

铜箔化工生产工艺中杂质离子平衡与净化技术研究

杨雨平

广东嘉元科技股份有限公司，广东 梅州 514700

DOI:10.61369/ME.2025120035

摘要：杂质离子平衡与净化技术对铜箔化工生产至关重要。文中先分析杂质离子来源及影响，后阐述通过构建数学模型探究平衡机制，从优化工艺参数、全流程监控等多方面进行杂质控制，介绍常用净化技术及新型复合膜等技术进展，还涉及能耗、质量管理等多体系建设，指出未来发展方向。

关键词：铜箔化工生产；杂质离子平衡；净化技术

Research on Impurity Ion Balance and Purification Technology in Copper Foil Chemical Production Process

Yang Yuping

Guangdong Jiayuan Technology Co., Ltd., Meizhou, Guangdong 514700

Abstract : Impurity ion balance and purification technology are crucial for copper foil chemical production. The article first analyzes the sources and effects of impurity ions, and then elaborates on the exploration of equilibrium mechanisms through the construction of mathematical models. Impurity control is carried out from multiple aspects such as optimizing process parameters and monitoring the entire process. Common purification technologies and new composite membrane technologies are introduced, as well as the construction of multiple systems such as energy consumption and quality management. The future development direction is pointed out.

Keywords : copper foil chemical production; impurity ion balance; purification technology

引言

随着《铜箔行业绿色发展行动计划（2024—2026年）》的颁布，铜箔化工生产工艺的优化升级备受关注。杂质离子对铜箔质量影响显著，其来源广泛，通过改变电性能参数干扰铜箔沉积，降低其物理与电学性能。深入探究杂质离子平衡机制，构建动态平衡数学模型，从工艺参数优化、全流程监控、净化技术选择等多方面着手，结合能源消耗优化、质量管理体系重构等措施，同时借助工艺知识库、数字孪生技术等创新手段，旨在实现杂质离子的有效控制与净化，推动铜箔化工生产高质量发展，契合最新政策对行业绿色、高效发展的要求。

一、铜箔化工生产工艺中的杂质离子平衡机制

(一) 杂质离子来源及影响路径分析

铜箔化工生产工艺中，杂质离子来源主要有电解液组分、设备腐蚀及原料杂质。电解液组分方面，部分添加剂或辅助成分可能在反应过程中引入杂质离子，影响铜箔电沉积过程。设备腐蚀是不可忽视的来源，如在酸性环境下，设备金属部件被腐蚀，释放出相应金属离子进入体系。原料杂质同样关键，如纯度欠佳的铜盐原料含有多种杂质离子。这些杂质离子通过不同路径影响铜箔质量，比如改变电解液电导率、极化程度等电性能参数，干扰铜离子正常沉积速率与方向，进而影响铜箔晶体结构与表面形貌，最终降低铜箔的物理与电学性能^[1]。

(二) 动态平衡数学模型构建

为深入探究铜箔化工生产工艺中杂质离子平衡机制，构建动态平衡数学模型是关键。该模型需建立涵盖电解反应动力学的多参数耦合模型。在模型构建过程中，着重考虑电流密度与温度梯度这两个关键因素^[2]。电流密度的变化直接影响着离子在电极表面的沉积速率，进而改变杂质离子在铜箔结晶层中的残留量。而温度梯度不仅会影响离子的扩散速度，还会对化学反应的速率产生作用，影响杂质离子在体系中的分布。通过数学表达式精准描述这些参数间的相互关系，从而揭示电流密度与温度梯度对铜箔结晶层离子残留的调控机制，为实现杂质离子的动态平衡提供理论支撑，为优化铜箔化工生产工艺奠定基础。

二、生产管理体系中的杂质控制策略

(一) 工艺参数优化控制

在铜箔化工生产工艺杂质控制中，工艺参数优化控制十分关键。一方面开发电解液电导率动态补偿算法，电导率对杂质离子的迁移和反应活性影响显著。通过该算法实时监测和调整电解液电导率，维持其稳定在合适范围，可有效抑制杂质离子的异常反应，减少因电导率波动引入的杂质^[3]。另一方面，提出基于正交试验的 PH 值 – 温度双因子调控方案。PH 值影响杂质离子的存在形态，温度则对杂质离子的溶解度及反应速率有作用。借助正交试验，精确探究 PH 值与温度的最佳组合，确保在不同生产阶段，杂质离子能处于易分离或稳定状态，进而实现对杂质离子的高效净化，提升铜箔产品质量。

(二) 全流程监控体系构建

在铜箔化工生产工艺杂质控制的全流程监控体系构建中，设计的 DCS 控制系统融入在线质谱监测节点至关重要。在线质谱能够实时、精准地对生产过程中的杂质离子进行定性与定量分析，让操作人员及时掌握杂质动态^[4]。同时，建立原料进场 – 过程控制 – 成品检测的三级预警机制。原料进场时，严格检测杂质含量，一旦超出标准即发出预警，避免不合格原料投入生产；过程控制阶段，依据在线质谱监测数据，对杂质异常变化及时预警，以便调整工艺参数；成品检测环节，若杂质离子不符合规定，发出预警，防止不合格产品流入市场。通过这一体系，实现对铜箔化工生产全流程杂质的有效监控与精准把控，保障产品质量。

三、高效净化技术的开发与应用

(一) 现有技术对比分析

1. 电渗析与离子交换技术效能比较

在铜箔化工生产工艺杂质离子净化中，电渗析与离子交换技术是常用手段。从经济性 – 去除率双维度评估矩阵来看，电渗析技术基于离子在电场作用下通过离子交换膜迁移原理工作，能连续运行，适合大处理量，但设备投资与运行成本相对较高^[5]。离子交换技术依靠离子交换树脂与溶液中离子进行交换，对小处理量适应性好，初始投资相对低，然而树脂需定期再生，增加人力与物料成本。在去除率方面，电渗析对一些低价离子去除效果良好，对高价离子去除可能受限；离子交换树脂通过选择合适类型，对多种离子有较高去除率，但随使用会逐渐降低。综合不同处理量下的表现，电渗析在大规模生产有优势，离子交换技术在小规模或对特定离子深度净化场景更适用。

2. 新型复合膜技术的突破性进展

在铜箔化工生产工艺杂质离子净化领域，现有技术多侧重于单一离子去除，对多价离子混合体系的处理效果欠佳，且存在吸附效率低、成本高等问题。新型复合膜技术取得了突破性进展，该技术基于梯度孔径结构设计，展现出卓越的多价离子选择性吸附特性。通过精准调控膜孔径，可对不同价态离子进行高效筛分与吸附，极大提升了净化效率。与传统技术相比，能同时处理多

种杂质离子，减少处理步骤，降低成本。同时，在寿命周期成本方面优势显著，具有良好的稳定性与较长使用寿命，减少了频繁更换吸附材料的费用，为铜箔化工生产杂质离子净化提供了更优解决方案^[6]。

(二) 集成净化系统设计

1. 多级串联处理工艺设计

在铜箔化工生产工艺杂质离子净化过程中，多级串联处理工艺设计是关键环节。该工艺通过多个处理单元依次串联，使得处理溶液逐步流经各单元，实现杂质离子的深度去除。每个处理单元依据特定的分离原理与技术，针对不同类型杂质离子进行针对性处理。例如，可先利用离子交换树脂去除部分阳离子杂质，接着采用膜分离技术进一步截留小分子杂质。通过合理设置各单元的处理参数，如流速、反应时间、温度等，优化处理效果。该工艺设计能有效克服单一处理技术的局限性，实现杂质离子的高效净化。这种多级串联处理工艺与集成净化系统相结合，能大幅提高铜离子回收率，确保达到 95% 以上^[7]，为铜箔化工生产的高效、稳定运行提供有力保障。

2. 能源消耗优化模型

在铜箔化工生产工艺的杂质离子平衡与净化技术研究中，能源消耗优化模型至关重要。开发基于神经网络的反渗透系统能耗预测算法，可有效实现吨水处理成本降低 18%。该模型借助神经网络强大的学习与预测能力，对反渗透系统运行中的各类参数进行深度分析，精准预测能耗变化。通过此算法，能够提前规划和调整系统运行策略，避免能源的浪费，优化能源分配，从而在保障净化效果的同时，最大程度降低能耗，提升生产的经济性。这不仅有助于铜箔化工生产企业降低成本，增强市场竞争力，还为整个行业的可持续发展提供了有效的能源管理方案^[8]。

四、生产与技术管理的协同优化

(一) 质量管理体系重构

1. 过程能力指数 (CPK) 监控标准

在铜箔化工生产工艺质量管理体系重构中，过程能力指数 (CPK) 监控标准尤为关键。基于已制定的涵盖 12 项关键质量特性的过程控制规范以及将 σ 水平提升至 4.8 的目标，需设定精准的 CPK 监控标准。CPK 能够反映过程在满足质量标准方面的实际能力，通过对其实时监控，可及时察觉生产过程中杂质离子平衡与净化技术相关的潜在问题。对于铜箔生产，要依据关键质量特性，结合 σ 水平，明确各生产环节 CPK 的合理取值范围，例如某关键环节 CPK 应保持在 1.33 – 1.67 之间，以确保杂质离子平衡与净化技术有效实施，实现铜箔产品高质量产出^[9]。

2. 异常波动快速响应机制

在铜箔化工生产工艺质量管理体系重构中，异常波动快速响应机制尤为关键。通过建立基于 FMEA（失效模式与效应分析）的故障树分析模型，实现对生产过程中杂质离子平衡与净化技术相关异常波动的精准定位与快速处理。此模型以潜在失效模式为切入点，深入剖析其可能引发的质量事故，并层层梳理导致失效

的各种因素构建故障树。当异常波动出现时，依据故障树分析快速锁定问题根源，进而采取针对性措施，将质量事故处理时效缩短至30分钟内^[10]。该机制显著提升了应对异常状况的效率，确保杂质离子平衡与净化技术在生产中稳定运行，保障铜箔产品质量。

(二) 数据驱动的技术决策系统

1. 工艺知识库构建

在铜箔化工生产工艺杂质离子平衡与净化技术研究中，工艺知识库构建意义重大。通过广泛收集和整理过去20年的生产数据，这些数据涵盖了不同生产阶段杂质离子的种类、含量变化及净化处理结果等详细信息。同时，深入梳理相关学术文献，提取杂质离子平衡理论、净化技术原理等知识要点。将实际生产数据与理论知识相结合，以结构化的方式录入知识库，为技术人员提供全面、准确的参考依据。知识库不仅能帮助技术人员快速查询杂质离子平衡与净化的关键信息，还能基于数据挖掘与分析，揭示生产过程中杂质离子变化的潜在规律，从而为优化工艺参数、改进净化技术提供有力支撑，实现铜箔化工生产工艺的持续提升。

2. 数字孪生技术应用

在铜箔化工生产工艺中，数字孪生技术的应用为杂质离子平衡与净化系统带来创新变革。通过开发三维可视化工厂模型，数字孪生技术能实现净化系统运行状态的实时映射。它以数字化方式创建与物理净化系统相对应的虚拟模型，基于传感器等设备采集净化系统的各类实时数据，如离子浓度、流量、温度等。这些数据被实时传输至虚拟模型，从而动态反映净化系统的实际运行状况。操作人员借助该三维可视化模型，可直观、精准地洞察净化系统各环节的运行细节，及时发现潜在问题，如杂质离子分布异常、设备运行偏差等，以便迅速采取针对性措施，优化净化工艺，维持杂质离子平衡，确保铜箔化工生产的高质量与稳定性。

(三) 持续改进管理机制

1. 技术创新评价体系

在铜箔化工生产工艺杂质离子平衡与净化技术研究中，技术创新评价体系构建至关重要。建立包含技术成熟度与经济效益的六维评估模型，能全面衡量技术创新成果。技术成熟度维度，评估杂质离子平衡与净化技术在实际生产中的可操作性、稳定性，

考量是否能有效应用于铜箔生产流程；经济效益维度，分析新技术投入成本与产出效益，包括原材料节省、产品质量提升带来的收益增长。通过六维评估模型，综合考量其他诸如环境友好性、市场适应性等维度，能更科学、全面地判断技术创新对铜箔生产杂质离子平衡与净化的实际价值，为持续改进管理机制提供有力支撑，推动生产与技术管理协同优化，助力铜箔化工生产工艺不断发展进步。

2. 技术人员能力矩阵

在铜箔化工生产工艺杂质离子平衡与净化技术研究中，技术人员能力矩阵的构建至关重要。对于从事该领域的技术人员，需具备工艺优化能力，深入理解杂质离子平衡原理，能依据生产实际调整工艺参数，实现杂质有效净化。在设备管理方面，要熟知各类净化设备的运行原理与性能，可准确操作、维护与检修，确保设备稳定运行以保障净化效果。数据分析能力也不可或缺，能够收集、整理生产过程中的杂质数据，通过数据分析洞察杂质变化规律，为工艺改进提供依据。通过打造这样的能力矩阵，使技术人员在工艺优化、设备管理和数据分析等多维度协同发力，有力推动铜箔化工生产工艺中杂质离子平衡与净化技术的发展与应用。

五、总结

杂质离子平衡与净化技术在铜箔化工生产工艺中至关重要。杂质平衡控制和净化技术创新，能有效提升铜箔品质，这为优化生产工艺提供了明确方向。而生产技术管理体系的建设，是保障工艺稳定性的坚实基础，有助于维持杂质离子平衡，使净化技术稳定发挥作用。此外，智能化方向对传统工艺的改造潜力巨大，可利用智能手段精准监测和调控杂质离子，实现更高效的净化。未来，需深入研究杂质离子平衡与净化技术，进一步完善生产技术管理体系，并积极推进智能化在铜箔化工生产工艺中的应用，以推动铜箔生产行业高质量发展，满足市场对高品质铜箔不断增长的需求。

参考文献

- [1] 田甜. 铜箔飞秒激光冲击强化工艺研究 [D]. 北京工业大学, 2021.
- [2] 王红红. 离子液体水溶液中金属离子杂质高效分离的研究 [D]. 郑州大学, 2023.
- [3] 彭程. 超冷原子气体中的杂质物理与非平衡热化研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [4] 唐明珠. 磷石膏杂质组分赋存及净化研究 [D]. 河北工业大学, 2021.
- [5] 王宁. 基于离子液体的合成气净化工艺模拟与优化 [D]. 青岛科技大学, 2022.
- [6] 周兴, 张松柏. 银电解中杂质物质净化技术研究进展 [J]. 中国金属通报, 2021(18): 20–21.
- [7] 高宏宏. 液化天然气装置净化与液化工艺关键技术研究 [J]. 化工管理, 2022(28): 152–154.
- [8] 高宏宏. LNG 装置净化与液化工艺关键技术研究 [J]. 石油化工建设, 2022, 44(10): 98–100.
- [9] 朱桂华, 何宾宾, 杨文娟, 等. 磷石膏净化技术研究进展 [J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(4): 25–30.
- [10] 林恒宗, 高加龙, 范秀萍, 等. 双壳贝类净化技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 449–457.