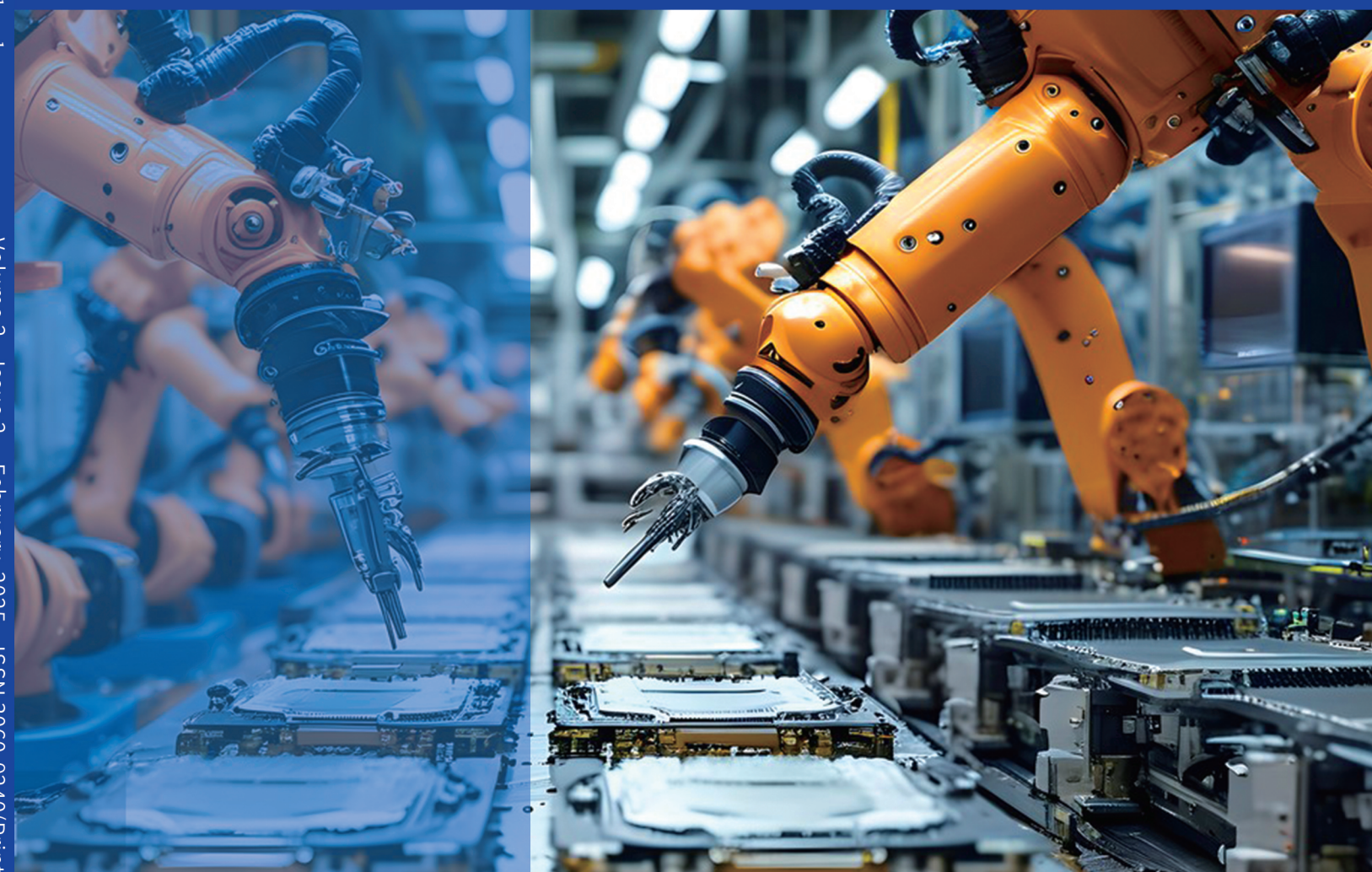


现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 2 • February 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839

E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

中文刊名：现代工业与技术

ISSN：3060-9240（纸质）3060-9259（网络）

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Modern Industry and Technology

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《现代工业与技术》征稿函

期刊概况：

中文刊名：现代工业与技术

ISSN：3060—9240（Print） 3060—9259（Online）

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word

· 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符

· 测量单位：国际单位

· 论文出版格式：Adobe PDF

· 参考文献：温哥华体例

出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）

· 纸质版出刊

· 出版社进行期刊存档

· 新加坡图书馆存档

· 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录

· 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；

· 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；

· 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；

· 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.

12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2·Issue 2· February 2025·ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(online)

编委会

主 编

蒋 晶 郑州大学

编 委

李伟锋 华东理工大学

李 硕 重庆理工大学

李益国 东南大学

高学金 北京工业大学

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | 增材制造技术在复杂热机械零部件定制化生产中的应用与精度控制
/ 王峰涛 | 1 | The application and precision control of additive manufacturing technology in the customized production of complex thermodynamic mechanical parts
/ Fengtao Wang |
| 4 | 航空发动机模块化设计思路分析
/ 雷向东 | 4 | Analysis of modular design concept of aero engine
/ Xiangdong Lei |
| 7 | 红外测定非均聚聚丙烯单体含量过程中样品制备方法的优化
/ 刘国圣 施多恒 伏江峰 余占武 | 7 | Optimization of Sample Preparation Methods for Infrared Determination of Monomer Content in Non-uniform Polypropylene
/ Guosheng Liu Duoheng Shi Jiangfeng Fu Zhanwu Yu |
| 11 | 面粉储藏过程中湿度控制与通风技术的综合管理方法研究
/ 郑小善 罗旭 祁攀 卢颖欣 柯成波 | 11 | Study on comprehensive management method of humidity control and ventilation technology in flour storage process
/ Xiaoshan Zheng Xu Luo Pan Qi Yingxin Lu Chengbo Ke |
| 14 | 煤岩分析在焦化厂的应用
/ 孙慧娟 | 14 | Application of coal and rock analysis in coking plant
/ Huijuan Sun |
| 17 | 产品 CMF 对摩托车造型设计的影响
/ 王引 贾子萌 李志鑫 | 17 | The influence of product CMF on motorcycle styling design
/ Yin Wang Zimeng Jia Zhixin Li |
| 20 | 面向核电站严苛环境的风阀密封结构优化策略
/ 秦明 卢青青 李芷强 | 20 | Optimization strategy for air valve sealing structure in the harsh environment of nuclear power plants
/ Ming Qin Qingqing Lu Duqiang Li |
| 23 | 刷镀导电层在电气设备中的应用
/ 宾昕 彭正祺 | 23 | Application of coating and plating conductive layer in electrical equipment
/ Xin Bin Zhengqi Peng |
| 27 | 关于循环水浓缩倍率测试方法对比的浅析
/ 刘志刚 | 27 | A brief analysis of the comparison of circulation water concentration ratio test methods
/ Zhigang Liu |
| 30 | 水热法制备 MHG 复合材料对甲基橙吸附效能的提升机理
/ 高慧 | 30 | The mechanism of improving the adsorption efficiency of methyl orange by hydrothermal preparation of MHG composites
/ Hui Gao |
| 33 | 全齿轮传动四向穿梭车结构与性能优化研究
/ 李明良 | 33 | Research on Structural Design and Performance Optimization of All-Gear Transmission Four-way Shuttle Vehicle
/ Mingliang Li |
| 37 | 新能源汽车用永磁同步发电机高转速工况下的性能优化试验研究
/ 杨健 | 37 | Experimental Study on Performance Optimization of Permanent Magnet Synchronous Generators for New Energy Vehicles under High-Speed Operating Conditions
/ Jian Yang |
| 40 | 大型复杂型面包覆套成型工艺探究
/ 鲁锋涛 张权 张海鹏 王领 | 40 | Investigation on large complex bread covering and forming process
/ Fengtao Lu Quan Zhang Haipeng Zhang Ling Wang |

The application and precision control of additive manufacturing technology in the customized production of complex thermodynamic mechanical parts

Fengtao Wang

Xinjiang Railway Vocational and Technical College, Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract

This study focuses on the application and precision control of additive manufacturing technology in the customized production of complex thermodynamic mechanical parts. At present, there is a strong demand for customization of complex thermodynamic mechanical parts, which is difficult to meet with traditional manufacturing technology, and additive manufacturing technology brings opportunities, but it faces the problem of dimensional accuracy control. This paper comprehensively uses literature research, case analysis and experimental research methods to analyze the principle and classification of additive manufacturing technology, as well as its application in the customized production of typical parts such as aero engine turbine blades, and verifies the significant advantages of this technology in the manufacturing of complex structures and customized production. At the same time, the influence of materials, process parameters and other factors on accuracy is analyzed, and the precision control strategy is proposed from the aspects of optimizing material selection and pretreatment, and accurately controlling printing process parameters. In the future, in-depth research should be conducted in the direction of material research and development, process innovation, equipment upgrading and multidisciplinary integration to promote the development of additive manufacturing technology.

Keywords

additive manufacturing; complex thermodynamic mechanical parts; Customized production; Dimensional accuracy control

增材制造技术在复杂热动机械零部件定制化生产中的应用与精度控制

王峰涛

新疆铁道职业技术学院, 中国·新疆 哈密 839000

摘 要

本研究聚焦增材制造技术在复杂热动机械零部件定制化生产中的应用与精度控制。当前, 复杂热动机械零部件定制化需求旺盛, 传统制造技术难以满足, 增材制造技术虽带来机遇, 但面临尺寸精度控制难题。研究综合运用文献研究、案例分析与实验研究法, 分析了增材制造技术原理、分类, 以及在航空发动机涡轮叶片等典型零部件定制化生产中的应用, 验证了该技术在复杂结构制造和定制化生产方面的显著优势。同时, 剖析了材料、工艺参数等因素对精度的影响, 并从优化材料选择与预处理、精确控制打印工艺参数等方面提出精度控制策略。未来, 应在材料研发、工艺创新、设备升级及多学科融合等方向深入研究, 推动增材制造技术发展。

关键词

增材制造; 复杂热动机械零部件; 定制化生产; 尺寸精度控制

1 引言

现代制造业中, 复杂热动机械零部件定制化需求飙升, 传统制造技术难以适配, 增材制造技术应运而生, 却面临尺寸精度控制难题。攻克这一难题, 对完善理论、推动产业升级意义重大。美、德、日等发达国家和国内科研主体, 已对增材制造开展研究。但现有研究存在工艺参数耦合效应不

明、材料适配性差、设备成本高且稳定性欠佳, 以及应用研究普适性不足等问题。本研究运用文献研究、案例分析与实验研究法, 梳理研究现状, 总结实践经验, 搭建实验平台并构建数学模型。本研究从三方面创新: 多维度剖析零件结构与制造环境对精度的影响; 融合材料科学、机械工程等多学科知识解决精度问题; 提出多参数协同优化与实时监测反馈策略, 实现工艺参数优化与精度动态控制。

【作者简介】王峰涛(1993-), 男, 中国河南信阳人, 本科, 工程师, 从事机械设计制造及其自动化研究。

2 增材制造技术与复杂热动机械零部件定制化生产概述

增材制造技术原理与分类：增材制造基于离散-堆积原理，先通过 CAD 软件建模，再用切片软件将模型切成二维层面，最后由设备逐层堆积材料成型。比如熔融沉积成型（FDM）技术，将丝状热塑性材料加热挤出，按路径堆积成实体。依据材料供给、成型原理等，增材制造可分为多种类型。材料挤出型的 FDM 设备成本低、操作简单；粉末床熔融型的 SLM、EBM 能制造高精度金属零件，分别用于航空航天和医疗领域；光固化型的 SLA 精度高、DLP 打印速度快；层叠制造型的 LOM、DDM，前者用于制作大型模型，后者应用于电子制造；热喷涂型的 WAAM 沉积速率高、PTA 可提升零件表面性能；生物打印型则有望解决器官移植供体短缺问题^[1]。

复杂热动机械零部件定制化生产特点与需求：复杂热动机械零部件结构复杂，如航空发动机涡轮叶片有扭曲形状和冷却通道，热交换器有曲折流道。此外，快速交付能满足客户需求，数字化设计和自动化生产可显著缩短交付周期。增材制造技术在定制化生产中的优势：增材制造能突破传统限制，制造复杂结构零部件，如一体成型航空发动机涡轮叶片。在小批量定制化生产上，它摆脱模具依赖，通过修改数字模型就能生产，成本效益高、灵活性强。该技术还能大幅缩短生产周期，跳过模具制造环节，快速响应紧急订单。在成本方面，增材制造材料利用率超 90%，降低了材料成本，尤其适用于小批量和定制化生产。

3 增材制造技术在复杂热动机械零部件定制化生产中的应用案例分析

3.1 航空发动机涡轮叶片定制化生产

航空发动机涡轮叶片工作环境恶劣，对性能和结构要求极高，传统铸造难以满足定制需求。某企业采用选区激光熔化（SLM）技术制造叶片。设计阶段，借助 CAD 与流体热传导分析，优化冷却通道，相比传统叶片，表面温度降低 10%~15%。制造时，SLM 无需模具，生产周期缩短 30%~40%，尺寸精度 $\pm 0.05\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\text{Ra}3.2\text{--}6.3\mu\text{m}$ 。微观组织上，晶粒尺寸减小 30%~50%，高温抗拉、屈服强度提升。飞行试验显示，使用增材制造叶片的发动机燃油效率提高 5%~8%，推力增加 3%~5%。

3.2 汽车发动机缸体定制化制造

汽车发动机缸体结构复杂，砂型铸造定制成本高、周期长。某企业运用 SLM 工艺制造缸体，通过 CAE 分析优化水套、油道，缸体表面温度降低 8%~12%，零部件磨损率降低 15%~20%。SLM 技术无需模具，生产周期缩短 40%~50%，尺寸精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\text{Ra}6.3\text{--}12.5\mu\text{m}$ ，抗拉、屈服强度提升。道路测试表明，搭载增材制造缸体的汽车燃油经济性提高 5%~7%，动力性能提升 8%~10%。

3.3 工业汽轮机转子定制化生产

工业汽轮机转子工况复杂，传统锻造和加工定制受限。某企业采用电子束选区熔化（EBM）技术，设计时结合 CAD 与有限元分析，优化转子结构，效率提高 5%~8%。EBM 在真空中作业，无需模具，生产周期缩短 30%~40%，尺寸精度 $\pm 0.08\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\text{Ra}3.2\text{--}6.3\mu\text{m}$ ，抗拉、屈服强度和疲劳寿命显著提升。运行测试显示，使用增材制造转子的汽轮机维护周期延长 30%~50%^[2]。

4 增材制造技术在复杂热动机械零部件生产中的精度影响因素分析

4.1 材料因素对精度的影响

材料的热膨胀系数、收缩率与流动性，从本质上影响着零部件的成型精度。在 SLM 打印进程中，高膨胀系数的钛合金材料，因打印时局部温度骤变，热胀冷缩不均，致使内部产生较大热应力，尺寸偏差可达 $\pm 0.2\text{--}0.5\text{mm}$ 。FDM 打印使用的 ABS 材料，收缩率在 0.4%~0.9% 之间，以汽车内饰件这类大型零件为例，尺寸可能缩小 1~2mm，严重影响适配性，同时表面粗糙度显著上升。粉末床熔融工艺里，不锈钢粉末若流动性欠佳，零件内部孔隙率增加 5%~10%，尺寸偏差达到 $\pm 0.1\text{--}0.3\text{mm}$ ，极大削弱零件的力学性能。

4.2 工艺参数对精度的影响

打印速度、层厚与温度等参数，直接决定了零件的精度。SLM 打印钛合金时，打印速度过快，粉末无法充分熔化，孔隙率增加 5%~10%，尺寸偏差 $\pm 0.1\text{--}0.3\text{mm}$ ；速度过慢，零件长时间受热，热变形量最高可达 $\pm 0.5\text{--}1.0\text{mm}$ 。FDM 工艺中，层厚过厚，表面台阶效应显著，粗糙度增加 2~3 倍，尺寸偏差 $\pm 0.2\text{--}0.5\text{mm}$ ；层厚过薄，层间结合不牢，缺陷发生率增加 10%~15%。以航空发动机叶片的 EBM 打印为例，打印温度过高，高温合金晶粒增大 30%~50%，变形量 $\pm 0.3\text{--}0.8\text{mm}$ ；温度过低，层间结合强度降低 30~50%。采用合理扫描策略，SLM 打印零件变形量可降低 30%~50%，精度显著提升 1~2 个等级。

4.3 设备性能对精度的影响

设备的机械精度、喷头定位精度，对零件精度影响极大。FDM 设备机械精度不足，在打印过程中定位偏差，零件尺寸偏差可达 $\pm 0.2\text{--}0.5\text{mm}$ 。SLA 设备喷头定位精度误差为 $\pm 0.05\text{mm}$ 时，对于微纳光学元件这类微纳结构零件，尺寸偏差达到 $\pm 0.1\text{--}0.3\text{mm}$ ，严重影响其光学性能。打印平台若不平整，大型金属零件因各部分受力不均，变形量可达 $\pm 0.5\text{--}1.0\text{mm}$ 。设备稳定性差，打印过程中频繁抖动，零件尺寸偏差增加 30%~50%，缺陷发生率大幅提高^[3]。

4.4 环境因素对精度的影响

环境温度、湿度与振动等环境因素，对打印精度产生重要作用。SLM 打印大型金属结构件时，环境温度过高，冷却过程温差异常，尺寸偏差 $\pm 0.5\text{--}1\text{mm}$ ；温度过低，钛合金零件冷却过快，内部应力集中，极易出现裂纹。在金属

粉末床熔融工艺中,湿度过高,粉末吸收水分,打印时产生气体,零件孔隙率增加 5%~10%,尺寸偏差 $\pm 0.1\sim 0.3\text{mm}$ 。在打印微机电系统(MEMS)这类精细结构时,外界振动干扰材料沉积,零件尺寸偏差达到 $\pm 0.05\sim 0.1\text{mm}$ 。

5 增材制造技术在复杂热动机械零部件生产中的精度控制策略

5.1 优化材料选择与预处理

材料选择直接关系增材制造的精度。粉末床熔融技术中,镍基高温合金粉末是航空发动机零部件的理想之选,其出色的高温强度、抗氧化和抗热腐蚀性,能满足极端工况需求。合适粒度分布与球形度的粉末用于 SLM 打印,可减少内部孔隙,提升致密度与尺寸精度,良好的粉末流动性也有助于降低尺寸偏差。航空航天领域对重量要求严苛,钛合金凭借低密度、高强度和耐腐蚀性脱颖而出。选择钛合金粉末时,需严控化学成分均匀性与氧含量,过高的氧含量会降低零件韧性与精度。在 EBM 制造钛合金零件时,高质量粉末可让内部组织更均匀,力学性能更稳定,保障尺寸精度。材料预处理同样重要。筛分金属粉末能去除团聚物,保证粒度均匀,使铺粉更均匀,减少零件内部缺陷,SLM 打印时尺寸偏差可降低 20%~30%。干燥易吸潮的铝合金粉末,能改善打印性能,降低气孔率 30%~50%。打印前对金属材料表面清洁活化,如激光熔覆前对基体喷砂,可增强层间结合强度,提升尺寸精度与力学性能。

5.2 精确控制打印工艺参数

构建参数优化模型是精确控制工艺参数的核心。借助正交、响应面实验,研究打印速度、层厚等参数对精度的影响,通过回归分析建立数学模型,预测最优参数组合。基于神经网络、遗传算法等机器学习算法,输入大量实验和生产数据进行训练,模型便能依据零件设计信息与材料特性,自动预测最优参数,提升优化效率与准确性。增材制造中各工艺参数相互耦合,多参数协同控制至关重要。以打印速度和温度为例,两者关联紧密,打印速度过快且温度过低,会加剧零件缺陷与尺寸偏差。采用多变量自适应控制算法,依据温度场分布、材料沉积状态等实时数据,动态调整多个参数。在控制扫描策略时,也要综合考虑零件结构与热分布,合理调整相关参数,确保各区域成型质量与精度。利用温度、位移等多种传感器,对打印过程关键参数实时监测。在打印平台和喷头部位安装传感器,获取温度和喷头运动轨迹数据,及时发现异常并调整。结合光学测量、X 射线检测等在线检测技术,实时检测零件尺寸与内部质量,对比设计模型,修正尺寸偏差,保障打印稳定性与精度^[4]。

5.3 提高设备性能与智能化水平

提升打印机机械精度是基础。FDM 打印机采用高精度滚珠丝杠和直线导轨,定位精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$,重复定位精度 $\pm 0.005\text{mm}$,大幅提升运动平稳性与精度。优化关键

零部件设计,如采用高强度铝合金并增加加强筋设计打印平台,增强刚性与稳定性,减少因振动和变形导致的精度影响。定期校准和维护打印机,确保机械精度长期稳定。控制系统的稳定性对增材制造精度影响显著。选用高稳定性硬件,如德国倍福 TwinCAT 运动控制器,其先进的实时操作系统和高性能处理器,可实现对各运动轴的精确控制。采用自适应、模糊控制等先进算法,根据实时数据自动调整控制参数,减少参数波动导致的尺寸偏差。做好屏蔽、滤波,降低电磁干扰,保证控制系统稳定可靠。智能化打印设备是未来发展方向。设备应具备自适应控制功能,根据温度、压力等实时数据自动调整工艺参数,优化打印过程。

5.4 改进后处理工艺

后处理工艺对提升零件尺寸精度与综合性能作用关键。热处理能消除打印内应力,改善微观组织和力学性能。镍基高温合金零件经固溶和时效处理,内应力降低 50%~70%,屈服强度提高 15%~25%,尺寸偏差控制在 $\pm 0.05\sim 0.1\text{mm}$ 。机械加工可修正尺寸偏差,提高表面精度。精密铣削汽车发动机缸筒内壁,能将内径尺寸精度控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内,圆柱度误差 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内,表面粗糙度降至 $\text{Ra}0.8\sim 1.6\mu\text{m}$ 。磨削工业汽轮机叶片型面,可消除表面台阶效应和尺寸偏差,使尺寸精度达到 $\pm 0.02\text{mm}$,表面粗糙度 $\text{Ra}0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ 。表面处理能提升零件表面质量与性能。电镀镀铬、镀锌可提高零件耐磨性和耐腐蚀性,活塞镀铬后耐磨性提高 3~5 倍。化学镀镍在零件表面形成镍磷合金镀层,增强耐腐蚀性和耐磨性。喷丸处理在零件表面引入残余压应力,提高航空发动机压气机叶片疲劳寿命 20%~30%。

6 总结

本研究围绕增材制造技术在复杂热动机械零部件定制化生产中的应用与精度控制展开。应用层面,通过航空发动机涡轮叶片等案例,证实该技术在复杂结构制造、定制化生产等方面优势显著。精度控制上,剖析了材料、工艺参数等因素对精度的影响,提出针对性策略。从材料选择与预处理,到工艺参数的优化控制,再到设备性能提升和后处理工艺改进,有效提高了零件的尺寸精度和质量。未来,材料研发需开发高性能材料,调控微观结构。工艺创新要探索多材料、多工艺融合技术,优化打印路径。设备升级应提升精度、速度与稳定性,推进智能化。

参考文献

- [1] 董斌,润润振.金属增材制造技术在农业机械领域的应用与发展[J].南方农机2024,55(10):33-35.
- [2] 许子桐.精密加工技术与农业机械制造工艺的研究[J].农机使用与维修,2025(01):79-82.
- [3] 周玉婷.增材制造聚醚醚酮电致形状记忆驱动特性及其仿生研究[D].吉林:吉林大学,2023.
- [4] 董洁,龙玲,殷国富.增材制造技术在汽车行业的应用研究[J].机械,2019,46(02):41-45+67.

Analysis of modular design concept of aero engine

Xiangdong Lei

Jiangsu Hangdu Power Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225200, China

Abstract

The modular design concept of aviation engines involves breaking down the engine system into several distinct modules. These modules, while having relatively independent functions, share a unified interface, allowing for easy interchangeability between them. This approach enhances the assembly speed of various engine components, facilitates maintenance and part replacement, and streamlines the overall production and maintenance processes of the engine. The article analyzes the modular design concept and key technologies of aviation engines, aiming to effectively enhance the design level of aviation engines, increase design flexibility, shorten the R&D cycle, reduce design costs, and improve the operational efficiency of airlines.

Keywords

aviation; engine; Modular design

航空发动机模块化设计思路分析

雷向东

江苏航都动力有限公司，中国 · 江苏 扬州 225200

摘 要

航空发动机模块化设计理念，就是对发动机系统进行分解，将其转化为几个不同的模块，这些模块功能相对独立，但是接口统一，各个模块之间可以互换，进而提高发动机各个组件的组装速度，方便维修和更换零件，简化整体发动机生产与维修流程。文章主要对航空发动机模块化设计理念和关键技术进行分析，从而有效提升航空发动机设计水平，提高设计灵活性，缩短研发周期，减少设计成本，促进航空公司的运营效率。

关键词

航空；发动机；模块化设计

1 引言

为适应未来社会发展对航空飞机的实际需求，需要对航空发动机设计模式进行持续性优化，引进模块化设计理念，这样才能进一步提高发动机体系性能，并减少研发时间，控制研发成本，同时也可以对模块设计进行配置复用，这样能够结合各类飞机发动机型号的不同，对其进行模块化更换和维护，保障发动机维修效果。

2 航空发动机模块化设计优势和关键技术

在现代化航空工业高速发展背景下，模块化设计在发动机设计中发挥了越来越重要的作用，可以对传统设计方法进行创新和优化，简化设计流程，进一步提高设计效率，控制发动机维修成本。模块化设计过程中需要保障各个发动机模块接口的标准化，能够保障各个模块相互兼容。模块化设计就是对复杂系统进行分解，将其转化为相对独立的几个模

块，且各个模块之间可以互换，这样方便对各个模块进行单独维修和更换，进而提高维护效率^[1]。由此可见，模块化设计理念在航空发动机设计中的优化应用，能够提高各个模块开发速度，且标准化的接口能够实现整个系统的高效集成与调试，还能够实现设计复用，在不同项目中重复使用通过验证的模块，这样能够减少研发成本，缩短研发周期。在模块化设计理念下，需要结合不同平台发动机的实际需求展开详细化分析，进而全方位、多角度分析发动机系统功能，优化架构设计要求；在此基础上，要推动构建航空发动机功能单元模型，其中建模方法有环境背景图、活动图、矩阵等，这样能够从上到下逐级分解发动机功能，并合理分配各个功能单元；此外还需要结合建模结果，开展模块设计与验证工作，并构建更加完善的模块数据库，明确模块复用判定条件。在该过程中，需要促进单个模块性能一致与结构互换，同时要结合不同用户的实际需求，想起短时间内配置发动机产品构型；在此基础上，要结合视情维修应用场景实际需求，对模块进行重组，形成一个个独立的维修单元体，这样可以确保各个维修单元体更换后整机性能的一致性，并保障整体发动机工作状态的可靠性。

【作者简介】雷向东（1986-），男，中国贵州贵阳人，本科，从事航空发动机设计研究。

3 航空发动机功能单元建模与划分技术

发动机是航空平台的重要动力来源,随着航空飞机发展水平的日益提升,动力需求日益呈现多样化趋势,因此需要对新技术进行优化应用,才能满足航空发动机功能多样化、结构复杂化的需求。航空发动机模块化建模需要对不同功能单元边界、接口进行清晰梳理,并严格按照系统工程正向设计流程进行操作,并从上到下逐层分析,对各类功能进行优化分解分配。在建模环节中,要优化解决发动机顶层功能呈现问题,并采取科学方法针对性分解分配顶层功能,才能更加合理地划分出“高内聚、低耦合”发动机功能单元^[2]。

3.1 基于环境背景图的航空发动机系统交互分析建模技术

为了精准识别航空发动机功能单元,需要更加全面地获得发动机顶层功能,只有这样才能保障合理划分后续功能单元。在功能识别工作中,为了对需求进行精准捕获,需要做好场景分析工作。由于各类功能都需要在航空发动机运行、维护场景中进行充分体现,所以需要加大对场景建模与描述工作的重视程度。通常情况下,航空发动机主要发挥航空装备平台子系统的作用,场景分析特殊性较强,需要保障运营场景与上级装备平台的统一性,此外还需要全过程弥补维修、保障等场景。其中,以场景为中心的发动机功能分析主要针对发动机与装备平台不同级别平台、人员、设备之间信息的相互交互,只有在此基础上才能结合输入/输出捕获发动机顶层功能;环境背景图建模主要是针对系统交互对象、信息进行分析和研究,在航空发动机 SOI 系统基础上,对不同场景与上级装备平台子系统、人员等实现信息交互^[3]。通常情况下,为了精准识别发动机交互信息,吸鸦片选择合适的输入信息,如上级装备平台的功能逻辑模型、通讯接口文件、机械接口文件等,然后利用环境背景图对其开展更加精准的建模分析工作,只有这样才能对整体航空发动机顶层功能进行精准识别。

3.2 基于活动图的航空发动机功能分解建模

在实际设计环节,可以通过多样化方式实现航空发动机顶层功能,由于承载功能、指标需要利用多样化、针对性的概念方案,这种情况容易引起顶层功能分解的不同。如果概念方案与显性满足功能指标不匹配,就要进行针对性创新,但是难度较大,需要进行大量的可行性论证。其中常用的发动机功能分析方法有功能流框图法、 N^2 图、时间线分析法^[4]。现阶段, SysML 建模语言能够在系统中进行规范性表达和分析,进而在发动机功能分析工作中得到广泛青睐。在该建模语言应用中,活动图主要发挥功能流框图的功能;时序图主要发挥时间线分析法的功能。当前,在航空发动机功能分解中较常使用活动图方法,这样能够有效解决顶层功能分解分配难题。活动图能够在建模结构的支持下,直接开展逻辑仿真工作,以便对顶层功能能否实现进行验证,

进而优化分析功能分解合理性。完成初步分解工作后,还要促进架构建模、功能危险性评估等工作的实现,进而推动多轮迭代,这样才能进一步明确功能分解合理性。

3.3 基于矩阵/ N^2 的航空发动机功能单元定义

这是在概念方案、功能分解结果的基础上,科学分配子功能,集合而成承载功能单元。在功能单元定义过程中,需要按照以下原则进行规范性操作:①以相似性为基准进行划分;②以高内聚、低耦合为基准进行划分,尽可能降低功能模块交互接口。在活动图建模分析与迭代支持下,能够利用 N^2 图进行功能单元划分,并实现接口的规范性解耦^[5]。在具体操作中,要根据分解核心子功能对初始单元模块进行定义,并利用 N^2 图对不同子功能关联关系、接口数量进行详细分析,在高内聚、低耦合基础上,把接口封闭在功能单元内部,这样能够对发动机功能模块进行重构。

4 模块设计与复用技术

结合功能模块设计结果,需要构建数据模块构型包,这些数据包含模型、配套文件等信息。该模块构型包需要与各类航空发动机的研发进度需求、成本控制要求等进行针对性设计,使其符合未来技术发展趋势要求,保障性能一致性,能够实现各个结构模块的互换。同时,还需要利用构型配置方法,构建模块数据库,同时对模块承接性能进行分析,分层验证结构接口,进而对复用模块进行协同共用,以便结合用户个性化需求,针对性、高效化配置发动机产品构型^[6]。当前,较为常用的模块结构互换性设计方法有接口标准化规格化、尺寸计算与公差分配、转子分级高精度平衡等,然而这些都是在不同模块之间的相互匹配补偿方式实现的要多平台模块复用的多样化需求不契合,所以在未来发展中需要加大对模块性能一致性设计方面研究力度。

4.1 模块性能一致性设计

在发动机模块设计和研制过程中,往往需要通过试制、装配、测量等步骤,这些流程往往会形成一定的几何特征尺寸偏差,这样容易致使模块启动性能出现分散问题,导致整个发动机性能偏差较大。所以,要采取科学方法,对模块性能几何特征进行精准识别,同时还需要对几何特征尺寸容差范围进行定量化控制。但是,现阶段该方面的技术措施还不到位,往往只能利用工程经验、整机匹配调试等方式,难以真正实现模块性能一致性^[7]。在正向设计理念支持下,尤其以多层级性能传递为基础,采取模块性能容差分配方法,这样能够利用模块关键特征公差控制,实现模块性能的一致性。例如,面向整机性能一致性的模块关键结合特征容差分配方式,需要通过敏感性分析、机器学习驱动特征选择等方式,对模块关键几何特征进行精准识别,这样可以减少关键几何特征控制采纳数量。航空发动机压气机部件性能容差分配方法技术路线如图 1 所示。

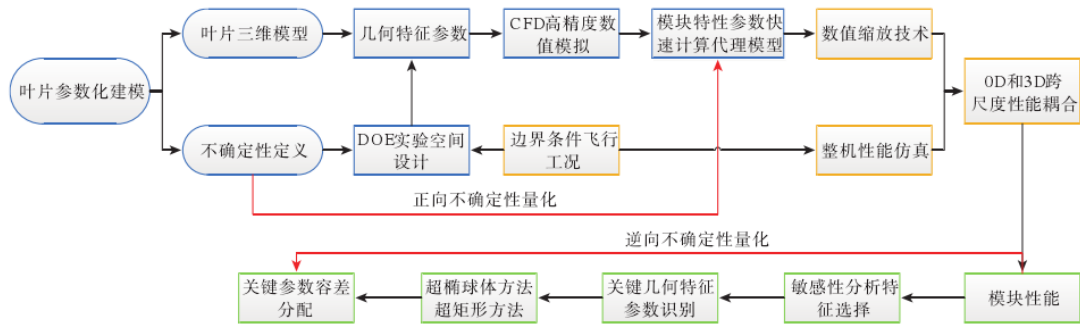


图1 航空发动机压气机部件性能容差分配方法技术路线

4.2 模块库构建与管理构型

在信息化数据库支持下构建模块库，这样才能把模块解耦后的各类信息进行结构化、数字化处置，包含功能性能属性、接口属性、寿命属性、技术成熟度属性等。以模块信息属性为中心，对模块库准入准则进行优化设计，只有符合该准则的信息才能归集到模块库进行存储和应用。对现有模块数据版本开展定期升级管理，且需要提前利用准入准则进行判断才能进行模块升级操作^[8]。在模块库支持下，需要形成发动机产品构型结构树，其中包含顶层、配置层、设计层等，三个层次的类型分别为多层结构、单层结构、一至多层结构。在此基础上，需要利用配置层对模块进行筛选，使其与设计要求保持契合性，然后高效完成发动机性能模型、物理模型构建工作，同时在仿真系统支持下，做好发动机功能性能、结构强度等进行仿真验证，保障设计方案的可行性，进而确定产品设计方案，提高验证速度，实现高效研发。

4.3 模块匹配定量决策

结合航空发动机研发和制作需求，往往需要通过配置构型的方式进行操作，但是这种方式往往会形成不同类型的产品设计方案，基于此需要构建模块匹配权衡决策模型，这样可以为设计方案可行性论证提供依据。

5 结语

综上所述，模块化设计是航空发动机研制工作的创新和优化，能够进一步提高航空工业效率和性能。在模块化设计支持下，能够对不同组件进行单独设计和测试，进而提高研发速度，减少维护、维修成本。在未来发展中，要在设计技术层面和验证体系层面进行更加深层次的研究，并对现代

数字化技术、人工智能技术进行优化应用，进而促进发动机研发工作向数据驱动层面转型，这样才能进一步提高发动机研发速度，并减少研发成本，强化综合性能。同时还需要对设计、仿真、测绘验证等流程进行集成化开展，强化数字孪生与模型协同、虚拟仿真装配试验等数字化方法的应用，促进虚拟验证与实物测试的相互融合，有效控制验证成本。

参考文献

- [1] 黄维娜,朱晓泉,潘辉,等. 航空发动机模块化设计关键技术与展望[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38 (02): 4-12.
- [2] 徐劲松,黄国勇. 航空活塞发动机机电硬件的模块化设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44 (16): 37-44.
- [3] 张成武,郝朝杰. 基于模块化设计的工程设计数据管理[J]. 航空发动机, 2019, 45 (02): 97-102.
- [4] 潘柏霖. 基于UG软件的航空发动机外部系统设计二次开发[J]. 中国设备工程, 2018(05): 123-125.
- [5] 马勃勃,董素艳,李宗耀,等. 航空发动机空气系统图形化建模软件设计[C]// 中国航空学会动力分会燃烧与传热传质专业委员会. 中国航空学会第十八届燃烧与传热传质学术研讨会论文集. 西北工业大学动力与能源学院;中国航空工业集团公司沈阳发动机设计研究所, 2015: 573-579.
- [6] 刘圣宇. 某型飞机发动机性能检测系统的设计与实现[D]. 吉林大学, 2012.
- [7] 郭旭,王凤君,赵曦. 浅谈航空发动机专用工位器具模块化设计[J]. 中国新技术新产品, 2011(24): 14.
- [8] 慈元卓. 装备模块化设计中的模块创建研究[D]. 国防科学技术大学, 2004.

Optimization of Sample Preparation Methods for Infrared Determination of Monomer Content in Non-uniform Polypropylene

Guosheng Liu Duoheng Shi Jiangfeng Fu Zhanwu Yu

Guoneng Baotou Coal Chemical Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia, 014010, China

Abstract

In the production process of impact-resistant polypropylene, it is necessary to strictly control the content of ethylene rubber phase in impact-resistant polypropylene and atactic polypropylene. The authors of this paper studied the company's enterprise standards and combined the process of producing impact-resistant polypropylene, it necessary to prepare and test two intermediate control samples. It takes about 1.5 hours to complete this analytical task. This sample preparation method has a complex operating procedure, heavy labor, and low analytical efficiency, which will affect the process production adjustment and thus affect the product quality. In summary, without affecting the quality of sample preparation, the authors used the pressure machine produced by LabTech company, through the selection of overflow and non-overflow mold, the selection of mold thickness, and the exploration of optimizing the pressing conditions, to carry sample preparation and infrared testing. Through the improvement and discussion of the enterprise standards, a quick and convenient sample preparation method was determined.

Keywords

Infrared method; impactresistant polypropylene; ethylene; rubber phase; sample preparation; optimization

红外测定非均聚聚丙烯单体含量过程中样品制备方法的优化

刘国圣 施多恒 伏江峰 余占武

国能包头煤化工有限责任公司, 中国·内蒙古 包头 014010

摘 要

在抗冲聚丙烯和无规聚丙烯生产过程中, 要严格控制抗冲聚丙烯中的乙烯和橡胶相含量, 本文作者研究了公司的企业标准, 结合在生产抗冲聚丙烯的过程中, 需要对中间控制2个样品进行样品制备并测试, 完成这个分析任务需要大约1.5小时, 此样品制备方法操作程序复杂, 人的劳动负荷较重, 分析效率低, 会影响工艺生产调整, 从而影响产品质量。综上所述, 在不影响样品制备品质的前提下, 利用LabTech公司生产的大压片机, 通过选用溢料式和非溢料式模具, 模具厚度的选择, 优化压片条件参数等方面的摸索, 进行样品制备和红外测试, 通过对企业标准的改进和探讨, 确定一种快速便捷的样品制备方法。

关键词

红外法; 抗冲聚丙烯; 乙烯; 橡胶相; 样品制备; 优化

1 引言

煤制烯烃项目自 2010 年 5 月 28 日在内蒙古包头投料试车成功后, 实现了煤化工和石油化工生产的有机衔接, 是能源化工技术领域中的重大突破, 对于优化能源结构, 保障能源安全具有重要的意义。煤制烯烃项目应用气相流化床工艺能够灵活生产各类均聚物、无规共聚物和抗冲共聚物等聚丙烯塑料产品。在生产抗冲聚丙烯和无规聚丙烯时, 使用二段反应器, 以向生成中的聚丙烯链中添加主要弹性体(橡胶相)成分。其中 Et(聚合物中的乙烯含量)、Fc(聚合物中的橡胶相含量)和 Ec(橡胶相中的乙烯含量)对产品出

厂质量至关重要, 在生产过程中, 通过 Fc、Ec 数据的监控, 能够快速指导工艺调整, 提高产品质量。目前 Fc 和 Ec 的检测过程中样品压片所需的时间过长、数据的重现性较差; 此种情况会导致分析数据不能及时准确提供, 工艺无法及时作出调整, 会导致产品质量出现较大波动, 甚至会导致反应器结块、堵塞 PDS 等一系列严重问题。

本文通过对红外分析抗冲聚丙烯和无规聚丙烯中共聚单体及橡胶相含量的样品制备方法^[1]的改进和优化, 实现制备样品自动化完成, 同时可以制备出 4 个样品, 制备出的薄片光亮平滑、无杂质、无气泡, 厚度符合分析要求, 确定一种快速便捷的样品制备方法, 该方法能够大大节省时间和人力成本, 提高分析检测效率, 保障工艺生产的平稳运行和产品质量。

【作者简介】刘国圣(1984—), 男, 中国山东青州人, 本科, 高级技师, 从事聚烯烃研发及检测研究。

2 实验部分

2.1 实验原料

聚丙烯抗冲聚丙烯 LC.1813.L、K8003 及标准样品 50H、50V。

2.2 实验设备及仪器

液压压片机, LP-S-50, LabTech 公司;
手动压片机, GS15011, specac 公司;
红外光谱仪, Nicolet6700, Thermofisher 公司。

2.3 样品制备及实验

在不影响样品制备品质的前提下, 本文利用 LabTech 公司生产的液压压片机, 通过选用溢料式和非溢料式模具, 模具厚度的选择, 优化压片条件参数等方面的摸索, 进行样品制备和红外^[2]测试, 对比分析结果, 最终确定一种快速便捷的样品制备方法。

2.3.1 选用溢料式和非溢料式模具的对比

选用溢料式和非溢料式模具在同一台液压压片机上压片, 液压压片机参数设置一致, 通过比对, 发现用非溢料式模具所压的薄片, 无法成型, 达不到分析测试要求, 且模具笨重, 不方便操作; 用溢料式模具所压的薄片, 压制的薄片, 能够到达薄片光亮平滑、无杂质、无气泡的要求, 但在样品厚度上还需要对液压压片机参数进行摸索。

2.3.2 选用不同厚度的溢料式模具进行试验

为了达到制备的样品薄片符合分析测试要求, 我们选用标准样品和自己公司生产的 LC.1813.L 样品, 选择模具厚度为 0.2mm 长方形模具和 0.3mm 正方形模具, 利用 LabTech 公司生产的大压片机, 在同样的参数下进行制备样品, 制备出的样品薄片厚度不均匀。

经过分析测试发现, 使用两种模具制备的样品薄片测试结果与标样结果偏差较大。经过多次试验后, 0.3mm 的模具所制备的样品基本符合测试要求, 但结果的误差较大, 因此, 我们在确定所选模具后还需要对样品用量和液压压片机参数进行摸索和优化。

2.3.3 摸索样品用量和优化液压压片机设置参数

首先, 我们固定液压压片机设置参数, 然后摸索样品用量, 选择标准样品 (50H), 用模具厚度为 0.3mm 的模具进行样品制备, 如表 2 所示:

由表 3 所示, 当固定液压压片机参数, 用不同用量的样品制备样品薄片, 经测试后通过与标样标准值比对, 选择样品用量在 0.60-0.70g 进行制备样品薄片。

其次, 我们在利用 LabTech 液压压片机进行压片时, 发现预热时间和急冷时间会影响样品薄片的光滑度和有无杂质, 板间距离会影响薄片的厚度, 因此, 我们对液压压片机参数进行了优化。经过大量试验后, 摸索出最佳的试验条件, 如表 4 所示。

选择最佳压片条件, 我们对所有的标样进行样品制备并测试, 结果如下:

由表 5 所示, 所有标样经过本文研究的样品制备方法所制备的薄片光亮平滑、无杂质、无气泡, 且厚度为 0.26mm, 经测试结果的相对误差较小, 重现性好。

2.3.4 测试数据验证

我们选用标样 50H 和 50V 及抗冲聚丙烯 K8003 的粒料和粉料, 分别用 LabTech 液压压片机、Specac 手动压片机进行样品制备薄片, 别用同一台相同条件下的 Nicolet-6700 傅里叶红外光谱仪进行分析, 对比如表 6 所示。



图 1 非溢料式模具



图 2 溢料式模具及 0.2mm 模具

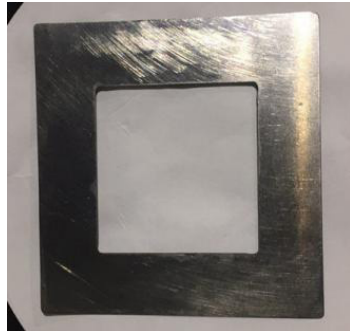


图 3 0.3mm 模具

表 1 同一样品使用不同厚度的溢料式模具制样试验结果

样品名称	压片模具	厚度 mm	分析项目	测试结果 %	标样标准值 %	相对误差 %
标样 50H	0.3mm 正方形 模具	0.28	Et	12.65	12.28	3.01
			Ec	58.67	59.99	2.20
			Fc	21.56	20.47	5.33
	0.2mm 长方形 模具	0.18	Et	12.99	12.28	5.78
			Ec	51.29	59.99	14.50
			Fc	25.34	20.47	23.79

表 2 固定的液压压片机设置参数

仪器参数	PP 红外压片设置参数		
Preheat	1min		
Pressure1	300KN	2min	
Pressure2	300KN	2min	
Pressure3	300KN	0.1min	
Cooling	急冷 direct cooling	10min	
Degassing	Times(sec): 3	Times(X): 2	Step: 2
Air blow	10		
Distance between platens	14mm		

表 3 不同用量的标样（50H）制备薄片分析测试结果

样品用量, g	薄片厚度, mm	分析文	测试结果 %	标准值 %	相对误差 %
0.60	0.26	Et	12.59	12.28	2.52
		Ec	58.89	59.99	1.83
		Fc	21.38	20.47	4.44
0.70	0.26	Et	12.37	12.28	0.73
		Ec	57.86	59.99	3.55
		Fc	21.38	20.47	4.44
0.80	0.28	Et	12.97	12.28	5.62
		Ec	57.86	59.99	3.55
		Fc	22.42	20.47	9.51
0.90	0.28	Et	12.79	12.28	4.15
		Ec	57.91	59.99	3.47
		Fc	22.09	20.47	7.89
1.00	0.29	Et	13.19	12.28	7.41
		Ec	56.91	59.99	5.13
		Fc	23.18	20.47	13.22

表 4 LabTech 液压压片机最佳压片参数表

仪器参数	红外压片设置参数		
Preheat	2min		
Pressure1	300KN	2min	
Pressure2	300KN	2min	
Pressure3	300KN	0.1min	
Cooling	急冷 direct cooling	15min	
Degassing	Times(sec): 3	Times(X): 2	Step: 2
Air blow	10		
Distance between platens	17mm		

表 5 最佳条件下标样制备测试结果

样品名称	厚度 mm	分析项目	测试结果 %			平均值 %	标准值 %	相对误差 %
50H	0.26	Et	12.295	12.241	12.276	12.27	12.28	0.08
		Ec	59.890	59.886	60.412	60.06	59.99	0.12
		Fc	20.529	20.441	20.320	20.43	20.47	0.19
50V	0.26	Et	2.812	2.801	2.809	2.81	2.81	0.09
		Ec	61.084	61.261	61.240	61.20	61.11	0.14
		Fc	4.603	4.572	4.587	4.59	4.59	0.05

表 6 四种样品两种制样方法对比

制样设备	LabTech 液压压片机				Specac 手动压片机			
样品名称	50H	50V	K8003 粉料	K8003 粒料	50H	50V	K8003 粉料	K8003 粒料
薄片厚度	0.26mm	0.26mm	0.26mm	0.26mm	0.26mm	0.26mm	0.26mm	0.26mm
制样时间	共需要 1 小时左右				共需要 4 小时左右			
测试仪器	Nicolet-6700 傅里叶红外光谱仪							

由上表所示可知，用 LabTech 液压压片机制备样品薄片相比较用 Specac 手动型压片机制备样品，所需要的时间短，人工操作负荷较低，同时制得的样品薄片厚度、光滑度、无杂质和气泡，完全符合红外测试要求。经过测试后，结果

如表 7 所示。

由表 7 可知，在同一实验室内，用两种不同制样方法制备样品，经同一测试方法测试，所得到的结果进行比对，通过计算两组数据之差的绝对值，得出两组结果具有良好的一致性。

表 7 四种样品两种制样方法测试结果对比

分析项目		Et				Ec				Fc			
样品名称		50H	50V	K8003 粉料	K8003 粒料	50H	50V	K8003 粉料	K8003 粒料	50H	50V	K8003 粉料	K8003 粒料
LabTech 液压压片机制样	①	12.29	2.80	6.88	6.98	59.99	61.11	35.11	33.70	20.49	4.58	19.60	20.71
	②	12.26	2.79	6.86	7.01	59.96	61.12	35.12	33.68	20.45	4.56	19.53	20.81
	③	12.30	2.81	6.90	7.02	60.02	61.09	35.08	33.73	20.49	4.60	19.67	20.81
Specac 手动型压片机制样	①	12.31	2.83	6.87	6.99	59.96	61.13	35.09	33.69	20.53	4.63	19.58	20.75
	②	12.30	2.78	6.89	7.02	59.98	61.12	35.13	33.72	20.51	4.55	19.61	20.82
	③	12.29	2.81	6.91	7.04	60.01	61.11	35.09	33.71	20.48	4.60	19.69	20.88
两组数据算数平均值之差的绝对值		0.020	0.021	0.018	0.024	0.013	0.022	0.017	0.018	0.023	0.019	0.020	0.025

3 总结

综上所述，通过对红外分析抗冲聚丙烯和无规聚丙烯中共聚单体及橡胶相含量的样品制备方法的改进和优化，制备样品自动化完成，同时可以制备出 4 个样品，制备出的薄片光亮平滑、无杂质、无气泡，厚度符合分析要求，经过测试后，通过大量实验结果计算和比对，能够得到准确的数据，从而得到一种快速便捷的样品制备方法。

目前公司生产抗冲聚丙烯和无规聚丙烯产品过程中，该方法应用于对 Et、Fc 和 Ec 数据的监控，保障了装置快速

调整生产工艺状态，减少过渡料的产生，提高了产品质量，为公司产生了更大的经济效益。

参考文献

[1] 刘国圣,伏江峰,廖珊珊,张维斌.样品制备方法对红外法测定抗冲聚丙烯中乙烯及橡胶相含量的影响.中国科技博览,第13期 2014年.

[2] 赵玉镶,廖腾芳 .快速测定乙烯丙烯共聚聚丙烯中乙丙胶体含量的方法.CN1308231A.

[3] 陈允奎编.红外吸收光谱法及其应用.上海:上海交通大学出版社,1993.110-112.

Study on comprehensive management method of humidity control and ventilation technology in flour storage process

Xiaoshan Zheng Xu Luo Pan Qi Yingxin Lu Chengbo Ke

Guangzhou Lingnan Sui Grain Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 511466, China

Abstract

This paper explores the integrated management approach for humidity control and ventilation in flour storage. It examines how changes in humidity affect the hygroscopicity and physical and chemical properties of flour, and discusses the role of ventilation in humidity regulation and its synergistic mechanism with dehumidification techniques. The study shows that by integrating sensor networks and automatic control systems to create an intelligent management model for real-time monitoring of humidity, temperature, and airflow, precise and dynamic adjustments can be made to the storage environment. This method effectively reduces the number of mold colonies, extends the shelf life of flour, and enhances the stability of flour quality. Practical experience indicates that this comprehensive management approach not only enhances storage safety but also significantly improves overall economic benefits and management efficiency, demonstrating strong applicability and potential for widespread adoption.

Keywords

flour storage; humidity control; ventilation technology; comprehensive management mode

面粉储藏过程中湿度控制与通风技术的综合管理方法研究

郑小善 罗旭 祁攀 卢颖欣 柯成波

广州岭南穗粮谷物股份有限公司, 中国 · 广东 广州 511466

摘 要

本文研究了面粉储藏中湿度控制与通风技术的综合管理方法, 从湿度变化对面粉吸湿性及物理化学性质的影响出发, 探讨了通风换气在湿度调节中的作用及其与除湿技术的协同机制。研究表明, 通过引入传感器网络和自动控制系统构建实时监控湿度、温度和气流的智能化管理模式, 实现了储藏环境的精准调控与动态调节, 可以有效降低储藏环境中的霉菌菌落数, 延长面粉的保质期, 同时提升面粉品质的稳定性。实践表明, 该综合管理方法不仅提高了储藏安全性, 还显著改善了整体经济效益和管理效率, 具有较强的适用性和推广价值。

关键词

面粉储藏; 湿度控制; 通风技术; 综合管理模式

1 引言

面粉作为重要的粮食加工产品其储藏过程对品质 and 安全性具有直接影响, 储藏过程中湿度的波动容易导致面粉吸湿性增加, 进而引发霉菌滋生和品质劣变, 严重影响食用品质和营养价值。传统的储藏方法在湿度调控和环境管理方面难以满足现代储藏对长时间、高质量保存的需求, 通风技术与湿度控制在改善储藏环境、延缓品质劣变方面发挥了重要作用。储藏技术的进一步发展需要在湿度与通风的协同作用上寻求更加科学、精准的管理方法, 为提高面粉储藏的安全性和稳定性提供技术支撑。

【作者简介】郑小善 (1990-), 女, 中国广东徐闻人, 本科, 助理工程师、高级技师, 从事食品安全工程、粮食检测研究。

2 湿度变化对面粉储藏稳定性的影响

储藏环境中湿度的波动会直接影响面粉的吸湿性和物理化学性质, 环境湿度较高时面粉容易吸收空气中的水分导致含水量增加, 水分的增加为微生物的繁殖提供了适宜的条件, 霉菌和细菌菌落数迅速上升进一步导致面粉的品质劣化^[1]。高湿度条件下面粉的蛋白质、淀粉和脂肪等主要成分容易发生化学反应引发褐变现象和酸败问题, 进而影响其色泽、气味和口感。湿度变化还可能造成面粉结块, 降低流动性和加工性能直接影响使用效果。低湿度环境虽然能够减缓部分微生物的生长, 但长期储藏中也可能引发面粉干燥现象导致其吸湿性增强, 使后续受潮风险提高。湿度的不稳定性还会对包装材料的性能产生影响, 增加外界湿气侵入的可能性会进一步加速面粉品质的下降, 湿度变化对面粉储藏稳定性的负面作用已成为影响储藏安全性和经济效益的主要问题。

3 通风换气对湿度调节的有效性

通风换气能够将储藏空间内湿气排出并引入相对干燥的空气,减少环境湿度的蓄积。湿度水平的降低有效抑制了霉菌和细菌的生长环境,减少了面粉品质劣化的风险。储藏环境中的湿气来源于空气湿度和面粉的吸湿性,通风换气能够缓解湿气累积造成的湿度升高,对湿度的动态平衡起到关键作用^[2]。通风换气能够将湿度较大的滞留空气及时排出避免内部湿气因封闭环境而持续累积,相较于密封储藏条件下的湿度控制,通风换气在一定程度上能够快速改善湿度过高的状况,天气干燥的时段其效果尤为显著。通风换气还可以调节储藏环境的温度,降低高温与高湿共同作用对面粉质量的影响。温度降低后空气中的相对湿度也会随之下降,从而减少储藏环境中湿度对面粉的影响。合理的通风设计能够避免局部湿气积聚现象,用均匀的空气流动实现储藏环境湿度的整体平衡,通风换气在一定湿度范围内还能起到抑制微生物的效果。

合理的通风管理需要充分考虑外界气候条件与储藏环境的湿度状况,干燥天气条件通风可以将外界的低湿度空气引入储藏环境从而降低内部湿度水平。通风频率的设定需要根据储藏环境的实际湿度水平进行调整,湿度变化较大的季节可以适当提高通风频率确保湿度调控的持续性。通风频率过高引入过多外界湿气会增加储藏环境湿度的波动,频率过低则会导致储藏空间内湿气难以及时排出增加湿度升高的风险,合理的通风频率应根据储藏环境的湿度监测结果动态调整。

4 湿度控制与通风技术的综合管理模式

4.1 湿度与通风协同作用的机制分析

湿度控制与通风技术的协同作用在面粉储藏环境管理中是实现储藏品质稳定的关键手段,面粉储藏环境的湿度控制主要依赖密封包装和除湿技术,密封包装能够有效隔绝外界湿气的侵入,高阻隔性能的材料能减少了环境湿度对面粉品质的直接影响,除湿技术则用主动调节储藏环境中的湿度水平的方式,降低了空气中的水汽含量使湿度维持在适宜范围。而长期单一使用密封或除湿手段可能导致储藏环境内的湿气无法有效扩散,局部湿度升高的风险增加,高温环境或季节可能加剧储藏条件的恶化。

通风技术在湿气排除和湿度均衡方面起到了弥补作用,通风换气能够用空气流动将储藏空间中的湿气及时排出并引入相对干燥的空气,降低湿度积聚对面粉品质的负面影响。储藏环境湿气浓度偏高的情况下,短时间通风能够有效降低湿度水平使储藏环境恢复平衡状态。通风技术能排出湿气还能带走储藏过程中产生的热量,进一步降低高温高湿条件下霉菌和细菌的生长速度。湿度与通风的协同作用是储藏环境动态平衡的实现基础,高温季节或潮湿地区外界湿气通过空气交换进入储藏环境的风险较高。密封储藏能够减

少外界湿气对面粉的直接影响,短时间通风在局部湿度积聚时发挥辅助作用,帮助排除滞留湿气并防止其影响扩散。干燥季节或干旱地区储藏环境可能因过度干燥导致空气流通不足或湿度过低,适当的通风操作可以引入外界适度湿润的空气,缓解长期密封可能导致的氧气不足或面粉品质下降的问题。

通风的协同作用在储藏环境管理中需结合环境条件进行优化设计,环境条件包括季节性气候变化、储藏仓库结构以及面粉的储藏规模等因素,高温季节的储藏环境需要增加通风时段和频率。气候干燥时适当减少通风以防止湿度下降过快造成不必要的品质损失,局部湿气积聚区域可以用定向通风的方式实现精准排湿,而整体环境则需要均匀通风以确保空气流通的全面性^[3]。协同作用的机制分析表明,湿度与通风技术的结合能够提高储藏环境的稳定性,减少单一技术的局限性。

4.2 储藏环境动态监测与数据调整机制

储藏环境中的湿度、温度和气流等参数影响面粉的品质和储藏稳定性,动态监测可以及时掌握储藏环境的变化趋势为后续的调控提供科学依据。动态监测机制的核心在于传感器的布置与数据采集系统的搭建,湿度传感器应布置在储藏仓库靠近地面的区域、顶部空间以及通风出口和密封包装的周围等关键位置,这样的布置可以全面捕捉储藏环境中的湿度变化避免单点监测可能导致的数据偏差。温度传感器则需要与湿度传感器协同布置,气流传感器的设置重点在于通风通道和空气流动的主要路径以确保通风效率的评估和调整能够基于准确的数据进行。

实时数据采集系统用连接各个传感器的方式将采集到的湿度、温度和气流数据传输到中央控制单元,数据用无线通信或有线网络传输并在控制系统中进行实时处理和分析。动态监测系统可以设置报警阈值,当储藏环境中的湿度或温度超出安全范围时系统能够发出警报提示管理人员采取措施。这种实时监测的方式能够及时发现储藏环境中的潜在问题,有效避免储藏条件恶化导致的面粉品质下降。

数据调整机制的设计需要结合监测数据的特点和储藏需求,包括通风设备、除湿设备和加湿设备的智能化控制。综合管理模式可以用预设参数与实际监测数据的对比来判断储藏环境的变化趋势,并自动启动相应设备进行调控。当湿度传感器检测到储藏环境湿度超出设定范围时,通风设备可以自动启动,根据湿度水平调整风机的运行时长和强度排出过多的湿气。如果湿度过低系统会启动加湿设备进行补湿,避免面粉因过度干燥而品质下降。

动态监测与数据调整机制的优势在于反应灵敏、控制精准和管理高效,实时监测系统能够捕捉储藏环境中的细微变化并将变化完整记录下来为后续的策略调整提供数据支持。如分析湿度变化的历史数据可以发现储藏环境中的长期趋势或周期性变化并基于此优化储藏管理策略。动态调整机

制则用自动化操作减少了人工干预的需求大幅降低了人为判断误差和操作失误的可能性,传统的手动监测和调控方式难以全面应对储藏环境中的参数变化复杂且相互关联的问题,智能系统能够用算法分析多个传感器的监测数据结合储藏环境的实际情况实时调整湿度控制和通风设备的运行状态,智能化的调控方式使储藏环境始终处于最佳状态进一步提高了储藏效率和面粉品质的稳定性。

动态监测与数据调整机制还具有较高的经济性和适应性,智能化系统的初期投入可能较高,但在长期使用中能够降低管理成本。自动化运行减少了人工成本,精准控制避免了因储藏条件不佳导致的面粉损耗从整体上提高了储藏经济效益。该机制还可以根据不同储藏规模和环境条件进行灵活调整,从小型储藏仓库到大型储藏中心均可适用,具有较强的普适性和可扩展性。

4.3 综合管理模式的实施效果评估

综合管理模式的实施效果直接关系到面粉储藏的质量和经济效益,科学的效果评估能够验证模式的实际应用价值,为后续优化和推广提供依据,湿度控制、通风效率和面粉品质等效果评估指标的改善能够直观反映综合管理模式的优越性。储藏环境湿度过高会导致霉菌和细菌的快速繁殖从而影响面粉品质,湿度动态监测与数据调整机制可以让储藏环境湿度能够被精确控制在安全范围内^[4]。

华南储藏中心长期负责大规模面粉的储藏与流通,梅雨季节和高湿环境下储藏仓库内的湿度水平常常超过85%,远高于面粉安全储藏湿度范围,且高湿度条件下该中心的霉菌菌落数频繁超过国家食品安全标准,面粉的色泽、气味和口感都发生明显劣化。统计数据显示,该中心每年因面粉品质劣化造成的经济损失占总储藏量的10%至15%,成为粮食管理中的一大难题。引入综合管理模式后华南储藏中心开始对湿度和通风技术进行系统性升级,在每个储藏仓库内安装了高精度湿度传感器和温度传感器,所有传感器的数据实时传输至中央控制系统,管理人员可以在平台随时查看湿度和温度变化,湿度接近14%上限时系统会自动启动通风设备或除湿机迅速排除湿气。同时该中心在每个仓库顶部设置了风机组,仓库两侧安装了辅助风道形成空气流通的闭环结构。配合高效的除湿设备,仓库内湿度被精确控制在12%~14%的范围内。监测数据显示引入综合管理模式后华南储藏中心仓库内的霉菌菌落数下降了近80%,从原来的超标频发逐渐趋于稳定并符合国家食品安全标准。储藏期间面粉的保质期延长了30%以上,之前储藏面粉常见的结块

现象也基本消失,样品检测中未再发现明显的酸味或霉味。动态监测与数据调整机制还降低了储藏管理的复杂性,管理人员无需频繁巡查仓库,中央控制系统提供了实时数据和操作建议。智能化设备的应用减少了人工操作失误的风险提高了管理效率和设备运行的精确性。管理者在远程端即可实现对所有储藏仓库的实时监控和调控极大地提升了管理的便捷性。

综合管理模式在储藏环境中的湿度控制和通风效率方面对面粉品质的提升和经济效益的改善起到了关键作用,综合管理模式在实际应用中表现出的便捷性和智能化水平进一步增强了其推广应用的价值,这种模式适用于面粉储藏的同时还为其他粮食及农产品的储藏管理提供了重要的参考和借鉴,为粮食储藏技术的发展方向提供了实践依据。

5 结论

现有储藏条件下通风换气及时排除湿气并引入干燥空气弥补了密封储藏在湿气扩散和湿度均衡上的不足,使得储藏环境的动态平衡得以实现,动态监测系统的实时数据采集与智能化分析进一步提高了调控的科学性和效率,为管理人员提供了全方位的决策支持。

湿度控制与通风技术的综合应用在实际储藏案例中降低了霉菌菌落数延长了面粉的保质期,提升了经济效益和管理效率表现出良好的适应性与普适性。

综上所述,面粉储藏过程中湿度控制与通风技术的综合管理方法在实际应用中有效改善了储藏环境的稳定性,并为面粉品质的长期保持提供了可靠保障,结合动态监测与数据调整机制的智能化管理模式实现了湿度、温度和气流等储藏参数的精准控制,减少了微生物滋生和品质劣化的风险。综合管理模式在保障面粉储藏安全性和品质稳定性方面取得了突出的效果,为现代粮食储藏技术的发展提供了创新性解决方案和理论支持。

参考文献

- [1] 尹国彬.一种利用空气比焓及绝对湿度选择粮食降水通风时机的方法[J].粮油食品科技,2024,32(06):196-202.
- [2] 杨庆生,彭迪云,张锐,等.一种智能化的温湿度智能控制系统[J].港口科技,2024(10):31-32+36.
- [3] 曹勇,郝建宇,姜兰芳,等.不同储藏温湿度对面粉中粗蛋白及湿面筋的影响[J].现代食品,2022,28(22):149-151.
- [4] 周建新,彭雪霁,高瑀琰,等.温、湿度对储藏小麦粉中霉菌区系的影响[J].中国粮油学报,2010,25(11):94-97.

Application of coal and rock analysis in coking plant

Huijuan Sun

Shanxi Geological Group Testing Technology Co., Ltd., Linfen, Shanxi, 030000, China

Abstract

This paper introduces the application of coal and rock analysis in coking plants. Coal and rock analysis can identify the quality of incoming coal through the distribution of vitrinite reflectance, effectively distinguishing between different types of coal and mixed coal conditions. This helps optimize coal blending schemes, improve the coal blending ratio, and stabilize coke quality. By combining the distribution of vitrinite reflectance and the activity-to-inactivity ratio from coal and rock analysis, it is possible to accurately predict the cold and hot properties of coke, stabilize coke quality, and guide coking coal blending. The research findings indicate that coal and rock analysis can identify the quality of incoming coal through the distribution of vitrinite reflectance, effectively distinguish between different types of coal and mixed coal conditions, thereby optimizing coal blending schemes, improving the coal blending ratio, stabilizing coke quality, and guiding coking coal blending.

Keywords

coal and rock analysis; vitrinite group reflectivity; active inert ratio; coke performance; coal blending for coking

煤岩分析在焦化厂的应用

孙慧娟

山西地质集团检测技术有限公司, 中国 · 山西 临汾 030000

摘 要

介绍了煤岩分析在焦化厂的应用, 煤岩分析可以通过镜质组反射率分布图对进厂煤质进行鉴定, 有效识别煤种和混煤情况, 从而优化配煤方案, 改善配煤比, 稳定焦炭质量。结合煤岩分析的镜质组反射率分布和活惰比, 可以较为精准地预测焦炭的冷热性能、稳定焦炭质量及指导炼焦配煤。研究结果表明, 煤岩分析可以通过镜质组反射率分布图对进厂煤质进行鉴定, 有效识别煤种和混煤情况, 从而优化配煤方案, 改善配煤比, 稳定焦炭质量, 并指导炼焦配煤。

关键词

煤岩分析; 镜质组反射率; 活惰比; 焦炭性能; 配煤炼焦

1 引言

焦化厂作为煤炭加工的重要环节, 其生产效率和产品质量直接关系到下游钢铁等行业的稳定发展。影响炼焦煤性质的主要因素包括变质程度、煤岩组成及第三成因因素, 故煤岩学对炼焦配煤技术的研究与应用至关重要。本文论述了经验配煤、煤岩配煤及人工智能配煤 3 种炼焦配煤技术发展历程和现状, 凝练了炼焦配煤技术的发展趋势。煤岩分析通过显微组分定量评估煤的工艺性能, 成为优化配煤、预测焦炭质量的关键技术。

2 煤岩分析的基本原理与方法

煤岩分析主要利用显微镜等工具对煤的显微组分、反射率等特性进行研究, 是通过研究煤的岩石学特征, 揭示煤的组成、结构及工艺性能的科学方法, 通过测定煤中镜质组

的反射率分布, 可以准确地评价煤质, 并指导焦化厂的生产实践。在焦化厂中用于优化配煤、预测焦炭质量等。以下从基本原理、核心方法及实际应用三个维度展开说明。

2.1 煤岩分析的基本原理煤的显微组分理论

煤是由不同显微组分(镜质组、惰质组、壳质组)组成的复杂混合物, 各组分的化学结构、反射率及热解行为差异显著:

镜质组: 主要成焦物质, 反射率(R_{max})反映煤化程度。

惰质组: 非活性组分, 高含量会降低焦炭强度。

壳质组: 富氢组分, 对焦炭反应性有双重影响(初期增强、后期降低)。

类比说明: 可将煤比作“混凝土”, 镜质组是“水泥”, 惰质组是“碎石”, 壳质组是“添加剂”, 三者比例决定“混凝土”(焦炭)的强度与稳定性。煤岩参数与工艺性能的关联 反射率分布: R_{max} 标准差越小, 煤质越均匀, 焦炭质量越稳定。

显微组分比例: 惰质组 >35% 时, 焦炭裂纹指数显著上升。各向异性指数: 反映煤的光学各向异性, 与焦炭光

【作者简介】孙慧娟(1987-), 女, 本科, 工程师, 从事工业分析与检验研究。

学组织（如纤维状、镶嵌状）直接相关。

2.2 煤岩分析的核心方法

煤岩显微组分定量分析

制样：将煤样制成光片（厚度约 $30\mu\text{m}$ ），经抛光、浸蚀后用于显微观察。技术瓶颈煤岩制样标准化不足（如抛光缺陷导致反射率测量偏差）

设备：偏光显微镜（如 Leica DM4500P）配合图像分析软件（如 CoalPetro）。

步骤：在 500 倍油浸物镜下随机选取 200~300 个测点。根据反射率、形态及颜色区分镜质组、惰质组、壳质组。计算各组分体积百分比（误差需 $<2\%$ ）。

3 煤岩分析在焦化厂的应用

3.1 煤质评价

煤岩分析能够准确地评价煤的变质程度和结焦性能，为焦化厂选择合适的煤种提供科学依据。通过煤岩分析，焦化厂可以了解煤中各种显微组分的含量和分布，从而判断煤的粘结性、热稳定性等关键指标，确保生产出的焦炭质量稳

定可靠。

3.2 混煤鉴别

在煤炭市场中，混煤现象普遍存在。混煤不仅会影响焦炭的质量，还会增加生产成本。煤岩分析通过测定煤中镜质组的反射率分布，可以准确地鉴别混煤及其比例。焦化厂可以利用这一技术手段，对进厂煤质进行严格把关，杜绝劣质煤进厂，确保生产过程的顺利进行。由于焦化厂的用煤量较大，利用煤岩分析可以辨别单混煤，确保采购的煤种为单种煤，避免堆放时的人为混合。单种煤的镜质组反射率分布图见图 1，混煤的镜质组反射率分布图见图 2。

从图 1 可知，单种煤的镜质组反射率分布图只有一个最高峰，没有凹口，且反射率的区间较窄，实验测得的反射率标准偏差为 0.084， < 0.1 ，故属于单一煤，煤种属于气煤或气肥煤；图 2 中镜质组反射率分布图有 2 个以上的凹口，且反射率标准偏差为 0.209， > 0.1 ，镜质组反射率区间较宽，是由长焰煤 / 不黏煤、气煤 / 气肥煤、肥煤、焦煤配合而成的混煤。

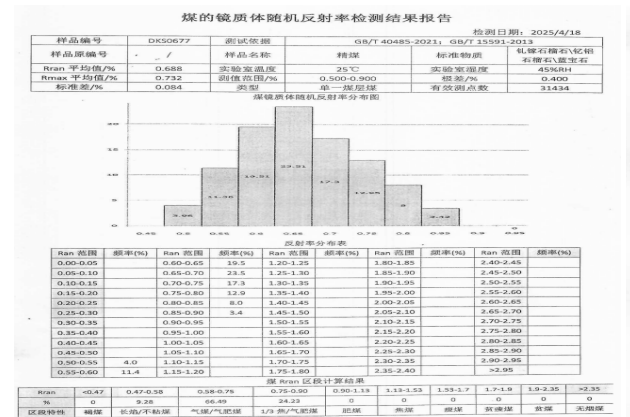


图 1 单种煤的镜质组反射率分布图（S2）

3.3 配煤指导

配煤是焦化厂生产过程中的关键环节之一。煤岩分析可以指导焦化厂制定合理的配煤方案，确保配合煤的质量稳定可靠。通过测定不同煤种的镜质组反射率分布，焦化厂可以了解各种煤种的结焦性能，并根据实际需求进行科学合理的配煤。这不仅可以提高焦炭的质量，还可以降低生产成本，提高经济效益。

配煤优化：不同变质程度的煤其镜质组反射率不同，通过测定镜质组反射率，可以了解单种煤的变质情况，进而科学地进行配煤。例如，在配煤中加入适量镜质组反射率适中的煤，可以改善焦炭的质量。如果镜质组反射率过高，说明煤的变质程度太深，可能导致焦炭的裂纹增多；反射率过低，则煤的粘结性可能不足。煤岩配煤理论（S1）

组分互补原则：通过高 / 低反射率煤搭配平衡膨胀压力动态配煤模型：结合煤岩参数与焦炉工况实时调整配比

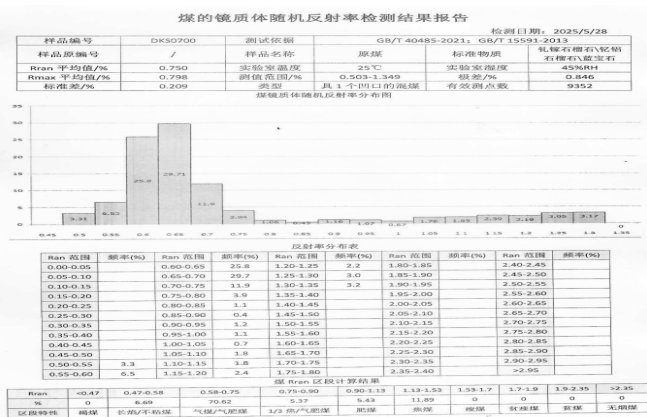


图 2 混煤的镜质组反射率分布图（S2）

3.4 焦炭质量预测

煤岩分析还可以用于预测焦炭的质量。通过测定配合煤的镜质组反射率分布，焦化厂可以预测焦炭的冷态强度、热态强度等关键指标。这有助于焦化厂及时调整生产参数，确保焦炭质量符合下游行业的需求。焦炭质量是由单种原煤质量及其配合比例决定，做好单种原煤的质量指标检测 and 不同单种煤的合理配用，是稳定和保证焦炭质量的基础。购买后的单种原煤堆以镜质组最大反射率为指标，同一煤堆镜质组最大反射率和反射率分布图尽可能重合或越接近越好。

4 煤岩分析核心指标与焦化工艺的关联性

4.1 显微组分定量分析

镜质组反射率（Rmax）：反映煤阶与结焦活性

案例：某厂通过 Rmax 标准差控制 $< 0.1\%$ ，焦炭反应后强度（CSR）提升 3%~5%

惰质组 / 活性组比例：影响焦炭孔隙率与机械强度

实验数据: 惰质组含量 >35% 时, 焦炭裂纹指数显著上升

4.2 焦化工艺概述

焦化工艺是将配合煤在焦炉内通过高温干馏(隔绝空气加热到 950~1050℃), 经过干燥、热解、熔融、粘结、固化、收缩等阶段, 最终产生焦炭和荒煤气的一种生产工艺。焦化工艺的核心在于通过合理的配煤和炼焦条件控制, 获得高质量的焦炭和丰富的炼焦化学产品。

焦炉操作指导

粘结性评估: 活性组分含量越高, 煤的粘结性通常越好。在焦化过程中, 良好的粘结性能够使煤粒之间更好地结合, 形成高强度的焦炭。例如, 气煤的活性组分含量相对较高, 粘结性较好, 在配煤中可以增加配合煤的粘结性。

适当调整活性组分的含量, 可以控制焦炭的气孔率和强度。如果活性组分含量过高, 焦炭的气孔率可能会降低, 但强度会增加; 反之, 气孔率可能会增加, 强度则会下降。

4.3 关联性解析

预测焦炭质量: 煤岩分析中的显微煤岩类型、煤岩显微组分等指标与焦炭的质量密切相关。例如, 镜质组含量高的煤种通常具有较好的粘结性和结焦性, 有利于生产出高质量的焦炭。通过煤岩分析, 可以预测不同煤种在焦化过程中的行为, 从而调整炼焦工艺参数, 确保焦炭质量满足生产需求。

提高焦化效率: 准确的煤岩分析有助于焦化企业选择合适的煤种和配煤比例, 提高焦化效率。例如, 通过增加高挥发分煤种的配入量, 可以增加焦炉煤气的产量; 通过优化配煤结构, 可以降低焦炭的灰分和硫分, 提高焦炭的纯度。

优化焦化工艺: 煤岩分析还可以为焦化工艺的改进提供重要依据。例如, 通过分析不同煤种在焦化过程中的行为差异, 可以调整炼焦温度、时间等工艺参数, 提高焦炭的产率和质量。延伸建议焦化企业应重视煤岩分析在焦化工艺中的应用, 建立完善的煤岩分析体系, 提高煤质鉴别的准确性和可靠性。在配煤过程中, 应充分考虑煤岩分析的结果, 结合常规煤质分析指标, 制定更为合理的配煤方案。焦化企业还应关注煤岩分析领域的最新研究动态和技术进展, 不断引进和应用新技术、新方法, 提高焦化工艺的水平 and 效率。

5 煤岩分析在焦化厂的具体应用方向原料煤质量预判

煤源筛选: 快速鉴别混煤、氧化煤(如镜质组荧光异常)

案例: 某厂通过煤岩分析发现某批次煤掺假 20% 非炼焦煤, 避免焦炭质量事故。

6 焦炭质量预测与工艺优化

焦炭强度预测模型: 基于镜质组反射率分布、各向异性指数建立回归方程(S3)。

配煤成本优化: 用煤岩参数替代部分粘结指数(G值)测试, 缩短配煤周期。

7 实例分析

以某焦化厂为例, 该厂通过引入煤岩分析技术, 对进厂煤质进行了严格把关。通过测定煤中镜质组的反射率分布, 该厂成功地鉴别出了多批混煤, 并采取了相应的措施进行处理。同时, 该厂还利用煤岩分析技术制定了合理的配煤方案, 确保了焦炭质量的稳定可靠。经过一段时间的实践, 该厂的生产效率和经济效益均得到了显著提高。

8 结论与展望

煤岩分析在焦化厂的应用具有广泛的前景和重要的价值。通过煤岩分析, 焦化厂可以准确地评价煤质、鉴别混煤、指导配煤并预测焦炭质量, 从而提高生产效率和产品质量。未来, 随着煤岩分析技术的不断发展和完善, 其在焦化厂的应用将更加广泛和深入。焦化厂应积极引进和应用这一技术手段, 为自身的可持续发展奠定坚实基础。煤岩分析通过微观尺度解析煤的结焦本质, 已成为焦化厂提质降本的核心工具。未来需突破自动化检测瓶颈, 深化数据驱动下的智能配煤与工艺调控体系。

参考文献

1. 吴玉良. 煤岩分析在配煤炼焦中的应用[J]. 煤质技术, 2013(S1): 49-51.
2. 周淑仪, 陈爱国. 煤的反射率谱图在焦化领域中的应用[J]. 燃料与化工, 1987, 18(S2): 6-9.
3. 李东, 李慧蓉, 母全伟. 用模糊集合度量方法评价炼焦所配之煤的可行性[J]. 山西科技, 2014, 29(S3): 57-59.

The influence of product CMF on motorcycle styling design

Yin Wang¹ Zimeng Jia² Zhixin Li²

1. Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute (Tianjin Motorcycle Technical Center) (Tianjin, 300072, China)

2. Tianjin Zhongke Technology Development Co., Ltd., Tianjin, 300072, China

Abstract

This article explores the significant role of CMF (Color, Material, and Process Surface Treatment) design in the motorcycle industry through numerous practical examples. By analyzing the application of CMF across various design stages, it is found that its impact on motorcycle styling design primarily manifests in three areas: enhancing the visual impact of motorcycles through color coordination, achieving both lightweight and functional breakthroughs with innovative materials, and endowing products with unique brand identities through process innovations. Consequently, this article highlights how CMF design serves as a core driving force for the continuous development of the motorcycle industry, offering new insights and directions for product innovation, brand building, and meeting the diverse needs of consumers.

Keywords

product CMF; product design; motorcycle color; motorcycle material

产品 CMF 对摩托车造型设计的影响

王引¹ 贾子萌² 李志鑫²

1. 天津内燃机研究所（天津摩托车技术中心），中国·天津 300072

2. 天津众科科技发展有限公司，中国·天津 300072

摘要

本文结合大量实际案例，探讨了CMF（颜色、材料、工艺表面处理）设计在摩托车行业中的重要作用。基于CMF在各设计环节应用的分析，发现其对摩托车造型设计的影响主要有三个方面，即通过色彩搭配提升摩托车外观的视觉冲击力，通过创新材料实现轻量化与功能性的双重突破，借助工艺革新赋予产品独特的品牌印记。从而，揭示了CMF设计如何成为推动摩托车行业持续发展的核心驱动力，为行业在产品创新、品牌塑造及满足消费者多元化需求等方面提供新思路与方向。

关键词

产品CMF；产品设计；摩托车颜色；摩托车材料

1 引言

CMF，即“Color-Material-Finishing”的缩写，在设计领域中，这三个要素彼此关联、相互依存，共同构成了产品外观与质感设计的关键考量维度。当下，交通工具市场竞争激烈且呈现多样化发展态势，摩托车行业作为其中独特分支，机遇与挑战并存。而CMF设计作为一项综合性设计策略，已然成为摩托车产品竞争力的关键因素，深刻影响着从产品概念构思至市场推广乃至长远发展的整个产业链条。

2 产品 CMF 中色彩（Color）对摩托车设计的影响

2.1 风格塑造

色彩是摩托车视觉呈现的核心要素，对风格塑造起着决定性作用。例如川崎摩托，其标志性的高饱和、高亮度绿

色系经精心调配，在Ninja等经典车型上广泛应用（见图1）。从色彩心理学而言，该绿色关联速度、活力等积极意象，契合川崎高性能与极致速度的品牌追求。在实际行驶场景中，无论是赛道疾驰还是公路巡航，绿色川崎摩托皆因鲜明色彩迅速聚焦视线，赋予车辆勇往直前的运动风格，成为品牌视觉标识。同样，越野摩托领域的KTM，其活力动感的橙色与越野情境适配（见图2）。橙色蕴含热情、冒险之意，令KTM摩托在越野赛道或山林探险中崭露头角，彰显野性冒险特质，塑造独特越野风格。

2.2 情感传达

色彩在摩托车设计里是关键的情感传递途径，不同颜色可唤起消费者特定的情感回应。哈雷戴维森摩托多采用深邃神秘的黑色为主调，这种黑色在视觉感受上意义丰富。从文化与心理视角来看，黑色代表力量、高贵与神秘，契合哈雷戴维森所承载的美式机车文化中自由、不羁的精神内涵。骑手骑上黑色哈雷时，神秘高贵之感油然而生，摩托车化作骑手个性与情感的外在表达，承载着他们对自由骑行的热忱

【作者简介】王引（1980-），女，中国山东德州人，硕士，工程师，从事摩托车造型设计及相关领域研究。

以及对美式文化的归属感。同样，杜卡迪的红色是热情与激情的象征，其红色调热烈且奔放，视觉冲击力强，能激起骑手的热血豪情与蓬勃活力（见图3）。骑手驾驶红色杜卡迪时，车辆动力性能与红色视觉冲击相互交织，引发强烈情感共振，彰显出杜卡迪对摩托运动的热爱以及对高性能的不懈追求。



图 1-1 2023 Ninja 500



图 1-2 2024 Ninja ZX-10R

图 2-1 2004 KTM 950
adventure

图 2-2 2025 KTM SX



图 3-1 Ducati 999R

图 3-2 Ducati Desmosedici
GP24

2.3 个性化定制

在现代摩托车消费市场，消费者个性化需求愈发突显，色彩成为满足该需求的关键要素。高端摩托车品牌应对消费者个性化色彩需求时提出多元化策略。如宝马摩托车部分高端品类，拥有专属的色彩选择库，包含常见色、金属色、珍珠色及特殊效果色等。BMW R18的消费者能在宝马定制中心根据个人偏好定制车身、轮毂、车架等部位色彩（图4）。摩托车改装市场同样为个性化色彩定制开辟诸多渠道。凭借先进喷漆工艺，可实现渐变、迷彩、涂鸦等繁杂多样的个性化色彩呈现。例如本田 CBR 摩托车经车主改装，把原本单调的红色车身变为从车头火焰红渐变为车尾橙红色，再配上金色轮毂与黑色车架，塑造出独树一帜的个性化坐骑，有力彰显了色彩对于摩托车个性化设计的关键作用。



图 4-1 BMW R18



图 4-2 BMW R18 定制油箱

3 产品 CMF 中材料（Material）对摩托车设计的影响

3.1 拓展设计空间

在现代高性能摩托车的设计领域，材料的选用已然成为主宰性能与品质走向的关键所在。以碳纤维材料为例，其性能优势显著，强度远超钢材，密度却仅约为钢的四分之一。杜卡迪 Panigale V4 R 运用碳纤维材质制作车身覆盖件后，为设计师在造型设计上开拓了更广阔的空间。就侧板而言，碳纤维可被打造成独特曲面，既契合车身空气动力学需求，又极具科技与运动感的视觉呈现。车尾的碳纤维扰流板，以轻薄且坚固的特质，凭借其独特造型在高速时有效引导气流，提升车辆下压力，外观上精致而富有张力，为车尾注入强烈战斗气息。

再者，碳纤维油箱护罩能设计出精致纹理与独特弧度，在守护油箱之际成为车身造型亮点，赋予杜卡迪摩托车更丰富的层次与独特风格，尽显高端赛车的非凡气质与个性魅力。在电动摩托车领域，铝合金材料的广泛应用同样体现了材料对设计自由度的提升作用。以 Zero Motorcycles 的部分车型为例，铝合金有着优良的可塑性，借助挤压、锻造、机械加工等工艺手段，能被塑造出形形色色复杂多样的形状和结构。Zero Motorcycles 的铝合金车架便能够运用独特的弯曲、扭转等设计巧思，雕琢出流畅灵动的线条与动感十足的轮廓，使整车外观更具现代感和科技感，满足不同消费者对于个性化和时尚造型的需求。

3.2 质感塑造

材料质感是摩托车品质感的重要体现，不同材料能塑造出全然不同的感官印象。在摩托车设计中，金属材料地位举足轻重，铝合金的运用尤为普遍。例如凯旋摩托车的部分复古车型，其油箱、发动机外壳以及轮毂等部位大量采用了精磨处理的铝合金材料。从材料加工工艺视角评价，这些铝合金部件经特殊加工后，表面散发着细腻的金属光泽，且这种光泽会随光线变化在车身表面游走，造就独特视觉效应，尽显复古且精致的美感，与经典英式机车风格相辅相成。从触觉体验层面，皮革材质应用于摩托车座椅设计，赋予骑手舒适与奢华的双重体验。以哈雷戴维森高端巡航摩托车为例，其座椅多选用优质天然皮革打造，这类皮革历经悉心鞣制与加工，质地柔软且耐磨，表面平滑并富有弹性。骑手落座，能真切感知皮革与身体的贴合无间，支撑性良好且舒适感十足。此外，皮革座椅在外观设计上对细节精雕细琢，采用双缝线工艺、压花图案等，进一步提升了座椅的美观度与奢华感，以及整车的品质形象。

4 产品 CMF 中表面处理（Finishing）对摩托车设计的影响

4.1 保护与美观

表面处理工艺对摩托车的防护与耐用性意义非凡，是

摩托车在复杂环境中持久维持优良性能的重要依托。电镀工艺在摩托车金属部件的处理上较为常见,就镀铬工艺而言,在排气管、把手、后视镜等金属部件上应用广泛(见图5)。从化学与物理防护层面来讲,镀铬层具备出色的防腐蚀能力,可有力阻挡潮湿、高温等恶劣环境对金属部件的侵害,避免生锈情况出现。同时,镀铬层能让部件光泽度得以提升,令摩托车外观更为光鲜亮丽,增强了整体的美观程度。



图 5-1 镀铬发动机护罩



图 5-2 镀铬前大灯

4.2 视觉效果增强

表面处理工艺能赋予摩托车丰富多样的视觉呈现,极大地提升其魅力。拉丝工艺颇为常见且成效显著,在金属表面实施拉丝操作,造就出细腻匀整的纹理。以雅马哈 XSR 系列这类现代简约风的摩托车为例,其油箱或侧板运用拉丝工艺后,依据光学原理,光线投射于拉丝区域,会催生出别具一格的光影变幻,令摩托车在各个视角都能展现出差异化

的视觉特征,有效提升了车辆的层次感与立体感,视觉吸引力大增。磨砂处理同样是备受青睐且应用广泛的表面处理手段,其可营造出低调奢华的质感。像高端摩托车的刹车卡钳、发动机缸体等特定部件常采用磨砂处理。从材料表面微观构造而言,磨砂面的颗粒质感予人精致含蓄之感,与摩托车整体设计风格相互映衬。

5 结论

综上所述,在摩托车产品研发的造型设计环节,CMF 设计占据着举足轻重的地位。色彩择取、材料选用以及表面处理工艺的精研搭配,共同为摩托车新产品铸就独一无二的风格特质、情感价值与卓越的高性能表现。CMF 设计不仅有力地驱动了技术层面的创新探索,还积极促进了文化的传承与发展演进,更在行业内引领着设计潮流的走向。展望未来,鉴于消费者对于摩托车的品质水准、个性化特色以及文化底蕴内涵的诉求不断攀升,CMF 设计势必会持续作为摩托车行业竞争的核心关键要素而存在。摩托车生产制造商有必要进一步深入探究并切实应用 CMF 设计理念,将其与产品的性能表现、品牌的文化内涵等关键方面进行深度融合,以此打造出更具市场竞争力的摩托车产品系列,推动整个摩托车行业沿着多元化、创新化的发展轨迹并稳健前行,最终达成行业可持续发展的长远目标。

参考文献

- [1] 傅炯,谢欢.汽车CMF设计方法[J].装饰,2020(01):24-27.
- [2] 闻建强.工业设计中感性设计的影响因素及控制[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2016,25(2):172-173.
- [3] 杨志锋.浅析汽车CMF设计[J].汽车实用技术,2019(16):88-89+100.
- [4] 唐纳德·A·诺曼著,何笑梅,欧秋杏译.设计心理学3:情感设计[M].北京:中信出版社,2012.
- [5] 李月恩,王震亚,李大可.感性工程学理论研究及产品开发应用[J].武汉理工大学学报,2010,32(6):168-172.

Optimization strategy for air valve sealing structure in the harsh environment of nuclear power plants

Ming Qin Qingqing Lu Duqiang Li

Zhejiang Shangfeng High-Tech Specialized Wind Industrial Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang, 312300, China

Abstract

Aiming at the sealing structure of the air valve in the harsh environment of nuclear power plants, in order to improve the sealing performance and durability and ensure the safe and stable operation of nuclear power plants. This paper conducts a theoretical analysis of the existing sealing structure of air valves and identifies the key factors affecting the sealing performance. Based on the results of theoretical analysis, experimental samples with different sealing structures were designed and fabricated. Through comparative analysis of experiments and numerical simulations, the optimal sealing structure scheme is determined. The optimized sealing structure of the air valve has been significantly improved in terms of sealing performance, durability and corrosion resistance. The experimental results show that the optimized sealing structure has better sealing performance than the traditional structure in harsh environments such as high temperature, high pressure and high humidity, and the sealing life is prolonged.

Keywords

Nuclear power plant; harsh environment Air valve sealing structure; Optimization strategy

面向核电站严苛环境的风阀密封结构优化策略

秦明 卢青青 李芷强

浙江上风高科专风实业股份有限公司, 中国 · 浙江 绍兴 312300

摘 要

针对核电站严苛环境下的风阀密封结构, 为提高密封性能和耐久性, 确保核电站安全稳定运行。本文对现有风阀密封结构进行理论分析, 找出影响密封性能的关键因素。基于理论分析结果, 设计并制作不同密封结构的实验样品。通过实验和数值模拟对比分析, 确定最佳密封结构方案。优化后的风阀密封结构在密封性能、耐久性和抗腐蚀性能方面均得到了显著提升。实验结果表明, 优化后的密封结构在高温、高压、高湿等严苛环境下, 密封性能优于传统结构, 且密封寿命延长。

关键词

核电站严苛环境; 风阀密封结构; 优化策略

1 引言

风阀密封结构是风阀性能的关键因素之一, 其密封性能直接影响着风阀的使用寿命和核电站的运行稳定性。在传统风阀密封结构中, 存在密封性能不稳定、耐腐蚀性差、使用寿命短等问题。为了提高风阀密封结构的性能, 本研究针对核电站严苛环境, 从材料选择、结构设计、密封原理等方面进行优化, 以期提高风阀密封结构的密封性能和耐久性。

2 核电站严苛环境对风阀密封结构的要求

2.1 核电站环境特点

核电站运行过程中, 设备会产生大量热量, 导致环境温度升高。高温环境会加速密封材料的老化, 降低密封性能。核电站内部压力较高, 尤其在反应堆附近, 压力变化较大。

风阀密封结构需承受高压, 确保系统稳定运行。核电站存在辐射环境, 辐射会对密封材料产生破坏, 降低其性能。

2.2 密封性能要求

风阀在核电站中的密封性能至关重要, 风阀密封结构需具备良好的密封性能, 防止气体泄漏, 确保核电站内部环境安全。风阀密封结构需适应系统压力变化, 保证系统压力稳定, 避免因压力波动导致的设备损坏。密封材料需具备良好的耐久性, 能够承受核电站环境中的高温、高压和辐射等因素。

2.3 可靠性要求

风阀密封结构在核电站长期运行中风阀密封结构需具备长期运行的可靠性, 确保核电站安全稳定运行。密封结构需具备良好的耐久性, 能够承受核电站环境中的各种因素, 延长使用寿命。风阀密封结构应便于维护, 降低维护成本, 提高核电站运行效率。

【作者简介】秦明 (1997-), 男, 中国安徽亳州人, 本科, 助理工程师, 从事机电制造 (通风设备) 研究。

3 风阀密封结构优化策略

3.1 材料选择

核电站运行过程中,设备内部温度较高,因此密封材料需具备良好的耐高温性能。聚四氟乙烯(PTFE)具有优异的耐高温性能,可在 -200°C 至 260°C 的温度范围内长期使用。耐高温硅胶具有良好的耐高温性能,可在 -60°C 至 200°C 的温度范围内使用。核电站运行过程中,辐射环境较为复杂,密封材料需具备一定的耐辐射性能。氟橡胶(FPM)具有良好的耐辐射性能,适用于核电站等辐射环境。聚酰亚胺(PI)具有优异的耐辐射性能,适用于核电站等辐射环境。核电站运行过程中,设备内部介质可能具有腐蚀性,密封材料需具备良好的耐腐蚀性能。氟橡胶(FPM)具有良好的耐腐蚀性能,适用于各种腐蚀性介质。聚四氟乙烯(PTFE)具有优异的耐腐蚀性能,适用于各种腐蚀性介质。将上述耐高温、耐辐射、耐腐蚀材料进行复合,以提高密封结构的整体性能。根据核电站设备的具体工况,设计合理的密封结构,如采用迷宫式、O型圈等结构,以提高密封效果。提高密封面的加工精度,确保密封面之间的贴合度,降低泄漏风险。对风阀密封结构进行定期检查与维护,确保其长期稳定运行。

3.2 结构设计优化

采用非对称密封面设计,根据风阀使用环境和介质特性,调整密封面的形状和角度,提高密封效果。引入微凹或微凸设计,使密封面与密封件形成紧密贴合,降低泄漏率。采用多边形密封面设计,提高密封面的接触面积,增强密封性能。在原有密封结构的基础上,增加一层或多层密封材料,提高密封效果。采用复合密封结构,将不同性能的密封材料组合在一起,发挥各自优势,提高密封性能。在密封面上增加密封条,形成多层密封,降低泄漏率。采用模块化设计,简化安装过程,提高安装效率。改进密封件固定方式,确保密封件在安装过程中不会松动,提高密封性能。优化密封面加工工艺,提高密封面的精度,降低泄漏率。采用整体式密封结构,减少连接部件,降低泄漏风险。引入弹性密封结构,使密封件在受压时产生弹性变形,提高密封性能。优化密封件与风阀本体之间的配合关系,确保密封件在运行过程中不会产生相对位移,提高密封效果。

对开式隔离阀是核电站中一种重要的安全设备,主要用于隔离核反应堆与辅助系统之间的管道,以防止放射性物质泄漏。在核电站运行过程中,对开式隔离阀需要承受高温、高压、腐蚀等严苛环境。安全级对开式隔离阀主要用于核电站的安全系统中,如反应堆冷却剂系统、安全注入系统等。其主要功能是在核电站发生事故时,迅速切断事故区域的管道,防止放射性物质泄漏。安全级对开式隔离阀需满足以下要求:(1)具有高可靠性,确保在紧急情况下能够可靠地切断管道;(2)具备良好的密封性能,防止放射性物质泄漏;(3)适应高温、高压、腐蚀等严苛环境。

非安全级对开式隔离阀主要用于核电站的非安全系统中,如冷却水系统、辅助系统等。其主要功能是在正常工况下,隔离管道,防止不同系统之间的交叉污染。非安全级对开式隔离阀需满足以下要求:(1)具备一定的密封性能,防止介质泄漏;(2)适应高温、高压、腐蚀等严苛环境;(3)结构简单,便于维护。

针对核电站严苛环境,安全级对开式隔离阀选用耐高温、高压、腐蚀的合金材料,如奥氏体不锈钢、钛合金等;非安全级对开式隔离阀选用耐腐蚀、强度较高的材料,如碳钢、不锈钢等。安全级对开式隔离阀采用双密封结构,即外密封和内密封。外密封采用金属密封圈,具有良好的耐高温、高压性能;内密封采用耐腐蚀的密封材料,如石墨、聚四氟乙烯等。此外,可增加密封预紧力,提高密封性能。非安全级对开式隔离阀采用单密封结构,选用耐腐蚀、强度较高的密封材料。密封面设计为斜面,便于安装和拆卸。阀体结构优化采用流线型设计,减小流体阻力,提高阀门效率;同时,减小阀体厚度,降低制造成本。阀盖结构优化采用整体式阀盖,提高结构强度和密封性能;在阀盖内部增加支撑结构,提高抗振性能。针对核电站严苛环境,采用电动或气动驱动机构,确保阀门在紧急情况下可靠动作。

3.3 密封件的改进

采用硅橡胶、氟橡胶等高性能橡胶材料,具有优异的耐高温、耐低温、耐油、耐老化等性能,适用于各种复杂工况。采用复合材料,如碳纤维增强塑料、玻璃纤维增强塑料等,具有良好的机械性能和耐腐蚀性能,适用于密封件在恶劣环境下的使用。选用不锈钢、钛合金等金属材料,具有高强度、耐腐蚀、耐磨损等特点,适用于高温、高压等特殊工况。采用精密成型工艺,如注塑、挤出、吹塑等,确保密封件尺寸精度和形状稳定性,提高密封性能。对密封件表面进行特殊处理,如镀层、涂层、氧化等,提高密封件的耐磨性、耐腐蚀性和抗氧化性。采用高精度加工设备,如数控机床、激光切割机等,确保密封件加工精度,提高密封性能。引入智能化检测技术,如三维扫描、激光测量等,对密封件进行精确检测,确保密封性能满足设计要求。在保证密封性能的前提下,优化密封件的结构设计,降低成本,提高密封件的可靠性。

该隔离阀由阀体、叶片、转轴、密封垫圈、气控设备、连杆结构、延长杆以及可选的限位开关等关键部件构成。如图2所示,该款阀门支持远程操控。本系列隔离阀的开关操作均采用人工控制,具体操作方法包括手柄操控,手柄直接与阀门的主轴连接,并配备锁定装置,便于在任意位置固定阀门调节状态;采用带延长操作杆的远程操控方法,适用于无法在附近直接操作阀门的情况。此设计将阀门的主轴与一根摇杆连接,通过摇杆推动与固定支架铰接的延长杆,从而实现摇杆的转动,进而控制阀门的开启与关闭。本系列阀门采用多叶片对开的设计,多叶片的协同动作通过平行四杆机

构实现同步，而叶片的对开则通过反向四杆机构完成。在叶片的两侧均设有橡胶密封条，从而保证阀门的内泄漏要求。叶片轴端增加了调心滚动轴承，确保阀门的灵活运行。针对轴套介质侧易进灰尘这一现象，在轴承内侧增加了防尘圈。流线型叶片使得阀门具有很小的流体阻力和噪音。

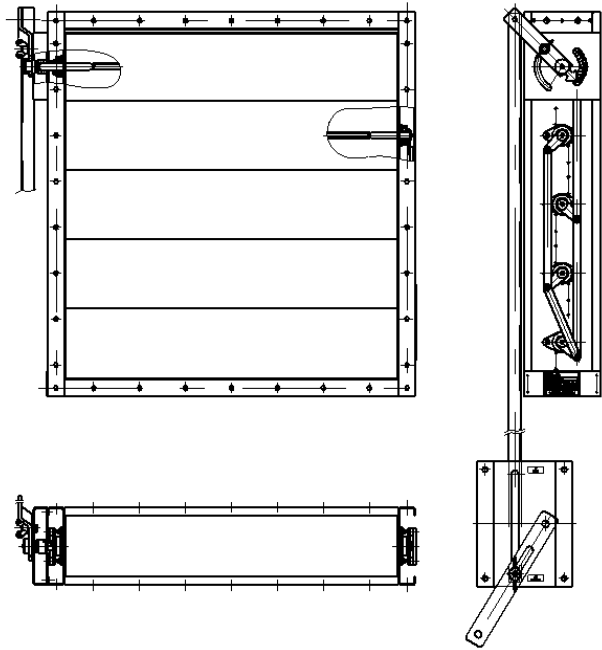


图 2 隔离阀结构

该系列阀门主要由阀体、叶片、轴、橡胶密封圈、气动装置、连杆机构、加长杆 (仅仅 3EVR106、107VAI、4EVR107VAI)、限位开关 (配带限位开关的产品) 等组成。如图所示，增加远距离操作装置的阀门。该系列隔离阀的启闭均由手动操作。手动操作方式有两种：一种为手柄操作方式，操作手柄直接和阀门的主动轴相连，并设有任意位置的锁定机构，确保阀门的调节功能；另一种为一配带加长杆的远距离操作，此种方式用于阀门不宜就近操作的场合，阀门的主动轴和一摇杆相连，推动和固定架铰接在一起的加长杆，使摇杆转动，带动阀门开或关。该系列阀门采用多叶对

开的结构形式，多叶片的同步运动是靠一平行四连杆机构来实现的，叶片的对开是靠一反向四杆机构来实现的。在叶片的两侧均设有橡胶密封条，从而保证阀门的内泄漏要求。叶片轴端增加了调心滚动轴承，确保阀门的灵活运行。针对轴套介质侧易进灰尘这一现象，在轴承内侧增加了防尘圈。流线型叶片使得阀门具有很小的流体阻力和噪音。通过优化设计，迷宫式密封结构有效提高了密封性能，降低了泄漏风险。耐高温、耐高压、耐辐射的密封材料，延长了密封圈的使用寿命，降低了维护工作量。耐磨处理降低了密封面磨损，提高了使用寿命。

4 结论

核电站所处的环境条件极其严苛，包括高温、高压、腐蚀性气体等，这对风阀密封结构提出了极高的要求。风阀作为核电站通风系统的重要组成部分，其密封性能直接影响到核电站的运行效率和安全性。应选用具有优异耐腐蚀性、耐高温性和密封性能的材料，如不锈钢、合金等，以提高风阀密封结构的整体性能。采用多级密封结构，提高密封效果；采用可调节密封垫，适应不同工况下的密封需求；优化风阀的安装方式，提高密封结构的稳定性。采用先进的制造工艺，如精密加工、热处理等，提高风阀密封结构的精度和可靠性。本研究为风阀密封结构优化提供了理论依据和实践指导，具有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 高腾飞,郭凯,李心刚,等.某核电站凝汽器密封结构用镍铝青铜螺栓断裂原因[J].理化检验-物理分册,2023,59(11):32-34+37.
- [2] 侯兴鑫,李帅,佟宇轩,等.IGCC燃气轮机二次风阀控制优化[J].机械工程师,2023,(01):132-135.
- [3] 张立德,李建维,谭璞.FlowMaster在核电站复杂通风系统风量调节的应用研究[J].暖通空调,2022,52(S2):297-301.
- [4] 汪正洪,王飞.浅析三代核电风阀设备鉴定[J].暖通空调,2020,50(S2):122-124.
- [5] 张庆涛.核级安全壳隔离阀抗震设计与研究[D].河北科技大学,2020.

Application of coating and plating conductive layer in electrical equipment

Xin Bin Zhengqi Peng

China Machinery General Institute Wuhan Material Protection Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

In the electrical field, electrical equipment is a core component essential for ensuring the normal operation of power grids. Therefore, it must be safe, stable, continuous, and reliable during operation. Electrical equipment consists of numerous electrical components. To enhance conductivity and efficiency at the contact points of these components, a conductive layer of silver, tin, or nickel is typically applied, especially in high-voltage and ultra-high-voltage environments. The conductive coating is a critical factor affecting the proper functioning of electrical equipment. This article focuses on this aspect, detailing the quality control standards for conductive coatings in electrical components, the preparation process, and methods to address issues encountered during the preparation process. It aims to provide theoretical support for the optimal performance of electrical components in electrical equipment.

Keywords

electrical components; coating quality control; coating preparation process

刷镀导电层在电气设备中的应用

宾昕 彭正祺

中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司, 中国·湖北 武汉 430030

摘 要

在涉电领域, 电气设备是保障电网正常运行的核心硬件之一, 因而要求其运行时安全、稳定、持续、可靠。电气设备由众多电器元件集合而成, 在这些电器元件的接触部位, 为了提高导电性及通电效率, 通常需要制备一层银、锡或镍导电层, 尤其是在高压超高压环境更是如此, 导电镀层是影响电气设备正常运行的关键因素。本篇文章也将目光集中于此, 着重介绍了电气设备电器元件中导电镀层的质量控制评价标准、镀层制备工艺及镀层制备过程中的问题解决方法, 希望本文可以为电气设备中电器元件的良好运行提供写作理论支撑。

关键词

电器元件; 镀层质量控制; 镀层制备工艺

1 引言

电器元件暴露的铜接触部位表面在大气环境下极易产生氧化, 形成氧化膜, 使得接触电阻迅速增大, 影响导电; 另外, 最关键的一点是当过载电流较大时, 元件工作的铜接触部位发热升温暴增, 甚至产生“烧结”现象, 严重影响电气设备的安全运行。正因如此, 通过刷镀质量控制在电器元件搭接部位制备导电镀层是安全保障不可或缺的重要一环。

2 镀层质量控制

电器元件接触部位制备导电镀层通过下面参照标准控制镀层质量:

(1) 《金属覆盖层 工程用银和铝合金电镀层》GB/T 12306。(2) 《金属覆盖层 锡电镀层》GB/T 12599。(3) 《金

属覆盖层 工程用镍电镀层》GB/T 12332。(4) 《金属基体上的金属覆盖层(电沉积层和化学沉积层)附着强度试验方法》GB/T 5270。(5) 《刷镀通用技术规范》JB/T7507-1994。(6) 《再制造 电刷镀技术规范》GB/T37674-2019。

3 镀层制备工艺

镀层制备应根据镀层质量控制通过人工操作实现刷镀电源→刷镀溶液→刷镀辅件形成闭环系统, 具体如下:

3.1 刷镀电源

电源应具有直流平衡特性, 电源的输出电压能实现无级调节, 调节精度高, 通常调压范围为 0~12V; 电源的输出电流应根据被镀零件表面的大小, 镀层的种类及沉积速度等因素选取, 即根据需求选择不同功率的电流; 电源应带有安培计时器或镀层厚度计, 以显示刷镀零件所消耗的电量或显示零件镀层厚度, 保证镀层质量; 电源通常应设有正、负极转换装置, 以满足刷镀工艺要求; 电源应设有过载保护装置, 当出现紧急情况时, 能保护电源和被镀零件不受损坏; 为了适应现场在线修复或室外作业要求, 电源操作应简单、保养方便 [1]。

【作者简介】宾昕(1989-), 男, 中国湖北武汉人, 硕士, 工程师, 从事电刷镀研究。

3.2 刷镀溶液

对刷镀溶液的基本要求：溶液所含金属离子浓度尽可能高；溶液性能对工艺温度变化不敏感；溶液性能对电流密度计变化不敏感；溶液对吸湿材料应有较好的稳定性。

刷镀溶液主要包括刷镀银溶液、刷镀锡溶液、刷镀镍溶液，其适用范围既可刷镀，又可用槽镀。对刷镀溶液的具体要求包括：对环境污染小，具有化学成分稳定，沉积率高，操作简单，工艺重现性好，溶液耗量少，尤其应解决好溶液长期存放变质（如新制备的光亮刷镀锡溶液使用时，镀层美观光亮，一旦密封放置约半年后，溶液产生沉淀、浑浊，说明镀液失效，再刷镀使用时，镀层质量难以保障，从而造成

不必要的损失浪费。现在这个问题已得到圆满解决，采用 A、B 双组分刷镀锡溶液，就可将其使用周期提高至少 1 年）和运输问题。而刷镀银，刷镀镍溶液均可长期存放。应根据环境温度变化（尤其在冬季）镀前对溶液加热至 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 方可使用。

3.3 刷镀辅件

刷镀辅件主要包括阳极（如不锈钢，石墨等）、包套布、循环泵、加热器、烘箱、容器、劳保等 [2]。

3.4 刷镀工艺流程

电器元件接触部分绝大多数为紫铜母材，常以 T1、T2 为主，现对刷镀银、刷镀锡、刷镀镍的实施工艺简述如表 1 所示。

表 1 不同刷镀工艺流程简介

镀层种类 工艺细节	刷镀银	光亮刷镀锡（酸性）	中性刷镀锡	刷镀镍
基材	铜基材，表面粗糙度 Ra0.8 μm			
除油	用有机溶剂（如丙酮）或其他清洁剂去除待镀表面的油污，也可采用电解除油；			
活化	用铜基专用活化液，无电擦拭待镀表面，时间 10~15 秒。 在有些特定情况下，由于电器元件（如高压瓷瓶）自身结构原因，在活化环节，导致活化残留液难以清除，当镀银完毕后，往往导致镀层发黑，因而在实际刷镀工艺中通常不必活化而直接镀银即可（前提是铜基材需经过抛光，清理原有氧化膜，为防止再次氧化尽快镀银），其厚度控制在 3~5 μm [3]。			用铜基专用活化液，无电擦拭待镀表面，时间 10~15 秒
刷镀	正向 3~3.5V，用镀笔阳极通过蘸取银液或循环泵，来回擦拭待镀表面，直至所需厚度为止，通常技术要求 $\geq 8\sim 10\mu\text{m}$ ，颜色均匀光亮或哑光。	正向 4~8V，用镀笔阳极蘸取锡液或循环泵，来回擦拭待镀表面，直至所需厚度为止，一般 8~10 μm ，颜色均匀光亮；	正向 4~8V，用镀笔阳极蘸取锡液或循环泵，来回擦拭待镀表面，直至所需厚度为止，一般 5~6 μm ，颜色均匀哑光；	正向 6~8V，用镀笔阳极通过蘸取镍液或循环泵，来回擦拭待镀表面，直至所需厚度为止，一般 8~10 μm ，颜色均匀光亮。
干燥	一旦刷镀完毕后，立刻用纯净水冲洗并用一次性卫生纸擦干或烘干，去掉水分，避免残留液留在镀层表面形成污渍，影响外观。	刷镀完毕，立刻用纯净水冲洗干净并用一次性卫生纸擦干或烘干，不允许残留液存在，防止污染，影响外观。若发现镀层表面局部有发黑发青现象，可用干净超细百洁布抛光擦拭即可，保持外观一致；或补镀一次，用净水冲洗并擦干即可。	刷镀完毕，立刻用纯净水冲洗干净并用一次性卫生纸擦干或晾干（吹干）；	
防变色处理	镀银层表面暴露于空气（氧化物）和硫化物环境下，经过一段时间放置后，容易产生变色和腐蚀，因而有必要涂覆一层有机防护层（如银层防变色保护剂），价格便宜，方便储存。	为了便于储存，有必要对镀锡部位进行防变色处理（涂覆专用防变色剂）。		
备注			中性刷镀锡往往用于较大规模尺寸的铜排整体导电防腐。由于其效率仅为光亮刷镀锡的 1/10，沉积速度较慢，但其优势在于不会像光亮刷镀锡，容易产生“二次污染”导致颜色不均 [4]。	

4 镀层制备过程中的问题和解决方法

一项工艺的掌握需要有个过程，不可能一蹴而就，特别像刷镀这样实践性极强的应用技术，更需要经验的积累，

不断试错总结，才能逐步掌握其核心真谛 [5]。

下面就镀层制备过程中常见的问题及解决方法总结（见表 2）。

表 2 刷镀常见问题及解决方法

序号	问题	解决方法
(1)	电器原件接触部位（搭接部位）镀层无法制备（镀不上）？	检查电源通电→调整电压→检查电缆正负极→更换部件
(2)	电器元件接触部位（搭接部位）制备的镀层外观如何防变色？	根据合同或订单技术要求，严格执行制备镀层工艺，包括实施步骤、参数、阳极、镀层性能（外观、厚度、结合力等）、纠错措施、工装、镀层防变色保护等。
(3)	刷镀溶液补充或更换条件？	对量化电气元件而言，为了提高生产效率，保证镀层质量，应适时对镀液进行必要的补充和更换。
(4)	不合格镀层如何处理？	镀层质量如果不合格（如有气泡、脱落等），则需要将镀层去掉，重新按照工艺规范制备镀层。

5 应用实例

实例 1：电力设备真空灭弧室局部接触面镀银。接触面镀银后（镀层厚度约 10um），镀银层相对于非镀银层，接触电阻低了约 85%；经过 100H 的氧化处理后，镀银层相对于非镀银层，接触电阻低约 93.9%；经过 100 次电弧处理后，镀银层相对于非镀银层，接触电阻低约 95.5%。此外，在摩擦试验中，镀银层相对于非镀银层，耐磨性提高了约 80%。

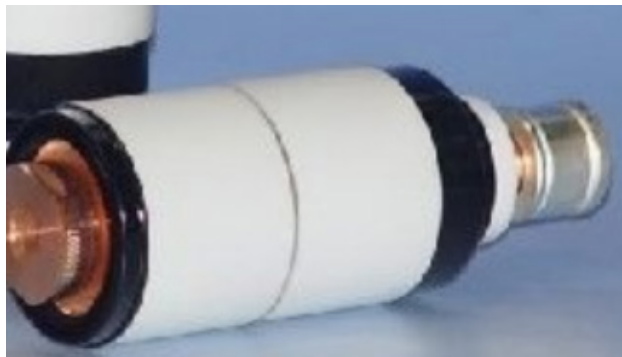


图 1 电力设备真空灭弧室镀银

实例 2：镀银合金成套技术在医疗领域的应用，如 CT 电气设备中的环槽镀银合金。采用的是银铋合金电刷镀工艺制备导电耐磨双功能镀层。接触面镀银铋合金后（镀层厚度约 8um），银铋合金镀层相对于非镀层，接触电阻低了约 78.6%；经过 100H 的氧化处理后，银铋合金镀层相对于非镀层，接触电阻低约 90%；在滑动摩擦试验中，银铋合金镀层相对于非镀层，耐磨性提高了约 82.7%。

实例 3：镀银成套技术在太阳能领域的应用，如还原炉电气设备电极镀高纯度银层。接触面镀银后（镀层厚度约 100um），镀银层相对于非镀银层，接触电阻低了约 98.2%；经过 100H 的高温氧化处理后，镀银层相对于非镀银层，接触电阻低约 99.3%；此外，电刷镀后的电极元件，使用寿命提高了约 900%[6]。



图 2 CT 电气设备中的环槽镀银铋合金前后对比



图 3 还原炉电气设备电极镀银

实例 4：镀锡成套技术在电力、电工、电气等领域的应用，如导电铜排上局部需要导电部位的镀锡。

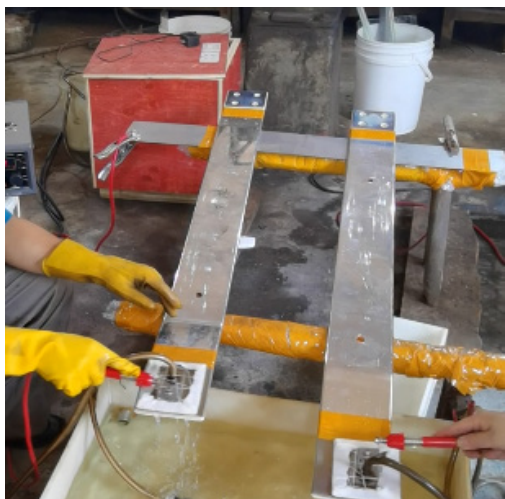


图 4 导电铜排局部镀锡

实例 5：镀镍成套技术在汽车领域的应用，如法国昂利公司生产自动线上的电气设备铝臂局部镀镍。



图 5 电气设备铝臂局部镀镍

6 结语

在电力、电工、电气行业，设备电器元件需要局部刷镀银、刷镀锡、刷镀镍的产品门类齐全，种类繁多，量大面广，相信随着时间的推移，技术的发展，将来会有越来越多的产品得到刷镀技术的服务，有理由相信刷镀技术应用前景广阔！

参考文献

- [1] 宾胜武《刷镀技术》化学出版社 2003.
- [2] 刘先曙《电接能材料的研究和应用》国防出版社 1979.
- [4] 张允诚，胡如南，向荣《电镀手册》国防工业出版社 2007.
- [5] 费敬银《定量测评电刷镀层的结合力》2024.
- [6] 刘天立《电镀镍溶液的维护与故障处理措施》化工管理出版社 2019.

A brief analysis of the comparison of circulation water concentration ratio test methods

Zhigang Liu

Yunnan Diandong Yuwang Energy Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

The concentration ratio of the open-cycle cooling system in coal-fired power generation units is a critical indicator for controlling the quality of circulating water. It plays a vital role in preventing condenser scaling and conserving water. The concentration ratio data is primarily obtained by the laboratory testing the Cl-concentration or hardness of the circulating water and makeup water daily. However, operators cannot monitor this data in real time, which hinders timely adjustments and control based on unit load and water quality conditions. This can lead to fluctuations in the concentration ratio, which is detrimental to preventing condenser scaling and conserving water. Therefore, there is a need for an indicator that can be monitored in real time to calculate and control the concentration ratio. This article suggests using the hardness and conductivity of the circulating water and makeup water to calculate the concentration ratio, as these two indicators show consistent trends.

Keywords

circulating water; concentration ratio; hardness; conductivity

关于循环水浓缩倍率测试方法对比的浅析

刘志刚

云南滇东雨汪能源有限公司, 中国 · 云南 曲靖 655000

摘 要

燃煤火力发电机组开式循环冷却系统浓缩倍率是控制循环水水质的一项重要指标, 对防止凝汽器的结垢和节水起重要作用, 而浓缩倍率数据主要是靠化验班每天通过测试循环水和补充水的Cl⁻浓度或硬度来计算得到, 运行人员不能实时掌握浓缩倍率数据, 不利于跟随机组负荷、水质情况及时调整和控制, 会造成浓缩倍率忽高忽低, 对防止凝汽器的结垢和节水非常不利, 所以想寻找一种可以实时在线监测的指标来计算和控制浓缩倍率。通过本文分析可以得出采用循环水、补充水的硬度、电导率计算浓缩倍率, 两者趋势基本一致。

关键词

循环水; 浓缩倍率; 硬度; 电导率

1 火电厂冷却水系统介绍

在火力发电厂的生产过程中, 用水作为工作介质和冷却介质, 其中用水量最大的是汽轮机的凝汽器冷却用水。例如, 一台 300MW 的发电机组, 其设计冷却水量为 30000~35000t/h(平均 32000t/h), 如果补充水率按 2.5% 计算, 每天补充水量为 19200t。用水作冷却介质的系统称为冷却水系统, 它通常有两种: 一种是直流式冷却系统; 一种是循环式冷却水系统。直流式冷却系统是指冷却水直接从水源地抽出, 只通过换热设备(凝汽器)一次就排回天然水体, 不循环使用。循环式冷却水系统又分为密闭式循环冷却水系统和敞开式循环冷却系统。密闭式循环冷却水系统是指冷却水本身在一个完全密闭的系统中不断地循环运行, 冷却水不与空

气接触, 水的冷却是由另一个敞开式冷却水(或空气)系统的换热设备来完成的。敞开式循环冷却系统是指冷却水由循环水泵送入凝汽器内进行热交换, 升温后的冷却水经冷却塔降温, 再由循环水泵送入凝汽器循环利用, 此系统的主要优点是节水。某电厂装机 4×600MW 燃煤火力发电机组凝汽器冷却方式为敞开式循环冷却系统, 凝汽器管材质为 304 不锈钢。

2 循环冷却系统的运行参数介绍

循环冷却系统的运行参数主要包括: 蒸发损失; 吹散及泄漏损失; 排污损失; 补充水量; 水量平衡; 盐量平衡; 浓缩倍率等。

2.1 蒸发损失

蒸发损失是指因蒸发而损失的水量。蒸发损失量以每小时损失的水量表示(m^3/h)。蒸发损失率 P_z 用蒸发损失量占循环水量的百分数表示。此值一般为 1.0%~1.5% 左右。

【作者简介】刘志刚(1982-), 男, 中国湖南邵阳人, 本科, 工程师, 从事电厂化学、脱硫、环保研究。

2.2 吹散及泄漏损失

吹散及泄漏损失是指呈水滴由冷却塔吹散出去和系统泄漏而损失的水量,吹散及泄漏损失率 P_F 因冷却设备的不同而异,自然通风冷却塔(有捕水器)的 0.1%,自然通风冷却塔(无捕水器)的 0.3%~0.5%。

2.3 排污损失

排污损失是指从防止结垢和腐蚀的角度出发,控制系统的浓缩倍率而强制排污的水量。浓缩倍率是指循环冷却水中的含盐量(或某种离子的浓度)与补充水中含盐量(或某种离子的浓度)的比值,因为水质 Cl^- 不会与阳离子生成难溶性化合物,所以经常用下式表示:

$$\phi = \frac{\rho_{Cl,X}}{\rho_{Cl,B}} \quad (2-1)$$

式中 ϕ —冷却系统的浓缩倍率;

$\rho_{Cl,X}$ —循环水中 Cl^- 的质量浓度, mg/L;

$\rho_{Cl,B}$ —补充水中 Cl^- 的质量浓度, mg/L;

如果知道 P_Z 、 P_F 和 ϕ 值,就可求出排污损失率 P_P 。

2.4 补充水量

补充水量是指补入循环冷却系统中的水量。当冷却系统中的总水量保持一定时,补充水量相当于单位时间内,因蒸发、吹散、排污损失的总和。对于一定的冷却系统,蒸发、吹散损失是一定的,也就是说排污损失的大小决定了补充水量的多少。

2.5 水量平衡

开式循环冷却系统中,水的损失包括蒸发损失、吹散和泄漏损失、排污损失。要使冷却系统维持正常运行,对这些损失量必须进行补充,因此,水的平衡方程式如下:

$$P_B = P_Z + P_F + P_P \quad (2-2)$$

$$P_B = \frac{\text{补充水量}}{\text{循环水量}} \times 100\%$$

式中 P_B —补充水率, %;

P_Z —蒸发损失率, %;

P_F —吹散及泄漏损失率, %;

P_P —排污损失率, %。

2.6 盐量平衡

由于蒸发损失不带走水中盐分,而吹散、泄漏、排污损失带走水中盐分,假如补充水中的盐分在循环冷却系统中不析出,则循环冷却系统将建立如下的盐类平衡:

$$(P_Z + P_F + P_P)\rho_B = (P_F + P_P)\rho_X \quad (2-3)$$

式中 ρ_B —补充水中的盐含量, mg/L;

ρ_X —循环水中的盐含量, mg/L。

将上式移项得:

$$\phi = \frac{(P_Z + P_F + P_P)}{(P_F + P_P)} = \frac{\rho_X}{\rho_B} \quad (2-4)$$

式中 ϕ —开式循环冷却系统的浓缩倍率。

如果冷却水系统的运行条件一定,那么蒸发损失量和吹散损失量就是定值,通过调整排污量可以控制循环冷却系统的浓缩倍率。

$$P_P = \frac{P_Z + P_F - \phi P_F}{\phi - 1} \quad (2-5)$$

由公式计算出的补充水量、排污水量和浓缩倍率的关系,如图 2-1 所示。从图 2-1 中看出,提高冷却水的浓缩倍率,可大幅度减少排污量和补充水量。另外,由于淡水资源日益紧张、源水水质不断恶化和环境保护要求严格,提高火力发电厂敞开式循环冷却系统中循环水的浓缩倍率达到节水的目的势在必行。从图 2-1 中还可以看出,随着浓缩倍率的提高,补充水量明显降低,但当浓缩倍率超过 5 时,补充水量的减少已不显著。此外,过高的浓缩倍率,严重恶化了循环水质,容易发生各种故障,大大增加了处理费用。上述情况说明,需要选定合适的浓缩倍率。一般开式循环冷却系统的浓缩倍率应控制在 5 左右,多采用 4~6。某电厂水源取自天然河水,经澄清处理作为系统补水,循环水采用加浓硫酸+水质稳定剂处理方式,根据藻类生产情况冲击性加固体氯片进行杀菌灭藻。日常控制浓缩倍率 3.0~3.8。

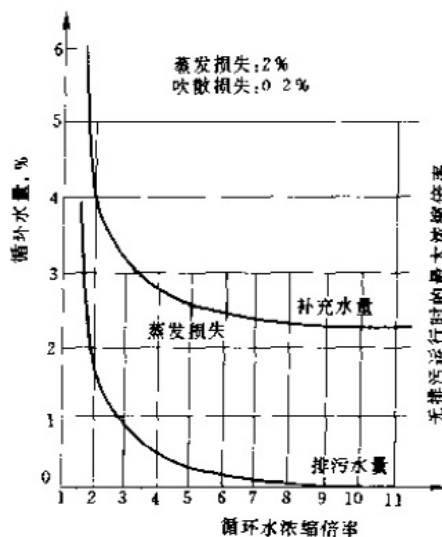


图 2-1 开式循环冷却系统中浓缩倍率与补充水量和排污量的关系

3 运行情况说明

在第 2 节中提到,浓缩倍率是指循环冷却水中的含盐量(或某种离子的浓度)与补充水中含盐量(或某种离子的浓度)的比值,因为水质 Cl^- 不会与阳离子生成难溶性化合物,所以经常用循环水 Cl^- 浓度与补充水 Cl^- 浓度的比值来计算浓缩倍率。但由于某电厂地处西南地区,常年温度适宜、阳光充足,微生物滋长严重,需经常向循环冷却系统中投加氯系杀菌剂,如以 Cl^- 浓度计算浓缩倍率,误差太大,造成水资源浪费,给系统的结垢带来风险,所以自 2006 年投产

以来一直采用循环水、补充水的硬度数据计算浓缩倍率，日常控制 3.0-3.8 之间。利用机组检修机会打开凝汽器水侧进行检查，未发现结垢现象，由此可见采用循环水、补充水硬度数据计算浓缩倍率来控制水质是可行的。

综上，燃煤火力发电机组开式循环冷却系统浓缩倍率是控制循环水水质的一项重要指标，对防止凝汽器的结垢和节水起重要作用，而浓缩倍率数据主要是靠化验班每天通过测试循环水和补充水的硬度来计算得到，运行人员不能实时掌握浓缩倍率数据，不利于跟随机组负荷、水质情况及时调整和控制，会造成浓缩倍率忽高忽低，对防止凝汽器的结垢和节水非常不利，所以想寻找一种可以实时在线监测的指标来计算和控制浓缩倍率。水的电导率是指水传导电流的能力，而水传导电流的能力与水中溶解盐类的多少息息相关，换言之，水的电导率的大小可以代表水中溶解盐类的多少，

若得到循环水和补充水的电导率数据，就可以计算得出开式循环冷却系统浓缩倍率。而电导率可以采用仪表实时测试，可得到在线数据，实时计算得出浓缩倍率，但这只是理论，需要实际数据来证明，因此本文主要是对这两种测试方法计算得出的浓缩倍率进行对比，看能否与理论一致。

4 循环水浓缩倍率测试方法对比

某电厂化验班每周进行一次循环水水质全分析，包含测试硬度、电导率等指标。补充水为天然河水，经过多年的测试发现，电导率基本在 $400 \mu\text{s}/\text{cm}$ 左右，硬度 $2.2\text{mmol}/\text{L}$ 左右。通过选取 2010-2021 年 1、2 号机组循环水水质全分析时的循环水硬度、电导率数据，计算得出硬度浓缩倍率和电导率浓缩倍率，将循环水硬度、电导率浓缩倍率做成折线图进行对照，如图 3-1、3-2 所示。

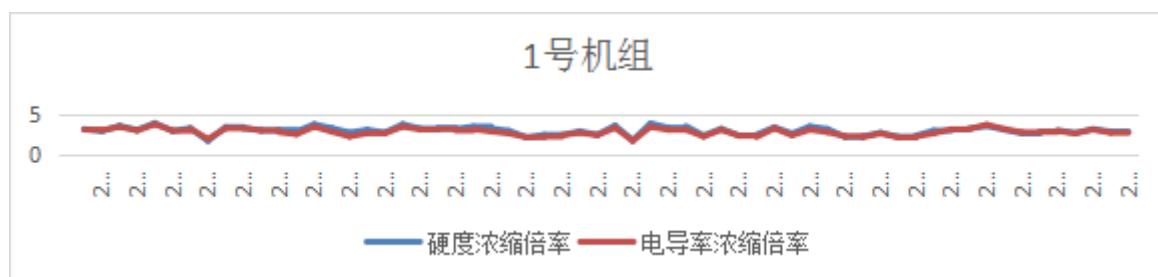


图 3-1 1 号机组硬度、电导率浓缩倍率对照图

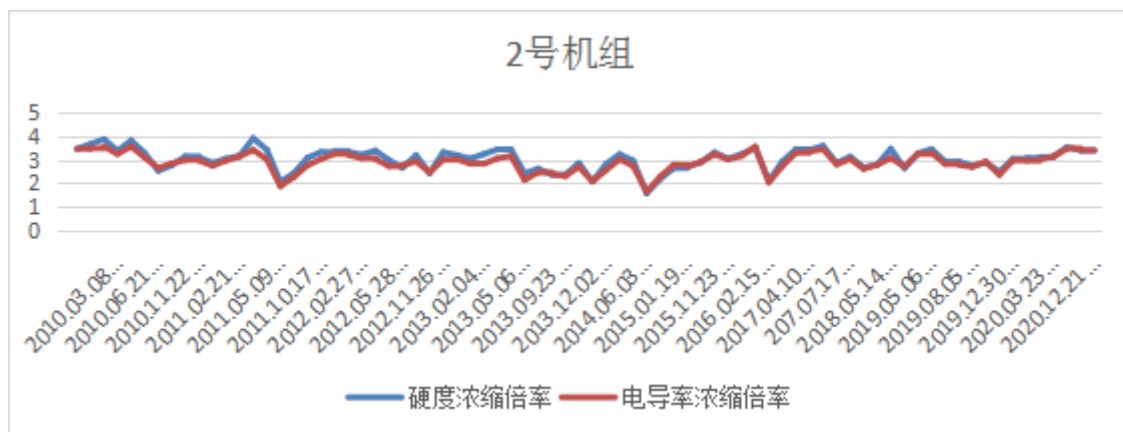


图 3-2 2 号机组硬度、电导率浓缩倍率对照图

5 结论

通过对上述表、图中数据、图形分析可以得出，采用循环水、补充水的硬度、电导率计算浓缩倍率，两者趋势基本一致。若安装循环水、补充水在线电导率表进行实时监测，完全可以为实现循环水的自动排污提供数据支持，为智慧化电厂的建设提供帮助。鉴于各电厂控制方式不一致，若想利用循环水、补充水电导率来计算浓缩倍率控制水质，还需进行针对本厂的数据收集和分析。

参考文献

- [1] 钱达中.发电厂水处理工程 [M].北京:中国电力出版社,1998.
- [2] 高秀山,张渡,杨东方.火电厂循环冷却水处理 [M].北京:中国电力出版社,2001.
- [3] 孙本达,杨宝红.火力发电厂水处理实用技术问答 [M].北京:中国电力出版社,2006.
- [4] 周柏青,陈志和.热力发电厂处理 [M].北京:中国电力出版社,2019.

The mechanism of improving the adsorption efficiency of methyl orange by hydrothermal preparation of MHG composites

Hui Gao

Heilongjiang Institute of Industry, Jixi, Heilongjiang, 158100, China

Abstract

Methyl orange, a typical organic dye, is highly stable in wastewater and challenging to treat, necessitating the development of efficient adsorption materials. This study examines the performance of magnesium hydroxide/graphene oxide (MHG) composites prepared by the hydrothermal method in methyl orange adsorption. It analyzes how the material's structural characteristics, specific surface area, and surface functional groups influence the adsorption isotherm behavior and kinetics. The study explores the mechanisms by which π - π stacking, pore structure optimization, and the synergistic effect of functional groups enhance adsorption efficiency. This research provides experimental evidence for constructing an efficient and renewable adsorption material system, offering practical engineering applications and theoretical guidance for the effective removal of refractory organic pollutants from dyeing wastewater.

Keywords

hydrothermal method; MHG composite material; methyl orange; adsorption mechanism

水热法制备 MHG 复合材料对甲基橙吸附效能的提升机理

高慧

黑龙江工业学院, 中国 · 黑龙江 鸡西 158100

摘 要

甲基橙作为典型有机染料, 其在废水中的稳定性强, 处理难度大, 需开发高效吸附材料。文章研究了水热法制备的氢氧化镁/氧化石墨烯 (MHG) 复合材料在甲基橙吸附中的性能, 分析了材料的结构特征、比表面积与表面官能团构成对吸附等温行为和动力学特性的影响, 探讨了 π - π 堆积作用、孔结构优化及官能团协同对吸附效能提升的机理。该研究可为构建高效可再生的吸附材料体系提供实验依据, 对印染废水中难降解有机污染物的高效去除具有现实工程应用价值和理论机制指导意义。

关键词

水热法; MHG 复合材料; 甲基橙; 吸附机理

1 引言

甲基橙作为一种典型偶氮类染料, 广泛存在于印染废水中, 因其结构稳定、生物难降解而对环境构成长期威胁, 吸附法因处理高效、条件温和被视为主要去除路径。氧化石墨烯具有大的比表面积和丰富的官能团, 能有效负载功能材料形成高性能复合吸附剂, 水热法在调控材料微观结构和界面特性方面具有显著优势。构建结构稳定、吸附效率高且可循环利用的新型复合材料成为提升污染物去除能力的关键。研究以氧化石墨烯为基底, 引入氢氧化镁构建 MHG 复合材料, 系统开展结构表征、吸附行为评价及性能机制分析, 为后续吸附性能提升与材料构型优化提供数据基础与理论支撑。

【基金项目】依托黑龙江省省属本科高校基本科研业务费项目《石墨烯基纳米复合材料的制备及对印染废水的吸附性能研究》。

【作者简介】高慧 (1989-), 女, 满族, 中国河北保定人, 本科, 工程师, 从事地质资源环保研究。

2 材料制备与表征

2.1 MHG 复合材料的水热合成过程

将预先超声剥离的氧化石墨烯分散于去离子水中, 加入适量氯化镁和六氢氧化镁前驱体, 控制 pH 至弱碱性条件, 充分搅拌形成均匀前驱液, 置于密闭反应釜中于 180℃ 下水热反应 12 小时, 冷却后离心洗涤至中性, 干燥后获得黑灰色 MHG 复合材料^[1]。整个过程中通过调控 Mg 源浓度和

GO 质量分数控制复合比例,从而调节材料微观结构和表面状态,有效形成片状 GO 与纳米 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的负载复合体系。

2.2 表面结构特征的检测方法

采用扫描电子显微镜观察材料的层状堆叠结构及氢氧化镁颗粒的分布形态,借助 X 射线衍射分析复合材料的晶体类型与结晶程度,确定 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的晶相特征与氧化石墨烯结构变化,傅里叶变换红外光谱用于检测合成前后羟基、羧基等表面官能团的变化,验证功能基团的引入与反应过程中的化学连接关系,不同测试结果互为印证以明确复合结构的形成及其表面功能特征。

2.3 吸附实验参数的设置依据

在吸附实验中控制初始甲基橙浓度范围为 10–100 mg/L,以评估不同浓度条件下的吸附性能,调节溶液 pH 至 3–11 用于分析酸碱条件对吸附量的影响,选用 25℃ 作为基础温度并设定不同吸附时间梯度以捕捉平衡时间点,所有条件以单变量法逐项控制,吸附容量与去除率作为评价指标,数据用于后续等温与动力学模型拟合分析材料吸附行为。

3 吸附性能评估

3.1 甲基橙的吸附等温行为

在不同初始浓度条件下测定 MHG 复合材料对甲基橙的平衡吸附量,构建吸附等温曲线,利用 Langmuir 与 Freundlich 模型对实验数据进行非线性拟合,拟合参数由最小二乘法确定,相关系数 R^2 用于评价拟合优度^[2]。Langmuir 模型中 q 与 K 分别表示最大吸附容量与结合常数, Freundlich 模型中的 K_f 和 n 值反映吸附能力与表面不均匀性。在 25℃ 下, Langmuir 模型拟合优度高于 Freundlich 模型,说明吸附过程趋向于单层吸附行为,吸附位点均匀分布。随着初始浓度升高,单位质量材料吸附量增加但去除量增长趋缓,表明高浓度下位点饱和。拟合结果中 q 大于 100 mg/g, K 值在稳定范围内变化,说明复合材料在实验浓度范围内具有较强的吸附能力, Freundlich 模型 n 值介于 1 至 2 之间,进一步验证吸附过程具有可逆性及一定程度的表面非均匀性。

3.2 吸附动力学与速率分析

吸附过程中速率控制步骤与吸附位点的作用方式密切相关,不同模型对动力学行为的拟合可反映吸附反应机制与控制类型。准一级模型假设吸附速率与未吸附量成正比,而准二级模型则基于化学吸附机制构建,其适用性可通过拟合参数与实测数据的接近程度判断。吸附过程在不同温度条件下进行以探究温度对吸附速率的影响,吸附平衡浓度和速率常数用于分析材料与染料分子之间的作用关系。下表 1 为不同温度下的动力学拟合参数。

在不同温度条件下,准一级与准二级动力学模型对吸附数据进行拟合,结果显示准二级模型在各温度下的 R^2 均高于 0.99,优于准一级模型的 0.91–0.93,表明吸附过程符合准二级速率控制特征,推断主控步骤为化学吸附。拟合吸

附量 $q_{e,cal}$ 与实测值接近,进一步验证模型适配性。 k 值随温度升高略有增大,反映温度对吸附速率有促进作用。

表 1: MHG 复合材料对甲基橙吸附的动力学模型拟合参数

温度 (°C)	模型	k 值	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
25	准一级	0.0321	84.73	0.912
25	准二级	0.0047	92.61	0.996
35	准一级	0.0355	87.12	0.917
35	准二级	0.0053	95.34	0.993
45	准一级	0.0387	88.4	0.924
45	准二级	0.0061	97.85	0.991

3.3 材料的循环使用能力

在吸附材料应用过程中,循环吸附能力与结构稳定性密切相关,连续重复使用后的性能变化可反映材料表面吸附位点的保留程度及解吸条件对结构的影响^[3]。每轮实验在相同初始浓度、pH、温度条件下进行,采用固定剂量材料与甲基橙溶液反应达到吸附平衡后,经乙醇与去离子水混合溶液浸泡完成解吸,控制解吸时间不变,重复进行吸附实验以测定不同循环轮次下的容量变化。吸附容量的逐轮变化与解吸后容量恢复值用于分析复合材料的可重复使用性能及其吸附位点的耐久性。下图 1 展示了 MHG 复合材料在五轮吸附 - 解吸循环中的吸附容量与解吸后恢复容量的变化趋势。

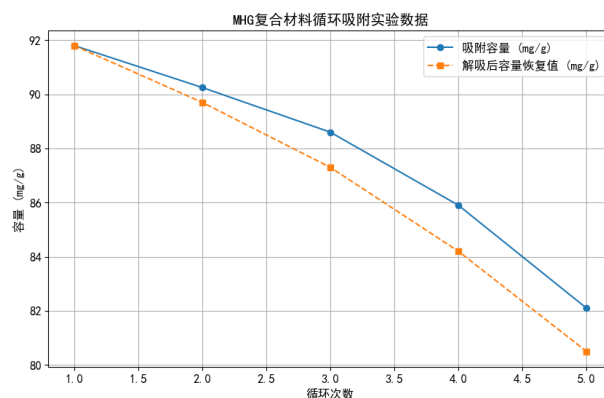


图 1: MHG 复合材料循环吸附实验数据

在连续五轮吸附 - 解吸实验中记录吸附容量变化,采用乙醇和去离子水混合溶液作为解吸剂,控制解吸时间为 2 小时,温度保持在 25℃。首次吸附容量达到 91.80 mg/g,第二轮开始吸附量略有下降,至第五轮下降至 82.10 mg/g,总下降幅度约为 10 mg/g,说明吸附位点略有损失但未发生结构性破坏。解吸后吸附容量恢复值与前一轮接近,说明材料在使用过程中结构稳定,可有效维持吸附活性。解吸效率较高,损耗控制在合理范围内,吸附能力在多轮循环后依然具备实用水平。

4 吸附效能提升机理分析

4.1 $\pi-\pi$ 堆积作用的增强作用

GO 表面具有高度共轭的芳香结构,能够与甲基橙分子

中的苯环形成 $\pi-\pi$ 堆积作用。在 MHG 复合结构中, 氢氧化镁的加入未破坏 GO 片层的 π 电子系统, 反而在复合反应中拉近 GO 层间距, 形成更为规整的堆叠排列结构, 从而增强 π 电子云之间的重叠程度^[4]。复合过程中形成的局部微孔和表面不规则位点有助于提高染料分子与 π 体系之间的接近度, 进一步增强 $\pi-\pi$ 相互作用的结合稳定性。

在吸附过程中, 甲基橙分子优先接近 GO 区域, 与 GO 片层表面形成面间作用, 复合材料的多层结构为分子排列提供了更大的接触界面。吸附过程中产生的静电吸引与 $\pi-\pi$ 作用并存, 但染料在 GO 表面上的有序堆积主要受到 π 电子重叠的稳定控制。吸附等温实验结果中 Langmuir 模型对数据拟合较好, 结合结构表征分析可确认复合结构在增强 $\pi-\pi$ 吸附位点方面发挥了关键作用, 有效提升甲基橙分子的结合能力与稳定吸附效果。为验证 GO 在复合过程中的层间结构变化, 可通过 XRD 图谱对比 GO 与复合材料的衍射峰位置与形态, 如下图 2 所示:

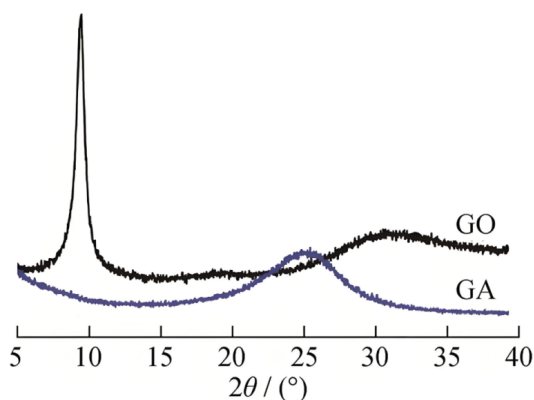


图: 2GO 与 MHG 复合材料的 XRD 图谱对比

图 2 中 GO 样品在 $2\theta \approx 10.2^\circ$ 处出现明显衍射峰, 对应其有序层状结构和较大的层间距; GA 样品(复合材料)在该位置的峰消失, 取而代之的是在 $2\theta \approx 25.1^\circ$ 处出现宽化衍射峰, 说明 GO 在复合过程中层间堆叠结构遭到破坏, 部分还原或结构重排后形成更紧密排列。衍射峰的变化表明复合后 GO 片层之间的排列方式发生改变, 有助于增强 $\pi-\pi$ 堆积作用, 为染料分子提供更多稳定吸附位点。

4.2 表面官能团对吸附能力的影响

氧化石墨烯表面富含羧基、羟基、环氧基等含氧官能团, 这些极性基团能够作为吸附位点与甲基橙分子发生静电作用和氢键作用。在水热反应条件下, 氢氧化镁的碱性环境促进 GO 表面部分羧基脱质子形成 $-\text{COO}^-$, 增强其与染料阳离子之间的静电吸附能力。复合过程中氢氧化镁水解产生的大量 $-\text{OH}$ 基团也稳定存在于复合材料表面, 与 GO 原有官能团协同提供多类型结合位点。表面极性基团数量的增加使复合材料在溶液中的表面电荷分布更均匀, 提升其对带电染料分子的识别和结合能力。

傅里叶变换红外光谱显示复合材料在 3400 cm^{-1} 和 1720 cm^{-1} 附近存在明显的 $-\text{OH}$ 和 $-\text{C}=\text{O}$ 特征峰, 表明官能团在

复合后未被破坏, 并可能因复合反应进一步增强。XPS 测试中 O 1s 峰强度变化表明 GO 表面的氧含量上升, 表明氢氧化镁的引入在材料表面引发二次官能化过程。官能团在 GO 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 界面处分布密集, 产生多点作用, 从而增强材料与甲基橙之间的结合能力。吸附过程中上述官能团提供静电吸引, 还可与染料分子形成稳定氢键网络, 进一步固定分子位置并维持吸附稳定性。

4.3 复合结构对比表面积的贡献

氧化石墨烯在水分散体系中易因 $\pi-\pi$ 相互作用发生片层堆叠, 导致实际比表面积远低于理论值^[5]。氢氧化镁的引入在 GO 片层间形成无序支撑结构, 阻止其紧密堆积, 促进层间孔道的形成。BET 测试数据显示, MHG 复合材料比表面积达到 $137.2\text{ m}^2/\text{g}$, 远高于 GO 的 $64.5\text{ m}^2/\text{g}$ 和 MH 的 $41.8\text{ m}^2/\text{g}$, 孔容也从原始 GO 的 $0.18\text{ cm}^3/\text{g}$ 提升至复合后的 $0.36\text{ cm}^3/\text{g}$, 表明复合结构在孔道数量和空间分布方面发生明显优化。孔径分布主要集中在 $2-10\text{ nm}$ 之间, 为典型中孔结构, 适配染料分子的尺寸, 有利于分子在孔内扩散和吸附。

扫描电镜图像显示复合材料呈现片层交错与颗粒嵌入并存的微观结构, 氢氧化镁颗粒均匀分布在 GO 表面和层间区域, 有效支撑三维多孔结构的构建。该结构在溶液中可形成多级传质通道, 使甲基橙分子更容易进入内部孔隙并与吸附位点接触。在等温吸附实验中, 单位质量复合材料的吸附量高于单组分材料, 说明孔结构的开放性和传质路径的延展性对吸附性能提升具有直接影响。动力学曲线显示复合材料在初始阶段吸附速率更快, 表明材料结构促进染料分子快速扩散并稳定结合于吸附表面, 有效缩短平衡时间。

5 结论

MHG 复合材料在水热条件下形成稳定的三维复合结构, GO 与氢氧化镁的协同作用显著提升比表面积与表面官能团数量, 吸附实验中表现出较高的甲基橙去除能力。吸附等温线符合 Langmuir 模型, 动力学行为符合准二级模型, 表明吸附为以化学作用为主的单层过程。 $\pi-\pi$ 堆积作用和极性基团参与形成多点结合机制, 循环实验中材料保持较高的吸附容量与结构稳定性。复合设计为高效吸附剂构筑提供有效路径, 具备进一步工程化应用的可行性。

参考文献

- [1] 李斌.化学限域水热法石墨烯纤维及其复合材料测温性能研究[D].青岛理工大学,2023.
- [2] 陈冬丽.水热法石墨烯/氧化钒复合材料的制备及性能[J].科技与创新,2022,(22):156-159.
- [3] 陆晓挺.CTAB辅助水热法合成 LiFePO_4/C 复合正极材料的形貌与电化学性能研究[J].粘接,2022,49(02):46-48.
- [4] 马金环,魏智强,梁家浩,等.水热法合成 $\text{rGO}/\text{MoO}_3/\text{Co}_3\text{S}_2$ 超级电容器电极复合材料[J].复合材料学报,2022,39(10):4580-4589.
- [5] 张孟丽.3D打印ABS/TPU/ CaSiO_3 骨架水热法生长 ZnO 复合材料的制备及性能研究[D].福建师范大学,2021.

Research on Structural Design and Performance Optimization of All-Gear Transmission Four-way Shuttle Vehicle

Mingliang Li

Shanghai Jiajia Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai, 201206, China

Abstract

Aiming at the problems of structural redundancy, high energy consumption and high maintenance cost existing in traditional four-way shuttle vehicles, this paper proposes an innovative design scheme of four-way shuttle vehicles based on a fully gear closed transmission system. By adopting an aluminum alloy modular frame, an all-gear integrated transmission structure and a closed lubrication system for gearboxes, the vehicle body height has been reduced to 120mm (20% lower than the industry standard), the self-weight has been reduced by 33% (200kg/1T load), and at the same time, the noise ($\leq 65\text{dB}$) and operating energy consumption have been effectively reduced (saving 15%-20%). Experimental verification shows that this design has significant advantages in terms of warehouse space utilization rate, transmission accuracy (positioning error $\pm 1\text{mm}$), and environmental protection performance, and can meet the requirements of high-cleanliness scenarios such as pharmaceuticals and electronics. [5]

Keywords

full gear closed transmission system; lightweight; energy saving and consumption reduction; utilization rate

全齿轮传动四向穿梭车结构与性能优化研究

李明良

上海甲佳智能科技有限公司，中国·上海 201206

摘 要

针对传统四向穿梭车存在的结构冗余、能耗高、维护成本高等问题，本文提出一种基于全齿轮闭式传动系统的四向穿梭车创新设计方案。通过采用铝合金模块化框架、全齿轮一体化传动结构和齿轮箱闭式润滑系统，实现车体高度降低至120mm（较行业标准缩减20%）、自重减少33%（200kg/1T负载），同时有效降低噪音（ $\leq 65\text{dB}$ ）与运行能耗（节能15%-20%）。经实验验证，该设计在仓储空间利用率、传动精度（定位误差 $\pm 1\text{mm}$ ）及环保性能方面具有显著优势，可满足医药、电子等高洁净场景需求。[5]

关键词

全齿轮闭式传动系统；轻量化；节能降耗；利用率

1 概述

1.1 研究背景

物流行业目前的现状有如下特点：1. 市场规模持续增长：2025 年第一季度，中国物流业总费用达到 4.5 万亿元，与 GDP 的比率为 14.1%，较上年同期下降 0.3 个百分点^[1]。传统的自动化立体仓储系统已经不能满足当前的需求，四向穿梭^[2]车可以四向行驶到达任意货位，路径选择灵活、快速高效，四向车立体库由此诞生。随着电商、物流以及自动化科技的快速发展，自动化仓储物流设备正经历着快速迭代更新的阶段^[1]。2. 物流需求特点：物流订单也呈现出批量小、批次多、种类多、波动高的特点^[1]。3. 成本稳步下降：全社会物流成本稳步下降，反映出行业的高质量发展。4.

绿色低碳物流受到重视：在政策推动下，绿色低碳物流逐渐成为行业发展的重要方向。5. 四向穿梭车式立体库的空间利用率高，系统中的设备易于维护与替换，四向穿梭车应用越来越广泛。随着智能仓储系统向高密度、高效率方向升级，传统四向穿梭车存在的链条传动磨损率高（年均维护成本增加 30%）、液压/丝杠顶升系统结构复杂（故障率 $\geq 8\%$ ）等问题日益凸显。现有产品普遍存在车体高度冗余（150mm 标准值导致货架层间距 $\geq 300\text{mm}$ ）、开式润滑污染（油污率 0.5L/千小时）等技术瓶颈；基于四向车的功能分析对整体结构进行模块化设计，对四向车行走所需的轮式结构和伺服电机进行分析和选择，设计出完整的行走导向机构等^[4]。

1.2 研究目标

开发一种新型全齿轮传动四向穿梭车，通过优化设计实现以下技术突破：车体高度压缩至 120mm，货架层间距降低 25%；传动系统模块化率 $\geq 85\%$ ，装配效率提升 40%；

【作者简介】李明良（1974-），男，中国甘肃天水人，本科，从事智能仓储自动化研究。

闭式润滑系统实现零污染排放；综合能耗降低至 0.8kWh/吨·公里（行业平均 1.0kWh）。

2 总体设计方案

2.1 系统架构

采用巷道行走 + 顶升换向双电机驱动模式（图 1），通过行星齿轮组实现四向运动耦合：行走模块：双级斜齿轮减速箱（速比 $i=10:1$ ），顶升模块：行星减速机 + 齿轮箱复合传动（顶升精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ）；框架结构：6061-T4 铝合金开模后经过 CNC 整体加工（减重系数 0.67），见图 2。

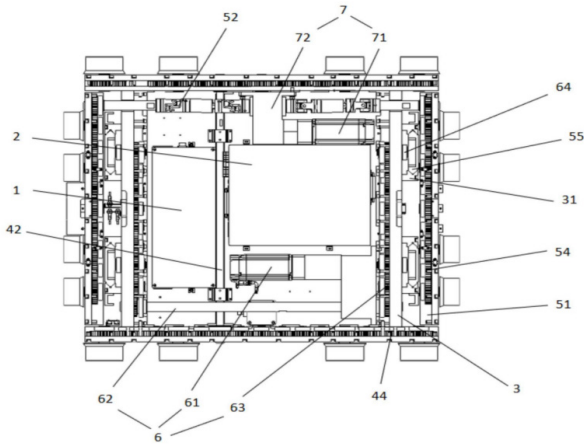


图 1

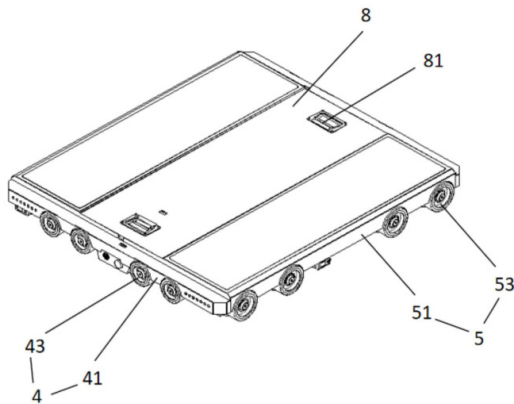


图 2

2.2 关键技术参数对比

指标	本设计	行业均值	优化幅度
车体高度	120mm	150mm	-20%
自重 / 载重比	0.13:1	0.2:1	-35%
传动效率	92%	78%-85%	+7-14%
噪音等级	≤65dB(A)	75-82dB(A)	-13-17dB

3 关键技术创新

3.1 全齿轮闭式传动系统

优化设计：采用渐开线斜齿轮齿形（图 2），接触应力降低 18%。噪音降低 15%。

润滑系统：SKF LGHP2 脂润滑，维护周期延长至 5000 小时（行业标准 2000 小时）；失效模式：通过 FMEA 分析，关键齿轮组 MTBF≥30000 小时。

3.2 轻量化模块化框架

结构设计：拓扑优化算法减重 26%，用 solidworks simulation 有限元分析显示最大应力点低于材料屈服强度（275MPa）的 60%。^[8]

3.3 运动控制优化

采用模糊 PID 算法，实现换向时间 ≤1.2 秒（传统系统 ≥2 秒）；开发双闭环反馈系统（编码器 + 激光测距），定位重复精度达 ±2mm。^[7]

3.4 行走机构电机选型计算

设计条件：最大负载：1 吨；最大运行速度：v=1.2m/s；最大加速度：a=1.2m/秒²；摩擦系数：μ=0.08（聚氨酯轮 - 钢轨）；传动效率 η=92%；行走轮直径 94mm；一个电机通过行星减速机和齿轮箱驱动 8 个轮子，总的减速比 10。

3.4.1 电机功率计算

1. 计算总的驱动力： $F = m(\mu * g + a) = 1000 \times (0.08 \times 9.81 + 0.5) = 1284.8\text{N}$

2. 计算轮端扭矩： $T_{\text{wheel}} = F_{\text{total}} \times r = 1927.2 \times 0.047 \approx 60.4\text{Nm}$

3. 计算电机扭矩： $T_{\text{motor}} = T_{\text{wheel}} / i \times \eta = 60.4 / 10 \times 0.9260.4 \approx 4.5\text{Nm}$

4. 计算电机转速： $n_{\text{wheel}} = \pi \times Dv \times 60 \times i = 3.1416 \times 0.0941.2 \times 60 \times 10 = 2442\text{RPM}$

5. 计算电机功率：

电机角速度 $\omega = 2\pi \times n_{\text{motor}} / 60 \approx 220.27\text{rad/s}$

电机功率为： $P = T_{\text{motor}} \times \omega = 6.5 \times 220.27 \approx 1.4\text{Kw}$

3.4.2 电机选型

选用雷赛系列伺服电机（型号 ACM80150V48G-M17-JZ-1M5），技术参数：额定功率：1.5kW；额定扭矩：4.77N·m；额定转速：3000r/min；过载能力：200%。

3.5 顶升机构设计计算

设计条件：顶升载荷：F=1500kg × 9.8=14.7kN；安全系数：n=1.5；设计载荷：F_d=14.7 × 1.5=22.05kN

3.5.1 蜗轮蜗杆参数计算

模数选择（ISO 53）： $m = 2.5K \cdot T \psi_m \cdot Z_2 \cdot [\sigma_H]^{23} = 4\text{mm} = 3 \psi_m \cdot Z_2 \cdot [\sigma_H]^{22.5K} \cdot T = 4\text{mm}$ （取 K=1.3, ψ_m=10, Z₂=40, [σ_H]=220MPa）

蜗杆导程角： $\gamma = \arctan Z_1 q = \arctan 210 = 11.31^\circ$ $\gamma = \arctan q Z_1 = \arctan 102 = 11.31^\circ$

传动效率验证： $\eta = \tan \gamma \tan(\gamma + \rho) = \tan 11.31^\circ \tan(11.31^\circ + 2.5^\circ) = 82.7\%$ $\eta = \tan(\gamma + \rho) \tan \gamma = \tan(11.31^\circ + 2.5^\circ) \tan 11.31^\circ = 82.7\%$

3.5.2 锥齿轮强度校核

根据 ISO 6336 进行齿面接触强度计算： $\sigma_H = ZE F_t b^{1/3} \cdot d_1 \cdot u + 1 u \leq [\sigma_H]$ $\sigma_H = ZE b \cdot d_1 F_t \cdot u u + 1 \leq [\sigma_H]$ ；计算

得 $\sigma_H=198\text{MPa}<[\sigma_H]=220\text{MPa}$ ，满足要求。

3.6 顶升电机选型计算

设计条件: 最大负载: 1 吨; 顶升高度 40mm, 顶升时间 1.2 秒; 一个电机通过行星减速机和齿轮箱驱动 4 个轮子偏心轮顶升, 总的减速比 200。^[8]

3.7 全齿轮承载能力计算

行走齿轮副设计 (按 AGMA 2001-D04 标准):

1. 齿面接触应力:

$$\sigma_H=ZE\sqrt{F_t\cdot d\cdot KAKVKH\beta\cos2\beta}\quad \sigma_H=ZE\sqrt{F_t\cdot d\cdot \cos2\beta}\quad KAKVKH\beta$$

代入参数 ($ZE=189.8\sqrt{\text{MPa}}$, $F_t=3.6\text{kN}$, $b=20\text{mm}$, $d=72\text{mm}$, $KA=1.25$, $KV=1.1$, $KH\beta=1.3$, $\beta=15^\circ$) 得

$$\sigma_H=835\text{MPa}<\text{许用值 } 860\text{MPa}$$

2. 齿根弯曲应力:

$$\sigma_F=F_t\cdot b\cdot mn\cdot YFYSY\beta KAKVKF\beta\quad \sigma_F=b\cdot mnF_t\cdot YFYSY\beta KAKVKF\beta$$

($YF=2.8$, $YS=1.6$, $Y\beta=0.9$) 计算得 $\sigma_F=218\text{MPa}<$
许用值 240MPa

3. 润滑设计验证: 采用 SKF 计算工具校核润滑脂寿命:

$$L_{10}=106\cdot CP\cdot n^{60}\cdot KTL_{10}=106\cdot PC\cdot 60n\cdot KT$$

($C=12.5\text{kN}$, $P=8.2\text{kN}$, $n=40\text{r/min}$, $KT=0.85$) 得
 $L_{10}=12,400\text{ 小时}>\text{设计要求 } 5000\text{ 小时}$

4. 行走齿轮箱设计为全齿轮闭式传动系统, 其中齿轮强度通过设计软件进行校核; 经过校核满足设计要求。

输入数据	输入扭矩 N·M	T	47.75	输入转速 转 / 分	n	15.00
	法向模数	Mn	2.50	螺旋角	β	0.000000
	压力角	α	20.00	中心距	a	67.5000
	输入齿轮齿数	Z1	24.00	输出齿轮齿数	Z2	30.00
	输入齿轮变位系数	X1	0.0000	输出齿轮变位系数	X2	0.00000
	输入齿轮宽度	b1	16.00	输出齿轮宽度	b2	16.00
	输入齿轮分度圆直径	d1	60.0000	输出齿轮分度圆直径	d2	75.0000
	输入齿轮基圆直径	db1	56.3816	输出齿轮基圆直径	db2	70.4769
	输入齿轮顶圆直径	da1	65.0000	输出齿轮顶圆直径	da2	80.0000
	滑动率	η 1	2.6409	滑动率	η 2	1.9236
	端面重合度	ε a	1.6277	轴向重合度	ε β	0.0000
	传动比（Z2/Z1）	u	1.2500	分度圆端面压力角	α t	20.00000
	总变位系数	Xn Σ	0.0000	端面啮合角	A' t	20.00000
序号	输入系数	代号	说明		齿轮 1	齿轮 2
1	使用系数	Ka	参照表 16.2-36 说明		1	1
2	动载系数	Kv	$= 1 + \left[\frac{K_1}{K_A \times \frac{F_t}{b}} + K_2 \right] \frac{Z \times V}{100} \times \sqrt{\frac{u^2}{1 + u^2}}$		1.004	1.005
		K1	K1、K2 按表 16.2-39 查取，7 级精度斜齿轮		39.100	39.100
		K2			0.0193	0.0193
3	齿向载荷分布系数	KH β、KF β	参照表 16.2-41 说明按修形齿轮选取		1	1
4	齿间载荷分配系数	KHa、KFα	表 16.2-42 按 7 级精度经表面硬化直齿轮		1.1	1.1
5	材料弹性系数	ZE	表 16.2-43，大小齿轮均为钢件		189.800	189.800
6	试验齿轮疲劳极限	σ Hlim	按图 16.2-17，齿轮渗碳淬火能保证有效层深		1550	1550
7	齿轮设计寿命	(循环次数)NL	参考表 16.2-47 选定		200000000	
8	寿命系数	ZNT	$= \left(\frac{2 \times 10^6}{N_L} \right)^{0.0191}$		0.916	
9	油膜影响系数	ZLVR	参考 GB/T3480-1997 表 27，按剃齿齿轮副选取		0.97	0.97
10	工作硬化系数	ZW	图 16.2-21，大齿轮齿面硬度 HBS>470		1	1
11	尺寸系数	ZX	图 16.2-22，按 mn<7 选取		1	1
12	最小安全系数	SHmin	参考表 16.2-46 较高可靠度低档选取		1	1
13	计算接触应力	σ H	$= Z_H \times Z_E \times Z_{\beta} \times \sqrt{\frac{F_t}{b \times d_1} \times \frac{u+1}{u} \times K_A \times K_V \times K_{H\beta} \times K_{H\alpha}}$		764	696

续表

14	许用应力	σ_{HP}	$= \frac{\sigma_{HLim} \times Z_{NT} \times Z_{LVR} \times Z_W \times Z_X}{S_{Hmin}}$	1377	1377
15	安全系数	SH	$= \frac{\sigma_{HLm} \times Z_{NT} \times Z_{LVR} \times Z_W \times Z_X}{\sigma_H}$	1.8017	1.9784
齿轮 1 接触强度满足要求			齿轮 2 接触强度满足要求		
16	齿根圆角敏感系数	$Y_{\delta RelT}$	表 16.2-48, 齿根圆角 $qs>1.5$	1	1
17	齿根表面状况系数	Y_{RrelT}	齿根表面粗糙度 $Ra\leq2.6\mu m$	1	1
18	抗弯尺寸系数	Y_x	图 16.2-28, 模数 $mn<5$	1	1
19	计算弯曲应力	σ_F	$= \frac{F_t}{b \times m_n} \times K_A \times K_V \times K_{F\beta} \times K_{F\alpha} \times Y_{Fa} \times Y_{Fsa} \times Y_{\beta}$	128	123
20	最小安全系数	SFmin		1.00	1.00
21	安全系数	SF	$= \frac{\sigma_{FE} \times Y_{NT} \times Y_{\sigma rect} \times Y_{Rrect} \times Y_X}{\sigma_F}$	9.40	9.72
结论			齿轮 1 弯曲强度满足要求		
			齿轮 2 弯曲强度满足要求		

以上校核计算按照机械工业出版社《机械设计手册》第二版第 3 卷第 16 篇【齿面接触疲劳强度与齿根弯曲疲劳强度校核计算】进行^[9]

4 实验验证与应用

4.1 性能测试

疲劳试验：连续运行 2000 小时，传动系统温升 $\leq 15^{\circ}\text{C}$ ；能效测试：单位载重能耗 $0.78\text{kWh}/\text{吨}\cdot\text{公里}$ ，较链条传动降低 22%。^[5]

4.2 应用案例

在洛阳甲佳科技有限公司仓库的部署表明：存储密度提升 28%（货架层数由 12 层增至 15 层）；设备故障率下降至 0.7 次/千小时（行业平均 2.3 次）；综合运维成本降低 41%。

4.3 传动系统实测数据

测试项目	理论值	实测值	偏差率
行走电机温升	$\leq 65^{\circ}\text{C}$	61.3°C	-5.7%
顶升定位精度	$\pm 0.5\text{mm}$	$\pm 0.43\text{mm}$	-14%
齿轮箱振动速度	$\leq 2.8\text{mm/s}$	2.1mm/s	-25%

5 结论与展望

本研究通过全齿轮传动系统与模块化设计的深度融合，成功解决了四向穿梭车的高能耗、低精度等技术痛点。经产业化验证，该方案可使立体仓库空间利用率提升至 92%（传统方案 $\leq 78\%$ ），为高价值货物仓储提供了创新解决方案。未来未来托盘四向穿梭车将加速集成 AI 算法、物联网（IoT）和 5G 通信技术，实现更高精度的路径规划与实时动态调度；可以通过精准定位技术提升设备运行稳定性，结合高效能电池技术延长作业时长。智能化系统的渗透将推动设备从单一

搬运功能向全流程仓储管理转型；硬件创新与模块化设计，核心零部件如传感器、驱动装置和升降系统的性能迭代将成为技术突破重点；模块化设计理念的引入，将增强设备对不同场景（如冷链、异形件存储）的适应性，降低定制化成本；此外，轻量化材料应用有望进一步降低能耗。

参考文献

[1] 四向穿梭车仓储系统调度与路径联合优化研究. 夏阳阳.北京交通大学,2023

[2] 基于冲突搜索机制的四向穿梭车系统路径优化算法研究. 满荣军.山东大学,2022

[3] 四向穿梭车系统配置与路径优化. 吴涛.吉林大学,2021

[4] 智能四向穿梭车的模块化设计与研究. 李祥森.南京农业大学,2021

[5] 面向冷链的四向穿梭车的设计及可靠性分析. 张洪鹏.济南大学,2024

[6] 多四向车的路径规划与调度技术研究. 陆枳屹.东华大学,2021

[7] 四向穿梭车立体仓储系统作业调度优化研究. 张颖旭.河南工业大学,2024

[8] 自动导引四向行走叉车设计及关键技术研究. 佐富兴.上海交通大学,2021

[9] 《互联网文档资源（<https://www.360docs.>）》- 2024

[10] 基于区块链技术的物流信息追溯机制研究 高琰晨2019

[11] 基于冲突搜索机制的四向穿梭车系统路径优化算法研究 满荣军 2022

[12] 齿轮强度校核计算. - 《互联网文档资源》

Experimental Study on Performance Optimization of Permanent Magnet Synchronous Generators for New Energy Vehicles under High-Speed Operating Conditions

Jian Yang

BorgWarner Power Drive Systems Tianjin Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract

This paper conducts relevant research on the performance optimization of permanent magnet synchronous generators for new energy vehicles under high-speed conditions. This article analyzes the challenges faced by the motor under high-speed operating conditions, such as increased electromagnetic loss, intensified vibration and noise, and difficult heat dissipation. It proposes performance optimization strategies from multiple dimensions, including electromagnetic design optimization, structural design improvement, cooling system optimization, and control strategy adjustment. That is, by adopting new electromagnetic materials and optimizing the magnetic circuit structure to reduce electromagnetic loss; Improving the rotor structure and enhancing mechanical strength aim to reduce vibration and noise. Redesign an efficient cooling system to solve the heat dissipation problem; And combine advanced control algorithms to enhance the efficiency and stability of power generation. This research achievement aims to enhance the performance of permanent magnet synchronous generators under high-speed conditions, which can provide technical support and theoretical references for the optimization and upgrading of the power system of new energy vehicles, and thereby contribute to the sustainable development of the new energy vehicle industry.

Keywords

New energy vehicles Permanent magnet synchronous generator Electromagnetic design Structural improvement Cooling system

新能源汽车用永磁同步发电机高转速工况下的性能优化试验研究

杨健

博格华纳动力驱动系统天津有限公司，中国·天津 300000

摘 要

本论文针对新能源汽车用永磁同步发电机在高转速工况下的性能优化问题展开相关的研究。文章通过分析高转速工况下发电机面临的电磁损耗增加、振动与噪声加剧、散热困难等挑战，从电磁设计优化、结构设计改进、冷却系统优化、控制策略调整等多个维度提出了性能优化策略。即采用新型电磁材料、优化磁路结构降低电磁损耗；改进转子结构、增强机械强度旨在减少振动与噪声；再设计高效冷却系统来解决散热难题；并结合先进控制算法提升发电的效率与稳定性。此次研究成果旨在提高永磁同步发电机在高转速工况下的性能表现，可以为新能源汽车动力系统的优化升级提供技术支持与理论参考，进而助力新能源汽车行业的可持续发展。

关键词

新能源汽车；永磁同步发电机；电磁设计；结构改进；冷却系统

1 引言

现阶段，随着全球对于环境保护和能源可持续发展的关注度不断提高，新能源汽车凭借其清洁、高效的优点，逐渐地成为了汽车产业发展的重要方向。而永磁同步发电机以其功率密度高、效率高、响应速度快等优点，在新能源汽车动力系统中得到广泛的应用。可在新能源汽车的实际运行过

程中，尤其是在高速行驶、急加速等工况下，永磁同步发电机常常需要工作在高转速状态。而高转速工况会给永磁同步发电机带来一系列的问题，如电磁损耗显著增加、振动与噪声加剧、散热难度加大等，并且这些问题严重地影响着发电机的性能和可靠性，制约了新能源汽车的动力性、经济性和舒适性。为此，本文将系统地分析高转速工况对永磁同步发电机性能的影响，并提出针对性的优化策略，以期能够为提升新能源汽车动力系统性能提供有益的参考。

【作者简介】杨健（1993-），男，中国河北涉县人，本科，从事工程技术研究。

2 高转速工况对永磁同步发电机性能的影响

2.1 电磁损耗增加

在高转速工况之下,永磁同步发电机的电磁损耗得以显著地增加,当中主要包括了铜损耗、铁损耗和永磁体涡流损耗。其中随着转速升高,电机的电流频率增大,使得绕组的交流电阻增加,从而导致铜损耗上升。同时,高频率的磁场变化使得铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗大幅增加,因此铁损耗也会随之升高。此外,高转速下永磁体表面会产生较强的涡流,进而引起永磁体涡流损耗,不仅降低了发电机的效率,还可能会导致永磁体温度升高,影响到其磁性能,甚至是出现不可逆退磁现象。

2.2 振动与噪声加剧

永磁同步发电机的振动与噪声问题在高转速运行时会变得更为突出。一方面,由于转子的不平衡、气隙磁场的不均匀以及电磁力的波动等因素,将会产生较大的振动。而振动不但会影响发电机的机械结构稳定性,而且还可能导致零部件松动、磨损,此时发电机的使用寿命会缩短^[1]。另一方面,振动会引发电机部件的振动噪声,同时高转速下空气动力噪声也会显著地增加,噪声将会对车内驾乘人员的舒适性产生不良的影响,甚至可能会干扰驾驶员的正常操作。

2.3 散热困难

高转速工况下的永磁同步发电机,由于电磁损耗和机械损耗的增加,使得发电机内部的温度急剧升高。然而电机内部空间有限,并且散热面积相对较小,加之高转速下电机内部的空气流动复杂,所以不利于热量的有效散发。此时如果不能及时地将热量散发出去,就会导致电机绕组绝缘老化、永磁体性能下降,严重时甚至可能会引发电机故障,进而影响到新能源汽车的正常运行。

2.4 控制难度加大

高转速工况下的永磁同步发电机,其控制难度会显著地增加。因为高转速带来的快速变化的电磁参数和动态特性,对于控制系统的响应速度、精度和稳定性提出了更高的要求。而传统的控制策略将无法满足高转速工况下的控制需求,进而容易出现电流失控、转矩脉动增大等问题,最终影响到发电机的发电性能和新能源汽车的动力输出稳定性。

3 电磁设计优化策略

3.1 采用新型电磁材料

在提升新能源汽车永磁同步发电机的性能时,选用高性能永磁材料是最为关键一环。此时,钕铁硼永磁体凭借其高剩磁密度与高矫顽力的特性,成为了最为理想的选择。原因在于,新型高性能钕铁硼永磁体不仅磁性能卓越,能够在相同体积下产生更强的磁场,以显著地提高了发电机的功率密度,而且其良好的热稳定性和抗退磁能力,可以有效地减少高转速工况下永磁体的涡流损耗,直接地降低了不可逆退磁风险。与此同时,铁芯材料的选择同样重要,一般建议采

用低损耗的硅钢片,如高牌号冷轧取向硅钢片,即可大幅度地降低铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗,进而减少高转速下的铁损耗。

3.2 优化磁路结构

通过采用偏心磁极、不等厚磁极等特殊结构优化磁极形状,就能够有效地改善气隙磁场分布,进而降低气隙磁场的谐波含量,并减少电磁力的波动,使得降低电磁损耗和振动噪声的目标得以实现。因此,对于新能源汽车永磁同步发电机的磁路结构优化而言,磁极形状优化与磁障设计均发挥着不可或缺的作用^[2]。

以偏心磁极结构为例,其能使气隙磁场更加正弦化,有效地抑制了齿槽转矩,从而显著地提高了发电机的运行平稳性。而在转子结构中引入磁障设计,合理地布置磁障的数量、形状和位置,则可以调节磁路磁阻、优化磁场分布,进而提高发电机的功率因数和发电效率。不仅如此,磁障还具备一定的隔磁作用,它能够减少永磁体的漏磁,进一步地降低永磁体涡流损耗。但磁极形状的优化应当侧重于改善磁场分布状态,磁障的设计需着重于调节磁路特性。只有二者相互配合,从不同的角度优化磁路结构,才能提升发电机的性能。

3.3 绕组设计改进

在新能源汽车永磁同步发电机的绕组设计改进方面,绕组型式选择与绕组匝数线径的优化紧密相关且各有侧重。具体而言:绕组型式的合理选择是首要环节,即根据发电机的具体参数和工况需求,在分布式绕组和分数槽集中绕组中进行抉择。其中分布式绕组凭借较好的散热性能和较低的谐波含量,在对散热要求较高的高转速工况下表现较为出色;分数槽集中绕组则以绕组端部短、用铜量少、功率密度高的优势,可以有效地降低铜损耗。

4 结构设计改进策略

4.1 转子结构优化

转子结构优化一方面要采用高强度的转子材料和结构设计,以此有效地提高转子的机械强度和临界转速,使其能够适应高转速运行需求。另一方面,转子的动平衡处理同样不可或缺。即对转子进行高精度的动平衡检测和校正,从而显著地减少转子的不平衡量,使得转子在高转速下得以稳定的运行,并且还能有效地降低振动和噪声。

4.2 轴承系统改进

轴承系统作为保障永磁同步发电机正常运转的关键部分,其在高转速工况下的改进是至关重要的。首先需选用适合高转速工况的陶瓷轴承、角接触球轴承等高性能轴承,并确保其能够充分地发挥自己的独特优势。其次应该采用合适的润滑脂和润滑方式,使得轴承可以在高转速下获得良好的润滑,从而减少磨损。同时通过优化轴承的密封结构,如采用双唇密封结构或迷宫密封结构,可有效地防止润滑油泄漏

以及外界灰尘、杂质进入轴承内部,此时能够避免这些因素影响轴承的性能和使用寿命。

4.3 机座与外壳设计

机座刚性的增强为发电机的稳定运行提供了保障,外壳散热结构的优化则解决了高转速下的散热难题,若二者协同作用,即可共同提升发电机在高转速工况下的性能表现^[3]。

为了增强发电机的整体机械稳定性,首要任务便是增强机座的刚性。一般情况下,通过设计具有足够刚性的机座结构,如增加机座的壁厚、合理布置加强筋等措施,就能够显著地增强机座的抗振能力,进而有效地减少振动的传递。但优化外壳的散热结构也非常关键。即在发电机外壳上设计散热筋、散热片等结构,从而大幅度地增加散热面积,以此提高散热的效率。或者是采用铝合金等导热性能良好的材料制造外壳,这样有助于热量的快速传导和散发。

5 冷却系统优化策略

5.1 风冷系统优化

在新能源汽车永磁同步发电机的风冷系统优化过程中,通风结构与风扇性能的优化是相辅相成的,二者共同致力于提升散热的效果。第一点,相关人员需合理地设计发电机内部的通风路径和通风口布局,以此奠定提高空气流通效率的基础。通常工程师们会依据发电机的结构特点与散热需求,灵活地采用轴向通风、径向通风或混合通风方式。对于轴向长度较长的发电机,轴向通风方式能够沿着其轴向方向高效地带走热量;而对于径向尺寸较大的发电机,径向通风或者混合通风方式才能够更好地覆盖散热区域,使得热量的有效散发得以实现。然而,仅有良好的通风结构还不够,风扇的性能也同样关键。实践中应该选用高性能的风扇,并对其叶片形状、尺寸和转速进行优化,此举是强化散热能力的重要举措。一般情况下,采用宽叶片、大直径的风扇就能够显著地增加风量,进而提升散热效果。但合理地调整风扇转速,便可在满足散热需求的前提下,尽量的降低噪声干扰。此外在风扇上设置导流罩或导流板,还能够进一步引导空气流动,让空气更加精准地作用于发热部位,从而大幅度的提高散热的效率。

5.2 液冷系统设计

就液冷系统的设计而言,冷却液的选择与冷却通道的设计是紧密关联,双方一齐保障着发电机在高转速工况下的散热需求。

在冷却液选择方面,工程师们会优先挑选导热性能好、比热容大且化学稳定性高的冷却液,当前水-乙二醇混合液是最为常见的优质选择。基于此,根据发电机实际的工作温度范围,还需精确地调整冷却液的浓度,这样才能确保冷却液在高转速工况下既不会因高温沸腾,也不会因低温环境下冻结。同时考虑到冷却液的腐蚀性,还必须选用具有良好防腐性能的冷却液,以此保护冷却系统的各个部件,进而延长系统的使用寿命。

不过冷却通道的设计同样不容忽视,建议在发电机的定子铁芯、转子铁芯或机座中科学开设冷却水道,此举是实现有效散热的关键^[4]。究其原因,通过优化冷却通道的形状、尺寸和布局,便保证了冷却液均匀地流经各个发热部位,其能够充分地带走热量。而采用螺旋式、蛇形等特殊的冷却通道结构,则可以有效地增加冷却液的流动路径和换热面积,以此显著地提高了散热的效率。

5.3 相变冷却技术应用

相变冷却技术应用于新能源汽车永磁同步发电机散热时,热管冷却技术和相变材料冷却技术即可各展所长,合力为解决高转速工况下的散热难题提供创新方案。具体而言:热管冷却技术凭借其独特的传热优势,成为了高效散热的有力手段。该技术旨在将热管应用于发电机的冷却系统,再利用其高效传热特性,达到快速把热量从发热部件传递到散热部件的效果。而由于热管具有传热效率高、结构简单、可靠性强等显著优点,因此在高转速工况下,它能够迅速地降低发电机的温度。例如,在永磁体表面或绕组端部安装热管,便可将这些关键部位产生的热量迅速地传导到机座或外壳的散热部位,进而实现了热量的高效转移。相变材料冷却技术则是从另一个角度发挥作用,此技术需要在发电机内部合适位置填充石蜡、脂肪酸等相变材料。当发电机温度升高时,相变材料就能吸收大量的热量发生相变,使其从固态转变为液态,接着利用相变过程吸收的潜热来降低发电机温度。随后当温度降低时,相变材料又能从液态转变为固态,此时它会释放热量。

6 结语

结合上述所有内容可知,新能源汽车用永磁同步发电机在高转速工况下的性能优化是一项系统且复杂的工程,当中涉及了电磁设计、结构改进、冷却系统优化以及控制策略调整等多个关键的领域。通过本研究提出的优化策略,从材料选择、结构设计到控制算法的改进,以层层递进的方式,针对性地解决了高转速工况下发电机面临的电磁损耗、振动噪声、散热及控制等难题。而这些优化策略具备一定的有效性与可行性,可以显著地提升发电机在高转速工况下的运行性能,不仅为新能源汽车动力系统的优化升级提供了坚实的技术支撑与理论依据,也为新能源汽车行业的可持续发展注入新动力。

参考文献

- [1] 唐小春,于冰,许时杰,等.新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机噪声及续航优化研究[J].电机与控制应用,2020,47(01):91-96.
- [2] 范文超.新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机设计[D].山东省:曲阜师范大学,2023.
- [3] 祁理想.新能源汽车用永磁同步电机耦合偏心下振动噪声研究[D].安徽省:安徽大学,2024.
- [4] 罗润谦.新能源汽车用永磁同步电机的研究现状[J].兵器材料科学与工程,2023,46(05):154-158.

Investigation on large complex bread covering and forming process

Fengtao Lu Quan Zhang Haipeng Zhang Ling Wang

210th Institute, Sixth Research Institute of China Aerospace Science and Industry Corporation, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract

The cladding is an important component in solid rocket engines, and its external dimensions and surface structure are determined by the size and structure of the engine combustion chamber. Large size wrapping sleeves cannot be produced using traditional molding processes due to their exceeding the working range of ordinary molding equipment, and the cost of large molds used in traditional processes is also relatively high. This article presents a new approach to the molding process of large-sized, large-diameter, and complex bread covers through the demonstration of the proposed plan. By reasonably dividing the structure of the preform, cleverly designing a new structure forming mold, and selecting a reasonable shrinkage coefficient based on long-term data statistics, the production of large and complex surface coating sleeves was finally completed using ordinary equipment, saving the manufacturing cost of large and complex molds and providing a technical basis for in-depth research on the forming process of large coating sleeve products.

Keywords

wrapping sleeve; Forming process; explore

大型复杂型面包覆套成型工艺探究

鲁锋涛 张权 张海鹏 王领

中国航天科工集团第六研究院 210 所, 中国·陕西 西安 710065

摘 要

包覆套为固体火箭发动机内的重要零件, 其外形尺寸、型面结构由发动机燃烧室尺寸及构所决定。大尺寸的包覆套因超出普通成型设备的工作范围, 无法以传统的成型工艺进行生产, 且传统工艺中, 所使用的大型模具成本也较高。本文通过开展方案论证, 形成了一种长尺寸、大直径、复杂型面包覆套成型工艺新思路。通过合理规划预成型件结构, 巧妙设计新结构成型模具, 并根据长期的数据统计, 选取合理的收缩系数, 最终采用普通设备完成大型复杂型面的包覆套成型生产, 节省了大型复杂模具的制造成本, 也为大型包覆套产品成型工艺深入研究提供了技术基础。

关键词

包覆套; 成型工艺; 探究

1 引言

包覆套作为固体火箭发动机的重要组成部分, 其外形尺寸、型面结构由发动机燃烧室尺寸及绝热层结构所决定。

目前, 大尺寸的包覆套因超出普通成型设备的工作范围, 无法以传统的成型工艺进行生产, 且应用传统工艺, 所使用的大型模具成本也较高。为此, 针对长尺寸、大直径、复杂型面的包覆套, 有必要探究新的成型工艺, 以解决该问题。

2 复杂型面包覆套成型工艺论证

以长度 1500mm、直径 400mm 系列包覆套产品为例, 针对其成型工艺开展探究。

2.1 包覆套结构特点分析

包覆套通常为锥形“口袋”状结构, 前端为椭球型面且封闭, 后端开口, 后端开口处直径小于前端封闭处直径, 侧面均布三根通长梯形槽, 椭球处型面厚度 $2.0\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$, 侧壁长锥段厚度 $1.8\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$, 短锥段厚度 $2.5\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$ 。包覆套模型图如图 1 所示。



图 1 包覆套模型

【作者简介】鲁锋涛(1983-), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 高级工程师, 从事复合材料成型研究。

2.2 工艺方案论证

传统的小型简单包覆套成型工艺主要有整体模压成型、分段预成型再合成、气压釜硫化成型。然而,大型复杂型面包覆套采用以上工艺方法,均存在不同程度的技术问题。

采用整体模压成型工艺存在以下问题:

- 成型模具中需设计大尺寸悬臂结构的芯模,由于悬臂尺寸过长,悬臂端的成型壁厚不易保证;
- 倒锥结构,脱模难度大;
- 整体模压成型模具尺寸超出平板硫化机工作台工作范围。

因此,该包覆套不适合采用整体模压成型工艺。

分段预成型再合成工艺一般是将包覆套划分成两部分:椭球端、筒段,两段分别采用模具整体预成型(成型模具分别如图2、图3所示),然后采用合成模具通过气囊加压的方式将各预成型段合成为一体。

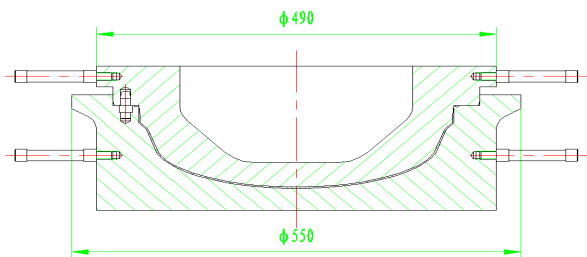


图2 椭球端成型模具

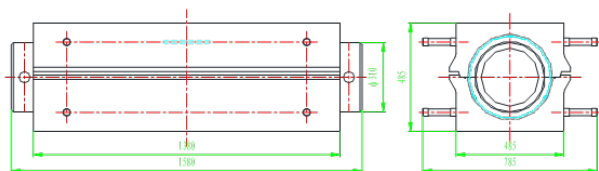


图3 筒段成型模具

采用分段预成型再合成工艺存在以下问题:

- 包覆套筒段成型需设计大型哈夫模具(图3),模具成本高;
- 筒段前端壁厚仅1.8mm,合模缝位置容易撕裂。

采用气压釜硫化成型工艺,需设计包覆套内型芯模,然后在芯模外部包裹生胶片,抽真空形成负压硫化成型。但此工艺方法难以保证梯形槽成型要求,另外,与整体模压成型类似,脱模难度大。

经过上述分析,包覆套整体模压成型、气压釜硫化成型方法因存在问题难以解决,此两种工艺无法应对大型复杂型面包覆套。分段预成型再合成工艺方法相对可行,但应考虑将工艺进一步简单化,同时降低模具成本。

为此,考虑将分段方式重新划分。椭球端必须依靠模具成型,结构保持不变。为降低模具成本,筒段考虑不再整体成型,考虑将三个梯形槽单独成型,其余部位在合成时贴

生胶片。如此划分成型结构,筒段大型哈夫模具可以取消,仅增加梯形槽成型模具,模具成本大幅降低,同时解决哈夫模合模缝容易撕裂的问题。

2.3 工艺流程

通过方案论证,确定采用分段预成型再合成的工艺方法,将椭球端、梯形槽分别预成型,整体合成时,其余部位贴生胶片,硫化成型。生产工艺流程如图4所示。

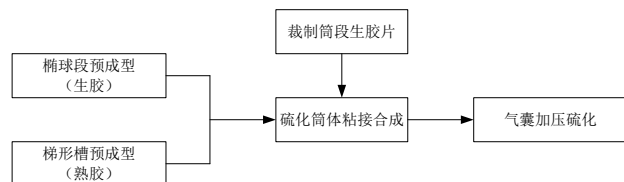


图4 成型工艺流程

3 硫化收缩率确定

硫化收缩率影响包覆套成型后的尺寸精度,是模具设计的重要参数,因此,对于硫化收缩率的确定尤为重要。

硫化收缩率可采用以下公式进行计算:

$$S_{cp} = \frac{D_{模} - D_{制}}{D_{模}} \quad (1)$$

式中: $D_{模}$ ——模具设计尺寸

$D_{制}$ ——产品成型尺寸

包覆套的材料为三元乙丙橡胶,通过长期的摸索验证,该材料硫化收缩率为1.6%~1.8%。此包覆套尺寸较大,且与绝热层的装配间隙极小,为此,收缩率选1.6%,避免产品成型后,难以装配。

4 成型模具设计

按照既定工艺方案,此包覆套成型需设计三套模具:椭球端成型模具、梯形槽成型模具、合成模具(包括气囊)。收缩率按1.6%进行设计。

椭球端成型模具如图3所示,梯形槽成型模具、合成模具分别如图5、图6所示。

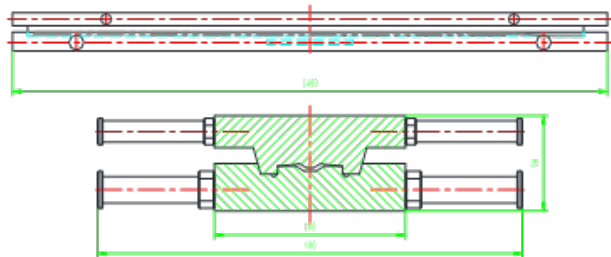


图5 梯形槽成型模具

5 包覆套成型效果

采用此工艺方案,完成大型复杂型面包覆套产品成型,

其检测数据如表 1 所示。

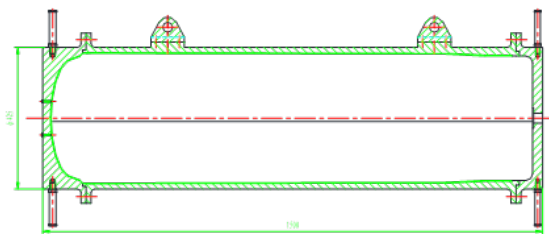


图 6 合成模具

通过表 1 可以看出，合成后的产品各部位的厚度满足

设计指标要求。

此外，包覆套装配关系良好。经此验证，此工艺生产的大型复杂型面包覆套满足要求。

6 结语

通过工艺探索验证，利用现有普通设备等资源，完成大型复杂型面包覆套产品的成型，探究出解决长尺寸、大直径、复杂型面包覆套成型难题的新工艺方法，节省了大型复杂模具的制造成本，也为大型包覆套产品成型工艺深入研究提供了思路。此工艺过程也存在一定的问题，即手工贴片操作难度较大，后续还需进一步改进方法，完善工艺。

表 1

测量象限		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	设计值
距离包覆套端面距离	50	2.7	2.77	2.80	2.75	2.78	2.76	2.77	2.76	2.5±0.3
	100	2.8	2.75	2.79	2.77	2.76	2.76	2.78	2.78	2.5±0.3
	200	2.22	2.25	2.39	2.34	2.20	2.239	2.23	2.20	2.5±0.3
	300	1.65	1.62	1.77	1.70	1.68	1.70	1.80	1.70	1.8±0.3
	400	1.69	1.67	1.73	1.68	1.65	1.68	1.80	1.69	1.8±0.3
	500	1.62	1.71	1.75	1.66	1.55	1.61	1.83	1.68	1.8±0.3
	600	1.73	1.72	1.73	1.66	1.56	1.61	1.70	1.58	1.8±0.3
	700	1.63	1.71	1.67	1.75	1.71	1.79	1.73	1.60	1.8±0.3
	800	1.67	1.65	1.65	1.64	1.68	1.62	1.71	1.56	1.8±0.3
	900	1.68	1.70	1.67	1.65	1.70	1.67	1.71	1.68	1.8±0.3
	1000	1.71	1.78	1.67	1.8	1.65	1.62	1.68	1.71	1.8±0.3
	1100	1.66	1.59	1.56	1.63	1.56	1.58	1.75	1.68	1.8±0.3

参考文献

1. 橡胶注射成型技术工艺研究及趋势[J]. 孙威.科技与创新,2016(22)

2. 推进剂与硅橡胶包覆层间粘接性能研究[J]. 李瑞琦,姜兆华,王福平,刘刚,杨春莉.材料科学与工艺,2003(03)

3. 《中国制造2025》解读之：我国制造业发展进入新的阶段[J].

4. 国内外复合材料工艺设备发展述评之二——纤维缠绕成型. 陈博.复合材料科学与工程,2023(S1)

5. 迷人的材料(彩图升级版)-10种改变世界的神奇物质和它们背后的科.【英】马克·米奥多尼克 著,赖盈满 译,未读 出品,.天津科学技术出版社

.工业炉,2023(03)