

ISSN 1001-9006  
CN 51-1333/TM

4

2025

第39卷 总第158期

# 東方電氣評論

## DONG FANG DIAN QI PING LUN

- 中国发电设备专业技术期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》期刊源
- 《万方数据-数字化期刊群》全文收录
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》期刊源
- 《中文科技期刊数据库》(维普网)全文收录
- 《中国期刊全文数据库(CJFD)》全文收录
- 《超星期刊域出版平台》全文收录

ISSN 1001-9006



中国东方电气集团有限公司 主办  
四川省动力工程学会

东方电气评论

第三十九卷第四期

二〇二五年七月

# DONGFANG ELECTRIC REVIEW



公开 ISSN 1001-9006  
发行 CN 51-1333/TM

第39卷第4期 (总第158期)  
出版日期: 2025年7月25日

国内邮发代号: 62-187  
国内定价: 8.00元



2025

第 39 卷第 4 期 总第 158 期  
(双月刊, 1987 年创刊)

# 东方电气评论



## 目次

### 编辑委员会

主任委员: 胡修奎

副主任委员: 董娜 唐健

委员: 王大伦	王拯元	王 駿	艾 松	石清华
卢 洪	令红兵	冯 涛	刘泰生	刘德民
江国焱	孙 奇	李维成	李 婷	李曦滨
杨金炳	邹 杰	宋聚众	陈文学	范小平
周 杰	赵永智	钟连兵	袁 凌	莫尔兵
莫春鸿	铎 林	梁权伟	舒华安	曾明富
谢光有	鄢治国	赖成毅	雷 宇	潘绍成

秘书长: 唐健

主管: 中国东方电气集团有限公司

主办: 中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会

主编: 胡修奎

副主编: 董娜 唐健

本期责任编辑: 李宏

英文编辑: 张媛

编辑出版: 《东方电气评论》编辑部

地址: 成都市高新西区西芯大道 18 号

邮编: 611731

电话: 028-87898263

电子信箱: dfdqpl@dongfang.com

投稿网址: <http://dfdqpl.xml-journal.net/>

印刷单位: 成都市新都华兴印务有限公司

国内发行: 四川省报刊发行局

国外发行: 中国出版对外贸易总公司北京 782 信箱

### 基础研究

- 表面光滑的银包铜粉制备研究 ..... 刘萍 马宝润 谭雷等(1)
- 镁基储氢材料性能提升及研究进展 ..... 阮晓莉 廖晓东 刘姝仪等(5)
- 预镀镍 SPCC 钢用做 4680 圆柱电池外壳的高温力学性能 .....  
..... 刘琦 萧伟坚 周秋伶(15)
- 风冷燃料电池结构与运行参数重要性研究 ..... 朱鼎 刘煜 胡军等(20)
- ANN 算法在环氧树脂性能预测中的应用研究 .....  
..... 钟连兵 李兆星 张林等(25)

### 数字制造

- 基于生成式 AI 技术的汽轮机智能运维系统研发 .....  
..... 伍文华 宋放放 周赵伟等(30)
- 智能制造背景下 XSuperNEST 套料软件在锅炉板材下料中的应用 .....  
..... 侯竹 钟学娇 张勃等(34)

### 火力发电

- 掺烧低灰熔点烟煤燃烧系统改造应用 ..... 石川 李盼 曹华等(40)
- 调峰电厂尿素储罐电伴热的应用 ..... 孙义(45)
- 大炉中机在电力辅助服务市场下的技术经济性研究 .....  
..... 李传永 李琳 安越里等(49)

### 核能发电

- 短套管密封面低温离子渗氮工艺 ..... 王洁 周迎平 周承操等(54)
- 核电用 316H 晶界碳化物对冲击及晶间腐蚀的影响 .....  
..... 段志伟 张娟 镇乐等(59)

### 风力发电

- 变桨后备电源充电控制策略研究 ..... 杨汽 李雨蒙(64)

### 工程技术

- 废旧橡胶高附加值资源化利用技术进展 ..... 秦佳旺 邓毅 庄原发(68)
- 多堆燃料电池流量分配特性的歧管参数分析 .....  
..... 程友星 刘煜 朱鼎等(73)
- 某二氧化碳集输处理站项目储能方案研究 .....  
..... 覃小文 王松 廖茹霞等(79)

### 项目管理

- 矩阵型组织结构在装备制造业的应用探究 .....  
..... 曹奔腾 刘家剑 王彦超(84)

# DONGFANG ELECTRIC REVIEW

4

2025

2025-7-25 Vol. 39 No. 4  
(Bimonthly, since 1987)

## CONTENTS



### BASIC RESEARCH

Research on the Preparation of Silver-coated Copper Powder with Smooth Surface ..... *LIU Ping, MA Baorun, TAN Lei, et al*(1)

Research Progress and Performance Enhancement Technologies of Magnesium-based Hydrogen Storage Materials

..... *RUAN Xiaoli, LIAO Xiaodong, LIU Shuyi, et al*(5)

High Temperature Mechanical Properties of Preplated Nickel SPCC Steel used as 4680 Cylindrical Battery Shell ... *LIU Qi, XIAO Weijian, ZHOU Qiuling*(15)

Research on the Importance of Structure and Operating Parameters of Air-cooled Fuel Cells ..... *ZHU Ding, LIU Yu, HU Jun, et al*(20)

Research on the Application of ANN Algorithm in the Performance Prediction of Epoxy Resin ..... *ZHONG Lianbing, LI Zhaoxing, ZHANG Lin, et al*(25)

### DIGITAL MANUFACTURING

Research and Development of An Intelligent Operation and Maintenance System for Steam Turbines Based on Generative AI Technology

..... *WU Wenhua, SONG Fangfang, ZHOU Zhaowei, et al* (30)

Application of XSuperNEST Nesting Software in Boiler Plate Cutting under the Background of Intelligent Manufacturing

..... *HOU Zhu, ZHONG Xuejiao, ZHANG Bo, et al* (34)

### THERMAL POWER

Application of Retrofitting the Combustion System for Blending Low-ash Melting Point Bituminous Coal ..... *SHI Hua, LI Pan, CAO Hua, et al*(40)

Application of Electric Heating for Urea Storage Tanks in Peak-shaving Power Plants ..... *SUN Yi*(45)

Study on Technical Economy of Medium-sized Boiler in Power Auxiliary Service Market ..... *LI Chuanyong, LI Lin, AN Yueli, et al*(49)

### NUCLEAR POWER

Low-temperature Ion Nitriding (LTIN) Process for Sealing Surface of Short Sleeve ..... *WANG Jie, ZHOU Yingping, ZHOU Chengcao, et al*(54)

Effect of 316H Grain Boundary Carbides on Impact and Intergranular Corrosion for Nuclear Power ..... *DUAN Zhiwei, ZHANG Juan, ZHEN Le, et al*(59)

### WIND POWER

Research on Charging Strategy of Pitch System Backup Power Supply ..... *YANG Kai, LI Yumeng*(64)

### ENGINEERING

Review on High Value-added Resource Utilization Technologies of Waste Rubber ..... *QIN Jiawang, DENG Yi, ZHUANG Yuanfa*(68)

Manifold Parameter Analysis of Flow Distribution Characteristics of Multi-stack Fuel Cells ..... *CHENG Youxing, LIU Yu, ZHU Ding, et al*(73)

Research on Energy Storage Schemes at A Carbon Dioxide Collection Processing Station Project ..... *QIN Xiaowen, WANG Song, LIAO Ruxia, et al*(79)

### PROJECT MANAGEMENT

Research on the Application of Matrix Organizational Structure in Project Management of Equipment Manufacturing Industry

..... *CAO Benteng, LIU Jiajian, WANG Yanchao*(84)

### EDITORIAL BOARD

**Chairman:** HU Xiukui

**Vice Chairmen:** DONG Na, TANG Jian

**Members:** WANG Dalun, WANG Zhengyuan, WANG Ai, AI Song, SHI Qinghua, LU Hong, LING Hongbing, FENG Tao, LIU Taisheng, LIU Demin, JIANG Guoyan, SUN Qi, LI Weicheng, LI Ting, LI Xibin, YANG Jinbing, ZOU Jie, SONG Juzhong, CHEN Wenxue, FAN Xiaoping, ZHOU Jie, ZHAO Yongzhi, ZHONG Lianbing, YUAN Ling, MO Erbing, MO Chunhong, DUO Lin, LIANG Quanwei, SHU Huaan, ZENG Mingfu, XIE Guangyou, YAN Zhiguo, LAI Chengyi, LEI Yu, PAN Shaocheng

**Chief Secretary:** TANG Jian

**Sponsor:** Dongfang Electric Corporation

**Chief Editor:** HU Xiukui

**Vice Chief Editors:** DONG Na, TANG Jian

**Executive Editor:** LI Hong

**English Editor:** ZHANG Yuan

**Edited and Published by:**

Editorial Department of Dongfang Electric Review  
No. 18 Xi Xin Avenue, Gao Xin Xi District, Chengdu,  
Sichuan, P. R. China

**Postal Code:** 611731

**Tel:** 028-87898263

**E-mail:** dfdqpl@dongfang.com

**Submission Website:** <http://dfdqpl.xml-journal.net/>

**Overseas Distribution by:**

China National Publishing Industry Trading Corporation  
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C. )

# 表面光滑的银包铜粉制备研究

刘萍 马宝润 谭雷 罗恒\*

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

**摘要:**采用液相还原法制备银包铜粉,特别采用三乙醇胺作为唯一一种还原剂使用,制备得到表面光滑的粉体。研究发现:相比 Vc、甲醛、葡萄糖等还原剂,三乙醇胺还原速度适中;三乙醇胺适宜还原温度为 40 °C,过高过低温度,表面粗糙度均增加;该还原剂对反应 pH 兼容性较强,pH 5 到 10 均合适;通过设计加入银源质量,可以制备 15%~30% 银含量粉体;30% 银含量粉体抗氧化性仍好于 15% 银含量粉体。

**关键词:**银包铜粉; 导电粉体; 银含量; 抗氧化性

中图分类号:TM241

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0001-04

## Research on the Preparation of Silver-coated Copper Powder with Smooth Surface

LIU Ping, MA Baorun, TAN Lei, LUO Heng\*

(DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** This article uses the liquid-phase reduction method to prepare silver-coated copper powder, especially using triethanolamine as the only reducing agent, to obtain smooth surface powder. The results showed that compared to reducing agents such as Vc, formaldehyde, and glucose, triethanolamine had a moderate reduction rate. The suitable reduction temperature for triethanolamine is 40 °C. If the temperature is too high or too low, the surface roughness will increase. The reducing agent has strong compatibility with reaction pH and is suitable for pH 5 to 10. By incorporating silver source quality into the design, the 15%~30% silver-containing powder can be prepared. The 30% silver containing silver-coated copper powder still has better antioxidant properties than the 15% silver containing silver-coated copper powder.

**Key words:** silver-coated copper powder; conductive powder; silver content; oxidation resistance

随着半导体、光伏、电子信息等行业进步,各类电子元器件逐渐朝着小型化、集成化方向发展,对器件的散热、导电等要求越来越多,其中对金属导电粉体的需求也越来越多。银包铜粉作为一种核壳结构的导电粉体,其理论导电性与纯银粉几乎差距不大,价格相对便宜很多,在一些导电导热应用场景,例如光伏异质结电池等领域,已经在逐渐替代价格较贵的纯银粉等金属粉体<sup>[1]</sup>。

银包铜粉常见的制备方法包括物理法和化学法,而化学法又包含置换法<sup>[2]</sup>和还原法<sup>[3]</sup>。微纳银包铜粉研究较为困难的点在于,银层如何致密包覆到铜核上,保持银铜界面结合紧密并且降低表面银层缺陷。同时在低银含量情况下、降低铜层裸露,保持银层包覆均匀,以实现粉体的高导电性和稳定性。

本文采用液相还原法制备银包铜粉,特别采用三乙醇胺这类中慢速度还原剂,替代葡萄糖、抗坏

收稿日期:2025-01-17

**作者简介:**刘萍(1993—),女,2019年毕业于浙江大学高分子材料专业,工学硕士,工程师。现于东方电气集团科学技术研究院有限公司,主要从事微纳粉体材料研发工作。

罗恒(1997—),男,2021年毕业于四川大学材料加工工程专业,工学硕士,工程师。现于东方电气集团科学技术研究院有限公司,主要从事微纳金属粉体研发工作。通信邮箱:luoh3859@dongfang.com。

血酸、甲醛等还原剂<sup>[4-5]</sup>,在还原步骤中加入并还原银氨等银源,实现银层在铜核表面包覆。本文通过对还原剂种类对比、反应温度、反应 pH、银含量调控等影响研究,实现了液相法制备低银含量表面光滑的银包铜粉。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 试剂与仪器设备

试剂:硝酸银(分析纯)、高纯铜粉(纯度大于99.5%,1~5 μm)、三乙醇胺(分析纯)、葡萄糖、抗坏血酸、甲醛(分析纯)、浓氨水、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、硝酸、硫酸、乙二胺四乙酸(EDTA)、去离子水。

仪器设备:水浴锅、电子天平、抽滤装置一套、200 目标准筛。

### 1.2 银包铜粉的制备

本文主要采用液相还原法制备银包铜粉,需要将铜粉表面氧化层和有机物去除掉,然后再进行银层包覆步骤。首先将 10 g 铜粉加入到 5 % 硝酸溶液中搅拌 10 min,过滤洗涤酸液后,再用超纯水洗涤 3 次,去除杂质;将洗涤后的铜粉再次加入到超纯水中,再分别加入 5 g PVP 和 5 g EDTA 粉末,搅拌溶解;将 3.14 g 硝酸银加入 100 mL 水溶解并滴加氨水形成银氨溶液,将 20 g 银氨溶液缓慢加入到铜粉悬浊液中,反应 10 min~20 min;加入 0.1 mol 三乙醇胺等还原剂溶液,搅拌 10 min,再将剩余银氨溶液加入到铜粉悬浊液中,反应 1 h,使铜粉表面置换还原形成银镀层。最后将悬浊液经过过滤、洗涤、抽滤、真空干燥,得到银铜粉粉体。不同银含量的粉体制备,只需要加入不同质量浓度的硝酸银即可。

### 1.3 性能测试及表征

利用扫描电镜观察粉体的表面形貌及粒径变化情况,判断银铜粉表面银层包覆情况。利用马弗炉测试银包铜粉体热增重情况,判断粉体抗氧化性。利用氯化银沉淀滴定并称重的方式,检测银铜粉的银含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同还原剂影响

在银包铜液相制备过程中,存在着银源溶液与

铜粉界面的铜原子置换还原反应,也存在着还原试剂对银源中银离子还原反应等,其还原性的强弱影响后续氧化还原反应的速率。根据各类置换化学还原法情况,本文选取了抗坏血酸、葡萄糖、甲醛、三乙醇胺等还原剂做相关银镀层研究,20 % 银含量银包铜粉银层包覆情况如图 1 所示。其中采用抗坏血酸作为还原剂,出现了铜核和银纳米颗粒共存的情况,如图 1(a),说明抗坏血酸还原能力过强,银离子还原速度过快,自身聚集生长成纳米银颗粒,而来不及在铜核表面生长。采用葡萄糖、甲醛、三乙醇胺等中慢速度的还原剂,如图 1(b)~(d),均可以使得银层包覆在铜核表面,可以继续进一步研究。但相对而言,在该反应条件下,葡萄糖还原粉体表面略显粗糙,甲醛还原粉体出现局部孔洞、银层不完整,三乙醇胺还原粉体表面相对光滑。

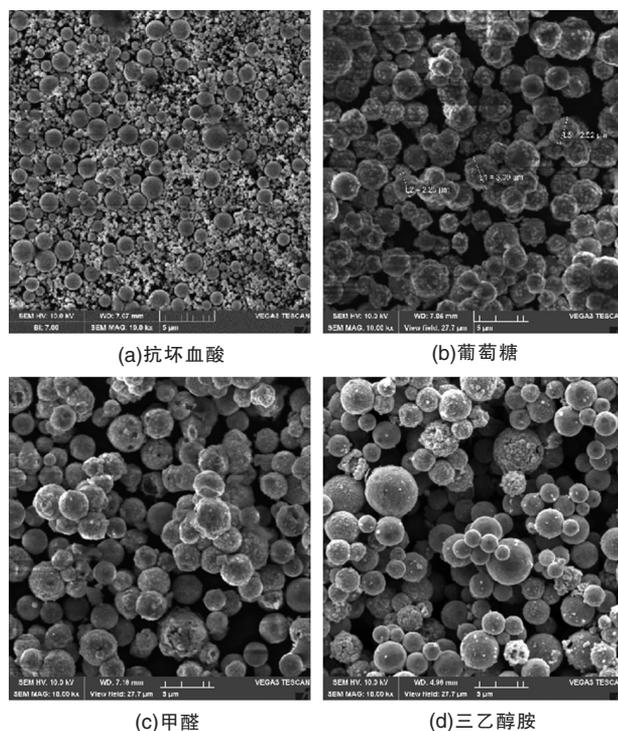


图 1 不同还原剂制备的银包铜粉 SEM 图

### 2.2 反应温度的影响

为了探究热力学条件变化对液相银包铜粉表面粗糙度的影响,本文研究了三乙醇胺还原体系下不同反应温度的影响。图 2 以 20 % 银含量银包铜为例,不同温度条件下银包铜粉 SEM 情况。研究结果显示,在 20 °C~50 °C 温度区间范围内,银包铜表面银层均完整包覆到铜核表面,没有纳米银颗粒出

现,说明三乙醇胺作为还原剂在不同温度范围均有较适宜的还原速度,温度兼容性较好,特别在 40 ℃ 时粉体表面光滑,如图 2(c)。在 20 ℃ 时,粉体表面出现局部轻微凸点,如图 2(a),推测可能在该温度还原后期,少量银离子还原速度较慢,聚集生长在高能位点,慢速生长成小凸点。而在 50 ℃ 时,粉体银层局部光滑、局部粗糙,如图 2(d),推测可能加热到该温度条件下,银层置换反应与还原剂还原速度出现轻微速度不匹配,银原子倾向在更小曲面上生长,造成银层变粗糙。

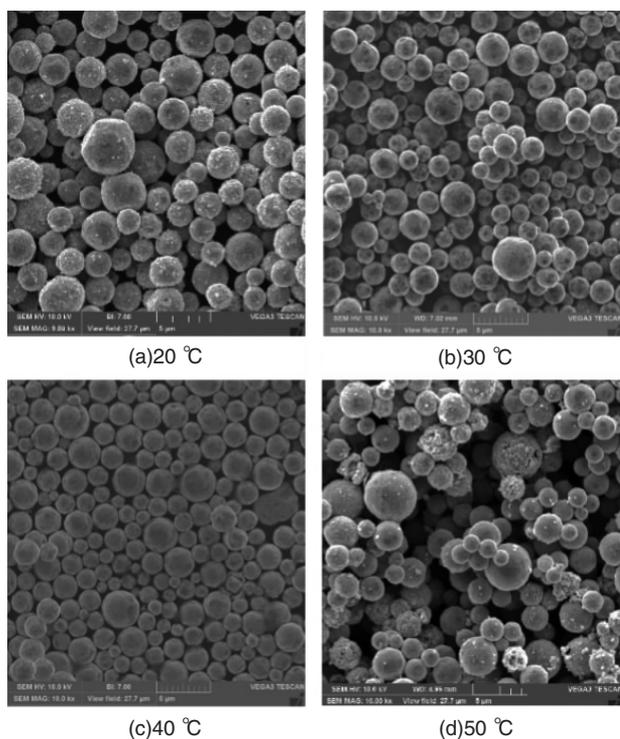


图 2 不同反应温度影响 SEM 图

### 2.3 反应 pH 的影响

通常金属纳米粒子液相化学反应对 pH 变化较为敏感,不同 pH 影响还原剂状态及还原电位,从而影响金属粒子的表面形貌。图 3 为在 40 ℃ 反应条件下,三乙醇胺制备 20 % 银含量银包铜粉的电镜情况。结果显示,在该温度条件下,pH=5~10 区间范围,即弱酸弱碱区间,银包铜粉体表面银层均具有较好的包覆性,表面光滑、少见孔洞出现,说明该还原剂对反应 pH 兼容性较强。以上特性,比较容易重复配方,实现粉体的重复性制备,对反应 pH 适应宽。因三乙醇胺是一种多羟基的小分子还原剂,水

溶性较好,推测其还原前后,均对银源有螯合作用,在不同 pH 下缓释还原银离子,从而形成均匀的银层。

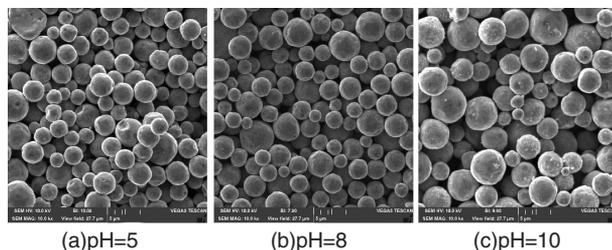


图 3 不同反应 pH 影响 SEM 图

### 2.4 不同银含量粉体制备

银包铜粉作为纯银粉的替代材料之一,银与铜的电阻率差异不大,在银层包覆完整的情况下,一般来说银含量越低银包铜粉价格约便宜。故而,行业内一直在持续探索着更低银含的银包铜粉制备。表 1 通过实验设计了 15 %、20 %、30 % 三种银含量的粉体,并对比设计银含与实际银含偏差,结果显示设计银含量越大,检测银含量与设计银含量之间偏差越大。并且在 15 %~30 % 银含设计区间,采用三乙醇胺还原的粉体,宏观颜色表现为灰色或灰白色,接近该尺寸银粉颜色。

表 1 不同银含粉体情况

实验	设计银含量(%)	检测银含量(%)	粉体颜色
(a)	15	15.5	灰色
(b)	20	21.2	灰白
(c)	30	32.3	灰白

图 4 为 40 ℃ 条件下,三乙醇胺还原制备不同银含量粉体的 SEM 电镜情况。从 15 % 到 25 % 设计银含变化,粉体表面形貌并未发生明显区别,均为包覆完整的、表面光滑的粉体,与宏观颜色表现也基本对上。有差异的是,越高银含的粉体,如图 4(c) 30 % 银含量粉体,因为还原银氨溶液更多,铜粉表面银层生长越厚,越到后期,银氨的还原越接近只有还原剂还原,而不再有置换反应,表面形成的突出银颗粒变多,粗糙度变大。低银含粉体,如图 4(a) 15 % 银含量银包铜粉,前期以与铜粉界面置换为主,还原银氨溶液在更光滑的界面层生长,因而粉体表面反而更光滑。

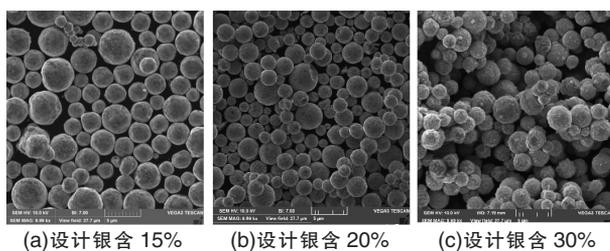


图4 不同银含粉体的SEM图

### 2.5 银层包覆完整性研究

为了进一步评测银包铜粉银层包覆完整性,本文研究不同银含粉体在 250 °C、300 °C 空气氛围下处理 1 h 热增重情况,如图 5 所示。

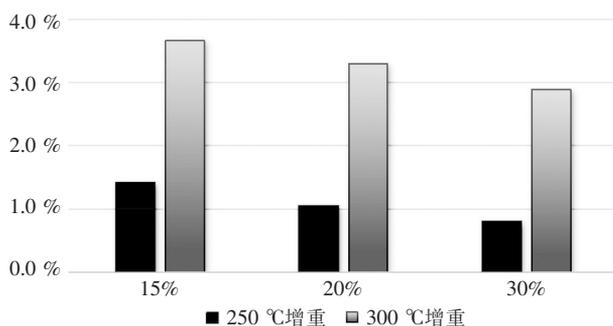


图5 不同银含粉体热增重情况

随着银包铜粉银含量从 30 % 降低到 15 %,粉体热增重逐渐降低,说明更高银含粉体表面裸露的铜核越少,更有利于银层包覆均匀。虽然 30 % 银含粉体表面粗糙度更高,但其热增重是相对 15 %、20 % 银含粉体更低的。同时测试温度从 250 °C 提升到 300 °C,不同银含粉体热增重均增加,说明采用该方法制备的银包铜粉使用温度更趋向 250 °C

及以下,更高温度氧化程度越高,可能影响导电性。

### 3 结语

本文采用三乙醇胺作为还原剂湿法化学制备银包铜粉,研究得出如下结论。

(1) 三乙醇胺还原速度适中,相比 Vc、甲醛、葡萄糖,可以制备得到表面光滑的粉体。

(2) 三乙醇胺还原温度为 40 °C 时,pH 在 5~10 范围均具有还原兼容性。

(3) 通过设计加入银源质量,可以制备 15%~30 % 银含的表面光滑的银包铜粉。

(4) 在 250 °C~300 °C 区间内,30 % 高银含粉体抗氧化性仍好于 15 % 银含粉体,但整体热增重均较低。

### 参考文献:

- [1] 卢北虎,方佳,彭戴,等. 银包铜粉的制备与应用现状[J]. 船电技术,2024,44(10):7-11
- [2] 孙志,于晓辉,娄鑫梨,等. 置换化学镀法制备银包铜粉导电胶填料及其性能[J]. 电镀与涂饰,2022,41(5):352-359
- [3] 郭学益,郑忱奕,王亲猛,等. 化学镀法制备银包铜粉研究进展[J]. 中国有色金属学报,2024,34(9):3037-3055
- [4] 武博,朱晓云,曹梅,等. 高致密高包覆率银包铜粉的制备和性能[J]. 材料研究学报,2018,32(10):775-781
- [5] 胡磊,朱晓云,张飞进. 致密银包铜粉基体-铜粉的制备及其性能研究[J]. 热加工工艺,2012,41(11):11-14

# 镁基储氢材料性能提升及研究进展

阮晓莉 廖小东 刘姝仪 何坪 李明科

东方电气集团科学技术研究院有限公司,成都 611731

**摘要:** 镁氢化物 ( $MgH_2$ ) 体系面临的核心科学挑战源于其本征的热力学-动力学双重制约:过强的 Mg-H 键合导致脱氢焓值居高不下,而表面氢分子解离能垒与体相氢扩散速率的协同劣化,共同造成材料在实际工况下必须依赖高温驱动且反应迟滞。科研人员开发了多种改性的策略,包括纳米化处理、合金化设计、催化改性和界面工程等方法。本文系统梳理国内外最新研究进展,详细分析各类改性方法的作用机理,前瞻性地提出了未来研究方向,旨在为高性能镁基储氢材料的突破性研发奠定理论基础,并指明具有可行性的技术路径。

**关键词:** 镁基材料; 储氢性能; 研究进展

中图分类号:TB34

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0005-10

## Research Progress and Performance Enhancement Technologies of Magnesium-based Hydrogen Storage Materials

*RUAN Xiaoli, LIAO Xiaodong, LIU Shuyi, HE Ping, LI Mingke*

(DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu China)

**Abstract:** The core scientific challenge of the magnesium hydride ( $MgH_2$ ) system stems from its intrinsic thermodynamic-kinetic dual constraints, which include excessively strong Mg-H bonding leading to a persistently high dehydrogenation enthalpy, while the synergistic deterioration of the surface hydrogen molecule dissociation energy barrier and the bulk hydrogen diffusion rate collectively cause the material to rely on high-temperature driving and exhibit sluggish reactions under actual working conditions. Researchers have developed various modification strategies, including nanostructuring, alloying design, catalytic modification, and interface engineering. This review summarizes the latest global research progress systematically, which provides a detailed analysis of the working principles of different modification methods and proposes future research directions prospectively. The aim is to establish a theoretical foundation for breakthrough advancements in high-performance magnesium-based hydrogen storage materials and outline feasible technological pathways.

**Key words:** magnesium-based materials; hydrogen storage properties; research progress

能源作为支撑人类社会生产与经济发展的核心物质基础,其重要性不言而喻<sup>[1]</sup>。在各类可再生能源中(包括氢能、风能、地热能和太阳能等),氢能因其独特的优势脱颖而出,被视为最具发展前景的二次能源。具体而言,氢能不仅具备零碳排放、能量密度高(120 MJ/kg)等显著特点,作为具有战略

意义的新型能源载体,其规模化应用不仅能显著增强能源供应链的韧性与安全性,还将通过替代传统化石能源实现温室气体排放的实质性削减,从而为全球能源体系向低碳化、可持续方向的转型提供关键驱动力。然而需指出的是,氢气本身具有易燃易爆(爆炸极限4%~75%)、密度极低(0.089 9 g/L)

收稿日期:2025-05-26

**作者简介:** 阮晓莉(1983—),女,2011年毕业于重庆大学材料科学与工程专业,硕士,高级工程师。现在东方电气(成都)创新研究有限公司储能与新材料技术研究所从事储能系统技术研发工作。

且易扩散等物理特性,这些特性给其储存和运输环节带来了显著的技术挑战<sup>[2]</sup>。正因如此,发展安全高效的储氢技术已成为当前氢能产业化应用过程中亟待突破的关键环节。

镁基储氢材料因其理论储氢密度达 7.6 wt. % 的突出优势,结合镁元素的地壳丰度高、环境兼容性好等特性,在新型储氢体系研究中展现出独特竞争力。该材料通过形成 Mg-H 化学键实现氢的可逆存储,其轻量化特性与本质安全性进一步强化了应用潜力,近年来已引发全球研究热潮<sup>[3]</sup>。这种基于轻金属的储氢机制,不仅满足了高容量存储的基础需求,更在资源可持续性和系统经济性层面具有战略意义。然而,该体系仍面临放氢温度过高、动力学性能欠佳以及高温下镁颗粒易团聚等技术瓶颈,其固有的缓慢吸放氢动力学特性要求较高操作温度,同时材料表面易形成致密氧化层,严重制约氢分子的解离与重组过程<sup>[4]</sup>。更为关键的是,材料自身较低的导热性能导致储氢罐内部温度分布不均,这种热力学不平衡状态会引发吸放氢效率的持续衰减,最终使其难以达到实际工程应用所需的性能标准<sup>[5]</sup>。

近年来,为克服镁基储氢材料的这些局限性,科研团队采用多尺度协同改性策略,包括纳米结构设计、合金组分优化及催化界面调控等创新方法,系统提升了镁基材料的储氢性能。其中,纳米结构设计通过调控晶粒尺寸与孔隙分布,不仅大幅增加了活性位点密度,还优化了氢原子传输通道<sup>[6]</sup>;合金化改性则通过引入特定元素重构晶体结构,显著降低了氢化反应能垒;而表面催化处理则有效抑制了氧化钝化现象,为氢分子解离-重组过程提供了高效反应界面<sup>[7]</sup>。催化改性通过引入高效催化剂,重构了镁基材料的表面反应位点,不仅大幅降低了氢分子解离-复合过程的能量势垒,还显著提升了材料的循环稳定性与反应动力学特性<sup>[8]</sup>。

基于此,本文综述了近年来镁基材料在调控储氢性能方面的主要手段及研究进展,主要包括有纳米化与微观组织调控、合金化和催化与界面改性等。该研究为镁基储氢材料的工程化应用开辟了新的技术路径,不仅揭示了其在不同应用场景中的性能优化机制,更为推动该材料体系的产业化进程奠定了重要的科学基础。

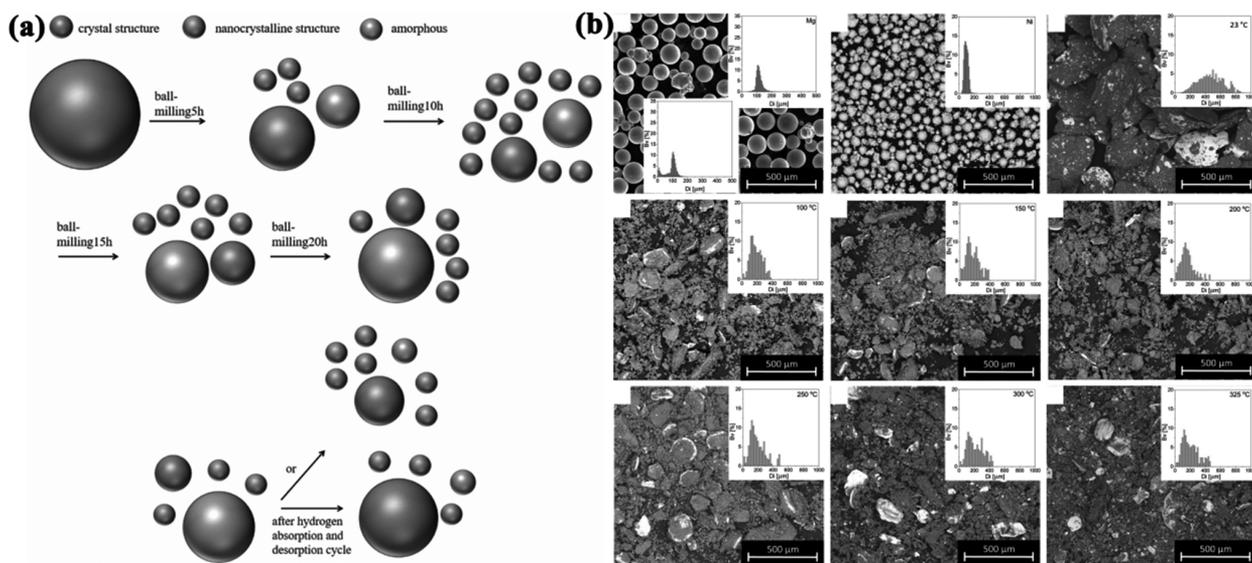
## 1 纳米化与微观组织调控

### 1.1 球磨法

球磨法是一种常见的通过机械球磨技术对储氢材料微观组织进行纳米级细化的工艺方法。该技术的核心机制在于利用高能球磨产生的机械力诱导微观结构重构,通过晶粒细化和缺陷工程协同提升储氢性能。剧烈的机械作用不仅促使材料内部形成高密度位错与纳米晶界网络,显著增加氢扩散通道和反应活性位点,还能有效破除表面氧化层的钝化效应,持续暴露新鲜金属表面,从而整体优化材料的吸放氢动力学行为。

例如, Yang 等人通过对  $Mg_{95}Ni_2Pr_3$  合金进行球磨,随球磨时间的延长,  $Mg_{95}Ni_2Pr_3$  合金逐渐从多晶演变为纳米晶和非晶体,并随着球磨时间的增加,纳米晶相的含量先增加后降低,在 553 K 和 3.5 MPa 条件下球磨 10 小时,该合金具有最优的储氢性能,如图 1(a) 所示<sup>[9]</sup>。 Baran 等人设计出一种新型的高温高压反应球磨方法并成功合成了镁镍基固态储氢材料,并随着球磨温度的升高,晶粒尺寸急剧减少,混合物也更加分布均匀进而优化储氢性能,如图 1(b) 所示<sup>[10]</sup>。 Wu 等人通过球磨法制备  $Mg_{90}Ni_5Y_5$  合金过程中形成了众多的纳米晶结构,极大地提升了  $Mg_{90}Ni_5Y_5$  合金的储氢性能<sup>[11]</sup>。 Zhou 研究团队成功构建了石墨烯修饰的  $Mg_{2.3}Y_{0.1}Ni$  复合储氢体系,通过界面协同效应显著提升了材料的整体储氢性能<sup>[12]</sup>。 Yong 等人通过真空感应熔炼和机械球磨成功制备出  $Mg_{90}Y_{1.5}Ce_{1.5}Ni_7$  合金,并且具有约 5.6 % 的可逆储氢容量<sup>[13]</sup>。 Zhou 研究团队创新性地采用高能球磨技术将过渡金属均匀分散于  $MgH_2$  纳米晶基体中,实现了材料微观组织结构的精准调控与储氢性能的协同提升<sup>[14]</sup>。

球磨法因其操作简便、成本低廉等优势,已成为实现镁基储氢材料纳米化改性的首选技术,能有效提升材料的储氢性能。然而,该方法在长时间球磨过程中易引入杂质,且所得粉末存在表面氧化倾向,需通过惰性气氛保护等措施维持材料纯度。此外,当前工艺仍面临颗粒尺寸分布不均和微观形貌调控不足等技术瓶颈,亟待通过优化球磨参数与后处理工艺加以解决。



注:(a)球磨工艺过程中晶体结构尺寸变化的流程图和吸氢和放氢循环后晶体结构尺寸变化的示意图<sup>[9]</sup>; (b)在不同温度下合成的样品的SEM图像和晶粒尺寸直方图<sup>[10]</sup>。

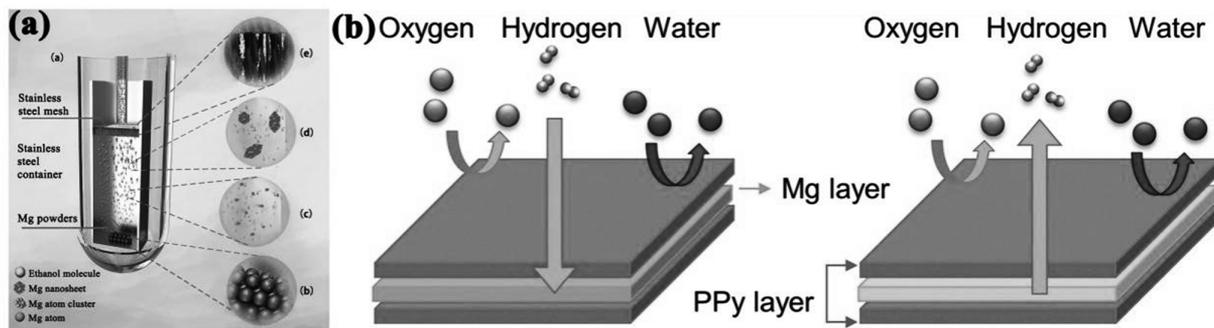
图1 镁基固态储氢材料球磨制备过程组织演变

## 1.2 气相沉积法

气相沉积技术通过气态前驱体在基材表面的可控化学反应或物理沉积,精准构筑具有特定形貌的固态薄膜或纳米结构。可显著提升材料的氢气吸附能力和储氢动力学性能。如Wang等人通过物理气相沉积法,成功合成新型纳米多孔镁材料,极大地提升储氢性能,如图2(a)所示<sup>[15]</sup>。Shen等人通过电化学沉积方法在电聚合聚吡咯(PPy)薄膜上连续沉积镁来制造一种特殊的多层结构,这种薄膜显示出优异的储氢性能,如图2(b)所示<sup>[16]</sup>。Cui等人使用一种新型气相传输沉积方法成功地将镁加载到阳极氧化铝模板的纳米孔中,极大优化了储氢性能<sup>[17]</sup>。Saita等人通过氢化化学气相沉积合成了

具有纳米纤维结构单晶的 $MgH_2$ ,可逆吸氢和解氢的质量为7.6%<sup>[18]</sup>。Lu等人在二甲基亚砷溶液中化学沉积制备了镁镍合金,储氢容量为1.35 wt.%<sup>[19]</sup>。

气相沉积技术为镁基储氢材料的制备提供了独特优势:其通过气态金属与氢分子的高效原位反应直接合成氢化物,避免了传统气-固相反应中繁琐的活化处理步骤,消除了动力学限制因素。该技术的核心优势在于反应物分子间的高频碰撞可实现快速合成,配合低温基底沉积有效维持产物稳定性。不过,当前工艺仍面临设备复杂度高、规模化生产成本偏大等工程化挑战,需要开发更具产业适配性的新型沉积系统。



注:(a)物理沉积示意图<sup>[15]</sup>; (b)化学沉积示意图<sup>[8]</sup>。

图2 不同气相沉积法制备镁基储氢材料

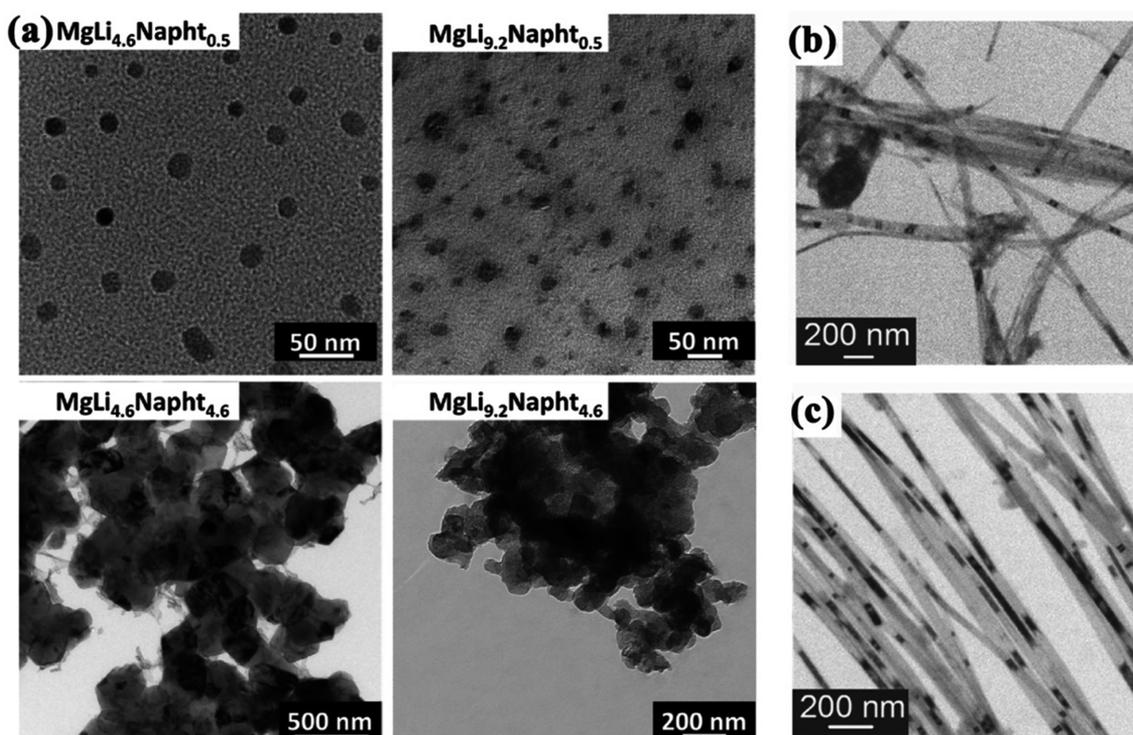
### 1.3 化学还原法

化学还原法是一种通过化学反应将金属氧化物、盐类或其他高价态化合物还原为纳米晶体的制备技术,常被用于纳米级细化储氢材料的微观组织进而提高储氢性能。

例如,Liu 等人以锂为还原剂,成功制备了纳米镁颗粒。其储氢容量与颗粒尺寸呈现明显的负相关性,如图 3(a)所示<sup>[20]</sup>。Sun 等人成功合成了镁,并通过控制镁颗粒的形貌,得到镁纳米纤维,储氢性能显著提高,如图 3(b)、(c)所示<sup>[21]</sup>。Zhang 研

究团队创新性地利用超声辅助技术,实现了粒径均一(4 nm~5 nm)的  $MgH_2$  超细纳米颗粒的可控制备<sup>[22]</sup>。Norberg 研究团队创新性地采用联苯/菲/萘多组分电子传输体系,成功制备镁纳米晶<sup>[23]</sup>。

化学还原法凭借其简易的操作流程、可控的反应条件以及良好的经济性优势,已成为材料合成的常用技术。然而,该方法在实际应用中仍面临副产物生成量较大、环境友好性不足等局限性,亟需通过反应机理优化与工艺改进来提升其可持续性。



注:(a)不同的锂/萘比例还原二正丁基镁而合成镁纳米颗粒<sup>[20]</sup>; (b)~(c)合成的镁纳米纤维<sup>[21]</sup>。

图 3 化学还原法制备镁基储氢材料

## 2 合金化

### 2.1 过渡元素

合金化作为镁基储氢材料性能优化的典型改性策略,通过构建多元合金体系实现热力学与动力学的协同提升。其作用机制主要体现在:合金元素的引入通过双重作用机制显著提升储氢性能:一方面通过重构氢化反应路径降低生成焓以优化热力学稳定性;另一方面,在氢化过程中形成的多元相结构为氢原子扩散提供了高效传输通道,从而协同

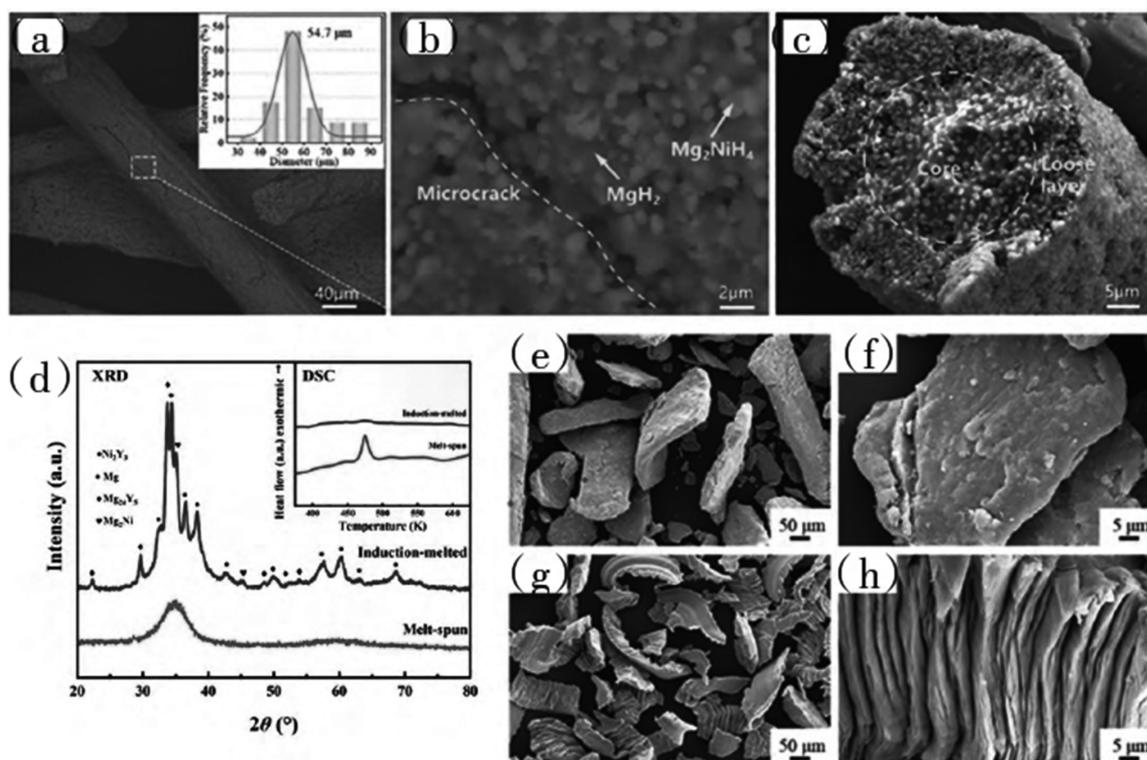
增强材料的动力学特性。这种双重调控的协同效应使合金化成为当前镁基储氢材料研究中最具实用价值的改性方法之一。

例如,Srikanta 等人采用熔炼工艺制备的  $Mg_2Ni$  合金,该体系具有更优的热力学不稳定性<sup>[24]</sup>。Shao 团队开发的纳米结构  $Mg_2Cu$  合金展现出卓越的储氢动力学特性<sup>[25]</sup>。Mohsenis 等进一步通过机械合金化引入 Al 元素(0.05~0.3 mol)替代 Cu,提升材料的储氢容量与循环稳定性<sup>[26]</sup>。Cao 等人通过熔融抽丝技术成功制备了 Mg-Ni-Ag 纳米纤维,其中

$Mg_{85}Ni_{14.8}Ag_{0.2}$  组分在 50 °C 和 100 °C、0.5 MPa 条件下分别实现 1.5 wt.% 和 2.1 wt.% 的吸氢容量,储氢性能显著提升(图 4)<sup>[27]</sup>。Khan 研究团队采用机械球磨-热压协同工艺构建了  $MgH_2$ -Ni 复合储氢体系,实现了热力学稳定性与反应动力学的同步提升<sup>[28]</sup>。

镁基储氢体系的合金化改性展现出双重优化效应:在动力学维度上显著加速吸放氢反应速率,

同时在热力学层面通过调控材料本征特性实现体系焓变的有效降低。然而该改性方法存在两个关键性缺陷:首先,重金属元素的引入会导致材料氢容量显著衰减;其次,在氢化反应过程中,Mg-合金元素键的断裂会破坏材料的结构可逆性,从而对循环稳定性产生不利影响。这些固有缺陷表明,合金化改性技术仍需在保持容量与提升循环稳定性方面开展深入优化研究。



注:(a)~(b)吸氢后的表面形貌;(c)吸氢纤维的横截面;(d)  $Mg_{85}Ni_{14.8}Ag_{0.2}$  的 XRD 图;(e)~(h)放氢后表面形貌。

图 4  $Mg_{85}Ni_{14.8}Ag_{0.2}$  纤维吸放氢形貌<sup>[27]</sup>

## 2.2 稀土元素

除过渡金属体系外,镁-稀土合金(如 Mg-Y/La/Nd/Ce 等)因其独特的性能优势已成为储氢材料研究的新焦点。稀土元素凭借其优异的表面活化特性,不仅能有效催化氢分子的解离吸附,在脱氢过程中形成的稀土氢化物相还可作为高效催化剂,通过双重作用机制显著提升材料的储氢动力学与循环稳定性。

例如,Song 等人研究采用熔融纺丝技术成功制备了 Y 元素梯度取代的  $Mg_{67}Ni_{33-x}Y_x$  合金体系,可实现更快的吸氢速率和更优异的循环稳定性,如图

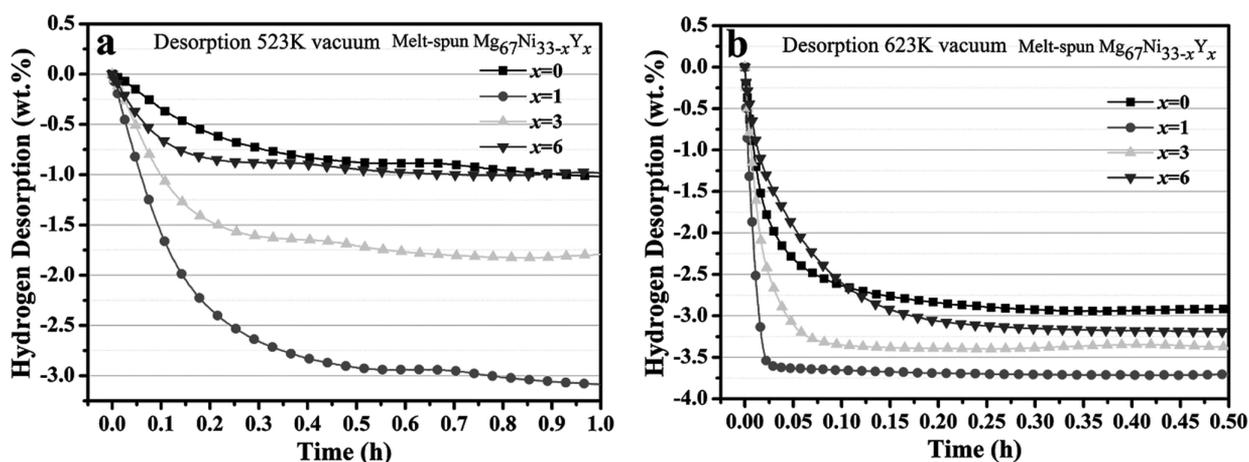
5 所示<sup>[29]</sup>。Zhong 等人采用球磨法制备的  $Mg_{0.95}In_{0.05}$  固溶体研究表明,In 元素的引入可有效降低镁基储氢材料的热力学稳定性,但其高昂的成本限制了实际应用潜力<sup>[30]</sup>。

Wu 团队的工作证实,Mg-Ga 固溶体在脱氢过程中通过可逆相变机制( $Mg_2Ga \leftrightarrow Mg_5Ga_2$ )有效降低了反应能垒,从而显著改善体系的脱氢动力学性能<sup>[31]</sup>。Li 研究团队成功构建了成分可调的  $Mg_{90}Ce_3RE_5$  (RE = La/Nd/Sm/Y) 四元合金体系,实现了脱氢反应动力学的突破性提升<sup>[32]</sup>。Wang 等通过感应熔炼制备的  $Mg_{90}Ni_xRE_{10-x}$  ( $x = 4, 5, 6$ ) 合金实

现热力学与动力学的双重优化<sup>[33]</sup>。

合金化作为  $MgH_2$  热力学性能调控的有效手段,虽然能够显著改善材料的储氢特性,但仍存在两个关键性技术瓶颈:其一,该方法不可避免地造成材料储氢容量的显著衰减;其二,由于镁与部分

金属的合金化能力有限,在放氢过程中易发生相分离(分解为镁单质和合金元素),且这种分解过程呈现不可逆特性,严重制约了材料的实际应用价值。因此,未来研究需着力开发新型合金体系优化设计策略,以突破现有技术限制。



注:a. 523 K;b. 623 K。

图5  $Mg_{67}Ni_{33-x}Y_x$  ( $x=0,1,3,6$ ) 样品在 3 MPa,不同温度条件下的吸氢动力学特性<sup>[29]</sup>

### 3 催化与界面改性

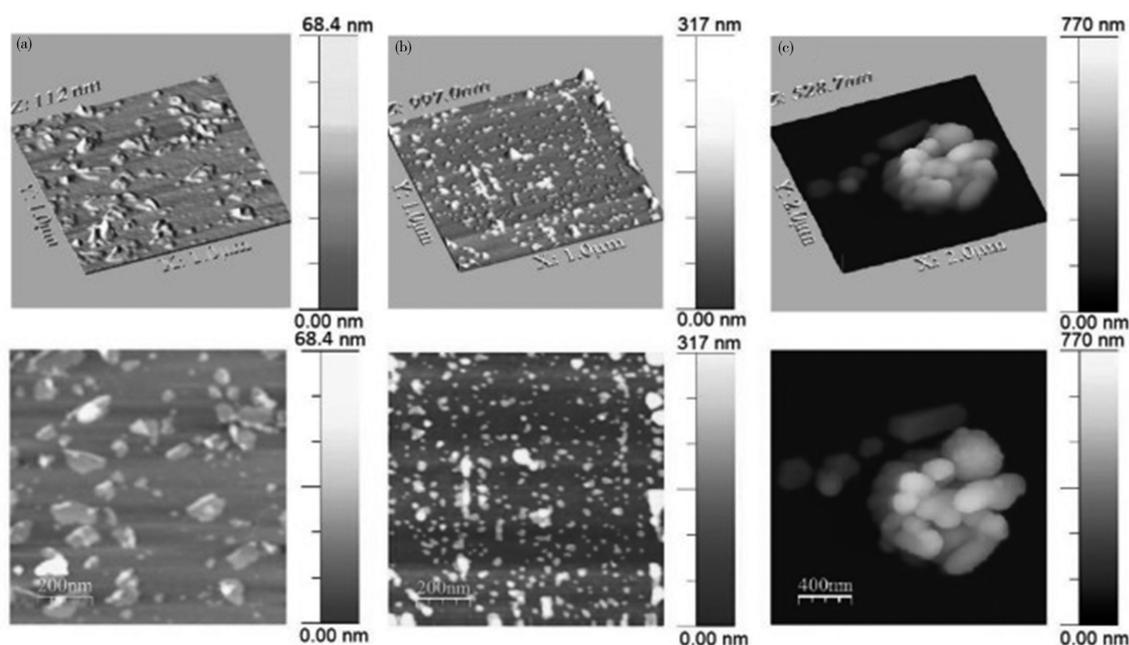
#### 3.1 催化剂改性

催化剂对镁基储氢材料动力学性能的改善机制主要涉及四大协同催化效应:“氢泵效应”通过促进氢的定向迁移与动态存储来优化储氢过程;“溢出效应”加速氢原子在催化剂-基体界面的跨界面传输;“通道效应”构建低能垒氢扩散路径;而“电子传递效应”则通过调控镁氢键的电子云分布来降低解离能垒。此外,催化剂可以发挥尺寸效应和/或纳米限制效应,促进热力学不稳定性 and 循环稳定性。

碳基材料因其轻质、结构可调性、优异的导热性和化学稳定性而成为催化  $MgH_2$  加氢/脱氢反应的理想添加剂。此外,高比表面积的特性使碳基材料能够提供丰富的反应位点,抑制不可避免的颗粒团聚和氧化。目前,石墨、活性炭、多壁碳纳米管、碳纳米纤维和活性炭纤维等碳基催化剂对  $MgH_2$  的性能进行了改性,可以有效降低氢脱附的活化能,改善水化动力学,保持氢吸附/脱附循环的稳定性。例如,Sweta 等人发现石墨添加剂引发的电子转移效应通过重构  $Mg-H$  键的电子云分布,显著降低了

氢解吸反应的能垒<sup>[34]</sup>。Lotoskyy 团队研究表明,这种碳基材料展现出优异的耐久性能<sup>[35]</sup>。

过渡金属也通常被用作催化剂,因为其倒数第二层的 d 电子可以与氢的 s 电子配对,从而在加氢过程中激活吸附的  $H_2$ 。例如,Cui 等人研究表明,电负性较低的过渡金属往往表现出优越的催化性能<sup>[36]</sup>。Chen 研究团队采用静电纺丝技术构筑了多孔镍纳米纤维(Ni NFs)载体,实验证实其催化效率较传统体系提升显著<sup>[37]</sup>。过渡金属化合物也表现出优异的催化性能。对过渡金属化合物催化机理的研究表明,催化活性受到四个关键的物理热力学性质的影响:大量的结构缺陷、低但足够的稳定性以避免完全还原、过渡金属离子的高价态和对氢的高亲和力。少量合适的过渡金属化合物可以显著增强氢的解吸,如  $TiO_2$ 、 $Nb_2O_5$ 、 $V_2O_5$ 、 $Cr_2O_3$ 、 $CeO_2$  等也表现出优异的加氢/脱氢催化性能。例如,Zhang 等人通过简单的单锅溶剂热法显著降低了  $MgH_2$  的脱氢起始温度<sup>[38]</sup>。Pukazhselvan 研究团队系统揭示了  $ZrO_2-MgH_2$  复合体系的协同作用机制,为镁基储氢材料的性能优化提供了新思路,具体作用机制如图 6 所示<sup>[39]</sup>。



注: (a) 200 r/min; (b) 350 r/min; (c) 与  $ZrO_2$  起始样品相对应。

图6  $MgH_2+0.5ZrO_2$  样品在不同转速下球磨 20 h 的原子力显微镜图像<sup>[39]</sup>

因此,催化剂在降低加氢和脱氢反应的活化能方面起着关键作用。它们可以在吸收和解吸过程中分别促进氢分子的解离和原子的重组,同时也可以加速氢通过镁基体或氢化物相的扩散。但是,目前催化过程的确切机理尚不清楚,需要对催化界面和催化机理进行进一步的研究。但在某些情况下,由于单一催化剂的催化作用有限, $MgH_2$  的动力学性质和解吸温度仍需要进一步提高。

### 3.2 表面与界面改性

镁基储氢材料的性能本质上受其表界面原子构型与组分分布的协同调控,这些微观结构特征直接决定了氢原子的吸附能垒和扩散路径,从而主导材料的整体储氢行为。要实现材料性能的突破性提升,必须深入解析表界面结构在氢化/脱氢反应中的动态演变机制,并基于此建立“结构-性能”的定量构效关系,最终通过精准界面工程实现储氢性能的定向优化。镁基材料的吸氢反应本质上起始于表界面区域,其原子排布与电子结构特性作为“氢化反应门户”,直接调控着氢分子的吸附活化与解离效率,从而成为主导整个储氢过程动力学行为的决定性因素。

例如,Ham 研究团队证实了微观结构-热力学性能之间的内在关联性<sup>[40]</sup>。Mooij 研究团队揭示了界

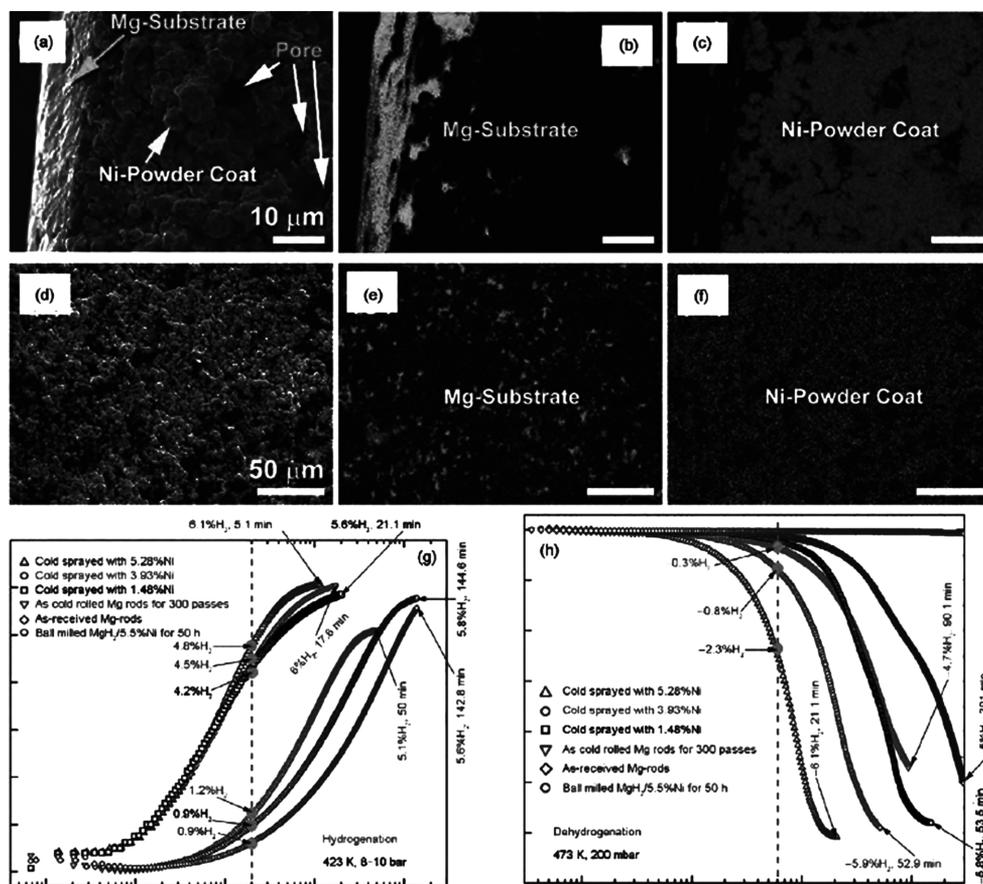
面工程调控  $MgH_2$  储氢性能的关键机制,证实表面特性对性能的优化同样显著<sup>[41]</sup>。Fujii 等人揭示了 Pd 催化剂层吸放氢引发的应力调控机制<sup>[42]</sup>。Fu 等人则通过超高压非平衡凝固技术证实, $Mg-5\%Ni$  合金中低角度取向的枝晶界面可作为高效氢扩散通道,大幅提升吸放氢动力学性能<sup>[43]</sup>。

表面涂层修饰技术为提升镁基材料储氢性能提供了有效途径。Eskandarany 团队创新性地通过低温冷喷涂技术,将微米级 Ni 粉体沉积至镁基材表面。研究表明,这种独特的塑性变形诱导机制促使 Ni 涂层自发形成多孔网络结构,其中具有 5.28 wt. % Ni 负载量的三重镀层体系(3-Ni/Mg)表现出显著增强的氢化反应动力学行为,这为通过表面纳米结构设计优化镁基储氢材料提供了实验依据<sup>[44]</sup>,如图 7 所示。

镁基储氢材料作为未来能源领域的重要候选体系,其性能表现本质上受晶体结构特征、相组成演变及界面行为等关键因素协同调控。现阶段研究主要围绕两个核心科学问题展开:一方面深入探究不同镁基体系中储氢相的结构与性能关联规律,另一方面系统解析表/界面微观构型对宏观储氢特性的影响机制。这些基础研究的突破性进展,将为新一代高性能镁基储氢材料的理性设计奠定重要

科学基础,积累了丰富的实验数据和研究成果。不过,在理论研究层面,与之相匹配的理论模型尚不完善,基于大数据和算法的高通量预测更是相对匮乏,这在一定程度上限制了镁基储氢相从实验室走向大规模实际应用的进程,亟待科研界进一步探索和突破。

科学基础,积累了丰富的实验数据和研究成果。不过,在理论研究层面,与之相匹配的理论模型尚不完善,基于大数据和算法的高通量预测更是相对匮乏,这在一定程度上限制了镁基储氢相从实验室走向大规模实际应用的进程,亟待科研界进一步探索和突破。



注:(a)~(f)表面形貌;(g)423 K析氢动力学特征;(h)473 K析氢动力学特征。

图7 5.28wt. %Ni 粉末冷喷涂 Mg 带材后的侧面和表面的形貌及元素分布及在 423 K 和 473 K 下的吸氢和放氢测试<sup>[44]</sup>

#### 4 结论与展望

镁基储氢体系凭借 7.6 wt. % 的理论储氢密度和突出的经济性优势,在新型储氢材料领域占据战略地位。然而,其强健的 Mg-H 键合导致的过高热力学稳定性,与迟缓的氢扩散动力学之间的固有矛盾,严重限制了该体系的工程化应用进程。为突破这些限制,研究者通过纳米结构设计、合金化改性和界面催化等协同策略对 Mg/MgH<sub>2</sub> 体系进行优化,目前已取得显著性能提升。同时,AI 辅助材料设计和理论预测等新兴研究方向可为镁基储氢材料的进一步发展提供强大动力。

(1) 纳米化技术通过调控 MgH<sub>2</sub> 的热力学稳定性、动力学性能及循环可逆性,在提升镁基储氢材

料性能方面展现出关键作用。其中,兼具纳米限域效应与催化活性的多孔轻质框架材料,因其独特的结构优势成为制备高性能纳米镁基储氢体系的核心要素。然而,当前镁基储氢领域仍面临两个关键科学瓶颈:一方面,纳米限域体系的体积储氢密度与结构稳定性之间的平衡机制尚未阐明;另一方面,纳米晶体的尺寸精准调控与表面钝化技术仍需突破。展望未来,通过多尺度催化剂设计(从原子排布到介孔结构)与先进合成方法(如等离子体辅助、微流控制备等)的协同创新,有望实现氢化反应动力学与热力学参数的协同优化,推动实用化储氢材料的发展。

(2) 合金化作为调控镁基储氢材料性能的重要手段,通过精准调控反应能垒与热力学参数(ΔH),

成功实现了材料氢化/脱氢性能的协同优化。然而,当前镁基储氢体系仍存在两个本质性局限:其一是本征储氢容量与实用化需求间存在显著差距;其二是循环过程中 Mg-M 键(M=合金元素)的不可逆断裂引发的结构退化效应,这直接制约了材料的长期循环稳定性与可逆储氢能力。尽管合金化改性已取得显著进展,未来研究仍需聚焦于储氢密度的突破性提升策略。

(3)多元催化剂体系(包括金属氧化物/氟化物/硫化物等)及其界面工程策略通过构建双重功能结构—原位生成的活性催化相与三维贯通氢传输网络,实现了镁基材料氢化反应动力学的突破性提升。研究表明,这些功能添加剂在材料制备与循环过程中形成的纳米级催化界面,不仅显著降低氢分子解离能垒,更通过重构原子扩散路径优化了氢迁移效率,从而协同增强材料的储氢性能。但当前对 MgH<sub>2</sub> 体系的催化机制仍缺乏系统认知,特别是表/界面结构与性能的构效关系亟待通过理论计算与实验验证相结合的方式深入解析,从而为设计高性能催化体系提供理论支撑。

(4)AI 辅助材料设计与理论预测成为镁基储氢材料研究新方向。通过数据模型筛选优化储氢材料体系,如机器学习构建动力学预测模型。理论计算(如 DFT、分子动力学)解析微观机制,减少实验盲目性,提升性能优化效率。持续推进 AI 辅助材料设计大模型和理论预测技术的发展,将其与实验研究紧密结合,形成相互促进的研究模式,推进高性能镁基储氢材料的研发进程。

#### 参考文献:

[1] Wiedenhofer D, Lenzen M, Steinberger J K. Energy requirements of consumption: Urban form, climatic and socio-economic factors, rebounds and their policy implications [J]. *Energy Policy*, 2013, 63:696-707

[2] Abe J O, Popoola A P I, Ajenifuja E, et al. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44 ( 29 ): 15072-15086

[3] Aguey K F, Ares J R. Hydrogen in magnesium: new perspectives toward functional stores [J]. *Energy & Environmental Science*, 2010 ( 5 ): 526-543

[4] Luo Q, Li J, Li B, et al. Kinetics in Mg-based hydrogen storage materials: Enhancement and mechanism [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7(1):58-71

[5] 邹建新, 张嘉祺, 赵颖燕, 等. 高容量镁基储氢合金材料研究与应用进展 [J]. *金属学报*, 2025, 61(3):420-436

[6] Ren L, Li Y H, Zhang N, et al. Nanostructuring of Mg-based hydrogen storage materials: Recent advances for promoting key applications [J]. *Nano-Micro Lett*, 2023, 15:93

[7] Zhao Y Y, Zhu Y F, Shi R, et al. Structural inhomogeneity: A potential strategy to improve the hydrogen storage performance of metal hydrides [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11 ( 25 ): 13255-13265

[8] Yang Y X, Zhang X, Zhang L C, et al. Recent advances in catalyst modified Mg-based hydrogen storage materials [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 163:182-211

[9] Yang Y, Sun W, Fang Q, et al. Effect of ball milling nanocrystallization on hydrogen storage performance of Mg<sub>95</sub>Ni<sub>2</sub>Pr<sub>3</sub> hydrogen storage alloy [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 40:109380

[10] Baran A, Jensen T R, Polański M. High-temperature high-pressure reactive ball milling synthesis of Mg-Ni-based solid-state hydrogen storage materials [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 103:114271

[11] Wu H, Ji Y, Chen Y, et al. Microstructure, hydrogen storage properties, and thermodynamic characterization of ball-milled Mg<sub>90</sub>Ni<sub>5</sub>Y<sub>5</sub> alloy [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2024, 195:112284

[12] Zhou D, Zheng C, Niu Y, et al. Hydrogen storage property improvement of ball-milled Mg<sub>2.3</sub>Y<sub>0.1</sub>Ni alloy with graphene [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50:123-135

[13] Yong H, Wei X, Zhang K, et al. Characterization of microstructure, hydrogen storage kinetics and thermodynamics of ball-milled Mg<sub>90</sub>Y<sub>1.5</sub>Ce<sub>1.5</sub>Ni<sub>7</sub> alloy [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(34):17802-17813

[14] Zhao Y, Liu Z, Liu J, et al. Improvement effect of reversible solid solutions Mg<sub>2</sub>Ni ( Cu ) / Mg<sub>2</sub>Ni ( Cu ) H<sub>4</sub> on hydrogen storage performance of MgH<sub>2</sub> [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, 12(1):197-208

[15] Wang H, Song X, Liu J, et al. A novel feathery nanoporous magnesium synthesized by ethanol vapor assisted physical vapor deposition [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2025, 649:127944

[16] Shen C, Aguey K F. Electrochemical deposited Mg-PPy multilayered film to store hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 49, 2018, 43 ( 49 ): 22385-22390

[17] Cui J, Wang H, Sun D, et al. Realizing nano-confinement of magnesium for hydrogen storage using vapour transport deposition [J]. *Rare Metals*, 2016, 35:401-407

[18] Saita I, Toshima T, Tanda S, et al. Hydrogen storage property of

- MgH<sub>2</sub> synthesized by hydriding chemical vapor deposition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 446-447: 80-83
- [19] Lu D, Li W. Electrochemical codeposition of magnesium and nickel alloy for hydrogen storage [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 117(2-3): 395-398
- [20] Liu W, Aguey K F. Size effects and hydrogen storage properties of Mg nanoparticles synthesized by an electroless reduction method [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(25): 9718-9726
- [21] Sun Y, Aguey K F. Synthesis of Magnesium Nanofibers by Electroless Reduction and their Hydrogen Interaction Properties [J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2017, 34(4): 1600276
- [22] Zhang X, Liu Y, Ren Z, et al. Realizing 6.7wt. % reversible storage of hydrogen at ambient temperature with nonconfined ultrafine magnesium hydrides [J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(4): 2302-2313
- [23] Norberg N S, Arthur T S, Fredrick S J, et al. Size-Dependent Hydrogen storage properties of Mg nanocrystals prepared from Solution [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(28): 10679-10681
- [24] Srikanta P, Aditya M V, Sankara S T. Synergetic effect of C and Ni on hydrogen release from Mg-Ni-electrochemically synthesized reduced graphene oxide based hydride [J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2021, 5(17): 4414-4424
- [25] Shao H Y, Wang Y T, Xu H R, et al. Preparation and hydrogen storage properties of nanostructured Mg<sub>2</sub>Cu alloy [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2005, 178(7): 2211-2217
- [26] Mohsenis E, Bozorg F K. Effect of Al substitution on phase evolution in synthesized Mg<sub>2</sub>Cu nanoparticles [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2023, 30(1): 63-71
- [27] Cao W C, Ding X, Chen R R, et al. In-situ precipitation of ultrafine Mg<sub>2</sub>Ni particles in Mg-Ni-Ag metal fibers and their hydrogen storage properties [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146252
- [28] Khan D, Zou J, Zeng X, et al. Hydrogen storage properties of nanocrystalline Mg<sub>2</sub>Ni prepared from compressed 2MgH<sub>2</sub>Ni powder [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(49): 22391-22400
- [29] Song W J, Li J S, Zhang T B, et al. Dehydrogenation behavior and microstructure evolution of hydrogenated magnesium - nickel - yttrium melt-spun ribbons [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(67): 54258-54265
- [30] Zhong H C, Wang H, Liu J W, et al. Altered desorption enthalpy of MgH<sub>2</sub> by the reversible formation of Mg(In) solid solution [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(4): 285-287
- [31] Wu D, Ouyang L, Wu C, et al. Phase transition and hydrogen storage properties of Mg-Ga alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 642: 180-184
- [32] 李英杰, 姚继伟, 雍辉, 等. 稀土掺杂对稀土-镁基金属储氢性能的影响 [J]. *材料导报*, 2022, 36(20): 187-194
- [33] 王启昌, 田红晓, 刘素霞, 等. RE 含量对 Mg-RE 基金属组织及储氢性能的影响 [J]. *稀土*, 2024, 45(6): 39-50
- [34] Sweta S, Tathagata K, Manoj N, et al. Mg-C Interaction Induced Hydrogen Uptake and Enhanced Hydrogen Release Kinetics in MgH<sub>2</sub>-rGO Nanocomposites [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(39): 22389-22396
- [35] Lotosky M, Denys R, Yartys V A, et al. An outstanding effect of graphite in nano-MgH<sub>2</sub>-TiH<sub>2</sub> on hydrogen storage performance [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(23): 10740-10754
- [36] Cui J, Liu J, Wang H, et al. Mg-TM(TM: Ti, Nb, V, Co, Mo or Ni) core-shell like nanostructures: Synthesis, hydrogen storage performance and catalytic mechanism [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(25): 9645-9655
- [37] Chen J, Xia G, Guo Z, et al. Porous Ni nanofibers with enhanced catalytic effect on the hydrogen storage performance of MgH<sub>2</sub> [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(31): 15843-15848
- [38] Zhang X L, Zhang X, Zhang L C, et al. Ultrafast hydrogenation of magnesium enabled by tetragonal ZrO<sub>2</sub> hierarchical nanoparticles [J]. *Materials Today Nano*, 2022, 18: 100200
- [39] Pukazhselvan D, Sandhya K S, Ramasamy D, et al. Active catalytic species generated in situ in zirconia incorporated hydrogen storage material magnesium hydride [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(3): 786-796
- [40] Ham B, Junkaew A, Arróyave R, et al. Size and stress dependent hydrogen desorption in metastable Mg hydride films [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014, 39(6): 2597-2607
- [41] Mooij L P A, Baldi A, Boelsma C, et al. Interface energy controlled thermodynamics of nanoscale metal hydrides [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2011, 1(5): 754-758
- [42] Fujii H, Higuchi K, Yamamoto K, et al. Remarkable hydrogen storage, structural and optical properties in multi-layered Pd/Mg thin films [J]. *Mater. Trans.*, 2002, 43(11): 2721-2727
- [43] Fu H, Wu W S, Dou Y, et al. Hydrogen diffusion kinetics and structural integrity of superhigh pressure Mg-5 wt. % Ni alloys with dendrite interface [J]. *J. Power Sources*, 2016, 320: 212-221
- [44] Eskandarany M S, Banyan M, Al-Ajmi F. Cold-rolled magnesium hydride strips decorated with cold-sprayed Ni powders for solid-state-hydrogen storage [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2019, 44(31): 16852-16861

# 预镀镍 SPCC 钢用做 4680 圆柱电池外壳的高温力学性能

刘琦 萧伟坚 周秋伶

广电计量检测集团股份有限公司, 广州 510627

**摘要:**对 4680 型圆柱电池外壳采用的预镀镍 SPCC(steel plate cold common)材料的性能探索,目前主要聚焦于镀镍层的厚度、耐蚀性能、镀层与基材的附着力以及电压稳定性等多个维度,然而,针对该材料在高温环境下力学性能的变化情况,现有的研究仍显不足。本文借助高温拉伸试验、金相组织观察以及断口形貌分析等手段,系统探究了该材料在高温环境下的力学性能边界。研究结果显示,当温度超过 600 °C 时,此类材料用作 4680 型圆柱电池的外壳时,可能引发严重的安全风险。与此同时,金相组织观察结果与断口形貌分析结果均有力地证实了材料内部组织结构的变化是导致其力学性能变化的关键因素。本文的研究成果对于指导该材料在电池外壳领域的实际应用环境具有重要的参考价值。

**关键词:**预镀镍 SPCC 钢;拉伸试验;金相分析;断口分析

中图分类号:TM912;TG142

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0015-05

## High Temperature Mechanical Properties of Preplated Nickel SPCC Steel used as 4680 Cylindrical Battery Shell

LIU Qi, XIAO Weijian, ZHOU Qiuling

(Guangzhou GRG Metrology & Test Co., Ltd, 510627, Guangzhou, China)

**Abstract:** Currently, the investigation into the characteristics of pre-nickel-plated SPCC (steel plate cold common) material utilized in the casing of the 4680 cylindrical battery predominantly revolves around aspects such as the nickel-plating layer's thickness, corrosion resistance, the adhesion strength between the coating and the substrate, and voltage stability, among others. Nevertheless, the existing body of research remains inadequate in addressing the alterations in the material's mechanical properties under high-temperature conditions. Through the implementation of high-temperature tensile testing, metallographic observations, and fracture morphology analyses, a comprehensive examination of the material's mechanical property limits at elevated temperatures was conducted. The findings of this study reveal that when temperatures surpass 600 °C, the use of such materials as the casing for 4680 cylindrical batteries may pose significant safety hazards. Furthermore, the outcomes of the microstructure observations and fracture morphology analyses robustly substantiate that changes in the internal microstructure serve as the pivotal factor influencing alterations in mechanical properties. The research findings presented in this paper hold considerable reference significance for directing the practical application environment of this material within the realm of battery casing manufacturing.

**Key words:** preplated nickel SPCC steel; tensile test; metallographic analysis; fracture analysis

4680 圆柱电池是在 2020 年 9 月特斯拉的电池日中首次提出,是 2170 圆柱电池的升级,与 2170 相比,4680 的电芯容量是其 5 倍,能够提高相应车型的续航里程,同时在生产成本方面,4680 圆柱

收稿日期:2025-06-03

**作者简介:**刘琦(1985—),男,2011年毕业于武汉材料保护研究所材料学专业,硕士研究生。现任职于广电计量检测股份有限公司,主要从事金属材料检测工作。

电池方案比 2170 圆柱电池方案可实现 14 % 的成本下降。

预镀镍钢壳作为 4680 电池的核心材料,经高温回火处理后,钢层与镍层之间会相互渗透形成镍铁合金层,大幅提升镀镍钢带的力学、耐蚀和耐热等性能,有效提高锂电池的一致性和安全性;同时本身具备结构强度,可以应用 CTP、CTC 等创新的封装工艺,从而实现提高空间利用率、减少零部件数量和电池重量和提升续航能力,同时可以增强车辆的抗撞击能力以提高整体安全性。随着 4680 电池发展提速,预镀镍钢壳的需求随之快速攀升。针对预镀镍钢壳的研究,目前查阅的资料集中在钢基带的纯度、延展性和平面各向异性指数;电镀工艺参数对镀层厚度、粗糙度及耐腐蚀性的影响;常温焊接性能及力学性能等,针对预镀镍钢壳的高温力学性能边界摸索资料不多。

根据中国汽车报发布 2022 年至今的新能源汽车事故统计,近 6 成的电动车事故是电池故障导致,而研究分析表明,过充电、低温和高温环境均会对电池产生一定程度的伤害,诱发失控从而出现安全事故。

以预镀镍 SPCC 钢-4680 圆电池外壳在高温环境的性能变化为研究对象,目的为探明其高温力学性能边界,同时开发出一套针对预镀镍钢壳的高温性能探索方案,帮助新能源汽车厂家探明电池的安全使用环境。

## 1 实验条件及方法

选取 4680 圆电池外壳预镀镍 SPCC 钢成品件裁样进行以下测试。

### 1.1 成分分析

设备:日立 HiTACHI 直读光谱仪 FOUNDRY-MASTER Pro2。

对 4680 电池外壳成品件做成分测试。

### 1.2 力学性能测试

设备:三思纵横材料试验机 UTM5105。

选择 4680 电池外壳成品件取样,将材料加工为 GB/T 228.1 中 P5 类型试样,试件厚度为 0.4 mm,平行段长度为 75.0 mm,宽度为 12.5 mm;测试温度

分别为室温 100 °C、200 °C、300 °C、400 °C、500 °C、600 °C、700 °C、800 °C。试验以 20 °C/min 加热,试样达到设定温度后保温 5 min,以应变速率为 5 mm/min 进行拉伸测试。

### 1.3 金相分析

设备:蔡司 Zeiss 材料分析研究显微镜 Axiolab 5。

分别对 1.2 测试后试样取断口部位做晶粒度测试。

### 1.4 断口分析

设备:赛默飞世尔 ThermoFisher 聚焦离子电镜 Heios5CX。

选取室温、200 °C、400 °C、600 °C 以及 800 °C 拉伸后的试样断口部位做电镜扫描。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 成分分析

表 1 为本次试验样品的成分结果,满足宝钢企标“Q/BQB 408-2023 冷成形用冷轧低碳钢及钢带”中 SPCC 牌号的成分要求:

成分	含量	指标要求
碳(C)	<0.000 5	≤0.15
锰(Mn)	0.079 7	≤0.60
磷(P)	0.019 1	≤0.10
硫(S)	0.007 0	≤0.025

### 2.2 样品力学性能分析

表 2 列出了在不同温度条件下试件的抗拉强度测试结果。图 1 展示了试件在拉伸测试过程中的力值-位移曲线,该曲线清晰地反映了试件在受力过程中的变形和强度表现。此外,图 2 还呈现了试件在经历 500 °C 至 800 °C 高温拉伸后的实际状态图片,显示了试件在高温环境下的直观变形情况。

从测试结果的具体数据来看,抗拉强度随着温度的下降而呈现出不同程度的降低,具体下降比例分别为 9.09 %、6.54 %、11.28 %、11.72 %、18.09 %、35.58 %、76.19 % 以及 48.00 %。这些数据表明,随着温度的升高,试件的抗拉强度逐渐减弱,特别是在高温段 600 °C 以上时,强度的下降尤为显著。

进一步观察拉伸后的试件图片,可以发现,当

试件在高温炉中经受 600 °C 以上的高温时,发生了明显的收缩变形现象。这种变形如果发生在电池外壳上,将会对电池的安全性能产生严重影响。具体来说,外壳的变形可能会导致电池内部发生短路,进而引发过热甚至爆炸等严重后果。

在“GB 8897.4-2008 锂电池的安全要求”标准中,第 6.5.3 节明确规定,单体电池应能承受 17 MPa 的拉压力而不产生电池内部短路。这一要求对于确保锂电池在使用过程中的安全性至关重要。

综合考虑锂电池的安全要求以及预镀镍 SPCC 钢外壳在高温环境下的性能表现,可以得出结论:为了确保锂电池的安全使用,推荐将预镀镍 SPCC 钢外壳的安全应用工况限制在 600 °C 以内,避免高温环境下外壳的变形和由此可能引发的安全问题。

表 2 拉伸测试结果

测试温度/°C	室温	100	200	300	400	500	600	700	800
抗拉强度/MPa	605	550	514	456	398	326	210	50	26

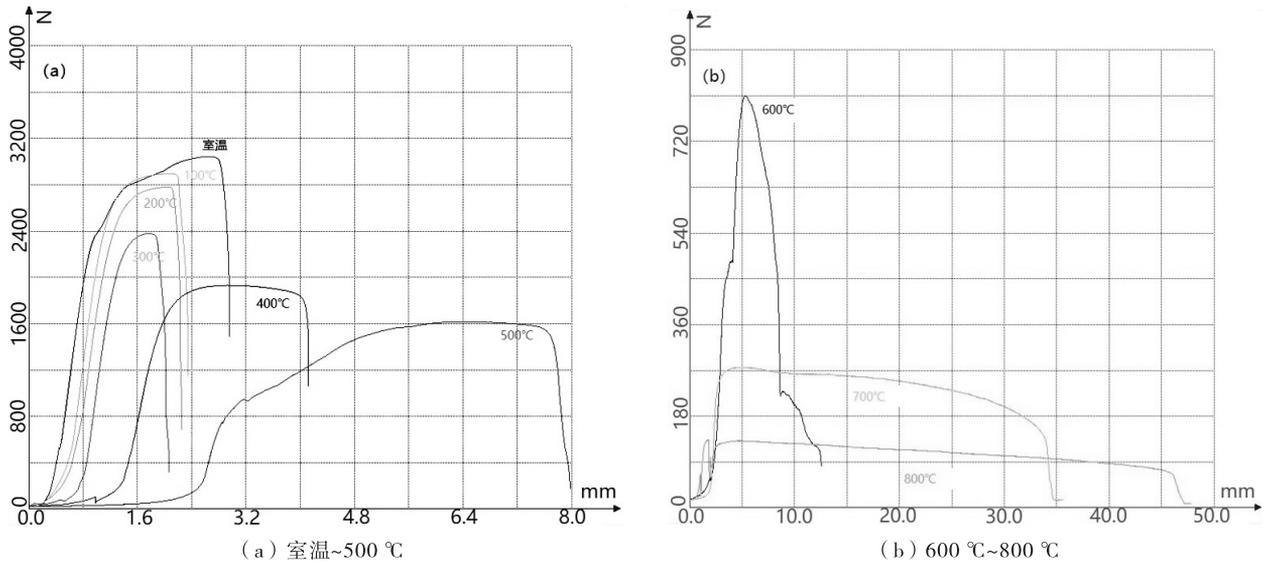


图 1 预镀镍 SPCC 钢的位移曲线

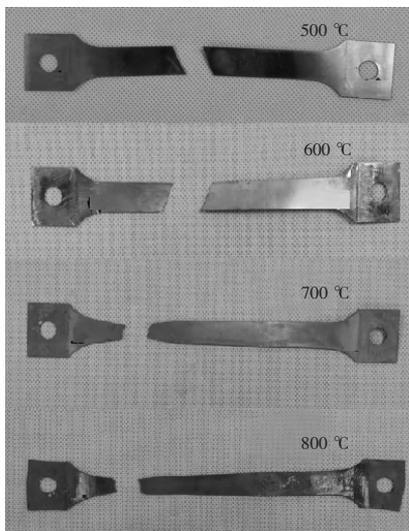


图 2 预镀镍 SPCC 钢的 500 °C ~ 800 °C 拉伸后试件

### 2.3 试验断裂部位金相分析

表 3 为试验拉伸后断口部位的晶粒度测定结果,而图 3 为相应的金相照片。可见,试件的晶粒尺寸随着测试温度的逐渐升高而呈现出不断增长的趋势。同时,金相照片清晰揭示晶粒的蠕变程度明显随着温度的升高而不断提升。

试验结果说明材料的金相结构和高温蠕变之间存在着一定对应关系。在高温影响下,温度为晶界动力学提供了驱动力,使得金属内部结构发生了改变,晶粒从无序状态向有序状态变化,导致了晶体结构的变化。而只有当晶粒取向无规则时,晶界内耗高,材料具有更高的强度;相反晶粒取向变得有规则时,内耗变低,强度也相应的变低。

表 3 拉伸试样断口部位晶粒度级别

测试温度/°C	室温	100	200	300	400	500	600	700	800
晶粒度/级	8.33	8.12	7.95	7.84	7.73	7.59	7.41	7.32	6.79

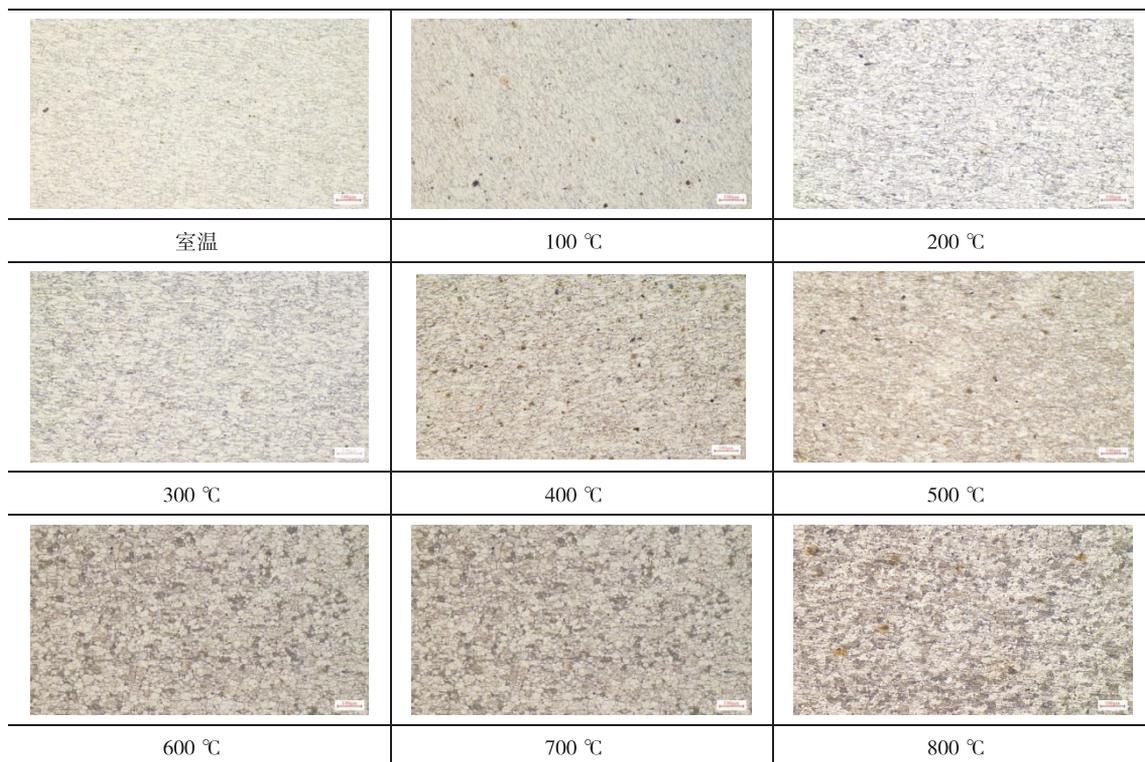


图3 拉伸试样断口部位金相图片

2.4 试验断裂部位断口分析

表4为拉伸断裂试样的断口分析结果,图4为相应的SEM照片。从断口的形貌特征上可见,在常温至400 °C的范围内,断裂试样呈现出明显的断裂方向和明显的韧窝特征;然而,当温度达到600 °C以上后,断裂的试样则不再具有明显的断裂方向,其断口上的韧窝特征也不再明显。这一现象的产生,主要是由于在高温载荷的作用下,试样的塑性会显著降低,缺口敏感性则相应增加,同时晶界的强度也会有

所下降。因此,当温度超过600 °C时,断裂的途径主要呈现出沿晶界断裂的特征。

表4 断口分析结果

测试温度/°C	结果
室温	断裂形貌为韧窝形貌+磨痕+大量异物附着
200	断裂形貌为韧窝形貌+磨痕+大量异物附着
400	断裂形貌为韧窝形貌+磨痕+大量异物附着
600	断裂形貌为磨痕+大量异物附着
800	断裂形貌为磨痕+大量异物附着

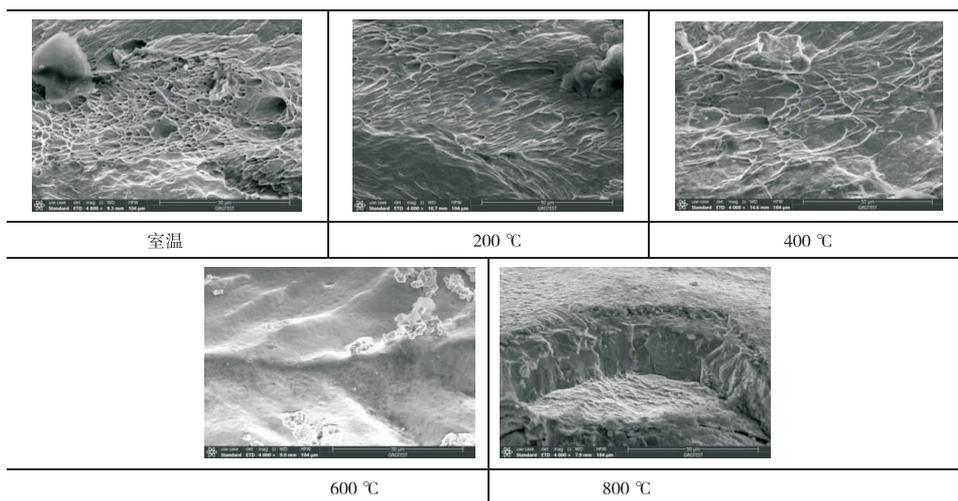


图4 断裂部位SEM图片

### 3 结论与展望

(1) 经过本文研究, 预镀镍 SPCC 钢 4680 圆电池外壳在高温环境下的力学性能变化呈现出一定的规律性。在室温至 500 °C 的范围内, 其力学性能下降趋势相对平缓, 抗拉强度的降低速率约为 55 MPa/100 °C。然而, 当温度超过 600 °C 时, 该材料便展现出显著的高温蠕变特性, 力学性能急剧下滑。因此, 为确保安全应用, 建议将其工况温度控制在 600 °C 以内。

(2) 本文的金相分析发现预镀镍 SPCC 钢 4680 圆电池外壳晶粒尺寸在高温环境下的短暂暴露并未引发明显的变化。具体而言, 室温和 800 °C 下的晶粒级别差异仅为 1.5 级左右。然而, 随着试验温度的持续升高, 晶粒表面逐渐呈现出受高温影响的畸变特征, 且温度越高, 畸变晶粒所占的比例越大, 引起材料的强度性能下降程度越大。

(3) 通过对断面进行 SEM 分析, 了解到预镀镍 SPCC 钢 4680 圆电池外壳在高温环境下的断裂特性。在 600 °C 及以上的高温环境中, 该材料的断裂形貌并未出现明显的韧窝, 其断裂特征由延性断裂逐渐转变为脆性断裂。

综上所述, 预镀镍 SPCC 钢用做 4680 圆电池外壳材料, 其力学性能基本满足安全规范要求。然而, 为了进一步提升其在实际应用中的稳定性和安全性, 研发人员有必要对工艺进行进一步的优化和改进, 特别是要提高预镀镍 SPCC 钢 4680 圆电池外壳在 600 °C 以上温度区间的稳定性。

### 参考文献:

- [1] 焦泽辉, 吴安民, 侯金涛, 等, 一种适用于板状试样高温持久蠕变试验夹具: CN106769423A [P]. 2017-05-31
- [2] 谷贤明, 平野茂, 立木光, 等. 镀镍钢板以及镀镍钢板的制造方法: CN105164321A [P]. 2015-12-16
- [3] 廖洪亮, 王平. 一种新型 4680 型号钢壳圆柱电池外壳: CN219017781U [P]. 2023-05-12
- [4] 许丁, 辛选荣. 合金钢 50SiMnVB 高温力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(10): 110-112
- [5] 张昊宇, 郑文忠. 1860 级低松弛钢绞线高温下力学性能 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(6): 861-865
- [6] 唐文兵, 王印培. 高温蠕变中的金相分维变化 [J]. 理化检验-物理分册, 2003, 39(12): 614-616
- [7] 梁延彬, 张新明, 张克伟. 5A05 铝合金热塑性变形的高温金相观察 [J]. 轻合金加工技术, 2000(6): 44-46
- [8] 葛庭燧. 固体内耗理论基础: 晶界弛豫与晶界结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [9] 杨宜科, 吴天禄, 江先美, 等. 金属高温强度及试验 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986
- [10] Kolluri M, Pierick P. ten, Bakker T. Characterization of high temperature tensile and creep-fatigue properties of Alloy 800H for intermediate heat exchanger components of (V) HTRs [J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 284: 38-49
- [11] MandelBrot B, Passoja D E, Paulley A. Fractal Character of Fractal Surfaces of Metals [J]. Nature, 1984, 308: 721-722
- [12] Otto F, Dlouhý A, Somsen Ch, et al. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy [J]. Acta Mater. 2013, 61(15): 5743-5755
- [13] Liu W H, He J Y, Huang H L, et al. Effects of Nb additions on the microstructure and mechanical property of CoCrFeNi high-entropy alloys [J]. Intermetallics 2015, 60: 1-8

# 风冷燃料电池结构与运行参数重要性研究

朱鼎<sup>1,2</sup> 刘煜<sup>1,2</sup> 胡军<sup>1,2</sup> 孔红兵<sup>1,2</sup>

1. 东方电气(成都)氢能科技有限公司,成都 611731; 2. 氢电转换四川省重点实验室,成都 611731

**摘要:**流道结构及运行参数对风冷燃料电池性能影响显著。本文以典型风冷燃料电池结构为研究对象,建立了数值计算模型,对气体扩散层孔隙率、气体扩散层润湿角、通道宽度、通道深度、环境压力、环境温度、阴极过量系数和阳极/阴极相对湿度这9个结构与运行参数进行计算。通过方差分析电流密度、质量功率密度和阴极催化层氧浓度均匀性三个性能指标。结果显示,可以将9个关键参数简化为主要的6个决策变量。

**关键词:**风冷燃料电池; 结构参数; 运行参数

中图分类号: TM911.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)04-0020-05

## Research on the Importance of Structure and Operating Parameters of Air-cooled Fuel Cells

ZHU Ding<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>1,2</sup>, HU Jun<sup>1,2</sup>, KONG Hongbin<sup>1,2</sup>

(1. Dongfang Electric (Chengdu) Hydrogen Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. Hydrogen Electricity Interconversion Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** The flow channel structure and operating parameters significantly affect the performance of air-cooled fuel cells. This study focuses on a typical air-cooled fuel cell structure and constructs a numerical model to calculate nine key structural and operational parameters, including the porosity of the gas diffusion layer, the wetting angle of the gas diffusion layer, channel width, channel depth, ambient pressure, ambient temperature, cathode excess ratio, and the relative humidity of the anode and cathode. Variance analysis is conducted on three performance indicators: current density, mass power density, and the uniformity of oxygen concentration in the cathode catalyst layer. The results show that the nine key parameters can be reduced to six primary decision variables.

**Key words:** air-cooled fuel cells; structure parameters; operating parameters

燃料电池是电化学催化反应将化学能直接转化为电能,具有转化效率高、能量密度高、低温运行性能好、低污染等优点。工作过程需要将电堆内部进行有效散热,才能保证燃料电池稳定、高效运行。对于功率为1 kW~2 kW的燃料电池,采用空气能够进行有效冷却。相较于采用水冷的燃料电池系统,风冷燃料电池具有结构简单、辅助设备少、辅助功耗低、控制简单等优点,在小型设备如无人机、自行车、摩托车、景区观光车以及便携设备中都有广

泛的应用前景。

风冷燃料电池双极板流道布置方式、结构尺寸以及膜电极各组件材料与厚度等结构参数都会对燃料电池的性能产生重要影响。双极板是燃料电池的核心部件之一,通过模压或者机加工在极板上形成的气体流道,在运输反应气体的同时还起到排出反应产生的水以及热的作用。双极板几乎占据了燃料电池堆体积的70%~90%、质量的60%~80%、成本的30%~40%左右<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2024-12-13

**作者简介:**朱鼎(1988—),男,2013年毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业,工学硕士,工程师。现任职于东方电气(成都)氢能科技有限公司,主要从事燃料电池系统研发、工程应用等工作。

有研究指出,增加流道的宽度对风冷燃料电池散热有利,且流场中温度均匀性也可以得到改善<sup>[3]</sup>。Qiu 等研究了槽道宽度的影响,发现相对湿度与氧浓度在宽槽道情况下分布更不均匀,认为肋槽宽度比为 3 时,可以实现较高的风冷燃料电池性能<sup>[4]</sup>。

膜电极中气体扩散层在传热传质和水传输过程中起重要作用。Meyer 等研究了风冷燃料电池膜电极中液态水分布与传输机制,发现阴极侧肋下液态水含量较高,而阳极侧液态水含量分布较为均匀,阳极侧气体扩散层中掺杂 PTFE 会影响液态水的传输行为,增加阳极侧气体扩散层中 PTFE 含量,降低微孔层孔隙率,使得阴极液态水难以从阴极反扩散至阳极,从阴极侧排出液态水含量增加<sup>[5]</sup>。

风冷燃料电池运行中,环境温度、湿度以及气压变化直接影响风冷燃料电池运行特性,风冷燃料电池堆性能提升、轻量化设计以及运行特性对复杂环境变化的适应性是风冷燃料电堆的关键技术。运行环境对风冷燃料电池影响非常显著。Jung 等通过实验研究了湿度、温度和空气流速的影响,提出为避免暴露在温度较高环境时质子交换膜的脱水问题,需要提高环境湿度与空气流速,同时为了保持风冷燃料电池保持稳定的输出性能,风冷燃料电池的入口湿度不应低于 55 %<sup>[6]</sup>。

通过前述研究可以发现,风冷燃料电池性能受各部件结构参数与运行工况影响显著,而不同的参数对风冷燃料电池影响程度不一。通过多参数优化燃料电池性能难以将影响因素考虑全面,因此本文采用数值计算的方法,将影响燃料电池性能的 9 个主要参数,根据影响程度,通过方差分析,简化为 6 个重要参数。为优化燃料电池性能减轻工作量。

### 1 多场耦合模型及计算区域

研究的风冷燃料电池典型单元三维结构如图 1 所示,包括阴阳极通道、气体扩散层、催化层以及位于阴阳极之间的质子交换膜。其中,阴阳极流道采用交叉流布置。各个组件的结构参数如表 1(a) 所示,网格示意图如图 1(b) 所示。

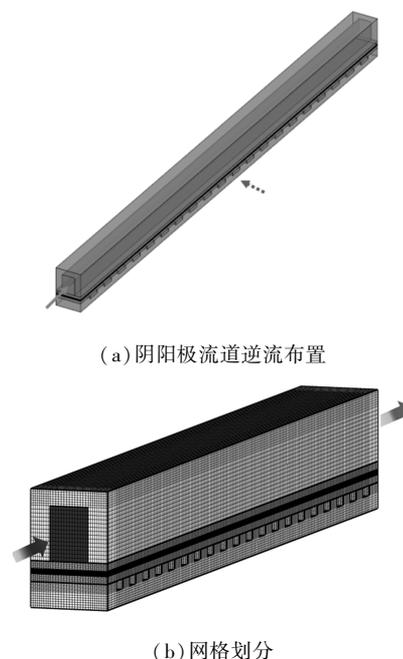


图 1 风冷燃料电池典型单元计算区域

本文采用三维多相非等温模型用于风冷质子交换膜燃料电池内部传输行为,求解方程包括质量、动量、能量、组分、液态水饱和度、膜态水、电子电势、质子电势方程,方程详细信息可参阅文献[7]。

阴阳极入口采用速度边界条件,入口温度设定为 298.15 K,阴极入口相对湿度设定为 0.3,阳极入口相对湿度为 0,阳极干氢气过量系数设置为 1.4,阴极过量系数设置为 30。计算了不同网格数的风冷燃料电池典型计算单元输出性能,0.6 V 操作电压下的电流密度与阴极出口温度如图 2 所示。可以发现,网格量为 18.1 万时,电流密度与阴极出口温度与最大网格量的偏差分别为 0.14 % 与 0.48 %,偏差均小于 1 %,采用该网格系统进行模拟。

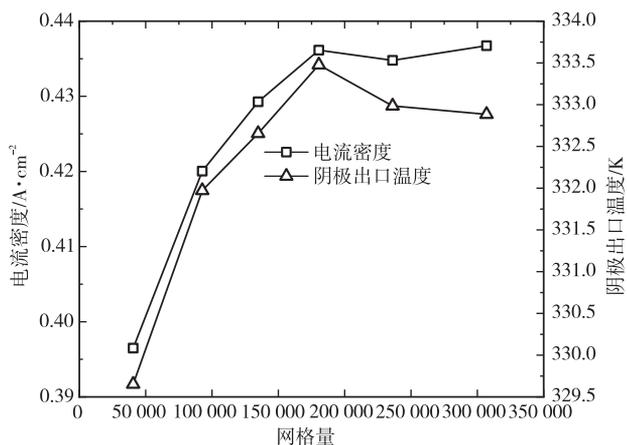


图 2 网格独立性考核

表 1 通道几何结构参数 mm

几何结构	几何描述	数值
阴极通道	宽度, $W_{cGC}$	1.2
	深度, $d_{cGC}$	1.7
阳极通道	宽度, $W_{aGC}$	1.2
	深度, $d_{aGC}$	0.3
扩散层	厚度, $\delta_{CDL}$	0.25
微孔层	厚度, $\delta_{MPL}$	0.03
催化层	厚度, $\delta_{CL}$	0.03
质子交换膜	厚度, $\delta_{MEM}$	0.025
通道	长度, $L$	50

## 2 设计变量选择

本研究选择了 9 个常见的风冷燃料电池几何参数和操作参数。其中, 结构参数包括气体扩散层孔隙率( $\varepsilon$ )、气体扩散层润湿角( $\theta$ )、肋宽( $W_r$ )和通道深度( $h_c$ ), 运行工况包括环境压力( $P$ )、环境温度( $T_{in}$ )、阴极过量系数( $ST_c$ )和阳极/阴极相对湿度( $RH_a/RH_c$ )。为了降低后续多目标优化计算工作量, 同时也为了找出影响风冷燃料电池的显著参数, 首先对上述 9 个自变量进行方差分析, 对这 9 个决策变量设置三个水平, 所选择的水平如表 2 所示。

表 2 变量水平划分

参数	水平 1	水平 2	水平 3
气体扩散层孔隙率 $\varepsilon$	0.6	0.7	0.8
气体扩散层润湿角 $\theta(^{\circ})$	110	130	150
阴极肋宽 $W_r$ (mm)	0.8	1.2	1.6
阴极通道高度 $h_c$ (mm)	1.3	1.5	1.7
环境压力 $P$ (atm)	0.7	0.85	1
环境温度 $T_{in}$ (K)	278.15	298.15	313.15
阴极过量系数 $ST_c$	10	25	40
阳极相对湿度 $RH_a$	0.1	0.5	0.9
阴极相对湿度 $RH_c$	0.1	0.5	0.9

所采用计算模型几何尺寸与表 1 保持一致。在调整阴极肋宽时, 保证典型计算单元的宽度为 2.4 mm 不变, 所以肋宽的增加意味着通道宽度的降低; 在调整阴极通道高度时, 维持阴极极板厚度不变; 环境压力选择从 0.7 atm 到 1 atm 以表征风冷燃料电池运行在不同海拔高度时的气压; 环境温度

选择为 278.15 K、298.15 K 以及 313.15 K 以反映不同温度范围下风冷燃料电池性能变化; 阴/阳极相对湿度选择覆盖低湿与高湿环境。

基于表 2 给出的三水平表, 生成 9 因素 3 水平的正交设计 L27 表, 如表 3 所示。在表 3 中, 每一行均代表结构参数与运行工况组合, 均需在三维数值模拟进行相应调整, 为三维典型单元数值模拟提供基础参数。

表 3 9 因素 3 水平 L27 正交设计表

$L_{27}$	$\varepsilon$	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$W_r$ (mm)	$h_c$ (mm)	$P$ (atm)	$T_{in}$ (K)	$ST_c$	$RH_a$	$RH_c$
1	0.6	110	0.8	1.3	0.7	5	10	0.1	0.1
2	0.6	110	0.8	1.3	0.85	25	25	0.5	0.5
3	0.6	110	0.8	1.3	1	45	40	0.9	0.9
4	0.6	130	1.2	1.5	0.7	5	10	0.5	0.5
5	0.6	130	1.2	1.5	0.85	25	25	0.9	0.9
6	0.6	130	1.2	1.5	1	45	40	0.1	0.1
7	0.6	150	1.6	1.7	0.7	5	10	0.9	0.9
8	0.6	150	1.6	1.7	0.85	25	25	0.1	0.1
9	0.6	150	1.6	1.7	1	45	40	0.5	0.5
10	0.7	110	1.2	1.7	0.7	25	40	0.1	0.5
11	0.7	110	1.2	1.7	0.85	45	10	0.5	0.9
12	0.7	110	1.2	1.7	1	5	25	0.9	0.1
13	0.7	130	1.6	1.3	0.7	25	40	0.5	0.9
14	0.7	130	1.6	1.3	0.85	45	10	0.9	0.1
15	0.7	130	1.6	1.3	1	5	25	0.1	0.5
16	0.7	150	0.8	1.5	0.7	25	40	0.9	0.1
17	0.7	150	0.8	1.5	0.85	45	10	0.1	0.5
18	0.7	150	0.8	1.5	1	5	25	0.5	0.9
19	0.8	110	1.6	1.5	0.7	45	25	0.1	0.9
20	0.8	110	1.6	1.5	0.85	5	40	0.5	0.1
21	0.8	110	1.6	1.5	1	25	10	0.9	0.5
22	0.8	130	0.8	1.7	0.7	45	25	0.5	0.1
23	0.8	130	0.8	1.7	0.85	5	40	0.9	0.5
24	0.8	130	0.8	1.7	1	25	10	0.1	0.9
25	0.8	150	1.2	1.3	0.7	45	25	0.9	0.5
26	0.8	150	1.2	1.3	0.85	5	40	0.1	0.9
27	0.8	150	1.2	1.3	1	25	10	0.5	0.1

## 3 各参数影响结果分析

基于表 3 给出的 L27 正交设计表, 对 0.6 V 操作电压下的上述表格中所列出的 27 个工况进行数值模拟计算, 统计该 27 个工况所输出的电流密度、质量功率密度与氧浓度均匀性参数列在表 4 中。

表4 0.6 V 操作电压下正交设计表计算结果

	电流密度 ( $A \cdot cm^{-2}$ )	质量功率密度 ( $kW \cdot kg^{-1}$ )	氧浓度 均匀性
1	0.502	0.764	0.919
2	0.504	0.768	0.942
3	0.584	0.889	0.943
4	0.592	0.858	0.867
5	0.613	0.888	0.899
6	0.369	0.535	0.944
7	0.652	0.890	0.776
8	0.674	0.921	0.827
9	0.657	0.897	0.859
10	0.502	0.758	0.918
11	0.569	0.860	0.907
12	0.566	0.856	0.932
13	0.574	0.737	0.881
14	0.426	0.547	0.891
15	0.657	0.842	0.901
16	0.295	0.476	0.971
17	0.316	0.511	0.960
18	0.463	0.748	0.965
19	0.469	0.617	0.923
20	0.491	0.646	0.931
21	0.528	0.694	0.918
22	0.235	0.405	0.981
23	0.310	0.533	0.976
24	0.380	0.653	0.966
25	0.307	0.427	0.954
26	0.433	0.603	0.960
27	0.353	0.492	0.956

对表4中的结果进行方差分析,将其汇总在表5中,在表5中SS表示各变量离均差平方和,F值与P值表征了决策变量的显著性水平,较高的F值与较小的P值意味着该决策变量较为显著,各决策变量F值所占比例统计为贡献率。从表5中可以看到,针对电流密度,气体扩散层孔隙率、通道宽度、环境温度以及阴极相对湿度的P值均小于0.05,而其F值求和的贡献率达87.78%;针对质量功率密度,气体扩散层孔隙率、通道宽度、环境温度与阴极相对湿度的P值也小于0.05,其F值贡献为79.15%;对于氧气浓度分布均匀性,气体扩散层孔隙率、通道宽度、气体流道高度与阴极过量系数的P值同样小于0.05,且其F值对氧气分布均匀性贡献达到93.25%。

表5 关于电流密度、质量功率密度与电流密度均匀性指标的方差分析

	决策变量	SS	F	P	贡献率(%)
电 流 密 度	$\varepsilon$	0.149 7	25.67	0.000	37.48
	$\theta$	0.023 4	4.01	0.062	5.85
	$W_r$	0.131 9	22.62	0.001	33.03
	$h_c$	0.009 2	1.59	0.263	2.32
	$P$	0.010 2	1.76	0.233	2.57
	$T_{in}$	0.030 9	5.31	0.034	7.75
	$ST_c$	0.004 3	0.73	0.510	1.07
	$RH_a$	0.001 7	0.28	0.760	0.41
	$RH_c$	0.038 0	6.52	0.021	9.52
质 量 功 率 密 度	决策变量	SS	F	P	贡献率(%)
	$\varepsilon$	0.304 8	27.01	0.000	46.85
	$\theta$	0.056 0	4.97	0.040	8.62
	$W_r$	0.060 4	5.35	0.033	9.28
	$h_c$	0.042 3	3.75	0.071	6.50
	$P$	0.025 3	2.24	0.169	3.89
	$T_{in}$	0.063 7	5.64	0.030	9.78
	$ST_c$	0.008 8	0.78	0.489	1.35
	$RH_a$	0.003 2	0.28	0.760	0.49
$RH_c$	0.086 1	7.63	0.014	13.24	
氧 浓 度 均 匀 性	决策变量	SS	F	P	贡献率(%)
	$\varepsilon$	0.019 4	195.21	0.000	33.01
	$\theta$	0.000 7	6.88	0.018	1.16
	$W_r$	0.028 7	289.16	0.000	48.90
	$h_c$	0.003 6	36.60	0.000	6.19
	$P$	0.002 1	21.00	0.000	3.55
	$T_{in}$	0.001 0	10.47	0.006	1.77
	$ST_c$	0.003 0	30.46	0.000	5.15
	$RH_a$	0.000 2	1.86	0.216	0.31
$RH_c$	0.001 0	9.73	0.007	1.65	

以下通过对不同决策变量对目标函数影响显著的原因进行分析,并根据不同决策变量的影响程度以及实际运行过程中频繁变化的运行参数进行筛选,为多目标优化提供优化空间。气体扩散层孔隙率与通道宽度对三个目标函数都有显著影响。气体扩散层孔隙率的变化会改变膜电极中水传输特性,在疏水气体扩散层中,较低的孔隙率会提升膜电极中的保水性能,继而改变风冷燃料电池性能,并且孔隙率影响氧气在气体扩散层中的传输特性,较低的孔隙率会使得肋下与通道下的氧浓度产生更大的差异,所以孔隙率会对三个目标函数同时产生显著影响。肋宽的变化同样会显著影响风冷燃料电池的水传输与氧传输特性。肋槽宽度比的增加会显著提升膜电极中的水含量,这会改变风冷

燃料电池欧姆极化特性,对燃料电池性能产生影响,而肋宽的变化对风冷燃料电池质量会产生影响,所以质量功率密度同样受到影响。

风冷燃料电池在运行时对温度变化较为敏感,较低的温度会降低风冷燃料电池电化学反应速率,较高的温度会使得质子交换膜脱水,降低质子电导率,需要合适的温度维持风冷燃料电池稳定运行,因此环境温度对风冷燃料电池电流密度影响显著,继而影响了质量功率密度与氧浓度均匀性。风冷燃料电池由于采用开放阴极的构型,阴极直接提供环境空气,环境湿度的变化会影响膜电极中的水分蒸发继而影响风冷燃料电池的保水特性,从而对风冷燃料电池的性能、质量功率密度以及电流均匀性产生影响。

气体扩散层润湿角对三个目标函数的函数的P值均在0.05左右,气体扩散层润湿角的变化,会改变液态水的传输特性,继而改变膜电极中膜态水分分布特性,使得受控于欧姆极化的风冷燃料电池性能得到显著改变,所以对三个目标函数均产生了一定的影响。阴极通道高度的变化对风冷燃料电池电流密度影响并不显著,而是通过影响双极板自身重量对风冷燃料电池的质量功率密度产生了一定的影响,在双极板设计中,通道高度的变化还会影响结构力学特性。在燃料电池实际运行过程中,受海拔高度的影响,装备有风冷燃料电池的无人机或其他小型移动设备,会经历不同海拔高度的变化,环境压力是常见的容易频繁变化的参数,环境压力的降低会降低催化层中反应物的压力,削弱了风冷燃料电池反应速率,继而对风冷燃料电池电流密度产生影响,从表5中可以看出,环境压力对风冷燃料电池电流密度具有一定的影响。

在参数显著性研究中,不同的结构与运行参数中,阳极相对湿度对燃料电池性能影响偏弱,这主要是因为相对湿度的变化同时影响氢分压与阳极侧膜电极的保水特性,虽然增加阳极相对湿度会增加膜电极的保水特性,但是氢分压的降低会削弱风冷燃料电池性能,并且阳极过量系数选择相较于阴极较小,多种因素影响下,使得阳极相对湿度对风冷燃料电池影响不显著。

综合上述分析,从上述9个自变量中,选择了6

个自变量作为后续优化的决策变量,即气体扩散层孔隙率、润湿角,阴极肋宽、阴极相对湿度、环境温度与环境压力。

#### 4 结语

本文建立了典型风冷燃料电池数值计算模型,通过设计正交试验,计算了不同结构尺寸与运行环境参数下的燃料电池性能,基于三个性能指标,即电流密度、质量功率密度和阴极催化层氧浓度均匀性,通过采用方差分析,选择对目标有显著影响的变量作为决策变量。在气体扩散层孔隙率、气体扩散层润湿角、通道宽度、通道深度、环境压力、环境温度、阴极过量系数和阳极/阴极相对湿度这9个结构与运行参数中,选择6个决策变量,减少了决策变量数量,提高设计计算效率。

#### 参考文献:

- [1] Wilberforce T, El Hassan Z, Ogungbemi E, et al. A comprehensive study of the effect of bipolar plate (BP) geometry design on the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2019, 111: 236-260
- [2] Li X, Sabir I. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2005, 30(4): 359-371
- [3] Matian M, Marquis A, Brandon N. Model based design and test of cooling plates for an air-cooled polymer electrolyte fuel cell stack [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(10): 6051-6066
- [4] Qiu D, Peng L, Tang J, et al. Numerical analysis of air-cooled proton exchange membrane fuel cells with various cathode flow channels [J]. *Energy*, 2020, 198: 117334
- [5] Meyer Q, Ashton S, Boillat P, et al. Effect of gas diffusion layer properties on water distribution across air-cooled, open-cathode polymer electrolyte fuel cells: a combined ex-situ X-ray tomography and in-operando neutron imaging study [J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 211: 478-487
- [6] Jung G B, Lo K F, Su A, et al. Experimental evaluation of an ambient forced-feed air-supply PEM fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(12): 2980-2985
- [7] Peng M, Chen L, Zhang L, et al. Improvement of thermal and water management of air-cooled polymer electrolyte membrane fuel cells by adding porous media into the cathode gas channel [J]. *Electrochimica acta*, 2022, 412: 140154

# ANN 算法在环氧树脂性能预测中的应用研究

钟连兵 李兆星 张林 杨超平

四川东树新材料有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**风电叶片用灌注环氧树脂是叶片制造过程中的关键原材料之一,环氧树脂产品原材料配比及固化工艺决定了产品能否达到目标性能,其中力学性能与玻璃化转变温度(glass transition temperature,  $T_g$ )是最核心的性能测试指标。本文采用人工神经网络(artificial neural network, ANN)对3种树脂原料、4种固化剂原料在不同配比固化后树脂浇筑体的拉伸强度与  $T_g$  进行建模,通过对模型进行评估并调整隐藏层参数,最终得到了较好的预测结果。

**关键词:**环氧树脂;人工神经网络;玻璃化转变温度;拉伸强度

中图分类号:O633.13

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0025-05

## Research on the Application of ANN Algorithm in the Performance Prediction of Epoxy Resin

ZHONG Lianbing, LI Zhaoxing, ZHANG Lin, YANG Chaoping

(Sichuan Dongshu New Materials Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** The infusion epoxy resin used for wind turbine blades is one of the key raw materials in the blade manufacturing process. The formulation of raw materials and the curing process of epoxy resin products determine whether the product can achieve target performance, among which mechanical properties and the glass transition temperature ( $T_g$ ) are the core performance test indicators. This article uses artificial neural networks (ANN) to model the tensile strength and  $T_g$  of resin cast bodies cured from three types of resin raw materials and four types of curing agents at different ratios, and through assessing the model and adjusting the hidden layer parameters, ultimately good prediction results were obtained.

**Key words:** epoxy resin; artificial neural network;  $T_g$ ; tensile strength

随着国际社会对能源安全、生态环境等领域的日益重视,风能作为清洁可再生能源对推进绿色低碳发展、实现“双碳”具有重要意义<sup>[1]</sup>。灌注环氧树脂是风电叶片制造的核心材料之一。在当前原材料价格不断浮动的市场环境下,新产品快速开发周期是企业保持竞争力的核心要素之一。然而,风电叶片用灌注环氧树脂的研发是一个相对复杂的过程,产品设计开发需要对理化及力学性能指标需进行多次实验验证,产品开发周期长、效率低。

近年来,随着人工智能、机器学习的高速发展,

神经网络算法在多因素多输出场景下优异的非线性建模能力在材料领域开展了大量的研究与应用<sup>[2-5]</sup>。范彬等<sup>[6]</sup>采用BP神经网络建立复方中药漱口水平预测模型,结合遗传算法成功筛选出较优的配方工艺。张橙等<sup>[7]</sup>将神经网络算法应用于催化臭氧氧化催化剂的开发过程,结果表明,神经网络模型对催化剂制备过程的复杂体系具有较好的拟合和泛化能力。霍洪山等<sup>[8]</sup>将固井实验数据进行神经网络训练,筛选出最合适的水泥浆配方范围,加速了水泥浆配方开发周期。

收稿日期:2025-06-12

基金项目:四川省科技计划项目:超大型复合材料结构粘接剂的研发及应用;项目编号:2024YFTX0063。

作者简介:钟连兵(1981—),男,2006年毕业于哈尔滨工业大学材料学专业,博士,高级工程师。现任四川东树新材料有限公司副总经理,从事新能源复合材料及高纯材料工艺技术研发工作。

传统的配方设计一般分为以下步骤:确认产品性能指标、基于经验初筛原材料及配比、理化性能筛选、力学及工艺性能验证。开发流程几乎完全依赖实验,同时实验过程中的异常数据也难以快速被发现。与传统基于实验开发的“配方设计-实验验证”开发思路不同,基于数据建模预测可将“实验验证”步骤简化,进而节约研发时间。受限于复杂的化学反应和应用需求场景,传统理论建模难以对此非线性关系进行较为准确的描述,而神经网络具有强大的非线性拟合能力和对原始高维数据的自动学习能力,在大量数据训练下具有极高的精度,较为适合在环氧树脂配方开发过程中进行应用。本文首次针对风电叶片环氧树脂的典型开发场景,应用人工神经网络算法对环氧树脂的浇筑体拉伸强度及玻璃化转变温度进行建模并评估,最终取得了预期的预测结果,为环氧树脂快速开发提供了数据驱动的新方法,有助于缩短研发周期和降低实验成本。

## 1 神经网络算法

神经网络算法是仿照人脑神经元传递建立的计算模型,通过非线性函数堆叠实现数据特征的多层抽象,核心公式表达为

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (1)$$

其中: $w_i$ 为权重(Weights),决定输入的重要性; $b$ 为偏置(Bias),调节神经元激活阈值; $f$ 为激活函数(Activation Function)。

神经网络的结构由层级化连接的神经元构成,通过前馈或者反馈机制实现信息处理,网络结构一般分为三层:输入层(Input Layer)接收原始数据;隐藏层(Hidden Layers)通过权重矩阵实现特征变换;输出层(Output Layer)生成最终结果。深度(Depth)为隐藏层数量,其决定网络深度。

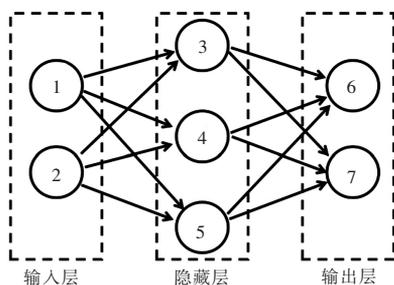


图1 神经网络结构

## 2 材料与方法

影响环氧树脂产品性能的因素众多,其中配方与工艺最为关键。相对于配方设计,工艺因依赖于现场应用条件及需求而变动较少。在限定的固化工艺下设计出满足目标性能的配方是企业目前研发的重点。常规环氧树脂产品的开发流程为:配方设计、样品配制、实验测试。单组测试流程需要时间1~2天,样品配制和实验测试极大延长了开发周期。基于大量的实验数据,利用神经网络算法进行建模,可快速预测实验结果,进而缩短实验周期。本文方案设计为固定工艺,确定配方组分比例为关键的输入变量,拉伸强度和玻璃化转变温度为输出变量,选取实验数据进行模型训练。

### 2.1 实验原材料

树脂组分原料:双酚A型环氧树脂E56、1,4-丁二醇二缩水甘油醚(BDDE)、C10~C12烷基缩水甘油醚。

固化剂组分原料:聚醚胺D230、孟烷二胺(MDA)、1,4-环己二胺、戊二胺。

### 2.2 固化工艺与测试

将树脂、固化剂组分原料分别按照不同比例单独混合均匀,再按树脂质量:固化剂质量=100:30均匀混合,在真空箱中将混合液进行真空脱泡处理后灌入浇筑体模具,随后在恒温80℃烘箱中进行7小时固化,固化结束后将浇筑体加工为拉伸测试样条(ISO527-5,见图2)与玻璃化转变温度测试小样品。

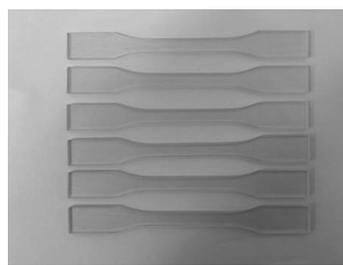


图2 拉伸测试试样

### 2.3 仪器设备

使用力学测试机(图3)测试浇筑体拉伸强度;使用差示扫描热量仪(图4)测试浇筑体玻璃化转变温度;使用真空干燥箱(图5)将树脂固化剂混合液进行脱泡处理;使用恒温烘箱(图6)进行恒温定时固化。



图3 力学测试机

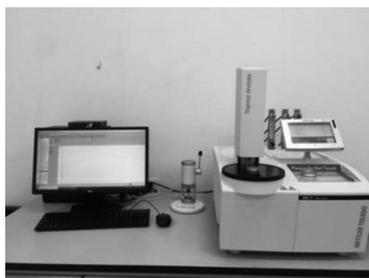


图4 差示扫描热量仪



图5 真空干燥箱



图6 恒温烘箱

## 2.4 实验数据选取

选取实验测试数据库中符合上述原料及固化工艺的测试数据进行预处理,去除数据重复、异常的数据,并基于此进行反向传播神经网络(Back Propagation, BP)建模。BP神经网络是一种多层前馈神经网络,由一个输入层、一个输出层和多个隐藏层组成。预处理后的实验数据节选见表1,其中原料数据为质量比。

## 2.5 人工神经网络建模

对于BP神经网络,隐藏层节点数的确定是模型准确与否的关键。本文根据公式(2)确定初始隐藏层节点数的范围,再采用网络结构增长型方法,即先设置较少的节点数,测试学习误差,然后逐渐增加节点数,优化训练次数,直到学习误差不再有明显减少为止。

表1 环氧树脂实验数据(节选)

序号	双酚 A 型环氧树脂 E56	BDDE	C10-C12 烷基缩水甘油醚	聚醚胺 D230	MDA	1,4-环己二胺	戊二胺	拉伸强度 (MPa)	玻璃化转变温度(℃)
01	89	5	6	21	6	3	0	63.9	83
02	88	5	7	21	3	3	3	64.5	84
03	87	5	8	21	6	3	0	63.1	79.5
					...				

$$n_1 = [\sqrt{2n+m}, 2n+m] \quad (2)$$

其中: $n$  为输入层节点数; $m$  为输出层节点数。

本次训练使用 Python 机器学习库进行 BP 神经网络建模训练,激活函数选用计算速度较快的 Relu 函数,损失函数(Loss Function)选用均方误差,优化算法选用 Adam 优化器。为检验拟合数据与计算的精度,在测试数据中,随机选取 10% 的数据进行模型评估。为提高模型预测的准确率,分别设置拉伸强度与玻璃化转变温度为单输出层节点,输入层为 7 种原材料的质量配比,隐藏层深度为 2 层,两组模型进行单独训练及参数优化。

模型评估方法选用四项数据:预测值(Predicted Values)与真实数据(True Values)误差、残差(Residuals)、模型损失(Model Loss)、误差分布(Error Distribution)。真实值与预测值对比图用于检查预测值与真实值的线性关系,理想情况应呈对角线分布。最终训练模型的预测值与真实值误差越小,则模型越精确。残差图用于检查残差(预测误差)是否随机分布。若存在分布不均,说明模型有系统性偏差。训练损失曲线用于监控训练和验证损失是否收敛,避免过拟合或欠拟合。随着训练次数的增长,预测误差会不断减少,得到更加接近

真实数据的预测值,模型损失会趋近于水平。若测试循环次数过少,模型损失梯度未趋近水平,则模型训练未达最优。若测试循环次数过多,模型损失梯度出现不降反升的情况,则模型训练出现过拟合。误差分布直方图显示模型误差是否符合正态分布。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 拉伸强度预测模型

通过多次参数调整及训练,在本实验输入层为7个节点,输出层为1个节点的前提下,中间两个隐含层节点分别为16和8的2层前向网络的训练误差达到预期效果。拉伸强度BP神经网络训练建模评估见图7~10。

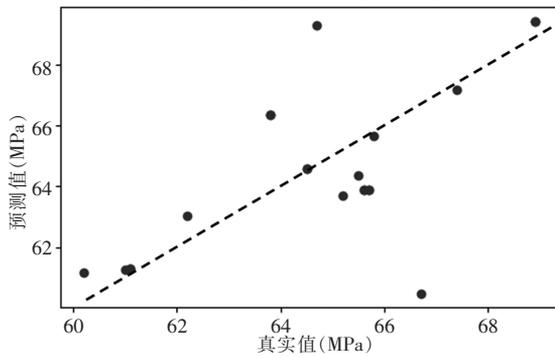


图7 拉伸强度真实值与预测值对比图

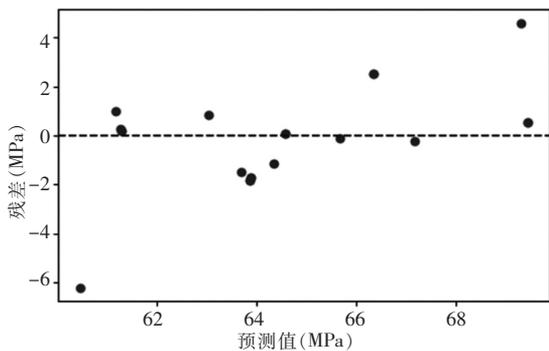


图8 拉伸强度残差图

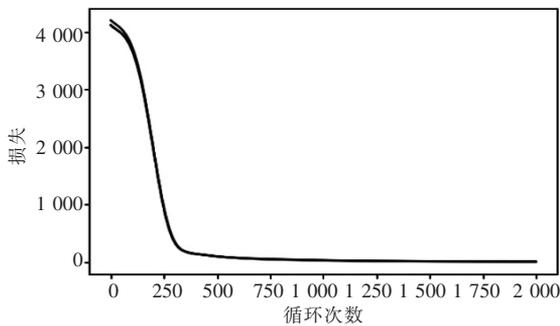


图9 拉伸强度模型损失图

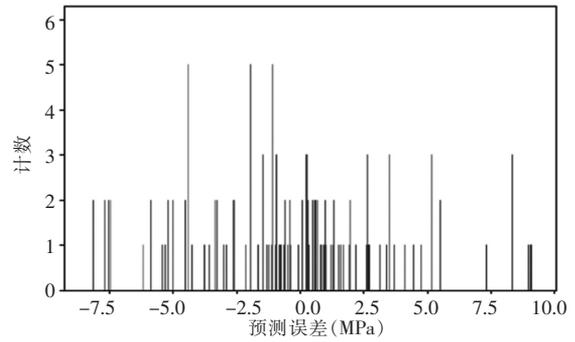


图10 拉伸强度误差分布直方图

由真实值与预测值对比图(图7)可知,预测值与真实值误差整体基本较为接近,数据误差离散性尚可,模型的预测能力基本符合预期。残差图(图8)显示,0线上下点分布较为平均,且数据误差基本位于0线附近,86.7%评估数据点误差值在 $\pm 3$  MPa以内,最大误差为6.1 MPa,模型整体预测偏差较小。模型损失图(图9)显示,随着训练次数的增加,模型在0~300次循环急剧收敛,300~1000次循环收敛速度趋于平缓,500次循环后模型损失梯度曲线趋近于与横坐标平行,且未出现上升的趋势,即模型未发生欠拟合或过拟合。误差分布直方图(图10)显示误差在0 MPa附近分布密度最高,0 MPa两侧分布较为均匀。通过此四项模型评价,可判断该拉伸强度神经网络预测模型具有较好的预测参考效果。

#### 3.2 玻璃化转变温度预测模型

通过多次参数调整及训练,在本实验输入层为7个节点,输出层为1个节点的前提下,中间两个隐含层节点分别为16和8的2层前向网络的训练误差达到预期效果。玻璃化转变温度BP神经网络训练建模评估见图11~14。

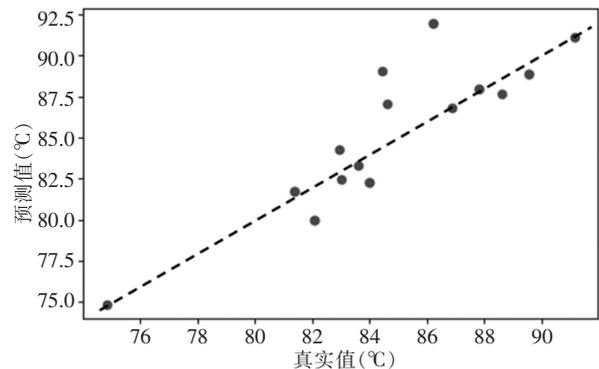


图11 T<sub>g</sub> 真实值与预测值对比图

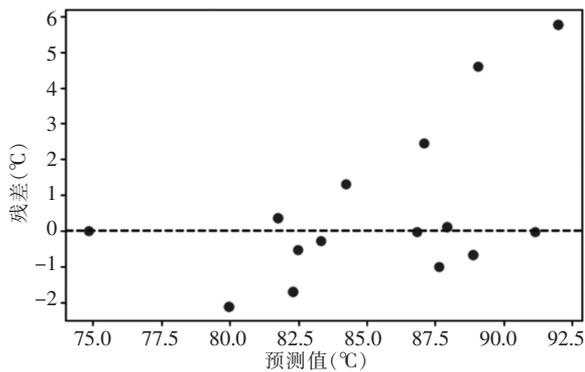


图 12 T<sub>g</sub> 残差图

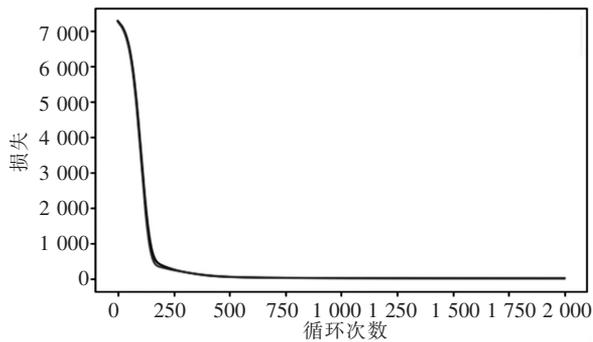


图 13 T<sub>g</sub> 模型损失图

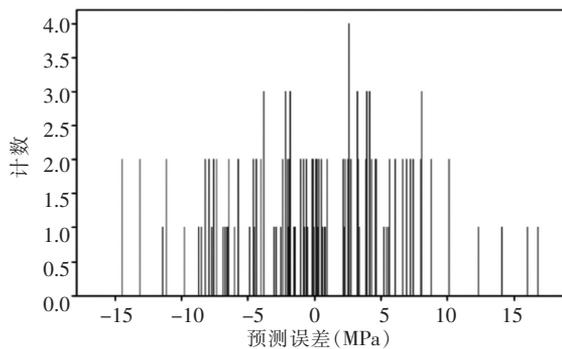


图 14 T<sub>g</sub> 误差分布直方图

由真实值与预测值对比图(图 11)可知,预测值与真实值误差整体基本较为接近,数据误差离散性较好,模型的预测能力较拉伸强度模型更优。残差图(图 12)显示,0 线上下点分布较为平均,数据误差大部分位于 0 线附近,86.7 % 评估数据点误差值在  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,最大误差为  $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,模型预测偏差较小。模型损失图(图 13)显示,随着训练次数的增加,模型在 0~200 次循环急剧收敛,200~500 次循环收敛速度趋于平缓,500 次循环后模型损失梯度曲线趋近于与横坐标平行,且未出现上升的趋势,

即模型未发生欠拟合或过拟合。误差分布直方图(图 14)显示误差在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近分布密度最高, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  两侧分布较为均匀,且基本符合正态分布,相较于拉伸强度模型误差分布更优。通过此四项模型评价,可判断该玻璃化转变温度神经网络预测模型具有良好的预测效果,且更优于拉伸强度神经网络预测模型。

#### 4 结语

应用神经网络对不同配比下的环氧树脂原材料进行建模,选用 7 种原材料质量配比作为输入节点,分别用浇筑体拉伸强度和玻璃化转变温度作为单个输出节点,得出以下结论。

(1) 采用 16-8 节点双隐藏层结构,应用 Relu 激活函数、Adam 优化器和均方误差损失函数训练,模型损失梯度收敛良好,未出现过拟合或欠拟合现象。

(2) 拉伸强度预测模型中 86.7 % 评估数据点误差值在  $\pm 3\text{ MPa}$  以内,玻璃化转变温度预测模型 86.7 % 评估数据点误差值在  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,模型预测具有较好的应用参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 乔黎明. 全球风电发展现状和展望[J]. 风能, 2012(9): 58-62
- [2] 于志省, 李应成, 王宇遥, 等. 神经网络在材料开发中的应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2): 158-164
- [3] 杨宁, 魏伟, 胡航语, 等. 基于图神经网络的高温树脂材料预测模型[J]. 功能高分子学报, 2021, 34(6): 554-561
- [4] Maharana S, Soni G, Mitra M. Prediction of Elasto-plastic Behaviour of Short Fiber Reinforced Polymer Composites Using Artificial Neural Network[M]. AIAA SCITECH 2023 Forum, 2023
- [5] Raimi O A, Lee B K, Raghunathan V. Artificial Neural Network (ANN)-Based Prediction Model of Demolding Force in Injection Molding Process [J]. Advances in Polymer Technology, 2025: 1528204
- [6] 范彬, 白雯静, 彭腾腾, 等. 基于遗传算法-反向传播神经网络及响应面法优化香薷漱口液配方工艺[J]. 甘肃医药, 2024, 43(7): 641-645
- [7] 张橙, 孙文静, 王盛哲, 等. 人工智能助力臭氧催化剂 SrFe<sub>x</sub>Zr<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub> 的开发[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1868-1877
- [8] 霍洪山, 陈志鸣, 宋茂林, 等. 基于神经网络的水泥浆配方智能推荐技术[J]. 石油化工应用, 2024, 43(11): 51-54

# 基于生成式 AI 技术的汽轮机 智能运维系统研发

伍文华 宋放放 周赵伟 赵晓苗 平艳

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:** 汽轮机运维行业经过长年积累, 具备大量高价值数据与经验, 并形成了一系列技术标准、操作规范等文件, 如何才能让沉淀的人员经验与技术资料高效发挥作用, 对机组运维具有重要意义。随着人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 与大语言模型 (Large Language Model, LLM) 的发展, 生成式 AI 技术, 因其强大的数据生成能力和特征提取能力, 在机组智能运维领域展现出巨大的潜力。本文围绕生成式 AI 技术在机组智能运维中的应用进行深入研究, 提出了一套完整的解决方案, 并完成智能运维系统开发与测试验证。

**关键词:** 人工智能; 大语言模型; 生成式 AI; 智能运维; 汽轮机

中图分类号: TK267

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)04-0030-04

## Research and Development of An Intelligent Operation and Maintenance System for Steam Turbines Based on Generative AI Technology

WU Wenhua, SONG Fangfang, ZHOU Zhaowei, ZHAO Xiaomiao, PING Yan

(Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** The steam turbine operation and maintenance industry, through years of accumulation, has acquired a vast amount of high-value data and experience, leading to the formation of various technical standards, operational norms, and other documents. It is crucially important for unit operation and maintenance to efficiently leverage this accumulated personnel experience and technical information. With the advancement of artificial intelligence (AI) and large language models (LLM), generative AI technology, due to its powerful data generation and feature extraction capabilities, has shown immense potential in the field of intelligent unit operation and maintenance. This paper delves deeply into the application of generative AI technology in intelligent unit operation and maintenance, proposes a comprehensive set of solutions, and completes the development and testing validation of an intelligent operation and maintenance system.

**Key words:** artificial intelligence; large language model; generative AI; intelligent operations and maintenance; turbine

作为核心电力设备, 汽轮机的稳定运行对整个发电厂和电网的可靠性至关重要, 其运行状态直接关系到发电效率和安全。然而, 由于汽轮机结构的复杂性以及运行环境的多变性, 传统的维护方式难以满足快速、准确的故障诊断与运维处理需求<sup>[1]</sup>。传统上, 这种运维依赖于控制系统程序和运维人员的经验, 而运维人员之间的个体差异往往决定了机组的运行情况。随着科技的不断进步, 特别是生成式 AI 技

术的发展为机组智能运维提供了新的解决方案。

生成式 AI 是一种基于大语言模型, 能够自主生成内容的人工智能技术, 可以应用于文本、图像生成等多个领域。近年来, 随着预训练技术的发展和计算硬件的提升, 生成式人工智能取得了突破性进展, 特别是以 ChatGPT 为代表的生成式对话模型, 取得了令人惊艳的效果, 开始广泛应用于各行各业。在汽轮机组日常运行与维护场景下, 通过将机

收稿日期: 2025-02-07

作者简介: 伍文华 (1987—), 男, 2013 年毕业于电子科技大学, 高级工程师, 主要研究方向为汽轮机设计与智慧电厂建设。

组故障案例处理手册、运行操作规程、产品说明书等技术文件导入大语言模型,依托模型的训练和学习,

对大量数据和文本进行挖掘分析,可以为汽轮机提供运维操作指导,从而实现机组智能运维(图1)。

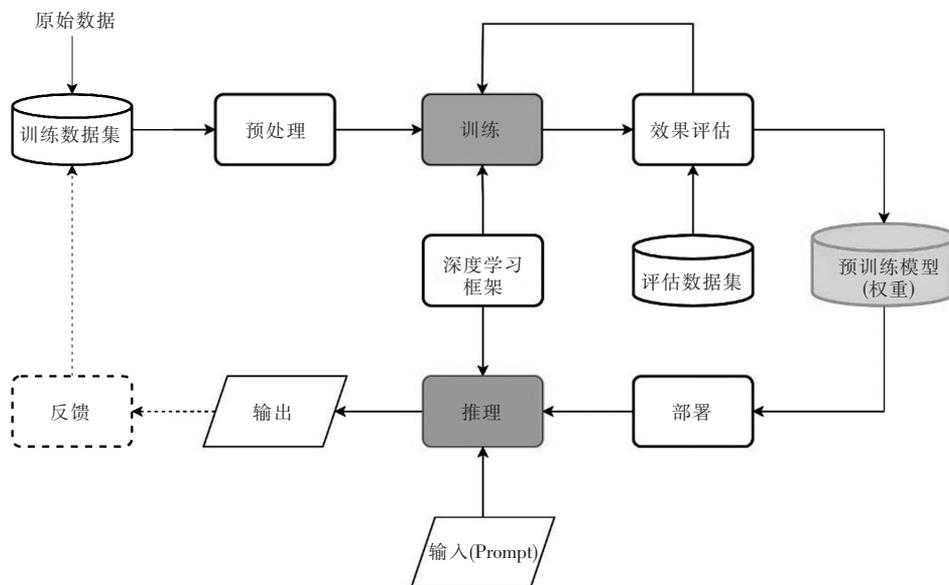


图1 生成式 AI 训练与推理过程

## 1 大语言模型与生成式 AI 技术

大语言模型(LLM)是一种基于深度学习技术构建的先进自然语言处理工具,具备理解和生成自然语言文本的能力。大语言模型的“大”体现在训练数据集广,模型参数和层数大,计算量大,其价值体现在通用性上,并且有很好的泛化能力。在2017年以前,自然语言处理领域的主流模型是循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN),使用递归和卷积神经网络进行语言序列转换。随着Transformer这一全新语言模型架构的提出,自然语言处理领域发生重大突破。

生成式人工智能模型的核心能力在于其对数据和任务的深刻理解,当前,以ChatGPT为代表的大规模语言模型在多个文本生成任务,如回答问题、提供建议、内容总结及文本优化等方面,已达到或超越人类水平,在问答式的机组智能运维系统的应用研究中,表现出了巨大潜力。

## 2 基于生成式 AI 的汽轮机智能运维系统实现

### 2.1 大模型本地化部署与选型

本地化部署是指将大模型部署在企业内部的数据中心内,而不依赖于云端服务提供商的服务

器,这种部署方式具有多方面的意义和优势。

(1)提升数据隐私与安全性:本地化部署有助于提高AI应用的数据隐私和安全性,由于数据不需要上传至云端,从而降低了数据泄露和滥用的风险。

(2)满足业务定制化需求:企业可以根据自己的特定需求和场景自主选择AI模型和相关配置,并进行适当的调整和优化,以满足特定的业务需求。

(3)解决云端限制问题:本地部署可以在一定程度上解决云端AI在大规模数据集上可能面临的运行速度和效率问题。同时,也为开发者提供了更多的实验和测试环境,加速了模型的开发和优化过程。

(4)成本控制:长期来看,本地化部署可以帮助企业更好地控制成本,尤其是当企业需要频繁使用大模型时。

在大模型的选择上,尽管通常情况下商用大模型性能更为稳定,有专业的技术支持服务,但考虑到行业特定领域的定制性开发与后续系统的授权及推广,建议采用开源大模型。并且,开源大模型的源代码和架构是公开的,任何人都可以查看和审查,以确保模型的透明度和可审计性。借助开源大模型庞大的开发者社区支持,用户可以获取技术支持、解决问题并共享经验。

## 2.2 智能运维系统架构

本文提出的分层架构设计,包括数据准备层、数据处理层、模型训练层和应用服务层(图2)。数据准备层负责收集汽轮机机组的运维资料,包括操作手册、故障案例库、维修记录等,这些资料是系统学习的基础,需要保证其准确性和完整性。数据预处理是指对收集到的数据进行预处理,包括文本清洗、分词、标注等步骤。将预处理后的数据导入大

模型进行训练学习,通过学习大量文本数据中的语言规律和知识,逐渐掌握汽轮机运维的相关知识和技能。在训练过程中,可以根据实际需求调整模型的参数和结构,以优化模型的性能。基于训练好的LLM模型,向终端用户提供交互界面(web端、桌面端或者手机端)和运维决策支持。为了提高系统的易用性和准确性,可以添加一些辅助功能,如问题分类、答案排序等。

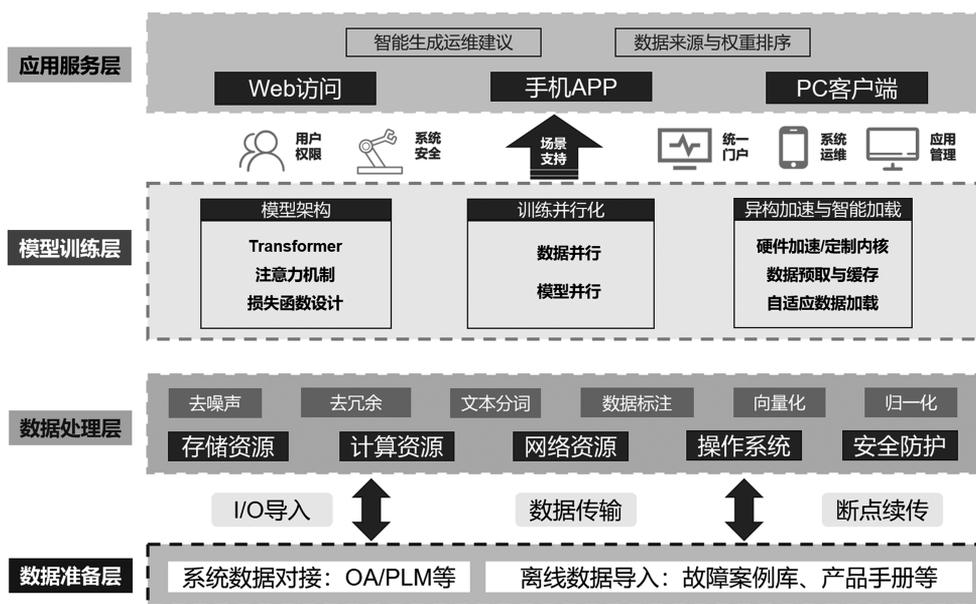


图2 系统架构设计

## 2.3 大语言模型的机器幻觉与处理方式

在大语言模型的应用场景下,“机器幻觉”通常指的是模型在没有足够证据支持的情况下,生成的错误或虚构的信息。这种幻觉现象在自然语言处理(Natural Language Process, NLP)任务中尤为突出,如文本生成、摘要、对话系统等。其特点包括:

(1) 非事实性:模型可能会创造出不存在的事实或事件,这些信息看似合理,但与现实不符。

(2) 内容不一致:在生成的文本中,模型可能会提供相互矛盾或逻辑上不连贯的信息。

(3) 缺乏依据:生成的信息缺乏来自输入数据的明确支持,似乎是模型“凭空想象”的结果。

RAG 全称为检索增强生成技术(Retrieval-Augmented Generation, RAG),旨在提高问答和文本生成任务的效果。其核心思想是将检索和生成相结合,以更好地解决复杂的自然语言处理任务<sup>[2]</sup>。RAG 技术解决大语言模型机器幻觉的方案特点:

(1) 提供有价值的上下文:通过在检索阶段选择相关文本片段,RAG 为生成模型提供了更有价值的上下文。这使得系统能够更准确地理解用户的问题,并生成更详尽、准确的答案,从而减少了非事实性和内容不一致的幻觉现象。

(2) 提高答案的全面性和准确性:在文本摘要领域,RAG 的应用注重保持全面性和准确性的关键点。通过检索阶段选择最相关的文本片段,生成阶段能够聚焦于保留原文中最重要、最具信息价值的内容,从而生成更具凝练性的摘要,减少了由于缺乏依据而产生的幻觉现象。

(3) 结合外部知识库:RAG 通过结合传统的大语言模型与外部知识库的检索,能够显著提升答案的准确性,减少模型的幻觉现象。这种方法通过利用外部的、非参数化的知识库,与内置于LLM中的参数化知识相结合,有效地弥补了单一模型的知识限制。

## 2.4 基于生成式 AI 技术的智能运维系统应用与测试

在本研究中,选取了一种开源的大语言模型,并结合了 RAG 技术,成功研发了汽轮机智能运维系统。为了训练和优化这个模型,上传了一系列与汽

轮机行业相关的技术文档(图 3)。通过该系统,能够有效地融合通用大模型的知识体系与专有知识库,以解答运维人员在实际操作中遇到的各类问题,同时,该知识库具有持续更新和迭代的能力,从而提升系统的准确性与泛化能力。



知识库文档列表

文档名称	文档状态	操作
汽轮机运行规程.pdf	解析完成 (可以参与问答)	⊕
汽轮机常见故障处理手册.pdf	解析完成 (可以参与问答)	⊕
大型火力发电机轴系故障诊断与处理.pdf	解析完成 (可以参与问答)	⊕
智能电厂关键解决方案.pdf	解析完成 (可以参与问答)	⊕
火电厂智慧电厂关键技术研究与实践.pdf	解析完成 (可以参与问答)	⊕
汽轮机产品说明书.pdf	解析完成 (可以参与问答)	⊕
汽轮机运行说明书.pdf	解析完成 (可以参与问答)	⊕
润滑油系统控制手册.pdf	解析完成 (可以参与问答)	⊕

图 3 系统应用与测试

## 3 结论与展望

著名市场调查机构 Gartner 在 2022 做出预计,到 2025 年生成式人工智能产生的数据占人类全部数据的比例将从目前的 1% 增长到 10%,生成式人工智能将会给人类社会带来深刻的影响与变革<sup>[3]</sup>。基于生成式 AI 技术的智能运维系统作为人工智能在汽轮机运维领域的探索与尝试,通过将传统经验知识沉淀与大语言模型相结合,提供了问答式的人工智能助手,初步实现了大语言模型对结构化、非结构化文本数据的训练与学习。此系统将为汽轮机的运行和维护带来革命性的改变,不仅提高了运

维人员的工作效能,减少了人为错误和延误,还为汽轮机的长期稳定运行提供了有力保障。随着人工智能技术的不断发展和应用,相信这一系统将在未来的汽轮机运维领域发挥越来越重要的作用。

### 参考文献:

- [1] 高展羽,宋放放,马骏. 智慧汽轮机功能及设计难点探讨[J]. 东方汽轮机,2023(2):18-21+39
- [2] 裴丹,张圣林,孙永谦,等. 大语言模型时代的智能运维[J]. 中兴通讯技术,2024,30(2):56-62
- [3] 张熙,杨小汕,徐常胜. ChatGPT 及生成式人工智能现状及未来发展方向[J]. 中国科学基金,2023,37(5):743-750

# 智能制造背景下 XSuperNEST 套料软件 在锅炉板材下料中的应用

侯竹 钟学娇 张勃 杨露平

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

**摘要:** 本文通过对某制造企业板材下料过程的分析, 引入新的排版软件, 对下料效率进行了研究和优化。通过定义阶段、测量阶段、分析阶段、改善实施阶段的工作, 找出了影响下料效率的关键因素, 并采取了相应的改善措施, 下料总用时从每月平均 20 天降低到 14 天, 取得了显著的效果。

**关键词:** 排版软件; 下料效率; 精益六西格玛

中图分类号: TM621; O221.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)04-0034-06

## Application of XSuperNEST Nesting Software in Boiler Plate Cutting under the Background of Intelligent Manufacturing

HOU Zhu, ZHONG Xuejiao, ZHANG Bo, YANG Luping

(Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China)

**Abstract:** Through the analysis of the plate cutting process in a certain manufacturing branch, this paper introduces new typesetting software to study and optimize the cutting efficiency. By carrying out the work in the define stage, measure stage, analyze stage, and improvement implementation stage, the key factors affecting the cutting efficiency were identified, and corresponding improvement measures were taken. Ultimately, the total time for cutting was reduced from an average of 20 days per month to 14 days, achieving remarkable results.

**Key words:** layout software; efficiency of cutting stock; lean six sigma

随着 2022 年国家发改委、能源局对“十四五”火电建设规划进行较大规模的调整, 国家发改委提出了“三个八千万”计划, 即: 2022、2023 年每年开工煤电项目 8 000 万千瓦, 2024 年保障投运煤电机组 8 000 万千瓦, 国内电力建设领域迎来了前所未有的繁荣期, 电力设备市场因此呈现出“小井喷”的增长态势。这一战略不仅加速了电力基础设施的扩张步伐, 为电力设备制造业带来了前所未有的市场机遇, 同时也对生产效率和产品质量提出了更高要求, 某制造企业面临着前所未有的挑战<sup>[1]</sup>。

面对市场需求的激增和交货时限的紧迫, 该制

造企业遭遇了零部件供应链不匹配、生产流程衔接不畅等瓶颈问题, 导致生产进度受阻, 订单延期现象频发, 客户满意度急剧下降。为应对挑战, 该企业采取了强化零部件的配套管理、优化生产流程、确保按时按质完成生产任务等措施, 以重塑客户信任并巩固市场地位。

在此背景下, 国家《中国制造 2025》行动纲领的出台, 为该制造企业指明了转型升级的明确方向。纲领强调智能制造的重要性, 鼓励企业采用先进的信息技术和智能装备, 推动生产过程的数字化、网络化和智能化<sup>[2]</sup>。该企业积极响应国家号召, 致力于通过构

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 侯竹 (1990—), 男, 2014 年毕业于西华大学机械电子工程专业, 本科, 工程师。现任东方电气集团东方锅炉股份有限公司燃烧器分厂制造技术员。

建数字化车间生产运营管理系统,并引入自动化、智能化生产线,实现生产过程的智能化改造。这一举措旨在从根本上解决当前面临的零部件配套与生产衔接难题,同时显著提升生产效率与产品质量,为企业在智能制造领域的关键技术突破奠定坚实基础。

综上所述,面对国家规划带来的市场机遇与挑战,企业紧抓智能制造的发展机遇,通过构建数字化车间、引入智能化生产线以及应用 XSuperNEST 套料软件等措施,在电站锅炉燃烧器这一关键电力设备的生产过程中不断提升板材下料的效率和产品质量,提升产品竞争力,推动企业乃至整个电力设备制造业向更高水平发展。

## 1 项目背景

### 1.1 项目现状

某制造企业计划年出产 8 000 吨电站锅炉燃烧器,月均 667 吨,其中旋流燃烧器预期月产量为 3 台套,板材下料采用激光、火焰、水下等离子等 3 种数控机床切割。

### 1.2 问题挑战

目前该制造企业存在以下问题。

(1) 板材切割效率低:一张板材需多个程序切割,导致切割完成用时多,影响后续收捡效率。

(2) 排版和切割工艺问题:不优化排版和切割工艺,会使切割断断续续,增加单次切割时间,加快易损件损耗,甚至导致零件缺陷报废。

(3) 设备功效未充分发挥:不同设备切割能力不同,需合理分配任务以提高下料效率。

(4) 备料工序问题:存在加班生产和零件配套不及时的情况,影响整体生产效率。

为解决这些问题,在该制造企业数字化车间建设中引进了某公司的自动套料软件 XSuperNEST,本文将结合传统下料方式和引入软件的相关功能后进行详细对比。

## 2 定义阶段

在实际下料的过程中,主要由切割和收捡两步组成,为了便于描述,首先对相关事项定义如公式(1):

$$Y = y_1 + y_2 \quad (1)$$

$Y$ :下料总用时(min); $y_1$ :切割用时(min); $y_2$ :收捡用时(min)。

### 3 测量阶段

在实际下料的过程中,在测量阶段,该制造企业对板材下料的现状进行了数据收集和分析。收集了板材下料的时间、数量、质量等数据。

$y_1$ :切割用时(单位:min,其中 $y_1 = \sum y_{1i}(i=1,2,3,4,\dots)$ )

$y_2$ :收捡用时(单位:min,其中 $y_2 = \sum y_{2i}(i=1,2,3,4,\dots)$ )

备注: $i$ 的取值不同代表不同钢板

如图 1 所示统计了一个月的量,可以发现板材切割和收捡用时超过每月切割生产总用时的 80%。所以本文选择板料切割环节作为改善的讨论对象,成品收捡在其他项目中改善,本文不做讨论。

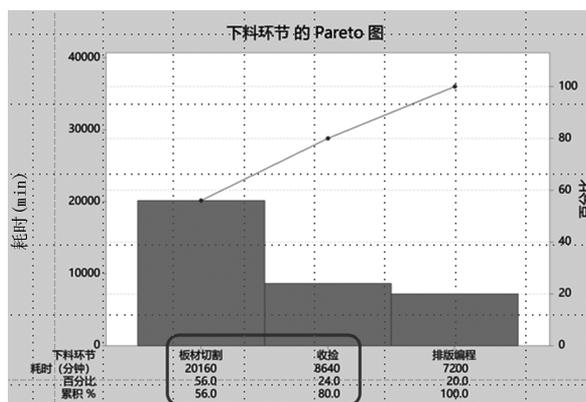


图 1 下料环节时间帕累托图

分析某月在制产品、某项目 2#660 MW 超超临界前后墙对冲燃烧锅炉项目燃烧器(单台炉 36 只)数控下料零件清单(图 2)。(数据来源:生产车间数据处理系统)

序号	名称	数量	规格	材料	厚度	数量	规格	材料	厚度
1	192N6121-1-2	13	S30815	010	34	192N6124-1-6	槽钢	10	Q235B
2	192N6121-1-4	26	Q235B	010	35	192N6124-1-8	槽钢	20	Q235B
3	192N6121-1-6	52	Q235B	06	36	192N6124-2	支腿	30	12C18N09
4	192N6121-1-11	36	Q235B	030	37	192N6124-4	槽钢	5	Q235B
5	1521-04046F121-15	36	Q235B	060	38	192N6125-3	槽钢	1	Q235B
6	1GA01282-1	72	Q235B	012	39	192N6131-1-2	二次夹板	13	S30815
7	1GA01282-3	72	Q235B	012	40	192N6131-2-1	槽钢	18	12C18N09
8	1521-04046F121-18-3	36	Q235B	042	41	192N6131-2-2	槽钢	15	12C18N09
9	192N6121-2-1	18	12C18N09	010	42	192N6131-4	槽钢	9	Q235B
10	1GP00405	36	Q345B	012	43	192N6132-4	槽钢	3	Q235B
11	1GP00404	828	Q345B	012	44	192N6134-1-2	二次夹板	6	S30815
12	192N6121-2-4	36	12C18N09	010	45	192N6134-3	槽钢	5	Q235B
13	192N6121-2-7	18	12C18N09	016	46	192N6135-3	槽钢	1	Q235B
14	192N6121-3	78	12C18N09	016	47	192N6145-1-4	法兰	18	Q235B
15	192N6121-4-2	36	12C18N09	010	48	192N6145-1-7	槽钢	18	Q235B
16	1GP00445	112	Q235A	016	49	192N6145-1-8	叶片	135	12C18N09
17	1GP00705	216	12C18N09	010	50	192N6145-1-8	槽钢	18	Q235B
18	支腿	144	Q235B	08	51	192N6145-1-8	支腿	18	Q235B
19	1GP00425	144	Q235A	020	52	192N6145-10	法兰	54	12C18N09
20	192N6121-3-3	72	Q235B	016	53	192N6145-10	槽钢	18	Q235B
21	192N6121-6	9	Q235B	010	54	192N6145-11	支腿	54	12C18N09
22	1GP00420	36	Q235B	050	55	192N6145-11	支腿	18	Q235B
23	1GA00871-1	36	Q235B	020	56	192N6146-1-1	法兰	18	Q235B
24	1GA00873-2	36	Q235B	012	57	192N6146-1-2	叶片	135	12C18N09
25	1GA00875-1	72	Q235A	08	58	192N6147-1-4	法兰	6	Q235B
26	192N6125-2-1	72	Q235A	08	59	192N6147-1-7	槽钢	18	Q235B
27	192N6125-2-1	8	12C18N09	010	60	192N6147-1-8	叶片	45	12C18N09
28	192N6122-2-3	8	12C18N09	06	61	192N6147-3	支腿	6	Q235B
29	192N6122-3-2	8	12C18N09	06	62	192N6147-4	法兰	6	Q235B
30	192N6122-3-3	16	Q235B	016	63	192N6147-8	支腿	18	12C18N09
31	192N6122-3-4	152	Q235B	016	64	192N6147-9	法兰	6	Q235B
32	192N6125-5	3	Q235B	010	65	192N6148-1-2	叶片	45	12C18N09

图 2 下料零件清单图

从图 3-4 中看出,单台燃烧器数控下料零件数量超 3 000 多件,材质主要有 5 种,其中以 Q235B、12Cr18Ni9、Q345B 为主;厚度有 11 种,集中在 850 mm 以下。材质和厚度种类多是燃烧器产品一大特点,同时也对下料效率带来一定影响。根据以往经验,往往把  $\delta 10$  mm 以下碳钢和所有不锈钢材质钢板放在水下等离子切割机进行。

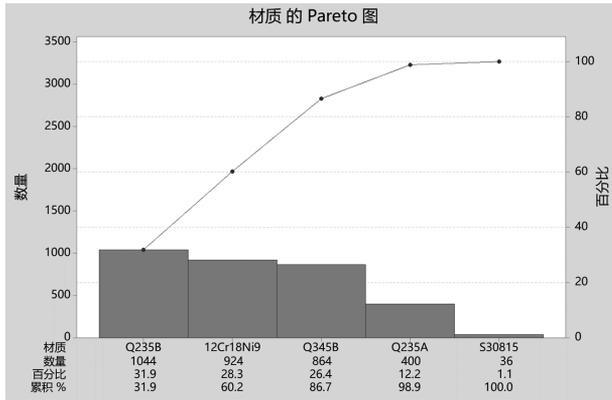


图 3 材质数量帕累托图

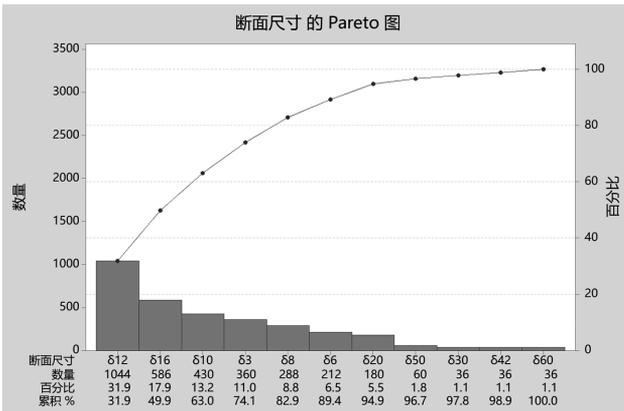


图 4 断面尺寸数量帕累托图

从图 5 中可以看出一共有 19 种材质厚度的零件,不同材质厚度的零件数量没有呈现出明显区别。但值得关注的是 Q345B/ $\delta 12$  mm 零件总数最多有 828 件,S30815 材质零件最少只有 36 件;12Cr18Ni9 和 Q235B 不同厚度零件数量都比较多。

从图 6 零件种类条形图反映出一共有 54 种不同的零件,且材质为 Q235B 和 12Cr18Ni9 的零件种类最多,总占比超 85 %。

由于该制造企业有激光、火焰、水下等离子等 3 种切割设备,收集数据分析后得知三台设备切割同材质厚度钢板速度能力不同,激光切割机比另外两台设备切割速率都快得多,且切割厚度能力有交叉

点,如何合理分配使三台设备同时发挥出最大产能,是值得考虑的问题。

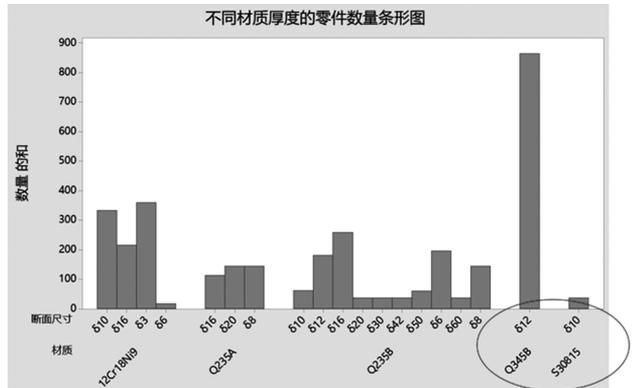


图 5 材质规格数量条形图

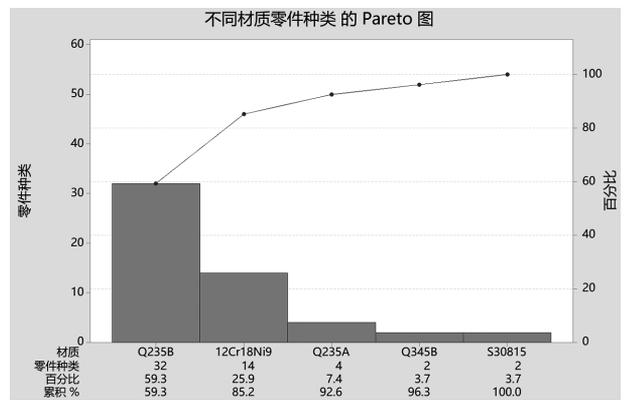


图 6 材质零件种类帕累托图

## 4 分析阶段

在分析阶段,该制造企业对影响板材下料效率的因素进行了深入分析。通过 CE 矩阵图等工具,分析验证后,找出了影响板材下料效率的因子有四:排版软件功能不足、排版人员绘图不熟练、支撑条间隙大、小零件切割完掉落或翘起、零件间距太小,如图 7。

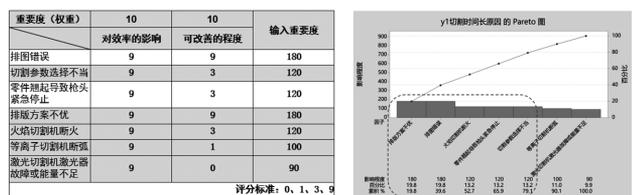


图 7  $y_1$  切割时间长原因权重帕累托图

## 5 改善、实施阶段

针对排版软件功能不足的问题,该制造企业决

定采用 XSuperNEST 自动套料软件予以解决。该软件功能强大,能够将生产计划中的工件依据零件图号、材质规格、项目名称等信息,直接制成 EXCEL 表格模版进行导入,并自动对所有工件按选项进行归类。它能通过内部算法和预设引入引出设置等参数,计算出所需所有工件的最优排列组合并不断优化。同时,还能通过设置不同的零件间隙,不同的零件角度限定,最大化的利用板材,同时确保切割完后所剩板材边角整齐。

### 5.1 两种方式套料对比

该制造企业直接以生产所需的一次周计划加工工件来进行比较。可以更直观地阐明批量表格导入和算法的差异所导致的效率对比情况。

#### 5.1.1 手工套料方式

手工套料方式是指编程人员根据工件的大小进行排版,先大后小,然后根据所需要的数量进行复制,手工排序。工件的来源则是将生产周计划需要下料的工件按照材质、厚度、数量手动整理,此过程耗费时间较长,如图 8 所示。

手工套料算法的操作流程如下:首先,将需要下料的工件整理妥当,在套料软件中打开所需工件的图纸,并将其导入。导入完成后,编程人员依据工件的形状,从所有工件图形中挑选出面积最大的图形率先进行排版,然后根据所需的数量进行增加或减少,通过手工进行排序,再依次对小件进行排版。此次排版内容 57 种零件,4 种规格,总共用时 3 h,用 1 500 mm×6 000 mm、1 500 mm×3 000 mm 等尺寸的板材 7 张。现展示 S30408 δ10 mm 零件排版情况,如图 8,使用板材 1 800 mm×5 400 mm 1 张,钢板有效利用率为 75%。

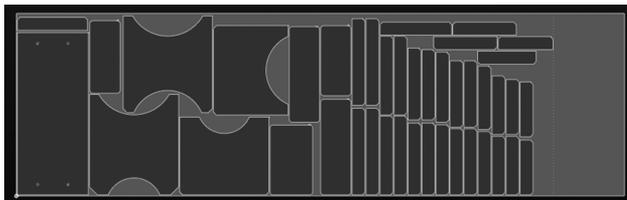


图 8 S30408 δ10 mm 手工套料零件排版图

#### 5.1.2 超级算法套料方式

超级算法即:HD-SuperNET,是一种强大的智能算法,为套料软件 XSuperNEST 特有的、能够自动拆分和排列复杂的零件图形,实现高效的套料任务。

该引擎通过该算法将图形拆分为多个零件,并生成套料任务,同时支持按时间排料,即在指定的时间间隔内计算出最佳的排版样式。通过不断尝试不同的套料配置,能够在给定的时间间隔内寻找最佳的套料方案,直到无法再增加效益或用户停止当前效益的并接受此方案为止。

该制造企业将同一份生产周计划 EXCEL 表格,用排版软件一次性导入,软件自动生成各项信息如图 9 所示。

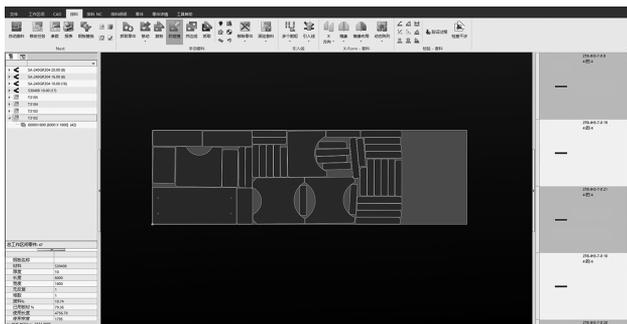


图 9 S30408 δ10 mm 超算套料零件排版图

依据板材的规格、厚度等不同属性,自动将所需下料的工件在左侧栏归类。在配置好各板材的数量和尺寸后,选用超级算法进行套料。以 S30408 δ10 mm 为例,套料结束后的结果如图 9 所示。此次套料所使用的板材尺寸为 1 800 mm×4 700 mm,共 1 张,整个计算过程用时 3 min,板材有效利用率达到 83%,比手动套料提升 8%,且切割结束后所剩板材的边角整齐,利于存放和二次使用。

### 5.2 留割工艺的应用

软件提供的留割工艺又称为微连工艺,是指在切割工件轮廓的时候跳过一小段轮廓不切割,使零件在切割后仍然保持连接,从而避免零件散落或变形。通常用于切割薄板或对零件精度要求较高的场合。

小零件留割的运用,保证了零件切割后不会翘起,也不会掉落。减少了大量切割中断时间(这类小零件数量少则几百件,多则几千件),也提高了零件表面质量。例如图 10 摇臂零件单支燃烧器 23 个,以每月出产 120 支燃烧器计算共 2 760 件。加微连接后单件节约切割中断用时约 0.5 min,每月共计 1 380 min,减去单件需再花费 10 s 收捡,共可以节约 920 min。

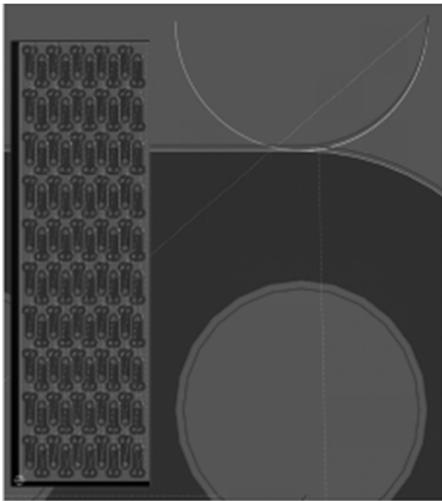


图 10 摇臂零件留割工艺排版图

燃烧器罩壳组件面板零件,外尺寸通常为 1 990 mm×1 790 mm。来料板材尺寸为 6 000 mm×1 800 mm,排版图零件间距和板边距小(5 mm~7 mm)。实际切割时因平台不平整,导致切割后翘起撞枪,使切割中断,如图 11。通过在排版图右上角添加留割,使其与母材连接,成功避免翘起后导致切割中断。单板可节约时间约 6 min,以一个月 120 支燃烧器计算,共节约 240 min。

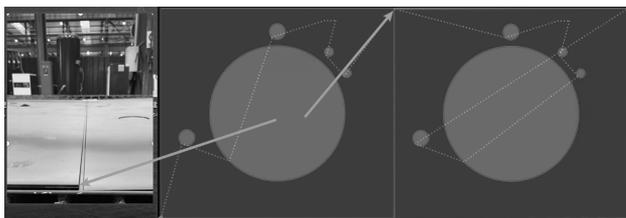


图 11 切割工艺应用排版图

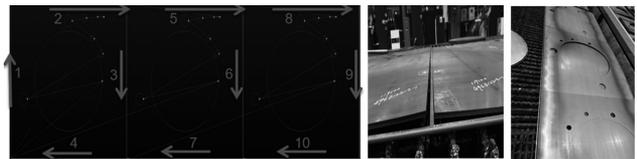
### 5.3 共边和预切割工艺的应用

共边切割是一种优化排版的切割工艺,它通过将多个零件的边缘对齐,使它们共享一条切割边,从而减少切割路径和切割时间,提高板材利用率,结合预切割功能让效率更上一层楼。

对燃烧器罩壳组件面板零件多次切割后。发现若采用传统切割方式(即单个零件逐一切割),由于激光切割时产生的热效应和平台栅格对零件支撑不平衡以及板材本身的残余应力等影响因素,单个面板零件切割完成后有翘起的概率,虽加了留割工艺,但不能完全避免,加之受板材尺寸限制,相邻零件距离较小(约为 7 mm),进而导致切割头经过上一零件轮廓边缘时,有撞击的风险。这种撞击轻

则导致零件无法割穿,重则导致切割头损坏。

针对这种情况,运用“共边+预切割”切割工艺,改善切割方法。避免了切割头撞击的风险,提高了切割质量也大大提高生产效率,节约能源。且这种切割工艺能推广应用到多种形状规格的零件,提高整体钢板切割下料效率,如图 12。



(a) 外轮廓切割路径示意图

(b) 改进前后切割对比图

注:其中路径 3、6 为共边切割线。路径 2、4、5、7 向下一零件相邻轮廓预切割约 150 mm。

图 12 切割工艺应用排版图及对比图

### 5.4 合理分配设备任务量

根据设备切割能力和效果以及燃烧器后续装焊顺序考虑,对零件切割进行以下初步分配:

(1) 火焰切割厚板较稳定,所以将  $\delta 16$  mm 以上碳钢板分配到火焰切割;

(2) 考虑激光切割机比火焰和水中切割速度都快很多,同时根据前面阶段数据得知 Q235B 和 12Cr18Ni9 材质厚度的零件数量都比较多,所以将  $\delta 16$  mm 以下这两种材质厚度绝大部分零件分配到激光切割;

(3) 两台水下设备切割不锈钢能力相当。考虑到一次风组件、内二次风组件、外二次风组件的装焊同时进行,将外二次风上下法兰和面板零件分配到两台水下设备;

(4) 涉及后续机加钻孔工序的零件应优先下料。此类零件多为一次风组件和三次风组件上的法兰零件。

经过以上各项措施,下料总用时从每月平均约 28 800 min(20 天)降低到约 20 160 min(14 天),效率提升 30%,取得了显著的效果,产量达到了历年新高。经预测减少了喷嘴和陶瓷环损耗量,节省电费、人工费合计约 20 余万元/年。

## 6 不足之处及改进方法

### 6.1 不足之处

#### 6.1.1 定制化程度不足

尽管 XSuperNEST 提供了强大的套料引擎和丰富的功能,但在某些特定行业如锅炉制造中,可能

需要更加定制化的解决方案。例如,锅炉板材的规格、材质和切割要求可能较为特殊,现有的套料算法可能无法完全满足这些特定需求。

### 6.1.2 系统集成难度

在实际应用中,XSuperNEST 需要与企业的其他管理系统(如 ERP、PDM 等)进行集成,以实现数据的无缝传输和共享。然而,不同企业的管理系统差异较大,集成过程中可能会遇到兼容性问题,增加了实施难度和成本。

### 6.1.3 操作复杂度

尽管 XSuperNEST 提供了直观的操作界面和详尽的用户手册,但对于一些非专业用户来说,仍然可能存在一定的学习曲线。特别是在面对复杂的锅炉板材下料任务时,操作人员需要掌握更多的技能和知识。

### 6.1.4 余料管理局限性

尽管 XSuperNEST 在余料管理方面表现出色,但在处理某些特殊形状或大小的余料时,可能仍然存在局限性。此外,对于长期积累的余料,系统可能无法自动进行最优化的再利用规划。

## 6.2 改进方法

### 6.2.1 加强定制化开发

针对锅炉制造行业的特殊需求,可以与 XSuperNEST 的供应商合作,进行定制化开发。通过调整和优化套料算法,使其更加适应锅炉板材的规格、材质和切割要求。同时,可以开发专用模块,以满足锅炉制造企业的特定需求。

### 6.2.2 优化系统集成方案

在系统集成方面,可以加强与不同管理软件供应商的沟通与合作,共同制定更加兼容和灵活的集成方案。同时,可以引入专业的系统集成服务提供

商,为企业提供一站式的解决方案,降低实施难度和成本。

### 6.2.3 提升用户培训和支持

加强对操作人员的培训和支持力度,提供详尽的操作指南和在线帮助文档。通过定期举办培训班、在线研讨会等方式,帮助操作人员掌握更多的技能和知识。同时,建立快速响应的支持体系,及时解决用户在使用过程中遇到的问题。

### 6.2.4 完善余料管理功能

针对余料管理的局限性,可以进一步优化 XSuperNEST 的余料管理功能。例如,引入更先进的算法和技术手段,实现对特殊形状和大小余料的自动识别和优化利用。同时,可以开发专门的余料再利用模块,帮助企业对长期积累的余料进行再规划和再利用。

## 7 结语

在当前的经济环境下,机械制造企业所面临的数字化、绿色化、精益化转型问题越来越重要。为了应对这些挑战,本文通过以精益六西格玛的思路对提高板材下料效率,降低生产成本,提高产品质量进行了介绍。以引入新的排版软件为契机,优化了排版方案和切割工艺,提高了板材利用率和切割质量;本文的实践和分析,为同类企业在生产管理改革中提供一定参考和启示。

## 参考文献:

- [1] 宋韬惠. 通过多种工艺的混合应用提升火焰切割作业效率的方法[J]. 煤矿机械, 2019, 40(2): 82-85
- [2] 孙春华, 陈皓辉, 刘华明. 复杂曲面整体叶轮 CAD/CAM 技术研究[J]. 高新技术通讯, 2003(6): 51-53

# 掺烧低灰熔点烟煤燃烧系统改造应用

石川<sup>1</sup> 李盼<sup>2\*</sup> 曹华<sup>1</sup> 缪森<sup>2</sup> 冉燊铭<sup>2</sup>

1. 国能长源汉川发电有限公司, 湖北 汉川 432300; 2. 能源清洁低碳热转化利用技术与装备四川省重点实验室, 成都 611731

**摘要:**介绍了汉川公司1 000 MW 等级超超临界燃煤锅炉机组掺烧低灰熔点烟煤的改造,改造包括燃烧系统、贴壁风改造、水冷壁优化改造等。改造后锅炉实现掺烧低灰熔点烟煤比例达到70%时炉膛无明显结焦,锅炉出口烟气NO<sub>x</sub>降至240.31 mg/Nm<sup>3</sup>(O<sub>2</sub>=6%,标基干态);100%负荷飞灰含碳量及CO排放浓度显著降低(飞灰含碳量低于0.5%;空预器出口烟气中CO浓度低至1.5×10<sup>-5</sup>);锅炉效率得以提高,提升至94.16%;机组经济性显著提高。

**关键词:**1 000 MW 等级超超临界锅炉;低灰熔点烟煤;燃烧系统改造;掺烧改造

中图分类号:TK222

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0040-05

## Application of Retrofitting the Combustion System for Blending Low-ash Melting Point Bituminous Coal

SHI Chuan<sup>1</sup>, LI Pan<sup>2\*</sup>, CAO Hua<sup>1</sup>, MIAO Miao<sup>2</sup>, RAN Shenming<sup>2</sup>

(1. CHN Energy ChangYuan Hanchuan Power Generation Co., Ltd., 432300, Hanchuan, Hubei, China;

2. Clean Energy Low-Carbon Thermal Utilization Technology and Equipment Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** This article introduces the retrofitting of a 1 000 MW ultra supercritical coal-fired boiler unit in ChangYuan Hanchuan power plant by co-combustion low ash melting point bituminous coal. This transformation includes combustion system transformation, secondary air flow field optimization transformation, wall mounted air transformation, water wall optimization transformation, etc. After this transformation, the boiler achieved no coking in the furnace when the ratio of blended low ash melting point bituminous coal reached 70%, and the NO<sub>x</sub> content in the flue gas at the furnace outlet decreased to 240.31 mg/Nm<sup>3</sup>(O<sub>2</sub>=6%, standard dry state). The carbon content and CO emission concentration of 100% load fly ash are reduced (the combustible content of boiler fly ash is less than 0.5%; the CO content in the flue gas at the outlet of the air preheater is as low as 1.5×10<sup>-5</sup>); the high-temperature corrosion in the furnace walls has been effectively alleviating, reaching a mild level; the boiler efficiency has been improved to 94.16%. The economic efficiency of the unit is improved.

**Key words:** 1 000 MW ultra supercritical unit; low-ash melting point bituminous coal; combustion system transformation; co-combustion transformation

我国低灰熔点煤分布广泛,资源量巨大,主要分布在我国北部,此外还有云、贵、川的褐煤。这些煤都大量地用于发电<sup>[1-2]</sup>。因此,为合理利用我国低灰熔点煤炭资源,一些电厂会适当掺配非设计煤种,提高经济效益<sup>[3-15]</sup>,这要求火电机组适应掺烧甚至全燃低灰熔点煤炭资源的能力。同时,在“双

碳”背景下,国家能源集团正在实施煤电一体化政策,鼓励电厂改烧神华煤<sup>[16-21]</sup>。掺烧烟煤一方面有利于减少污染物排放,响应国家环保政策要求<sup>[22-23]</sup>;另一方面,掺烧烟煤对于提升锅炉效率、提高电厂运行经济性具有重要意义<sup>[24-27]</sup>。

因此,一些已有的非燃烟煤机组锅炉存在掺烧

收稿日期:2025-05-07

作者简介:石川(1991—),男,硕士,工程师,从事火电厂锅炉检修管理工作。

李盼(1993—),女,硕士,工程师,从事火力发电设备设计研发。通信邮箱:lipan19940809@163.com。

甚至全燃低灰熔点烟煤的需求,需要进行掺烧低灰熔点煤种适应性改造。

汉川公司锅炉已开展掺烧低灰熔点烟煤的工作,采购和掺烧的低灰熔点烟煤主要为神混系列。神混煤具有水分稍高,灰分较小,挥发分较高,灰熔点偏低等特点,属于易燃尽、易结焦煤种。随着低灰熔点烟煤掺混比例的增大,锅炉出现结焦加重、掉焦阻塞干渣机、烟温偏差增大等现象。因此,为提高机组的适应性和生存能力及响应“煤电一体化战略”政策,汉川电厂 1 000 MW 等级超超临界燃煤锅炉机组掺烧低灰熔点烟煤的改造具有迫切性和必要性。

## 1 锅炉概况

国电汉川电厂#5 机组为 1 000 MW 等级超超临界燃煤机组,锅炉型号为 DG 2991/27.46-II 型,配 1 000 MW 汽轮发电机组,于 2012 年建成投产。该机组锅炉为超超临界参数变压直流炉,单炉膛,一次中间再热,平衡通风,露天布置,前后墙对冲燃烧,固态排渣,全钢构架,全悬吊结构  $\pi$  型锅炉。

炉膛由两种不同的水冷壁组成,前后墙共布置 6 层 48 只煤粉燃烧器。

过热蒸汽汽温调节是通过燃料、给水比和两级喷水减温方式,再热汽温调节采用烟道挡板调节,在冷再进口装有事故喷水器。制粉系统采用中速磨冷一次风机正压直吹式制粉系统,配 6 台磨煤机。

锅炉原主要设计参数如表 1 所示。

表 1 锅炉原主要设计参数

名称	单位	TMCR	BRL
过热蒸汽流量	t/h	2 991.3	2 904.18
过热器出口蒸汽压力	MPa(g)	27.46	27.39
过热器出口蒸汽温度	℃	605	605
再热蒸汽流量	t/h	2 502.39	2 423.08
再热器进口蒸汽压力	MPa(g)	5.88	5.68
再热器出口蒸汽压力	MPa(g)	5.68	5.48
再热器进口蒸汽温度	℃	369	363
再热器出口蒸汽温度	℃	603	603
省煤器进口给水温度	℃	296	293

该锅炉原设计煤种为混煤(平顶山烟煤:榆神烟煤:陕西贫煤=2:1:1),改造的设计煤种为神混

低灰熔点烟煤、高灰熔点烟煤进行混合,低灰熔点烟煤:高灰熔点烟煤=70:30,采用煤场掺混,炉内燃烧的方式,改造后煤质数据见表 2。

表 2 改造适应煤质

序号	项目	单位	高灰熔点煤种	低灰熔点煤种	改造适应煤种
1	全水分	%	12.4	10.4	10.3
2	空气干燥基水分	%	4.60	6.24	4.69
3	收到基灰分	%	16.85	14.00	16.54
5	干燥无灰基挥发分	%	35.98	33.21	34.12
8	收到基低位发热量	MJ/kg	21.33	23.02	22.01
9	收到基碳	%	56.65	61.83	59.40
10	收到基氢	%	3.16	3.17	3.10
11	收到基氮	%	0.86	0.88	0.85
12	收到基氧	%	9.77	9.43	9.49
13	收到基全硫	%	0.31	0.29	0.32
14	变形温度	℃	1 420	1 130	1 260
	煤灰 软化温度	℃	1 450	1 150	1 280
	熔融性 半球温度	℃	1 490	1 170	1 300
	流动温度	℃	>1 500	1 210	1 340
15	可磨性指数		94	66	69
	二氧化硅		43.91	50.93	49.03
	三氧化二铝		39.10	23.47	29.61
	三氧化二铁		4.88	9.69	7.60
	氧化钙		5.83	8.78	6.56
16	煤灰 氧化镁		1.04	1.21	1.14
	成分 三氧化硫		2.02	2.00	2.27
	二氧化钛		1.32	0.73	1.03
	氧化钾		0.72	1.55	1.29
	氧化钠		0.69	0.91	0.84
	五氧化二磷		0.36	0.49	0.42

其中,改造适应煤种为神混低灰熔点烟煤、高灰熔点烟煤进行混合,混合比例为低灰熔点烟煤:高灰熔点烟煤=70:30。

从煤质分析看,具有中等结渣(普华煤质判别)倾向,需要关注炉膛结渣问题。

## 2 改造分析及方案

通过对煤质结焦性和锅炉运行状况分析,大比例掺烧低灰熔点烟煤后,须对机组的燃烧系统、贴壁风系统、水冷壁等进行全方位改造及相应优化改造<sup>[2]</sup>。

### 2.1 燃烧系统改造方案

锅炉原燃烧系统前后墙布置 6 层 48 只煤粉燃

烧器。制粉系统采用中速磨冷一次风机正压直吹式制粉系统,配6台磨煤机。

煤质改变后,由于燃料中的挥发份升高,煤的着火点降低。通过燃烧器改造,结合降低 $\text{NO}_x$ 的性能提升改造,将现旋流煤粉燃烧器更换为最新型低 $\text{NO}_x$ 旋流燃烧器,有效提升燃烧器的整体可靠性。新型燃烧器通过多种关键技术的综合应用,使煤粉在着火前形成“三高一低”(高温回流烟气、高煤粉浓度、高湍动度和低氧量)区,实现低负荷稳燃能力强、燃烧稳定高效、 $\text{NO}_x$ 排放低、煤种适应性广等主要性能指标。

燃烧系统改造具体方案如下。

#### (1) 炉膛差异化热负荷布置

影响炉膛结焦安全性的锅炉热力特性指标主要体现在炉膛容积放热负荷 $q_v$ 、炉膛断面放热负荷 $q_F$ 和燃烧器区域壁面放热负荷 $q_B$ ,而断面放热负荷 $q_F$ 和壁面放热负荷 $q_B$ 共同构成了燃烧器区域的燃烧强度,燃烧强度越大对煤粉着火稳燃有利,但对炉膛结焦的不利影响较大。

改造设计条件中炉膛截面、容积均未改变,主要热力特性指标不会发生较大改变。由于项目改造前燃用较低挥发分煤种,各指标处于相关设计规范的推荐值范围,若掺烧大比例低灰熔点烟煤,入炉煤的灰熔点下降,在现有炉膛断面、容积不改变的边界条件下,炉膛断面放热强度和容积放热强度变化不大,但燃烧器区域实际壁面热负荷不一致,表现出中上层高温区放热强度高,燃烧强度大,不利于降低炉膛温度,防止炉膛结焦。

锅炉燃烧器等间距布置,由于炉内热负荷高,主要热力特性指标已不满足掺烧大比例低灰熔点烟煤需要,会导致炉膛及屏底结焦严重,因此,拟通过改造调整燃烧器层间距并采用差异化热负荷布置方式,以均衡燃烧器区域壁面热负荷。

原设计前后墙6层48只煤粉燃烧器总数量保持不变,对燃烧器布置方式进行调整,并适当调整燃烧器间距。将中层前墙燃烧器下移600mm,中层后墙燃烧器上移400mm,前后墙各层燃烧器不等间距布置,重新均衡燃烧器区域实际壁面热负荷,炉膛高温区热负荷下降,火焰平均温度水平下降,有利于防止炉膛结焦。燃烧设备布置方式见图1。

(2) 更换32只煤粉燃烧器为新型OPCC超低 $\text{NO}_x$ 旋流煤粉燃烧器。

(3) 等离子层燃烧器的等离子点火装置利旧,更换其二、三次风配风组件。

(4) 原前后墙下层燃尽风位置不变,更换16只燃尽风调风器。

(5) 新增燃烧器冷却风系统,风源采用热一次风,对备用层燃烧器进行冷却保护。

(6) 布置新型贴壁风,前后墙贴壁风喷口适当下倾,风源采用高压风,另外增加侧墙贴壁风,侧墙贴壁风从热二次风总风道引风。

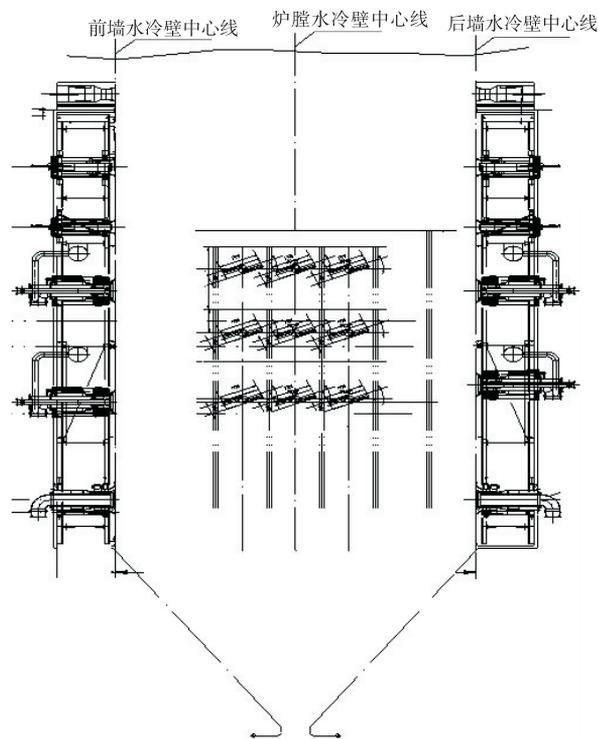


图1 燃烧设备布置示意图

## 2.2 燃尽风改造方案

燃尽风改造主要原则为在确保燃烧还原空间的同时设计适当的燃尽风率,以兼顾煤粉燃尽和降低 $\text{NO}_x$ 排放的统一。

燃尽风改造通过选取合理的燃尽风风率(30%),达到全炉膛空气度分级燃烧的目的,并通过多种调节手段,同时兼顾 $\text{NO}_x$ 控制与煤粉的燃尽。

根据改造方案设计,改造后前后墙共布置16只燃尽风调风器和4只侧燃尽风调风器,前后墙靠近侧墙燃尽风适当侧移,按照新风率设计参数改造燃

尽风调风器,在燃尽风调风器设计中,采用旋流+直流风的结构,燃尽风调风器将燃尽风分为两股独立的气流送入炉膛。由于锅炉在实际运行中沿炉膛宽度方向风、粉混合均匀性不是非常好,而沿炉膛宽度方向氧量调节手段相对比较有限,为了更进一步控制高效燃烧和低 NO<sub>x</sub>,新燃尽风调风器采用喷口水平摆动和风量自动调节燃尽风技术,设置水平摆动式喷口,该燃尽风技术可以更好的调节炉膛横截面的氧量分布,覆盖炉膛面积更广,进一步控制高效燃烧。

### 2.3 贴壁风改造方案

贴壁风技术是一种简单可靠,且属于一次性投资改进、长期可用的技术方案。本项目改造采用新型贴壁风技术,即前后墙与侧墙相结合、高压风与低压二次风相结合的多重配风技术。

根据改造后燃烧器布置位置的调整对现贴壁风进行布置。

新型贴壁风技术特点主要包括:

#### (1) 下喷贴壁风技术

技术优势:①喷口射流下喷,增加侧墙气流上升阻力,减少气流向侧墙扩散,从源头减弱还原性气氛产生;②喷口射流下喷,加强贴壁风气流和侧墙气流的混合,促进 CO 的氧化燃烧;③喷口射流下喷,提升贴壁风气流沿炉膛深度方向的覆盖范围,降低侧墙中部区域还原性气氛。

#### (2) 燃尽风侧移技术

技术优势:①燃尽风和未燃尽煤粉颗粒更强的混合燃烧,降低屏底温度;②减少煤粉上升气流阻力,有效抑制煤粉气流向侧墙移动。

### 2.4 冷却风改造方案

改造方案对处于炉膛热负荷高区域中上层燃烧器采用新型冷却风系统,新冷却风系统风源:热一次风,通过风管接入燃烧器前端的方式。燃烧器投入时,燃烧器对应的冷却风阀门关闭;燃烧器停运时,打开对应冷却风阀门,投入燃烧器冷却风,起冷却保护作用。由于一次风压力高,新型燃烧器冷却系统可有效提高燃烧器运行的可靠性,提高对停运燃烧器的冷却效果。燃烧器冷却风结构见图 2。

下层燃烧器由于其处于炉内火焰低温区,且长期运行,不考虑冷却风配置。

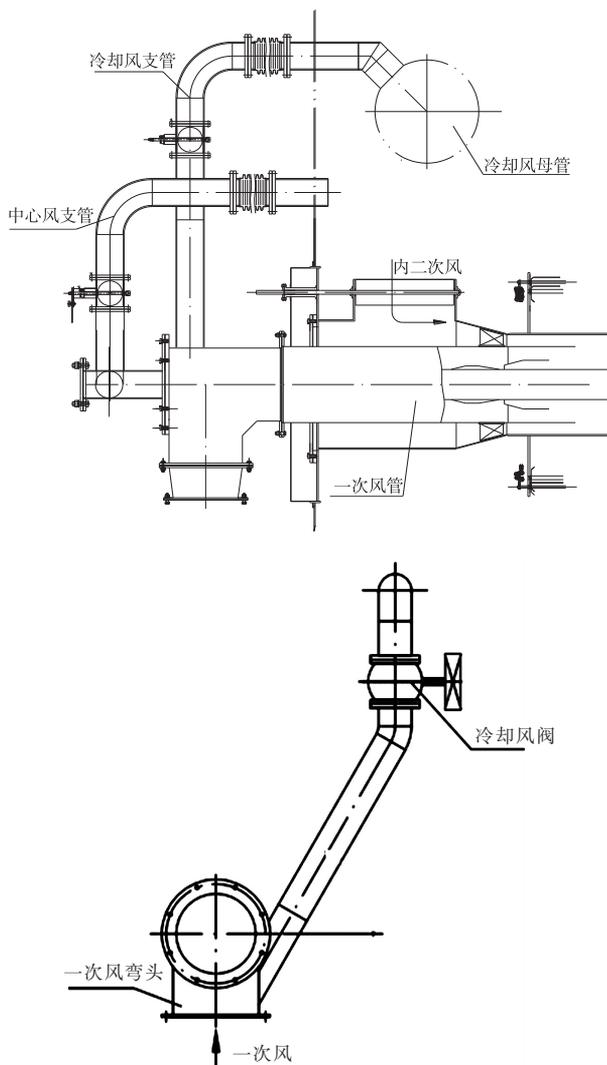


图 2 燃烧器冷却风结构

## 3 改造效果

经过上述掺烧低灰熔点烟煤改造后,锅炉运行表现优异,具体如下。

(1) 锅炉改造后实现高比例掺烧低灰熔点烟煤,掺烧比例高达 70%,锅炉燃烧状况良好,通过炉渣状况和结焦监视系统观察,试验期间锅炉受热面无明显结焦现象,见图 3。

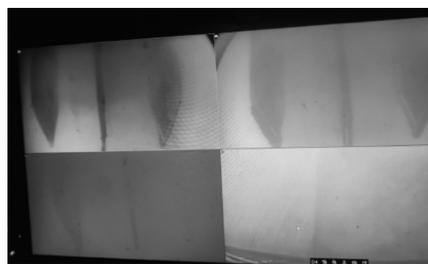


图 3 结焦监视系统画面

(2)改造后 100 % 负荷下, 锅炉飞灰可燃物含量平均值 0.32 %, 空预器出口烟气中 CO 含量平均值  $1.5 \times 10^{-5}$ , 锅炉效率实际平均值 94.16 %, 均满足合同考核值要求, 如表 3 所示。

表 3 改造前后效率对比

项目	单位	实测值	合同考核值
飞灰可燃物含量	%	0.32	≤1.8
空预器出口 CO	$10^{-5}$	1.5	≤35
锅炉效率	%	94.16	≥94.12

(3)改造后 100 % 负荷下省煤器出口 NO<sub>x</sub> 排放浓度实际平均值为 240.31 mg/Nm<sup>3</sup>, 低于合同约定考核值 250 mg/Nm<sup>3</sup>(表 4)。

表 4 改造前后 NO<sub>x</sub> 对比

名称	原工程	改造后	
		实测值	合同考核值
燃烧器	OPCC-III	OPCC-IV	
燃尽风	两层燃尽风	只保留下层燃尽风并上移	
上层燃烧器到燃尽风的间距 m	7.150 1	7.150 1	
上中层燃烧器间距 m	5.819 8		
中下层燃烧器间距 m	5.819 8	中层错层布置	
NO <sub>x</sub> 排放保证值	275		
mg/Nm <sup>3</sup>	(运行)	240.31	≤250

#### 4 结语

本文通过汉川电厂 1 000 MW 等级超超临界燃煤锅炉机组大比例掺烧低灰熔点烟煤的改造, 最终成功实现了锅炉掺烧低灰熔点烟煤比例达到 70 %。改造后经性能测试试验, 锅炉运行情况良好, 机组各参数均满足设计要求。根据电厂长时间运行煤质掺配状况和运行观察, 炉膛基本无结焦现象, 锅炉省煤器出口 NO<sub>x</sub> 排放达标, 100 % 负荷飞灰含碳量及 CO 排放浓度显著降低, 锅炉效率提高, 机组经济性显著提高。

#### 参考文献:

[1] 熊友辉, 孙学信. 我国低灰熔点煤的分布及其在电站中的应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 1997(5): 33-36  
 [2] 董鸿业. 电厂锅炉混煤掺烧技术研究与实践[J]. 中国设备工程, 2021(15): 168-169

[3] 王加勇, 陈伟, 邬平, 等. 330 MW 机组锅炉低灰熔点烟煤掺烧试验优化研究[J]. 锅炉制造, 2020(6): 1-4  
 [4] 孔亮, 易宁, 张健, 等. 燃用无烟煤的 660 MW 超临界机组锅炉选型技术经济分析[J]. 电力与能源, 2015, 36(6): 858-863  
 [5] 杨忠灿, 姚伟. 电厂锅炉变煤种掺烧问题研究[J]. 中国电力, 2010, 43(11): 42-45  
 [6] 陈晶玲, 车美美, 程健林, 等. 电厂锅炉混煤掺烧技术研究与实践[J]. 冶金与材料, 2020, 40(6): 34-35  
 [7] 苗长信, 刘志超, 郭玉泉, 等. 300 MW 机组锅炉掺烧无烟煤对比试验[J]. 中国电力, 2007(10): 5-8  
 [8] 周新频, 张乃方. 城市燃气输配系统的安全管理[J]. 煤气与热力, 2012, 32(9): 41-45  
 [9] 王春波, 李永华, 陈鸿伟. 混煤燃烧特性研究(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2005(18): 97-103  
 [10] 陈国栋, 袁益超, 王波. 电厂锅炉混煤燃烧技术应用现状及分析[J]. 锅炉技术, 2014, 45(5): 53-57  
 [11] 李皓宇, 朱宪然, 刘彦鹏, 等. 600 MW 机组锅炉深度掺烧劣质煤技术[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 99-104  
 [12] 王琦. 电厂锅炉混煤掺烧技术的研究分析[J]. 新型工业化, 2022, 12(2): 204-206  
 [13] 裴杰, 王建勋, 白旭东, 等. 600 MW 机组锅炉掺烧劣质烟煤的性能试验研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(2): 66-69  
 [14] 陈红, 周安鹏, 耿向瑾, 等. W 火焰锅炉低负荷条件下掺烧煤泥的数值模拟[J]. 广东电力, 2018, 31(03): 15-20  
 [15] 宋小俊. 电厂锅炉混煤掺烧技术研究与实践[J]. 石化技术, 2020, 27(01): 111+152  
 [16] 李天罡. 基于循环经济的煤电一体化战略探索[J]. 现代营销(下旬刊), 2018(12): 7  
 [17] 李晨源. 330MW 锅炉燃用神华煤防结渣优化改造研究[D]. 华中科技大学, 2020  
 [18] 程志强, 王桂芳, 姚伟, 等. 安全经济燃用神华煤的几点建议. 热力发电, 2002(3): 62-64  
 [19] 武振新, 张清峰, 赵振宁, 等. 电站锅炉燃用神华煤的安全性分析. 华北电力技术, 2013(11): 6-10+14  
 [20] 王品刚, 顾大钊, 宋畅, 等. 神华煤安全洁净高效燃用技术研究及应用. 神华科技, 2009, 7(1): 39-46  
 [21] 韩建国, 蒙毅, 程志强, 等. 电站锅炉燃用神华煤经济性分析[J]. 热力发电, 2003(2): 5-7  
 [22] 夏季, 彭鹏, 华志刚, 等. 燃煤电厂分磨掺烧方式下磨煤机组合优化模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(29): 1-8  
 [23] 毛晓飞, 吴英, 曾过房, 等. 700MW 机组锅炉混煤掺烧试验研究[J]. 热力发电, 2014, 43(5): 69-74  
 [24] 苏攀, 于鹏峰, 刘林波, 等. 600 MW 超超临界锅炉混煤掺烧下灰渣可燃物突升原因分析[J]. 锅炉技术, 2019, 50(6): 45-49  
 [25] 郝宏生. 煤种变化对燃煤电厂综合经济性影响分析[J]. 锅炉技术, 2018, 49(2): 8-11  
 [26] 温智勇, 谭晶, 钟俊. 煤质对电厂锅炉运行及经济性影响的研究[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(9): 72-78  
 [27] 王群英, 苏攀, 张健, 等. 660 MW 机组锅炉掺烧褐煤对煤粉输送和运行成本的影响[J]. 热力发电, 2015, 44(10): 9-14

# 调峰电厂尿素储罐电伴热的应用

孙义

东方电气集团东方锅炉股份有限公司,成都 611731

**摘要:**以某工程为例,介绍尿素溶液储罐电伴热系统的设计方法,文中对储罐的热量损失进行分析计算,对电伴热带选型及其配电设计也进行了详细说明。通过分析,得出储罐电伴热系统的设计时应注意的问题,对工程设计具有参考价值。

**关键词:**自限温电伴热; 储罐的热损; 带漏电保护的微型断路器

中图分类号:TM621.7

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0045-04

## Application of Electric Heating for Urea Storage Tanks in Peak-shaving Power Plants

SUN Yi

(Dongfang Boiler Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** Taking a certain project as an example, this article introduces the design method of the electric heat tracing system for urea solution storage tanks. The article analyzes and calculates the heat loss of the storage tanks and provides a detailed explanation of the selection and distribution design of the electric heat tracing belt. Through analysis, the issues that should be paid attention to in the design of the electric tracing system for storage tanks are identified, which has reference value for engineering design.

**Key words:** self limiting temperature electric heating; heat loss of storage tanks; MCB with leakage protection

常规的尿素溶液储罐采用蒸汽伴热的方式,而调峰电厂因其特殊性,并不能保证有持续的蒸汽热源,因此要求采用电伴热的方式,与尿素溶液储罐壳体外部保温层一起共同维持尿素溶液储罐内尿素溶液的温度,以避免尿素溶液发生结晶现象。电伴热带以S形状均匀安装于储罐表面,利用电流的热效应,将电能转化为热能,产生的热量补充储罐的热量损失。电伴热系统设计的要义在于维持温度下电伴热产生的热量 $\geq$ 金属储罐散热损失。

不同浓度的尿素溶液的结晶温度不同,见尿素溶液与结晶温度的关系曲线(图1),电厂脱硝系统经常使用质量浓度为40%~50%的尿素溶液,为避免结晶,常规定尿素溶液温度不低于

28.5℃。下面以某调峰天然气调峰电厂的尿素溶液储罐电伴热设计为例,介绍自限温电伴热带的设计步骤及选型。

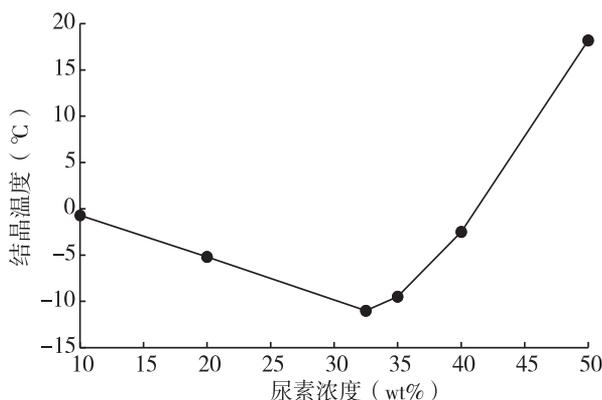


图1 尿素溶液与结晶温度的关系曲线

收稿日期:2025-05-29

**作者简介:**孙义(1988—),男,2013年毕业于西安工业大学电气工程及其自动化专业,本科,工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司,主要从事节能环保的电控设计工作。

## 1 储罐的热损失计算

### 1.1 项目伴热需求分析

尿素溶液储罐 2 台, 容积 30 m<sup>3</sup>, 户外布置, 设备基础为钢筋混凝土, 基础无绝热层。环境最低温度 -8.8 ℃, 维持温度 28.5 ℃。保温厚度 50 mm, 材料硅酸铝纤维。储罐介质温度 30 ℃ ~ 50 ℃。储罐采用 304 不锈钢材质, 直径 3 016 mm × 8 mm, 高度 4 250 mm, 液位 3 700 mm, 罐底底板 φ3 300 mm。设备基础混凝土高 1 000 mm。另查得罐底基础承台导热系数 1.74 W/m·℃, 304 不锈钢导热系数约为 16.3 W/m·℃。

### 1.2 储罐热损计算

储罐的热损失根据文献[1]的公式进行计算。

#### 1.2.1 储罐的热量损失 $Q_{total}$ 计算

$$Q_{total} = Q_{ins} + Q_{slab} + Q_{supt} + Q_{manhole} \quad (1)$$

式中:  $Q_{total}$ —设备整体热量损失;  $Q_{ins}$ —设备表面热量损失;  $Q_{slab}$ —设备通过混凝土基础传递的热量损失;  $Q_{supt}$ —设备支腿热量损失;  $Q_{manhole}$ —设备人孔热量损失。

#### 1.2.2 储罐的表面热量损失 $Q_{ins}$ 计算

$$Q_{ins} = \left( \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_{co}} + \frac{1}{h_o}} \right) \times A \quad (2)$$

式中:  $Q_{total}$ —设备表面热量损失(W);  $A$ —设备表面积(m<sup>2</sup>);  $T_p$ —维持温度(℃);  $T_a$ —最低环境温度(℃);  $x$ —保温层厚度(m);  $k$ —保温材料的平均导热系数(W/m·℃);  $h_i$ —储罐外壁到保温隔热层内侧空气的传热系数(W/m<sup>2</sup>·℃), 一般工程设计取 11.62~13.95 W/m<sup>2</sup>·℃;  $h_{co}$ —从外表面到保温层外壳的空气传热系数(W/m<sup>2</sup>·℃), 取值在 2~25 W/m<sup>2</sup>·℃;  $h_o$ —从隔热层外表面到周围空气的对流传热系数(W/m<sup>2</sup>·℃), 室外中等风条件下, 一般工程设计取 20~30 W/m<sup>2</sup>·℃。

该计算基于最不利热损失假设——即容器处于完全满液状态。通过查找文献[2]常用绝热材料性能表, 硅酸铝棉制品导热系数为  $k = 0.03 + 0.002 \times \frac{T_p + T_a}{2} = 0.03 + 0.002 \times \frac{28.5 + (-8.8)}{2} = 0.03197$  W/

m·℃。设备表面积  $A$  的计算  $A = \pi \times \frac{3.016^2}{4} + \pi \times 3.016 \times 4.25 = 47.4$  m<sup>2</sup>, 此处不考虑罐底表面积。

由于本公式中的  $h_i$ 、 $h_{co}$ 、 $h_o$  在实际工程中查找数据困难, 不同工况取值变化较大, 但对整体热损结果影响较小, 常在工程中予以简化。这样的计算结果偏大, 公式简化计算为:

$$Q_{ins} = \left( \frac{T_p - T_a}{\frac{x}{k}} \right) \times A = \left( \frac{28.5 - (-8.8)}{0.05}{0.03197} \right) \times 47.4 =$$

1 130.5 W。

#### 1.2.3 储罐的罐底热量损失 $Q_{slab}$ 计算

尿素溶液储罐直接放置在混凝土基础上, 热量会通过罐底钢板和混凝土传递出去, 造成热损失。罐底边缘附近的温度通常低于罐底中间的温度, 因为最低环境温度对罐底外边缘影响更大。

$$Q_{node} = \left( \frac{T_p - T_{node}}{\frac{X_{wall}}{K_{wall}} + \frac{X_{slab}}{K_{slab}}} \right) \times A_{node} \quad (3)$$

式中:  $Q_{node}$ —节点间罐底板区域的热量损失;  $A_{node}$ —节点之间区域的表面积(m<sup>2</sup>), 即罐底表面积;  $T_p$ —维持温度(℃);  $T_{node}$ —计算出的罐底底板中心温度(℃);  $X_{slab}$ —混凝土层的厚度(m);

$K_{slab}$ —混凝土在平均温度下的导热系数(W/m·℃);  $X_{wall}$ —罐壁的厚度(m);  $K_{wall}$ —罐壁材料的传热系数(W/m<sup>2</sup>·℃)。

由于罐底底板中心温度  $T_{node}$  不易确定, 但较最低环境温度  $T_a$  高, 工程中为了简化计算, 用  $T_a$  替代  $T_{node}$ , 使结果偏大。

$$Q_{node} = \left( \frac{28.5 - (-8.8)}{\frac{0.008}{16.3} + \frac{1}{1.74}} \right) \times \pi \times \frac{3.3^2}{4} = 554.6$$
 W

#### 1.2.4 支腿热量损失

$$Q_{supt} = \sqrt{h_f \times P \times K_s \times A_c} \times (T_p - T_a) \times \varepsilon \quad (4)$$

式中:  $Q_{supt}$ —支腿热量损失;  $A_c$ —穿过隔热层的截面的横截面积(m<sup>2</sup>);  $P$ —上面  $A$  的周长(m);  $T_p$ —维持温度(℃);  $T_a$ —最低环境温度(℃);  $K_s$ —支撑的导热系数(W/m·℃);  $h_f$ —裸露在空气中的支撑空气对流系数(W/m<sup>2</sup>·℃), 取 25 W/m<sup>2</sup>·℃;  $\varepsilon$ —翅片的效率, 取 1。本算例无支架, 此处不考虑。

### 1.2.5 人孔热量损失 $Q_{\text{manhole}}$

如果检修孔或把手与流体接触,则可以通过使用储罐表面的热量损失的方法进行计算。如果它们不与流体接触,则可以安全地忽略它们。

本算例已经将罐体侧壁上的热损失纳入储罐表面的热损失。

### 1.2.6 安全系数

由于热量损失计算结果为理论值,且未考虑与实际现场安装相关的缺陷,因此应将安全系数应用于计算值。应考虑以下安全因素:①热绝缘退化;②电源电压变化;③分支接线电压降;④加热装置电压降(如适用);⑤高温应用中的辐射和对流增加;⑥保温安装质量;应根据这些标准评估每个应用程序,并确定安全系数。典型值为 25 %。

综上,储罐的理论计算热量损失  $Q_{\text{total}} = Q_{\text{ins}} + Q_{\text{slab}} + Q_{\text{supt}} + Q_{\text{manhole}} = 1\ 130.5 + 554.6 + 0 + 0 = 1\ 685.1$  W,再乘以安全系数 1.25,  $Q_{\Sigma} = 1.25 \times 1\ 685.1 = 2\ 106.4$  W。根据热平衡原则,可以得到电伴热系统的总功率为 2 106.4 W。

## 2 电伴热带的选用

电伴热带分为变功率电伴热带(自限温)和恒功率电伴热带。自限温电伴热带具有自动控温,随意剪切,交叉重叠安装等优点,但也存在启动电流较大等缺点,使之不能按照常规设备考虑配电。恒功率电伴热带对计算长度要求严格,裁剪受限,需按发热节单位裁剪,不能交叉重叠,必须配置温控系统。因此,小型的储罐电伴热多选用自限温电伴热带。

### 2.1 自限温电伴热的工作原理

在两条平行线路中间充填导电塑料作为芯线,芯线之间的电路数随温度的影响而变化,当电伴热带周围的温度降低时,导电塑料产生收缩而使碳粒连接形成电路,电流流经这些电路,使电伴热带发热。当温度升高时,导电塑料产生的膨胀,碳粒渐渐断开,电阻增加,电伴热带会自动减少功率输出。当周围温度变冷时,塑料又恢复到收缩状态,碳粒相应连接起来形成电路,电伴热带发热功率又自动上升。产品结构示意图如图 2。

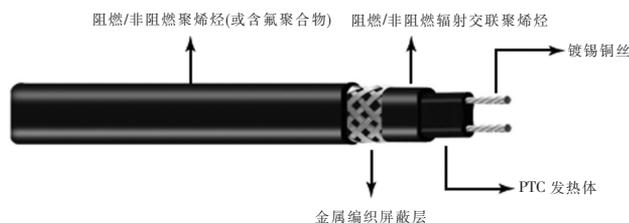


图 2 产品结构示意图

### 2.2 自限温电伴热的基本参数介绍

自限温电伴热的启动电流比:初始启动电流  $I_A$  与额定稳态电流  $I_N$  之比。低温型  $I_A/I_N \leq 3$ ,中温、高温型  $I_A/I_N \leq 5$ <sup>[2]</sup>。启动电流比越小,则产品质量越好(表 1)。

表 1 自限温电伴热带参数表<sup>[3]</sup>

规格	标称功率 (W/m)	工作电压 (V)	最高维持 温度(℃)	最高承受 温度(℃)
低温型(D)	3、10、15、20、		65	90
中温型(Z)	25、30、35、40、	220	90	125
高温型(G)	45、50、55、60		125	160

注:(1)标称功率:伴热带在标准温度为 10℃时,在额定电压及稳态电流下测出的每米发热功率;(2)最高承受温度:对伴热带的热稳定性不会产生不利影响的最高操作温度或暴露温度。因此,使用中不要超过伴热带的最高承受温度;(3)最高维持温度:伴热带在一定保温条件下通电时能使伴热系统持续保持(或保持一定时间)的最高温度。<sup>[2]</sup>

### 2.3 自限温电伴热的选型示例

前文中提到储罐介质温度 30℃~50℃,维持温度 28.5℃,自限温电伴热带的所有类型最高维持温度和最高承受温度均满足要求。低温型伴热带生产厂家支持的最高标称功率为 35 W/m,为减少电伴热带的长度,我们选择中温型自限温电伴热带 60 W/m。然后,再用总的热量损失除以电伴热带在保持温度时的输出功率。保持温度时的输出功率每个厂家生产的产品都有些微弱差异,以某产品的功率输出曲线图为例见图 3。

在保持温度 28.5℃时,该伴热带输出的功率为 45 W/m。电伴热所需的基本长度  $L_1 = 2\ 106.4 \div 45 = 47$  m。在确定电伴热带的基本长度后,需要确定电伴热带的回路数。在基本长度外还需要确定电伴热带的附加长度,每一回路电源接线预留长度 1 m,每处中间接线盒预留长度 1 m,每处尾端预留长度 1 m,以及考虑施工的偏差。这里简化计算按照 1.1 倍的安装余量进行考虑,即电伴热供货总长  $L_{\Sigma} = 47 \times 1.1 = 52$  m。自限温电伴热有着很高的启动电流,因此需要

选择合适的断路器,断路器允许的最大回路长度应大于每一回路的电伴热带总长度。回路数量=伴热带总长度/该断路器允许的最大回路长度。

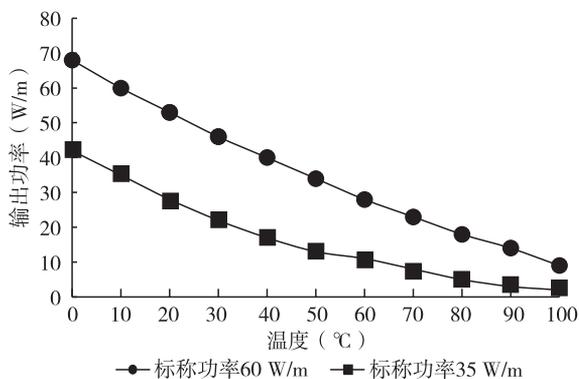


图3 某产品的功率输出曲线

根据 IEEE515—2017 的规定<sup>[1]</sup>,电伴热系统的断路器应具有接地保护功能。因此电伴热的配电回路一般选择微型断路器带漏电保护,漏电保护额定值为 30 mA。施工时应注意电缆中的 PE 线与电伴热带的屏蔽层可靠连接。

另外断路器的动作特性需要满足电伴热系统在低环境温度下的启动。微型断路器中 C 型的瞬时脱扣范围为  $>5 I_n \sim 10 I_n$  (含  $10 I_n$ ), D 型的瞬时脱扣范围为  $>10 I_n \sim 20 I_n$  (含  $20 I_n$ )。要确保在 C 型微断的 5 倍额定电流下或者 D 型微断的 10 倍额定电流下大于电伴热带的启动电流。目前只能通过厂家的测试数据(产品样本中),来查得断路器允许的最大长度。某厂家测试数据如表 2。

表2 测试数据

AC220V 供电电压		最大回路长度与微型断路器 C 型规格(米)		
产品型号	启动温度/℃	25A	32A	40A
ZBR-60 中温	10	37	37	58
型自限温伴	0	30	39	48
热带标称功	-10	26	34	43
率 60 W	-20	22	30	33

项目中的环境最低温度  $-8.8\text{ }^\circ\text{C}$ ,选用额定电流为 32 A 的 C 型微型断路器,其最大回路长度为 34 m,回路数  $= 52/26 = 1.5$ ,取 2 回路。每一回路电伴热长度  $52/2 = 26\text{ m}$ 。工程设计中也可选择 25 A 的 D 型微型断路器。

电伴热的控制回路设计中,为了较为准确的控制电伴热的控制温度,在电伴热的主回路中串有接

触器,通过现场采集的罐壁上装设的热电阻 PT100 信号,传输至温控表,当温度低于  $28.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,接通接触器的控制线圈,来自动闭合接触器,使电伴热系统自动工作。

采用  $60\text{ W/m}$  自限温电伴热带,  $30\text{ m}^3$  尿素溶液储罐单罐电伴热系统参考用量如表 3 所示。

表3 参考用量

序号	产品名称	规格型号	单位	数量
	自限温电伴热带	中温, 60 W	米	52
	电源接线盒		个	2
	尾端接线盒		个	2
	数显式温控器		个	3
	温度传感器		个	2
	传感器接线盒		个	2
	铝箔胶带	50 mm 宽, 20 m 长	卷	3
	不锈钢扎带		根	4
	警示标签		张	2
	电伴热配电箱	304 s, 1.5 mm 厚	面	1

注:铝箔胶带应全程覆盖电伴带以增大电伴热的散热面积。

### 3 结语

储罐的热量损失计算公式较为复杂,尤其是在传热系数的计算和罐底接触面的温度的确定上,难以较为精确的计算,在工程中应予以适当简化,以满足实际的设计需要。储罐正常热量损失主要集中于储罐底部,在后续设计中应考虑设置保温结构的基础,同时适度提高罐体表面保温层的厚度,减少热量损失,节约电能的消耗。另需要注意的是,不同的厂家电伴热带的规格和产品参数各不相同,应结合电伴热产品的具体参数进行电气设计。按照本文的方法进行尿素溶液储罐电伴热系统设计的项目已投运两年,储罐电伴热系统运行良好,满足控制要求。

### 参考文献:

- [1] IEEE Std 515—2017 (Revision of IEEE Std 515—2011), IEEE Standard for the Testing, Design, Installation, and Maintenance of Electrical Resistance Trace Heating for Industrial Applications [S]. IEEE, 2017
- [2] GB/T 19835—2015, 自限温电伴热带[S].
- [3] 中国建筑标准设计研究院. 国家建筑标准设计图集管道和设备保温、防结露及电伴热 16S401 [M]. 北京:中国计划出版社, 2016

# 大炉中机在电力辅助服务市场下的 技术经济性研究

李传永 李琳 安越里 刘春帘

山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013

**摘要:**随着新能源的快速发展,电力系统面临着峰谷差拉大的挑战,煤电在新型电力系统中的角色逐渐向基础保障性和系统调节性电源并重转变。为应对电网调峰需求和满足工业供汽需求,深入研究了“大炉中机”技术方案;阐述了其初投资情况,涉及主机及辅机设备的变化;探讨了技术经济性,计算了容量电价、市场化容量补贴等收益。研究表明,“大炉中机”方案虽增加了投资,但在调峰能力、收益等方面表现出色,投资回收期较短,具有显著的综合效益,为电厂在新型电力系统下的优化运行提供了可行路径,未来适应火电政策变化方面也有更多余地。

**关键词:**电力系统; 电网调峰; 大炉中机; 技术经济性

中图分类号:F426

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0049-05

## Study on Technical Economy of Medium-sized Boiler in Power Auxiliary Service Market

LI Chuanyong, LI Lin, AN Yueli, LIU Chunlian

(Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., 250013, Jinan, China)

**Abstract:** With the rapid development of new energy, the power system is facing the challenge of widening the peak-valley difference, and the role of coal-fired power in the new power system is gradually changing to both basic supportability and system-regulated power supply. In order to meet the demand of peak load regulation of power grid and industrial steam supply, the technical scheme of "large furnace with medium engine" is deeply studied. The initial investment situation is expounded, involving the changes of the main engine and auxiliary equipment; the technical economy is discussed, and the benefits such as capacity electricity price and market-oriented capacity subsidy are calculated. The research shows that, although the project of "middle power plant in large furnace" has increased investment, it has outstanding performance in peak-shaving ability and income, short payback period and remarkable comprehensive benefits, which provide a feasible path for the optimal operation of power plants under the new power system and has more room to adapt to the changes of thermal power policies in the future.

**Key words:** electric power system; peak regulation of power grid; machine in large furnace; technical economy

在全球能源转型的大背景下<sup>[1-3]</sup>,新能源发电如风能、太阳能等得到了迅猛发展<sup>[4-5]</sup>。然而,新能源的间歇性、波动性和随机性特点,给电力系统的

稳定运行带来了诸多挑战。电力系统峰谷差被进一步拉大,对电力供应的可靠性和稳定性提出了更高要求<sup>[6-7]</sup>。在此情况下,煤电作为传统的发电方

收稿日期:2025-01-20

**作者简介:**李传永(1979—),男,2003年毕业于山东大学热能与动力工程专业,本科,高级工程师,现任职于山东电力工程咨询院有限公司机务环保部,从事电力设计工作。通信邮箱:lichuanyong@spic.com.cn

李琳(1978—),女,2005年毕业于东南大学热能与动力工程专业,硕士,教授级工程师,现任职于山东电力工程咨询院有限公司机务环保部,从事电力设计工作。通信邮箱:lilin07@spic.com.cn

式,其角色正发生着深刻变化,从过去主要承担基荷发电任务,逐渐向基础保障性和系统调节性电源并重转型。

为了适应这一转型,国家出台了一系列政策措施。例如,国家发展改革委、国家能源局印发的《关于建立煤电容量电价机制的通知》<sup>[8]</sup>,对煤电机组实行两部制电价政策,激励煤电在保障电力系统发电充裕性方面发挥重要作用<sup>[9-13]</sup>。在地方层面,山东省对于火电机组调节容量和调节能力的重视程度一直走在国内前列,其能源局和发改委也发布了相关通知完善容量电价机制<sup>[14]</sup>。

在这样的政策环境和能源转型需求下,电厂面临着如何优化自身机组配置,以更好地适应电网调峰调频要求的问题,由此提出了“大炉中机”机组配置方案。一方面,为了响应国家和地方政策要求,提高机组在电网中的调节能力,获取容量电价收益<sup>[15-17]</sup>;另一方面,为了满足当地大型工业企业(如万华蓬莱工业园)庞大的工业供汽需求。该方案通过加大锅炉蒸发量,优化主机及辅机选型,实

现热电解耦、能量梯级利用等方式,期望提升机组满负荷可靠性、中负荷经济性、低负荷适应性和变负荷灵活性。本文将对该“大炉中机”技术方案进行详细分析,探讨其在技术和经济方面的可行性与效益。

## 1 “大炉中机”方案初投资分析

### 1.1 机组容量、大比例抽汽对主机设计的影响

目前国内火力发电机组的工况定义有两种:GB 5578—2024 固定式发电用汽轮机规范<sup>[17]</sup>和 IEC45—1991 汽轮机规范<sup>[19]</sup>。国内湿冷供热机组均采用 GB 的工况定义,工况定义均以纯凝工况为基准,兼顾供热。而供工业供汽时按出力达不到要按纯凝机组进行考核,极大影响了企业的供汽收益。因此,本文以供汽工况为设计基准,同时满足山东省对铭牌容认定的相关政策,参照 GB 标准定义工况,其中对汽轮机工况定义如表 1 所示,额定功率和最大功率按供汽满发的要求确定。

表 1 GB 5578—2024 固定式发电用汽轮机规范对汽轮机工况定义表

项目	VWO	TMCR	THA	TRL
主蒸汽参数	额定参数	额定参数	额定参数	额定参数
主蒸汽流量	(1.03%~1.05%)×TMCR 流量	额定流量	根据热平衡图确定	TMCR
背压	设计背压	设计背压	设计背压(考虑冷却介质的全年平均温度)	夏季背压(考虑冷却介质在全年最高温度下的冷端参数优化)
机组补水率	0	0	0	1.5%
发电机处功率	根据热平衡图确定	根据热平衡图确定	额定功率	额定功率
备注	阀门全开工况	汽轮机最大连续出力工况	热耗率考核工况	额定工况

机组容量增加且存在大比例抽汽,对主机设计有诸多影响,需要注意一些问题。在汽轮机方面,总体按抽汽工况设计以满足冷、热段大流量抽汽,额定工业抽汽 400 t/h 满发致机组最大进汽量增大,高压缸需更大模块,中压、低压模块在抽汽位置后与常规百万机组相同,工业热负荷 1 压力高使中调门参调维持 4.85 MPa,带来憋压与高排温度超温问题,高压通流大致纯凝运行主汽压力滑压有经济损失,不同负荷下抽汽与调节有相应变化,且 50% 负荷以上热段减温减压供汽,50% 以下主汽减温减压供汽;对于锅炉方面,考虑大量供热要兼顾纯凝与抽汽工况,抽汽量超 5% 再热蒸汽流量需特殊设

计,包括合理选设计工况、采用全面灵活再热汽温调节方案(如烟气挡板等多种措施并设事故喷水)、控制受热面偏差、采用高档次不锈钢材料、为二级再热器增设壁温测点,必要时增设蒸汽侧调节手段,以额定抽汽 400 t/h 为锅炉设计基准点,不同工况下烟气挡板等调节有相应变化并影响锅炉效率与汽温。

### 1.2 “大炉中机”方案初投资与常规锅炉方案对比

锅炉本体组合安装方面,“大炉中机”方案采用 3 405 t/h 超超临界参数锅炉,相比常规方案中采用的 2 905.2 t/h 锅炉,投资有所增加,以常规锅炉为基准,其二者初投资差值如表 2 所示。由表可知,相

关辅机如送风机、引风机等的规格和功率也相应增大,投资也有不同程度的变化。送风机流量和压头增加,电动机功率增大,投资增加;引风机流量和压头增大,电动机功率提高,投资也有所增加。低低温静电除尘器安装重量增加,投资增加;中速磨煤机规格和功率变化,投资减增加。总体而言,锅炉及相关辅机设备投资增加较多。

表2 “大炉中机”方案中的锅炉设备与常规方案

相比的初投资差值		单位:万元
名称	初投资差值	
钢炉架	700	
锅炉	10 500	
送风机	40	
一次风机	0	
引风机	160	
低低温静电除尘器安装	301	
中速磨煤机	966	
冷风道	56	
烟风煤管道	43	
烟道	139	
送粉管道	87	

汽轮机本体型号不变,但由于工况变化,相关设备如高压加热器组、主机凝结水泵等的规格和性能有所调整,会引起投资的波动。高压工业蒸汽管道投资增加。汽机相关设备总体投资增加。

表3 “大炉中机”方案中汽轮机设备与常规方案

相比的初投资差值		单位:万元
名称	初投资差值	
汽轮机本体	600	
高压加热器组	740	
主机凝结水泵	限额价	
旁路装置	限额价	
除氧器	限额价	
汽动给水泵组	限额价	
高压工业蒸汽管道	500	

脱硫、脱硝、除灰、水工、水工结构、上煤、化学等系统的部分设备也因“大炉中机”方案而发生变化。具体初投资差值如图1所示。从图中可以得知,脱硫系统中吸收塔尺寸增大、浆液循环泵功率提高等,投资增加;脱硝系统中SCR反应器本体制作安装重量增加,投资增加;水工系统中循环水泵流量和电动机功率增大,投资增加;上煤系统部分设备改造提速,投资增加等。

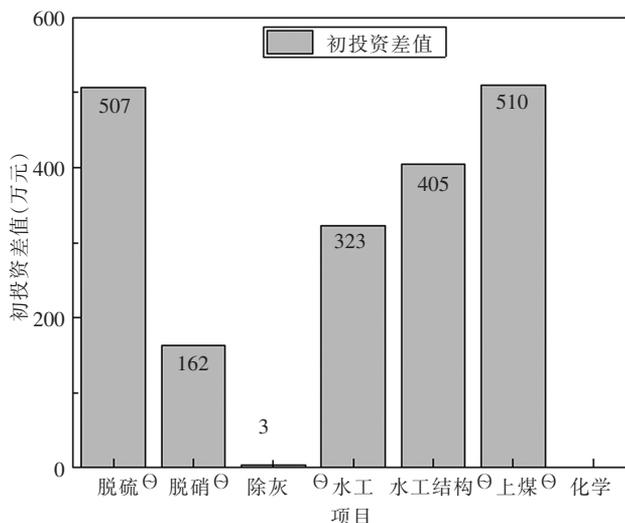


图1 “大炉中机”方案中的其他设备与常规方案的初投资差值

经过核算,两台机采用“大炉中机”方案共增加投资16 742万元,以上三大部分设备占比情况如图2所示。

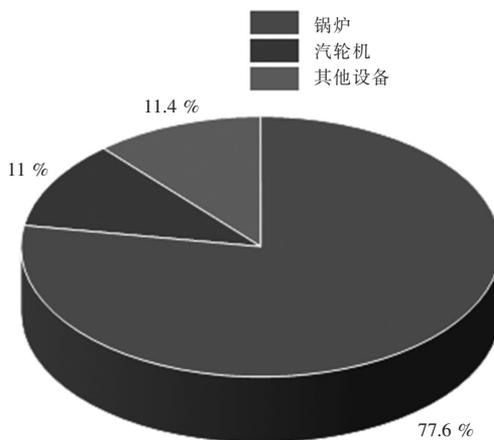


图2 “大炉中机”方案中的所有设备与常规方案的初投资总差值占比

## 2 “大炉中机”方案技术经济性分析

### 2.1 容量补偿收益

“大炉中机”方案使机组铭牌及顶峰能力相比常规方案中的不满发方案得到显著提升,单台机组出力增加约114 MW。这使得电厂在电网调峰中能够发挥更大作用,更好地适应电力系统负荷变化。

#### (1) 煤电容量电费

根据国家发展改革委、国家能源局印发的《关于建立煤电容量电价机制的通知》,煤电容量电价按照回收煤电机组一定比例固定成本的方式确

定<sup>[20-21]</sup>。其中,按容量电价回收固定成本的比例30%,用于计算容量电价的煤电机组固定成本实行全国统一标准,为每年每千瓦330元。如表4,根据以上原则计算,两台机组容量电价年收益增加约

2 257.2万元。这部分收益的增加体现了“大炉中机”方案在满足电网调峰需求方面的经济价值,有助于提高电厂的盈利能力。

表4 容量电费补偿费用(两台机组)

项目	单位	数值	备注
顶峰容量增加	MW	228	两台机
国家容量电价标准	元/(年·kW)	330	按照30%支付
煤电容量电费	万元/年	2 257.2	计划检修给,临时检修和非停不给,按照12个月算

(2) 山东省容量补偿电费

山东省能源局、山东省发改委发布《关于贯彻发改价格[2023]1501号文件完善我省容量电价机制有关事项的通知》。配合国家发展改革委、国家能源局印发的《关于建立煤电容量电价机制的通知》,将山东省现行市场化容量补偿电价用户侧收取标准由每千瓦0.0991元暂调整为0.0705元。相应地,原山东省发电侧市场化容量补贴费用进行

了调整。按照3 100亿千瓦时计算,山东省市场化总容量补偿收益约2 185 000万元,山东省内直调机组总容量约6 862.5万千瓦时,计算得出山东省市场化容量补贴费用约26.04万元/10 MW。

由于两台机组因调峰能力增加,山东省市场化容量补贴收益增加约6 530.8万元,如表5。这进一步证明了“大炉中机”方案在山东省电力市场环境下的优势,能够为电厂带来可观的额外收益。

表5 煤电容量电费收益(两台机组)

项目	单位	数值	备注
顶峰容量增加	MW	228	两台机
减少降出力费用容量电费	万元	6 530.8	每10 MW一个月26.04万;按照11个月算(去掉一个月检修时长)

其中,减少降出力费用容量电费由下式求得:228 MW/10×26.04万元×11=6 530.8万元

2.2 调峰过程中电力现场市场收益

考虑到电厂在调峰过程中的实际运行情况,如顶峰电价、厂用电率、成本电价、运行天数和每日顶峰时间等因素,计算调峰过程中的电力现场市场收益。如表6经过计算,两台机组调峰过程中电力现场市场收益增加约345.98万元。这表明“大炉中机”方案在电力市场交易中具有一定的竞争力,能够通过灵活的调峰操作获取额外收益。

表6 调峰总收益(两台机组)

项目	单位	数值	备注
顶峰容量增加	MW	228	
厂用电率	%	4	
顶峰电价(电厂提供)	元/kWh	0.8	
成本电价	元/kWh	0.321	按可研数据
运行天数	天	330	扣除一个月检修期
每日顶峰时间	h/天	1	平均估计
每年顶峰售电收益	万元	345.98	顶峰售电中,仅考虑10%为市场化电量

综合以上各项收益,“大炉中机”方案两台机全年增加收益约9 133.98万元,如图3所示。这一收益的增加显著提高了电厂的经济效益,使其在市场竞争中更具优势。

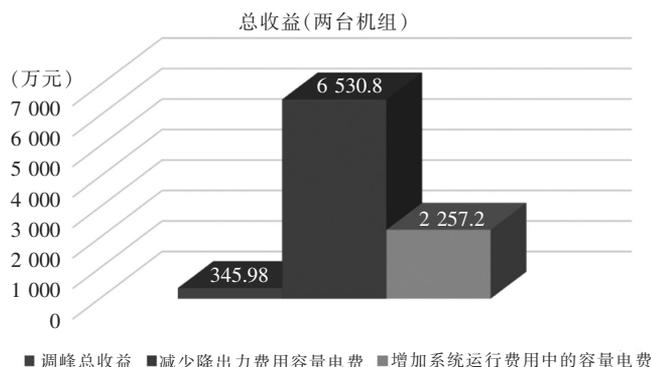


图3 “大炉中机”方案总收益(两台机组)

初投资增加值的回收年限n由式(1)求得:

$$n = -\ln(1 - \Delta P \times \frac{i}{\Delta B}) / \ln(1 + i) \quad (1)$$

式中: $P$ 为工程投资增加的费用,数值为 $16\ 742 \times 10^4$ 元, $B$ 为年运行费用,减少 $9\ 133.98 \times 10^4$ 元; $i$ 为年利率(%),暂按国内长期贷款利率 $i=4\%$ ,计算出投资回收期 $n=3.02$ 年。较短的投资回收期表明该方案在经济上具有较高的可行性和投资价值,能够较快地收回投资成本并实现盈利。

### 3 结论

“大炉中机”技术方案在电厂工程中的应用具有重要意义,该方案能够有效应对新型电力系统下电网调峰需求和工业供汽需求,符合国家能源转型战略和地方产业发展规划。初投资分析表明,虽然该方案相比常规锅炉方案增加投资 $16\ 742$ 万元,但在主机和辅机设备选型上进行了优化,为后续的高效运行奠定了基础。技术经济性分析结果显示,“大炉中机”方案在调峰能力提升、容量电价收益、市场化容量补贴收益和电力现场市场收益等方面表现出色,合计两台机全年增加收益约 $9\ 133.98$ 万元,投资回收期 $3.02$ 年。

综上所述,“大炉中机”方案是一种适应新型电力系统要求的可行技术方案,对于提高电厂的综合效益、促进能源的高效利用和保障电力系统的稳定运行具有重要作用。在未来的电厂建设和改造中,可根据实际情况进一步推广和应用该技术方案,同时不断优化和完善相关技术和管理措施,以实现更好的经济效益和社会效益。

### 参考文献:

[1] 李学华. 聚焦能源转型与可持续发展[N]. 经济日报,2024-11-14(004)  
[2] 柴麒敏,刘伯翰,马玉洁,等. 能源转型与技术创新的全球盘

点:进展与评估[J]. 气候变化研究进展,2024,20(6):747-756  
[3] 管克江,任皓宇. 携手推动能源转型和可持续发展[N]. 人民日报,2024-11-13(016)  
[4] 邱严.“双碳”目标下新能源发电产业可持续发展策略研究[J]. 中国设备工程,2024(20):261-263  
[5] 王涛. 风力发电技术在新能源发电中的应用探析[J]. 电力设备管理,2024(18):143-145  
[6] 王放放,杨鹏威,赵光金,等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战[J]. 发电技术,2024,45(2):189-198  
[7] 王伟,徐婧,赵翔,等. 中国煤电机组调峰运行现状分析[J]. 南方能源建设,2017,4(1):18-24  
[8] 本刊讯. 国家发改委、国家能源局发布《关于建立煤电容量电价机制的通知》[J]. 电力与能源,2023,44(6):584  
[9] 梁治国,陆永浩,王美玲,等. 容量电价机制下煤电机组运行面临的挑战与对策:基于MSAF大科学设施的应用分析[J]. 煤炭经济研究,2023,43(11):55-60  
[10] 柯潘明. 煤电机组在容量电价机制下经济运行模式分析[J]. 内蒙古煤炭经济,2024(17):178-180  
[11] 杨娟. 建立煤电容量电价机制推动能源绿色低碳转型[J]. 价格理论与实践,2023(11):28-30  
[12] 余璇. 容量电价机制利好煤电转型发展[N]. 中国电力报,2024-04-10(004)  
[13] 张志强,倪小点,卢季德. 完善煤电容量电价机制促进煤电产业健康发展[J]. 中国经贸导刊,2024(11):74-76  
[14] 山东省发展和改革委员会关于电力现货市场容量补偿电价有关事项的通知[J]. 山东省人民政府公报,2022(10):56  
[15] 陈斌,解尧,田森,等. 煤电容量电价落地情况分析及相关建议[J]. 中国电力企业管理,2024(19):52-55  
[16] 赵坤. 煤电价格形成机制重大调整[N]. 中国电力报,2023-11-14(001)  
[17] GB/T 5578-2024 固定式发电用汽轮机规范[S].  
[18] 廖睿灵. 煤电容量电价机制要来了[N]. 人民日报海外版,2023-11-28(011)  
[19] 王睿佳. 研究建立适应新形势的电价形成机制[N]. 中国电力报,2024-10-25(004)

# 短套管密封面低温离子渗氮工艺

王洁 周迎平 周承操 唐炼

东方电气(武汉)核设备有限公司, 武汉 430223

**摘要:**本文探讨了低温离子渗氮工艺在短套管密封面中应用的最佳工艺参数,以提升密封面的硬度及渗氮层脆性。采用 X 射线衍射仪分析渗层相组成、硬度法和金相法分别进行评估研究渗氮层厚度、按 GB/T 11354 执行氮层脆性检验,结果表明:渗氮温度为 425 °C 时,在渗氮时间为 60 h 情况下,不仅提升了密封面的硬度,还降低了其渗氮层脆性,为核电工业密封技术的发展开辟了新的道路。

**关键词:**低温离子渗氮; 短套管密封面; 硬度提升; 渗氮层脆性

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)04-0054-05

## Low-temperature Ion Nitriding (LTIN) Process for Sealing Surface of Short Sleeve

WANG Jie, ZHOU Yingping, ZHOU Chengchao, TANG Lian

(Dongfang Electric(Wuhan)Nuclear Equipment Company Ltd., 430223, Wuhan, China)

**Abstract:** This paper conducts an in-depth exploration of the optimal process parameters for the application of low-temperature ion nitriding in the sealing surface of short casing pipes, aiming to enhance the hardness of the sealing surface and reduce the brittleness of the nitrided layer. The phase composition of the nitrided layer was analyzed using an X-ray diffractometer, while the thickness of the nitrided layer was assessed through hardness testing and metallographic methods. Brittleness testing of the nitrided layer was performed according to GB/T 11354. The results indicate that, when the nitriding temperature is set at 425 °C and the nitriding duration is 60 hours, not only is the hardness of the sealing surface improved, but the brittleness of the nitrided layer is also reduced. This finding opens up a new path for the development of sealing technologies in the nuclear power industry.

**Key words:** low-temperature ion nitriding; sealing surfaces; surface modification; the nitriding layer is brittle

### 1 引言

#### 1.1 研究背景

基于小型堆的紧凑性设计,带来更多的堆内密封面设计需求,如某型一体化小堆,使用短套管实现不同温度冷却剂流道的分离,其接触面的耐磨性要求较高。传统的密封技术虽然在一定程度上满足了基本需求,但短套管的密封面常常面临高温和高压的双重挑战,处于极端工况下,如高温、高压或

腐蚀性介质中,且设备设计寿命较长,密封面的结合力要求高;性能需达到渗氮层厚度不小于 0.02 mm,脆性检验为 1 级,为均一氮化层,无 CrN 相;传统的渗氮工艺难以在这种环境下维持稳定的性能。因此,探索新型密封技术,特别是低温离子渗氮工艺,成为当前研究的重难点<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 研究目的与意义

某研究团队通过对 AISI316L 奥氏体不锈钢进行低温渗氮处理,成功提高了其表面硬度和耐磨

收稿日期: 2024-11-05

作者简介: 王洁(1996—),女,2021年毕业于西安理工大学材料工程专业,硕士,工程师。现任职于东方电气(武汉)核设备有限公司,主要从事原材料研究方向及表面处理工作。

性,显著延长了其在工业设备中的使用寿命<sup>[2]</sup>。另一项研究则表明,低温离子渗氮工艺在 TC4 钛合金上的应用,不仅提高了材料的耐磨性能,还显著增强了其抗腐蚀能力,为航空航天领域的应用提供了新的可能性<sup>[3]</sup>。采用低温离子渗氮工艺处理的 316 不锈钢,其表面硬度可提高至 HV1000 以上,耐磨性提升约 30 %<sup>[4]</sup>。因此,通过在低温环境下进行离子渗氮,不仅可以避免高温对材料基体的损伤,还能在表面形成一层均匀、致密的渗氮层,显著提高密封面的硬度和耐磨性。低温离子渗氮工艺还具有环保和节能的优势。相比传统的高温渗氮工艺,低温工艺所需的能源消耗大大降低,且过程中产生的废气和废液也显著减少,符合当前绿色制造的发展趋势<sup>[5]</sup>。

## 2 实验设计与方法

### 2.1 实验材料与设备

本实验根据产品短套管材料要求,选用 SA-182 F316 奥氏体不锈钢,这种材料因其优异的耐腐蚀性和良好的机械性能而被广泛应用于高要求的核电工业环境中<sup>[2]</sup>。SA-182 F316 不锈钢的化学成分经过严格控制,确保其在低温渗氮过程中能够形成均匀且致密的渗氮层,从而提升密封面的耐磨性和耐腐蚀性。

渗氮仪配备高精度的温度控制器,能够在渗氮过程中实时监测和调节炉内温度,确保温度波动在  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,从而保证了渗氮层的均匀性和一致性。使用了 X 射线衍射仪(XRD)和硬度试验机,用于分析渗氮层的微观结构和形貌特征。

### 2.2 实验方案设计

(1)对渗氮温度进行了选择和优化。将渗氮温度设定在较低的范围,以避免材料的热变形和晶粒长大。将渗氮温度设定在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,并通过逐步降温的方式进行实验,以观察不同温度下渗氮层的形成情况。

(2)渗氮时间的选择参考文献[6]中关于 25Cr3MoA 钢齿轮的三段法渗氮工艺的研究内容。该研究表明,适当的渗氮时间可以显著提高渗氮层的厚度和硬度。因此,将进行不同时间的渗氮实验,以确定最佳的渗氮时间。

(3)气体成分的选择和优化参考文献[7]中关于奥氏体不锈钢氮钛离子共渗工艺的研究,选择氨气作为主要的渗氮气体,可以提供足够的氮原子,而氨气电离出的氢离子则有助于降低渗氮过程中的电离能,提高渗氮效率,因此实验将氨气的流量设定为  $200\text{ mL}/\text{min}$  至  $400\text{ mL}/\text{min}$ 。

(4)在实验过程中,参考了文献[8]基于 Ansys 模拟的钛合金筒形工件离子渗氮温度场分析的研究和文献[9]中关于不同渗氮温度的奥氏体不锈钢渗层组织及性能的对比分析的研究。该研究表明,渗氮温度及均匀性对渗氮层的组织结构和性能有着显著影响。因此,在实验中对不同温度下的渗氮层进行了组织分析和性能测试,包括显微硬度测试、渗氮层脆性测试,以全面评估渗氮层的性能。



图1 产品低温渗氮

### 2.3 实验步骤与流程

实验的具体步骤如下:将预处理后的短套管样品放入离子渗氮设备的真空室中,确保样品均匀分布,避免局部过热或渗氮不均。随后,启动真空泵,将真空室内的压力降至  $0.001\text{ Pa}$  以下,以去除空气中的氧气和水分,防止样品表面氧化<sup>[4]</sup>。

接下来,引入分解氨的混合气体,调整气体流量至设定值。在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境下,通过高频电源产生等离子体,离子轰击样品表面,促进氮原子的吸附和扩散<sup>[4]</sup>。渗氮期间通过实时监控系统记录温度和压力变化,确保实验过程的稳定性和可控性。

渗氮完成后,缓慢降低真空温度至室温,取出样品进行后续处理。样品表面形成的渗氮层通过

显微镜观察和 X 射线衍射分析,评估其形貌和结构特征<sup>[3]</sup>。硬度测试采用维氏硬度计,测试其硬度及渗氮层脆性。

### 3 实验结果与分析

根据目前研究成果及前期工程经验,选定电压为 700~800 V,电流为 7~19 A,氨气流量为 200~400 mL/m 保持不变,调整渗氮温度和渗氮时间进行工艺优化,按此试验参数进行低温离子渗氮试验,试验主要参数如表 1。

表 1 低温离子渗氮试验参数

参数	第一次试验	第二次试验	第三次试验	第四次试验
渗氮温度(°C)	510	450	425	425
渗氮时间(h)	20	40	40	60

按照第一次工艺试验参数,采用 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)技术,对经过低温离子渗氮处理的短套管密封面进行了深入的形貌和结构分析。如图 2,第一次试验 SEM 图像显示,在渗氮层的外表面上有灰色的物相生成,通过 EDS 能谱仪对正常基体和灰色部分进行成分分析,可以看到,灰色部分主要以 Cr、N 元素为主,且均高于正常基体,可能是氮化铬相析出。XRD 分析进一步揭示了渗氮层中表面检测到了氮化铬的析出(图 3)。

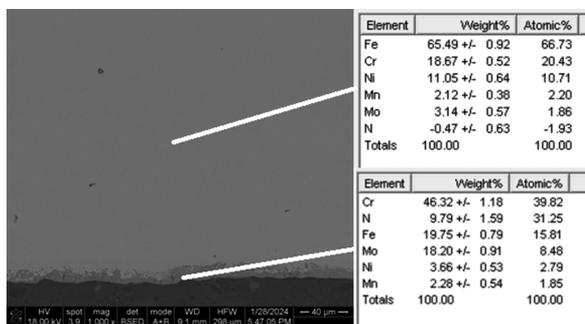


图 2 第一次试验渗氮层中析出的氮化铬

渗氮温度是影响 CrN 相形成的重要因素,由第一次试验可知,当渗氮温度达到 500 °C 以上,CrN 相的形成变得显著。故降低温度,但由于有厚度要求,延长渗氮时间进行了第二次试验,从工件上利用线切割取下一小块试样,用沾有酒精的棉球仔细擦拭后,利用 X 射线衍射仪对试样进行扫描,如图 4,从 XRD 扫描图谱中可以看到,试样仅有的三个明显峰都是  $\gamma_N$  的峰,没有检测到其它析出物。

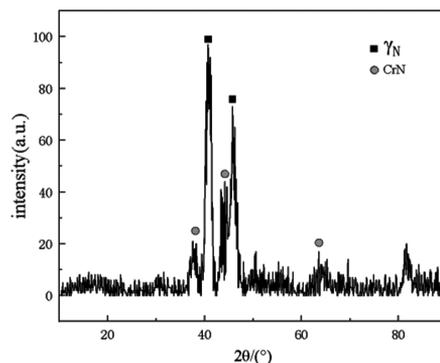


图 3 第一次试验表面 XRD 图谱

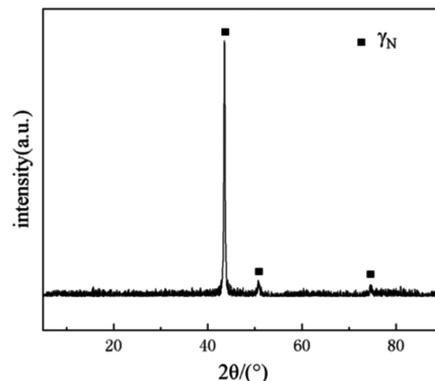


图 4 第二次试验表面 XRD 图谱

GB/T 34883 离子渗氮中对 304 奥氏体不锈钢的常用渗氮温度进行了规定,对于固溶热处理的材料,渗氮温度为 420 °C~450 °C。故第三次试验温度选择为 425 °C,采取与第一次试验同样的取样方式,利用 X 射线衍射仪对试样进行扫描,从 XRD 扫描图谱中(如图 5 所示)可以看到,试样仅有的二个明显峰都是  $\gamma_N$  的峰,也没有发现氮化铬的析出。

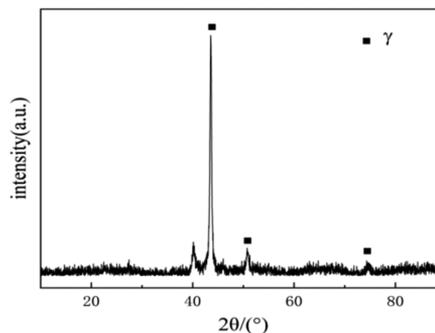


图 5 第三次试验表面 XRD 图谱

通过对比不同渗氮时间和温度条件下的样品,我们发现,在 425 °C 下渗氮 40 h 的样品表现出最佳的结构特征,没有发现氮化铬的析出。

根据最优参数我们进行金相检测,检验其厚

度,利用线切割机取下试样,磨抛后腐蚀,金相腐蚀剂选用马布勒(Marble)试剂,马布勒试剂具体配比按 4g CuSO<sub>4</sub>+20 mL HCl(浓)+20 mL H<sub>2</sub>O 配置,腐蚀后置于金相显微镜下观察。如图 6 所示,腐蚀后可以看到基体上出现晶界,而渗氮层上并没有,晶界与渗氮层间存在明显界限,且呈现一边厚一边薄的趋势,测到的最薄位置为 5.3 μm,最厚位置为 30.1 μm(如图 7 所示)。试验结果不满足渗层深度 ≥0.02 mm 的要求进一步优化工艺,延长渗氮时间为 60 h,使用相同的腐蚀溶液,腐蚀后置于金相显微镜下观察。腐蚀后基体呈灰色,渗氮层基本不受腐蚀,仍呈现白亮色。渗氮层整体厚度较为均匀,检测到的最薄位置为 28.2 μm,最厚位置为 32.5 μm。(如图 8 和 9 所示)测试实验结果均满足渗层深度 ≥0.02 mm。

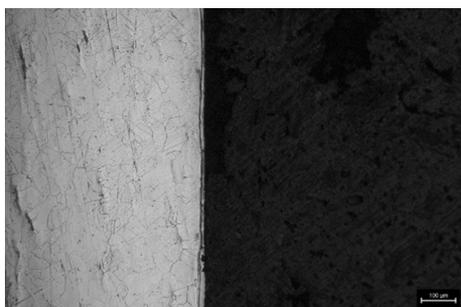


图 6 腐蚀后试样组织形貌

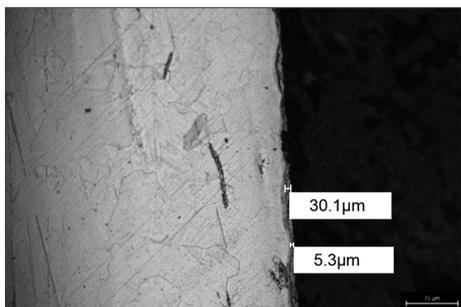


图 7 不同位置渗氮层深度



图 8 腐蚀后试样组织形貌

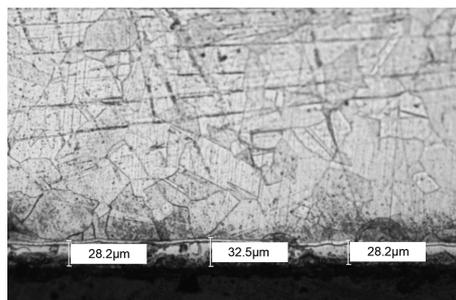


图 9 不同位置渗氮层深度

根据上述结果,在 425 °C 下渗氮 60 h 的样品厚度能满足渗层深度 ≥0.02 mm 的要求。

在此最优工艺情况下,我们对样品进行了硬度法测渗氮层硬度检验及渗氮层脆性检验。

从试样的表面开始,逐渐向试样内部测量维氏硬度,因为试样基体较软,使用国标 GB/T 4340.1 中 1.96 N 的试验力所打出的硬度点较大,且测试位置为试样边部,较大的测试力可能会因为硬度点离边部太近,影响测量结果,故在测试了几种不同的试验力后,将试验力定在 0.49 N。

硬度点斜向排列,如图 10-11 所示,可以看到从表面到内部,试样硬度逐渐降低,直到在距离表面 77.9 μm 处,硬度降到 234.1HV0.05,接近界限硬度。这里需要强调的是,最外层的硬度点过于接近表面,可能会造成实验硬度较实际硬度偏低。

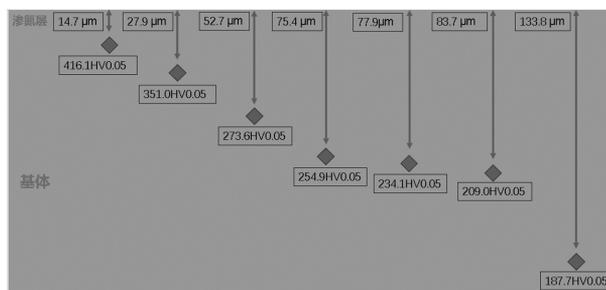


图 10 试样表面处维氏硬度梯度实验示意图

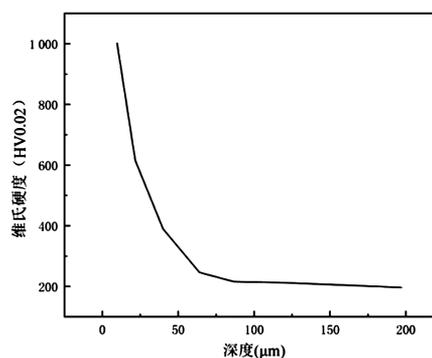


图 11 试样表面处维氏硬度梯度曲线

测试实验结果硬度值为 1321HV、1290HV、1309HV,工艺上满足  $HV \geq 900$ 。

按 GB/T 11354 检测渗氮层脆性,结果为 1 级。如图 12 所示。

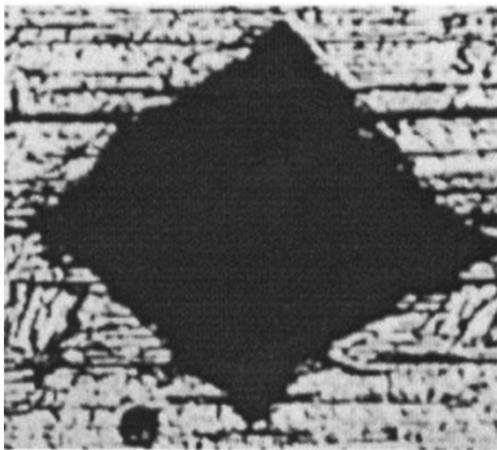


图 12 脆性图

#### 4 结语

(1)温度为 510 ℃时,其渗氮层存在明显的析出物,有 CrN 相形成。

(2)对于低温离子渗氮,当渗氮温度小于 450 ℃时,无析出物,均为单一的氮化层。

(3)渗氮温度为 425 ℃时,在渗氮时间为 60 h 情况下,可以保证渗氮厚度满足  $\geq 0.02$  mm,且其余检测指标性能良好,表面硬度不低于 900 HV、不存在氮化铬相且脆性为 1 级。

无论是硬度还是脆性,低温离子渗氮工艺均展现出卓越的性能提升能力。这一研究成果不仅丰富了低温离子渗氮工艺的理论基础,为实际核电应用中的密封性能和使用寿命提供了有力保障。期待这一工艺在未来能够得到更广泛的应用,为核电堆内构件生产带来更大的经济效益和社会效益。

#### 参考文献:

- [1] 唐明,滕照正,吴柳根,等. 膨胀套管螺纹连接技术研究[J]. 钻采工艺,2016,39(5):58-61+104
- [2] 曹驰,路永宽,陈志林,等. 冷形变对 AISI316L 奥氏体不锈钢低温渗氮行为影响的研究[J]. 2022,51(22):111-115
- [3] 高天悦. 体育器械用 TC4 钛合金的力学与耐磨性能研究[J]. 合成材料老化与应用,2021,50(2):112-114
- [4] 罗建东,胡雁鸿,林育周. 双电源低温渗氮工艺在 316 不锈钢上的应用[J]. 金属热处理,2022,47(3):7-13
- [5] 仲崇阳,孙金全,李福杰,等. 金属耐磨蚀表面复合处理绿色节能新技术[J]. 金属加工(热加工),2022(5):9-12
- [6] 张海巍,马晓锋,马宁,等. 25Cr3MoA 钢齿轮的三段法渗氮工艺[J]. 金属热处理,2023,48(6):118-121
- [7] 魏咏梅,李双喜,汪美桃,等. 奥氏体不锈钢钛离子共渗工艺[J]. 金属热处理,2023,48(9):116-121
- [8] 韩啸,贺瑞军,朱硕,等. 基于 Ansys 模拟的钛合金筒形工件离子渗氮温度场分析[J]. 金属热处理,2023,48(6):258-264
- [9] 刘兰兰,张道达,吴孝泉. 不同渗氮温度的奥氏体不锈钢渗层组织及性能的对比分析[J]. 南昌大学学报(理科版),2021,45(6):615-620

# 核电用 316H 晶界碳化物对冲击及晶间腐蚀的影响

段志伟 张娟 镇乐 刘盛波

东方电气(广州)重型机器有限公司,广州 511455

**摘要:**针对 316H 不锈钢碳化物析出相,从热处理工艺方面分析了碳化物析出的原因,并研究了 316H 不锈钢碳化物析出情况对冲击性能及晶间腐蚀性能的影响。结果表明:316H 不锈钢大量碳化物沿晶沉淀析出,是由于热处理过程中在敏化温度区间停留时间过长导致;随着碳化物析出相的增多,其常规冲击及时效冲击性能均呈下降趋势,析出严重者不符合核电用钢的冲击性能要求;晶间腐蚀性能也随着碳化物沉淀相的析出而降低,弯曲试样表面开裂。

**关键词:**316H 不锈钢;碳化物析出相;冲击性能;晶间腐蚀

中图分类号: TG113

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)04-0059-05

## Effect of 316H Grain Boundary Carbides on Impact and Intergranular Corrosion for Nuclear Power

DUAN Zhiwei, ZHANG Juan, ZHEN Le, LIU Shengbo

(Dongfang(Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., 511455, Guangzhou, China)

**Abstract:** The reasons for carbide precipitation phase in 316H stainless steel were analyzed from the heat treatment process, and the effect of carbide precipitation on impact properties and intergranular corrosion properties of 316H stainless steel was studied. The results indicate that a large amount of carbides precipitate along the grain in 316H stainless steel due to the long residence time in the sensitization temperature range during the heat treatment process. With the increase of carbide precipitation phases, the conventional impact and aging impact properties show a decreasing trend, and the severe precipitation do not meet the impact property requirements of nuclear power steel. The intergranular corrosion properties also decrease with the precipitation of the carbide precipitated phase, and the surface cracking of the bent specimen is observed.

**Key words:** 316H stainless; the carbide precipitation phase; impact property; intergranular corrosion

316H 不锈钢由于含有高比例的铬、镍和钼元素,因此对酸性和氯化物介质具有出色的抗腐蚀能力,这种特性使得 316H 不锈钢能够在多种腐蚀性环境中保持长期稳定的性能,且其碳含量较高具有优良的高温力学性能。316H 不锈钢由于其优良的性能在核电装备、化学及石油等行业被广泛应用,尤其在核电设备制造中,一些核级部件在服役过程中既要承受一定的快中子剂量和高温高压环境,又

要考虑与环境介质的相容性问题,基于以上因素,316H 不锈钢被广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

对于 316H 不锈钢的金相组织检测中,经常会发现有碳化物沉淀相的析出,本文将通过试验来研究热处理工艺和碳化物析出相之间的关系,并探究碳化物析出相对材料的冲击性能及晶间腐蚀性能造成的影响。

收稿日期:2024-10-24

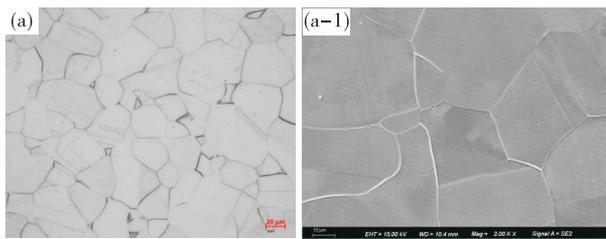
**作者简介:**段志伟(1981—),女,2012年毕业于广东工业大学材料科学与工程专业,硕士研究生,工程师。现任东方电气(广州)重型机器有限公司,主要从事理化检测工作。

## 1 试验材料

本文所用的材料为 316H 不锈钢,其化学元素含量如表 1 所示,图 1 为材料的金相组织形貌,其组织为正常的奥氏体组织,无碳化物析出相。

表 1 316H 不锈钢的化学成分 wt. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.04	0.36	1.86	0.014	0.001	17.72	12.22	2.67



注:(a)组织形貌;(a-1)SEM形貌。

图 1 316H 不锈钢的显微组织形貌

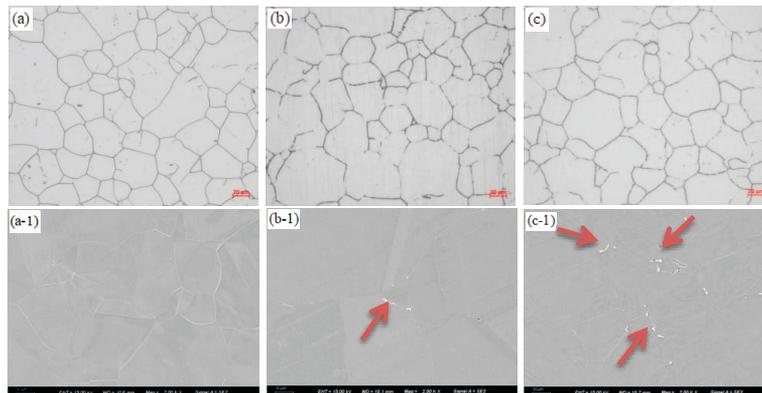
## 2 试验方案

### 2.1 冷却方式对碳化物析出的影响

核用电 316H 不锈钢供货态热处理的要求为加

热到奥氏体区保温一定时间,然后在水中淬火或用其他方法快速冷却以防止碳化物沉淀析出<sup>[3]</sup>。对于大锻件来说,在热处理的过程中,表面和心部的冷速会有较大的差别,表面冷速快可达到淬火要求,但心部有可能是空冷甚至是炉冷的冷速。现使用上述 316H 试验材料,加工成多块小试样来模拟不同冷却方式对组织的影响。图 2 所示为 316H 不锈钢试样在 1 050 °C 下保温 20 min,(a)~(c)分别为以水冷、空冷和炉冷的方式冷却后所得到的组织形貌,(a-1)~(c-1)分别为对应的 SEM 形貌。

由图 2 可知,试样在 1 050 °C 的高温单相区保温,过剩相碳化物被充分溶解,水冷试样 a 因为快速冷却,碳化物来不及析出,因此形成了单一的奥氏体组织。而空冷(b)或炉冷(c)试样,因为冷却时在敏化温度区间停留的时间大于水冷的试样,被溶解的过饱和碳又从奥氏体中析出,与 Fe、Cr 等元素形成碳化物析出相,在奥氏体晶界处分布(如箭头所示)。因为晶界处的界面能较晶内低,因此就会降低碳化物形核的活化能,使得碳化物析出相极易在晶界处形成,使晶界处于脆性状态<sup>[4]</sup>。



注:(a),(a-1)水冷;(b),(b-1)空冷;(c),(c-1)炉冷;(a-1)~(c-1):SEM。

图 2 不同冷却方式下的显微组织

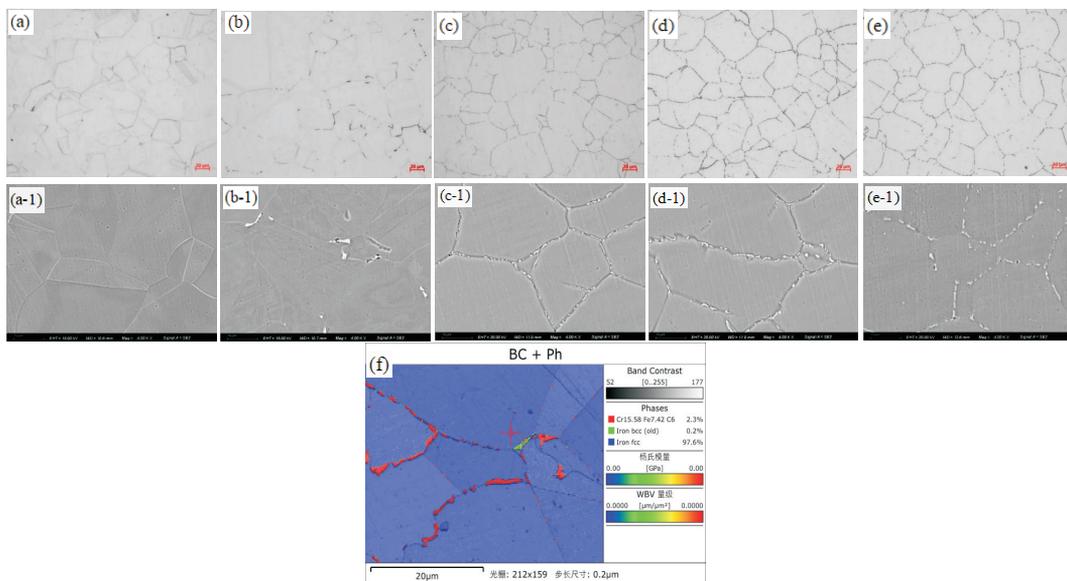
### 2.2 热处理温度对碳化物析出的影响

对于大锻件来说,由于冷速的原因,心部在低于固溶处理的温度区间停留时间增加,对碳化物析出也有一定的影响<sup>[5]</sup>,现模拟在固溶温度以下保温一定时间后,316H 不锈钢的组织变化情况。

图 3 为为 316H 不锈钢试样在不同温度保温一定时间后的显微组织,(a)~(c)分别为 950 °C、850 °C、750 °C 保温 2 h 后的显微组织,(d)~(e)分别为 750 °C 保温 5 h、10 h 的显微组织,(a-1)~(e-1)为

(a)~(e)对应的 SEM 图片。由图 3 可以看出,在图(a)~(a-1)中未发现析出相存在,图(b)~(b-1)中出现微量的碳化物析出相,呈短棒状零散的分布在晶界处,图(c)~(c-1)中的碳化物析出相逐渐增多,呈链状断续分布,图(d)~(d-1)、(e)~(e-1)析出相继续增加,沿晶界连续分布。图(f)对碳化物析出相进行 EBSD 相分析,此析出相成分即为  $M_{23}C_6$  型碳化物,它是 316H 不锈钢中析出的主要含 Cr 的碳化物<sup>[6-7]</sup>。可以得出随着温度的降低,析出相逐渐增

加,接近敏化温度区间并且随着保温时间的增加,析出相呈链状连续分布在晶界处。



注:(a)950 °C 保温 2 h;(b)850 °C 保温 2 h;(c)750 °C 保温 2 h;(d)750 °C 保温 5 h;(e)750 °C 保温 10 h;(a-1)~(e-1):SEM;(f):EBSD。

图 3 不同温度热处理后的显微组织

### 3 碳化物析出相对冲击性能的影响

由以上分析可知,随着热处理温度的降低及在敏化温度区间保温时间的增加,碳化物析出相逐渐增加并连续分布于晶界处,随后对经上述热处理的几组典型试样进行常规冲击及时效冲击试验,来分析碳化物析出相对冲击性能的影响程度。时效热

处理制度:750±5 °C、保温 100 h、到温入炉、静止空气中冷却。

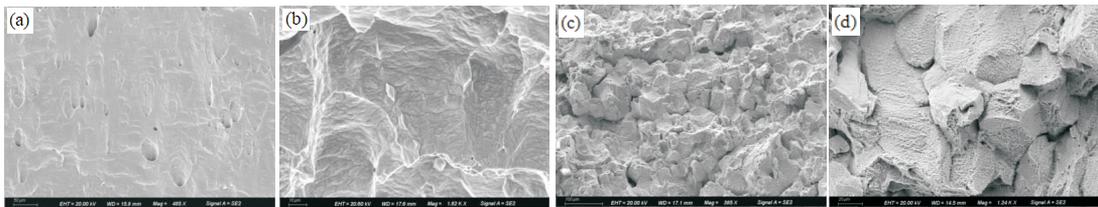
由表 2 冲击试验结果可归结出,随着组织中碳化物析出相的增加,试样的常规冲击及时效冲击均呈下降趋势,对于碳化物析出严重的试样其冲击结果,不能满足核电设备部件制造中其技术条件对于冲击性能的要求,会对产品造成极大的安全隐患。

表 2 不同碳化物析出情况下的冲击试验

试样	热处理工艺	碳化物析出情况	室温冲击试验 Kv(J)	
K1/K2/K3	1 050 °C 保温 20 min	正常奥氏体组织	常规冲击	359/372/366
K4/K5/K6		无碳化物析出	时效冲击	142/138/135
K7/K8/K9		微量沿晶界	常规冲击	264/273/267
K10/K11/K12	850 °C 保温 2 h	短棒状零星分布	时效冲击	135/129/126
K13/K14/K15		少量沿晶界	常规冲击	195/204/198
K16/K17/K18	750 °C 保温 2 h	链状断续分布	时效冲击	126/124/120
K19/K20/K21		多量沿晶界	常规冲击	135/132/135
K22/K23/K24	750 °C 保温 5 h	链状分布	时效冲击	105/105/108
K25/K26/K27		大量沿晶界	常规冲击	112/108/118
K28/K29/K30	750 °C 保温 10 h	连续分布	时效冲击	86/78/84

图 4 所示为两种典型冲击试样断口的 SEM 形貌,(a)~(b)为无碳化物析出的正常试样 K1 常规冲击断口形貌,其基体和晶界均无碳化物析出相,理论上晶界强度和晶内强度基本一致,断口形貌为韧窝花样,断裂机理表现为韧性断裂(无晶界形

貌);(c)~(d)为晶界有大量碳化物析出相连续分布的试样 K25 常规冲击断口形貌,表现为沿晶韧窝花样,断口上可见沿晶碳化物脱落后孔洞,沿晶界分布的碳化物削弱了晶界强度,所以其冲击性能明显低于无碳化物析出的正常试样。



注:(a)~(b)K1 SEM;(c)~(d)K25 SEM。

图4 冲击断口 SEM 形貌

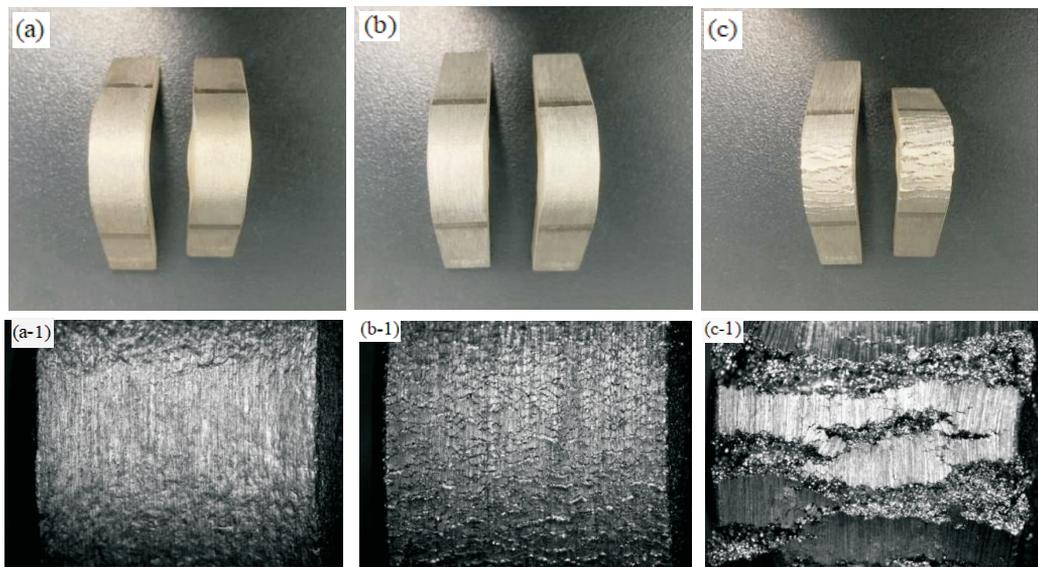
#### 4 碳化物析出相对晶间腐蚀性能的影响

碳化物析出对奥氏体不锈钢的影响是多方面的,决定不锈钢耐腐蚀性能的主要元素是 Cr,由以上分析可知 316H 不锈钢中析出的  $M_{23}C_6$  型碳化物含有大量的 Cr 元素,而碳化物又优先在晶界处析出,因此晶界附近就会呈现 Cr 缺失的状态,晶内 Cr 元素的扩散速度很慢,不能及时的补充晶界所缺失的 Cr,当 Cr 含量低于一定含量时,便会形成贫 Cr 区,这种贫 Cr 现象就使得晶界失去了耐腐蚀能力,从而引发晶间腐蚀。晶间腐蚀是沿着晶界面不断扩展的一种腐蚀,晶粒和晶粒之间的结合力被削弱,因此金属的力学性能强度也急剧降低,且内部发生晶间腐蚀,在金属的外表面上看不出明显的痕迹,在使用过程中不能引起重视,而实际晶粒内部结合力已被严重的破坏,所以是一种很危险的腐蚀<sup>[8]</sup>。

结合上述热处理工艺,继续探究碳化物析出量

对晶间腐蚀性能的影响程度。选取三种典型试样,按照 GB/T 4334—2020 金属和合金的腐蚀 奥氏体及铁素体-奥氏体(双相)不锈钢晶间腐蚀试验方法中 E 法进行腐蚀试验。

如图 5 所示,图(a)~(a-1)为正常固溶处理后的试样(奥氏体组织,无碳化物析出相)经过晶间腐蚀试验后的形貌,在 10 倍放大镜下观察其弯曲外表面,弯曲完好无晶间腐蚀裂纹;图(b)~(b-1)为经过 750 °C 保温 2 h 热处理后的试样(少量碳化物析出相沿晶界呈链状断续分布)经过晶间腐蚀试验后的形貌,观察其弯曲外表面可见龟裂特征,典型的晶间腐蚀裂纹;图(c)~(c-1)为经过 750 °C 保温 10 h 热处理后的试样(大量碳化物析出相沿晶界连续分布)经过晶间腐蚀试验后的形貌,可见弯曲后表面龟裂扩展,形成严重的开裂。因此可知,316H 不锈钢试样组织中出现了碳化物析出相,便会影响其耐晶间腐蚀性能,随着碳化物析出相的增加,其耐腐蚀性能急剧下降,不能满足产品使用要求。



注:(a),(a-1)正常固溶处理试样;(b),(b-1)750 °C 保温 2 h 热处理试样;(c),(c-1)750 °C 保温 10 h 热处理试样。

图5 不同碳化物析出情况下的晶间腐蚀试样形貌

## 5 结论

(1)分析 316H 不锈钢碳化物析出相产生的原因,对于大锻件,由于心部冷速慢,会导致碳化物沉淀相析出,且随着热处理温度降低,在敏化温度区间停留时间增加,碳化物由在晶界呈短棒状零星分布,逐步加剧为链状断续分布,析出严重至沿晶界连续分布,EBSD 分析碳化物析出相为  $M_{23}C_6$ 。

(2)随着碳化物析出相的增加,试样的常规冲击及时效冲击均呈下降趋势,对于碳化物沿晶连续析出的试样,其冲击性能不能满足核电设备部件制造中其技术条件的要求。

(3)分析碳化物析出相对晶间腐蚀性能的影响,结果显示组织中析出了碳化物沉淀相,便会影响其晶间腐蚀性能,随着析出相的增加,其腐蚀试验弯曲后表面由细小的龟裂裂纹扩展为严重的开裂,耐晶间腐蚀性能急剧下降,不能满足产品使用要求。

## 参考文献:

- [1] 裴海洋. 核电用 316LN 不锈钢在不同温度下的形变行为和机理[D]. 北京:北京科技大学,2015
- [2] 燕春光,李雅平,王明政. 钠冷快堆堆容器堆内构件用 316 型不锈钢及其持久断裂性能[J]. 钢铁研究学报,2008,30(12):935-942
- [3] 邢梦楠,胡昕明,杨雨泽,等. 固溶热处理对 316L 奥氏体不锈钢性能的影响[J]. 轧钢,2024,41(2):44-49+58
- [4] 邵春娟,米国发,许磊,等. 冷速对 316H 大锻件固溶处理后析出相及晶间腐蚀的影响[J]. 金属热处理,2018,43(10):60-66
- [5] 乔思凡,赵志伟,许少言,等. 固溶温度对 316L 不锈钢性能的影响[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2017,37(3):177-179+189
- [6] 丁秀平,刘雄,何燕霖,等. 316L 奥氏体不锈钢中时效条件下析出相演变行为的研究[J]. 材料研究学报,2009,23(3):269-274
- [7] 张述林,李敏娇,王晓波,等. 18-8 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报,2007(2):124-128
- [8] 张根元,吴晴飞. 固溶处理温度对 304 奥氏体不锈钢敏化与晶间腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护,2012,33(8):695-698

# 变桨后备电源充电控制策略研究

杨恺 李雨蒙

东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**变桨系统是风力发电机组的核心控制系统之一,配备有一定容量的后备电源用于在电网非计划性掉电时提供驱动叶片回到安全位置的必要能量。随着变桨后备电源容量不断增大以及双驱变桨系统的出现,在此提出了基于双充电机协同的新型充电控制策略,缩短充电时间,降低后备电源类故障,提升变桨系统可靠性。

**关键词:**变桨系统; 后备电源; 充电策略

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)04-0064-04

## Research on Charging Strategy of Pitch System Backup Power Supply

YANG Kai, LI Yumeng

(Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** The pitch the system is the core control system of WTGs and generally is equipped with a backup power supply to provide the necessary energy to drive the blades back to feather position during unplanned power outages from the grid. With the increasing capacity of backup power supply and the emergence of dual-drive pitch systems, this paper proposes a novel charging control strategy based on the coordination of dual charger, which aims to shorten charging time, reduce faults related to the backup power supply, and enhance the reliability of the pitch system.

**Key words:** pitch system; backup power supply; charger strategy

后备电源作为风电机组电动变桨系统的核心部件之一,是变桨系统在主电源故障情况下的应急供电设备,用于提供完成风轮安全收桨的必要能量,避免飞车事故的发生。因此,后备电源的输出能力和可靠性直接关系到变桨系统乃至整个风电机组的安全<sup>[1-2]</sup>。

电动变桨系统发展至今,后备电源形成了以蓄电池和超级电容为代表的两类不同技术路线。蓄电池具有能量密度高、技术成熟等优点,但存在充放电效率低、寿命有限等问题<sup>[3]</sup>。超级电容则相对蓄电池功率密度更高、充放电速率快、循环充放电寿命长等优点,逐渐成为变桨系统后备电源的主流选择。

后备电源的性能除了受电压、温度等工作环境影响外,充电控制策略也是关键因素之一。科学的

充电控制方法可以提高后备电源的充电速率,抑制寿命衰减,减少故障率。因此,针对不同类型后备电源的特性,设计科学合理的充电控制方法意义重大<sup>[4]</sup>。

### 1 后备电源

目前电动变桨系统后备电源仍以蓄电池和超级电容模组为主,虽然近年来逐渐出现了新型锂离子超级电容但应用相对较少,本节仅就蓄电池和超级电容模组的相关特性进行论述。

#### 1.1 蓄电池

蓄电池在变桨系统领域的应用已经经历了数十年的发展,技术已经相对成熟,性能稳定可靠。蓄电池能力密度大、成本低且能够输出相对稳定的

收稿日期: 2025-02-08

作者简介: 杨恺(1992—),男,2015年毕业于上海交通大学电气工程与自动化专业,本科,高级工程师。现任职于东方电气风电股份有限公司风电研发设计院,从事风电机组变桨控制系统研发工作。

电压,可以为变桨系统中的伺服电机、PLC 控制器、变桨驱动器等设备供电,确保变桨系统的正常运行。由于上述优点,在我国风电发展早期,蓄电池是变桨系统主流的后备电源选择。

但是随着老旧变桨系统的服役过程接近末期和技术的不断进步,蓄电池的缺点也日渐突出。首先,蓄电池的充放电速度慢,尤其是在深度充放电时,完成一次完整工作周期时间较长。这可能会导致变桨系统无法及时响应主控系统指令迅速动作,增加故障停机时间。其次,蓄电池的循环充放电次数较少,容量会随着充放电次数的增加不断衰减,输出能力等性能表现也会逐渐变差。最后,蓄电池的充放电性能受低温环境的影响较大,其充放电效率会降低,在我国北方等寒冷地区,其低温特性可能导致在极端情况下无法向变桨驱动器输出电能。

## 1.2 超级电容

超级电容模组有多个超级电容单体串并联而成,功率密度大,充放电速率快,这种特性使得变桨系统可以在电网掉电时从超级电容模组中获得大量能量,确保桨叶快速响应,有效提升机组安全性。另一方面,超级电容的充放电循环次数高,对温度特别是低温环境的适应能力强,在低温环境下仍能保持强大的输出能力不衰减。因此,超级电容逐渐替代蓄电池发展成为了目前变桨系统的主流后备电源<sup>[5-8]</sup>。

目前主流的超级电容模组大多内置了主动均压电路,可动态调整各单体电压,保证模组各个单体之间的电压处于一个合理的范围,避免因部分单体过压或欠压引发模组故障。但超级电容的容值会随电压、温度等因素变化,在存储过程中,会有一定程度的电能自损耗,若长时间存放不进行充放电还可能会导致损坏,需要定期对超级电容进行补能。上述特性就要求充电控制策略具备动态调整能力,可根据超级电容的电压、温度等状态实时控制充电机输出的充电电流与电压,防止过充、过压等情况,保障超级电容工作在适宜工况。

## 2 充电机制及充电策略

变桨系统后备电源的充电装置分为外置充电机和驱动器内置充电机两类。

### 2.1 外置充电机

外置充电机由系统主回路供电,经内部整流后为后备电源充电,典型单线图如图 1 所示。外置充电机具有灵活性高、维护方便、适用范围广等优点,在变桨系统的发展初期得到了广泛的应用。但外置充电机特别是单相式充电机容易受电网波动影响,故障率较高;充电控制由器件本身独立完成,个性化控制需求实现难度大,特别是需要多机协同的控制场景比较受限;需要额外占用柜内空间增加成本等,因此在变桨系统的应用中已逐步淘汰。

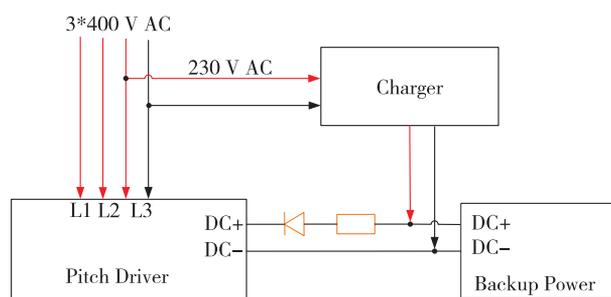


图 1 外置充电机单线图

### 2.2 内置充电机

内置充电机集成在伺服驱动器内部,与驱动器的直流母线和后备电源直接相连,其充电电路主要包含整流桥、滤波电容、功率开关管、整流二极管、控制芯片等器件<sup>[9]</sup>,如图 2 所示。在充电过程中,变桨驱动器通过控制功率开关管的导通和关断,实现对充电机输出的控制,确保充电的安全性和稳定性,并且能够根据后备电源的状态自动调整充电参数,在保证安全的前提下提高充电效率。

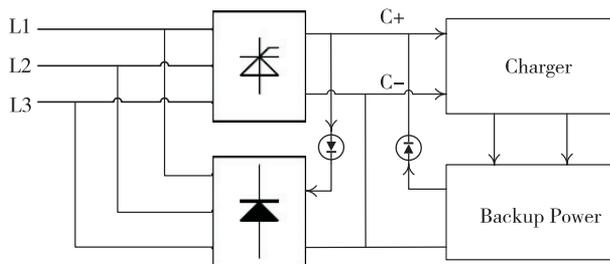


图 2 内置充电机单线图

与外置充电机相比,内置充电机集成度高,明显降低变桨系统复杂度,减少器件和故障点,减少硬件采购和安装调试成本,控制灵活,可根据对后备电源的实时监控动态调整控制策略,优化充电过程。但受限于驱动器内部条件,在充电功率方面存

在一定限制。

### 2.3 常见充电策略

变桨系统后备电源充电控制方法分为恒流充电和恒压充电两种(图3)。在恒流充电模式下,控制充电机以恒定电流输出,从而使电容电压迅速上升,适用于对充电速度要求较高且超级电容初始电压较低的情况,但是若持续恒流模式充电,在设定充电电压阈值附近容易因为过大的充电电流导致部分单体过压造成超级电容模组损坏。在恒压充电模式下,控制充电机以恒定电压输出减小充电电流,避免超级电容模组由于过大的充电电流导致瞬时过压,在后备电源电压达到设定电压后,充电电流会自动调节进行涓流输出。但恒压模式在超级电容电压较低的区间由于目标电压与实际电压偏差大,会导致过大的充电电流,超级电容由于瞬时大电流注入容易出现过温等问题。

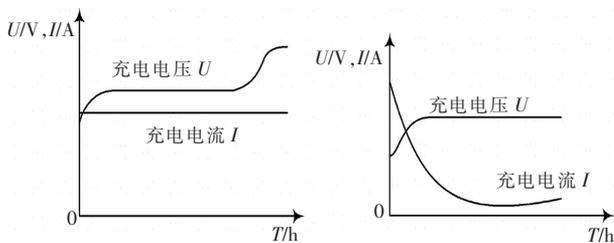


图3 恒流与恒压模式的充电特性图

目前变桨系统主流的充电策略是恒流-恒压相结合的控制方式,即在超级电容电压较低的充电初期,以恒定电流进行补能,迅速提升电压,对于内置式充电机还可以动态调整充电电流,尽可能增加恒流充电范围,缩短充电时间。在电容电压接近预设充电电压值时,充电机切换至恒压模式,以涓流对后备电源进行持续补能,如图4所示。

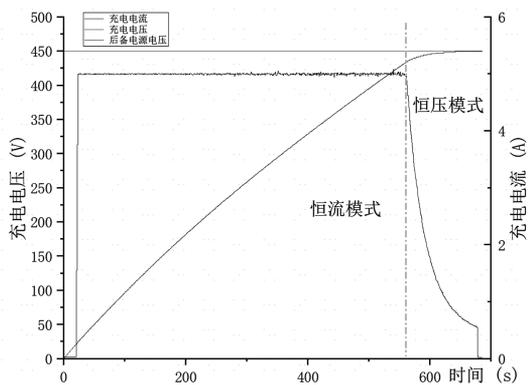


图4 恒流-恒压充电曲线图

## 3 双充电机电路及控制策略

随着用于超大型风电机组的双驱电动变桨系统的出现,其后备电源容量大幅增加,后备电源充电时间显著增加。另一方面,这种新型双驱电动变桨系统每一支桨叶由两个伺服驱动器驱动,两个驱动器内部均集成了充电机。因此,在双驱方案下后备电源由两个充电机可用,双充电机在大幅提升充电速率的同时互为备份,有效降低充电机和后备电源类故障。

### 3.1 双充电机充电电路

如图5所示给出了一种典型双驱电动变桨系统充电电路,包含主、从两条充电回路,两条充电回路均包含控制模块、充电机、二极管,共同为后备电源充电;另一方面,后备电容同时与两个驱动的直流母线通过二极管连接为两个驱动器供电。与以往的多充电机并联方式不同,两个驱动器的控制模块之间通过高速内部总线实时通讯进行信息交互,作为双充电机协同控制的基础。

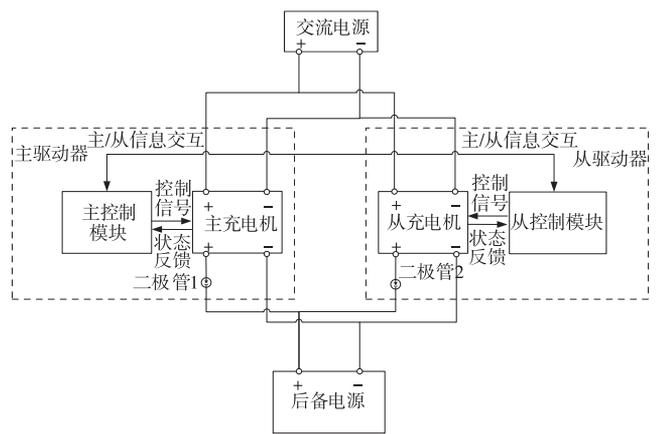


图5 双充电机充电电路

### 3.2 双充电机协同控制策略

对于有两个充电机共同为后备电源充电的双驱变桨系统,双充电机之间的协同配合显得尤为重要,虽然能够大幅提升充电速率,但也可能由于充电机的输出冲突引发故障。特别是在接近充电电压设定值的恒压充电阶段,由于两个驱动器测量到的后备电源电压不可避免的由于测量元件、线路阻抗的差异存在一定区别,这可能会导致超级电容实际电压超过设定电压值,部分单体长期处于过压状态将严重影响其寿命。

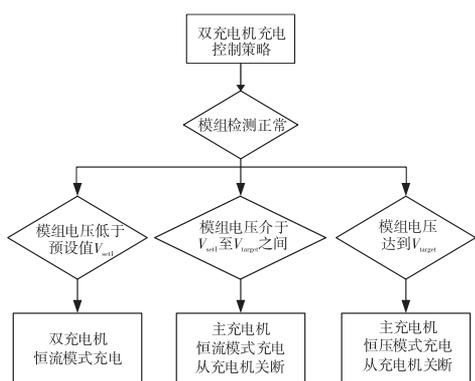


图6 双充电机协同策略

在超级电容模组状态和电压测量正常的条件下,同轴双驱动器基于实时信息交互和超级电容模组电压控制充电机通过不同的充电模式对超级电容模组充电。当电压低于预设电压值的  $V_{set1}$  时,主、从充电机通过恒流模式同时对超级电容模组充电,快速提升后备电源电压,在此阶段主从充电机之间互不影响,系统可发挥最大输出能力缩短充电时间。当后备电源电压介于  $V_{set1}$  和  $V_{target}$  时进入第二充电阶段,控制从充电机关断,仅以主充电机通过恒流模式对超级电容模组充电,值得注意的是,当后备电源电压接近目标充电电压  $V_{target}$  时,若持续以最大充电电流进行充电,可能会在恒流模式到恒压模式切换的过程中电流过大导致超级电容过压。因此在第二充电阶段中增加一个中间节点  $V_{set2}$ ,当后备电源电压达到  $V_{set2}$  后,减小充电机恒流模式的充电电流,以实现从恒流模式到恒压模式的顺利切换,避免后备电压过充的问题。当后备电源电压首次达到预设电压值  $V_{target}$  后,主充电机切换到恒压模式对超级电容模组充电,保持后备电源处于满电状态。

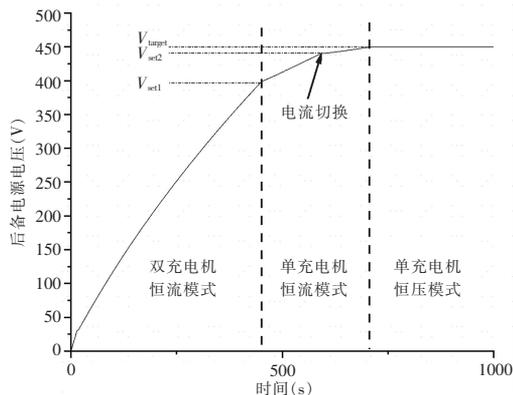


图7 双充电机协同充电曲线

相较于单个充电机充电策略,双充电机协同充电控制策略能大幅提升充电速率,后备电源充电时

间可降低约 50%,特别适合用于超大型海上风电机组大容量后备电源。

### 3.3 双充电机安全冗余

双充电机系统除了可以加快充电速率缩短充电时间外,还可以实现充电机的“双机热备”。当系统中单个充电机故障或充电回路失效时,故障信息可通过同轴驱动器之间的高速内部总线进行交互,系统切换至单充电机模式,由正常的单个充电机对后备电源充电,系统可不停机持续运行,当且仅当同轴两个充电机同时失效时变桨系统报出故障。当失效充电机或回路恢复后,系统自动切换回到双充电机模式。据统计采用双充电机冗余方案的双驱电动变桨系统年后后备电源类故障时间由 1.7 小时/台缩短至 0.2 小时/台,大幅提升变桨系统可靠性。

## 4 结语

本文所述的双充电机协同控制策略能够实现变桨系统后备电源的快速补能和充电机的“双机热备”,提升了充电效率和变桨系统可靠性,充电过程兼顾超级电容特性,有效抑制电容寿命衰减。这种控制策略适用于超大型海上风电机组的双驱电动变桨系统,并已经批量验证了该控制策略的优越性。

### 参考文献:

- [1] 苏胜,刘文平,周恒. 8 MW 海上风力发电机关键技术研究[J]. 广西电力,2022,45(4):38-44
- [2] 丁桂林,刘尧荣,郭雁一夫. 大型风电机组变桨系统设计[J]. 风能,2021(7):104-107
- [3] 侯绍虎. 大型风力发电机组变桨后备电源管理系统设计[D]. 湖南大学,2013
- [4] 黄雅君. 风力发电变桨后备电源智能管理系统[J]. 现代电子技术,2010,33(6):203-206+210
- [5] 郭晓宇. 超级电容在变桨系统中的应用[J]. 中国设备工程,2019(1):115-116
- [6] 刘伟. 超级电容储能装置作为兆瓦级风力机变桨系统备用电源的研究[D]. 华北电力大学(北京),2011
- [7] 鲁斌,刘剑,沈鑫. 基于超级电容的变桨系统后备电源容量测试功能研究与设计[J]. 工业控制计算机,2017,30(11):141-142
- [8] 张利元,王会龙,刘强. 风电机组变桨用超级电容测试系统设计[J]. 电工技术,2020(11):130-132+135
- [9] 王庆峰,项峰,王杭烽,等. 高集成式驱动器在变桨系统中的应用分析[J]. 风能,2019(5):102-105

# 废旧橡胶高附加值资源化利用技术进展

秦佳旺<sup>1</sup> 邓毅<sup>1,2</sup> 庄原发<sup>1,2</sup>

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001; 2. 能源清洁低碳热转化利用技术与装备四川省重点实验室, 成都 611731

**摘要:**随着“橡胶工业”的蓬勃发展,大量废弃橡胶由此产生。废旧橡胶的堆放和掩埋不仅会造成资源浪费,更会对水体、土壤等造成严重污染。因此,实现废旧橡胶的高附加值资源化利用很有必要。综述了目前文献中已报道的涉及化工过程与材料成型工艺的废旧橡胶直接/间接资源化利用技术,介绍了各种技术的原理、优缺点及研究进展。

**关键词:**废旧橡胶;高附加值;资源化利用;直接利用;间接利用

中图分类号:TQ31

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0068-05

## Review on High Value-added Resource Utilization Technologies of Waste Rubber

QIN Jiawang<sup>1</sup>, DENG Yi<sup>1,2</sup>, ZHUANG Yuanfa<sup>1,2</sup>

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China;

2. Clean Energy Low-Carbon Thermal Utilization Technology and Equipment Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** With the prosperous development of the rubber industry, a large amount of waste rubber is generated. The accumulation and burial of waste rubber will not only bring about waste of resources but also cause heavy pollution to water and soil. Therefore, it's necessary to realize the high value-added resource utilization of waste rubber. This paper reviews the direct and indirect utilization technologies of waste rubber involving chemical and material forming processes that have been reported in the literature and highlights the principles, advantages and disadvantages, and research progress of the technologies mentioned above.

**Key words:** waste rubber; high value-added; resource utilization; direct utilization; indirect utilization

橡胶是一类具有高弹性的聚合物材料,因良好的化学稳定性、绝缘性及机械性能在直接或间接加工后应用于建筑、汽车、医疗和运动器材等领域。橡胶制品在方便着人们生活的同时,更新换代产生的废旧橡胶也成为了第二大废旧高分子材料,对环境造成了不可小觑的“黑色污染”<sup>[1]</sup>。废旧橡胶的主要来源为废旧橡胶制品,如轮胎、胶带、胶辊和工业橡胶制品等。根据《废旧轮胎综合利用指导意见》,2018年我国废旧轮胎的产量为1 450万吨,而这只占废旧橡胶总量的60%至70%。废旧橡胶因化学稳定性和热稳定性较好难以通过自然降解处

理,而目前采用的露天堆放、露天焚烧和就地掩埋等方式会导致细菌传播、环境污染等危害。因此,采用灵活简单、经济性好的技术手段对废旧橡胶进行高附加值资源化利用,实现废旧橡胶的绿色回收很有必要。

本文以废旧橡胶高附加值资源化利用技术为出发点,根据是否改变废旧橡胶的原有物化性质为依据将目前文献已报道的高附加值资源化利用技术分为直接利用技术和间接利用技术,对各技术的原理、优劣及研究进展进行综述,以期后续开展废旧橡胶高附加值资源化利用工作提供新思路。

收稿日期:2024-09-09

作者简介:秦佳旺(1996—),男,2021年毕业于四川大学化学工程专业,硕士,工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司环保研发部,从事水污染处理技术研发工作。

## 1 直接利用技术

废旧橡胶可通过原形改制利用及再制造技术实现资源化回收利用。原形改制利用是指将废橡胶通过捆绑、裁剪和冲切等方式提高其经济附加值,从而实现资源化回收利用,如设置在港口码头作为船舶的缓冲防撞装置、设置成公路防护栏或水土保持栏或用于建造建筑隔音墙或弹性防护网、防撞装置及防滑胶垫等<sup>[2]</sup>。另外,Gupata 等人发现废旧橡胶中的硫磺可与 Hg、Cu 等重金属发生反应形成难溶于水的沉淀,因此废橡胶还可应用于去除水体重金属污染<sup>[3-4]</sup>。原形改制利用无需过多的能耗和人力成本,经济性较好。但该方法对废旧橡胶的消纳有限,多作为辅助手段。

对于废旧轮胎和废旧纤维芯橡胶传输带,再制造技术亦为可行的直接利用技术。简单来说,再制造技术是在保留废旧橡胶的骨架材料和部分橡胶材料基础上,对其磨损部位进行打磨、整体硫化、粘附新胶等工序从而实现资源化回收利用。该方法制得的再生轮胎的寿命恢复率最高可达 90%,同时节省了 30%至 50%的原材料消耗<sup>[5-6]</sup>。中国电器科学研究院有限公司的赵新等人基于新型拽刮工艺和超高压液压力硫化工序研制出废旧纤维芯橡胶传输带再制造工艺及移动式再制造成套系统装备。采用上述工艺硫化后的再生传输带可达新品指标的 80%以上,每吨再生传输带的利润约为 1.1 万元<sup>[7]</sup>。

## 2 间接利用技术

间接利用技术是指通过物理、化学或生物手段将瓦解废旧橡胶内部交联网络,将其分解成单体后再重组,最终转化为其他高附加值产品,大多属于化工技术。目前常用的间接利用技术有再生胶制备、胶粉利用、材料改性、裂解技术、燃料利用和橡塑共混再生利用,往往涉及到化工工艺及化工设备的应用。

### 2.1 再生胶技术

再生胶技术是利用化学、物理或生物手段将废旧橡胶的硫硫交联键(在原制造过程的硫化工艺中形成)断开,但仍保留橡胶原有成分,最终形成无高

弹性但仍具塑性和黏性的可再硫化橡胶。根据再生胶的制备手段不同,可分为化学再生法、物理再生法和生物再生法<sup>[8]</sup>。

#### 2.1.1 化学再生法

化学再生法是指在一定温度、压力和化学再生剂作用下,废橡胶中的硫-硫键(S-S bond)断开,导致橡胶内部交联网络分解,形成具有可塑性的再生胶工艺<sup>[8]</sup>。传统化学再生法制备再生胶工艺包括油法、水法和动态再生法,这些方法能耗高、安全隐患大且再生过程中会产生废气废水,难以适应新形势下的工业生产<sup>[1]</sup>。随着国家对工业领域提出了绿色、节能、智能、清洁的要求,常压连续挤出再生工艺和常温法再生工艺受到了关注<sup>[9]</sup>。前者是在常压干燥条件下,将硫化胶粉和各种再生助剂均匀混合后,输送到密闭螺旋结构再生装置中。利用热空气作为氧化剂并提供高温环境、辅以活化剂和软化剂的化学作用,螺旋结构对物料形态的重塑作用等使废硫化橡胶的交联网络分解重构形成具有塑性的橡胶材料。后者利用开炼机、密炼机或螺杆挤出机提供的机械剪切力使再生剂均匀覆盖在硫化橡胶粉表面,形成“核-壳”结构颗粒。随时间延长,再生剂逐渐浸润、渗入到胶粉内部,从而削弱 S-S 键的键能致使橡胶内部交联结构分解,进而实现再生<sup>[10]</sup>。总体来说,化学再生法的工艺虽在不断进步,但因涉及到添加化学添加剂,且对反应设备提出一定工艺要求,难以从源头上解决再生橡胶制造过程中的环保问题。

#### 2.1.2 物理再生法

相比于化学再生法,物理再生法可在不添加化学再生剂的情况下,通过引入外部能量(如射线、微波、光波和机械力等)打开橡胶内部交联网络的 S-S 键和 S-C 键,从而形成具有流动性的再生橡胶。根据外加能量种类不同,物理再生法可分为微波再生法、超声波再生法、机械挤出法和超临界 CO<sub>2</sub> 法等<sup>[11-12]</sup>。微波再生法和超声波再生法分别以微波和超声波作为外加能量选择性切断橡胶交联网络内部的部分交联键(如 S-S 键、C-S 键)而不影响橡胶大分子主链或橡胶交联网络中的碳骨架,从而制备出性能接近于原胶的再生胶。机械挤出法是利用外界施加的机械应力削弱橡胶聚合物分子间和

分子内的作用力,破坏废旧橡胶内部的三维交联网络,导致聚合物内部化学键断裂,产生大分子自由基,从而引发聚合物降解或交联等变化。

超临界 CO<sub>2</sub> 法是指在临界态 CO<sub>2</sub> 流体氛围中利用再生设备(如螺杆挤出装置)制备再生胶。在该过程中,超临界 CO<sub>2</sub> 流体不参与反应,只充当传质、溶胀废旧橡胶及隔绝空气的角色。得益于超临界 CO<sub>2</sub> 的高溶解传质性能、低粘度和高扩散系数,废旧橡胶可在超临界 CO<sub>2</sub> 流体氛围中迅速溶胀,增大内部压力,减弱分子间作用力,交联键处于伸展状态。此时降低再生设备压力(外部环境压力),橡胶内外压差会导致交联键受到应力而断裂,橡胶内部三维交联网络被瓦解成线性大分子链结构,实现废旧橡胶的再生(图 1)<sup>[13-14]</sup>。

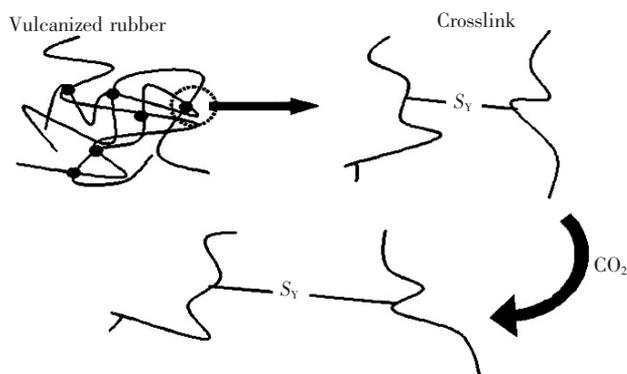


图 1 超临界 CO<sub>2</sub> 流体对废旧橡胶内部交联网络的作用

### 2.1.3 生物再生法

微生物再生是指在嗜硫细菌(如氧化亚铁硫杆菌、氧化亚硫硫杆菌和排硫硫杆菌等)作用下,废旧橡胶中的硫磺组分从橡胶表层游离出来以单质或硫酸形式存在,导致橡胶聚合物中 S-S 键被破坏,聚合物交联网络分解,失去弹性,最终成为再生橡胶<sup>[15]</sup>。该方法可常温条件下进行且无需化学助剂,污染小、成本低。但部分菌种在前期培养过程中对设备和环境要求较高,且在工艺执行过程中要严格做好防护措施以防菌种泄露,对人力和设备提出较高要求,目前尚未实现工业化。

## 2.2 基于胶粉制备的材料改性技术

胶粉即废旧橡胶经碾磨处理后形成的单分散性良好的橡胶颗粒。与废旧橡胶的原始状态相比,胶粉中不含金属、纺织物等杂质、质地轻且干燥、比表面积更大。胶粉的生产过程中不涉及二次污染,

废橡胶使用率可达 100 %。目前,胶粉的主要制备方法为常温粉碎法、低温粉碎法和溶液粉碎法<sup>[16]</sup>。常温粉碎法是利用剪切作用将废旧橡胶切断、破碎形成胶粉。该方法生产的胶粉为毛刺状、比表面积较大,易于后期活化改性。低温粉碎法是采用液氮或其他冷冻介质及空气涡轮制冷装置等设备,将废旧橡胶从弹性态转变为脆性态。脆性态橡胶再进入磨盘机粉碎成胶粉。该法制得的胶粉具有平滑均一的表面及内部结构,属高品质产品。溶液粉碎法是将粗粉碎后的废旧橡胶置于水或其他有机溶剂中进行预处理,再进入磨盘式胶体研磨机粉碎,后进行脱溶剂干燥,最终形成胶粉。该方法工艺复杂,涉及到传热传质等化工过程,且需要使用大量的有机溶剂,易产生有机废液、含硫气体等副产物,造成二次污染。

目前,废旧橡胶制成的胶粉除用于生产胶粉制品外,还可在熔融状态下作为改性剂分散于建筑材料中(如沥青、混凝土)以增强其高低温适应性、弹性恢复量、抗疲劳强度、摩擦性能和粘接性等<sup>[17]</sup>。该法因在降低改性材料成本的同时实现对建筑材料性能的显著正向调控而受到学者的广泛关注。

在利用橡胶优化沥青性能方面,李国峰<sup>[18]</sup>等人研究了废橡胶粉添加量和粒径对改性沥青的物化和机械性能的调控作用。实验发现当废橡胶粉用量为 15 %、粒径为 80 目时,改性沥青的性能最佳。方长青等人<sup>[19-20]</sup>以废旧橡胶粉和废弃聚乙烯粉作为改性剂,对普通石油沥青进行改性处理。研究表明,废橡胶与沥青中的轻质成分结合,降低沥青中自由基数量,减少沥青烯的产生,提高了沥青的抗老化性能。同时,废橡胶粉中的抗氧化剂和抗臭氧剂也可起到相同作用。

在提高水泥性能方面,加入废橡胶粉可显著提高水泥的抗疲劳、防冻及渗透性能。Oikonomou 等人<sup>[21]</sup>将胶粉等质量替代 SiO<sub>2</sub> 作为添加剂加入至水泥砂浆中,发现水泥抗氯离子渗透性能得到显著提升,抗氯离子渗透性能最大可提高 56 %。Guneyisi 和 Gesoglu 等人<sup>[22-23]</sup>研究发现掺入橡胶会降低水泥坍塌落度,并提高改性水泥的抗冲击和抗裂性能。

### 2.3 热裂解技术

废橡胶的热裂解是指利用废橡胶中有机物的

不稳定性,在温度为 500~1 000 ℃,无氧或弱氧且不引起燃烧的条件下热裂解废橡胶<sup>[8]</sup>。其反应实质为有机大分子在加热状态下分解成小分子,从而打破原有交联结构。热裂解由一系列化学和物理转化构成,包括大分子主链化学键断裂、异构化和小分子聚合等。热裂解产物均可再次投入使用,是较好的废橡胶回收技术。热解气体(如氢气、一氧化碳、甲烷等)的热值与天然气相当,可常作为燃料气体。液体产物(有机酸、醇、焦油、芳香烃等)可作为燃料使用,也可作为催化裂化原料用于油品生产。固体产物炭黑可用作橡胶制品填充剂增加产品强度、也可用于活性炭制备。

#### 2.4 燃料利用

废硫化橡胶主要由碳、氢和氧元素组成,总含量接近 90%,具有高热能潜力。废硫化橡胶燃烧热约 33 MJ/kg,与优质煤(25 MJ/kg)相当,其燃烧效率优于油和木料<sup>[24]</sup>。近几年,在国家节能环保要求日益严格,废硫化橡胶热潜能的开发受到关注。在将废硫化橡胶作为燃料使用时,考虑到环保要求,可采取密闭空间燃烧方式。产生的热能可用于发电、钢铁炼焦、工业废水处理热源供应以及日常生活等领域。

#### 2.5 橡塑共混再生利用

橡塑共混是一种将橡胶与塑料融合的工艺,能够生产出兼具二者特性的复合材料。共混过程中,橡胶和塑料在界面处交互结合,导致二者性能既互补又保持独有特性,且不产生副产物。因橡胶的加工可塑性普遍差于塑料,塑料的加入能够大幅提高复合材料的流变性能,降低生产难度,提高生产的灵活性。相应的,在塑料中加入橡胶添加剂也能增加弹性和冲击性,缓解复合材料在低温下脆性破裂等问题<sup>[25]</sup>。

现阶段,该方向研究热点是缓解两者相容性差异,提升二者在相界面处的结合能力。Nevatia 等人<sup>[26]</sup>将再生胶粉和废旧塑料共混制备成热塑性弹性体,从物化性质、机械性能和相流变性能方面对其进行探究,并与其它以天然或低线性材料相互组合形成的共混体进行比较。结果表明,在硫促动态交联系统下,再生胶粉和废旧塑料按 1:1 共混得到的材料最好,与以天然材料为原料形成的共混体相当。利

用再生胶粉-废旧塑料共混体制备热塑弹性体既解决了橡塑固废材料带来的环境影响,也提高了工艺经济性。

### 3 结语

近年来,因废旧橡胶的易于规模化放大的翻新工艺、对沥青和混凝土等建筑材料良好的改性能力和高热值等特点,废旧橡胶的高附加值资源化回收利用已得到了学界的广泛关注。目前,已开发出多种废旧橡胶的高附加值资源化回收利用技术,且部分技术已实现成熟的工业化并具有良好的技术经济性。相信随着未来环保产业地位的提高、国家相关法律法规的进一步完善,废旧橡胶高附加值资源化回收利用技术会继续朝着绿色、健康、可持续发展的方向不断发展。

#### 参考文献:

- [1] 李岩,张勇,张隐西. 废橡胶的国内外利用研究现状[J]. 合成橡胶工业,2003(1):59-61
- [2] 刘伟,王宝民. 废旧橡胶资源化利用途径[C]//中国城市科学研究会,中国绿色建筑委员会,北京市住房和城乡建设委员会. 第六届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 大连理工大学土木工程学院,2010:369-371
- [3] Gupta V K, Ganjali M R, Nayak A, et al. Enhanced heavy metals removal and recovery by mesoporous adsorbent prepared from waste rubber tire[J]. Chem Eng J, 2012, 197:330-242
- [4] 矫淑卿. 废旧轮胎回收利用技术进展[J]. 山东化工, 2006(5): 25-29
- [5] Egan Archer. Emerging Solutions for Managing Scrap Tyres: Technology Options and Market Opportunities [M]. Juniper Consultancy Services Ltd, 2004
- [6] Secretariat of Basel Convention. Technical guidelines on the identification and management of used tyres [R]. United Nations Environment Programme, 2000: 1
- [7] 赵新,符永高,胡彪,等. 废旧工程机械发动机成套设备开发及示范—废旧橡胶输送带再制造[J]. 中国科技成果, 2015(11):14
- [8] 赵庆镇. 具有微纳结构的再生胶在轮胎橡胶中的应用[D]. 青岛科技大学, 2023
- [9] 卢娜. 废硫化橡胶资源化可控制备及多相复合材料结构与性能研究[D]. 青岛科技大学, 2017
- [10] 朱信明,辛振祥,卢灿辉. 再生橡胶:原理·技术·应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2016

- [11] 史金炜,张立群,江宽,等. 废橡胶脱硫再生技术及新型再生剂研究进展[J]. 中国材料进展,2012,31(4):47-54
- [12] 高文廷,杜爱华,辛振祥. 国内外再生胶生产研究现状[J]. 橡塑技术与装备,2012,38(2):31-35
- [13] Jiang K, Shi J W, Ge Y Y, et al. Complete devulcanization of sulfur-cured butyl rubber by using supercritical carbon dioxide[J]. J. Appl. Polym. Sci., 2013, 127(4):2397-2406
- [14] Mangili I, Collina E, Anzano M, et al. Characterization and supercritical CO<sub>2</sub> devulcanization of cryo-ground tire rubber: influence of devulcanization process on reclaimed material [J]. Polym. Degrad. Stab., 2014, 102:15-24
- [15] 吴翠,廖小雪,陈荣凤. 废旧橡胶脱硫再生胶的研究现状[J]. 特种橡胶制品,2010,31(5):66-70
- [16] 刘增元. 国内外废橡胶资源利用趋势及胶粉的应用现状[J]. 再生资源研究,2000(5):15-19+37
- [17] 魏冕. 废旧橡胶塑料类沥青混合料性能研究[D]. 山东建筑大学,2018
- [18] 李国峰,陈梅. 废橡胶粉改性沥青性能的研究[J]. 当代化工, 2016,45(5):900-904+
- [19] Fang C, Wu C, Yu R, et al. Aging properties and mechanism of the modified asphalt by packaging waste polyethylene and waste rubber powder[J]. Polym Adv Techn, 2013, 24(1):51-55
- [20] 胡彪,张晓雨,赵新,等. 废旧橡胶制品资源化利用研究进展[J]. 材料导报,2014,28(3):75-79+87
- [21] Oikonomou N, Mavridou S. Improvement of chloride ion penetration resistance incement mortars modified with rubber from worn automobile tires [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(6):403-407
- [22] Gesoğlu M, Güneyisi E. Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume, Mater. Struct., 2007,40:953-964
- [23] A. Benazzouk, O. Douzane, M. Quéneudec, Transport of fluids in cement-rubber composites, Cement Concr. Compos., 2004, 26(1):21-29
- [24] 杜爱华,刘双喜,牛斌. 废橡胶热解与热能利用[M]. 北京:化学工业出版社,2015
- [25] 曹凌云,朱瑞,胡春星,等. 废旧橡胶和塑料再生利用的研究现状[J]. 橡塑资源利用,2011(1):7-12
- [26] Nevatia P, Banerjee T S, Dutta B, et al. Thermoplastic elastomers from reclaimed rubber and waste plastic. J. Appl. Polym. Sci., 2002, 83(9):2035-2042

# 多堆燃料电池流量分配特性的歧管参数分析

程友星<sup>1,2</sup> 刘煜<sup>1,2\*</sup> 朱鼎<sup>1</sup> 林美琪<sup>1</sup> 胡军<sup>1</sup>

1. 东方电气(成都)氢能科技有限公司,成都 611731;2. 氢电转换四川省重点实验室,成都 611731

**摘要:**研究建立了多堆质子交换膜燃料电池系统三维模型。采用多孔介质模型模拟并通过流体仿真求解,研究了阴极歧管尺寸对多电堆流量分配均匀度的影响。仿真结果表明:增大阴极主歧管尺寸可以提高多堆燃料系统的流量分配均匀性;相对于进气主歧管,排气主歧管尺寸对多堆燃料系统流量分配一致性影响更大。文中结果可以指导多堆燃料电池系统流量分配歧管设计。

**关键词:**多堆质子交换膜燃料电池系统;歧管尺寸;流量分配

中图分类号:TM911.4

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0073-06

## Manifold Parameter Analysis of Flow Distribution Characteristics of Multi-stack Fuel Cells

CHENG Youxing<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>1,2\*</sup>, ZHU Ding<sup>1</sup>, LIN Meiqi<sup>1</sup>, HU Jun<sup>1</sup>

(1. Dongfang Electric (Chengdu) Hydrogen Energy Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. Hydrogen Electricity Interconversion Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** A three-dimensional model of a multi-stack proton exchange membrane fuel cell system was established. The effect of the cathode manifold size on the uniformity of flow distribution of the multi-stack was studied by using the porous media model and solved by the fluid simulation. The simulation results show that increasing the size of the main cathode manifold can improve the flow distribution uniformity of the multi-stack fuel system. Compared with the intake main manifold, the size of the exhaust main manifold has a greater impact on the consistency of flow distribution in the multi-stack fuel system. The results in this paper can guide the design of flow distribution manifolds for multi-stack fuel cell systems.

**Key words:** multi-stack proton exchange membrane fuel cell system; manifold size; flow distribution

质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一种清洁高效电化学能量转换装置,目前受到越来越多的关注,只因它具有零排放、冷启动性能好、功率密度高、辅助零部件少等优势,在固定式电站、移动式电源与家用热电联产等领域得到极其广泛应用<sup>[1-2]</sup>。可是,目前大功率单堆燃料电池系统的技术方案还未得到完全地突破,价格高且无法长期运行的缺

点<sup>[3]</sup>。为了解决目前这些问题,人们多采用多堆的燃料电池系统来满足大功率的需求。多堆燃料电池系统是含有多个小功率电堆构成的燃料电池发电系统,并不是只含一个大功率电池组,弥补了燃料电池耐久性差,并极大地增强了系统的稳定性<sup>[4-5]</sup>。

多堆燃料电池系统是由多个电堆组成,如果多

收稿日期:2025-05-23

**作者简介:**程友星(1990—),男,2017年毕业于华北电力大学机械制造及其自动化专业,硕士,工程师。现在东方电气(成都)氢能科技有限公司,主要从事氢燃料电池系统开发工作。

刘煜(1986—),男,2013年7月毕业于西安交通大学化学工程专业,博士,高级工程师,现在东方电气(成都)氢能科技有限公司,主要从事氢燃料电池系统开发工作。通信邮箱:liuyu02@dongfang.com。

堆燃料电池系统中电堆间有性能上的差异,那么系统性能将会受性能最差电堆功率的限制<sup>[6]</sup>。所以,为减小电堆间的性能差异且保证每个电堆之间性能上的一致性,电堆间的流量分配均匀性就尤为重要。

本文利用多孔介质简化电堆模型建立多堆燃料电池系统三维模型并通过流体仿真求解,研究了阴极主歧管参数尺寸对多堆燃料电池系统流量分配均匀性的影响。

## 1 几何模型及多堆系统模型相关参数

### 1.1 多堆系统模型

进、出口歧管是电堆是极其重要的组成部分,电堆一般有 3 对歧管,分别为燃料(氢气)、空气或氧气和冷却液<sup>[7]</sup>。不小于 2 个电堆的单个燃料电池系统称为多堆燃料电池系统,本文按 5 个电堆为例,以 a 阴极空气歧管为研究对象。图 1 所示为 5 个电堆上下叠放方式燃料电池系统简化模型,气流方式采用的是 U 型方式,每个电堆单元模块的额定功率大约为 24 kW 左右。空气或氧气从右端底部进入,图 1 右侧进气主歧管经过支管将空气或氧气均匀地分配到 5 个电堆中,反应过后的废气从各电堆出口支管汇流于排气主歧管,最终一起排出。现将 5 个电堆从上至下排序,序号依次为 1、2、3、4、5。通常电堆对气体的阻碍作用,这与多孔介质较为相似,所以本文将电堆作为多孔介质,其具体的结构参数如表 1 所示。简化系统模型均取支路数为 5、主路数为 2,对应的支路、主路面积比设定为主面积比  $S_p$ :

$$S_p = \left( \sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4} \right) \cdot \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)^{-1} \quad (1)$$

上述式中,  $d_i$  为第  $i$  电堆的支路直径;  
 $D$  为进、排气主歧管的直径。

对氢燃料电池系统进行数值流体仿真分析时,作如下假设:

- 氢燃料电池仿真模型在稳定状态下运行;
- 电堆模型中多孔介质各向同性;
- 气体是理想性气体,无法压缩;
- 不考虑重力。

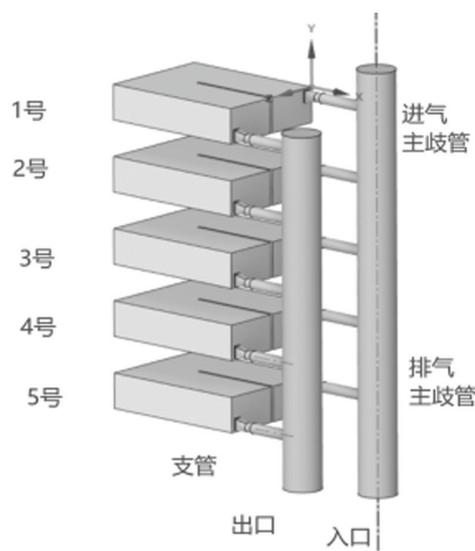


图 1 多堆燃料电池系统简化模型

表 1 多堆系统的结构参数

参数(单位)	值
电堆长(mm)	527
电堆宽(mm)	420
电堆高(mm)	153
支管歧管直径(mm)	38
额定工作点(A/cm <sup>2</sup> )	0.6
反应面积(cm <sup>2</sup> )	310
空气进口压力(kPa)	30.2
运行温度(K)	343
空气计量比(-)	2
电堆节数(节)	170
电堆个数(个)	5
电堆间距(mm)	255

### 1.2 控制方程

根据 1.1 中流体仿真分析的假设,质量守恒方程与动量守恒方程分别如公式(2)所示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot \tau - \nabla p + S_i \quad (3)$$

式中: $i$  取 1,2,3,依次代表是  $x,y$  和  $z$  的坐标方向; $\rho$ -空气密度; $u$ -空气速度; $\tau$ -应力张量; $p$ -静压; $S_i$ -源项; $t$ -时间; $\nabla$ -梯度算符。

采用多孔介质方式简化电堆模型。针对各向

同性的多孔介质,源项分别由黏性损失项与惯性损失项构成,其控制方程为:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}u_i + C_2\rho|u|u_i\right) \quad (4)$$

$\alpha$ -孔隙率。

由于电堆多孔介质范围流速较低,所以可以看作层流。其控制方程简化为:

$$S_i = -\frac{\mu}{\alpha}u_i \quad (5)$$

### 1.3 流阻特性

电堆多孔介质模型是利用速度和压降方法确定模型。在进行仿真多孔介质设定时,需确定每个方向粘性阻力和惯性阻力因数。两个因数矩阵可以确定每个方向压降与速度的关系,进而利用速度计算出压损。多孔介质压损与速度之间的函数关系如式(6)~(8)

$$\nabla P = av^2 + bv \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{2}C_2\rho\Delta n \quad (7)$$

$$b = \frac{\mu}{\alpha}\Delta n \quad (8)$$

式中, $a$ :二阶系数; $b$ :一阶系数; $C_2$ :惯性阻力因数; $\rho$ :流体密度; $\Delta n$ :沿着该方向的多孔介质厚度; $\alpha$ :渗透率; $1/\alpha$ :粘性阻力因数; $\mu$ :动力粘度。

## 2 参数化研究结果

本文使用参数化方法进行流量分析,各燃料电池堆间流量分配的均匀性,可用参数化质量流量表示,其表达式为

$$\beta_i = Q_i/\bar{Q} \quad (9)$$

式中, $Q_i$ -第*i*电堆的质量流量;

$\bar{Q}$ -所有电堆的平均质量流量。

评价质量流量比 $\beta_i$ 分布的离散程度,采用 $\beta_i$ 的标准差 $\varphi$ 进行分析,其表达式:

$$\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\beta_i - \bar{\beta})^2}{n}} \quad (10)$$

上述式中, $n$ -电堆总数;

$\bar{\beta}$ -流量比平均值, $\bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i$ 。

将标准差 $\varphi$ 作为评价流量分配均匀性参数,其数值越小表明各电堆内流量就越靠近平均值,进而说明燃料电池系统的流量一致性就越好,然而,标准差 $\varphi$ 越大说明燃料电池系统的流量一致性就越差。

## 3 结果与分析

### 3.1 进气主歧管尺寸的影响

多堆系统的多堆整体寿命取决于寿命最短的电堆,流量分布不均匀会降低电堆的性能并加速电堆的老化。根据电堆运行参数和结构,各电堆支管的进、排气口直径都为38 mm。初始排气主歧管为130 mm,改变进气主歧管尺寸分别为:60 mm,85 mm,94 mm,100 mm,107 mm,114 mm,120 mm,130 mm,详细参数如表2所示。

表2 不同进气主歧管尺寸参数

进气主歧管 $D_1$ (mm)	排气主歧管 $D_2$ (mm)	$S_p$	$Q$ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )
60	130	0.5	0.121 2
85	130	1	0.121 2
94	130	1.2	0.121 2
100	130	1.4	0.121 2
107	130	1.6	0.121 2
114	130	1.8	0.121 2
120	130	2	0.121 2
130	130	2.34	0.121 2

流体数值模拟计算的进口边界条件压力30.2 kPa,水力直径与进气主歧管尺寸一致,温度343 K;出口边界条件为质量流量 $0.1212 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图2所示为燃料电池系统进、排气主歧管直径大小均为130 mm时,5个电堆和管道内的速度云图和压强云图,此图也可以代表其他各歧管尺寸的速度云图和压强云图。由图3可知:当面积比 $S_p$ 大于1时,3号电堆由图3可知:当面积比 $S_p$ 大于1时,3号电堆一致性变化最小,1号和5号电堆一致性相对更敏感;随着面积比 $S_p$ 增大,多堆一致性系数呈先减小后增大的趋势,且当 $S_p = 1.6$ 时,多堆的一致性系数最小;当面积比 $S_p$ 小于1时,多堆一致性系数明显变大;随着面积比 $S_p$ 增大,歧管的进出口压损呈下降的趋势。

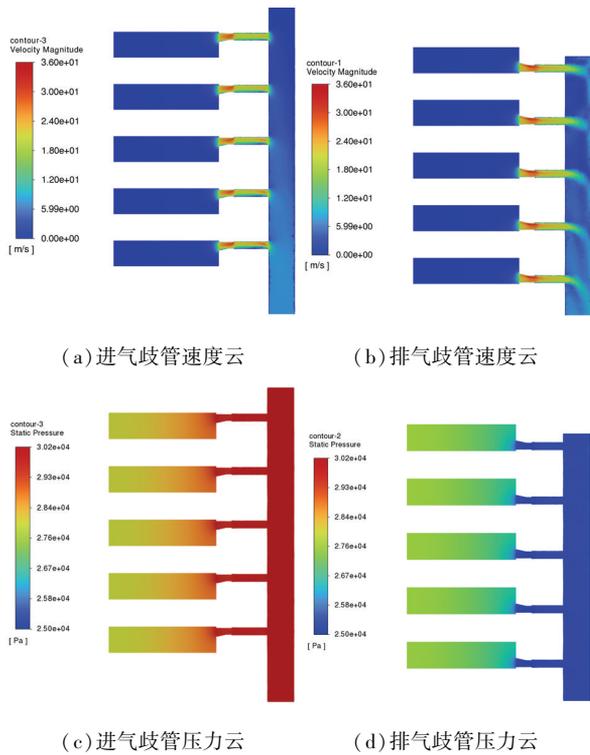
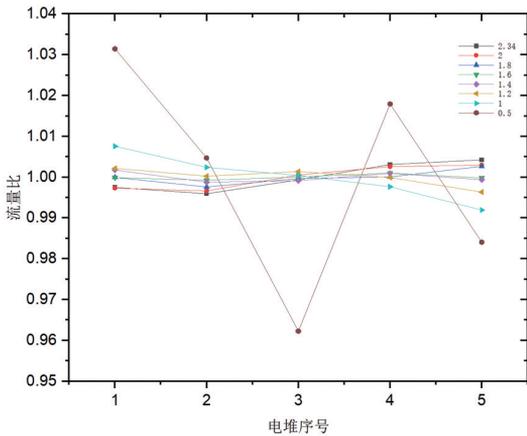
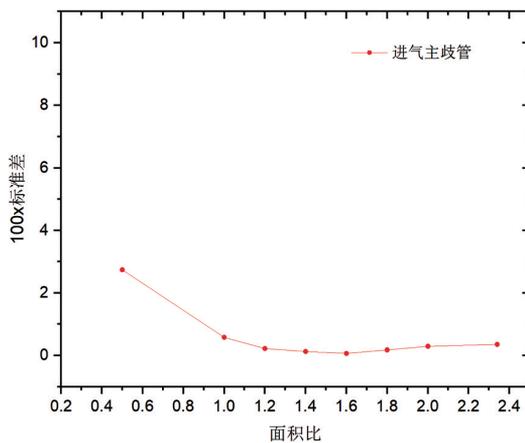


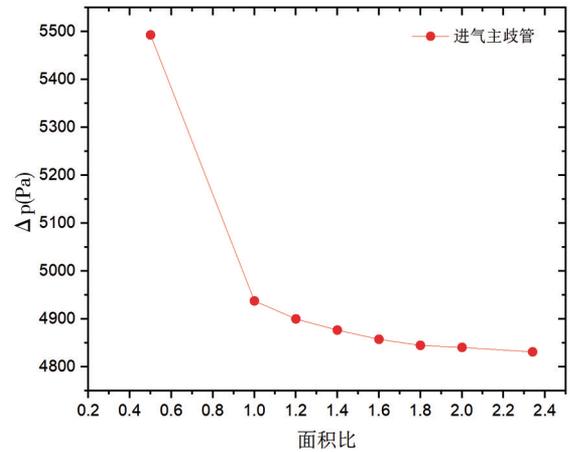
图2 多堆支管的中心处进气、排气歧管速度和压力云



(a) 进气主歧管不同面积比的电堆分配情况



(b) 进气主歧管尺寸与一致性系数的关系



(c) 进气主歧管尺寸与压损的关系

图3 进气主歧管尺寸对分配一致性和压损的影响

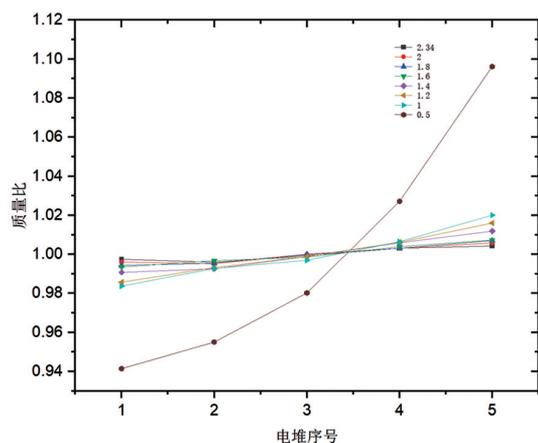
### 3.2 排气主歧管尺寸的影响

根据电堆运行参数和结构,各电堆支管的进、排气口直径都为 38 mm。初始进气主歧管直径为 130 mm,改变排气主歧管尺寸分别为:60 mm,85 mm,94 mm,100 mm,107 mm,114 mm,120 mm,130 mm,详细参数如表 3 所示。流体数值模拟计算的进口边界条件压力 30.2 kPa,水力直径 0.13 m,温度 343 K;出口边界条件为质量流量  $0.1212 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 3)。

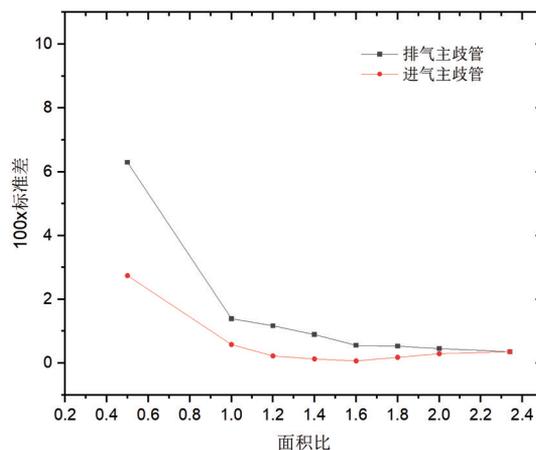
表 3 不同排气主歧管尺寸参数

进气主歧管 $D_1$ (mm)	排气主歧管 $D_2$ (mm)	$S_p$	$Q(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
130	60	0.5	0.121 2
130	85	1	0.121 2
130	94	1.2	0.121 2
130	100	1.4	0.121 2
130	107	1.6	0.121 2
130	114	1.8	0.121 2
130	120	2	0.121 2
130	130	2.34	0.121 2

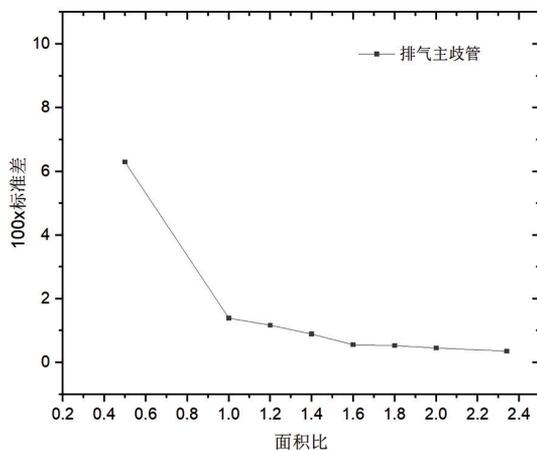
由图 4 可知:当面积比  $S_p$  大于 1 时,3 号电堆一致性变化最小,1 号和 5 号电堆一致性相对更敏感;电堆 1-5 号的流量呈逐渐增大的趋势;随着面积比  $S_p$  增大,多堆一致性系数呈减小趋势;当面积比  $S_p$  小于 1 时,多堆一致性系数明显变大;随着面积比  $S_p$  增大,歧管的进出口压损呈下降的趋势,且当  $S_p = 1.6$  时,压损变化趋于平稳。



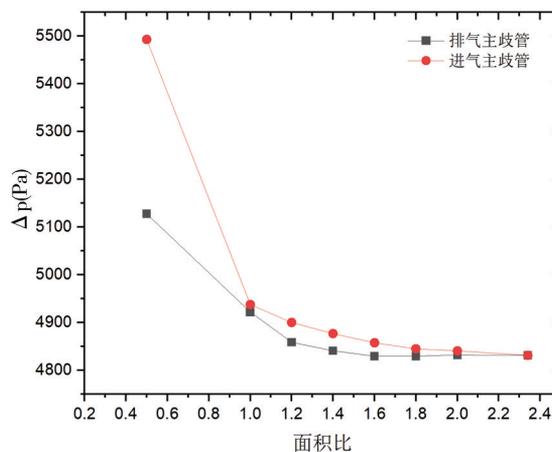
(a) 排气主歧管不同面积比的电堆分配情况



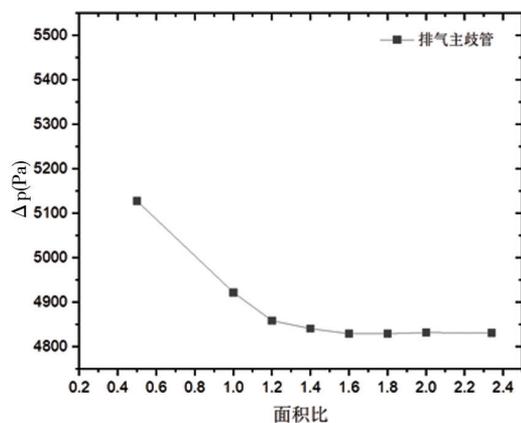
(a) 进、排气主歧管尺寸与一致性系数的关系



(b) 排气主歧管尺寸与一致性系数的关系



(b) 进、排气主歧管尺寸与压损的关系



(c) 排气主歧管尺寸与压损的关系

图4 进气主歧管尺寸对分配一致性和压损的影响

### 3.3 进、排气主歧管尺寸对比分析

进气主歧管通过支管将气体分配到5个电堆中,排气主歧管通过支管将5个电堆气体汇集。由于进、排气主歧管功能不一样,对分配的影响程度也不一致,具体如图5所示。

图5 进、排气主歧管尺寸对比

由图5可知:排气主歧管的一致性系数对面积比  $S_p$  的敏感度更高;当面积比相同时  $S_p$ ,排气主歧管的压损更大些。由于从支管出来的气体先流向排气主歧管然后再变向流向出口,导致大部分的气体远离支管出口,进而局部气体流速更快,压损更大。

## 4 结论

本文采用流体数值模拟软件研究了阴极进气和排气歧管尺寸对多堆质子交换膜燃料电池系统流量分配的影响。

(1) 进气和排气主歧管的面积比对多堆系统内流量分配的一致性趋势相似但影响程度不同,增大面积比,可以改善电堆内气体均匀性,且排气主歧管尺寸对一致性影响更大。

(2) 进气和排气主歧管的面积比小于1时,系

统的电堆流量分配一致性较差,对设计多堆燃料电池系统具有指导意义。

(3)在多堆燃料电池系统的设计中,需要着重考虑阴极侧排气歧管的尺寸影响。

#### 参考文献:

- [1] JIAO Kui, XUAN Jin, DU Qing, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells [J]. Nature, 2021, 595: 361-369
- [2] WANG Yun, RUIZ DIAZ D F, CHEN K S, et al. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells: a review [J]. Materials Today, 2020, 32: 178-203
- [3] LIU J X, LUO W S, YANG X Z, et al. Robust model based fault diagnosis for PEM fuel cell air-feed system [J]. IEEE Transactionson on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3261-3270
- [4] 沈伟, 石霖, 陈春光, 等. 多堆燃料电池系统温度模型预测控制 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1368-1376
- [5] 李奇, 刘强, 李艳昆, 等. 考虑燃料电池老化的多堆自适应功率分配方法 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(4): 713-721
- [6] 樊智鑫, 宋珂, 章桐. 空冷质子交换膜燃料电池性能优化研究综述 [J]. 汽车技术, 2020(4): 1-8
- [7] WU C W, ZHANG W, HAN X, et al. A Systematic Review for Structure Optimization and Clamping Load Design of Large Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack [J]. Journal of Power Sources, 2020, 476: 228724

# 某二氧化碳集输处理站项目储能方案研究

覃小文<sup>1</sup> 王松<sup>1</sup> 廖茹霞<sup>2</sup> 张永鹏<sup>1</sup> 杨志<sup>1</sup> 刘沛霖<sup>1</sup> 张文挺<sup>1</sup>

1. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

**摘要:**本研究方案依托于现有的二氧化碳输运设备,可以配套二氧化碳生产、运输、储存设施建设,而且还可以用来消耗过量的电力以填补用电高峰期电力供应匮乏。本文介绍了二氧化碳储能技术原理,针对集输处理站二氧化碳来气,利用峰谷差对二氧化碳进行长时储能,具有非常广阔的发展前景。

**关键词:**二氧化碳储能; 集输处理站; 管线; 技术特点

中图分类号:TK02

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2025)04-0079-05

## Research on Energy Storage Schemes at A Carbon Dioxide Collection Processing Station Project

QIN Xiaowen<sup>1</sup>, WANG Song<sup>1</sup>, LIAO Ruxia<sup>2</sup>, ZHANG Yongpeng<sup>1</sup>,  
YANG Zhi<sup>1</sup>, LIU Peilin<sup>1</sup>, ZHANG Wenting<sup>1</sup>

(1. Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China; 2. Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

**Abstract:** Relying on the existing carbon dioxide transportation equipment, this research plan can be equipped with carbon dioxide production, transportation, and storage facilities and can also be used to consume excessive electricity to fill the lack of power supply during the peak power period. This article introduces the principle of carbon dioxide energy storage technology. For carbon dioxide to gas at the integration processing station, use peak-valley difference to carry out long-term energy storage of carbon dioxide, which has very broad development prospects.

**Key words:** carbon dioxide energy storage; gathering and processing station; pipelines; technical characteristics

在国家“十四五”规划和“双碳”目标的战略发展背景下,储能将是构建新型电力系统、实现“碳达峰、碳中和”目标的关键技术<sup>[1]</sup>。

随着经济和社会的发展,传统的规划和建设思路以及电网在控制、调度和管理上逐渐显现出困难和复杂。随着高峰用电需求增加,电网公司也需要加大投资输配电设备来满足用电高峰时负荷的需求,进而直接导致系统的总体负荷率偏低,综合利用率变低<sup>[2]</sup>。针对这一现象,高效、先进的大规模储能技术可以提供全新的思路和有效的技术手段<sup>[3]</sup>。

抽水蓄能电站通常由上水库、下水库和输水及发电系统组成,上下水库之间存在一定的落差。在

电力负荷低谷时段把下水库的水抽到上水库内,以水力势能的形式蓄能;在负荷高峰时段,再从上水库放水至下水库进行发电,将水力势能转换为电能。抽水蓄能技术相对成熟,设备寿命可达30~40年,功率和储能容量规模可以非常大,仅受水库库容的限制,通常在100~2000 MW之间。抽水蓄能在电力系统中可以起到调峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动和为系统提供备用容量等多重作用。抽水蓄能的最大局限性是受地理条件的限制,必须具有合适建造上下水库的地理条件。

压缩空气储能系统是基于燃气轮机技术发展起来的一种能量存储系统,其工作原理是:当电力系统的用电处于低谷时,利用富余电量驱动空气压

收稿日期:2025-02-05

作者简介:覃小文(1991—),男,2012年毕业于重庆大学机械电子工程专业,本科,高级工程师,主要从事储能系统研究及关键设备研发工作。

缩机,把能量以高压空气的形式存储起来;当用电负荷处于高峰时,将储气空间内的高压空气释放出来,驱动发电机发电。目前已有2座大型电站分别在德国和美国投入商业运行。总体来说,目前传统使用天然气并利用地下洞穴的压缩空气储能技术已经比较成熟,但存在对特殊地理条件和化石燃料的依赖问题。对于无地下盐穴的应用场景,就需要使用高压压力容器进行存储,但该技术方案高压容器成本较高,对于大功率、长时长储能项目,总体建设成本偏高。以50 MW/200 MWh 储能容量为例,仅10 MPa 等级的高压压力容器就需要超过40 000 m<sup>3</sup>,随着钢材价格不断上涨,每 m<sup>3</sup> 高压压力容器的采购价格在8 000元~10 000元,仅存储用压力容器就需要3.2亿以上的投资,成本居高不下。注:江苏金坛压缩空气储能项目储能容量为60 MW/300 MWh,

对应盐穴容积22万 m<sup>3</sup>。

压缩二氧化碳储能是一种气液互转、两态协同储能技术,其系统效率高、无燃爆风险、且环保性能极好,具有广泛的功率、容量、地域适应性,通过控制储能过程和释能过程的运行时长,灵活方便地调节储存容量和释能容量,并可全球区域(热带到寒带)使用,是一种极具发展前景的大规模清洁物理储能技术。压缩二氧化碳储能发电系统的基本原理是在用电低谷期,利用过剩或多余的电力带动电动机将常温常压的二氧化碳气体压缩为液体,并将压缩过程中产生的热能储存起来;在用电高峰期,利用存储的热能和电厂的余热加热液态二氧化碳至气态,驱动膨胀机进行发电。相比于压缩空气储能,二氧化碳储能为闭式循环,二氧化碳在通过相关动力设备在常压气仓和高压储罐之间循环(表1)。

表1 大容量储能优势对比

抽水蓄能	电化学储能	二氧化碳储能
√ 容量规模大、储能时间长	√ 响应速度快	√ 容量规模大、储能时间长
√ 电-电转换效率高	√ 电-电转换效率高	√ 建设周期短
√ 运行寿命长	√ 建设周期短	√ 运行寿命长
❖ 建设周期长	❖ 存在燃爆风险	√ 建设运行成本低
❖ 选址严重受限	❖ 原材料不断涨价、废料处理成本高	√ 电-电转换效率高
❖ 资源短缺	❖ 寿命有限	√ 选址无特殊要求

## 1 技术简介

压缩二氧化碳储能是一种气液互转、两态协同储能技术,其系统效率高、无燃爆风险、且环保性能极好,是一种极具发展前景的大规模清洁物理储能技术。压缩二氧化碳储能发电系统的基本原理是在用电量较低的时段,利用富余的电能通过电动机驱动压缩机将常温常压二氧化碳气体压缩并换热冷却后为液体,同时利用储热介质(如熔融盐、导热油或中压水)储存压缩过程中产生的热能;波峰时段,通过存储的热能和电厂的余热,将液态二氧化碳加热至气态<sup>[3]</sup>,升温后进入透平做功,从而驱动发电机进行发电。压缩二氧化碳储能发电系统主要由以下六大系统组成:储气单元、储液单元、压缩单元、储热单元、换热单元、膨胀发电单元<sup>[4]</sup>。

系统储能/释能原理。储能过程中,在用电低谷时段,电动机拖动压缩机,储存于低压储气装置

中的常温常压二氧化碳工质进入压缩机,经压缩升温升压后进入换热器,与来自储冷罐中的低温介质换热后降低温度,完成热量储存,冷却介质在吸收高温热量后储存于储热罐中。高压低温的二氧化碳工质通过冷却器再次降温后进入冷凝器冷凝成液态,冷凝后的二氧化碳工质变为液态并储存于储液罐中,该过程的冷量由冷却设备提供。整个过程中,通过转化,将低谷时期的电能转化为热能和压力能,储存起来<sup>[4]</sup>。

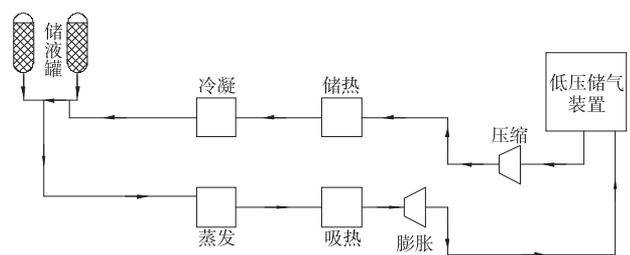


图1 二氧化碳储能原理图

释能过程中,通过工质泵,将液罐中的高压低温二氧化碳工质打入蒸发器蒸发,变为气态后进入透平进口的预热换热器,与来自储热罐中的高温介质换热后升温,吸收储能过程中储存的部分热量。高温、高压的二氧化碳进入透平膨胀对外做功<sup>[5]</sup>,驱动发电机向外发电。透平出口的低温常压工质在回热器内将热量释放给回热水后降温(如需,具体根据透平排气温度配置),降温后的二氧化碳存储于低压储气装置内并与环境换热,并逐渐恢复至常温常压状态。

## 2 二氧化碳储能的发展

### 2.1 国外供应商情况

早在2012年,瑞士洛桑埃科尔理工大学的Morandin教授提出<sup>[6]</sup>将二氧化碳作为工质并应用于储能系统,Energy Dome在意大利撒丁岛的诺奥罗省正式上线了全球首个二氧化碳电池试点项目,容量2.5 MW/4 MWh,二氧化碳电池设施在测试其性能的初始运行阶段后,于2022年6月全面投入使用。项目位于一个拥有现有电力连接的工业区,计划在电网上进行商业运营,作为独立储能为电网提供最需要的监管服务(图2)。



图2 Energy Dome公司计划部署“CO<sub>2</sub> battery”电池储能项目(右侧白色建筑)效果图

### 2.2 国内研发生产情况

西安交通大学、中科院工热所、华北电力大学、华中科技大学等相继开展二氧化碳储能研究。东方汽轮机联合合作伙伴,第一次将二氧化碳储能技术由理论研究推向工程化应用,该项目于2023年5月在德阳建成并通过设备验收(图3),标志着10 MW级二氧化碳储能系统的设计、制造、安装、运行等技术得到了验证,工艺流程、系统应用具备可行性,为该

技术的工程化应用奠定了基础。



图3 德阳10 MW/20 MWh压缩二氧化碳储能项目示意图

海螺水泥安徽芜湖基地建设的10 MW/80 MWh二氧化碳储能电站已完成压缩机组、膨胀机组、换热器等设备的安装,低压储气装置、罐体、通风塔等辅助设施已施工完成,并于2023年12月并网发电(图4)。



图4 安徽芜湖海螺水泥10 MW/80 MWh压缩二氧化碳储能项目示意图

压缩二氧化碳储能系统在经过中试项目验证以及海螺项目(用户侧)小功率工程化应用后,根据用户不用的需要,还可在其他领域进行推广。

## 3 案例分析

某采气厂集输处理站,集输处理站,气站每天有10万方2.0 MPa、20℃二氧化碳来气,二氧化碳储能子系统排气(驱油或对外出售)要求为2.1 MPa、常温,现场拥有拥有10 MW变电站余量可利用。项目设一套压缩系统、一套透平膨胀系统、一套储热系统、两套储液系统及辅助配套设施。项目储能规模为10 MW/50 MWh,每天储能8 h,释能5 h。设备运行按每天“一充一放”。

### 3.1 工艺生产流程

该系统包括储能工艺过程与释能工艺过程两部分,其中储能工艺过程主要部件包括低压储气装置、压缩机、电动机、油冷却器、水冷却器、水冷器、气站、高温储罐、低温储罐等;释能工艺过程主要部

件包括气站、加热器、透平、发电机、水冷器、低压储气装置、高温储罐、低温储罐。

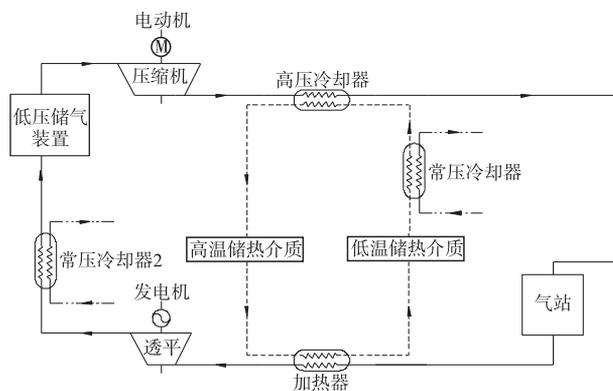


图5 某二氧化碳储能系统图

**储能工艺流程:** 储能时,从二氧化碳低压储气装置抽出常温二氧化碳,通过电动机驱动压缩机工作,将二氧化碳进行压缩。压缩后的过热态二氧化碳进入一级或多级冷却器换热;低温储热介质从低温介质储罐排出,若温度高于设计温度,先进入常压冷却器冷却,然后进入高压冷却器参与换热。与储热介质换热后的常温二氧化碳进入二氧化碳管线;储热介质进入高温介质储罐储存。

**释能工艺流程:** 释能时,管线中的高压二氧化碳气体通过气站进入储能系统;来自气站的高压常温二氧化碳气体经过一级或多级加热器,被加热至高温;换热后的储热介质进入低温介质储罐储存起来。加热至高温的高压二氧化碳气体进入透平膨胀做功,带动发电机发电;透平排气经过常压冷却器2冷却至常温,常压冷却器2出口的常温二氧化碳进入二氧化碳储存装置储存起来。

管线中的高压二氧化碳气体通过气站进入储能系统;来自气站的高压常温二氧化碳气体经过加热器,将二氧化碳加热至高温状态;加热器出口的高温高压二氧化碳气体进入透平膨胀做功,带动发电机发电<sup>[7]</sup>;透平排气经过常压水冷器2冷却至常温;常压水冷器2出口的常温常压二氧化碳气体进入低压储气装置储存起来。

### 3.2 工艺系统

#### (1) 压缩系统

设置一套压缩系统,由电动机拖动压缩机。在储能过程中,电机利用低谷电拖动压缩机从低压储气装置吸入二氧化碳气体压缩,压缩后的高温二氧

化碳经换热系统冷却后通过气站回到二氧化碳管线中。

表2 压缩机性能参数表

	单位	数值
电动机功率	kW	9 000
入口压力	MPa	0.097
出口压力	MPa	2.100
入口温度	℃	20
出口温度	℃	300

#### (2) 膨胀发电系统

透平前设置加热器,用于加热进入透平的压缩二氧化碳。发电机采用三相交流同步发电机,额定电压 10.5 kV,额定频率 50 Hz,冷却方式为空冷。

表2 透平进出口参数表

	单位	数值
发电机功率	kW	10 000
入口压力	MPa	1.900
出口压力	MPa	0.105
入口温度	℃	300
出口温度	℃	80

#### (3) 储热系统

储热介质根据温度不同,可采用熔盐、导热油和中压水。储能阶段,通过储热介质将压缩热能储存在高温储罐中;释能阶段将储存的热能释放回二氧化碳系统。储热系统主要包含高温储罐、储热介质、低温储罐。

#### (4) 换热系统

换热系统分为压缩二氧化碳气体冷却换热系统和压缩二氧化碳气体加热换热系统。压缩二氧化碳气体冷却换热系统用于回收储能压缩过程的压缩热;压缩二氧化碳气体加热换热系统用于加热透平机级前的压缩二氧化碳。

#### (5) 工质存储系统

工质存储系统为常压柔性低压储气装置。低压储气装置用于释能阶段储存常压气态二氧化碳,以及储能阶段释放常压气态二氧化碳。

#### (6) 润滑油系统

为确保压缩机系统和透平发电系统设备的正常运转,需设置润滑油站,满足单套系统内的压缩

机和透平发电机的润滑油系统。

#### (7) 其它附属系统

其他附属系统包括:工艺水系统,电气系统,控制系统、消防系统等相关设备根据工艺进行选择。

### 3.3 主厂房布置

压缩机、透平发电机均采用架高两层布置,压缩机为横向布置方式。

### 3.4 项目电力系统接入方案

储能时:电网通过变压器降压到 10 kV,以供本项目驱动系统使用。

释能时:系统发电,发电电压为 10 kV 等级,经过变压器升压后送入电网。

### 3.5 项目总平面布置设想

本次拟建项目总平面布置原则:充分满足生产工艺布置流程的需要,力求工艺管道路径短捷,线路合理,作业方便。充分考虑项目的外部及地形条件,根据现行防火、环保、安全、卫生、运输间距及消防规范,合理进行工业场地平面布置,做到功能分区明确,布置紧凑合理,节约用地。全面规划,合理安排,统筹,综合考虑并处理好近期建设与远期发展的关系,适当留有发展余地。

该建设项目用地总体地势平坦,竖向设计采用平坡式布置,地面设计标高满足地面排水坡度要求。

管线综合布置应与总平面及竖向布置相协调,满足管线布置原则及其相关规范。绿化设计采用点、线、面相结合的布置方式。改善环境,减少污染,净化空气。

## 4 结语

压缩二氧化碳储能技术作为一种新型的压缩

气体储能技术<sup>[5]</sup>,具有储能密度大、经济成本低、运行寿命长、负碳排放等多方面优势,其建设不依赖于地质条件,建设周期短,对构建新型能源体系具有重要示范作用,助力双碳目标实现意义明显。适合我国大规模长时储能系统建设和可持续发展的需求,具有非常广阔的发展前景。通过上述技术措施,获得了以下有益效果。

(1) 本方案依托运输管线进行建设,不需要建设高压介质储存装置及其配套设施,初期投资低。

(2) 利用原生产单位储存和使用的中压二氧化碳气体储能,增加了经济收益。

(3) 本方案采用集中换热方式,能够储存并使用高品质热量,降低了换热损失,提高系统效率至 65 %。

### 参考文献:

- [1] 国家能源局 2021 年上半年能源经济形势等情况新闻发布会文字实录[J]. 中国电业,2021(8):40-43
- [2] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组,王松岑,来小康,等. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):3-8+30
- [3] 谭明根. 能源储存新纪元:二氧化碳储能[J]. 中学生数理化(初中版. 中考版),2022(Z1):38
- [4] 赵大周,张钟平,汪淑军,等. 基于 EBSILON 的压缩二氧化碳储能系统仿真分析[J]. 节能,2023,42(12):84-86
- [5] 张家俊,李晓琼,张振涛,等. 压缩二氧化碳储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术,2023,12(6):1928-1945
- [6] 郝佳豪,越云凯,张家俊,等. 二氧化碳储能技术研究现状与发展前景[J]. 储能科学与技术,2022,11(10):3285-3296
- [7] 道客巴巴. 大荣集团 30 MW 机组方案项目投资申请建议书[EB/OL]. <https://www.doc88.com/p-9963955529334.html>

# 矩阵型组织结构在装备制造业的应用探究

曹奔腾 刘家剑\* 王彦超

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731

**摘要:** 强化装备制造业企业的矩阵型组织结构管理, 有助于促进企业良性发展, 巩固国民经济和科技工业基础。目前较多装备制造企业仍存在职能部门沟通困难、进度失控、多项目管理混乱等问题。本文以某大型电站装备制造企业为例, 深入剖析矩阵型组织结构特点, 对容易出现的问题提出处理建议, 为装备制造业的矩阵型组织结构应用提供参考。

**关键词:** 装备制造业; 矩阵型组织结构; 项目经理; 职能部门

中图分类号: F271

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2025)04-0084-04

## Research on the Application of Matrix Organizational Structure in Project Management of Equipment Manufacturing Industry

CAO Benteng, LIUJiajian\*, WANG Yanchao

(Dongfang Boiler Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

**Abstract:** Strengthening the matrix organizational structure management of equipment manufacturing enterprises is conducive to promoting the development of enterprises and consolidating the of the national economy and technological industry. At present, many equipment manufacturing enterprises still suffer from difficulties in communication between functional departments, loss of control over progress, and in multi-project management. This paper takes a large power station equipment manufacturing enterprise as an example, deeply analyzes the characteristics of the matrix organizational structure, and proposes solutions to common problems, providing a reference for the application of the matrix organizational structure in equipment manufacturing enterprises.

**Key words:** equipment manufacturing industry; matrix organizational structure; project manager; department

装备制造业是为国民经济和科技工业提供技术装备的战略型、基础性产业, 是各行业产业升级、技术进步的重要保障和国家综合实力的集中体现。20世纪90年代以来, 在市场竞争和产业政策的推动下, 装备制造企业推行项目管理并获得巨大的成功<sup>[1]</sup>, 装备制造企业逐步由职能型组织结构向矩阵型组织结构转变, 以追求高效扁平的运营效率来适应性全球化、客户定制化、多项目并行及快速响应的市场发展趋势, 由此可见矩阵型组织结构在装备

制造行业应用研究极为必要。

在全球面临诸多环境和社会挑战的背景下, 项目管理不仅要关注项目的完成质量、成本控制和交期, 还要考虑如何通过项目执行实现长远的经济、社会和环境效益。

### 1 装备制造业项目特点

装备制造企业具有技术密集和资金密集高、非标准化生产制造、模块化程度低、质量管理要求高

收稿日期: 2025-01-16

**作者简介:** 曹奔腾(1989—), 男, 2015年毕业于重庆大学动力工程及工程热物理专业, 硕士, 工程师。东方电气集团东方锅炉股份有限公司项目管理中心, 主要从事项目管理方向研究及应用工作。通信邮箱: caobt5592@dongfang.com。

刘家剑(1988—), 男, 2011年毕业于四川大学过程装备与控制工程专业, 本科, 工程师。现任东方电气集团东方锅炉股份有限公司项目管理中心, 主要从事项目管理方向研究及应用工作。通信邮箱: liujj1366@dongfang.com。

及进度计划要求高等典型特征,且在当前市场环境下企业需要多项目平行执行,根据产品差异项目也体现出设计生产周期不同、质保体系差异等特点,需要企业不断提升设计、生产、质检等多部门协作管理水平,充分应用发挥好矩阵型组织结构的优势,提升企业竞争力。制造业作为世界经济的重要支柱,其项目管理方式需不断创新和改进以推动整个行业的可持续发展<sup>[2]</sup>。

## 2 矩阵型项目组织结构概论

根据项目管理知识体系指南 PMBOK<sup>[3]</sup>,常见的项目组织结构分为职能型、项目型和矩阵型。三种组织结构中项目经理决策权利及职能部门投入情况的对比情况如表 1 所示。职能型组织结构对职能部门有明确的职能专业区分,员工仅需要在相应职能部门发挥个人专业技能,对唯一的部门领导负责,此结构特点为各部门互为孤岛,对跨部门合作项目的响应较慢。项目型组织结构给予项目经理足够大的决策权以支配项目团队中包括人力、财力等所有项目相关资源,项目团队只对项目经理负责,此结构特点是项目经理可以高度集权确保项目达成,但可能会影响到非项目相关的日常运营工作,且项目结束后团队成员的重新安置也存在问题。矩阵型组织结构是职能型和项目型的混合,员工同时隶属于职能部门和项目团队,接受项目经理和职能部门的双重领导,可以最大限度地利用组织资源,职能部门为项目做专业和技术工作,项目经理对项目结果负责,是一种更加灵活的组织形式。矩阵型组织结构又根据项目经理权力大小分为弱矩阵型、平衡矩阵型和强矩阵型<sup>[4]</sup>。

表 1 三种项目管理组织形式对比

组织结构	职能型	矩阵型			项目型
		弱矩阵	平衡矩阵型	强矩阵	
项目经理权力	很小或无	较低	适中	高	全权
职能人员投入项目	无	较低	适中	高	全部
项目经理角色定位	兼职或无	兼职	全职	全职	全职

## 3 装备制造业矩阵管理结构实践分析

### 3.1 装备制造行业组织结构

装备制造行业企业主要是从计划经济时代发展起来的传统国有企业,其原职能型组织结构有明显的计划经济色彩,由于订单量小,一般由计划部门在年底排定第二年生产年度计划,只包含项目开始和结束时间,在执行过程中提前 1~2 个月细化排定季度计划和月度计划,而具体执行进度由各职能部门各自控制,缺乏部门间的协调对接及反馈,对项目结束节点无法有效把控。

自 21 世纪初,装备制造行业得到快速发展,订单数量急速增长的同时市场对履约交付要求随之提高,企业开始普遍采用矩阵型管理组织结构,以某大型电力装备制造企业 D 公司为例(图 1),其在 1998 年成立项目部门,并设置项目经理岗位,授中层管理者权责,原职能型组织结构转变为矩阵型组织结构,如图 1 所示,在合同签订生效后,由项目经理通过项目启动联系单通告各职能部门项目启动,各职能部门根据业务分工及项目需求参与到项目执行工作中,完成项目团队的组建。项目经理通过计划部下达设计、物资采购和生产计划,各职能部门根据计划完成项目经理分配的任务,项目团队成员在项目执行过程中原则上要听从项目经理安排,执行好项目经理指令,但同时要对职能部门领导负责,项目团队成员在发现项目执行偏差或难以解决的重大关键问题时需同时向项目经理和职能部门领导报告,从多渠道寻求支持<sup>[5]</sup>,项目经理有对各职能部门计划完成情况的考核权,同时职能部门领导负责对隶属于项目团队的职能部门员工考核权。以此确保项目经理能充分调动职能部门资源开展相关工作,确保项目高效运转,完成项目履约交付。

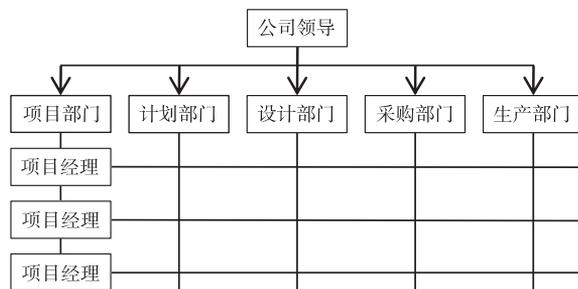


图 1 D 公司矩阵型组织管理结构示意图

### 3.2 矩阵型组织结构特点分析

矩阵型组织结构将装备制造业原各职能部门直线型工作模式调整为以项目需求为主导的项目管理型工作模式,职能部门以项目为中心完成专业职能管理保障工作,矩阵型组织结构并未减弱或摒弃原职能部门主导地位,而是进一步强化各专业职能部门对项目的支撑及基础管理。对其分析有以下特点:

#### 3.2.1 资源共享,加强部门协作,提升技术水平

矩阵型组织结构以项目为中心的扁平化管理可以实现设计、生产资源高度共享,各职能部门员工同时隶属于项目团队和职能部门,可以更好地利用和整合各个部门人力物力财力资源,降低生产资源成本,对于降本增效、追求利润的装备制造业极为重要。另外打破部门孤岛促进跨职能协作,可以更好地发挥管理人员的管理优势,有利于最终项目履约交付。此外同一职能员工分别参与不同项目,多层面交流有助于其整体技术水平提升。

#### 3.2.2 资源获取的灵活性和适应性

由于矩阵结构为职能部门之间提供共享资源的条件,项目经理可以根据项目的需要对团队成员进行灵活调整和组合,以适应不同的项目需求。矩阵型组织结构可以更好地应对项目变化和风险,及时实现对资源的高效配置,尤其是在装备制造型企业需要集中资源攻坚重点难点项目时能起到强有力的支撑作用,提升项目成功率<sup>[6]</sup>。

## 4 矩阵型组织结构易出现的管理问题及应对建议

### 4.1 加强有效沟通与过程协调

矩阵管理存在多方领导以及多方联系的特点,常常会造成信息沟通的膨胀和沟通渠道的复杂化,最终造成信息传递受阻并且项目执行效率降低。加强职能部门之间横向沟通和执行问题协调解决对项目成功极为关键。首先在项目执行过程中项目经理要明确项目目标,并将目标进行具象和分解,项目经理不仅承担项目计划制定和激励考核工作,同时需要肩负部门联络指挥官的职责,在职能部门出现沟通和执行问题时,及时梳理流程确保项目正常推进。可利用信息化技术,建立顺畅的信息交流平台,如D公司项目经理通过线上办公流程对

各职能部门进行任务下达及客户需求的传递,职能部门横向反馈执行中的问题,同时也有利于公司高层对重大事项进行决策。

### 4.2 明确职能部门权责

矩阵型组织结构的交叉型组织流程不可避免存在项目团队成员需要接受双向领导,容易出现职能部门之间权责界限不清问题。通过明确界定各角色在不同项目阶段及专业科室中的具体职责与权限范围,可构建起一个权责清晰、对等分配的责任体系,以有效促进跨专业、跨项目的协作与沟通<sup>[7]</sup>,合理提高项目经理在项目执行过程中对各职能部门必要的激励考核授权,在职能部门发生工作推诿等情况时,项目经理有绝对话语权进行责任界定。

### 4.3 多项目执行合理排序

在装备制造企业存在多项目执行资源冲突时,首先应依据公司战略、项目紧急程度、客户重要程度来判断项目优先级<sup>[8]</sup>,确定项目优先级排序的管理制度,按照制度进行项目排序。其次加强项目执行过程中关键工序情况的反馈,根据项目执行客观条件,如客户真实需求、原材料回厂计划、生产资源落实情况等,合理分析调配项目顺序。最后对特殊项目,项目经理必须与企业高层管理者保持必要沟通,项目经理需要有公司高层管理者的明确指示和绝对授权后,再进行重要的项目顺序决策。

### 4.4 建立信息化管理平台

根据装备制造企业项目产品需求计划、设计及生产周期差异等特点,在多项目并行执行时,项目经理需要对各个并行执行项目做到执行过程全覆盖管控,以确保项目履约。需要提升企业数字化水平,实现从项目需求计划、设计计划、物料采买计划、生产及发运计划全过程可视化系统管理。以D公司为例,通过搭建多项目全流程管理平台,实现线上及时准确掌握各项目节点信息及各职能部门工作进度,及时暴露执行偏差,为纠偏创造条件。

### 4.5 关键岗位择优配置

装备制造企业在矩阵型管理结构下,为节约人力成本,项目的执行需要职能部门的充分参与,如部分执行环节是根据物项类别或工序类别进行人员分工,某个员工承担全公司某个物项或工序的执

行,此类关键岗位人员的积极性对项目最终结果影响很大,因此需要重点关注关键岗位人员的选择和任命。加强企业文化建设,通过文化引领,提升员工对企业的价值认同和归属感,以此提高员工工作热情。此外根据绩效评估结果,需要制定相应的激励机制<sup>[9]</sup>,客观地评估团队成员的工作表现,激发团队成员的积极性和创造力。

## 5 总结

装备制造业采用矩阵型管理组织结构,是随着市场和业务的变化,不断适应战略和环境变化的动态演进,持续调整和完善的结果。在此组织结构下,技术、采购、生产等职能部门能够在项目经理组织协调下加强沟通相互协作,形成完整的组织体系,保障企业正常运营。本文提出的矩阵型组织结构容易出现的管理问题及应对建议可以覆盖多数装备制造企业,D公司通过以上措施项目履约率一直处于行业领先地位,但各企业应根据各自市场环境和承接项目的特点,在项目运行过程中合理应对易出现问题并加以控制,持续调整和完善其矩阵组织结构,使其更加适用于企业,保证项目顺利执行

促使企业良好发展,以适应新的机遇和挑战。

## 参考文献:

- [1] Cleland D. Cleland. Project Management : Strategie Design and Implementation[M]. The McGraw-Hill Companies, Inc. ,2007
- [2] 陈琳. 制造业项目管理与绿色经济可持续发展探究[J]. 中国产经,2024(21):164-166
- [3] ThePMI Standards Committee. A Guide to the Project Management Body of Knowledge [ M ]. Philadelphia: Project Management Institute,2021
- [4] 束飞. 生产制造型企业项目管理组织结构的选择[J]. 科技信息,2011(36):508-509
- [5] 温亚力,李辰辉. 矩阵型组织结构在航空发动机研制项目管理中的应用[J]. 项目管理技术,2011,9(7):88-91
- [6] 冯清江. 基于矩阵模式的航天型号项目管理优化研究[D]. 哈尔滨工业大学,2015
- [7] 罗伯坤,储顺,高坤. 舰船装备型号保障总师式准弱矩阵管理模式[J]. 上海质量,2024(11):63-68
- [8] 徐二喜. H公司多项目管理的进度研究[D]. 电子科技大学,2023
- [9] 赵婷. 中小企业项目管理中的团队激励机制构建研究[J]. 中国集体经济,2025(1):73-76

## 《东方电气评论》征稿须知

《东方电气评论》是由中国东方电气集团有限公司、四川省动力工程学会联合主办的能源装备制造领域公开发行的学术期刊,双月刊出版,国内统一连续出版物号 CN 51-1333/TM,国际标准连续出版物号 ISSN 1001-9006。

《东方电气评论》综合介绍我国能源装备制造领域的科技研发成果及先进制造技术,主要栏目有基础研究、火力发电、核能发电、水力发电、风力发电、光伏发电、工程技术、项目管理、电力电子与控制、数字制造等。《东方电气评论》为著作性刊物,欢迎评论性文章,少量接受综述类文章。来稿必须未公开发表过,且创新性强、观点明确、数据可靠。文稿格式请参照《学术论文编写规则》(GB/T7713.2-2022)和《信息与文献 参考文献著录规则》GB/T 7714-2015 要求,量和单位必须符合国家标准和国际标准。

稿件内容请勿涉及国家秘密和单位秘密,保密审查手续按作者所在单位的相关规定办理,必要时提供"不涉及保密,可以公开发表"的单位证明原件。投稿格式要求如下:

1. 投稿方式:请使用电子文档投稿。电子文档的格式为 WPS 或 Word 文件。投稿时请提供通信作者或第一作者的电话号码、电子信箱和详细准确的线下邮送地址。

2. 论文内容结构包括:论文题名(20 字内),作者姓名,作者单位(单位名称、地址及邮编),摘要(200 字内),关键词(3~8 个),正文(图、表应在正文中明确引用位置出现)及参考文献。

3. 英文项目:题名、摘要、关键词、作者姓名及其单位与通信信息几部分,除中文外,须译成英文一并提供。

4. 插图与表格都应有图(表)序与图(表)题。刊出后的图片均为灰度图片,请作者确保能准确反映需表达的全部信息,画面清晰,大小适宜。图中字符一般用 6 号宋体字。

5. 文中符号:外文字母、符号必须分清大小写、正斜体,上下角标,数码符号等其位置高低应区别明显,容易混淆的外文字母或缩写简称,请在第一次出现时注明文种或含义或完整全称。

6. 论文作者署名应遵守学术规范。

7. 作者简介:包括姓名、出生年、性别、职称和职务、何时何地取得何校何专业学位(最高学历),曾获得过的重大成果或奖励,现在从事的专业工作。

8. 参考文献:只列出已公开出版并在文中直接引用的主要文献,且大多应为 5 年内的文献,序号按文中出现的先后顺序编排。

9. 著作权声明:本刊已被《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》期刊源、万方数据-数字化期刊群、《中国核心期刊(遴选)数据库》期刊源、《中文科技期刊数据库》(维普网)、中国期刊全文数据库(CJFD)、《超星期刊域出版平台》收录,有关作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,如作者不同意被收录,请在来稿时向本刊说明。

10. 版面费:本刊未收取发表版面费。论文一经录用,编辑部酌付稿酬并向作者邮寄赠送当期杂志。

11. 本刊唯一网站投稿: [dfdqpl.xml-journal.net](mailto:dfdqpl.xml-journal.net); 联系邮箱: [dfdqpl@dongfang.com](mailto:dfdqpl@dongfang.com)。编辑部地址:成都市高新西区西芯大道 18 号,邮编:611731。