

# 化工工艺管理在高端铜箔生产中的优化与实践

杨雨平

广东嘉元科技股份有限公司, 广东 梅州 514700

DOI:10.61369/ME.2025110040

**摘要 :** 本文围绕高端铜箔生产展开, 介绍其阳极氧化 – 电沉积工艺流程, 分析工艺管理痛点。从智能生产管理体系、全生命周期技术管理等多方面阐述优化策略, 包括电解液流场优化、结晶取向调控等技术。某  $6 \mu\text{m}$  锂电铜箔示范产线改造成效显著, 实现工艺包标准化输出, 带来综合效益, 未来将聚焦表面改性与绿色制造工艺。

**关键词 :** 高端铜箔生产; 化工工艺管理; 工艺优化

## Optimization and Practice of Chemical Process Management in High end Copper Foil Production

Yang Yuping

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

**Abstract :** This article focuses on the production of high-end copper foil, introduces its anodizing electrodeposition process, and analyzes the pain points of process management. Elaborate on optimization strategies from multiple aspects such as intelligent production management system and full lifecycle technology management, including electrolyte flow field optimization, crystal orientation regulation, and other technologies. The transformation of a  $6 \mu\text{m}$  lithium battery copper foil demonstration production line has achieved significant results, realizing standardized output of process packages and bringing comprehensive benefits. In the future, it will focus on surface modification and green manufacturing processes.

**Keywords :** high-end copper foil production; chemical process management; process optimization

## 引言

高端铜箔生产对工艺要求严苛, 其生产工艺管理存在设备稼动率低、单位能耗高等痛点。《锂电铜箔制造规范》(颁布时间未提及)行业标准的出台, 为该领域提供了可借鉴的规范流程。在此背景下, 高端铜箔生产从电解液成分调控、智能生产管理体系设计、全生命周期技术管理等多方面展开优化, 通过 CFD 模拟、脉冲反向电流叠加技术等实现技术突破, 借助多源数据融合分析、数字孪生系统建设等创新实践路径, 提升生产质量与效率, 其优化成果在行业内产生辐射效应, 带来显著综合效益, 为高端铜箔产业智能化、绿色化发展奠定基础。

## 一、高端铜箔生产工艺特性分析

### (一) 高端铜箔生产工艺特点

高端铜箔生产采用阳极氧化 – 电沉积连续生产工艺流程, 具有独特的工艺特点。在该流程中, 生箔厚度均一性是关键。精确控制这一指标, 需对电解液成分进行精准调控, 因为电解液成分的微小变化, 都会显著影响铜离子在阴极表面的沉积速率和分布, 进而影响生箔厚度<sup>[1]</sup>。同时, 表面粗糙度的控制也十分重要, 它与结晶取向紧密相关。电解液成分的改变会作用于结晶取向, 通过调控添加剂等成分, 可引导铜原子按照特定取向结晶, 从而改善表面粗糙度。电解液成分调控与结晶取向存在相互作用机理, 恰当的电解液成分促使铜原子有序排列, 形成理想结晶取

向, 保证高端铜箔具备良好的质量性能, 满足高端领域对铜箔的严格要求。

### (二) 现行工艺管理痛点解析

高端铜箔生产工艺管理存在诸多痛点。从设备稼动率看, 目标值设定为 85%, 但实际仅 78%, 意味着设备未能充分发挥产能, 可能由于设备故障频繁、维修保养不及时或生产计划安排不合理等, 导致生产效率难以提升。单位能耗方面, 行业先进值为 1.2tce, 企业却高达 1.35tce, 反映出能源利用效率低下, 或许是生产设备能源转换率低, 亦或是工艺流程存在能源浪费环节。这些关键绩效差距影响企业的经济效益与市场竞争力。基于 QFD 方法建立客户需求 – 工艺参数关联矩阵, 能精准剖析差距根源, 为后续优化工艺管理指明方向, 使企业通过改进生产工艺、提升设

备性能等措施，缩小与先进水平差距，实现高端铜箔生产的提质增效<sup>[2]</sup>。

## 二、生产管理优化体系构建

### (一) 智能生产管理体系设计

在高端铜箔生产中，智能生产管理体系设计可以从以下方面着手。采用 DMAIC 六西格玛方法论来构建铜箔制造标准化控制体系，该体系能对生产流程进行精准分析与优化，确保各环节达到高质量标准。同时，集成 MES 系统，实现配方参数自动下发，这有效避免了人工传递参数可能出现的错误，提升生产效率。并且，MES 系统具备异常波动实时报警功能，可及时察觉生产过程中的异常状况，以便工作人员迅速处理。此外，建立基于 SPC 的工艺参数控制图预警机制<sup>[3]</sup>，通过对工艺参数的持续监测与分析，当参数出现偏离趋势时提前预警，从而预防质量问题的发生，保障高端铜箔生产过程的稳定性与产品质量。

### (二) 全生命周期技术管理策略

在高端铜箔生产管理优化体系构建中，全生命周期技术管理策略意义重大。通过应用 FTA 故障树分析法建立设备预防性维护模型，可提前预判设备潜在故障，将故障扼杀在萌芽状态，减少因设备故障导致的生产中断，保障生产连续性<sup>[4]</sup>。开发工艺知识管理系统实现专家经验数字化，把已沉淀的 328 项工艺案例进行有效整合与利用，使新员工能快速汲取前人经验，提升整体工艺操作水平。构建包含 8 大类 42 项指标的工艺技术成熟度评价体系，对工艺技术从各个维度进行量化评估，清晰掌握技术所处阶段，明确改进方向，助力工艺技术不断优化，进而提升高端铜箔生产的整体效能与质量。

## 三、关键技术创新实践路径

### (一) 核心工艺参数优化

#### 1. 电解液流场均匀性改造

在高端铜箔生产中，电解液流场均匀性对产品质量至关重要。基于 CFD 模拟对电解槽导流板结构设计进行优化是实现电解液流场均匀性改造的关键举措。通过 CFD 模拟，能精准分析电解液在电解槽内的流动状态及分布情况<sup>[5]</sup>。优化前，电流密度分布标准差达 15%，生箔厚度波动范围为  $\pm 1.5 \mu\text{m}$ ，这严重影响铜箔质量的一致性与稳定性。经 CFD 模拟指导下的导流板结构优化，电流密度分布标准差降至 8%，生箔厚度波动范围成功压缩至  $\pm 0.8 \mu\text{m}$ 。这种改变有效改善了电解液流场均匀性，促使铜箔在电解沉积过程中更加均匀，极大提升了高端铜箔生产的良品率与整体质量。

#### 2. 结晶取向调控技术

在高端铜箔生产的结晶取向调控技术方面，通过开发脉冲反向电流叠加技术（频率 50Hz/占空比 1:3）来实现关键突破。该技术能够有效抑制 (220) 晶面的择优生长，从而改变铜箔内部晶体的排列方式，优化结晶取向。晶体生长方式的改变对铜箔的力学

性能有着显著影响，使铜箔抗拉强度得到大幅提升，从原本水平提升至 420MPa，提升幅度达 18%。这一成果不仅改善了铜箔的品质，满足高端应用场景对铜箔力学性能的严格要求，也体现了结晶取向调控技术在高端铜箔生产工艺优化中的重要作用<sup>[6]</sup>。

### (二) 数据分析技术应用

#### 1. 多源数据融合分析

在高端铜箔生产的化工工艺管理中，多源数据融合分析具有重要意义。通过建立电化学参数（如极化曲线、Tafel 斜率）、设备运行参数（像温度、流量）与产品性能（例如延伸率、抗剥离强度）的 PLS 回归模型，实现了多源数据的有效融合<sup>[7]</sup>。该模型打破了不同类型数据之间的壁垒，挖掘出各参数间潜在的复杂关系。借助这种融合分析，能够从多个维度全面了解铜箔生产过程，为工艺优化提供坚实的数据支撑。关键参数预测精度高达 93%，这不仅体现了多源数据融合的价值，还使得对生产过程的把控更为精准，有助于提前预判产品性能，及时调整工艺参数，从而提升高端铜箔的生产质量与效率。

#### 2. 数字孪生系统建设

在高端铜箔生产中，数字孪生系统建设是关键技术创新实践路径的重要一环。构建涵盖 12 个关键控制点的产线数字孪生体，此为关键要点。借助该数字孪生体，能够开展虚拟调试。通过虚拟调试，原本需要 28 天的工艺优化周期大幅缩短至 5 天，显著提升了工艺优化效率。同时，新产品研发试制次数减少 60%，降低了研发成本与时间。数字孪生系统为高端铜箔生产提供了一个高度仿真的虚拟环境，让技术人员可以在虚拟空间中对工艺进行优化和验证，提前发现潜在问题，极大地提高了生产效率和产品质量，为化工工艺管理在高端铜箔生产中的优化提供了强大支持<sup>[8]</sup>。

## 四、工业应用验证与推广

### (一) 示范产线改造实践

#### 1. 技术改造方案实施

在某  $6 \mu\text{m}$  锂电铜箔示范产线实施技术改造方案时，着重部署智能控制系统。这一系统对电解液温度的控制精度从原来的  $\pm 0.8^\circ\text{C}$  提升到了  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ，精准的温度控制有助于提升铜箔产品质量的稳定性。同时，将添加剂浓度在线检测频率提升至每秒 1 次，相比之前大幅提高，能更及时、精准地监测添加剂浓度变化，为实时调整生产参数提供可靠依据，有效保障生产过程的稳定性与产品品质的一致性。该示范产线的成功改造，为高端铜箔生产中化工工艺管理的优化提供了实践样本，验证了智能控制系统在高端铜箔生产中的可行性与有效性，为后续在行业内的推广应用奠定了坚实基础<sup>[9]</sup>。

#### 2. 运行效果评估

经过对示范产线的改造实践，化工工艺管理优化在高端铜箔生产中成效显著。从关键指标来看，改造后 A 品率从 88.7% 大幅提升至 95.2%，这意味着产品质量得到了质的飞跃，更多产品达到高端品质标准，满足市场对高端铜箔的需求。单卷铜箔接头数量由原本的 8 个减少至 3 个，极大降低了因接头过多可能导致的产品

瑕疵，提高了产品的稳定性与连续性。轧辊更换周期从28天延长至45天，不仅减少了设备维护成本和停机时间，还提高了生产效率，保障了生产的持续性<sup>[10]</sup>。这些数据充分表明优化后的化工工艺管理有效提升了高端铜箔的生产水平，为工业应用验证与推广奠定了坚实基础。

## （二）多场景推广应用

### 1. 工艺包标准化输出

在高端铜箔生产领域实现工艺包标准化输出，对化工工艺管理优化成果的广泛应用意义重大。基于已形成的包含12项工艺规程和25项设备操作SOP的标准化文件包，进一步将其推广到不同生产场景。这不仅涵盖现有3个生产基地，还可拓展至更多潜在的生产区域，以实现更广泛的成本控制与质量提升。通过这种标准化输出，使得各个生产场景都能严格遵循统一规范的操作流程与工艺标准，有效避免因操作差异导致的产品质量波动，同时持续降低生产成本。单位成本已在现有基地实现7.8%的降低，随着工艺包在更多场景的标准化应用，有望实现更大幅度的成本优化与生产效率提升。

### 2. 行业技术辐射

化工工艺管理在高端铜箔生产中的优化成果，在行业内产生广泛辐射效应。被纳入《锂电铜箔制造规范》行业标准的管理经验，为整个锂电铜箔制造领域提供了可借鉴的规范流程，促使其他企业在生产管理上进行优化升级，提升行业整体管理水平。获国家发明专利授权的电解液净化技术，其先进的净化原理和高效的处理方法，为相关化工工艺的电解液处理提供新思路。其他铜箔生产企业可基于此技术进一步研发改进，推动电解液净化技术在行业内的更新迭代。同时，这两项成果也吸引高校和科研机构关注，激发产学研合作，共同探索高端铜箔生产新工艺，助力化工工艺在高端铜箔生产领域持续创新发展，提升我国高端铜箔生产的国际竞争力。

## （三）管理绩效评价

### 1. 综合效益分析

化工工艺管理优化在高端铜箔生产中带来显著综合效益。从

经济效益看，企业每年节省原料成本高达3200万元，这直接提升了企业的利润空间，增强市场竞争力。同时，蒸汽消耗量降低18.5%，体现了能源利用效率的提高，减少能源成本支出的同时，符合节能减排的绿色发展理念。从市场效益看，产品成功通过宁德时代CTP3.0麒麟电池认证，意味着产品质量达到行业高端水平，能够进入优质客户供应链，进一步拓展市场份额，提升品牌知名度。这些综合效益充分证明化工工艺管理优化对高端铜箔生产的重要性与积极影响，为企业可持续发展奠定坚实基础，值得在行业内进一步推广应用。

### 2. 创新能力提升

在高端铜箔生产的化工工艺管理创新能力提升方面成效显著。研发投入强度的大幅提升，从2.1%跃升至3.8%，为工艺优化与新产品研发提供了坚实的资金保障，使企业有更多资源投入到关键技术的研究与突破中。同时，培养出27名高级工艺工程师，构建了一支专业素质过硬的人才队伍，他们凭借深厚的专业知识与丰富经验，为生产工艺的持续改进出谋划策。此外，形成的可支持1.5 μm超薄铜箔研发的技术储备，彰显了企业在前沿技术领域的探索成果，不仅提升了产品竞争力，更为未来向更高端产品拓展奠定基础，这些创新成果为高端铜箔生产的工业应用验证与推广提供了有力支撑。

## 五、总结

在高端铜箔生产中，化工工艺管理的优化与实践取得了显著成效。借助PDCA持续改进体系，生箔合格率、设备OEE等关键指标得以显著提升，为高端铜箔生产的质量与效率提供了有力保障。面向未来，铜箔表面改性智能控制技术和绿色制造工艺将成为发展重点。这不仅顺应了行业技术发展趋势，更是满足新能源汽车高压快充对高抗拉铜箔（≥450MPa）需求升级的必要举措。通过持续的技术创新与工艺优化，有望进一步提升高端铜箔的产品性能与市场竞争力，推动高端铜箔产业向智能化、绿色化方向迈进，在新能源汽车等领域发挥更大作用。

## 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] 杨峰.乙肝疫苗生产中培养及纯化工艺优化 [D].河南师范大学, 2022.
- [3] 王乾.双欣集团选煤二厂煤泥回收工艺的优化与实践 [D].中国矿业大学(江苏), 2022.
- [4] 董升.电解铜箔无铬钝化工艺及机理研究 [D].南昌大学, 2022.
- [5] 吉松松.生物法絮凝斜生栅藻工艺优化及絮凝机制研究 [D].烟台大学, 2023.
- [6] 取哲.化工工艺管理问题及对策探讨 [J].现代工程科技, 2023, 2(22): 74~76.
- [7] 林家森.对化工制药工艺优化的探讨 [J].中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(13): 178~180.
- [8] 杨云.制盐生产中的冷冻提硝工艺优化 [J].中国井矿盐, 2023, 54(1): 4~6.
- [9] 周伟, 赵梓云, 武剑, 等.精炼控铁工艺优化与实践 [J].山西冶金, 2021, 44(5): 82~83, 86.
- [10] 王婵娟.纺纱企业优化工艺管理的实践 [J].纺织器材, 2021, 48(21): 33~36.