

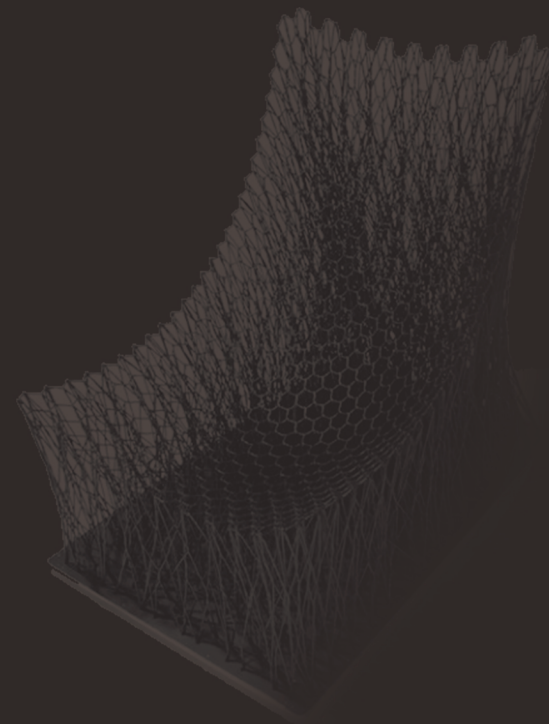


01
2026

材料科学与应用技术

Materials Science and Applied Technology

Volume 5 Issue 1 February 2026 ISSN 3060-883X (Print) 2811-0307 (Online)



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

Volume 5 Issue 1 February 2026 ISSN 3060-883X (Print) 2811-0307 (Online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 65881289

E-mail: contact@nassg.org

Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：材料科学与应用技术

ISSN: 3060-883X (纸质) 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: 3060-883X (Print) 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



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: 3060-883X (Print) 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 5 Issue 1 February 2026
ISSN 3060-883X (Print) 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 基于 Dynaform 的钛合金板材冲压成形过程仿真与回弹预测研究
/ 王威
- 4 现代喂丝球化工艺研究与应用实践
/ 范家建 何德文 冯兴平
- 8 真空回潮机出口物料含水率稳定控制改进
/ 赵春元 张晓峰
- 11 面向 50 μm 以下超薄硅片的磨削与抛光工序协同优化研究
/ 陈跃骅 方勇华 詹玉峰
- 14 多晶硅还原炉内化学反应与流动耦合机制的数值研究
/ 王正云 李万存 高科平 王东
- 17 软包铝塑膜热封聚丙烯层的硬度对摩擦系数稳定性的影响研究
/ 朱婷
- 21 有机硅疏水膜的制备在抗菌方面的应用研究
/ 栾睿泽
- 24 数字化背景下进出口公益检测服务的政策创新研究
/ 董顺芳
- 27 不同基材金属防腐涂层的附着力与耐蚀性对比分析
/ 彭富忠
- 30 铜漆包线加工关键技术与质量控制研究
/ 倪志星 邱东兴 顾芝茵 龙全新
- 33 OLED 器件发光层用精细有机材料纯度提升技术研究
/ 储士红
- 36 自动化玻璃钢膜壳生产线研发及工程化应用
/ 周松林
- 1 Dynaform-based Simulation and Rebound Prediction for Titanium Alloy Sheet Stamping Forming Process
/ Wei Wang
- 4 Research and Application of Modern Spheroidizing Wire Feeding Technology
/ Jiajian Fan Dewen He Xingping Feng
- 8 Improvement of moisture content stability control of vacuum humidifier outlet material
/ Chunyuan Zhao Xiaofeng Zhang
- 11 Research on the Coordinated Optimization of Grinding and Polishing Processes for Ultra-thin Silicon Wafers below 50 μm
/ Yuehua Chen Yonghua Fang Yufeng Zhan
- 14 Numerical Study on Coupling Mechanism of Chemical Reaction and Flow in Polysilicon Reduction Furnace
/ Zhengyun Wang Wancun Li Keping Gao Dong Wang
- 17 Effect of Hardness of Polypropylene Layer on Friction Coefficient Stability of Soft-pack Aluminum-plastic Film
/ Ting Zhu
- 21 Research on the application of silicone hydrophobic membrane preparation in antibacterial aspects
/ Ruize Luan
- 24 Research on Policy Innovation of Import and Export Publicity Testing Services in the Digital Era
/ Shunfang Dong
- 27 Comparative Analysis of Adhesion and Corrosion Resistance of Metal Anti-corrosion Coatings on Different Substrates
/ Fuzhong Peng
- 30 Research on Key Processing Technologies and Quality Control of Copper Enameled Wires
/ Zhixing Ni Dongxing Qiu Zhihan Gu Quanxin Long
- 33 Research on the Technology for Improving the Purity of Fine Organic Materials Used in the Light-Emitting Layer of OLED Devices
/ Shihong Chu
- 36 Development and Engineering Application of Automatic FRP Shell Production Line
/ Songlin Zhou

Dynaform-based Simulation and Rebound Prediction for Titanium Alloy Sheet Stamping Forming Process

Wei Wang

AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710089, China

Abstract

Titanium alloys, renowned for their exceptional specific strength, corrosion resistance, and high-temperature performance, are extensively utilized in advanced manufacturing sectors including aerospace, automotive, and biomedical applications. However, titanium alloy sheets often exhibit significant springback and wrinkling during stamping processes due to their limited plasticity and pronounced elastic recovery, posing substantial challenges for mold design and dimensional accuracy control. This study employs the Dynaform finite element simulation platform to conduct numerical modeling and springback prediction for TC4 titanium alloy sheet stamping. Through constructing a 3D finite element model, we investigate the influence of forming parameters (including blank holder force, friction coefficient, die clearance, and forming speed) on material quality. The deformation mechanisms are analyzed using a combined elastoplastic constitutive model and springback correction algorithm. Results demonstrate that optimizing blank holder force, improving friction conditions, and adjusting die clearance can significantly reduce springback while enhancing part formation accuracy. This research provides theoretical foundations and practical guidance for optimizing titanium alloy stamping dies and achieving high-precision forming processes.

Keywords

Dynaform; Titanium alloy sheet; Stamping forming; Finite element simulation; Rebound prediction

基于 Dynaform 的钛合金板材冲压成形过程仿真与回弹预测研究

王威

中航西安飞机工业集团股份有限公司, 中国·陕西 西安 710089

摘要

钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性与高温性能, 被广泛应用于航空航天、汽车及生物医疗等高端制造领域。然而, 钛合金板材在冲压成形过程中因塑性差、弹性恢复大, 极易产生回弹与起皱等缺陷, 给模具设计与尺寸精度控制带来较大挑战。本文基于有限元仿真平台 Dynaform, 对 TC4 钛合金板材的冲压成形过程进行数值模拟与回弹预测研究。通过建立三维有限元模型, 研究成形工艺参数(如压边力、摩擦系数、模具间隙及成形速度)对成形质量的影响规律, 并采用弹塑性本构模型与回弹修正算法分析其变形机理。研究表明, 适当提高压边力、优化摩擦条件与模具间隙可显著降低回弹量, 提高制件成形精度。本文的研究为钛合金冲压模具优化设计及高精度成形提供了理论依据与工艺参考。

关键词

Dynaform; 钛合金板材; 冲压成形; 有限元仿真; 回弹预测

1 引言

钛合金因其轻质高强和良好的耐腐蚀性, 被视为新一代高性能结构材料。然而, 其高弹性模量与低塑性特性使传统冲压成形工艺面临显著困难。相比钢材与铝合金, 钛合金在塑性变形过程中更易发生回弹与裂纹, 导致成形精度下降与后续装配困难。传统经验法调整工艺参数效率低、周期长, 难以满足现代制造对精度与效率的双重要求。近年

来, 有限元仿真技术在金属成形领域得到广泛应用, 尤其是 Dynaform 平台在钣金冲压模拟方面具备较高精度与可视化优势。其内置的 LS-DYNA 求解器可实现对复杂接触、材料硬化及回弹行为的全过程分析。本文以 TC4 钛合金板材为研究对象, 通过 Dynaform 建立冲压成形仿真模型, 对工艺参数、材料属性及边界条件进行系统分析, 揭示回弹机理并提出优化控制策略。研究目标在于建立仿真预测—参数优化—实验验证一体化的成形精度控制方法, 为钛合金板材高效、高精度冲压提供理论与技术支撑。

【作者简介】王威(2000—), 男, 本科, 助理工程师, 从事钣金成形, 塑性成形研究。

2 钛合金板材冲压成形特性分析

2.1 材料性能与成形难点

TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金属于典型 $\alpha + \beta$ 型双相合金, 兼具高比强度与优良耐腐蚀性, 是航空航天与高端装备制造的关键材料。但其室温塑性差、应变硬化率高及摩擦系数大, 导致在冲压成形中极易出现局部应力集中与变形不均。钛合金的高回弹特性使制件在卸载后尺寸偏差显著, 难以保持设计形状, 模具几何补偿与回弹控制成为成形过程中的核心难题。此外, 其热导率低、加工硬化明显, 使模具磨损加剧, 进一步降低成形稳定性, 对工艺参数匹配与模具设计精度提出更高要求。

2.2 冲压变形机理

钛合金板材在冲压过程中依次经历弹性变形、塑性流动与卸载回弹三个阶段, 其应力-应变曲线具有显著的非线性特征。变形初期的应力积累和屈服后不均匀流动导致内应力分布复杂, 卸载阶段的弹性恢复使制件产生较大回弹。回弹量与材料的弹性模量、屈服强度及残余应力分布密切相关, 而模具间隙与摩擦状态亦对应力传递路径产生重要影响。若摩擦系数过大, 会限制材料流动并引发拉裂; 若过小, 则导致滑移过度和厚度减薄。由此可见, 钛合金冲压变形的本质是多因素耦合下的非线性弹塑性过程。

2.3 有限元仿真在钛合金成形中的应用价值

传统实验法难以捕捉钛合金冲压过程中应力、应变及厚度变化的瞬态规律, 成本高且周期长。有限元仿真为研究其复杂变形提供了高效手段。基于 Dynaform 平台, 可在虚拟环境中模拟不同工艺参数下的应力场、应变场及厚度分布规律, 预测成形极限图 (FLD) 并开展回弹分析, 实现对工艺窗口的精确控制。仿真技术不仅可用于优化模具间隙、压边力和摩擦条件, 还能在成形前预估潜在缺陷, 从而大幅减少试模次数与材料浪费, 为钛合金高精度冲压提供理论与技术支持。

3 仿真模型建立与参数设定

3.1 模型构建与材料参数

基于 Dynaform 平台建立钛合金板材冲压成形的三维有限元仿真模型, 以确保对复杂变形与回弹行为的高精度描述。板材选用 TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金, 厚度为 1.0 mm, 模型采用四节点壳单元以平衡计算精度与效率。材料行为采用各向同性弹塑性本构模型, 参数取弹性模量 $E=110 \text{ GPa}$ 、屈服强度 $\sigma_s=900 \text{ MPa}$ 、泊松比 $\nu=0.34$, 硬化规律遵循幂指数形式 $\sigma = K \varepsilon^n$ 以表征其应变强化效应。为反映钛合金在成形过程中的应力路径依赖性, 模型引入混合硬化项 (各向同性 + 随动硬化), 以提升对反复加载及卸载阶段的描述能力。模具、凹模与压边圈均设定为刚体单元, 以简化求解过程并提高计算稳定性。网格划分方面, 采用区域加密策略, 弯曲半径处最小单元尺寸控制在 0.8 mm, 以便准确捕捉应变梯度

与厚度变化, 为后续回弹预测提供精确基础。

3.2 边界条件与加载方式

模型设置的边界条件严格遵循实际工艺约束, 确保仿真结果与实验的一致性。冲头定义为刚性体, 以恒定下压速度加载, 模拟典型深拉成形过程。板料周边节点施加固定约束以防止滑移和位移畸变。摩擦行为采用库仑摩擦模型描述, 摩擦系数范围设定为 0.08~0.15, 以反映钛合金与模具接触的真实摩擦特性。压边力通过加载模块施加, 控制区间为 20~60 kN, 利用多组仿真对比不同压边力条件下的应力场与回弹响应。为了准确模拟回弹过程, 在成形结束后切换至静力求解阶段, 对卸载过程进行非线性弹塑性分析, 以捕捉弹性恢复行为。计算中引入自适应时间步长控制及接触刚度调整, 以避免卸载阶段出现数值震荡, 从而提高回弹预测的稳定性与可靠性。

3.3 仿真实验与实验对比

为验证 Dynaform 仿真模型的精度与适用性, 本文选取典型 U 形件作为研究对象, 在相同的材料 (TC4 钛合金)、几何参数及工艺条件下开展冲压成形实验。实验采用高精度模具与伺服液冲压压机, 加载路径及速度与仿真设定保持一致。为确保实验数据的准确性, 利用数字图像相关 (DIC) 技术实时测量应变分布, 并通过激光扫描仪获取成形件的三维形貌与厚度分布数据, 对仿真预测结果进行对比分析。结果表明, 仿真计算得到的应力集中区域与实验中观测到的实际变形区域高度吻合, 厚度变化趋势一致, 误差控制在 8% 以内。仿真预测的最大应变位置与实验测得值偏差小于 1 mm, 说明模型对应变路径的捕捉精度较高。同时, 仿真得到的回弹角度与实测值偏差仅为 0.3° , 表明 Dynaform 在描述钛合金板料的弹塑性变形与卸载行为方面具有较高可靠性。综上所述, 该仿真模型在应力场、应变场及回弹预测方面均表现出良好的一致性与稳定性, 为后续工艺参数优化及回弹控制研究提供了坚实的理论与技术基础, 证明了 Dynaform 在钛合金冲压仿真中的工程可行性与应用价值。

4 工艺参数对成形质量与回弹的影响

4.1 压边力的影响

压边力在钛合金板材冲压成形中起到稳定材料流动与防止起皱的关键作用。过低的压边力使板料边缘约束不足, 导致材料在凹模圆角处发生径向回流, 引起起皱或局部褶皱; 过高的压边力又会增加拉应力水平, 使变形区的应力集中加剧, 容易诱发裂纹或局部破裂。仿真结果表明, 压边力对成形稳定性和回弹控制具有显著影响。当压边力控制在约 40 kN 时, U 形件的厚度分布较为均匀, 材料流动平衡, 残余应力梯度较小, 回弹角度明显降低。进一步分析发现, 压边力增加可使中性层位置向板料内侧移动, 减少弹性恢复区间, 进而改善形状精度。因此, 在钛合金冲压中应建立压边力自适应控制机制, 实现局部加载与动态调节, 以兼顾防皱

与防裂的成形要求。

4.2 摩擦系数与模具间隙的影响

摩擦系数与模具间隙直接决定板料的流动行为与应力分布,对成形精度与回弹特性具有协同影响。摩擦系数过大时,材料与模具间的接触阻力增加,导致局部应力集中和流动不均;摩擦系数过小时,材料滑移加剧,厚度减薄明显,增加了开裂风险。仿真与实验结果表明,当摩擦系数控制在0.1左右时,板料的应力传递最为稳定,成形质量最佳。模具间隙的合理设计亦是关键参数,间隙过大会导致材料支撑不足,造成回弹角度增大;间隙过小则增加摩擦热与应变集中,引起裂纹及表面损伤。研究发现,模具间隙取板厚的1.05~1.1倍时,可有效兼顾成形充填性与摩擦稳定性,显著改善厚度均匀性与回弹一致性,为模具优化设计提供参考依据。

4.3 成形速度与温度效应

成形速度和温度条件对钛合金的变形机制和应力释放特征具有显著影响。较高的冲压速度使应变速率上升,材料流动时间缩短,导致应力集中和裂纹风险增大;适度降低成形速度可改善应变分布,使塑性变形更充分,从而减轻回弹。仿真分析表明,在中低速区间,钛合金的变形均匀性显著提升,卸载后的残余应力更易均衡分布。此外,温度是改善钛合金塑性的关键因素,升温可显著降低屈服强度与弹性模量,促进应变协调,减轻弹性恢复效应。实际生产中,采用温成形或热-冷复合成形工艺,在400~600℃范围内可有效改善材料流动性并降低回弹量30%以上。研究结果表明,通过成形速度控制与温度辅助相结合,可实现应力释放的过程调控,从根本上提高钛合金板材成形精度与表面质量。

5 回弹预测与控制机制分析

5.1 回弹预测模型建立

在Dynaform平台中,采用成形-卸载两步法建立回弹预测流程:先以显式求解获得成形阶段的应力-应变与厚度分布,再在回弹模块中切换至隐式或准静态卸载,计算弹塑性恢复量。材料模型方面,以各向同性/混合硬化(结合各向同性与随动硬化)表征钛合金的Bauschinger效应与应力路径变化,配合应变速率敏感项提高对成形历史的记忆能力。为减小由网格畸变与接触刚度引起的数值偏差,采用壳单元减积分并进行网格敏感性分析,确定关键弯曲区加密网格与合理的接触惩罚系数。结果显示,弯曲区的拉压残余应力不均衡是回弹的主导因素;在此基础上引入非线性弹性恢复修正(考虑卸载曲线非线性与路径相关性),可将角度回弹预测误差由~15%降至~7%以内,有效提升精度与稳定性。

5.2 回弹分布规律与敏感性分析

仿真揭示回弹呈空间非均匀分布:件壁中部与转角R处最显著,源于这两类区域的应力梯度与弯曲/反弯组合变

形最为剧烈。通过单因素与多因素正交试验对压边力、摩擦系数、模具间隙、成形速度进行敏感性排序,得到压边力的影响程度最高,其次为摩擦系数与间隙,速度影响相对较弱。在压边力过低时,法向约束不足导致材料回流与起皱倾向增强,卸载后产生较大的角度回弹;压边力提升至临界区间可抑制中性层迁移与厚度不均,从而降低回弹。摩擦系数在0.08—0.12区间内有利于稳定材料流动、减小切向滑移差;间隙取 $t\sim 1.1t$ 可兼顾充填与摩擦热控制。敏感性结果为参数优选与补偿量分配提供了量化依据。

5.3 回弹控制策略

综合采取“参数优化+几何补偿+工艺辅助”的多层控制路径。参数侧,基于敏感性结果确定压边力闭环控制区间与分区加载策略,配合润滑管理使摩擦系数稳定在目标窗口;几何侧,采用迭代补偿法对型面进行反向偏置,在Dynaform中构建“补偿—仿真—评估”内环,直至关键截面回弹误差 $< 1\text{ mm}$ 、角度误差 $< 0.5^\circ$ 。为避免过度补偿导致的二次偏差,引入区域化权重与曲率约束,保证型面连续性。工艺侧,针对钛合金室温塑性受限与回弹大的特性,引入温成形/热-冷复合压边、保压卸载与定压整形(restrike)等手段,必要时叠加弹性垫或局部压料筋以稳定材料流动。进一步地,结合数据驱动的代理模型与贝叶斯优化,实现多参数联动寻优与快速补偿量预测,为高精度、可复制的回弹控制提供工程化方案。

6 结语

本研究基于Dynaform仿真平台,对TC4钛合金板材的冲压成形过程进行了系统分析与回弹预测。结果表明,合理的压边力、摩擦系数及模具间隙参数可有效控制回弹,提高制件成形质量。通过有限元仿真技术,不仅可在设计阶段预测缺陷、优化工艺,还能减少试模次数与生产成本。未来研究应进一步结合温热复合成形与机器学习算法,构建多变量预测模型,实现从经验调参到智能决策的转变。该研究为钛合金复杂构件的高精度成形提供了可行路径,对提升我国高端制造业的数字化设计与工艺优化水平具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 翟林,韩国泰.基于Dynaform与Abaqus铝合金冲压成型及模具结构联合仿真分析[J].机床与液压,2024,52(13):129-134.
- [2] 尤晋,龚红英,刘尚保,等.基于Dynaform及响应面法的6016铝合金散热壳体冲压成形及优化[J].锻压技术,2022,47(03):54-58.
- [3] 刘强,俞国燕,梅端.基于Dynaform与RBF-NSGA-II算法的冲压成形工艺参数多目标优化[J].塑性工程学报,2020,27(03):16-25.
- [4] 喻忠.基于DynaForm冲压件成形性分析[J].汽车实用技术,2018,(21):91-92+100.
- [5] 何斌,邢昌.基于Dynaform的回弹控制及优化设计[J].汽车实用技术,2018,(21):79-81.

Research and Application of Modern Spheroidizing Wire Feeding Technology

Jiajian Fan¹ Dewen He² Xingping Feng³

1. Shandong Xinlingfeng New Material Technology Co., Ltd., Dezhou, Shandong, 253000, China

2. Wulian Yuxing Machinery Manufacturing Co., Ltd., Rizhao, Shandong, 276800, China

3. Yantai Xingchuang Automotive Parts Manufacturing Co., Ltd., Yantai, Shandong, 264000, China

Abstract

To produce the development history and recent years development of the wire feeding spheroidization process. By analyzing the processing principle of core wire and the composition of raw materials, as well as the physical, chemical, and metallurgical theoretical basis of the composition phase of raw materials, study the optimal melting point of the composition phase and the basic theoretical research of spheroidization treatment. Compare the application of modern wire feeding equipment, and explain the principle of wire feeding spheroidization through graphics and text, And through practice, organize practical application data and propose relevant problem solutions.

Keywords

Wire feeding spheroidization; Core material composition phase; Reaction of magnesium in liquid iron at high temperature; Visual diagram of wire feeding spheroidization; Type of wire feeding stations; Status of wire feeding spheroidization; Application data of wire feeding spheroidization

现代喂丝球化工艺研究与应用实践

范家建¹ 何德文² 冯兴平³

1. 山东鑫翎丰新材料科技有限公司, 中国·山东 德州 253000

2. 五莲县玉星机械制造有限公司, 中国·山东 日照 276800

3. 烟台兴创汽车配件制造有限公司, 中国·山东 烟台 264000

摘要

讲述了喂丝球化的发展史和近几年的发展情况, 通过对包芯线加工原理和原材料组成, 以及原材料组成相的物理化学冶金理论基础进行了最佳的组成相的熔点和球化处理基础理论研究, 又对现代化喂丝设备的应用对比, 并通过图文解释了喂丝球化原理, 并通过实践整理了实际应用数据并提出了相关问题对策。

关键词

喂丝球化; 芯料组成相; 镁元素在高温铁液中的行为; 喂丝球化直观图; 喂丝站类型; 喂丝球化状态; 喂丝球化应用数据

1 引言

随着铸造工业自动化智能化的发展以及环境友好型的工业进程, 喂丝球化处理近几年飞速发展, 喂丝法源自日本 20 世纪 70 年代钢铁厂各类钢材硅钙线、铝线的喂丝工艺, 并且迅速得到推广应用。20 世纪 70 年代的末期, 美国、德国相继开发出了用于铸铁喂丝球化处理的高镁包芯线。之后的 10 年的发展中研制了高镁脱硫线、球化线以及孕育线等用于金属液喂丝处理适用各种生产工艺的复合多元素、多功能包芯线, 使喂丝处理技术越来越完善, 应用不断扩大。喂丝球化工艺具有球化质量稳定、利于环境保护等优点, 国内喂丝工艺应用相对较晚, 最早应用时间是 20 世纪 90 年代初期, 随着铸造工业的发展 2016 年以后在国内铸造企业快速发展得到广泛应用。

2 喂丝球化工艺技术原理探析

根据铸造厂铸件壁厚大小和材质要求, 熔炼配置适合的包芯线合金锭, 合金锭进行破碎筛分后合金芯粉料, 再使用优质碳素钢钢带, 通过自动包线机组进行物理轧制、充料、物理包裹制成用于球化处理功能的包芯线。

2.1 包芯线截面图

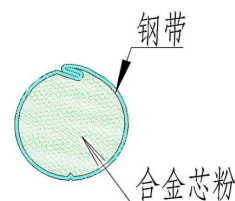


图 1

2.2 稀土硅镁合金芯料的组成相以及物理化学状态

稀土硅镁合金芯料合金锭由硅铁、镁锭、硅钙、硅钡、稀土等合金由中频炉二次熔炼金属型水冷模具浇注成合金锭再进行破碎而成。

对稀土钡硅铁合金^[1]的密度和物相进行了研究和分析得出其组成相 FeSi₂、Mg₂Si、FeSi、RESi、BaSi、Si 及一些未知相，密度 3.74g—4.14g/cm³ 熔点温度范围为 1050—1140℃。

用光学显微镜、扫描电镜和电子探针对球化剂组成相进行了深入细致的研究分析^[2]，其组成相以及成份分别是 FeSi₂、FeSi、Mg₂Si、Si-Mg-Ca、Si-Ca-Ce-La，镁主要是以两相 Mg₂Si 和 Si-Mg-Ca 的金属间化合物形式存在，和稀土分别存在自己的硅化物中。从图 2 的 Mg-Si 二元相图中可知镁和硅形成的稳定化合物 Mg₂Si（硅 36.61% 熔点 1102℃），当硅在 1.34% 和 58% 时分别形成熔点 637.6℃ 的 Mg-Mg₂Si 和熔点 950℃ 的 Mg₂Si-Si。喂丝球化处理应用的稀土硅镁合金芯料中硅在 43%-45% 之间

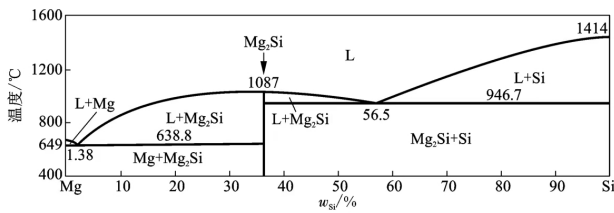
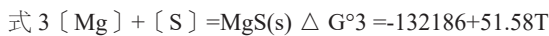
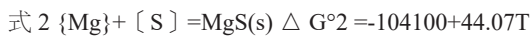
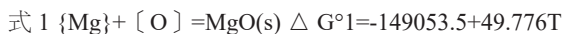


图 2

2.3 喂丝球化镁元素在高温铁液中的行为机理

稀土硅镁合金芯料熔点（镁含量 20-30%）熔点在 1095-1060℃，金属 Mg 的熔点低（651℃），沸点也不高（1107℃）。金属镁在铁水中脱硫的热力学分析中得知^[3]，喂丝加入到铁液中稀土硅镁合金芯料镁元素，由于铁水温度在 1400℃ 以上，高于镁元素沸点，所以镁元素在铁水包熔爆处呈气态形式上浮，并且会有一些镁蒸气溶解于铁液中参与以下化学反应。



由式 1 减式 2 得知镁和氧的亲合力大于镁和硫的亲合力，由于中频炉熔炼的铁液中的氧含量非常低所以式 1 发生后很快完结。

式 2 和式 3 都是脱硫反应所以是同时进行的，金属镁粒在铁水脱硫过程动力学文献^[4]研究表明镁蒸汽泡脱硫能力小于 10%，铁水中脱硫反应主要以式 3 为主，观察喂丝法工艺金相图中石墨球数相对冲入法石墨球数，喂丝法工艺金相图中石墨球数比较多，因此间接的证明了气泡学说支撑石墨形核理论的紧密关系。

2.4 喂丝球化直观图

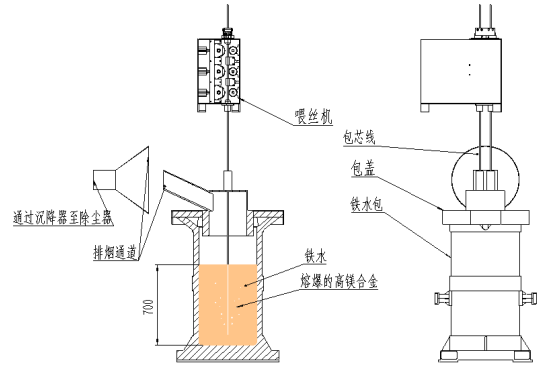


图 3

喂丝球化应用直观图，定量长度包芯线通过喂丝机以一定的速度插入到铁水包底部，包芯线在高温铁液中进行熔爆，镁元素和镁蒸气上浮⁵。

3 现代化喂丝设备简介

3.1 行车吊运式喂丝站（经济型）

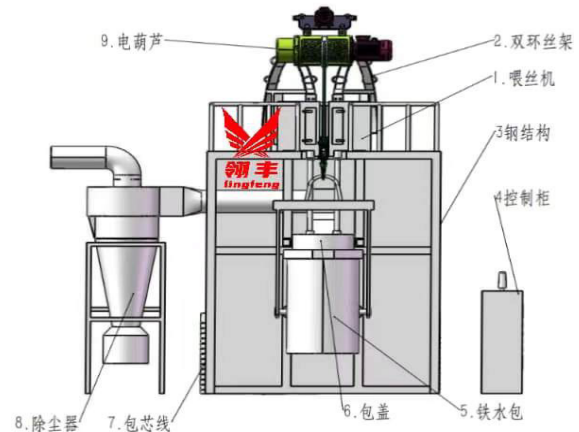


图 4

3.2 台车式喂丝站

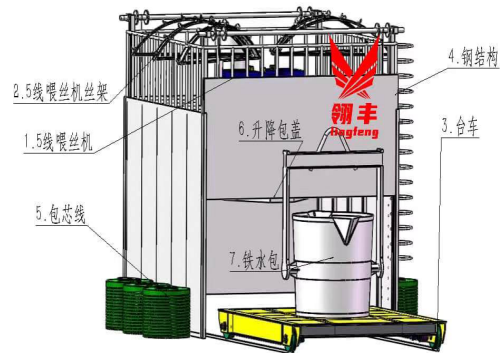


图 5

3.3 全自动智能化喂丝站

全自动智能化喂丝站如图 6 所示。

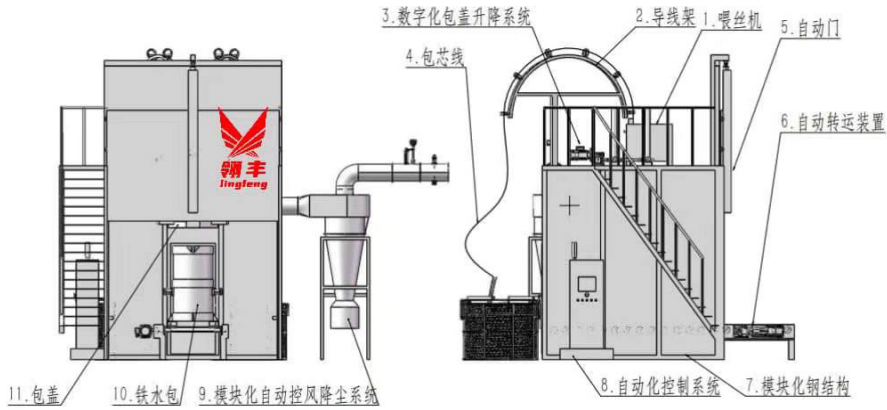


图 6

3.4 全自动智能化喂丝站现场应用图

全自动智能化喂丝站现场应用如图 7 所示。

3.5 几种形式喂丝站的简介

1 行车调运式的喂丝站因其结构简单、投资少效率高、建设周期短、应用最广泛，因为用行车吊运式丝管是 S 型倾斜，所以包芯线会出现径向偏离现象残镁波动大，再就是封闭性不好烟尘外溢。

2 台车进退式或者台车通过式，大多是用于大吨位或者说喂丝站和电炉分别在两个车间的工况，封闭性比较好效率



图 7

适中，因是行车吊运落包在台车上落包位置偏差比较大。

3 全自动喂丝站是结合近几年铁水转运大量应用于铸造厂后迅速发展起来的，重量、温度、化学成分、采集后自动化集成处理，并且可以同 MES 系统通讯。自动化程度高、球化处理效率极高、铁水包卡位准确包芯线径向偏离少、球化处理残留镁稳定、包芯线单位吨耗相对较少。

4 喂丝球化状态和各工艺参数实际应用

4.1 喂丝球化状态图

喂丝球化状态如图 8 所示。

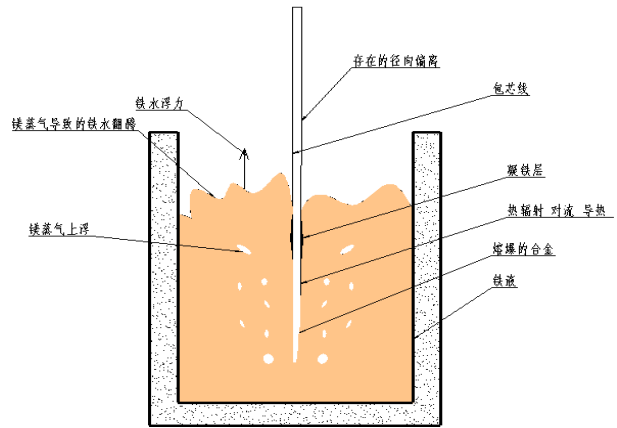


图 8

4.2 喂丝球化工艺的应用实践

某铸造厂静压线造型中小铸件壁厚 35-65mm，采用全自动智能化喂丝站每包处理 1.2-1.3 吨铁水。

应用 30 镁球化线实际应用几组数据下：

| 球化温度 /℃ | 送线长 m/T | 送线速度 m/min | 残留镁 % |
|---------|---------|------------|--------|
| 1480 | 24 | 27 | 0.0739 |
| 1460 | 22 | 26 | 0.0648 |
| 1470 | 19 | 26 | 0.0504 |
| 1480 | 18 | 27 | 0.0448 |

每吨送线 18 米金相抽检 (SEM-200×)

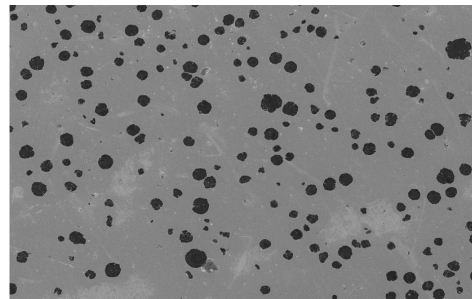


图 9

应用 20 镁球化线实际应用几组数据下：

| 球化温度 /°C | 送线长 m/T | 送线速度 m/min | 残留镁 % |
|----------|---------|------------|--------|
| 1470 | 17 | 25 | 0.0596 |
| 1480 | 15 | 25 | 0.0395 |
| 1470 | 15 | 24 | 0.045 |
| 1460 | 15 | 22 | 0.0432 |

每吨送线 15 米金相抽检 (SEM-200×)

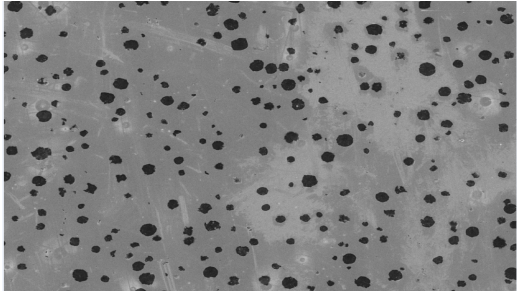


图 10

通过以上 8 组数据对比, 20 镁球化线在同等炉料配比和出炉温度下吸收率远远大于 30 镁。

5 喂丝球化生产中的若干问题与对策

5.1 球化不良

1 包芯线的径向偏离过大造成的铁液球化后均匀度比较差

2 铁水包液位控制不合理, 铁水液面高度的高径不够

3 原铁水成份失控, 或者出炉温度过高, 送线速度不匹配

4 喂丝机实际送线长度出现偏差, 设定的送线速度与实际速度不符

5.2 长时间使用后堵线

丝管长度设计偏下, 尤其是丝管插入包盖中的情况下, 除尘效果差。采用双段式丝管彻底解决堵线问题

5.3 卡线和打滑

包芯线使用时放置在置线框中, 放置包芯线乱线; 喂丝机丝架设计要足够长, 导向轮要 4 套以上包芯线接头要平整, 喂丝机主动输线轮定期更换。

5.4 包盖问题

包盖尽量用 10 个毫米以上钢板焊接, 用浇注料塘平与铁水包接触的平面, 排烟道尽量倾斜避免长时间使用堵塞风道或者改用防喷溅包盖。

5.5 除尘风量和风速问题

喂丝站前端沉降器内部氧化镁结垢状况图, (风速 5-7m/S)



图 11

喂丝球化过程中需要配置足够风量才能把球化过程中氧化镁烟尘通过除尘器沉降下来, 风速建议 M8-12m 每秒比较合理, 太快容易降低镁的吸收率, 太低烟尘排吸不彻底管道堵塞严重; 建议喂丝站前端加沉降器, 风速较低必要时可用水冷式沉降器。

参考文献

- [1] 涂赣峰 张成祥 任存治 等 稀土钨镁硅铁合金密度和熔化温度范围测定及物相分析[J]. 铁合金1995(5): 20-22.
- [2] 杨爱宏 稀土镁球化剂相组成及球化特性的研究 清华大学学位论文1990 30-40
- [3] 刘守平 文光远 张丙怀 铁水用金属镁脱硫的热力学分析 [J]. 钢铁钒钛 1998, 19(01): 16-19
- [4] 郭汉杰 金属镁粒铁水脱硫过程动力学 钢铁2007 (5) 39-42
- [5] Heat Transfer and Melting Characteristics of Calcium - Cored Wire in Molten Steel Q Guo, M Chen Lxu -steel research international, 2024 - Wiley Online Library

Improvement of moisture content stability control of vacuum humidifier outlet material

Chunyuan Zhao Xiaofeng Zhang

Henan China Tobacco Golden Leaf Production and Manufacturing Center, Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

To address the issue of poor moisture content stability in vacuum rehumidification machine output materials, this study first analyzed the influencing factors of moisture content in the vacuum rehumidification process. Based on optimizing the weight of each carton of tobacco blocks entering the vacuum rehumidification equipment and improving the cooling water circulation system, statistical analysis was conducted to examine the relationship between the cumulative amount of humidification steam and water per unit time during vacuum extraction and the moisture content in the rehumidification process. Through a Design of Experiments (DOE) approach, optimal parameters for the vacuum rehumidification machine were determined, providing a basis for controlling moisture content stability. The results achieved a reduction of over 20% in the annual average standard deviation of moisture content in vacuum rehumidified materials, with the annual mean deviation of moisture content in winter/summer output materials $\leq 0.8\%$.

Keywords

Vacuum rehumidification; Batch variation; Moisture content of export materials

真空回潮机出口物料含水率稳定控制改进

赵春元 张晓峰

河南中烟黄金叶生产制造中心, 中国·河南 郑州 450000

摘要

针对真空回潮机出口物料含水率稳定性差的问题, 通过对真空回潮工序物料含水率影响因素分析, 在优化控制进入真空回潮设备每箱烟块重量、改进冷却水循环系统的基础上, 统计分析抽真空时间长短单位时间内增湿蒸汽和水累积量大小与真空回潮工序含水率的关系, 采用DOE实验设计最优真空回潮机参数, 为真空回潮物料含水率稳定性控制提供了依据。最终实现了真空回潮及出口物料含水率标准偏差年度平均值下降20%以上, 年度冬/夏季真空回潮机出口物料含水率均值极差 $\leq 0.8\%$ 。

关键词

真空回潮; 批次差异; 出口物料含水率

1 引言

真空回潮作为制丝线增温增湿的第一个工序, 其工艺任务是对长期贮存的烟叶进行回潮处理, 适当提高烟片的含水率和温度, 使烟片柔软, 增加韧性, 使烟叶舒展易于松散, 提高烟片的耐加工性, 减少后续工序中的造碎; 减轻烟叶中的杂味以改善卷烟感官质量, 杀灭烟叶中的虫卵; 去除青杂气, 其吸味能得到明显改善, 为下道工序提供合适的原料。

2 存在问题

在实际生产中, 由于真空回潮设备无水分自动调节及控制功能, 回潮后水分在不同批次或不同季节的差异明显。冬季真空回潮后物料含水率可以达到 15.0% 以上, 而夏季

回潮后物料含水率只有 13.7%, 批次间极差达到 1.3% 以上。真空回潮后水分稳定性差不仅影响卷烟感官质量稳定性, 而且导致下游松散回潮工序出口物料含水率控制难度增加^[1]。问题主要表现为:

2.1 同一牌号不同批次间物料含水率波动

统计某牌号 2024 年度真空回潮出口物料含水率均值变化, 如图 1 所示, 批次之间均值相差较大。

2.2 批次内不同箱体间物料含水率差异

真空回潮机有两个箱体交替工作, 通过统计某批次生产过程中 A、B 两个相同出口物料含水率情况, 如图 2 所示。可以看出 A 箱体和 B 箱体出口物料含水率之间存在明显的差异。

由于真空回潮工序物料含水率波动, 尤其是季节性的含水率变化, 一是影响卷烟感官质量稳定性; 二是导致下游松散回潮工序出口物料含水率控制难度增加; 三是夏季真空回潮工序物料含水率偏低, 烟片耐加工性降低, 导致原料消耗增加^[2]。

【作者简介】赵春元(1978—), 男, 中国河南遂平人, 本科, 高级工程师, 从事烟草制丝设备电气控制及技术管理研究。

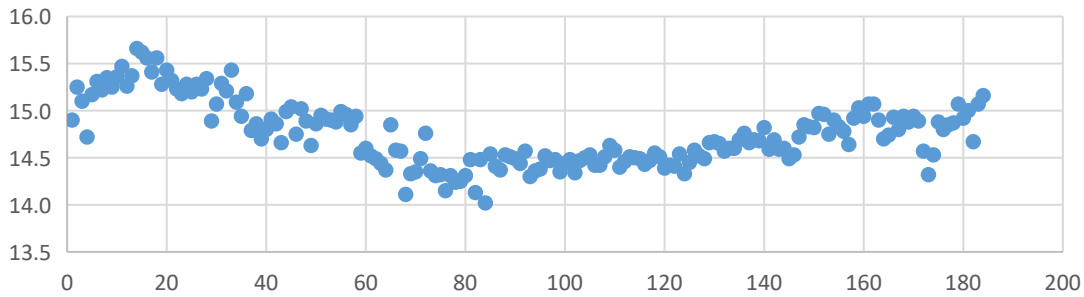


图1 2024年度松散回潮入口物料含水率均值

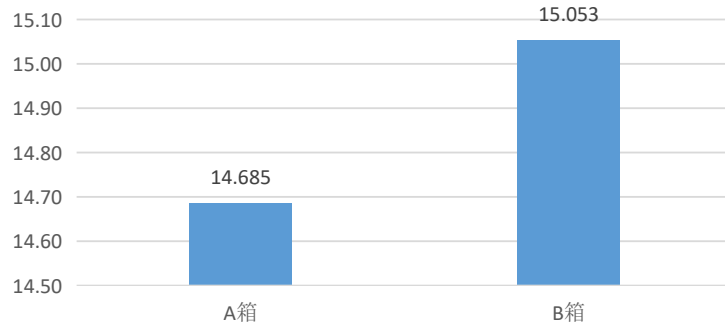


图2 批次内不同箱体间物料含水率对比

3 控制改进

3.1 原理分析

真空回潮机出口物料含水率稳定性与回透率有很大关系,回潮后烟片的水分和温度的均匀性和稳定性能够反映回潮效果的好坏。影响真空回潮机回潮效果的主要因素包括以下三个方面。

3.1.1 烟包体积和密度

在烟包体积和密度因素中,排除烟包原料方面的因素,回潮效果主要与烟包的切片块数和每个周转箱装载烟块重量有关系。目前在用真空回潮系统物料装箱采用自由落体方式,周转箱装入烟块的重量不均匀,会造成回透率不均匀,进而影响真空回潮机出口物料含水率稳定性^[3]。

3.1.2 真空度

回潮效果还取决于抽空时真空回潮箱体内能达到的真空度高低。真空度能够增加烟叶吸收水分的能力。在夏季高温天气时,经常出现真空度无法满足工艺要求的情况。回潮箱的真空度达不到工艺要求,就会影响蒸汽在烟包中的扩散速度和扩散范围,造成外层烟叶和里层烟叶含水率区别较大,甚至影响包芯烟叶不能增湿出现^[4]。

3.1.3 加湿能力

回潮效果还取决于加湿系统能否提供高品质的加湿汽源。当抽真空阶段结束,真空度也满足工艺要求的情况下进入增温增湿阶段,如果出现增湿时间长、增湿蒸汽和增湿水流量大或湿蒸汽含水量过大等现象时,也会影响蒸汽在烟包中的扩散速度和扩散范围,造成外层烟叶和里层烟叶含水率

区别较大,甚至影响包芯烟叶不能增湿出现^[5]。

3.2 优化改进

3.2.1 控制装箱烟块重量

考虑到开箱后每个烟包重量在200kg左右,每箱按照装入300kg切后烟块计算,每箱需要装入一个半烟包,三个烟包切完需要9刀,第一次切完一个半烟包需要5刀,第二次需要4刀,依次循环。修改切片机的PLC控制程序,在切片机切完一个半烟包后暂停2秒,使切后烟块之间有个空隙,方便装箱工装完一个半烟包切后烟块后进行换箱,确保每箱烟块平均值在300kg左右^[6]。

3.2.2 改造冷却水循环系统

(1)在水箱内部增加分隔板,分为热水箱和凉水箱,在水箱底部贯通。冷却塔回水管路改为向凉水箱下水,使冷却塔降温处理后的水流向凉水箱;经过真空回潮冷凝器温度高的冷却水,通过排水泵直接排入热水箱。

(2)增加了一套独立冷却水循环管路,将原有的间歇式冷却水循环模式改为节能型不间断冷却水自循环模式,从热水箱引出一套独立管路接入冷却塔。冷却塔循环水泵管路直接与冷却塔联通进行降温处理,实现对热水箱内冷却水的连续循环冷却,降低冷却水温度,达到减少抽真空时间的效果,冷却水循环系统如图3所示。

真空回潮机工作时,当热水箱水温度大于26℃时,启动循环水泵进行冷却;低于26℃时,循环水泵继续运行10分钟后,循环水泵停止。当真空回潮机停止工作时,如果热水箱冷却水温度大于26℃时,循环水泵继续运行1小时再停止;低于26℃时循环水泵延时10分钟停止。

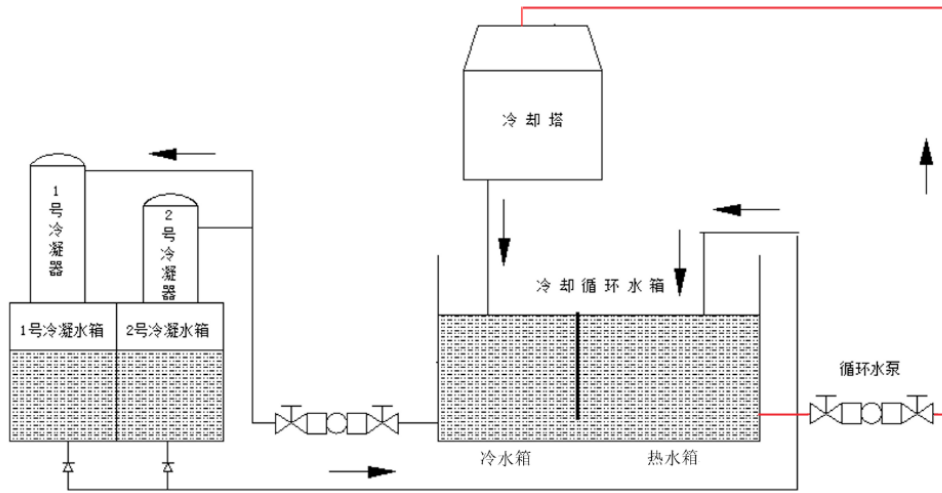


图3 改造后冷却水循环管路示意图

3.2.3 参数优化

真空回潮机回潮阶段是加潮系统向箱体内存加水和水蒸气，真空环境下烟叶迅速吸收水分；保压阶段是给予烟叶一定的时间充分吸收水分，时间的长短会影响烟叶水分大小；回抽阶段是将箱体内多余的水分抽走，由于真空度影响水分沸点，因此回抽停止真空度的高低，决定了抽走水分的多少，同样会影响到烟叶水分的大小。针对真空回潮机回潮、保压和回抽三个阶段控制参数加潮水停止真空度、加潮汽停止真空度、保压时间、回抽停止真空度建立四因子两水平的全因子实验。最终确定加潮水停止真空度为60Kpa；加潮汽停止真空度62.94Kpa；保压时间90Kpa；回抽停止真空度22Kpa。

4 结语

针对真空回潮后水分稳定性差的问题，通过改进装箱控制，优化冷却水循环及设备控制产生等方法，有效提升了真空回潮机出口物料含水率控制稳定性。统计某牌号2025

年度真空回潮机出口物料含水率标偏平均为0.4954，较2024年度的0.6345下降了21.91%。为后工序加工的稳定性奠定了基础，提升整个制丝线的过程控制能力。

参考文献

- [1] 葛茂栋,纪娜.制叶片加工过程中真空回潮工序西格玛水平影响因素分析[J].科技风.2017(10):186
- [2] 郝玉山,李新叶,杨海涛等.烟叶真空回潮的建模与控制[J].中国烟草学报.2019(04):29-35
- [3] 李鹏超.真空回潮机冷却水循环系统的改进.电脑知识与技术[J].2013(9):8128-8129
- [4] 基于机器学习的切丝后含水率预测及控制方法[J].高立秀;陈得丽;万兴森;王星皓;朱知元;李永华;余迪;孔维熙.食品与机械,2021(04)
- [5] 卷烟制丝环节关键工序水分预测模型的建立与检验[J].李自娟;刘博;高杨;陈娇娇.食品与机械,2020(10)
- [6] 基于梯度提升树的烟草回潮机出料含水率预测[J].何毅;李斌;普轶;李曾;周霄天;路瑶;金超.软件,2020(06)

Research on the Coordinated Optimization of Grinding and Polishing Processes for Ultra-thin Silicon Wafers below 50 μm

Yuehua Chen Yonghua Fang Yufeng Zhan

Zhejiang Xusheng Electronics Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

With the development of integrated circuit manufacturing toward higher integration density and lower power consumption, wafer thinning has become a key process for improving device performance and packaging reliability. Ultra-thin silicon wafers with thicknesses below 50 μm are prone to warpage, micro-cracks, and residual stress concentration during grinding and polishing, which places higher demands on process coordination. Focusing on the stability of processing quality and yield improvement of ultra-thin silicon wafers, this study systematically analyzes the intrinsic relationships between the two core processes of grinding and polishing in terms of material removal mechanisms, surface damage evolution, and stress release behavior, and discusses the comprehensive effects of key process parameters on damage layer thickness, surface roughness, and flatness. By establishing a collaborative optimization strategy for the grinding and polishing processes, the constraining role of grinding-induced surface conditions on polishing efficiency and quality consistency is emphasized, providing theoretical foundations and technical support for achieving low-damage and high-stability precision machining of ultra-thin silicon wafers below 50 μm .

Keywords

Ultra-thin silicon wafer; Grinding process; Polishing process; Collaborative optimization; Surface quality

面向 50 μm 以下超薄硅片的磨削与抛光工序协同优化研究

陈跃骅 方勇华 詹玉峰

浙江旭盛电子有限公司, 中国 · 浙江 衢州 324300

摘要

随着集成电路制造向高集成度与低功耗方向发展, 硅片减薄已成为提升器件性能与封装可靠性的关键工艺环节。50 μm 以下超薄硅片在磨削与抛光过程中易产生翘曲、微裂纹及残余应力集中等问题, 对加工工艺的协同性提出了更高要求。围绕超薄硅片加工质量稳定性与良率提升目标, 系统分析磨削与抛光两道核心工序在材料去除机理、表面损伤演化及应力释放方面的内在关联, 探讨关键工艺参数对损伤层厚度、表面粗糙度和平整度的综合影响。通过构建磨抛工序协同优化思路, 强调磨削表面状态对抛光效率与质量一致性的约束作用, 为 50 μm 以下超薄硅片实现低损伤、高稳定性的精密加工提供理论依据与技术支持。

关键词

超薄硅片; 磨削工序; 抛光工序; 协同优化; 表面质量

1 引言

在先进封装与三维集成技术快速发展的背景下, 硅片厚度不断向极限减薄方向演进, 50 μm 以下超薄硅片逐步成为高端集成电路制造的重要基础材料。厚度显著降低后, 硅片整体刚度急剧下降, 对外界载荷与加工扰动的敏感性明显增强, 传统磨削或抛光单独优化的工艺模式已难以满足高质量加工需求。磨削工序虽具备高去除效率, 但易引入亚表面损伤与残余应力, 而抛光工序在改善表面形貌的同时, 其去

除能力受前序磨削状态制约明显。两道工序在材料去除尺度、应力演化及缺陷传递方面呈现出高度耦合特征。基于此, 有必要从整体工艺链角度出发, 系统研究磨削与抛光工序之间的协同关系, 通过参数联动与过程匹配, 实现超薄硅片加工质量、稳定性与制造效率的综合提升。

2 超薄硅片磨削与抛光协同优化的工艺基础

2.1 50 μm 以下超薄硅片的力学特性与加工敏感性

当硅片厚度降低至 50 μm 以下时, 其弯曲刚度呈指数级下降, 抗弯能力与抗冲击能力明显削弱。在加工载荷作用下, 硅片更容易产生整体翘曲和局部应力集中现象, 微小外力波动即可引发裂纹萌生与扩展。硅材料固有的脆性特征使其对

【作者简介】陈跃骅 (1971—), 男, 中国开化人, 工程师, 从事硅材料加工研究。

表面和亚表面缺陷极为敏感,加工过程中形成的微裂纹、残余应力和非均匀变形均可能在后续工序中被放大。磨削和抛光作为典型去除工序,其载荷形式、接触状态及热效应对超薄硅片稳定性影响显著。

2.2 磨削与抛光工序在超薄硅片加工中的功能分工

磨削工序在超薄硅片加工中主要承担材料去除和厚度控制任务,其核心目标是实现高效率减薄并获得可控的表面形貌。通过合理选择砂轮粒度和磨削参数,可以在保证加工效率的同时限制损伤层深度。抛光工序则侧重于消除磨削残留的表面缺陷和亚表面损伤,实现表面粗糙度和应力状态的进一步改善。二者在功能定位上具有明显差异,但在工艺链条中相互制约。磨削质量直接决定抛光负载水平和去除效率,而抛光能力又对磨削允许损伤程度形成反向约束。

2.3 工序协同优化对超薄硅片质量控制的技术意义

针对 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片,加工质量不再由单一道工序决定,而是由磨削与抛光的整体协同效果共同控制。协同优化能够在工序间建立合理的质量传递关系,使磨削阶段形成的表面状态与抛光能力相匹配,避免因损伤叠加导致的缺陷放大。通过对损伤层厚度、残余应力分布及表面形貌的系统控制,可显著降低翘曲变形和隐性裂纹发生概率。工序协同还能够减少抛光阶段的去除量和加工时间,从而降低热效应和二次损伤风险。该技术路径对提升超薄硅片加工良率和稳定性具有重要意义,是实现高一一致性、高可靠性加工的重要基础^[1]。

3 面向 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片的磨削工序关键参数优化

3.1 磨削方式与设备结构对超薄硅片稳定性的影响

磨削方式和设备结构是影响超薄硅片加工稳定性的关键因素。双面磨削或高精度背磨结构能够在一定程度上平衡硅片两侧受力,降低单面载荷引起的弯曲风险。设备结构刚度不足会放大磨削振动,使接触力呈现周期性波动,进而诱发局部应力集中。磨削平台的吸附与支撑方式对 $50\mu\text{m}$ 以下硅片尤为关键,支撑不均易导致加工过程中产生瞬态翘曲。通过提高设备整体刚度和运动平稳性,可有效抑制动态变形,为后续参数优化提供稳定的工艺基础。

3.2 磨削参数组合对损伤层厚度与翘曲变形的作用机制

磨削参数组合直接影响硅片表面损伤形态和变形程度。砂轮粒度、转速、进给速度与磨削压力之间存在复杂耦合关系。较粗粒度和较大进给速度有利于提升材料去除效率,但容易增加裂纹扩展深度和残余应力水平。过高磨削压力会使超薄硅片产生明显弹性变形,卸载后形成永久翘曲。通过降低单位载荷并采用多阶段减薄策略,可将损伤层控制在可抛光去除范围内,同时抑制宏观变形的积累。参数组合的合理匹配是实现低损伤磨削的核心技术手段。

3.3 磨削表面状态对后续抛光工序的适配要求

磨削表面状态决定了抛光工序的去除效率和稳定性。表面粗糙度过高会增加抛光初期的局部接触应力,导致材料去除不均,而损伤层分布不均则可能在抛光过程中形成应力释放不一致现象,引发新的翘曲。对 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片而言,磨削后表面需具备均匀纹理和可控损伤深度,以保证抛光载荷分布平衡。通过优化磨削参数获得稳定表面状态,可显著降低抛光去除量和加工风险,实现磨削与抛光之间的高效衔接^[2]。

4 面向 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片的抛光工序精细化控制

4.1 抛光材料与抛光垫特性对表面质量的影响

在 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片抛光过程中,抛光材料与抛光垫的物理化学特性直接决定表面质量演化规律。抛光液通常以二氧化硅溶胶为主要磨料,其粒径多控制在 $20\sim 80\text{nm}$ 范围内,粒径分布的集中程度对材料去除均匀性具有显著影响。粒径过大会加剧局部微切削效应,引发表面划伤,而粒径过小则导致去除效率显著下降。抛光垫硬度和孔隙结构同样关键,实验表明,当抛光垫邵氏硬度控制在 $60\sim 70$ 之间、孔隙率维持在 $35\%\sim 45\%$ 区间时,可在保证接触稳定性的同时实现较好的流体更新能力。抛光垫表面形貌对载荷分布具有调节作用,合理的微孔结构有助于缓冲瞬时载荷波动,使表面粗糙度 R_a 稳定降低至 0.3nm 以下,为超薄硅片获得高质量镜面提供基础条件。

4.2 抛光工艺参数对表面粗糙度与应力释放的调控作用

抛光压力、抛光盘转速及抛光时间共同构成抛光工艺参数体系,对表面粗糙度和残余应力释放过程产生耦合影响。对于 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片,抛光压力通常需控制在 $3\sim 6\text{kPa}$ 范围内,压力过大会诱发硅片整体弯曲,降低形貌一致性。抛光盘转速一般设定在 $40\sim 80\text{rpm}$ 区间,可在保证材料去除速率的同时抑制剪切应力集中。试验数据显示,在合理参数组合下,抛光后表面粗糙度可由磨削后的 $5\sim 10\text{nm}$ 降低至 $0.2\sim 0.4\text{nm}$,同时亚表面残余应力释放比例可达到 70% 以上。参数调控的本质在于通过温和去除机制实现应力渐进释放,避免因去除速率突变引发新的形变风险。

4.3 抛光过程对磨削残余缺陷的修复能力分析

磨削工序不可避免地会在硅片表层引入微裂纹和损伤层,抛光工序的核心作用在于对该类缺陷进行有效修复。研究表明,当抛光去除量达到损伤层厚度的 $1.2\sim 1.5$ 倍时,绝大多数磨削诱发微裂纹可被完全消除。对于损伤层厚度控制在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的超薄硅片,通过分阶段抛光策略可在保证结构稳定的前提下完成缺陷修复。抛光过程中化学作用与机械作用协同发挥作用,使裂纹尖端钝化并逐步去除缺陷源。经合理抛光后,硅片表面缺陷密度可降低一个数量级以上,为后续工艺提供稳定的结构基础^[3]。

5 面向 50 μm 以下超薄硅片的磨抛协同优化实施路径

5.1 磨削与抛光工序参数联动优化策略

磨抛协同优化的关键在于建立磨削参数与抛光参数之间的联动关系,使两道工序在损伤控制与表面修复方面形成闭环调节。磨削阶段通过控制砂轮粒度、进给速度和载荷水平,将损伤层厚度稳定限制在 3~5 μm 区间,为抛光提供可预测的去除目标。抛光阶段则依据磨削表面状态动态调整压力和转速,使材料去除过程与残余应力释放同步进行。实践表明,在联动优化条件下,抛光去除量可减少约 20%~30%,整体加工周期缩短 15% 以上,同时翘曲变形控制在 10 μm 以内,显著提升工艺稳定性。

5.2 基于质量指标的磨抛协同评价体系构建

为实现磨抛协同优化的工程化应用,有必要构建以质量指标为核心的评价体系。该体系通常以表面粗糙度、损伤层厚度、翘曲量和残余应力水平作为关键指标,通过多指标综合评价反映工艺效果。测试数据显示,当表面粗糙度低于 0.4 nm、翘曲量小于 8 μm 、残余应力释放率超过 70% 时,超薄硅片加工质量处于稳定区间。通过对各指标进行权重分配和趋势分析,可实现磨削与抛光参数的定量反馈调整,为协同优化提供可靠决策依据^[4]。

5.3 协同优化工艺在超薄硅片规模化加工中的应用方向

在规模化加工条件下,磨抛协同优化工艺有助于提升

超薄硅片生产一致性与良率。通过将协同优化参数固化为标准工艺窗口,可降低不同批次间质量波动。生产实践表明,在 50 μm 以下硅片连续加工条件下,引入协同优化工艺后成品合格率可由 92% 提升至 98% 以上。该工艺路径还具备良好的扩展潜力,可适配更薄规格硅片及更大尺寸基片加工需求,为超薄硅片高可靠制造提供稳定技术支撑。

6 结语

针对 50 μm 以下超薄硅片加工过程中易出现的损伤放大与形貌失稳问题,磨削与抛光协同优化工艺展现出明显技术优势。通过对抛光材料、工艺参数及缺陷修复机制的系统控制,可有效消减磨削残余损伤并实现应力平缓释放。在此基础上构建的磨抛协同优化实施路径,有助于提升加工过程的稳定性与一致性。相关研究为超薄硅片精细化加工与规模化应用提供了可靠的工艺思路,对提高产品良率和制造可靠性具有现实意义。

参考文献

- [1] 索开南,张伟才,杨洪星,郑万超.硅溶胶抛光液对硅单晶抛光片表面质量的影响[J].半导体技术,2021,46(10):788-794.
- [2] 王剑.高温退火对直拉硅抛光片表面质量及氧沉淀的影响[D].导师:马向阳;杨德仁;田达晰.浙江大学,2014.
- [3] 杨洪星,陈亚楠.夹具形状对硅抛光片表面质量的影响[J].电子工艺技术,2013,34(02):122-124.
- [4] 武永超,杨洪星,张伟才,宋晶,赵权.硅抛光片表面颗粒度控制[J].电子工业专用设备,2010,39(10):20-22+47.

Numerical Study on Coupling Mechanism of Chemical Reaction and Flow in Polysilicon Reduction Furnace

Zhengyun Wang Wancun Li Keping Gao Dong Wang

Xinjiang Jingnuo New Energy Industry Development Co., Ltd., Huyanghe, Xinjiang, 834034, China

Abstract

The modified Siemens process remains the dominant technology in polycrystalline silicon production. As the core reactor, the reduction furnace exhibits strong coupling effects between the thermal decomposition of silane or trichlorosilane and chemical vapor deposition reactions, fluid dynamics, and heat/mass transfer processes. These interactions directly determine the deposition rate, product purity, and energy consumption. Given the complex multiphysics interactions within the furnace, experimental measurements cannot fully reveal the underlying mechanisms, making numerical simulation an essential tool for studying this coupling. This paper systematically analyzes the coupling characteristics between chemical reactions and fluid flow in polycrystalline silicon reduction furnaces. It reviews fundamental theories and key models for numerical simulation, explores core coupling mechanisms involving flow velocity distribution, temperature fields, and reaction rates, summarizes optimization strategies for simulation methods, validates simulation effectiveness through practical case studies, and ultimately outlines future research directions to provide theoretical support for furnace structure optimization and process parameter control.

Keywords

Polysilicon reduction furnace; Chemical reaction; Flow coupling; Numerical simulation; Mass and heat transfer; Deposition characteristics

多晶硅还原炉内化学反应与流动耦合机制的数值研究

王正云 李万存 高科平 王东

新疆晶诺新能源产业发展有限公司, 中国·新疆 胡杨河 834034

摘要

改良西门子法是多晶硅工业生产的主流技术, 还原炉作为核心反应装置, 其内部硅烷或三氯氢硅的热分解与化学气相沉积反应, 与流体流动、传热传质过程存在强烈耦合效应, 直接决定多晶硅沉积速率、产品纯度及能耗水平。由于还原炉内耦合过程涉及多物理场相互作用, 实验测量难以全面揭示其内在规律, 数值模拟成为研究该耦合机制的有效手段。本文系统分析多晶硅还原炉内化学反应与流动的耦合特性, 梳理数值模拟的基础理论与关键模型, 深入探讨流速分布、温度场与反应速率的核心耦合机制, 总结模拟方法的优化策略, 结合实践案例验证模拟的有效性, 最后展望未来发展方向, 为还原炉结构优化与工艺参数调控提供理论支撑。

关键词

多晶硅还原炉; 化学反应; 流动耦合; 数值模拟; 传质传热; 沉积特性

1 引言

多晶硅还原炉的内部空间中, 原料气体于高温硅芯的表面界面处, 发生热分解与化学气相沉积的双重反应过程, 其反应产物为多晶硅。反应过程与炉内流体的流动行为、传热传质的动态过程之间, 存在着紧密的耦合关联。流速的空间分布形态、温度梯度的变化特征等流动特性参数, 对反应物的传输效率以及反应环境的稳定性构成显著影响。化学反应所释放或吸收的热量, 又会对炉内的流场结构与温度场分布产生反向作用。这种复杂的多场耦合效应, 导致炉内多晶

硅沉积过程中出现不均匀性等技术问题。该问题直接制约着产品质量的提升空间与能耗优化的实现路径。实验研究方法, 受限于高温高压的极端环境条件与现有测量技术的精度瓶颈, 难以全面捕捉炉内全域的耦合细节信息。数值模拟技术, 凭借其具备的全域可视化能力与参数可控性的核心优势, 成为揭示耦合机制本质、优化炉内工况参数的关键技术路径。相关研究工作, 对推动多晶硅产业向高质量发展方向演进, 具有不可忽视的重要现实意义。

2 多晶硅还原炉内化学反应与流动的耦合特性

2.1 耦合过程的核心特征

多晶硅还原炉耦合过程的核心特征在于“流动-传质-反应-传热”的链式关联。原料气体的流动状态, 此一炉内

【作者简介】王正云(1987—), 男, 中国甘肃武威人, 硕士, 高级工程师, 从事多晶硅生产方面研究。

动力学基底参数,决定反应物向硅芯表面的传输速率。流速过低将引致反应物供应匮乏。流速过高则易触发气流对硅芯表面的冲刷作用,动摇沉积稳定性。作为反应物与产物输运纽带的传质过程,其效率被流动场分布直接调控,此调控效应应进一步波及反应速率的空间分布格局。化学反应的热效应可重构炉内温度场。形成局部温度梯度。温度变化会反作用于流动特性。引发由气流密度差异驱动的自然对流。温度梯度亦会直接调制反应速率常数。强化耦合效应。硅芯生长过程中几何形态的变迁,会改造流道结构。改造后的流道结构会扰动流速分布与反应界面的传质条件。构成动态耦合循环。

2.2 耦合过程的关键影响因素

影响还原炉内耦合过程的关键因素,其分类框架严格划分为工艺参数与结构参数两大范畴:进气流量,作为工艺参数的核心变量之一,通过对炉内主流速度场与反应物浓度梯度分布的直接规制,实现对传质效能与反应进展深度的双重扰动;反应温度,不仅构成化学反应得以启动的先决性边界条件,其空间分布的均一性程度更对反应速率的区域异性施加调控,从而进一步形塑多晶硅沉积的空间均一性特征;不同配比的硅烷/三氯氢硅与氢气混合体系,其进气组分比例通过对反应物浓度水平与反应路径的定向定义,借助反应驱动力的动态调整,完成对耦合过程强度与方向的系统性重塑。还原炉的几何尺度与硅芯的空间排布范式,作为结构参数的关键构成,通过对流道形态的根本性界定,实现对气流运动轨迹与速度场分布的深度干预;气体分布器的构型设计,则通过对进气初始流速分布的精准调控,介入反应物在炉内的扩散与混合进程,最终完成对耦合过程初始状态的结构性重置。

3 多晶硅还原炉内核心耦合机制

3.1 流动与传质 – 反应的耦合机制

流动、传质与反应过程的耦合作用机制,其核心构成要素体现为流速分布对反应物的输运及反应进程的调节功能,以及化学反应对流体动力学特性的反向影响。炉内的流场配置,决定了反应物向硅芯表面迁移的扩散速率,在硅芯外围催生了边界层结构,该边界层的厚度伴随流速的提升而呈现缩减趋势,这一现象可强化反应物的传质效能,进而提升表面反应的速率;但流速过高时,边界层内反应物的浓度会出现急剧下降,同时可能诱发气流的湍动程度加剧,导致反应物混合状态的不均匀性,最终对反应的稳定性产生负面影响。^[1]另一方面,化学反应过程会消耗反应物并生成新的产物,这一变化会导致反应界面周边的气体组分与密度发生改变,形成局部的气流压力差,进而触发二次流动现象,这种二次流动会进一步调整炉内的流速分布与传质环境,最终形成“流动-传质-反应”的闭环耦合系统。

3.2 温度场与流动 – 反应的耦合机制

还原炉内最显著的耦合模态体现为温度场与流动-反

应过程的双向互馈耦合。化学反应的热效应构成温度场构建的核心热源输入;硅芯外表面发生的化学沉积反应所释放的热量,会引发该局部区域的温度抬升,进而塑造以硅芯为几何中心的空间温度梯度分布。温度梯度的存在,将导致炉内气体介质的密度产生空间异性;由密度差驱动的浮力效应,会诱发气体的自然对流运动;自然对流与外部施加的强制对流形成动力学叠加,共同重构炉内的流速场分布特征。温度场对反应速率的直接调控作用不可忽视;温度的升高会显著增强反应速率常数的数值,从而加速沉积反应的动力学进程,但局部温度的过度升高会引发副反应的激化,进而对最终产品的纯度指标产生负面影响。流速场的分布特征通过对流换热效率的非线性调制,会反向作用于温度场的空间分布格局;高速气流对对流换热强度的强化效应,会降低特定局部区域的温度水平,进而对反应速率产生抑制性影响。上述所有过程共同构成“温度-流动-反应”的动态耦合平衡系统。^[2]

3.3 硅芯生长与流动 – 反应的动态耦合机制

还原炉内耦合机制的关键构成单元,贯穿多晶硅生产全流程的,是硅芯生长进程与流动-反应体系的动态耦合关联。硅芯直径随沉积反应的持续而渐次扩张,这一扩张引发流道截面积的收缩,收缩继而推升流体流速。流速的提升,会对传质过程形成强化效应,此强化效应将进一步助推沉积速率的上扬。但硅芯生长的空间不均匀性,会导致流道的形态特征产生空间维度的差异性。这种差异性,会让流速的空间分布格局趋向复杂化。复杂化的流速分布,又会加剧沉积过程的不均匀性程度。硅芯生长进程中几何尺度的变迁,会对其自身的导热属性以及辐射换热的表面积产生改变作用。这种改变,会对炉内温度场的分布状态形成扰动。温度场分布的扰动,会对反应速率的空间分布模式施加调控影响。调控影响的结果,是对硅芯的生长速率与生长均匀性产生作用。这种动态耦合关联,会驱动炉内的工况状态随时间维度持续发生变动。变动的存在,增大了多晶硅沉积过程的调控难度系数。

4 耦合机制数值模拟的优化策略

4.1 模型优化与修正

耦合机制模拟精度的提升,其核心策略在于模型的优化与修正——这一修正与优化,必须聚焦于反应动力学模型及辐射模型这两个关键维度。针对硅烷或三氯氢硅构成的不同原料体系,反应动力学参数的修正,需以实验数据为基准,此基准的运用,要求同时纳入温度与组分浓度对反应速率的影响因子,以规避通用模型所引发的系统性误差。辐射模型的优化,需锚定还原炉内高温环境的固有特征,对辐射特性参数进行精细化调整,调整过程中,必须考量硅芯表面发射率随温度及表面状态的动态演变;同时,炉壁与硅芯之间的辐射换热路径,必须获得精确的数学描述,这一描述的精确性,将直接决定温度场模拟精度的最终提升幅度。流动、传

质、反应与传热模型之间的关联强度，需要通过引入相间耦合系数修正项予以增强，这一增强操作的目标，是确保耦合过程描述的绝对准确性。

4.2 网格划分与数值算法优化

网格划分与数值算法的优化操作，在同步提升模拟过程的收敛性、模拟结果的精度这两个维度的同时，可实现计算成本的有效降低。还原炉内流场空间分布特征与反应空间分布特征，构成了网格划分的核心依据，在这一依据下，针对硅芯周边区域、气体分布器等关键区域，非结构化网格的应用可实现网格加密，此加密操作的直接目的，是确保边界层内部的流速梯度与浓度变化能够被准确捕捉。炉内非关键区域的网格，需进行适度简化处理，以达成计算精度与计算效率之间的动态平衡。数值算法的选择策略，包含三个关键维度：第一维度，耦合求解器的采用，其功能是对流动方程、传热方程以及组分传输方程进行同步求解，这一求解方式的优势，在于提升耦合过程模拟的时效性；第二维度，对流项的离散格式选择，高阶离散格式的应用，可有效减少数值扩散现象，进而实现流场与浓度场模拟精度的提升；第三维度，松弛因子与收敛判据的调整操作，此操作的核心作用，是优化计算收敛速度，同时确保模拟结果的稳定性。^[3]

4.3 多尺度耦合模拟方法

还原炉内跨越宏观流场至微观表面反应的多尺度特性，其耦合机制的全面揭示，可通过多尺度耦合模拟方法达成。宏观尺度上，对炉内整体流动、传热传质及宏观反应分布的模拟，能够获取全域工况参数。微观尺度上，聚焦硅芯表面反应动力学过程，模拟表面吸附、分解与沉积的微观机制，可得到表面反应速率与覆盖度等关键参数。通过构建宏观

尺度间的关联模型，将微观反应参数反馈至宏观模拟，实现宏微观耦合模拟。此举既保障模拟的全域性，又提升表面反应过程描述的精准性。为深入理解耦合机制提供更全面的理论支撑。

5 结语

多晶硅还原炉内部化学反应与流体运动之间的耦合机制，作为一个涵盖动量传递、质量输运、化学反应动力学及热能传递的复杂多物理场交互系统，其核心本质在于三重双向耦合的同时存在：流体运动与质量输运 - 化学反应过程的耦合、温度分布与流体运动 - 化学反应的耦合、硅芯生长过程与流体运动 - 化学反应的耦合。揭示这一耦合机制的有效途径，是通过数值模拟技术的应用。通过对数学模型的参数优化、计算网格的自适应调整与求解算法的改进、以及跨尺度耦合模拟方法的实施等策略组合，模拟结果的精度能够得到显著增强。实践层面的应用数据表明，基于数值模拟结果的设备结构优化与工艺操作参数的精准调控，可实现多晶硅沉积均匀性的有效改善。同时提升沉积速率。并降低生产过程中的能源消耗。

参考文献

- [1] 赵程文轩,徐燕燕,侯雨,等. “双碳”目标下多晶硅生产节能优化研究 [J]. 陕西煤炭, 2026, 45 (01): 157-162. DOI:10.20120/j.cnki.issn.1671-749x.2026.0129.
- [2] 王俊华,王阳,赵云浩,等. 电子级芯片用多晶还原工序质量管控要点 [J]. 中国集成电路, 2025, 34 (05): 80-84.
- [3] 石何武,张升学,杨永亮. 多晶硅还原生产系统节能提质探讨 [J]. 绿色矿冶, 2025, 41 (01): 55-59+70. DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.01.009.

Effect of Hardness of Polypropylene Layer on Friction Coefficient Stability of Soft-pack Aluminum-plastic Film

Ting Zhu

Shanghai Enju New Material Technology Co., Ltd., Shanghai, 200120, China

Abstract

Aluminum-plastic films containing different hot-sealed polypropylene layers were prepared through multi-layer co-extrusion and film-coating processes. A fixed proportion of slip agents was added to the hot-sealed polypropylene layer to ensure the prepared aluminum-plastic films possess excellent formability and processability. The hardness of the hot-sealed polypropylene layer was tested using a nanoindentation instrument, while the friction coefficient of the surface of the hot-sealed polypropylene layer was measured with a friction coefficient tester to investigate the impact of hardness on initial friction coefficient. Simultaneously, the prepared aluminum-plastic film rolls were stored in four different temperature test chambers at 5°C, 25°C, 40°C, and 60°C. The friction coefficient of the surface of the hot-sealed polypropylene layer after storage was tested using a friction coefficient tester to examine the effect of hardness on friction coefficient stability. The results indicate that the higher the hardness of the hot-sealed polypropylene layer, the lower the initial friction coefficient, and the better the stability of the friction coefficient.

Keywords

Heat-sealed polyethylene; Slip agent; Friction coefficient; Hardness

软包铝塑膜热封聚丙烯层的硬度对摩擦系数稳定性的影响研究

朱婷

上海恩捷新材料研究有限公司, 中国·上海 200120

摘要

通过多层共挤淋膜工艺制备含有不同热封聚丙烯层的铝塑膜, 热封聚丙烯层中添加固定比例的爽滑剂, 以保证所制备得的铝塑膜具有良好的成型能力与加工性。利用纳米压痕仪测试铝塑膜的热封聚丙烯层的硬度, 利用摩擦系数仪测试铝塑膜热封聚丙烯层表面的摩擦系数, 以考察硬度对初始摩擦系数的影响。同时将所制备得的铝塑膜卷样置于-5°C、25°C、40°C、60°C四个不同温度试验箱中保管, 利用摩擦系数仪测试保管后的铝塑膜热封聚丙烯层表面的摩擦系数, 考察硬度对摩擦系数稳定性的影响。结果表明, 热封聚丙烯层的硬度越高, 初始摩擦系数越低, 摩擦系数的稳定性越好。

关键词

热封聚乙烯; 爽滑剂; 摩擦系数; 硬度

1 引言

铝塑膜是软包锂离子电池的主要外包装材料, 由中间金属层, 通常为铝箔或钢箔的一侧通过胶粘剂复合尼龙膜与聚对苯二甲酸酯类膜, 另一侧与改性聚丙烯层、热封聚丙烯层复合。为了提高铝塑膜的成型深度与电池生产效率, 在铝塑膜的内外层上均设置爽滑剂层, 以起到润滑作用, 降低表面摩擦系数^[1]。铝塑膜内层爽滑剂添加在热封聚丙烯层中, 添加方式通常是将爽滑剂与聚丙烯共混、熔融、挤出、造粒, 再与热封聚丙烯层主体树脂以特定比例共混, 最后与改性聚

丙烯层多层共挤、流延到中间金属层上成膜。

目前, 为了改善聚丙烯薄膜的高摩擦性能的缺陷, 使用较多的爽滑剂为酰胺类爽滑剂^[2-5]。其中, 芥酸酰胺具有较高的熔点, 良好的热稳定性和抗氧化能力强, 分子结构中含有长不饱和碳链和胺基, 能赋予聚丙烯表面优异的极性作用和润滑性能^[6]。因此, 本文以芥酸酰胺添加到铝塑膜热封聚丙烯层中开展研究。芥酸酰胺与热封聚丙烯的相容性有限, 易从内部迁移至薄膜表面, 也易从表面回迁至薄膜内部, 从而导致铝塑膜表面的摩擦系数出现异动^[7-8]。这种迁移行为取决于芥酸酰胺的添加量, 热封聚丙烯的理化性能, 以及外界储存温度、时长等^[9]。本文利用纳米压痕仪测定铝塑膜热封聚丙烯层的理化性能参数——硬度, 并对具有不同硬度的热封聚丙烯层的摩擦系数受温度的影响进行研究, 以作为

【作者简介】朱婷(1990—), 女, 中国江苏靖江人, 硕士, 工程师, 从事材料化学与工程研究。

铝塑膜热封聚丙烯种类选型的参考依据。

2 实验部分

2.1 原料及设备

PP 1# (三元无规共聚聚丙烯, 28MFR=5g/10min)、PP 2# (三元无规共聚聚丙烯, 50MFR=7g/10min)、PP 3# (三元无规共聚聚丙烯, 39MFR=10g/10min)、爽滑剂(含有 12% 重量比的芥酸酰胺的三元无规聚丙烯母粒)、马来酸酐接枝改性聚丙烯 (MFR=5g/10min)、挤出淋膜设备、摩擦系数仪(兰光 MXD-02)、纳米压痕仪(布鲁克)、环境试验箱(ESPEC)。

2.2 材料准备

铝塑膜外层的制备: 铝箔的厚度为 40 微米, 尼龙的厚度为 15 微米, 聚对苯二甲酸乙二酯的厚度为 12 微米。将铝箔的暗面与亮面经过钝化处理, 然后暗面通过涂布聚氨酯的胶粘剂与尼龙以及聚对苯二甲酸乙二酯进行干式复合。

挤出淋膜: 分别将 PP 1#、PP 2#、PP 3# 与爽滑剂按照重量为 99:1 共混, 按照淋膜顺序加入料筒, 另一个料筒中固定加入马来酸酐接枝改性聚丙烯, 通过熔融挤出机的两个挤出模头采用两层共挤, 流延在上述铝塑膜的亮面, 冷却成膜。马来酸酐接枝改性聚丙烯与铝箔直接接触, PP 1#、PP 2#、PP 3# 会分别形成铝塑膜的热封聚丙烯层, 分别制备成

成品铝塑膜 1#、铝塑膜 2#、铝塑膜 3#。

2.3 性能测试

铝塑膜摩擦系数测试: 将样品按模具裁切出上片 (TD=63mm, MD=103mm), 与下片 (TD=100mm, MD=200mm), 样品保持平整, 下片固定, 上片固定在滑块上, 按照拉伸速度为 100mm/min, 测定行程为 100mm, 拖动滑块, 使铝塑膜的热封聚丙烯层与热封聚丙烯层相互摩擦, 读取内层摩擦系数数值, 将铝塑膜的外层 PET 与外层 PET 相互摩擦, 读取外层摩擦系数数值。

纳米压痕硬度测试: 将铝塑膜放置与载台上, 热封聚丙烯层朝上, 采用正三角锥型 Berkovich 压头, 使用连续刚度法 CSM 对表面进行测试, 施加载荷为 10mN, 振动频率 220HZ, 振幅 2nm, 共加载 40s, 以获取最大压入深度与纳米压痕硬度。

3 实验结果

3.1 热封聚丙烯层的纳米压痕硬度测量

首先, 分别对铝塑膜 1#、铝塑膜 2#、铝塑膜 3# 的热封聚丙烯层的纳米压痕硬度进行测定, 其中, 硬度-深度曲线如图 1 所示, 测试结果如表 1 所示。从测试结果得出, 所制备的三种铝塑膜的热封聚丙烯层的硬度大小为: PP 2# > PP 3# > PP 1#。

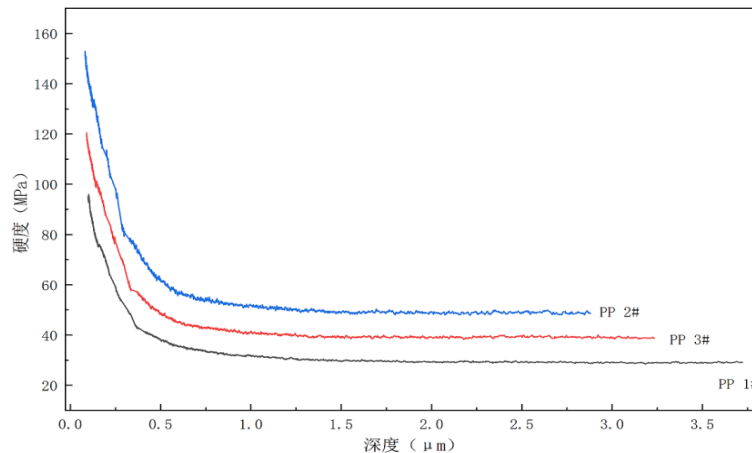


图 1 热封聚丙烯层的硬度 - 深度曲线

表 1 热封聚丙烯层的最大压入深度与硬度测试结果

| 铝塑膜 | 热封聚丙烯 | PP 类型 | MFR (g/10min) | 最大压入深度 μm | 硬度 MPa |
|--------|-------|-------|---------------|----------------------|--------|
| 铝塑膜 1# | PP 1# | 三元系 | 5 | 3.78 | 28 |
| 铝塑膜 2# | PP 2# | 三元系 | 7 | 2.88 | 50 |
| 铝塑膜 3# | PP 3# | 三元系 | 10 | 3.25 | 39 |

3.2 热封聚丙烯层的硬度对初始摩擦系数的影响

图 2 是热封聚丙烯层的硬度对铝塑膜内层的初始摩擦系数的影响。根据纳米压痕仪对热封聚丙烯层硬度的测试结果, 如图 1 与表 1 所示, 已知硬度的大小为: PP 2# > PP 3# > PP 1#, 根据摩擦系数的测定结果, 可以得出, 在添加

爽滑剂的种类与含量相同的情况下, PP 的硬度越高, 其表面的初始摩擦系数越小。一般来说, 作为铝塑膜的热封聚丙烯层, 规定摩擦系数 < 0.3, 即能满足成型与工艺的需求。因此, 铝塑膜内层所选定的 PP 的硬度范围较宽, 硬度 < 50 均可。

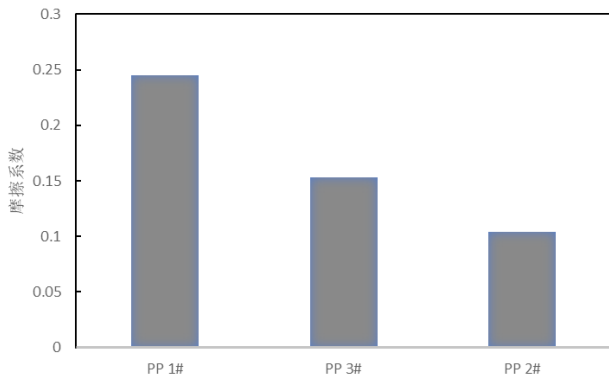


图 2 热封聚丙烯层的硬度对初始摩擦系数的影响

3.3 热封聚丙烯层的硬度对摩擦系数稳定性的影响

本文重点考察热封聚丙烯层的硬度对铝塑膜内层摩擦系数的稳定性的影响。将所制备得到的三种铝塑膜，铝塑膜 1#、铝塑膜 2#、铝塑膜 3# 的卷样分别存放在 -5℃、25℃、40℃、60℃ 四个温度环境箱内，存放时间为 60d（天）。存

放期间，在第 1d、3d、7d、14d、30d，含第 60d，将样品从环境箱中取出进行摩擦系数测定，测定结果分别如图 3、图 4、图 5 所示，图中 0d 的摩擦系数即初始摩擦系数。从图 3 得出，铝塑膜 1# 的热封聚丙烯层的硬度较低，为 28MPa，其内层表面的摩擦系数的稳定性较差。在 25℃ 的环境温度保管 14d 后，摩擦系数 > 0.3。在超过 40℃ 的环境温度保管 60d 后，摩擦系数异常增高至 0.7 以上。该现象于铝塑膜的运输、保管、成型、电池制造等环节非常不利。

从图 4 得出，铝塑膜 3# 的热封聚丙烯层的硬度比铝塑膜 1# 略高，为 39MPa，其内层表面的摩擦系数的稳定性相对于铝塑膜 1# 略高。在 25℃ 的环境温度保管 60d 后，摩擦系数 ≈ 0.3。在超过 40℃ 的环境温度保管 60d 后，摩擦系数在 0.4-0.5 范围内，该数值明显低于铝塑膜 1# 样品。

从图 5 得出，铝塑膜 2# 的热封聚丙烯层的硬度在三种铝塑膜中处于最高水平，达到 50MPa。其内层表面的摩擦系数的稳定性在三种铝塑膜中表现最佳。在 60℃ 的环境温度保管 60d 后，摩擦系数刚达临界值 0.3。

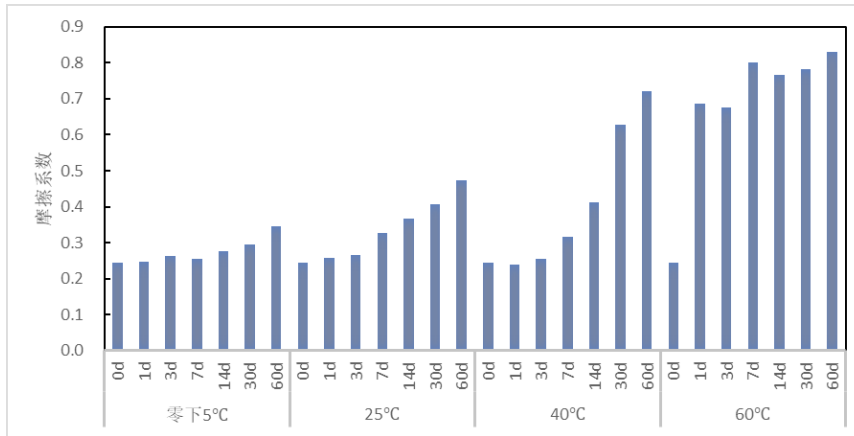


图 3 铝塑膜 1# 热封聚丙烯层的摩擦系数随温度、时间的影响

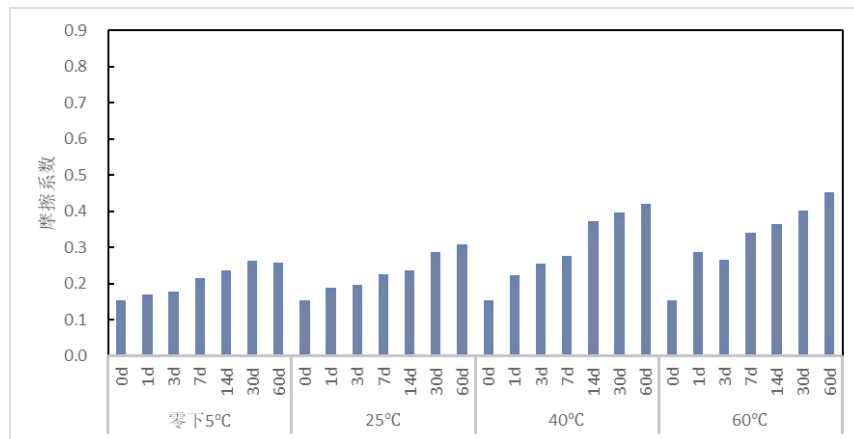


图 4 铝塑膜 3# 热封聚丙烯层的摩擦系数随温度、时间的影响

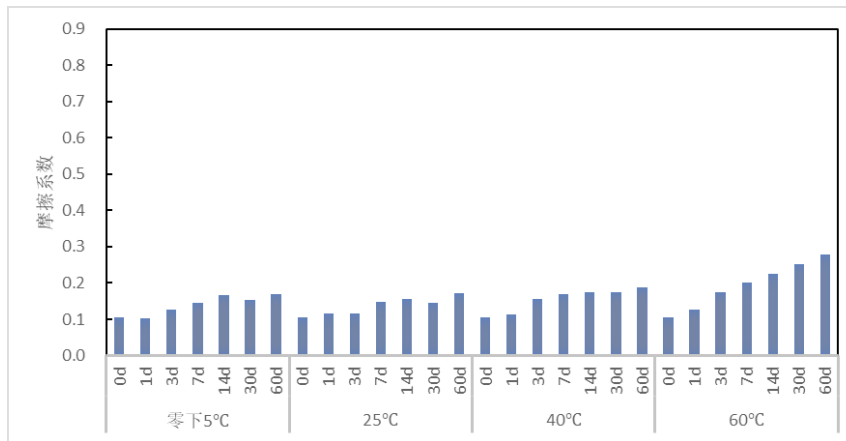


图5 铝塑膜2# 热封聚丙烯层的摩擦系数随温度、时间的影响

4 结语

经研究,铝塑膜内层的热封聚丙烯层的摩擦系数与PP的硬度具有相关性,在保证添加爽滑剂的种类与含量一致的前提下,PP的硬度越高,能获得较低的摩擦系数。同时,当PP的硬度在28-50MPa范围内,均能获得低于0.3水平的摩擦系数。在经过-5°C、25°C、40°C、60°C的环境温度的保管后,对铝塑膜内层的摩擦系数的演变趋势进行测定,得出,当PP的硬度越高,其表面的摩擦系数随环境温度的提高,更容易保持稳定;相反,但给PP的硬度越低,其表面的摩擦系数随环境温度的提高,稳定性较差。

参考文献

- [1] 聂海平, 吴剑, 吴国岚. 爽滑剂和纺粘开口剂在塑料薄膜中的应用[J]. 塑料助剂, 2017 (3): 19-22.
- [2] ZILLES J U. Anti-Block Additives[J]. Food Hydrocolloids, 2014,23(9):1-11.
- [3] 任晓兵. 开口爽滑剂在低密度聚乙烯薄膜中的应用[J]. 当代化工, 2017, 46 (1): 173-176.
- [4] 赵世亮, 高盟新材. 爽滑剂对复合制品表面摩擦因数的影响[J], 广东包装, 2012, 45 (12): 49-51.
- [5] ZILLESJU. Anti-Block Additives[J]. Food Hydrocolloids, 2014,23(9):1-11.
- [6] LUYIMA A, CUI W, HECKMAN C, et al. Examination of copper electro-winning smoothing agents. Part IV: Nucleation and growth of copper on stainless steel[J]. Minerals Metallurgical Processing, 2016,33(1):39-46.
- [7] CHEN J C, LI J S, HU T, et al. Fundamental study of erucamide used as a slip agent [J], Journal of Vacuum Science & Technology A, 2007,25(4):886-892.
- [8] DULAL N, SHANKS R, GENGENBACH T, et al. Slip-additive migration, surface morphology, and performance on injection moulded high-density polyethylene closures[J]. Journal of Colloid and Interface Sciences, 2017, 507:537-545.
- [9] DULAL N, SHANKS R, GENGENBACH T, et al. Migration and performance of erucamide slip additive in high density polyethylene bottle caps[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135 (43): 46822.

Research on the application of silicone hydrophobic membrane preparation in antibacterial aspects

Ruize Luan

Xuzhou Medical University, Xuzhou, Jiangsu, 221004, China

Abstract

In response to the increasing emphasis on public health issues, a highly effective antibacterial silicone hydrophobic composite film containing bactericidal components was prepared using the dip-coating method. Tests were conducted on contact angle, color difference, and antibacterial properties. The results demonstrated that the prepared film exhibited excellent hydrophobicity, with a contact angle of 141° and an antibacterial rate against *Escherichia coli* exceeding 90%.

Keywords

Silicone film; Hydrophobicity; Antibacterial properties

有机硅疏水膜的制备在抗菌方面的应用研究

栾睿泽

徐州医科大学, 中国 · 江苏 徐州 221004

摘要

针对越来越重视公共环境的健康问题, 采用浸涂法制备了抗菌效果良好的含有杀菌组分的有机硅疏水复合膜, 采用接触角、色差和抗菌性测试。结果表明, 制备得到的膜具有良好的疏水性, 接触角为 141° , 对大肠杆菌的抗菌率大于 90%。

关键词

有机硅膜; 疏水性; 抗菌性

1 引言

随着病原微生物体传的播引起疾病新冠疫情结束, 人们越来越关注公共卫生的健康问题, 尤其是公共场所的病原病菌的大范围存在问题。伴随对于新冠病毒的认识逐步深入, 意识到在有毒细菌感染后“治”之前的更为重要的是“防”, 只有懂得“防”才能更有利于个人健康。有毒细菌的生存条件离不开适宜的温度和湿度, 如大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等有毒细菌(以下简称细菌)的最适生长温度均在 37°C 左右, 还需要依赖于存在的潮湿环境, 也就是让物体表面疏远水的是抗菌途径之一^[1]。

近年来在纳米技术快速发展的推动下, 许多无机氧化物纳米粒子作为抗菌组分广泛应用于建筑材料、纺织品和医疗卫生等领域, 特别像目前鳞次栉比的一幢幢大楼都采用的玻璃材料, 污渍或细菌的液滴极易粘附在其表面, 形成污染, 采用价廉的具有纳米级氧化锌、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)与有机硅材料复合制备的复合膜抗菌效果理应更好^[2]。

【作者简介】栾睿泽(2005—), 男, 中国山东烟台人, 在读本科, 从事预防医学材料的基础研究。

2 材料及实验

材料和设备 环氧改性有机硅树脂(RE611)购于湖北隆胜四海新材料股份有限公司; 疏水纳米二氧化硅(SiO_2)粒径为 $5\text{ nm}\sim 50\text{ nm}$, 购自潍坊三佳化工有限公司; 全氟十七氟癸基三甲氧基硅烷(FAS-17)由凯越化学试剂店提供; 高纯超细纳米氧化锌(粒径大小 20 nm)购自中科中研有限公司; 无水乙二醇(AR)购自西陇试剂有限公司; 乙酸乙酯(AR)购自德州森特化工有限公司; 环氧固化剂(B210)购自昆山久力美电子材料有限公司; 人工汗液(CF-001)购自东莞市创峰自动化科技公司; 玻璃片(BK9)大小为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$, 购自深圳西普科电子有限公司。数显磁力搅拌器(HJ-1)购自常州市金坛友联仪器研究所; 超声波清洗机(AK-100), 深圳市钰洁清洗设备有限公司; 接触角测量仪(致佳 ZJ-6900), 深圳市致佳仪器设备有限公司。

膜的制备 纳米疏水 SiO_2 颗粒改性: 取 5 mL FAS-17, 加入 45 mL 无水乙二醇, 超声分散, 充分搅拌, 配制成体积比为 10% 的疏水氟硅烷液, 随后加入疏水纳米 SiO_2 , 制备得到的液体简称为 FS 液。再取 100 g 乙酸乙酯, 搅拌过程中分别加入上述制备的 FS 液 0 、 2 、 4 、 6 和 8 mL , 边搅拌边加入 5 g 环氧改性有机硅树脂、固化剂 1 g 、 0.1 g CTAB

和 0.05g 高纯超细纳米氧化高纯超细纳米氧化锌于直径大小 200mm 的培养皿中,用塑料镊子取干净的玻璃片于上述溶液中,浸泡 1min 后翻面再浸泡 1min 后取出平放在烧杯口上直到膜干为止。

性能测试 疏水性通过接触角大小的变化来判断疏水程度;色差采用高精度色差仪(DS-200)测试;抗菌性能参照国家卫生健康委员会发布的抗菌或抑菌评价方法 WS/T 650-2019 进行测试。

3 实验结果

3.1 润湿性

制备的膜层疏水性通过接触角大小的变化来进行判断,通常接触角大于 90° 被认为膜层的润湿性较差,疏水性较好,各种细菌赖以生存的基础物质水难以留存,这样可以大幅减小细菌的残留,见图 1。

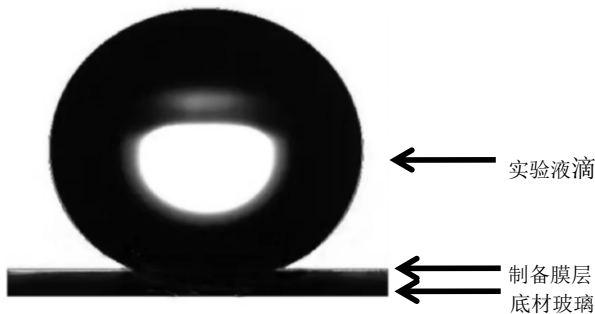


图 1 制备有机硅膜润湿性示意图

实验结果表明随着 FS 加入量的增大,接触角从开始的 90.72° 逐步显著增加到 141.23°,说明膜层变得越来越疏水了,载继续增加疏水成分,接触角的数值变化不大,说明添加 FS 的最佳值就在 4mL 左右^[3]。

表 1 疏水组分 FS 加入量对应的接触角变化关系

| FS 添加量 (mL) | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
|-------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 接触角大小 (°) | 90.72 | 128.19 | 141.23 | 141.53 | 141.72 |

3.2 膜的耐腐蚀性能测试

医院、电梯按钮、自助餐厅、自助值机设备和网吧等这类公共场所往往是细菌残留的主要区域,这些长期暴露或直接接触室外大气或稍显频繁接触的环境,如果浸涂一层抗菌的疏水膜,阻断或杀灭了部分细菌,既不影响美观和使用性能,又能有效地预防的各种有毒细菌的传播,这样对公共健康有益。膜层的颜色的变化在显示中展示得最为直观,有无颜色的变化一眼就可以看出,通过下列公式可以计算出来颜色的变化。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta A^2 + \Delta B^2}$$

其中 ΔE 代表的是色差值, ΔL 代表的是明暗度的变化值, ΔA 代表的是红绿变化值, ΔB 代表的黄蓝变化值,其中 ΔE 大于 3.0 颜色变化肉眼容易识别出来^[4]。

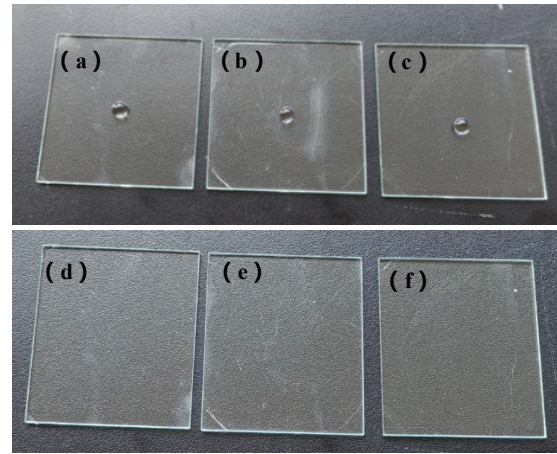


图 2 制备有机硅膜各种测试前后照片

采用玻璃片浸涂制备膜层后滴加测试 5% 的碳酸氢钠(图 2 a)、3% 的硼酸水溶液(图 2 b)、人工汗液(图 2 c)测试膜层的耐腐蚀性能,直到蒸发干燥为止,碳酸氢钠溶液挥发干后膜(图 2 d),硼酸水溶液挥发干后(图 2 e),人工汗液膜(图 2 e),测试后色差值均小于 3.0,显示玻璃片上的膜抗腐蚀性较好,对膜层的外观和膜没有太大的影响。

表 2 各种腐蚀介质对膜的色差测试结果

| 腐蚀介质 | 5% 的碳酸氢钠 | 3% 的硼酸 | 人工汗液 |
|---------------|----------|--------|------|
| 色差 ΔE | 1.53 | 1.17 | 0.86 |

3.3 膜的抗菌性能测试

膜的抗菌率是判断制备的膜抗菌或抑菌性能好坏的标志,基于本人测试抗菌结果基础上,外送专业检测机构确认,结果采用抗菌率来表示。通常抗菌率大于 90% 具有较好的抗菌效果,60-90% 之间具有抑菌效果^[5],本文选用两种细菌进行抗菌效果评价,图 3 为制备用于抗菌检测的有机硅膜的照片,并送往德检科技服务(青岛)有限公司进行检测。

从外送检测结果看,有机硅疏水膜层对大肠杆菌具有较好的抗菌效果(如图 4),其中金黄色葡萄球菌抗菌(图 4 a 为对对照样,图 4 c 抗菌样)和大肠杆菌的抗菌(图 4 b 为对对照样,图 4 d 抗菌样)检测后部分样品照片。具体测试结果显示制备的含有抗菌组分疏水有机硅膜对大肠杆菌抗菌率达到 91.11% 以上和金黄色葡萄球菌抗菌率达到 81.25% 以上,对这两种常见的细菌具有良好的抗菌效果,见表 3。

制备的疏水有机硅膜除了具有疏水功能外,还具有了抗菌效果,原因主要在于如下三个方面。一是有机硅膜的疏水性,这样细菌存活的基本物质条件水难以润湿玻璃表面,因此相当于去除了细菌赖以生长繁殖的基础。二是纳米级锌离子和季铵盐都显示出正电,凭借库仑静电引力牢固吸附于带负电的细菌外膜的脂多糖表面,膜层内低浓度锌离子形成了寡动力效应,参与了如铁离子等金属离子竞争结合,锌离子的渗入胞壁进入内部抑制革兰氏阴性大肠杆菌生长,破坏微生物金属稳态系统;季铵盐也通过静电引力季铵盐对金黄色葡萄球菌的细胞壁磷壁酸及膜磷脂等靶点部位结合,直接

引起革兰氏阳性菌的金黄色葡萄球菌细胞壁塌陷、破裂成碎片，胞内物质大量外泻。这样在锌离子和季铵盐的协同作用展现出良好的抗菌活性。三是有机硅疏水膜呈现出多孔结构，大肠杆菌的长度大小在2微米左右，而金黄色葡萄球菌的大小在1微米左右，大量的水分子因为疏水性被挡在在膜层外

围，极少数通过毛细管效应渗入细菌液中大肠杆菌深入膜层中孔道内几率稍大，在锌离子和季铵盐的共同消杀作用下抗菌效果对大肠杆菌更好^[6]。总之，静电吸附+膜破坏的"物理攻击"的方式起到了去污与杀菌一体化，清洁同时消灭细菌的目的。



图3 制备有机硅膜用于检测大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌效果玻璃片照片

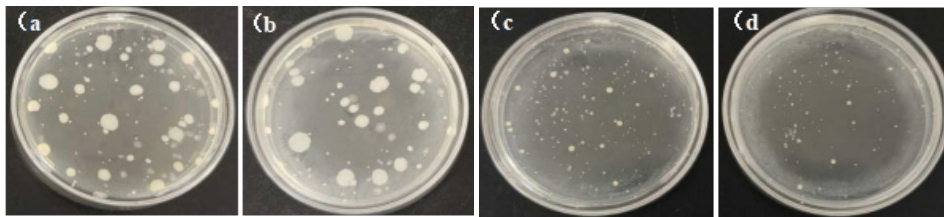


图4 制备有机硅膜的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗菌效果照片

表3 制备的有机硅疏水膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌效果表

| 实验菌株 | 对照片接种活菌数 (CFU/片) | 24h 对照片活菌数 (CFU/片) | 24h 抗菌样品活菌数 (CFU/片) | 抗菌率 |
|---------|-------------------|--------------------|---------------------|-------|
| 大肠杆菌 | 3.7×10^5 | 9.5×10^6 | 7.9×10^5 | 92.02 |
| | 4.0×10^5 | 9.0×10^6 | 8.0×10^5 | 91.11 |
| | 4.4×10^5 | 9.7×10^6 | 8.1×10^5 | 91.65 |
| 金黄色葡萄球菌 | 2.0×10^5 | 1.6×10^6 | 2.9×10^5 | 81.88 |
| | 2.2×10^5 | 1.6×10^6 | 3.0×10^5 | 81.25 |
| | 2.2×10^5 | 1.6×10^6 | 2.8×10^5 | 82.50 |

4 结语

本研究成功通过浸涂法将疏水的纳米二氧化硅与环氧树脂相结合，辅助抗菌剂氧化锌和十六烷基溴化铵联合在玻璃片表面制备具有抗菌超疏水抗菌复合膜，得到了以下结论：

(1) 加入少量的疏水组分 FS 就可以制备获得接触角在 140° 左右的疏水膜，制备的膜层透明，可以抵御普通的腐蚀介质的侵蚀。

(2) 制备的有机硅疏水膜对大肠杆菌的抗菌率高达 90% 以上，对于金黄色葡萄球菌的抑菌率也超过了 80%，表明在抗菌剂锌离子和季铵盐的协同作用下对革兰氏阳性菌、阴性菌均有较好的抗菌效果。

参考文献

[1] 张淑琪, 黄佳, 马鑫, 等. 乌鲁木齐市健康人群携带沙门菌

的耐药情况 及基因组特征分析, 中国预防医学杂志, 2025,26 (5): 584-588.

[2] 厉斌, 韩竞峰, 陶绍渠, 等. 改性纳米二氧化钛/壳聚糖季铵盐疏水抗菌纸的制备及性能研究, 中国造纸学报, 2025,40 (3): 85-93.

[3] 王凯, 王德武, 侯得印, 等. 自组装法制备PVDF-SiO₂/PVSQ超疏水复合膜及膜蒸馏抗污染性能, 化工学报, 2019,70 (1): 298-308.

[4] 郭明, 王秀丽. 镀膜玻璃色差的调控技巧, 国外建材科技, 2008,29 (2): 67-74.

[5] Sui Siyao, Ma Jiajia, Lu Haoqian, et al. Characterizations and preservative effect of anti-fogging films prepared with nano-TiO₂, 农业工程学报, 2019,35 (5): 302-310.

[6] 于慧, 张梦, 宋杰, 等. 膜抗菌性评价方法概述, 膜科学与技术, 2015,35 (4): 123-129.

Research on Policy Innovation of Import and Export Publicity Testing Services in the Digital Era

Shunfang Dong

Hai Kou Customs Comprehensive Technology Service Center, Honghe Prefecture, Yunnan, 661399, China

Abstract

In the context of digital technology deeply empowering international trade, the policies for import and export publicity testing services are facing the demand for coordinated upgrading. This study, based on practical cases, analyzes the core values of policy innovation in strengthening the biological security defense line, optimizing public service governance, and connecting global digital rules, and proposes feasible measures such as establishing a data integration mechanism, improving the cross-domain collaboration system, and building an international mutual recognition framework. The research aims to provide theoretical references for optimizing import and export publicity testing policies under digital transformation, helping to balance trade facilitation and risk prevention, and enhancing the modernization level of China's cross-border trade governance.

Keywords

Digital background; Import and export publicity testing services; Policy innovation

数字化背景下进出口公益检测服务的政策创新研究

董顺芳

河口海关综合技术服务中心, 中国·云南红河州 661399

摘要

在数字技术深度赋能国际贸易的背景下, 进出口公益检测服务政策面临协同升级需求。本研究结合实践案例, 分析政策创新在筑牢生物安全防线、优化公共服务治理、衔接全球数字规则中的核心价值, 提出构建数据融通机制、完善跨域协同体系、搭建国际互认框架等可落地举措。研究旨在为数字化转型下进出口公益检测政策优化提供理论参考, 助力平衡贸易便利化与风险防控, 提升我国跨境贸易治理现代化水平。

关键词

数字化背景; 进出口公益检测服务; 政策创新

1 引言

数字技术重构进出口贸易的治理生态, 为公益检测服务政策创新提供了全新契机。本研究立足数字化转型趋势, 聚焦政策协同创新核心, 从技术赋能、治理联动、规则对接三个维度, 探究政策创新的落地路径与保障机制, 旨在破解当前服务中的协同壁垒, 实现生物安全防控、公共服务普惠与国际规则衔接的多重目标, 为提升我国跨境贸易治理现代化水平提供思路。

2 探究数字化背景下进出口公益检测服务政策创新的意义

2.1 筑牢生物安全防线, 强化风险防控精准效能

数字化背景下进出口公益检测服务政策创新, 核心意

义在于以制度赋能技术, 构建更为主动、更精准的生物安全防控体系。政策通过明确数字化监测技术的应用边界、数据采集标准与预警机制, 推动公益检测从被动响应转向主动预判, 大幅提升跨境生物安全风险的防控能力。依托政策引导搭建的全域数据整合平台, 可实现跨区域、跨品类检测数据的实时汇聚与智能分析, 精准捕捉潜在疫病传播、外来物种入侵等风险隐患的扩散规律, 为风险防控提供科学决策支撑。同时, 政策创新可推动公益检测资源的数字化优化配置, 让检测服务覆盖更广泛的进出口场景, 通过技术普惠强化全链条风险管控; 此以政策为支撑的数字化防控模式, 不仅能提升公益检测的风险识别精度与响应效率, 更能夯实国家生态安全与公共卫生安全的基础, 为进出口贸易筑牢安全屏障。

2.2 优化公共服务治理, 提升贸易便利化普惠水平

进出口公益检测服务政策的数字化创新, 是推进公共服务治理现代化、提升贸易便利化水平的重要路径。政策通过规范数字化服务流程、明确数据共享规则与公益服务边

【作者简介】董顺芳(1989—), 女, 中国云南寻甸人, 硕士, 从事出入境食品检测检验与质量控制研究。

界,打破部门间的信息壁垒,实现检测审批、结果核验、服务供给的全流程协同高效^[1]。此出口公益检测服务可以借助政策引导构建的普惠性数字化服务体系,可将公益检测服务延伸至中小微企业、个体从业者等群体,通过线上化、轻量化服务降低市场主体的合规成本与时间成本,助力市场主体更好地参与国际贸易。

2.3 衔接全球数字规则,增强国际经贸协同竞争力

数字化背景下进出口公益检测服务政策创新,具有衔接全球数字贸易规则、提升国际经贸协同能力的战略意义。在全球数字贸易快速发展的趋势下,政策通过推动检测数据标准化、电子证书互认、跨境数据安全流动等方面的创新,可实现与国际通行规则的有效衔接,降低跨境贸易中的技术壁垒与制度性成本;在进出口公益检测政策引导下的数字化公益检测体系,能够构建可追溯、可核验的检测数据链条,增强我国进出口产品检测结果的国际认可度,为企业出海提供有力支撑。与此同时,出口公益检测服务政策的创新可推动我国在全球数字检测领域的标准输出与合作,提升我国在全球贸易治理中的话语权,以构建更为开放、高效的国际经贸合作格局,增强在全球贸易体系中的核心竞争力。

3 数字化视角下进出口公益检测政策的协同创新策略

3.1 技术赋能政策,构建数据融通协同机制

数字化浪潮下,数据已成为进出口公益检测服务提质增效的核心生产要素,技术赋能政策的核心落点是通过制度设计打破数据壁垒,构建全链条、标准化的数据融通协同机制,让技术工具与检测业务深度耦合,既提升公益检测效能,又为企业提供精准服务支撑;该机制需以政策为引领,明确数据采集、共享、应用的规范与边界,推动检测数据从分散存储向聚合赋能转变,实现技术价值与政策目标的同频共振。

政策需牵头搭建统一的检测数据共享平台,规范数据标准与交互协议,实现跨部门、跨场景数据互联互通。出口公益检测服务可通过政策明确要求海关、农业农村、林草、卫健等部门,将动植物检疫、产品质量检测、疫病监测、跨境人员健康筛查等数据纳入平台,建立涵盖检测参数、流程节点、结果反馈等内容的标准化数据库,统一数据格式与编码规则,避免数据“打架”。昆明海关依托云南智慧口岸建设,依托统一数据平台实现进境水果取样送检“一键推送”,关员现场取样后,将榴莲、芒果等特色农产品的检测要求转化为标准化参数同步至实验室,检测结果 24 小时内自动回传至国际贸易“单一窗口”及昆明(磨憨)全国榴莲集散中心,企业可实时查询进度,既实现检测全程可追溯,又支撑磨憨口岸成为全国榴莲进口规模第一的口岸。强化政策对智能检测技术与数据融合应用的引导,政策可针对性支持红外测温、视频交互、AI 图像识别、5G 智能单兵设备等技术与数

据融通机制结合,应用于陆路口岸货运查验、船舶检疫、动植物疫病筛查、跨境人员健康检测等场景,同时要求建立数据安全审核机制。健全数据融通的落地保障政策需划定数据共享范围与权限,对涉及商业秘密、国家安全、跨境人员隐私的数据实施分级管控,并推动地方特色场景数据融通试点^[2]。云南依托政策推动“智慧海关+地方特色产业”数据融通;河口口岸则推动冷链农产品检测数据与跨境物流数据融合,建立低风险东盟水果“无感通关”模型,通过数据预判实现冷链货车快速放行,货运车辆日均通行效率提升 30% 以上。

表 1 技术赋能政策下数据融通协同机制核心信息表

| 核心维度 | 具体措施 | 关键数据 |
|--------|------------------------------|------------------------------|
| 搭建共享平台 | 政策牵头建统一检测数据共享平台,规范数据标准与交互协议 | 整合跨部门检测数据,建立标准化数据库,统一格式与编码 |
| 技术数据融合 | 政策引导智能检测技术与数据融通结合,建立数据安全审核机制 | 融合红外测温、AI 图像识别等技术数据,分级管控敏感数据 |
| 落地保障试点 | 划定数据共享范围与权限,推动地方特色场景数据融通试点 | 归集多场景数据形成大数据池,搭建风险研判模型 |

3.2 治理联动政策,完善跨域协同服务体系

数字化背景下,进出口公益检测服务的跨域协同并非简单的区域联动,而是以政策为纽带,重构跨部门、跨区域的治理格局,通过权责划分、流程再造与机制保障,打破行政壁垒与服务边界,构建全域一体化的公益检测服务体系,以实现公益检测服务的均等化、高效化供给,同时筑牢全域协同的风险防控防线。

政策需明确跨域协同的组织架构与权责清单,搭建常态化联动机制。通过出台专项政策,成立由海关、农业农村、市场监管、卫健等部门组成的跨域协同工作组,明确各部门在公益检测中的职责分工、协同流程与责任追究机制,避免推诿扯皮。云南依托沿边开放优势,推行“口岸联动+区域协同”检测模式,以磨憨、河口、瑞丽三大枢纽口岸为龙头,联动孟定清水河、猴桥、关累港等节点口岸,建立跨口岸检测协同工作组,明确海关与地方部门的权责清单,实现区域内农产品检疫、跨境人员健康检测结果互认,企业可自主选择申报口岸,实行“多点受理、集中审单、全域放行”,真正打通沿边口岸检测服务壁垒。

以政策推动跨域流程再造与服务融合,其通过政策引导,将数字化公益检测服务流程嵌入跨域协同平台,实现申报、检测、核验、放行等环节的全流程线上协同。明确区域内公益检测项目、技术标准与质控要求的统一口径,推动线上预检、远程咨询、电子报告互认等服务的跨域延伸,让企业无需跨区域跑动即可享受标准化公益服务^[3]。云南通过政策推动各口岸检测流程数字化再造,磨憨公路口岸优化车辆验放流程,将跨境货车检测验放时间从 10 分钟压缩至 4 分

钟；河口公路口岸实施“一车到底、重进重出”试点，跨境车辆通行时间从30分钟缩减至10分钟，大幅降低企业物流成本，实现“运输+检测”无缝衔接。

3.3 规则对接政策，搭建国际协同互认框架

在全球数字贸易深度融合的背景下，进出口公益检测的国际协同互认，核心是通过政策创新搭建规则对接桥梁，实现检测标准、数据流动、证书效力的跨境协同，既破除技术性贸易壁垒，又强化全球风险防控合力，推动我国公益检测规则与国际通行标准深度衔接，该目标对面向南亚东南亚辐射中心的云南而言。政策需牵头通过出台专项政策，引导公益检测机构对标国际先进标准，重点深化与东盟、澜湄区域国家的检测互认合作，推动我国检测项目、技术参数与目标国际标准的兼容适配。云南以自贸试验区昆明片区为抓手，搭建“澜沧江—湄公河国家标准互联互通平台”，联动省标准化研究院与老挝工业和贸易部，推动7项中国建材标准转化

为老挝国家标准、4项云南省道地药材标准纳入老挝国家标准体系，实现中老检测标准互认。以政策规范跨境检测数据流动，筑牢安全与互认双重底线；出口公益检测服务依托《促进和规范数据跨境流动规定》等政策框架，结合云南沿边口岸特点，明确公益检测数据跨境流动的范围、条件与安全要求，对不含重要数据和个人信息的农产品检测结果、通关核验数据，简化跨境传输流程，免于安全评估申报，提升数据互认效率；针对性在磨憨—磨丁经济合作区、瑞丽国家重点开发开放试验区开展试点，制定检测数据跨境流动负面清单，重点规范澜湄区域农产品、矿产品检测数据的跨境流转，为全国沿边地区规则落地积累经验，实现数据安全与国际协同的双向赋能。健全国际互认落地保障政策，还需配套搭建公益检测国际互认服务平台，整合各国检测标准、互认清单、认证流程等信息，为企业提供一站式查询与咨询服务^[4]。

表2 技术赋能及规则对接政策核心信息汇总

| 核心维度 | 具体措施 | 数据/规则要点 |
|--------|----------------------|-------------------|
| 搭建共享平台 | 搭统一平台，规范数据标准协议 | 整合跨部门数据，统一格式编码 |
| 技术数据融合 | 智能技术与数据融通，建安全审核机制 | 融合AI数据，分级管控敏感数据 |
| 落地保障试点 | 划定数据权限，推进地方特色试点 | 归集数据建池，搭建风险研判模型 |
| 标准互认 | 对标国际标准，深化跨境互认，开展公益培训 | 适配国际参数，搭建规则对接桥梁 |
| 跨境数据互认 | 明确流动规则，自贸区试点负面清单 | 精简非敏数据流程，免安全评估申报 |
| 机制保障 | 搭一站式平台并纳入机构考核 | 整合国际信息，激励机构适配国际水平 |

4 结语

本研究构建数字化背景下进出口公益检测服务政策协同创新框架，明确了技术、治理、国际层面的核心举措。政策创新需以数据融通为基础、以跨域协同为支撑、以国际互认为延伸。未来可深化数字技术与政策的深度融合，完善试点推广与效能评估机制，为政策优化提供理论与实践参考，助力公益检测服务更好适配数字贸易发展，兼顾国门安全与贸易便利化。

参考文献

- [1] 盛斌, 刘宇英. 走出产品“舒适区”:企业数字化与出口产品转换[J].中国工业经济,2024(8):61-79.
- [2] 战俭,史建峰,侯永明,等.进出口货物中天然放射性物质检测技术研究[J].同位素,2025,38(3):269-275.
- [3] 魏书瑞.腐烂茎线虫RAA快速检测方法的建立及生防菌和杀线剂的触杀效果评价[D].沈阳农业大学,2024.
- [4] 张然,卢小雨,李蕊,等.深圳市进出境玉米病害检测存在的问题及其对策[J].南方农业,2025,19(12):175-177.

Comparative Analysis of Adhesion and Corrosion Resistance of Metal Anti-corrosion Coatings on Different Substrates

Fuzhong Peng

Guangdong Institute of Technology, Zhaoqing, Guangdong, 526070, China

Abstract

Metal anticorrosive coatings are crucial technologies for extending material lifespan and ensuring structural safety. The adhesion and corrosion resistance of coatings vary among different metal substrates due to differences in surface energy and chemical reactivity. This study investigates steel, aluminum, and copper substrates, comparing the adhesion and corrosion resistance mechanisms of epoxy, polyurethane, and inorganic ceramic coatings. Results demonstrate that steel substrates exhibit the strongest protective performance after sandblasting or phosphating treatments, achieving optimal interfacial bonding. Aluminum substrates show weak adhesion due to oxide films, but their anodic oxidation significantly enhances synergistic protection. Copper substrates, with high electrochemical activity, rely on chemically anchored substrates for coating stability. Through electrochemical and salt spray tests, the coupling effects between substrate properties and coating systems are revealed, providing a basis for optimizing anticorrosive systems.

Keywords

Metal substrate; Anticorrosive coating; Adhesion; Corrosion resistance; Interfacial bonding; Electrochemical impedance

不同基材金属防腐涂层的附着力与耐蚀性对比分析

彭富忠

广东理工学院, 中国·广东肇庆 526070

摘要

金属防腐涂层是延长材料寿命与保障结构安全的重要技术。不同金属基材因表面能与化学活性差异, 涂层附着与耐蚀性能表现不同。本文以钢、铝、铜为研究对象, 比较环氧、聚氨酯与无机陶瓷涂层的附着与耐蚀机理。结果表明, 钢基经喷砂或磷化处理界面结合牢固, 防护性能最佳; 铝基因氧化膜存在附着力偏弱, 但经阳极氧化后协同防护效果明显; 铜基因电化学活性高, 涂层稳定性依赖化学锚固底层。通过电化学与盐雾试验分析, 揭示了基材特性与涂层体系间的耦合作用规律, 为防腐体系优化提供依据。

关键词

金属基材; 防腐涂层; 附着力; 耐蚀性; 界面结合; 电化学阻抗

1 引言

金属材料在工业、建筑、交通及能源领域的广泛应用, 使防腐保护成为工程安全与经济效益的重要保障。金属表面的电化学活性使其在潮湿、含盐及酸碱环境中极易发生腐蚀, 造成机械性能退化、设备失效与资源浪费。防腐涂层通过形成隔离屏障、缓蚀反应或阴极保护作用, 有效阻断腐蚀介质的渗透, 从而延长结构使用周期。然而, 不同基材金属的表面能、氧化膜特性及化学反应活性不同, 使得相同涂层体系在附着力、致密性与耐蚀效果上存在显著差异。系统比较不同金属基材上防腐涂层的附着与耐蚀性, 对优化防护体系、提高使用可靠性具有重要意义。本文从界面结合机制、环境腐蚀行为及多层涂层体系协同性能三个维度展开分析,

旨在揭示基材差异对防腐性能的本质影响, 为工程防护提供科学依据。

2 不同基材表面特征与防腐涂层结合机理

2.1 钢材的表面特性与界面结合规律

钢材因其高强度与可焊接性在工业领域广泛应用, 但其表面活性高、易氧化特征使防腐性能依赖于界面结合的质量。钢表面由 Fe 及其氧化物构成, 表面粗糙度与活性位点分布直接影响涂层附着力。通过喷砂处理可显著提高表面比面积与机械嵌合强度, 而磷化或阴极电泳工艺能在表面生成致密 FePO_4 晶体层, 起到化学锚固与阻隔作用。环氧体系在钢基表面形成的极性键结合力较强, 其交联网络结构能有效抑制水汽和氧气的渗透扩散。实验表明, 当粗糙度 R_a 保持在 2.5–3.5 μm 时, 附着力可提高约 35%, 电化学阻抗值增加一倍以上, 说明钢表面形貌优化与化学预处理协同作用是提升涂层长期稳定性的关键路径, 对重防腐体系设计具有

【作者简介】彭富忠(1991—), 男, 中国江西吉安人, 硕士, 助教, 从事金属表面防腐研究。

重要参考价值^[1]。

2.2 铝基材的表面氧化膜与附着影响

铝基表面天然形成的 Al_2O_3 氧化膜结构致密且稳定，为其提供一定的自钝化防护，但低表面能和弱润湿性导致涂层附着性能不足。通过阳极氧化工艺可在铝表面制备具有规则孔洞的多孔氧化层，为涂层渗入与机械锁合作用提供通道，从而显著增强附着力。聚氨酯涂层在铝基表面可与氧化膜羟基形成氢键与偶极相互作用，提升界面稳定性。若进一步采用有机硅或氟硅改性，可增强柔韧性与时耐候性。实验结果显示，未处理的铝基涂层剥离强度仅约 4 MPa，经阳极氧化后可提升至 10 MPa 以上，盐雾试验中耐蚀时间延长近三倍，说明氧化膜的结构调控与化学改性对铝基防护体系的性能提升具有显著促进作用。

2.3 铜基材的表面电化活性与涂层稳定性

铜基材具有良好的导电与导热性能，但其表面化学活性高，易生成 Cu_2O 和 CuO 混合氧化膜，这类膜层在电解介质中不稳定，易形成微电偶腐蚀，加速界面失效。通过在界面引入硅烷偶联剂或含巯基底漆，可在铜与涂层之间形成化学桥联，抑制电子迁移与氧化还原反应^[2]。无机陶瓷涂层如 SiO_2 、 Al_2O_3 等经溶胶-凝胶高温固化后能与铜表面形成稳定的 $M-O-Si$ 化学键，提高界面阻隔性能。电化学试验结果表明，经过偶联底漆处理的环氧/铜体系在 3.5% NaCl 溶液浸泡 240 小时后仍保持完整，而未经处理样品在 72 小时内即出现起泡剥落，表明界面化学键结合与陶瓷复合层能显著提升铜基防腐涂层的稳定性与耐蚀寿命。

3 防腐涂层附着力的影响因素与增强途径

3.1 表面粗糙度与物理吸附作用

金属基材表面的粗糙度对涂层附着力具有直接影响，其通过改变界面接触面积与微观嵌合作用来增强物理吸附效应。适度的粗糙结构能够形成稳定的微机械锁合，使涂层在外力作用下具备更高的剥离阻力。当表面过于光滑时，涂层仅依赖范德华力维持结合，易在湿热或机械应力下失效；而粗糙度过高则可能引起应力集中，导致界面裂纹扩展。实验表明，在铝合金表面将 Ra 由 0.8 μm 调控至 2.4 μm 时，附着强度提升约 60%，但当超过 3.5 μm 后反而下降，说明存在最优粗糙度区间。通过控制喷砂压力、磨料粒径及喷射时间，可获得均匀微凸形貌，从而在宏观上增强界面摩擦阻力，在微观上提供更多吸附位点，使涂层兼具良好附着力与抗剥离性能，为防腐体系提供稳定的机械基础。

3.2 化学预处理与界面反应机理

化学预处理是提升金属表面活性与改善界面能匹配的关键环节，其通过调节表面电荷分布与化学组成，为涂层提供稳定的结合通道。钢基常采用磷化、铬酸盐转化等方法，生成以 $FePO_4$ 或 Cr_2O_3 为主的反应膜层，不仅提高耐蚀性，也为环氧或聚氨酯涂层提供化学键结合位点。铝基表面常用

硅烷偶联或铬盐转化处理，通过 $Si-O-M$ (M 为金属) 键的形成，实现有机-无机界面桥接，增强极性键作用。铜基则因表面活性高、易形成氧化膜，需引入含巯基或胺基偶联剂，通过共价键固定形成稳定界面^[3]。X 射线光电子能谱 (XPS) 分析显示，经硅烷处理后的铝基表面出现明显 $Si\ 2p$ 峰，表明形成稳固的化学键结合，提高了界面结合能与抗水解能力，从根本上增强了防护体系的可靠性。

3.3 涂层固化与应力协调机制

涂层固化阶段的热力学过程决定了最终附着性能，其关键在于交联密度控制与应力协调。过快固化会导致内部应力积聚，使界面产生微裂纹或脱层，而缓慢升温或分段固化可有效释放残余应力，保证涂层的完整性。环氧体系中，加入柔性链段或橡胶增韧相可提高涂层的延展性，减小热膨胀差异带来的界面应变。纳米填料如 SiO_2 、 Al_2O_3 等在体系中形成能量吸收点，能分散应力集中并提升交联稳定性。研究表明，采用双阶段固化工艺的环氧/钢体系，其附着力由 8.2 MPa 提升至 12.5 MPa，且断裂形态由界面剥离转变为内部 cohesive 破坏。该结果说明合理的固化过程与结构调控不仅能提高附着强度，也能显著改善涂层长期服役的机械稳定性与防护耐久性。

4 不同防腐涂层体系的耐蚀性比较

4.1 环氧涂层的屏蔽与极化作用

环氧涂层因其分子结构中含有大量极性羟基与环氧基团，能够与金属表面形成牢固的化学键合，从而构建致密而稳定的防护层。高交联密度赋予环氧体系极低的渗透系数，使其在钢基材上表现出优异的屏蔽性能。该涂层通过阻隔氧气、水分及氯离子渗入，切断了腐蚀反应的基本条件。此外，环氧树脂在固化后能形成较强的阴极极化作用，减缓金属表面的还原反应速率，降低腐蚀电流密度。掺杂石墨烯、纳米 TiO_2 或 ZnO 颗粒可进一步优化导电通道分布，提升极化均匀性与介电常数稳定性。实验表明，复合环氧涂层在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 720 小时后腐蚀面积不足 1%，其阻抗模值高达 $10^9\ \Omega \cdot cm^2$ ，充分体现出优异的综合防护性能与电化学稳定性。

4.2 聚氨酯涂层的柔韧性与耐候性优势

聚氨酯防腐涂层以 $-NHCOO-$ 键为主链结构，兼具柔性与高耐候性，在多变环境中能保持优异附着力与耐久性^[4]。其链段中软硬相交替排列，使涂层具备良好的弹性恢复性能，可有效缓解热胀冷缩和机械振动导致的应力集中。铝基材上的聚氨酯涂层能与氧化膜微观孔隙形成嵌合结构，提高了机械锁合与界面结合强度。经 UV 老化 1000 小时测试后，涂层表面仍保持 90% 以上的光泽度，附着强度变化不超过 5%。在酸性及盐雾环境中，聚氨酯的化学稳定性略低于环氧，但通过氟硅共聚或纳米改性可提高其疏水性与抗光解能力，使其在外露结构及航空铝合金防护中具有广泛应用潜力。

4.3 无机陶瓷涂层的高温与化学稳定特征

无机陶瓷涂层如 SiO_2 、 ZrO_2 及 Al_2O_3 具有高化学惰性和极低离子迁移率，可在极端环境下长期维持防护性能。其致密的三维网状结构能有效阻隔离子渗透与化学侵蚀，适用于高温、高盐及强酸碱环境下的防护需求。通过溶胶-凝胶法制备的 SiO_2 涂层在 200°C 条件下仍保持结构完整，其电化学腐蚀电流密度低至 10^{-8} A/cm^2 ，显示出优异的阻蚀效果。该类涂层在铜、钢等基材表面可形成强界面键合层，稳定电位差，减少电化学腐蚀风险。尽管陶瓷涂层存在脆性问题，但通过与柔性环氧或聚脲底层复合，可显著改善抗裂性能，实现高强度、高耐蚀与良好韧性的统一，为重防腐与高温设备提供长期防护保障。

5 基材—涂层体系的协同防护机理与工程应用

5.1 界面能匹配与电化学稳定平衡

金属防腐涂层体系的长期稳定性本质上取决于界面能的匹配程度与电化学势能的平衡状态。不同金属基材的标准电极电位差异显著，若涂层材料与基体电位差过大，则会在界面形成微电偶结构，使腐蚀反应在潜伏期迅速启动。界面能匹配良好的体系能够形成稳定的化学键或电荷分布平衡，从而抑制电化学反应的驱动力。例如钢与环氧涂层之间，羟基与羧基能与铁表面活性位点形成化学键结合，使电位差减小并减少界面能不均。研究表明，钢/环氧体系在引入碳纳米管导电相后，界面电荷迁移阻抗显著增加，腐蚀电位由 -0.67 V 提升至 -0.45 V ，说明势能梯度得到有效缓冲。对于铜基和铝基系统，通过掺入电化学惰性粒子如 SiO_2 、 Al_2O_3 或 TiN ，可形成稳定的势垒层，阻止电子传导通道的建立。界面能的优化不仅降低了体系自由能，也改善了界面润湿性，使涂层在热循环和应力作用下仍能维持结构完整，从而实现长期的电化学稳定与防护平衡^[9]。

5.2 多层复合涂层的协同效应

单层防腐涂层因材料性能单一，无法同时兼顾高附着力、屏蔽性与耐候柔韧性，而多层复合涂层通过功能分层设计实现多重防护耦合。底漆锚固金属基体，中间层缓蚀阻介质迁移，面漆抗紫外、耐磨耐候。环氧-聚氨酯复合体系使钢基腐蚀速率降 70% 以上，铜基陶瓷-聚脲复合结构经 2000 小时盐雾试验无起泡剥落。该结构还能释放应力、分

配化学势能，提升涂层在温变和机械载荷下的耐久性，实现功能与结构的协同优化。

5.3 工程环境中的老化与失效规律

防腐涂层在工程环境中受紫外辐射、温湿循环等多重作用，老化失效是材料结构与环境因素的耦合结果：环氧体系长期曝露会分子链断裂、表面粉化，聚氨酯体系遇高湿/酸性环境易软化、附着力下降。可通过引入光稳定剂、抗氧化剂等改性，提升分子能量耗散能力以延缓老化。研究表明，光稳定改性的环氧/聚氨酯复合体系 UV 老化 1500 小时后附着强度仍超 90%；沿海高盐高湿环境下，复合涂层服役 8 年防护效率仍达 80% 以上。其失效多为局部微裂纹、界面起泡而非整体剥落，复合结构的能量分散和界面保护优势显著，为工程长期防护提供了可靠技术支撑。

6 结语

不同基材金属在防腐涂层附着力与耐蚀性方面存在显著差异，其根本原因在于表面能、氧化膜特征及界面化学反应活性不同。钢基涂层结合力最强，适宜采用环氧体系配合磷化预处理；铝基适合阳极氧化后覆以聚氨酯或氟硅改性层，以提升柔韧与耐候性能；铜基则需通过偶联剂与陶瓷底层协同抑制电化学反应。多层复合体系在附着力、耐蚀性及环境适应性上表现最为优异。通过界面能调控、结构设计与环境模拟，可实现防护性能的系统优化。未来研究应结合纳米复合技术与智能自修复机理，构建具备自感知与自愈能力的新型防腐涂层体系，实现金属结构的长期稳定运行与可持续防护。

参考文献

- [1] 蒋玉洁.硅基防腐涂层的制备与应用性能研究[D].青岛科技大学,2024.
- [2] 王凌云.绿色环保石墨烯防腐涂层的制备及性能研究[D].江南大学,2022.
- [3] 张嘉琪.光固化防腐涂层附着力促进剂的研究[D].江南大学,2021.
- [4] 许旭东,蔡一平,王延艳.水工金属结构防腐涂层附着力试验与分析[J].水利建设与管理,2024,44(05):65-69.
- [5] 杨志平.UV固化金属防腐涂层的构筑及性能研究[D].江南大学,2021.

Research on Key Processing Technologies and Quality Control of Copper Enameled Wires

Zhixing Ni Dongxing Qiu* Zhihan Gu Quanxin Long

Jiangxi Jiangtong Taiyi Special Electrical Materials Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

Abstract

Aiming at the increasingly stringent requirements for electromagnetic performance and reliability of copper enameled wires in high-frequency applications, a key processing technology system based on conductor pretreatment, multi-layer insulation coating, and automatic control is proposed. Research and analysis show that the purity control of oxygen-free copper rods and the collaborative process of multi-pass drawing and annealing can ensure conductor uniformity; gradient viscosity coating and three-temperature-zone curing effectively improve the integrity of the enamel film. The results indicate that through high-precision molds, closed-loop tension control, catalytic combustion VOCs treatment, combined with SPC process monitoring, the enamel film thickness tolerance of $\pm 2 \mu\text{m}$ and VOCs removal rate of more than 98% can be achieved. The products meet the requirements of 220°C heat resistance and high corona resistance, greatly improving the manufacturing level of high-end electromagnetic wires.

Keywords

Copper enameled wire; Key processing technology; Quality control

铜漆包线加工关键技术与质量控制研究

倪志星 邱东兴* 顾芝菡 龙全新

江西省江铜台意特种电工材料有限公司, 中国·江西 南昌 330000

摘要

针对铜漆包线在高频应用中电磁性能、可靠性要求日益提升的问题, 提出基于导体预处理、多层绝缘涂覆、自动化控制的加工关键技术体系。经过研究分析表明, 无氧铜杆纯度控制、多道次拉丝退火协同工艺可保障导体均匀性; 梯度粘度涂覆和三温区固化有效提升漆膜完整性。研究结果表明, 通过高精度模具、闭环张力控制、催化燃烧VOCs治理, 结合SPC过程监控, 可实现漆膜厚度公差 $\pm 2 \mu\text{m}$ 、VOCs去除率超过98%, 产品满足220°C耐热、高耐电晕性能要求, 大幅度提高高端电磁线制造水平。

关键词

铜漆包线; 加工关键技术; 质量控制

1 引言

铜包铝漆包线作为高频电磁应用领域的轻量化导体材料, 通过铜铝复合结构实现性能和成本的协同优化。其内芯为高纯铝, 外层包覆 13%–17% 体积分数的无氧铜, 经过热轧或拉拔形成冶金结合界面, 在保留铜优秀的表面导电性基础上, 还能大幅度降低单位长度质量。在直流工况下, 其电阻率约为纯铜线的 1.45–1.46 倍; 而在 5 MHz 以上高频场景中, 由于趋肤效应使电流集中于铜表层, 导电效能趋近纯铜, 适用于开关电源变压器、射频电感、显示偏转线圈等高频器件。该材料可使线圈重量减轻约 50%, 制造成本下降 30%–50%, 具有较强的经济优势。然而, 铝芯化学活性高, 铜铝界面容易发生电化学腐蚀, 需要在拉丝、退火、涂漆全

工序中实施惰性气氛保护和界面洁净控制, 产品执行 GB/T 29197、SJ/T 11223 标准, 线径覆盖 0.06–4.6 mm, 耐高温等级达 130–220 级, 但受限于铝本征电阻率及热稳定性, 不适用于大功率低频电力传输场景。

2 铜包铝漆包线的主要特性

2.1 分类与规格

铜包铝漆包线 (CCA) 的分类及规格体系体现材料+结构+性能的多方面融合特征。依据导体构成、几何形态、绝缘类型、铜层比例, 可系统划分为若干技术类别。按照 GB/T 29197–2012 标准, 铜层体积分数是分级指标, 直接影响导电性、焊接性、成本; 线径覆盖微细 ($< 0.6 \text{ mm}$) 至常规范围, 适配不同电磁器件需求; 绝缘涂层则决定耐高温等级。例如: CCAQZ(G)-1(2)/155 采用聚酯亚胺复合涂层, 适合应用在 155°C 长期工作环境。下表综合关键参数, 为工程选型提供量化依据。

【作者简介】倪志星 (1988—), 男, 中国江西南昌人, 本科, 助理工程师, 从事铜金属材料加工研究。

表 1 铜包铝漆包线的分类与规格

| 分类维度 | 类型 / 等级 | 技术特征与应用指向 |
|-------|--------------------------------|------------------------|
| 铜层体积比 | 10A/H (8%–12%) | 成本敏感型, 低频轻载场景 |
| | 15A/H (13%–17%) | 主流型号, 具有良好的导电性、可焊性、经济性 |
| | 20A/H (18%–22%) | 高可靠性需求, 接近纯铜焊接性能 |
| 线径规格 | 圆线: 0.10–5.00 mm | 微细线用于高频电感, 粗线被应用在功率绕组 |
| | 扁线: 截面积 $\leq 20 \text{ mm}^2$ | 提升槽满率, 适合高效电机 |
| 绝缘体系 | QA (聚氨酯, 155 级) | 易焊接, 适用于消费电子 |
| | QZY (聚酯亚胺, 220 级) | 耐高温、耐溶剂, 用于新能源汽车电驱 |
| | 自粘 / 变频专用型 | 简化绕制工艺 |
| 典型含铜量 | 0.1–0.63 wt% | 和铜层体积比正相关, 影响其应用成本 |

2.2 特性与性能

铜包铝漆包线在电磁性能和经济性之间实现高效平衡。其直流电阻率约为纯铜线的 1.45–1.46 倍, 但高频 (>5 MHz) 下受到趋肤效应影响, 致使电流集中在高导电铜表层, 等效交流电阻趋近纯铜水平; 密度仅为铜的 40%, 相同电阻条件下线材重量降低 37%–50%, 显著减轻线圈质量; 抗拉强度 96–135 MPa, 虽然是纯铜线的 44%–51%, 但满足多数绕组机械要求; 连续铜层赋予其良好的抗氧化性及直接钎焊能力, 有效规避铝线需表面活化处理的工艺限制; 材料成本约为纯铜线的 2/3, 结合轻量化优势, 终端产品综合成本可下降 30%–60%, 在高频变压器、消费电子、新能源电驱等领域具备良好的应用价值。

3 铜漆包线加工关键技术

3.1 导体预处理技术

微细漆包线对于杂质较为敏感, 工作人员必须采用纯度 $\geq 99.95\%$ 的无氧铜 (OFC), 其氧含量低于 10 ppm, 可有效抑制 Cu_2O 夹杂形成, 有助于保障晶界完整性。拉丝过程采用多道次连续减径工艺, 单道压缩率严格限定在 15%–20% 区间, 避免局部剪切带集中引发断线; 模具材质优选硬质合金, 将尺寸公差控制在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内; 拉丝后立即进入在线连续退火系统, 炉温精准调控为 400–500 °C, 依据线速动态匹配保温时间, 让冷加工位错充分回复再结晶, 恢复延伸率至 30% 以上, 同时彻底裂解, 充分发挥残留润滑剂作用, 防止碳化物在漆膜界面富集。同时, 退火全程通入高纯氮氢混合保护气氛, 氧分压控制在 10^{-6} Pa 量级, 杜绝 $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$ 氧化膜生成 (如图 1 所示)。

3.2 绝缘涂覆与固化技术

现代高性能产品普遍采用多层复合结构, 典型配置为聚酰胺酰亚胺 (PAI) 底漆层和聚氨酯 (PU) 外层协同体系, 前者提供 220°C 以上耐热等级, 后者赋予产品高耐磨性, 涂覆层数则依据耐压需求设定为 4–30 道。针对不同线径, 涂覆方式严格采用差异化实施, 微细线 ($\leq 0.2 \text{ mm}$) 采用毛毡浸渍法, 利用毛细作用实现均匀包覆; 粗线则选用精密模具涂漆, 通过间隙控制保障同心度。漆液粘度按照涂 -4 杯标准动态调控, 初道维持 25–30 秒以利渗透, 后续提高至 40–45 秒, 进一步增强膜厚累积, 最终漆膜厚度公差压缩至 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。

在固化过程中, 工作人员根据双热风对流烘炉分三温区精准执行: 预热区驱除溶剂, 防止气泡; 主固化区促使树脂交联成网状结构; 冷却区缓冷抑制内应力开裂。全程温度波动须控制在 $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内, 超差将导致交联度不足, 大幅度劣化耐溶剂性、长期热老化性能, 支撑高端电磁器件对于绝缘可靠性的严格要求。

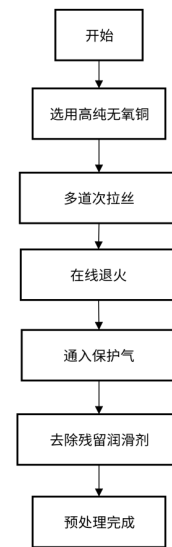


图 1 导体预处理

3.3 高性能绝缘材料应用

高性能绝缘材料选型及应用是铜漆包线适配多样化工况的技术支撑, 其本质在于树脂分子结构和使用环境热-电-机械应力的精准匹配。通用工业电机通常采用聚酯漆 (QZ), 其主链含苯二甲酸、乙二醇单元, 玻璃化转变温度约为 130°C, 具有成本低、柔韧性好等特征, 但长期热老化容易发生酯键水解, 限制其在高温场景的应用。面向航空航天、新能源汽车驱动电机、高频开关电源等领域, 则普遍采用聚酰胺酰亚胺 (PAI)、聚酯亚胺 (QZY) 体系。QZY 通过引入亚胺环刚性结构, 在保持良好可绕性的同时, 将耐热等级提高至 200°C; PAI 则凭借全芳香杂环骨架、高交联密度, 实现 220°C 下长期稳定运行, 并具备良好的耐电晕性、耐溶剂性, 适用于变频电机中高频脉冲电压环境。近年来, QZY/XY 复合涂层进一步优化性能梯度, 内层 PAI 强化附

着力,外层 QZY 可有效提升自粘特性,形成功能梯度绝缘体系。另外,材料选择要综合考量热指数(TI)、相对温度指数(RTI)、介电强度、漆膜柔韧性的平衡,确保在热氧化、局部放电、机械振动融合作用下维持绝缘完整性^[1]。

3.4 环保与自动化技术

在环保层面,涂覆及高温固化阶段释放的苯系物、醇醚类挥发性有机物(VOCs)经过集成式废气治理系统高效处置。主流工艺采用不燃性水基分散剂乳液吸收结合催化燃烧(CO)技术,VOCs去除率稳定超过98%,排放浓度低于20 mg/m³,远优于GB 16297大气污染物综合排放标准。部分先进产线引入在线GC-MS监测技术,加强智能反馈控制,实现废气成分动态识别。在自动化方面,国产高速漆包生产线已经实现放线+退火+多道涂漆+梯度烘焙+激光测径+收线全流程闭环控制,线速度达到30 m/min以上。关键工序配备伺服张力控制系统,波动控制在±0.5 N以内;漆膜厚度由涡流传感器实时反馈,联动调节涂漆泵频率;烘炉温区采用PID+模糊算法复合调控,温度均匀性偏差≤±2℃,有效降低人工干预导致的质量离散性,为电磁线产业向智能化转型升级提供坚实技术底座^[2]。

4 铜漆包线加工质量控制分析

4.1 原材料质量控制

在导体材料质量控制过程中,工作人员须采用符合GB/T 3952标准的无氧铜杆(OFC),其纯度不低于99.95%,氧含量严格控制在5~10 ppm区间。过高氧含量会形成Cu₂O脆性相,降低延展性,诱发拉丝断裂;Bi、Pb、S等杂质元素要通过ICP-MS检测,总量不超过5 ppm,有效避免晶界偏析削弱高频导电性能。针对微细线(<0.1 mm)生产,则应对铜杆进行超声波探伤和晶粒度评级,确保内部无缩孔、夹杂、粗大柱状晶,且每批次铜杆入厂必须完成电导率、抗拉强度、延伸率三项指标验证^[3]。

绝缘漆作为功能层载体,其质量直接影响漆膜附着力、耐热性、介电强度。供应商须提供完整技术数据包,包括树脂固含量、粘度、酸值、凝胶时间、热重分析(TGA)曲线。漆液入厂后进行小样试涂及烘焙,量化评估流平性、针孔率、和铜基体的界面结合力;溶剂体系中苯类物质含量须符合GB 38507限制,优先选用低毒环保型稀释剂;所有原材料实施批次追溯编码管理,建立“一物一码”数据库,确保质量问题可快速回溯至源头,从供应链端筑牢质量防线。

4.2 工艺质量控制

工艺过程是连接材料和成品性能的重要环节,须通过参数闭环、在线监测等手段,实现动态稳态控制。例如:在拉丝工序中,单道压缩率、模具角度、润滑剂浓度构成重要控制要素,压缩率偏离15%~20%区间容易引发加工硬化^[4];退火温度和线速匹配决定再结晶程度,400~500℃保护气氛退火后,铜线延伸率应稳定在30%~35%,电阻率波动≤±0.5%。涂覆阶段采用多级粘度梯度设计,初道低粘度保障浸润,后续高粘度累积膜厚,漆膜总厚度依IEC 60317标准按线径分级控制,公差±2 μm。固化炉三温区(预热—主烘—冷却)温度曲线经热电偶实测校准,PAI体系主烘区

必须维持380±3℃,偏差超限将导致交联不足。此外,全流程嵌入SPC统计过程控制,外径、漆膜同心度、击穿电压等特性实施X-R图监控,异常趋势自动触发工艺纠偏,确保产品一致性达到六西格玛水平^[5]。

4.3 设备质量控制

拉丝机主轴径向跳动需要≤2 μm,模具座定位重复精度达到±1 μm,防止线径椭圆度超标;退火炉采用双通道氮氢混合气控制系统,实时监测露点并联动流量调节阀,保证炉内氧分压<10⁻⁶ Pa,避免铜线表面氧化影响漆膜附着力^[6]。涂漆系统配备高精度齿轮计量泵,流量波动<±1%,配合激光测径仪反馈实现漆膜厚度自适应调节。烘炉热风循环系统经过CFD仿真优化,截面温差≤±2℃,热电偶校准周期不超过30天^[7]。

在设备维护过程中,严格推行TPM(全员生产保全)模式,建立预防性维护台账,收线张力传感器、β射线测厚仪、VOCs在线监测仪等关键部件实行强制周期检定,误差超限立即停用。高速生产线集成MES系统,实时采集放线张力、线速度、各区温度等200+参数,异常数据自动标记,生成详细的维修工单。此外,设备清洁度纳入日常点检,涂漆槽每周超声清洗,烘炉内壁每月除积碳,杜绝杂质污染漆膜^[8]。

5 结语

本研究系统梳理铜漆包线加工中的关键技术和质量控制路径。导体预处理环节通过高纯无氧铜、精确退火工艺,有助于保障晶界完整性,控制氧化物生成。绝缘涂覆采用PAI/QZY复合体系,结合粘度梯度调控、三温区固化等手段,实现热稳定性和机械强度协同优化。在环保和自动化方面,集成催化燃烧系统,实现VOCs高效治理。质量控制依托原材料入厂检测、工艺SPC监控、设备TPM管理,确保产品一致性达到六西格玛水平。研究成果为高性能漆包线量产提供从材料到工艺再到管控的完整技术模式,推动电磁线制造向高精度、智能化、绿色化方向发展。

参考文献:

- [1] 宋启龙,陈智勋,穆锡龙,等. 耐高温漆包线用高效复配氢氧化钠脱漆剂的研究[J]. 电镀与涂饰,2025,44(4):141-145.
- [2] 刘志军,陈亮,袁敏,等. 扁铜漆包线免剥漆皮电阻焊接头性能分析[J]. 微特电机,2025,53(1):78-82.
- [3] 高晨光,汪旭东,刘旭辉,等. 镍合金漆包线电阻脱漆微点焊工艺[J]. 焊接,2025(4):78-83.
- [4] 夏扬,于正林. 基于单相机全视角的漆包线缺陷检测方法[J]. 机电工程技术,2025,54(15):115-122.
- [5] 徐飞. 电机用漆包线表面针孔检测工装的设计与应用[J]. 电机技术,2025(4):53-54.
- [6] 蔡凯,龙香林,王阳. 高频方波脉冲频率对漆包线耐电晕性能的影响研究[J]. 上海塑料,2025,53(6):58-62.
- [7] 曾跃云,郭伟,刘红芳,等. 铜材质量和退火工艺与漆包线柔软性的关系[J]. 电线电缆,2025,68(12):55-60.
- [8] 陈金刚. 电机绕组用电磁漆包线性能检测及绕组浸漆工艺控制[J]. 电气防爆,2025(1):24-26.

Research on the Technology for Improving the Purity of Fine Organic Materials Used in the Light-Emitting Layer of OLED Devices

Shihong Chu

Beijing Yunji Technology Co., Ltd., Beijing, 100094, China

Abstract

To address the issues such as the attenuation of device luminous efficiency, shortened lifespan, and color deviation caused by trace impurities in the fine organic materials of OLED devices, and to achieve high-purity production of organic luminescent materials and their industrialization, a combined technology of raw material purification, optimization of synthesis processes, multi-step purification, and precise impurity detection was employed for research. The synthesis reaction parameters were adjusted, the purification process system was selected, and a trace impurity detection platform was established to complete the entire process of organic luminescent material purity improvement from laboratory synthesis to industrialization. After the combined purification process of recrystallization, column chromatography, and vacuum sublimation, the purity of the core organic material of the OLED luminescent layer can be increased to over 99.99%, the content of metal ion impurities can be reduced to below 1 ppm, and the content of organic impurities can be reduced to below 5 ppm. The adjusted preparation process can effectively suppress the occurrence of side reactions and reduce impurity generation at the source.

Keywords

OLED devices; Light-emitting layer; Fine organic materials; Purity improvement; Purification process

OLED 器件发光层用精细有机材料纯度提升技术研究

储士红

北京云基科技股份有限公司, 中国 · 北京 100094

摘要

针对 OLED 器件发光层精细有机材料内微量杂质导致的器件发光效率衰减、寿命缩短、色偏等问题, 采用合成工艺优化、多步纯化联用等组合技术, 通过调节合成反应参数、筛选纯化工艺体系、搭建痕量杂质检测平台, 实现从实验室合成到工业化纯化的有机发光材料全流程纯度提升, 目标。结果表明, 经重结晶-柱层析-真空升华三步纯化组合工艺处理后, 可将 OLED 发光层核心有机材料纯度提至 99.99% 以上, 把金属离子杂质含量降到 1 ppm 以下, 把有机杂质含量降到 5 ppm 以下; 调整后的制备工艺可有效压制副反应产生, 从源头减少杂质生成。

关键词

OLED 器件; 发光层; 精细有机材料; 纯度提升; 纯化工艺

1 引言

OLED 器件依托自发光、柔性显示、响应速度快等特性, 为新一代显示和照明技术的核心发展方向, 发光层精细有机材料属 OLED 器件核心组成部分, 纯度高低直接决定器件的发光效率、使用寿命与显示精度^[1]。精细有机发光材料合成及制备阶段, 易受原料含杂质、合成副反应、纯化不彻底等影响引入少量有机杂质和无机杂质, 金属离子杂质可充当电荷传输陷阱, 有机杂质会诱发非辐射复合, 两者都会造成器件性能大幅下降, 高纯度属于 OLED 发光层有机材料的

核心技术指标^[2]。现阶段精细有机发光材料的纯化存在单步工艺纯化效率偏低、杂质检测精度欠缺、合成与纯化工艺衔接性弱等问题, 限制 OLED 器件性能提升^[3]。

2 OLED 器件发光层用精细有机材料纯度提升技术

2.1 原料精制与合成工艺

本次实验采用合成 DOBPF 和 NPB 的核心工业级原料, 用重结晶加减压蒸馏的组合工艺做精制处理。精细有机发光材料合成时产生的杂质, 主要来自未反应原料、反应副产物与催化剂残留, 改良合成工艺靠多参数协同调节, 从 3 个维度阻断杂质生成源头。一是精准把控原料摩尔比和反应时间, 促原料充分反应, 降低未反应原料残留量; 二是把控合

【作者简介】储士红 (1980—), 男, 中国安徽金寨县人, 硕士, 高级工程师, 从事显示材料研发与产业化研究。

适的反应温度和反应氛围,抑制茱环、芳胺环出现氧化、裂解等副反应,减少有机副产物产出;三是优化催化剂投放量,保障催化活性合格时,降低催化剂残留量,减少金属离子杂质占比。

2.2 多步纯化与联用工艺

仅靠一种纯化工艺没法提纯出高纯度的 OLED 发光层有机材料,本研究先单独测试重结晶、柱层析、真空升华、溶剂萃取这 4 种常用纯化工艺,选取 DOBPF 粗产物作为研究样本,分析各单步工艺的最优参数与纯化效果,最终数据证实重结晶、柱层析、真空升华 3 种工艺的纯化效果明显,溶剂萃取工艺纯化效率不高,不适合高纯度纯化。重结晶工艺采用正己烷-二氯甲烷混合溶剂(体积比 3:1)充当结晶溶剂,经 60℃ 恒温溶解后,按 2℃/h 的速率匀速降温,把结晶温度设为 0~5℃,实施 2 次重结晶,把材料纯度从 98.8% 提至 99.5%,把金属离子杂质含量控制在 5 ppm 以内,把有机杂质含量降到 30 ppm 以下,慢速度降温能让晶体慢慢生长,降低晶体中杂质包埋占比,增加结晶纯度。柱层析工艺用硅胶做固定相,正己烷-乙酸乙酯混合溶剂(体积比 10:1)作为流动相,把上样量设定为硅胶质量的 1%~2%,洗脱流速设为 1~2 mL/min,做完柱层析分离后,把材料纯度从 99.5% 提高到 99.90%,把有机杂质含量降到 10 ppm 以下,可高效去除重结晶工艺难分离的结构相近有机杂质。真空升华工艺采用的工艺参数为真空度 1×10^{-4} Pa、升华温度 220~230℃、保温时间 4~5 h。

3 痕量杂质检测平台搭建与纯度验证

3.1 痕量杂质精准检测平台搭建

本研究采用 HPLC-MS、ICP-MS、GC 等仪器,建成适

配 OLED 精细有机材料的痕量杂质检测平台,精准甄别有机杂质和无机杂质。检测有机杂质,采取 HPLC-MS 联用技术,用高效液相色谱分离杂质,质谱实现杂质定性和定量,检测下限为 1 ppm,能有效甄别材料里痕量有机副产物、未反应原料等有机杂质;针对金属离子杂质开展检测,采用 ICP-MS 技术,借助电感耦合等离子体实现样品离子化,靠质谱仪检测离子质荷比,精准量化金属离子,可实现 0.1 ppm 检测限,可检测多种 OLED 材料里常见的 Fe、Cu、Pd、Na 等金属离子杂质;检测小分子挥发性杂质,采取 GC 技术,最低可检测 0.5 ppm,能有效甄别材料内的溶剂残留和小分子挥发性杂质。

3.2 高纯度有机材料的结构与纯度验证

运用核磁共振波谱仪($^1\text{H-NMR}$ 、 $^{13}\text{C-NMR}$)、高分辨质谱仪(HRMS),表征经多步纯化联用工艺处理的 DOBPF 和 NPB 的结构,两种材料的 $^1\text{H-NMR}$ 、 $^{13}\text{C-NMR}$ 谱图与标准谱图完全相符,无杂峰显现;HRMS 测得的分子量与理论分子量偏差控制在 ± 0.002 范围内,证明纯化工艺没改动材料的分子结构,纯化操作没破坏材料的核心结构。用 HPLC 面积归一化法验证材料纯度,DOBPF 与 NPB 的 HPLC 谱图均呈现单一色谱峰,无杂质峰检出,纯度全部达到 99.99% 以上。

4 OLED 器件发光层用精细有机材料纯度提升效果

4.1 原料精制的杂质去除效果

由表 1 可知,采用重结晶-减压蒸馏联用工艺提纯后,各类核心原料纯度均升至 99.0% 以上,把金属离子杂质含量压低至 3 ppm 以下,把有机杂质含量降到 20 ppm 以下。

表 1 原料精制前后的纯度与杂质含量对比

| 原料名称 | 精制工艺 | 精制前纯度 (%) | 精制后纯度 (%) | 精制后金属离子杂质 (ppm) | 精制后有机杂质 (ppm) |
|------|--------------|-----------|-----------|-----------------|---------------|
| 茱 | 乙醇重结晶 + 减压蒸馏 | 98.2 | 99.5 | < 3 | < 20 |
| 1-萘胺 | 正己烷重结晶 | 98.5 | 99.6 | < 2 | < 15 |
| 溴苯 | 减压蒸馏 + 分子筛干燥 | 98.0 | 99.4 | < 1 | < 18 |
| 溴代联苯 | 二氯甲烷重结晶 | 98.3 | 99.5 | < 2 | < 16 |

4.2 多步纯化联用工艺纯度提升效果

单步纯化工艺筛选后的结果,搭建重结晶-柱层析-真空升华三步纯化联用流程,纯化处理 DOBPF 和 NPB 粗产物,先通过优化后的重结晶工艺对粗产物做初步提纯,去除大部分无机杂质和大分子有机杂质,把材料纯度升到 99.5% 以上;借助柱层析工艺分离结构相近的有机副产物,把纯度提至 99.90% 以上;收尾用真空升华工艺做深度纯化,移除痕量金属离子杂质与小分子有机杂质,产出超高纯度材料。

4.3 高纯度有机材料的 OLED 器件应用效果

测试高纯度精细有机材料对 OLED 器件性能的提升效果,采用两种不同工艺制备的材料制作 OLED 器件,分别是多步纯化联用工艺产出的高纯度材料,器件采用经典底发

射结构:ITO/HTL/EML/ETL/Al,空穴传输层(HTL)采用 NPB,发光层(EML)采用 DOBPF,电子传输层(ETL)由三(8-羟基喹啉)铝(Alq₃)构成,全部功能层都采用真空热蒸镀法制备,蒸镀速率设为 0.1~0.2 nm/s,蒸镀真空度设为 5×10^{-4} Pa,该器件有效发光面积是 4 mm²。用器件光电性能测试系统,测试两种材料制备的 OLED 器件的发光效率、亮度、色坐标等性能。高纯度材料生产的 OLED 器件,最大发光效率达 32.5 cd/A,较普通纯度材料做的器件提升 28%;最大亮度值达 18500 cd/m²,色坐标为(0.152, 0.063),与标准蓝光色坐标(0.150, 0.060)的偏差仅为 0.005,而普通纯度材料制备的器件色坐标为(0.165, 0.082)存在显著色偏。

5 结语

要提高 OLED 器件发光层精细有机材料的纯度，需建立原料精制 - 合成优化 - 多步纯化 - 杂质检测的全流程技术体系，围绕杂质源头控制、过程抑制、末端去除、效果验证 4 个环节，实现高纯度材料制备，单独优化某个环节，实现不了 99.99% 以上的超高纯度指标。未来可大量采用工艺适配性良好的纯度提升技术体系，实现茈类、芳胺类等多种 OLED 发光层精细有机材料的高纯度制备，给 OLED 核心

材料的高纯度、规模化制备找了可行的技术方向。

参考文献

- [1] 邢锦涛.成膜特性对OLED器件性能影响[J].中国科技信息, 2023, (03):116-119.
- [2] 邹源佐, 王丹.印刷OLED显示用发光材料进展[J].中国材料进展, 2021, 40(06):454-462.
- [3] 王海燕, 王宇, 李向阳, 等.高效磷光OLED材料的设计、合成与性能[J].化工设计通讯, 2020, 46(07):42-43.

Development and Engineering Application of Automatic FRP Shell Production Line

Songlin Zhou

Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composite Materials Group Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

Abstract

The manufacturing process of fiberglass membrane shells typically involves multiple steps, including material mixing, winding and layering, heating curing, demolding, surface turning and grinding, putty application and belt polishing, drilling, hydrostatic pressure testing, painting and baking, and packaging for storage. However, the numerous steps and low automation level of equipment have posed operational challenges for Company A. This paper analyzes the issues and causes in the development of automated fiberglass membrane shell production lines, proposes optimization suggestions, and evaluates the engineering application effects, aiming to provide reliable references for improving production efficiency and quality.

Keywords

Automated FRP membrane shell; Production line R&D; Engineering application

自动化玻璃钢膜壳生产线研发及工程化应用

周松林

连云港中复连众复合材料集团有限公司, 中国·江苏·连云港 222000

摘要

玻璃钢膜壳制造过程通常包含配料搅拌、缠绕铺层、加温固化、脱模、外表车削与打磨、打腻子与砂带抛光、打孔、静水压检测、喷漆烤漆、包装入库等环节。但由于工序较多,设备自动化程度不高,对A公司经营上造成了较大困难。为此,下文将对自动化玻璃钢膜壳生产线研发中存在的问题及其原因进行分析,并提出其优化建议,分析工程化应用效果,旨在为提高自动化玻璃钢膜壳生产效率与质量提供可靠参考。

关键词

自动化玻璃钢膜壳; 生产线研发; 工程应用

1 引言

玻璃钢膜壳兼具耐腐蚀与比强度优势,制造过程通常包含配料搅拌、缠绕铺层、加温固化、脱模、外表车削与打磨、打腻子与砂带抛光、打孔、静水压检测、喷漆烤漆、包装入库等环节。面对人工工序占比高、节拍波动大的不利情况,A公司认为有必要从工艺与装备两端同步推进自动化,形成可复制的工程化应用路径。

2 自动化玻璃钢膜壳生产线研发存在的问题

2.1 前端成形质量不稳定

在自动化玻璃钢膜壳生产线中,前端成形质量波动首先集中体现在包头加厚过渡区的外观上,纤维能否实现无滑移铺放直接关系包头质量。缠绕阶段若出现滑纱、毛纱结团、贫胶等现象,会造成包头圆顺度下降,包头坡面形成台阶,

内壁亦可能出现白斑、起泡或轻微分层等表观缺陷。此类缺陷在后续检验中常以筒身平整度不足、表面粗糙度偏高、端头壁厚不均与局部划伤风险增大等形式暴露。由于膜壳表面需满足车削、补腻子、砂带精磨及喷涂的工艺窗口,毛坯质量一旦偏离,就会引发修整工时叠加、返工率上升和批次节拍拉长,现场表现为等待与在制品积压增加,直接挤占打孔与试压等关键工序的有效产出。

2.2 打孔工序自动化程度低

在膜壳生产线中,打孔工序仍以人工测量与划线为主,孔位基准依靠吊装就位、吊线校正、手动对刀和压板锁紧来建立,掉头加工时需重复校验,节拍随操作者波动。孔加工往往要按预钻孔、提孔、内外台阶压孔等顺序完成,底孔、中孔与台阶分别用不同刀具实现,频繁停机换刀与试切复核使有效切削时间被压缩,单班产出通常只有10~12只。定位误差在不同装夹方案下会叠加放大,导致孔距、对称度与同轴性离散,后续装配与试压更依赖返修与挑选。

2.3 现有的膜壳打磨设备效率较低

在膜壳自动化生产线上,现有打磨装备多以筒身直线

【作者简介】周松林(1992—),男,本科,工程师,从事玻璃纤维增强树脂基复合材料产品开发、工艺研究。

磨块抛光为主,对包头斜坡、端口台阶孔边等复杂曲面覆盖不足,形成“筒身可磨、包头需转序”的断点。固化后工件仍需吊装装夹、多次换带与复磨,包头往往转入车床修形,再经历刮腻子、晾干和二次砂带精磨,工序串联使单件周转时间显著增加,现场常出现等待机床与等待腻子固化并存的现象。打磨轨迹与压力控制更多依赖人工经验,难以稳定实现随形贴合与恒定接触,同批产品外表面粗糙度离散、打磨质量参差不齐。

2.4 喷涂周期长

膜壳喷涂段通常按底漆喷涂、流平干燥、细磨整平、再喷面漆并入烤漆房固化的顺序组织,膜壳在喷房与打磨区之间频繁转运与等待。底漆多用于增加漆膜厚度并遮盖微孔,喷后需留出充分固化时间,再进行水磨或砂纸精磨,磨后还要反复擦拭除油除水并重新遮蔽不喷区域,才能进入面漆段。面漆喷涂要求喷房洁净、门体关闭、温度与风向风速稳定,喷枪口径与喷距需逐批调整,准备与清场占用作业窗口。烘烤阶段存在固定温度区间与保温时间,装卸、冷却与复检同样占位,批次衔接不顺时常跨越多个班次,单批完成喷涂往往延至次日。

3 自动化玻璃钢膜壳生产线研发存在问题的主要原因

3.1 铺层路径与包头几何不匹配

铺层路径与包头几何不匹配是引发前端成形质量不稳定的主要原因,这主要是因为铺层顺序与受力走向、缠绕纱搭接角度不协调,尤其在包头区域坡度偏大时,纱带在曲率突变处更容易发生局部张力失衡,进而出现滑纱、起皱、搭接不均、局部树脂富集/贫化等缺陷。上述缺陷一旦形成,会直接表现为膜壳表面质量波动、后续车削与修整量增大,最终把“成形端的不稳定”传递到打磨与喷涂环节,形成连锁放大效应。

3.2 测量定位依赖人工导致节拍受限

目前打孔环节的关键瓶颈不在“钻孔动作本身”,而在测量、找正、定位与复核几乎都靠人工完成。人工定位带来的典型后果是:一是节拍受操作者熟练度影响,效率波动大;二是定位基准一致性不足,容易出现孔位偏差、重复返工;三是测量与定位占据主工时,导致设备利用率低。综合来看,本质原因是缺少稳定的定位基准体系与自动测量/对位/夹持的一体化装置,使得打孔无法形成可复制的标准节拍。

3.3 缺陷源头导致打磨余量大且工装适配不足

当前打磨效率低,很大一部分是被前端成形缺陷与表面粗糙度“拖慢”的。也就是说,表面起伏大、局部滑纱/搭接痕明显,会迫使打磨需要更多遍数、更长接触时间才能达到喷涂要求的粗糙度窗口。同时,现有打磨设备往往还存在两类共性不足。一是贴合与随形能力不足,包头曲面区域

难以保持稳定压力与接触面积,导致效率下降且一致性差,包头打磨困难;二是除尘与磨料管理不充分,粉尘堆积会降低切削效率、加速磨料钝化,进一步拉长工时。

3.4 依赖底漆补偿表面质量引发工序叠加

当前需要通过喷底漆来提升漆面质量,说明膜壳前道表面状态(粗糙度、孔隙/纹理、搭接痕等)未能稳定进入可直接面漆的窗口,只能用底漆进行填充、找平、遮盖,这会导致喷涂周期被多重因素拉长。具体包括:一是工序叠加,底漆喷涂、流平、固化/干燥、打磨修补再进入面漆;二是返修概率上升,底漆阶段暴露的针孔、波纹、砂痕需要二次处理;三是节拍被干燥固化牵制,喷涂本体时间占比不高,但等待时间显著。

4 自动化玻璃钢膜壳生产线研发的优化建议

4.1 优化铺层顺序与包头坡面角度

第一,重排铺层顺序,先锁定过渡区再形成外观层。将包头加厚区的关键层前置,优先布置对抗滑移与保证圆顺度的“约束层/锁边层”,使纤维带在过渡区先形成稳定受力框架,再逐步叠加厚层,最后再铺设外观修饰层。让过渡区在早期就具备抗剪与抗位移能力。第二,减小包头坡度并拉长过渡段,使厚度变化更可控。将加厚过渡从“短而陡”调整为“长而缓”,通过减小坡度、延长过渡长度,让每一层在坡面上的搭接长度更充分,降低纤维带在局部曲率突变处的应力集中与滑移概率。第三,围绕过渡区设置可执行的铺放控制点,确保顺序与坡面方案落地。在包头过渡区建立关键控制点,例如每一段的搭接起止位置、加厚层的递增节距以及外观层的收尾位置,形成与程序一致的检查项(如过渡区层次完成后再进入下一段)。通过顺序节点清晰、位置一致性可核对的方式,减少批次间波动,避免因毛坯偏离导致的返修叠加和在制品积压。

4.2 提高打孔的自动化程度

第一,建立统一的定位基准,减少人工校正环节。以膜壳端面与筒身外圆作为统一基准,设计一套“快速夹紧自动找正”的定位组件,包含V形支承或滚轮托架、端面限位、轴向顶紧与旋转角度限位机构,使吊装就位后可一次完成中心与角度的基准建立。夹具上预留基准块与定位销,换批或掉头时直接复位,避免重复吊线校正与手动对刀,把孔位误差控制在夹具与程序可控范围内。第二,开发自动打孔设备方案,合并工序并减少换刀停机。按“预孔水咀孔台阶”工艺路径进行整机方案设计,优先采用带刀库或多主轴的结构,将底孔中孔台阶加工在同一装夹下连续完成,通过自动换刀或多刀位切换替代频繁停机换刀与试切复核。第三,把辅助动作纳入设备节拍,提升连续作业能力。将孔位复测、冷却水加注与排屑清理改为设备自带功能配置,例如设置简易测头用于孔位复核、冷却液自动启停与定量补给、螺旋排屑或气液排屑装置,减少人工衔接停歇点。配套编制

三类基层可执行的点检表,分别覆盖装夹状态确认、刀具寿命管理与孔位抽样检验,将定位建立、加工过程与质量复核固化为标准化作业流程,以减少节拍波动并降低返修与挑选的几率^[1]。

4.3 可随形自动打磨设备联动改造

首先,优化膜壳端部涨紧与支撑体系。将膜壳旋转由电机驱动统一控制,两端内夹持采用气动涨塞实现快速定位与可靠夹紧,兼顾夹持精度与夹紧力,并可通过更换涨塞规格适配不同型号膜壳。在筒体下方增设尼龙辊支撑,形成端部定位 轴向限位 下部托撑的稳定结构,降低打磨过程的振动与跳动,减少复磨与返工。第二,配置自动打磨小车。在床体上增设自动打磨小车,小车集成打磨装置与粉尘收集装置。小车结构采用固定架加双行走伺服电机方案,伺服输出端配置行走齿轮并与床体齿条啮合,实现稳定直线进给;小车顶部布置压紧气缸,带动磨块压紧架与调整机构,通过气压调节实现磨块下压力可控,并允许磨块随形上下,覆盖包头斜坡、端口过渡与孔边台阶等区域,减少工序断点。第三,完善电路与控制系统。建立计算机电路控制系统,将膜壳旋转、打磨小车行走速度与砂带打磨机启停纳入联动控制,按工位设定转速、进给与压紧气压的参数组合,使受力与速度同步匹配,避免人工凭经验调压调速造成的粗糙度离散。

4.4 漆层路径精简与表面质量前控

第一,取消底漆工序。在玻璃钢基材耐腐蚀性能满足使用条件的前提下,将“底漆喷涂 流平干燥 细磨整平”从流程中剔除,喷涂段采用单道面漆成膜,直接进入烘烤固化与复检。底漆原本用于增厚与遮盖微孔,若前道成形与打磨已能稳定控制表面缺陷,则单涂体系可显著减少等待、转运与二次遮蔽等非加工时间,同时降低因底漆打磨带来的返工风险。第二,把表面质量控制前移到成形与打磨段。以包头过渡区为重点,将铺层顺序与包头坡面匹配优化落到工艺参数上,降低坡面台阶与拉毛来源;同步通过提升打磨装备的随形能力与受力稳定性,将粗糙度和局部微孔控制在面漆可接受范围。车削量与补腻子量随之下降,喷涂前的精磨、擦拭与遮蔽次数减少,使喷房准备窗口更集中,批次衔接更顺畅^[2]。

5 自动化玻璃钢膜壳生产线工程化应用效果分析

5.1 包头成形平滑过渡实现免车削

针对高压力与多开孔膜壳包头大、斜坡易滑纱的问题,通过调整铺层顺序并采用先短后长的加厚策略,使各加厚层起点与终点错开,叠加网眼布辅助过渡,包头变加厚区的厚度梯度更连续,斜坡台阶与拉毛显著减少。工艺稳定后,包

头可直接进入打磨环节,不再依赖车床先修形再打磨。以单只膜壳计,包头切削量约减少 1kg,同时打磨可控性更好,包头表面一致性随之提升。

5.2 打孔定位与工序切换实现标准化增产

科学选择自动钻孔设备型号,使用双龙门三工序打孔机,能够在排钻以及膜壳刀具间完成顺利切换。利用排钻进行筛管打孔,并利用开孔器进行膜壳打孔,实现了全自动定位,钻孔、提孔、压孔的自动切换。这样一来能有效避免了人工划线、定位等低质低效的问题。完成初次定位后,可以实现标准化打孔,加工效率提高 120%,实现产量的大幅增长。

5.3 表面质量提升带动喷涂工序缩短

更新与改造膜壳打磨设备后,包头免车削实现了常态化运行,产品可以一次打磨完直线段的筒体和两端凸起的包头,在打磨效率提升 80% 的同时,有效抑制了表面的气孔数量,有效控制其粗糙程度,膜壳表面打磨质量得到大幅提升从而具备了直接喷面漆的条件,从而减少了喷底漆的工序,经过测试,在面漆厚度达到 50um 以上,即可达到要求的表面质量,实现免喷底漆的目的,可降低成本 10%。

5.4 产能与成本双向改善

经过以上工艺升级后,后续各工序能从每天单班产量提升 80%,人工成本降低 50%,且每只膜壳可节省底漆等材料费用约 10%。通过节拍分析定位瓶颈,再以提升前道质量、装备自动化、功能集成、工序压缩的路径实施,A 公司成功能够实现产能与成本的双向改善^[3]。

6 结语

本文以 A 公司自动化玻璃钢膜壳生产线的落地,以优化铺层顺序与包头坡面角度、提高打孔的自动化程度、可随形自动打磨设备联动改造以及漆层路径精简与表面质量前控为主线展开。实践表明,经过针对性地优化与改进,自动化玻璃钢膜壳生产线实现包头成形平滑过渡实现免车削,打孔定位与工序切换实现标准化增产,表面质量提升带动喷涂工序缩短以及产能与成本双向改善,说明该方案具备推广条件,可作为后续玻璃钢膜壳产线扩展与标准化建设的技术基础。

参考文献

- [1] 荆蓉,张锐涛,孟雨辰,等.玻璃纤维/聚丙烯复合纤维纱拉挤成型过程[J].复合材料科学与工程,2020(5):7.
- [2] 孔启航.浅析玻璃钢设备在离子膜烧碱装置中的应用[J].中华建设,2020.
- [3] 李厥瑾.基于PLC的玻璃钢拉挤生产线控制系统的研究与开发[D].中国海洋大学[2025-12-31].