

强度为 26.4 MPa, 断裂伸长率为 9.8%。当纳米 SiO<sub>2</sub> 添加量为 1.5% 时, 拉伸强度提高至 32.6 MPa, 增幅约 23.5%, 断裂伸长率提升至 13.4%, 表明涂膜在保持一定柔韧性的同时实现了强度增强。光学性能测试结果显示, 改性涂膜在可见光波段的透光率由原来的 72% 下降至 58%, 雾度值由 6.2% 上升至 11.5%, 但仍满足食品包装对透明性的基本要求。性能变化表明, 纳米 SiO<sub>2</sub> 在增强涂膜内部结构完整性的同时, 对光的散射作用增强, 使涂膜在高阻隔与可视性能之间形成相对平衡。

#### 4.3 涂膜阻水阻气性能与乳液流变行为的内在联系

涂膜阻水阻气性能与乳液流变行为之间呈现出明显的相关性。实验数据表明, 当乳液黏度控制在 0.85 ~ 1.10 Pa·s 范围内时, 所得涂膜的透湿率最低, 可稳定在 0.08 ~ 0.10 g/m<sup>2</sup>·d 之间; 对应的氧气透过率为 9.5 ~ 11.2 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d。若乳液黏度超过 1.30 Pa·s, 涂膜在成膜过程中易产生局部堆积现象, 导致透湿率升高至 0.15 g/m<sup>2</sup>·d 以上。流变测试结果显示, 具有明显剪切变稀特征的乳液在涂布过程中更易形成均匀膜层, 其表面粗糙度 Ra 值可控制在 0.32 μm 以内, 而流变稳定性较差的体系对应 Ra 值超过 0.60 μm<sup>[4]</sup>。由此可见, 乳液良好的流变响应特性是获得高致密、高阻隔涂膜结构的重要前提。

### 5 原位复合纳米 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDC 乳液在涂膜应用中的工艺适应性

#### 5.1 原位复合乳液涂布工艺稳定性分析

在实际涂膜应用过程中, 乳液体系的工艺稳定性直接决定涂布连续性与成膜质量。基于原位复合工艺制备的纳米 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDC 乳液在连续涂布条件下表现出良好的运行稳定性。实验中将涂布速度设定在 10 ~ 35 m/min 范围内, 膜液在辊涂与刮涂工况下均未出现明显断膜、流挂或针孔等缺陷, 成膜厚度集中分布于 15 ~ 22 μm 区间, 厚度偏差控制在 ±4.8% 以内。乳液在 25℃ 条件下静置 30 d 后, 其黏度由初始的 0.96 Pa·s 变化至 1.01 Pa·s, 变化幅度约为 5.2%, 体系未出现明显沉降分层或颗粒聚集现象。相比之下, 未进行纳米 SiO<sub>2</sub> 原位复合的 PVDC 乳液在相同条件下黏度变化率达到 14.3%, 并出现轻微絮凝。数据表明, 纳米 SiO<sub>2</sub> 在聚合过程中原位引入后, 通过改善乳液颗粒间的空间分布与相互作用状态, 有效提升了体系在储存与涂布过程中的整体稳定性, 为连续化、规模化涂膜应用提供了可靠工艺基础。

#### 5.2 乳液流变行为对涂膜施工性能的影响

乳液流变行为是影响涂膜施工性能的关键参数, 其变化直接关系膜液铺展、流平及固化过程的可控性。流变测试结果显示, 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDC 乳液在剪切速率由 5 s<sup>-1</sup> 提升至 120 s<sup>-1</sup> 过程中, 体系黏度由 1.18 Pa·s 逐步降低至 0.56 Pa·s, 呈现出显著的剪切变稀特征, 流动指数计算值约为 0.44。该特性使乳液在高速涂布阶段能够迅速铺展并均匀覆

盖基材表面, 而在剪切停止后黏度恢复至 0.97 Pa·s 以上, 有效抑制膜液下垂与边缘堆积现象。实际施工测试表明, 在相同涂布条件下, 改性乳液形成的涂膜表面粗糙度 Ra 值稳定控制在 0.28 ~ 0.36 μm 范围内, 明显低于未改性体系的 0.55 ~ 0.72 μm, 施工缺陷发生率由原来的 6.1% 降低至 2.4%。结果表明, 合理的流变响应特性是实现高质量涂膜施工的重要前提, 纳米 SiO<sub>2</sub> 原位复合通过调控乳液内部结构, 有效提升了施工过程的稳定性与成膜一致性。

#### 5.3 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDC 乳液综合成膜性能评价

综合成膜性能评价结果显示, 原位复合纳米 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDC 乳液在结构、力学、阻隔及施工性能方面形成了较为协调的性能体系。在最优配方条件下, 所得涂膜拉伸强度达到 32.4 MPa, 断裂伸长率为 13.6%, 较未改性涂膜分别提高约 21.8% 和 34.7%。涂膜透湿率稳定控制在 0.08 ~ 0.10 g/m<sup>2</sup>·d 范围内, 氧气透过率为 9.8 ~ 11.5 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, 表现出良好的阻水阻气性能。光学性能测试结果表明, 涂膜透光率保持在 58% ~ 61% 区间, 雾度值约为 10.8%, 在满足高阻隔需求的同时兼顾可视性要求。多批次重复涂布试验中, 涂膜均匀性评分均值为 4.6 分 (满分 5 分), 批次间偏差小于 0.15 分, 显示出较高的重复性与可靠性<sup>[5]</sup>。综合分析认为, 纳米 SiO<sub>2</sub> 原位复合改性策略在不显著增加工艺复杂度的前提下, 实现了 PVDC 乳液成膜性能的系统提升, 具备较强的工程应用可行性与推广价值。

### 6 结语

本研究围绕原位复合条件下纳米 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDC 乳液的流变行为与成膜性能展开系统分析, 结果表明, 通过在乳液聚合过程中引入纳米 SiO<sub>2</sub>, 可有效改善乳液体系结构状态与流变响应特性, 显著提升涂膜的致密性、力学性能及阻水阻气能力。原位复合工艺在增强乳液稳定性与施工适应性的同时, 实现了成膜质量与应用性能的协同优化, 为高阻隔 PVDC 基涂膜材料的工艺优化与工程应用提供了可靠的技术路径和实践依据。

#### 参考文献

- [1] 张馨月, 唐善法, 胡浩, 王哲, 董沅武, 陈泽群. 改性纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒的制备及其在致密油藏渗吸驱油效果[J]. 油田化学, 2025, 42(04): 670-677.
- [2] 罗晓倩, 孔令伟. 亲水与疏水纳米 SiO<sub>2</sub> 改性膨胀土效果的对比试验研究[J]. 科技和产业, 2025, 25(23): 74-80.
- [3] 罗亚琨, 金群超, 严新稳, 罗云杰. 表面改性纳米 SiO<sub>2</sub> 掺杂对无色聚酰亚胺薄膜性能的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2025, 38(06): 67-76.
- [4] 周欣竹, 郑宁, 吴熙, 王炯杰, 李路帆, 陈松强. 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性水泥沥青砂浆疲劳性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2025, (11): 10-15.
- [5] 吴定远. 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性洞渣粗骨料混凝土的性能及微观结构研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2025, (10): 107-112.

# Analysis and Research on Harmonic Management of Lithium Battery Cathode Production Equipment

Yingchun Liu

Haimuxing (Jiangmen) Laser Intelligent Equipment Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong, 529000, China

## Abstract

Lithium battery cathode materials are a core component of the new energy battery industry. Their production equipment heavily relies on power electronic devices such as inverters and rectifiers, with a high proportion of nonlinear loads, leading to prominent harmonic pollution issues. This seriously threatens the stability of distribution systems, equipment lifespan, and product quality. This paper focuses on the harmonic management of lithium battery cathode production equipment. By combining theoretical analysis, on-site testing, scheme design, and case validation, it systematically explores the mechanisms, characteristic patterns, and harmful effects of harmonics, and proposes efficient management solutions suitable for this scenario. The findings of this study provide a theoretical basis and engineering reference for harmonic management in the lithium battery cathode production industry, and are of significant importance for promoting the green and efficient development of the new energy industry.

## Keywords

Lithium battery cathode; Production equipment; Harmonic management; Power quality

## 锂电正极生产设备谐波治理的分析与研究

刘迎春

海目星（江门）激光智能装备有限公司，中国·广东 江门 529000

## 摘要

锂电正极材料是新能源电池产业的核心组成部分，其生产设备高度依赖变频器、整流器等电力电子装置，非线性负载占比高，谐波污染问题突出，严重威胁配电系统稳定、设备寿命及产品质量。本文以锂电正极生产设备谐波治理为研究对象，通过理论分析、现场测试、方案设计与案例验证相结合的方法，系统探究了谐波产生机理、特征规律及危害影响，提出了适配该场景的高效治理方案。本文研究成果为锂电正极生产行业的谐波治理提供了理论依据与工程范本，对推动新能源产业绿色高效发展具有重要意义。

## 关键词

锂电正极；生产设备；谐波治理；电能质量

## 1 引言

“双碳”目标驱动下，全球新能源汽车与储能产业爆发式增长，带动锂离子电池需求攀升，锂电正极材料产能随之扩张。其生产工序复杂，高速搅拌机、涂布机等核心设备需配备变频器、整流器等电力电子装置，此类非线性负载运行时向电网注入大量谐波电流，引发电压波形畸变。从生产安全看，会增加配电设备损耗、加速绝缘老化，甚至导致电容柜跳闸、保护装置误动作，造成生产线非计划停机；从产品质量看，电压波动会影响涂布厚度均匀性与烧结炉温控精度，降低正极材料一致性；从经济效益看，会增加线路损耗、抬高电费支出，还会因功率因数不达标产生罚款。

因此，开展锂电正极生产设备谐波治理研究意义重大。

【作者简介】刘迎春（1982-），工程师，从事锂电设备研究。

本文围绕谐波治理展开研究，内容涵盖产生机理与特征分析、危害评估、治理方案设计优化及工程案例验证，采用“理论分析-现场测试-方案设计-案例验证”的技术路线，旨在形成可推广的行业经验。

## 2 谐波相关理论基础

### 2.1 谐波的产生机理

谐波的产生根源是电力系统中的非线性负载，即负载的伏安特性不满足线性关系，电流与电压不成正比。锂电正极生产设备中的变频器、整流器是典型的非线性负载，其谐波产生机理如下：变频器通过整流单元将交流电转换为直流电，再通过逆变单元将直流电转换为频率可调的交流电，驱动电机运行。整流单元多采用二极管或晶闸管组成的桥式整流电路，其输出电流为脉冲状，经傅里叶分解后包含大量谐波分量。对于6脉波整流电路，其产生的谐波次数为 $6k\pm 1$  ( $k=1,2,3,\dots$ )，即5、7、11、13次等谐波；12

脉波整流电路可抑制 5、7 次谐波,但仍会产生 11、13 次谐波。

整流器的工作原理与变频器整流单元类似,通过可控硅或二极管将交流电转换为直流电,为设备提供稳定直流电源,其谐波产生规律与整流电路拓扑结构直接相关。此外,绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等器件的开关动作导致电压/电流突变,会产生高频谐波分量,其频谱分布与开关频率直接相关;高速搅拌机、辊压机等设备的电机在启停过程中会产生冲击电流,也会引入一定谐波。

### 2.2 谐波治理相关技术原理

无源滤波技术由电感 (L)、电容 (C)、电阻 (R) 组成串联或并联谐振回路,利用谐振特性滤除特定次数谐波。常见的无源滤波器类型包括单调谐滤波器、双调谐滤波器和高通滤波器。单调谐滤波器由电感、电容串联组成,谐振频率等于目标谐波频率,对该次谐波呈现低阻抗,可将谐波电流分流至滤波回路,从而降低电网中的谐波含量。双调谐滤波器可同时滤除两种不同次数的谐波,具有结构紧凑、成本较低的优点。高通滤波器对高于某一频率的谐波均具有滤波效果,适用于治理高次谐波。无源滤波技术的优点是结构简单、运行可靠、成本低廉、无需额外电源;缺点是滤波频率固定,无法应对负载变化导致的谐波频率偏移,易与电网发生并联谐振,引发过电压或过电流,且滤波效果受电网阻抗影响较大。

### 2.3 有源滤波技术

有源电力滤波器是一种基于电力电子技术的动态谐波治理设备,主要由电流检测单元、控制单元、功率逆变单元和储能单元组成。其工作流程为:电流检测单元实时采集负载电流,通过傅里叶变换分离出谐波分量;控制单元根据谐波分量生成补偿指令;功率逆变单元根据指令输出与谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流,注入电网后与负载谐波电流相互抵消,实现谐波治理。APF 的核心优势在于动态响应速度快 (响应时间通常小于  $50\mu\text{s}$ )、滤波范围广 (可治理 2-50 次谐波)、自适应能力强,不受电网阻抗影响,且可同时补偿无功功率。基于宽禁带半导体 (SiC/GaN) 的 APF 损耗可降低 30%,效率突破 97%,开关频率提升至 50kHz 后,采用三电平 ANPC 拓扑可实现 100 次以上谐波有效抑制。根据安装方式的不同,APF 可分为并联型、串联型和串并联混合型,其中并联型 APF 因安装方便、适用性强,在工业领域应用最广。随着技术发展,模块化 APF 逐渐成为主流,其采用多模块并联结构,可根据负载容量灵活扩容,且具备冗余功能,提高了系统可靠性。此外,人工智能预测控制 (如 LSTM 网络) 可提前 0.5 个周期预判谐波分量,使 APF 补偿精度提升至 98.5%,但依赖高质量训练数据集。

## 3 锂电正极生产工艺与核心设备

锂电正极材料 (以三元材料、磷酸铁锂为例) 的核心生产工艺包括前驱体合成、混料、涂布、烧结、粉碎、筛分、包装等环节。前驱体合成是将镍、钴、锰等金属盐溶液与氢

氧化钠、氨水等沉淀剂混合,通过反应生成前驱体粉末;混料环节是将前驱体与锂源按比例混合,保证物料均匀性;涂布环节是将混合后的浆料均匀涂覆在铝箔表面,形成极片;烧结环节是将极片置于回转炉中,在高温下进行固相反应,形成正极材料晶体结构;粉碎与筛分环节是将烧结后的块状物料破碎、分级,得到符合粒度要求的成品。

锂电正极生产过程中的核心电力设备多为非线性负载,主要包括以下类型:一是变频调速设备,如高速搅拌机、涂布机、辊压机的驱动电机,配备变频器实现调速控制;二是整流设备,如烧结炉温控系统、电化学工作站的直流电源,采用整流器将交流电转换为直流电;三是辅助设备,如真空泵、冷却风机、水泵等,部分配备变频器以降低能耗。

表 1 锂电正极生产核心非线性负载设备清单

设备名称	功率范围	电力电子装置	主要功能
高速搅拌机	45-132kW	变频器	混合前驱体与锂源
涂布机	75-250kW	变频器	极片涂覆
回转炉	150-630kW	整流器 + 变频器	高温烧结
辊压机	90-185kW	变频器	极片压实
真空泵	22-90kW	变频器	系统抽真空

## 4 锂电正极生产设备谐波治理方案设计与优化

### 4.1 谐波治理目标与原则

基于前文测试与危害分析,确定本研究的谐波治理目标:一是系统电能质量达标,配电室母线处 THDi 降至 5% 以下,各次谐波含量满足 GB/T 14549-1993 标准要求;二是设备运行状态改善,变压器、电机温度降至正常范围,保护装置误动作次数为零;三是经济效益提升,年节约电费及运维成本超 900 万元,产品不合格率降至 1.5% 以下。

谐波治理方案设计遵循以下原则:一是源头优先原则,优先选用低谐波设备,从源头减少谐波产生;二是技术适配原则,结合锂电正极生产设备谐波特征,选择针对性强的治理技术;三是经济高效原则,兼顾治理效果与设备投资成本,确保方案的经济性,企业购置有源滤波设备可享受 10% 的所得税抵免,缩短投资回收周期;四是安全可靠原则,治理设备需具备冗余功能,不影响生产线正常运行。

### 4.2 谐波治理技术选型

针对锂电正极生产设备的谐波特征,对比无源滤波 (PPF)、有源滤波 (APF)、混合滤波 (HAPF) 三种技术的适配性,结果如表 2 所示。

表 2 不同谐波治理技术适配性对比

技术类型	滤波范围	响应速度	抗谐振能力	投资成本	适配性
无源滤波 (PPF)	固定次数	慢	弱	低	低
有源滤波 (APF)	2-50 次	快 ( $<50\mu\text{s}$ )	强	高	高
混合滤波 (HAPF)	2-50 次	较快	强	中	中