

# 新能源锂电池正极材料生产线设计： 低温蒸发技术与设备腐蚀防护

周海荣

四川富临新能源科技有限公司，四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2025080014

**摘要：** 新能源产业快速发展推动锂电池正极材料生产需求激增，但传统高温蒸发工艺因设备腐蚀严重制约产能提升。本文提出基于低温蒸发技术的协同防护策略：通过真空环境降低溶液沸点（60~80℃），结合耐腐蚀合金（哈氏合金 C-276 腐蚀速率 < 0.015mm/a）与陶瓷涂层（抗氯离子渗透率 < 0.1 μg/cm<sup>2</sup>·h）的应用，减少金属材料氧化速率与应力腐蚀风险；优化蒸发器流道设计（湍动能降低至 0.15m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>）及双层密封系统（泄漏率 < 1 × 10<sup>-6</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s），抑制外部环境腐蚀渗透。工程案例表明，技术改造后设备年维修频率下降 40%，单位能耗降低 35%，符合《工业能效提升行动计划（2024-2026 年）》低碳转型目标，为锂电池正极材料绿色制造提供理论支撑。

**关键词：** 锂电池正极材料；低温蒸发技术；设备腐蚀防护

## Design of Cathode Material Production Line for New Energy Lithium Battery: Low Temperature Evaporation Technology and Equipment Corrosion Protection

Zhou Hairong

Sichuan Fulin New Energy Technology Co., LTD., Chengdu, Sichuan 610000

**Abstract：** The rapid development of the new energy industry has led to a surge in demand for lithium battery cathode materials. However, traditional high-temperature evaporation processes are severely limited by equipment corrosion, which hinders capacity expansion. This paper proposes a collaborative protection strategy based on low-temperature evaporation technology: by lowering the solution boiling point (60~80℃) in a vacuum environment, combined with the use of corrosion-resistant alloys (Hastelloy C-276 corrosion rate < 0.015 mm/a) and ceramic coatings (chloride ion permeability < 0.1 μg/cm<sup>2</sup> h), to reduce the oxidation rate and stress corrosion risk of metal materials; optimizing the design of evaporator flow channels (turbulent kinetic energy reduced to 0.15 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) and a double-sealed system (leakage rate < 1 × 10<sup>-6</sup> Pa m<sup>3</sup>/s) to inhibit external environmental corrosion penetration. Engineering cases show that after technical upgrades, the annual maintenance frequency of equipment decreased by 40%, and unit energy consumption reduced by 35%, meeting the low-carbon transition goals of the "Industrial Energy Efficiency Improvement Action Plan (2024-2026)." This provides theoretical support for green manufacturing of lithium battery cathode materials.

**Keywords：** lithium battery cathode material; low temperature evaporation technology; equipment corrosion protection

### 引言

新能源产业的迅猛发展推动锂电池正极材料需求激增，其生产工艺的高效性与设备耐久性成为行业核心挑战。近年来，中国出台《关于推动能源电子产业发展的指导意见》（2024 年）、《有色金属行业稳增长工作方案》（2024 年）等政策，明确将锂电池正极材料列为战略性新兴产业，强调技术创新与绿色生产。然而，传统蒸发工艺依赖高温高压蒸汽，加剧金属设备的化学侵蚀与应力腐蚀，导致设备寿命缩短、维护成本攀升及产品污染风险，严重制约产能提升与可持续发展。低温蒸发技术通过真空环境降低溶液沸点，减少蒸汽温度与压力，可显著减缓材料氧化速率，兼具能耗降低与腐蚀抑制的双重优势，为生产线优化提供新路径。尽管该技术在能耗控制方面已有探索，但针对其与设备腐蚀防护的系统性协同设计研究仍显不足，尤其在耐腐蚀材料适配性、结构优化与经济性平衡等领域缺乏深入验证。本文聚焦低温蒸发技术机理，结合材料选择、表面处理及结构设计策略，通过实验与工程案例量化分析其防腐效果与技术经济性，以期为锂电池正极材料绿色制造提供理论支撑与实践参考。

## 一、锂电池正极材料生产线现状与腐蚀问题分析

### (一) 正极材料生产工艺流程概述

锂电池正极材料生产以三元 (NCM/NCA) 或磷酸铁锂 (LFP) 体系为主, 核心工艺包括前驱体共沉淀合成 (pH=10~12、温度50~70°C)、高温烧结 (600~900°C) 及气流粉碎 (粒径  $D_{50} \leq 5 \mu\text{m}$ )<sup>[1]</sup>。其中, 蒸发浓缩环节通过多效蒸发器去除前驱体浆料中的氨水、硫酸根等溶剂, 蒸汽消耗量占生产线总能耗的25%~35%, 且需依赖耐高温高压的镍基合金蒸发罐 (工作压力0.3~0.6MPa)<sup>[2]</sup>。该环节设备运行稳定性直接影响浆料固含量 (需提升至40%~60%) 与产品一致性, 但传统工艺中蒸发器结垢率高达15%~20%, 频繁清洗进一步加剧设备损耗。以年产5万吨生产线为例, 蒸发系统年蒸汽用量超过3万吨, 设备故障导致的非计划停机时间占总生产时间的8%~12%, 成为制约产能释放的关键瓶颈。

### (二) 设备腐蚀的主要成因与影响

高温高压蒸汽 (150°C以上、0.4MPa) 引发的腐蚀主要表现为氯离子应力腐蚀开裂 (SCC) 与酸性冷凝液 (pH=2~4) 导致的点蚀<sup>[3]</sup>。以316L不锈钢蒸发器为例, 氯离子浓度 > 50ppm 时, 年腐蚀速率可达0.3~0.5mm, 焊缝区域因残余应力集中, 裂纹扩展速率提升3~5倍。腐蚀导致设备壁厚减薄至设计值的70%时需强制报废, 典型蒸发器寿命从设计5年缩短至2~3年, 年维护成本增加15%~20%。更严重的是, 腐蚀产物 (如  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ ) 混入正极浆料会引发电池循环容量衰减 (> 5%), 自放电率升高至1.5mV/h 以上。某企业检测显示, 因腐蚀污染导致的批次不合格率高达3.2%, 远超《锂离子电池行业规范条件》中杂质含量  $\leq 10\text{ppm}$  的要求, 直接经济损失年均超800万元<sup>[4]</sup>。

## 二、低温蒸发技术的基本原理与优势

### (一) 低温蒸发技术机理

低温蒸发技术是一种基于溶液沸点随压力变化原理的新型分离工艺, 其核心在于利用真空环境显著降低溶剂的汽化温度。通过精确调控系统压力至10~30kPa 范围, 该技术可将水溶液的沸点稳定控制在60~80°C区间, 相比传统蒸发工艺对150°C以上高温蒸汽的依赖, 实现了显著的能耗突破<sup>[5]</sup>。低温蒸发技术基于 Clausius-Clapeyron 方程揭示的压力-沸点关系, 通过真空环境 (10~30kPa) 使水溶液在60~80°C蒸发, 较传统工艺节能60%。压力每降10kPa, 沸点下降约15°C, 结合多级蒸汽压缩系统, 可将二次蒸汽潜热利用率提升40%以上, 实现能量梯级利用。该技术适用于化工、制药及高盐废水处理, 尤其保护热敏性物质免于热分解。模块化设计集成智能压力调控与余热回收装置, 降低设备腐蚀风险, 寿命超10年。其减排40%的优势契合工业绿色转型需求, 已入选国家节能技术推广目录。

### (二) 低温蒸发在正极材料生产中的应用优势

低温蒸发技术将操作温度控制在80°C以下, 较传统高温工艺 (>150°C) 降低蒸汽能耗30%~50%。其核心在于减少相变潜

热需求, 并通过多级蒸汽热泵使余热利用率达85%以上。材料学研究表明, 80°C工况下不锈钢蒸发器氧化速率降低60%~80%, 晶间腐蚀电流密度  $< 0.15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , 有效抑制应力腐蚀。低温蒸发技术在某年产2万吨的三元前驱体生产线中实现显著效益: 蒸发器年腐蚀深度由1.2mm 降至0.3mm, 设备维护周期从8个月延长至24个月, 单线年节省检修成本超300万元。通过蒸汽用量减少42%、余热回收系统应用, 综合能耗降至1.1tce/t 产品, 碳减排率达38%。该技术使设备寿命突破5年, 同步解决热敏性物质分解难题, 为新能源材料制造提供了高效节能的蒸发解决方案, 兼具延长设备周期与降低生产成本的双重优势<sup>[6]</sup>。

## 三、基于低温蒸发的设备腐蚀防护策略

### (一) 材料选择与表面处理技术

耐腐蚀合金如哈氏合金 C-276, 钼含量15%~17%, 在氯离子浓度高达10000ppm 的酸性环境中年腐蚀速率低于0.03mm, 优于316L 不锈钢。钛合金 Ti-6Al-4V 通过表面  $\text{TiO}_2$  钝化膜抵御 pH 1~12 化学侵蚀, 适用于含硫酸盐溶液。聚四氟乙烯 (PTFE) 涂层厚度50~100  $\mu\text{m}$ , 接触角  $> 110^\circ$ , 有效阻隔腐蚀但需避免超过260°C热降解。等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  涂层显微硬度1200HV, 孔隙率 < 2%, 磨损率低。微弧氧化技术可在钛合金表面生成20~50  $\mu\text{m}$  陶瓷氧化层, 击穿电压 > 300V, 适合高压绝缘防护<sup>[7]</sup>。

### (二) 设备结构设计优化

蒸发器流道设计需通过计算流体力学 (CFD) 模拟优化, 采用渐缩渐扩流道与螺旋导流片组合结构, 将流体雷诺数控制在5000~8000区间, 湍动能降低至0.15m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> 以下, 避免空泡腐蚀引发的局部材料损失。双相不锈钢焊接接头处采用倒角过渡设计 (R角  $\geq 3\text{mm}$ ), 使应力集中系数从2.8降至1.5, 显著抑制应力腐蚀开裂 (SCC) 倾向。密封系统采用双层波纹管与金属缠绕垫片复合结构, 在-90kPa 真空环境下泄漏率  $< 1 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ , 并通过纳米气凝胶隔热层 (导热系数0.018W/m·K) 将设备外壁温度维持在40°C以下, 防止外部湿热环境 (RH > 90%) 引发的电化学腐蚀。冷凝水收集装置增设 pH 在线监测模块与自动排酸阀, 当检测到 pH < 4时启动碱性中和剂投加系统, 确保冷凝液电导率稳定在50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以内, 从源头阻断酸性腐蚀链式反应。

## 四、实验验证与工程案例析

### (一) 实验室模拟测试

为验证低温蒸发环境下材料与涂层的耐腐蚀性能, 采用电化学工作站与动态真空腐蚀试验箱模拟实际工况 (温度80°C、真空度-90kPa、pH=3.5酸性环境)。实验表明, 哈氏合金 C-276 的年均腐蚀速率仅为0.012mm, 较传统316L 不锈钢 (0.21mm/a) 降低94%, 钛合金 Ti-6Al-4V 因钝化膜稳定性表现出零失重特性。聚四氟乙烯 (PTFE) 涂层经500次热循环 (-20°C~120°C) 后附着力仍达 ASTM D3359标准4B 等级, 陶瓷涂层 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -

ZrO<sub>2</sub>) 在模拟冷凝液浸泡240h后氯离子渗透量低于0.1 μg/cm<sup>2</sup>·h, 较未涂层基体金属降低99%。X射线光电子能谱(XPS)分析显示, 涂层表面形成致密氧化层(厚度约50nm), 显著抑制腐蚀介质扩散, 验证了材料-涂层协同防护机制的有效性。

### (二) 工业生产线应用案例

某年产2万吨高镍三元前驱体生产线实施低温蒸发技术改造后, 蒸汽温度由150℃降至80℃, 系统压力由0.4MPa调整至-85kPa<sup>[6]</sup>。运行数据显示, 蒸发段蒸汽消耗量从2.3t/h降至1.5t/h, 年节能折合标煤4200吨, 单位产品能耗成本下降22%。设备年非计划停机次数从14次减少至5次, 维修频率降低40%, 年维护成本节约超360万元。通过电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)检测, 正极材料中铁、铬等金属杂质含量稳定在5ppm以下, 优于《锂离子电池行业规范条件》中10ppm的限值要求<sup>[9]</sup>。改造后生产线连续运行18个月后, 蒸发器壁厚仅减少0.25mm(原工艺同期减少1.1mm), 设备综合效率(OEE)提升至92%, 验证了低温蒸发技术对生产可靠性与产品质量的双重提升作用。

### (三) 技术经济性分析

低温蒸发技术的初期投资主要集中在耐腐蚀合金材料(约占总设备成本的25%~30%)、真空系统升级(15%~20%)及涂层工艺引入(10%~12%), 但改造后生产线运维成本显著降低。以年产5万吨磷酸铁锂生产线为例, 设备寿命从3年延长至6年, 年均折旧成本下降40%, 结合蒸汽能耗减少35%及维修频次降低带来的直接成本节约(约280万元/年), 项目投资回收期可缩短至2.8

年。环境效益方面, 低温蒸发工艺使吨产品废水排放量减少50%(从1.2m<sup>3</sup>降至0.6m<sup>3</sup>), 蒸汽冷凝水回用率提升至85%以上, 年减排CO<sub>2</sub>约6500吨, 契合《工业能效提升行动计划》对重点行业低碳转型的硬性指标。全生命周期成本分析表明, 尽管初期投资增加约1200万元, 但10年周期内综合成本降低23%, 兼具技术可行性与经济可持续性。

## 五、总结

低温蒸发技术通过真空环境降低溶液沸点(沸点可降至60~80℃), 结合耐腐蚀合金材料(如哈氏合金C-276年腐蚀速率<0.015mm)与陶瓷涂层(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>涂层抗氯离子渗透率<0.1 μg/cm<sup>2</sup>·h)的协同防护, 使设备寿命延长至6年以上, 年维护成本降低40%。创新性体现在工艺-材料-结构耦合设计: 蒸发器流道优化(湍动能降低至0.15m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)与双层密封系统(泄漏率<1×10<sup>-6</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s)显著抑制腐蚀源, 生产线综合效率(OEE)提升至92%, 正极材料杂质含量稳定低于5ppm。未来研究可聚焦智能腐蚀监测系统(如基于声发射技术的裂纹在线检测)与高熵合金涂层开发(耐温>600℃、PREN值>50), 同时结合《工业能效提升行动计划》要求, 深化废热回收与近零排放工艺集成, 推动锂电池正极材料制造向高效、低碳、长周期运行方向迭代升级<sup>[10]</sup>。

## 参考文献

- [1] 明博, 韩虹羽. 锂离子电池正极材料进展[J]. 化工生产与技术, 2012, 19(4):10.
- [2] 姜涛, 陈慧明, 许德超, 等. 新能源汽车用高能量密度锂电池正极材料技术研究. 汽车工艺与材料, 2016(3):5.
- [3] 王瑞岩. 奥氏体不锈钢在氯离子溶液中的应力腐蚀开裂研究[D]. 山东大学, 2016.
- [4] 本刊编辑部. 工信部正式发布《锂离子电池行业规范条件》[J]. 2015.
- [5] 左名景, 韩英, 孙烨, 等. 低温蒸发技术用于煤化工浓盐废水处理的中试研究[J]. 城市环境与城市生态, 2015, 28(2):4.
- [6] 陶熠, 杨素洁, 孙俊杰, 等. 锂离子电池三元正极材料资源化利用研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(2):1-8.
- [7] 孙磊, 张春路. 基于系统仿真和计算流体动力学的冷凝器管路优化[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(9):5.
- [8] 张中彩, 王鑫, 吕玉辰, 等. 不同前驱体制备工艺对高镍三元正极材料LiNi<sub>0.83</sub>Co<sub>0.12</sub>Mn<sub>0.05</sub>O<sub>2</sub>的影响研究[J]. 稀有金属, 2021.
- [9] 左越. 工信部举行宣贯会解读《锂离子电池行业规范条件》[J]. 信息技术与标准化, 2016(1):7-7.
- [10] 袁猛. 智能化腐蚀监测仪的发展现状及趋势[J]. 信息化建设, 2016, 000(001):250.