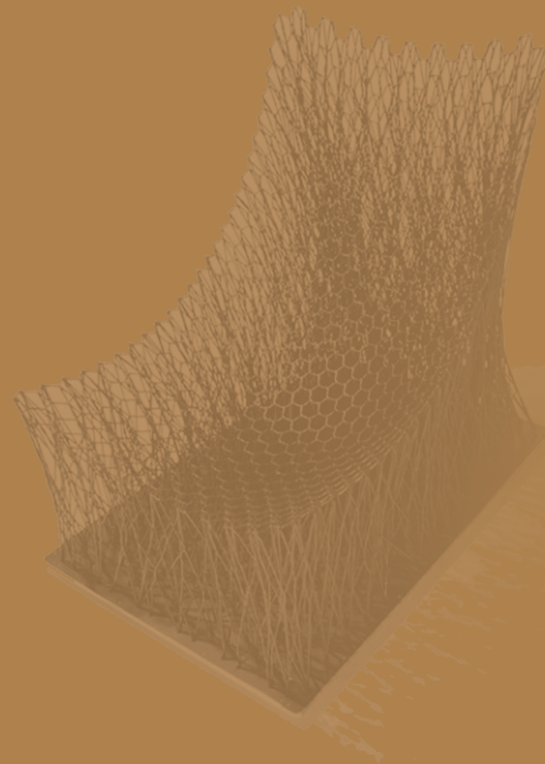




Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 65881289
E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



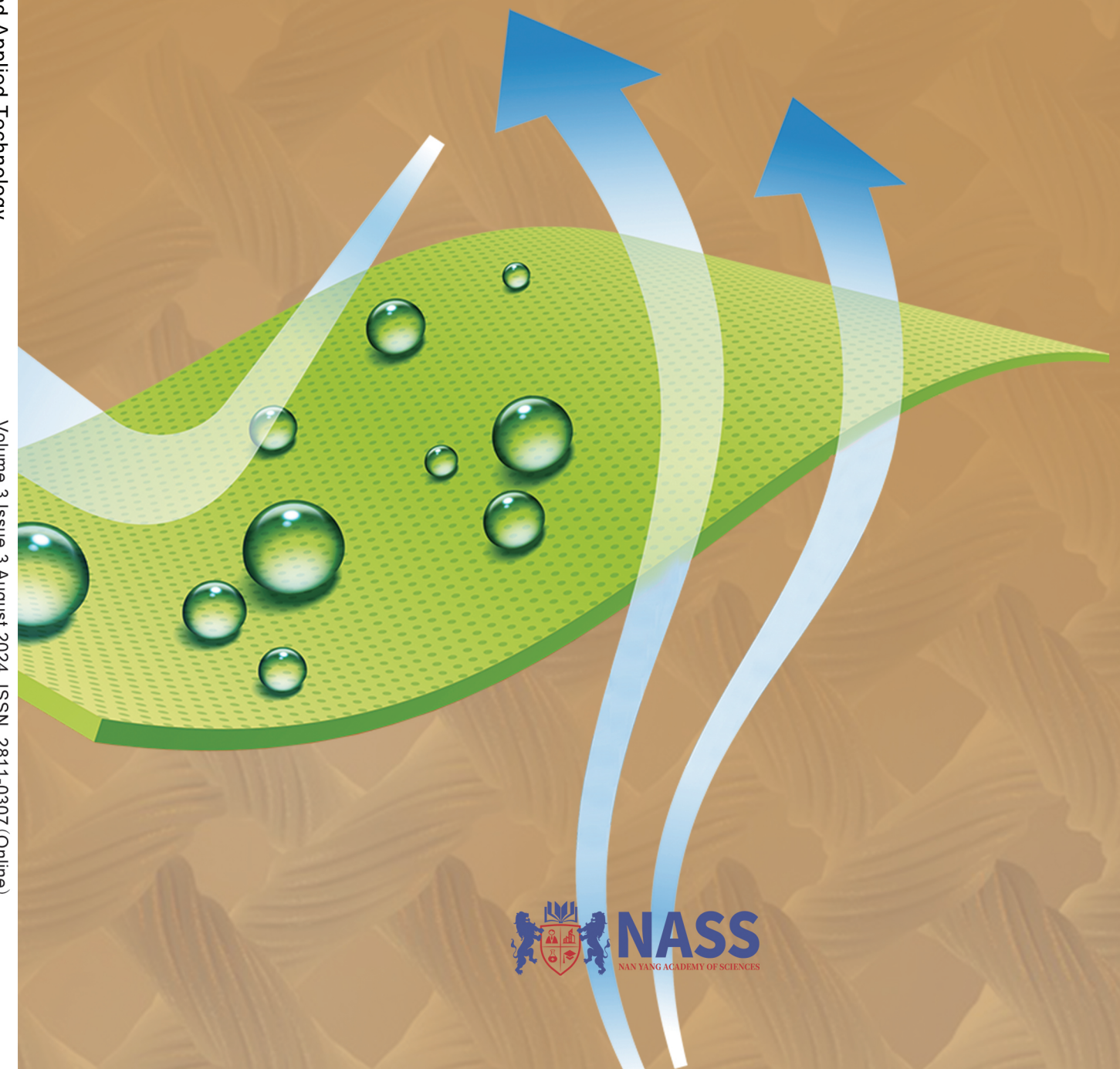
材料科学与应用技术 Materials Science and Applied Technology

Volume 3 Issue 3 August 2024 ISSN 2811-0307 (Online)

Volume 3 Issue 3 August 2024 ISSN 2811-0307 (Online)

材料科学与应用技术

Materials Science and Applied Technology



中文刊名：材料科学与应用技术

ISSN：2811-0307 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/msat

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Materials Science and Applied Technology

ISSN: 2811-0307 (Online)

Language: Chinese

URL: http://journals.nassg.org/index.php/msat

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《材料科学与应用技术》征稿函

Database Inclusion



Asia & Pacific Science
Citation Index



Creative Commons



MyScienceWork



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



期刊概况：

中文刊名：材料科学与应用技术

ISSN：2811—0307（Online）

出版语言：华文刊

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/msat

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
- 中国知网（CNKI）、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。

材料科学与应用技术

Materials Science and Applied Technology

Volume 3 Issue 3 August 2024

ISSN 2811-0307 (Online)

主 编

邢宝林

河南理工大学, 中国

编 委

余 鹏 Peng Yu

刘恩超 Enchao Liu

高 飞 Fei Gao

郝名扬 Mingyang Hao

1	天然气泄漏事件下的智能化学材料应用研究 / 辛燕				/ 黄华悱 胡晴 苗雅宁 戎恩芹 邵玉田
4	复合材料风电叶片结构设计相关思考 / 丛朋雨	36	碳纤维增强复合材料在航空航天中的应用研究 / 孙凤雷		
7	6061 铝合金激光焊温度场流场数值模拟 / 梁谦 曹江涛 夏立	39	激光 3D 打印高强高韧 TC4 钛合金的组织与性能 / 郭双全 李曙光 张伟 黄璇璇 王轶		
11	多功能材料在非标装备设计中的应用与性能优化探究 / 房浩弟 王崇阳 王卫鑫	42	微米和纳米级产品技术创新与挑战 / 万勇 邹炳林		
14	介电常数实验教学测量仪的开发 / 周朝彪 李阳 曲晓英	45	正八面体二硒化镍尺寸控制合成与表征 / 曾凯 刘飘		
17	硅片制备工艺中表面缺陷的检测与修复技术研究 / 吴雄杰 江红卫	48	芳纶橡胶复合材料的阻燃性能分析及改进 / 佟舟 卢鹏		
20	论建筑材料检测在建筑工程中的重要性及对策 / 肖建明	51	1700V 高性能 GaN HEMT 电力开关器件研究 / 陈兴		
23	钛合金粉末冶金制品缺陷分析 / 赵峰	55	高强钢在汽车底盘轻量化设计中的应用实践 / 朱莉莉		
26	Ti 系催化剂光催化氧化 VOCs 技术的运用研究 / 于艳 朱俊	58	精制钢在大跨度玻璃幕墙中应用与性能分析 / 于鹏		
29	热管相变技术在空间环境热控制中的适应性与挑战 / 江文峰	61	中国上海地区商品砂浆无损检测技术探讨 / 杨阳霖		
32	饮品级邻氨基苯甲酰胺制备工艺的研究	65	锌二次资源生产电锌流程技术改造工业实践 / 曾繁顺 黄炳宙 蒋卫平		

- 1 Research on the Application of Intelligent Chemical Materials under Natural Gas Leakage Events
/ Yan Xin
- 4 Reflection on the Structural Design of Composite Wind Turbine Blades
/ Pengyu Cong
- 7 Numerical Simulation of Temperature Field and Flow Field in 6061 Aluminum Alloy Laser Welding
/ Qian Liang Jiangtao Cao Li Xia
- 11 Application and Performance Optimization of Multi-functional Materials in Non-standard Equipment Design
/ Haodi Fang Chongyang Wang Weixin Wang
- 14 Development of Dielectric Constant Experimental Teaching Measuring Instrument
/ Chaobiao Zhou Yang Li Xiaoying Qu
- 17 Research on Detection and Repair Technology of Surface Defects in Silicon Wafer Preparation Process
/ Xiongjie Wu Hongwei Jiang
- 20 The Importance and Countermeasures of Building Material Testing in Construction Engineering
/ Jianming Xiao
- 23 Defect Analysis of Titanium Alloy Powder Metallurgy Products
/ Feng Zhao
- 26 Application of Ti Based Catalyst in Photocatalytic Oxidation of VOCs Technology
/ Yan Yu Jun Zhu
- 29 Adaptability and Challenge of Heat-tube Phase Change Technology in Thermal Control of Space Environment
/ Wenfeng Jiang
- 32 Research on the Preparation Process of Beverage Grade Ortho Aminobenzamide
/ Huayi Huang Qing Hu Yaning Miao Enqin Rong
- 36 Research on the Application of Carbon Fiber Reinforced Composites in Aerospace
/ Fenglei Sun
- 39 Structure and Properties of Laser 3D Printing High Strength and High Toughness TC4 Alloy
/ Shuangquan Guo Shuguang Li Wei Zhang Xuanxuan Huang Yi Wang
- 42 Technological Innovation and Challenges of Micron and Nanoscale Products
/ Yong Wan Binglin Zou
- 45 Shape-Controlled Synthesis and Characterization of Nickel Selenides Octahydra
/ Kai Zeng Piao Liu
- 48 Analysis and Improvement of Flame Retardant Properties of Aramid Rubber Composite Materials
/ Zhou Tong Peng Lu
- 51 Research on 1700V High Performance GaN HEMT Power Switching Devices
/ Xing Chen
- 55 Application Practice of High Strength Steel in Lightweight Design of Automobile Chassis
/ Lili Zhu
- 58 Application and Performance Analysis of Refined Steel in Large Span Glass Curtain Wall
/ Peng Yu
- 61 Discussion on the Nondestructive Testing Technology of Commercial Mortar in Shanghai, China
/ Yanglin Yang
- 65 Industrial Practice of Technological Transformation of Zinc Secondary Resource Production Process for Electric Zinc Production
/ Fanshun Zeng Bingzhou Huang Weiping Jiang

Research on the Application of Intelligent Chemical Materials under Natural Gas Leakage Events

Yan Xin

Yantai PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd., Yantai, Shandong, 264600, China

Abstract

The paper takes natural gas leakage accidents as the research background and focuses on the application of intelligent materials in the field of natural gas leakage monitoring. Firstly, the hazards of natural gas leakage events are discussed to enhance people's understanding of the impact of natural gas leakage events. Then, the advantages of applying intelligent chemical materials in the context of natural gas leakage events are introduced. Finally, methods for applying intelligent chemical materials in the context of natural gas leakage events are listed, and relevant research suggestions are proposed. The paper aims to deepen people's understanding of the application of intelligent materials in natural gas leakage accidents, and provide reference for researchers in related fields to promote the application and development of intelligent chemical materials in natural gas leakage detection, making positive contributions to energy security and environmental protection.

Keywords

natural gas leakage ; intelligent chemical materials; application research

天然气泄漏事件下的智能化学材料应用研究

辛燕

烟台中石油昆仑燃气有限公司，中国·山东 烟台 264600

摘 要

论文以天然气泄漏事故为研究背景，围绕智能材料在天然气泄漏监测领域的应用展开研究。首先对天然气泄漏事件的危害展开论述，以增强人们对天然气泄漏事件影响的认识，然后将智能化学材料在天然气泄漏事件背景下应用的优势进行了介绍，最后列出了在天然气泄漏事件背景下应用智能化学材料的方法，提出相关研究建议。论文旨在加深人们对智能材料在天然气泄漏事故中的应用认识，并为相关领域的研究者提供借鉴，以促进智能化学材料在天然气泄漏检测中的应用与发展，为能源安全与环境保护作出积极贡献。

关键词

天然气泄漏；智能化学材料；应用研究

1 引言

随着天然气泄漏事故的发生，智能材料在化工领域的应用越来越受到人们的重视。传统的天然气泄漏监测手段主要依赖于人工巡检和固定检测设备，存在检测精度低、响应速度慢、适用范围窄等不足。智能化学材料因其高灵敏度、快速响应和可视化检测等优点，所以在天然气泄漏检测领域具有广阔的应用前景。

2 天然气泄漏事件的危害

2.1 可引发火灾或爆炸

如果泄漏源得不到有效控制，以甲烷为代表的可燃气体将迅速向周围扩散，形成一团可燃气体云。这些可燃气体一旦遇到火源，便会立刻燃烧起来，迅速蔓延开来，造成巨大的损失。但若发生在密闭空间，则可燃气体积聚密度越大，发生火灾、爆炸的威力就越大，因此采取相应的预防措施就显得尤为重要^[1]。一旦发生火灾、爆炸事故，将对周边人员及财产造成重大损失，火灾造成的后果有很多，如烧伤、中毒、窒息等，严重者可危及生命。至于爆炸，那就是瞬间的毁灭，不单单是人员的伤亡，还有周围的建筑与设施，都会对整个社会造成难以估量的损失。

2.2 会对环境造成污染

甲烷的温室效应是二氧化碳的好几倍，所以尽管泄漏出来的气体很少，但是它带来的气候变化效应却不容忽视，

【作者简介】辛燕（1981-），女，中国山东济南人，博士，工程师，一级安全评价师，从事天然气安全生产管理、QHSE管理、企业EAP研究。

气候变暖将导致极端气候事件频发,影响生态平衡,加剧自然灾害。大气中甲烷氧化生成臭氧,严重影响植物生长及土壤质量,同时泄漏出的有害气体进入地下水或水中,污染水源,危害人体健康及生态平衡。

2.3 对周边地下管道和设施造成损害

天然气中含有硫化氢等腐蚀性物质,当其泄漏至地下管线附近时,将加速管线金属腐蚀速率,造成管壁减薄、裂纹,甚至破裂,引发更严重的泄漏事故,这类管线的破坏,不仅影响了天然气的正常输送,而且有可能引发爆炸,危及周围建筑及人身安全。天然气泄漏后,有毒气体会渗入地下设施,引发火灾、爆炸等重大事故,对城市供水、供电、通信等基础设施的正常运转产生重大影响。此外地下设施一旦受到破坏,其维修与维修费用将十分庞大,对城市经济与社会发展造成极大压力,而且地下管线的破坏会引起地表塌陷,影响道路交通及建筑物的稳定;地下设施遭到破坏,会使城市公共服务设施瘫痪,对居民生活造成严重影响。

3 智能化学材料在天然气泄漏事件背景下应用的优势

3.1 快速检测出天然气泄漏,及时发出警报

在天然气泄漏事故中,具有快速检测功能的化工材料具有十分重要的意义,利用气敏材料,可对煤气中有害气体浓度的变化进行实时监测,并在检测到异常时及时报警。这一快速检测技术,有助于企业及时发现并处理潜在的泄漏隐患,避免事故发生,保证生产及员工的安全。

3.2 短时间内封堵漏点,避免泄漏问题加重

智能化工材料的封堵功能在应急处置过程中发挥着重要作用,一旦泄漏发生,利用具有快速封堵功能的材料,可快速封堵泄漏点,有效地控制泄漏的蔓延,避免造成更大的损失,该方法能够在较短的时间内对泄漏点进行封堵,有效地降低了泄漏对环境、设备安全的影响。

3.3 智能化学材料有修复能力,可减少事故造成的损失

智能化工材料具有自修复功能,可快速堵塞泄漏点,降低泄漏事故带来的损失。一旦发生气体泄漏,智能化工材料能够快速反应,形成保护层或阻塞物,防止气体进一步泄漏,防止事故扩大,这种自愈能力,既可降低事故所造成的经济损失,又可保护环境及人身安全^[2]。

3.4 可配合智能监控系统,实现远程监控

智能化工材料可与智能监测系统相结合,实现远程监测,提高应急响应效率,智能化工材料与智能监测系统相结合,可实现对煤气泄漏的实时监控,并及时向监控中心或操作人员发出报警信号。远程监测系统的应用,可提高事故响应速度、缩短处理时间、减少人为干预、降低事故风险。

3.5 降低人为操作失误风险,提高天然气安全性

传统的维修、维修等作业方式存在人为差错风险,智能化工材料的自动化特征可减少人为干预,减少人为错误的发生,在保证天然气设备安全的前提下,能够减少事故发生的概率,保证人员及设备的安全。

4 在天然气泄漏事件背景下应用智能化学材料的方法

4.1 气体传感器材料在天然气中的应用

气敏材料是检测天然气中有害气体含量的重要手段,硫化氢、甲烷等有毒气体泄漏会引发重大安全事故,及时、准确地检测这些气体浓度对事故的发生至关重要。气敏材料的选择是非常重要的,它要求敏感材料对目标物具有很高的选择性和灵敏性,能够检测硫化氢、甲烷等有害气体,一般选用金属氧化物、半导体或有机物作为敏感层,该材料可通过改变气体浓度使其发生特殊的物理化学变化,从而实现目标物的探测。该传感器一般包括一敏感层、一电极、一支持基底等。在此基础上,要对各部件进行合理的结构设计,提高传感器的响应速度、灵敏度及稳定性。可以从纳米结构、表面改性等方面对传感器性能进行优化,以提高其对目标物的探测能力。在制备过程中,必须对其组成、形貌及结构进行控制,以保证其性能满足要求,同时利用 X-射线衍射、扫描电镜等多种表征手段对其晶体结构、表面形貌等进行表征,为优化传感器性能提供依据。

4.2 防腐涂料在天然气中的应用

防腐涂层能有效防止天然气中腐蚀性组分对设备表面的损伤,防腐涂层的合理设计与应用,不仅能有效地延长设备寿命,而且能保证管线及设备的安全稳定运行。防腐涂料在使用时,其抗腐蚀性组分的能力直接受到涂料成分的影响。传统防腐涂料主要采用有机溶剂型、水基型及粉末型,其中有机溶剂型防腐涂料以其优异的耐蚀性和附着力得到了广泛的应用。然而随着环境保护意识的提高,水性防腐涂料以其不含溶剂,无毒害,无挥发性有机化合物等优点,逐渐成为现代环境保护的主流。研究者们也在不断地探索新的防腐涂层,如纳米涂层、自修复涂层等,以提高涂层的防腐性能,并拓展其应用范围。涂层的均匀性,致密性,附着力等指标直接影响到涂层的防腐性能,因此通过对涂料表面处理、底漆选择及涂装方法的优化,可有效地提高涂料的质量与稳定性。

4.3 压力传感器材料在天然气中的应用

智能化工材料因其灵敏度高、稳定性好、抗腐蚀能力强等特点,可在恶劣环境中长时间稳定工作,常用的压力传感器材料有硅、聚合体、金属氧化物等,这类材料具有优异的力学性能及化学稳定性,可准确感知压力变化并将信号传递出去。采用合适的制备工艺与工艺,实现对材料结构与性能的调控,提高传感器的灵敏度与稳定性,采用磁控溅射沉

积、溶胶凝胶法等方法制备高性能薄膜敏感材料,实现对微小压力变化的高灵敏检测。当外界压力作用于传感器材料时,传感器会发生形变或电学特性改变,从而产生电信号输出。通过对传感器结构及信号采集系统的合理设计,能够准确地监测压力变化并及时报警。

4.4 过滤材料在天然气中的应用

在天然气泄漏事故中,采用智能材料作为过滤材料,可以有效地提高过滤效率、降低成本、降低环境污染。将纳米材料、功能聚合物等功能材料引入过滤材料中,可以有效地提高过滤效率和选择性。纳米材料的孔道结构可有效地吸附、分离杂质分子,实现天然气的精准过滤。功能聚合物材料具有特殊的亲/疏水性、吸附等特性,可以根据天然气组分的特点设计并调控其选择性过滤,通过对这些智能材料的合理设计与组合,可有效改善过滤材料性能、提高过滤效率、降低环境污染。或可采用等离子体修饰、化学改性等先进表面改性技术,提高过滤材料亲油、抗污染、抗高温等性能,经过表面修饰后,滤材具有良好的亲水性能,并能提高滤材对油脂等杂质的吸附能力;同时还能提高滤料的耐污染性,延长使用寿命,减少更换次数及费用。还可以通过化学改性等手段提高其耐高温性能,使其适应更加苛刻的工作环境,增强其安全性与稳定性,可提高过滤材料的效率、可靠性^[3]。还可以将过滤材料与传感技术结合,实现对过滤材料的智能化监控,可以将传感元件嵌入滤材中,可实时监控气体流量及质量,及时发现问题,及时调整,确保过滤效果。或可结合智能化学材料的响应特性,实现过滤材料的自清洁、自愈合等功能,进一步提升过滤材料的使用寿命与稳定性。或者可以将智能化工材料与传感技术相结合,对过滤材料进行智能化管理,提高其智能化程度及可靠性。

4.5 密封材料在天然气中的应用

在天然气泄漏防治中,应充分考虑材料的密封性、耐腐蚀性、耐高温及可靠性,目前高分子材料、橡胶材料,金属材料等都表现出了优异的性能,这类材料不仅具有良好的密封性,而且可以根据外界环境温度和压力的变化做出相应的反应,从而达到智能化控制的目的。另外,通过结构与工艺优化,提高密封性能与耐久性,保证复杂工况下的可靠工作,同时通过原子层沉积和纳米材料修饰等先进制备技术,有效提升密封性能,有效控制天然气泄漏。智能技术的引进,也使密封材料有了新的应用前景,通过将传感器、控制器等智能设备集成在一起,实现对密封材料状态的实时监控,及时发现并解决可能出现的隐患,提高系统的安全稳定运行,还可以借助人工智能、大数据等技术,预测并优化密封材料性能,为系统运行提供更可靠的保障。在实际应用中,

密封材料智能化也能实现对系统的远程监控、自动报警、提高应急处理能力,保证生产生活正常进行,通过对密封材料性能的优化,达到降低系统能耗、降低运行成本的目的。

4.6 防爆材料在天然气中的应用

防爆材料具有良好的防火、防爆和耐热性能,被广泛应用于现代化工和石油天然气开采等领域,它的主要作用是在发生火灾或爆炸时,利用吸收、分散、隔热等功能来降低火蔓延速度,起到保护设备及人员安全的作用。目前研究者们已经通过合成、修饰和复合等方法设计出了多种具有优异防爆性能的材料,比如将聚合物与无机材料复合,提高其耐热、耐腐蚀、阻燃等性能,在高温、高压等苛刻条件下仍能稳定存在。另外,纳米材料的应用将为新型防爆材料的开发提供新思路,在传统防爆材料中掺入纳米粒子,可有效改善吸热隔热性能,提高防爆效果。在天然气泄漏事故中,设计和应用防爆材料时,应综合考虑天然气的燃烧特点、环境温度和压力等因素,一般来讲,防火材料应具有良好的吸热性及热稳定性,以便在火灾或爆炸时快速吸收热量,减缓火灾蔓延。同时,结构的防爆设计也是十分重要的,如,用多孔材料结构增加表面积,增强对天然气的吸附能力,可有效降低泄漏气体对环境的危害。在天然气泄漏事故中,防爆材料由于受外界因素(如热、压等)的影响,会使材料的性能退化甚至失效,因此定期检查、维修防爆材料非常重要。通过红外热成像、声波仪等设备,全面检测隔爆材料的吸热性能和结构完整性,能够及时发现问题,及时维修更换,保证隔爆材料的长效使用。

5 结语

随着智能化工材料技术的不断发展与完善,智能化工材料在天然气泄漏事故中的应用将会越来越普及,这不仅能够更好地防范与管理天然气事故风险的发生,也能提升事故处置的效率与精度,为保障社会治安与人民生活品质做出更大贡献。在这一机遇与挑战并存的时代,开发新型智能化工材料是应对天然气泄漏事故的重要手段,但是新型智能化工材料的应用还需要不断完善和优化,这样才能不断推进智能化工新技术的应用,为构建安全、清洁、可持续发展作出贡献。

参考文献

- [1] 刘佳伟,戴彩丽,李琳.基于多重超分子作用的自修复凝胶研究进展及在油田领域应用前景[J].高分子通报,2022(10):9-15.
- [2] 孙澄宇,于军,鲁志海.基于“互联网+”的高校实验室智能管理信息系统构建[J].数字技术与应用,2021,39(10):129-131.
- [3] 姜苗苗,丁颖,徐丽慧,等.纳米银材料的合成及其应用研究进展[J].化工新型材料,2022,50(6):245-249.

Reflection on the Structural Design of Composite Wind Turbine Blades

Pengyu Cong

Jiangsu Xinyang New Material Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225100, China

Abstract

Blade is the core component of wind turbine, which can convert wind energy to mechanical energy. With the development of science and technology, composite materials play an important role in the structural design of wind turbine blades, which can further improve the aerodynamic performance of wind turbines, ensure the improvement of wind power generation, and increase the overall economic benefits of wind farms. Therefore, it is necessary to optimize the structural design of composite wind turbine blades to ensure the large-scale, lightweight and low-cost blades, and effectively play the advantages of composite materials in the structural design of wind turbine blades. This paper mainly analyzes the specific application in the structural design of zha wind turbine blade of composite material, and explores the optimization design scheme, so as to realize the optimization and upgrading of wind turbine in China.

Keywords

composite material; wind power blade; structural design

复合材料风电叶片结构设计相关思考

丛朋雨

江苏新扬新材料股份有限公司，中国 · 江苏 扬州 225100

摘 要

叶片是风力发电机的核心部件，可以将风能向机械能进行转化。随着科学技术的发展，复合材料在风电叶片结构设计中发挥了重要作用，可以进一步提高风力发电机气动性能，保障风力发电产量的提升，并增加整体风电场的经济效益。因此，需要对复合材料风电叶片结构设计进行优化，确保叶片的大型化、轻量化、低成本化，有效发挥复合材料在风电叶片结构设计中的优势作用。论文主要对复合材料在风电叶片结构设计中的具体应用进行分析，并探究优化设计方案，实现中国风力发电机的优化升级。

关键词

复合材料；风电叶片；结构设计

1 引言

在现代化科学技术发展背景下，中国提出了碳达峰、碳中和目标，加大对清洁能源的开发利用率，有效推动了风电行业的可持续发展，从而缓解生态环境恶化态势。在风力发电技术应用中，需要对复合材料风电叶片结构进行优化设计，从而实现风能的有效性吸收，同时实现风能向机械能的全面性转化，有效提升风力发电质量和效率。

2 复合材料在风电叶片结构设计中的应用类型

2.1 增强纤维

该类材料应用费用较低，性能较强，可以批量供应。主要有玻璃纤维、碳纤维等类型。其中玻璃纤维主要在蒙皮、

腹板、主梁上进行使用，可以强化叶片刚度，减少叶尖挠度变形问题；碳纤维比模量、比强度较高，可以强化叶片刚度和强度，满足超大型叶片轻质高强要求^[1]。

2.2 夹芯材料

该类材料可以提高叶片结构刚度和抗载能力，在蒙皮、腹板上继续拧使用，主要包含轻木、硬质泡沫等类型。轻木密度小、生长迅速，可以强化叶片结构刚度，但是吸胶量高，适用性不足；硬质泡沫类型较多，包括聚氯乙烯（PVC）、高性能聚氨酯（HPE）等。

2.3 基体树脂

该材料具有良好的粘接、支持、保护、传递载荷的功能，常用的基体树脂有不饱和聚酯、环氧类热固性树脂。其中热固性树脂有环氧灌注、手糊树脂，前者主要在叶片腹板、主梁、壳体部位使用，强化成型效果；后者主要在叶片前后缘、腹板位置使用，能够粘接补强。随着科学技术的发展，聚氨

【作者简介】丛朋雨（1997-），男，中国辽宁省盖州人，本科，助理工程师，从事复合材料结构设计研究。

酯、双环戊二烯树脂被广泛应用,具有良好的灌注优势,固化快,且黏度低。此外,还有热塑性树脂,能够循环使用,可熔融性高,可以降低叶片制造成本,是未来叶片发展重要方向。

2.4 结构胶

该类材料可以对叶片蒙皮和腹板进行有效性粘接,发挥主承力结构的作用,在具体应用中,需要精准计算各项参数,减少误差。常用的材料有环氧型结构胶、聚氨酯型结构胶。前者适用性强,强韧性、固化收缩率低,可以提高叶片剪切强度和剥离强度^[2]。

3 复合材料风电叶片结构设计类型

3.1 单壁结构

单壁结构就是在叶片设计中,利用单层复合材料进行制造,该类型的结构较为简单,且费用不高。但刚度较低,很可能在使用过程中出现振动、疲劳破坏等现象。

3.2 双壁结构

即在叶片结构设计中利用两层复合材料进行设计和制造,且要在两层复合材料之间填充泡沫、蜂窝结构等轻质材料。该类结构的刚度、强度较好,能够对振动、疲劳破坏进行有效抑制^[3]。

3.3 混合结构

该类结构应用中,需要对两种及两种以上的材料进行组合设计和制造,其组合方式有玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料、木材等。该结构形式可以对不同材料的优点进行综合发挥,强化叶片整体性能的提升。

4 复合材料风电叶片结构优化设计

4.1 优化设计方法

在对复合材料风力发电机叶片结构进行设计过程中,需要结合风力发电项目的具体特点,对叶片材料、载荷、剖面结构等进行优化设计,持续性优化叶片结构,才能保障风力发电机的高质量运行,为风力发电事业的可持续发展奠定良好基础。

4.2 优化设计模型

叶片材料选择:要对叶片材料的物理特性、安全性等进行全面性分析,确保叶片能够对各种复杂环境进行良好适应。当前在叶片结构设计中常用的复合材料类型有玻璃纤维增强塑料和碳纤维增强塑料等。前者设计性强,质量轻,成本较低,具有良好的性价比,但强度和刚度不足;后者质量较轻,能够实现叶片的轻量化设计,刚度和强度较好,但是成本较高。在具体选择中,要结合设计要求、成本等因素进行优化选择^[4]。

叶片剖面结构设计:要结合具体情况,精准计算剖面结构相关参数,明确其具体厚度、弦长、截面形状、扭角等,从而提升叶片捕风效率,并强化气动性能和噪声控制效果,保障整体结构稳定性,确保剖面结构能够对各种几何特性进

行灵活性适应。其中常见的叶片翼型剖面如图1所示。

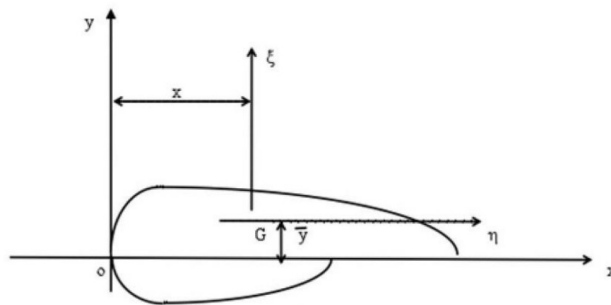


图1 翼型剖面图

铺层设计:铺层设计是风力发电机结构设计的核心环节,且铺层方式不同,对叶片的运行效果产生差异化的影响,因此需要结合实际情况,优化铺层结构设计方案,确保结构设计的严谨性和标准化^[5]。其中叶片主要包含外壳、主梁、夹芯等构件,主梁为主要的承载结构,其截面形状、布局与叶片强度、刚度息息相关;夹芯结构直接影响叶片剪切性能和稳定性;外壳可以提升内部结构承受风载荷的能力,保障结构稳定性。在具体的铺层设计中,需要通过有限元分析方式,精准模拟和分析叶片结构,精准定位结构薄弱点,并提出针对性的整改措施;此外还需要通过拓扑优化、形状优化等方法,优化叶片结构布局,保障整体叶片性能的全面提升。

叶片载荷设计:风力发电机叶片载荷主要有气动载荷、重力载荷、离心力载荷等,要对风力发电机所处环境特点进行分析,实现叶片载荷的针对性设计,强化承受能力。尤其要对叶片连接、支撑结构进行优化设计,确保能够对外部载荷进行良好的承载。其中包含叶片与轮毂连接、叶片内部支撑结构等的设计。在连接设计中,主要包含螺栓连接、胶接等方式,需要保障连接强度和耐久性,避免出现松动、断裂问题,保障叶片正常旋转;在支撑结构设计中,要对风载荷变形、振动问题进行分析,优化支撑结构设计,强化叶片动态性能,有效控制振动、噪声问题。

蒙皮设计:在离心载荷、重力载荷、气动载荷影响下,叶片在不同位置会出现不同变化,通常情况下,针对长度为12.5m的叶片来讲,其应力主要集中在0~9m处,因此要做好这些方位内的蒙皮优化工作,保障叶片设计质量^[6]。

4.3 优化设计程序

在当前风力发电项目研究和实施过程中,需要有效提升风能利用率,才能强化风能发电质量,保障风力发电事业的可持续发展。其中,发电机叶片设计与风力发电机的捕风能力息息相关。因此,需要结合实际情况,对发电机叶片进行优化设计,尤其要对复合材料进行合理应用,并实现结构设计的科学性与合理性,才能进一步提高整体叶片设计质量,强化其捕风能力,保障发电效率的提升。在具体的叶片设计中,需要优化设计程序,并精准掌握风力发电机的年能量输出情况,且要对风能转换系统进行优化控制,防止发生

能量损失问题,保障叶片具有较高的吸收率,提高风能利用率,保障风力发电系统的高质量、高效率运行。

4.4 制造工艺控制

在对复合材料风电叶片结构进行设计时,要做好叶片的静强度分析、模态分析、稳定分析等内容,对各项设计、制造参数进行优化设计和精准计算,从而保障叶片制造质量。此外,要选择合适的制造工艺,结合材料特性、产品形状、尺寸、生产效率等要素,选择合适的制造工艺,如手糊成型、真空袋压成型、预浸料模压成型等。同时要制定可行性的质控体系,严格检测原材料、成品质量,并加大生产过程的监控力度,保障生产操作规范性,有效控制生产成本^[7]。

4.5 受力特点分析

①弯曲力,主要体现在叶片根部,容易引起叶片弯曲变形、应力集中等问题,因此要强化叶片弯曲刚度、强度设计。②扭转力,会引起叶片扭转变形问题,主要集中在叶片中部位置,需要提升叶片的扭转刚度、强度设计,减少扭转变形问题,并强化叶片材料、结构设计质量。③压缩力和拉伸力,主要集中在叶片前缘、后缘部位,会引起叶片应力集中、变形问题,需要强化叶片抗压强度、抗拉强度设计。④疲劳载荷,主要来自风力变化、叶片自重引起的振动,会引起叶片疲劳破坏问题,要优化叶片疲劳寿命设计,延长使用寿命,保障叶片可靠性。

5 复合材料风电叶片结构设计质量检测方法

5.1 敲击检测技术

该技术应用中,主要是敲击复合材料叶片结构,通过声音辨别,对叶片结构是否受损进行判断。该技术主要对结构脱胶、分层损伤等问题进行检测,方便操作。在敲击检测中,正常的叶片结构会发出清晰的声音;一旦结构中存在脱落问题,会发生强烈沉闷的声音。其中主要的敲击设备为小锤,也可以利用金属、木质小锤为主。还可以在智能化技术支持下,进行数字化敲打,从而对叶片结构缺陷进行高效性检测。但是需要在十分安静的环境中进行使用^[8]。

5.2 超声波检测技术

该技术应用中,即通过专业设备向被测物体发射超声波,使其穿透物体结构,并对反射回来的信号进行分析,以便对叶片结构性能进行判断。该技术主要在前期结构试验环节中进行使用,且具有较强的灵活性,方便操作,不会对叶片结构造成破坏,能够对复合材料结构进行动态检测,应用范围广泛。

5.3 目测检测技术

该方法可以对复合材料叶片结构的完整性进行检测,这是结构质量的最佳方法,其中影响因素为外部因素、检测条件等,存在很大的不足之处。在具体应用中,可以使用照明工具联合目视进行检测,明确结构表面的裂纹等缺陷问题。

5.4 X射线检测技术

X射线属于电磁波,具有较强的穿透力,可以穿透被测物体,并吸收能量,其强度逐渐衰减。一旦风电叶片复合材料中存在裂纹、杂质等病害问题,其吸收性能会发生改变。通过该技术能够精准检测叶片结构质量,保障叶片安全。

6 结语

综上所述,随着社会经济的发展,风力发电事业高速发展,同时对风力发电机叶片结构设计质量提出了更高的要求。在现代化科学技术支持下,复合材料在风电叶片结构设计中得到了有效应用,尤其是玻璃纤维和碳纤维等增强材料的优化应用,能力实现风电叶片的轻量化设计,强化整体叶片结构的刚度和强度,保障叶片稳定性、可靠性运行,为风电事业的可持续发展奠定良好的基础。在未来发展中,需要对复合材料风电叶片结构设计向自动化、数字化、整体化方向发展,在自动铺装技术、自动铺设纤维技术、拉挤技术的支持下,实现叶片结构设计的自动化和高效化。

参考文献

- [1] 李成良,杨超,倪爱清,等.复合材料在大型风电叶片上的应用与发展[J].复合材料学报,2023,40(3):1274-1284.
- [2] 张鑫桂.风电叶片复合材料主梁结构的多尺度可靠性优化设计研究[D].上海:东华大学,2023.
- [3] 曾旭升.大型复合材料风电叶片模具整体设计与制造技术[J].区域治理,2018(11):222.
- [4] 秦志文.大型分段式复合材料风电叶片结构与性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [5] 张朋.大型复合材料风电叶片真空灌注缺陷研究与解决[J].玻璃纤维,2023(2):18-22+27.
- [6] 杨海如,马祥禹,喻国铭,等.碳纤维复合材料风力发电机叶片振动特性研究[J].玻璃钢/复合材料,2018(9):70-74.
- [7] 吴彦波,黄有慧,张述强,等.后缘阻胶海绵在复合材料风电叶片上的应用效果研究[J].天津科技,2019,46(7):3.
- [8] 柴红梅,袁凌,李颖,等.复合材料风电叶片先进制造技术研究现状[J].玻璃钢/复合材料,2019(2):6.

Numerical Simulation of Temperature Field and Flow Field in 6061 Aluminum Alloy Laser Welding

Qian Liang^{1,2} Jiangtao Cao¹ Li Xia¹

1. China Electronics Technology Group Corporation 54th Research Institute, Shijiazhuang, Hebei, 050081, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang, 150001, China

Abstract

To investigate the molten pool flow behavior during laser welding of aluminum alloys, a three-dimensional transient mass and heat transfer numerical model was established to analyze the temperature field and flow field in laser welding of 6061 aluminum alloys. When the laser thermal efficiency was set to 60%, the weldment of 6061 aluminum alloy of 4-mm-thick could not be penetrated by the laser welding with the power of 2500W and 3500W. While the weldment could be penetrated when the laser power was 4500W. Before the weldment penetration, there were three flow trends in the molten pool, downward flow at the bottom of the keyhole, clockwise downward flow at the front of the keyhole, and counterclockwise flow at the back of the keyhole. After the weldment penetration, there were four flow trends in the molten pool, downward flow at the bottom of the keyhole, clockwise downward flow at the front of the keyhole, counterclockwise flow at the back of the keyhole, and upward flow at the bottom of the molten pool.

Keywords

6061 aluminum alloy; laser welding; temperature field; flow field

6061 铝合金激光焊温度场流场数值模拟

梁谦^{1,2} 曹江涛¹ 夏立¹

1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 中国·河北 石家庄 050081

2. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要

为了研究铝合金激光焊接过程中的熔池流动行为, 建立了三维瞬态传质传热数值模型, 对6061铝合金激光焊温度场-流场进行分析。当激光热效率设定为60%时, 功率2500W和3500W的激光焊不能熔透4mm厚的6061铝合金焊件, 而激光功率为4500W时可以使焊件熔透。焊件熔透前, 熔池形成三种流动趋势, 匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动以及匙孔后部的逆时针流动。焊件熔透后熔池主要存在四种流动趋势, 匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动、匙孔后部的逆时针涡流以及焊件底部熔透处的向上流动。

关键词

6061铝合金; 激光焊接; 温度场; 流场

1 引言

铝合金具有比强度高、热稳定性好、耐腐蚀性强等优点, 在保证强度要求的同时可以减轻装备重量, 是航空航天领域中重要的轻量化结构材料^[1-3]。6061 铝合金是一种典型的 Al-Mg-Si 系中等强度铝合金, 因其具有优良的耐腐蚀性被广泛应用于航空航天领域^[4,5]。激光焊由于能量密度集中、热输入低、热影响区小等优势可以获得高质量的焊接接头, 在铝合金焊接中具有诸多优势。但由于铝合金熔点低、热导率大、散热快等特点, 极易在焊接过程中产生气孔、裂纹等

缺陷, 这降低了其在重要领域应用的进一步扩大^[4]。

考虑到焊接质量与焊接过程中的热力学行为密切相关。由于激光焊过程中匙孔和熔池流动的动态变化特点, 采用试验手段难以准确地观察熔池内的热力学行为, 需要花费大量成本。随着数值模拟手段的日渐成熟, 越来越多的研究学者采用数值模拟的方法来研究分析焊接过程中的热力学行为。黄立进等^[6]建立了铝合金激光焊三维数值模型, 研究了铝合金激光焊中匙孔行为和气孔形成机理。康悦等^[4]对 6061 铝合金激光焊温度场和应力场进行数值模拟研究, 为工艺试验提供参数参考。

论文采用峰值指数递增—锥体热源模型, 建立了三维瞬态传质传热数值模型, 对 6061 铝合金激光焊接过程中的温度场 - 流场进行数值模拟。分析不同激光功率下的温度场

【作者简介】梁谦 (1990—), 男, 中国河北井陉人, 硕士, 工程师, 从事电子装备工艺设计及动力学分析研究。

分布特征,以及焊件熔透前后的熔池流动行为,对铝合金激光焊接工艺优化具有重要意义。

2 数学模型

2.1 计算域模型及网格划分

图 1 为计算域模型,模型尺寸为 $35\text{mm} \times 16\text{mm} \times 8\text{mm}$ 。计算域被划分为流体区域和固体区域,将远离焊缝的区域设置为固体区域,该区域只进行热传导方程的求解,流体区域则进行全部方程的求解。基板厚度为 4mm ,宽度为 16mm ,其中固体区域宽度为 4mm 。考虑到大功率激光可能会使基板焊穿以及激光的热力作用使熔融金属挤压到基板表面,因此在基板上下分别设置 2mm 厚的空气层。对计算域进行六面体网格划分,靠近焊缝的流体区域网格尺寸为 0.2mm ,为了减少计算时间,固体区域网格尺寸为 0.4mm ,

网格划分如图 2 所示。

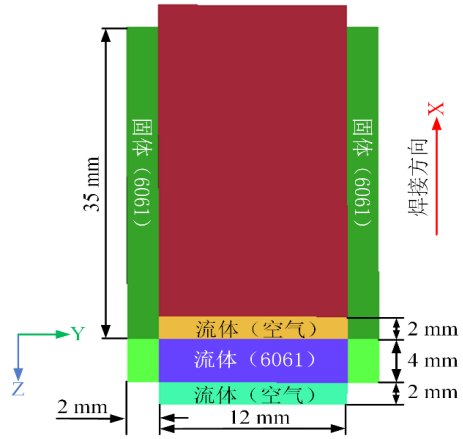


图 1 计算域模型

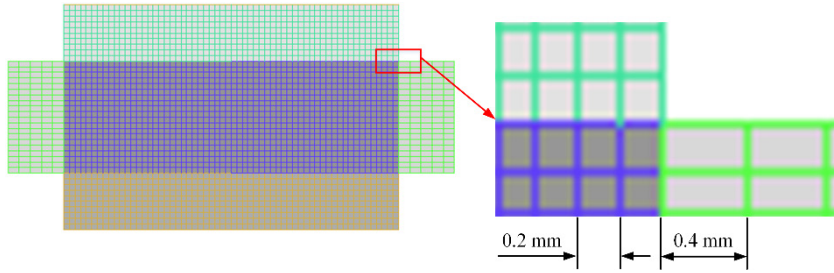


图 2 网格划分

2.2 材料属性

焊接材料为 6061-T6 铝合金,在焊接过程中,材料的热物性参数会随温度发生变化。为了准确模拟焊接温度场一流场,需要考虑材料性能随温度的变化。6061-T6 铝合金的热导率、比热容、密度随温度的变化数值如表 1 所示^[7]。

表 1 6061 铝合金的热物性参数

温度 / K	热导率 / (J/m · K)	比热容 / (J/kg · K)	密度 / (kg/m ³)
300	155	900	2700
400	158.5	1000	2650
500	162.5	1020	2620
600	163.5	1030	2600
700	167.5	1070	2500
800	169.5	1100	2400
900	172.5	1100	2300
1000	174.5	1100	2200
1100	178.5	1100	2100
1200	182	1100	2000

2.3 激光热源模型

热源模型的选取和加载对于激光焊接数值模拟来说是最关键的。对于激光深熔焊,在激光能量的作用下形成匙孔来加热工件,激光在匙孔内发生多次反射,受 Fresnel 吸收影响,匙孔下部能量密度较大^[8]。根据激光深熔焊的特征,论文采用峰值指数递增—锥体热源模型来描述激光能量的分布。热源作用半径沿厚度方向呈线性递减,热源的峰值热

流密度在焊件深度方向指数递增、在任意深度截面内热源的热流密度呈高斯分布^[9],其热流密度分布函数为:

$$q = Q_0 \exp\left(\frac{\ln(\chi)}{z_i - z_e}(z - z_e)\right) \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (1)$$

$$Q_0 = \frac{3Q_l \ln(\chi)}{\pi(1-e^{-3})(z_i - z_e) \left\{ r_e^2 - r_i^2 - 2 \frac{r_i - r_e}{\ln(\chi)} \left[r_e - r_i \chi - \frac{r_i - r_e}{\ln(\chi)}(1 - \chi) \right] \right\}} \quad (2)$$

其中, χ 为热源上下表面热流峰值比例系数; Q_l 为激光有效热输入; $r_0(z)$ 为热源的分布参数; z_e 和 z_i 分别为热源上、下表面 z 坐标; r_e 和 r_i 分别为热源上、下表面半径。

3 结果与讨论

激光功率对焊接温度影响较大^[4],其功率大小直接影响到熔池形状和温度场分布^[7],并对最终焊接质量起重要作用。为确定功率对激光焊接的影响,保持焊接速度恒定为 1.8m/min ,取激光功率为 2500W 、 3500W 和 4500W 进行 4mm 厚的 6061 铝合金激光自熔焊数值模拟,由于铝合金对激光强烈的反射作用,激光热效率设定为 60% ^[10],并选取使焊件熔透的激光功率进行温度场一流场数值分析。

3.1 不同激光功率下纵截面温度场分布

图 3 为不同激光功率下两个时刻纵截面的温度场分布。为了更直观地展示熔池区域,设定温度大于液相线 (928K) 的区域用红色表示。焊接初期,在激光能量作用下开始形成

熔池, 由于此时热量积累较少, 匙孔深度和熔池深度较小, 如图 3 (a1)、(b1)、(c1) 所示。随着焊接进行, 同功率下的匙孔深度和熔池深度不断增大, 熔池尺寸也逐渐趋于稳定, 如图 3 (a2)、(b2)、(c2) 所示。当焊接时间为 0.88s 时, 对比 2500W 和 4500W 功率下的纵截面温度场, 可以观察到, 2500W 功率下的匙孔深度仅约为 0.5mm, 而 4500W 功率下的匙孔深度约为 2.5mm, 如图 3 (a2) 和图 3 (c2) 所示。随着激光功率的增加, 热输入量增加, 匙孔深度和熔池范围随之增加。熔池底部热量主要来自匙孔, 匙孔深度的增加将更多热量传递到熔池底部, 必将带动熔池深度的增加。通过模拟不同激光功率对温度场的影响可以得出, 激光功率为 2500W 和 3500W 时很难使焊件熔透。当激光功率为 4500W 时, 可以观察到焊件被熔透, 熔池尺寸在熔透后趋于稳定, 如图 3 (c2) 所示。

3.2 熔透功率下的焊件上下表面温度场分布

基于前文对比的不同功率下纵截面温度场分布, 选取 4500W 激光功率进行熔透焊接过程数值分析。图 4 为不同时刻焊件上表面和下表面的温度场计算结果。从图 4 (a) 可以看到, 由于激光作用于焊件, 焊件上表面熔池区域较小, 同时刻的焊件下表面峰值温度约为 730K, 远低于液相线温度。当焊接时间为 0.35s 时, 可以观察到焊件背面峰值温度已超过 928K, 此时焊件被熔透, 如图 4 (b) 所示。随着焊接进一步进行, 上表面熔池尺寸趋于稳定, 熔池温度场前部

和后部稍窄、中部稍宽。熔透后的焊件下表面熔池呈明显的椭圆形, 熔池尺寸小于上表面熔池尺寸, 如图 4 (c) 所示。

3.3 熔透功率下的熔池纵截面温度场一流场

图 5 为 4500W 功率下不同焊接时刻熔池纵截面温度场-流场计算结果。如图 5 (a) 所示, 焊接初期, 在蒸发反力的作用下熔融金属被挤压形成凹坑^[6], 凹坑底部熔融金属表现为向下流动, 促进匙孔的形成。蒸发反力是激光匙孔形成的主要驱动力, 随着焊接进行, 在蒸发反力的作用下凹坑不断扩大, 匙孔形成, 如图 5 (b) 所示。焊件被熔透前, 熔池形成三种流动趋势, 匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动以及匙孔后部的逆时针流动, 这种流动方式有助于熔融金属和能量向熔池底部和后部传递, 如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示。随着热量不断积累, 熔池区域逐渐增大, 0.35s 时观察到焊件被熔透。由于匙孔前壁的小型顺时针涡流和匙孔后部的逆时针涡流, 使得匙孔上部前后壁熔融金属被推动形成“凸起”^[6], 焊件底部熔透处的熔融金属表现为向上流动, 如图 5 (c) 所示。匙孔前后壁在涡流的影响下, 凸起进一步扩大, 最终在匙孔上部前后壁相连形成金属液桥, 如图 5 (d) 所示。之后在蒸发反力的作用下, 匙孔底部又重新打开, 熔池尺寸趋于稳定, 如图 5 (e) 和图 5 (f) 所示。焊件熔透后熔池主要存在四种流动趋势, 匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动、匙孔后部的逆时针涡流以及焊件底部熔透处的向上流动。

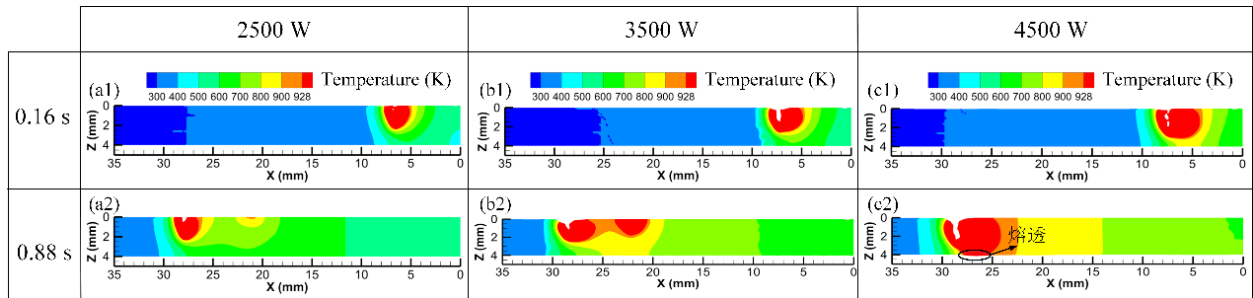


图 3 不同激光功率下两个时刻的纵截面温度场分布

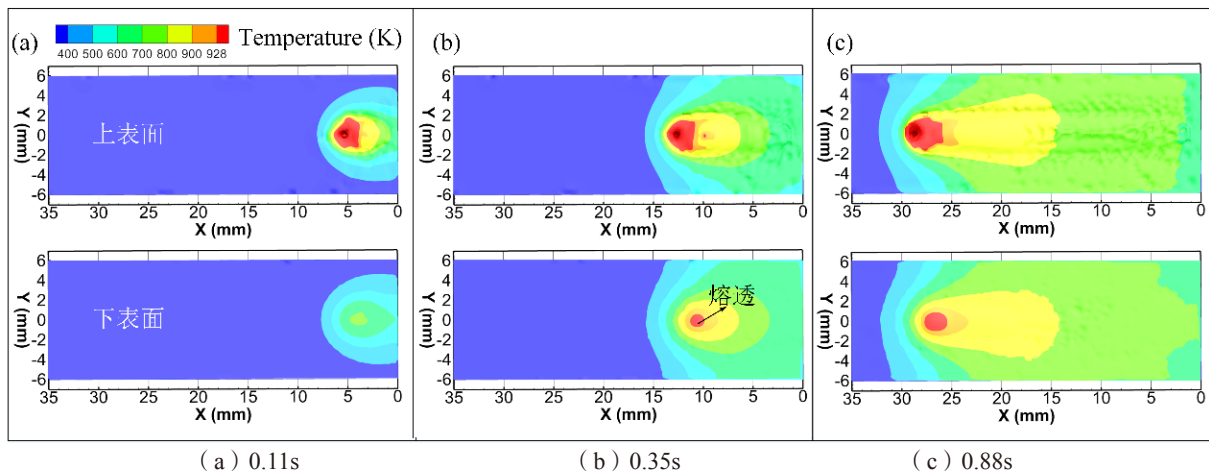


图 4 4500W 激光功率下不同时刻上下表面温度场分布

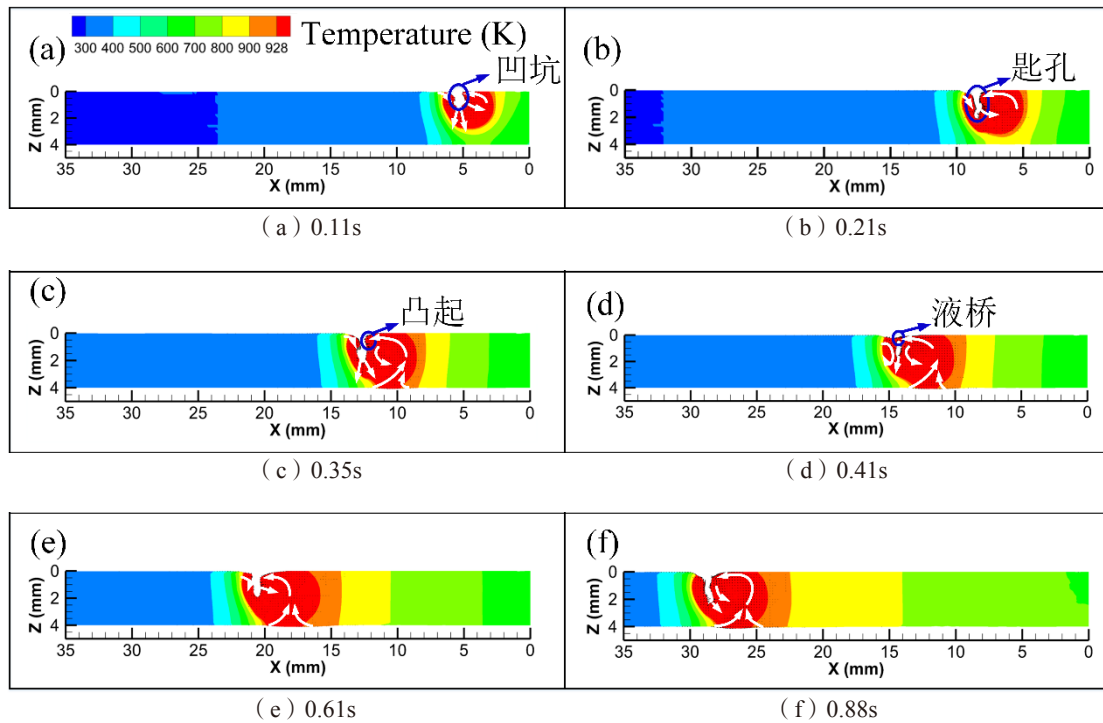


图 5 4500 W 激光功率下不同时刻纵截面温度场—流场分布

4 结论

建立三维瞬态传质传热数值模型,研究了不同激光功率下 4mm 厚 6061 铝合金激光焊温度场,针对熔透功率下的激光焊温度场—流场进行研究,基于数值模拟结果,得出结论如下:

①保持其他焊接参数一致,选取激光功率分别为 2500W、3500W 和 4500W 进行 6061 铝合金激光焊温度场数值分析。随着激光功率的增加,匙孔深度和熔池深度明显增加。功率为 2500W 和 3500W 的激光焊难以将 4mm 厚的 6061 铝合金熔透,而功率为 4500W 的激光焊可以熔透。

②分析了熔透功率(4500W)下的焊件上下表面温度场分布。熔透后的上表面熔池尺寸趋于稳定,熔池温度场前部和后部稍窄、中部稍宽;焊件下表面熔池呈明显的椭圆形,熔池尺寸小于上表面熔池尺寸。

③分析了熔透功率(4500W)下的熔池纵截面温度场—流场分布。焊件熔透前,熔池形成三种流动趋势,匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动以及匙孔后部的逆时针流动。焊件熔透后熔池主要存在四种流动趋势,匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动、匙孔后部的逆时针涡流以及焊件底部熔透处的向上流动。

参考文献

- [1] 许芙蓉,杨立军,王金杰.6061铝合金薄板激光焊工艺试验研究[J].兰州石化职业技术大学学报,2023,23(3):11-13.
- [2] 杨帆,陈芙蓉.A-UIT处理对7075铝合金焊接应力影响的数值模拟[J].焊接学报,2021,42(12):91-96.
- [3] 马俊雅,李静静.航空航天用高强铝合金搅拌摩擦焊的研究现状与发展[J].材料研究与应用,2023,17(1):79-86.
- [4] 康悦,占小红,封小松,等.6061铝合金激光焊温度场与应力场数值模拟研究[J].上海航天(中英文),2020,37(6):58-63+68.
- [5] 李京.高速列车6061铝合金激光焊接工艺研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2015.
- [6] 黄立进,刘鹏,朱苏,等.铝合金激光焊气孔数值模拟[J].造船技术,2020(2):1-6+12.
- [7] 穆绍帅.6061-T6中厚板铝合金激光焊接工艺参数研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [8] 胥国祥,郭庆虎,胡庆贤,等.中厚板铝合金光纤激光+MIG复合热源焊残余应力的数值分析[J].机械工程学报,2018,54(2):77-83.
- [9] 姜自立.小电流脉冲GMA辅助大功率固体激光焊接过程数值分析[D].济南:山东大学,2020.
- [10] 朱桢.6061/5182异种铝合金激光焊接接头组织与性能研究[D].苏州:苏州大学,2022.

Application and Performance Optimization of Multifunctional Materials in Non-standard Equipment Design

Haodi Fang Chongyang Wang Weixin Wang*

Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract

This paper mainly focuses on the multifunctional materials in the design of non-standard equipment. Non-standard equipment design has wide application prospects, and multifunctional materials play an important role in non-standard equipment design. First, this project will analyze the types and properties of multifunctional materials in detail. Multifunctional materials have high strength, high temperature resistance and other corrosion resistance. Understanding and mastering this feature is the key to understanding the multifunctional materials in the design of non-standard equipment. Secondly, the method and effect of multifunctional materials applied to the design of non-standard parts are studied systematically. This project intends to deeply study the application of multifunctional materials in non-standard parts design from three aspects of material selection, structural design and processing process. On this basis, this project will provide new ideas and new methods for the design of non-standard parts. Finally, we will combine practical work experience and scientific research achievements, and analyze and verify actual cases to form a complete set of non-standard equipment design methods and processes, promoting the development and progress of non-standard equipment design technology.

Keywords

multi-functional materials; non-standard equipment; design; performance optimization; application prospect

多功能材料在非标装备设计中的应用与性能优化探究

房浩弟 王崇阳 王卫鑫*

天津航天长征火箭制造有限公司, 中国 · 天津 300000

摘 要

论文主要针对非标设备设计中的多功能材料进行了研究。非标设备设计具有广泛的应用前景, 多功能材料在非标设备设计中占有重要地位。首先, 本项目将详细分析多功能材料的种类与性质。多功能材料具有高强度、耐高温、抗腐蚀性等多功能特性, 理解并掌握这一特征, 是理解非标设备设计中多功能材料的关键。其次, 对多功能材料应用于非标零件设计的方法与效果进行系统的研究。本项目拟从材料选择、结构设计和加工工艺三个方面对多功能材料在非标准零件设计中的应用进行深入研究。在此基础上, 本项目将为非标件设计提供新思路、新方法。最后, 我们将结合实际工作经验与科研成果, 结合实际案例分析与验证, 形成一套完整的非标设备设计方法与流程, 促进非标设备设计技术的发展与进步。

关键词

多功能材料; 非标装备; 设计; 性能优化; 应用前景

1 引言

在技术进步的今天, 非标设备得到了更多的应用, 为确保其性能与功能, 必须采用多功能性的材料。多功能化材料是一类新型的非标设备, 它具备丰富的特征与性能, 对提高设备的效率、降低成本和提高安全性有着重要意义。为此, 本项目拟开展基于多功能复合结构的非标设备设计及性能

优化方法研究, 以期为中国非标设备的研发提供更加科学、高效、可靠的技术支撑。

2 多功能材料的种类及其特点

2.1 多功能材料的种类及其特点

多功能材料具有较强的空间构象表达能力、物理化学性能可控性以及产物结构的复杂性等特性。多功能材料在非标设备设计中的应用十分广泛。介绍了复合材料、智能材料、纳米材料等多功能材料的类型及特性。复合材料指由两种或多种材料构成的材料。复合材料具有重量轻、强度高、刚度大、抗腐蚀性好等优点。复合材料因其独特的性能, 被广泛应用于非标设备的设计中。在航空航天, 汽车, 海洋工程, 通道钻井, 消防设备等领域都有广泛的应用。复合材料的制

【作者简介】房浩弟(1986-), 男, 中国山东青岛人, 硕士, 工程师, 从事非标装备研发研究。

【通讯作者】王卫鑫(1990-), 男, 中国山西吕梁人, 本科, 工程师, 从事工艺装备研发设计研究。

造方法主要有层合、注射、挤出、复合等。智能材料是一类能够根据外部环境而自动改变其性能的新型材料。智能材料主要有形状记忆合金、压电材料、磁致伸缩材料、电致变色材料等。形状记忆合金是一种能够在温度、应力、电场等条件下自动变形的材料。压电材料是一类由多个晶体构成的材料，在外加电场或压力作用下，其形状和尺寸会发生变化。磁致伸缩材料是指通过外加磁场进行拉伸和压缩的材料。电致变色材料是指在外加电场作用下，其形状和尺寸能够发生变化的材料。纳米材料是一种在纳米尺度上具有特殊物化性质的材料。纳米材料一般是指具有1~100nm微结构的材料。纳米材料除了具有小尺寸效应及量子效应外，还具有比表面积大，活性高，化学组成可调等优点。纳米材料应用于非标准化设备设计中具有重要意义。纳米材料如金属、陶瓷、高分子等，可应用于精细加工、生物医药、信息、能源等领域。纳米材料的制备方法主要有溶胶-凝胶、气相沉积和高能球磨等。

2.2 不同种类多功能材料在非标准设备设计中的应用

各种多用途的材料在非标准设备上有着各自的用途。由于具有质量轻、强度高、抗腐蚀性好等特点，在航空和汽车等装备上得到了越来越多地使用。例如，在航天方面，采用复合结构可以有效地改善飞行器的性能并减少燃油消耗。然而，在实际中，由于具有对外界条件的响应能力，使其具有很强的适应性。在非标准设备中，具有自适应性、形状记忆等特性的智能材料能够响应外界的变化，从而实现非标准设备的自主调节。某些智能电话或可佩戴式装置上的感应器可以自主地辨识外界的环境，并根据所处的环境来调整自身的姿势与位置。然而，由于其比表面积大、性能优异等特点，在许多领域具有广阔的用途。将其应用于非标准器件的结构优化，可以实现对其力学、电学和热学等性能的强化。比如，采用纳米复合技术，可以提高一些部件的耐热性、力学强度，使得非标准设备在使用过程中具有较高的稳定性。总之，在非标准设备的设计中，各种类型的多用途材料都有其独特之处。未来，要进一步发掘新型多功能复合材料在非标准设备中的潜力，使其具有更大的潜力，更好地发挥非标准设备的作用。

3 多功能材料在非标准设备设计中的应用案例

3.1 多功能材料在非标准设备设计中的应用案例

将多功能材料应用于非标准设备的设计，已得到广泛的研究与发展。在航空领域，复合材料已广泛应用于飞机制造。举个例子，“梦想之翼”787就使用了大量的碳纤维复合材料，这是一种比传统金属材料更轻的材料，从而提高了飞机的燃料利用率。在航空航天领域，纳米材料已被广泛用于制造各类精密航天设备。举例来说，在人造卫星上涂覆纳米微粒，可防止高能粒子破坏电子装置。在军事方面，智能材料还可用于制作全息头盔、防弹装备等，为士兵提供安全保障。此外，多功能材料的应用范围也越来越广。例如，在能源领域，

一些太阳能电池就使用了纳米材料来提高效率。此外，智能材料还可以应用于医疗器械的制造，如智能药盒、防水医疗器械等，从而提升医疗器械的智能化程度与安全性。本项目的研究成果将丰富多功能材料应用于非标设备设计领域，对提升非标设备性能与安全水平具有重要意义，同时也对相关领域新技术与新产品的研发具有重要的指导意义。

3.2 多功能材料对非标装备的性能优化和提升的作用

将多功能复合材料用于非标设备的设计，能够有效地提高非标准设备的综合性能，是一项极具实际意义的课题。在航天技术中，采用轻质材料可以有效地减少飞行器的质量、减少燃料消耗量，从而改善飞行器的机动性能和经济性能。而采用智能材料能够让非标准设备具有更高的智能性能，如在机器人等自动装置中采用的人工智能算法，能够实现非标准设备的自动控制，提高诊疗的准确性。另外，利用纳米技术能够在减小器件尺寸的前提下，改善器件的机械、传热及电气等性能，为非标器件的性能提升开辟新途径。本项目研究成果将为非标准设备的综合性能优化与提高提供新思路。通过本项目的研究，为中国特种设备的研究提供新的思路。

4 多功能材料在非标准设备设计中的性能优化

4.1 多功能材料在非标准设备设计中的性能优化方法

将多功能材料应用于非标准设备设计，可有效提升装备性能与安全性能，促进新技术与新产品的发展。如何优化结构与制备，提升非标准设备性能与稳定性，是多功能材料应用领域亟待解决的关键科学问题。因此，研究多功能材料在非标准设备设计中的应用技术与方法，对其进行性能优化具有重要意义。首先，必须明确非标准设备对多功能材料的需求与特性。确定材料的力、热、物理化学等性能参数，设计制备工艺。例如，在制造代谢监视器时，必须先确定其所需的生物学参数，才能决定其多功能化材料及制备工艺。其次，要重视多功能材料的制备方法工艺。通过优化制备工艺，采用合适的材料设计与成本控制手段，实现高效与高质量的平衡，提升制备工艺的可扩展性与可持续性。在此基础上，对非标准设备进行材料性能分析与调控，进一步提升非标准设备的性能与安全性。最后，探索多功能材料的组合方式，实现非标准设备设计的优化与强化。通过复合、表面改性等手段，实现异质材料之间的高效集成，形成新型复合材料，实现非标准设备性能优化。多功能材料用于非标准设备性能优化是一项复杂而富有挑战性的课题，但要实现其应用，还需深入研究与探索，找到最佳组合与制备方法，才能使非标准设备具有更高的性能与广阔的应用前景。

4.2 不同种类多功能材料在不同条件下的性能表现和优化

将多功能化的材料用于非标准化设备的设计，可以有效地改善装备的使用性能，增强其安全可靠。但由于多种

多功能材料在各种工况下的综合效能与优化效果差别很大,因而对其进行综合性能的研究就显得尤为重要。首先,要针对具体的使用场合及要求,选用适当的多用途复合材料。例如,为了获得更高的导热性能和更高的安全性能,需要选用高导热、高稳定性的多功能材料。其次,研究多种环境下多功能复合材料的综合效能及优化途径。例如,在高温条件下,必须选用耐高温、机械性能优良的材质;而在较低温度时,为了确保装置的运行,必须选用高强度、耐冷的材质。在此基础上,还应根据实际情况选用相应的加工方法,以达到最佳效果。在此基础上,研究多功能复合材料的组合效应及综合性能的调控方法。通过调节各种物质之间的交互作用和它们之间的相对含量,可以达到多功能材料的复合效应。在对复合材料进行结构优化时,应充分利用各种材料之间的交互作用及比例,使其达到最佳的组合效应。总之,对多种类型、多功能材料在各种工况下的行为进行研究,并对其进行优化设计具有十分重要的意义。在此基础上,通过多功能材料的筛选,材料性能的解析,以及组合效应的最佳化,达到非标设备性能的最佳化,从而提升非标设备的性能价格比。

5 结论和展望

5.1 研究成果

论文以非标设备为对象,对多功能材料在非标设备设计中的应用及性能优化进行了研究。首先,在系统回顾文献的基础上,对多功能材料的概念、分类及其在非标设备设计中的应用进行了综述。其次,研究多功能材料在不同工况下的性能及优化方法,包括材料选择、性能分析及复合效应优化等。通过本项目的研究,为非标设备设计中多功能材料的应用与性能优化提供重要的理论依据。总之,多功能材料在非标设备设计中的应用及性能优化是十分必要的。多功能材料可通过优化设计方法提高装备性能与安全性能,降低制造成本与维护难度。本项目将进一步强化多功能复合材料的应用与性能优化研究,探索更全面、更深层次的多功能材料设计方法,为非标设备的设计提供新的思路。针对目前该领域的不足,本项目拟进一步完善其应用与性能优化方法,提升其应用可靠性与普适性。在此基础上,本项目拟进一步开展多功能复合材料的研究,拓展其适用范围,提升其应用品质,实现设备高效设计与优化。

5.2 展望多功能材料在未来的应用前景及其研究方向

通过以上研究,指出了新型多功能复合材料在非标设备的开发中有着广泛的发展潜力。在今后的产品开发过程中,多功能化的材料将扮演越来越大的角色,从而保证设备的性能与安全。所以,它在今后的研究中具有重要的意义。首先,将重点放在新一代多功能高分子的开发与合成上。发展新的多功能化新技术与新技术,以获得更好的综合性能与使用效率。比如,利用转换学习、深度增强学习等人工智能技术,实现对多功能材料的进一步优化。其次,要注意多功能复合材料与其他材料之间的相互作用。多功能材料的组合效应对整体综合效能有重要的作用,故对多功能材料的组合效应进行深入的研究,有望获得更加优异的综合性能与安全保证。在此基础上,重点研究多功能复合体系在工程实践中的改进与验证。尽管多功能材料已在实验室开展了大量研究,但其在工程实践中的性能优化与验证还存在诸多问题。所以,今后的研究工作应侧重于对多功能复合材料在工程中的应用进行检验与优化,提高其实用性与可靠性。因此,它具有广阔的发展空间。本项目的开展将为非标设备的研发提供更加高效、可靠的多功能化新方法。

6 结语

论文拟通过对多功能材料类型及特性的分析,探索其在非标装备设计中的应用案例,结合试验与数据分析,探索多功能复合材料性能优化的方法与效果,为非标标准化装备设计提供新的思路。本项目的研究成果将为中国非标产品设计提供更全面、更科学、更高效、更可靠的技术支撑,促进中国非标产品设计与应用的创新。

参考文献

- [1] 杨维天,张婷.现代材料在非标装备制造中的应用[J].机械工程与自动化,2015(1):84-86.
- [2] 刘保春,潘丰.基于多功能材料的非标装备设计[J].计算机技术与发展,2017(7):12-14+17.
- [3] 张鑫,张伟.非标装备设计的多功能材料性能优化方法研究[J].河北科技大学学报,2018(2):1-4.
- [4] 齐发龙.多功能材料在非标装备设计中的应用研究及开发[J].河南科技,2019,37(5):33-36+42.
- [5] 吕辉.聚酰亚胺材料在非标材料中的应用[J].湖南金融高等专科学校学报,2016,15(2):99-102+105.

Development of Dielectric Constant Experimental Teaching Measuring Instrument

Chaobiao Zhou Yang Li Xiaoying Qu*

School of Physics and Mechatronics Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou, 550025, China

Abstract

Dielectric materials are widely used in microwave communication, aerospace, biomedicine and other fields. In the use of dielectric materials, dielectric constant is one of the important parameters to measure the electromagnetic properties of dielectric materials, and it is very important to obtain the dielectric constant accurately. Using parallel plate capacitor method and FDC2214 capacitive sensor chip and STM32 single chip microcomputer as main components, a dielectric constant measuring instrument suitable for experimental teaching is designed and developed. The dielectric constant of the parallel plate capacitor is calculated by changing the capacitance value of the parallel plate capacitor with 6 different samples. The measured result is in good agreement with the actual value by comparing with the standard value.

Keywords

dielectric constant; capacitive sensor; single chip microcomputer

介电常数实验教学测量仪的开发

周朝彪 李阳 曲晓英*

贵州民族大学物理与机电工程学院, 中国·贵州 贵阳 550025

摘 要

电介质材料被广泛应用在微波通信、航空航天、生物医学等领域。在电介质材料的使用过程中, 介电常数是衡量电介质材料电磁特性的重要参数之一, 准确获得材料的介电常数具有十分重要的意义。采用平行板电容器法, 以FDC2214电容式传感器芯片和STM32单片机作为主要元器件, 设计开发一款适合实验教学的介电常数测量仪。通过放入6种不同待测样品来改变平行板电容器的电容值, 计算出样品的介电常数, 并与标准值对比, 发现测量的结果与实际值较吻合。

关键词

介电常数; 电容式传感器; 单片机

1 引言

近年来, 随着科学技术的不断发展, 电介质材料已广泛应用在微波通信、航空航天、生物医学等各领域^[1-4]。介质材料的介电常数是反映电介质材料在静电场作用下电性质或极化性质的主要参数, 是衡量电介质材料电磁特性的重要参数之一。介电常数在很多领域都有广泛的应用, 如在微波通信领域、食品加工领域、林业和土壤科学领域、生物

医学领域等等。然而在大学物理实验教学的过程中, 介电常数的测量相对比较少。因此, 研发设计稳定、高效的介电常数测量装置, 应用于大学物理实验教学是非常有意义的。

关于介电常数测量技术的研究有多种测量方法, 常用的方法有: 传输线法、波导法、谐振腔法、自由空间法以及平行板电容器法。其中, 平行板电容器法是利用平行板电容器间接地测量待测样品的介电常数, 基本原理为把测试样品放入电容器的极板间, 然后对电容器极板间的电容值进行测量, 将测量得到的电容值代入公式, 由此计算出测试样品的介电常数。该方法的优点是结构简单、易于测试^[2]。

论文首先介绍所用传感器的原理, 然后介绍测量仪的整体结构设计, 最后给出测量结果和讨论。

2 设计原理

设计开发的介电常数测量仪使用 FDC2214 电容式传感器芯片, 它主要用来获取平行板电容器的电容值。其内部结构如图 1 所示, 有谐振电路驱动器、多路复用器、内核和

【基金项目】国家民委教改项目(项目编号: 23123); 高等学校教学研究项目(项目编号: DJZW202039xn, DWJZW202140xn)。

【作者简介】周朝彪(1988-), 男, 中国贵州安龙人, 博士, 副教授, 从事微纳光学与大学物理教学研究。

【通讯作者】曲晓英(1980-), 女, 中国山东青岛人, 博士, 教授, 从事原子核物理与大学物理教学研究。

I²C 接口等。在各通道外部连接一个初始电感与电容, 然后再接上平行板电容器, 形成一个谐振电路, 由谐振电路驱动器进行驱动。当样品放入平行板电容器时, 将使谐振电路中的谐振频率 f 发生改变, FDC2214 芯片通过改变的谐振频率 f 、初始电容 C_0 及电感 L_0 便可计算出平行板电容器的电容值:

$$C = \frac{1}{L_0 \times (2\pi \times f)^2} - C_0 \quad (1)$$

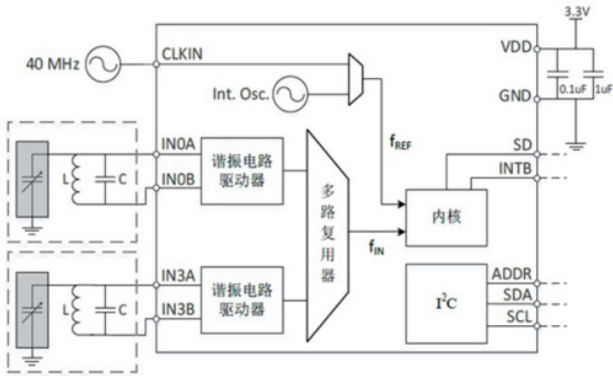


图 1 FDC2214 功能框图

通常在不考虑边缘效应下, 平行板电容器的极板间的电容量为:

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (2)$$

其中, S 为极板有效面积; ϵ 为电容极板间介质的介电常数; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; ϵ_r 为电容极板间介质的相对介电常数; d 为极板间距。

LC 电路是各种电子设备中的基本电子组件, 尤其是在诸如调谐器, 滤波器, 混频器和振荡器之类的电路中的无线电设备中。图 2 为 LC 并联谐振电路, 电容 C 与电感 L 并联, r 为电感的损耗电阻, 电容的损耗电阻忽略不计。

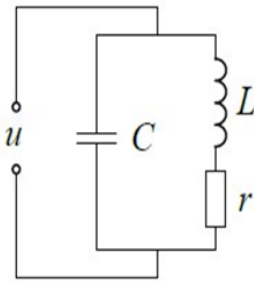


图 2 LC 并联谐振电路

在谐振条件下, 当感抗与容抗相等时, 无功支路电流相等且相反, 彼此相消, 使电流达到最小, 在这种状态下, 总阻抗最大, 谐振频率如下:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

将平行板电容式传感器作为 LC 并联谐振电路中的电

容, 当平行板间放入样品时, 将引起电容的变化, 电容的变化又可由频率的变化表示, 即:

$$C = \frac{1}{L \times (2\pi \times f)^2} \quad (4)$$

电感 L 已知, 频率 f 由 FDC2214 电容式传感器芯片给出的数据计算得到, 则通过上式可计算出放入样品时电容式传感器的电容量。由式 (2) 和式 (4) 联立可得样品介电常数:

$$\epsilon = \frac{d}{S \times L \times (2\pi \times f)^2} \quad (5)$$

测量仪的整体结构设计如图 3 所示, 由信号采集模块、电源模块、显示模块、按键模块及 STM32 单片机组成。信号采集模块主要由平行板电容器、LC 谐振电路与 FDC2214 组成, 最初谐振电路由 FDC2214 提供驱动, 电路保持平衡, 谐振频率不变, 当样品放入平行板电容器使谐振频率发生改变, FDC2214 通过变化的谐振频率得到此时平行板电容器的电容值, 再由 STM32 单片机通过公式计算得出样品的介电常数, 最终由显示模块进行显示。

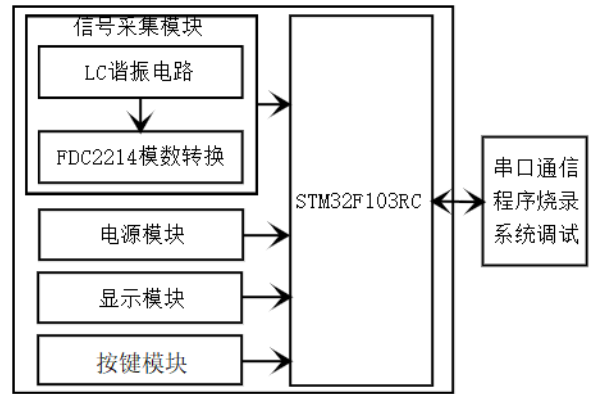
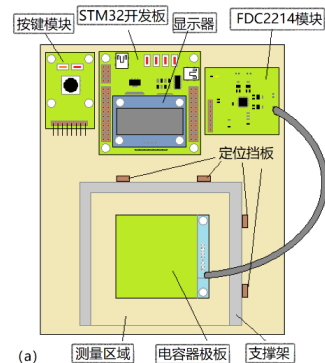
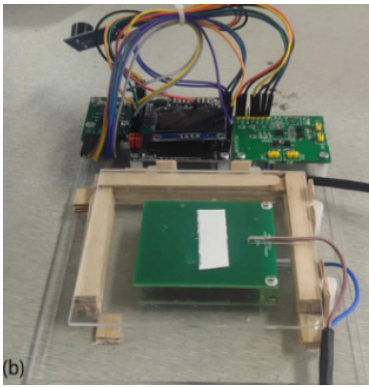


图 3 整体结构设计

图 4 为机械结构示意图, 所有的模块组装在一块亚克力板上。采用模块化的设计方法, 不仅简化设计, 还便于检修和调试, 通过合理的布局将信号采集模块、按键模块、显示模块和 STM32 开发板有机结合在一起, 由于没有使用到大功率的器件, 所以仪器的供电通过 STM32 开发板的 USB 接口与外部电源连接。



(a) 机械结构图



(b) 介电常数测量仪的实物图

图 4 机械结构示意图

3 测量结果与讨论

将设计开发的介电常数测量仪，用来测量自来水、矿泉水、95% 乙醇、岩石板、空气、橡胶块，共 6 种测试样品。

表 1 室温下样品的相对介电常数测量数据

样品	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值	参考值	相对误差
自来水	85.92	85.93	85.94	85.94	85.94	85.934	86.00	0.0008
矿泉水	41.59	41.59	41.61	41.63	41.62	41.608	40.00	0.0402
95% 乙醇	24.79	25.76	25.48	25.53	25.62	25.436	26.00	0.0217
岩石板	1.96	1.97	1.96	1.97	1.96	1.964	2.00	0.0180
空气	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.9975	1.00	0.0025
橡胶块	1.99	2.01	1.90	1.99	2.04	1.986	2.00	0.0070

4 结论

论文设计开发一套介电常数测量仪，采用平行板电容器法为基本原理，使用 FDC2214 电容式传感器芯片，与 STM32 单片机结合，自主设计硬件电路和编写软件程序，实现了仪器的检测功能，能够完成对大多数固体、液体以及气体介质材料的测量，并通过多次实验，对实验收集到的数据进行分析。该仪器结构简单、使用方便、测试速度快、制作成本低，具有一定的实用性。但仪器仍存在一定的缺点与不足待日后完善。如由于原理性的问题需要对测试样品进行特殊的处理，降低了仪器的实用性、便捷性；采集装置使用接触式测量，需要用到压力装置，不够理想，并且压力装置

具体测量步骤：

①测量的样品首先进行处理，例如自来水、乙醇等液体样品装入密封的薄膜袋并排出其中的空气，并能够通过挤压达到厚度 11mm 且完全填充平行极板间隙；岩石板、橡胶块这样的固体样品制成厚 11mm、面积大约 50mm×50mm 的块状；空气不需要特殊准备。

②然后将仪器置于水平桌面并接入电源，启动仪器进入自检程序，确认无误后进行下一步。

③将待测样品放入测量区域的指定位置，盖上上极板，由定位挡板确定位置，操作仪器进行数据采集，将数据记入表格。

④重复②、③两步，每种样品进行五次测量，直至 6 种样品全部测完。

将测量的结果整理在表 1 中，从结果来看，研发的仪器给出了非常合理的测量结果。其中，自来水的测量结果最为接近，而矿泉水的测量结果偏差较大，可能是由于矿泉水的成分与标准值的成分不同造成的。

过于简陋。对此可以改为非接触式测量，不仅可省去压力装置部分，而且不与样品接触，既保护了样品又能提高准确度，还使操作更为简化。仪器为实验教学中材料介电常数的测量提供了新的思路。

参考文献

- [1] 杨蓉.高介电常数材料测试技术[D].成都:电子科技大学,2019.
- [2] 王德成.基于微波结构谐振特性的介电常数测试方法研究与设计[D].重庆:重庆邮电大学,2021.
- [3] 孙耀强.电容式粮食水分在线检测仪的研究[D].长春:吉林农业大学,2014.
- [4] 张晓飞,杨定新,胡政,等.基于电介质介电常数测量的油液在线监测技术研究[J].传感技术学报,2008,21(12):2088-2091.

Research on Detection and Repair Technology of Surface Defects in Silicon Wafer Preparation Process

Xiongjie Wu Hongwei Jiang

Zhejiang Haina Semiconductor Co., Ltd., Kaihua, Zhejiang, 324300, China

Abstract

Detection and repair technology studies the influence of surface defects on device performance in the preparation process of silicon wafer, and analyzes the types of surface defects and their effects on the performance of silicon wafer. The principle and application practice of chemical mechanical polishing (CMP) and ion injection repair technology discuss the development trend of optical microscope detection technology, automation and intelligence. The application effect of detection and repair technology in the actual preparation process, and the effects on silicon wafer quality and device performance were verified by data analysis.

Keywords

silicon wafer preparation process; surface defects; detection technology; repair technology

硅片制备工艺中表面缺陷的检测与修复技术研究

吴雄杰 江红卫

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江 开化 324300

摘要

检测与修复技术研究硅片制备过程中表面缺陷对器件性能的影响, 论文对表面缺陷的种类、产生原因及对硅片性能的影响进行了分析。化学机械抛光 (CMP) 及离子注入修复技术原理及应用实践探讨了光学显微镜检测技术、自动化、智能化的发展趋势。检测和修复技术在实际制备过程中的应用效果, 以及对硅片质量和器件性能的影响, 均通过数据分析进行了验证。

关键词

硅片制备工艺; 表面缺陷; 检测技术; 修复技术

1 引言

硅片作为集成电路等微电子器件的基础材料, 其表面质量直接影响器件性能和生产成本。然而, 在硅片制备工艺中, 表面缺陷常常存在, 给器件性能带来负面影响。研究表面缺陷的检测与修复技术具有重要意义。论文旨在系统分析硅片表面缺陷的类型、成因及对器件性能的影响, 探讨现有的检测技术, 如光学显微镜, 以及修复技术, 如化学机械抛光和离子注入。通过实验数据的分析验证, 为提高硅片制备工艺的质量和器件性能提供技术支持和理论指导。

2 表面缺陷的分类与特征分析

2.1 表面缺陷的类型及其成因分析

硅片制备工艺中常见的表面缺陷类型有晶格缺陷、氧化物形成、金属污染等。晶格缺陷一般有位错、晶界、杂质等, 其形成受晶体生长条件和材料制备工艺等多种因素影响。氧

化物形成多发生于氧化处理过程中, 主要由氧化剂温度气氛等引起, 金属污染以工艺中的各种设备材料为主, 比如金属器皿金属探针等, 各种成因相互交织, 造成表面缺陷复杂多样的现象, 所以对其形成机理有深入认识十分关键^[1]。在硅片制备工艺中, 针对不同的表面缺陷及其形成机理进行有效的检测和修复策略的制定。

2.2 表面缺陷对硅片性能的影响分析

表面缺陷对硅片性能的影响是多方面的, 它们会降低硅片的光学性能, 导致光学器件的失效或性能下降。表面缺陷还会影响硅片的电学性能, 如增加电阻、降低载流子迁移率等, 从而影响器件的电性能。表面缺陷还可能成为应力集中点, 导致硅片的机械性能下降, 甚至引发晶体破裂。表面缺陷对硅片的性能具有严重的负面影响, 必须采取有效措施进行检测与修复。

2.3 表面缺陷特征分析方法与工艺参数关联性研究

表面缺陷特征分析方法主要包括能直观观察表面缺陷的形貌、尺寸和分布的光学显微镜、扫描电子显微镜 (SEM)、原子力显微镜 (AFM) 等, 可通过研究工艺参数与表面缺陷的关联性, 进而优化工艺条件, 减少缺陷产生的可能性,

【作者简介】吴雄杰 (1970-), 男, 中国浙江浦江人, 本科, 工程师, 从事硅材料加工研究。

从而找出制备过程中容易造成表面缺陷的环节。如氧化物形成的程度可以通过调节氧化处理的温度和时间来加以控制；化学机械抛光的效果可以通过改变抛光液的成分和酸碱度而得到优化^[2]。对制备工艺改进提供重要依据的是表面缺陷特征分析方法与工艺参数的关联性研究。

3 表面缺陷的检测技术

3.1 光学显微镜检测技术及其应用

光学显微镜是利用光学透镜放大被测物图像，从而实现观察和分析表面缺陷的一种常用表面缺陷检测工具。光学显微镜在硅片制备过程中，通常配有能清晰显示显微缺陷形态和尺寸的高分辨率镜头和数码影像处理系统。不同尺寸和形态的表面缺陷可以通过调节显微镜的放大倍数和焦距来检测和分析。光学显微镜还能结合反射衍射、共焦成像等特殊照明技术，提高检测灵敏度和细微瑕疵的精确性。表面缺陷的检测和分析在硅片制备过程中被广泛应用于光学显

微镜。

3.2 检测技术的自动化与智能化发展趋势

表面缺陷检测技术随着技术的进步，人工智能技术的发展，正在快速地向自动化、智能化的方向发展。自动化技术可以快速准确地检测和分类表面缺陷，通过引入机器视觉系统和自动化控制软件。例如，对大面积硅片表面缺陷的自动识别和统计分析，可以通过图像处理算法和模式识别技术来实现。智能技术则通过与人工智能算法如深度学习和神经网络相结合的方式，提高表面缺陷检测系统的智能程度和自适应能力。该技术不仅可以对不同类型的表面缺陷进行自动识别和定位，还可以根据检测结果对工艺参数进行自动调整，实现对硅片制备工艺稳定性和一致性的在线实时监控和反馈控制^[3]。自动化、智能化的检测技术发展趋势，将为硅片制备过程提供更加高效、可靠的质量控制与管理解决方案。基于机器视觉系统的硅片表面缺陷检测设备如图 1 所示。

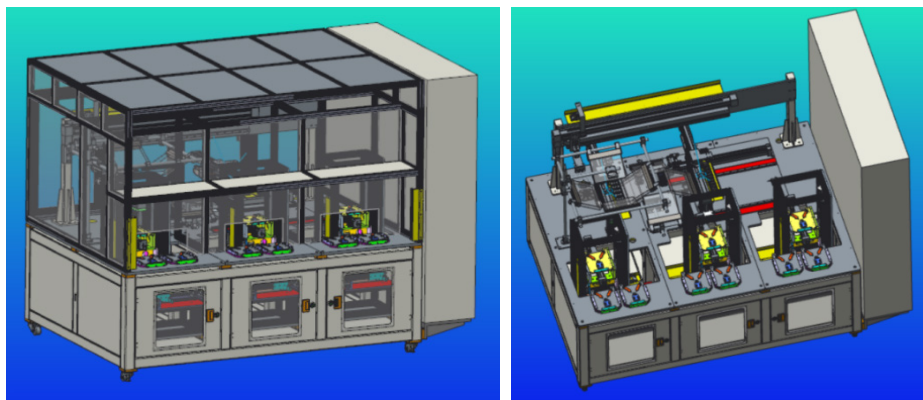


图 1 基于机器视觉系统的硅片表面缺陷检测设备

4 表面缺陷的修复技术

4.1 化学机械抛光（CMP）技术在表面缺陷修复中的应用

化学机械抛光（Chemical Mechanical Polishing, CMP）技术是一种广泛应用于半导体工艺的表面处理方法，对表面缺陷修复起着重要作用。CMP 技术通过使用化学溶液和研磨剂在特定环境下切削和去除硅片表面，结合了化学腐蚀和机械磨削的优点，使硅片表面达到平整、光洁的效果。表面缺陷在硅片制备过程中经常存在，除了影响硅片的光学和电学性能外，还会降低器件的可靠性和稳定性，如氧化物、金属污染和晶格缺陷等。CMP 技术可以有效地去除各种类型的表面缺陷，通过调整抛光液的成分和 pH 值，配合磨料的选择。它的修复过程主要分为两个阶段：粗磨和细磨，去除表面大部分瑕疵，然后再进行细磨，使表面进一步变得平整、光洁。通过对抛光液浓度和温度的控制，更好地修复表面缺陷，从而达到精确控制抛光率和表面平整度的目的^[4]。修复后的硅片不仅表面平整光滑，而且不会残留任何化学物质，符合制备微电子器件所需的高要求，硅片的表面光洁光

滑，不会残留任何化学物质。CMP 技术广泛应用于硅片制备过程中，提供了硅片质量与器件性能提高的有效手段。未来 CMP 技术将继续扮演重要角色，为制备微纳电子器件提供更为稳定可靠的表面处理方案。

4.2 离子注入修复技术的原理与应用实践

离子注入修复技术是以高能离子在材料表面的能量沉积效应为原理，广泛应用于半导体工艺中的表面缺陷修复方法。该技术实现了表面缺陷的修复和改善，通过向硅片表面注入高能离子，引发局部结晶重排和晶格修复。离子束在硅片表面产生的高能量轰击，在离子注入修复过程中，可引起表面原子位移和重新排列，使表面缺陷得以消除或减少。离子注入还可以改变表面材料的化学成分，形成新的化学键和晶体结构，使表面更稳定、更坚固，离子注入还可以改变表面材料的化学成分实际运用中，离子注入修复技术可针对不同种类的表面缺陷进行调节与优化，通过控制离子注入的能量剂量及深度，达到对不同深度及种类表面缺陷的修复作用。离子注入修复技术还可与退火化学处理等其他表面处理方式相结合，使修复效果得到进一步的提高。实践证明，离

子注入修复技术可有效地提高硅片表面质量和性能,提高器件的可靠性和稳定性,在微电子器件的制备中具有举足轻重的作用。今后随着半导体工艺的日益发展以及技术的进步,离子注入修复技术将得到进一步的完善与提高,从而在微纳电子器件的制备中提供更加可靠高效的表面处理手段。从长远看,随着技术的不断进步,离子注入修复技术将成为微电子器件制备中不可或缺的重要一环。

5 数据分析验证

5.1 表面缺陷检测与修复技术在实际硅片制备工艺中的应用案例分析

表面缺陷检测与修复技术在实际硅片制备工艺中的应用案例分析是为了验证其在提高硅片质量和器件性能方面的有效性,对一批硅片进行了表面缺陷检测,并针对检测结果采用了化学机械抛光(CMP)技术进行修复,初步检测结果显示,平均每平方厘米表面缺陷数量为50个。通过CMP技术进行了修复处理,修复后再次进行了表面缺陷检测。结果显示,经过修复处理后,表面缺陷数量平均降至15个。这表明CMP技术能够有效地修复硅片表面的缺陷,使其表面质量得到显著改善^[9]。对修复前后的硅片进行了器件性能测试。结果显示,修复后的硅片器件的电阻值降低了20%,载流子迁移率提高了15%。这说明修复技术不仅改善了硅片表面质量,还直接影响了器件的性能。表面缺陷检测与修复技术在实际硅片制备工艺中的应用案例分析证明了其在提高硅片质量和器件性能方面的有效性和可行性。

5.2 检测与修复技术对硅片质量及器件性能的影响分析

为了评估这些技术在硅片制备过程中的实际效果,检测与修复技术对硅片质量和器件性能的影响分析,深入分析了硅片质量和器件性能对硅片表面缺陷的检测与修复。通过光学显微镜对一批硅片的检测,发现表面缺陷的密度平均为100defects/mm²。采用的是化学机械抛光(CMP)技术修复。修复后,再次进行光学显微镜检测,结果显示表面缺陷密度明显降低,表面缺陷密度为30100defects/mm²。这说明CMP技术能有效地修复硅片表面的缺陷,并对器件性

能产生明显的影响,对修复前后的硅片分别进行器件性能的测试,结果发现修复后的硅片器件的电阻值平均降低了25%,载流子迁移率平均提高了20%,说明修复技术不仅能提高硅片表面质量,而且对器件性能也有直接的影响。经统计分析,修复前后硅片的缺陷密度与器件性能指标之间存在明显的负相关关系,即表面缺陷密度越低,器件性能就越好。在硅片表面修复技术的研究和应用方面,应着重考虑如何提高修复效果,以进一步提高器件性能^[6]。经过对检测与修复技术对硅片质量及器件性能的影响进行的研究分析,发现在提高硅片制备工艺的稳定性 and 一致性,以及使器件性能得到提高方面具有十分重要的作用,从而为微电子器件的发展提供了可靠的技术支撑。

6 结语

系统地研究了硅片制备过程中表面缺陷的检测与修复技术,探讨了光学显微镜、化学机械抛光及离子注入等检测与修复技术的原理与应用,通过分析表面缺陷的分类、成因及其对硅片性能的影响。实验数据验证了这些技术在实际过程中的应用效果,也验证了这些技术对硅片质量和器件性能的提高效果。综合来看,为微电子器件的发展提供了可靠的技术支撑,检测与修复技术对于提高硅片制备工艺的稳定性 and 一致性,以及器件性能的优化具有重要意义。

参考文献

- [1] 宋园园.EBCMOS中电子倍增层的制备研究[D].长春:长春理工大学,2023.
- [2] 刘碧慧.高性能背钝化晶体硅太阳能电池铝浆的制备研究及应用[D].株洲:湖南工业大学,2023.
- [3] 张飞.Cu-Sn-Ti金属结合剂超薄砂轮的制备与切割评价[D].泉州:华侨大学,2023.
- [4] 辛毓.原子层沉积氧化钛薄膜用于硅太阳能电池的研究[D].保定:河北大学,2023.
- [5] 刘永康.用于生物传感的叉指微电极制备及生物传感器构建的研究[D].长沙:中南大学,2023.
- [6] 周轶凡.双面钙钛矿/硅叠层电池设计与制备研究[D].成都:电子科技大学,2023.

The Importance and Countermeasures of Building Material Testing in Construction Engineering

Jianming Xiao

Taixing Yuanyi Construction Engineering Quality Testing Center Co., Ltd., Taixing, Jiangsu, 225400, China

Abstract

The development link of the construction industry, due to the large scale of the project, needs more raw materials, the quality of materials directly affects the quality of the whole project, the relevant personnel need to strengthen the attention to it. In order to ensure the quality of materials, material testing has become the key to construction, and relevant personnel are required to carry out testing according to the needs of the project, and timely select qualified products. This paper starts from the construction project, analyzes the necessity and content of building material detection, and on this basis expounds the difficulties of material detection, and then combines these information to formulate targeted solutions, to ensure the quality of materials used in the construction project, so as to effectively control the level of construction.

Keywords

building material testing; quality control; storage and transportation; process management

论建筑材料检测在建筑工程中的重要性及对策

肖建明

泰兴市元一建设工程质量检测中心有限公司, 中国·江苏·泰兴 225400

摘 要

建筑行业发展环节, 由于工程一般规模较大, 需要较多的原材料, 材料的质量就直接影响整个工程的质量, 需要相关人员加强对其的重视。而为了保证材料的质量, 材料检测就成为建筑施工的关键, 要求相关人员根据工程需要开展检测, 及时筛选出合格的产品。论文从建筑工程入手, 分析建筑材料检测的必要性以及内容, 并在此基础上阐述材料检测的难点, 然后结合这些信息针对性地制定解决对策, 以保证建筑工程中所用到的材料质量, 从而有效管控建筑施工水平。

关键词

建筑材料检测; 质量控制; 储存运输; 流程管理

1 引言

建筑材料检测作为对建筑施工环节原材料质量进行检测的作业, 需要对材料的质量、外观、性质、规格以及用途等进行全方位的检测, 尽可能地规避材料质量问题。通过材料检测, 相关人员可以及时发现材料中存在的质量缺陷, 并且在使用之前进行替换, 进而保证建筑工程的质量。所以建筑材料检测一直是建筑行业的关键步骤, 需要相关人员结合实际进行设计。然而实际作业环节, 建筑工程本身规模较大, 材料总量以及种类较多, 在开展材料检测时还存在技术以及人员等方面的难点, 一定程度上制约检测作业的落实。此背景下, 就要求相关人员加强对建筑材料检测的重视, 深入分析检测流程, 结合材料类型合理安排检测步骤以及方法, 以保证检测功能的发挥。

【作者简介】肖建明(1978-), 男, 中国江苏泰兴人, 本科, 高级工程师, 从事材料检测新技术研究。

2 建筑材料检测概述

建筑材料检测是对各种建筑材料进行测试和评估, 以确保其符合相关标准和规范的要求。现阶段的建筑材料检测涉及面较广, 主要包括以下方面: 一是混凝土检测, 包括混凝土抗压强度测试、抗拉强度测试、抗冻性能测试、渗透性测试等, 以评估混凝土的力学性能和耐久性能; 二是钢筋检测, 对钢筋的化学成分分析、拉伸试验、弯曲试验等, 以评估其质量和力学性能, 确保满足设计和安全要求; 三是水泥检测, 对水泥进行化学成分分析、凝结时间测试、抗压强度测试、含气量测试等, 以确保水泥的质量和性能符合标准要求; 四是隔热材料检测, 对隔热材料的导热系数测试、阻燃性能测试、耐久性能测试等, 以评估其隔热效果和安全性能; 五是防水材料检测, 对防水材料的质量进行测试, 包括抗渗透性测试、耐候性测试、耐腐蚀性测试等, 以确保其具有良好的防水效果^[1]。这些建筑材料检测项目可以帮助确保建筑材料的质量和性能符合相关标准和规范, 从而保障建筑结构

的安全性、可靠性和持久性。

3 建筑材料检测的重要性

建筑工程中，材料质量检测可以对各种原材料质量进行检查，分析材料存在的安全隐患，具有多样化的优势，需要相关人员进行深入分析。

3.1 可以保证建筑工程的安全性

建筑材料的强度、耐久性和稳定性直接影响建筑结构的安全。通过对材料进行检测，可以确保其符合设计和规范要求，从而降低结构失效的风险。

3.2 实现工程的质量控制

材料检测有助于确保建筑材料的质量符合标准和规范要求，以避免使用次品材料或存在缺陷的材料，从而提高建筑工程的质量和可靠性。

3.3 推进环境友好型社会落实

一些建筑材料可能会对环境造成负面影响，如释放有害气体或污染土壤。通过检测，可以确保材料的环保性能符合相关标准，从而降低对环境的影响。

3.4 可以进行成本控制

及早发现建筑材料的质量问题可以避免在后期修复和更换材料时产生额外的成本。因此，建筑材料检测有助于控制建筑工程的总体成本。

3.5 合规性

建筑材料检测有助于确保所使用的材料符合相关的法律法规和标准要求，避免因违规使用材料而面临法律责任。

综上所述，建筑材料检测对于确保建筑质量、安全性和合规性至关重要，有助于保障人们的生命财产安全，并推动建筑行业的健康发展。

4 建筑材料检测存在的难点

建筑材料检测环节，由于工程规模较大，检测要求较高，现阶段的建筑材料检测就还存在一些难点，需要检测人员进行深入分析。

4.1 材料多样性和复杂性

建筑材料种类繁多，涉及不同类型的材料，如混凝土、钢材、玻璃、木材等。每种材料都有其特定的检测方法和标准，需要专业知识和技能来进行检测。

4.2 可行性和可靠性

某些材料的检测可能需要使用特殊的仪器和设备，或者进行复杂的实验室测试。这些检测方法可能昂贵且耗时，对于一些工地或项目来说可能不太实际。此外，确保检测结果的准确性和可靠性也是一个挑战。

4.3 采样和测试

建筑材料的采样过程需要确保样品的代表性，以便对整批材料进行评估。采集合适的样品并正确进行测试需要经验和专业知识。

4.4 监督和执行

材料检测需要有效地监督和执行机制，以确保工地或项目按照检测结果和指导意见进行材料选择和使用。监督和执行的不足可能导致使用不合格材料或违规行为。

4.5 技术更新和标准变化

建筑材料检测技术和标准不断发展和更新。保持对新技术和标准的了解，以及培训专业人员以适应变化，是一个挑战。

5 建筑工程中材料检测的对策

5.1 结合对象开展针对性的检测技术

建筑材料检测的对象通常包括混凝土、钢材、玻璃、隔热材料、装饰材料以及其他材料，需要检测人员针对这些具体对象制定针对性的检测技术。

5.1.1 混凝土检测技术

混凝土作为建筑工程的主要原材料，直接影响工程质量，需要相关人员积极开展材料检测。首先，要进行抗压强度测试，这是最常见的混凝土检测方法之一，通过在实验室中对混凝土样品施加压力来评估其抗压强度。这可以帮助确定混凝土的质量和强度是否符合设计要求。其次，要进行密度测试，通过测量混凝土样品的密度来评估其质量和均匀性。这对于确保混凝土的坍落度和紧密度至关重要；再次，要进行抗渗性能测试，这种测试用于评估混凝土的抗渗性能，即其抵抗水分渗透的能力。这对于确保混凝土结构的耐久性和防水性能非常重要。最后，需要进行收缩和膨胀性能测试，这些测试用于评估混凝土在不同湿度和温度条件下的收缩和膨胀性能，以确保混凝土在使用过程中不会出现严重的变形问题^[2]。这些混凝土检测技术可以通过实验室测试或现场测试的方式进行，以确保混凝土材料符合相关标准和设计要求。

5.1.2 钢材检测技术

钢材检测技术是确保钢材质量和性能符合标准要求的重要手段，常见的钢材检测技术包括以下几种：一是要进行化学成分分析，通过对钢材样品进行化学成分分析，确定其中各种元素的含量，以确保其符合设计要求和产品标准；二是要进行力学性能测试，包括拉伸试验、弯曲试验、冲击试验等，用于评估钢材的抗拉强度、屈服强度、延伸率、冲击韧性等力学性能指标；三是要进行硬度测试，通过在钢材表面施加一定载荷并测量其压痕的大小来评估钢材的硬度，常用的方法有布氏硬度、洛氏硬度等；四是需要进行耐蚀性能测试，应对钢材进行盐雾试验、腐蚀试验等，评估其耐蚀性能，特别是对于用于户外或腐蚀环境下的钢材。这些钢材检测技术可以帮助确保钢材的质量、性能和安全可靠性，对于建筑结构和工程项目具有重要意义。

5.1.3 玻璃材料检测

玻璃作为一种常见的建筑材料，其质量和性能对于建

筑结构的安全和美观至关重要，应通过以下手段进行检测：一是要进行玻璃外观检测，通过目视检查或借助光学仪器对玻璃表面进行检查，以确定是否有裂纹、气泡、磨损等缺陷；二是要进行玻璃厚度测量，利用厚度计等设备测量玻璃板的厚度，确保符合设计要求；三是要开展玻璃抗冲击性能测试，通过冲击试验评估玻璃的抗冲击性能，包括冲击强度和破碎方式，以确保在发生意外碰撞时能够保持完整或安全破碎；四是玻璃光学性能测试，包括透光率、反射率、透射率等参数的测定，以评估玻璃的光学性能和透明度；五是需要进行玻璃热性能测试，通过测定玻璃的热传导系数、热膨胀系数等参数，评估其在热环境下的性能。这些玻璃检测技术可以帮助确保玻璃产品的质量和性能符合相关标准和设计要求，保障建筑结构和使用安全。

5.1.4 隔热材料检测技术

隔热材料通常用于建筑中，以减少能量损失和提高能效，应通过以下手段对其进行检测。首先，进行热导率测试，通过测定材料的热导率来评估其隔热性能。热导率测试可以使用热流计或热导率仪器进行，以确定材料对热量传递的阻抗；其次，进行红外辐射测试，利用红外热像仪等设备对隔热材料表面进行扫描，以评估其对红外辐射的反射、吸收和透射能力，从而确定隔热效果；再次，防潮性能测试，针对某些隔热材料，尤其是用于潮湿环境的材料，进行防潮性能测试，以评估其在潮湿条件下的隔热效果和耐久性；最后，还有防火性能测试，对隔热材料进行防火性能测试，评估其在高温条件下的耐火性能，确保材料符合相关的防火标准和要求^[3]。这些隔热材料检测技术可以帮助确保隔热材料的性能符合设计要求，为建筑提供有效的隔热保温措施，提高能源利用效率。

5.1.5 装饰材料的检测

装饰材料通常用于室内和室外的建筑装饰，包括墙面、地板、天花板、门窗等，要求相关人员通过以下手段进行检测：一是要进行表面平整度测试，通过光学方法或机械方法测量装饰材料表面的平整度，以确定其表面质量是否符合要求；二是要开展硬度测试，利用硬度计等设备对装饰材料进行硬度测试，以评估其抗压、耐磨和耐划伤能力；三是进行防火性能测试，对装饰材料进行防火性能测试，评估其在高温条件下的耐火性能，确保材料符合相关的防火标准和要求；四是还需要进行颜色稳定性测试，通过人工气候老化试验或光照试验等方法，评估装饰材料的颜色是否稳定，以确保长期使用不会出现色差问题。这些装饰材料检测技术可以帮助确保装饰材料的质量和性能符合相关标准和设计要求，保障建筑装饰的美观和安全。具体建筑材料检测对象及方法详如表 1 所示。

表 1 建筑材料检测对象及方法

建筑材料检测对象	建筑材料检测的方法
混凝土	抗压测试、密度测试、抗渗测试、收缩与膨胀测试、硬度测试
钢材	化学成分分析、力学性能测试、耐腐蚀性测试、硬度测试
玻璃	外观检测、厚度检测、光学性能检测、抗冲击检测、热性检测
隔热材料	热导率测试、红外辐射测试、防潮性能检测、防火性能检测
装饰材料	表面平整度测试、硬度测试、防火性能测试、颜色稳定性检测
其他材料	

5.2 要建立健全材料检测与管理制度

建立健全的建筑材料检测采购管理制度对于确保建筑工程质量至关重要，需要检测人员结合需要进行建立并完善。首先，需要建立明确的建筑材料检测采购管理制度，包括采购程序、责任部门、流程要求、相关要求以及监督检查等内容；其次，应根据国家标准和相关规定，制定合适的建筑材料检测的采购标准，并与供应商明确沟通。并且建立供应商评价机制，选择具备合法资质、专业能力和良好信誉的建筑材料检测机构作为合作伙伴。最后，要建立监督检查机制，对供应商的检测过程进行监督和检查，确保检测工作的准确性和可靠性。建立健全的建筑材料检测采购管理制度，有助于确保建筑材料质量符合标准要求，提升工程质量和安全水平^[4]。建议建筑单位加强对采购管理制度的执行，加强对建筑材料检测的监督和管理，为建筑工程的顺利进行提供有力保障。

6 结语

影响材料检测的因素有很多，材料检测环节是确保工程材料质量的关键，是保证建筑物安全的必要条件。检测人员在工作中必须具备准确、科学、公正的工作态度，严格遵守材料检测流程，对每一个细小的步骤都进行足够的重视，保证检测结果的准确性，使不合格产品没有容身之地，为建筑品质的整体提高奠定坚实的基础。

参考文献

[1] 薛钰泽.关于建筑材料检测在建筑工程中的重要性分析[J].中华建设,2021(10):56-57.
[2] 高志宇.建筑材料检测在建筑工程中的重要性分析[J].建材与装饰,2020(17):48+52.
[3] 纪安.建筑材料检测在建筑工程中的重要性分析[J].河南建材, 2020(1):45-46.
[4] 马小平.关于建筑材料检测在建筑工程中的重要性分析[J].门窗,2019(16):57-58.

Defect Analysis of Titanium Alloy Powder Metallurgy Products

Feng Zhao

Beijing Aerospace Special Equipment Testing Research and Development Co., Ltd., Beijing, 100074, China

Abstract

Titanium alloy powder metallurgy products are widely used in aerospace, medical and bioengineering fields because of their excellent mechanical properties and biocompatibility. However, the defects in the metallurgical process are recognized as one of the constraints. The aim of this study is to analyze and solve the common defects in titanium alloy powder metallurgy products, such as holes, inclusions, cracking and so on. Based on the actual production process of titanium alloy powder metallurgy products, the detection of defects by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and non-destructive testing technology is discussed. The formation process and mechanism of these defects are analyzed in detail, aiming at providing new strategies to solve the quality problems of products. It provides theoretical basis and engineering practice suggestions for improving the processing quality of titanium alloy powder metallurgy products. Through targeted defect improvement methods, the performance of titanium alloy powder metallurgy products can be significantly enhanced to better meet the requirements of various applications.

Keywords

titanium alloy powder metallurgy; defect analysis; production and processing process; solution strategy; mechanical properties

钛合金粉末冶金制品缺陷分析

赵峰

北京航天特种设备检测研究发展有限公司, 中国 · 北京 100074

摘要

钛合金粉末冶金制品因其优异的机械性能和生物相容性, 广泛应用于航空航天领域、医疗及生物工程等领域, 然而其在冶金过程中的缺陷问题是公认的制约因素之一。本研究的目标是剖析并提出解决钛合金粉末冶金制品中的常见缺陷, 如孔洞、夹杂、开裂等。基于钛合金粉末冶金制品的实际生产加工过程, 论述了采用光学显微观察、扫描电子显微镜 (SEM) 和无损检测技术对缺陷的检测, 详细地分析了这些缺陷的形成过程和机理, 旨在提供解决制品质量问题的新策略, 为钛合金粉末冶金制品加工质量的提升提供理论依据和工程实践建议。通过针对性的缺陷改善方式, 可以显著增强钛合金粉末冶金制品的性能, 更好地满足各类应用的要求。

关键词

钛合金粉末冶金; 缺陷分析; 生产加工过程; 解决策略; 机械性能

1 引言

钛合金粉末冶金制品因其具备优异的机械性能和生物相容性, 被高度重视, 并在航空航天领域、医疗、生物工程等深入应用。然而, 值得注意的是, 钛合金粉末冶金制品在生产加工过程中, 常常会出现孔洞、夹杂、开裂等多样性缺陷, 这在一定程度上限制了其广泛使用及工艺进一步的开发。因此, 对这些缺陷进行深入分析, 探寻其产生的机理和制约因素, 并提出有效的解决策略, 显得至关重要。论文以此为重心, 论述采用金相光学显微观察、扫描电镜及金相实验室分析等技术手段, 对钛合金粉末冶金中的各类缺陷进行详尽的揭示和分析, 以期为进一步提升钛合金粉末冶金制品性能提供可靠的理论依据和实践指导。

【作者简介】赵峰 (1989–), 男, 中国北京人, 硕士, 工程师, 从事金属和复合材料无损检测研究。

2 钛合金粉末冶金制品的概述

2.1 钛合金粉末冶金制品的历史和发展

钛合金粉末冶金制品在现代制造业中占据了重要地位, 其发展历程可以追溯到 20 世纪初期^[1]。早期的研究主要集中在如何利用粉末冶金技术来制备小型和复杂形状的零部件。在 20 世纪 50 年代, 随着技术的进步和对钛合金材料特性的深入了解, 粉末冶金技术在钛合金制品中的应用逐渐扩大。当时, 钛合金制品主要用于航空航天领域, 特别是涡轮叶片和机身部件的制造。

20 世纪 70 年代, 钛合金粉末冶金制品的研究进入了一个新的阶段。在这个时期, 得益于粉末制备技术的进步, 制备出粒度更细、纯度更高的钛合金粉末成为可能。这些粉末在后续的成型和烧结过程中, 能够显著改善制品的机械性能和微观结构^[2]。电子束熔炼和等离子旋转电极工艺的引入, 使得高纯度钛粉末的制备技术得到了快速发展。由于这些技

术进步,钛合金粉末冶金制品的性能有了显著提高,使其在更多领域得到了应用。

进入 21 世纪,随着现代科学技术的不断进步,钛合金粉末冶金制品的发展达到了一个新的高度。3D 打印技术的发展,尤其是粉末床选择性激光熔化(SLM)和电子束熔化(EBM)工艺的应用,极大地推动了钛合金粉末冶金制品的应用。这些新技术的引入,不仅提高了制品的制造精度和复杂结构的成形能力,还在一定程度上减少了传统制造过程中孔洞、夹杂和开裂等缺陷的产生。

2.2 钛合金粉末冶金制品的特性和应用

钛合金粉末冶金制品优异的特性,使其在航空航天、化工、医疗、生物工程和汽车工程等多个领域得以广泛应用。

钛合金以其卓越的比强度和比刚度,耐高温性、抗疲劳性和优良机械性能,使其成为航空航天领域的理想材料,提高了航空航天器的性能和寿命。钛合金粉末冶金在化工领域,钛合金的抗腐蚀性能保证了设备在腐蚀环境中长期稳定运行。在医疗领域,钛合金因其优异的生物相容性,广泛用于牙科植入物和骨科植入物中,能够与人体组织很好地融合,减少排斥反应,提高植入物的耐久性。钛合金因其优异的加工性能和成形能力使得在复杂形状的制品制造过程中,能够更好地满足设计需求,增加了工程应用的灵活性。钛合金粉末冶金制品还在汽车工业中逐渐展现出巨大的潜力,其减重效果不仅提升了燃油效率,更显著地改善了整车性能。

由此可见,钛合金粉末冶金制品在航空航天领域、化工、医疗、生物工程以及汽车等领域的广泛应用,充分展示了其在现代工业中的重要地位和巨大潜力。

3 钛合金粉末冶金制品的缺陷分析

3.1 孔洞夹杂开裂等缺陷的形成机理

钛合金粉末冶金制品在冶金过程中经常出现孔洞、夹杂、开裂等多种缺陷,这些缺陷在很大程度上限制了制品的质量和使用性能。

孔洞主要形成于粉末颗粒之间在压制和烧结过程中未能完全致密化的结果,尺寸大小可能达到 100~180 μm ,这表示孔洞缺陷的尺寸相对较小,但足以对材料的力学性能和结构完整性产生显著影响。烧结过程中,空隙没有被充分填充导致孔洞的产生,这种现象可能是由于烧结温度和时间的不充分或粉末颗粒尺寸不均匀所引起的,挤压过程中施加的压力不足也可能造成孔洞。

夹杂则主要来源于粉末冶金过程中,原材料或环境中的杂质在高温条件下与钛基体发生反应,形成诸如氧化物、氮化物或碳化物等夹杂物,夹杂物的尺寸可以从微米级到毫米级不等。较小的夹杂物可能只有几个微米,而较大的夹杂物可能达到数毫米甚至更大。这些夹杂物在钛合金基体内的存在,会影响晶粒的均匀生长和材料的机械性能。

开裂缺陷通常是由于钛合金的脆性性质与粉末冶金工

艺参数不匹配引起的,具体的裂纹尺寸取决于多种因素,如裂纹的类型(如穿晶裂纹、沿晶裂纹等)、材料厚度、加工条件等。因此,很难给出一个通用的尺寸范围。

烧结过程中由于热应力集中或者冷却过程中冷却速率不均匀,可能导致钛合金粉末冶金制品发生开裂,在显微镜下观察,可以发现微观裂纹的尺寸通常在几十微米到几百微米之间。这些裂纹可能起始于材料中的夹杂物、孔隙或其他缺陷,并随着应力的积累而扩展。在一些严重的情况下,微观裂纹可能相互连接形成宏观裂纹,这些宏观裂纹的尺寸可以从几百微米到几毫米不等。特别是在烧结冷却阶段,不均匀的热膨胀和冷缩会导致内应力的产生,当内应力超过了材料的抗裂强度,就会发生裂纹。

各类缺陷的形成机理复杂且多样,充分理解这些缺陷的形成过程对于改进粉末冶金工艺、提升钛合金产品品质具有重要意义。金相光学显微观察、扫描电子显微镜(SEM)和无损检测等技术手段在钛合金粉末冶金制品缺陷检测的应用有助于深入剖析缺陷形成的微观机理,为进一步的优化策略提供理论依据。

3.2 金相光学显微观察和扫描电子显微镜(SEM)技术的使用

金相光学显微观察和扫描电子显微镜(SEM)在分析钛合金粉末冶金制品缺陷中具有重要作用。金相光学显微镜主要用于初步观察样品表面,通过此技术可以快速识别出孔洞、裂纹和夹杂物等宏观缺陷的存在。在低倍放大下,光学显微镜能够提供样品的大面积视图,帮助确定缺陷的分布和基本形貌。

扫描电子显微镜(SEM)则进一步放大了观测细节,能够在高分辨率下提供样品表面和内部结构的清晰图像。SEM可以揭示出微观形态的细节,如孔洞的形状和尺寸,裂纹的拓展路径,以及夹杂物的成分类别和分布特征。通过能谱分析(EDS)与SEM结合使用,能够有效识别出夹杂物的化学成分和元素分布,为深入了解夹杂物的来源和形成机制提供依据。

结合金相光学显微镜和SEM的观察结果,可以对钛合金粉末冶金制品的缺陷进行多角度分析。这些技术手段不仅能够有助于识别和评价缺陷,还能为优化粉末冶金工艺和提升制品质量提供可靠的数据支持和科学依据。

3.3 无损检测技术的使用

射线检测技术通过射线穿透制品,利用不同材料对射线的吸收能力差异来检测制品内部孔洞、夹杂物等缺陷。射线CT技术利用X射线照射样品,并通过计算机算法重构出样品的三维内部结构,实现对制品内部结构的高分辨率观察。这种技术有助于发现微小缺陷,并评估制品的制造精度,为制品的质量控制提供重要依据。超声检测也是一种重要的内部缺陷无损检测手段,它利用超声波在材料中的传播特性来检测制品内部的缺陷。对于钛合金材料而言,超声检测对

于内部冶金缺陷尤为有效，能够精确识别并定位缺陷位置。通过综合应用这些无损检测手段，我们可以较为全面评估钛合金粉末冶金制品的质量，确保制品的可靠性和稳定性。

4 钛合金粉末冶金制品的优化策略

4.1 针对性的缺陷改善方法

为解决钛合金粉末冶金制品中的常见缺陷，需采取针对性的改善方法^[1]。孔洞的产生主要由于粉末或成型过程中的气体侵入，解决此类缺陷的一种有效方法是采用真空烧结或氢气还原工艺，从而减少气体残留。控制烧结温度和保温时间也有助于改变孔洞的形成，提升材料的致密度。针对夹杂物问题，原材料的纯度十分重要。在生产中，选择高纯度的钛粉末能够有效减少夹杂物的含量。通过在粉末冶金过程中加入适量的碳、氮等元素，可以在冶炼环境中形成保护气氛，防止杂质的侵入。进一步的净化处理如电渣重熔（ESR）可显著降低制品中的氧氮含量，提高材料的纯净度。

对于开裂现象，其预防关键在于热处理工艺的优化。均匀的加热和缓慢的降温过程可避免因热应力引发的开裂。采用等温退火处理可以减小热应力，增强材料的韧性。通过优化粉末的粒径分布，使成型后的半成品颗粒紧密排列，有助于减少开裂缺陷的发生。

以上方法在实际生产中经过验证，实践效果显著。真空烧结和氢气还原工艺明显提升了制品的致密度，减少了孔洞缺陷的出现。高纯度原材料的使用及适当的净化处理显著降低了夹杂物含量，使材料更加纯净。优化的热处理工艺有效预防了开裂问题，提高了制品的韧性和整体性能。

4.2 钛合金粉末冶金制品的质量优化

在钛合金粉末冶金制品的质量优化过程中，必须充分考虑不同缺陷的具体特性和来源。高质量的钛合金制品依赖于严格控制的粉末筛选、均匀的粉末分布以及优化的烧结工艺。通过精细筛选钛合金粉末，以减少粉末颗粒之间的大小差异及不规则形状，能够有效降低孔洞和夹杂的发生概率。

采用先进的粉末压制技术，如等静压法，可在高压环境下实现粉末的均匀致密化，进而减少内部空隙和微裂纹的形成。与此烧结工艺的优化也是提升质量的重要步骤。通过对烧结温度和时间等参数的精确控制，可以促进钛合金颗粒之间的有效扩散和结合，从而显著降低缺陷的数量和性质。

在烧结后处理过程中，引入热等静压（HIP）工艺，能够进一步消除内部残余孔隙和微裂纹，提升材料的整体致密度和机械性能。表面处理技术如喷丸和抛光工艺的引入，可以有效改善制品表面质量和疲劳强度。

整体而言，通过系统性地优化粉末选择、压制成型、烧结及后续处理工艺，能够大幅提升钛合金粉末冶金制品的品质，满足更高要求的应用需求。

4.3 制品加工质量的提升对于整体性能的影响

钛合金粉末冶金制品的加工质量对其整体性能有显著影响。高质量的加工工艺能有效减少孔洞、夹杂、开裂等缺陷的产生，从而提升材料的力学性能和稳定性。优化后的制品表现出更高的抗拉强度、延展性和疲劳寿命，显著增强了其在严苛环境下的工作可靠性。高精度的加工过程也改善了制品的生物相容性，使其在医疗和生物工程领域的应用更加广泛。

5 结语

论文以钛合金粉末冶金制品的缺陷问题为研究对象，通过论述金相光学显微观察、扫描电子显微镜（SEM）和无损检测技术手段详细地研究了钛合金粉末冶金制品中常见的孔洞、夹杂、开裂等缺陷的形成过程和机理，提出了有效的解决策略。然而，必须承认的是，论文未能涵盖所有种类的钛合金粉末冶金制品，且处理机能也因设施或技术环境的差异而异，因此需要后续研究者根据实际状态进行针对性分析与改进。同时，尽管本文已提出相应改善措施，但缺陷的产生不能完全避免，仍需寻找更为系统而深入的解决方案。未来可以进一步对钛合金粉末冶金制品其余类型的缺陷进行更为深入的研究，以期在理论和方法上达到更全面和深入的理解，从而提高钛合金粉末冶金制品的加工质量，更好地满足其在航空航天、化工、医疗、生物和汽车工程等领域的应用需求。

参考文献

- [1] 周鹏.钛合金粉末冶金技术研究[J].中国金属通报,2019(5).
- [2] 陈学文.钛合金粉末冶金制备工艺及力学性能研究[J].冶金与材料,2020,40(3).
- [3] 张强,蔡永丰,李晓静,等.钎合金粉末冶金研究进展[J].粉末冶金技术,2023,41(1):44-54.

Application of Ti Based Catalyst in Photocatalytic Oxidation of VOCs Technology

Yan Yu Jun Zhu

Tieling Guixin Environmental Protection Technology Co., Ltd., Tieling, Liaoning, 112000, China

Abstract

The paper explores the application of Ti based catalysts in photocatalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs) technology. Firstly, an analysis was conducted on the environmental impact and treatment needs of VOCs, followed by an overview of the principles of photocatalytic oxidation technology and the potential of Ti based catalysts in this field. Subsequently, the paper delved into the design and preparation strategies of Ti based catalysts, including material selection, doping modification, and preparation methods. Then, the relationship between photocatalytic activity, stability, catalyst structure, and performance was explored through performance evaluation and optimization strategies. Finally, the industrial application prospects of Ti based catalysts for photocatalytic oxidation of VOCs were discussed, and technical optimization and improvement strategies were proposed.

Keywords

Ti based catalyst; photocatalytic oxidation; VOCs management; performance evaluation; industrial application prospects

Ti 系催化剂光催化氧化 VOCs 技术的运用研究

于艳 朱俊

铁岭贵鑫环保科技股份有限公司, 中国 · 辽宁 铁岭 112000

摘 要

论文探讨了光催化氧化挥发性有机物 (VOCs) 技术中 Ti 系催化剂的应用。首先对 VOCs 的环境影响和治理需求进行了分析, 然后对光催化氧化技术的原理和该领域 Ti 系催化剂的潜力进行了概述。随后论文深入研究了包括材料选择、掺杂改性、制备方法等 Ti 系催化剂的设计和制备策略。接着光催化的活性、稳定性以及催化剂结构和性能的关系通过性能评估和优化策略进行了探讨。最后对 Ti 系催化剂光催化氧化 VOCs 的产业化应用前景进行了展望并提出了技术优化和改进策略。

关键词

Ti 系催化剂; 光催化氧化; VOCs 治理; 性能评估; 工业应用前景

1 引言

挥发性有机物 (VOCs) 排放量在当前快速发展的工业化进程中持续攀升严重影响生态环境和人体健康。针对这一挑战对于 VOCs 处理新方法效率和环保要求都很高学界也在积极探索。在这一大环境下光催化氧化技术因其独特的优势而日益受到重视特别是以 Ti 系催化剂为核心的技术在 VOCs 光催化氧化方面更是显示出巨大的应用前景。该研究深入分析了 Ti 系催化剂在 VOCs 光催化氧化中的应用效果探讨了其作用原理和优化途径以期有效控制 VOCs 贡献创新的解决方案提出新的视角和方法。

2 Ti 系催化剂光催化氧化 VOCs 技术概述

2.1 Ti 系催化剂的种类与特点

在科研领域基于钛元素的催化剂因其独特的特性而备

受关注这是一项针对挥发性有机物 (VOCs) 的光催化氧化研究。这类催化剂主要是基于钛的氧化物并通过各种巧妙的改进手段加以优化而成的。它们在稳定性、光响应性和催化效率等方面均表现出优异的性能因而成为研究人员对 VOCs 光催化氧化 (VOCs) 领域进行深入探索的热点。

钛白粉作为突出的钛系催化剂类型呈现锐钛矿、金红石和板钛矿三种晶状结构的鲜明特征。其中得益于较高的丰富的表面羟基以及优异的电子传输性能以锐钛矿结构的钛白粉尤其为研究界所瞩目。通过精心调控其晶体结构显著提高活性位点数量催化效能随之增强。针对钛系催化剂有多种改进策略包括多种方法如金属离子与非金属物的共混贵金属的负荷以及与半导体的复合等。这些策略对催化剂的电子结构、表面性质和捕获光的能力进行了有效的调控使其光触媒活性从本质上得到了增强。

2.2 光催化氧化 VOCs 的基本反应机制

在光催化过程中挥发性有机化合物 (VOCs) 的氧化作用涉及许多物理化学的交互反映其关键步骤包括: 吸收光

【作者简介】于艳 (1978-), 女, 中国甘肃平凉人, 本科, 工程师, 从事催化剂及废催化剂综合利用研究。

能,生成电子对,它们的传输与复合、氧化还原作用在催化剂表面展开等。在这一系列的过程中价带中的电子跃迁到导带上形成电子和空穴这就是光能的吸收。这些电子和空穴会在催化剂表面移动并与吸附的 VOCs 分子发生作用然后引发一系列氧化还原反应从而使 VOCs 转变为具有友好环境的物质。

催化剂的种类、结构、对光能的捕捉效率以及表面性质等要素在深入探讨挥发性有机化合物光催化氧化的诸多环节中都对其反应机理起着至关重要的作用。这些关键因素的深入机制探索提供了至关重要的理论支持以优化催化剂的设计提高催化剂的催化效率。

2.3 Ti 系催化剂在光催化氧化 VOCs 中的作用机制

钛系催化剂的功能在对挥发性有机物 (VOCs) 进行光催化氧化过程中尤为关键。它的核心价值首先表现在高效吸收光能为催化反应提供所需的能量支持通过形成电子和空穴的配对。此外其对 VOCs 分子的捕捉和活化作用显著增强从而促进氧化还原反应的速率如丰富的羟基和活性基等催化剂的表面特性。更值得注意的是即使在复杂多变的工况下钛催化剂仍能保持长期高效性能其稳定性和抗腐蚀性同样出色。

钛系催化剂在光催化处理挥发性有机物 (VOCs) 领域光催化活性水平显著提高其物理化学性质独特。这些催化剂既拓宽了光能的吸收范围从而提高了光能转化效率又有效降低了催化反应的能量门槛促进了反应速率催化效能进一步增强在表面反应动力学水平上进行了改进。此外钛基催化剂还具有优异的可回收性和再生优势其重复利用只需通过简单的循环过程即可实现。这样的特点在缓解光催化氧化 VOCs 技术经济压力的同时对环境保护起到积极作用的环保排放也随之减少。

3 Ti 系催化剂的设计与制备策略

3.1 催化剂材料的选择与优化

在 Ti 系催化剂探索创新的过程中对材料的细致甄别和优化至关重要。研究人员需要致力于探究其晶体结构的具体属性如晶格参数、晶面的排列等以了解这些结构要素对催化剂的活性产生了怎样的影响。在此基础上对催化剂表面活性位的形成原理进行深入揭示再通过理论模型与实验数据的综合分析指导我们对催化剂结构进行更有针对性的设计与构建。

异质元素的引入和表面修饰技术在增强钛基催化剂性能的过程中起到了至关重要的作用。催化剂的电子状态可以通过巧妙地融合过渡金属和一些非金属元素进行细致的调控然后增强催化剂的光捕捉能力、电荷传输效率和催化反应能力。而且同样可以显著提高其催化效率和稳定性对催化剂表面进行精确修饰或构建复合多相结构。这种以碳纳米管和石墨烯等碳基材料封装钛催化剂的策略不仅在反应中有效阻止了催化剂的重聚和衰退而且增强了其吸附有机挥发性物质的能力堪称一次成功的实战案例。

3.2 催化剂的制备方法

制备技术对催化剂的效能具有决定性作用其中溶胶-凝胶法因其操作简便、成本效益高而被广泛采用因此溶胶-凝胶法,在制备钛系催化剂时能得到孔径均匀、结晶度高的材料如溶胶浓度、凝胶化时间等关键参数的精确控制。此外,通过引入其他元素实现对催化剂性能的有效增强和精细调节这种方法还容易实现多组分复合催化剂的合成。

水热合成技术这种在高温高压条件下制备催化剂的方法被重视其特点是使催化剂材料在较短时间内实现高纯度的生成。该技术在制备钛系催化剂的过程中能够对催化剂的晶体结构进行有效、精细的调控从而在催化性能方面获得更加优异的物质。

纳米级材料和微观结构的精确控制在探索高活性催化剂的最新进展中转变为核心战略。获得的催化材料显示出更大的丰富的活性位点从而在催化效能方面有了显著的飞跃这得益于这种纳米级技术的巧妙运用。同时其催化性能还经过精心调控如催化剂的外形、颗粒大小、孔隙度等微结构都得到了进一步的优化。以模板合成技术为证该技术能够制备出钛基催化剂具有特定的形状和孔隙特征其优异的催化光催化分解挥发性有机化合物 (VOCs) 的反应中得到淋漓尽致的展现。

4 Ti 系催化剂光催化氧化 VOCs 的性能评估与优化策略

4.1 性能评估指标与实验方法

针对 Ti 系催化剂在光催化降解挥发性有机化合物 (VOCs) 中的应用效能研究需要构建一套包含 VOCs 分解率、催化剂活性和持久性、反应选择性等多维度评价综合评价体系。实验设计要求严谨遵循科学方法以提高评价结果的准确性和可靠性。具体地说 VOCs 的浓度变化可以通过搭建光催化实验系统辅以高精分析仪器如气相色谱、质谱等进行动态监测从而对其分解效率进行估算。同时运用扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)、X 射线衍射 (XRD) 等物理探测手段深入分析催化剂的微观形态、结构特性和表面化学状态如 X 射线光电子能谱 (XPS)、红外光谱 (IR) 等力求揭示其性能与内在的内在联系。

4.2 光催化活性与稳定性研究

光催化活性在评价 Ti 系催化剂性能的过程中显得尤为重要。研究人员在深入分析光生电子与空穴的产生、迁移及其分离效率对催化活性的同时探讨了光源种类、光照强度、波长等多样化的实验条件揭示催化剂在转化光能过程中的效率高低。同时,稳定性也是评价催化剂的另一项不可缺少的指标必须引起足够的重视以保证其业绩稳定性或在持续的长时间反应中发生退化的趋势。因此,对催化剂的稳定性进行综合评价是必不可少的研究步骤并通过循环实验等手段来探讨其失活的潜在的再生途径。

4.3 催化剂结构与性能关系的探讨

细微的结构变化在催化剂性能的研究过程中必不可少。这些结构因素如何影响其光催化活性可以从钛系催化剂的晶体结构、比表面积特性、孔隙分布、表面缺陷和活性位分布等方面进行深入分析来揭示。大家都知道催化剂的表面积高孔隙丰富对反应物的迁移吸附和促进更有效,对于催化剂的活性和稳定性至关重要的光生电子与空穴的复合过程表面的微小缺陷和活性位的决定性的影响。因此,对催化剂的结构特性如晶体结构、形态、尺寸等进行巧妙调控无疑是改善其光催化性能的有效方法。

5 Ti 系催化剂光催化氧化 VOCs 的工业应用前景与策略

5.1 现有工业应用中的挑战与限制

在考量光催化氧化挥发性有机物(VOCs)Ti系催化剂的产业化应用潜力时必须正视一系列技术难题和限制条件。关于催化剂本身尽管Ti系列催化剂因其优异的电子属性和催化活性而风头正劲但在迈向产业化的道路上Ti系列催化剂的效率和稳定性依然有较大的提升空间。这就促使我们必须从精心设计和优化活性位点的催化剂材料晶体结构入手更加深入地展开掺杂和改性技术的研究和探索。

对于光源的选择和应用在工业生产中具有决定性的作用。光催化技术本质上是对光能的利用在特定的工业实践中光催化的效率及其持续稳定性在很大程度上是由光源的稳定性、能量密度及其光谱分布等要素决定的。因此,寻找具有高效、稳定特性的光源与催化剂之间的交互机制进行细致的调整无疑是将光触媒技术推进产业化的重头戏。同时,影响技术在工业应用中成效的条件精确控制也是同等重要的。在实际操作过程中环境因素的变化如温度、湿度、氧气浓度等都可能对光催化反应的明显的影响。深入研究这些因素了解其对光催化反应的影响机理并根据这些认识加以优化无疑是光催化反应实现更稳定的必然之路。

5.2 技术优化与改进策略

以下策略有望成为技术进步和改进的突破口以突破现

阶段工业应用所遇到的诸多困难。首当其冲的就是要通过掺杂或改性等手段深化催化剂的开发和设计研究特别是要注重对晶体结构、活性位点的探索以及催化活性和稳定性的提升从而创造出效率更高的钛系催化剂。在光源选择和应用上通过优化光源和催化剂的相互作用积极探索光源材料新颖、高效、性能稳定的特点增强光催化工艺的性能和可靠性。此外为了达到自动调控和最优化使用光源的目的也不能忽视光源智能控制技术的研究。

深入探究各种反应条件下隐藏的作用原理进而实现对环境要素如温度、湿度、氧气浓度等的精确调整是寻求提高光催化反应效能和持久性策略的关键。同时还可以促进光催化过程的性能显著提高通过创新改进反应器设计和工艺流程。唯有如此才能促使光催化反应朝着更加稳妥的方向前进。

6 结语

在这项研究中我们系统性地深入研究了钛系催化剂在挥发性有机污染物(VOCs)光催化降解过程中的应用使此类催化剂在环境治理中的重要作用得到了凸显。得益于其优异的光催化活性和稳定性目前已证实钛系催化剂是解决VOCs污染的强力药剂。该研究全面探讨了催化剂的设计理念、制备技术、性能评估和优化策略为应用VOCs治理领域的钛系催化剂奠定了坚实的理论基础并提供了实践指导。展望未来钛系催化剂在光催化氧化VOCs技术领域的重要性在追求绿色和可持续发展的环保事业中日益凸显并有望扮演更为关键的角色。

参考文献

- [1] 王璐.多酚辅助Au-Ti系催化剂的制备及其催化H₂/O₂共存丙烯气相环氧化反应的研究[D].厦门:厦门大学,2021.
- [2] 邵嘉铭.基于锰系催化剂催化脱除烟气中NO_x和VOCs的试验与机理研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [3] 罗阿群.V-Ti及Mn-Ti系催化剂对二噁英催化降解的性能研究[D].上海:上海工程技术大学,2016.
- [4] 顾晓华,牛淑青,刘仁秋.Ti系催化剂对纤维级PET切片质量影响的研究[J].合成纤维,2009,38(6):33-35+39.

Adaptability and Challenge of Heat-tube Phase Change Technology in Thermal Control of Space Environment

Wenfeng Jiang

Shenzhen Boshang Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

This paper discusses the adaptability and challenge of heat pipe phase change technology in the thermal control of space environment. As an efficient thermal control method, heat pipe phase change technology is widely used in aerospace, electronics, energy and other industries, especially in the extreme environment. By comparing the performance parameters of aerospace and industrial heat pipes, the advantages and technical problems in space environment are analyzed. This paper also discusses how to overcome these challenges and achieve efficient and reliable thermal control. Through this study, it provides a reference for the future development of thermal control technology in the space environment.

Keywords

heat pipe phase change technology; space environment; thermal control; technical challenges; performance comparison

热管相变技术在空间环境热控制中的适应性与挑战

江文峰

深圳博尚科技有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘 要

论文探讨了热管相变技术在空间环境热控制中的适应性与挑战。热管相变技术作为一种高效热控方法, 广泛应用于航空航天、电子、能源等行业, 尤其在极端环境中的应用显得尤为重要。通过对比宇航级和工业级热管的性能参数, 分析其在空间环境中的热控优势与面临的技术难题。论文还结合博尚科技的技术创新与应用实例, 探讨了如何克服这些挑战, 实现高效、可靠的热控制。通过本研究, 为未来空间环境热控制技术的发展提供参考。

关键词

热管相变技术; 空间环境; 热控制; 技术挑战; 性能对比

1 引言

随着航天技术的迅猛发展和空间探索任务的不断增加, 热控系统在空间环境中的重要性愈发凸显。在太空中, 温度变化剧烈, 热流密度高, 如何有效地管理和控制热量成为各类航天器设计中的关键问题。热管相变技术作为一种高效的热管理方法, 因其卓越的导热性能和稳定性, 逐渐成为解决空间环境热控问题的首选技术之一。

热管相变技术利用了相变材料在固液或液气相变过程中吸收或释放大潜热的特性, 从而实现高效的热传导和温度控制。该技术不仅在航天领域有广泛应用, 还被广泛应用于电子设备散热、能源系统、建筑供暖等多个领域, 展现出极大的应用潜力。

论文结合深圳博尚科技有限公司在热能领域技术研发的经验积累, 详细探讨热管相变技术在空间环境热控制中的

适应性与挑战。通过对比宇航级和工业级热管的性能参数, 分析其在空间环境中的优势与不足, 并结合博尚科技的实际应用案例, 探讨如何克服现有的技术挑战, 实现高效、可靠的空间热控系统。希望通过本研究, 为未来空间热控技术的发展提供有价值的参考。

2 热管相变技术的基本原理

2.1 热管的结构与工作原理

热管结构通常由管壳、毛细结构和工作液组成。其结构包括几个关键部分。管壳是热管的外壳, 通常由高导热材料如铜或铝制成, 以减少管壳的热阻。毛细结构是热管内部的一层多孔材料, 如烧结粉末、金属网或沟槽结构, 能够通过毛细作用将工作液输送到蒸发段和冷凝段之间。工作液是在热管内部循环的液体, 常见的有水、氨、乙醇等。工作液的选择依赖于热管的工作温度范围和具体应用需求^[1]。

工作原理如下: 蒸发段通过一端吸收热量, 使工作液蒸发为气体。在此过程中, 吸收了大量潜热, 从而降低了蒸发段的温度。蒸发生成的气体在热管内的压力差推动下, 迅

【作者简介】江文峰(1989-), 男, 中国广东深圳人, 本科, 从事传热与空间热管理研究。

速流向热管的另一端，即冷凝段。在冷凝段，气体释放热量并凝结成液体，热量被传递到冷凝段的外界环境中。凝结后的液体通过毛细结构返回蒸发段，完成一个循环。通过这一循环过程，热管实现了高效的热传导和温度控制，具备优异的均温性和导热能力^[2]。

2.2 相变材料的选择与应用

相变材料在热管中的选择至关重要，因为它直接影响热管的性能和适用性。选择相变材料时，需考虑其相变温度、潜热、导热系数以及化学稳定性等特性。

相变材料的相变温度应与热管的工作温度范围相匹配。例如，水作为工作液时，其相变温度（100℃）适用于电子设备散热，而氨（-33℃）适用于低温环境下的热管理。相变材料的潜热越大，其吸收或释放的热量越多，从而提高热管的热传导效率。常用的相变材料如水、氨和乙醇都具有较高的潜热。相变材料的导热系数影响其热传导效率。高导热系数的材料能更快地传递热量，有助于提高热管的性能。相变材料在长期使用中应具有良好的化学稳定性，不会与管壳或毛细结构发生化学反应，从而保证热管的使用寿命和可靠性^[3]。

3 热管相变技术在不同领域的应用

3.1 航空航天

在航空航天领域，热管相变技术被广泛应用于航天器的热控制系统，以应对太空中极端的温度环境。这项技术能够有效管理和控制热量，确保航天器在白天高达数百摄氏度和夜晚降至零下数百摄氏度的温度下正常运行。具体应用包括卫星内部电子设备的温控、深空探测器的系统热管理，以及载人航天器的生命支持系统温度调节，保障宇航员的生命安全。

3.2 电子行业

随着电子设备性能的不不断提升，热管相变技术因其高效散热性能在电子行业中应用广泛。它可以快速将 CPU 和 GPU 产生的热量传导至散热器，确保高性能计算机和游戏机的稳定运行。在数据中心，热管技术提高了服务器的散热效率，降低设备温度，确保可靠性。此外，智能手机和平板电脑等移动设备在高性能运行时产生的热量也通过热管技术得到有效管理，提升用户体验和设备寿命。

3.3 能源行业

在能源行业，热管相变技术用于提高发电和储能系统的效率和可靠性。它在太阳能集热系统中帮助高效收集和传导太阳能热量，提高系统热效率。在核能发电中，热管技术有效管理核反应堆产生的高温热量，确保其安全运行。同时，在大规模储能设备如蓄电池和超级电容器中，热管技术管理充放电过程中产生的热量，延长设备寿命并提高安全性。

3.4 其他领域

除了上述主要领域，热管相变技术在其他建筑、医疗、汽车、工业制造等行业中也得到了应用，起到了降低能耗、维持稳定运行、提高安全性能、提高生产效率等效果。

4 宇航级与工业级热管性能对比

4.1 启动温度

宇航级热管需要在极端低温环境下工作，其启动温度通常低于 -100℃。这种低启动温度确保热管在太空中的极寒环境下能够迅速启动，保证航天器内部设备的正常运行。

工业级热管的启动温度通常在 30℃左右，适用于常规工业环境中的热管理需求。这类热管主要应用于常温或高温环境，如电子设备散热、工业设备热控等。

4.2 传热能力

宇航级热管的轴向传热能力通常超过 25W/CM²，而径向传热能力则高于 684W/M。高传热能力使得宇航级热管能够高效地管理航天器内部的热量，确保设备在极端温度环境下稳定运行。

工业级热管的轴向传热能力一般小于 5W/CM²，径向传热能力低于 80W/M。尽管传热能力相对较低，但对于常规工业应用已经足够，能够满足电子设备、工业机器等的散热需求。

4.3 均温性

宇航级热管的均温性通常小于 1℃，这意味着热管内部温度分布非常均匀，能够在极端环境下维持设备的稳定温度。

工业级热管的均温性一般小于 5℃，适用于常规工业环境中的热管理需求。尽管温度分布稍微不如宇航级热管均匀，但在多数工业应用中已经足够。

4.4 使用寿命

宇航级热管的使用寿命通常超过 10 年。长寿命的设计能够满足航天器长期任务的需求，确保在整个任务周期内提供稳定的热管理性能。

工业级热管的使用寿命一般为 3 年左右。尽管寿命相对较短，但在多数工业应用中，这样的寿命已经能够满足日常使用需求，并且相对较低的成本使其在商业应用中具备优势。

通过以上对比可以看出，宇航级热管和工业级热管在启动温度、传热能力、均温性和使用寿命等方面存在显著差异。这些差异反映了两种热管在不同应用领域中的技术要求和性能标准，帮助我们更好地理解和选择适合具体应用场景的热管技术。

5 空间环境热控制的技术挑战

5.1 极端温度与热流密度

在太空中，航天器处于阳光直射和地球阴影之间的温差可以高达数百摄氏度。例如，太阳光照射下的温度可能超过 100℃，而在阴影中温度可能降至 -100℃以下。这种极端温度变化要求热控系统具备极强的适应能力，以确保航天器内部设备在不同温度下均能正常工作。

航天器内部的电子设备和电力系统会产生高热流密度，导致局部过热。如果不能及时有效地散热，可能导致设备损坏甚至系统失效。因此，热控系统必须能够快速传导和散发热量，保持设备在安全温度范围内。

5.2 长时间稳定性与可靠性

热控系统需要在长时间运行中保持稳定性能,不能因材料老化或其他因素导致性能下降。热管相变技术在长时间运行中可能面临工作液蒸发、毛细结构堵塞等问题,影响其传热能力和均温性。

在太空中,任何热控系统的失效都会对任务产生严重影响,甚至危及航天器的安全。因此,热控系统必须具备高可靠性,确保在各种极端条件下均能正常工作。这需要通过严格的设计、制造和测试过程来保证。

5.3 其他技术难题

太空中的高能辐射可能对热控系统的材料和元件造成损伤,影响其性能和寿命。因此,热控系统需要具备抗辐射能力,以保证在高辐射环境中的可靠性。在微重力环境下,热控系统的工作液循环和相变过程会受到影响,可能导致传热效率下降。因此,需要专门设计的热管和相变材料,以适应微重力条件下的传热需求。航天器的设计要求热控系统必须具有轻量化和紧凑化的特点,以减少对航天器整体重量和体积的影响。这要求热控系统在保持高效传热能力的同时,尽可能降低其重量和体积。

总之,空间环境的独特性和复杂性对热控系统提出了诸多技术挑战。只有通过不断地技术创新和优化设计,才能克服这些挑战,确保航天器在极端环境下的正常运行。

6 解决方案与未来发展

6.1 创新解决方案

6.1.1 高效热管技术

微型热管具有更高的导热性能和灵活性,适用于空间有限的航天器内部。通过优化热管内部的毛细结构和工作液,进一步提升传热效率。在传统工作液中加入纳米颗粒形成纳米流体,就形成了纳米流体热管。这显著提高了热管的传热能力和均温性。纳米流体的高比表面积和高导热性使其成为高效热管的理想选择。

6.1.2 相变材料优化

具有高潜热、高导热性和化学稳定性的新型相变材料,可以适应空间环境的极端温度变化。这些材料不仅提高了热管的传热效率,还延长了其使用寿命。此外,将不同性质的相变材料复合在一起,结合其各自的优点,也可以提高热控系统的整体性能。例如,将有机相变材料与无机相变材料结合,既提高了传热能力,又增强了材料的稳定性。

6.1.3 先进制造技术

利用3D打印技术制造热管和散热器,不仅可以优化其内部结构,提高传热效率,还能减少制造成本和时间。3D打印还允许设计更加复杂和高效的毛细结构,进一步提升热管性能。

开发能够响应环境变化的智能材料,如温度敏感材料或形状记忆合金,用于热控系统。这些材料能够根据环境温度的变化自动调整其性能,提高热控系统的适应能力。

6.1.4 主动热控系统

利用热电效应实现主动冷却,通过电流控制冷却效果,

提供更精确的温度调节。热电冷却器具有无移动部件、响应速度快等优点,适用于需要精密温控的空间设备。

微流体系统通过控制微小液体通道中的流体流动,实现高效的热传导和散热。该系统体积小、重量轻,非常适合用于空间受限的航天器内部。

6.2 未来技术发展趋势

6.2.1 智能化与自适应性

未来的热控系统将更加智能化,能够根据环境变化自动调整工作状态,实现自适应热管理。通过结合传感器技术和人工智能算法,热控系统可以实时监测和分析温度变化,做出最优的热控决策。

6.2.2 轻量化与高效化

航天器对重量和能耗的严格限制要求热控系统必须轻量化和高效化。未来的发展将致力于开发新材料和新结构,进一步降低系统重量,提高传热效率。例如,采用超轻量材料和高导热结构,实现更高的性能比。

6.2.3 综合热管理系统

随着航天任务的复杂化,未来的热控系统将更加综合和多功能。除了热控,还将集成其他环境控制功能,如辐射防护、微重力适应等,提供全面的环境控制解决方案。

6.2.4 多功能相变材料

开发具有多功能的相变材料,如同时具备导热、储能和防辐射功能的复合材料。这些材料能够在单一系统中实现多种功能,提高系统的集成度和可靠性。

6.2.5 国际合作与标准化

热控技术的发展需要全球范围内的合作与交流。通过国际合作,共享最新研究成果和技术,推动热控技术的标准化和规范化,促进航天器热管理系统的统一和优化。

未来,随着创新解决方案的不断涌现和技术发展的不断推进,热管相变技术在空间环境热控制中的应用将更加广泛和高效,为人类的太空探索和航天事业提供坚实的技术保障。

7 结语

热管相变技术在空间环境热控制中非常重要,通过深入研究其结构、工作原理和相变材料,并广泛应用于航空航天、电子和能源行业,我们能更好地优化这一技术。面对极端温度和长时间稳定性等挑战,创新解决方案如微型热管、纳米流体和智能材料不断涌现,推动了热控系统的发展。随着智能化和高效化等趋势的发展,热管相变技术将在未来航天任务中发挥更关键的作用,确保更高效、更可靠的空间热控制系统。

参考文献

- [1] 江浩文,刘起汉.高温热管应用研究进展与展望[J].甘肃科技,2024,40(1):66-69+73.
- [2] 满学鹏,顾炜莉,易小芳,等.热管真空管太阳能集热器研究进展及应用[J].真空科学与技术学报,2021,41(4):318-325.
- [3] 陈久林,段洋,王志雄.相变储热技术的研究现状及应用[J].广东化工,2020,47(2):101-104+110.

Research on the Preparation Process of Beverage Grade Ortho Aminobenzamide

Huayi Huang Qing Hu Yaning Miao Enqin Rong Yutian Shao*

School of Materials and Chemical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui, 239000, China

Abstract

Ortho aminobenzamide is currently the only substance approved for use as a residual AA scavenger in beverage grade PET materials. The paper takes the industrial production process of beverage grade ortho aminobenzamide as the research object, selects indigo carmine anhydride as the main reaction raw material, screens the feeding sequence, ammonia source type and dosage, reaction temperature, reaction solvent type, mixed solvent ratio and dosage, as well as the number of times the mother liquor is used. Quality and technical indicators such as purity, yield, and Hunter whiteness of ortho aminobenzamide are used. The optimal process conditions were ultimately explored, which involved using industrial ammonia water with a mass concentration of 26% to 28% as the ammonia source, followed by the addition of indigo carmine first and then the ammonia source, and using a mixture of water and dichloromethane as the reaction solvent. The optimal reaction temperature was 20 °C, and the maximum number of solvent applications was 3 times. At this time, the yield of ortho aminobenzamide was higher than 85%, the purity was not less than 99.9%, and the Hunter whiteness was 80, fully meeting the quality requirements of beverage grade ortho aminobenzamide.

Keywords

o-aminobenzamide; PET packaging materials; deodorants; indigo anhydride; process condition

饮品级邻氨基苯甲酰胺制备工艺的研究

黄华悻 胡晴 苗雅宁 戎恩芹 邵玉田*

滁州学院材料与化学工程学院, 中国·安徽 滁州 239000

摘 要

邻氨基苯甲酰胺是目前唯一被批准用作饮品级PET材料中残留AA清除剂的物质。论文以饮品级邻氨基苯甲酰胺的工业生产工艺为研究对象,选择靛红酸酐作为主要反应原料,筛选了加料顺序、氨源种类及其用量、反应温度、反应溶剂种类、混合溶剂配比及其用量,以及母液的套用次数等条件,以邻氨基苯甲酰胺的纯度、收率及亨特白度等为质量技术指标。最终探索出了最佳工艺条件,即质量浓度为26%~28%的工业氨水作为氨源、采用先加靛红酸酐后加氨源的加料顺序,以水与二氯甲烷等体积混合物作为反应溶剂,最佳反应温度为20℃,最大溶剂套用次数为3次,此时,邻氨基苯甲酰胺的收率高于85%,纯度不低于99.9%,亨特白度80,完全满足饮品级邻氨基苯甲酰胺的质量要求。

关键词

邻氨基苯甲酰胺; 饮品包材; 除臭剂; 靛红酸酐; 工艺条件

1 引言

聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 材料兼具优异的力学性能和光学性能, 用其制作的聚

酯类饮料瓶较玻璃瓶更轻便、安全、易保存。随着饮品市场新产品的蓬勃发展, 近些年蒸馏水和碳酸汽水的 PET 材质包装瓶市场增长很迅猛, 2018 年以来, 中国聚酯 PET 行业热度持续提高, 产能增速达近 10%。虽然公众普遍认为 PET 是比较安全的食品接触材料, 但事实上, 在合成和加工过程中因 PET 聚合物热降解而生成的残留乙醛 (AA), 这些残留乙醛 (AA) 会迁移到饮料中, 引起饮料的异味^[1]。比如瓶装水, 消费者希望它有“清爽”的口味, 无法接受 AA 所发出的水果味。AA 在水中的味阈值是 10~20ppb, 要求瓶料胚中 AA 的浓度就是 1~2ppm。欧洲框架法规 1935/2004^[2] 或美国联邦食品、药品和化妆品法案^[3] 第 3 条中都要求食品的感官特性不受包装材料的影响, 所以乙醛的存在使得包装材料不符合法规要求。

【基金项目】滁州学院校级科研启动基金 (项目编号: 2020qd07); 滁州市指导计划项目 (项目编号: 2021ZD026); 滁州市科技成果转化奖补项目 (项目编号: 2022KJ27)。

【作者简介】黄华悻, 女, 中国安徽芜湖人, 在读本科生。

【通讯作者】邵玉田, 男, 中国安徽淮南人, 博士, 讲师, 从事药物合成工艺学研究。

众多研究表明通过向聚合物中添加清除剂的方式对去除残留 AA 体现出操作方便、持久性去除能力强等优点^[4-6]。为了降低 PET 瓶中的乙醛迁移,邻氨基苯甲酰胺(CAS:88-68-6)是目前唯一被批准用作乙醛清除剂的物质。根据欧洲塑料法规 10/2011^[7],邻氨基苯甲酰胺适用于 SML 为 50 μg/L 的水和饮料的瓶子。邻氨基苯甲酰胺也被美国食品接触通告第 137 号中批准作为聚酯饮料瓶中乙醛的清除剂^[8],中国 GB9685—2016《食品接触材料及制品用添加剂使用标准》中规定邻氨基苯甲酰胺的 SML 为 0.05mg/kg^[9]。美国俄亥俄州 Aven Lake 的 PolyOne(普立万)公司推出 FDA 认可批准的食品包装用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)新型助剂

OnCap AA,可有效去除饮品级 PET 制品的游离 AA,并指出其有效成分是含量 99.9% 的邻氨基苯甲酰胺、亨特百度 80 以上。

目前,用作饮品 PET 包装瓶 AA 清除剂的邻氨基苯甲酰胺生产工艺报道很少,缺乏稳定工艺参数^[10-13]。基于现状,论文以靛红酸酐作为主要原料,研究了不同氨(胺)源、溶剂、温度、加料顺序等反应条件对邻氨基苯甲酰胺合成工艺进行系统研究,以期解决现有工艺生产邻氨基苯甲酰胺存在产品纯度低、亨特白度不达标、生产过程难以操控等不足,以满意的收率针对性地合成了饮品级邻氨基苯甲酰胺。邻氨基苯甲酰胺的合成如图 1 所示。

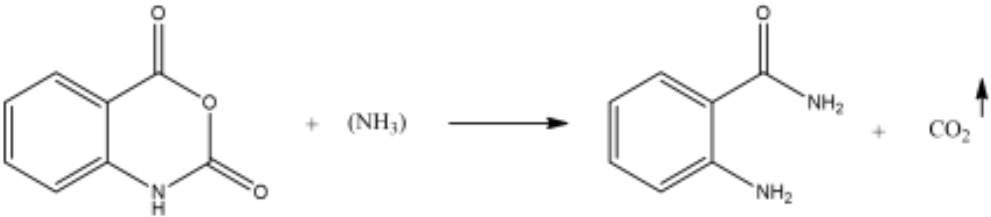


图 1 邻氨基苯甲酰胺的合成

2 实验部分

2.1 仪器和试剂

实验试剂如表 1 所示。

表 1 实验试剂一览表

名称	规格	厂家信息
靛红酸酐	99%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
氨水	26%~28%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
碳酸氢铵	99%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
二氯甲烷	AR	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
乙腈	AR	上海阿拉丁生化科技股份有限公司

仪器信息如表 2 所示。

表 2 仪器信息一览表

名称	型号	
Cole-parmer 数字显型磁力加热搅拌器	SPH-300	广州市赛拓仪器科技有限公司
高效液相色谱仪	1260 Infinity II	安捷伦科技有限公司
真空干燥箱	DZF6050	上海一恒科学仪器有限公司
德国赛多利斯电子分析天平	BSA124S	上海佳宜电子科技有限公司
全自动亨特白度计	WSD-3C	北京康光光学仪器有限公司

2.2 实验步骤

①先加靛红酸酐后加氨。

将靛红酸酐、溶剂加入三口烧瓶,开启搅拌;在一定温度下,分批加入氨,搅拌至靛红酸酐反应完全;降温至 15℃以下,抽滤,滤饼用去离子水漂洗至中性;60℃烘干,

得到白色邻氨基苯甲酰胺产品。

②先加氨后加靛红酸酐。

将氨、溶剂加入三口烧瓶,开启搅拌;在一定温度下,分批加入靛红酸酐,搅拌至靛红酸酐反应完全;降温至 15℃以下,抽滤,滤饼用去离子水漂洗至中性;60℃烘干,得到白色邻氨基苯甲酰胺产品。

3 结果与讨论

3.1 加料顺序对反应结果的影响

表 3 展示了加料顺序对邻氨基苯甲酰胺技术指标,即产率、纯度以及亨特白度的影响。由图数据可知,在其他条件相同的时候,先加靛红酸酐后加氨,或先加氨后加靛红酸酐,所得产品的技术指标几乎一致,所得邻氨基苯甲酰胺产品的纯度均高于 99%、收率 86% 以上,且亨特白度均为 83。同时,在实验过程中,两种加料方式对应的体系均很平稳,无明显泡沫堆积,甚至冲料现象。因此,在本实验中,加料顺序不是造成产品技术指标呈现巨大波动的主要因素。为减少研究工作量,后续实验均采用先加靛红酸酐后加氨的加料顺序。

表 3 加料顺序对反应结果的影响

序号	加料顺序	邻氨基苯甲酰胺技术指标		
		纯度	收率	亨特白度
1	先加靛红酸酐后加氨	99.9%	86.9%	83
2	先加氨后加靛红酸酐	99.8%	86.1%	83

注:靛红酸酐(0.1mol)、氨水(0.4mol)、水(48.9g)/二氯甲烷(48.9g)、20℃。

3.2 氨源对反应结果的影响

表 4 分别给出了改变氨源, 即浓度 26%~28% 的工业氨水和碳酸氢铵, 对产品邻氨基苯甲酰胺技术指标的影响结果。结果表明, 相比碳酸氢铵, 采用氨水作为氨源时产品邻氨基苯甲酰胺的技术指标整体略好, 尤其是亨特白度高了两个点。同时, 投料时, 固体碳酸氢铵往往需要采用人工或航吊比较麻烦, 而液体氨水更易于采用管道投料, 通过简易流量计就可以完美实现投料速率和总投料量。因此, 本工艺中选择浓度 26%~28% 的工业氨水作为氨源。

表 4 氨源对实验结果的影响

序号	氨源	邻氨基苯甲酰胺技术指标		
		纯度	收率	亨特白度
1	碳酸氢铵	99.8%	85.3%	81
2	氨水	99.9%	86.9%	83

注: 靛红酸酐 (0.1mol)、氨 (0.4mol)、水 (48.9g)/二氯甲烷 (48.9g)、20℃。

3.3 物料比对反应结果的影响

改变氨与靛红酸酐的物料比对所得产品邻氨基苯甲酰胺技术指标的变化结果如表 5 所示, 由表中数据可知, 随着所用氨与靛红酸酐的摩尔比的逐步增大, 产品纯度和亨特白度并无显著变化, 且在研究的比例范围内邻氨基苯甲酰胺亨特白度均高于 80、即满足饮品包材所需的质量技术要求。同时, 随着所用氨与靛红酸酐的摩尔比的逐步增大, 但产品收率呈现较为明显的减少趋势。其原因可能是氨量的逐步增大导致体系 pH 的增加, 继而引起产品在水中的溶解度的增大、导致产品收率下滑。因此, 综合考虑产品技术指标均处于最佳值时, 选择 n 氨 : n 靛红酸酐的比例为 4 : 1 为最佳条件。

表 5 物料比对实验结果的影响

序号	n(氨) : n(靛红酸酐)	邻氨基苯甲酰胺技术指标		
		纯度	收率	亨特白度
1	2 : 1	99.7%	86.2%	82
2	4 : 1	99.6%	86.9%	83
3	6 : 1	99.9%	85.5%	83
4	8 : 1	99.8%	83.2%	83

注: 靛红酸酐 (0.1mol)、水 (48.9g)/二氯甲烷 (48.9g)、20℃。

3.4 温度对反应结果的影响

表 6 展示了反应温度对产品邻氨基苯甲酰胺技术指标的影响结果。随着反应温度由 50℃逐步降低至 20℃, 产品纯度由 99.4% 增加到 99.9%、产品收率由 88.9% 降低到 86.9%、产品亨特白度则由 68 增加到 83; 进一步将反应温度降至 10℃后, 产品纯度和亨特白度均未呈现明显变化、但产品收率则进一步降低至 81.9%。由此可见, 反应温度对产品纯度、收率和亨特白度均有明显影响, 且对产品亨特白度影响极为明显, 当反应温度高于 20℃时, 虽然产品纯度

和收率均较好, 但亨特白度均明显低于 80、即产品质量不能满足饮品包材所需的质量技术要求。从节约能源和保证产品技术指标均为优先考虑, 论文实验选择 20℃为最佳反应温度。

表 6 温度对反应结果的影响

序号	反应温度	邻氨基苯甲酰胺技术指标		
		纯度	收率	亨特白度
1	50℃	99.4%	88.9%	65
2	40℃	99.4%	88.7%	71
3	30℃	99.6%	87.5%	75
4	20℃	99.9%	86.9%	83
5	10℃	99.9%	81.9%	84

注: 靛红酸酐 (0.1mol)、氨 (0.4mol)、水 (48.9g)/二氯甲烷 (48.9g)。

3.5 溶剂种类对反应结果的影响

在其他条件均相同时, 研究了反应溶剂种类变化对产品邻氨基苯甲酰胺技术指标的影响 (表 7)。综合分析表 7 数据可知, 在本论文研究的条件范围内, 所得产品的纯度均较好、均在 99% 以上, 但收率和亨特白度呈现了较为明显的不同。采用单一溶剂时, 所得产品邻氨基苯甲酰胺的亨特白度均达不到饮品包材所需要的技术指标, 而采取混合溶剂时, 所得产品邻氨基苯甲酰胺的亨特白度均高于 80, 满足饮品包材的质量需求。进一步综合考虑收率指标, 最终选择水: 二氯甲烷混合溶剂作为最佳反应溶剂。

表 7 溶剂种类对反应结果的影响

序号	反应溶剂	邻氨基苯甲酰胺技术指标		
		纯度	收率	亨特白度
1	水	99.4%	83.1%	78
2	乙腈	99.4%	70.3%	72
3	二氯甲烷	99.6%	87.5%	77
4	水 : 乙腈 =1 : 1	99.9%	77.3%	84
5	水 : 二氯甲烷 =1 : 1	99.9%	86.9%	83

注: 靛红酸酐 (0.1mol)、氨 (0.4mol)、溶剂 (97.8g)、20℃。

3.6 溶剂比对反应结果的影响

溶剂配比对邻氨基苯甲酰胺技术指标的影响结果如表 8 所示。对比表中数据值可知, 增加混合溶剂中水的比例有利于提高产品收率、但会导致产品纯度和亨特白度下降而不满足饮品包材所需要的技术指标。而增加混合溶剂中二氯甲烷的比例, 则可以有效保证产品的纯度和亨特白度均满足饮品包材所需要的技术指标、但收率明显降低。造成上述现象的可能原因是, 混合溶剂中水的比例增加导致杂质析出量增大、继而造成产品技术指标下降; 相反, 增大混合溶剂中二氯甲烷的用量, 则使得绝大部分杂质溶于二氯甲烷而不会析出, 有效保证的产品的纯度和亨特白度指标, 但由于二氯甲烷不但会溶解杂质、同样也会溶解邻氨基苯甲酰胺, 因此, 造成产品邻氨基苯甲酰胺的收率下降。综合考虑, 则选择混合溶剂中水与二氯甲烷的体积比为 1 : 1 为最优条件。

表 8 溶剂配比对反应结果的影响

序号	m（水）：m（二氯甲烷）	邻氨基苯甲酰胺技术指标		
		纯度	收率	亨特白度
1	1：1	99.9%	86.9%	83
2	2：1	99.2%	88.5%	76
3	1：2	99.9%	84.7%	81

注：靛红酸酐（0.1mol）、氨（0.4mol）、溶剂为水与二氯甲烷的混合物（97.8g）、20℃。

3.7 溶剂用量对反应结果的影响

表 9 展示了改变溶剂用量对邻氨基苯甲酰胺技术指标的影响。表中现象及数据结果表明在所研究的三个条件下，所得产品的纯度均为 99.9%、亨特白度均高于 80，即增加溶剂用量对产品纯度和亨特白度没有明显影响。但随着溶剂用量由 3：1 增大到 9：1，产品收率呈现明显的下降。可能原因是溶剂量增大后、产品被溶解量也随之增加，造成产品收率下降。因此，溶剂用量为靛红酸酐质量 3 倍为最佳，此时所得邻氨基苯甲酰胺的纯度和白度均合格且收率最高。

表 9 溶剂用量对反应结果的影响

序号	m（溶剂）：m（靛红酸酐）	邻氨基苯甲酰胺技术指标		
		纯度	收率	亨特白度
1	3：1	99.9%	88.3%	83
2	6：1	99.9%	86.9%	83
3	9：1	99.9%	80.7%	84

注：靛红酸酐（0.1mol）、氨（0.4mol）、溶剂为水与二氯甲烷等质量混合物、20℃。

3.8 溶剂套用次数对反应结果的影响

通过将反应溶剂套用是减少废液排放、提升产品成效比和市场竞争力的有效途径之一。论文在上述研究基础上，研究了溶剂套用实验。套用实验是以上一批反应结束的母液作为反应底液，根据损失量进行补加新的溶剂，并保证每一批套用实验的溶剂与靛红酸酐的质量比均为 3：1。

由表 10 数据可知，当套用次数在 3 次及其以内的时候，产品的纯度和亨特白度均满足饮品包材所需要的技术指标，同时，产品收率达到 92.0%。进一步地，随着套用次数的增加，产品收率依然在增大、但增加的幅度已不是很显著；同时，产品的纯度和亨特白度均降低至饮品包材所需要的技术指标以下。由此可见，通过反复套用母液，可以增大产品收率，但兼顾饮品包材对本产品的质量指标要求，在本研究条件内的最大套用次数为 3 次。

论文以饮品级邻氨基苯甲酰胺的工业生产工艺开发为研究对象，选择靛红酸酐作为主要反应原料，筛选了加料顺序、氨源种类及其用量、反应温度、反应溶剂种类、混合溶剂配比及其用量，以及母液的套用次数等条件，综合考量了饮品级邻氨基苯甲酰胺的纯度、收率及亨特白度等质量技术指标。最终探索出了最佳工艺条件，即质量浓度为 26%~28% 的工业氨水作为氨源、采用先加靛红酸酐后加

氨源的加料顺序、以水与二氯甲烷等体积混合物作为反应溶剂、最佳反应温度为 20℃、最大溶剂套用次数为 3 次，此时，邻氨基苯甲酰胺的收率高于 85%、纯度不低于 99.9%、亨特白度 80，完全满足饮品级邻氨基苯甲酰胺的质量要求。

表 10 溶剂套用次数对反应结果的影响

序号	套用次数	邻氨基苯甲酰胺技术指标		
		纯度	收率	亨特白度
1	1	99.9%	89.7%	83
2	2	99.9%	90.9%	83
3	3	99.9%	92.0%	82
4	4	99.7%	93.6%	80
5	5	99.4%	94.1%	77

注：靛红酸酐（0.1mol）、氨（0.4mol）、水（48.9g）/二氯甲烷（48.9g）、20℃。

参考文献

[1] 赵镭,韦存茜,吴亚平,等.液相色谱串联质谱法测定聚对苯二甲酸乙二醇酯矿泉水瓶中邻氨基苯甲酰胺迁移量[J].食品安全质量检测学报,2020,11(15):5309-5312.

[2] Commission regulation (EU) No 1935/2004[Z].

[3] FDA, Food and Drug Administration, 2015. 21 CFR 174[Z].

[4] MARK R, Atlanta, GA(US). Process for reduction of acetaldehyde and oxygen in beverages contained in polyester-based packaging[P]. US6569479, 2003.

[5] MARK R, Atlanta, GA(US). Method to decrease aldehyde content in polyolefin products[P]. US6632874, 2003.

[6] MARK R, Atlanta, GA(US). Method to decrease the acetaldehyde content of melt-processed polyesters[P]. US6274212, 2001.

[7] Commission regulation (EU) No 10/2011 [Z].

[8] Food contact notification (FCN) No. 137, US Food and Drug Administration [Z].2001.

[9] GB9685—2016 食品安全国家标准食品接触材料及制品用添加剂使用标准[S].

[10] Staiger R P, Wagner E C. ISATOIC ANHYDRIDE. II. REACTIONS OF ISATOIC ANHYDRIDE WITH AMMONIA[J]. The Journal of Organic Chemistry, 2002, 13(3).

[11] WANG G L, CHEN X L, DENG Y Y, et al. Synthesis and Nematicidal Activities of 1,2,3-Benzotriazin-4-one Derivatives against Meloidogyne incognita[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2015, 63:6883-6889.

[12] CHENG R, GUO T J, DAISY Z N, et al. One-pot Synthesis of quinazolinones from anthranilamides and aldehydes via p-toluenesulfonic acid catalyzed cyclocondensation and phenyliodine diacetate mediated oxidative dehydrogenation[J]. Sythesis, 2013,45:2998-3006.

[13] 杨莎,李晓花,杜漠,等.2-氨基苯甲酰胺衍生物的合成与应用[J].化学与生物工程,2024,41(4):60-63.

Research on the Application of Carbon Fiber Reinforced Composites in Aerospace

Fenglei Sun

Jinan Steel Four New Industry Development (Shandong) Co., Ltd., Jinan, Shandong, 252000, China

Abstract

In the context of the continuous development of modern science and technology and aerospace industry, the performance requirements for aircraft are becoming higher and higher. Carbon fiber reinforced composite materials are widely used in the aerospace field because of their comprehensive performance advantages such as high strength, low density and high temperature resistance, saving fuel and reducing maintenance costs on the basis of reducing the weight of various types of aircraft. This paper takes carbon fiber reinforced composite as the research object, elaborates the performance characteristics of carbon fiber reinforced composite and its application in the aerospace field in detail, and puts forward several effective countermeasures around the development trend of carbon fiber reinforced composite in the aerospace field for reference.

Keywords

carbon fiber reinforced composite; aerospace; apply; study

碳纤维增强复合材料在航空航天中的应用研究

孙凤雷

济钢四新产业发展（山东）有限公司，中国·山东 济南 252000

摘 要

在现代科学技术和航空航天事业不断发展背景下，对飞行器的性能要求也越来越高。碳纤维增强复合材料因其展现出的高强度、低密度、耐高温等综合性能优势，被广泛应用到航空航天领域当中，在减轻各类飞行器重量的基础上，节省燃油和降低维护成本。论文以碳纤维增强复合材料为研究对象，细致阐述碳纤维增强复合材料的性能特点及在航空航天领域的应用状况，围绕航空航天领域碳纤维增强复合材料的发展趋势，提出几点有效应对建议，以供参考。

关键词

碳纤维增强复合材料；航空航天；应用；研究

1 引言

在航空航天领域，对碳纤维增强复合材料进行应用，不仅有助于飞行器减重，使其结构效率增加，还能有效抵御外部打击和温度变化带来的影响，助推中国航空航天事业获得高质量的发展。然而受到碳纤维增强复合材料综合性能及其实际应用范围了解不足影响，导致碳纤维增强复合材料在航空航天领域应用与发展受到诸多的限制。需要加强碳纤维增强复合材料研究与分析，在全面细致了解其在航空航天飞机结构、航天器等方面的应用状况及取得效果后，明确高性能和多尺度复合材料是未来的主流趋势，将助力航空航天领域解决更多痛点问题^[1]。

2 碳纤维增强复合材料的性能特点

碳纤维增强复合材料主要是以碳纤维或碳纤维织物为增强体，以树脂、金属、陶瓷、橡胶等为基体，所形成的复合材料。其性能特点有：①高强度。碳纤维的比强度，即抗拉强度与密度的比值，为钢的 6 倍、铝的 17 倍。这使得碳纤维增强复合材料可以承受较大的工作负荷，最大工作压力可达到 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 。②轻质化。碳纤维增强复合材料的重量较轻，仅为钢的 1/5，这使它在减轻产品自重、提高能源效率等方面，拥有较为显著的应用优势。③机械性能好。碳纤维增强复合材料还拥有优异的抗蠕变、耐疲劳等性能，并且这些性能要比环氧树脂和传统金属材料高得多。④耐腐蚀。碳纤维增强复合材料耐酸、碱、盐及大气环境的腐蚀，实际运用即便是不对其进行定期维护保养，使用寿命就可达到 15 年以上。⑤耐热性。碳纤维增强复合材料还具有良好的导热和耐热性能，支持在 $-120^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$ 的温度环境下稳定的工作。同时，在惰性气体中，该材料适应温度还能达到

【作者简介】孙凤雷（1983-），男，中国山东聊城人，本科，工程师，从事空天产业应用材料研究。

2000℃左右,拥有较好的经受热冷急剧变化的性能优势。⑥导电导热和抗震性能。碳纤维增强复合材料所具有的导电和导热性能,使其适用于需要良好热管理和电磁屏蔽的应用领域。同时,拥有的良好抗震性,又使之成为减震消音的优良材料^[2]。

3 碳纤维增强复合材料在航空航天中的应用情况

3.1 飞机结构件

碳纤维增强复合材料在航空航天飞机结构件上应用,为飞机设计建造带来重大的突破与改革,使飞机的飞行性能得到极大的提升。实际应用表现为:①机身结构。相较于传统金属材料,碳纤维增强复合材料拥有更高的强度和刚度,再加上出色的抗疲劳性能,将之运用到飞机机身设计和制造中,可使飞机机身更轻和更坚固。特别是在无人机领域,碳纤维增强复合材料被广泛应用到整体机身制造当中,包括翼梁、机身梁及其他承受高荷载的结构件,即使无人机结构更加轻量化,又保持了良好的强度和耐腐蚀性能,见图1。②机翼和尾翼。碳纤维增强复合材料用于制造机翼和尾翼,可以有效减轻整体重量,提高性能和燃油效率。究其原因在于碳纤维增强复合材料拥有高比强度、高比模量,运用以后可取得减少飞机制造结构重量、增强飞机结构强度等的效果。同时,经过精确的层叠设计、纤维取向控制以后,通过使用的碳纤维增强复合材料,还能实现对机翼结构刚度、强度的精确调整与控制,使飞机的飞行性能得到大幅度的提升。③机身和起落架。将碳纤维增强复合材料用于机身和起落架的制造中,可以承受较大的静荷载和动荷载。同时,还能有效运用到各种连接件和细部构件当中,比如飞机舱门,不仅可以减轻飞机结构负担,还能为飞机优化设计提供更多的可能性^[3]。



图1 GE90 发动机使用碳纤维增强复合材料设计制造风扇叶片

3.2 发动机

在提高航空航天发动机性能、降低燃油消耗率等方面,碳纤维增强复合材料也发挥着至关重要的作用。实际运用表现为:①发动机外壳和外部结构。在航空航天发动机领域,要求发动机外壳必须具备轻量化、高强度、耐腐蚀等特性,

而碳纤维增强复合材料本身具备的高强度、耐腐蚀等优良性能,就成为了发动机设计制造的理想材料,实际运用可有效减轻发动机的负荷,使整个系统燃油效率得到提升。②发动机叶片。对于飞机发动机的叶片,不仅要求可以在高温高压环境下正常保持工作,还要确保整体结构完整性和轻量化。对碳纤维增强复合材料运用后,既能减小叶片的质量,又能提高动力传输的效率。比如GE90发动机就是首个使用碳纤维增强复合材料设计制造风扇叶片,并直接进入实际服役的涡扇发动机,每个叶片使用超过1700个手工铺层的碳纤维预浸料制造,通过热压罐固化和精加工,使其具备优良的耐高温高压、轻量化等使用性能。③结构加强件及附件。碳纤维增强复合材料在航空航天发动机的结构加强件及附件领域应用,多体现在支撑结构制造、发动机管道等方面,可提高发动机的整体强度,有效预防疲劳破坏带来的不利影响。

3.3 航天器

碳纤维增强复合材料在航天器上应用十分广泛,主要包括:①天线罩。作为保护航天器上天线及其他敏感设备的重要内容,要求其具备轻量化、高强度、低热膨胀的使用性能。由于航天器中每公斤质量都会对整个系统运载和性能产生极大的影响,因此对碳纤维增强复合材料拥有的轻量特性进行运用,就有助于减轻航天器的整体负荷,实现对其使用性能的优化改进。同时,碳纤维增强复合材料具有的高强度特性,可使航天器的天线罩在极端的空间环境中承受较大的外部压力与振动,以此实现对航天器上各种设备的有效保护。②次级结构件。碳纤维增强复合材料在航天器次级结构件中也有创新性的应用。比如航天器对质量较为敏感,碳纤维增强复合材料所体现出的高强度和高刚度性能,就为航天器提供十分卓越的结构支持,确保次级结构件能够更好地承受极端温度变化、空间真空等。同时,有效利用碳纤维增强复合材料的可塑性和可成形性,就能根据复杂的几何形状对航天器次级结构件进行设计与定制,在切实满足不同载荷需求的同时,推动航天器结构设计精细化进程。③热防护层。碳纤维增强复合材料在航天器的热防护层上应用,可极大保护航天器不受高温和极端气流的影响。在航天器进入大气层时,往往容易受到高速运动产生的空气摩擦影响,导致其运行不够稳定可靠。这时利用碳纤维增强复合材料的高温稳定性和热传导性能,就能增强航天器自身防护能力,避免内部结构遭受到外部高温高压环境的影响。另外,利用碳纤维增强复合材料在制造过程中的可塑性和成型灵活性,还能促进热防护层根据实际航天器外形进行优化设计和制作,在满足各类航天任务需求的基础上,保证航天器进入大气层后可以安全返回来^[4]。

3.4 其他方面

碳纤维增强复合材料在航空航天领域其他方面进行应用,包括座椅、仪表板、油箱油管等内容。对于座椅、仪表板这些航空器内部构件,在制作时考虑使用碳纤维增强复合

材料,就能利用其轻质、高强的特性,使飞机内部构件更加轻便。对于航空器的油箱油管,则能利用碳纤维增强复合材料的耐腐蚀、兼容性好等优势,保障和提升航空燃油系统的安全性及可靠性。

4 碳纤维增强复合材料在航空航天中的发展趋势及有效建议

4.1 发展趋势

碳纤维增强复合材料在航空航天领域中的发展趋势包括:①高性能复合材料。复合材料是人们运用先进材料制备技术,将不同性质的材料组分优化组合而成的新材料。尽管现阶段碳纤维增强复合材料在航空航天领域中应用,取得了增强内部结构稳定性、提升整体飞行性能、减少燃油损耗等的效果。但是没有准确把握碳纤维增强复合材料主要聚焦高性能复合材料研究与应用的发展趋势,也会对碳纤维增强复合材料实际应用性能优化和扩大产生极大的影响。新时期必须将注意力放在高性能复合材料研究与应用分析上面,通过研究开发具有更加卓越性能的复合材料,比如新型环氧树脂、聚酰亚胺等,强化碳纤维增强复合材料在高温和极端环境下的性能表现,促进其在航空航天领域得到更加深入应用,并助推中国航空航天事业朝着更好的方向发展。②多尺度复合材料。在碳纤维增强复合材料中逐步引入微观、纳米级别等的增强材料,并在进行制备过程中,有效运用纤维增强、人工智能等技术,不仅可以持续改进材料的导热、耐磨等性能,还使复合材料具有感知性、形状记忆等智能功能,依托其可在多尺度上精心设计材料结构,甚至是对材料性能进行精细调控,延伸和拓展碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用范围,新时期航空航天事业发展对于高性能材料的需求也能得到切实的满足^[5]。

4.2 有效建议

要促进碳纤维增强复合材料在航空航天领域得到有效应用和深度发展,就要对以下工作加以重视:①加强碳纤维增强复合材料研究分析。紧密围绕碳纤维增强复合材料在航空航天领域中有效应用,构建专门的研究队伍,对碳纤维增强复合材料的特性及其在航空航天领域应用的范围进行细致把握。然后从高性能化、低成本化、绿色智能等角度入手,

深度研究采用怎样的方式提高碳纤维纯度和性能、优化树脂基体配方和工艺、实施大规模碳纤维复合材料制造等,确保碳纤维增强复合材料能够满足航空航天各项需求。②持续优化相关工艺技术。在改进生产工艺方面,通过调整共聚单体组分实现快速可控的氧化工艺,再利用共聚单体的结构特点,加快氧化反应速率,最后采用干喷湿纺工艺,降低成本和提高产量。在应用创新技术方面,可考虑使用等离子氧化技术,对更高质量和低成本碳纤维产品进行制备。同时,采用微波氧化工艺和余热利用技术,可显著降低生产过程中的能耗与碳排放,促进碳纤维增强复合材料可持续发展,为在航空航天领域有效应用奠定良好的基础。

5 结语

论文是对碳纤维增强复合材料在航空航天中应用的研究与分析。随着中国航空航天事业不断发展,组织开展飞机机身、内部结构构件等设计制造工作,对使用材料也提出更高的要求,主要体现在高强度、轻量化、耐腐蚀、耐高温等方面。碳纤维增强复合材料作为一种轻质坚固的新材料,在航空航天内部结构件、航天器、发动机等中应用,可使飞机、航天器等整体性能得到全面的提升。新时期必须加强对碳纤维增强复合材料在航空航天领域中的应用的研究与分析,并紧跟时代发展步伐,有效利用先进工艺、技术、材料等,对碳纤维增强复合材料的性能进行持续优化改进,促进其在航空航天领域得到更大范围的应用,在充分发挥其优势性能的同时,引领航空航天事业朝着更好的方向迈进。

参考文献

- [1] 余粤凯.金属/碳纤维增强复合材料低速冲击和层间增强机理研究[D].南昌:华东交通大学,2023.
- [2] 谷雨.碳纤维增强聚合物复合材料在航空航天领域的研究进展[J].冶金与材料,2023,43(7):118-120.
- [3] 吕淑扬,郑凯,赵英男,等.碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用[J].聚酯工业,2024,37(3):71-73.
- [4] 孙国栋,吕龙飞,解静,等.碳纤维增强复合材料阻尼性能的研究进展[J].材料导报,2023(7):1-22.
- [5] 李欣,宋绮梦,张学强,等.激光加工碳纤维增强复合材料及其在航空航天领域应用(特邀)[J].中国激光,2024,51(4):9-30.

Structure and Properties of Laser 3D Printing High Strength and High Toughness TC4 Alloy

Shuangquan Guo^{1,2} Shuguang Li^{1,2} Wei Zhang^{1,2} Xuanxuan Huang^{1,2} Yi Wang^{1,2}

1. Chengdu Hangli (Group) Industrial Co., Ltd., Meishan, Sichuan, 610041, China

2. Chengdu Tianxiang Power Technology Research Institute Co., Ltd., Meishan, Sichuan, 610041, China

Abstract

The TC4 titanium alloy was formed by SLM technology. The density of the 3D printing specimen optimized based on the Double Doelhart design matrix optimization reached 99.9%. The parameters for optimal printing are: layer thickness 30 μ m, laser power is 310W, scanning speed is 1200mm/s, scanning spacing is 0.1mm, and wind field value is 24. Due to the high laser energy density and high scanning speed during the laser selective melting process, the laser selective melting structure is a fine martensite structure that solidifies nearly rapidly. The relationship between heat treatment systems and mechanical properties was studied. It indicated that the HIP and long-term annealing process can obtain a high-strength and high-toughness 3D printed titanium alloy, which can fully meet the technical indicators of forgings and can be widely used in the printing of aircraft engine parts.

Keywords

3D printing; laser additive manufacturing; titanium alloy; heat treatment

激光 3D 打印高强高韧 TC4 钛合金的组织与性能

郭双全^{1,2} 李曙光^{1,2} 张伟^{1,2} 黄璇璇^{1,2} 王轶^{1,2}

1. 成都航利（集团）实业有限公司，中国·四川眉山 610041

2. 成都天翔动力技术研究院有限公司，中国·四川眉山 610041

摘 要

采用SLM技术成形了TC4钛合金，基于Double Doelhart设计矩阵优化的3D打印试样的致密度达到99.9%，最佳打印的参数为：层厚30 μ m，激光功率310W，扫描速度1200mm/s，扫描间距0.1mm，风场数值24。由于激光选区熔化过程中的高激光能量密度和高扫描速度带来极快的冷却速度（ $10^4\sim 10^7$ °C/s），激光选区熔化组织为近快速凝固的细小马氏体组织。研究了热处理制度与力学性能关系，表明低温热等静压+长时真空退火可以获得高强高韧性的3D打印钛合金，全面达到锻件的技术指标，可广泛应用于航空发动机零件的打印。

关键词

3D打印；激光增材制造；钛合金；热处理

1 引言

TC4 钛合金具有优良的综合力学性能，通常是航空发动机冷端部件如机匣、整体叶盘等重要零件的制造选用材料。由于其 3D 打印的广泛应用，3D 打印钛合金航空发动机零部件也成了研究的热点^[1]。发动机运行工况条件恶劣，3D 打印的钛合金需要全面达到锻件技术水平才能被广泛应用。很多研究人员并没有给出全面的性能测试数据^[2]，导致在航空发动机工程应用推广缓慢。论文通过新工艺参数优化+热处理优化，深入研究组织与性能的关系，给出全面的性能数据库，为激光 3D 打印 TC4 制件的热处理工艺制定和工程应用提供试验依据和参考。

【作者简介】郭双全（1981-），男，中国四川眉山人，博士，高级工程师，从事粉末研制与3D打印研究。

2 试验设备及方法

2.1 制备方法

本试验采用德国 SLM Solutions 公司生产的 SLM280HL 型激光选区熔化设备。该设备由一个最大输出功率为 400W 的 YLR-400 光纤激光器、带有 PSV 自动上送粉装置、工作平台，回收过滤装置以及计算机控制系统等部分组成。

试验材料采用 Tekna 公司生产的商业 TC4 雾化球形粉末。采用美国麦奇克仪器公司的 S3500 型号激光粒度仪测试粉末粒度，粉末的粒度主要分布范围为 15~45 μ m，其中 D（10）为 22 μ m，D（50）为 33 μ m，D（90）为 48 μ m。图 1 给出了试验粉末的 SEM 形貌，粉末的球形度达到 98.3%。

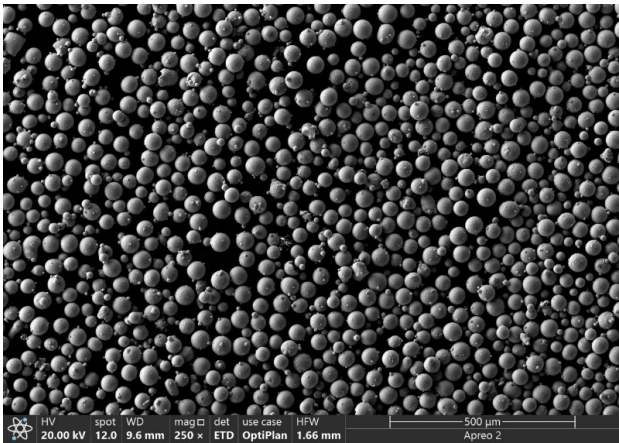


图 1 粉末 SEM 形貌

3D 打印的试样包括室温拉伸、高温拉伸、高温持久、冲击韧性、硬度、高周疲劳和低周疲劳，试棒成形方向包括横向 XY 方向和纵向 Z 方向。

对打印制备好的样品进行低温热等静压（HIP）+ 真空长时退火处理，其中 HIP 具体参数为 140MPa 压力下 880℃ × 2h，而真空长时热处理温度 880℃ × 6h。

2.2 表征

样品在 20 V 和 0℃下使用 10% 磷酸水溶液蚀刻 5s。使用卡尔蔡司倒置光学显微镜（OM）和蔡司 GEMINI 300 扫描电子显微镜（SEM）分析打印态、后处理的形态和微观结构。

2.3 力学性能测试

力学性能测试按照 HB 5143—1996《金属室温拉伸试验方法》、HB 5148—1996《金属室温冲击试验方法》、HB 5150—1996《金属高温拉伸持久试验方法》、ASTM E466—15《高周疲劳测试方法》、ASTM E606/E606M-12《低周疲劳测试方法》和 HB 5168—1996《金属布氏硬度试验方法》执行。

3 结果与讨论

3.1 致密度优化与微观组织

采用 Double Doehlert 矩阵优化^[3]方法，将激光功率、扫描速度和扫描间距设定为 X1、X2 和 X3，18 组参数如表所示，获得了工艺参数与致密度的关系。测试结果表明 18 号参数的致密度最高且能量密度适中，最佳打印的参数为：层厚 30μm，激光功率 310W，扫描速度 1200mm/s，扫描间距 0.1mm，风场数值 24，其致密度达到 99.95%（表 1）。18 号参数样品金相组织如图 2 所示，由于激光选区熔化过程中的高激光能量密度和高扫描速度带来极快的冷却速度（10⁴~10⁷℃/s），激光选区熔化组织为近快速凝固的细小马氏体组织^[3,4]。

3.2 热处理后组织与力学性能

经过热等静压 + 热处理后的组织如表所示，组织非常致密，并且为 α+β 组织，其中 α 的数量占了绝大部分，并且 α 相呈现多种形态，如短棒状、长条状、树枝状，多

尺度下协同为 3D 打印的 TC4 材料的综合力学性能提升提供了保障。测试了横向和纵向的试样力学性能，测试结果表明经过后处理的 3D 打印试样，其室温拉伸、高温拉伸、高温持久、冲击韧性、硬度、高周疲劳和低周疲劳性能全面达到航空锻件技术标准，并且经过处理以后其断面收率和锻件相比非常高。可以实现航空锻件的直接打印（见图 3、图 4）。

4 结论

①采用 Double Doehlert 设计矩阵优化的 3D 打印工艺参数可以实现打印试样达到 ≥ 99.9% 的致密度。

②经过低温热等静压 + 真空长时退火处理后得到稳定的 α+β 组织。组织非常致密，其中 α 的数量占了绝大部分，且 α 相呈现多种形态，如短棒状、长条状、树枝状，多尺度下协同为 3D 打印的 TC4 材料的综合力学性能提升提供了保障。

③经过低温热等静压 + 真空长时退火处理后的试样其室温拉伸、高温拉伸、高温持久、冲击韧性、硬度、高周疲劳和低周疲劳性能全面达到航空锻件技术标准。可以实现航空锻件的直接打印。

表 1 26 组工艺参数

序号	激光功率（W）	扫描速度（mm/s）	扫描间距（mm）
1	350	1400	0.12
2	380	1400	0.12
3	365	1750	0.12
4	335	1750	0.12
5	320	1400	0.12
6	335	1050	0.12
7	365	1050	0.12
8	365	1516.801386	0.14
9	335	1516.801386	0.14
10	350	1166.801386	0.14
11	365	1283.198614	0.1
12	335	1283.198614	0.1
13	350	1633.198614	0.1
14	330	1200	0.1
15	350	1200	0.1
16	340	1450	0.1
17	320	1450	0.1
18	310	1200	0.1
19	320	950	0.1
20	340	950	0.1
21	340	1283.429561	0.12
22	320	1283.429561	0.12
23	330	1033.429561	0.12
24	340	1116.570439	0.08
25	320	1116.570439	0.08
26	330	1366.570439	0.08

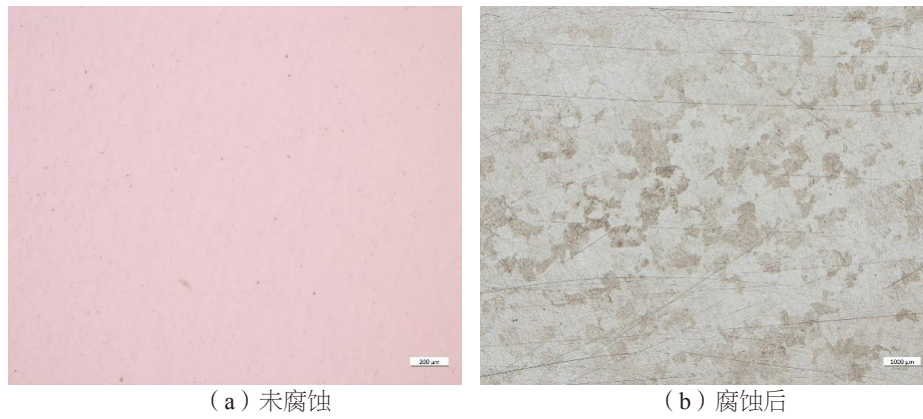


图 2 3D 打印态组织 OM 图

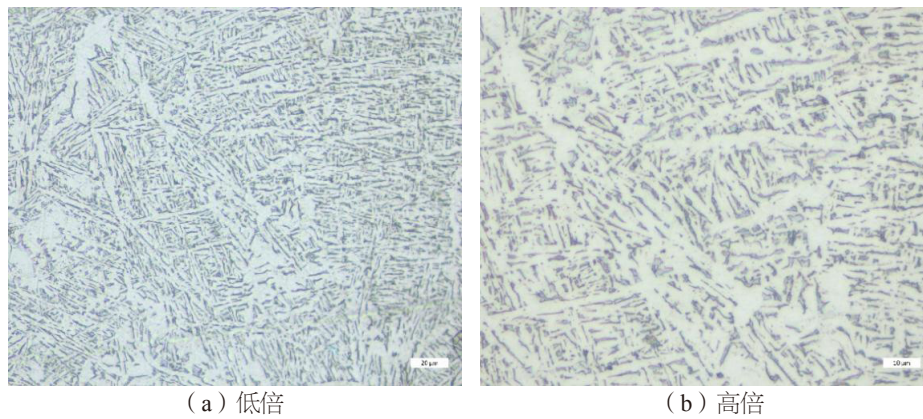


图 3 HIP+ 热处理后的 XY 向组织 OM 图

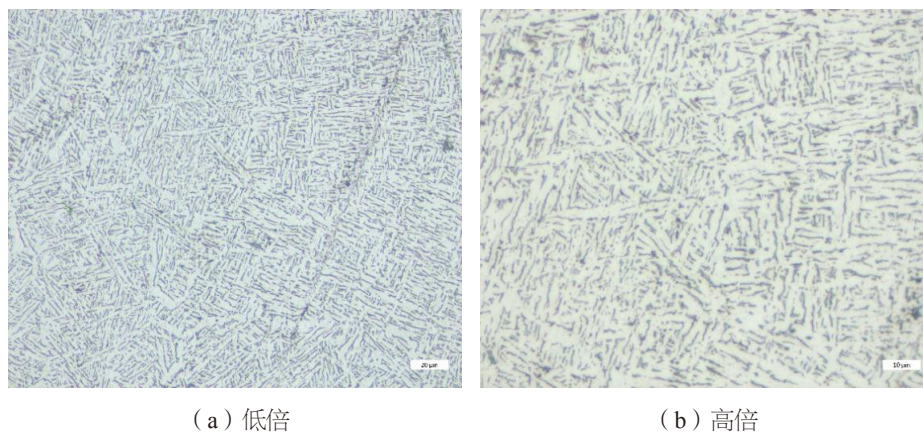


图 4 HIP+ 热处理后的 Z 向组织 OM 图

参考文献

- [1] Chaolin Tan, Fei Weng, Shang Sui, et al. Progress and perspectives in laser additive manufacturing of key aeroengine materials [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021,170(103804):1-58.
- [2] Sheng Cao, Ruikun Chu, Xigen Zhou, et al. Role of martensite decomposition in tensile properties of selective laser melted Ti-6Al-4V [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018(74):357-363.
- [3] 王文博,马瑞鑫,井志成,等.固溶时效处理对激光3D打印TC4合金组织与性能的影响[J].2019,46(10):1-9.
- [4] Camille Pautz, Pierre Forêt, Eduard Hryha, et al. Argon-helium mixtures as Laser-Powder Bed Fusion atmospheres: Towards increased build rate of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Tech,2020,279(116555):1-9.

Technological Innovation and Challenges of Micron and Nanoscale Products

Yong Wan Binglin Zou

Shenzhen Wansheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

Micrometer and nano technology has the comprehensive characteristics of high precision, high efficiency, high quality and diversification, which is the core technology of the development and production of high-tech industry. Under this technology, materials of different properties can be processed and made into different types of micron and nano products. In the process of production and processing, multiple specialties and multiple technologies are involved, which can promote the miniaturization, multi-function and integrated development of the manufacturing industry. In the new era, the scientific field explores micron and nano product technology from a new perspective, which promotes the innovation of micron and nano product technology, but it also faces a series of challenges, which requires people to scientifically analyze and study the material characteristics and product characteristics, and break through the development difficulties and difficulties. This paper mainly focuses on the technical innovation and challenges of micron and nanoscale products, to provide reference for related fields.

Keywords

micron; nano; product technology; innovation; challenge

微米和纳米级产品技术创新与挑战

万勇 邹炳林

深圳市万胜环保科技有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘 要

微米和纳米级技术具有高精度、高效率、高品质、多样化的综合特点,是当前高新科技产业研发生产的核心技术。在该技术下可以将不同性质的材料加工、制作成为不同类型的微米和纳米产品,在生产加工的过程中涉及多个专业、多项技术,可以推动制造产业的微型化、多功能、集成化发展。在新时期下,科学领域从新视角探寻微米和纳米级产品技术,推动了微米和纳米级产品技术的创新,但是也面临着一系列挑战,需要人们科学分析和研究材料特性和产品特点,突破发展难题和困境。论文主要浅谈微米和纳米级产品技术创新与挑战,为相关领域提供参考。

关键词

微米; 纳米; 产品技术; 创新; 挑战

1 引言

在各个产业的规模化、集成化、专业化发展下,人类对微纳米技术的需求不断增加,光刻机技术也得以快速发展,并在芯片制造、生物医学、高科技复杂器件制造等领域得到广泛应用,从最初的微米级到现在的纳米级,光刻技术的发展取得了长足的进步。在这一趋势下,微米和纳米级产品生产领域也取得了较大的成就,实现了发展困境的突破和创新,并制定了未来的发展计划和目标。但是在研发生产的过程中还面临着误差、曝光、精度要求等多方面的挑战,对微米和纳米级产品技术提出了新要求,因此需要迎接挑战,实现深层次的创新,有效满足各个行业的需求。

【作者简介】万勇(1980-),男,中国湖南岳阳人,硕士,从事人体内手术机器人研究。

2 微米和纳米级产品技术的概述

微米和纳米级产品技术是一种高精密性的制造技术,其可以将不同的材料加工制作成不同类型的零部件、结构、器件等,其应用范围较广,当前主要应用到半导体、电子、生物、医学、光电等多个领域中。该技术优势显著,可以完整地保存各种材料,提高产品加工精度和速度,以及质量,可以实现生产过程的集成化,在未来该技术的应用下可以推动加工制造领域的微型化、多功能化、专业化。该技术原理为:在特定的加工环境下,采用不同的加工方法对原材料进行深度加工处理,通过复杂干扰式结构提高产品的精度和稳定性、可靠性。在该技术应用时对加工设备和工具精度要求高,可以优化工艺流程、降低生产成本,不需要进行二次加工,可以提高加工品质^[1]。另外,该技术也可以研发、应用新材料,便于科学领域研究新材料的特性,推动材料的创新

发展,具体产品材料结构如图1所示。

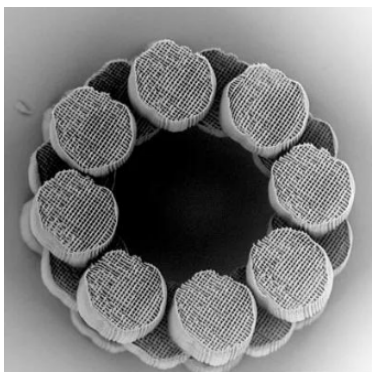


图1 微米和纳米级产品材料结构

3 微米和纳米级产品技术的发展现状和创新

3.1 发展现状

1970年代,光刻机主要应用于集成电路半导体制造的工艺中,重点解决的问题是如何在半导体表面形成细线路和小尺寸的结构。当时的光刻技术主要使用的是接触式光刻技术,它使用接触掩模版来定位和限制曝光区域,虽然能够制作出高精度的电路,但接触掩模版会在制作过程中被损坏,极大地限制了光刻机的生产效率和制造成本。1980年代,非接触式光刻技术的出现,使得光刻机的精度进一步提升。非接触式光刻技术使用反射式光刻技术,光源和光学组件采用反射式设计,可以减少误差,并实现更高精度的曝光。同时,随着半导体领域对于精度的要求不断提高,光刻机也越发需要更高精度的运动部位、更高质量的光学组件等。

3.2 创新

3.2.1 微米和纳米级产品技术精度的突破

在当前互联网技术、大数据技术、人工智能等技术的广泛应用下大幅提升了微米和纳米级产品制造的精度。为了满足这一技术引入了光刻机技术,在这一新技术的应用下可以在原有微米级别精度的基础上,成功地实现了纳米级的精度提升,这一突破主要体现在以下几个方面:曝光光源的进步^[2]。在光源产业的发展下,促使新型的短脉冲光源、气体激光光源等不断涌现,在这一趋势下提高了曝光光源的能量、稳定性和速度,进而提升了光刻机的制造精度,具体如图2所示。



图2 纳米技术在光源产业的应用

光学组件的优化。在当前的光源产业发展下,已经开发出了具有高性能的数纳米放射线掩模版的光刻机和高分辨率的投影光学系统,有效满足了使用要求,可以更好地控制光学像差和热稳定性等因素,使得光刻机实现更高精度的曝光。高精度控制系统的应用。引入高精度控制系统,通过系统促使光刻机进行更精准的位置控制、振动抑制,从而优化光刻机工作模式、提升运行效率,进而提升了光刻机的制造精度^[3]。

3.2.2 纳米科技与微米化工程的发展。

在专家和技术人员的一系列分析、研究、实践下,在长期的经验积累、技术分析、难点突破过程中人们在纳米材料的合成、制备和应用方面取得了重大突破,成功开发出多种高性能纳米产品,随着产品的试点推行,被广泛应用到了电子、医疗、能源等领域,推动了社会的进步和经济的发展。在后期人们改进和优化了纳米技术和产品的性能和内部结构,加强了应用范围的控制,有效解决了环境污染和能源危机等重大问题,为微米和纳米工程的可持续发展提供了有效的解决方案。例如,在微米化工程领域,以高效、环保为导向,全力提升生产工艺与技术,技术创新和研发的过程中引入自动化和智能化技术,从而实现了工厂生产线的自动化管理和控制,大幅提升了微米和纳米级产品的品质和产能。并在后期注重提升产品的绿色化、可循环化并加强了安全生产的管理与控制,彰显了保护环境、保障员工安全的理念。

3.3 纳米科技与微米化工程的研究与应用

想要更进一步地研究和应用微米和纳米级产品技术,就需要加强人才队伍建设,加强各方面的投入,全面提升人才质量,共同致力于微米和纳米级产品技术的创新、应用、发展,在这一过程中可以加强和科研机构、科技公司、高校的合作。并加强技术经验的分享和交流,共同推动技术的共享与创新,不断完善产品的质量与性能,提升生产效率与能源利用率,为客户提供更加优质的产品和服务。比如地区研究协会共同致力于高端微流控芯片设计、制造与应用,在这一趋势下各个科技有限公司先后与多家生物科技公司及医疗检测机构开展基于微流控技术的研发合作。在多个企业内试点微米纳米技术,如芯片半导体、超精密材料、纳米纺织等,在后期还会持续扩大^[4]。

3.4 望赋能产业转型升级

在科学技术协会大力支持下,中国微米纳米技术学会联合多个地区共同创办了微米纳米技术应用创新大会,搭建了与国内外优秀技术及项目的产学研用对接平台。微米纳米技术是一项汇集电子、机械、材料、制造以及物理、化学和生物等不同学科的科学技术,是面向21世纪的新兴科技。在会议中可以详细介绍和展示当前最新的研发成果,比如非晶纳米晶、MEMS传感器、4D打印等微米纳米先进技术,将这些技术广泛应用到陶瓷、汽车、智能穿戴、物联网、人工智能等众多领域。充分利用当地城市优势和亮点,推动工

业产业的发展,通过微米纳米技术促进产业转型升级的技术需求也很强,促使中国的微米纳米技术研究走在世界前列。同时还需要搭建科研与产业对接的桥梁,促进优秀成果转化和落地,为地区产业带来更大的发展潜能。

4 微米和纳米级产品技术的挑战应对对策

微米纳米先进技术的应用对中国科技创新和产业发展意义重大,比如 MEMS 传感器对于发展智能车联网、自动驾驶、4D 打印等,可以应用到高端陶瓷的制造和生产中。有机纤维材料可以应用到纺织产业中,推动功能性纺织的发展,其发展潜力大,前景好,未来也会带动各个科技园继续举办微米纳米具体产业项目对接会,为中国微米纳米技术学会的技术项目及专家资源落地提供强有力支持。

4.1 挑战

第一,技术难度高。调查发现,当前微米和纳米尺度的产品制造需要高精度的加工技术和设备、仪器,但是现有的条件限制大,资金短缺,无法满足以上要求,还达不到高精度加工要求。第二,成本高。因为微米和纳米级产品技术先进、性能稳定,且纳米材料的制备过程复杂、流程烦琐,会耗费大量的人力、物力、财力,整体投资成本高,效益不佳,还无法实现大规模的生产、应用。第三,安全性问题。纳米材料的尺寸和性质特殊,在生产、制作、研发、应用等各个环节中对人体和环境会产生影响,安全性问题大啊。第四,环境影响。纳米材料的广泛应用会和其他物质发生反应,会释放出一些气体,进而污染环境,影响生态系统。

4.2 对策

想要应对以上微米和纳米级产品技术研发和应用过程中面临的挑战,把握机遇,解决问题,实现创新目标,就需要加强基础研究。在研究的过程中深入探索微纳尺度下的物理效应,比如制作、加工、研发过程中的黏附问题、润湿行为等,尝试着理解并解决这些特殊尺度下出现的问题。例如,纳米尺度下的热传导问题,可以研究新的热学分析方法和模型,更准确地描述和预测微纳尺度下的热输运行行为。且研究人员还需要研发新原理、新方法,通过新原理和新方法

突破传统集成电路工艺的限制,如衍射极限、量子效应等,即知道地探索纳米压印、丝网印刷、飞秒激光刻蚀等新型微纳制造工艺。在这一过程中可以结合跨学科知识,如物理、化学、生物学等多个学科的知识,科学应用,共同推动微纳制造技术的创新发展。同时研究人员还需要注重解决环境和安全问题。

在研究的过程中要评估各个纳米材料的使用环境要求和等级,以及健康风险,为政府和企业制定相应的管理措施提供科学依据。在研究过程中还需要加强纳米颗粒的监测和治理,根据变化情况及时控制,降低其对生态系统和人体健康的潜在风险。另外,在研究中还需要建立规范和标准,积极参与国际纳米科技规范和标准的制定过程,确保中国的技术和产品符合国际标准,可以根据中国实际情况建立纳米科技相关的规范和标准体系,提高研发和应用的安全性和可靠性。梳理可持续发展目标,优化纳米材料的生产过程,降低资源消耗和废弃物产生,提高生产效率,研发纳米材料的回收和再利用技术,延长其使用寿命,降低环境影响。

5 结语

微米和纳米级产品技术研发和应用不受限于所使用的加工设备,为此,要发挥现有设备的能力,克服现有设备的局限性,实现所需要的加工结构尺寸。并在研究中制作具有实际用途的纳米结构,用多种不同类别的纳米加工技术实现,结合实际情况发挥该纳米加工技术的作用,推动微米和纳米级产品技术的创新发展。

参考文献

- [1] 范贝贝,李瑾,冯献.农业强国目标下作物育种科技与装备创新:态势、挑战与路径[J].科技导报,2023,41(16):23-31.
- [2] 刘彬,廖涛,刘咏,等.一种纳米/亚微米双尺度氧化物增强难熔高熵合金复合材料及其制备方法[Z].2024-06-06.
- [3] 陈晶,徐军,陈文雄.一种可用于微米—纳米级矿物研究的新技术——FIB[J].地质通报,2003,22(5):371-373.
- [4] 纪崇甲.球形微米和纳米级SiO₂生产新工艺[C]//全国化工实用高新技术交流会,2003.

Shape-Controlled Synthesis and Characterization of Nickel Selenides Octahedra

Kai Zeng¹ Piao Liu^{2*}

1. Hunan LEED Electronic Ink Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan, 412007, China,

2. Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou, Hunan, 412000, China

Abstract

In this study, we used the thermal synthesis method of mixed solvent, selected nickel chloride and selenium powder as the main reactants, and reacted in hydrazine hydrate, ethylenediamine and water, and successfully prepared NiSe₂ regular octahedral micro and nano powder materials with different sizes. In order to understand and analyze the prepared products, X-ray powder diffraction (XRD), SEM (SEM), TEM (TEM), high resolution transmission electron microscope (HRTEM) and selective electron diffraction (SAED) were used. The results show that the size changes of NiSe₂ octahedron are regulated by the volume ratio of hydrazine to ethylenediamine and of hydrazine to water. This finding provides an important rationale for further regulating the size of NiSe₂ regular octahedra.

Keywords

nickel selenide; solvent thermal method; morphology control

正八面体二硒化镍尺寸控制合成与表征

曾凯¹ 刘飘^{2*}

1. 湖南利德电子浆料股份有限公司, 中国·湖南 株洲 412007

2. 湖南化工职业技术学院, 中国·湖南 株洲 412000

摘 要

本研究运用了混合溶剂热合成方法, 选用氯化镍与硒粉作为主要反应物, 同时在水合肼、乙二胺以及水这三种溶剂中进行反应, 成功制备出了尺寸各异的NiSe₂正八面体微纳米粉体材料。为了对所制备的产物进行深入的了解和分析, 我们采用了X射线粉末衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、高分辨透射电镜(HRTEM)以及选区电子衍射(SAED)等多种表征技术。研究结果显示, NiSe₂正八面体的尺寸变化受到水合肼与乙二胺的体积比以及水合肼与水的体积比的调控。这一发现为我们进一步调控NiSe₂正八面体的尺寸提供了重要的理论依据。

关键词

硒化镍; 溶剂热法; 形貌控制

1 引言

在黄铁矿结构化合物中, 研究者和科研院所对二硒化镍 NiSe₂ 和其他 MX₂ (M=Fe、Co、Ni、Mn 等, X=S、Se 等) 开展了大量的研究工作^[1,2], 得出了 MX₂ 许多有趣的物化性能和潜在的应用。NiSe₂ 是无机化合物半导体材料中的重要成员, 具有优异的电学、磁学和光学特性^[3]。NiSe₂ 作为一种弱顺磁的电导体材料, 磁化系数大约 1×10^{-6} emu/g, 并且磁化系数随温度升高变化很小^[4]。正是由于 NiSe₂ 这种特殊的电磁学性质, 科学工作者对 NiSe₂ 微纳米材料的合成开展了深入地研究^[5,6]。Chen 等人^[7] 采用溶剂热法用氯化镍和硒粉在水合肼和乙二胺混合溶剂中反应系统性地成功制备出

H-NiSe 系列不同形貌和结构如六角纳米片、六方纳米棱柱、六方纳米锥以及球形等。陈等人^[8] 采用溶剂热法在一缩二乙二醇成功合成纳米 NiSe₂ 晶体, 测试其电化学性能上的应用。杜卫明等^[9] 以油酸作为表面活性剂和以硒粉为硒源, 在无外加还原剂的条件下合成了六角星状二硒化镍晶体。赵等^[10] 采用溶剂热法制备出花椰菜形貌的 NiSe₂ 晶体, 测试其电催化性能上的应用。郭等^[11] 直接在碳纤维上合成纳米 NiSe₂ 晶体, 测试其电催化析氢性能。陈等人^[12] 制备球形、切边切角八面体以及正八面体三种形貌的 NiSe₂ 晶体, 得出晶面生长速率对晶体长大的影响。在前面各种研究报道中, 还没有系统性地控制合成出不同尺寸大小的 NiSe₂ 正八面体微纳米粉体材料。

论文以水合氯化镍和硒粉为反应物, 采用混合溶剂热法在水、乙二胺和水合肼三种不同的溶剂中成功制备出不同

【作者简介】曾凯(1985-), 男, 中国湖南株洲人, 硕士, 工程师, 从事光伏太阳能电池导电浆料研究。

尺寸系列的正八面体状 NiSe_2 晶体粉末。利用 X 射线粉末衍射仪、扫描电镜、透射电子显微镜等手段对目标产物进行了分析,研究了水合肼和水体积比以及水合肼和乙二胺体积比对 NiSe_2 晶体形貌的影响,研究了不同反应时间下 NiSe_2 晶体的形成机制,并探讨了三种不同尺寸的正八面体状 NiSe_2 晶体的生长机理。

2 实验

2.1 实验原料及仪器

氯化镍 ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、硒粉 (Se)、乙醇、80% 水合肼 ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 以下简称 NH_{80})、乙二胺 ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$, 以下简称 En), 所有用到的化学试剂均为分析纯。样品的 X 射线粉末衍射分析是在 Rigaku D/max 2500V 射线衍射仪 (石墨单色滤波, $\text{Cu K}\alpha$ 辐射, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) 上进行; 样

品的形貌及结构是由 JSM-7001F 型场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 进行观察的; 透射电子显微镜照片 (TEM)、高分辨透射电子显微镜照片 (HRTEM) 以及选区电子衍射花样 (SAED) 是在 JEOL JEM-3010 高分辨通用型透射电子显微镜上获得的。

2.2 正八面体结构 NiSe_2 的制备

首先称取反应物 $0.9615 \text{ g NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.004 mol) 和 1.2624 g Se 粉末 (0.016 mol) 加入 80 mL 不同体积比的 NH_{80}/En 或 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 的混合溶剂中, 再超声震荡下搅拌 15 分钟, 最后将上述混合溶液转移到 100 mL 内衬聚四氟乙烯的不锈钢反应釜中。在适当温度下保温特定时间, 待自然冷却至室温后, 打开反应釜, 经过去离子水和无水乙醇多次离心洗涤, 在燥箱中烘干 4 h , 得到最终产物^[3]。表 1 为 NiSe_2 粉体的反应条件及对应的尺寸和形貌。

表 1 NiSe_2 粉体的反应条件和尺寸

Sample	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Reaction/h	NH_{80}/En	$\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$	Shape (size)
YP1	140	20	—	3 : 1	Octahedra (100~200nm)
YP2	140	20	—	1 : 0	Octahedra (600~800nm)
YP3	140	20	1:3	—	Octahedra (5~8 μm)

3 结果与讨论

3.1 XRD 分析

图 1 是 $0.1 \text{ M NiCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶液和 0.016 mmol Se 粉在不同体积比的混合溶剂 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 和 NH_{80}/En 下, 经过 140°C 溶剂热反应 20 h 所得 NiSe_2 的 XRD 图谱。从衍射图谱中可以看出, 所有的 NiSe_2 的衍射峰都可以标定为面心立方 NiSe_2 , 其晶体结构属于立方晶系的 NiSe_2 (JCPDS No. 881711, $a = 5.962 \text{ \AA}$, $V = 212.02$)。从图中可以得出, 样品 YP1、YP2 和 YP3 的衍射峰呈现高衍射强度和窄半峰宽, 说明此条件下制备的样品是结晶性非常好的纯物相 NiSe_2 。

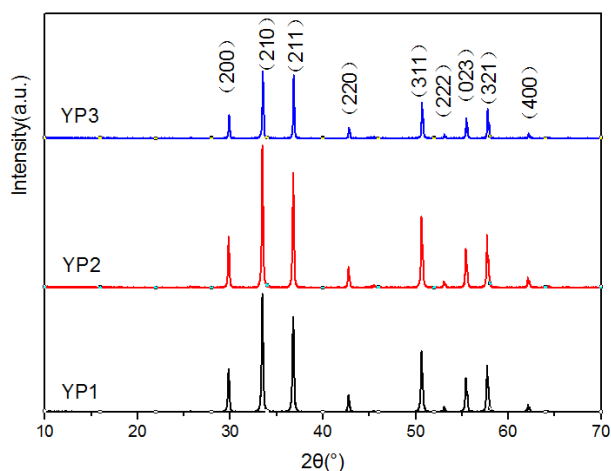


图 1 不同体积比 NH_{80}/En 和 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 所得到 NiSe_2 晶体 XRD 图谱

3.2 SEM 分析

图 2 是在不同体积比的混合溶剂 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 和 NH_{80}/En 下, 经过 140°C 溶剂热反应 20 h 所得 NiSe_2 (YP1、YP2 和 YP3) 的扫描电镜照片。当混合溶剂 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 体积比为 3 : 1 时, 所得到的 NiSe_2 晶体为大小均匀分散的正八面体 (图 2a), 尺寸较小, 直径分布在 $100 \sim 200 \text{ nm}$ 。当混合溶剂 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 体积比为 1 : 0 时, 所得到的 NiSe_2 晶体依然是分散均匀的正八面体 (图 2b), 但是晶体长大, 尺寸分布在 $600 \sim 800 \text{ nm}$ 。当混合溶剂 NH_{80}/En 体积比为 1 : 3 的时 (图 2c), 所得到的 NiSe_2 晶体全部是分散均匀的正八面体, 并且尺寸继续长大, 直径分布在 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 大小。

3.3 NiSe_2 晶体的形成过程

NiSe_2 晶体的形成过程是一个涉及精密化学合成和晶体生长技术的复杂过程。这种二元化合物, 由镍 (Ni) 和硒 (Se) 两种元素构成, 其独特的晶体结构赋予它一系列优异的物理和化学性质, 使得它在热电材料、储能设备和光电传感器等领域具有广泛的应用前景。在温度 140°C 下对 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 体积比为 3 : 1 时经不同反应时间下进行分析, 当反应进行 1 h 后, 就可以看到 NiSe_2 衍射峰的出现。随着反应时间的延长, 中间产物的 NiSe_2 衍射峰强度越高, 表明产物的结晶性越来越好。不同反应时间下的中间产物的 SEM, 当反应进行 1 h 后, 产物形貌均为无序不规则的纳米颗粒; 当反应进行到 1.5 h 后, 产物形貌均为纳米线和细小正八面体; 当反应进行 2 h 后, 产物正八面体 NiSe_2 逐渐增多, 另外在 NiSe_2 正八面体表面上吸附有纳米线和纳米颗粒, 说明正八面体 NiSe_2 的通过典型 Ostwald 的颗粒间融合熟化机制长大^[13]。

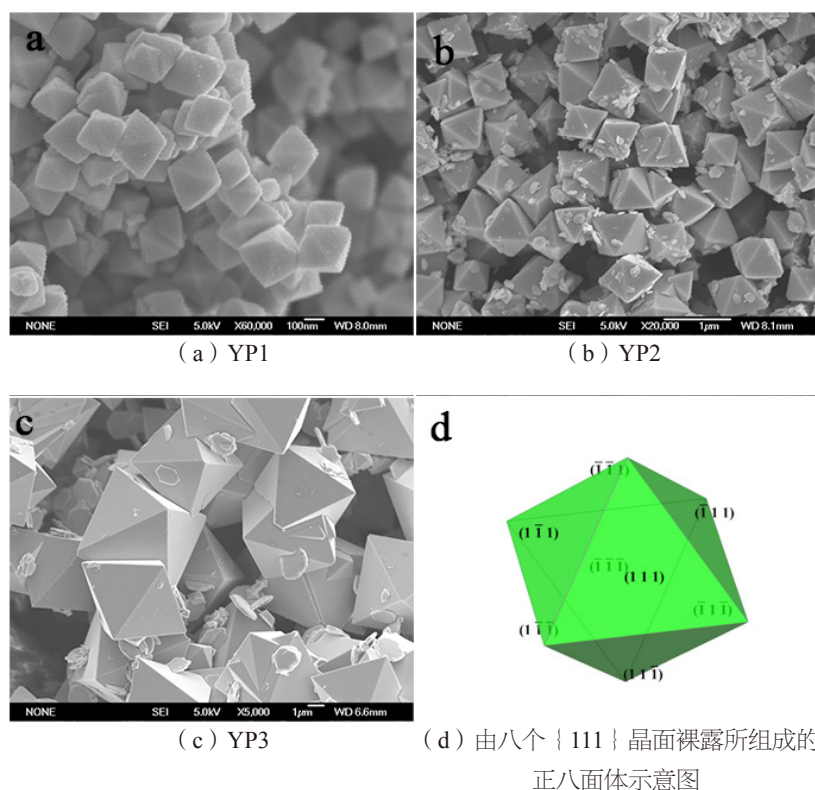


图 2 不同体积比 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 和 NH_{80}/En 所得到的 NiSe_2 晶体 SEM 图

4 结论

选用三种混合溶剂系统地控制合成了三种不同尺寸大小的正八面体 NiSe_2 晶体, 详细的研究三种混合溶剂 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 、 NH_{80}/En 以及反应时间对目标产物形貌和尺寸影响。结果表明: 混合溶剂 NH_{80}/En 体积比和 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 体积比对 NiSe_2 正八面体尺寸长大具有控制作用。在 $\text{NH}_{80}/\text{H}_2\text{O}$ 溶剂中, 反应初期都是开始形成 NiSe_2 纳米线, 后续转变长大形成 NiSe_2 正八面体。在 NH_{80}/En 混合溶剂中, 自由乙二胺溶剂分子优先吸附在 $\{111\}$ 晶面裸露的 Ni^{2+} 上, 降低晶面 $\{111\}$ 生长速率, 促进正八面体结构的形成。当反应条件的改变后, 诱导某种结构形态的反应物形成不同尺寸和形貌的晶体有待进一步的深入和研究。

参考文献

- [1] 周璇. 硒化镍基复合材料的制备及其储钠性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [2] 周俊. 二硒化镍纳米结构的晶相调控、异质元素掺杂及电解水性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [3] 曾凯. 镍硫属化合物溶剂热法控制合成及生长机理研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [4] 郭亚杰, 李帆, 郭栋, 等. $\text{Ni}(\text{SxSe}_{1-x})_2$ 纳米线阵列催化电极的制备与析氢性能[J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16011-16015.
- [5] Chen X H, Fan R. Low-temperature hydrothermal synthesis of transition metal dichalcogenides[J]. Chemistry of Materials, 2001, 13(3): 802-805.
- [6] Yang J, Cheng G H, Zeng J H, et al. Shape control and characterization of transition metal diselenides MSe_2 ($\text{M}=\text{Ni}, \text{Co}, \text{Fe}$) prepared by a solvothermal-reduction process[J]. Chemistry of Materials, 2001, 13(3): 848-853.
- [7] Shu guang Chen, Kai Zeng, Yan de Song, et al. Systematical shape evolution of hexagonal NiSe crystals caused by mixed solvents and ammonium chloride[J]. Journal of Crystal Growth, 2012(358): 57-63.
- [8] 陈斌, 李尔沙, 冯鹏元, 等. NiSe_2 的合成制备及其电化学性能[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(1): 119-127.
- [9] 杜卫民. 结构形貌多元化的纳米级硫属半导体液相合成、生长机理及性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [10] 赵东江, 马松艳. NiSe_2 化合物对氧化还原反应的电催化性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(4): 846-850.
- [11] 郭亚杰, 叶锋, 郭栋, 等. 纳米混杂结构 NiSe_2 高效析氢电极制备及其电化学性能[J]. 材料导报, 2018, 32(23): 4084-4088.
- [12] 陈曙光, 李雄波, 蔡富轩, 等. 立方二硒化镍 NiSe_2 的形貌控制合成与生长机理[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015, 12(2): 90-94.
- [13] Wei Bing Zhang, Shuguang Chen, Kai Zeng. Tuning the crystal shape of materials by chemical potential: a combined theoretical and experimental study for NiSe_2 [J]. RSC Adv., 2014(4): 13395-13404.

Analysis and Improvement of Flame Retardant Properties of Aramid Rubber Composite Materials

Zhou Tong¹ Peng Lu²

1. Liaoning Provincial Product Quality Supervision and Inspection Institute, Shenyang, Liaoning, 110032, China

2. Shenyang Rubber Research and Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110021, China

Abstract

Aramid rubber composite materials have been widely used in aerospace, automotive and other fields due to their excellent mechanical properties and heat resistance. This article aims to improve the flame retardant properties of aramid rubber composite materials, using various flame retardants for modification, and analyzing the effects of different flame retardants on the flame retardant properties of composite materials. The thermal stability and flame retardancy of the modified composite material were evaluated through thermogravimetric analysis (TGA), vertical combustion experiment (UL-94), and oxygen index (LOI) testing. The research results indicate that the addition of phosphorus based and nitrogen based flame retardants significantly improves the flame retardancy of aramid rubber composites, with the phosphorus nitrogen composite flame retardant system performing the best. Under this system, the ultimate oxygen index of the composite material increased to 32%, and the vertical combustion test reached V-0 level. In addition, thermogravimetric analysis showed that the quality loss rate of the modified composite material was significantly reduced at high temperatures. This study provides a theoretical basis and technical support for the application of aramid rubber composite materials in high-temperature environments.

Keywords

aramid rubber composite material; flame retardant performance; flame retardant; thermogravimetric analysis; vertical combustion test

芳纶橡胶复合材料的阻燃性能分析及改进

佟舟¹ 卢鹏²

1. 辽宁省产品质量监督检验院, 中国·辽宁 沈阳 110032

2. 沈阳橡胶研究设计院有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110021

摘 要

芳纶橡胶复合材料由于其优异的机械性能和耐热性, 在航空航天、汽车等领域具有广泛应用。论文以提高芳纶橡胶复合材料的阻燃性能为目标, 采用多种阻燃剂进行改性, 并分析了不同阻燃剂对复合材料阻燃性能的影响。通过热重分析 (TGA)、垂直燃烧实验 (UL-94) 和氧指数 (LOI) 测试, 评估了改性后的复合材料的热稳定性和阻燃性能。研究结果表明, 添加磷系和氮系阻燃剂显著提高了芳纶橡胶复合材料的阻燃性能, 其中磷氮复合阻燃体系表现最佳。在该体系下, 复合材料的极限氧指数提高至32%, 垂直燃烧试验达到V-0级。此外, 热重分析显示, 改性后的复合材料在高温下的质量损失率显著降低。论文的研究为芳纶橡胶复合材料在高温环境下的应用提供了理论基础和技术支持。

关键词

芳纶橡胶复合材料; 阻燃性能; 阻燃剂; 热重分析; 垂直燃烧试验

1 引言

芳纶橡胶复合材料在航空航天和汽车等领域广泛应用, 但其阻燃性能不足, 限制了高温环境中的使用。为提升阻燃性能, 我们采用了多种阻燃剂, 评估了不同阻燃剂的效果。结果显示, 磷系和氮系阻燃剂显著提高了阻燃性能, 这项研究为芳纶橡胶复合材料在高温环境中的应用提供了新的可能, 也为材料的安全性提升提供了理论基础和技术支持。

【作者简介】佟舟 (1999-), 女, 中国辽宁丹东人, 本科, 助理工程师, 从事质量研究。

2 芳纶橡胶复合材料概述

2.1 芳纶橡胶复合材料的基本特性

芳纶橡胶复合材料是一种由芳纶纤维和橡胶基体组合而成的高性能复合材料^[1]。其具有优异的机械性能, 包括高强度、高模量和良好的耐疲劳性^[2]。这些特性使其在高强度、高耐磨要求的应用中表现出色。芳纶纤维由于其本身的耐热性和稳定性, 使得复合材料在高温环境下仍能保持良好的性能。芳纶橡胶复合材料还具备优良的耐化学腐蚀性, 能抵抗多种化学物质的侵蚀, 从而延长材料的使用寿命。芳纶纤维的低密度特点也使得复合材料具有较轻的重量, 在需要减重的应用中展现出明显优势。

2.2 芳纶橡胶复合材料的应用领域

芳纶橡胶复合材料在多个领域得到了广泛应用。在航空航天领域，由于其卓越的机械性能和耐热性，芳纶橡胶复合材料被用于制造飞机结构件和防护装备，提升了航空器的安全性和耐用性。在汽车工业中，芳纶橡胶复合材料用于制造车身部件和内饰材料，不仅减轻了车辆重量，还提高了耐冲击性和燃油效率。在电子电器行业，芳纶橡胶复合材料因其优异的电绝缘性和阻燃性能，被用于生产高性能电缆、绝缘板和电子元器件。芳纶橡胶复合材料在建筑工程中也有应用，其耐热、耐磨和防火性能使其成为理想的建筑材料，用于制造防火门、隔热板和管道保护层。通过广泛应用于这些领域，芳纶橡胶复合材料展示了其多功能性和优越性能。

2.3 芳纶橡胶复合材料的阻燃性能现状

芳纶橡胶复合材料在航空航天、汽车等领域的应用中，阻燃性能至关重要。现有的芳纶橡胶复合材料在阻燃性能方面存在不足，难以满足高温环境的要求。目前主要的阻燃改性方法包括添加磷系、氮系等阻燃剂，以提高材料的热稳定性和阻燃性能。研究表明，单一阻燃剂在提升阻燃效果方面有限，而复合阻燃体系可以更显著地改善材料的阻燃性能，尤其是磷氮复合阻燃体系表现出较高的极限氧指数和较低的质量损失率，为材料在高温环境中的应用提供了有效支持。

3 阻燃剂的选择与改性方法

3.1 常用阻燃剂及其作用机制

常用阻燃剂主要包括卤系、磷系和氮系阻燃剂。卤系阻燃剂利用其在燃烧过程中生成的卤化氢气体，抑制燃烧反应链，达到阻燃效果。其优点是阻燃效率高，但燃烧时会释放有毒气体，环保性较差。磷系阻燃剂通过在高温下生成磷酸或多聚磷酸，形成阻燃保护层，减少可燃气体的产生和传热，具有良好的阻燃性能和热稳定性，且毒性较低。氮系阻燃剂则通过热分解生成氮气等惰性气体，稀释燃烧区域的氧气浓度，其分解产物可与材料表面形成稳定的炭化层，阻止热量和氧气的进一步传递，提高材料的耐火性能。磷氮复合阻燃体系结合了磷系和氮系阻燃剂的优点，能够在燃烧过程中形成更加稳定且高效的阻燃屏障，显著提升材料的整体阻燃性能。

3.2 磷系阻燃剂的作用及效果

磷系阻燃剂通过在芳纶橡胶复合材料中引入磷元素，在燃烧过程中形成阻燃保护层，发挥阻燃作用。磷系阻燃剂主要包括红磷、磷酸盐及其衍生物。红磷通过燃烧生成磷酸和磷酸盐，形成致密的玻璃态保护层，隔绝氧气和热量，阻止材料进一步燃烧。磷酸盐和有机磷化合物在高温下分解，释放出磷酸，催化碳化过程，生成炭层，进一步增强阻燃效果。研究表明，磷系阻燃剂能够有效提高材料的极限氧指数，降低垂直燃烧实验中的燃烧速率，提高材料的热稳定性和耐火性能。

3.3 氮系阻燃剂的作用及效果

氮系阻燃剂主要通过释放不燃气体和形成保护性炭层来提高芳纶橡胶复合材料的阻燃性能。氮系阻燃剂在高温下分解生成氨气、氮气等不燃气体，稀释燃烧区的氧浓度，降低材料的燃烧速度。氮系阻燃剂能促进材料表面形成致密的炭化层，阻隔热量和氧气的传递，进一步提高材料的热稳定性和耐燃性。实验结果显示，添加氮系阻燃剂后，材料的热分解温度升高，热释放速率显著降低，达到更好的阻燃效果^[3]。

4 芳纶橡胶复合材料阻燃性能测试与分析

4.1 热重分析（TGA）方法及结果

热重分析（TGA）是一种通过监测材料在不同温度下的质量变化来研究其热稳定性和分解特性的技术。在中，使用TGA对未改性和改性后的芳纶橡胶复合材料进行热重分析，以评估阻燃剂的效果。测试在氮气气氛中进行，温度范围设定为室温至800℃，升温速率为10℃/min。未改性芳纶橡胶复合材料在350℃左右开始显著分解，600℃时残余质量约为20%。添加磷系和氮系阻燃剂的复合材料在450℃才开始大量分解，700℃时残余质量显著增加，约为40%。尤其是磷氮复合阻燃体系的复合材料，表现出更高的热稳定性，在700℃时残余质量超过45%。这些结果表明，磷氮复合阻燃剂显著提高了芳纶橡胶复合材料的热稳定性，有效延缓了其分解过程。TGA分析结果为后续阻燃性能测试提供了重要的基础数据。

4.2 垂直燃烧实验（UL94）方法及结果

采用UL-94标准测试方法对改性芳纶橡胶复合材料的阻燃性能进行评估。试样尺寸为125 mm×13 mm×3 mm，测试前在23℃和50%相对湿度下调节48h。测试装置包括燃烧器和样品夹持装置，燃烧器火焰高度为20 mm，火焰接触样品10s后移除，并记录样品熄灭时间和滴落物是否引燃棉花。测试结果显示，磷氮复合阻燃体系的芳纶橡胶复合材料表现出优异的阻燃性能，所有试样均达到V-0级别，平均熄灭时间不足5s，无熔滴现象。结果表明，磷氮复合阻燃体系显著提升了材料的阻燃效果^[4]。

4.3 氧指数（LOI）测试方法及结果

氧指数（LOI）测试用于评估材料在规定氧气浓度下的燃烧性能。采用ASTM D2863标准方法对改性后的芳纶橡胶复合材料进行LOI测试。结果显示，未改性样品的LOI值为22%，添加磷系阻燃剂后的LOI值提高至28%，添加氮系阻燃剂后的LOI值为27%。磷氮复合阻燃体系样品的LOI值显著提升至32%，表明其具有更优异的阻燃性能^[5]。LOI值的提升反映了复合材料在空气中更难燃烧，阻燃效果明显增强。

5 磷氮复合阻燃体系的优化与性能评估

5.1 磷氮复合阻燃体系的优化设计

在磷氮复合阻燃体系的优化设计中，对磷系和氮系阻

燃剂的质量比进行系统研究,以确定最佳配比。采用均匀设计法,对不同配比的复合材料进行预实验,并通过氧指数(LOI)测试和垂直燃烧实验(UL-94)初步筛选性能较优的配方。在此基础上,结合热重分析(TGA)数据,评估不同配比对复合材料热稳定性的影响。通过响应面法(RSM),进一步优化磷氮复合阻燃体系的配比,得到最优组合。最终,确定了磷氮阻燃剂的最佳添加量和比例,为提升芳纶橡胶复合材料的阻燃性能奠定了基础。优化后的体系在阻燃性能和热稳定性方面均表现出显著提升,极限氧指数和垂直燃烧实验等级均达到预期目标。

5.2 改性复合材料的热稳定性分析

改性后的芳纶橡胶复合材料在热稳定性方面表现出显著改善。通过热重分析(TGA),测得改性复合材料的热分解温度明显高于未改性材料。具体实验结果显示,添加磷氮复合阻燃体系的复合材料在300℃~500℃温度范围内的质量损失率显著降低,表明其在高温下的热稳定性得到增强。对热分解过程的分析表明,磷氮复合阻燃体系在热降解过程中形成了一层致密的碳化层,有效阻止了热量和氧气的传递,延缓了基材的进一步分解。综合评价表明,磷氮复合阻燃体系不仅提高了复合材料的初始分解温度,还显著降低了最大失重速率,对热稳定性起到了积极作用。实验数据支持了改性技术在提升芳纶橡胶复合材料热稳定性方面的有效性。

5.3 改性复合材料的阻燃性能综合评价

改性后的芳纶橡胶复合材料在阻燃性能综合评价中表现出显著提升。热重分析显示,磷氮复合阻燃体系的加入使复合材料在高温下的质量损失率显著降低,热稳定性明显提高。氧指数测试结果表明,改性后的复合材料氧指数达到32%,显著高于未改性材料。垂直燃烧实验结果显示,改性材料达到了V-0级,表明其在火焰中的自熄性能优越。这些结果均表明磷氮复合阻燃体系在提升芳纶橡胶复合材料阻燃性能方面具有显著效果。

6 结论与展望

6.1 研究结论

研究结果显示,通过添加磷系和氮系阻燃剂,芳纶橡胶复合材料的阻燃性能得到了显著提升。热重分析(TGA)表明,改性后的复合材料在高温下的热稳定性明显增强,质量损失率显著降低。在垂直燃烧实验(UL-94)中,改性后的复合材料达到了V-0级,表明其具有优异的阻燃效果。氧指数(LOI)测试结果显示,采用磷氮复合阻燃体系的芳纶橡胶复合材料的极限氧指数提高至32%,远高于未改性材料。

磷系阻燃剂通过促进成炭,形成保护性炭层,有效隔绝热源和氧气;氮系阻燃剂通过释放不燃气体,稀释可燃气体浓度,进一步提高了阻燃效果。两者协同作用,使得磷氮复合阻燃体系在阻燃性能方面表现最佳。通过优化磷氮复合阻燃体系的配比和添加量,复合材料的热稳定性和阻燃性能得到了进一步增强。

6.2 未来研究方向与应用前景

未来研究方向应着重于进一步优化芳纶橡胶复合材料的阻燃体系,以满足更高的应用要求。可探索新型环保阻燃剂的开发,以减少对环境和人体的潜在危害。通过纳米技术,将纳米颗粒引入复合材料中,有望显著提升材料的阻燃性能和机械性能。基于不同阻燃剂协同作用的机理研究,有助于设计更加高效的复合阻燃体系。

在应用前景方面,随着对高性能材料需求的不断增长,芳纶橡胶复合材料在航空航天、汽车制造和电子设备等领域的应用将更加广泛。高效阻燃材料的研发将推动这些领域的技术进步和安全保障。通过材料的智能化设计和制造,开发出具有自修复、监测和响应功能的复合材料,将极大提升其应用价值和市场竞争力。

7 结语

论文研究了芳纶橡胶复合材料的阻燃性能,发现其阻燃性能不足。研究表明,磷系和氮系阻燃剂能显著提升阻燃效果,特别是磷氮复合体系最佳,极限氧指数提高到32%,垂直燃烧达到V-0级,高温下的质量损失率降低。尽管取得进展,但在阻燃剂的均匀分布、长期耐候性和环保性方面仍有不足。未来需进一步研究,探索新型高效环保阻燃剂,改进阻燃剂的分散技术,研究阻燃剂与基体的相互作用机制,以提高综合性能。这些研究将有助于提升芳纶橡胶复合材料的阻燃性能,拓宽其在高温环境中的应用。

参考文献

- [1] 刘吉凯,潘利剑.芳纶/阻燃环氧树脂复合材料的性能研究[J].复合材料科学与工程,2021(2):72-76.
- [2] 苍穹.新型阻燃木塑复合材料开发及阻燃性能分析[J].化工设计通讯,2021,47(9):32-33.
- [3] 黄伟江,李乾波,谢森,等.EP/GF/DiDOPO复合材料阻燃性能[J].工程塑料应用,2020,48(9):38-43.
- [4] 唐刚,彭中朝,宋强,等.阻燃PLA复合材料的制备及其阻燃性能研究[J].中国塑料,2019,33(1):24-28.
- [5] 陈虹,虎龙,吴中伟,等.芳纶防弹材料阻燃性能的开发[J].高科技纤维与应用,2019,44(5):61-64.

Research on 1700V High Performance GaN HEMT Power Switching Devices

Xing Chen

Xidian-Wuhu Research Institute, Wuhu, Anhui, 241000, China

Abstract

GaN materials have the advantages of high band-gap width, high electron mobility, high thermal conductivity and good chemical stability. Therefore, GaN based HEMT power electronic devices have the characteristics of high voltage resistance, low loss, high switching speed, high temperature characteristics and good anti-irradiation effect in power switching applications. However, the current GaN devices for power switching applications have not fully played their characteristic advantages, mainly reflected in: at present, the breakdown characteristics of GaN material systems have been fully explored, but the power switching applications based on GaN devices are mainly concentrated in the 100~650 V middle and low voltage level, and the applications in the high-voltage level power switching field are less. To solve this problem, the novel GaN based HEMT power electronic devices for power switching applications are studied in this paper. GaN HEMT devices with lateral breakdown voltage over 1700V and up to 1740V were prepared on silicon substrate.

Keywords

GaN based HEMT power electronic device; 1740V; thin buffer; reduce cost

1700V 高性能 GaN HEMT 电力开关器件研究

陈兴

西安电子科技大学芜湖研究院, 中国 · 安徽 芜湖 241000

摘 要

GaN材料具有高禁带宽度、高电子迁移率、高热导率、较好的化学稳定性等优势,因此GaN基HEMT电力电子器件在功率开关应用中具备高耐压、低损耗、高开关速度、高温特性好、抗辐照效应好等特点,但是目前面向功率开关应用的GaN器件并未完全发挥出其特性优势,主要体现在目前GaN材料体系的击穿特性已得到充分挖掘,但是基于GaN器件的功率开关应用主要集中在100~650 V的中低压级别,在高压级别的功率开关领域应用较少。针对此问题,论文对面向功率开关应用的新型GaN基HEMT电力电子器件展开深入研究。论文在硅衬底上制备出了横向击穿电压超过1700V,高达1740V的GaN HEMT器件。

关键词

GaN基HEMT电力电子器件; 1740V; 薄缓冲; 降低成本

1 引言

电力电子器件是电力电子技术中的核心元器件,随着能源和环境问题的日益突出,研究新型高性能、低损耗电力电子器件是提高电能利用率、节约能源、缓解能源危机的有效途径之一。相对于第一代和第二代半导体材料,GaN材料具有更大的禁带宽度(3.42 eV)、更高的临界击穿电场(3.3 MV/cm)和电子饱和漂移速度(2.5×10^7 cm/s),其化学性能稳定、耐高温、抗辐射,在制备高性能电力电子器件方面极具潜力^[1]。由于自发极化和压电极化的作用,即使在非故

意掺杂的情况下,AlGaIn/GaN异质结界面处也能形成面密度约 10^{13} cm⁻²、室温迁移率达1800 cm²/v·s以上的二维电子气(two-dimensional electron gas, 2DEG),这使得该结构不但在制备高温大功率微波器件方面优势显著,而且在制备高性能的高压、低损耗、高速、抗辐射电力开关器件方面也表现出了无可比拟的优势。经过10多年的努力,用于微波领域AlGaIn/GaN HEMT已趋于成熟,相继有产品问世。近几年,人们将目光转向了基于AlGaIn/GaN HEMT结构的高耐压电力开关器件的研究。

GaN在照明、射频和电力电子等方面取得了巨大的成功。近年来,氮化镓高电子迁移率晶体管(hemt)正积极渗透到数据中心、电动汽车(EV)和可再生能源等工业和汽车应用市场^[2]。因此,迫切需要1200~1700V乃至更高耐压的GaN器件。在这项工作中,将在Si衬底上展示1740V

【作者简介】陈兴(1990-),男,中国江西抚州人,硕士,工程师,从事氮化镓MOCVD外延和氮化镓功率器件研制和生产研究。

GaN HEMT。清楚地阐述器件结构 and 处理流程。

2 器件制备

人们惯常认为 GaN 基功率器件的性能以及可靠性问题与 GaN 外延材料的质量是密切相关的。GaN 基微波功率器

件对器件工艺的要求比较高,而 GaN 基 HEMT 电力电子器件的性能依赖于器件结构的设计以及器件的工艺制备两方面。GaN 基电力电子器件的关键工艺包含表面钝化、台面隔离、欧姆接触和栅金属(肖特基接触)等工艺,详见图 1。接下来论文主要针对这四种工艺进行介绍。



图 1 GaN 基电力电子器件基本工艺流程

在 GaN 基功率器件的制备工艺中,钝化层的生长主要是为了抑制 GaN 基器件的表面态,从而改善器件的动态特性,钝化层的质量是非常重要的。通常在进行钝化的介质层生长前需要用稀盐酸等溶液对芯片进行处理。目前常用的钝化层主要包含 Si_3N_4 、 SiO_2 以及 Al_2O_3 、 HfO 等高 k 介质。其中 Al_2O_3 、 HfO 等高 k 介质主要是通过采用原子层沉积(PEALD)进行生长, Si_3N_4 和 SiO_2 可以通过采用 PECVD 或者 LPCVD 来完成。一般来说 PEALD 和 LPCVD 的生长速度较慢,但是生长的材料的质量较高,PECVD 的生长速度较快。需要注意的是 LPCVD 属于高温生长工艺,其温度通常高达 800°C 以上,该工艺无法应用到先栅工艺中。在论文中,耗尽型器件采用 PECVD 在 300°C 生长 Si_3N_4 材料作为钝化层。

台面隔离是用来隔断同一个外延片上不同器件之间的漏电干扰。目前常用的台面隔离主要分为两种:第一种是采用干法刻蚀结合湿法刻蚀的方式,首先利用反应离子刻蚀(RIE)或者等离子体刻蚀(ICP)进行干法刻蚀,一般刻蚀深度为二维电子气下方 120 nm 左右,保证沟道层中的 2DEG 被隔断并且电子难以绕过台面隔离的凹槽进行漏电。在 GaN 基器件的制备工艺中,采用 Cl_2/BCl_3 的干法刻蚀,尤其是快速的干法刻蚀很容易在刻蚀的同时引入刻蚀损伤,从而影响器件的性能,所以在干法刻蚀后需要采用四甲基氢氧化铵溶液(TMAH)进行高温水浴,修复刻蚀损伤,降低器件的漏电,也可以采用 $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 的高温退火修复干法刻蚀所造成的 GaN 晶格损伤。第二种

常用的台面隔离方式是离子注入。离子注入通常是高能氮粒子轰击到台面区域之外,将 GaN 晶格打坏使得器件隔离^[3]。一般来说利用离子注入来实现台面隔离具有更好的隔离效果以及更低的泄漏电流。

常规 GaN 基 HEMT 器件的源漏电极一般是欧姆接触。欧姆接触工艺包含凹槽刻蚀、金属沉积、剥离(或金属刻蚀)以及快速高温退火(RTA)四个步骤组成。凹槽刻蚀有利于实现低温欧姆接触,即金属剥离完成后通过采用较低的温度即可在金属与 GaN 半导体材料之间实现欧姆接触。金属沉积一般是利用电子束蒸发(EBEAM)或者磁控溅射完成,欧姆接触的金属通常采用 Ti 基金属或者 Ta 基金属两个系列,在论文中的欧姆接触是采用 Ti 基金属完成,金属层从下到上依次是 Ti/~Ni/Au,厚度分别是 20/130/50/45nm。其中金属 Ti 也被称为势垒层金属,Ti 扩散到 GaN 材料中可以形成低功函数的 TiN 且产生大量的氮空位,进而形成欧姆接触。金属 Al 是覆盖层金属,可以起到催化剂的作用,促进 Ti 与 GaN 中的氮元素形成 TiN。Ni 和 Au 属于帽层金属,Ni 可以阻止上层的 Au 向下扩散,Au 可以起到保护的作用,防止下方的金属被氧化。在金属沉积完成后,通过剥离或者金属刻蚀的方式可以形成论文所需要的源漏电极的图形,最后经过快速热处理即可形成欧姆接触。针对 Ti/Al/Ni/Au 合金的欧姆接触工艺,论文中采用的快速热处理的温度是 860°C ,时间是 35s。

GaN 基 HEMT 器件的栅金属通常采用整流接触,即肖特基接触。肖特基接触的工艺步骤主要分为金属沉积和剥

离，不需要经过快速热处理。在论文中，基于常规耗尽型器件的制备时，采用 Ni/Au 合金做为栅金属与 GaN 材料形成肖特基接触。如图 2 所示，源漏接触为欧姆接触，经过了快速热处理，表面会变得凹凸不平，栅极采用肖特基接触，不需要经过快速热处理，所以金属表面较为平整。

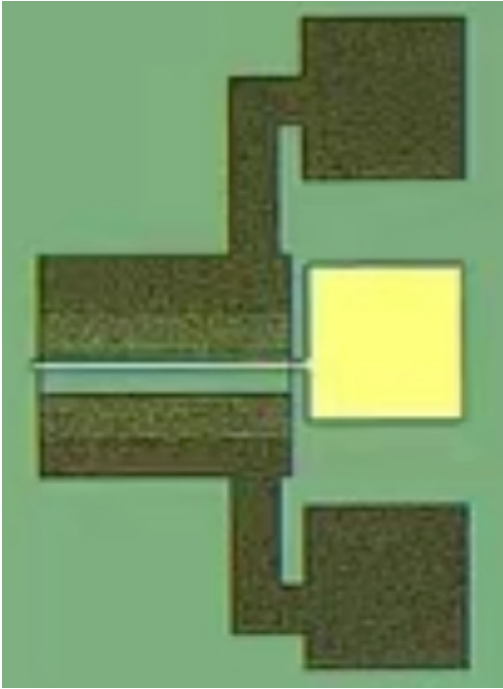


图 2 GaN 基电力电子器件

栅漏间距 $L_{gd}=7\mu\text{m}$ ，栅源间距 $L_{gs}=3\mu\text{m}$ ，栅长 $L_g=6\mu\text{m}$ ，栅宽 $W_g=100\mu\text{m}$ 。

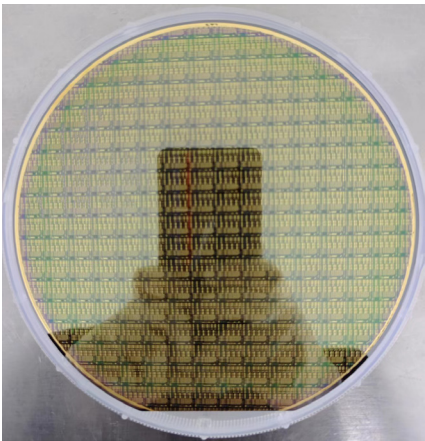


图 3 器件样品图示

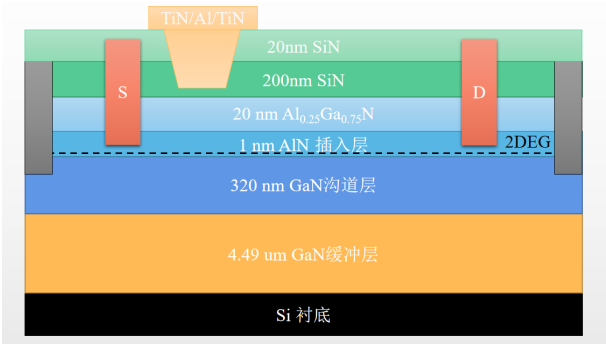


图 4 器件结构示意图

3 器件测试结果及分析

本小节主要针对器件进行电学特性的测试工作，并展开性能分析。器件样品如图 3 所示，器件结构如图 4 所示。

图 5 为器件的转移特性和跨导曲线，可以发现制备的 GaN HEMT 器件阈值电压为 -7.6V ，同时该器件具备极低的栅极漏电，为 10^{-13}A/mm 量级。

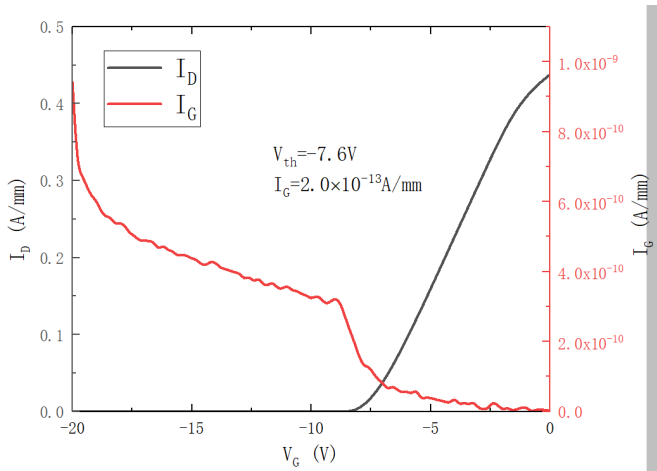


图 5 器件的转移特性曲线以及跨导曲线

根据图6,当栅极电压低于 -7.6V 时,器件处于关闭状态,导致导电沟道被完全堵塞,没有载流子可以进入,从而无法产生电流 I_{DS} 。当栅压 V_{GS} 达到 -7.6V 时,导电沟道逐步打开。经过 B1500 电学特性测试系统测量,发现制备的 GaN

HEMT 电子器件的源漏最大饱和电流密度 $I_{DS}=0.7\text{A/mm}$ 。由直流输出曲线斜率可以算出,制备的 GaN HEMT 器件的 $R_{on}=8.3\text{m}\Omega$ 。

从图 7 中可以看出,制备的 GaN HEMT 器件的击穿电

压高达 1740V，具备良好的耐压特性。

4 结语

论文所制备的高耐压 GaN HEMT 器件，制备出的器件具有良好的电学特性以及可靠性，可以满足多种应用场景

需求。在 $V_{GS}=-7.6V$ 时，制成的 GaN HEMT 器件表现出了良好的电学特性，其源漏最大饱和电流密度 $I_{DS}=0.7A/mm$ ，GaN HEMT 器件的导通电阻 R_{on} 低至 $8.3m\Omega$ 。栅极漏电流低至 $10^{-13}A/mm$ 数量级，击穿电压高达 1740V。

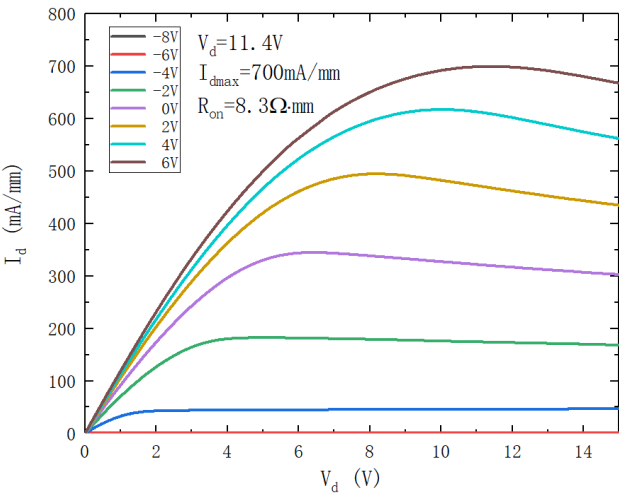


图 6 器件的直流输出特性曲线

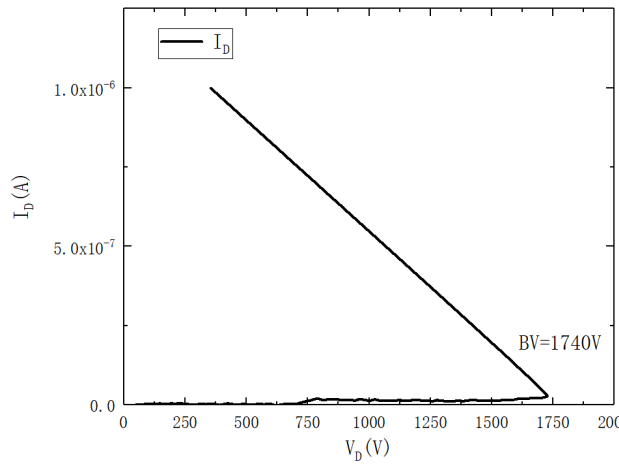


图 7 器件的击穿特性曲线

参考文献

[1] Sharbati S, Ebel T, Franke W T. Design of E-mode GaN HEMTs by the polarization super junction (PSJ) technology[J]. Microelectronics Reliability,2020,114(11):113907.

[2] Ma Y, Xiao M, Du Z, et al. Tri-gate GaN junction HEMT[J]. Applied Physics Letters,2020,117(14):143506.

[3] Gupta G, Kanamura M, Swenson B, et al. 1 200V GaN switches on sapphire substrate[C]. 2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), IEEE,2022:349-352.

Application Practice of High Strength Steel in Lightweight Design of Automobile Chassis

Lili Zhu

Henan Xinghe Tongpin High-tech Development Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450003, China

Abstract

With the increasing demand for energy conservation and emission reduction in the automobile industry, the lightweight design of vehicles has become an important research direction. This paper discusses the application practice of high-strength steel in the lightweight design of automobile chassis. By analyzing the mechanical properties and processing characteristics of high strength steel and combining with the specific chassis structure design, several schemes of high strength steel to replace traditional steel are put forward and verified. Studies have shown that the use of high-strength steel can significantly reduce the chassis weight and improve the fuel economy and handling performance of the car. In addition, the high strength and corrosion resistance of high-strength steel can also effectively improve the service life and safety of the chassis. This study provides theoretical basis and practical guidance for the application of high strength steel in automotive lightweight design, and is of great significance to promoting the sustainable development of automotive industry.

Keywords

high strength steel; automotive lightweight; chassis design; fuel economy; handling performance

高强钢在汽车底盘轻量化设计中的应用实践

朱莉莉

河南星河同频科技发展有限公司, 中国 · 河南 郑州 450003

摘 要

随着汽车工业对节能减排需求的不断增加, 汽车轻量化设计成为重要研究方向。论文探讨了高强钢在汽车底盘轻量化设计中的应用实践。通过分析高强钢的力学性能和加工特点, 结合具体底盘结构设计, 提出了几种高强钢替代传统钢材的方案, 并进行了实验验证。研究表明, 使用高强钢可以显著减轻底盘重量, 提高汽车的燃油经济性和操控性能。此外, 高强钢的高强度和耐腐蚀性能也能有效提高底盘的使用寿命和安全性。本研究为高强钢在汽车轻量化设计中的应用提供了理论基础和实践指导, 对推动汽车工业的可持续发展具有重要意义。

关键词

高强钢; 汽车轻量化; 底盘设计; 燃油经济性; 操控性能

1 引言

在全球节能减排的背景下, 汽车工业面临挑战和机遇。为了减少燃油消耗和降低排放, 汽车轻量化设计成为关注焦点。汽车重量影响燃油经济性和排放, 因此通过材料优化和结构设计实现轻量化很重要。高强钢作为一种新材料, 因其高强度、高刚度和耐腐蚀性能, 逐渐广泛应用于汽车工业。高强钢不仅能提高汽车安全性和耐用性, 还能减轻车辆自重。在汽车底盘设计中, 传统钢材往往导致结构重量增加, 影响燃油经济性和操控性能, 而高强钢能很好地解决这一问题。论文探讨了高强钢在汽车底盘轻量化设计中的具体应用, 通过对高强钢的性能和加工特点分析, 提出了几种高强

钢替代传统钢材的方案, 并进行了实验验证。研究结果表明, 使用高强钢可以显著减轻底盘重量, 提高汽车燃油经济性和操控性能, 同时高强钢的高强度和耐腐蚀性能也能提高底盘使用寿命和安全性。本研究为高强钢在汽车轻量化设计中的应用提供了理论基础和实践指导, 对推动汽车工业可持续发展具有重要意义。未来, 随着高强钢材料技术进步, 其在汽车工业中的应用前景将更加广阔。

2 高强钢材料特性与应用背景

2.1 高强钢的定义与分类

高强钢是指抗拉强度较传统钢材显著提高的钢种, 其定义通常基于材料的强度指标^[1]。一般来说, 抗拉强度在 550MPa 以上的钢材被称为高强钢。高强钢的主要特点包括高强度、高硬度和良好的延展性, 这使其在需要高强度和轻量化的应用中表现出色。

【作者简介】朱莉莉 (1988-), 女, 中国河南商丘人, 硕士, 工程师, 从事科技管理及金属材料加工工艺研究。

高强钢可根据其制造工艺和微观结构分为多种类型。按制造工艺分类,高强钢主要包括冷轧高强钢和热轧高强钢^[2]。冷轧高强钢通过冷加工工艺生产,具有更高的强度和更好的表面质量,适用于需要高精度和高表面质量的部件;热轧高强钢通过热加工工艺生产,适用于厚板和大件结构。

按微观结构分类,高强钢可分为双相钢、多相钢、复相钢、马氏体钢等。双相钢由铁素体和马氏体组成,具有良好的综合性能和较高的延展性;多相钢则包含铁素体、马氏体、贝氏体和残余奥氏体等多相组织,具备优异的成形性能和抗疲劳性能;复相钢通常在铁素体基体中分布有第二相颗粒,表现出优异的强度和韧性;马氏体钢具有最高的强度,但塑性较低,适用于极高强度需求的部件。

高强钢的分类不仅体现了不同钢种的微观结构特征和力学性能,也反映了其在不同应用领域的适用性。通过合理选择和使用不同类型的高强钢,可以在保持结构强度和安全性的前提下,显著减轻汽车底盘的重量,实现轻量化设计目标。

2.2 高强钢的力学性能分析

高强钢的力学性能是其在汽车底盘轻量化设计中广泛应用的关键因素。高强钢具有出色的屈服强度和抗拉强度,其屈服强度通常在 550MPa 以上,抗拉强度则可达到 700MPa 以上。这些力学性能使高强钢在同等载荷条件下能够使用更薄的材料,从而显著减轻底盘的重量。

高强钢的良好延展性能和抗疲劳性能,是其另一个重要优势。在汽车底盘结构中,高强钢能够承受复杂的应力状态而不易发生断裂。优越的抗疲劳性能意味着底盘在长时间使用过程中不会因反复载荷作用而产生裂纹,大大提高了其可靠性和耐久性。

与传统钢材相比,高强钢还表现出更好的耐腐蚀性能。通过添加适量的合金元素如铬、钼等,高强钢在潮湿、盐雾等恶劣工况下依然能保持较长的使用寿命。这一特性对保证汽车底盘的安全性和延长其使用寿命具有重要意义。

总的来说,高强钢的优异力学性能为其在汽车底盘轻量化设计中的应用提供了坚实的基础,有助于实现节能减排和提高车辆性能的目标。

2.3 高强钢在汽车工业中的应用现状

高强钢在汽车工业中的应用已经得到了广泛关注和推广。由于高强钢具有较高的强度和优异的耐腐蚀性能,被大量应用于车身结构和底盘部件中^[3]。车身制造中,采用高强钢可以实现减重的目标,保持安全性能。在底盘设计中,高强钢的使用显著提升了零部件的强度和抗冲击性能,减少了使用传统钢材时可能出现的断裂和变形问题。高强钢的可加工性使其能够适应现代汽车制造的高精度要求,提高生产效率并降低制造成本。

3 高强钢在汽车底盘设计中的应用

3.1 汽车底盘设计的基本要求

汽车底盘设计的基本要求直接影响整车的性能、安全性和耐久性。要求底盘具有足够的结构强度和刚度,以承受车辆运行过程中所受到的各种载荷和冲击。底盘需能有效支撑车体重量和承受行驶中的动载荷,应对不同路况下的振动和冲击压力。底盘设计需考虑轻量化,减轻底盘自重,有利于提高汽车的燃油经济性和降低二氧化碳排放。通过优化设计和材料选择,轻量化设计不仅有助于减少能耗,还能提升车辆的动力性能和操控稳定性。

另外,底盘的防腐性能也是设计中的重要因素。汽车在行驶过程中会接触到各种腐蚀介质如水、盐分及泥土,底盘良好的耐腐蚀性能可延长其使用寿命,提升车辆的总体可靠性。底盘设计还需注重安全性,尤其是碰撞安全性,确保在发生意外碰撞时底盘能够有效吸能,减少对车内乘员的伤害。

底盘设计的经济性同样关键,需在保证性能的前提下优化成本。设计中需考虑材料选择、制造工艺和装配流程,以降低生产成本和简化制造工序。底盘设计需满足国际和地区的法规要求,包括环境保护法规和安全法规,确保车辆能够合法上路并符合环保和安全标准。

汽车底盘设计的基本要求包括结构强度和刚度、轻量化、防腐性能、安全性和经济性,以及符合相关法规标准。这些要求共同保障了汽车在使用中的安全性、经济性和可靠性。

3.2 高强钢在底盘结构中的优势

高强钢在汽车底盘结构中展现出多方面的优势。高强钢的高强度特点使其在保持较低材料体积的情况下,依旧能提供卓越的承载能力和抗冲击性。在汽车底盘的设计中,采用高强钢可以显著减轻底盘重量,从而达到减轻整车重量的效果,进而提高车辆的燃油经济性。高强钢具备优异的耐腐蚀性能,能够在恶劣的使用环境中保持较长的使用寿命,减少了因腐蚀导致的材料疲劳和损坏风险,提高了底盘的耐久性和安全性。

高强钢的可焊接性能良好,为现代汽车制造工艺提供了优势支持。现代汽车底盘多采用模块化设计,合理利用高强钢的这一特性,可实现结构件之间的高效连接,并优化焊接工艺流程。高强钢的高模量和低变形特性则有助于提升底盘的整体刚性和结构稳定性,促使汽车在行驶过程中保持良好的操控性能和舒适体验。综合来看,高强钢在汽车底盘的应用不仅满足了轻量化设计要求,还提升了车辆的综合性能和可靠性。

3.3 高强钢替代传统钢材的设计方案

在汽车底盘设计中,高强钢替代传统钢材的设计方案主要集中在几个方面:选择合适的高强钢种类,以确保其力

学性能满足底盘结构的强度和刚度要求；通过有限元分析和结构优化，确定关键部位如车架、悬挂系统等的高强钢使用比例，优化结构重量和性能；采用先进的制造工艺，如热成形和激光焊接，以增强高强钢构件的制造精度和连接强度，确保其在实际使用中的可靠性和耐久性；通过实验验证，评估不同设计方案在重量减轻、燃油经济性和操控性能方面的提升效果，从而制定出最佳的高强钢替代方案。这些设计方案为实现汽车底盘轻量化提供了有效路径。

4 实验验证与性能评估

4.1 高强钢底盘结构的实验方法

为验证高强钢在汽车底盘设计中的实际应用效果，需要进行系统的实验方法及其评估。

选择适当的实验材料即高强钢和传统钢材。材料的选择应基于其广泛的工业应用和易于获取性。进行材料的力学性能测试，包括拉伸试验和疲劳试验，以确认其基本性能参数。选择相同尺寸和形状的汽车底盘样件进行对比实验，是保证实验结果可比性的重要前提。

对比样件的制造采用相同的工艺流程，如冲压、焊接等加工过程，确保底盘结构的稳定性和一致性。清晰标注每一个样件，并进行详细记录，包括厚度、重量以及各个连接部位的工艺特点。

为评估底盘在实际使用中的表现，可采用有限元分析法进行模拟计算。通过加载不同的车载荷和路面条件，模拟底盘在多种工况下的应力分布、变形和损伤情况。对高强钢和传统钢材底盘在这些模拟条件下的表现进行比较，找出优化设计方案。

随后，进行物理实验验证。为更接近现实条件，可设计一个包含多种路面类型、坡度和速率变化的测试跑道。将高强钢和传统钢材底盘装配于相同型号和配置的汽车上，进行测试行驶。通过安装应变片、加速度传感器等监测设备，实时记录底盘的应力、变形及振动情况。

综合材料性能测试、模拟计算和物理实验的结果，进行综合分析，确定高强钢底盘在轻量化设计中的优越表现。这些实验方法和验证步骤，为高强钢在汽车底盘设计中的应用实践提供了重要的参考依据。

4.2 底盘重量与燃油经济性的实验结果

在实验中，使用高强钢和传统钢材分别制作两组汽车底盘样本，并进行详细对比分析。实验结果表明，高强钢底盘的重量显著低于传统钢材底盘。具体而言，高强钢底盘的重量减少了约 20%，有效降低了车辆的整体质量。

为评估燃油经济性，对两组底盘样本进行了相同条件

下的道路测试，测试包括城市道路和高速公路两种工况。结果显示，高强钢底盘车辆的平均燃油消耗率较传统钢材底盘车辆减少了 15%。这种燃油经济性的提升主要归因于车辆自重减轻所带来的滚动阻力和加速阻力的降低。

数据分析还揭示了高强钢底盘在耐久性测试中的优势。由于高强钢的优越力学性能和抗腐蚀特性，高强钢底盘在长期使用后的质量和性能保持率优于传统钢材底盘。这些实验结果充分证明，高强钢在汽车底盘轻量化设计中的应用，不仅能够显著减轻底盘重量，还能够提升燃油经济性和车辆的整体性能。

4.3 操控性能和安全性的评估

高强钢在底盘设计中的应用显著提高了汽车的操控性能 and 安全性。通过高强钢材料的高强度和高刚性，使得底盘在高速行驶和复杂路况下能够保持稳定和精确地操控。高强钢的耐腐蚀性能有效延长了底盘的使用寿命，减少了因腐蚀导致的结构损坏，进一步提升了车辆的安全性。实验结果表明，采用高强钢设计的底盘在碰撞测试中表现出优异的能量吸收和变形控制能力，显著降低了乘员伤害风险。

5 结语

本研究围绕高强钢在汽车底盘轻量化设计中的应用进行了深入探讨和实践。通过对高强钢的力学性能和加工特点分析，结合底盘结构设计，提出了高强钢替代传统钢材的具体方案，并对其进行了实验验证。实验结果证实高强钢在底盘轻量化设计中能有效降低汽车底盘重量，提高燃油经济性和操控性能，同时高强度和耐腐蚀性能确保了底盘的使用寿命和安全性。然而，本研究的局限性在于仅对部分高强钢进行了研究，未来可以考虑不同类型高强钢的综合应用，以进一步提高轻量化设计的效果。此外，对高强钢的加工工艺、成本控制以及环境影响等方面的研究仍有待完善。在今后的研究中，应积极探索高强钢的新型应用领域，以解决汽车行业面临的节能减排等诸多挑战。总之，本研究为高强钢在汽车底盘轻量化设计中的应用提供了有益的理论依据和实践指导，具有较强的现实意义和推广价值。期望未来各界能够进一步关注和投入资源，推动高强钢在汽车工业中的普及应用，为中国汽车工业的可持续发展作出积极贡献。

参考文献

- [1] 冯亚鹏,张庆龙.浅谈汽车底盘工艺轻量化设计[J].汽车世界, 2020(21):28-29.
- [2] 熊剑.汽车底盘轻量化设计与应用[J].汽车知识,2023,23(7):86-88.
- [3] 林惠林.汽车底盘悬架关键部件轻量化设计[J].汽车博览,2020(3):58-59.

Application and Performance Analysis of Refined Steel in Large Span Glass Curtain Wall

Peng Yu

Jiangsu Hengshang Energy Saving Technology Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai, 200000, China

Abstract

With the rapid development of China's social economy and the acceleration of urbanization, the construction industry has ushered in unprecedented opportunities for development. As an important element of modern architecture, glass curtain wall has been widely used in the design of building facades because it can give the building a sense of transparency and aesthetics. Especially in the large-span, large-scale glass curtain wall, this advantage is more significant. However, the large-span design puts forward higher requirements on the mechanical properties of the main force keel. Considering that the strength of steel is three times that of aluminum alloy and the price is more economical, steel keel is often used for the keel of long-span glass curtain wall from the perspective of cost performance and mechanical performance. The traditional cold bending processing method of steel pipe often leads to too large cross-section fillet, which affects the aesthetics of indoor visual surface. With the progress of processing technology, such as hot pressing, fine grinding and welding technology, the steel pipe section has been able to meet the design requirements of the fillet accuracy. Based on practical engineering experience and material properties, this paper deeply discusses the feasibility and advantages of using high-precision steel (refined steel) keel instead of traditional aluminum alloy keel in large-span glass curtain wall.

Keywords

large span glass curtain wall; fine steel; performance analysis

精制钢在大跨度玻璃幕墙中应用与性能分析

于鹏

江苏恒尚节能科技股份有限公司上海分公司, 中国 · 上海 200000

摘 要

随着中国社会经济的迅猛发展和城市化进程的加速, 建筑行业迎来了前所未有的发展机遇。玻璃幕墙作为现代建筑的重要元素, 因其能够赋予建筑通透感和美观性, 已被广泛应用于建筑外立面设计中。尤其在大跨度、大分格的玻璃幕墙中, 这种优势更为显著。然而, 大跨度设计对主受力龙骨的力学性能提出了更高要求。考虑到钢的强度是铝合金的3倍, 且价格更为经济, 从性价比和受力性能出发, 大跨度玻璃幕墙的龙骨常选用钢龙骨。传统钢管的冷弯加工方式往往导致截面圆角过大, 影响室内可视面的美观。随着加工工艺的进步, 如热压、精细打磨和焊接等技术的应用, 钢管截面已能满足设计要求的圆角精度。论文基于实际工程经验和材料特性, 深入探讨大跨度玻璃幕墙中采用高精钢(精制钢)龙骨替代传统铝合金龙骨的可行性及其优势。

关键词

大跨度玻璃幕墙; 精致钢; 性能分析

1 引言

精制钢: 又名精致钢、精细钢、高精钢、精密钢等。精制钢型号多种多样, 常规的有直角方矩管、直角矩形钢、T 型钢, 还有特殊定制的梯形钢、异型钢等等。

建筑幕墙体系中精制钢: 指的是在幕墙支撑体系中, 外观方面可以无缝衔接完全替代或部分替代铝型材的钢型材, 即被称为精制钢或高精钢。也就是说, 精制钢(高精钢)

表面光滑平整媲美铝型材拿过来可以直接安装使用, 无需再做任何外包装饰, 并且器表面氟碳喷涂出来也完全可以达到相应的防腐耐久性和美观性能。

2 精致钢系统应用优势

在大跨度玻璃幕墙项目中, 精致钢(高精钢)系统的应用优势显著, 以下从材料受力强度、保温节能、防火性能以及加工工艺和表面处理四个方面进行详细解析。

2.1 材料受力强度优势

精致钢相较于传统铝合金材料, 具有更高的强度和刚度。钢材的强度通常是铝合金的 3 倍左右, 这意味着在相同

【作者简介】于鹏(1984-), 男, 中国山东莱阳人, 本科, 工程师, 从事外装饰幕墙设计和施工研究。

受力条件下，精致钢能够提供更强大的支撑力，确保幕墙结构的稳定性和安全性。在大跨度玻璃幕墙项目中，这种高强度特性尤为重要，因为它能够有效抵抗风压、地震等外力作用，保证幕墙的整体性能^[1-3]。

下图表格是我整理钢材和铝合金型材的材料性能和物理力学性能指标，为了方便读者观看，此表格中铝合金型材牌号采用比较常用的 6063-T5，精致钢牌号采用比较常用的 Q235 系列（见表 1）。

表 1 钢铝力学性能数值表（N/m²）

	抗拉、抗压、抗弯	抗剪	弹性模量	线膨胀系数 (1/℃)
6063-T5	90	55	0.70×10^5	2.35×10^{-5}
Q235	215	125	2.06×10^5	1.20×10^{-5}

抗拉、抗压、抗弯决定了材料自身的强度，数值越高说明材料自身的强度越高，上表中铝合金的抗拉、抗压、抗弯是 90N/m²，而钢材的抗拉、抗压、抗弯是 215N/m²，说明钢材自身的强度远远高于铝合金材料。也就是说在两种材料采用相同截面大小计算受力强度时，钢材料要比铝合金材料好很多。因此在大跨度玻璃幕墙使用龙骨时由于跨度较大，对龙骨的受力强度也要求较大，这就导致了如果采用铝合金材料往往需要很大的截面才能满足受力要求，而采用钢材材料其截面在减小很多的情况下就可以满足强度受力要求，从而较少造价、增加室内可利用空间、提高室内龙骨的美观性。

弹性模量决定了材料的刚度和抗变形能力，数值越大说明材料的刚度和抗变形能力越好，上表中铝合金的弹性模量是 0.70×10^5 N/m²，而钢材料的弹性模量是 2.06×10^5 N/m²，说明钢材料的刚度和抗变形能力是铝合金材料的 3 倍。幕墙龙骨在结构计算时其挠度变形大小控制满足要求是必须项，而决定挠度变形大小的因素是水平风荷载、龙骨的长度、龙骨的截面特性、龙骨自身材料的弹性模量。也就是说在相同条件下（水平风荷载相同、龙骨的长度相同、龙骨的截面特性相同）由于钢材料的弹性模量是铝合金型材弹性模量的 3 倍，钢龙骨的挠度变形会更小。因此，在大跨度玻璃幕墙使用龙骨时由于跨度较大，导致龙骨的长度较长，这就导致了如果采用铝合金材料往往需要很大的横截面才能满足挠度变形要求，而采用钢材材料其截面在减小很多的情况下就可以满足挠度变形要求，从而较少造价、增加室内可利用空间、提高室内龙骨的美观性^[4]。

线膨胀系数：固体物质的温度每改变 1 摄氏度时，其长度的变化和它在原温度（不一定为 0℃）时长度之比，叫做“线性膨胀系数”。线膨胀系数越小材料受热胀冷缩的影响越小，材料的变形也就越小，材料性能越稳定。上表中铝合金的线膨胀系数是 2.35×10^{-5} （1/℃），钢材的线膨胀系数是 1.20×10^{-5} （1/℃），因此钢材受热胀冷缩的影响要比铝合金材料好很多，更适合大跨度玻璃幕墙中龙骨材料的

选用。

2.2 保温节能

虽然精致钢本身并不直接提供保温功能，但通过与保温材料的结合使用，可以显著提升幕墙的保温性能。在精致钢龙骨与玻璃面板之间填充高效的保温材料，如玻璃棉、岩棉等，可以有效减少热量传递，提高建筑的保温效果。同时，精致钢系统还具有良好的气密性和水密性，能够进一步降低能耗，符合绿色建筑和节能减排的要求。

传热系数是指在稳定传热条件下，围护结构两侧温差为 1 度，单位时间通过单位面积传递的热量，单位为瓦/米·度。

铝合金材料的导热系数 237W/m·K，钢材料的导热系数 50W/m·K，根据这个数值可以看出，钢材料的导热系数要远远低于铝合金材料，导热系数越低说明材料的保温节能性能越好，钢系统型材对比等截面的铝系统型材框节点热工性能是 1：4，从保温节能性能考虑钢材料要比铝合金材料更加保温节能。

玻璃幕墙系统传热系数计算公式：

幕墙传热系数：

$$k_{\text{靠}} = k_{\text{玻}} \times S_{\text{玻}} + k_{\text{框}} \times (1 - S_{\text{玻}})。$$

式中： $k_{\text{玻}}$ ——玻璃导热系数；

$S_{\text{玻}}$ ——玻璃所占门窗整体的面积；

$k_{\text{框}}$ ——框架的导热系数；

$S_{\text{框}}$ ——框架所占门窗整体的面积。

2.3 防火性能

精致钢作为钢材的一种，本身具有一定的耐火性能。在火灾发生时，精致钢能够在一定时间内保持结构完整性，为人员疏散和消防救援争取宝贵时间。此外，精致钢系统还可以通过在龙骨表面涂刷防火涂料、使用防火玻璃等措施进一步提升防火性能。这些措施能够确保幕墙在火灾中的安全性，减少火灾对建筑的损害。

钢材料的熔点约 1538℃，铝合金材料的熔点 660℃，钢材料的熔点是铝合金材料熔点的 2.3 倍，因此在相同工况下，如果发生火灾，幕墙龙骨采用钢材料耐火时间要相对高于采用铝金属材料。

由于钢材料的熔点是 1538℃，现金市面上所用的防火幕墙其主要受力龙骨都是采用钢龙骨，钢龙骨 + 防火玻璃 + 防火胶条 = 防火玻璃幕墙，可以达到 2h 的耐火完整性，这种做法是铝合金龙骨无法达到的。

单从耐火性来说，钢材料比铝合金材料更适合作为防火玻璃幕墙的主受力龙骨。

2.4 加工工艺和表面处理

加工工艺：精致钢系统采用先进的加工工艺，如热压、精细打磨和焊接等，确保龙骨的截面精度和表面光洁度。这些工艺使得精致钢能够满足大跨度玻璃幕墙对精度和美观性的高要求。同时，精制钢系统还支持定制化生产，能够根

据具体项目的需求进行个性化设计和生产。

表面处理: 精致钢系统表面经过氟碳喷涂等处理工艺, 具有优异的防腐耐久性和美观性能。氟碳涂层不仅能够有效抵抗紫外线、酸雨等恶劣环境的侵蚀, 还能够保持长时间的光泽度和色彩稳定性。这使得精致钢系统在大跨度玻璃幕墙项目中具有较长的使用寿命和较低的维护成本(如图1所示)。



图1 精致钢玻璃幕墙工程照片

3 结论

钢系统(尤其是精制钢或高精钢系统)与铝系统在建筑幕墙应用中的对比, 展现出多个显著的优势。

①能做大分格, 宽和高都有优势, 系统做好更安全。钢系统由于钢材的高强度特性, 能够轻松支撑大跨度、大分格的幕墙结构。无论是宽度还是高度, 钢系统都能提供更为灵活的设计空间, 满足建筑师对于现代建筑通透性和视觉震撼力的追求。同时, 通过精细的设计和严格的施工质量控制, 钢系统能够确保幕墙结构的安全性, 有效抵抗风压、地震等外力作用。

②同等条件下, 截面小, 纤细不粗笨, 更符合建筑师美观要求。相较于铝系统, 钢系统在达到相同承载能力的条件下, 其截面尺寸通常可以做得更小。这意味着钢龙骨在视觉上更加纤细、不粗笨, 能够更好地融入建筑的整体设计之中, 满足建筑师对于美观性的要求。此外, 较小的截面尺寸也有助于减少材料用量和降低整体重量, 对建筑结构的影响

也相应减小^[5]。

③玻璃和胶条采用防火的就能直接做防火幕墙。钢系统本身具有一定的耐火性能, 再加上采用防火玻璃和防火胶条等配套材料, 可以轻松地构建出符合消防规范要求的防火幕墙。这种防火幕墙在火灾发生时能够有效阻止火势蔓延, 为人员疏散和消防救援争取宝贵时间。相比之下, 铝系统的防火性能通常较弱, 需要额外采取防火措施才能达到相同的防火效果。

④同分格比铝系统距离建筑结构距离小, 计算建筑容积率指标时, 每层为业主多节省几十平方可使用面积。由于钢系统的高强度和刚度特性, 使得在相同分格尺寸下, 钢幕墙与建筑结构之间的距离可以比铝系统更小。这意味着在建筑面积的计算中, 钢系统能够为业主节省出更多的可使用面积。特别是在高层建筑中, 这种节省的面积累积起来将相当可观, 为业主带来实际的经济利益^[6]。

⑤承托大玻璃分格更安全。大玻璃分格是现代建筑幕墙中常见的设计元素之一, 它能够带来更加开阔的视野和通透的空间感。然而, 大玻璃分格也对幕墙结构的承载能力提出了更高的要求。钢系统凭借其高强度和稳定的性能特点, 能够轻松承托大玻璃分格并确保其安全性。相比之下, 铝系统在大玻璃分格的应用上可能会受到一定的限制。

综上所述, 钢系统在建筑幕墙应用中展现出诸多优于铝系统的特点, 这些特点使得钢系统在现代建筑领域(特别是大跨度玻璃幕墙系统)中具有广泛的应用前景和市场需求。

参考文献

- [1] 何丹丹.幕墙玻璃两种粘接方式力学性能测试及分析[J].国防交通工程与技术,2023,21(6):74-77.
- [2] 周小龙.大跨度玻璃幕墙不同支撑条件下立柱抗风压性能研究[J].福建建设科技,2022(4):10.
- [3] 石樱.关于房屋装饰玻璃幕墙施工技术应用分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2023(11):1.
- [4] 徐永平.幕墙设计中开启扇的安全性分析——以某玻璃幕墙工程为例[J].房地产世界,2022(12):18-20.
- [5] 韩松.一种新型钢系统幕墙的研发[J].建筑技艺,2022(S1):375-379.
- [6] 李晓杰,韩影,贾立丹,等.建筑玻璃光热性能解读及现场检测概述[J].建设科技,2019(9):38-41.

Discussion on the Nondestructive Testing Technology of Commercial Mortar in Shanghai, China

Yanglin Yang

Shanghai Gongda Construction Engineering Testing Co., Ltd., Shanghai, 200444, China

Abstract

The compressive strength of commercial masonry mortar in Shanghai mainly includes penetration method and rebound method. These two detection methods propose a correlation between the penetration value m_d or the rebound value R_m and the strength of commercial mortar. This paper uses the concrete ultrasonic rebound synthesis method $f-v-R$ detection technology, combining the penetration method and the 1stOpt data fitting software simulation analysis 1stOpt strength measurement curve, it can better describe the penetration value $f-m_d-R_m$, the rebound value m_d and compressive strength value R_m , compared with the traditional $f-m_d$ or $f-R_m$ strength measurement curve detection method is single, this new model may be closer to the actual strength of commercial mortar in the actual detection.

Keywords

non-destructive testing; commercial mortar; strength measurement curve; regression curve

中国上海地区商品砂浆无损检测技术探讨

杨阳霖

上海功大建设工程检测有限公司, 中国 · 上海 200444

摘 要

上海市现场检测商品砌筑砂浆抗压强度主要有贯入法及回弹法。这两种检测方法提出了贯入值 m_d 或回弹值 R_m 与商品砂浆强度之间的相关关系。论文借鉴混凝土超声回弹综合法 $f-v-R$ 检测技术,提出了将贯入法和回弹法结合起来,利用1stOpt数据拟合软件模拟分析 $f-m_d-R_m$ 测强曲线,它能够较好地描述商品砂浆的贯入值 m_d 、回弹值 R_m 和抗压强度值之间的关系,与传统的 $f-m_d$ 或 $f-R_m$ 测强曲线检测方法单一、数据误差较大相比,这种新模型的提出,在实际的检测中可能更加接近商品砂浆的实际强度。

关键词

无损检测; 商品砂浆; 测强曲线; 回归曲线

1 引言

商品砂浆的无损检测技术是指在不影响结构构件受力性能或其他使用功能的前提下,利用物理方法对其表面或内部的状态进行检查和测试,推定砂浆的抗压强度等一系列性能的检测方法。贯入法和回弹法是检测砂浆强度最常用的两种方法^[1],迟培云提出了粉煤灰砖砌体中砂浆回弹测强曲线的应用研究^[2];刘想研究了混凝土实心砖和非承重混凝土空心砖测强曲线^[3];程伟对回弹法现场检测砌筑砂浆与贯入法现场检测砌筑砂浆进行了对比^[4];那么是否可以像混凝土超声回弹综合法一样将贯入法及回弹法的检测数据进行拟合得到一种新的测强曲线。

【作者简介】杨阳霖(1988-),男,中国福建人,本科,工程师,从事建筑主体结构检测研究。

2 贯入回弹综合法测强曲线

2.1 测强曲线的设想

在混凝土现场强度检测技术中,超声回弹综合法的检测结果无疑是几种检测技术中更接近混凝土实际抗压强度,将其声速值、回弹值和抗压强度值之间的关系,通过建立 $f-v-R$ 测强曲线,能够得到更为接近实际结果的数据。

同理,相较于传统的贯入法 $f-m_d$ 或回弹法 $f-R_m$ 检测,论文假设贯入深度 m_d 、回弹强度 R_m 和抗压强度值 f 之间存在函数关系:

$$f = am_d^b R_m^c$$

2.2 检测对象

某14层员工宿舍楼填充墙砌体材料为蒸压混凝土加气砌块,采用强度等级M7.5的干混普通砌筑砂浆。按单个构件检测^[5]对50个构件(房间)的砌筑砂浆强度进行贯入法及回弹法检测。在50个构件砌筑时,使用与构件灰缝同盘

的砂浆制作钢底同条件试块，同条件试块拆模后与检测构件同条件养护。养护结束后对同条件立方体试块进行抗压强度检测^[6]。

2.3 检测结果

2.3.1 贯入法检测

贯入法检测是采集构件的贯入深度值，通过专用测强曲线^[5]推算砌筑砂浆的抗压强度值。

单个蒸压混凝土加气砌块构件的砂浆贯入检测数值中，剔除 16 个贯入深度值中的 3 个较大值和 3 个较小值，余下的 10 个贯入深度值按下式取平均值 m_d ：

$$m_d = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} d_i$$

单个构件贯入强度推定值 f_1' 等于其换算值 f_1 ，其中 $f_1 = \alpha \times m_d^\beta$ ， $\alpha=135.5$ ， $\beta=-2.035$ 。

2.3.2 回弹法检测

回弹法检测是采集构件表面反馈回来的弹回值及构件的碳化深度值，通过专用测强曲线^[5]推算砌筑砂浆的抗压强度值。

单个蒸压混凝土加气砌块构件的砂浆回弹检测数值中，计算第*j*个测区的平均回弹值时，从该测区的 12 个回弹值中的最大值和最小值剔除，余下的 10 个回弹值按下式取平均值 $R_{m,i}$ ：

$$R_{m,i} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} R_{i,j}$$

单个构件回弹强度推定值 f_2' 等于其最小测区换算值 $f_{2,min}$ ，其中 $f_{2,min} = \alpha \times R_{min}^\beta$ ， $\alpha=2.698 \times 10^{-4}$ ， $\beta=3.267$ 。

2.3.3 结果汇总

自然养护龄期到达 28d 时进行贯入法及回弹法检测，同时将对应的同条件试块进行

抗压强度试验，汇总得到的贯入深度平均值 m_d 、最小测区回弹平均值 R_{min} 及同条件抗压强度如表 1 所示。

表 1 贯入深度平均值 m_d 、最小测区回弹平均值 R_{min} 及同条件抗压强度汇总表

构件编号	m_d mm	R_{min} MPa	f MPa	构件编号	m_d mm	R_{min} MPa	f MPa
201	2.92	28.8	16.7	803	3.03	28.4	15.3
202	3.03	28.7	15.2	805	2.72	28.6	17.9
203	2.92	29.1	16.5	807	3.02	29.7	15.8
204	2.98	28.2	15.1	904	2.86	29.7	15.2
305	3.03	27.9	14.3	905	2.69	29.1	18.5
306	2.83	29.6	17.6	909	3.18	27.0	14.7
307	2.85	29.3	16.3	910	2.98	27.3	14.6
308	2.89	29.8	15.8	1003	3.05	29.3	14.4
402	2.78	30.5	17.8	1004	2.74	30.6	18.1
403	2.83	29.1	17.3	1007	3.08	27.5	15.1
404	3.18	27.7	14.9	1008	2.86	27.6	17.4
405	2.81	28.8	17.7	1105	2.79	27.8	16.2
504	2.64	30.2	18.1	1106	2.81	29.4	15.6
505	2.95	27.5	15.9	1107	2.83	27.3	17.6
507	3.05	27.3	16.6	1109	3.16	27.8	15.1
508	3.03	28.4	14.9	1206	2.80	29.4	18.1
605	2.81	29.7	17.5	1207	2.72	28.9	18.1
606	2.88	28.0	16.2	1208	2.91	29.3	16.9
609	3.10	29.3	14.3	1209	2.88	28.2	17.4
610	3.10	28.6	14.8	1302	2.79	29.7	16.4
705	2.97	29.7	16.7	1304	3.03	28.9	14.6
706	2.73	27.3	18.2	1305	2.89	28.8	16.2
709	3.09	30.0	13.5	1308	2.77	29.0	17.8
710	2.78	27.4	17.1	1309	2.86	28.6	17.9
802	2.94	27.7	15.2	1310	3.07	28.8	15.2

3 测强曲线拟合

3.1 数据拟合软件——1stOpt (First Optimization)

1stOpt 是一款强大的数据拟合软件，支持各种类型的数据输入，包括实验数据、模拟数据等，并能够进行数据的预处理和后处理。通过其独特的全局优化算法，能够轻松地进行复杂的数据分析和模型优化。用户可以根据现有数据通过数学方法找到一条与之相吻合的曲线或函数，同时，拟合结果以图形化的方式展示，使用户能够更直观地理解数据和模型。

3.2 输入算法编程

定义函数 $y = ax_1^b x_2^c$ ， y 代表同条件抗压强度 f ， x_1 代表贯入深度平均值 m_d ， x_2 代表最小测区回弹平均值 R_{min} ， a 、 b 、 c 为通过 1stOpt 拟合软件求出的三个常数参数。输入算法编程见图 1。

3.3 输入检测数据

依次输入 50 个构件的抗压强度 f ，贯入深度平均值 m_d ，最小测区回弹平均值 R_{min} 。输入检测数据见图 2。

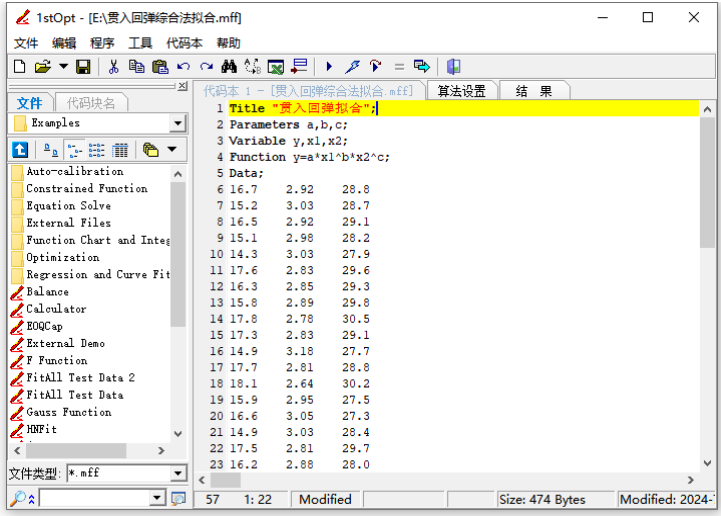


图 1 输入算法编程

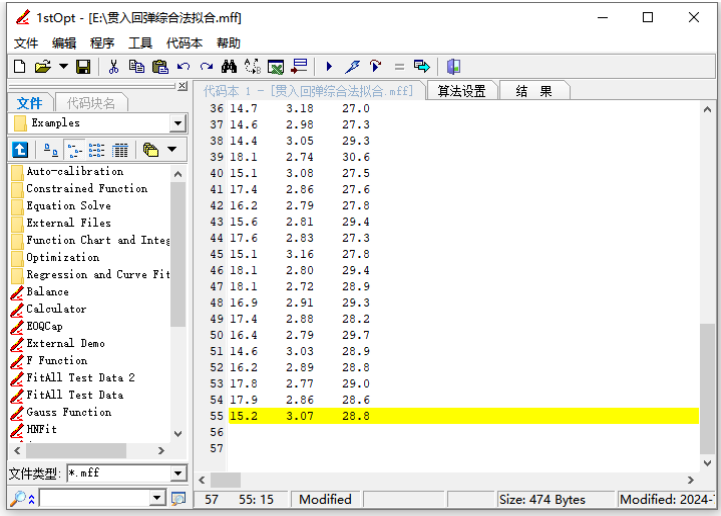


图 2 输入检测数据

3.4 选择算法

算法选择麦夸特法优化算法，这种算法的广泛度和精度都比较高，特别在非线性回归和曲线拟合方面，优势比较突出。

收敛判断指标选择 1.00E-10，最大迭代数 1000，这些都是控制其精度，使其拟合度提高。

选择算法见图 3。

3.5 结果输出

贯入回弹拟合

参数	最佳估算
a	160.793203440573
b	-1.53127913814125
c	-0.195659825578901

执行计算结果见图 4。

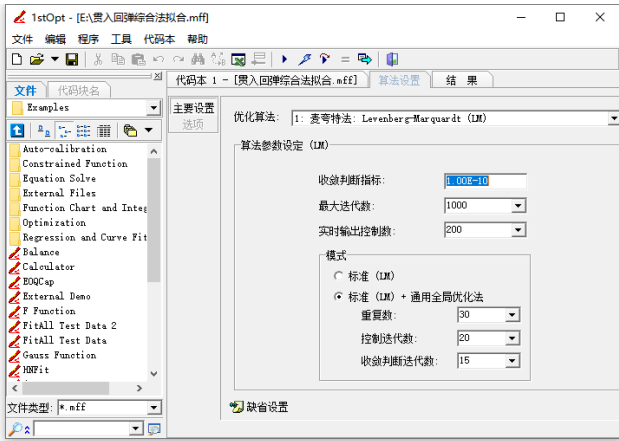


图3 选择算法

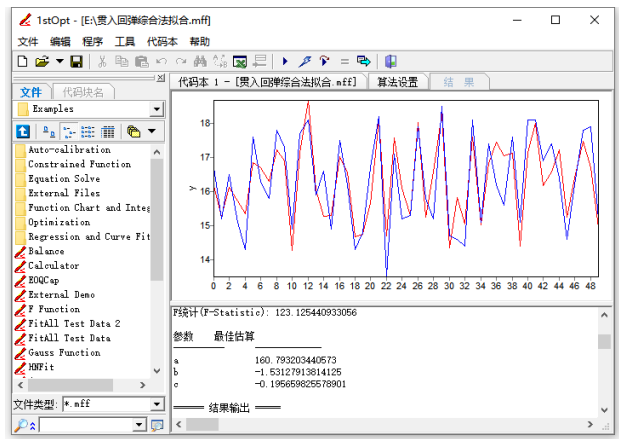


图4 执行计算结果

4 误差计算

参考贯入法测强曲线的平均相对误差不应大于18%，相对标准差不应大于20%^[7]。回弹法测强曲线的平均相对误差不应大于18%，相对标准差不应大于20%^[3]。

平均相对误差和相对标准差应按下列公式计算：

平均相对误差公式：

$$m_r = \pm \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{cu,i}^0}{f_{cu,i}^c} - 1 \right| \times 100\%$$

相对标准差公式：

$$e_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{cu,i}^0}{f_{cu,i}^c} - 1 \right)^2}{n-1}} \times 100\%$$

计算得到该测强曲线的平均相对误差 $m_r=3.7\%$ ，相对标准差 $e_r=4.5\%$ 。这条曲线拟合可用，模型出来的三个参数

值代入原模型：

$$f = am_d^b R_m^c$$

论文建立的砂浆贯入回弹综合法模型为：

$$f = 160.7932 \times m_d^{-1.5313} \times R_m^{-0.1957}$$

5 结语

中国还没建立贯入回弹综合法的相关规程及测强曲线，但应用两种检测方法由表至内多侧面综合反应砂浆抗压强度，正因为是多侧面反应砂浆强度指标，故有较好的相关性。论文提出的计算模型对具有检测条件的砂浆构件均可参考采用，不过论文的分析结论只是针对上海地区一栋十四层砖混楼房砌缝砂浆强度 M7.5 的干粉砌筑砂浆，砌块为蒸压混凝土加气砌块的实测数据得到，按单个构件进行检测且样本量较少，标号单一。对于不同强度、不同砌体条件的砂浆检验批测强情况，需要进行有关强度方面的修正。同时还需要扩大检测样本数量。

由于各种无损检测方法大多是间接推定强度，不确定的影响因素甚多，所以检测具体对象时，应结合现场实际情况，或者采用两种或两种以上的方法来检测，充分考虑所选择检测方法的精度，才有可能保证检测数据的可信度。除论文所述无损检测方法外，还有推出法、筒压法、砂浆片剪切法、点荷法、砂浆片局压法、择压法、钻芯法等^[8]。随着中国工程建设质量管理的加强，砂浆无损检测技术的作用日益明显，从而也促进了该项技术的迅猛发展。可以说随着无损检测技术的成本降低、有效性提高、可操作性更强，则无损检测技术必将跨入一个崭新的发展阶段。

参考文献

- [1] 董月亮,张海明,谭志催.贯入法与回弹法检测砌筑砂浆抗压强度在实际工程中的对比性研究[C]//第四届全国工程结构安全检测鉴定与加固修复研讨会论文集,2015:4.
- [2] 迟培云,迟衡.回弹法检测预拌砂浆抗压强度的应用研究[J].低温建筑技术,2017,39(8).
- [3] 刘想.混凝土实心砖和非承重混凝土空心砖测强曲线研究[J].四川水泥,2023(10).
- [4] 程伟.谈贯入法检测砌筑砂浆抗压强度[J].山西建筑,2019,45(2).
- [5] DG/TJ 08-2021—2007 商品砌筑砂浆检测技术规程[S].
- [6] JGJ 70—2009 建筑砂浆基本性能试验方法[S].
- [7] JGJ/T 136—2017 贯入法检测砌筑砂浆抗压强度技术规程[S].
- [8] 刘兴远,王彬炜,刘洋,等.砌筑砂浆抗压强度实体检测探讨[J].重庆建筑,2019,18(7):37-40.

Industrial Practice of Technological Transformation of Zinc Secondary Resource Production Process for Electric Zinc Production

Fanshun Zeng Bingzhou Huang Weiping Jiang

Qinghai Huaxin Renewable Resources Co., Ltd., Xining, Qinghai, 811600, China

Abstract

An analysis was conducted on the imperfect leaching process, shortcomings in the leaching and purification processes, insufficient circulation in the electrolysis process, poor cooling ability of the waste liquid circulation, low electrolysis efficiency, low casting yield, and high chlorine content in the floating slag in the zinc secondary resource recovery production process of a certain company. These problems led to low output, poor economic and technical indicators, and high processing costs in the zinc production system; By improving the leaching process in the zinc production system, optimizing the chlorine and iron removal processes, adding purification solution cooling towers and purification slag washing processes, improving the inlet of the electrolytic circulation pump and transforming the waste liquid cooling tower, adding anode plate flatbed machines, improving the process equipment of melting and casting slag, strengthening operational training and other auxiliary measures, stable production operations have been achieved, and the problems of low output, poor technical indicators, and high processing costs in the zinc production system have been solved.

Keywords

Chlorine removal; oxidation and iron removal; waste liquid cooling tower; flat plate machine

锌二次资源生产电锌流程技术改造工业实践

曾繁顺 黄炳宙 蒋卫平

青海华鑫再生资源有限公司, 中国·青海 西宁 811600

摘 要

分析了某公司锌二次资源回收电锌生产工艺中存在的浸出工艺不完善、浸出除杂工序及净化工序存在短板、电解工序存在循环量不足、废液循环降温能力差、电解电效低、熔铸直收率低及浮渣含氯高等工艺、设备问题,导致电锌生产系统存在产量低,经济技术指标差,加工成本高等问题;通过对电锌生产系统中浸出工序进行工艺完善、优化除氯及除铁工艺、增加净化溶液冷却塔和净化渣洗涤工艺、改善电解循环泵进液和改造废液冷却塔、增加阳极板平板机,改良熔铸造渣等工艺设备优化,加强操作培训等辅助措施,稳定生产操作,解决了电锌生产系统产量低、技术指标差和加工成本高的问题。

关键词

除氯;氧化除铁;废液冷却塔;平板机

1 引言

某公司是以再生资源回收利用、技术研发、新材料技术研发为主,集生产、科研、销售于一体的再生资源回收企业,以锌二次资源为原料生产电锌,2017年现公司收购该项目后,重新进行规划,编制可研进行改造,改造后规模为5万吨/年,由于当初改造时设计存在不足,导致2021年投产后,实际产能一直徘徊在2万吨以下,导致生产成本居高不下,亏损严重,严重制约着企业的可持续发展。2022年底,根据公司湿法系统存在的瓶颈问题,系统杂质高,电锌生产

不能提高负荷,直接导致生产成本高的现状,公司提出了电锌湿法生产系统升级改造方案,决定对其进行升级改造^[1]。改造工作从2023年的6月18日开始,至9月15日结束,电锌湿法生产系统升级技改后投入使用,产能及各项经济技术指标取得了显著进步。

2 改造前存在的问题

2.1 改造前生产工艺介绍

某公司电锌生产系统主要原料是以次氧化锌粉为原料焙砂生产的二次焙砂,二次焙砂处理工艺为焙砂通过高位料仓进入中浸反应槽,中浸采用5个反应槽连续生产,中浸矿浆进入中浸浓密机进行澄清固液分离,底流压滤浆化后进入高浸反应槽,高浸采用3个反应槽间断生产,高浸反应压滤液返回中浸使用,高浸压滤渣经皮带输送至火法处理系统处

【作者简介】曾繁顺(1981-),男,中国广西桂林人,工程师,从事铅锌冶炼生产、环保管理研究。

理；中浸溢流和底流压滤液进入到氧化除铁工序，除铁采用 6 个反应槽间断生产，采用双氧水进行氧化除铁，石粉中和，除铁压滤渣压滤后经皮带输送到火法系统处理，除铁滤液进入除氯工序，除氯工序采用 3 个反应槽间断生产，除氯渣经碱洗再生后返回除氯使用，碱洗废水送污水站处理，除氯滤

液输送到净化工段间断生产，经过一段净化除铜镉、二段净化除砷锑、三段净化除钴镍、四段净化除有机物后进入到电解工段产出锌片，电解采用 3.2m² 大极板生产和自动行车出槽，为使用氧化锌为原料的行业内首家企业，锌片送到熔铸工段产出国标 1# 锌锭。工艺流程图如图 1 所示。

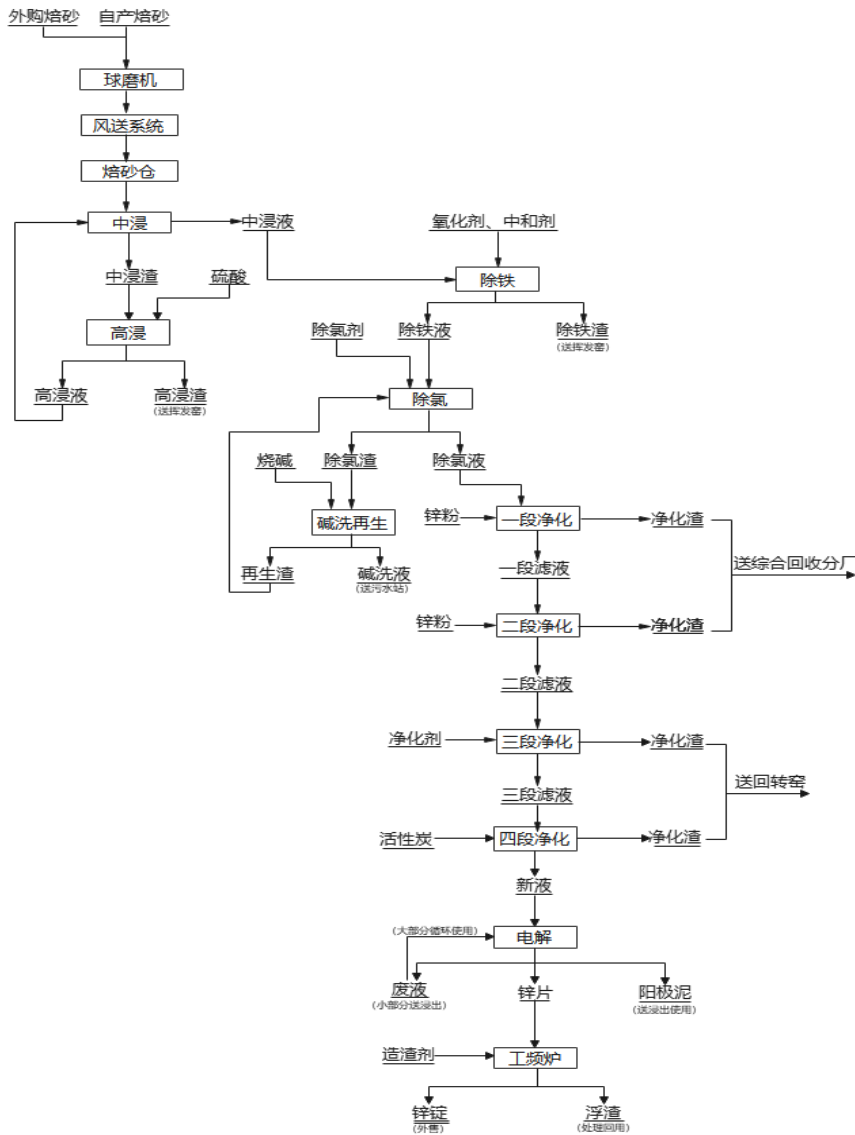


图 1 改造前工艺流程图

2.2 主要存在问题

改造前由于电锌生产存在浸出工艺不完善、净化工艺存在短板、电解电效低等问题，导致产量提不上去，生产加工成本居高不下。

2.2.1 二次焙砂浸出工艺不完善

改造前二次焙砂浸出工艺配置只能满足两段浸出需求，只有中浸和高浸，造成高浸渣渣率和渣含锌偏高，影响焙砂至锌片的锌金属直收率，改造前焙砂浸出指标见表 1。

表 1 改造前焙砂浸出指标

时间	高浸渣率 (%)	高浸渣含锌 (%)	焙砂至锌片回收率 (%)
2023 年 1 月	31.80	15.98	79.56
2023 年 2 月	28.69	16.11	80.14
2023 年 3 月	43.47	15.26	81.21
2023 年 4 月	46.09	16.66	79.43
2023 年 5 月	37.09	16.26	78.58
均值	37.43	16.05	79.78

2.2.2 浸出除杂工艺待优化

浸出工序的除杂工艺主要包括氧化除铁和除氯工序，改造前氧化除铁采用双氧水氧化、石粉中和进行间断生产操作，除铁渣未经洗涤直接进入回回转窑，造成渣率高和渣含锌高，影响焙砂至锌片的锌金属直收率；除氯工序采用硫酸铜除氯工艺间断生产模式，除氯铜碱洗再生工艺因设备配置不足而共用压滤机和酸洗、碱洗反应槽，导致碱洗效果差，片碱消耗大，同时除氯效果差导致系统含氯高，对设备腐蚀和阴阳极板腐蚀严重^[2]。上述两个工艺采用间断生产模式，影响生产处理量，限制了产能的提升，改造前除氯、除铁指标见表 2。

表 2 改造前除氯、除铁指标

时间	除铁渣率 (%)	除铁渣含锌 (%)	除铁石灰单耗 (kg/t)	片碱单耗 (kg/t)	废液含氯 (g/L)
2023 年 1 月	40.70	12.24	150	27	2.5
2023 年 2 月	45.11	12.86	192	42	2.6
2023 年 3 月	40.70	12.44	182	35	2.8
2023 年 4 月	52.84	10.23	228	27	2.4
2023 年 5 月	45.23	11.07	210	20	2.7
均值	44.92	11.77	192	30	2.6

2.2.3 净化工艺不完善

改造前净化生产采用间断式四段净化工艺，生产中存在处理量不足、新液温度高、有机物吸附效果差、锌粉加入易被吸入烟管中、三四段净化渣直接送回回转窑处理导致锌损失大灯问题，一、二段渣因设备配置不足长期堆存在仓库，不仅积压金属，还带来环保隐患，改造前三、四段渣含锌及有机物吸附效率见表 3。

表 3 改造前三、四段渣含锌及有机物吸附效率

时间	三段渣含锌 (%)	四段渣含锌 (%)	三、四段渣渣率 (%)	有机物吸附效率 (%)
2023 年 1 月	30.90	20.38	5.69	35
2023 年 2 月	28.28	16.95	5.84	40
2023 年 3 月	28.05	27.23	5.32	38
2023 年 4 月	28.38	22.32	5.26	36
2023 年 5 月	27.16	15.88	5.74	34
均值	28.55	20.55	5.57	36.6

2.2.4 电解废液循环方式不能满足流量要求

改造前电解循环泵进液端采用虹吸模式进液，由于虹吸模式溶液流动速度慢，导致虹吸桶和虹吸管结晶速度快，堵塞严重，导致电解循环量提不起来，严重影响电解产能提升，改造前的循环泵连接方式如图 2 所示。

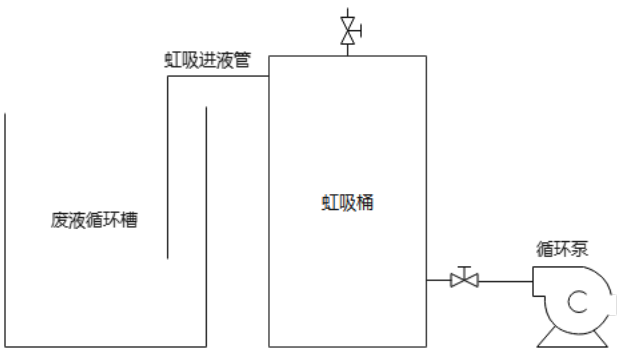


图 2 改造前的循环泵连接方式

2.2.5 电解废液循环冷却塔降温效果差

锌电解过程中槽温控制是确保电解系统平稳运行的重要条件，也是影响锌片质量、产能、成本的重要因素。在锌电解过程中，由于电热效应使电解液温度不断升高，根据锌电解液易腐蚀、结晶的特点，为了保证稳定的电解温度，一般采用具有较好捕滴能力的强制鼓风逆流喷液的空气冷却塔，即空冷塔。

改造前电解配置 4 台 F=50m² 的空气冷却塔，但是风机仅仅配置为 22×10⁴m³/h，风量严重不足，而且由于冷却塔的喷淋系统为老式树枝结构，喷淋喷头规格为 φ50mm，非常容易堵塞，清理周期为 15 天左右，导致电解槽温失控，严重影响电解生产组织，随着电解产能的提升，老式空冷塔的冷却能力已满足不了生产要求，特别是在夏季生产高峰期，随着环境气温的升高及系统负荷的增加，系统槽温控制愈加困难，限制了电解系统产能的提升，改造前电解指标见表 4。

表 4 改造前电解指标

时间	电解动力电单耗 (kWh/t)	电解直流电单耗 (kWh/t)	锌片产量 (t)
2023 年 1 月	253.11	4164.05	2218.09
2023 年 2 月	249.44	4257.26	2105.69
2023 年 3 月	245.23	4099.70	1962.50
2023 年 4 月	296.92	3801.62	2341.05
2023 年 5 月	225.31	3651.59	2242.24
均值	254.00	3994.85	2173.91

2.2.6 锌电解电效低

由于电解工序锌电积采用 3.2m² 大尺寸极板，未配置机械平板设施，人工平板难以满足生产要求，导致形成较多的接触板，致使电解电效降低，改造前电解电效见表 5。

表 5 改造前电解电效

项目	2023 年 1 月	2023 年 2 月	2023 年 3 月	2023 年 4 月	2023 年 5 月	均值
电效 (%)	74	75	74	75	75	74.6

2.2.7 熔铸锌浮渣含氯高

在锌片采用工频炉熔铸锌锭冶炼中，锌液铸成锌锭加入氯化铵进行造渣，氯化铵的作用在于与浮渣中的氧化锌发

生如下反应：



生成氯化锌熔点低（约 318℃），因而破坏了浮渣中的氧化锌薄膜，使浮渣颗粒中的锌露出新鲜表面而聚合成锌液，减少浮渣中带走的锌，从而提高直收率。但是由于浮渣层的温度比锌液层温度低，氯化铵造的浮渣含氯较高，对浮渣的后续返回湿法系统使用带来困难，含氯浮渣只能返回火法系统处理，改造前熔铸指标见表 6。

表 6 改造前熔铸指标

时间	熔铸直收率（%）	氯化铵单耗（kg/t）	浮渣含氯（%）
2023 年 1 月	90.77	1.5	1.54
2023 年 2 月	94.93	1.0	1.58
2023 年 3 月	95.00	1.2	1.48
2023 年 4 月	96.09	1.2	1.43
2023 年 5 月	94.78	1.3	1.36
均值	94.31	1.3	1.48

3 技术升级改造方案

本次技术升级改造主要围绕解决全氧化锌生产电锌中的三大难题展开，重点突破提高锌直收率、除氯效率、氧化除杂效率和除有机物效率等问题，实现产能的提升和生产成本的下降。

3.1 完善浸出工艺配置

焙砂浸出工艺由原来的中浸—高浸，改为中浸—低浸—高浸三段浸出^[1]，增加中浸 2 台 F=200m² 压滤机、φ3×3m 浆化槽 2 个及配套搅拌机、输送泵、电动葫芦 2 台；低浸压滤增加 2 台 F=160m² 压滤机，φ3×3m 浆化槽 2 个及新增 1 套配套搅拌机、输送泵，目的是为了降低高浸渣渣率和渣含锌，提高焙砂中锌的浸出率，改造后的浸出工艺流程为焙砂通过高位料仓进入中浸反应槽，中浸采用 5 个反应槽连续生产，中浸矿浆进入中浸浓密机进行澄清固液分离，底流压滤浆化后进入低浸反应槽，低浸采用 3 个反应槽间断生产，低浸滤液返回中浸使用，低浸渣压滤后经浆化送高浸反应槽，高浸采用 3 个反应槽间断生产，高浸反应压滤液返回低浸使用，高浸压滤渣经皮带输送至火法处理系统处理。

3.2 优化浸出除杂工艺

为提高除氯处理量和生产稳定性，除氯工序由间断改为连续，取消纯碱中和降酸，采用锌浮渣降酸；除氯渣新增水洗、碱洗后浆化系统改造（搅拌槽、搅拌机和泵均为利旧，新增了一台皮带输送机），新增一台 F=160m² 除氯渣碱洗压滤机；优化除氯操作，引入使用铜渣除氯^[3,4]，优化控制条件，提高除氯效率，降低除氯成本。

为提高除铁处理量、生产稳定性和降低除铁成本，除铁由间断改为连续除铁，新增高效氧气喷吹系统（见图 3），除铁工艺由双氧水除铁改为双氧水—液氧除铁^[5]，采用石粉中和，除铁渣新增 2 个 φ4×4m 浆化洗涤槽、2 台 22kW 搅

拌机和配套的泵及管道，新增一台 F=300m² 除铁渣洗涤后压滤机，并利旧 1 台洗涤滤液贮槽和输送泵。

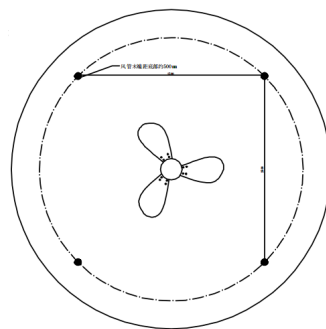


图 3 高效氧气喷吹系统布置图

3.3 优化净化工艺

针对净化间断生产导致产能小的问题，净化生产由原来的间断生产改为连续生产，连续生产模式的优点是生产处理量大，生产稳定；并在连续加入锌粉的第二个槽，把锌粉直接加入反应槽内改为加入溜槽中，解决直接加入反应槽中易被抽风抽到烟管中的问题，提高锌粉的使用效率。

为提高金属直收率，对三、四段渣采取增加洗涤工艺，把三、四段净化渣合并后进行洗涤，把渣中的水溶锌洗涤出来后再送到回转窑处理。

为提高活性炭吸附效率，结合活性炭使用效率最高的温度区间，新建一套 F=50m² 的空气冷却塔，用三段净化后滤液降温，三段净化后液温度由 70℃~75℃降低至 45℃~50℃后进入四段净化，不仅可以提高四段净化活性炭的吸附有机物效率，还可以实现钙镁结晶开路，改善电解液质量，降低槽电压，提高电效。

3.4 改善电解循环进液方式

利用停产技改的机会，改造循环泵进液系统，由原来的虹吸方式改为直连方式，提高泵的运行效率，解决原来虹吸方式进液不足导致循环液不足的问题^[6,7]，并增加 2 台循环泵，每套系统做到 2 开 1 备，确保电解循环液供应的同时保障生产稳定运行，改造后的连接方式如图 4 所示。

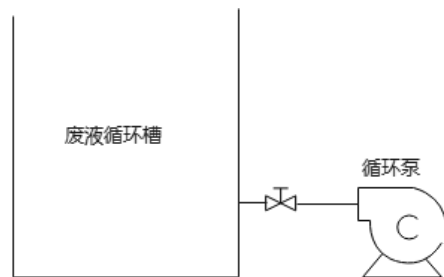


图 4 改造后的循环泵连接方式

3.5 改造电解废液冷却塔

空冷塔的运行效果受气液比、冷却时间（即液体在冷却通道中的停留时间）、冷却时换热面积（即在塔中为液

体的比表面积,即液体分散程度)、气液分布等因素影响较大^[6,7]。

原塔面板高度 13m 符合一般空冷塔面板高度要求,冷却液塔内停留时间满足设计,着重考虑空冷塔的气液比、换热面积(主要影响因素考虑液体分散程度和气液分布)和捕滴除雾三部分进行改造。

3.5.1 气液比

相关计算如下:

电解液循环量: $500\text{m}^3/\text{Hr}$, $p=1250\sim 1300\text{kg}/\text{m}^3$, 比热 $C1=4300\text{J}/\text{kg}$ 。

电解液温差: 由 $t1=43\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 至 $t2=33\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, 温差 $\Delta t1=7^\circ\text{C}$ 左右。

本地气象条件: 大气压 77KPa , 相对湿度 65% , 夏季气温 26°C , 按气体充分换热升温 10°C 考虑(估算), 根据热量守恒: $Q1=Q2$, 即 $C1m1\Delta t1=Q\text{挥发吸热}+Q\text{空气吸热}$, 安全系数 10% 考虑, 经核算风量约 $40\times 10^4\text{m}^3/\text{hr}$ 。一般空冷塔气/液比取 $0.8\sim 1.2:1$, 考虑到现场气候条件、泵效率等综合因素影响, 风机风量选择 $38.5\sim 45\times 10^4\text{m}^3/\text{hr}$ 区间, 风压约 200Pa , 根据风机参数表建议选用 $\phi 3600\text{mm}$, 风压 200Pa , 为适应不同季节和气候条件下空气冷却塔的使用, 通过变频调速保证风机在最佳工况点运行, 同时节省电能。

3.5.2 布液方式

在气液比和冷却时间相同的情况下(即风机相同,塔规格相同,液量相同),影响冷效的关键因素为比表面积和气液分布。原塔布液为老式管道布液,喷头数量多,喷洒液滴大,塔内比表面积小,气液分布不均匀,冷却效果不理想。从空气塔的冷却效果出发,布液上老式布液优化为塔侧喷淋布液,采用两根进液主管+10只低压大流量喷头的塔侧喷淋布液的方式(该喷头进口压力 $\geq 0.05\text{MPa}$),使电解液通过大流量喷头的高效雾化,利用喷淋冲击力使浆液抱团下落,增加液体在塔内的雾化面积,使空气与电解液充分换热,将换热后的空气快速置换,以此提高降温效果。

3.5.3 捕滴除雾

由于提高了雾化效果,喷淋后的液滴捕滴难度加大,将提高喷淋层至捕滴层的间距,合理选择除雾器的类型和调整除雾器间距以及层数,增加气流的流动距离,从而使气流与捕滴器的接触面积增大,以此提高捕滴除雾效率。

改造中将原捕滴层支架改为钢包玻璃钢防腐支撑梁,增加捕滴层支撑玻璃钢格栅,选用双层高效弧形除雾器,单层高度 160mm ,片间距 25mm 。由于该类除雾器捕滴性能优异,可不用捕沫网,克服因捕沫网结晶堵塞造成的风阻增大、结晶堵塞造成换气缓慢冷效下降的缺陷,延长清理周期。考虑到 PVC 材质容易老化,清理时易破损,材质上选用强度和重复性更好的 PP 收水器。冷却塔改造后配置图见图 5。

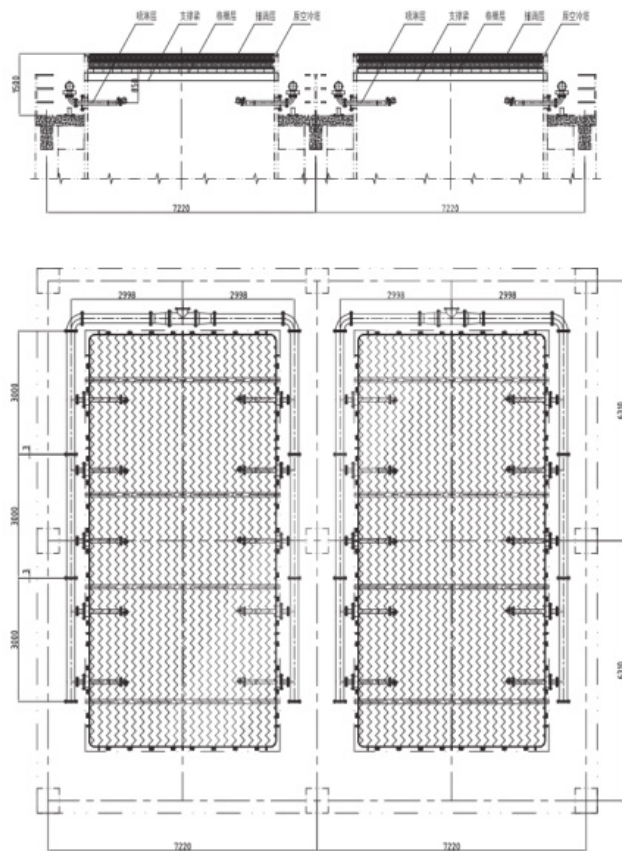


图 5 电解冷却塔改造图

3.6 增加阳极板平板装置

为解决电镀锌工厂人工校正过程中劳动强度大, 劳动力配备大, 工作质量及效率低下等问题, 在多次外出考察的基础上, 在电解工序新增一套锌电解阳极板刮板校正机^[6,7], 对人工刮板校正工序进行自动化处理, 提高阳极板平板效果和效率。

整套设备主要由“上料装置、机械手垂直提升机构、链条拍打机构、阳极板面校正机构”及电气控制系统等组成。整套设备都配备故障报警功能, 哪里出现问题都会会在后台显示出故障点, 方便检查维修。

整条线采用 PLC 主控, 触摸屏监控, 具有高效、可靠、环保方便等优点。系统采用可编程控制器作为主控制器, 采集现场所有光电开关信号, 经过运算输出控制所有电机和气动原件的运行, 并实时监控设备的运行状态, 保护设备的安全运行。整机系统可联机自动运行, 也可单机自动运行, 操作简单, 有自动连锁互锁功能, 故障自动报警停机, 阳极板平板机配置图见图 6。

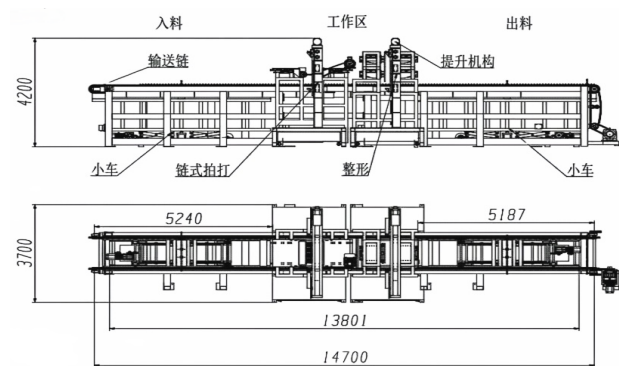


图 6 阳极板平板机配置图

3.7 降低浮渣含氯

在工频炉熔铸过程中从炉门进入炉内的空气燃烧产生废气 CO 以及阴极锌片带入少量的水分, 使炉内的锌液氧化生成氧化锌, 生成的氧化锌以一层薄膜状包住一些锌液滴, 形成小粒状的氧化锌与锌的混合物——浮渣, 浮渣越多, 熔铸时锌的直收率则越低。在阴极锌熔铸成锌锭过程加少量氯化铵搅拌, 扒出浮渣, 生成氯化锌熔点低 (约 318℃), 因而破坏了浮渣中的氧化锌薄膜, 使浮渣颗粒中的锌露出新鲜表面而聚合成锌液, 减少浮渣中带走的锌, 从而提高直收率, 但是浮渣中含氯较高。为进一步提高直收率和降低浮渣含氯, 创新运用某试剂作为熔铸辅助造渣剂对氯化铵造渣进行改良。使用方法为氯化铵和试剂按照一定比例进行破碎混合均匀, 然后投入工频炉中进行造渣生产操作, 主要利用该试剂沸点低 300℃、闪点 216℃等易燃的特点, 在浮渣造渣过程中发生燃烧, 燃烧温度达 500℃以上, 比氯化铵更有利于破坏锌浮渣中氧化锌包裹层, 释放其中的锌液滴, 使锌液滴

滴落汇聚成为锌液, 从降低浮渣带走的锌含量, 同时由于该试剂替代了原氯化铵的部分功能, 可降低氯化铵用量, 从而降低浮渣含氯, 新产出的浮渣通过球磨筛分后直接回用到湿法系统。

3.8 增加直投氧化锌生产, 优化生产组织管理

为拓展原料的采购范围, 增加企业的经济效益, 调整原料结构, 在以二次焙砂原料为主的基础上, 增加直投氧化锌作为生产原料, 直投氧化锌由于可溶锌率高以及含铅高, 浸出后可以直接产出高浸铅泥, 出售给铅冶炼厂, 有利于企业提高产品直收率 and 经济效益。

同时加强内部管理, 在加强员工工艺操作培训的同时, 制定定期管道、贮槽、冷却塔清理制度, 关键工序采用备用设备和管线, 并辅助经济责任制考核等手段, 确保生产组织稳定运行。

4 改造实施过程

2023 年 6 月 18 日至 7 月 15 日完成电锌系统主要硬件改造, 小部分于 9 月 15 日完成改造, 累计投入改造费用 1375 万元, 改造后的工艺流程为: 二次焙砂处理工艺为焙砂通过高位料仓进入中浸反应槽, 中浸采用 5 个反应槽连续生产, 中浸矿浆进入中浸浓密机进行澄清固液分离, 底流压滤浆化后进入低浸反应槽, 低浸采用 3 个反应槽间断生产, 低浸滤液返回中浸使用, 低浸渣压滤后经浆化送高浸反应槽, 高浸采用 3 个反应槽间断生产, 高浸反应压滤液返回低浸使用, 高浸压滤渣经皮带输送至火法处理系统处理; 中浸溢流和底流压滤液进入氧化除铁工序, 除铁采用 6 个反应槽连续生产, 采用双氧水 + 氧气组合进行氧化除铁, 石粉中和, 除铁压滤渣压滤后通过浆化洗涤压滤经皮带输送到火法系统处理, 除铁滤液进入除氯工序, 除氯工序采用 3 个反应槽连续生产, 除氯渣经碱洗再生后返回除氯使用, 除氯渣酸洗、碱洗分开进行, 碱洗废水送污水站处理, 除氯滤液输送到净化工段连续生产; 增加直投氧化锌生产工艺, 外购直投氧化锌采用中浸—低浸—高浸逆浸的工艺, 中浸滤液返回焙砂中浸, 高浸渣为铅泥直接外售; 除氯后液经过一段净化除铜镉、二段净化除砷锑、三段净化除钴镍、除钴镍滤液通过新建冷却塔降温后进入四段净化除有机物后进入电解工段产出锌片, 电解采用 3.2m² 大极板生产和自动行车出槽, 锌片送到熔铸工段产出国标 1# 锌锭, 改造后工艺流程图如图 7 所示。

5 改造效果

自全部改造项目完成投入使用后, 焙砂高浸渣渣率、渣含锌, 除铁渣渣率、渣含锌, 除氯效率、有机物吸附效率得到有效改善, 电锌产量不断提升, 生产成本逐渐下降, 改造取得明显的经济效益, 改造后的技术指标如表 7~ 表 10 所示, 改造前后技术指标对比如表 11~ 表 14 所示。

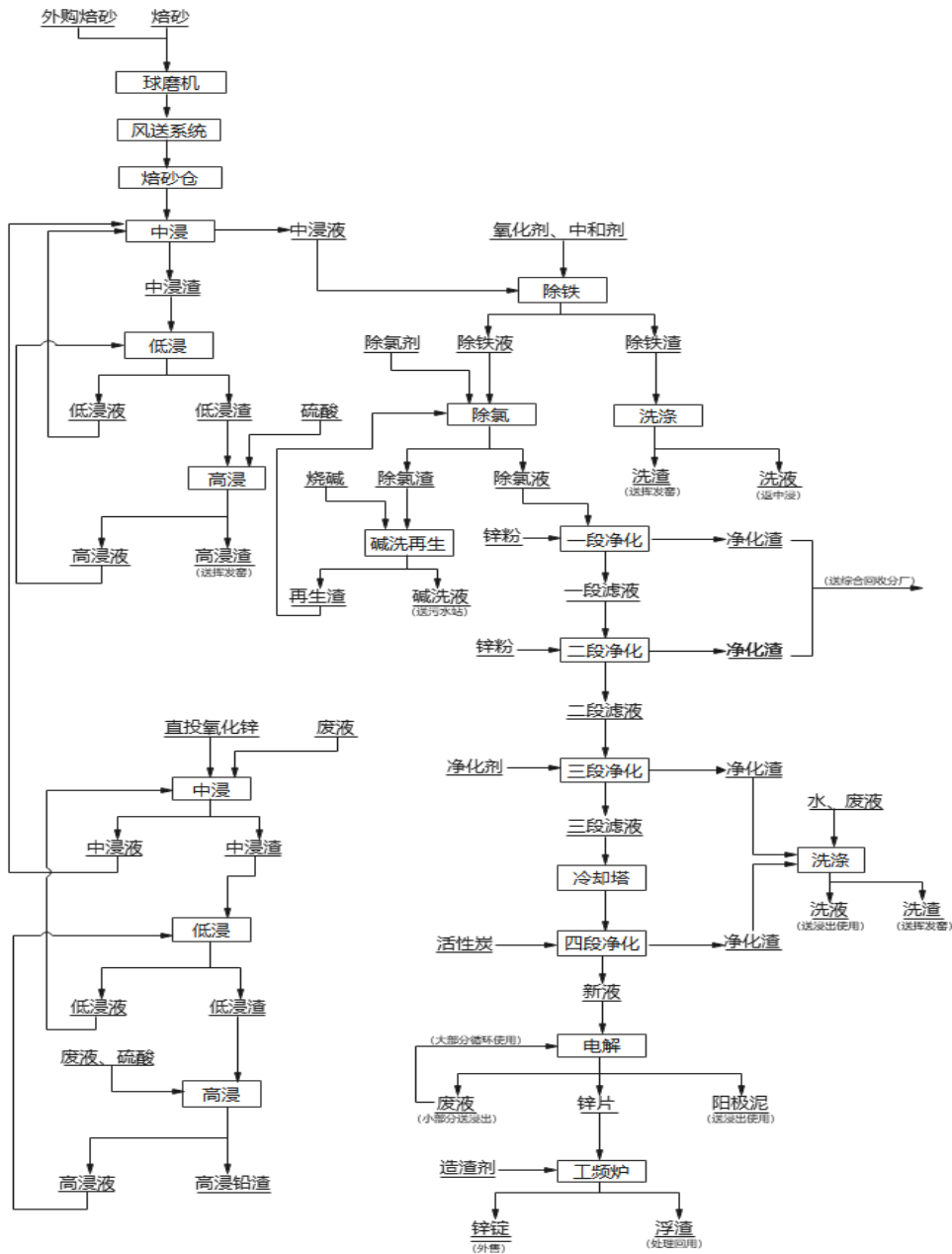


图 7 改造后电锌生产工艺流程图

表 7 改造后浸出工序指标

时间	高浸渣率 (%)	高浸渣含锌 (%)	除铁渣率 (%)	除铁渣含锌 (%)	石粉单耗 (kg/t)	片碱单耗 (kg/t)	焙砂至锌片回收率 (%)
2023 年 10 月	31.24	11.25	15.20	7.05	63	24	87.25
2023 年 11 月	28.51	9.97	22.58	6.97	79	25	88.72
2023 年 12 月	27.28	10.78	23.05	8.00	68	27	86.30
2024 年 1 月	34.31	9.74	27.63	7.82	73	26	90.61
2024 年 2 月	33.72	11.97	30.90	8.84	65	25	88.65
2024 年 3 月	35.34	11.85	33.20	8.32	85	23	87.68
2024 年 4 月	33.39	11.20	31.02	8.15	72	24	89.56
均值	31.97	10.97	26.23	7.88	72	25	88.40

表 8 改造后净化工序指标

时间	三四段渣含锌（%）	三四段渣渣率（%）	有机物吸附效率（%）
2023 年 10 月	9.23	3.05	65
2023 年 11 月	12.86	2.89	68
2023 年 12 月	14.77	3.48	63
2024 年 1 月	15.13	2.60	64
2024 年 2 月	14.41	4.19	69
2024 年 3 月	16.65	5.43	70
2024 年 4 月	13.59	4.46	68
均值	13.80	3.73	66.71

表 9 改造后电解工序指标

时间	电解动力电单耗（kWh/t）	电解直流电单耗（kWh/t）	锌片产量（t）	电解电效（%）	废液含氯（g/L）
2023 年 10 月	168.25	3425.00	2713.32	85	0.85
2023 年 11 月	174.31	3389.00	2720.21	86	0.92
2023 年 12 月	169.54	3395.00	2991.73	86	0.88
2024 年 1 月	172.13	3368.00	3437.63	85	0.94
2024 年 2 月	175.25	3408.00	2214.36	87	0.93
2024 年 3 月	169.35	3420.00	3001.51	86	0.89
2024 年 4 月	170.65	3376.00	3136.40	87	0.92
均值	171.35	3397.29	2887.88	86	0.90

表 10 改造后熔铸工序指标

时间	熔铸直收率（%）	氯化铵单耗（kg/t）	浮渣含氯（%）
2023 年 10 月	97.92	0.7	0.88
2023 年 11 月	97.69	0.6	0.86
2023 年 12 月	97.04	0.4	0.64
2024 年 1 月	97.19	0.6	0.42
2024 年 2 月	97.56	0.4	0.75
2024 年 3 月	97.46	0.5	0.61
2024 年 4 月	97.56	0.6	0.84
均值	97.49	0.5	0.71

表 11 浸出工序改造前后指标对比

项目	高浸渣率（%）	高浸渣含锌（%）	除铁渣率（%）	除铁渣含锌（%）	石粉单耗（kg/t）	片碱单耗（kg/t）	焙砂至锌片回收率（%）
改造前均值	37.43	16.05	44.92	11.77	192	30	79.78
改造后均值	31.97	10.97	26.23	7.88	72	25	88.40
变化幅度	-5.46	-5.08	-18.69	-3.89	-120	-5	8.62
变化比例（%）	14.59	31.65	41.61	33.05	62.50	16.67	10.80

表 12 净化工序改造前后指标对比

时间	三四段渣含锌（%）	三四段渣渣率（%）	有机物吸附效率（%）
改造前均值	24.55	5.57	36.6
改造后均值	13.80	3.73	66.71
变化幅度	-10.75	-1.84	30.11
变化比例（%）	43.79	33.03	82.27

表 13 电解工序改造前后指标对比

时间	电解动力电单耗（kWh/t）	电解直流电单耗（kWh/t）	锌片产量（t）	电解电效（%）	废液含氯（g/L）
改造前均值	254.00	3994.85	2173.91	74.6	2.6
改造后均值	171.35	3397.29	2887.88	86	0.9
变化幅度	-82.65	-597.56	713.97	11.4	-1.7
变化比例（%）	32.54	14.96	32.84	15.28	65.38

表 14 熔铸工序改造前后指标对比

时间	熔铸直收率（%）	氯化铵单耗（kg/t）	浮渣含氯（%）
改造前均值	94.31	1.3	1.48
改造后均值	97.49	0.5	0.71
变化幅度	3.18	-0.8	-0.77
变化比例（%）	3.37	61.54	52.03

6 结语

通过对整个锌二次焙砂生产电锌流程进行优化升级改造，完善浸出工艺，优化除杂及净化工艺、改造电解循环系统和废液冷却系统，改良熔铸造渣工艺，实现生产产量的提升、指标的提升和生产加工成本的下降，给企业增加盈利增添了新的助力。

①通过完善浸出工艺，焙砂高浸渣率由 37.43% 下降到 31.97%，渣含锌由 16.05% 下降到 10.97%，有助于提高焙砂浸出直收率。②通过优化除杂及净化工艺，除铁渣率由 44.92% 下降到 26.23%，除铁渣含锌由 11.77% 下降到 7.88%，浸出除杂系统处理量提升 65%；净化系统处理量提升 80%；净化三、四段净化渣渣率下降 33.03%，渣含锌下降 43.79%；新液有机物含量由 125mg/L 下降到 84mg/L，不仅降低除铁渣和三四段净化渣带走的金属量，还提升了系统的处理量。③通过对电解工段循环泵系统和废液冷却塔的改造，循环量提升 75%，电解动力电单耗下降 32.54%，直流电单耗下降 14.96%，废液循环液降温效果由原来的降温幅度 2℃~3℃提高到 5℃~7℃，实现电解槽温可控，电效由

78% 提升到 85%，锌片产量提升 32.84%。

④通过对熔铸造渣过程的改造，实现浮渣含氯由 1.48% 下降到 0.71%，氯化铵单耗由 1.3kg/t 下降到 0.5kg/t，锌浮渣实现在湿法系统直接回用。

参考文献

[1] 冯继平.8.5万吨/年锌厂工艺改造生产实践[J].云南冶金,2019(4):57-61.

[2] 王文录.湿法炼锌中氯的危害与控制[J].湖南有色金属,2007(2): 22-24.

[3] 郑莉莉.脱氯技术在湿法炼锌流程的研究和应用[J].世界有色金属,2017(8):23-24.

[4] 李春,李白强.氯化亚铜沉淀脱氯反应平衡的研究[J].湿法冶金,2001,20(3):152-155.

[5] 姚应雄,陈先友,朱北平,等.高氟氯次氧化锌烟尘的湿法炼锌生产实践[J].中国有色冶金,2019(4):24-27.

[6] 付运康.锌电积电效率低的原因与对策[J].有色金属,2002(5):21-24.

[7] 周炜.降低锌电积电耗的探讨[J].铜业工程,2013(3):21-25.