

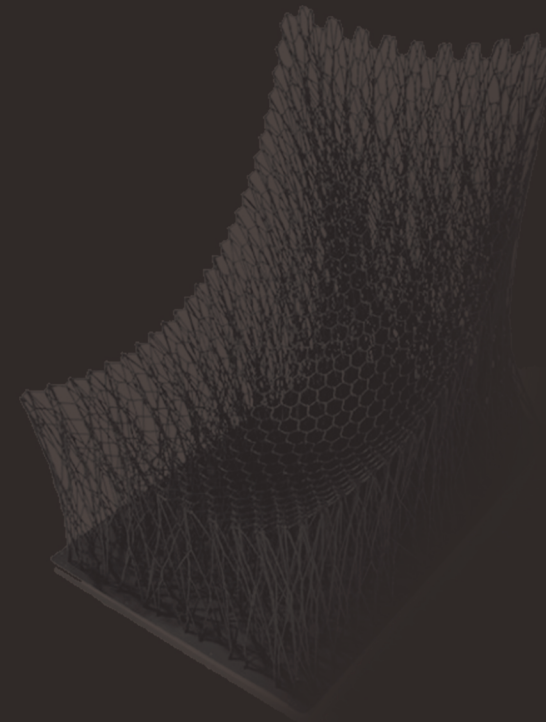


03  
2025

# 材料科学与应用技术

Materials Science and Applied Technology

Volume 4 Issue 3 August 2025 ISSN 3060-883X (Print) 2811-0307 (Online)



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

E-mail: [contact@nassg.org](mailto: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 4 Issue 3 August 2025 ISSN 3060-883X (Print) 2811-0307 (Online)



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

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

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



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 4 Issue 3 August 2025

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  | 海水介质 316L 不锈钢应力腐蚀开裂的临界条件分析与预测模型<br>/ 李强  |    |                                                           |  | / 鲁锋涛 祁本利 韩共乐 张海鹏 |
| 4  | 多主元烧绿石重离子辐照效应与硬化机制研究<br>/ 赵铭浩            | 36 | 绿色低碳背景下炭素材料与铝电解工艺的协同发展<br>/ 王伟红                           |  |                   |
| 8  | 金属板材室温抗拉强度测量不确定度评定和分析<br>/ 陈荟竹           | 39 | 碲烯范德华异质结的物性研究与应用<br>/ 江靖雯                                 |  |                   |
| 12 | 金属材料加工过程中的缺陷与控制探讨<br>/ 张凌云               | 42 | 基于扩展有限元 XFEM 的 TC21 钛合金应力强度因子数值模拟分析<br>/ 高阳 田晨超 张娟 张浩 陈安琦 |  |                   |
| 15 | 商品混凝土绿色生产技术优化及碳排放控制路径研究<br>/ 苏益军         | 45 | 304 不锈钢 TIG 焊接接头组织与性能分析<br>/ 黄逸兴                          |  |                   |
| 18 | 聚丙烯基复合材料的增韧改性及性能研究<br>/ 董昱恺              | 48 | 植物功效成分提取新方向：道地植物单一成分的天然比例复配<br>/ 王安宁 侯森                   |  |                   |
| 21 | 基于光固化 3D 打印技术的塑胶模具快速响应小批量市场需求策略<br>/ 蔡霆峰 | 51 | 船舶钛合金表面高分子防污涂层的制备与性能研究<br>/ 胡一鸣 周龙玉 胡晨 朱浩强 高海涛            |  |                   |
| 24 | 陶瓷涂层对隔膜针刺强度的影响机制研究<br>/ 吴海洋              | 54 | TA1 钛合金板材单向拉伸力学性能及各向异性研究<br>/ 李轩 赵刚 李国刚 邵若伟               |  |                   |
| 29 | 钕铁硼永磁体稀土元素回收进展<br>/ 安慧琳 江泽佐 赵建华 王欣鹏 何春林  | 58 | 食品安全胶体金快检技术培训痛点与解决对策探析<br>/ 陈亮宇                           |  |                   |
| 33 | 三元乙丙橡胶注压成型工艺探究                           | 61 | 中厚管线钢板非分层探伤不合分析及质量提升<br>/ 孔雅                              |  |                   |

- 1 Analysis and prediction model of critical conditions of stress corrosion cracking of 316L stainless steel in seawater medium  
/ Qiang Li
- 4 Study on Heavy Ion Irradiation Effects and Hardening Mechanisms in Multi-Principal Element Pyrochlores  
/ Minghao Zhao
- 8 Evaluation and analysis of Uncertainty in the measurement of tensile strength of metal sheets at room temperature  
/ Huizhu Chen
- 12 Discussion on defects and control in the processing of metal materials  
/ Lingyun Zhang
- 15 Research on Optimization of Green Production Technology for Commercial Concrete and Carbon Emission Control Pathways  
/ Yijun Su
- 18 Study on toughening modification and properties of polypropylene matrix composites  
/ Yukai Dong
- 21 A strategy for plastic mold rapid response to small batch market demand based on light curing 3D printing technology  
/ Tingfeng Cai
- 24 Study on the influence mechanism of ceramic coating on needle puncture strength of diaphragm  
/ Haiyang Wu
- 29 Progress in rare earth element recovery of NdFeB permanent magnets  
/ Huilin An Zezuo Jiang Jianhua Zhao Xinpeng Wang Chunlin He
- 33 Exploration of Injection Molding Process for EPDM Rubber  
/ Fengtao Lu Benli Qi Gongle Han Haipeng Zhang
- 36 Collaborative Development of Carbon Materials and Aluminum Electrolysis Process in the Context of Green and Low-Carbon Transformation  
/ Weihong Wang
- 39 Physical properties research and application of tellurene van der Waals heterojunction  
/ Jingwen Jiang
- 42 Numerical Simulation Analysis of Stress Intensity Factor of TC21 Titanium Alloy Based on Extended Finite Element Method (XFEM)  
/ Yang Gao Chenchao Tian Juan Zhang Hao Zhang Anqi Chen
- 45 Analysis of Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel TIG Welded Joints  
/ Yixing Huang
- 48 New Directions in Plant Active Ingredient Extraction: Natural Proportional Compound of Single Active Components from Authentic Plants  
/ Anning Wang Sen Hou
- 51 Preparation and Performance Study of Polymer Anti fouling Coating on Ship Titanium Alloy Surface  
/ Yiming Hu Longyu Zhou Chen Hu Haoqiang Zhu Haitao Gao
- 54 Study on unidirectional tensile mechanical properties and anisotropy of TA1 titanium alloy sheet  
/ Xuan Li Gang Zhao Guogang Li Ruowei Shao
- 58 Analysis of Pain Points and Countermeasures in Training on Rapid Detection Technology of Food Safety Colloidal Gold  
/ Liangyu Chen
- 61 Analysis and quality improvement of non-layered flaw detection for medium thick pipeline steel plates  
/ Kong Ya



# Analysis and prediction model of critical conditions of stress corrosion cracking of 316L stainless steel in seawater medium

Qiang Li

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

This study explores the mechanisms and critical conditions of stress corrosion cracking (SCC) in 316L stainless steel in seawater environments, revealing the electrochemical-mechanical coupling failure mechanism under the combined effects of anodic dissolution and hydrogen embrittlement. Environmental parameters, material properties, and stress states are identified as the primary influencing factors, with their interactions exhibiting significant nonlinear characteristics. A predictive model is developed through multi-parameter coupling analysis, proposing a comprehensive protective strategy that includes environmental regulation, material optimization, and stress management. In practical applications, it is essential to integrate critical stress thresholds and corrosion kinetics parameters, achieving multi-dimensional prevention and control through optimized welding processes, surface modification, and online monitoring, thereby providing theoretical support for SCC risk assessment and life prediction of marine equipment.

## Keywords

stainless steel; stress corrosion cracking; protection

# 海水介质 316L 不锈钢应力腐蚀开裂的临界条件分析与预测模型

李强

中广核核电运营有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

## 摘 要

探讨海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂机理及临界条件, 揭示阳极溶解与氢脆协同作用下的电化学-力学耦合失效机制。环境参数、材料特性及应力状态被确认为主导因素, 其交互作用呈现显著非线性特征。基于多参数耦合分析构建预测模型, 提出环境调节、材料优化与应力管理的综合防护策略。工程应用需结合临界应力阈值与腐蚀动力学参数, 通过焊接工艺优化、表面改性及在线监测实现多维防控, 为海洋装备的 SCC 风险评估与寿命预测提供理论支撑。

## 关键词

不锈钢; 应力腐蚀开裂; 防护

## 1 引言

海洋环境中 316L 不锈钢的应力腐蚀开裂行为严重威胁海洋装备服役安全, 其临界条件受环境、材料及应力状态多重耦合作用。海洋大气环境下金属材料的腐蚀控制是保障海洋工程装备服役安全的核心挑战。随着我国“海洋强国”战略推进, 南海、东海等热带海域的装备腐蚀失效问题日益凸显。海洋工程装备的服役寿命与可靠性高度依赖于关键连接件的耐蚀性能。316L 不锈钢因其优异的耐蚀性和力学性能, 被广泛应用于海洋工程领域。然而, 在湿热、高盐雾、强辐

照的热带海洋大气环境中, 316L 不锈钢仍面临严重的局部腐蚀风险。

## 2 应力腐蚀开裂机理

### 2.1 阳极溶解机制

阳极溶解机制作为应力腐蚀开裂的核心机理之一, 其本质是金属在特定环境与应力协同作用下的电化学腐蚀过程。在海水介质中, 316L 不锈钢表面因氯离子侵蚀破坏钝化膜, 暴露出活性金属基体, 形成局部微电池。阳极区域发生金属原子电离, 电子通过基体传导至阴极区参与氧还原反应, 构成自催化溶解循环。该过程受环境因素显著影响: 氯离子浓度升高会加速钝化膜破裂, 而溶解氧含量则直接关联阴极反应速率。应力作用通过促进位错运动加剧阳极溶解,

【作者简介】李强 (1989–), 中国湖北咸宁人, 本科, 工程师, 从事静止机械密封研究。

一方面使新生裂纹尖端持续暴露于腐蚀环境,另一方面导致局部应变集中区成为优先溶解通道。值得注意的是,阳极溶解主导的 SCC 通常表现为沿晶或穿晶裂纹形貌,裂纹扩展路径与晶界析出相或局部应变分布密切相关。实验研究表明,当阳极溶解速率超过临界阈值时,裂纹尖端难以通过再钝化实现自修复,最终导致材料失稳断裂。

## 2.2 氢脆开裂机制

氢脆开裂机制是海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂的另一重要机理,其核心在于氢原子在应力作用下的扩散与富集行为。在腐蚀环境中,阴极反应生成的氢原子可吸附于金属表面,部分氢原子渗透进入金属晶格。这些氢原子在应力梯度驱动下向拉应力区迁移,并在晶界、夹杂物或位错等缺陷处聚集形成氢分子,产生局部高压导致微裂纹萌生。316L 不锈钢的奥氏体组织虽具有较低氢扩散系数,但应变诱导马氏体相变会显著提高氢脆敏感性。氢原子还通过降低原子键结合能或促进位错运动等方式削弱材料力学性能。氢脆主导的 SCC 裂纹通常呈现沿晶特征,裂纹扩展速率与环境氢浓度、材料氢陷阱密度及应力水平呈正相关。需特别指出,该机制与阳极溶解机制存在本质差异:氢脆裂纹尖端无明显腐蚀形貌,且裂纹扩展具有突发性,在表观应力强度因子远低于材料断裂韧性时即可能发生失稳断裂。

## 2.3 协同作用

协同作用是海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂过程中阳极溶解机制与氢脆开裂机制共同作用的结果。两种机制并非独立存在,而是相互促进,形成正反馈循环。阳极溶解导致裂纹尖端局部酸化,促进氢离子还原反应,增加氢原子渗透量;同时,氢原子在金属内部的富集又降低了局部区域的断裂韧性,加速裂纹扩展。应力作用不仅为氢原子扩散提供驱动力,还通过塑性变形破坏钝化膜,加剧阳极溶解过程。在协同作用下,裂纹扩展速率显著高于单一机制主导的情况。316L 不锈钢的奥氏体-马氏体相变区域尤其容易成为协同作用的敏感区,相变产生的微观应变场既促进氢原子聚集,又加速局部阳极溶解。值得注意的是,协同作用的强度与环境参数密切相关:氯离子浓度升高会强化阳极溶解组分,而阴极极化则可能增强氢脆组分。这种机制耦合使得 SCC 行为呈现复杂的非线性特征,单纯基于单一机制的预测模型往往难以准确描述实际失效过程。

# 3 影响 SCC 的关键因素

## 3.1 环境

环境因素是影响海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂 (SCC) 行为的关键变量。海水中的氯离子浓度直接影响钝化膜的稳定性,高浓度氯离子促进局部腐蚀坑的形成,为裂纹萌生提供优先位置。溶解氧含量通过调控阴极反应速率影响腐蚀进程,而 pH 值的变化则可能改变金属表面膜的化学

组成。温度升高通常会加速腐蚀反应动力学,同时促进氢原子扩散。海水流速对 SCC 的影响具有双重性:适度流速可减少腐蚀产物沉积,但过高流速可能导致冲刷腐蚀。此外,海洋生物附着可能形成氧浓差电池,加剧局部腐蚀。需特别注意的是,环境因素的协同效应往往比单一因素影响更为显著,如高温与高氯离子浓度的组合会显著降低材料的 SCC 抗力。在实际海洋环境中,这些参数通常呈现动态变化特征,使得环境因素的量化评估变得尤为复杂。

## 3.2 材料

材料特性是决定 316L 不锈钢在海水介质中抗应力腐蚀开裂 (SCC) 性能的内在因素。该材料的化学成分波动,特别是钼、镍等合金元素含量的微小变化,直接影响钝化膜的稳定性与自修复能力。晶界碳化物析出会形成局部微电偶,增加晶间腐蚀敏感性;而  $\delta$  铁素体相的存在可能改变氢扩散路径。冷加工导致的位错密度升高既可能通过应变诱导马氏体相变促进氢脆,又可能因残余应力加剧局部阳极溶解。表面状态同样关键,机械加工产生的表面缺陷可能成为裂纹优先形核位点,而适当的表面处理可改善耐蚀性。值得注意的是,微观组织均匀性对 SCC 抗力具有重要影响,偏析带或夹杂物聚集区往往成为腐蚀扩展通道。材料批次间的性能差异主要源于冶炼工艺参数波动,这导致相同环境条件下可能出现不同的 SCC 行为。热处理制度通过调控相组成和晶界特征,进一步影响材料在腐蚀环境中的长期服役表现 [1]。

## 3.3 应力状态

应力状态是影响 316L 不锈钢在海水介质中应力腐蚀开裂 (SCC) 行为的重要力学因素。施加应力水平必须超过特定阈值才能引发 SCC,该阈值与材料强度和環境腐蚀性密切相关。应力集中现象尤为关键,结构不连续处如缺口、焊缝等部位的局部应力增强会显著降低 SCC 临界条件。动态载荷比静态应力更具破坏性,循环应力作用会加速裂纹扩展速率。残余应力作为初始应力场的重要组成部分,焊接或冷加工产生的残余拉应力可能使材料在无外载情况下仍发生 SCC。值得注意的是,应力方向与晶粒取向的关系影响裂纹扩展路径,沿特定晶向的应力作用会促进穿晶或沿晶开裂。多轴应力状态比单轴应力更易诱发 SCC,主应力比值的变化会改变裂纹尖端应力强度因子。应力作用时间同样重要,长期低应力作用可能通过蠕变-腐蚀交互作用导致延迟开裂。应力状态的这些特征使得 SCC 预测必须综合考虑静态与动态载荷、残余应力以及局部应力集中效应。

# 4 SCC 的防护改进

## 4.1 环境调节

介质改性是降低 316L 不锈钢在海水环境中应力腐蚀开裂风险的有效途径。通过添加缓蚀剂可改变溶液化学性质,如硝酸盐等氧化性物质能促进钝化膜修复,而硫代硫酸盐等

还原剂可抑制阴极析氢反应。调节氯离子浓度至临界值以下可延缓点蚀诱发过程,同时控制 pH 值在 8.5-9.5 范围有助于维持钝化膜稳定性。除氧处理能显著降低阴极反应速率,而添加微量重金属离子如  $Ce^{3+}$  可改善表面膜保护性能。需特别注意各类添加剂间的协同效应,不当组合可能反而加速局部腐蚀。在封闭系统中,采用离子交换树脂去除有害离子是可行的工程解决方案。介质改性措施应与材料特性及工况条件相匹配,方能实现最优防护效果 [2]。

温度控制是调节 316L 不锈钢在海水环境中应力腐蚀开裂 (SCC) 敏感性的重要手段。温度升高会加速电化学反应速率,促进钝化膜破裂和氢渗透过程,因此将工作温度控制在 60℃ 以下可有效降低 SCC 风险。在温度变化频繁的工况中,需避免因热循环引起的热应力叠加机械应力。对于高温海水环境,采用冷却系统维持恒温状态比间歇降温更具防护效果。值得注意的是,温度梯度导致的局部电偶腐蚀也需要防范,均匀的温度分布有助于维持材料表面电化学性能一致性。在设备设计阶段应充分考虑传热路径对温度场的影响,避免形成高温应力集中区域。温度控制需与介质成分调节协同实施,方能实现最优防护效果。

#### 4.2 材料优化

材料优化是提升 316L 不锈钢抗应力腐蚀开裂性能的根本途径。通过调整合金成分,增加钼含量可增强钝化膜稳定性,而降低碳含量可减少晶界碳化物析出。采用双相不锈钢或高纯奥氏体不锈钢等替代材料可显著改善耐蚀性。晶粒细化处理能够阻碍裂纹扩展路径,而适当的热处理工艺可消除不利相组织。表面改性技术如激光熔覆、离子注入等可在材料表层形成防护屏障。材料选择需综合考虑力学性能与耐蚀性的平衡,过高的强度反而可能增加 SCC 敏感性。在焊接工艺中,选用匹配的焊材和优化的焊接参数对保证接头耐蚀性至关重要。材料优化应与具体服役环境特性相结合,才能实现最佳防护效果。

#### 4.3 应力管理

应力管理是控制 316L 不锈钢在海水环境中应力腐蚀开裂的关键环节。通过结构设计优化可降低局部应力集中系数,采用圆角过渡和均布载荷设计能有效缓解应力峰值。残余应力的消除尤为重要,可通过退火热处理或振动时效工艺实现。在服役过程中,保持工作应力低于临界应力强度因子  $K_{ISCC}$  是基本准则。对于承受交变载荷的构件,需特别注意疲劳应力与腐蚀环境的协同作用。预应力处理技术能在材料表层引入压应力,从而抑制裂纹萌生。在装配环节,应避免强制组装导致的附加应力。应力管理措施需结合材料特性和环境参数进行系统设计,才能达到预期的防护效果。

## 5 工程应用指南

### 5.1 防护对策

针对海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂 (SCC) 的防护对策应采取多维度综合治理。在环境控制方面,需维持介质 pH 值在中性范围并控制氯离子浓度,同时通过热交换系统稳定工作温度。材料选择上宜采用高钼含量的改良型不锈钢或双相不锈钢,并对焊接接头进行固溶处理。结构设计应避免尖锐转角,采用有限元分析优化应力分布。定期实施无损检测可及时发现表面缺陷,阴极保护技术能有效抑制阳极溶解过程。对于关键承力构件,建议建立基于临界应力参数的服役寿命评估体系。防护涂层体系的选择需考虑与基材的相容性和长期耐久性。各防护措施应依据具体工况条件进行针对性组合,形成完整的防护方案 [3]。

### 5.2 案例

某海上平台 316L 不锈钢管道系统在服役三年后出现多处应力腐蚀开裂。经分析,开裂主要发生在焊接热影响区,该区域存在明显的残余应力和晶间贫铬现象。现场检测显示介质温度波动导致氯离子浓度周期性变化,加速了阳极溶解过程。针对该案例,工程团队采取了多重改进措施:选用 2205 双相不锈钢替换关键管段,对焊接工艺参数进行优化以降低残余应力,并在系统中加装在线腐蚀监测装置。改造后跟踪监测表明,新系统在相同工况下运行五年未出现 SCC 失效。该案例验证了材料选择、应力控制和环境监测相结合的综合防护策略的有效性。

## 6 结论

综上所述,确立了海水介质中 316L 不锈钢应力腐蚀开裂的临界条件判定准则,阐明阳极溶解与氢脆的协同作用通过电化学生力学耦合驱动裂纹失稳扩展。环境参数、材料特性与应力状态的多维交互决定了断裂阈值。基于裂纹尖端局域化腐蚀动力学与氢扩散行为的协同建模,提出了涵盖环境调控、材料优化及应力管理的综合防护体系。该预测模型通过量化临界应力强度因子、氢渗透通量与腐蚀速率间的非线性关系,为海洋装备的 SCC 风险评估与寿命预测提供了理论框架及工程决策依据。

### 参考文献

- [1] 张华,李志刚,王磊.海水环境中316L不锈钢应力腐蚀开裂行为及机理研究[J].中国腐蚀与防护学报,2022,42(5):356-364.
- [2] 陈晓明,吴建波,刘海涛.海洋环境下奥氏体不锈钢氢脆敏感性影响因素研究[J].材料工程,2023,51(8):112-120.
- [3] 李明,赵国强,周卫东.基于多场耦合的海洋装备用不锈钢应力腐蚀寿命预测模型[J].机械工程材料,2024,46(2):45-53.

# Study on Heavy Ion Irradiation Effects and Hardening Mechanisms in Multi-Principal Element Pyrochlores

Minghao Zhao

Institute of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu, 211106, China

## Abstract

The safe disposal of high-level radioactive waste (HLW) represents a critical challenge for the sustainable development of nuclear energy. Pyrochlore ceramics are regarded as an ideal matrix for immobilizing actinide nuclides due to their exceptional chemical stability. However, conventional pyrochlores are susceptible to amorphization under intense irradiation fields, leading to structural failure. This study designed and fabricated four types of multi-principal element titanate pyrochlores (#1-#4). Utilizing 31 MeV Kr ion irradiation experiments combined with XRD, Raman spectroscopy, and Vickers hardness testing, the influence mechanisms of phase structure on irradiation-induced amorphization and hardness were systematically investigated. The results demonstrate that single-phase pyrochlores exhibit superior irradiation resistance, retaining partial crystalline diffraction peaks up to a fluence of  $1.36 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . In contrast, dual-phase materials experienced more severe amorphization and more significant irradiation hardening. Raman spectra revealed that irradiation intensifies lattice distortion and induces an order-disorder transition (pyrochlore  $\rightarrow$  fluorite). This research elucidates the correlation mechanism between phase structure regulation and irradiation resistance, providing a theoretical basis for designing irradiation-tolerant waste form matrices.

## Keywords

Pyrochlore, Heavy ion irradiation, Nuclear waste immobilization, Irradiation hardening, High-entropy ceramics

# 多主元烧绿石重离子辐照效应与硬化机制研究

赵铭浩

南京航空航天大学材料科学与技术学院, 中国 · 江苏 南京 211106

## 摘 要

高放废物 (HLW) 的安全处置是核能可持续发展的关键挑战之一, 烧绿石陶瓷因优异化学稳定性被视为锕系核素理想固化基材。然而, 传统烧绿石在强辐照场下易发生非晶化, 导致结构失效。本研究设计制备四种多主元钛酸盐烧绿石 (#1-#4), 通过 31 MeV Kr 离子辐照实验, 结合 XRD、拉曼光谱及维氏硬度测试, 系统研究相结构对辐照非晶化与硬度的影响机制。结果表明: 单相烧绿石抗辐照稳定性更高, 在注量  $1.36 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  下仍保留部分晶体衍射峰, 双相材料则非晶化程度更严重且辐照硬化更显著。拉曼光谱表明, 辐照加剧晶格畸变并诱导有序-无序转变 (烧绿石相  $\rightarrow$  萤石相)。本研究阐明相结构调控对抗辐照性能的关联机制, 为抗辐照固化基材设计提供理论依据。

## 关键词

烧绿石陶瓷; 重离子辐照; 核废料固化; 辐照硬化; 高熵陶瓷

## 1 引言

高放废物 (High-Level Radioactive Waste, HLW) 的安全长期处置是核能可持续发展的关键挑战。理想的固化基材需兼具优异的化学稳定性、高包容能力和卓越的抗辐照性能。人造岩石 (Synthetic rock, Synroc) 中的烧绿石结构陶瓷 ( $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ) 因其对锕系核素的高固溶度、良好化学稳定性及结构可调被视为极具前景的候选材料 [1]。然而, 传统单主元烧绿石陶瓷在实际 HLW 处置的强辐照场下, 易于发生

非晶化导致结构失效, 危及固化体长期安全性 [2]。因此, 提升烧绿石陶瓷的抗辐照性能至关重要。研究表明, 基于高熵理念的多主元设计是改善陶瓷性能的有效策略 [3]。通过引入多种尺寸的阳离子形成多主元烧绿石可增强晶格畸变与构型熵, 有望抑制辐照损伤缺陷的迁移积累和非晶化过程。然而, 多主元烧绿石相结构差异对其辐照响应及力学性能的影响机制尚不明确。

本研究制备了四种多主元钛酸盐陶瓷 ( $\text{SmGdDyErYb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ , ( $\text{NdSmEuHoLu}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ , ( $\text{LaNdErYbLu}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ , ( $\text{LaNdSmYbY}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ )。通过系统表征其在 31 MeV Kr 离子辐照前后的相结构和维氏硬度, 重点探究相结构差异对辐照诱导结构演变及辐照硬化效应的影响, 旨在揭示相结构调控对

【作者简介】赵铭浩 (2000-), 男, 中国河南驻马店人, 硕士, 从事放射性废物固化用陶瓷研究。

提升材料抗辐照性能的关键作用，为设计与优化高辐照稳定性核废料固化基材提供理论依据。

## 2 实验方法

### 2.1 原料及配方

根据烧绿石基陶瓷的物相形成特性，本研究采用真空热压烧结法制备高致密陶瓷块体，实验原料使用分析纯的稀土氧化物 ( $\text{RE}_2\text{O}_3$ ,  $\text{RE}=\text{La}$ 、 $\text{Nd}$ 、 $\text{Sm}$ 、 $\text{Eu}$ 、 $\text{Gd}$ 、 $\text{Dy}$ 、 $\text{Ho}$ 、 $\text{Er}$ 、 $\text{Tm}$ 、 $\text{Yb}$ 、 $\text{Lu}$ 、 $\text{Y}$ ) 和二氧化钛 ( $\text{TiO}_2$ )，以上原料均购自上海阿拉丁科技股份有限公司。多主元钛酸盐陶瓷具体组成如表 1 所示。

表 1 多主元钛酸盐陶瓷的成分、阳离子半径比和化学无序度

| 编号 | 化学式                                          | $R_{\text{RE}}/R_{\text{Ti}}$ | $\delta_{\text{size}}(\%)$ | $\delta_{\text{mass}}(\%)$ |
|----|----------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| #1 | $(\text{SmGdDyErYb})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ | 1.702                         | 3.36                       | 4.84                       |
| #2 | $(\text{NdSmEuHoLu})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ | 1.734                         | 4.5                        | 7.07                       |
| #3 | $(\text{LaNdErYbLu})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ | 1.731                         | 7.05                       | 9.46                       |
| #4 | $(\text{LaNdSmYbY})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  | 1.769                         | 5.84                       | 19.89                      |

### 2.2 样品制备

将表 1 所示材料按化学计量比称量，并于  $100^\circ\text{C}$  干燥 2 h 以去除水分。随后，以无水乙醇为分散介质，使用高能球磨机在 500 转每分钟的转速下球磨 24 h，获得混合粉末。采用 SG-XS1700 型马弗炉对该混合粉末进行预烧结 ( $1100^\circ\text{C}$ ，保温 24 h)。预烧结后的粉末在相同球磨参数下进行二次球磨 12 h。将所得预烧结粉体置于 FHP-828 型真空热压炉中进行致密化烧结：在真空度  $10^{-3}\text{ Pa}$ 、 $1200^\circ\text{C}$  烧结温度下，施加 50 MPa 压力并保温保压 30 min。烧结后的陶瓷块体先后采用 320 目至 2000 目的碳化硅砂纸进行粗磨，再使用金刚石悬浮液抛光至镜面。

### 2.3 辐照实验

将抛光后的样品送至中国科学院近代物理研究所进行 Kr 离子辐照实验。实验条件为：离子束流能量为 31 MeV，辐照注量设定为  $6.82 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}$  和  $1.36 \times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ ，辐照温度为  $350^\circ\text{C}$ ，真空度为  $5 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ 。

### 2.4 性能表征

X 射线衍射 (X-ray Diffraction, XRD) 使用 Malvern Panalytical 公司生产的 Empyrean 型 X 射线衍射仪多功能平台进行测试。测试使用  $\text{Cu K}\alpha$  靶 ( $\lambda=1.5406\text{ \AA}$ )，扫描速度为  $5^\circ/\text{min}$ ，扫描范围为  $10^\circ$ – $80^\circ$ 。拉曼光谱 (Raman spectroscopy) 采用 HORIBA HR Evolution 型高分辨率拉曼光谱仪表征，入射激光波长设定为 532 nm。使用维氏硬度仪测量多主元陶瓷材料的表面维氏硬度 (Vicker hardness)，测试参数为载荷 1 kg，保载时间 10 s。

## 3 结果与讨论

### 3.1 多主元钛酸盐陶瓷的结构表征

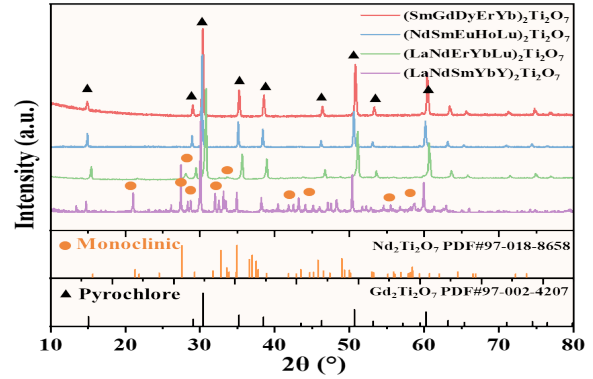


图 1 四种多主元钛酸盐陶瓷的 XRD 图谱

四种材料的 XRD 谱图如图 1 所示。通过与稀土钛酸盐标准 PDF 卡片对比，所有材料均在  $2\theta$  为  $29^\circ$ 、 $38^\circ$ 、 $46^\circ$  和  $53^\circ$  附近观察到典型的烧绿石结构超晶格衍射峰，分别对应 (311)、(331)、(511) 和 (531) 晶面，表明四种材料均存在烧绿石结构。相比之下，#3 和 #4 材料在  $2\theta$  为  $21^\circ$ 、 $33^\circ$  和  $42^\circ$  等多处出现明显的第二组衍射峰，归属于单斜相结构。这表明随着阳离子半径的增加，材料中烧绿石结构和单斜结构出现共存。化学无序度较大的材料内部晶格畸变更严重，其双相结构特征较为明显。综上，XRD 结果表明，通过调控组成元素的种类，可以实现对材料相结构的有效调控。

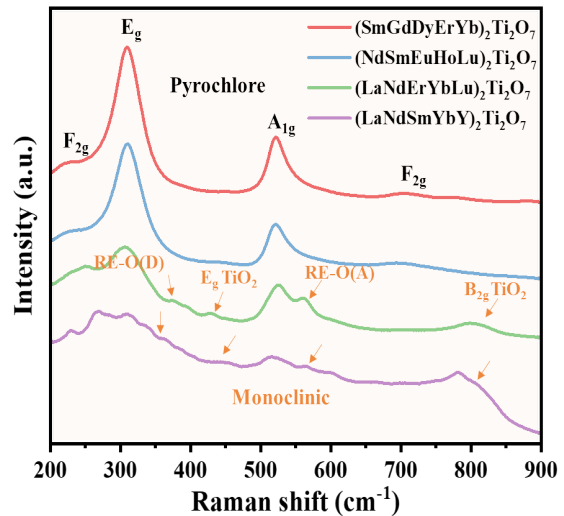


图 2 四种多主元钛酸盐陶瓷的拉曼光谱

烧绿石结构在  $200\sim 800\text{ cm}^{-1}$  区间内存在  $A_{1g}$ 、 $E_g$  和  $F_{2g}$  的拉曼振动峰，单斜结构在  $300\sim 800\text{ cm}^{-1}$  存在金属-氧键振动的特征峰 [4,5]。图 2 展示了四种多主元陶瓷的拉曼光谱。

所有材料均在  $230\text{ cm}^{-1}$  ( $F_{2g}$ )、 $300\text{ cm}^{-1}$  ( $E_g$ )、 $520\text{ cm}^{-1}$  ( $A_{1g}$ ) 及  $700\text{ cm}^{-1}$  ( $F_{2g}$ ) 处观察到烧绿石相的典型振动峰,说明样品中存在烧绿石结构。而在  $300\sim 650\text{ cm}^{-1}$  区间, #3 和 #4 材料呈现出明显额外的 RE-O 键振动峰,同时在  $750\text{ cm}^{-1}$  处检测到  $B_{2g}$  振动模式,这证实了两组材料中单斜相的存在,与 XRD 分析结果相一致。

### 3.2 多主元钛酸盐陶瓷辐照后的结构变化

离子辐照对多主元稀土钛酸盐陶瓷固化体的结构演化具有显著影响,通过拉曼光谱分析可深入揭示其微观损伤机制。图 3 展示了四种多主元钛酸盐陶瓷在经过不同注量下重

离子辐照后的拉曼光谱。可以明显观察到,四种材料的拉曼峰均发生宽化。随着辐照注量的增加,烧绿石相的  $A_{1g}$ 、 $E_g$  和  $F_{2g}$  拉曼峰逐渐宽化和减弱。同时,位于  $780\text{ cm}^{-1}$  附近的萤石结构的  $F_{2g}$  振动峰显著增强。这表明辐照破坏了材料结构的有序性,晶格结构由有序烧绿石相逐渐向无序萤石结构转变 [6]。在高注量的重离子辐照下,双相材料的烧绿石与单斜相的特征峰几乎完全消失,形成较宽的鼓包,而单相烧绿石材料仍保留部分有序结构,这证明单一烧绿石相结构具有更强的抗辐照能力。

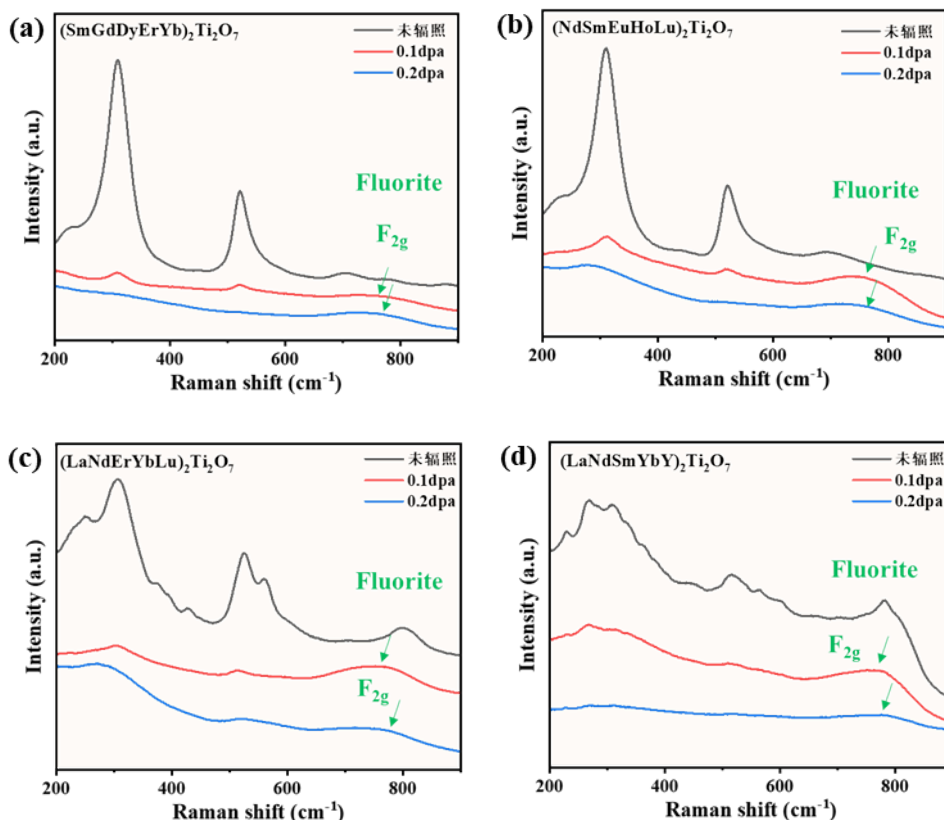


图 3 四种多主元钛酸盐陶瓷重离子辐照后的拉曼光谱

### 3.3 多主元钛酸盐陶瓷辐照后的结构变化

图 4 为四种多主元钛酸盐陶瓷重离子辐照前后的维氏硬度。通过对四种多主元稀土钛酸盐样品进行维氏硬度测试发现,在未辐照状态下,单相烧绿石结构样品因其较小的 A 位离子半径及较强的金属-氧键强,其维氏硬度高于双相结构样品。当 Kr 离子辐照剂量增至  $1.36 \times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$  时,所有样品的维氏硬度均达到峰值。其中,单相样品 #1 的硬度提升至  $1001.838\text{ Hv}$ ,增幅达  $4.54\%$ ,双相样品 #4 的硬度提升至  $938.92\text{ Hv}$ ,增幅为  $5.77\%$ 。结果表明,双相材料的辐照硬化效应更为显著。这源于双相材料对辐照损伤具有更高的敏感性。辐照硬化主要归因于高能离子轰击在晶体内部诱发的缺陷,加剧了晶格畸变程度。辐照诱导下,双相材料内部晶粒发生更显著的细化效应,进而导致单位体积内晶界密度

增加,提升辐照后材料的力学性能。

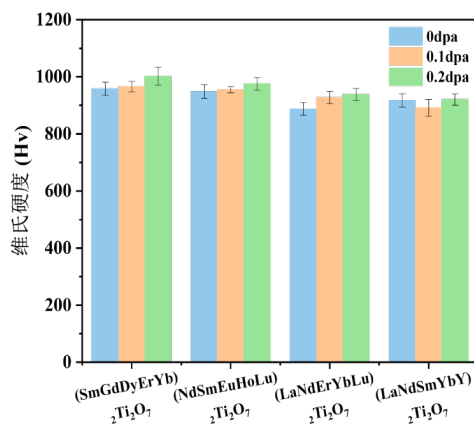


图 4 四种多主元钛酸盐陶瓷重离子辐照前后的维氏硬度

表 2 四种多主元钛酸盐陶瓷重离子辐照前后的维氏硬度

| 编号 | 维氏硬度 (Hv) |        |          |
|----|-----------|--------|----------|
|    | 0dpa      | 0.1dpa | 0.2dpa   |
| #1 | 958.32    | 966.05 | 1001.838 |
| #2 | 949       | 954.55 | 975.6    |
| #3 | 887.7     | 928    | 938.92   |
| #4 | 917.54    | 891.55 | 920.55   |

4 结论

本研究设计制备了四种多主元钛酸盐烧绿石陶瓷（#1-#4），系统研究了其在 31 MeV Kr 离子辐照下的结构演化行为与力学性能响应。结果表明，单相烧绿石材料展现出良好的抗辐照非晶化能力。拉曼光谱分析显示，辐照后烧绿石的特征峰  $A_{1g}$ 、 $E_g$  和  $F_{2g}$  发生宽化且强度减弱，而萤石相的  $F_{2g}$  峰显著增强，表明辐照驱动有序烧绿石结构向无序萤石结构的转变。相比之下，烧绿石 - 单斜双相材料由于对辐照更为敏感，在注量为  $1.36 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  时，单相材料仍保留部分衍射峰，而双相材料特征峰几乎完全消失，非晶化程度加剧。力学性能方面，所有样品均出现辐照硬化现象，其中双相材料的硬化效应更为显著，#4 样品硬度提升 5.77%。分析表明，硬化主要源于辐照诱导产生的晶格缺陷以及晶粒细化导致的晶界密度增加。

综上所述，维持单相烧绿石结构并通过多主元组分设计调控晶格畸变，是提升钛酸盐烧绿石材料抗辐照稳定性及

其力学性能的有效策略。本研究为耐辐照固化基材的成分优化设计提供了重要依据。

参考文献

[1] Weber W J, Navrotsky A, Stefanovsky S, et al. Materials science of high-level nuclear waste immobilization[J]. MRS bulletin, 2009, 34(1): 46-53.

[2] Ewing R C, Weber W J, Lian J. Nuclear waste disposal—Pyrochlore ( $A_2B_2O_7$ ): Nuclear waste form for the immobilization of plutonium and “minor” actinides[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(11): 5949-5971.

[3] Zhou L, Li F, Liu J X, et al. High-entropy  $A_2B_2O_7$ -type oxide ceramics: a potential immobilising matrix for high-level radioactive waste[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 415: 125596.

[4] Wang J, Wang J X, Zhang Y B, et al. Order-disorder phase structure, microstructure and aqueous durability of  $(Gd, Sm)_2(Zr, Ce)_2O_7$  ceramics for immobilizing actinides[J]. Ceramics International, 2019, 45(14): 17898-17904.

[5] Krishnankutty K, Dayas K R. Synthesis and characterization of monoclinic rare earth titanates,  $RE_2Ti_2O_7$  ( $RE= La, Pr, Nd$ ), by a modified SHS method using inorganic activator[J]. Bulletin of Materials Science, 2008, 31(6): 907-918.

[6] Taylor C A, Patel M K, Aguiar J A, et al. Bubble formation and lattice parameter changes resulting from He irradiation of defect-fluorite  $Gd_2Zr_2O_7$ [J]. Acta Materialia, 2016, 115: 115-122.

# Evaluation and analysis of Uncertainty in the measurement of tensile strength of metal sheets at room temperature

Huizhu Chen

Hainan Deep Sea Technology Innovation Center, Sanya, Hainan, 572024, China

## Abstract

Based on the importance of evaluating the measurement uncertainty of test parameters in the process of inspection and testing work, taking the tensile strength test of metal plates at room temperature as an example, this paper analyzes that in the actual measurement process of tensile strength and elongation after fracture parameters of a certain testing institution, under the influence of factors such as the accuracy grade of the mechanical testing machine used, the operational proficiency of the testing personnel, and the measurement repeatability, The source of uncertainty and the evaluation process provide a reference basis for the uncertainty evaluation work of the tensile strength test of metal sheets at room temperature, aiming to propose improvement measures for the subsequent laboratory quality control and promote the further improvement of the professional level and testing ability of technicians.

## Keywords

Metallic materials; tensile strength at room temperature; Evaluation of measurement uncertainty

# 金属板材室温抗拉强度测量不确定度评定和分析

陈荟竹

海南省深海技术创新中心, 中国·海南 三亚 572024

## 摘 要

本文立足于检验检测工作过程中测试参数测量不确定度评定的重要性, 以金属板材室温抗拉强度测试为例, 分析了某检测机构在实际抗拉强度和断后伸长率参数的测量过程中, 受到所使用的力学试验机准确度等级、检测人员操作熟练度、测量重复性等因素的影响下, 不确定度来源和评定的过程, 为金属板材室温抗拉强度测试的不确定度评定工作提供参考依据, 旨在对后续实验室质量控制提出改进措施, 促进技术人员专业水平、测试能力的进一步提升。

## 关键词

金属材料; 室温抗拉强度; 测量不确定度评定

## 1 引言

测量不确定的评定与分析是国内外相关规范和准则的强制要求, 国际上合格评定相关的各方组织一直对检验检测工作中呈报具体数值、定量分析项目的测量不确定度评定与分析工作非常重视, 测量不确定度检验检测机构技术能力的综合体现, 也会对测量数据的可信程度、可比程度和不可靠程度的带来重要的影响, 然而不确定度来源众多, 且受到技术人员经验和专业水平的影响较大, 仍需针对本机构实际的测量能力进行深入的分析和评定。

## 2 测量不确定度分析和评定工作的目的和意义

金属板材室温抗拉强度测试中测量不确定度的评定与

分析决定了测量数据的可信程度, 是检验检测机构技术能力的综合体现<sup>[2]</sup>, 受到仪器设备准确度等级、最大允许误差、实验人员操作熟练度、实验环境条件控制、测量重复性等多重因素的影响, 如力学环境检验实验室检测员在使用力学试验机依据国家标准 GB/T 228.1-2021《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》<sup>[1]</sup>要求进行金属材料室温拉伸试验对抗拉强度、最大力和断后伸长率三个参数进行测量时, 使用准确度等级为 1.0 级和 0.5 级的力学试验机, 具有 5 年以上测试经验的检测员和处于岗前培训期的检测员所获得的测量不确定度均存在差异, 综上所述, 检测项目的不确定度分析和评估是一个机构在人、机、料、法、环五个方面有效性控制的结果, 对我们更好的改进检测工作中的不符合项具有重要指导意义。

## 3 测量不确定度评定的实施过程

以金属材料抗拉强度和断后伸长率两个参数的测量为例, 现描述测量不确定度评定过程。

【作者简介】陈荟竹(1991-), 女, 中国海南三亚人, 硕士, 从事材料工程、海洋技术装备综合试验与检测、计量校准研究。

3.1 测量仪器设备

主要检测仪器设备信息见表 1。

3.2 被测对象

样品为中实国金 NILQC-202320210a 批次质控样品，

金属材料矩形横截面非比例试样，厚度 2.0mm，原始宽度 20mm，原始标距 80mm，平行长度 120mm，总长 270mm，材料表面光滑、平整。检测试样的抗拉强度  $R_m$ 、断后伸长率  $A$ 。

表 1 主要检测仪器设备信息

| 序号 | 设备名称  | 设备编号          | 规格型号     | 主要参数                                                      | 准确度等级或最大允许误差               | 有效期至       | 状态 |
|----|-------|---------------|----------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|------------|----|
| 1  | 力学试验机 | YQ-202212-007 | JD-1002A | 1. 测试行程：800mm;<br>2. 测试速度：(1-300) mm/min;<br>3. 容量：5000kg | 1 级，试验力示值准确度优于 $\pm 1.0\%$ | 2025.12.5  | 合格 |
| 2  | 游标卡尺  | LJ-202310-186 | 300mm    | 1. 测量范围 (0-300) mm<br>2. 分辨率：0.02mm                       | $\pm 0.02\text{mm}$        | 2025.12.11 | 合格 |

3.3 测量方法

根据 GB/T 228.1-2021《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》要求，在规定的条件下（包括各仪器设备处于校准有效期，且受控状态下），选用量程为 50kN 的力学试验机，选择基于平行长度估算的应变速率控制模式（ $A_2$ ）的测试方法，以 14.4mm/min 的加载速率测试得到试样的最大力，使用游标卡尺测量出断后标距的数值，最后通过设备自带的计算公式获得抗拉强度  $R_m$  和断后伸长率  $A$ 。

3.3.1 拉伸试验抗拉强度  $R_m$  检测程序

金属板材为矩形横截面，原始截面积  $S_0$  由厚度和宽度相乘而得，试样截面原始厚度  $a_0$  和原始宽度  $b_0$  通过测量获得；再以一定的加载速率施加拉力，直至试样断裂；最后读取力学试验机软件控制系统上显示的最大力  $F_m$ ，通过公式  $R_m=F_m/S_0$  计算得到抗拉强度。在同一试验条件下，试验共进行 6 次<sup>[3]</sup>。

3.3.2 拉伸试验断后伸长率  $A$  检测程序

首先制备试样，在试样上划出 50mm 的原始标距，再以规定速率施加拉力，直至试样断裂；对齐试样使其轴线处于同一直线上，确保试样断裂部分适当接触后，测量断裂标距的伸长值，使用公式计算出断后伸长率  $A$ 。在同一试验条件下，试验共进行 6 次。

3.3.3 建立测量模型

根据测试标准方法要求：

抗拉强度

$$R_m=F_m/S_0 \tag{1}$$

断后伸长率

$$A=\left(\frac{\overline{L_u}}{L_0}-1\right)\times 100\% \tag{2}$$

式中：

$F_m$ —最大力，N

$S_0$ —试样平行长度的原始横截面积， $\text{mm}^2$

$L_0$ —试样原始标距，mm

$a_0$ —矩形横截面试样原始厚度，mm

$b_0$ —矩形横截面试样平行长度的原始宽度，mm

$\overline{L_u}$ —试样断后标距平均值，mm

$A$ —断后伸长率，%

$R_m$ —抗拉强度，MPa

3.3.4 测量不确定度来源分析

根据金属板材室温拉伸试验的数学模型及试验特点，测量不确定度的主要来源有以下几种：试样横截面积最大允许误差带来的不确定度分量  $u(S_0)$ ；最大力测量带来的不确定度分量  $u(F_m)$ ；试样原始标距和断后标距测量带来的不确定度分量  $u(L_0)$  和  $u(L_u)$ 。另外还应考虑检测员测量重复性所带来的不确定度和仪器设备或游标卡尺误差引入的不确定度。另外，测试数据都须按标准规定进行数值修约，因此仍需考虑数值修约所带来的不确定度分量  $u(R_{m,rou})$  和  $u(A_{rou})$ 。

3.4 标准不确定度分量的评定引入的不确定度分量

金属板材平行长度的原始横截面积应准确至或优于  $\pm 1\%$ ，最大允许误差为  $\pm 0.4\text{mm}^2$ ，其出现在此区间的概率是均匀的，所以服从均匀分布，它所引起的标准不确定度可用 B 类方法评定，即：

$$u(S_0)=\frac{a}{\sqrt{k}}=\frac{0.4}{\sqrt{3}}=0.231$$

金属板材在满足标准的前提下，其横截面积最大允许误差就是  $\pm 0.4\text{mm}^2$ ，所以获得的标准不确定度分量非常可靠，其自由度  $\nu$  无限大。

3.5 最大力值测量引入的不确定度分量

检测员重复性测量引入的不确定度分量  $u(F_m, 1)$ 。在重复性测量条件下，该检测机构的检测员小陈对同一批次的质控样品的最大力值进行多次测试，用统计方法进行标准不确定度的 A 类评定，本次试验对 6 个试样最大力进行测量，结果如表 2 所示。

对于最大力  $F_m$  实验标准偏差使用以下公式获得：

$$S(\overline{F_m})=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{10}(F_{mi}-\overline{F_m})^2}=137.967$$

重复性测量引入的相对标准不确定度（ $n$  取 3，为 3 个试样的重复性测量）：

$$u_{rel}(F_m)=\frac{S_{rel}(\overline{F_m})}{\sqrt{n}}=0.67\%$$

$$u(F_m,1)=\overline{F_m}\times u_{rel}(F_m)=11965.113\times 0.67\%=79.688\text{N}$$

试验机示值误差所引起的标准不确定度分量  $u(F_m,2)$ 。

所使用的力学试验机,经校准为1级,其示值误差为 $\pm 1.0\%$ ,可用B类评定,即:

$$u_{rel}(F_{m,2})=\frac{a}{\sqrt{k}}=0.58\%$$

其自由度计算可得:

$$\nu=\frac{1}{2}\left[\frac{\Delta u(x)}{u(x)}\right]^{-2}=50$$

由于本次试验最大力的平均值 $\bar{F}_m$ 为11965.113N=119.65kN,所以此因素引入的绝对不确定度是:

$$u(F_{m,2})=\bar{F}_m \times u_{rel}(F_{m,2})=0.58\% \times 119.65=0.690381\text{kN}=690.381\text{N}$$

标准测力仪所引起的标准不确定度分量 $u(F_{m,3})$ 。本机构所用力学试验机使用0.3级标准测力仪进行校准,不确定度为0.3%,置信因子为2,相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(F_{m,3})=\frac{a}{\sqrt{k}}=0.15\%$$

此因素引入的绝对不确定度为:

$$u(F_{m,3})=119.65 \times 0.15\%=0.179475\text{kN}=179.475\text{N}$$

读数分辨力带来的标准不确定度分量 $u(F_{m,4})$ 。本试验选用的力学试验机量程为50kN,软件控制界面显示的最小读数是 $1 \times 10^{-6}\text{kN}$ ,由此带来的标准不确定度分量为:

$$u(F_{m,4})=0.29x=0.29 \times 1 \times 10^{-6}\text{kN}, \text{自由度 } \nu \text{ 无限大}$$

由于重复性测量、仪器设备示值误差、标准测力仪、最小读数分辨力所引起的不确定度分量各不相关,所以根据以下公式合成得到试验力值测量所引起的绝对标准不确定度总分量,即,对最大力有:

$$u(F_m)=\sqrt{u^2(F_{m,1})+u^2(F_{m,2})+u^2(F_{m,3})+u^2(F_{m,4})}=717.765\text{N}$$

表2 抗拉强度多次试验测量结果

| 序号       | 原始厚度 mm | 原始宽度 mm | 原始横截面积 mm <sup>2</sup> | 最大力 N     | 断后标距 mm | 抗拉强度 MPa | 断后伸长率 % |
|----------|---------|---------|------------------------|-----------|---------|----------|---------|
| 1        | 2.0     | 20      | 40                     | 11943.520 | 114.00  | 298.59   | 42.50   |
| 2        | 2.0     | 20      | 40                     | 12223.401 | 113.50  | 305.59   | 41.88   |
| 3        | 2.0     | 20      | 40                     | 12220.851 | 114.00  | 305.52   | 42.50   |
| 4        | 2.0     | 20      | 40                     | 11944.107 | 116.24  | 298.60   | 45.28   |
| 5        | 2.0     | 20      | 40                     | 12146.910 | 116.26  | 303.67   | 43.52   |
| 6        | 2.0     | 20      | 40                     | 11964.113 | 115.40  | 299.10   | 44.25   |
| 算术平均值    |         |         |                        | 11965.113 | 114.9   | 301.85   | 43.32   |
| 实验标准偏差   |         |         |                        | 137.967   | 1.223   | 3.450    | 1.278   |
| 相对标准偏差 % |         |         |                        | 1.153     | 1.064   | 1.143    | 2.950   |

### 3.6 试样断后标距测量所引起的不确定度分量 $u(L_u)$

断后标距长度测量引起的不确定度分量 $u(L_u, 1)$

断后标距 $L_u$ 的测量结果详见表2。

对于断后标距 $L_u$ 实验标准偏差使用以下公式获得:

$$S(\bar{L}_u)=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{10}(L_{ui}-\bar{L}_u)^2}=1.223$$

测量重复性的相对标准不确定度( $n$ 取3,为3个试样的重复性测量):

$$u_{rel}(L_u)=\frac{S_{rel}(\bar{L}_u)}{\sqrt{n}}=0.61\%$$

$$u(L_u,1)=\bar{L}_u \times u_{rel}(L_u)=114.9 \times 0.614\%=0.71\text{mm}$$

游标卡尺测量断后标距引入的不确定度分量 $u(L_u,2)$

试样原始标距和断后标距是用游标卡尺一次性作出标记和测量的,量程为300mm,最大允许误差为 $\pm 0.02\text{mm}$ ,其出现在此区间的概率是均匀的,所以服从均匀分布, $n$ 取3,用B类方法评定它所带来的标准不确定度,即:

$$u(L_u,2)=\frac{0.02}{\sqrt{n}}=0.01155\text{mm}$$

由于两分量不相关,可得:

$$u(L_u)=\sqrt{u^2(L_u,1)+u^2(L_u,2)}=0.71\text{mm}$$

数值修约所引起的标准不确定度分量 $u(R_{rou})$ 和 $u(A_{rou})$ 。根据国家标准方法规定:“试样测定的性能结果数值应按照

相关产品标准的要求进行修约。如未规定具体要求,应按照如下要求进行修约:强度性能修约到1MPa;屈服点延伸率修约到0.1%,其他延伸率和断后延伸率修约到0.5%;断面收缩率修约到1%”。由此可知,对于金属板材室温拉伸试验结果的数值修约可按照B类不确定度评定方法开展,修约间隔为 $x$ ,则 $u(x)=0.29x$ ,对于本实验,强度的数学期望是:

$$\bar{R}_m=\frac{\bar{F}_m}{S_0}=299.128\text{MPa}=299\text{N/mm}^2$$

断后伸长率的数学期望是:

$$\bar{A}=\frac{\bar{L}_u-L_0}{L_0}=43.625\%=43.5\%$$

可见本例强度的修约间隔为1MPa,伸长率的修约间隔为0.5%,由 $u(x)=0.29x$ 可知,

$$u(R_{m,rou})=0.29 \times 1=0.29\text{N/mm}^2$$

$$u(A_{rou})=0.29 \times 0.5\%=0.14\%$$

自由度皆为 $\infty$ 。

### 3.7 合成不确定度的计算

因金属板材试样平行长度横截面积允许偏差、试验力、断后标距的测量所引入的不确定度以及数值修约(最终结果经数值修约而得到,所以对最终结果而言,修约也相当于输入)所引入的不确定度之间彼此独立不相关。因此,由下式计算合成标准不确定度:

$$u_c^2(y)=\sum_{i=1}^N\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2u^2(x_i)=\sum_{i=1}^Nc_i^2\cdot u^2(x_i)=\sum_{i=1}^Nu_i^2(y)$$

即

$$u_c^2(R_m)=c_{F_m}^2u^2(F_m)+c_{S_0,m}^2u^2(S_0)+u^2(R_{m,rou})$$
$$u_c^2(A)=c_{L_u}^2u^2(L_u)+c_{L_0}^2u^2(L_0)+u^2(A_{rou})$$

由测量模型对各输入量求偏导数，可得相应的不确定度灵敏系数：

$$c_{F_m}=\frac{\partial R_m}{\partial F_m}=\frac{1}{S_0}c_{S_0,m}=\frac{\partial R_m}{\partial S_0}=-\frac{F_m}{S_0^2}$$

$$c_{L_u}=\frac{\partial A}{\partial L_u}=\frac{1}{L_0}c_{L_0}=\frac{\partial A}{\partial L_0}=-\frac{L_u}{L_0^2}$$

将各数据代入上式得

$$c_{F_m}=\frac{1}{80}=0.0125\text{mm}^{-2}$$
$$c_{S_0,m}=-11965.113/(80\times80)=-1.870\text{N/mm}^2$$
$$c_{L_u}=1/80=0.0123\text{mm}^{-1}$$
$$c_{L_0}=114.9/80/80=2.063\text{mm}^{-1}$$

标准不确定度分量详见表 3。

表 3 标准不确定度分量明细表

| 分量           | 不确定度来源                        | 标准不确定度 u(xi) 值        | 自由度 v    |
|--------------|-------------------------------|-----------------------|----------|
| $u(S_0)$     | 平行长度的横截面积的允许公差                | 0.231                 | $\infty$ |
| $u(F_m)$     | 最大力测量                         | 79.688N               | 5        |
|              | 试验机示值误差                       | 690.381N              | 50       |
|              | 标准测力仪的不确定度                    | 179.475N              | 50       |
|              | 读数分辨率                         | 717.765N              | $\infty$ |
| $u(L_u)$     | 断后标距长度测量                      | 1.223                 | 5        |
|              | 量具误差                          | 0.70509mm             | 50       |
| $u(R_{rou})$ | 数值修约（间隔为 1N/mm <sup>2</sup> ） | 0.29N/mm <sup>2</sup> | $\infty$ |
| $U(A_{rou})$ | 数值修约（间隔为 0.5%）                | 0.14%                 | $\infty$ |

将各不确定度分量和不确定度灵敏系数代入计算公式，有：

$$u_c^2(R_m)=0.0125^2\times717.765^2+(-1.870)^2\times0.231^2+0.29^2=80.7686$$
$$u_c^2(A)=0.0123^2\times0.70509^2+(2.063)^2\times0+0.14^2=0.1400$$

由以上结果可知

$$u_c(R_m)=8.987\text{N/mm}^2$$
$$u_c(A)=0.374\%$$

3.8 扩展不确定度的计算

扩展不确定度采用  $U=ku_c(y)$  的表示方法，即：  
对本例，包含因子取 2，因此有：

$$U(R_m)=2u_c(R_m)=2\times8.987=17.974\text{N/mm}^2=18\text{N/mm}^2$$
$$U(A)=2u_c(A)=2\times0.374=0.748=0.7\%$$

用相对扩展不确定度来表示，则分别是：

$$U_{rel}(R_m)=U(R_m)/R_m=17.974/299=6.0\%$$
$$U_{rel}(A)=U(A)/A=0.7/43.5=1.6\%$$

3.9 测量不确定度的报告

本例所评定的金属板材的抗拉强度、断后伸长率测量结果的不确定度报告如下：

$$R_m=299\text{N/mm}^2; U=18\text{N/mm}^2; k=2$$
$$A=43.5\%; U=0.7\%; k=2$$

以上结果表明，可以预期在符合正态分布的前提下，在 (299-18) 至 (299+18)N/mm<sup>2</sup> 的区间包含了抗拉强度测量结果可能值的 95%；在 (43.5%-0.7%) 至 (43.5%+0.7%) 的区间包含了断后伸长率测量结果可能值的 95%。如果按相对扩展不确定度的方式来呈现，则可写为：

$$R_m=299\text{N/mm}^2; U_{rel}=6.0\%; k=2$$
$$A=43.5\%; U_{rel}=1.6\%; k=2$$

结语：综上所述，为提升检测机构的测量及不确定度评定的能力，应结合机构未来规划与发展，做好年度质量控制计划、提升检测人员计量领域专业知识、开展常态化监督机制，随时掌握检测机构人员、设备、环境设施、测量系统、测量程序的变化，对已完成评估的测量不确定度进行实时监控和及时调整，为机构的质量可持续发展做出贡献 [4]。

参考文献

[1] GB/T 228.1-2021金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法

[2] CNAS GL009-2018材料理化检测测量不确定度评定指南及实例

[3] JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

[4] 彭宏，王春奕，徐鸿昊，张全新. GH4169高温合金圆棒试样室温拉伸试验的测量不确定度评定[J].热处理 2024 ,39 (01)

# Discussion on defects and control in the processing of metal materials

Lingyun Zhang

Jinduicheng Molybdenum Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi, 710000, China

## Abstract

Metal materials are widely used in the field of processing and manufacturing, and are currently showing a diversified development trend, which is mainly characterized by high performance and environmental protection, and the application field is constantly expanding. In the process of metal material processing, affected by various factors, it is inevitable that some defects will occur. In order to make the processing of metal materials more delicate and high-quality, it is necessary to control defects in the processing process. This paper introduces the common defects of metal materials, expounds the defect detection technology in the processing of metal materials, and proposes the control measures of processing defects according to the requirements of material processing.

## Keywords

metal materials; Processing; flaw

# 金属材料加工过程中的缺陷与控制探讨

张凌云

金堆城钼业股份有限公司, 中国 · 山西 太原 710000

## 摘 要

金属材料在加工制造领域中广泛应用, 目前呈现出多元化的发展趋势, 主要特征为高性能和环保化, 并且应用领域在不断拓展。在金属材料加工的过程中, 受到各种因素的影响, 难免会出现一些缺陷。为了使金属材料加工更加精细和优质, 必须对加工过程中的缺陷进行控制。本文介绍了常见的金属材料缺陷, 阐述了金属材料加工中的缺陷检测技术, 根据材料加工的要求, 提出了加工缺陷的控制措施。

## 关键词

金属材料; 加工; 缺陷

## 1 引言

在加工制造的过程中, 许多产品都需要使用金属材料。根据化学成分进行分类, 金属材料可以分为黑色金属和有色金属两类。比较常见的黑色金属包括铁、锰、铬等。有色金属包括铜、钛、铝等。其中, 钢铁为最常用的金属材料, 具有较高的性能优势, 但随着制造业的发展, 对新材料的需求也更加迫切。在金属材料加工过程中, 会采用多种工艺技术, 包括超塑成型、增材制造等, 利用各种技术改造金属的形状与性能, 满足产品制造在造型与能力方面的需求。从目前的情况看, 铝合金、镁合金等合成金属材料逐渐代替传统金属材料, 具有高性能、绿色环保、成本低廉等优势。在这些金属材料加工的过程中, 如果没有采取有效的控制措施, 可能出现表面缺陷或内部缺陷, 包括腐蚀、气孔等。这些缺陷会影响材料性能和美观性, 造成产品性能下降, 甚至在应用中

会产生安全风险。所以必须采取有效的缺陷控制措施, 确保金属材料加工质量。

## 2 金属材料加工过程中常见的缺陷

### 2.1 表面缺陷

金属材料表面缺陷的形式有很多, 常见的缺陷问题包括磨损、氧化、拉伤、划痕等。其中, 氧化缺陷的引发原因有很多, 包括工艺缺陷、环境因素、结构设计等, 会出现氧化膜异常的情况, 金属材料表面变色, 导致材料表面出现色斑, 影响材料的膜层附着力, 材料缝隙也会出现腐蚀。最常见的氧化形式就是锈蚀, 比如常用的铁材料, 氧化后会出现铁锈, 表面出现黄褐色的锈斑, 造成铁材料结构被破坏, 降低铁的强度、韧性、硬度等性能, 影响铁制品的使用寿命<sup>[1]</sup>。一些产品对金属表面有较高的品质要求。例如, 在高温或者高压环境下使用此类铁质产品, 如果出现氧化锈蚀的问题, 容易引发事故, 造成设备损坏以及人员伤亡。

磨损包括划痕、擦伤等表面损伤, 会影响金属的厚度、硬度和美观度, 造成金属机械性能不足, 难以满足生产加工

【作者简介】张凌云(1987-), 女, 工程师, 本科, 中国陕西西安人, 从事金属压力加工研究。

的使用需求<sup>[2]</sup>。拉伤也是比较常见的表面缺陷,因为金属表面拉伸,所以产生明显的变化痕迹,在加工过程中,这部分会导致应力集中,造成金属脆性增加,裂纹因此扩展。此外,还有一些金属可能外表面被异物包裹,或者在加工时油漆、胶水等其他材料残留,造成金属外部美观性受影响,一些残留物也会腐蚀金属表面。

表面缺陷对金属材料的影响较大,体现在多个方面,最主要的就是会导致金属材料的机械性能下降,包括强度、韧性、硬度、抗疲劳性等,造成材料使用寿命缩短,在预期寿命之前就出现断裂或者弯折等问题。不仅如此,氧化会造成金属难以抵抗外部腐蚀,造成材料被腐蚀的速度加快,缩短材料的使用寿命<sup>[3]</sup>。划痕则主要影响材料的外观,严重的划痕也会增加材料断裂的风险,如果使用有划痕的材料进行零部件生产,会影响产品的精度,使用该材料的设备也需要经常维护,严重时还需要更换新品,造成维护成本过高,也会带来安全风险。

## 2.2 内部缺陷

金属材料内部缺陷会直接影响材料性能和寿命,常见的内部缺陷包括夹杂物、气孔、析出物、裂纹等。夹杂物就是材料中夹杂着异物或其他微小的材料颗粒,导致金属材料出现应力集中的情况,容易造成裂纹扩展,也会带来疲劳损伤;气孔就是材料内部出现孔隙,因为加工的过程中有气体进入材料,这些气体没有全部排出,所以产生气孔<sup>[4]</sup>。析出物就是一些合金材料中会析出一些不稳定的元素,造成金属脆性不足,也会降低机械性能。裂纹是比较常见的内部缺陷,通常由应力原因导致,造成材料的整体强度下降,也会导致材料韧性不足。

内部缺陷对金属材料的影响较大,会造成金属材料的力学性能下降。例如,夹渣、气孔、裂纹等问题,会造成金属材料强度、刚度、韧性等力学性能降低,导致材料加工需求无法满足。例如,焊接不够彻底的情况下,焊缝强度不足,进而导致气体进入材料内部,材料随之出现气孔缺陷,造成材料承载能力下降,容易出现弯折、断裂等问题;内部缺陷也会影响金属材料的疲劳强度,一些疲劳裂纹不仅会出现在金属材料的表面,也会出现在亚表面缺陷位置,内部缺陷会延缓裂纹成核,内部裂纹虽然会迅速扩展,但扩展速率并不会超过表面裂纹,所以表面缺陷主要影响金属材料的疲劳强度;内部缺陷对材料的冲击韧性也有较大的影响,所谓冲击韧性,就是材料遭受冲击荷载时,用于衡量其抵抗破坏的能力<sup>[5]</sup>。裂纹、气孔、夹杂物等内部缺陷会降低材料冲击韧性,也就是降低了冲击韧性指标( $\alpha_k$ 值),造成材料在遇到冲击时,更容易发生锻造问题。

造成金属材料出现内部缺陷的原因有很多,以夹杂物缺陷来说,可能因为炉料、炉渣等进入金属内部;在材料加工的过程中,通常需要经过冷却环节,如果冷却不均匀,会影响材料内部组织结构均匀性,进而导致各类内部缺陷。例

如,冷却钢钉的过程中,因为金属模温度较低,材料表面层会有晶粒区域形成,内部因为冷却不均匀造成明显的晶粒产生,导致严重的内部缺陷;在材料锻造的过程中,如果没有合理控制工艺参数,也可能导致内部缺陷<sup>[6]</sup>。例如,焊接处理是非常重要的加工环节,如果电压、电流等参数不达标,则可能导致焊接质量低下,会出现气孔、夹渣等缺陷。此外,一些金属材料本身就存在质量问题,所以生产加工时也难免出现缺陷。例如,金属原材料本身就有较高的气体含量,所以出现气孔缺陷的概率较高。

## 3 金属材料加工过程中的缺陷检测技术

### 3.1 无损检测技术

无损检测技术顾名思义,就是不会破坏金属材料的检测技术。常用的无损检测技术有超声波检测和X射线检测两种。

超声波检测就是利用声波传播原理定位金属材料的缺陷,在材料内部引入高频声波,监测声波传播情况,根据声波变化进行分析,不会损伤材料且缺陷定位比较精准。在实际监测时,使用超声波探头发送声波,如果材料内部存在缺陷,则声波遇到缺陷就会反射或者散射,进而出现回波信号,检测人员根据回波信号做出判断(如图1)。该检测技术具有较高的分辨率,而且检测速度较快,不会损坏检测样品,能够满足多样化的检测需求。目前,金属材料加工缺陷检测中,超声波检测技术应用广泛,主要针对气孔、裂纹等内部缺陷进行检测,能够有效监控材料质量,使材料加工更加精细。

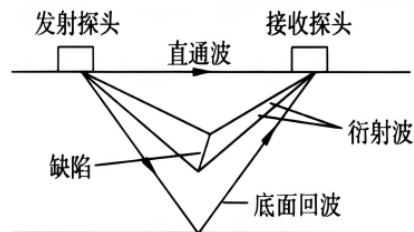


图1 超声波检测技术原理

X射线检测就是根据X射线的传递情况进行检测分析,探测器能够捕获射线。如果X射线遇到气孔、夹渣等缺陷,则会出现散射、吸收等情况,探测器随之产生影像<sup>[7]</sup>。X射线检测的分辨率也比较高,同时属于无损检测技术,能够探测金属材料深处,所以在焊接、锻造等加工环节广泛应用该技术进行检测。

### 3.2 材料性质测试

在金属材料加工的过程中,要确认材料是否存在缺陷,需要进行严格的材料性质测试。主要进行拉伸试验和硬度测试。

在拉伸试验中,先选择金属材料样品,然后使用拉伸试验机进行测试。设定试验机的拉伸力和拉伸速度,使材料样品逐渐被拉伸。在这个过程中,测量拉伸力与材料的伸长量,通过数据的记录与分析确定材料拉伸参数。根据拉伸试验结果获取材料的应力-应变曲线<sup>[8]</sup>。在拉伸试验中,伸长率、抗拉强度、屈服强度等都是不可或缺的重要参数,通过拉伸

试验能够确定材料脆性、强度等性质，为工程设计、工艺选择、质量把控等提供更多参数依据。以某钢筋拉伸试验为例，具体数据如下表所示：

表 1 钢筋拉伸试验表

| 试样名称                                   |                     | HRB335 φ 16 钢筋 |        |        |        |
|----------------------------------------|---------------------|----------------|--------|--------|--------|
| 试样编号                                   |                     | Φ 16-1         | Φ 16-2 | Φ 16-3 | Φ 16-4 |
| 试样尺寸                                   | 公称直径 mm             | 16             | 16     | 16     | 16     |
|                                        | 长度 mm               | —              | —      | —      | —      |
|                                        | 质量 g                | —              | —      | —      | —      |
|                                        | 截面积 mm <sup>2</sup> | 201.1          | 201.1  | —      | —      |
|                                        | 标距 mm               | 80             | 80     | —      | —      |
| 拉伸荷载 KN                                | 屈服                  | 72             | 72     | —      | —      |
|                                        | 极限                  | 114            | 114    | —      | —      |
| 强度 MPa                                 | 屈服点                 | 358            | 358    | —      | —      |
|                                        | 拉伸强度                | 567            | 567    | —      | —      |
| 断口形式                                   |                     | 延性断裂           | 延性断裂   | —      | —      |
| 结论：试验结果表明，该材料的力学性能与《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》的要求相符 |                     |                |        |        |        |

硬度测试也是评估金属材料最主要的性能测试，常用布氏硬度测试法。在实际测试的过程中，选择硬度较高的钨球压入材料表面，根据压痕直径计算材料硬度值。硬度值通常采用布氏硬度的形式呈现，或者采用洛氏硬度测试，具体根据测试需求进行选择。

4 金属材料加工过程中的缺陷控制措施

4.1 优化加工参数

在金属材料加工的过程中，为避免出现缺陷问题，需要对加工参数进行严格把控。主要控制温度、压力与速度三项参数。在温度方面，根据金属的类型确定加工温度范围，避免温度过高或过低导致加工不当影响金属材料的化学性质和物理性能。温度控制时，主要对温度浮动情况进行控制，使加工温度保持在合理的区间内，避免出现热裂纹、晶粒度等内部缺陷<sup>[9]</sup>。在现代金属材料加工生产的过程中，已经广泛应用精度较高的温控系统，能够实时监测温度的变化，并且对温度进行合理的调整与控制。

在金属材料加工中，压力会对材料的形态与形状产生影响，如果压力较大，会导致材料变形，容易出现夹渣、裂纹等缺陷。所以，必须严格控制加工的压力。例如，在锻造和冷挤压加工的过程中，可以利用机械设备精准控制压力。在铸造和焊接环节，主要从源头控制压力。例如，可以调节焊机上悬臂的减压阀来控制压力，使焊接压力保持在合理的范围内。

加工速度过快可能造成晶粒结构、表面质量变化等缺陷问题。如果加工速度较慢，则应力集中较少，能够降低热裂纹风险，但会造成加工的时间成本增加。所以需要根据实际加工需求，对加工速度与加工质量进行把控和平衡。

4.2 选择优质材料

在实际加工的过程中，原材料选择会直接影响加工质

量。在选择金属原材料时，需要从多个角度进行分析，主要包括原材料的物理性能和化学成分。不同金属材料的性能不同，一些材料的性能缺陷和优势都非常明显，必须根据加工需求进行选择。如果原材料选择不当，或者原材料本身就存在缺陷问题，则产品加工质量也会受到影响，加工过程中更容易出现缺陷<sup>[10]</sup>。为此，在材料选择时，必须先进行严格的质量检验，确认材料的物理和化学参数，结合相关的技术标准 and 规范要求进行分析和选择。具体可以采用机械性能测试、显微组织分析等方式，编制材料的参数表格，通过图表可视化呈现材料各项参数，为材料对比选择提供依据。此外，原材料的运输、存放与处理也会对材料的性能和质量产生影响。很多金属材料在潮湿高温的环境中容易被腐蚀，出现锈蚀、裂纹等缺陷。所以必须控制环境温度，并且采取合理的防腐措施。不锈钢等材料可能需要在加工前进行预处理，如退火、淬火等处理环节，以此提升材料性能，减少材料的缺陷问题。

5 结语

综上所述，在金属材料加工的过程中，受到各种因素的影响，可能出现表面缺陷和内部缺陷。针对各类缺陷，可以采用无损检测 and 性能测试的方式进行缺陷定位与分析，然后采取有效的缺陷处理和 控制措施。通过加工参数的优化与原材料的严格筛选，能够有效降低缺陷出现的概率，使金属产品加工制造的质量大幅提升。

参考文献

[1] 韩立洋,王涛,马服辉,等.激光切割在非金属材料加工中的应用研究[J].内燃机与配件,2025,(09):61-63.

[2] 刘李.有色金属材料的加工与发展措施研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,西南大学,重庆工商大学,重庆建筑编辑部.人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.浙江双银特材科技有限公司,;2025:448-450.

[3] 朱哲毅.材料成型与控制工程中的金属材料加工解析[J].冶金与材料,2025,45(03):103-105.

[4] 华攀锋.金属模具材料的钳工精细化加工过程[J].模具制造,2024,24(12):143-145.

[5] 王魁,白立刚,王连玉.金属材料加工过程中的缺陷分析与控制[J].冶金与材料,2024,44(01):13-15.

[6] 徐圆圆.陶瓷修复过程中金属材料加工和封接技术[J].铸造,2022,71(05):667.

[7] 张立荣,孟祥海,张伟.机械加工过程中金属材料表面质量及精度控制方法[J].中国金属通报,2022,(02):52-54.

[8] 朱泽晖.金属模具材料的钳工精细化加工过程研究[J].世界有色金属,2021,(08):175-176.

[9] 杨永刚.金属材料加工过程的转炉冶炼终点控制技术应用[J].世界有色金属,2020,(21):8-9.

[10] 杨仲生.基于智能工厂施工的有色金属材料控制加工过程[J].世界有色金属,2020,(19):11-12.

# Research on Optimization of Green Production Technology for Commercial Concrete and Carbon Emission Control Pathways

Yijun Su

Dali Science and Technology Achievement Transformation Center, Dali, Yunnan, 671000, China

## Abstract

As the issue of global climate change becomes increasingly severe, reducing carbon emissions has become a common goal for all countries. The construction industry, especially the production of commercial concrete, is one of the main sources of carbon emissions. The green production and carbon emission control of commercial concrete are of great significance. This paper takes Yunnan Province as the research background and explores the optimization path of green production technology and carbon emission control measures for commercial concrete. By analyzing the production process and carbon emission sources, the process optimization, material substitution and application of low-carbon technologies were studied, and a green production path suitable for Yunnan Province was proposed. Research shows that by optimizing production processes, using green raw materials and improving energy efficiency, carbon emissions can be effectively reduced, providing technical support for the green transformation of the construction industry in Yunnan Province.

## Keywords

Ready-mixed concrete; green production technology; carbon emissions; Yunnan Province; low-carbon technology

# 商品混凝土绿色生产技术优化及碳排放控制路径研究

苏益军

大理市科技成果转化中心，中国·云南大理 671000

## 摘要

随着全球气候变化问题日益严峻，减少碳排放成为各国共同目标。建筑业，特别是商品混凝土生产，是碳排放的主要来源之一。商品混凝土的绿色生产和碳排放控制意义重大。本文以云南省为研究背景，探讨了商品混凝土绿色生产技术优化路径和碳排放控制措施。通过分析生产流程及碳排放源，研究了工艺优化、选材替代及低碳技术应用，并提出了适合云南省的绿色生产路径。研究表明，通过优化生产流程、使用绿色原料和提高能效，能够有效减少碳排放，为云南省建筑业绿色转型提供技术支持。

## 关键词

商品混凝土；绿色生产技术；碳排放；云南省；低碳技术

## 1 引言

在全球应对气候变化的大背景下，减少温室气体排放已成为各国政府的重要目标。建筑业，特别是商品混凝土的生产，是碳排放的重要领域之一。混凝土作为基础建筑材料，其生产过程中消耗大量能源并排放大量二氧化碳，因此推动商品混凝土的绿色生产和碳排放控制，已成为建筑行业发展的重点课题。

云南省作为我国西南部的重要省份，近年来基础设施建设和城市化进程中对混凝土的需求日益增加。然而，如何

平衡经济发展与环境保护之间的矛盾，尤其是在建筑行业的绿色生产方面，已成为云南省亟待解决的问题。因此，研究商品混凝土的绿色生产技术优化和碳排放控制路径，对于云南省的建筑行业实现绿色可持续发展具有重要的理论和实践价值。本文将从商品混凝土生产过程的碳排放源分析入手，探讨如何通过技术创新、工艺优化及绿色原料的使用减少碳足迹，为云南省建筑行业提供理论支持和技术路径。

## 2 商品混凝土的生产工艺及碳排放源分析

### 2.1 商品混凝土的生产工艺

商品混凝土作为现代建筑中广泛应用的材料，由散装水泥、骨料（砂子、石子）、水以及外加剂等按特定配比混合而成。其生产工艺涵盖原料采购与存储、搅拌、运输、

【作者简介】苏益军（1968-），男，中国云南大理人，本科，工程师，从事经济，法律研究。

浇筑以及后期养护等多个环节，每个环节都与碳排放息息相关。

原材料采购与储存阶段，散装水泥是核心原材料，其生产中石灰石煅烧和燃烧会释放大量二氧化碳，骨料开采运输也有环境负担，企业应优先选低碳水泥和可持续开采骨料。搅拌过程能源消耗和碳排放显著，企业需采用高效搅拌技术、低能耗设备。运输与浇筑环节，传统运输工具碳排放大，应优化路线、采用低碳工具。养护过程碳排放相对低，但高温干燥有能耗，合理控制温湿度可减少碳排放。

总之，要降低商品混凝土生产过程中的碳排放，需从各个环节入手，采用绿色原材料、高效技术和低碳设备，优化运输路线，合理控制养护条件，推动商品混凝土生产向绿色、低碳方向发展。

## 2.2 碳排放源分析

商品混凝土生产过程的碳排放主要来自以下几个方面：

**水泥的生产与使用：**水泥的生产过程会排放大量二氧化碳，主要来源于石灰石的煅烧和燃烧。这是整个商品混凝土生产过程中最重要的碳排放源。石灰石在高温下煅烧生成石灰，同时释放二氧化碳，约占水泥生产过程总排放的60%左右。随着水泥需求的增长，减排水泥生产过程的二氧化碳排放是减少商品混凝土整体碳排放的核心。

**运输过程中的能源消耗：**商品混凝土的生产涉及多个环节，包括原材料的运输、生产厂内的运输以及混凝土浇筑的运输等。运输环节尤其是依赖化石燃料的交通工具，如卡车和搅拌运输车及固定泵、汽车泵，在运输使用过程中也会消耗大量能源，并且排放大量二氧化碳。因此，优化运输路线、使用节能型交通工具及结合本地资源减少运输距离，能有效减少碳排放。

**能源消耗与生产设备：**商品混凝土生产过程中的搅拌、浇筑等环节，使用的生产设备大多依赖于电力或燃料，能源消耗较大。这些环节涉及大量的机械设备，尤其是电动搅拌机、混凝土泵车等设备，其运行产生的能耗和碳排放直接影响到整体的碳足迹。因此，提高设备能效、采用低碳能源，能够显著降低生产过程中碳排放。

## 2.3 商品混凝土生产中的碳排放影响因素

商品混凝土碳排放受多因素影响。原材料选择影响显著，水泥是碳排放主要源头，其生产中石灰石煅烧和燃烧释放大量二氧化碳，用粉煤灰等替代部分水泥可显著减碳；选当地环保骨料，如多孔骨料等，能降低运输距离，减少运输碳排放。生产工艺效率是减碳关键，采用高效搅拌技术、节能设备，优化生产流程，合理优化搅拌时间与频率，可避免能量浪费；科学调度和规划能提高效率、减少能耗。外加剂使用也不可忽视，采用环保型外加剂，如速凝剂等，能提升性能、减少水泥用量，间接降低碳排放。综上所述，通过优化商品混凝土生产工艺，使用低碳原材料和绿色技术，从原材料选择、生产工艺效率提升到外加剂合理应用等多方面入

手，能够有效减少碳排放，为建筑行业的绿色转型提供切实可行的路径。

## 3 商品混凝土绿色生产技术优化路径

### 3.1 优化生产工艺与提高能效

在商品混凝土生产过程中，搅拌和运输环节的能源消耗与碳排放问题较为突出，不过通过优化生产工艺、提升生产效率，可有效降低碳排放。

搅拌技术创新是关键。采用高效能搅拌机，能显著缩短搅拌时间，在减少能源消耗的同时，提升混合质量和生产效率。这种技术不仅能保证混凝土的均匀性，还能提高整体生产效率，避免能源浪费。通过精确控制搅拌时间和速度，对搅拌过程进行优化，能耗得以降低，碳排放也随之减少。运输过程优化同样重要。运输环节的碳排放商品混凝土生产中占比较大。为减少这一环节的碳排放，可选用低碳排放的运输工具，例如电动混凝土搅拌车。同时，优化运输路线、提高运输效率、减少不必要的运输次数，都能有效降低能源消耗和碳排放。优化生产流程也不容忽视。引入自动化和信息化管理系统，能实现生产过程的精细化管理。通过实时监控生产环节、优化生产计划、协调资源使用，可减少不必要的能源消耗和浪费。智能化的生产管理系统还能自动调节生产设备的运行状态，提升设备能效，进一步降低能耗和碳排放。

总之，通过搅拌技术创新、运输过程优化以及生产流程优化，商品混凝土生产过程中的碳排放问题将得到有效缓解，推动行业向绿色、低碳方向发展。

### 3.2 绿色原材料的使用

在商品混凝土生产中，使用绿色原材料是降低碳排放的有效手段，通过替代部分水泥或传统骨料，可显著减少生产过程的碳足迹。

替代水泥是重要举措。工业废渣如粉煤灰、矿渣，以及天然矿物如石膏、膨润土等，都可部分替代水泥。这些材料的应用不仅能降低碳排放，还能减少资源浪费。以粉煤灰为例，它是火电生产的副产品，作为环保替代水泥使用材料，碳足迹较低，能大幅减少水泥用量，进而降低生产中的二氧化碳排放。

低碳骨料的使用同样关键。传统混凝土生产中，砂子和碎石的开采和运输会造成较大环境负担。而采用可再生或低碳骨料，如多孔材料、无害化建筑废弃物等，可减少对自然资源的开采，降低环境压力。这些替代骨料不仅有助于减少碳排放，还能推动废弃物循环利用，契合绿色发展理念。

绿色外加剂的应用也不容忽视。外加剂在混凝土生产中作用重大，使用低碳、无害的外加剂，如新型混凝土促进剂、速凝剂等，能减少水泥用量，提升混凝土性能，同时降低碳排放。绿色外加剂不仅能提高混凝土的工作性和耐久性，还能间接减少水泥使用，降低生产过程中的碳足迹，有

力推动绿色生产的实施。

### 3.3 实施碳排放监测与评估体系

为确保绿色生产技术在商品混凝土行业有效落地，构建完善的碳排放监测与评估体系至关重要。该体系能精准把握碳排放的影响及来源，为生产过程优化提供有力支撑。

引入先进的碳排放监测技术是基础。通过实时监控生产各环节的碳排放量，可迅速定位问题所在，并及时采取调整措施。监测系统对每个环节进行数据采集与分析，确保碳排放处于可控范围内，极大提升生产过程的环境友好性。开展生命周期评估不可或缺。对商品混凝土从原材料采购、生产、运输到使用的全流程进行评估，能全面掌握其碳排放的整体情况。此方法不仅关注生产阶段，还涵盖使用过程中的环境影响，为碳排放评估提供了全面框架。依据评估结果，可制定更科学的生产和管理方案，实现碳排放最小化。运用碳足迹计算模型也十分关键。该模型能量化商品混凝土的碳排放水平，为企业提供改进方向和政策建议。通过计算不同生产环节的碳排放，找出主要来源，并给出针对性减排策略，助力企业有效达成碳减排目标。

这些绿色生产技术和碳排放控制措施，不仅能降低商品混凝土行业的碳足迹，还能引领建筑行业整体向绿色、低碳方向迈进，为可持续发展贡献力量。

## 4 碳排放控制路径与可持续发展策略

### 4.1 政策支持与激励机制

政府在推动商品混凝土生产企业实现绿色生产、促进低碳与节能技术应用方面可发挥关键作用。首先，可推出税收优惠与补贴政策，针对采用低碳生产工艺、绿色原材料以及节能设备的企业，给予税收减免和资金扶持。这不仅能激励企业积极进行技术革新，提高生产效率，还能有效降低能源消耗和碳排放，实现经济效益与环境效益的双赢。其次，建立碳交易机制，打造碳排放交易市场，让企业通过碳信用交易减轻碳排放负担。此举能引导企业主动寻求减排途径，通过采用绿色低碳技术获取额外收益，形成绿色生产的良性循环。最后，加强环保法规建设，制定并严格执行碳排放标准，以法规之力推动绿色生产技术的广泛应用。通过完善环保法规体系，规范行业排放行为，促使企业加大环保投入，切实履行绿色生产责任，共同推动商品混凝土行业向绿色、低碳、可持续方向发展。

### 4.2 绿色建筑材料的推广应用

在建筑行业中，商品混凝土作为最广泛使用的基础材料，其生产过程中的碳排放问题不容忽视，绿色生产对于减少建筑业碳排放而言意义重大。要实现商品混凝土的绿色生产，推广低碳混凝土是关键举措之一。这需要积极推动低碳水泥和高效骨料的使用，鼓励在建筑行业里以低碳混凝土替代传统混凝土。低碳混凝土的优势显著，一方面能减少水泥的使用量，另一方面通过引入替代材料，可有效降低生产环节的二氧化碳排放。政府在此过程中可发挥重要作用，通过出台相关政策进行引导，并给予市场激励，以此推动低碳混凝土在建筑行业中的广泛应用，进而促进整个建筑行业朝着绿色方向转型。

绿色建筑认证也是推动商品混凝土绿色生产及建筑行业绿色转型的有效手段。政府可以积极推动绿色建筑认证体系的建立，同时鼓励社会组织参与认证机制。对于符合绿色标准的混凝土建筑项目，给予认证和相应的激励政策。这些认证能够确保建筑项目达到低碳、环保的标准，同时也能增强企业在市场中的竞争力。通过绿色建筑认证，政府能够引导建筑行业向绿色、低碳方向发展，为可持续建筑材料的大规模应用创造有利条件，有力推动建筑行业的绿色转型。

## 5 结语

商品混凝土作为建筑行业的重要材料，其绿色生产技术的优化和碳排放控制对于推动农业现代化和乡村振兴战略具有重要意义。通过优化生产工艺、使用绿色原材料和技术创新，可以有效降低商品混凝土的碳排放，推动建筑行业的可持续发展。随着政策支持的逐步落实和绿色技术的不断推广，未来商品混凝土行业将在低碳、环保的道路上稳步前行。

### 参考文献

- [1] 陈有才,唐孟雄,罗奥,等.预拌混凝土碳排放足迹计算与案例分析[J].广州建筑,2024,52(S1):89-98.
- [2] 林楚营.“双碳”目标下混凝土企业的绿色转型战略[J].张江科技评论,2024,(11):80-82.
- [3] 张晓然,段佳豪,薄艾,等.预拌混凝土行业绿色低碳发展路径[J].工程质量,2024,42(04):83-86.
- [4] 段后红.混凝土全生命周期碳排放分析及减排措施[J].建设科技,2024,(01):38-40+44.

# Study on toughening modification and properties of polypropylene matrix composites

Yukai Dong

Shandong University of Technology, Zibo, Shandong, 255049, China

## Abstract

Polypropylene (PP) composites have been widely adopted in industrial applications due to their superior physical and chemical properties. However, the brittleness of polypropylene remains a major limitation in practical applications. To enhance its toughness and impact resistance, researchers have implemented various toughening modification methods. This paper reviews the techniques for toughening polypropylene composites, including inorganic filler modification, organic polymer toughening agents, and blending modification, while analyzing their effects on material performance. The findings demonstrate that appropriate toughening approaches can significantly improve the mechanical properties of polypropylene composites, particularly in terms of impact toughness and durability. Finally, the paper examines the development trends in polypropylene toughening modification and outlines future research directions.

## Keywords

polypropylene; toughening modification; composite material; mechanical properties; filler

# 聚丙烯基复合材料的增韧改性及性能研究

董昱恺

山东理工大学, 中国 · 山东 淄博 255049

## 摘 要

聚丙烯 (PP) 基复合材料因其优异的物理化学性能而被广泛应用于工业领域。然而, 聚丙烯的脆性是其应用的主要限制因素。为了提高其韧性和耐冲击性, 研究人员通过多种方法对聚丙烯进行增韧改性。本文综述了聚丙烯基复合材料的增韧改性方法, 包括无机填料改性、有机高分子增韧剂以及共混改性等技术, 探讨了这些方法对聚丙烯性能的影响。研究结果表明, 通过适当的增韧改性手段, 可以显著提高聚丙烯复合材料的力学性能, 尤其是其冲击韧性和耐用性。最后, 本文分析了聚丙烯增韧改性的发展趋势, 并对未来的研究方向进行了展望。

## 关键词

聚丙烯; 增韧改性; 复合材料; 力学性能; 填料

## 1 引言

聚丙烯 (Polypropylene, PP) 作为一种具有优异机械性能、较低成本和良好化学稳定性的热塑性塑料, 广泛应用于汽车、电子、电器以及包装等领域。然而, 由于聚丙烯的脆性较大, 尤其是在低温环境下, 其冲击强度和耐热性较差, 这在许多高性能要求的场合中制约了其应用。因此, 聚丙烯基复合材料的增韧改性成为了提升其性能的重要研究课题。近年来, 随着新型增韧材料和改性技术的发展, 聚丙烯复合材料的性能得到了显著改善, 增韧改性技术已成为提高聚丙烯基复合材料力学性能的有效手段之一。

## 2 聚丙烯基复合材料的增韧改性方法

### 2.1 无机填料改性

无机填料改性是通过将各种无机物质 (如碳酸钙、滑石粉、玻璃纤维等) 加入聚丙烯中, 从而改善其力学性能和热稳定性。无机填料具有较高的硬度、强度和耐热性, 能够有效提高聚丙烯的刚性, 改善其耐冲击性能。填料的种类、形状、粒径以及表面处理方式均对改性效果产生重要影响。玻璃纤维作为常用的增强填料, 其高强度特性能够显著提高复合材料的拉伸强度和冲击韧性<sup>[1]</sup>。同时, 合理的玻璃纤维含量和分散性可以有效提高复合材料的综合力学性能。研究表明, 适量的无机填料不仅能改善聚丙烯的力学性能, 还能在一定程度上提升材料的热稳定性和尺寸稳定性。

### 2.2 有机高分子增韧剂

有机高分子增韧剂是一类能够改善聚丙烯韧性和冲击强度的材料。常见的有机增韧剂包括橡胶类、热塑性弹性体类以及共聚物等。橡胶类增韧剂通过与聚丙烯的相容性相互

【作者简介】董昱恺 (2004-) , 男, 中国山东淄川人, 本科, 从事电催化及复合材料研究。

作用,在聚丙烯中形成弯曲形态的分子链,从而分散外力作用,降低材料的脆性。热塑性弹性体(如SEBS、SBS)由于其优异的拉伸性能和弹性模量,能够有效提高复合材料的冲击韧性。除此之外,增韧剂的加入还可改善聚丙烯的低温冲击性能和耐久性。近年来,研究者们还通过选择不同类型的增韧剂及优化其配比,以达到更好的增韧效果。

### 2.3 共混改性

共混改性是将聚丙烯与其他聚合物进行共混,从而获得具有优异力学性能的复合材料。常见的共混物包括聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)、聚氨酯(PU)等。在共混过程中,通过调节共混比例、共混温度以及加工工艺,可以显著提高聚丙烯的韧性和抗冲击性能<sup>[2]</sup>。例如,聚丙烯与聚乙烯共混后,可以形成相容性较好的复合材料,增韧效果十分显著。此外,共混改性还能够改善材料的热稳定性和加工性能,使得聚丙烯复合材料在各种应用场合中更加适用。

## 3 增韧改性对聚丙烯基复合材料性能的影响

### 3.1 力学性能

增韧改性技术显著改善了聚丙烯基复合材料的力学性能。力学性能是材料选择和设计的关键因素之一,特别是在需要承受较大外力的应用中。通过增韧改性,聚丙烯的拉伸强度、弯曲强度和冲击韧性均得到了显著提升。无机填料(如玻璃纤维、碳酸钙、滑石粉等)的加入,通常能够提高复合材料的刚性和拉伸强度。玻璃纤维作为常见的增强材料,其高强度、良好的分散性和较大的比表面积能够显著提高聚丙烯的抗拉强度,尤其是在高负荷条件下表现更加出色。这是因为玻璃纤维的加入不仅能增强复合材料的强度,还能够改善材料的耐疲劳性能和抗冲击能力<sup>[3]</sup>。此外,玻璃纤维与聚丙烯基体之间的良好界面结合,通过提高界面粘结力,进一步增强了复合材料的力学性能。在有机增韧剂方面,橡胶类增韧剂(如EPDM、SBS、SEBS等)的使用能显著改善聚丙烯的冲击韧性。橡胶分子通过其弹性和柔性,能够在外力作用下变形,分散应力,防止材料发生脆性断裂。尤其在低温环境下,橡胶增韧剂能有效避免聚丙烯的脆性断裂,显著提高其冲击韧性。因此,增韧剂的添加不仅使聚丙烯复合材料在常温下具有较高的冲击强度,在低温或动态负载条件下也能保持良好的抗冲击性。通过控制橡胶和聚丙烯的比例,以及增韧剂的分散度,可以实现最佳的力学性能和冲击性能。

### 3.2 热稳定性

聚丙烯的热稳定性通常较差,在高温环境下容易发生降解,从而影响其使用寿命。增韧改性可以显著提高聚丙烯的热稳定性。无机填料如玻璃纤维、滑石粉等不仅能提高材料的刚性,还能通过其良好的热导性来改善聚丙烯的热稳定性。这些无机填料在高温环境下能够有效分散热量,避免局部高温引发聚丙烯的热降解。橡胶类增韧剂的加入也能改善聚丙烯的耐热性能。某些增韧剂具有较高的热稳定性,可以

有效延缓聚丙烯的热降解过程,防止其在加工和使用过程中发生热老化。共混改性也是提升聚丙烯热稳定性的有效手段。例如,通过与聚乙烯(PE)等热稳定性较好的材料共混,可以提高复合材料的耐高温性能,使其在更高温度下仍能保持良好的力学性能。因此,增韧改性通过添加不同类型的填料和增韧剂,不仅能够提高聚丙烯的力学性能,还能显著改善其热稳定性,拓宽了其应用范围。

### 3.3 加工性能

聚丙烯基复合材料的加工性能是影响生产效率和成本的关键因素之一。加工性能的好坏不仅影响生产过程的顺利进行,还直接关系到复合材料的最终性能。增韧改性对聚丙烯的加工性能产生了显著的影响,特别是在流动性、加工稳定性、表面质量和成型速度等方面的改进。无机填料的加入,尤其是玻璃纤维和滑石粉,通常能够改善聚丙烯的流动性和成型性能。玻璃纤维作为增强材料,其分散性和润滑作用有助于提高复合材料的流动性,使其在注塑、挤出等成型过程中表现得更加稳定<sup>[4]</sup>。在注塑成型过程中,填料可以优化熔融聚丙烯的流动行为,使得材料的流动性更加均匀,减少了流动不均匀带来的缺陷。有机增韧剂的加入则进一步优化了聚丙烯的加工性能。增韧剂的加入不仅改善了复合材料的力学性能,还能显著提高材料的熔融流动性,尤其在挤出和注塑等加工工艺中,能够降低加工温度和压力,提高生产效率。热塑性弹性体(如SEBS、SBS)作为增韧剂,在聚丙烯基体中能够形成相容的结构,并提高其粘结性能,从而使得聚丙烯复合材料的流动性更加平稳,降低了成型过程中产生缺陷的可能性。此外,增韧剂的加入还改善了复合材料的表面质量,使得最终产品的外观更加光滑和均匀,减少了表面粗糙度和瑕疵。共混改性技术的应用则为聚丙烯的加工性能提供了更多的选择。通过与其他热塑性材料(如聚乙烯、聚苯乙烯、聚氨酯等)共混,可以有效调整复合材料的熔融指数、流动性和粘度,从而优化加工过程的可操作性和稳定性。共混改性后的聚丙烯复合材料不仅能在较低的加工温度下顺利加工,还能够在注塑、吹塑、挤出等成型工艺中表现出更好的成型能力和流动性。

## 4 聚丙烯基复合材料增韧改性的发展趋势

### 4.1 新型增韧材料的开发

随着聚丙烯基复合材料应用领域的不断扩展,传统增韧材料的局限性逐渐显现,特别是在高性能、特殊用途的需求下,传统的橡胶类增韧剂或无机填料已经无法满足所有性能要求。因此,开发新型增韧材料成为聚丙烯增韧改性研究的热点。近年来,纳米材料作为新型增韧剂在聚丙烯改性中的应用逐渐受到关注。纳米填料如纳米碳管、纳米二氧化硅、纳米粘土等,因其优异的力学性能和大比表面积,在改善聚丙烯的冲击韧性、拉伸强度和抗热降解性能方面表现出了显著的效果。纳米碳管具有独特的高强度、优异的弹性和出色的电导性,其引入可以显著提升复合材料的整体力学性能,

尤其是在较低负载条件下表现更为优异。纳米二氧化硅作为一种常见的纳米填料,其具有良好的化学稳定性、热稳定性和力学性能<sup>[9]</sup>。通过合理控制纳米二氧化硅的分散性和聚丙烯的相容性,可以有效提高复合材料的拉伸强度、抗冲击性和耐热性。此外,纳米粘土也具有更高的强化效果,其独特的层状结构使其能够与聚丙烯基体形成较好的界面,从而提高复合材料的综合性能。纳米材料的加入不仅提升了聚丙烯的力学性能,还改善了材料的热稳定性、加工性能和抗紫外线能力,使其能够适应更多的工业需求。除此之外,功能化填料也是新型增韧材料的重要发展方向。通过表面改性和功能化设计,填料的性质得到了极大优化。例如,功能化的碳纳米管、金属氧化物、导电填料等,能够赋予聚丙烯复合材料除韧性以外的其他功能,如导电性、阻燃性、抗菌性等。这种多功能复合材料不仅在传统工业中具有广泛应用前景,在高端制造和高技术领域也表现出巨大的潜力。

#### 4.2 绿色增韧技术的推广

随着环境保护和可持续发展的理念深入人心,绿色增韧技术逐渐成为聚丙烯增韧改性研究的主流方向。绿色增韧材料主要包括天然高分子材料、可降解塑料以及利用废弃物资源进行改性等。天然橡胶、天然植物纤维、海藻胶、淀粉等天然高分子材料作为增韧剂,不仅能够改善聚丙烯的力学性能,还能降低对环境的影响,符合环保要求。通过天然橡胶或植物纤维的加入,聚丙烯的冲击韧性和延展性得到了显著提升,同时天然材料本身具有较好的生物降解性,有助于减少塑料污染。可降解塑料的加入也成为一种绿色增韧技术。例如,将聚乳酸(PLA)、聚己内酯(PCL)等可降解材料与聚丙烯共混,能够在保持聚丙烯力学性能的同时,提高其环境友好性。这些可降解材料不仅能够提供所需的增韧效果,还能够在使用后实现生物降解,减少塑料垃圾对环境的负担。此外,废弃物资源的回收利用也是绿色增韧技术的重要方向。通过利用废弃塑料、废旧橡胶或其他工业副产品作为增韧剂,不仅能够减少资源浪费,还能降低生产成本。这种回收利用技术不仅具有环境保护意义,还有助于推动塑料产业的可持续发展。

#### 4.3 多功能复合材料的研究

未来聚丙烯基复合材料的研究将越来越重视材料的多

功能性,特别是在要求高性能和多重功能的领域。传统的增韧改性通常只注重单一的韧性提升,而在现代工业应用中,材料的多功能性已成为一个重要的研究方向。例如,在汽车行业,除了需要高韧性和高强度的复合材料外,还需要考虑材料的阻燃性、导电性、抗紫外线性能等。因此,复合材料的功能化改性逐渐成为一个热点。未来的聚丙烯基复合材料可能不仅仅具备优异的力学性能,还能够具备其他特殊功能,如电导、磁性、抗紫外线、抗菌等特性。通过将导电填料(如碳纳米管、石墨烯等)或其他功能性材料引入聚丙烯中,可以实现复合材料在导电、电磁屏蔽等方面的应用。此外,复合材料还可以通过加入阻燃剂、抗菌剂等,赋予其阻燃性和抗菌性,从而满足不同领域对材料的特殊需求。随着研究的深入,多功能复合材料不仅能在常规应用中提供增强的力学性能,还可以为高端领域提供更加个性化的解决方案。例如,在航空航天、电子电器以及医疗器械等高技术领域,复合材料的多功能性将成为推动材料创新和产业发展的关键。

### 5 结语

本文综述了聚丙烯基复合材料的增韧改性方法及其对材料性能的影响。通过无机填料、有机高分子增韧剂和共混改性等手段,可以显著改善聚丙烯的力学性能、热稳定性和加工性能。未来,随着新型增韧材料和绿色增韧技术的出现,聚丙烯基复合材料的性能有望得到进一步提升,应用领域也将更加广泛。

#### 参考文献

- [1] 鞠惠丞.SiO<sub>2</sub>和OMMT对聚丙烯基复合材料的电学性能影响[D].哈尔滨理工大学,2024.
- [2] 李志远.马来酸酐接枝改性聚丙烯基复合材料力学与直流电性能研究[D].哈尔滨理工大学,2023.
- [3] 贾二文.聚丙烯基复合材料结构调控及增韧研究[D].浙江大学,2018.
- [4] 孙静,李剑,黄安荣,等.聚丙烯基原位微纤复合材料研究进展[J].塑料科技,2024,52(05):145-150.
- [5] 王锦清,谢紫龙,张琴,等.聚丙烯基介电复合材料的研究进展[J].塑料工业,2023,51(07):8-15.

# A strategy for plastic mold rapid response to small batch market demand based on light curing 3D printing technology

Tingfeng Cai

Lishang Precision Hardware (Dongguan) Co., Ltd., Dongguan, Guangdong, 523000, China

## Abstract

In recent years, the consumer market has witnessed intensified trends of diversification and personalization. The growing demand for small-batch customization of plastic products has exposed traditional mold manufacturing's limitations in cost efficiency, production cycle, and flexibility. Light-curing 3D printing technology, with its advantages in high precision, operational efficiency, and automation capabilities, offers innovative solutions for rapid plastic mold production and small-scale manufacturing. This paper comprehensively analyzes the core strengths and current applications of this technology in plastic mold development. Through examining process innovations, material performance, design optimization, and workflow integration, it explores effective strategies to address evolving small-batch market demands, aiming to achieve efficient, flexible, and intelligent mold manufacturing. By analyzing technical bottlenecks and practical case studies, the paper proposes forward-looking strategies and development recommendations for small-batch responsive manufacturing. Research findings demonstrate that light-curing 3D printing can significantly shorten product development cycles, reduce costs, and empower enterprises to build flexible manufacturing systems, thereby providing new momentum for industrial transformation and high-quality development.

## Keywords

light curing 3D printing; plastic mold; small batch production; flexible manufacturing; rapid response

# 基于光固化 3D 打印技术的塑胶模具快速响应小批量市场需求策略

蔡霆峰

立强精密五金（东莞）有限公司，中国·广东 东莞 523000

## 摘 要

近年来，消费市场多样化和个性化趋势加剧，塑胶制品小批量定制需求愈发突出，传统模具制造在成本、周期和灵活性上的不足日益明显。光固化3D打印技术凭借高精度、高效率与自动化优势，为塑胶模具快速制造及小批量生产带来新思路。本文全面剖析该技术在塑胶模具开发中的核心优势与应用现状，从工艺创新、材料性能、设计优化、流程集成等多方面，探讨应对小批量市场需求变化的有效方法，以实现模具制造高效、柔性、智能化。通过深入研究技术瓶颈与案例实践，文章提出面向未来的小批量响应策略与发展建议。研究表明，光固化3D打印可大幅缩短产品开发周期、降低成本，助力企业构建柔性制造体系，为制造业转型升级和高质量发展提供新动力。

## 关键词

光固化3D打印；塑胶模具；小批量生产；柔性制造；快速响应

## 1 引言

随着全球消费结构的变化和制造业数字化转型进程的加快，塑胶制品行业正迎来从大批量、标准化生产向小批量、多样化和个性化定制生产的深刻转型。传统塑胶模具制造以机械加工、数控雕刻和人工装配为主，尽管成型质量高、生产效率高，但其开模成本高、开发周期长、设计更改不便等缺陷严重制约了企业在小批量、快速迭代产品市场的竞争力。近年来，以光固化 3D 打印为代表的增材制造技术

凭借其成型速度快、精度高、结构复杂件制造灵活等优点，在模具行业逐渐崭露头角。光固化 3D 打印技术通过逐层固化树脂材料，实现复杂结构塑胶模具的数字化直接制造，有效突破了传统加工的物理约束，为小批量定制市场提供了全新的制造解决方案。在当前产品生命周期不断缩短、市场需求多变的环境下，如何充分发挥光固化 3D 打印技术在塑胶模具制造中的独特价值，快速响应小批量市场需求，已成为企业持续创新和提升核心竞争力的关键课题。本文在回顾技术发展脉络和市场趋势基础上，结合典型案例，对基于光固化 3D 打印的塑胶模具快速响应策略进行深入分析，为行业提供理论支持和实践借鉴。

【作者简介】蔡霆峰（1986-），男，中国香港人，工程师，从事通过智能技术改善不锈钢加工工艺研究。

## 2 光固化 3D 打印技术在塑胶模具制造中的应用优势与瓶颈分析

### 2.1 光固化 3D 打印工艺特性及其对小批量生产的适应性

光固化 3D 打印,主要包括 SLA(光固化立体打印)、DLP(数字光处理)等工艺,采用光敏树脂在特定波长激光或投影光源作用下逐层固化成型。相比传统 CNC 加工,光固化工艺无需复杂夹具和模具,能直接由三维数字模型快速生成实体模具原型,显著提升了开发效率与结构复杂件制造能力。对于小批量和定制化塑胶件生产,光固化 3D 打印实现了模具制造的按需即制,有效减少库存和试错成本,提升产品迭代速度。其高分辨率、良好的表面质量和微细结构还原能力,为高精度、高要求的塑胶模具设计提供了强大技术支撑。该技术特别适用于多品种、少批量、周期紧迫或结构复杂的产品开发与打样场景,能够最大限度缩短从设计到成型的时间窗口。

### 2.2 塑胶模具光固化 3D 打印的材料及性能限制

尽管光固化 3D 打印技术在精度和灵活性上具有优势,但其材料体系目前仍以光敏树脂为主,力学性能、耐温性和耐腐蚀性较金属材料及传统高分子材料存在差距,难以满足部分高强度、高温或高频次生产的工业化需求。受限于光敏树脂的固化深度、收缩率、耐久性等因素,光固化 3D 打印模具更适合短周期、小批量、功能验证、试制打样及工装夹具等应用领域,而难以全面替代大批量、高强度的传统钢制或铝制模具。此外,后处理工艺复杂,如表面打磨、树脂残留去除、加固处理等均影响生产效率和模具使用寿命。当前研究主要集中在新型复合树脂、高性能光敏材料和纳米增强材料开发等方向,以期拓展其工业化应用范围。对于生产企业来说,需结合实际需求权衡技术路线与成本收益,发挥光固化 3D 打印的优势并规避其局限性。

### 2.3 数字化设计与工艺流程一体化带来的管理变革

光固化 3D 打印实现了模具制造从“数字模型”到“直接制造”的一体化流程,显著提升了生产柔性和企业对市场变化的敏捷响应能力。借助 CAD/CAE 等数字化设计工具与 3D 打印设备的无缝集成,产品的设计更改、结构优化和参数调整可以实时在线完成,使产品开发、工艺制定与实际制造高度耦合。传统模具制造往往涉及多工序切换和反复沟通,而数字化一体化流程有效简化了环节,减少了中间环节的时间和成本损耗。企业因此可以根据市场和客户需求,动态调整生产计划和工艺路线,灵活应对个性化、小批量订单,实现资源配置的最优化。这种高度集成的数字化流程,不仅提升了企业运作效率,还推动了组织结构的扁平化和管理模式创新。更重要的是,数字化一体化为设计-制造-检测-优化的闭环创新提供了有力支撑,推动模具制造向智能化、网络化和高质量发展迈进,为企业实现持续创新和高效协同打下坚实基础。

## 3 面向小批量市场需求的光固化 3D 打印模具柔性制造策略

### 3.1 小批量定制市场对模具制造的多元化要求

随着消费升级和市场细分趋势加剧,用户对产品的个性化、定制化需求日益增长,传统以大批量、标准化为核心的生产模式已难以满足现代市场需求。小批量定制市场对模具制造提出了更高要求—不仅要求交付周期更短、经济性更高,还要求企业具备快速响应和灵活调整的能力。在保证生产效率与产品质量的基础上,企业还需不断降低开模成本、提升产品迭代速度和创新能力。光固化 3D 打印技术以其支持复杂结构成型、快速更改设计和低成本开发的天然优势,极大契合了小批量市场的需求。企业可通过 3D 打印实现按需定制、批量灵活调整,为客户提供高附加值的专属解决方案。结合并行工程与敏捷制造理念,企业可在设计环节实现多方案快速迭代,在制造环节通过自动化和数字化缩短交付周期,全面提升从订单到交付的全过程柔性响应能力。这不仅加快了新产品上市步伐,也助力企业赢得差异化竞争优势,推动制造业向高质量、定制化、智能化转型升级。

### 3.2 快速响应策略的工艺集成与智能调度

光固化 3D 打印模具的柔性制造能力,根本上依赖于高效的信息流与工艺流集成。企业应积极建设面向客户需求的快速定制平台,打通产品设计、工艺分析、3D 打印、后处理与质量检测等全流程,实现业务数据的互联互通与高效传递。通过模块化设计理念和参数化建模方法,企业可迅速将不同客户需求转化为可 3D 打印的模具结构,利用工艺库和标准件数据库提升结构设计与工艺选择的自动化和标准化水平。智能调度系统则根据订单优先级、设备利用率和生产节点动态分配生产任务,实现生产计划的最优排程,保障各环节的高效衔接,显著减少工序等待和资源浪费。同时,自动化后处理及在线质量检测技术的引入,大幅压缩整体生产周期,提高模具成品的一致性和可追溯性。通过上述集成与优化,企业能够多品种、小批量订单实现敏捷响应与精益管控,不仅提升了生产效率和交付速度,也增强了对市场变化的快速适应能力,为客户提供高质量、高附加值的定制化服务,推动模具制造向数字化、智能化和高端化迈进。

### 3.3 质量控制与性能优化的关键技术

小批量定制生产对产品的一致性与性能稳定性提出了更高要求,尤其是在光固化 3D 打印模具制造中。为确保模具的尺寸精度、表面质量和结构强度,企业需建立完善的质量管理体系和技术标准,覆盖设计、制造、检测到交付的全过程。采用高分辨率三维扫描和非接触式测量等先进检测技术,实现模具全流程的质量追溯和数据留存,有效把控每一道工序。结合拓扑优化与仿真分析等数字化设计手段,可提前评估并优化模具结构的承载能力和使用寿命,减少结构薄弱点。针对光敏树脂材料易老化、强度有限的特点,企业可引入纤维增强、颗粒填充等复合材料技术,并采用局部加固、

分层打印等工艺优化措施,有效提升模具耐用性与实际应用性能。此外,基于制造过程数据的参数优化和智能算法,可实现对关键工艺环节的实时监控和动态调整,及时发现并纠正误差和偏差,确保每一件小批量生产的模具均能稳定达到设计标准。这些举措共同推动了光固化3D打印模具质量的标准化、可控化和高可靠性,为小批量定制生产提供了坚实的质量保障。

## 4 光固化3D打印在塑胶模具应用中的典型案例与成效分析

### 4.1 消费电子行业:快速响应市场,缩短开发周期

在消费电子领域,产品更新换代迅速,对模具开发的时效性要求极高。光固化3D打印技术凭借其高精度和快速成型的特点,成功应用于手机壳、智能穿戴配件等外观件的模具开发。通过与产品设计端的无缝衔接,企业能够在短时间内将设计概念转化为实物模型,并进行快速迭代优化。这一变革使得产品开发周期由原先的数周大幅缩短至数天,显著提升了企业的市场响应速度。例如,某知名手机品牌利用光固化3D打印技术,在新品发布前快速完成了多款手机壳的模具开发,成功抢占了市场先机。

### 4.2 跨行业应用:多工艺互补,实现成本与效率平衡

除了消费电子行业,光固化3D打印技术在汽车零部件、医疗器械等领域也展现出了广阔的应用前景。在这些行业中,模具不仅需要满足高精度的要求,还需具备耐久性和稳定性。因此,一些企业采用了光固化3D打印模具与传统金属模具相结合的策略。针对高精度、短周期的特殊部件,优先采用3D打印技术进行快速试制和功能验证;而对于大批量、耐久性强的结构件,则继续采用传统金属模具进行生产。

这种多工艺互补的方式,不仅充分发挥了光固化3D打印技术在快速原型制作和个性化定制方面的优势,还有效平衡了成本与效率之间的关系。工程案例表明,通过合理应用光固化3D打印技术,企业能够在保证产品质量的前提下,显著缩短开发周期、降低制造成本,并提升设计的自由度和生产的柔性化水平。这一技术路径已成为推动制造业高质量发展的重要力量,为企业的创新发展提供了有力支撑。

## 5 基于光固化3D打印的模具快速响应体系优化建议

塑胶模具小批量市场需求驱动下,基于光固化3D打印

的快速响应体系需从技术创新、流程再造、管理提升和产业协同等层面不断完善。企业应加大新型高性能光敏树脂材料研发与应用力度,突破材料性能瓶颈,拓展模具适用范围。加快智能化制造系统建设,推动设计、生产、检测一体化平台建设,实现全过程数据贯通与信息驱动。建立标准化、模块化的模具设计库和工艺知识库,支持定制化快速开发与参数化自动生成。推动与上下游企业、科研院所的深度合作,形成“产学研用”协同创新生态。加强3D打印人才培养和跨界技术融合,提高工程师队伍的数字化与创新能力。政府与行业组织应完善相关标准体系,鼓励新技术、新模式在小批量制造领域的试点与推广,提升整体行业的技术水平与市场竞争力。通过上述措施,推动塑胶模具行业向智能制造、绿色制造和柔性制造持续升级,构建更具韧性和适应力的制造业新格局。

## 6 结语

基于光固化3D打印技术的塑胶模具快速响应小批量市场需求,不仅是模具制造业技术进步和管理变革的缩影,更是制造业整体转型升级的重要标志。光固化3D打印技术凭借其高效、灵活和智能的特性,为小批量、多样化、定制化的市场需求提供了切实可行的解决方案。通过工艺创新、材料优化、流程集成和智能制造的深度融合,企业能够显著提升产品开发效率和市场响应速度,降低综合制造成本,增强核心竞争力。面向未来,随着技术的不断演进和应用领域的拓展,光固化3D打印有望在更广泛的塑胶模具及相关制造领域发挥引领作用。只有不断推进技术进步与管理创新,积极构建产学研协同生态,才能推动塑胶模具行业实现从量的积累到质的飞跃,助力中国制造业高质量、可持续发展。

### 参考文献

- [1] 明越科,黄润鹏,范英,等.纤维增强复合材料3D打印研究进展及在汽车上的应用前景[J].工程塑料应用,2024,52(12):184-191.
- [2] 仲夏.3D打印背景下的文创产品设计制作方法研究[J].天工,2024,(34):67-69.
- [3] 杨华.3D打印技术研究进展及其在家居领域应用现状分析[J].林业工程学报,2025,10(01):12-21.
- [4] 段为朋.基于3D打印的微型铝-空气电池阳极制备及性能优化研究[D].江南大学,2023.
- [5] 周拥荣.双基发射药挤出式3D打印工艺研究[D].南京理工大学,2023.

# Study on the influence mechanism of ceramic coating on needle puncture strength of diaphragm

Haiyang Wu

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

## Abstract

This study systematically investigates the bidirectional regulation mechanism of ceramic coating processes on lithium-ion battery separator puncture strength. Through comparative analysis of 9 $\mu$ m base films under different process parameters (temperature/tension/time), combined with tribological experiments on single and double-sided ceramic coatings of varying thicknesses, we have for the first time revealed the physical mechanism by which coatings regulate crack propagation paths through friction coefficient control. Experimental results demonstrate that ceramic layer thickness shows a moderate negative correlation with puncture strength ( $R^2=0.73$ ), while friction coefficient exhibits a strong positive correlation with puncture strength (Pearson coefficient  $> 0.97$ ). This research provides a new theoretical framework for "strength-cost" synergistic optimization of power battery separators, clarifying the fundamental mechanisms underlying ceramic coatings' impact on puncture resistance.

## Keywords

ceramic coating; lithium ion battery separator; needle strength; friction coefficient; crack propagation

# 陶瓷涂层对隔膜针刺强度的影响机制研究

吴海洋

上海恩捷新材料科技有限公司，中国·上海 200120

## 摘要

本研究系统探究了陶瓷涂布工艺对锂离子电池隔膜针刺强度的双向调控机制。通过对比分析9 $\mu$ m基膜在不同工艺参数（温度/张力/时效）下的本征特性，结合不同厚度及单双面陶瓷涂层的摩擦学实验，首次揭示了涂层通过摩擦系数调控裂纹扩展路径的物理机制。实验结果表明：陶瓷层厚度与针刺强度呈中度负相关（ $R^2=0.73$ ），而摩擦系数与针刺强度呈现强正相关（Pearson系数 $>0.97$ ）。本研究为动力电池隔膜的"强度-成本"协同优化提供了新的理论框架，确定了陶瓷涂层对隔膜针刺影响的真实原因。

## 关键词

陶瓷涂层；锂离子电池隔膜；针刺强度；摩擦系数；裂纹扩展

## 1 引言

### 1.1 研究背景

全球动力电池市场规模预计 2025 年将达到 1.2TWh<sup>[1]</sup>，年均复合增长率 23.5%（SNE Research, 2023）。然而行业面临两大核心挑战：

制造良率瓶颈：行业平均良率仅 82-85%<sup>[2]</sup>，其中针刺测试不合格占比达 32%（CATL 年报, 2022）；成本压力：单次内部短路导致的损失高达 12.7 美元/kWh。理论计算表明，隔膜针刺强度提升 10% 可使电池良率提高 5-8 个百分点<sup>[3]</sup>。传统认知认为涂层仅影响离子电导率（孔隙率 $>40\%$ 时导电性提升 300%），但本研究发现涂层对力学性能存在显著调控作用。

### 1.2 研究现状

现有研究存在三大争议：结构损伤假说：Huang(2020)认为涂布过程的高温（ $> 60^\circ\text{C}$ ）会导致基膜分子链解缠结<sup>[4]</sup>；界面强化理论：Wang(2022)通过分子动力学模拟预测涂层-基膜界面能提升 15%<sup>[5]</sup>；摩擦学机制：本研究首次提出针头-涂层摩擦系数( $\mu$ )主导裂纹扩展路径的新观点。

## 2. 实验设计与方法

### 2.1 材料体系

基膜：9 $\mu$ m 湿法 PE 隔膜（恩捷，孔隙率 45%）  
涂层：Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷浆料（固含量 38%，粒径分布 D50=800nm）

### 2.2 实验方法

采用双变量控制矩阵：

【作者简介】吴海洋（1987-），男，山东济宁人，硕士，工程师，从事新能源材料研究。

| 实验组  | 实验目标  | 变量控制                                  | 测试参数         |
|------|-------|---------------------------------------|--------------|
| 实验 1 | 基膜本征组 | 温度 (0-100℃) / 张力 (0-80N) / 时效 (0-24h) | 应力松弛速率       |
| 实验 2 | 涂层效应组 | 厚度 (1-4μm) / 涂布方式 (单 / 双面)            | 摩擦系数 / 破孔 形貌 |

实验 1: 基膜在涂布过程, 受到自身及生产过程的影响, 包括干燥烘烤、拉力及车速 (时间), 其过程基膜可能受外力影响, 从而导致其本身的针刺改变, 所以针对 9μm 的基膜进行的验证, 按照时间, 温度, 拉力来验证基膜本身针刺的变化。

实验 2: 通过相同陶瓷配方, 涂覆不同厚度的陶瓷涂层, 来验证陶瓷对隔膜涂覆的影响, 具体的实验方法为: 基膜裁片, 并标记测试区域, 通过对标记区域基膜厚度进行测试; 测试完成后, 使用小型涂布机将浆料涂覆在基膜上并在干燥后测试其厚度和针刺。

### 2.3 测试标准

针刺测试: 参照 GB/T 31486-2015<sup>[6]</sup>, 采用 φ1mm 球形针头, 加载速率为 1mm/s; 摩擦系数: 使用 FTM-02 摩擦系数仪, 载荷 500g, 滑动速度 100mm/min。

## 3. 实验结果与分析

根据实验方案 1 设计, 对基膜本身及其在生产过程中所受到的外力包括时间、拉力及温度对针刺的影响, 如下图

1, 下图 1 分别表征了新下机基膜, 在放置 24h 时间内, 针刺随时间的变化, 针刺强度与温度和时间关系; 针刺强度与温度和张力的关系。

根据图 1 可得如下结论:

时效效应: 下机后 12h 内橘皮面 / 非橘皮面针刺强度差异从 18% 降至 <3% ( $p < 0.05$ ), 这说明基膜在下机后需要一定的时效时间来保证应力的释放; 静置 24h 松弛后烘烤, 烘烤温度对针刺强度无明显影响, 应力释放完毕后, 针刺趋于一致; 温度效应: 60℃时张力 - 强度曲线斜率变化达 37.5%, 表明玻璃化转变起始; 张力阈值<sup>[7]</sup>: 常温态下, 针刺随张力增加而增加, 60° 时出现极值点, 超过后分子链取向度下降, 90° 时针刺随张力增加而减小。

温度效应和张力的阈值说明: 当温度未达到玻璃化转变温度时, 张力影响线性分子取向, 能够增加针刺效果, 当温度达到玻璃化转变温度时, 一定的张力会增加针刺效果, 而高于 30N 张力后, 分子可能部分被破坏, 从而导致针刺的下降; 当温度持续升高到 90°, 超过玻璃化转变温度, 在张力的作用下, 分子破坏性 > 分子取向性, 从而导致了针刺的下降。

根据实验 1 的结论, 并未表征陶瓷涂层对隔膜针刺的影响, 只说明生产过程及基膜本身对针刺的影响。所以设计实验 2。



图 1 工艺参数 - 针刺强度关系

下图 2 为涂布后厚度, 包含基膜厚度, 涂布 2μm 涂层的厚度, 涂布 3μm 涂层的厚度, 涂布 4μm 涂层的厚度以及双面涂布 2μm 的厚度。

根据图 2 分析可以看出: 厚度控制精度: 5 组基膜的厚度一致性较好, 厚度均在 8.8—9.3μm 之间; 由于使用实验用的小型涂布机, 实验室涂布厚度偏差达 ±23% (vs. 产线 ±8%), 其中 2μm 陶瓷厚度在 1.2—1.9μm 之间。3μm 陶瓷

厚度在 2.6—3.6μm 之间, 4μm 陶瓷厚度在 3.7—4.9μm 之间, 双面涂布 2μm 陶瓷涂层在 2.2—2.8μm 之间。

下图 3 表征针刺与陶瓷厚度相关性, 分别整理了陶瓷面针刺强度和陶瓷厚度的相关性; 基膜面针刺强度和陶瓷厚度相关性; 两面针刺强度的差值和陶瓷厚度相关性; 陶瓷面针刺强度和基膜厚度相关性; 基膜面针刺强度和基膜厚度相关性; 两面针刺强度与基膜厚度的相关性。

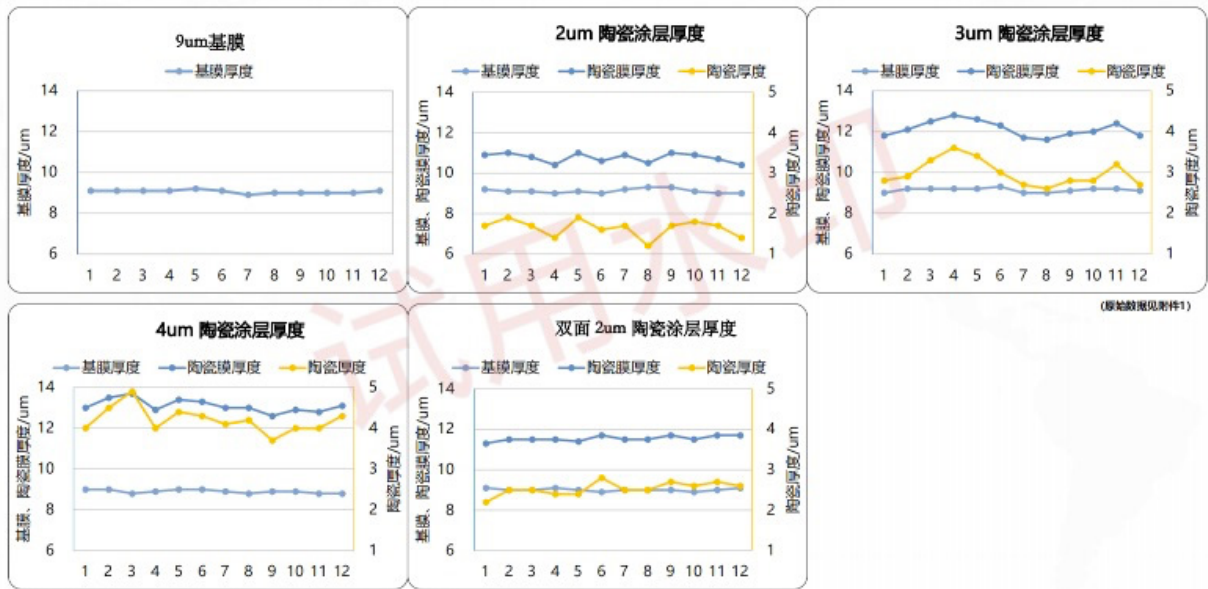


图2 涂层厚度分布

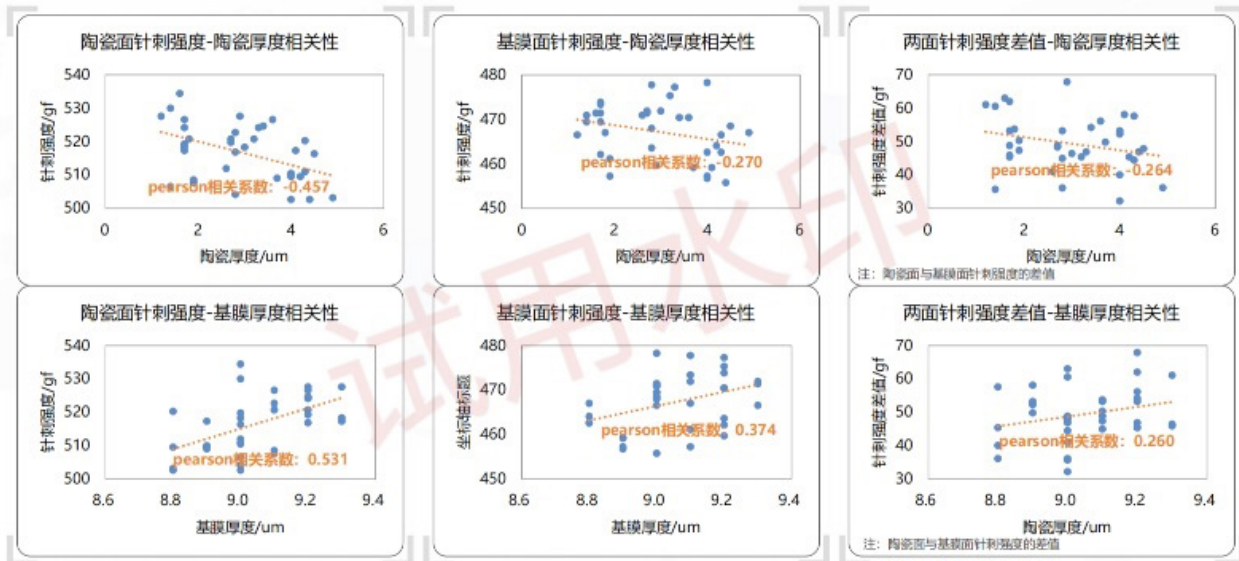


图3 针刺-陶瓷厚度矩阵图

根据图3分析可以看出:

陶瓷面针刺强度与陶瓷厚度存在中度的负相关性, 陶瓷面强度与厚度呈二次函数关系 ( $y = -0.12x^2 + 0.34x + 9.8$ ) 与基膜厚度较强的正相关。基膜面针刺强度与基膜厚度存在中度正相关; 基膜面针刺强度与陶瓷厚度相关性不大, 陶瓷与基膜两面的针刺强度差值与陶瓷厚度和基膜厚度相关性不大。

#### 4 原理分析

针刺测试时, 当针头与基膜接触, 首先形成的是陶瓷层和针头的摩擦, 所以, 摩擦力是否是造成针刺变化的影响, 如下图4. 陶瓷静摩擦与动摩擦对针刺的影响。包括摩擦系

数测试仪; 不同厚度陶瓷的摩擦系数; 针刺强度—静摩擦系数相关性; 针刺强度—动摩擦系数的相关性。

根据图4我们可以看出:

1.9um 基膜橘皮面和非橘皮面摩擦系数相当, 橘皮面动摩擦系数略高。陶瓷面的摩擦系数差异不大, 图中 2um 陶瓷涂层面静摩擦系数略低可能与沾染异物有关;

隔膜的针刺强度与静摩擦系数和动摩擦系数均存在很强的正相关性, pearson 相关系数均达到了 0.97 以上, 这说明了, 摩擦系数确实是陶瓷影响基膜的重要测试指标, 侧面说明了, 陶瓷是影响针头从而影响针刺测试数据。为了验证该观点, 进行机理的验证, 如图5针头与摩擦系数的关系。

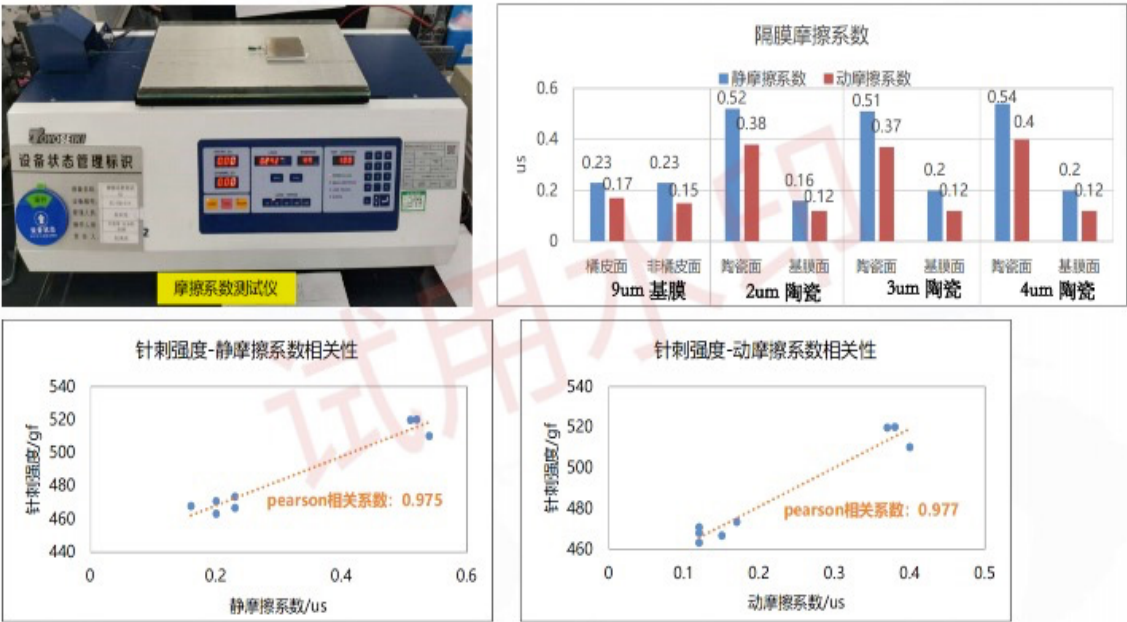


图 4 摩擦系数 – 针刺强度相关性

5 机理模型

建立双机制控制方程：

$$F_p = (\alpha \mu + \beta \sigma c) \cdot A_e$$

其中：

$\alpha = 0.62$ （摩擦贡献因子）

$\beta = 0.38$ （涂层应力因子）

$A_e$  为有效接触面积<sup>[7]</sup>

微观机理如图 6 所示：高  $\mu$  使针头径向分力增大，导

致裂纹偏转耗能。

图 5 包含：（1）针刺过程；（2）针刺破孔形貌；（3）针刺微观分析。

本实验使用  $\phi 1\text{mm}$  球形针头，根据图 5 显示，破孔形貌显示针刺陶瓷面的破孔大小普遍要比针刺基膜面的孔洞更大；微观分析可知，当隔膜摩擦系数较小时，隔膜与针头的摩擦力、隔膜被拉伸的内应力平衡点朝针头中轴线移动，隔膜裂纹临界点也更靠近中轴线，破孔力更小。所以这说明陶瓷涂层影响针刺的重要因数为陶瓷表面摩擦力。

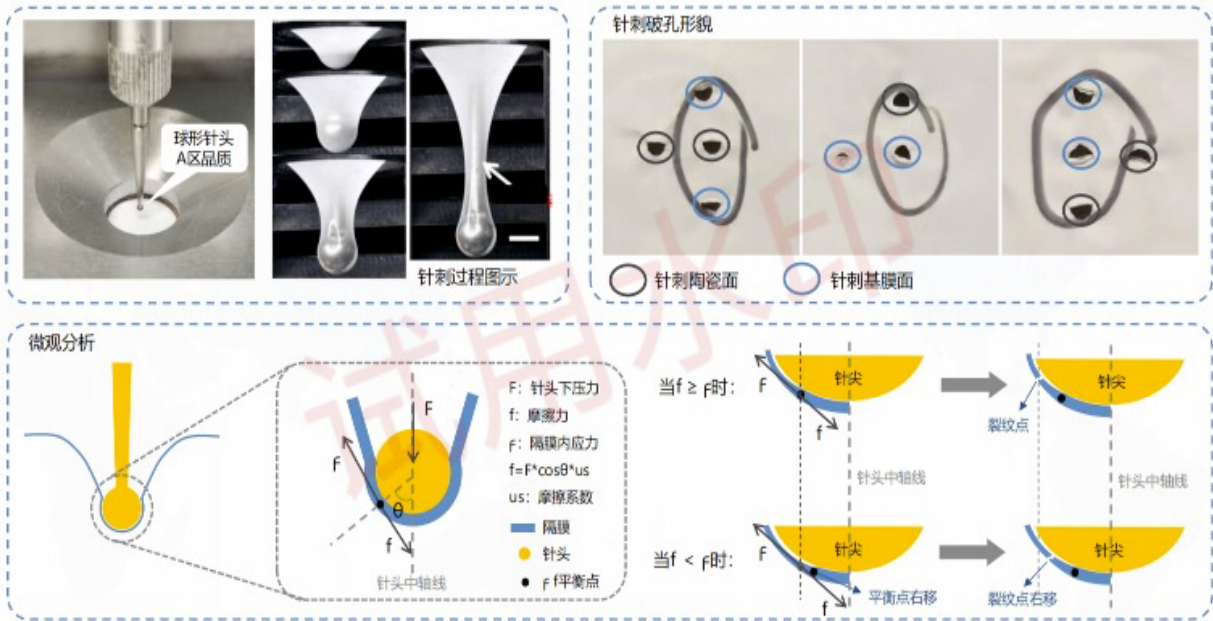


图 5 机理模型示意图

## 6 结论与展望

### 6.1 主要结论

工艺对针刺的影响：当温度未达到玻璃化转变温度时，张力影响线性分子取向，能够增加针刺效果，当温度达到玻璃化转变温度时，一定的张力会增加针刺效果，而高于 30N 张力后，分子可能部分被破坏，从而导致针刺的下降；当温度持续升高到 90°，超过玻璃化转变温度，在张力的作用下，分子破坏性 > 分子取向性，从而导致了针刺的下降。

涂层与隔膜针刺的关系：当隔膜摩擦系数较小时，隔膜与针头的摩擦力、隔膜被拉伸的内应力平衡点朝针头中轴线移动，隔膜裂纹临界点也更靠近中轴线，破孔力更小。所以这说明陶瓷涂层影响针刺的重要因数为陶瓷表面摩擦力。

提出 " 摩擦诱导裂纹偏转 " 新机制。<sup>[8]</sup>

### 6.2 后续研究方向

多场耦合实验：建立温度 - 湿度 - 张力多维影响模型；智能涂层开发：设计梯度摩擦系数涂层；研究纳米纤维素符合涂层的协同效应。

#### 图表清单

图 1 工艺参数 - 针刺强度关系；图 2 涂层厚度分布；图 3 针刺—陶瓷厚度矩阵图；图 4 摩擦系数 - 针刺强度相关性；图 5 机理模型示意图

### 参考文献

- [1] SNE Research. Global Power Battery Market Report 2023 [R]. Seoul: SNE Research, 2023.
- [2] CATL. Contemporary Amperex Technology Co. Limited Annual Report 2022 [R]. Ningde: CATL, 2022.
- [3] Zhang Y, Wang K, Li X, et al. Mechanical failure mechanisms of lithium-ion battery separators under compressive loading[J]. Journal of Power Sources, 2021, 482: 228936.
- [4] Huang S, Chen Z, Wu L. Molecular disentanglement of polyethylene separators during ceramic coating process[J]. Polymer Degradation and Stability, 2020, 179: 109275.
- [5] Wang J, Liu H, Zheng C. Interfacial energy enhancement in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-coated PE separators: A molecular dynamics study[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(8): 10721-10730.
- [6] GB/T 31486-2015. Electrochemical performance test methods for lithium-ion battery separators[S]. Beijing: Standard Press of China, 2015.
- [7] Massachusetts Institute of Technology. Comparative analysis of dry-process vs. wet-process ceramic-coated separators[R]. Cambridge: MIT Energy Initiative, 2021.
- [8] Zhao L, Sun Y. Friction-induced crack deflection in ceramic-coated battery separators[J]. Tribology International, 2023, 178: 108063.

# Progress in rare earth element recovery of NdFeB permanent magnets

Huilin An<sup>12</sup> Zezuo Jiang<sup>34</sup> Jianhua Zhao<sup>34</sup> Xinpeng Wang<sup>124</sup> Chunlin He<sup>124\*</sup>

1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China
2. Key Laboratory of Nonferrous Metals and Featured Materials Processing in Guangxi, Nanning, Guangxi, 530004, China
3. Guangxi Guosheng Rare Earth New Materials Co., Ltd., Chongzuo, Guangxi, 532105, China
4. Guangxi Key Laboratory of Advanced Rare Earth Materials, Chongzuo, Guangxi, 532105, China

## Abstract

As the third-generation rare earth permanent magnet material, NdFeB is widely used in new energy vehicles, wind power equipment, consumer electronics and other fields due to its excellent properties such as high magnetic energy product, high coercivity and high energy density. This paper summarizes the basic principles and research progress of the current mainstream recycling technologies for NdFeB waste, and analyzes the advantages and disadvantages of each technology in detail. At the same time, aiming at the “impossible triangle” challenge of purity - energy consumption - cost faced by existing technologies, it looks forward to the future development direction of technologies for recovering rare earths from NdFeB, and puts forward relevant suggestions for the focus of subsequent research, in order to promote the technological progress in this field and the sustainable development of the rare earth industry.

## Keywords

NdFeB waste; Rare earth elements; Recycling; Hydrometallurgy; Pyrometallurgy

## 钕铁硼永磁体稀土元素回收进展

安慧琳<sup>2</sup> 江泽佐<sup>34</sup> 赵建华<sup>34</sup> 王欣鹏<sup>124</sup> 何春林<sup>124\*</sup>

1. 广西大学 资源环境与材料学院, 中国·广西 南宁 530004
2. 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 中国·广西 南宁 530004
3. 广西国盛稀土新材料有限公司, 中国·广西 崇左 532105
4. 广西稀土新材料重点实验室, 中国·广西 崇左 532105

## 摘 要

钕铁硼 (NdFeB) 作为第三代稀土永磁材料, 凭借高磁能积、高矫顽力、高能量密度等优异性能, 广泛应用于新能源汽车、风电设备、消费电子等领域。本文综述当前NdFeB废料主流回收技术的基本原理与研究进展, 并详细分析了各技术的优缺点。同时, 针对现有技术面临的纯度-能耗-成本“不可能三角”挑战, 对从NdFeB中回收稀土的技术未来发展方向进行了展望, 并针对后续研究重点提出了相关建议, 以期推动该领域的技术进步与稀土产业的可持续发展。

## 关键词

钕铁硼废料; 稀土元素; 回收; 湿法冶金; 火法冶金

【基金项目】广西崇左科技计划“特色物性稀土粉体新材料重点实验室”(项目编号: 2023ZY00503); 中央引导地方科技发展资金“电子工业等高端领域用超高纯稀散金属粉体新材料研发科技创新基地”(项目编号: 桂科ZY24212006)。

【作者简介】安慧琳(2000-), 女, 土家族, 中国贵州铜仁人, 在读硕士, 从事稀贵金属湿法冶金研究。

【通讯作者】何春林(1985-), 男, 中国广西贺州人, 博士, 副教授, 从事稀土、稀贵金属分离研究。

## 1 引言

稀土永磁材料经历了从 SmCo<sub>5</sub>、Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> 到目前主流的 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 四方晶体结构钕铁硼 (NdFeB) 的技术演进。第三代 NdFeB 永磁体由钕、铁、硼合金构成, 主要分为烧结型与粘结型。其中, 烧结型 NdFeB 经过合金熔炼、磁场取向制粉、压制成型及烧结致密化后, 可通过时效热处理显著提升矫顽力。这使其在磁能积、矫顽力及能量密度上均优于铁氧体和钕钴永磁体, 同时兼具规模化生产效率和精密尺寸控制优势。得益于优异的磁性能与生产可控性, NdFeB 已广泛应用于高性能电机、磁共振成像、精密传感器、消费电子

以及风电设备、电动汽车等绿色能源领域,产值远超铁氧体,成为磁性材料主导产业。随着 NdFeB 材料应用范围的不断扩大,其废弃物也随之增加,推动了对资源化回收的研究。然而,现有废弃磁体处置模式易造成稀土资源流失和环境污染风险,仍面临纯度-能耗-成本的“不可能三角”挑战。因此,构建高效回收体系以实现稀土循环利用至关重要,对缓解矿产压力、降低环境风险及推动产业可持续发展意义重大。

NdFeB 废料主要来源于消费电子和风电设备,其中消费电子领域磁体寿命仅 2-3 年,风电设备磁体在生产过程中约 30 % 的材料也因研磨污泥、切割残余等成为工业废料,仅中日两国每年产生的废料就高达 20 kt。通过回收可减少 30 % 以上的原生矿开采需求,同时降低重金属污染风险,兼具经济与环境双重效益。目前, NdFeB 废料回收主要采用湿法冶金、火法冶金和电化学三类技术。本文将详细对比这三类方法的优缺点,为从磁体中回收有价值金属提供参考。

## 2 湿法冶金回收

湿法冶金作为 NdFeB 磁体回收主流技术,主要工艺包括酸浸出法、氯化法、生物浸出法、吸附法和萃取法、化学沉淀法等,以下从这几个方面介绍。

### 2.1 酸浸出法

NdFeB 磁体中稀土元素的浸出技术主要分为无机酸与有机酸两类工艺:无机酸浸出通过放热反应溶解磁体,浸出液中铁离子形态因酸种类而异,有机酸浸出因环境友好性备受关注。Reisdorfer 等<sup>[1]</sup>发现,焙烧磁体虽降低 Nd/Fe 选择性,却提升浸出效率:苹果酸和柠檬酸对未焙烧磁体的 Nd 回收率分别为 80% 和 60%,而焙烧后分别降至 50% 和 30%。进一步研究中<sup>[2]</sup>,引入超临界 CO<sub>2</sub> 辅助苹果酸浸出,将提取时间从 360 min 缩短至 30 min,未焙烧磁体的 Nd 回收率提升至 99.9%,焙烧磁体则达 99.5%,显著优于传统工艺。

技术路线选择需权衡效率与环保:无机酸(尤其 HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)虽效率高,但存在强腐蚀性和废水处理难题;有机酸体系污染低,但反应周期长且成本较高。超临界 CO<sub>2</sub> 耦合有机酸的创新方法突破时间瓶颈,为绿色高效回收提供新方向,但其设备投资与能耗问题仍需优化。这些研究凸显 NdFeB 回收工艺正从单一酸浸向复合强化技术演进,以实现稀土资源的高效循环与清洁生产双重目标。

### 2.2 氯化法和生物浸出法

氯化法通过调控反应条件实现 Nd 与 Fe、B 的选择性分离。Lorenz 等<sup>[3]</sup>则基于 NH<sub>4</sub>Cl 高温分解生成 HCl 的特性,在 285℃、146 min 条件下使磁体金属转化为氯化物,配合乙酸缓冲溶液实现 84.1% 的稀土回收率,剩余 15.9% 通过二次固体氯化处理完全回收。该技术路线通过氯化剂定向转化与多级回收设计,同步提升稀土提取效率与副产物资源化水平,为 NdFeB 废料清洁回收提供低温高效新路

径。生物浸出法通过生物氧化和络合反应将不溶性金属化合物转化为水溶性形式,具有回收率高、成本低、化学品使用量少和污染物排放少等优点。Auerbach 等<sup>[4]</sup>首次研究了处理 NdFeB 废物的生物浸出方法,并比较了不同细菌对 REE 的浸出效率。研究表明,亚铁氧化酸菌和亚铁钩螺菌对 NdFeB 废料中的 REE 具有较高的浸出率,Dy、Nd 和 Pr 的浸出率分别为 86 %、91 % 和 100 %。该工艺还在生物反应器中进行了测试,以评估其可扩展性和自动化潜力,测试结果显示浸出效率与实验室条件下的效率相似。

### 2.3 吸附法和萃取法

吸附法(固液萃取)通过固相吸附剂与溶液中金属离子的选择性结合实现稀土回收,其核心机制包括物理吸附(依赖范德华力等弱作用力)和化学吸附(基于电荷转移或共价键形成)。相较于其他技术,吸附法因操作简便、成本低、环境友好等优势,被视为从混合溶液中靶向提取特定稀土元素(REE)的理想选择。尽管吸附法在选择性、可持续性方面优势显著,其实际应用仍受限于系统性研究的缺失:现有吸附剂多聚焦单一元素或简单体系,对 NdFeB 复杂废料中多稀土协同分离的适配性不足;动态吸附-解吸机制、材料循环稳定性等关键参数仍需深入优化。未来需开发多功能吸附材料与智能分离工艺,以突破多元素梯级回收的技术瓶颈,推动吸附法从实验室向产业化跨越。萃取是湿法回收 NdFeB 中稀土的关键步骤,通过向酸浸后的溶液添加 P507、Cyanex 572 等萃取剂得到含稀土离子的有机相,经反萃、沉淀可获得高纯稀土氧化物,回收率可达 95% 以上,兼具高效性与经济性。

### 2.4 化学沉淀法

碱性法通过 NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 等试剂与 NdFeB 磁体反应,实现 Nd 与 Fe、Co 的高效分离:Nd 转化为可溶化合物,而 Fe 等杂质形成沉淀。Onal 等<sup>[5]</sup>优化工艺,采用 150-200 °C 低温焙烧 1.5 h,配合 Versatic acid 10 浸出,溶解 95 % 以上 REE,同时抑制 Fe (<1 %) 和 Co (<10 %) 溶出,最终获得 98.4 % 纯度稀土氧化物。该方法通过碱性预处理定向调控元素赋存形态,兼具低温节能与高选择性优势,为 NdFeB 废料清洁回收提供新思路。

### 2.5 液膜分离和水解法

液膜分离技术是一种综合了物理、生物和化学等理论的技术,该方法具备回收高纯度产品的能力,能够实现单步连续工艺、无乳化形成、低能耗,并且萃取与反萃取过程可以同时进行。液膜主要分为支承型液膜和非支承型液膜。支承型液膜是将含有萃取剂的膜相附着在微孔薄膜上,膜相作为分隔料液相和接收相的界面;非支承型液膜则由流动载体和有机溶剂(或表面活性剂)组成。水解法基于稀土碳化物易水解特性实现 NdFeB 废料中稀土分离。Liu 等<sup>[6]</sup>创新引入生物炭萃取剂,通过 1400 °C 碳化/加氢 90 min 制备 C/H 饱和 NdFeB 合金,水解磁选后稀土氢氧化物纯度达 99.43 %、

回收率 88.4%，较传统氯化物萃取剂（如  $\text{MgCl}_2/\text{KCl}$ ）显著提升纯度。该方法通过碳化-水解协同机制强化稀土选择性溶出，同步实现铁基合金与稀土的高效分离，为 NdFeB 废料绿色回收提供高纯度、短流程技术路径。

### 3 火法冶金

火法冶金通过高温熔炼、还原等反应将稀土浓缩为合金或混合物，主要工艺包括氢气分解法、氯化法、熔融分离法、玻璃渣法和氟化分离法。相较于湿法冶金的多步骤与试剂依赖，火法虽简化流程却面临能效与产物纯度瓶颈。

#### 3.1 氢气分解法

氢气分解法利用  $\text{H}_2$  与 NdFeB 磁体反应引发体积膨胀，致其破裂形成金属粉末，是直接回收该材料的有效途径。Zakotni 等<sup>[7]</sup>通过合金元素添加与“晶界改性”技术，制备出矫顽力  $> 2000 \text{ kA/m}$  的烧结磁体，性能超越原料。但废磁体氧含量（2000-5000 ppm）远超新磁体（300-400 ppm），导致回收过程易积累污染物，限制直接回用。Li 等<sup>[8]</sup>系统研究氢化条件，发现  $150^\circ\text{C}$  为最佳吸氢温度，通过掺杂 1.0%  $\text{DyH}_3$  纳米颗粒，再生磁体矫顽力、剩磁与最大能量积回收率分别达 101.7%、95.4% 和 88.58%；而添加 2.0%  $(\text{Nd}_{20}\text{Dy}_{80})_{76}\text{Co}_{20}\text{Cu}_3\text{Fe}$  时，三项指标提升至 92.4%、97.5% 和 93.3%。该过程利用 REE 与 O 的高温亲和力（远高于 Fe），选择性氧化 REE 生成稀土氧化物，而 Fe 保持金属态，实现元素定向分离。尽管氢气分解法能直接制备高性能再生磁体，但空气污染控制与成分精准调控仍是规模化应用的关键挑战。

#### 3.2 氯化法和熔融分离法

氯化法基于氯离子（ $\text{Cl}^-$ ）与 REE 的选择性反应，利用氯化物特性分离 NdFeB 中的 REE 与 Fe。常用氯化剂包括  $\text{FeCl}_2$ 、 $\text{MgCl}_2$  和  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 。Hua 等<sup>[9]</sup>在  $600^\circ\text{C}$  下以熔融  $\text{MgCl}_2\text{-KCl}$  体系提取 REE，回收率达 90%，仅消耗无水  $\text{MgCl}_2$ ，产物可直接用于电解制备稀土合金。该方法通过氯化-蒸馏耦合工艺实现稀土高效分离，兼具环保性（无废水、试剂循环）与产物高纯度优势，但反应条件优化（如温度、时间）仍是提升回收效率的关键。熔融分离法利用熔融金属对 REE 的高亲和力，形成低熔点合金实现 NdFeB 废料中稀土与铁分离。该方法通过液态金属定向结合稀土，兼具高提取效率（Nd  $> 90\%$ ）与合金产物可电解再生优势，但熔融体系分离纯化（如 Ag-Nd 氧化分离）仍是技术难点，需进一步开发高分相工艺以提升经济性。

#### 3.3 玻璃渣和氟化分离法

玻璃渣法通过高温（ $1300\text{-}1500^\circ\text{C}$ ）下 NdFeB 废料与  $\text{CaO-SiO}$  基熔渣反应，选择性氧化溶解 REE。Abrahami 等<sup>[10]</sup>结合  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{CaF}_2$  炉渣与室温  $\text{H}_2\text{SO}_4$  浸出，实现 REE 回收率  $> 99\%$ 。该方法通过熔渣体系定向富集稀土，同步分离铁/硼等杂质，但高温能耗与炉渣成分调控仍是规

模化应用的关键挑战。氟化物法利用 REE 对氟（F）的高亲和力实现 NdFeB 废料中稀土分离。Xie<sup>[11]</sup>采用  $\text{AlF}_3\text{-NaF}$  熔融盐体系，在  $900^\circ\text{C}$  氟化 3h，回收 83%REE 并电解制取 Al-Nd 合金。该方法通过氟化反应选择性富集稀土，产物可直接用于合金制备，但高温长时工艺限制其经济性，需优化反应动力学以平衡效率与能耗。

### 4 电化学冶金

电化学法通过电解/电沉积直接提取稀土金属，兼具环保、低试剂消耗及高选择性优势，但面临高设备成本、电解液适配性与工艺优化挑战，常需湿法预处理协同。周等<sup>[12]</sup>采用阳极氧化工艺，以 NdFeB 废料为阳极、 $0.2 \text{ mol/L}$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$  为电解液，在  $2.5 \text{ V}$ 、 $25^\circ\text{C}$  条件下实现 Nd（94.6%）与 Fe（96.1%）同步回收，能耗仅 1.74 kWh。Kumari 等<sup>[13]</sup>创新使用生物可降解柠檬酸电解质，在 0.5 M 浓度、 $200 \text{ A/m}^2$  电流密度及 298 K 条件下电解 5 h，配合 D2EHPA 萃取剂，获得 99.9% 纯度混合稀土氧化物与 98.6% 氧化铁，展现环保工艺潜力。电化学法以低试剂消耗直接转化金属形态，突破了传统湿法冶金的局限。然而，电化学体系的设备投入仍是规模化应用瓶颈，未来需开发高效电极材料，推动清洁回收技术从实验室向产业端跨越。

### 5 结语

NdFeB 永磁体因其优异的磁性能被广泛应用于新能源汽车、风电设备、信息存储等领域，废料中含 30% 左右稀土元素，远高于原生矿石，回收价值显著。当前回收技术已形成湿法、火法、电化学三大体系。湿法冶金以高选择性和回收率为优势，衍生出酸浸出、生物浸出等多种工艺，如超临界  $\text{CO}_2$  辅助有机酸浸出可实现 99.9% 的 Nd 回收率，但存在试剂消耗大、流程长等问题；火法冶金具有流程短、无废水污染特点，氢气分解法可直接再生高性能磁体，熔融分离法稀土提取率超 90%，却受限于高能耗与产物纯度不足；电化学法展现出环保与可控性优势，不过设备成本与工艺复杂性仍是产业化障碍。因此，为实现 NdFeB 永磁体的资源化回收，建议开发绿色短流程工艺，推动多技术协同集成，实现湿法与火法、电化学联用，发挥各体系优势，以实现稀土资源高效循环利用与产业绿色可持续发展。

### 参考文献

- [1] REISDÖRFER G, BERTUOL D, TANABE E H. Recovery of neodymium from the magnets of hard disk drives using organic acids [J]. Minerals Engineering, 2019, 143: 105938.
- [2] REISDÖRFER G, BERTUOL D A, TANABE E H. Extraction of neodymium from hard disk drives using supercritical  $\text{CO}_2$  with organic acids solutions acting as cosolvents [J]. Journal of  $\text{CO}_2$  Utilization, 2020, 35: 277-87.
- [3] LORENZ T, BERTAU M. Recycling of rare earth elements from FeNdB-Magnets via solid-state chlorination [J]. Journal of Cleaner

- Production, 2019, 215: 131-43.
- [4] AUERBACH R, BOKELMANN K, STAUBER R, et al. Critical raw materials – Advanced recycling technologies and processes: Recycling of rare earth metals out of end of life magnets by bioleaching with various bacteria as an example of an intelligent recycling strategy [J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 104-17.
- [5] ÖNAL M A R, RIAÑO S, BINNEMANS K. Alkali baking and solvometallurgical leaching of NdFeB magnets [J]. Hydrometallurgy, 2020, 191.
- [6] LIU B, ZHU N, LI Y, et al. Efficient recovery of rare earth elements from discarded NdFeB magnets [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 124: 317-25.
- [7] ZAKOTNIK M, HARRIS I R, WILLIAMS A J. Possible methods of recycling NdFeB-type sintered magnets using the HD/degassing process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 450(1-2): 525-31.
- [8] 李现涛, 岳明, 李萌, 等. 块状烧结钕铁硼废料的氢处理回收技术研究进展 [J]. 2016, 37(03): 123-8.
- [9] HUA Z, WANG J, WANG L, et al. Selective extraction of rare earth elements from NdFeB scrap by molten chlorides [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2014, 2(11): 2536-43.
- [10] ABRAHAMI S T, XIAO Y, YANG Y. Rare-earth elements recovery from post-consumer hard-disc drives [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2014, 124(2): 106-15.
- [11] XIE B, WANG L, LI H, et al. An interface-reinforced rhombohedral Prussian blue analogue in semi-solid state electrolyte for sodium-ion battery [J]. Energy Storage Materials, 2021, 36: 99-107. 周利娜, 苏志伟, 肖成梁, 等. 阳极氧化浸出钕铁硼废料中的钕和铁 [J]. 高校化学工程学报, 2022, 36(4): 603-9.
- [12] 周利娜, 苏志伟, 肖成梁, 等. 阳极氧化浸出钕铁硼废料中的钕和铁 [J]. 高校化学工程学报, 2022, 36(4): 603-9.
- [13] KUMARI A, DIPALI, RANDHAWA N S, et al. Electrochemical treatment of spent NdFeB magnet in organic acid for recovery of rare earths and other metal values [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309.

# Exploration of Injection Molding Process for EPDM Rubber

Fengtao Lu Benli Qi Gongle Han Haipeng Zhang

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

## Abstract

In solid rocket engines, the insulation layer and cladding are mostly made of ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber. Currently, the molding process of EPDM rubber is mainly based on compression molding, involving molds such as upper and lower molds and Haff molds. Some products formed by Haff molds have lower strength at the joint of the mold and are prone to cracking. In addition, some rubber products contain metal inserts, and traditional molding processes make it difficult to locate and load the inserts. Through analysis, it is found that the cracking problem of the mold joint in the product formed by Haff mold pressing is mainly caused by local pressure relief during mold closing; The difficulty in locating inserts and loading materials is mainly due to the shared space between the material cavity and the mold cavity in the molding process. In the injection molding process, when injecting glue, the mold cavity is always in a locked state, there is no risk of pressure relief, and the material cavity is separated from the mold cavity, which can effectively solve the problems of insert positioning and loading. Therefore, it is necessary to explore the injection molding process of EPDM rubber.

## Keywords

Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber; Injection Molding; Process Investigation

# 三元乙丙橡胶注压成型工艺探究

鲁锋涛 祁本利 韩共乐 张海鹏

中国航天科工集团第六研究院 210 所, 中国·陕西 西安 710065

## 摘 要

在固体火箭发动机中, 绝热层、包覆套所采用的材料大多为三元乙丙橡胶, 目前, 三元乙丙橡胶的成型方式主要以模压工艺为主, 涉及的模具有上下模、哈夫模, 而采用哈夫模成型的部分产品, 合模缝部位强度偏低, 易出现开裂现象。此外, 部分橡胶产品中含有金属嵌件, 传统模压工艺对于嵌件定位难度大, 装料困难。通过分析, 哈夫模模压成型后的产品合模缝易开裂问题, 主要原因为合模时的局部泄压造成; 嵌件定位难度大, 装料困难, 主要是因为模压工艺中, 料腔与型腔空间共用造成。而注压工艺中, 注胶时, 模具型腔始终处于锁紧状态, 不存在泄压风险, 且料腔与型腔分开, 可有效解决嵌件定位问题以及装料问题。为此, 有必要开展三元乙丙橡胶注压成型工艺探究。

## 关键词

三元乙丙橡胶; 注压成型; 工艺探究

## 1 引言

在固体火箭发动机中, 绝热层、包覆套所采用的材料大多为三元乙丙橡胶, 目前, 三元乙丙橡胶的成型方式主要以模压工艺为主, 涉及的模具有上下模、哈夫模, 而采用哈夫模成型的部分产品, 合模缝部位强度偏低, 易出现开裂现象。此外, 部分橡胶产品中含有金属嵌件, 传统模压工艺对于嵌件定位难度大, 装料困难。

针对上述问题进行深入分析, 哈夫模模压成型后的产品合模缝易开裂问题, 主要原因为合模时的局部泄压造成; 嵌件定位难度大, 装料困难, 主要是因为模压工艺中, 料腔与型腔空间共用造成。而注压工艺中, 注胶时, 模具型腔始

终处于锁紧状态, 不存在泄压风险, 且料腔与型腔分开, 可有效解决嵌件定位问题以及装料问题。为此, 有必要开展三元乙丙橡胶注压成型工艺探究。

## 2 研究思路与技术方案

开展三元乙丙橡胶注压成型工艺探究, 需满足两个条件。其一, 三元乙丙橡胶材料本身具有良好的流动性。其二, 需要设计出合理可靠的注压成型模具。对于三元乙丙橡胶的流动性, 已在模压工艺中进行了验证, 因而, 本文将重点研究注压成型模具设计。

按照注压成型模具的原理及功能模块, 可将模具划分为两个结构单元—料腔、型腔。注压成型工艺的整体技术方案如下:

先将模具各零部件进行组装, 形成型腔。再将三元乙丙橡胶装入料腔, 通过平板硫化机加热加压, 将三元乙丙橡

【作者简介】鲁锋涛(1983-), 中国陕西西安人, 高级工程师, 从事复合材料成型、工艺装备设计研究。

胶从料腔挤压流入型腔,从而实现产品成型,最后,拆卸模具,进行脱模。

## 2.1 试验对象选取

选取一小型且需通过嵌件成型的典型零件(结构见图1),开展研究试验工作,可以同时研究解决合模缝质量问题、嵌件固定问题、装料问题。

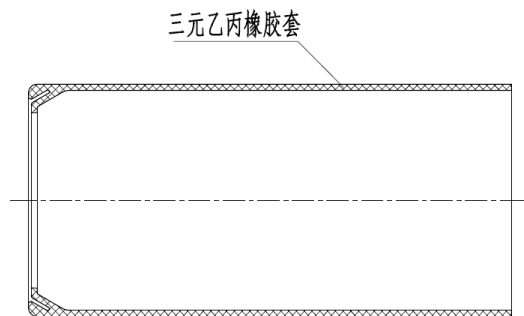
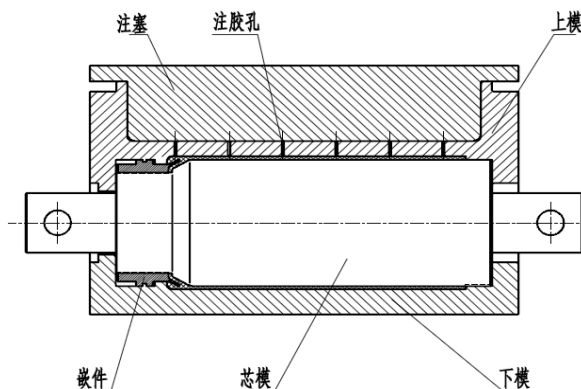


图1 试验样品结构

在该零件中,三元乙丙橡胶的厚度为3.5mm,总重0.62kg。

## 2.2 注压成型模具设计

根据产品结构特点,完成试验件注压成型模具设计,该模具主要由注塞、上模、芯模、下模、嵌件等组成,结构



见图2。

模具主要设计要点如下:

料腔: 试验样品中,三元乙丙橡胶总重0.62kg,模具料腔设计尺寸为330mm×134mm×50mm,可装料2.6kg,满足装料要求;注胶孔: 根据产品型腔位置,在料腔底部设置三排注胶孔,注胶孔排布位置与型腔匹配,孔径为 $\phi 3$ ;嵌件固定: 金属嵌件在模具内需固定可靠,且精准定位,才能保证成型后的尺寸精度,根据嵌件结构特点,选择嵌件环形槽外圆作为径向定位面,利用环形槽的侧面作为轴向定位面,确保嵌件定位可靠;模具定位: 上下模与芯模轴向通过前后端面定位,径向采用前后两端定位,前端通过嵌件过渡定位,芯模与嵌件内圆进行定位,嵌件环形槽外圆与上下模进行定位,后端上下模与芯模直接定位;排气、溢胶: 前端嵌件外部型腔,通过上下模与嵌件的配合间隙进行排气、溢胶,在配合面前端设置空腔,存放排出气体及溢出胶料;前端嵌件内部型腔、后端型腔通过配合间隙直接排气、溢胶;启模口: 模具共设置三处启模口,分别位于注塞与上模之间、上模与下模之间、上下模与芯模之间,确保产品成型后顺利脱模,以及再次注料时,注塞可以顺利脱出;模具强度: 该试验件注压模具属于小型模具,模具设计壁厚为25mm,强度满足注压要求。

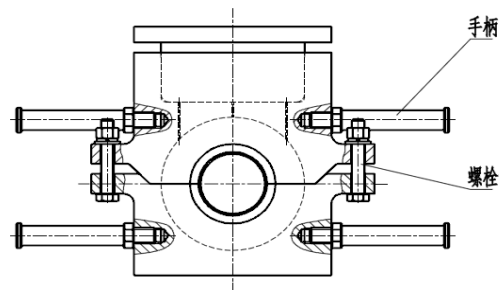


图2 注压成型模具结构

## 2.3 注压成型模具材料选择与性能适配

在注压成型模具设计中,材料选择直接影响模具寿命、成型精度及产品质量。针对三元乙丙橡胶注压工艺的特点(工作温度150-180℃、锁模力5-6MPa、胶料流动性中等),模具核心部件(上模、下模、芯模)选用Cr12MoV冷作模具钢。该材料经淬火+低温回火处理后,硬度可达50-55HRC,具备优异的耐磨性和抗压强度,可有效抵抗胶料在高压下的冲刷磨损;同时,其线膨胀系数较低( $11.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),在反复加热-冷却循环中变形量小,能保证型腔尺寸稳定性,避免因模具热变形导致产品尺寸超差。

对于注塞部件,考虑到其需频繁与胶料接触,承受设

备压力以及与料腔的摩擦力,选用40Cr合金结构钢,经调质处理后硬度控制在28-32HRC,既保证了足够的强度(屈服强度 $\geq 785\text{MPa}$ ),又具备一定韧性,可减少长期往复运动中的疲劳损伤风险。金属嵌件与模具的配合面则采用镀铬处理,镀层厚度20-25 $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度 $Ra \leq 0.8\mu\text{m}$ ,一方面降低嵌件与模具的摩擦系数,便于装拆定位;另一方面镀铬层的化学稳定性可防止嵌件在高温硫化过程中与胶料发生化学反应,方便脱模。

## 2.4 注压工艺参数优化过程与关键依据

注压工艺参数的确定需结合三元乙丙橡胶的硫化特性及模具结构特点,通过多组对比试验逐步优化。在压力参数调试中,初期尝试3-4MPa压力时,发现胶料难以充满型腔

前端细小部位（如嵌件与型腔的间隙处），出现缺胶现象，这是由于压力不足导致胶料流动动力不足；当压力提升至 7-8MPa 时，虽能充满型腔，但模具配合面溢胶量显著增加，飞边厚度超过 0.3mm，且合模缝处出现胶料挤出不均的情况，分析其原因为过高压力导致模具微小变形，配合间隙增大。最终确定 5-6MPa 为最优压力区间，此时胶料既能完全填充型腔，飞边厚度控制在 0.05-0.08mm，后续清理难度低。

温度参数的设定基于三元乙丙橡胶的硫化曲线。通过差示扫描量热法（DSC）测试可知，该橡胶的硫化起始温度为 140℃，峰值温度为 160℃，完全硫化温度为 170℃。因此，模具预热温度设定为 100-110℃（低于硫化起始温度），避免胶料在未充满型腔前提前硫化；注压阶段保持该温度，确保胶料流动性；硫化阶段升温至 170℃，并保温 2h，此时交联度可达 90% 以上，满足产品力学性能要求（拉伸强度 ≥ 8MPa，扯断伸长率 ≥ 300%）。

注压行程的分段控制设计源于胶料流动特性。三元乙丙橡胶属于高黏度非牛顿流体，流动过程中易因剪切作用产

生温升，若一次性快速完成注压行程，可能导致局部胶料提前硫化，形成“冷料斑”。分 5 次走完 20mm 行程（每次 4mm），中间间歇 1min，可使胶料在流动过程中温度均匀分布，同时让前端胶料充分填充型腔细节，减少气泡产生。试验表明，该方式可使产品内部气孔率降低至 0.5% 以下，远低于模压工艺的 3%-5%。

3 试验件性能检测与模压工艺对比

为验证注压工艺的优势，对试验件进行了系统性能检测，并与同规格模压产品对比。在合模缝强度测试中，采用拉伸试验机对合模缝处进行拉伸试验，注压产品的合模缝拉伸强度为 8.3Mpa，而哈夫模模压产品的合模缝拉伸强度仅为 5.1Mpa，提升约 62.7%，且注压产品合模缝处未出现开裂现象，证明注压工艺的锁模状态有效解决了局部泄压问题。

3.1 注压工艺试验

经多次试验、调试，形成注压成型工艺参数见表 1。

表 1

| 序号 | 工序名称  | 工艺内容                                                                                                               | 备注 |
|----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | 注压前准备 | 1.1 模具清理；<br>1.2 组装模具，固定金属嵌件，预热模具，预热时间 1.5h~2h；<br>1.3 三元乙丙橡胶压延出片，出片尺寸：325mm×130mm×5mm，数量：4 片，重量：1.0kg。            |    |
| 2  | 注压    | 2.1 装料，继续预热 20min；<br>2.2 注压。在 100t 平板硫化机上进行操作，设置压力 5Mpa~6Mpa，在模具装料行程内（装料高度 20mm），点动控制平板硫化机升降，分 5 次走完行程，中间间歇 1min。 |    |
| 3  | 硫化    | 合模到位后，设置平板硫化机温度至硫化温度，待温度到达设定值后，保温 2h，保温结束后，关闭加热开关，平板通水冷却或自然降温。                                                     |    |
| 4  | 脱模    | 当模具温度降至 30℃以下时进行脱模                                                                                                 |    |
| 5  | 清理飞边  | 成型件清理飞边                                                                                                            |    |

3.2 试验效果

试验结束后，检查样件外观，外观平整，无缺胶、分层现象。三元乙丙橡胶厚度合格，均匀一致。

4 结语

通过开展三元乙丙橡胶注压成型模具设计、注压工艺试验，完成了三元乙丙橡胶注压成型工艺的探究与尝试，基本掌握了小型三元乙丙橡胶产品的注压成型工艺，初步解决了小型三元乙丙橡胶零件的合模缝易开裂，嵌件定位困难，装料不便等问题。

然而，本文所述的探究试验存在一定的局限性，目前仅适用于小型零件成型。此外，试验过程也存在一些小问题，例如型面存在注胶残痕，注胶速度慢，注胶孔难清理等问题，

后续需进一步优化注压模具结构，完善注压工艺。

参考文献

[1] 张韶姣,刘林国,孙学红.聚乙二醇脂脂肪酸酯对三元乙丙橡胶胶料脱模效果的影响[J].橡胶工业,2025,72(07):539-544.

[2] 侯兰杰,彭倩倩,刘宽,等.三元乙丙橡胶板式支座性能测试与有限元模型的二次开发[J/OL].橡胶工业,1-5[2025-08-18].https://link.cnki.net/urlid/11.1812.TQ.20250612.1441.002.

[3] 黄辉龙,黄汉雄.注压成型纳米结构PP/POE共混物表面的液滴低温冲击行为[J].高等学校化学学报,2021,42(10):3195-3202.

[4] 郭永娜,刘兆栋.V形橡胶弹簧注压成型工艺与模具设计[J].模具工业,2013,39(07):47-51.DOI:10.16787/j.cnki.1001-2168.dmi.2013.07.018.

# Collaborative Development of Carbon Materials and Aluminum Electrolysis Process in the Context of Green and Low-Carbon Transformation

WeiHong Wang

Zahanaoer Branch, Inner Mongolia Huomei Hongjun Aluminum and ElectricityCo., Ltd., Huolinguo, Inner Mongolia, 029200, China

## Abstract

In the context of global green and low-carbon transformation, the collaborative development of carbon materials and aluminum electrolysis processes has become a crucial pathway for promoting high-quality development in the aluminum industry. Aluminum electrolysis, as a high-energy-consuming industry, is closely linked to the consumption of anode carbon materials and carbon emissions during its production process. As a core component of electrolytic cells, the performance of carbon materials directly affects electrolysis efficiency, energy consumption, and pollutant emissions. By optimizing the preparation process of carbon materials, enhancing comprehensive resource utilization, and promoting technological innovations in the aluminum electrolysis process, deep collaboration can be achieved between the two in terms of energy conservation, carbon reduction, circular economy, and intelligent production.

## Keywords

Green and low-carbon; Carbon materials; Aluminum electrolysis process; Collaborative development; Energy conservation and carbon reduction

## 绿色低碳背景下炭素材料与铝电解工艺的协同发展

王伟红

内蒙古霍煤鸿骏铝电有限责任公司扎哈淖尔分公司, 中国·内蒙古 霍林郭勒 029200

## 摘 要

在全球绿色低碳转型背景下, 炭素材料与铝电解工艺的协同发展已成为推动铝工业高质量发展的关键路径。铝电解作为高能耗产业, 其生产过程中阳极炭素材料的消耗与碳排放密切相关。炭素材料作为电解槽的核心部件, 其性能直接影响电解效率、能耗及污染物排放。通过优化炭素材料制备工艺、提升资源综合利用率, 并推动铝电解工艺的技术革新, 可实现二者在节能降碳、循环经济及智能化生产中的深度协同。

## 关键词

绿色低碳; 炭素材料; 铝电解工艺; 协同发展; 节能降碳

## 1 引言

在全球应对气候变化与能源转型的背景下, 铝工业作为高能耗、高碳排放行业, 其绿色低碳发展面临巨大挑战。炭素材料(如阳极炭块)作为铝电解工艺的核心消耗品, 其生产与使用过程直接关联电解效率、能源消耗及碳排放。传统铝电解工艺依赖高能耗的炭素材料制备与电解过程, 导致资源浪费与环境污染。因此, 探索炭素材料与铝电解工艺的协同发展路径, 通过技术创新与产业升级实现节能降碳, 成为推动铝工业可持续发展的关键。本文从技术、资源、能源、

产业及政策五个维度, 分析绿色低碳背景下二者的协同发展机制。

## 2 技术协同: 创新驱动效率提升

### 2.1 炭素材料技术革新: 性能突破与绿色生产

炭素材料作为铝电解工艺的核心消耗品, 其性能与制备工艺的革新是推动铝工业绿色低碳发展的基础。传统炭素材料(如普通预焙阳极)存在导电性差、抗腐蚀性弱等问题, 导致电解过程中阳极消耗过快、电耗偏高, 同时生产环节的能源浪费与污染物排放也制约了行业的可持续发展。<sup>[1]</sup>

针对上述问题, 高性能炭素材料的研发成为关键方向。石墨化阳极通过高温石墨化处理, 显著提升了材料的导电性与热稳定性, 可降低电解过程中的电阻损耗, 减少阳极过电

【作者简介】王伟红(1976-), 本科, 从事炭素, 铝电解研究。

压,从而降低吨铝电耗。惰性阳极则是另一项颠覆性技术,其采用非消耗性材料(如金属陶瓷复合材料),在电解过程中不参与化学反应,彻底消除了阳极消耗与二氧化碳排放,同时避免了传统阳极生产中的沥青烟气污染。尽管惰性阳极目前仍处于技术攻关阶段,但其潜在的环境效益与经济效益已引发广泛关注。

## 2.2 铝电解工艺技术升级: 高效节能与柔性适配

铝电解工艺的技术升级是降低能耗与碳排放的核心环节。传统电解槽存在电流分布不均、热平衡难以控制等问题,导致电解效率低下、电能损耗严重。高效节能电解槽通过优化槽体结构(如采用异型阴极、新型内衬材料)与磁场设计,改善了电流分布与热平衡,降低了槽电压与热损失,从而减少吨铝电耗。智能槽控系统则结合物联网与大数据技术,实时监测电解槽的运行参数(如槽温、铝液水平、分子比),并通过AI算法动态调整工艺参数,实现电解过程的精准控制。例如,通过智能调控加料量与电流强度,可避免阳极效应的发生,减少电能浪费与氟化盐消耗。<sup>[2]</sup>

## 2.3 协同效应: 技术融合驱动绿色转型

炭素材料与铝电解工艺的技术协同,是推动铝工业绿色低碳发展的核心动力。新型炭素材料(如石墨化阳极、惰性阳极)与高效节能电解槽的结合,可显著提升电解效率,降低阳极消耗与电耗。例如,石墨化阳极的高导电性可减少电解过程中的电阻损耗,而高效电解槽的优化设计则进一步降低了槽电压,二者协同作用可使吨铝电耗降低10%以上。同时,惰性阳极与柔性电解技术的结合,可彻底消除阳极消耗与二氧化碳排放,并提升绿电在电解铝生产中的利用率,推动铝工业向零碳目标迈进。

## 3 资源协同: 循环经济与综合利用

### 3.1 炭素材料资源循环: 废旧再生与多元协同

炭素材料的资源循环是铝工业实现循环经济的重要抓手。废阳极作为铝电解过程中的主要固体废弃物,其回收再造可显著减少原生炭素材料的消耗。通过建立废阳极回收体系,利用破碎、筛分与二次成型技术,可将废阳极中的炭素成分与杂质分离,重新制备成符合电解需求的阳极炭块。这一过程不仅降低了炭素材料的生产成本,还减少了废阳极填埋或焚烧带来的环境压力。此外,炭素材料与其他工业固废的协同利用技术进一步拓展了资源循环的边界。例如,煤矸石等含碳固废可通过预处理与炭素材料混合,替代部分石油焦或煤沥青原料,既降低了对化石资源的依赖,又实现了固废的减量化与资源化。通过炭素材料资源循环的深化,铝工业可逐步构建起“资源-产品-再生资源”的闭环模式,推动产业链向绿色低碳方向转型。

### 3.2 铝电解工艺资源优化: 减量增效与固废治理

铝电解工艺的资源优化是降低生产成本与环境污染的关键环节。氟化盐作为电解过程中的关键辅助材料,其消耗

量直接影响原料成本与氟污染风险。通过优化电解槽设计(如采用新型内衬材料与槽体结构),可减少氟化盐的挥发与渗漏,降低单位产品的氟化盐用量。同时,智能槽控系统的应用可实时监测电解槽的分子比与氟化盐浓度,动态调整加料量,避免过量添加导致的资源浪费与环境污染。<sup>[3]</sup>此外,铝灰作为电解铝生产的主要固废,其资源化利用技术已取得重要进展。通过高温熔炼、化学浸出或生物提取等方法,可从铝灰中回收铝、镁等有价值金属,并将剩余残渣转化为建材原料或土壤改良剂。铝灰资源化利用不仅减少了固废排放,还创造了额外的经济价值,推动了铝电解工艺的资源高效利用。

## 3.3 协同效应: 闭环产业链与资源效率提升

炭素材料与铝电解工艺的资源协同,通过废阳极回收、固废协同利用与电解槽优化等措施,形成了紧密的闭环产业链。废阳极的循环再造为电解槽提供了再生炭素材料,而电解槽的优化设计又减少了辅助材料的消耗,进一步降低了废阳极的产生量。同时,炭素材料与其他工业固废的协同利用,拓展了原料来源,降低了对原生资源的依赖。铝灰的资源化利用则实现了固废的减量化与资源化,减少了环境污染。通过资源循环与综合利用的协同,铝工业的资源利用效率显著提升,单位产品的资源消耗与废弃物排放大幅降低,为行业的可持续发展提供了有力支撑。这种协同效应不仅体现在经济效益上,更推动了铝工业向绿色、低碳、循环的产业模式转型。

## 4 能源协同: 绿电替代与余热回收

### 4.1 绿电替代: 可再生能源深度耦合与新型能源探索

绿电替代是铝工业能源结构转型的核心路径。铝电解工艺作为高耗能产业,其电力消耗占生产总成本的30%以上,且传统化石能源发电导致高碳排放。推动铝电解工艺与风电、光伏等可再生能源的耦合,通过绿电直连模式,可实现电解铝生产的低碳化。例如,在风光资源丰富的地区建设“绿电铝”产业园,通过专用输电线路将风电、光伏电站与电解铝厂直接连接,减少电力传输损耗与碳排放。此外,绿电的波动性对电解槽稳定性提出挑战,需通过柔性电解技术(如动态功率调节、储能系统耦合)提升绿电利用率,确保电解过程的连续性与高效性。在新型能源替代方面,氢能的应用为铝工业提供了零碳能源解决方案。氢能可通过电解水制取,或利用工业副产氢,其燃烧产物仅为水,可替代部分化石能源用于炭素材料制备(如煅烧、焙烧环节)的加热过程。尽管氢能的大规模应用面临成本与技术瓶颈,但其清洁性与可再生性使其成为未来能源协同的重要方向。

### 4.2 余热回收: 能源梯级利用与系统效率提升

余热回收是提高铝工业能源综合利用率的关键手段。炭素材料制备过程中的煅烧与焙烧环节,需消耗大量热能,同时产生高温烟气与废渣余热。通过余热锅炉或热管技术,

可将煅烧炉、焙烧炉的烟气余热转化为蒸汽或热水，用于发电或厂区供暖，实现能源的梯级利用。例如，某炭素企业通过余热回收系统，将煅烧烟气温度从 900℃ 降至 200℃ 以下，年发电量可达数千万千瓦时，显著降低了外购电需求。

在铝电解工艺中，电解槽运行过程中产生的余热（约 800-950℃）同样具有回收价值。通过余热回收装置，可将电解槽侧部与顶部的余热用于预热氧化铝原料或生产热水，减少燃料消耗与能源浪费。

#### 4.3 协同效应：能源结构优化与低碳目标实现

绿电替代与余热回收的协同，可显著降低铝工业的碳排放强度，推动能源结构绿色转型。绿电替代直接减少了化石能源发电的碳排放，而余热回收则通过提高能源利用效率，间接降低了单位产品的能耗与排放。例如，在“绿电铝”生产中，结合余热回收技术，可使吨铝碳排放量从传统工艺的 12 吨以上降至 5 吨以下，降幅超过 50%。此外，绿电与余热的协同还可降低生产成本，提升企业竞争力。

#### 4.4 上下游产业联动：技术融合与边界拓展

上下游产业联动是铝工业实现技术突破与市场拓展的核心路径。炭素材料企业与铝电解企业需打破传统合作模式，通过联合研发平台共享数据与资源，共同开发适配性更强的新型材料与工艺。例如，炭素企业可根据电解槽的电流密度、热场分布等参数，定制化设计阳极炭块的孔隙结构与导电性能，而铝电解企业则可反馈实际生产中的材料损耗与能耗数据，推动炭素材料的持续优化。这种深度协同不仅提升了产品性能，还缩短了研发周期，降低了技术迭代成本。<sup>[3]</sup>

在产业边界拓展方面，炭素材料的应用领域正从传统铝电解向储能、氢能等新兴产业延伸。例如，高性能炭素材料（如石墨化炭块）可作为锂离子电池的负极材料或氢能储运的载体，其高导电性、高稳定性与低成本优势为新能源产业提供了关键支撑。炭素企业与电池制造商、氢能企业的跨领域合作，可推动炭素材料在新能源场景中的规模化应用，形成“材料-器件-系统”的协同创新链。通过上下游联动，铝工业可突破单一产业链的限制，融入更广阔的绿色经济体系。<sup>[4]</sup>

#### 4.5 绿色供应链构建：标准认证与模块化发展

绿色供应链的构建是铝工业提升国际竞争力与可持续

性的关键举措。绿电铝认证体系的建立，通过追溯铝产品的全生命周期碳排放（包括电力来源、原料消耗、工艺能耗等），为低碳铝产品提供权威标识。这一体系不仅满足了国际市场对绿色产品的需求（如欧盟碳边境调节机制），还倒逼企业加速绿电替代与工艺优化，形成“绿色生产-绿色认证-绿色消费”的闭环。<sup>[5]</sup>同时，推动炭素材料与铝电解工艺的标准化与模块化，可降低协同发展的技术门槛与成本。例如，制定统一的阳极炭块尺寸、电解槽接口标准与智能控制系统协议，使不同企业的设备与材料能够无缝对接，实现“即插即用”。模块化设计还可加速新技术的推广（如柔性电解槽、惰性阳极），降低中小企业的技术改造风险。通过标准化与模块化，铝工业的绿色转型将从“单点突破”转向“系统集成”，形成更具韧性的产业生态。

## 5 结语

绿色低碳背景下，炭素材料与铝电解工艺的协同发展是铝工业实现碳减排目标的关键路径。通过技术协同提升效率、资源协同促进循环、能源协同推动转型、产业协同拓展边界、政策协同提供保障，二者可形成互为支撑的绿色发展体系。未来，需进一步强化跨领域合作，加速新型材料与工艺的研发应用，同时完善政策标准与市场机制，推动铝工业在全球绿色供应链中发挥更大作用。协同发展不仅有助于铝工业的可持续发展，也将为全球能源转型与气候治理提供重要支撑。

## 参考文献

- [1] 张辉,黄子龙.点燃“绿色引擎”澎湃发展动能[N]. 南昌日报,2024-04-15(003).
- [2] 薛璇.铝用炭素：量价齐飞但要防止产能过剩[J]. 中国有色金属, 2022,(20):70-71.
- [3] 周小淞,欧春予,邓翔,等.铝用炭素产业绿色低碳转型的技术探讨[J]. 轻金属,2022,(09):33-36.
- [4] 刘业飞,武静.大同宇林德：做炭素新材料产业绿色发展的引领者[N]. 山西经济日报,2022-05-23(007).
- [5] 李志刚.我国铝用炭素行业标准化概述[J]. 世界有色金属,2022,(02):5-7.

# Physical properties research and application of tellurene van der Waals heterojunction

Jingwen Jiang

Jiangmen Polytechnic guangdong province jiangmen city, Jiangmen, Guangdong, 529000, China

## Abstract

As a highly promising emerging two-dimensional material in the post-graphene era, tellurene exhibits enormous application potential in next-generation electronic and optoelectronic devices, attributed to its distinctive helical chain layered crystal structure, tunable bandgap characteristics, high carrier mobility, and superior mid-infrared photoelectric response as well as thermoelectric performance. Van der Waals heterojunctions, which enable precise stacking of diverse two-dimensional materials via non-covalent interactions, offer an innovative strategy to overcome the performance limitations of single-component materials, achieve interface engineering regulation, and realize multi-functional integration. This paper systematically reviews the research advances in tellurene-based van der Waals heterojunctions, elaborates on their construction principles and classification systems, and dissects core mechanisms including interfacial charge transfer and energy band alignment. Moreover, it clarifies the modulation rules of external field regulation and defect engineering on key physical properties such as electron transport and photoelectric conversion. The application explorations in field-effect transistors, mid-infrared detectors, and energy storage devices are introduced. Furthermore, the current challenges in large-area high-quality fabrication, precise interface regulation, stability enhancement, and device-scale integration are summarized. Finally, the prospect of achieving practical breakthroughs in 5G/6G communications, infrared imaging, new energy, and other high-tech fields through multi-component heterojunction design and advanced fabrication/characterization technology innovation is presented, providing comprehensive insights for fundamental research and application translation in this domain.

## Keywords

Tellurene; Van der Waals heterojunction; Electronic device

# 碲烯范德华异质结的物性研究与应用

江靖雯

江门职业技术学院，中国·广东 江门 529000

## 摘 要

碲烯作为后石墨烯时代极具潜力的新兴二维材料，凭借其独特的螺旋链层状晶体结构、可调带隙特性、高载流子迁移率及优异的中红外光电响应与热电性能，在新一代电子与光电器件领域展现出巨大应用前景。范德华异质结通过非共价键作用力将不同二维材料精准堆叠，为突破单一材料性能瓶颈、实现界面工程调控与多功能集成提供了创新途径。本文系统梳理碲烯范德华异质结研究进展，阐述其构建原理与分类，剖析界面电荷转移、能带对齐等核心机制，及外场与缺陷工程对电子输运、光电转换等物性的调制规律。介绍其在场效应晶体管、中红外探测器、储能器件等领域的应用探索，总结制备、界面调控、稳定性及集成方面的挑战，展望通过多元设计与技术创新推动其在 5G/6G、红外成像等领域实用化突破，为基础研究与应用转化提供参考。

## 关键词

碲烯；范德华异质结；电子器件

## 1 引言

自 2004 年曼彻斯特大学 Geim 小组成功采用微机械剥离法，从高定向热解石墨中分离出单原子层的石墨烯（Graphene）以来<sup>[1]</sup>，二维材料家族迅速扩充，迄今实验上

可获取的二维材料已达数百种。其构成元素涵盖了周期表中的诸多元素，结构类型丰富多样，囊括了原子级薄的碳基材料（如石墨烯、石墨炔）、六方氮化硼（h-BN）、过渡金属硫族化合物（如 MoS<sub>2</sub>、WS<sub>2</sub>、MoSe<sub>2</sub>、WSe<sub>2</sub>）、黑磷、硅烯、锗烯及其饱和形式，乃至稀土二维材料、过渡金属卤化物，以及以共价有机框架为代表的合成有机二维材料等。相比于三维体材料，二维材料的物理化学性质发生了变化，获得了更多的性能，展现了许多同类体材料所没有的电子和光学特性，比如：i) 强的平面共价键以及纳米级别的材料厚度展现出了优越的机械柔性和光学透明度；ii) 其具有超高

【基金项目】感谢广东省普通高校特色创新项目（项目编号：2023KTSCX371）。

【作者简介】江靖雯（1993-），女，中国湖南新化人，博士，讲师，从事半导体材料设计与研究。

的比表面积,可应用于表面催化和超级电容器等领域;iii) 二维材料表面原子的高度暴露使其可被通过外部条件(如:应力、压强、掺杂和吸附等)进行性能调控。从而,二维材料引起了光电探测器<sup>[2]</sup>、太阳能电池<sup>[3]</sup>、低功耗逻辑电路<sup>[4]</sup>、非易失性光电子存储<sup>[5]</sup>和高容量储能器件<sup>[6]</sup>等多个领域的广泛研究。因此,二维材料被认为是解决器件微型化同时又满足高性能要求的突破口。

碲烯作为 VA 族原子薄层材料的代表,由于其独特的结构和电子特性引起了人们的广泛关注。作为一种准 2D 层状半导体,碲(Te)具有高载流子迁移率、可调带隙(0.35-1.2 eV)、高线性二向色性、室温下出色的环境稳定性、光电导特性、热电特性和磁输运特性等优异的独特特性。<sup>[7-8]</sup>因此,碲烯在传感器、储能、光电子器件和自旋电子学器件等方向具有重要的应用前景,是延伸摩尔定律重要的候选材料。

另一方面,不同层状二维半导体材料堆叠后的异质结由于其特殊的构型,不仅可以降低纯半导体材料载流子复合率,调整其能带结构,而且在保持原有材料性能的基础上,还会出现单层材料所不具备的新颖性能,为材料的改性提供了一个可行的方法,并极大地扩展了单一材料在太阳能电池、光电探测器、光催化剂等领域的应用。近几年来关于碲烯与其他二维材料构建的异质结如碲烯/CdS<sup>[2]</sup>,碲烯/MoS<sub>2</sub><sup>[4]</sup>等均表现出优异的电学、光学性能,在二维材料领域得到了广泛应用。因此找寻晶格匹配的其他二维材料与碲烯构建范德华异质结来进一步改善碲烯性能以及扩大碲烯应用领域具有实际意义。

## 2 碲烯范德华异质结的物性研究进展

朱志立教授及其团队成员凭借深厚的理论功底与先进的计算模拟手段,在二维碲烯的基础研究方面取得了重要突破。他们通过精密的理论计算和模型构建,发现半导体相的二维碲烯具备远高于过渡金属硫化物的载流子迁移率。这一特性意味着在电子器件应用中,二维碲烯能够实现更高效、更快速的电荷传输,大大提升器件的运行速度与性能。同时,相较于黑磷,二维碲烯在稳定性方面表现更为出色,有效克服了黑磷在实际应用中因稳定性欠佳而面临的诸多挑战。此外,朱志立教授团队还通过严谨的理论预测,揭示了二维碲烯存在三种不同的晶体结构,分别命名为  $\alpha$  相、 $\beta$  相和  $\gamma$  相,这三种相态在原子排列方式、电子云分布以及相应的

物理化学性质上均存在显著差异,为后续针对不同应用场景对二维碲烯进行材料设计与性能调控提供了丰富的理论基础,相关研究成果发表在<sup>[9-10]</sup>,如图一所示。其理论预测激发了全球范围内众多科研团队对二维碲烯的实验探索热情,推动了该领域研究的快速发展。

吴文卓教授等科研人员则致力于将二维碲烯从理论研究推向实验制备与实际器件应用阶段。他们创新性地采用溶液法,成功合成出大面积(50  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ )的高质量二维碲烯片。<sup>[11]</sup>这种制备方法具有操作相对简便、成本可控且易于规模化生产的优势,为二维碲烯的工业化应用开辟了一条可行路径。以所制备的二维碲烯片作为沟道构建的晶体管(沟道长度为 3  $\mu\text{m}$ ),展现出了令人瞩目的性能。在热稳定性方面,该晶体管能够在较宽的温度范围内保持稳定运行,极大地拓展了其在不同工作环境下的适用性;其开关比高达  $\sim 10^6$ ,这意味着晶体管能够在导通和截止两种状态之间实现极为清晰、高效的切换,有效降低了信号干扰与误判的可能性;载流子迁移率达到  $700 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,经对比,这一数值是同样大小和结构的黑磷晶体管载流子迁移率的 23 倍,充分彰显了二维碲烯在晶体管应用中的显著优势。这些实验结果不仅验证了理论上对二维碲烯优异性能的预测,更为二维碲烯在下一代高性能晶体管及相关集成电路领域的实际应用奠定了坚实基础。

S. Berweger 等科研工作者另辟蹊径,聚焦于二维碲烯在双载流子晶体管领域的应用研究。他们精心设计并成功制备出以碲烯作为沟道的碲烯双载流子晶体管,这一创新性的器件结构充分利用了二维碲烯独特的电学特性,能够实现对电子和空穴两种载流子的有效操控,为拓展晶体管的功能与应用范围提供了新的思路。为深入探究该晶体管的内部工作机制与微观载流子特性,S. Berweger 团队采用了先进的近场微波扫描显微镜技术。这种技术能够在纳米尺度下对晶体管内部的局域载流子分布、传输特性以及相关电导特性进行高分辨率的测量与分析。通过对实验数据的深入挖掘与分析,他们揭示了碲烯双载流子晶体管在不同工作条件下的载流子输运规律,为进一步优化器件性能、提升器件稳定性提供了关键的实验依据<sup>[12]</sup>。这一研究成果不仅加深了科研人员对二维碲烯电学性质在复杂器件结构中应用的理解,更为开发基于二维碲烯的新型多功能电子器件提供了重要的技术支撑与理论指导。

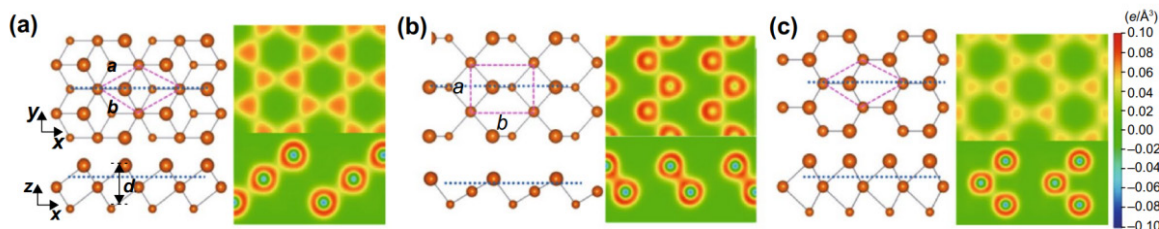


图 1  $\alpha$ -Te (a)、 $\beta$ -Te (b) 和  $\gamma$ -Te (c) 晶体结构示意图

### 3 碲烯范德华异质结的应用探索

#### 3.1 光电探测器

Jinrong Yao 等科研人员将研究目光投向了 Te 与 CdS 构建的范德华异质结。他们通过系统的实验研究与性能表征发现, Te/CdS 范德华异质结具有极高的载流子迁移率。这一关键特性使得该异质结在光电信号的快速响应与高效传输方面具备显著优势。在光电探测器中, 载流子迁移率直接影响着探测器对光信号的捕捉速度和转换效率, 高迁移率能够让探测器更迅速地将光信号转化为电信号, 从而实现对微弱光信号的精准探测。因此, Te/CdS 范德华异质结凭借其出色的载流子迁移性能, 有望成为设计高性能光电探测器的核心材料体系, 为光电探测技术在成像、通信、环境监测等领域的升级提供有力支撑<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 太阳能电池

太阳能电池作为清洁能源利用的重要载体, 其能量转换效率是衡量性能的核心指标。Wu K 及其团队致力于开发基于 2D Te 与过渡金属二硫族化合物构建的异质结太阳能电池, 并报道了一系列具有优异性能的研究成果<sup>[3]</sup>。其中, Te 与 WS<sub>2</sub> 形成的异质结太阳能电池, 其功率转换效率 (PCE) 高达 18.8%; 而 Te 与 WTe<sub>2</sub> 构建的异质结太阳能电池, 功率转换效率更是达到了 22.5%。这一效率水平在同类二维材料异质结太阳能电池中表现突出, 充分体现了碲烯与过渡金属二硫族化合物之间良好的界面匹配性和电荷传输特性。

#### 3.3 低功耗逻辑电路

利用碲烯的可调掺杂特性 (通过栅压调控实现 n 型 / p 型转变), 与 MoS<sub>2</sub> 构建异质结逻辑电路, 成功实现反相器、与非门等基础单元。该器件还被证实可作为反相器工作, 且能通过光照实现关闭功能。这种多功能器件兼具集成模块的紧凑性, 拓宽了碲基异质结的应用范围, 也为碲基器件在集成电路领域的应用提供了参考。<sup>[4]</sup>

### 4 结语

当前碲烯范德华异质结研究虽已在电子、光电、能源等领域展现出独特优势, 但其发展仍面临诸多关键挑战。在材料制备层面, 大面积高质量碲烯单晶及异质结的可控制备存在均匀性不足、产率低的问题, 难以满足器件规模化应用需求; 界面调控方面, 缺陷与应力分布的精准表征缺乏有效手段, 界面电荷转移与能带对齐机制的定量研究仍待深化; 稳定性上, 碲烯在空气环境中的氧化降解机制尚未完全明晰, 导致器件长期工作可靠性受限; 器件集成环节, 从实验室原型到规模化制造的工艺兼容性仍需突破。

但是, 通过技术创新与多学科交叉融合, 这些挑战有望逐步攻克。制备技术上, 原子级精准转移与原位生长技术的发展将实现高质量异质结的可控制备; 表征手段上, 球差电镜、角分辨光电子能谱等先进技术的应用将深化界面机制

认知; 稳定性提升可通过表面修饰与封装技术实现; 功能拓展方面, 多元二维材料协同的异质结设计或将诱导超导、拓扑量子效应等新奇物理现象, 理论模拟与机器学习辅助的物性预测将加速高性能器件开发, 推动碲烯范德华异质结在 6G 毫米波通信、红外成像、柔性能源等领域从基础研究迈向产业化应用, 为下一代电子信息与能源技术提供核心材料支撑。

#### 参考文献

- [1] Novoselov, Kostya S., et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306.5696 (2004): 666-669.
- [2] Yao J, Chen F, Li J, et al. Mixed-dimensional Te/CdS van der Waals heterojunction for self-powered broadband photodetector. *Nanotechnology*, 32.41 (2021): 415201.
- [3] Wu K, Ma H, Gao Y, et al. Highly-efficient heterojunction solar cells based on two-dimensional tellurene and transition metal dichalcogenides. *Journal of Materials Chemistry A*, 7.13 (2019): 7430-7436.
- [4] Cheng, Yue, et al. Multifunctional optoelectronic devices based on two-dimensional tellurium/MoS<sub>2</sub> heterojunction. *Applied Physics Letters*, 125.17 (2024).
- [5] Bach, Thi Phuong Anh, et al. 2D van der Waals heterostructure with tellurene floating-gate for wide range and multi-bit optoelectronic memory. *ACS nano*, 18.5 (2024): 4131-4139.
- [6] Yang, Hengyu, et al. "A ternary composite with TeO<sub>2</sub>/Te heterostructure towards reversible six-electron transfer for advanced aqueous zinc batteries." *Chemical Engineering Journal* 507 (2025): 160410.
- [7] Wu W, Qiu G, Wang Y, et al. Tellurene: its physical properties, scalable nanomanufacturing, and device applications. *Chemical Society Reviews*, 47.19 (2018): 7203-7212.
- [8] Zeng L H, Lin S H, Li Z J, et al. Fast, self-driven, air-Stable, and broadband photodetector based on vertically aligned PtSe<sub>2</sub>/GaAs heterojunction. *Advanced Functional Materials*, 28.16 (2018): 1705970.
- [9] Zhu Z, Cai X, Yi S, et al. Multivalency-driven formation of Te-based monolayer materials: a combined first-principles and experimental study. *Physical review letters*, 119.10 (2017): 106101.
- [10] He Z, Yang Y, Liu J W, et al. Emerging tellurium nanostructures: controllable synthesis and their applications. *Chemical Society Reviews*, 46.10 (2017): 2732-2753.
- [11] Wang Y, Qiu G, Wang R, et al. Field-effect transistors made from solution-grown two-dimensional tellurene. *Nature Electronics*, 1.4 (2018): 228-236.
- [12] Berweger S, Qiu G, Wang Y, et al. Imaging carrier inhomogeneities in ambipolar tellurene field effect transistors[J]. *Nano letters*, 19.2 (2019): 1289-1294.

# Numerical Simulation Analysis of Stress Intensity Factor of TC21 Titanium Alloy Based on Extended Finite Element Method (XFEM)

Yang Gao<sup>1</sup> Chenchao Tian<sup>1</sup> Juan Zhang<sup>1</sup> Hao Zhang<sup>1</sup> Anqi Chen<sup>2</sup>

1. Xi'an Hantang analysis and Testing Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi, 710016, China

2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an, Shaanxi, 710016, China

## Abstract

TC21 titanium alloy, as a high-strength, high-toughness, damage-tolerant structural titanium alloy, is widely used in the defense, military, aerospace fields. In aerospace applications, it is often subjected to multi-field coupling conditions such as force field and temperature field. Therefore, quantitatively studying its fatigue damage tolerance performance is of great significance. This paper focuses on the stress intensity factor  $K$ , an important indicator in the fatigue crack growth process, and conducts theoretical calculations and crack growth numerical simulations based on XFEM. The results analysis proves that the simulation results are relatively close to the actual situation, with an error of less than 5% compared to the theoretical calculation results, which can accurately reflect the crack growth process of three-dimensional CT specimens. At the same time, it also verifies the existence of the "tunnel effect" in the crack growth process, that is, the growth rate of internal cracks is often greater than that of surface cracks.

## Keywords

CT specimen; XFEM; crack propagation; Stress intensity factor

# 基于扩展有限元 XFEM 的 TC21 钛合金应力强度因子数值模拟分析

高阳<sup>1</sup> 田晨超<sup>1</sup> 张娟<sup>1</sup> 张浩<sup>1</sup> 陈安琦<sup>2</sup>

1. 西安汉唐分析检测有限公司, 中国·陕西 西安 710016

2. 西北有色金属研究院, 中国·陕西 西安 710016

## 摘 要

TC21 钛合金作为一种高强高韧、损伤容限型结构钛合金在国防军工、航空航天领域应用广泛, 其在航空航天应用场景中多处于力场、温度场等多场耦合工况下, 因此, 量化研究其疲劳损伤容限性能具有非常重大的意义。本文针对疲劳裂纹扩展过程中应力强度因子  $K$  这一重要指标, 分别进行了理论计算和基于 XFEM 的裂纹扩展数值模拟; 通过结果分析证明了该模拟结果和实际情况较为接近, 与理论计算结果误差在 5% 以内, 可以准确的反映三维 CT 试样裂纹扩展过程; 同时也验证了裂纹扩展过程“隧道效应”的存在, 即内部裂纹的扩展速率往往大于表面裂纹。

## 关键词

CT 试样; XFEM; 裂纹扩展; 应力强度因子  $K$

## 1 引言

钛合金作为一种重要的结构金属, 其具有强度高、耐腐蚀性好、耐热性高、密度低等特点而被广泛用于航空航天领域。其中 TC21 钛合金在高性能航空及航天飞行器结构件制造中有着巨大的应用前景, 作为航空航天用主承力结构件其多处于力场、温度场等多场耦合工况下, 对其疲劳性能提出了更高要求<sup>[1-2]</sup>, 为了适应飞机及航天器疲劳损伤容限设计

准则的要求, 必须对其损伤容限性能进行研究。断裂韧性、裂纹扩展速率则是表征损伤容限性能的重要指标, 其中应力强度因子  $K$  作为表征裂纹扩展速率的重要参数, 通过试验或数值模拟的方式对其进行研究具有重要意义。

目前对断裂韧性、裂纹扩展速率的试验方案都是基于 MTS、INSTRON、Zwick 等主流试验平台及设备, 通过 COD 规采集裂纹扩展数据及一定系统性柔度修正方案测得裂纹扩展速率的数据, 但以上方案都是根据 ASTM E647-2015<sup>[3]</sup> 和 GB/T 6398-2017<sup>[4]</sup> 规范中对 CT 试样应力强度因子计算解析公式的二维平面应变假设, 这与实际三维试样在裂纹扩展试验中的应力状态存在差异, 实际情况中由于

【作者简介】高阳 (1994-), 男, 中国陕西宝鸡人, 本科, 助理工程师, 从事材料力学性能研究。

“隧道效应”的存在,内部裂纹的扩展速率往往大于表面裂纹。因此,可自定义裂纹状态的计算机数值模拟方案成为热点<sup>[5-6]</sup>,目前主要方案有 Abaqus 的扩展有限元 (XFEM)、ANSYS、Workbench、FRANC 3D 等。

本工作只针对裂纹扩展过程中典型峰值最大应力强度因子  $K_{\max}$  的结果值进行研究,对满足 ASTM E647-2015 标准的同规格紧凑拉伸裂纹扩展 CT 样品分别进行 XFEM 裂纹扩展模拟以及理论计算得到裂纹扩展过程中不同裂纹长度下的最大应力强度因子  $K_{\max}$  值,并通过以上结果来分析 TC21 钛合金在裂纹扩展过程中的规律。

## 2 扩展有限元 (XFEM) 的理论基础

扩展有限元法由 Belytschko 教授于 1999 年提出,其基于单位分解理论很大程度上降低了对网格划分的依赖度,引入能够反映裂纹面不连续性的 Heaviside 函数以及可以反映裂纹尖端渐进位移场奇异性的附加函数来描述单元内部的间断属性,使有限元网格与裂纹扩展同时相互独立而存在,允许裂纹穿过某个网格单元继续扩展,从而能够模拟任意形状、任意路径的裂纹。单元内任意点  $x$  的位移可以表示为:

$$u_{XFEM}(x) = \sum_{j=1}^n N_j(x) u_j + \sum_{h=1}^{mh} N_h(x) [H(x) - H(x_h)] a_h + \sum_{k=1}^{mt} N_k(x) \left[ \sum_{l=1}^4 (F_l(x) - F_l(x_k)) b_k^l \right]$$

其中,  $n$  为单元常规有限元节点数,  $N_j$  为形函数,  $u_j$  为常规有限元节点自由度向量,  $mh$  为裂纹面两边增强节点数,  $H(x)$  是点  $x$  处的 Heaviside 函数值,  $H(x_h)$  是增强节点  $h$  处的 Heaviside 函数值,  $a_h$  为裂纹面两边增强节点自由度向量;  $mt$  裂尖增强节点数,  $F_l(x)$  是裂尖增强函数在点  $x$  处的值,  $F_l(x_k)$  是裂尖增强函数在点  $k$  处的值,  $b_k^l$  为裂尖增强节点自由度向量。

而对于点  $x$  处的 Heaviside 函数值  $H(x)$  值,在裂纹上方时取 1,在裂纹下方时取 -1,即:

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x - x^* \geq 0 \\ -1, & \text{其他} \end{cases}$$

其中  $x$  为考察点,  $x^*$  为距离点  $x$  处最近的裂纹面上的点。

同时,对于各向同性材料,  $F_l(x)$  函数可经过一系列线性解析,在裂尖极坐标系中,其表达式为:

$$F_l(r, \theta) = \left[ \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right]$$

其中  $(r, \theta)$  为点  $x$  处于裂尖极坐标系下的坐标。

经上述内容即可将点  $x$  处的 Heaviside 函数值  $H(x)$  和裂尖增强函数  $F_l(x)$  值确定,从而确定单元内任意点  $x$  的位移  $u_{XFEM}(x)$ ,精确量化的描述裂纹尖端的位置和状态。

## 3 TC21 钛合金裂纹扩展模拟

### 3.1 裂纹扩展模拟参数

在利用 Abaqus 有限元模拟软件进行裂纹扩展模拟前需

要 TC21 钛合金的弹性模量、密度等基本材料参数,但由于 Abaqus 数值模拟软件中必须保证各个参量的单位制统一,因此本工作中涉及的应力、载荷、长度的单位分别设置为 MPa、N、mm,同时对应于本文讨论的应力强度因子数值的单位则为  $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ,针对于此次试验的 TC21 钛合金锭进行取样做了基本的静力学试验得到了如下表 1 的材料参数:

表 1 TC21 钛合金基本材料参数

| 材料参数 | 数值                   | 单位              |
|------|----------------------|-----------------|
| 弹性模量 | 113000               | MPa             |
| 泊松比  | 0.33                 | /               |
| 密度   | $4.5 \times 10^{-3}$ | $\text{g/mm}^3$ |
| 屈服强度 | 1015                 | MPa             |
| 抗拉强度 | 1147                 | MPa             |
| 状态   | 退火态 (M)              | /               |

同时,模拟依据试验依据 ASTM E647-2015 规范中关于裂纹扩展标准 CT 试样的尺寸要求,设计裂纹扩展 CT 试样模型尺寸如图 1。

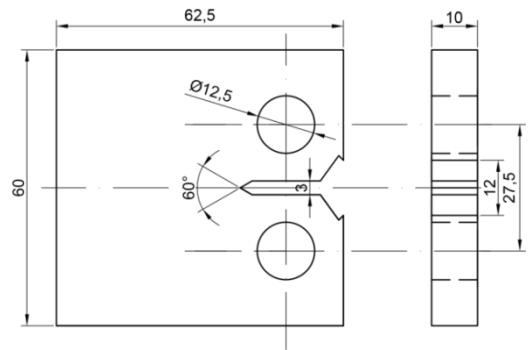


图 1 CT 试样模型尺寸图

### 3.2 裂纹扩展数值模拟

本节将基于 Abaqus 2020 数值模拟软件的扩展有限元 (XFEM) 模块,对 TC21 钛合金标准 CT 试样模型进行数值模拟得到对应条件下的应力强度因子  $K$  值,并加以分析。

本工作中的裂纹扩展数值模拟三维模型采用满足 ASTM E647-2015 规范的图 1 标准样品尺寸,在 Abaqus 2020 有限元模拟软件的 part 模块中创建如图 2(a) 的 CT 试样三维模型。

基于 Abaqus 的 XFEM 模块可以实现动态裂纹的扩展过程,但是在此过程中 Abaqus 的历程输出无法实时输出并保存应力强度因子  $K$  值,因此本模拟在静态力学下,对多组特定裂纹长度的有限元模型进行单次静态模拟,在设置裂纹长度  $a$  为 15.0mm、17.5mm、20.0mm、22.5mm、25.0mm、27.5mm、30.0mm 的情况下,分别进行模拟并输出对应的应力强度因子  $K$  值。

首先,在创建好的 CT 试样三维模型中引入对应长度的裂纹面,在材料属性中输入对应的弹性模量、泊松比等材料

基本参数值,损伤准则选择 Maxps 损伤准则,场变量的输出中勾选水平集参量 PHILSM、裂纹朝向参量 PSILSM 以及裂纹状态参量 STATUS XFEM,以保证最终模拟结果的输出;在相互作用(interaction)模块中创建裂纹并指定裂纹类型为 XFEM,同时分别在上下加载孔中心同上下加载孔圆柱面添加耦合约束(coupling)关系,设置耦合约束自由度;在载荷(load)模块中对上加载孔耦合点设定边界条件:锁定 x、z 方向位移 U1、U3 和沿 x、y 轴方向的转动约束 UR1、UR2,释放 y 方向位移 U2 和沿 z 轴方向的转动约束 UR3;同时在下加载孔中心耦合点设定边界条件:仅释放沿 z 轴方向的转动约束 UR3,对垂直于 z 轴的两表面施加不可变形的约束 U3;设置大小为 7500N 的加载力在上加载孔耦合点,方向与 U2 一致,如图 2(b):

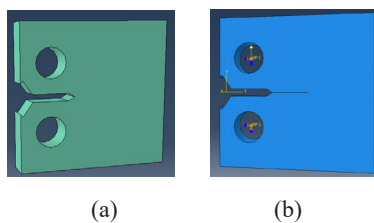


图 2 CT 试样有限元模型

然后通过网格划分(mesh)模块对整个实体模型进行网格划分,单元网格尺寸为 0.5 mm,检查并优化该模型及模拟过程后提交计算,在计算完成后生成的 .dat 文件中提取应力强度因子 K 的计算结果值。

## 4 结果及分析

### 4.1 应力强度因子 K 的结果

本工作分别通过裂纹扩展试验、XFEM 裂纹扩展模拟两种方式得到了对应裂纹长度 a 分别为 15.0mm、17.5mm、20.0mm、22.5mm、25.0mm、27.5mm、30.0mm 时的最大应力强度因子  $K_{max}$  的结果值如下表 2 所示:

表 2 最大应力强度因子  $K_{max}$  结果表

| 裂纹长度<br>a(mm) | 理论 $K_{max}$ 值<br>( $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ) | 裂纹扩展模拟<br>$K_{max}$ 均值<br>( $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ) | 模拟值偏差<br>(%) |
|---------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------|
| 15.0          | 596.19                                                   | 617.58                                                           | 3.59         |
| 17.5          | 677.96                                                   | 685.86                                                           | 1.16         |
| 20.0          | 772.03                                                   | 808.07                                                           | 4.67         |
| 22.5          | 884.55                                                   | 920.80                                                           | 4.10         |
| 25.0          | 1024.50                                                  | 1057.91                                                          | 3.26         |
| 27.5          | 1205.36                                                  | 1205.86                                                          | 0.04         |
| 30.0          | 1448.24                                                  | 1484.62                                                          | 2.51         |

### 4.2 结果分析

根据以上结果可以发现:通过裂纹扩展数值模拟和应力强度因子经验公式理论计算得到相同裂纹长度下最大应力强度因子  $K_{max}$  值非常接近,相同裂纹长度下模拟结果最大应力强度因子  $K_{max}$  值与理论值最大偏差仅 4.67%。

同时,在准静态 XFEM 裂纹扩展模拟下,由于沿厚度方向网格间隔为 0.5mm,通过模拟可以得到裂纹前缘延厚度方向不同深度处的 21 个应力强度因子值,可以准确反映裂纹前缘延厚度方向不同深度处的应力强度因子分布情况,将不同裂纹长度下分别得到的应力强度因子数组绘制在图 3 中:

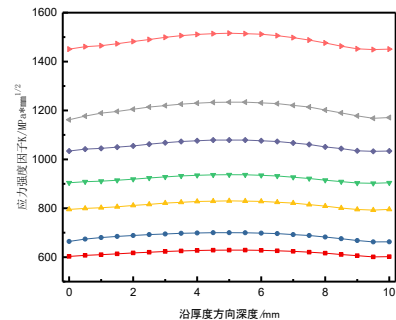


图 3 厚度方向  $K_{max}$  分布

通过图 3 可以看出不同裂纹长度 a 下模拟得到的最大应力强度因子  $K_{max}$  值均沿厚度方向中线对称分布,且越接近两侧表面的最大应力强度因子  $K_{max}$  值越小,其值约等于理论计算值,厚度中间区域的最大应力强度因子  $K_{max}$  值越大,表明裂纹扩展过程中裂纹前缘有向前突出的“隧道效应”,即内部裂纹扩展速率往往大于表面裂纹扩展速率。

## 5 结语

本文针对 TC21 钛合金裂纹扩展过程中的应力强度因子 K 这一重要参数,分别进行了理论计算、和基于 Abaqus 数值模拟软件 XFEM 模块的裂纹扩展数值模拟;对比和分析结果得到以下结论和结果:

基于本工作的 TC21 钛合金应力强度因子数值模拟结果与理论计算结果较为接近,  $K_{max}$  值偏差在 5% 以内,表明该模拟过程可以相对准确的描述裂纹扩展过程;通过模拟  $K_{max}$  在厚度方向上的分布规律表明裂纹扩展过程中裂纹前缘有向前突出的“隧道效应”,即内部裂纹扩展速率往往大于表面裂纹扩展速率。

## 参考文献

- [1] 何蕾.钛合金在航空领域的市场展望[J].金属世界,2015,(05):4-7.
- [2] 邹武装.钛及钛合金在航天工业的应用及展望[J].中国有色金属,2016,(01):70-71.
- [3] ASTM E647-15, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates[M].ASTM International, West Conshohocken. PA.2015.
- [4] 中国国家标准化管理委员会 GB/T6398—2017金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S].北京:中国标准出版社.2017.
- [5] 余建星等.基于三维CT试样的X65钢裂纹扩展规律研究[J].兵器材料科学与工程,2021,44(01):1-7.
- [6] 白树伟等.疲劳裂纹扩展前缘线形貌分析及数值模拟[J].科学技术与工程,2019,19(01):256-260.

# Analysis of Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel TIG Welded Joints

Yixing Huang

Nanchang Institute of Communications, Nanchang, Jiangxi, 33010, China

## Abstract

This paper systematically studies the influence of TIG welding process parameters on the microstructure and properties of 304 stainless steel welds. By designing three heat input parameters of 8.5, 10.5, and 12.5 kJ/cm, and using metallographic microscopes, scanning electron microscopes, and other detection methods, the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of the joints were mainly investigated. The research results show that when the heat input is 10.5 kJ/cm, the weld zone obtains fine and uniform solidification structure, with  $\delta$ -ferrite content of 5.8%, and the comprehensive performance of the joint is the best. The tensile strength reaches 625 MPa, the elongation is 35%, and the corrosion rate is the lowest (0.85 mm/a). Excessive or insufficient heat input will cause coarse grains or performance degradation. From the conclusion, it can be drawn that when the heat input is controlled within the range of 10-11 kJ/cm, better comprehensive performance of 304 stainless steel welded joints can be obtained, providing an important process basis for engineering applications.

## Keywords

304 stainless steel; TIG welding; microstructure; mechanical properties; corrosion resistance; welding process optimization

## 304 不锈钢 TIG 焊接接头组织与性能分析

黄逸兴

南昌交通学院, 中国 · 江西 南昌 330100

## 摘 要

本文就304不锈钢TIG焊接工艺参数对焊缝组织性能的影响规律展开系统的研究。通过设计8.5、10.5、12.5kJ/cm三种热输入参数,用金相显微镜,扫描电镜等检测方式,着重考察了接头的微观组织情况,力学性能,耐腐蚀性能。研究结果表明:当热输入为10.5kJ/cm时,焊缝区获得细小均匀的凝固组织, $\delta$ -铁素体含量为5.8%,接头综合性能最好,抗拉强度达到625MPa,伸长率35%,腐蚀速率最低(0.85mm/a),过高或过低的热输入都会造成晶粒粗大或性能降低。从结论可以得出,在热输入控制在10-11kJ/cm范围内,可以获得较好的304不锈钢焊接接头综合性能,为工程应用提供了重要工艺依据。

## 关键词

304不锈钢; TIG焊接; 微观组织; 力学性能; 耐腐蚀性; 焊接工艺优化

## 1 引言

304 不锈钢由于其良好的耐腐蚀性及可成型性,在石油化工,食品机械等行业中应用较广。TIG 焊接属于高质量的连接方式,其工艺参数会直接影响接头组织和性能。焊接接头在实际工程出现一些问题,比如说晶间腐蚀,力学性能降低等,这对设备的使用寿命和安全有很大影响。目前大多数的研究都是对单一工艺参数的影响,缺少对工艺-组织-性能关系的系统研究。尤其是不同的热输入条件下,接头组织演变规律及对力学性能、腐蚀行为的影响机理尚不明确。本次试验通过设计多组对比试验,对 304 不锈钢 TIG 焊接接头微观组织进行系统分析,评价接头的力学性能和耐腐蚀性

能,建立工艺参数与接头性能之间的定量关系,为工程应用提供理论指导和技术支持。

## 2 研究目的与实验设计

### 2.1 304 不锈钢焊接接头综合性能优化目标的确立

本研究目的是为了提 高 304 不锈钢 TIG 焊接接头的综合性能,主要解决工程应用中由于焊接工艺不当造成的晶间腐蚀敏感性增加、力学性能下降等问题。通过系统改善焊接工艺参数,以期获得组织均匀、力学性能好、耐腐蚀性强的焊接接头。具体性能指标要求包括:抗拉强度大于等于 600MPa,延伸率大于 30%,显微硬度分布均匀,腐蚀速率小于 1.0mm/a。这些指标保证了接头的服役安全性,又考虑到了生产工艺的经济性和可行性,为后续实验的设计指明了技术方向。

【作者简介】黄逸兴(1980-),男,中国江西南昌人,本科,实验师,从事机械制造、材料成型及控制类研究。

2.2 TIG 焊接工艺参数体系的实验设计方案

本次实验使用了厚度为 3mm 的 304 不锈钢板材，并且选择 ER308L 焊丝作为填充材料。为了对热输入影响接头性能进行深入了解，选取三个不同热输入参数的焊接工艺。通过调节焊接电流 140-180A、焊接电压 12.5—13.5V、焊接速度 120mm/min 等参数，获得 8.5、10.5 和 12.5kJ/cm 三种不同的热输入量。焊接过程采用 99.99% 纯氩气保护，气体流量恒定在 15L/min。所有试件都用 V 型坡口，装配间隙 0.5mm，确保实验结果的可靠性和可比性<sup>[1]</sup>。表 1：详细列出了三组实验的具体工艺参数及其对应的热输入值，这些参数设置为后续研究不同热输入条件下接头的组织性能演变规律提供了基础。

表 1 焊接工艺参数

| 组别 | 电流 (A) | 电压 (V) | 速度 (mm/min) | 热输入 (kJ/cm) |
|----|--------|--------|-------------|-------------|
| 1  | 140    | 12.5   | 120         | 8.5         |
| 2  | 160    | 13.0   | 120         | 10.5        |
| 3  | 180    | 13.5   | 120         | 12.5        |

2.3 组织性能多维度表征方法的确定依据

为确保研究结果的全面和可靠，使用多维度表征法来考察接头性能。微观组织分析用 IE500M 金相显微镜来观察微观组织，用 JSM-7800F 场发射扫描电镜来进行细部结构分析。力学性能测试包含室温拉伸试验（GB/T2651），显微硬度测定，腐蚀性能测试使用晶间腐蚀试验（GB/T4334），点腐蚀试验。每个参数组取 3 个平行试样，实验结果取平均值，保证数据的统计性。利用 ImageProPlus 软件对组织进行定量分析，保证数据处理的准确性与科学性。

3 微观组织结构特征分析

3.1 焊缝区域凝固组织形貌与相组成演变规律

不同热输入条件下的焊缝组织呈现显著差异。当热输入为 8.5kJ/cm 时，焊缝中心形成细小的胞状晶和树枝晶组织，一次枝晶臂间距约为 15μm。随着热输入增加至 10.5kJ/cm，枝晶尺寸略有增大，但组织仍保持较好的均匀性。当热输入达到 12.5kj/cm 的时候，枝晶臂间距就会变大到 25um 而且有明显的粗化。通过 EDS 分析可知，焊缝中以奥氏体相为主，δ - 铁素体随着热输入的增大而减小，从 8.5kJ/cm 时的 6.2% 降到 12.5kJ/cm 时的 4.5%。这种组织的变化对于焊缝的抗热裂性和耐腐蚀性有很大的影响。

3.2 热影响区晶界特性与析出相分布特征

热影响区（HAZ）的组织变化最为显著。在低热输入（8.5 kJ/cm）条件下，HAZ 宽度较窄，约为 0.8mm，晶粒尺寸保持在 25μm 左右。当中等热输入（10.5kJ/cm）时，HAZ 宽度扩大至 1.0mm，晶粒尺寸增加至 35μm。当采用高热输入（12.5kJ/cm）时，HAZ 宽度进一步扩大至 1.2mm，晶粒发生明显粗化，最大晶粒尺寸达到 50μm。通过 TEM 观察发现，在 650-850℃敏化温度区间，晶界处有 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 型

碳化物析出，且析出物数量与热输入量呈正相关关系，这对材料的耐腐蚀性能产生不利影响。

3.3 母材 / 焊缝界面组织梯度变化规律研究

熔合线附近的组织有明显的梯度变化。母材侧是轧制态的等轴奥氏体晶粒，平均尺寸为 20μm。靠近熔合线的地方，因为温度梯度大，所以形成外延生长的柱状晶区。从元素分布分析中可以看出，熔合线附近存在 Cr，Ni 等重要的合金元素的扩散层，扩散层的宽度大约为 50μm。Cr 元素在熔合线上有轻微的贫化，最低含量为 17.5%，这就使得界面区域的耐腐蚀性变差<sup>[2]</sup>。界面区域显微硬度测试发现该处有明显的硬度梯度，从母材的 210HV 到焊缝区的 230HV 逐渐过渡，这种硬度变化和组织梯度特征密切相关。

4 力学性能测试结果与讨论

4.1 接头强度特性与断裂行为关联性分析

拉伸试验结果说明焊接接头的力学性能与热输入参数存在一定的相关性。当热输入为 10.5kJ/cm 时，接头的综合性能最好，抗拉强度达到 625MPa，屈服强度为 325MPa，延伸率为 35%，比母材强度低 8.7%。低热输入（8.5kJ/cm）条件下，由于冷却速度快，接头强度为 605MPa，但是塑性差；高热输入（12.5kJ/cm）时，由于晶粒粗化严重，强度降低到 595MPa。所有试样断裂位置都在热影响区，断口分析可知低热输入试样为韧性断裂，有大量的韧窝；高热输入试样为准解理断裂，与晶界碳化物析出、晶粒粗化有关。这表明优化热输入可有效改善接头强塑性匹配。表 2 数据清晰地展示了不同热输入参数下接头力学性能的量化对比，为后续分析与讨论提供了重要依据。

表 2 拉伸性能测试结果

| 热输入 (kJ/cm) | 抗拉强度 (MPa) | 屈服强度 (MPa) | 延伸率 (%) |
|-------------|------------|------------|---------|
| 8.5         | 605        | 310        | 32      |
| 10.5        | 625        | 325        | 35      |
| 12.5        | 595        | 295        | 28      |

4.2 显微硬度分布梯度与组织演变对应关系

显微硬度测试结果中可以看出，接头硬度分布具有明显的不均匀性。母材区硬度保持在 210HV 左右，焊缝区由于快速凝固产生细晶强化，硬度可高达 230HV。热影响区软化，最低硬度为 185HV，与该区域晶粒长大及回复再结晶有关。硬度分布曲线显示，软化区宽度随着热输入的增大而增大，在 8.5kJ/cm 时宽度为 0.6mm，在 10.5kJ/cm 时宽度为 0.8mm，在 12.5kJ/cm 时宽度为 1.0mm。这种变化是硬度和微观组织非常吻合的证明，证实了焊接热循环对局部力学性能的显著影响。

4.3 塑性变形能力与界面协调性研究

弯曲试验结果显示所有的试样都能通过 180° 的弯曲试验，但是性能方面存在差别。热输入为 10.5kJ/cm 的试样弯曲性能最好，表面没有产生裂纹；而高热输入试样的弯曲时

会出现微裂纹,这是由于热影响区组织粗大造成的。通过数字图像相关(DIC)技术对试样的应变场分布情况加以分析,发现试样熔合线附近存在着明显的应变集中现象,而且集中程度与界面组织梯度有关。从实验结果来看,通过改善焊接工艺参数,可以提高接头各部分之间的变形协调性,从而提高整体塑性变形能力。

## 5 腐蚀行为实验结果与机理

### 5.1 晶间腐蚀敏感性定量评价与机理分析

通过 Strauss 试验和电化学动电位再活化(EPR)的方法来评定焊接接头的晶间腐蚀敏感性。结果表明所有的焊接接头都有不同程度的晶间腐蚀倾向,热输入量为 10.5kJ/cm 时腐蚀最轻,腐蚀速率为 0.85mm/a,腐蚀等级为 A 级。EPR 结果显示再活化率随着热输入量的增加而增大,在 12.5kJ/cm 时最大,为 15.8%。腐蚀机理是由于 Cr 碳化物在晶界上析出而造成的贫铬区。热输入影响敏化温度区间停留的时间,进而影响贫铬区的程度。通过显微观察发现,腐蚀裂纹主要是沿晶界扩展,而且在热影响区最严重,这也与该区域碳化物大量析出现象相符合。表 3 的定量数据清晰地展示了不同热输入条件下接头腐蚀性能的显著差异,为后续腐蚀机理分析提供了重要的数据支撑。

表 3 腐蚀试验结果

| 热输入 (kJ/cm) | 腐蚀速率 (mm/a) | 腐蚀等级 | 最大腐蚀深度 (μm) |
|-------------|-------------|------|-------------|
| 8.5         | 0.92        | B    | 125         |
| 10.5        | 0.85        | A    | 105         |
| 12.5        | 1.15        | C    | 155         |

### 5.2 点蚀萌生与发展行为特征研究

采用 FeCl<sub>3</sub> 溶液进行点蚀试验,点蚀最先在热影响区出现。点蚀电位测量表明焊接接头的点蚀电位比母材低 50-100mV。热输入为 12.5kJ/cm 时点蚀敏感性最高,点蚀密度达到 35 个/cm<sup>2</sup>,平均蚀坑深度为 85μm。通过 SEM 观察发现,点蚀核主要起源于晶界碳化物和基体的界面处,以及夹杂物周围。蚀坑呈典型的半球形发展,腐蚀时间越长,蚀坑越往中心聚集,相互连接成较大的腐蚀坑。

### 5.3 腐蚀产物化学组成与腐蚀类型判定

通过 XPS 和 EDS 对腐蚀产物成分的分析可知,主要产物是 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,FeOOH,其中 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量越多耐腐蚀性越好。在 10.5kJ/cm 试样中 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量最高,为 62.5%,而 12.5kJ/cm 试样中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量则显著提高。腐蚀产物中还有少量氯化物被发现,约有 2.3%,说明 Cl<sup>-</sup> 加入了腐蚀之中。结合显微形貌与成分分析确定主要的腐蚀形式为晶间腐蚀和点蚀。晶间腐蚀出现在敏化程度较高的区域,而点蚀则与夹杂物和析出密切相关。研究还发现两种腐蚀形式存在相互促进作用,加速了接头的腐蚀失效进程。

## 6 综合结论与工程应用价值

### 6.1 组织 - 性能关联机制的系统性结论

研究表明,焊接热输入通过影响微观组织演变进而决定接头综合性能。当热输入为 10.5kJ/cm 时,组织性能匹配效果最佳。焊缝区形成细小均匀的树枝晶组织,δ - 铁素体含量控制在最佳值 5.8%,热影响区晶粒大小控制在 35μm 左右。这样的组织特征使得接头在拥有良好力学性能(抗拉强度为 625MPa,延伸率为 35%)的同时还具有良好的耐蚀性(腐蚀速率为 0.85mm/a)。过大的或过小的热输入都会导致组织的恶化,如热输入较低时组织细化而残余应力增大,热输入较高时晶粒粗大且碳化物析出严重,导致接头性能下降。这一结论为优化焊接工艺提供了重要的理论依据。

### 6.2 焊接工艺参数优化方向的明确建议

基于研究成果,推荐选用热输入参数为中等热输入参数 10—11Kj/cm 的 304 不锈钢 TIG 焊接。具体工艺参数为:焊接电流为 155—165A,电压为 12.8—13.2V,焊接速度为 115—125mm/min。可以采用较小的坡口角度和多层多道焊的方式,减少单道焊的热输入总量。严格控制层间温度<150℃,防止热影响区过分敏化。对于耐腐蚀性要求比较高的地方,可以做焊后固溶处理(1050℃ × 30min),消除焊接应力,使组织均匀。这些措施可显著提高接头的综合使用性能。

### 6.3 工程应用价值与后续研究展望

本研究结论已成功应用于某化工设备制造企业,使得 304 不锈钢焊接接头的合格率达到 99.5%,设备的使用寿命提高了 30%。研究成果为石油化工、食品机械等诸多领域里焊接工艺规范修订形成了科学依据<sup>[9]</sup>。后续研究会侧重于探讨焊接接头在高温、腐蚀等相互作用条件下的性能改变规则,进一步探索数字化焊接手段在线监测并调控的实际应用情况,促使不锈钢焊接技术朝着智能化与高效率的方向迈进。

## 7 结语

本研究表明,TIG 焊接热输入参数的优化可以很好的控制 304 不锈钢接头组织和性能。当热输入控制在 10.5kJ/cm 时,接头的综合性能最好,抗拉强度达到 625MPa,腐蚀速率为 0.85mm/a。研究显示了焊接热输入 - 微观组织 - 力学性能 - 耐腐蚀性之间内在联系,形成起工艺优化理论模型。研究成果已经应用到工程实践中,有效的提高了设备的使用寿命和安全性能。未来研究将聚焦多场耦合工况下接头性能演化规律及智能化焊接技术开发,为推动不锈钢焊接技术进步提供重要支撑。

### 参考文献

- [1] 杨海波,陈勇,徐育焱,等.304不锈钢管TIG焊接接头凝固行为及热力耦合研究[J].精密成形工程,2023,15(12):173-181.
- [2] 孙家坡.激光-TIG复合焊接304不锈钢工艺参数优化[D].南华大学,2023.
- [3] 刘辉,张俊峰.TP304不锈钢管道TIG焊接熔池冶金行为与微观组织调控研究[J].冶金与材料,2025,45(08):22-24.

# New Directions in Plant Active Ingredient Extraction: Natural Proportional Compound of Single Active Components from Authentic Plants

Anning Wang Sen Hou

Guyu Biotechnology Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

## Abstract

Plant extracts play an important role in the Chinese cosmetics, health products, and pharmaceutical markets. With the continuous advancement of extraction technology, the concept of plant extract raw materials is gradually changing. However, since their inception, there have been inherent problems with plant extract raw materials. Some plant extract ingredients are mixed, and the core functional components and mechanisms are unclear. Some plant extracts have merely a single component and lose the effect of synergistic enhancement. Although there are numerous reports on the preparation of plant extracts, the theoretical research on the development of plant extracts is still lacking. This study analyzes on the development theory of plant extract raw materials, explains from a scientific perspective the four major characteristics that excellent plant extract raw materials should possess and details the scientific basis behind them: sourcing authentic plants, extracting high-purity monomers, compounding multiple monomer ingredients, and following natural ratios using the compound method. This study will provide theoretical references and R&D guidelines for the development of plant extracts in the fields of cosmetics, health products, and pharmaceuticals in China.

## Keywords

plant extract raw material; authentic; monomer; compound; natural proportion

## 植物功效成分提取新方向：道地植物单一成分的天然比例复配

王安宁 侯森

谷雨生物科技集团股份有限公司，中国·广东 广州 510000

## 摘 要

在中国化妆品、保健品、药品市场，植物提取物原料占有重要的一席之地。随着现在提取工艺的不断进步，植物提取物原料的理念也逐渐改变。然而，从诞生之日起，植物提取物原料就存在内在的问题：有的植物提取物成分混杂，核心功效成分和机制不明；有的植物提取物成分单一，但是也失去协同增效的机制；同时，植物提取物的制备方法虽多有报道，但是植物提取物的研发理论研究还很缺乏。本文针对植物提取物原料的开发理论进行了研究分析，从科学的角度阐释了优秀植物提取物原料所应具备的四大特征及其背后的科学依据：取材道地植物、提取高纯单体、多单体成分复配以及复配道法天然比例。本研究将为中国化妆品、保健品、药品领域中植物提取物的开发提供理论参考和研发方向指南。

## 关键词

植物提取物原料；道地；单体；复配；天然比例

## 1 引言

植物提取物原料成分在中国化妆品、保健品、药品市场占有重要的地位。近年来各种植物提取成分层出不穷，大致上可分为三种。第一种是功效物质不明的成分。虽然此成分整体有效，但其功效成分不明，并且往往纯度很低。更有甚者其标志性成分仅能作为生产质控使用，并非真实的功

效成分。第二种是核心功效物质明确，但是纯度不高的成分。此成分往往以混合物的形式存在，例如，原料光果甘草根提取物，其中主要功效物质是光甘草定，但是纯度一般仅仅只有 40% 左右。第三种是化学结构明确且纯度很高的成分。这种成分是从天然植物中提取而来，其成分单一，功效明确，例如，原料光甘草定能够达到 99% 的纯度，具有优异的美白功效。

这三种植物提取成分原料的出现，反映了科学理论的历史变迁。从传统中医视角来看，植物提取物，尤其是药材来源的植物提取物，往往含有数十种生物碱、黄酮、多糖等

【作者简介】王安宁（1982-），男，满族，本科，从事生物化学与分子生物学研究。

复杂成分，这些成分在复方中相互作用，共同发挥药效。然而这种多成分的“黑箱”却给机理机制的分析造成了困难。相对而言，西方现代药学“单体成分至上”的原则受到越来越多的追捧。结构明确的物质，可以通过科学的试验精准测量其剂量-功效关系，具有更好的信服力。在追求单一活性成分的过程中，人们发现多物质的复配具有比单体成分更加优秀的功效，即协同增效效应。获取更优秀的植提原料是化妆品科学的重要研究课题，然而目前的原料研发还缺乏成熟理论指导，为此，本文抛砖引玉，在理论层面浅谈化妆品植物提取原料的未来发展方向。

## 2 野生道地植物的中医学理解

道地药材是中医临床长期优选出的优质药材，强调特定地域（如四川黄连、甘肃当归）在自然条件（气候、土壤）和人文工艺（种植、炮制）共同作用下形成的独特品质<sup>[1]</sup>。其“道”源于唐代行政区划，“地”指地理环境，体现中医“天人合一”理念。中医理论认为药材禀受天地之气，如甘肃岷县当归因高海拔积累更多补血成分。孙思邈《千金翼方》强调“用药必依土地”。

一方面，道地的自然条件更有利于植物的生长，正所谓“橘生淮南则为橘，橘生淮北则为枳”。淮南属亚热带季风气候，温暖湿润（年均温 $> 0^{\circ}\text{C}$ ，年降水量 $> 800\text{mm}$ ），适合柑橘生长，果实甘甜；而淮北属温带季风气候，冬季寒冷干燥（年均温 $< 0^{\circ}\text{C}$ ，霜期长），柑橘无法适应。而枳（酸涩果实）更为耐寒，才能在淮北生长。虽然古人缺乏现代植物学的知识，将橘（柑橘）与枳（枳壳）混淆为一种物种，但这句话所包含的理论，演绎了道地的自然条件与植物生长的互动过程。

另一方面，尽管道地的自然条件不一定是逆境，但是很多生长于逆境的道地植物，会主动通过复杂的生理和分子机制来适应和缓解逆境的威胁与损害，如持续调节激素水平、增强抗氧化能力等提高对逆境的忍耐力。在此过程中，植物会产生特殊的成分来对抗环境压力，导致植物所含功效物质的量和种类发生改变。离开了道地环境，不但会使植物的生长受到抑制，而且会让部分在逆境道地环境中产生的功效成分逐渐丧失。因此使用道地的植物是寻求植物来源功效成分的关键。

## 3 高纯提取物的优势

生长在逆境的植物，在对抗环境压力时，除了会产生一系列有益的功效成分，也会产生有害成分。例如，茄科植物会产生茄碱，这种成分能有效防御昆虫等天敌，但是大量使用会导致神经系统功能损伤。又如，烟草能合成二萜糖苷，这种物质可攻击细胞膜，从而保护植物免于食草动物吞食。这些成分在具有对人体有害的风险。

虽然有益的功效成分在纯度不高的植物提取物中占主体，但是微量有害物质的掺杂同样具有不可忽视的风险。例

如，光甘草定、甘草酸二钾这些对皮肤有益的成分都提取自甘草，但研究表明，在纯度不高的光甘草定中，有时会掺杂光甘草酚这种成分。研究发现纯光甘草定对斑马鱼胚胎并没有遗传毒性，而含有光甘草酚的同剂量的光甘草定，则展现出显著的遗传毒性，该毒性随光甘草酚含量而增加<sup>[2]</sup>。随着光甘草定纯度的提高，光甘草酚的含量会不断减少，直至趋近于零，彻底消除了其不良影响。

某些单体物质，其在极低的剂量下也具有极强的副作用。如光甘草定这种美白成分<sup>[3]</sup>，在提纯过程中，极易掺杂微量的芒柄花素。芒柄花素在极低的含量时也会导致皮肤过敏等不良反应。如表 1 所示，在 300ppm 的光甘草定乳液中，含有百万分之 0.75 的芒柄花素就会导致明显的皮肤过敏（1 例一级反应 1 例二级反应），当芒柄花素的含量提高到 3ppm 时，会产生更明显的皮肤刺激（3 例一级反应 1 例二级反应）。使用高纯功效物质进行复配，能够有效避免不明杂质成分带来的副作用，降低使用风险。

表 1. 含有芒柄花素的光甘草定乳液的斑贴试验。

| 芒柄花素含量<br>(ppm) | 观察<br>时间 | 受试<br>人数 | 斑贴试验不同皮肤反应人数 |   |   |   |
|-----------------|----------|----------|--------------|---|---|---|
|                 |          |          | 1            | 2 | 3 | 4 |
| 3               | 0.5h     | 46       | 3            | 1 | 0 | 0 |
|                 | 24h      | 48       | 2            | 0 | 0 | 0 |
|                 | 48h      | 48       | 2            | 0 | 0 | 0 |
| 0.75            | 0.5h     | 48       | 1            | 1 | 0 | 0 |
|                 | 24h      | 50       | 0            | 0 | 0 | 0 |
|                 | 48h      | 50       | 0            | 0 | 0 | 0 |
| 0               | 0.5h     | 49       | 0            | 0 | 0 | 0 |
|                 | 24h      | 49       | 0            | 0 | 0 | 0 |
|                 | 48h      | 49       | 0            | 0 | 0 | 0 |

高纯的单体成分具有明确的化学结构，可以通过科学的试验对其功效进行精准的检测，避免混合提取物功效成分不明、比例不稳定等因素带来的风险，是植物提取物未来的发展方向。

## 4 多成分复配的协同增效

天然植物提取物的功效往往是多种成分协同作用的结果。例如，红景天<sup>[4]</sup>主要分布在北半球的极寒地带以及高原地区，为了适应高海拔、强紫外线的生存环境，产生了红景天苷以及一系列酚类功效物质，如原花青素、绿原酸、没食子酸等。又如，高山火絨草（又名雪絨花），原产于阿尔卑斯高山地区，生长在海拔 2000-2900 米的砾石草地或石灰岩地，生长环境具有温差大、气压低、紫外线辐射强烈、超低温及风强等特点。为此，雪絨花中进化出各种对自身生存有益同时也对皮肤有益的活性成分，包括雪絨花酸、绿原酸、植物固醇、氨基酸、多醣体等，能够协同抗氧化并对体内过量的自由基及有害物质进行清除。

为了达到协同增效的目的，往往需要选取几种（通常两到三种）发挥主要功效的单体成分，进行科学复配。参考

天然道地植物所含成分选择复配成分是实现成功复配的关键。例如，在光果甘草中含有光甘草定、甘草素、甘草酸三种功效成分 [5]。实验数据表明，无论甘草酸还是甘草素单独和光甘草定复配都不能达到协同增效（图 1）。然而，同时复配光甘草定、甘草素、甘草酸三种功效成分，会使原料的美白功效得到显著性改善，实现协同增效的目的。

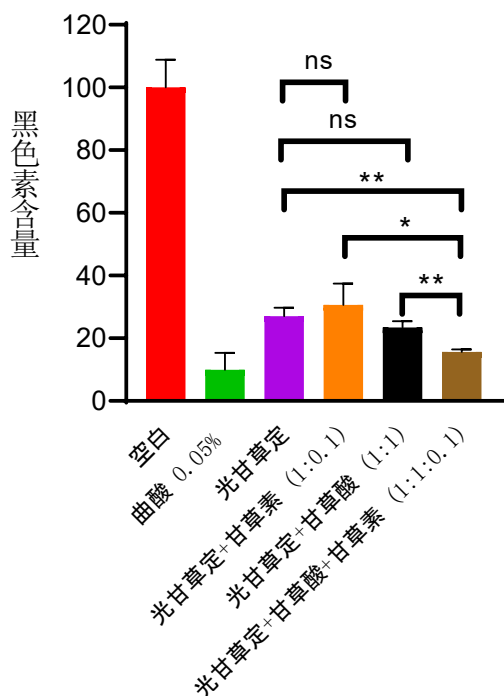


图 1. 光甘草定、甘草酸、甘草素复配的美白协同功效。

## 5 道地药材质的天然（野生）比例

在逆境中，道地植物不断抵抗恶劣的生存环境，促进了次生代谢产物的合成和积累，优化了有效成分的比例，进而提升功效。例如，研究发现干旱的条件会激活甘草 EMP 途径和 TCA 循环，从而激活抗氧化酶体系并增加黄酮类化合物的积累。在千万年的自然筛选中，那些进化中通过偶然突变产生功效物质比例最优的植物，在逆境压力中，会得到

更好的生存机会；而比例欠佳的植物，在同样生存环境下，相较最优比例的突变株，会生长缓慢而被进化选择压力淘汰。为此，道地天然（野生）植物中的功效成分比例，是自然选择对自然环境的最优解，也是发挥最佳功效的比例。

近年来，很多道地植物采用人工种植的方法进行获取。人工条件下生长的植物，相较天然（野生）植物，所经历的生存环境不尽相同。导致各个成分之间的比例可能发生变化。例如，野生的人参中，往往人参皂苷的种类比较丰富且含量普遍较高，并含有稀有人参皂苷，而人工种植的人参无论在人参皂苷的含量还是种类都远逊色于野生参。为此，植物提取成分的复配应遵循其在道地植物中的天然（野生）比例。

## 6 结语

本文针对植物提取原料成分的未来发展趋势，提出理论性指导原则：首先，须优选道地的植物进行原料的提取。其次，须从道地植物中提取出高纯度的单体成分。这些成分拥有清晰明确的分子结构，其功效可以通过严谨的科学实验进行验证。然后，须参照道地植物中的成分组合，选择几种核心单体成分，进行复配以实现协同增效。最后，应参照单体成分在道地药材中的天然（野生）比例进行复配。

## 参考文献

- [1] 黄璐琦, 陈美兰, 肖培根. (2004) 中药材道地性研究的现代生物学基础及模式假说, 中国中药杂志 29, 494-496.
- [2] Guo Q, Wu S, Liang W, et al. (2022) Glabrol impurity exacerbates glabridin toxicity in zebrafish embryos by increasing myofibril disorganization, *Journal of ethnopharmacology* 287, 114963.
- [3] Yokota T, Nishio H, Kubota Y, et al. (1998) The inhibitory effect of glabridin from licorice extracts on melanogenesis and inflammation, *Pigment cell research* 11, 355-361.
- [4] 季宇彬, 耿欣, 汲晨峰. (2007) 红景天研究进展, 天津中医药 24, 66-68.
- [5] Li C, Li T, Zhu M, et al. (2021) Pharmacological properties of glabridin (a flavonoid extracted from licorice): A comprehensive review, *Journal of Functional Foods* 85, 104638.

# Preparation and Performance Study of Polymer Anti fouling Coating on Ship Titanium Alloy Surface

Yiming Hu<sup>123</sup> Longyu Zhou<sup>123</sup> Chen Hu<sup>12</sup> Haoqiang Zhu<sup>12</sup> Haitao Gao<sup>12</sup>

1. Hubei Nuclear Power Engineering Technology Research Center, Hubei, Wuhan, 430000, China

2. China Shipbuilding Industry Corporation Nuclear Safety and Emergency Technology Center, Hubei, Wuhan, 430000, China

3. Chinese People's Liberation Army Naval Engineering University, Hubei, Wuhan, 430000, China

## Abstract

With the development of shipping industry, ships are often subjected to challenges such as biological fouling and corrosion during long-term service in complex marine environments, which severely affect structural safety and operational efficiency. Titanium alloys, with their excellent mechanical properties and corrosion resistance, are widely used in high-performance ship structures. However, their surfaces are prone to become attachment bases for marine organisms, necessitating protection through efficient anti-fouling coatings. High molecular anti-fouling coatings have gained extensive application in the maritime field due to their excellent interfacial regulation capabilities, environmental friendliness, and durability. This paper systematically reviews the material selection, structural design, preparation processes, and performance characterization of high molecular anti-fouling coatings on titanium alloy surfaces, while conducting in-depth analysis of their anti-fouling mechanisms and engineering applications. The study demonstrates that rationally designed high molecular anti-fouling coatings can significantly enhance the service life of ship hulls, showing promising application prospects.

## Keywords

titanium alloy; polymer anti-fouling coating; ship antifouling; surface modification; performance study

# 船舶钛合金表面高分子防污涂层的制备与性能研究

胡一鸣<sup>123</sup> 周龙玉<sup>123</sup> 胡晨<sup>12</sup> 朱浩强<sup>12</sup> 高海涛<sup>12</sup>

1. 湖北省核动力工程技术研究中心, 中国·湖北 武汉 430000

2. 中国船舶集团有限公司核安全及应急技术中心, 中国·湖北 武汉 430000

3. 中国人民解放军海军工程大学, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘 要

随着航运业的发展, 船舶在复杂海洋环境中长期服役, 常遭遇生物污损与腐蚀等难题, 严重影响结构安全和运行效率。钛合金凭借优异的力学与耐腐蚀性能, 广泛应用于高性能船舶结构, 但其表面易成为海洋生物的附着基底, 需依赖高效防污涂层进行保护。高分子防污涂层因其良好的界面调控能力、环保性和耐久性, 在船舶领域获得广泛应用。本文系统梳理了钛合金表面高分子防污涂层的材料选择、结构设计、制备工艺与性能表征, 深入分析其防污机理及工程应用。研究表明, 合理设计的高分子防污涂层能够显著提升船体服役寿命, 具有良好的应用前景。

## 关键词

钛合金; 高分子防污涂层; 船舶防污; 表面改性; 性能研究

## 1 引言

钛合金因其高比强度、低密度和优异的耐蚀性, 在船舶、海洋工程及航空航天等领域得到了广泛应用, 尤其是在高端船舶制造领域, 钛合金结构大幅提升了船体的综合性能。然而, 复杂多变的海洋环境中, 生物污损问题普遍存在。海洋微生物、藻类及贝类等的附着不仅导致船体阻力增加、能耗升高, 还会加速钛合金表面的局部腐蚀, 严重缩短材料服役

寿命。传统有机锡类防污涂层虽有一定防污作用, 但其带来的环境污染日益严重, 已被逐步禁用。在此背景下, 绿色高效的高分子防污涂层成为当前研究的热点。高分子防污涂层例如丙烯酸酯类季铵盐抗菌涂层、环氧树脂季铵盐聚合涂层拥有较大的分子设计空间, 可通过聚氨酯柔性链段与环氧树脂刚性网络的互补作用, 构建兼具高强度与高韧性的三维网状结构, 攻克钛合金动态部件防污涂层易脱落、抗冲击性差的难题。部分高分子材料还具备自修复、耐老化、耐磨损等特性, 为船舶钛合金表面防护开辟了新路径。尽管已有多项研究进展, 界面兼容性、长期耐久性和工程化应用等关键问题仍待深入探讨。本文将系统研究高分子防污涂层的制备与

【作者简介】胡一鸣(1990-), 男, 中国湖北天门人, 硕士, 工程师, 从事船用材料研究。

性能,为高性能船舶表面防护提供理论依据与实践指导。

## 2 船舶表面污染与防护需求

### 2.1 钛合金在船舶领域的应用现状

当下阶段,钛合金其优良的物理及化学性能,成为现代高性能船舶结构不可或缺的材料。其密度低、强度高、耐腐蚀、抗疲劳等特点使其适用于水下结构、螺旋桨、舰体连接件等关键部位。在实际服役过程中,钛合金能够在高盐、高湿、高压的恶劣环境下长期稳定运行。然而,其表面活性高,极易吸附有机物和微生物,成为海洋生物附着的“温床”,导致生物污损问题突出。海洋生物附着于设备表面,生长繁殖速度极快,且附着十分牢固,难以清除,导致船舶阻力增加,降低航速、增加燃料消耗,同时会堵塞管道,降低换热效率,促成局部腐蚀和结构疲劳,造成舰船进坞维修费用增加、使用寿命缩短等损失。船舶涂层研究现状

国外在舰船防污材料领域形成以无锡自抛光防污漆、低表面能防污涂料、可控溶解型防污漆为核心的成熟技术体系,并针对钛合金基材的特殊性开发了氧化钛基材料、季铵盐类抗菌涂层、环氧树脂季铵盐聚合涂层、生物衍生防污涂层及智能响应型防污涂层等多元化创新方向,通过分子级改性、天然活性物质利用及环境动态响应机制,显著提升钛合金通海系统的防污效能与适配性;国内防污技术长期以传统溶解型防污漆为主,虽在涂料防污、物理、电解、生物防污等领域开展探索,但针对船舶钛合金系统的专用防污研究较少,现有材料存在附着力不足、耐磨性差、环保性弱、有效期短等问题,尤其在环氧树脂季铵盐聚合涂层等新型材料上仅完成实验室小试,规模化应用与长期稳定性验证仍待突破。

### 2.2 防污涂层的关键性能需求

高效防污涂层不仅要具备优良的防生物附着能力,还应具备良好的附着力、耐腐蚀性、机械强度和长期稳定性。对于钛合金等高端船舶材料,防污涂层需适应多变的服役环境,如高盐雾、高紫外线、高流速冲刷等。此外,涂层应具备优异的环境友好性,避免重金属和有机锡等有害成分。理想的高分子防污涂层应兼具自清洁、自修复、耐老化等功能,以延长船体表面清洁周期,降低维护成本,提高经济与环境综合效益。

## 3 高分子防污涂层的设计与制备技术

### 3.1 高分子材料的选择与结构设计

高分子防污涂层材料的选择与结构设计是提升其综合性能的关键。优质防污涂层通常以表面能低、成膜性好、耐腐蚀和耐老化的高分子为基础。高分子季铵盐、季磷盐防污材料是目前研究的热点,通过带官能团单体的聚合反应或以接枝的方式,在聚合物链上引入抗菌官能团,再引入分子级季铵盐嵌入策略,开发环氧-聚氨酯复合交联工艺,合成新型高分子抗菌防污涂层,在实际应用过程中,能同时将多种防污剂进行复合,满足不同海域工况的要求,适用范围较广,

成本较低。有机硅聚合物如聚二甲基硅氧烷(PDMS)因其分子链柔顺、疏水性强、成膜致密,已成为船舶防污的主流材料。聚酯类、聚氨酯及其改性物也常被用于多层复合体系,以提升力学强度和韧性。结构设计上,通过分子主链的柔性调控、交联度调节和功能基团的引入,实现防污性能、附着力和耐久性的协同优化。近年来,嵌段共聚、接枝聚合、超分子自组装等策略,为防污涂层赋予了更强的分子可设计性,推动了其在复杂海洋

3.2 表面改性与界面粘结增强方法  
为实现高分子防污涂层与钛合金基体的高效结合,必须采取科学的表面改性与界面粘结增强措施。钛合金表面在自然环境下极易生成一层致密的氧化膜,这虽提升了耐蚀性,但往往削弱了涂层的物理粘结。机械打磨、喷砂等物理方法能够粗化基体表面,提高涂层的机械锁合力;酸蚀、碱蚀等化学处理不仅去除表面杂质,还能引入活性位点,利于化学键合的形成。等离子体活化技术通过在表面引入极性基团,显著提升高分子链段的定向排列和粘结强度。此外,偶联剂如硅烷、磷酸酯等能够在钛合金与高分子之间搭建化学“桥梁”,进一步增强界面结合。近年来,层层自组装(LBL)、原位聚合和多功能接枝等新技术不断涌现,极大丰富了钛合金/高分子界面的结构调控手段,为提升防污涂层服役可靠性奠定了坚实基础。

### 3.3 防污涂层的制备工艺与优化

高分子防污涂层的制备工艺不仅决定了成膜均匀性,还影响其防污和耐久性能。刷涂、喷涂等传统工艺因施工便捷、适用范围广,常被用于船舶大面积防护。浸渍与旋涂则能实现薄膜致密、表面光滑,适合对表面质量要求较高的部件。制备过程中,涂层厚度的精准控制、交联剂的合理选用及固化温度的优化,对保证涂层致密度和与基体的界面粘结至关重要。实际工程应用中,为应对不同服役环境和结构复杂度,常通过分步涂覆、多层复合和梯度结构等方式提升涂层的功能集成度和服役寿命。近年来,数字化喷涂、自动化固化及智能工艺监控技术不断成熟,使高分子防污涂层的大规模制备和工程化应用成为可能,大大提升了制备效率与质量一致性,也为高端船舶制造的智能化转型提供了新支撑。

## 4 高分子防污涂层的性能表征与机理分析

### 4.1 防污性能的测试方法

防污性能的科学评估是高分子防污涂层研发与应用的基础环节。实验室内常采用静态浸泡实验,将涂覆样品长时间浸泡于人工海水或天然海水中,定期观察和统计生物附着物的数量与种类,以评估涂层对微生物、藻类及贝类等的抑制效果。动态流场防污试验则通过模拟船舶实际运行环境,检测涂层在流体剪切力作用下的防污能力,揭示其长期服役性能。除此之外,现场挂板试验是最贴近真实工况的方法,将试样悬挂于不同海域,周期性取样分析生物附着与涂层表面变化。为深入理解防污机制,还需结合接触角测量、表面能测试及摩擦系数测试等物理表征手段,系统分析涂层表面特性与生物附着行为之间的内在关系,为高分子防污材料的

设计与优化提供理论支持和实践依据。

## 4.2 耐腐蚀与力学性能分析

高分子防污涂层除防污外，还需具备优良的耐腐蚀和力学性能，以确保在复杂海洋环境下的稳定性与可靠性。电化学阻抗谱（EIS）和极化曲线是常用的耐蚀性能测试方法，通过分析不同涂层体系下的阻抗变化、腐蚀电流密度及极化电位，揭示其抗蚀机理。盐雾腐蚀测试则在加速环境中考察涂层的耐盐雾性能，模拟实际海上服役的腐蚀过程。力学性能方面，附着力测试（如划痕、拉脱）、耐磨损测试及柔韧性测试，是评价涂层与钛合金基体结合强度、抵抗机械损伤能力的关键指标。涂层在满足防污的基础上，只有兼具高耐腐蚀性和优良力学性能，才能确保其在实际工程中的长期服役安全 and 经济效益。

## 4.3 防污机理与界面作用分析

高分子防污涂层的防污机理主要体现在物理屏障、表面能调控和化学抑制三方面。低表面能高分子材料通过降低细菌、藻类等生物的黏附概率，使其难以在表面形成稳固的生物膜；而涂层中的疏水、亲水基团则可调节水膜结构，构建物理屏障，有效阻断微生物的定植和生长。部分高分子涂层还能释放生物抑制剂，通过生物学活性组分抑制海洋生物的繁殖和附着。界面作用则是涂层防护性能的核心，高分子链与钛合金表面的物理嵌合和化学键合，提升了界面结合强度和整体稳定性。深入剖析分子结构、表面能与生物附着的关系，不仅有助于揭示防污机理，还为开发高效、长效的新型高分子防污涂层提供理论基础。

# 5 高分子防污涂层的工程应用与前景展望

## 5.1 典型高分子防污涂层工程应用案例

随着绿色防污理念的深入推广，聚二甲基硅氧烷（PDMS）、氟聚合物、功能化聚酯、丙烯酸胺类季铵盐抗菌涂层、环氧树脂季铵盐聚合涂层等高分子防污涂层在船舶工程中得到了批量化和多样化的实际应用。这些材料通过优化分子结构，显著提升了对海洋生物附着的抑制效果，并有效降低了对环境的潜在危害。例如，某型海洋科考船采用多层复合高分子防污涂层后，经实际服役一年，船体表面生物附着面积减少了90%以上，船舶燃油消耗大幅下降，维护清理周期延长近一倍，整体运营成本和能耗水平得到有效控制。不同类型高分子涂层在实际工程应用中需根据目标水域的生物多样性、流速、温度以及船型特性等进行定制化设计和分层组合，以兼顾抗污、防腐、耐磨等多重需求。近年来，随着现场经验的积累和表面工程技术的进步，高分子防污涂层已成为提升船舶经济性与绿色性能的重要技术路径，极大推动了行业的高质量发展和生态友好型转型。

## 5.2 技术创新与多功能一体化发展

材料科学和纳米技术的不断突破为高分子防污涂层的功能集成和性能提升注入了新活力。传统防污涂层多以单一功能为主，难以兼顾复杂海洋环境下的多重挑战。当前，智能响应型涂层、自修复功能材料、多层复合结构以及纳米

填料的应用逐渐成为研究热点。智能防污涂层能根据温度、pH或生物附着信号实现性能自调节，提升了动态适应性。自修复材料通过微胶囊释放机制修复表面微损伤，延长了涂层寿命和服役周期。多层复合结构则融合了多种高分子与无机成分，实现了防污、抗菌、防腐、耐磨等多重功能的有机统一。纳米填料如石墨烯、二氧化钛等的引入进一步提升了涂层的力学强度、抗紫外和抗老化能力。通过界面分子工程和多场（光、电、热）耦合设计，有望实现智能感知和主动响应，为船舶表面防护技术带来革命性突破，推动高分子防污涂层向多功能一体化、高效长效方向发展。

## 5.3 未来发展方向与挑战

尽管高分子防污涂层在船舶行业已展现出巨大应用潜力，但大规模工程化应用、服役持久性、环境友好性及成本控制等方面仍存在诸多挑战。未来的技术发展需在分子设计、界面工程和功能集成方面持续创新，提升涂层在极端海洋环境下的耐磨、耐蚀和自修复能力。同时，应加大对无毒、可降解绿色材料的研发力度，降低环境污染风险，确保符合国际绿色船舶标准。为促进涂层技术成果转化与推广，亟需完善标准化性能测试和工程评价体系，构建从材料研发、实验验证到工程示范的全链条创新平台。此外，多学科的协同创新尤为关键，需加强材料科学、表面工程、环境生态及智能制造等领域的深度融合，共同推动高分子防污涂层技术的持续突破。随着全球航运绿色低碳转型和可持续发展战略的深入实施，高分子防污涂层将在船舶及相关海洋工程领域发挥越来越重要的作用。

# 6 结语

钛合金作为高性能船舶结构的关键材料，面临严峻的生物污损与腐蚀威胁。高分子防污涂层以其分子可设计性、环境友好性和优异的防护性能，成为钛合金表面防护的重要技术路径。本文系统梳理了高分子防污涂层的材料选择、结构设计、制备工艺与性能表征，分析其防污机理和工程应用成效。研究表明，合理设计的高分子涂层能够有效提升钛合金表面的抗污与耐腐蚀能力，延长船舶服役周期，降低维护成本。展望未来，随着材料科学与工程技术的不断进步，高分子防污涂层将在船舶、海洋及相关领域发挥更大作用，助力绿色航运和可持续发展。

## 参考文献

- [1] 张琪,罗丽蓉,刘涛,等.船舶海水管系TC4钛合金的表面涂层与耐蚀性能[J].金属热处理,2019,44(01):185-189.
- [2] 夏申琳,王刚,杨晓,等.钛及钛合金在船舶中的应用[J].金属加工(冷加工),2016,(19):40-41.
- [3] 李德强,王树森,包恩达.钛合金材料在船舶材料上的应用与发展[J].世界有色金属,2015,(09):127-128.
- [4] 赵成志,余姣姣,袁玉平,等.船舶海水管系钛合金组织及腐蚀性能研究[J].特种铸造及有色合金,2013,33(12):1161-1164.
- [5] 程德彬.船用钛合金与航空钛合金的使用性能差异[J].材料开发与应用,2012,27(03):60-63.

# Study on unidirectional tensile mechanical properties and anisotropy of TA1 titanium alloy sheet

Xuan Li<sup>1</sup> Gang Zhao<sup>1</sup> Guogang Li<sup>1</sup> Ruowei Shao<sup>2</sup>

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

2. Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning, 110136, China

## Abstract

To investigate the room-temperature forming properties of TA1 titanium alloy sheets, a unidirectional tensile testing system was employed to study the effects of loading speed (1, 3, 5 mm/min) and orientation angle (0°, 45°, 90°) on the mechanical performance of 1 mm thick TA1 sheets. Results showed that as loading speed increased from 1 mm/min to 5 mm/min, the 0° deformation decreased from 48.92% to 40.31%, while yield strength dropped from 218.4 MPa to 196.9 MPa, demonstrating significant strain rate sensitivity. Different orientations exhibited distinct anisotropy: the 45° orientation showed optimal plasticity (deformation 51.85%) but lowest strength (tensile strength 295.8 MPa), whereas the 90° orientation had highest strength (yield strength 271.3 MPa) but poorest plasticity (deformation 43.23%). This study revealed the coupled effect between TA1 sheet anisotropy and loading speed, providing a theoretical basis for optimizing room-temperature forming process parameters.

## Keywords

TA1 titanium alloy; unidirectional tensile; anisotropy; loading speed; mechanical properties

# TA1 钛合金板材单向拉伸力学性能及各向异性研究

李轩 赵刚 李国刚 邵若伟

1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 中国·陕西 西安 710089

2. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 中国·辽宁 沈阳 110136

## 摘 要

为探究TA1钛合金板材室温成形性能, 采用单向拉伸试验系统研究了加载速度(1、3、5 mm/min)和取向角度(0°、45°、90°)对1 mm厚TA1板材力学性能的影响规律。结果表明: 加载速度从1 mm/min增至5 mm/min时, 0°方向变形量从48.92%降至40.31%, 屈服强度从218.4 MPa降至196.9 MPa, 呈现明显的应变速率敏感性; 不同取向表现出显著各向异性, 45°方向塑性最优(变形量51.85%)但强度最低(抗拉强度295.8 MPa), 90°方向强度最高(屈服强度271.3 MPa)但塑性最差(变形量43.23%)。研究揭示了TA1板材各向异性与加载速度的耦合效应, 为其室温成形工艺参数优化提供了理论依据。

## 关键词

TA1钛合金; 单向拉伸; 各向异性; 加载速度; 力学性能

## 1 引言

钛及其合金凭借高比强度、低密度(4.5 g/cm<sup>3</sup>)、优异耐腐蚀性和宽温域服役能力, 已成为航空航天关键结构材料<sup>[1-3]</sup>。第四代战斗机F-22中钛合金用量高达41%, 主要应用于机身框架、蒙皮和压缩机叶片等关键部件<sup>[4]</sup>。然而, 钛合金室温成形面临诸多挑战: 高强度导致成形载荷大、低弹性模量引发严重回弹、强各向异性造成变形不均匀等<sup>[5-6]</sup>。

TA1作为工业纯钛的典型代表, 因其良好的塑性和耐腐蚀性在航空制造中应用广泛。但目前关于TA1板材各向异

性及加载速度对成形性能影响的系统研究相对匮乏<sup>[7-8]</sup>。任家陶等<sup>[9]</sup>研究了TA2板材不同取向的拉伸行为, 发现屈服强度随取向角增大而规律性增加。高铁军等<sup>[10]</sup>探索了黏性介质压力成形对TA1钛合金成形性能的影响机制。

本文通过系统的单向拉伸试验, 研究加载速度和取向角度对TA1板材力学性能的影响规律, 分析其各向异性特征及形成机理, 为后续复杂应力状态下的成形性能研究和工艺参数优化提供理论支撑。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料及试样制备

试验材料为厚度1 mm的TA1工业纯钛板材, 其化学成分符合GB/T 3620.1-2016标准要求。依据GB/T 228.1-

【作者简介】李轩(1989-), 男, 工程师, 主要研究飞机板材塑性成形研究。

2010《金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》设计单向拉伸试样，总长度160 mm，标距段长度65 mm，标距段宽度20 mm（图1）。采用激光切割加工试样，并对切割边

缘进行精细打磨以消除加工影响。为研究材料各向异性，分别制备与轧制方向成0°、45°和90°的试样，每组条件制备3个平行试样以确保数据可靠性。

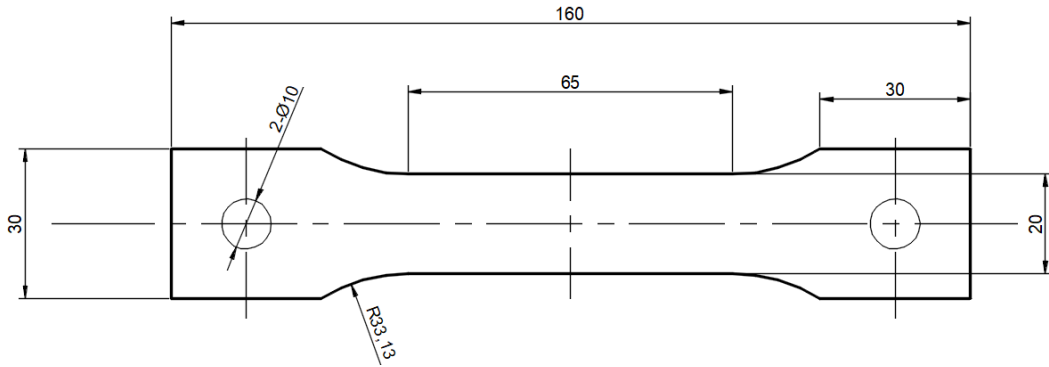


图1 单向拉伸试样尺寸示意图

## 2.2 试验设备与方案

试验采用WDW-T100型电子万能材料试验机，最大载荷100 kN，速度调节范围0.05~1000 mm/min，位移测量精度±0.5%。设置三种加载速度：1、3、5 mm/min，室温条件下进行拉伸试验。

## 2.3 数据处理方法

变形量 $\delta$ 计算公式

$$\delta = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1.1)$$

工程应变 $\varepsilon$ 与工程应力 $\sigma$ 分别为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.3)$$

其中， $L_0$ 为初始标距长度， $L_u$ 为拉伸后标距长度， $\Delta L$ 为位移变化量， $F$ 为拉伸力， $A_0$ 为初始横截面积。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 取向角度对力学性能的影响

图2~4展示了不同加载速度下三个取向的工程应力-应变曲线。在基准速度（1 mm/min）条件下，力学性能表现出明显的取向依赖性：变形能力：45°方向最优（51.85%），0°方向次之（48.92%），90°方向最弱（43.23%）。（屈服强度：90°方向最高（271.3 MPa），45°方向居中（230.1 MPa），0°方向最低（218.4 MPa）。抗拉强度：90°方向（329.5 MPa）> 0°方向（323.1 MPa）> 45°方向（295.8 MPa）

这种规律在3 mm/min和5 mm/min加载速度下保持稳定，表明TA1板材的各向异性特征在1~5 mm/min速度范围内具有良好的一致性。45°方向始终保持最优塑性，而90°方向持续展现最高强度，体现了典型的塑性-强度倒置

关系。

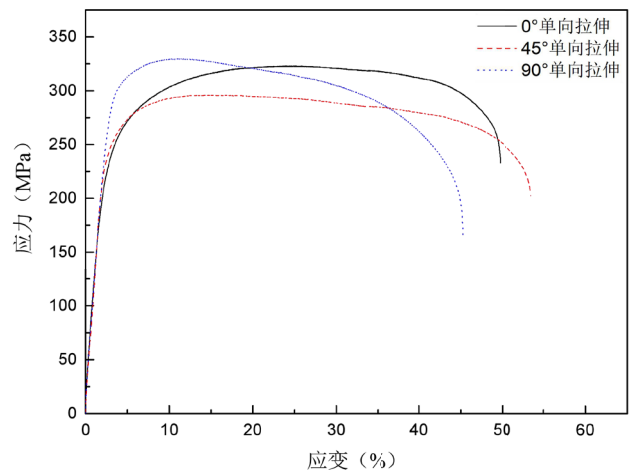


图2 1 mm/min下不同取向试样工程应力-应变曲线（0°、45°、90°）

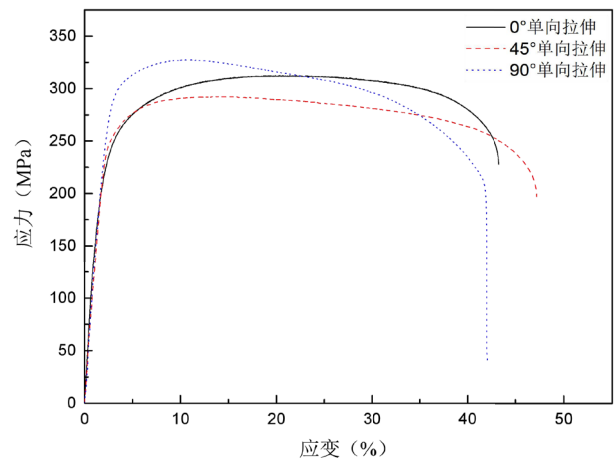


图3 3 mm/min下不同取向试样工程应力-应变曲线（0°、45°、90°）

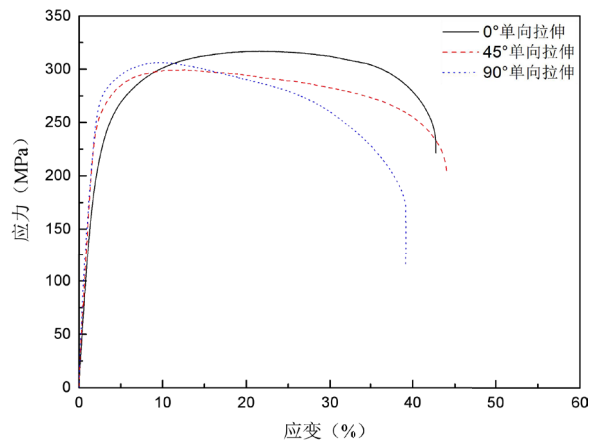
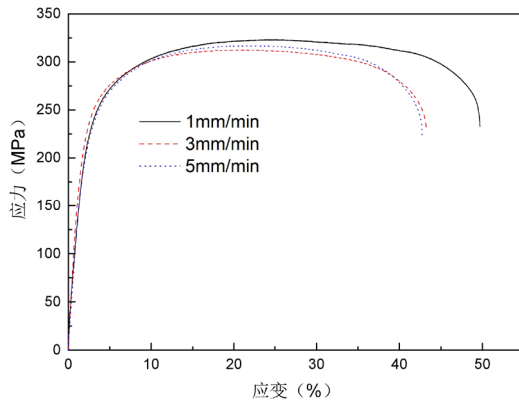
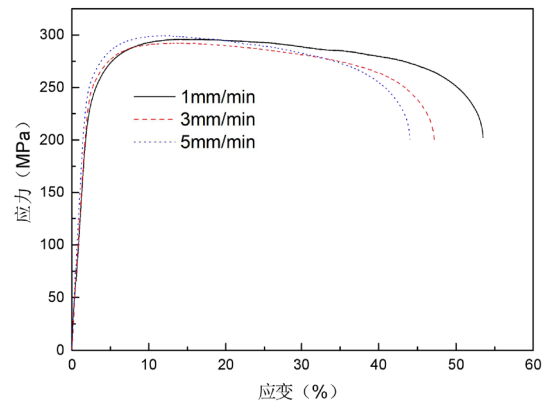


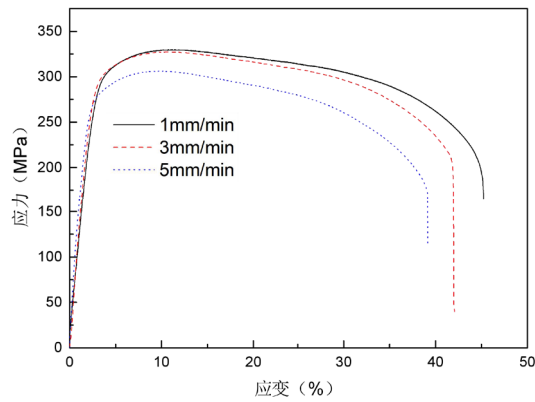
图 4 5 mm/min 下不同取向工程应力 - 应变曲线  
( $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ )



a)  $0^\circ$  单向拉伸

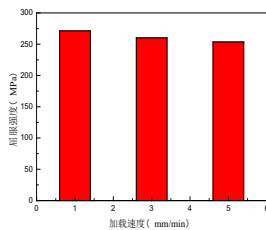


b)  $45^\circ$  单向拉伸

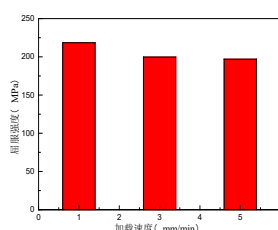


c)  $90^\circ$  单向拉伸

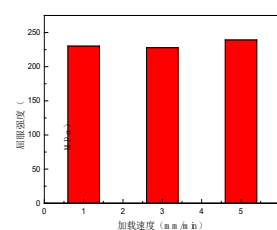
图 5 不同加载速度条件下单向拉伸试件工程应力 - 应变曲线



a)  $0^\circ$  单向拉伸



b)  $45^\circ$  单向拉伸



c)  $90^\circ$  单向拉伸

图 6 不同加载速度条件下对单向拉伸试件屈服强度的影响

### 3.2 加载速度对力学性能的影响

图 5 和图 6 分别展示了不同取向在三种加载速度下的应力 - 应变曲线及屈服强度变化。随着加载速度从 1 mm/min 增至 5 mm/min:

$0^\circ$  取向: 屈服强度持续下降 (218.4  $\rightarrow$  196.9 MPa, 降幅 9.8%), 变形量显著减少 (48.92%  $\rightarrow$  40.31%, 降幅 17.6%)。  $45^\circ$  取向: 屈服强度呈现先降后升的非单调变化 (230.1  $\rightarrow$  227.8  $\rightarrow$  239.1 MPa), 变形量持续降低 (51.85%  $\rightarrow$  43.08%, 降幅 16.9%)。  $90^\circ$  取向: 屈服强度逐步递减 (271.3  $\rightarrow$  253.6 MPa, 降幅 6.5%), 变形量降幅最大 (43.23%  $\rightarrow$  38.15%, 降幅 11.7%)

结果表明, TA1 板材对加载速度表现出显著的敏感性,  $0^\circ$  和  $90^\circ$  取向的应变速率效应尤为明显。

## 4 结语

本文通过系统地开展 TA1 钛合金板材在不同取向和加载速度下的单向拉伸试验研究,深入分析了其各向异性和加载速度对力学性能的影响规律,得出了以下重要结论:

TA1 板材在 1~5 mm/min 加载速度范围内表现出明显的应变速率敏感性,加载速度增加导致变形能力和屈服强度同步下降,其中 0° 方向变形量降幅达 17.6%,屈服强度降幅达 9.8%。

材料呈现显著各向异性: 45° 方向塑性最优(变形量 51.85%)但强度最低(抗拉强度 295.8 MPa); 90° 方向强度最高(屈服强度 271.3 MPa)但塑性最差(变形量 43.23%),体现了取向角度对性能的调控作用。

加载速度与取向角度存在复杂交互作用,前者主导应变硬化行为,后者决定各向异性程度。实际成形工艺应根据零件性能需求,合理选择板材取向并控制成形速度,以实现强度与塑性的最佳平衡。

## 参考文献

- [1] 周廉,赵永庆,王向东.中国钛合金材料及应用发展战略研究[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [2] Peters M, Kumpfert J, Ward C H, et al. Titanium alloys for aerospace applications[J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(6): 419-427.
- [3] 原国森,宛利鹏,韩艳艳.钛合金的应用进展[J].热加工工艺,2017, 46(4):21-24.
- [4] 刘全明,张朝晖,刘世锋,等.钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J].钢铁研究学报,2015,27(3):1-4.
- [5] 李岩,张晓臣,宋美慧,等.钛合金成型方法的研究进展[J].黑龙江科学,2018,9(9):158-159.
- [6] 贾蔚菊.高强钛合金板材的室温成形[J].钛工业进展,2014,31(6): 45-46.
- [7] 方波,程明,陈仲强,等.TA12钛合金板材成形性能试验[J].精密成形工程,2011,3(4):12-16.
- [8] 王忠金,宋辉.钛合金板材室温成形技术研究进展[J].塑性工程学报,2010,17(3):1-8.
- [9] 任家陶,李岗陵.板材不同取向的单向拉伸试验研究[J].岳阳大学学报,1991,22(2):80-83.
- [10] 高铁军,刘青,蔡晋,等.复杂形状TA2钛合金半管件黏性介质压力成形[J].中国有色金属学报,2016,26(4):790-796.

# Analysis of Pain Points and Countermeasures in Training on Rapid Detection Technology of Food Safety Colloidal Gold

Liangyu Chen

Shenzhen Zhuorun Testing Technology Co., Ltd., Guangdong, Shenzhen, 518114, China

## Abstract

Colloidal gold rapid detection technology, with its strong immediacy and relatively simple operation, has seen increasingly widespread application in food safety screening scenarios such as grassroots farmers' markets, food production enterprises, and regulatory sampling. However, the effective promotion and standardized implementation of this technology heavily rely on systematic and professional training programs. Current training initiatives still face significant challenges. To address these issues, this paper analyzes the root causes of these pain points from four dimensions: technical adaptability, resource supply, personnel foundation, and management mechanisms.

## Keywords

colloidal gold rapid detection technology; training pain points; solutions

## 食品安全胶体金快检技术培训痛点与解决对策探析

陈亮宇

深圳市卓润检测技术有限公司, 中国 · 广东 深圳 518114

## 摘 要

胶体金快检技术凭借即时性强、操作相对简便的优势,在基层农贸市场、食品生产企业及监管抽检等食品安全快速筛查场景中应用愈发广泛,而该技术的有效推广与规范落地,高度依赖系统且专业的培训工作。然而当前培训仍存在明显痛点。基于此,本文从技术适配性、资源供给、人员基础、管理机制四个维度分析痛点成因,进而提出优化培训内容设计、强化资源保障、分层提升人员能力、健全管理体系的对策,为提升培训质量、推动技术规范应用提供切实参考,助力强化基层食品安全监管效能,构建高效精准的食品安全检测体系。

## 关键词

胶体金快检技术; 培训痛点; 解决对策

## 1 引言

食品安全风险防控需快速检测技术支撑,胶体金快检技术因操作便捷、检测高效等特点,成为基层筛查的重要手段。该技术的规范应用依赖专业培训,但现有培训常面临技术环节讲解不深入、资源供应不稳定、人员能力参差不齐及管理机制不健全等问题,导致技术应用效果受限。

## 2 胶体金快检技术概述

胶体金快检技术是以胶体金颗粒的光学特性以及免疫层析原理为依托而建立起来的快速检测手段。此项技术把特异性抗体或者抗原标记在胶体金颗粒的表面,凭借免疫反应的特异性来识别目标分析物;接着借助层析作用达成目标物的分离与富集;最后依据胶体金颗粒聚集所产生的颜色变化来完成定性或者半定量检测<sup>[1]</sup>。的操作流程较为简便,不需

要复杂的前处理步骤以及大型仪器设备,操作人员经过基础培训就能完成检测,很大程度降低了对实验条件的依赖。检测周期一般控制在数分钟到半小时之内,可契合现场快速筛查的需求,有效弥补了传统实验室检测在时效性方面的不足。在食品安全领域,该技术主要用于农药残留、兽药残留、生物毒素以及微生物污染等风险因子的初步筛查,可以在生产、流通、监管等环节提供即时检测数据,为食品安全风险预警与控制给予技术支持,是构建多层次食品安全检测体系的关键部分。

## 3 当食品安全胶体金快检技术培训痛点

### 3.1 技术层面

胶体金快检技术的操作规范性要求较高,其核心环节包括试剂准备、样本前处理、加样操作及结果判读等,各步骤间存在紧密的关联性。培训过程中,技术原理与实操操作的衔接不足易导致操作人员对关键控制点把握不清。例如试剂保存需严格控制温度与湿度,若培训中未明确环境因素对

【作者简介】陈亮宇(1998-),男,中国广东深圳人,助理工程师,从事食品安全工程研究。

胶体金颗粒稳定性的影响机制,操作人员可能因忽视保存条件导致试剂活性下降。加样量的精准度直接影响反应体系平衡,而现有培训常侧重流程演示,对微量操作的手法要领讲解不足,易造成检测结果偏差。结果判读依赖肉眼观察胶体金聚集的颜色变化,培训中若缺乏对判读时间窗口与背景干扰因素的系统说明,操作人员易出现误判或漏判,降低检测结果的可靠性<sup>[2]</sup>。

### 3.2 培训资源层面

培训资源的系统性与实用性不足制约培训效果提升。理论教材内容多停留在技术原理的基础阐述,对实际操作中的常见问题及解决方法覆盖不全,导致理论学习与实践需求脱节。实操培训所需的胶体金检测卡、样本处理工具等耗材供应不稳定,学员难以通过反复练习熟悉操作流程。师资队伍存在短板,部分培训讲师缺乏一线检测经验,对技术应用场景的理解局限于理论层面,无法有效指导学员应对复杂检测环境。培训设备更新滞后于技术发展,现有教学用快检装置与实际应用中的新型产品存在差异,学员完成培训后仍需重新适应实际工作中的设备操作。

### 3.3 人员能力层面

参训人员的知识背景与技能基础差异显著,增加培训实施难度。部分基层检测人员缺乏免疫学与分析化学的基础知识,对胶体金标记原理及免疫反应特异性的理解存在障碍,影响对操作逻辑的把握。实操能力不足表现为样本前处理步骤不规范,如离心速度控制不当或样本稀释比例失衡,直接影响目标物的有效提取。学习主动性与持续学习意识薄弱,部分人员将快检技术简单等同于机械操作,忽视对检测原理与质量控制要点的深入学习,导致技术应用中难以应对突发问题。知识转化能力欠缺,培训中掌握的操作方法无法灵活适配不同类型样本或检测项目,限制技术应用的广度与深度。

### 3.4 管理层面

培训管理体系的不完善,直接制约了技术推广工作的实际成效。从标准层面看,当前培训缺乏统一规范,不同地区、不同机构在培训内容设计与考核要求设定上存在显著差异,这一现状导致操作人员的技术水平呈现明显分层,难以形成标准化的技术执行能力。在效果评估环节,现有机制存在单一化问题,多数情况下仅以理论笔试或短期实操考核作为核心评估手段,此类方式难以全面、客观反映学员在实际工作场景中对技术的应用能力与灵活适配能力。此外,长效跟踪指导机制的缺失,使得学员在独立开展检测工作过程中若遭遇技术难题,往往无法获取及时的技术支持与解决方案,进而导致前期培训成果难以得到有效巩固,技术应用效果易出现衰减。

## 4 食品安全胶体金快检技术培训痛点的解决对策

### 4.1 优化培训技术

优化培训技术,要把技术原理和实操应用的深度融合当作核心内容,去构建一个系统性的教学体系。培训一开始就要强化理论基础和操作实践之间的衔接,采用分阶段教学模式:先系统地讲解胶体金标记原理、免疫反应特异性以及层析作用机制;接着结合实操步骤来阐明理论对操作的指导意义。比如,说明试剂保存温度和胶体金颗粒稳定性之间的关联,让操作人员明白环境因素控制对试剂活性有着直接的影响;详细说明加样量和反应体系平衡的关系,借助原理讲解来强化微量操作的精准度意识<sup>[3]</sup>。

对于样本前处理、加样操作、结果判读等核心步骤,要逐个拆解操作要领,并且解释其背后的技术逻辑。样本前处理阶段,要重点讲解离心速度、温度控制对目标物提取效率的影响;加样操作需要强调加样枪的使用手法以及规避液体残留的方法;结果判读则要明确时间窗口的设定依据以及背景干扰因素的识别要点,使得操作人员从技术原理层面去把握各步骤的必要性和规范性。基础训练阶段专注于标准化操作流程,借助反复练习来固化试剂准备、样本加样等基础动作;进阶训练引入复杂场景模拟,像是模拟不同基质样本的前处理差异、试剂失效的应急处理等,以此提高操作人员应对实际检测中突发问题的能力。

### 4.2 强化培训资源建设

强化培训资源建设应以系统性和实用性作为核心目标,构建与胶体金快检技术特点相适配的资源支撑体系。一是优化培训教材与教学资料体系,在保留技术原理基础内容的前提下,着重补充实际操作中的关键控制点以及常见问题的解决方案;借助模块化设计将理论知识和操作流程对应整合,让教材内容可直接对实操环节起到指导作用。要强化教材内容的动态更新机制,依据技术发展以及应用场景的变化及时调整重点章节,保证理论阐述与当前主流快检产品的技术特性保持一致。二是建立稳定的实操耗材供应与管理机制,针对胶体金检测卡、样本处理管、加样工具等核心耗材,应依靠集中采购或者长期合作的方式保障培训期间的充足供应;同时规范耗材的储存和使用流程,防止因耗材质量波动影响培训效果。可以考虑开发模拟训练耗材,在降低成本的同时让学员可进行反复练习,强化操作熟练度。三是师资队伍建设,借助组织讲师参与一线检测工作或者技术研发项目,提高他们对实际应用场景的理解,使他们可在培训中结合真实操作需求讲解技术要点;建立师资定期交流机制,促进不同地区、机构之间的经验共享,提升整体教学水平。四是推动培训设备与技术应用的同步更新,根据当前主流快检产品的技术参数和操作界面,及时升级教学用检测装置,保证学

员在培训中接触的设备与实际工作环境一致；可以引入虚拟仿真技术辅助教学，借助模拟不同操作失误场景帮助学员直观理解错误操作的影响，提高培训的互动性和实效性。依靠上述措施的协同施行，培训资源可更精准地匹配技术应用需求，为提升培训质量提供坚实保障<sup>[4]</sup>。

### 4.3 提升培训人员能力

针对参训人员知识背景存在差异的情况，要设计出分层递进的理论教学内容，系统地补充免疫学基础原理、胶体金标记技术特性以及分析化学基本概念，以此帮助他们建立起技术认知框架，理解操作步骤背后所蕴含的科学逻辑，防止出现机械执行流程的现象。实操训练要聚焦于标准化操作规范，采用分步演示与反复练习相结合的办法，强化样本前处理过程中的离心速度控制、样本稀释比例调节等关键操作；加样环节着重训练微量液体移取时手法的稳定性；结果判读阶段则结合颜色变化原理解释判读标准，培养人员对弱阳性、假阳性结果的辨识能力。要依靠明确技术应用价值来激发学习动机，强调胶体金快检在食品安全风险防控方面的实际作用，引导人员从被动接受培训转变为主动探索技术要点；同时建立学习反馈机制，鼓励人员在训练中提出操作疑问，借助师生互动深化理解。知识转化能力的提升依赖于场景化训练，模拟不同基质样本、不同检测项目的操作场景，指导人员依据样本特性调整前处理方法，根据检测目标优化反应条件，培养其灵活适配实际检测需求的能力，保证培训内容可有效地迁移至工作实践。凭借系统实施上述措施，人员可逐步构建起完整的技术应用能力体系，为胶体金快检技术的规范应用提供人力保障。

### 4.4 完善培训管理体系

首先要构建标准化培训框架，依靠制定统一的培训大纲以及考核规范，清晰地明确理论教学和实操训练的核心模块以及学时分配情况。以此保证不同地区、机构的培训内容可覆盖技术原理、操作流程、质量控制等关键要素，防止因为培训内容存在差异而致使操作人员技术水平出现参差不齐的状况。在培训实施过程当中，要规范师资资质认证以及培训组织流程，明确讲师需要有的专业背景与实践经验，设定实操训练的最低时长以及耗材用量标准，借助流程标准化来保障培训质量的稳定性。其次，培训效果评估要突破传统单一考核模式，构建多维度评估体系。理论考核应当侧重于对技术原理与关键控制点的理解程度，而不是机械记忆；

实操考核需要模拟实际检测场景，设置样本前处理、加样操作、结果判读等完整流程，评估操作人员在规范操作以及问题应对方面的综合能力。评估周期要延伸至培训结束后的实际工作阶段，借助跟踪学员独立开展检测的质量数据，分析操作规范性与结果一致性，将短期考核与长期表现相结合，全面反映培训成效。评估结果要及时反馈至培训设计环节，用于优化课程内容与教学方法。要建立长效跟踪指导机制，需要建立学员技术档案，记录培训过程、考核结果以及后续工作表现，为个性化指导提供依据；定期组织复训与技术交流活动，针对实际应用中出现的共性问题开展专题培训，帮助学员更新知识与技能；搭建线上技术支持平台，由专业团队提供实时答疑服务，解决学员在独立操作中遇到的技术难题，避免因问题积累影响技术应用效果。依靠持续互动与支持，保证培训内容可有效转化为实际操作能力。最后，要强化培训质量控制要求，在培训目标设定中明确质量意识培养的关键性，将检测记录规范性、结果溯源要求、异常结果处理流程等内容纳入必修模块；考核环节要增设质量控制专项评估，检验学员对检测数据可靠性的把控能力，比如记录完整性、结果复核及时性等。培训管理部门要定期开展培训质量巡查，检查培训机构是否严格落实质量控制教学要求，保证学员在培训阶段即养成规范操作与质量优先的工作习惯。

## 5 结语

食品安全胶体金快检技术培训痛点具有多维度特征，需通过系统性对策协同解决。优化培训技术可强化原理与实操融合，强化资源建设能夯实教学基础，提升人员能力是核心目标，完善管理体系为长效保障。上述对策的实施有助于提升培训质量，增强检测人员技术应用能力，推动胶体金快检技术在基层规范落地，为食品安全风险早发现、早防控提供技术支撑，助力构建多层次、高效率的食品安全检测网络。

### 参考文献

- [1] 傅骏青,程玲云,杨振东,等. 玉米粉(渣)中伏马菌素胶体金快检产品评价与应用[J].食品工业,2023,44(10):292-296.
- [2] 叶雅真,骆和东. 商品化腐霉利胶体金快速检测试剂盒的质量评价[J].福建分析测试,2022,31(03):58-62.
- [3] 叶雅真,骆和东. 商品化甲氧苄啶胶体金快检试剂盒检测效果评价与分析[J].食品安全导刊,2022,(07):96-98.
- [4] 叶雅真,骆和东. 克百威快检试剂盒质量评价样品的分析[J].食品安全导刊,2022,(05):92-94.

# Analysis and quality improvement of non-layered flaw detection for medium thick pipeline steel plates

Kong Ya

SD Steel Rizhao Co.,Ltd.,Rizhao, Shandong, 276805, China

## Abstract

Pipeline steel has high requirements for non-destructive testing. In the case of high-sensitivity testing, it is easy for point like defects to occur at 1/4 of the steel plate thickness. It is believed that this defect morphology is caused by Ca-AL-O inclusions with large differences in acoustic impedance of the steel substrate. By optimizing the Ca treatment process during smelting, the significant reduction and spheroidization of Ca-AL-O inclusions have been effectively achieved, which improves product safety.

## Keywords

acoustic impedance; Ca-AL-O inclusions; Ca treatment process; spheroidizing

# 中厚管线钢板非分层探伤不合分析及质量提升

孔雅

山东钢铁集团日照有限公司, 中国·山东 日照 276805

## 摘 要

管线钢探伤要求较高, 高灵敏度探伤情况下, 容易在钢板厚度1/4处出现点状探伤不合, 认为此缺陷形态是由于钢基体声阻抗差别较大的Ca-AL-O系夹杂物引起的, 通过优化冶炼过程中的Ca处理工艺有效实现了Ca-AL-O系夹杂物的大幅减少及球化, 使得产品安全性得到提升。

## 关键词

声阻抗; Ca-AL-O系夹杂物; Ca处理工艺; 球化

## 1 引言

管线钢是只指用于制造输送石油、天然气等管道所用的一类具有特殊要求的钢种, 近年来, 由于油气田开发的重点正在向边远地区转移, 管线钢也多在高寒、地质地貌复杂的地区服役, 对产品的安全性能要求更为严格。随着国内外各大管线重点工程对钢管焊缝区域探伤验收标准不断加严, 如国家管网、中石油、中石化等客户在钢管施工环焊过程采用的探伤设备越来越先进, 目前主流采用 TOFD+ 相控阵超灵敏探伤手段, 对焊缝区域验收标准大幅提高, 倒逼管厂对钢板的探伤验收标准异常严格, 对钢板纵向两边及横向两端内部质量要求大幅提升, 主要体现为钢板此区域在采用高灵敏度  $\phi 6\text{mm}+10\text{dB}$  探伤时不允许存在超过其当量的缺陷波幅, 此标准较为严格, 钢板在探伤扫查过程中很容易出现超标信号, 通过信号显示, 缺陷多为钢板厚度 1/4 处的非分层缺陷, 从而产生质量改判, 增加生产成本。

## 2 探伤不合分析

### 2.1 探伤波形显示情况

钢板采用双晶直探头探伤, 相关设备参数及验收标准如表 1 所示:

表 1 设备参数及验收标准

| 设备型号         | 探头型号        | 校验标准        | 判定灵敏度                         | 验收标准     |
|--------------|-------------|-------------|-------------------------------|----------|
| 友联 PXUT-330N | 5P 20FG 10Z | ISO 10893-9 | $\phi 6\text{mm}+10\text{dB}$ | 单点超当量不合格 |

14.3mm 厚 X70M 钢板探伤扫查过程出现多处超标波幅信号, 起波位置位于距离钢板上表面 3.5mm 深度处 (约为钢板厚度 1/4 处), 为点状缺陷引起的不连续信号<sup>[1]</sup>, 示波屏显示如下图 1 所示:



图 1 缺陷显示

【作者简介】孔雅 (1986-), 女, 硕士, 工程师, 从事中厚板工艺及产品研发研究。

## 2.2 缺陷微观分析

探伤不合位置通过微观形态分析,确定引起探伤不合的主要原因为长条状缺陷,通过其

形貌观察确定其为夹杂物,长度约为 576 $\mu\text{m}$ ,夹杂物的形态很大程度上取决于钢材压缩变形程度,因此,只有在箱似程度变形的试样坯制备的截面上才可能进行测量结果的比较。用于测量夹杂物含量试样的抛光面面积约为

200mm $\times$ 20 mm $\times$ 10 m),并平行于钢材纵轴,位于钢材外表面到中心的中间位置。

此夹杂物长度方向上为大多数没有变形,带角的,形态比小(一般 $< 3$ ),黑色或带蓝色的颗粒,沿轧制方向排成一行,对探伤不合位置经 EDS 光谱分析,夹杂物内部含有较多的 O、Al、Ca 元素,为 B 类夹杂,根据 ASTM E45 标准判定为 2.5 级。

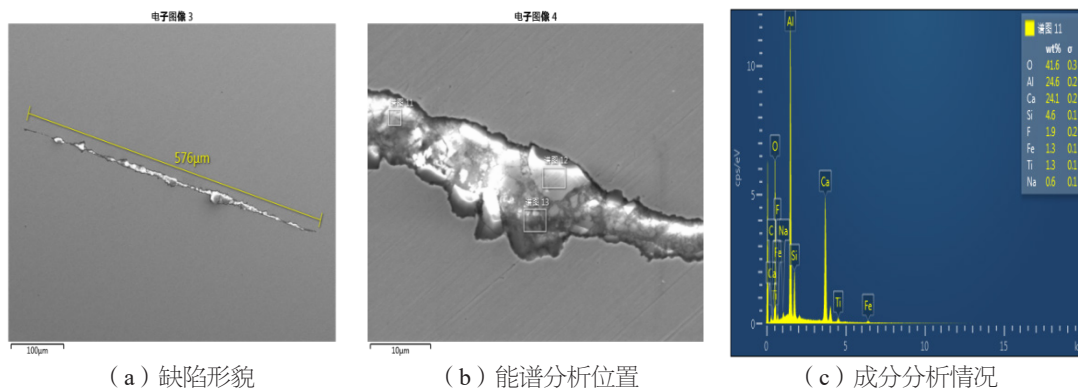


图 2 缺陷 EDS 检测情况

超声检测主要是基于超声波在工件中的传播特性,如声波在通过材料时能量会损失,在遇到声阻抗不同的两种介质分界面时会发生反射等。声源产生的脉冲波进入到工件中 --- 超声波在工作中以一定方向和速度向前传播 -- 遇到两侧声阻抗有差异的界面时部分声波被反射:检测设备接收和显示 -- 分析声波幅度和位置等信息<sup>[2]</sup>,评估缺陷是否存在或存在缺陷的大小、位置等。两侧声阻抗有差异的界面可能是材料中某种缺陷(不连续),如裂纹、气孔、夹等,也可能是工件的外表面。声波反射的程度取决于界面两侧声阻抗差异的大小、入射角以及界面的面积等。通过测量入射声波和接收声波之间声传播的时间,可以得知反射点距入射点的距离。

当入射波达到钢基体和夹杂物界面时,理想状态下界面上声压反射率如下所示:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2-1)$$

$Z_2$ : Ca-AL-O 系夹杂物声阻抗

$Z_1$ : 钢基体声阻抗

可以看出,当声阻抗差别比较大的时,声压反射率越高,反射信号越高,示波屏上反射信号越高,声阻抗公式如 2-2 所示:

$$Z = \rho \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (2-2)$$

$\rho$ : 介质密度

$E$ : 介质杨氏弹性模量

$\sigma$ : 介质泊松比,所有固体的泊松比均在 0-0.5 之间。

Ca-AL-O 系夹杂物属于硬质夹杂物,其密度和弹性模量较钢基体而言差别较大,由公式(2-2)可知,硬质夹杂和钢基体声阻抗差别较大,再由公式(1-1)所示可得,当超声波入射到钢基体和 Ca-AL-O 系夹杂物分界面时,声压反射率较大,示波屏上反射信号较高。值得一提的是,钢板卷管后,特别焊缝区域在高温重熔及快速冷却焊缝区域伴随着内应力的产生,在硬质夹杂物缺陷位置容易形成缝隙或裂纹<sup>[3]</sup>。

## 2.3 夹杂物产生过程

在冶炼和浇注过程中产生或混入与基体无任何联系、独立存在的氧化物、硫化物、氮化物等,经加工或热处理后仍不能消除的非金属相统称为非金属夹杂物,简称为夹杂物。Fe、Mn、Cr、Al、Ti 等虽然属于金属元素,但它们与 O、S、N 等形成化合物后失去金属的性质,因此这些非金属夹杂物的存在破坏了基体连续性,严重地降低钢的力学性能。若钢中的非金属夹杂物呈网状分布时,则显著降低钢的性及冲击韧性;若非金属夹杂物经轧制变形伸长,会引起钢的性能出现明显的各向异性。另外,非金属夹杂物在钢中起着缺口和应力集中的作用,往往是裂纹的优先形成位置。

钢中的夹杂物主要来源是:钢液凝固过程中,O、S、N 与钢液之间的平衡随着温度降低而移动,导致 O、S、N 的各种化合物的平衡常数相应增大,因此形成各种非金属化合物。除个别情况下利用弥散分布的非金属化合物作为形核质点(如 AlN),或者钉扎质点(如 Nb、V、Ti 的碳、氮化物)以阻止晶粒长大之外,钢中非金属夹杂物通常被认为是有害的,需要通过各种措施使其含量尽可能降低。但不管炼钢技术怎样改进,钢中总还会有一定量非金属夹杂物。现代工程

技术的发展对钢材质量的要求日益严格,有时即使钢中杂质元素的含量已经很低,但所形成的夹杂物仍然影响钢的性能。虽然可以采用提高钢的洁净度的办法来尽量降低形成夹杂物的氧、硫等非金属元素含量,但由于工艺上的困难和经济上不可取,不能无限制地降低非金属杂质含量,所以需要了解夹杂物的变化及其与钢性能的关系,从而科学地控制钢中夹杂物的类型、含量、分布、形态等,达到提高钢材质量的目的。

铝脱氧的钢中存在的氧化铝夹杂物多数熔点很高,在连铸温度下呈固态,很容易在中间包水口处聚积引起堵塞。而残留在钢中的 A1203 夹杂物与钢的基体相比呈硬脆性,在轧制过程中很容易破碎并且延轧制方向连续分布,而造成严重的缺陷。向铝脱氧的钢液中喂入硅钙线,就能够改变铝氧化物夹杂的形态。钙是强脱氧剂,且沸点低,进入钢液后很快成为蒸汽,在上浮过程中与钢中氧作用生成钙的氧化物。根据钢液中 Ca 含量的多少,生成  $\text{CaO} \cdot 3\text{A1203}$  (熔点  $1850^\circ\text{C}$ )、 $\text{CaO} \cdot 2\text{A1203}$  (熔点  $1750^\circ\text{C}$ )、 $\text{CaO} \cdot \text{A1203}$  (熔点  $1600^\circ\text{C}$ ) 和  $12\text{CaO} \cdot 7\text{A1203}$  (熔点  $1415^\circ\text{C}$ )。CaO 和 A1203 生成中间相较多,应控制钢中钙含量,避免生成中间相  $\text{CA}_6$ 、 $\text{CA}_2$ 、CA,而生成液相  $12\text{CaO} \cdot 7\text{A1203}$ ,有利于夹杂物上浮, $12\text{CaO} \cdot 7\text{A1203}$  熔点很低 ( $1415^\circ\text{C}$ ),而且密度小,在钢液中集聚上浮排入炉渣,就可以使大量的这类脱氧产物在进入中间包之前从钢液中上浮去除,不仅可以减轻中间包水口堵塞问题,保证连铸顺利进行,改善钢液的浇铸性能,并且可以增加钢的清洁度、改善钢水质量。

探伤不合位置夹杂物为 Ca-Al-O 系夹杂物,冶炼过程中的 Ca 处理工艺尤其关键,RH 破空后实行合适的精准钙处理工艺,Ca 处理的主要目的是生成生成液相  $12\text{CaO} \cdot 7\text{A1z0}$ ,有利于夹杂物上浮和球化。如果 Ca 处理不充分,容易产生高熔点的  $\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  等,此类夹杂物不容易去除且高温下容易聚集长大,对产品质量不利;反之,如果过分 Ca 处理,蒸汽上浮过程中形成的过量 CaO 可能会与炉衬发生化学反应产生 Ca-Mg 系夹杂物,此类夹杂物熔点高且容易长大,对产品质量不利。因此合理的 Ca 处理工艺可有效减少 Ca-Al-O 系夹杂物的产生,提升产品内部质量<sup>[4]</sup>。

### 3 改进措施

对比不同厂家供钙线质量,通过实践对比固定供货厂家并形成稳定的检验机制,提升钙线产品质量,钙线软硬适中,提升喂线效果。

精准控制喂钙线时机,RH 破空后后调节底吹流量至软吹流量(渣面微动不裸露),将钢包车开至喂线位,使用喂丝机喂入纯钙线,确保钙线喂入钢水,不能盘在渣面。

优化 Ca 处理工艺,在确保钙线喂入钢水前提下,喂线

速度控制在  $100\text{--}140\text{m/min}$ ,目标速度按照  $120\text{m/min}$  控制,喂线效果以铸机中包试样检验的钙含量符合  $10\text{--}30\text{ppm}$  控制,根据实际钙的收得率情况可适当调整钙线量。

### 4 实施后效果

措施实施后,效果显著,钢水纯净度水平得到明显提升,且钢中的夹杂物形态及分布发生了明显变化,通过微观分析可以看出,钢板中 Ca-Al-O 系夹杂物尺寸和形态发生了明显变化,如图 3 所示:夹杂物发生了明显的球化,且尺寸较小,均不超过  $30\mu\text{m}$ 。

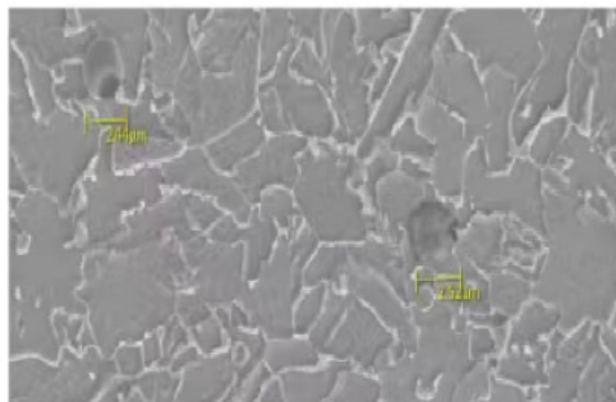


图 3 优化 Ca 处理后钢板中 Ca-Al-O 系夹杂物形态

根据本文 2.1 所示探伤验收标准进行钢板验收,探伤合格率由原来的 92% 提升至 99.5%,

在减少质量改判的同时,提升了客户满意度水平。

### 5 结语

长条状 Ca-AL-O 系夹杂物属于硬质夹杂物,其声阻抗和钢基体声阻抗差别较大,探伤时容易产生较高的缺陷波幅,且在钢板卷管及焊接过程中在此缺陷处容易引起应力集中导致裂纹产生,钢种应尽量避免。

真空结束后调节底吹流量至软吹流量(渣面微动不裸露),破空后喂入纯钙线,喂线速度  $100\text{--}140\text{m/min}$ ,铸机钙含量按照  $10\text{--}30\text{ppm}$  控制,有助于 Ca-AL-O 系夹杂物去除及有效球化,提升产品质量。

通过措施的有效实施,Ca-AL-O 系夹杂物发生了明显的球化,且尺寸较小,均不超过  $30\mu\text{m}$ ,探伤合格率也由原来的 92% 提升至 99.5%。

### 参考文献

- [1] 李强等. 管线钢钙处理工艺优化[J]. 炼钢, 2019 (05)
- [2] 郑辉等. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008: 32-34.
- [3] 孔祥磊, 刘干, 王杨, 等. 基于中薄板坯 X90 管线钢卷板的研发[J]. 轧钢, 2024, 41(06): 30-36+53.
- [4] 杨子江, 李国鹏, 张光磊, 等. X70 级管线钢板型控制技术应用实践[J]. 宽厚板, 2022, 28(06): 23-25+37.