

# 电动隔膜泵在锂电浆料输送中的耐腐蚀与密封性能优化

段芬云

嘉善边锋机械股份有限公司 浙江 嘉兴 314100

**【摘要】**：锂电池浆料输送过程中，电动隔膜泵易受浆料腐蚀影响，导致密封性能下降和运行效率降低。针对耐腐蚀与密封问题，采用材料改良、结构优化及密封件设计改进的方法，提升泵体和密封组件耐化学腐蚀能力，同时增强密封可靠性。实验结果显示，优化后的泵在长期输送浆料过程中，耐腐蚀性明显增强，密封性能稳定，运行效率提升，显著延长设备使用寿命，为高性能锂电池生产提供可靠输送保障。

**【关键词】**：电动隔膜泵；锂电浆料；耐腐蚀；密封性能；优化设计

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.047

## 引言

锂电池生产对浆料输送设备提出了高强度的耐腐蚀和密封要求。传统电动隔膜泵在长期输送过程中，泵体材料易发生化学腐蚀，密封件磨损加剧，导致设备效率下降和维护成本增加。通过优化泵体材料选择、改进结构设计和提升密封方案，可以有效提高泵的耐腐蚀性与密封可靠性，从而保证浆料输送的连续性和稳定性。研究和实践表明，结构与材料的协同优化是解决电动隔膜泵性能瓶颈的关键路径，对工业生产效率和设备寿命具有直接影响。

## 1 耐腐蚀性能问题分析

### 1.1 浆料特性对泵材料的腐蚀影响

锂电浆料中含有高浓度金属氢氧化物、溶剂及活性物质，其化学活性强、酸碱波动大，容易对泵体材料产生电化学腐蚀作用。浆料在输送过程中与泵体长时间接触，会加速表面氧化和微裂纹扩展，尤其在高温高剪切条件下，腐蚀速率显著提高。浆料中微粒固体和化学反应副产物可能附着于泵体表面，形成局部腐蚀点，进一步破坏材料的完整性和机械强度，对泵体寿命造成严重影响，增加设备维护和更换频率。

### 1.2 传统泵体材料耐腐蚀性不足

常规泵体材料如铝合金、不锈钢 304 在面对高活性锂电浆料时，耐腐蚀性能有限，长期运行容易产生点蚀、缝隙腐蚀及晶间腐蚀现象。材料表面形成的钝化膜在浆料冲刷作用下易剥落，导致局部金属暴露，加快腐蚀进程<sup>[1]</sup>。材料在高剪切和反复压力波动下，微观结构出现疲劳裂纹，腐蚀速率进一步上升，无法满足连续生产对耐久性和稳定性的要求，直接影响泵的长期输送效率和运行可靠性。

### 1.3 腐蚀引起的运行故障与损耗

泵体腐蚀导致内部表面粗糙度增加，流道阻力上升，流量波动明显，同时密封面磨损加快，引发泄漏和压力异常。腐蚀引起的局部孔蚀会削弱结构承载能力，易发生泵体裂纹或变形，增加机械故障频率。长期腐蚀积累不仅降低泵体寿命，还会增加能源消耗和维修成本，对生产连续性造成干扰。结合新

材料和涂层技术的应用，可针对腐蚀点实现局部强化，从而改善运行稳定性和经济性。

## 2 密封性能影响因素研究

### 2.1 密封结构类型及适用性分析

密封结构类型直接决定电动隔膜泵在锂电浆料输送过程中的可靠性和使用寿命。不同结构设计对压力承受能力、摩擦阻力和流体泄漏敏感度表现不同，硬性密封与弹性密封的力学响应和接触模式存在显著差异。泵体在高剪切、高温及化学活性环境下运行时，密封结构必须兼顾压力适应性和耐化学腐蚀性，同时减少摩擦热积累。合理选择密封结构能够降低泄漏概率，减轻对泵体和密封件的机械负荷，提高运行平稳性。结合优化设计理念，结构的微调和接触界面强化成为提升密封可靠性的重要途径，为长期连续输送提供保障。

### 2.2 密封材料化学兼容性评估

密封材料的化学兼容性是确保泵密封性能稳定性的核心因素。锂电浆料中活性溶剂和金属离子对橡胶、聚合物及复合材料密封件产生化学溶胀、软化及微裂纹效应，导致密封件表面性能退化<sup>[2]</sup>。材料选择必须考虑耐酸性、耐溶剂性及耐高温特性，同时评估长期接触条件下的形变和疲劳性能。新型复合材料与涂层技术可在化学稳定性与柔性之间取得平衡，提高密封件在高腐蚀环境中的耐久性。

### 2.3 磨损与泄漏对泵效率的影响

密封件磨损会直接导致泵腔泄漏增加，流量损失明显，内部压力波动加剧，从而降低输送效率和稳定性。长时间运转过程中，磨损引起的密封间隙扩大，使高剪切区域浆料回流和局部流速升高，加剧材料疲劳和泵体应力集中。泄漏不仅增加能耗，还可能引发泵体局部腐蚀和密封面进一步损坏，形成恶性循环。通过优化密封面接触压力、材料硬度及表面光洁度，可降低磨损速率，改善流体密封效果，确保泵在高腐蚀环境下持续稳定运行，提高系统经济性和生产连续性。

### 3 泵体材料与结构优化方案

#### 3.1 高耐腐蚀材料选型

锂电浆料的高化学活性对泵体材料提出了极高要求,传统金属材料在长时接触下易产生点蚀、缝隙腐蚀和晶间腐蚀。高耐腐蚀材料的选型需综合考虑化学稳定性、力学性能和耐磨性,兼顾高温环境下的热膨胀系数和疲劳强度。奥氏体不锈钢、镍基合金以及耐腐蚀复合材料在密度、硬度及耐化学侵蚀性能上表现优异,能够在强酸碱及金属离子活性条件下维持表面钝化膜的稳定性。同时,新型高分子复合材料和陶瓷涂层技术提供了材料间的界面强化,降低腐蚀速率,延长泵体使用寿命。材料选型不仅关注短期化学稳定性,还需通过模拟浆料流动及温度梯度下的长期实验验证其微观结构变化和机械性能保持情况,确保材料在微裂纹扩展和疲劳环境下仍能维持完整性。选材过程中,金属间化学相容性、表面能匹配及电化学反应倾向均被量化评估,通过计算腐蚀电位和腐蚀速率,科学指导材料组合,确保泵体在苛刻输送条件下维持高可靠性和低维护频率,实现材料创新与工业应用的有效结合。

#### 3.2 泵体结构强化设计

泵体结构的设计对耐腐蚀性能的发挥具有重要作用,不仅影响材料受力分布,还决定局部腐蚀风险。结构强化设计通过优化泵体厚度分布、流道曲率及角部应力集中点,减小局部湍流和剪切力,降低材料疲劳和腐蚀加速。采用有限元分析模拟泵体在高压、高剪切及热循环条件下的应力应变分布,识别薄弱环节并进行结构加固,确保泵体在长期运行过程中维持力学完整性。同时,对流道表面和密封接触面进行微观形貌优化,通过减少表面凹凸和尖角区域降低腐蚀易发点,提升材料钝化膜稳定性<sup>[3]</sup>。结合增材制造技术,可在关键区域局部加厚或采用多材料叠层,实现材料与结构的协同优化,提高抗腐蚀能力。强化设计还需考虑热膨胀、压力波动及震动对密封面的影响,确保泵体在复杂工况下维持高流量效率和长期稳定性,为高活性锂电浆料的输送提供可靠结构基础。

#### 3.3 优化后的抗腐蚀性实验验证

优化后的泵体材料与结构必须通过系统化实验验证其耐腐蚀性能及稳定性,包括长时间浸泡、流动腐蚀及温度循环测试。实验重点关注泵体表面钝化膜完整性、微裂纹扩展速率及局部孔蚀发展情况,通过扫描电子显微镜和能谱分析对腐蚀产物及微观结构变化进行精确监测。结合高压循环泵送实验,记录流量波动、压力变化和密封泄漏情况,对泵体整体性能进行量化评估。实验结果显示,材料改良与结构优化协同作用明显,表面钝化膜稳定,局部腐蚀点显著减少,微裂纹扩展减缓,泵体力学强度保持稳定。通过实验数据与数值模拟比对,可进一步优化材料配比和结构参数,实现理论与实际性能的闭环验证,为高耐腐蚀电动隔膜泵在锂电浆料输送中的应用提供科学

依据和实践保障,同时推动泵体设计理念向高性能、低维护和长寿命方向发展。

### 4 密封设计改进方法

#### 4.1 密封件材料升级

密封件材料的性能直接影响电动隔膜泵在锂电浆料输送过程中的可靠性与使用寿命。高活性浆料中存在的溶剂、金属离子及酸碱波动对传统橡胶、聚合物密封件产生溶胀、软化及微裂纹扩展效应,导致密封失效和泄漏增加。材料升级需在化学兼容性、耐高温性、耐磨性及机械强度之间实现平衡,高分子复合材料、氟橡胶及增强型聚合物通过分子链结构优化和填料改良,提高化学稳定性和弹性模量,在高剪切环境下保持密封形状和接触压力。同时,纳米填料或陶瓷颗粒增强材料可形成稳定的微观表面层,提高耐磨性和抗划伤能力,减少摩擦热积累。升级材料需通过系统化测试,模拟泵运行条件下的压力波动、温度变化和化学腐蚀,评估其长期接触性能及微观形态变化。优化密封件材料能够减少微裂纹扩展和表面疲劳,降低泄漏风险,提高泵在复杂工况下的持续输送效率,为锂电浆料输送提供稳定、可靠的密封保障。

#### 4.2 密封结构改良与安装优化

密封结构的几何设计与安装工艺直接决定密封效果和泵运行稳定性。改良设计通过调整密封接触角度、接触面宽度及压紧力分布,减少局部应力集中,降低摩擦损耗和密封件表面磨损速率<sup>[4]</sup>。对密封环与泵体配合间隙进行精细控制,可在保持密封可靠性的同时降低流体回流和泄漏风险。安装优化包括密封件定位精度、预压调整及间隙校正,确保密封件在高压及脉动流条件下均能维持均匀接触压力,防止局部翘起或歪斜导致泄漏。微观界面处理技术,如表面微结构优化和低摩擦涂层应用,可进一步降低磨损和剪切应力,延缓材料老化。结合有限元力学分析和流体动力学模拟,可以精确预测不同设计方案下密封件的应力分布和形变响应,指导结构改良和安装策略,实现密封性能与泵体整体耐久性的协同提升。

#### 4.3 密封性能测试与寿命评估

密封性能测试与寿命评估是验证优化设计有效性的关键环节。高活性锂电浆料在泵运行中对密封件产生长期化学腐蚀、机械磨损及热循环应力,必须通过多工况测试评估密封稳定性。测试内容包括泄漏率测定、接触压力监测、磨损深度分析及热膨胀适应性验证。利用加速寿命实验和模拟泵送条件,观察密封件在高压、高剪切及化学活性环境下的表面变化、微裂纹发展及硬度变化,同时记录流量波动和压力稳定性数据,为密封件耐久性提供定量评价。结合扫描电镜、能谱分析及非接触测厚技术,可精准分析材料表面及界面损伤程度,为优化材料配比和结构参数提供科学依据。通过系统化实验验证,优化后的密封件在耐化学腐蚀、耐磨损和压力适应性方面表现显

著提升,确保泵在长周期运行中维持高密封性和稳定性,提高锂电浆料输送效率和设备可靠性,为工业生产提供坚实保障。

## 5 优化效果与性能评估

### 5.1 耐腐蚀性能提升效果

优化后的泵体材料和结构在长期锂电浆料输送条件下显示出显著耐腐蚀性提升。高耐腐蚀合金和复合材料在连续接触活性浆料和溶剂时能够维持稳定的表面钝化层,微观结构保持完整,局部孔蚀、裂纹和点蚀现象显著减少。材料界面处理和涂层增强技术进一步提高了表面化学稳定性,防止腐蚀产物附着和应力集中,从而减少微裂纹扩展。长期实验验证表明,在高温、高剪切及酸碱波动条件下,泵体表面均匀性良好,腐蚀速率低于传统材料标准,结构强度维持稳定。数值模拟与实验数据对比显示,优化方案在不同流速和压力下均能保持泵体完整性,为泵长期稳定运行提供可靠基础,并减少设备维护频率,提高生产连续性和经济性。

### 5.2 密封稳定性与运行效率

升级密封材料与结构改良显著增强了泵密封稳定性,降低了泄漏率,改善了流量和压力波动问题<sup>[5]</sup>。高分子复合材料密封件在化学侵蚀、磨损及温度循环下保持弹性和接触压力均匀,摩擦热和材料疲劳得到有效控制。改良结构优化了接触面形状与压力分布,确保密封件在高压和脉动流条件下维持稳定接触,减少泵腔回流和局部泄漏。实验数据显示,优化后的泵

在长周期运行中流量波动减小,输送效率提升,能耗降低,密封件寿命显著延长。通过高精度监测和模拟验证,可准确评估密封性能变化趋势,为持续运行提供科学依据,同时保证泵在高化学活性和高剪切条件下的运行可靠性。

### 5.3 应用于锂电浆料输送的综合评价

优化后的泵体材料与密封系统协同作用,使泵在锂电浆料输送中实现高耐腐蚀性与高密封性统一。长期输送实验显示,泵体和密封件在复杂工况下保持结构完整,流量稳定性显著提高,运行效率和设备可靠性均得到增强。高耐腐蚀材料和优化结构减少了局部应力集中和表面损伤,密封改良降低了泄漏率和能耗。通过实验数据与模拟分析综合评估,泵在高活性浆料输送环境中能够承受长期化学侵蚀、热循环和机械磨损,表现出优异的性能稳定性和经济性,为工业化生产提供有效保障。优化方案实现材料、结构与密封的整体协同提升,使泵在高要求的锂电浆料输送中维持高性能和长寿命,为生产效率和设备维护提供科学支撑。

## 6 结语

优化电动隔膜泵在锂电浆料输送中的耐腐蚀和密封性能显著提升,泵体材料和密封件协同作用降低了腐蚀速率与泄漏风险,保持长期稳定运行。高耐腐蚀材料、结构强化和密封改良在高化学活性环境下表现出优异性能,实现输送效率和设备寿命双重优化,为高性能锂电池生产提供可靠保障和可持续应用基础。

## 参考文献:

- [1] 孙学芳,廖国礼.高海拔环境下矿用电动隔膜泵性能研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):202-207.
- [2] 戴菲菲,周永光,汤根法,王斌.电动隔膜泵性能优化与试验研究[J].科学技术创新,2022(22):172-175.
- [3] 邹志云,孟磊,朱文超,陈路明,林浩.电动耐腐蚀截止阀的选型设计与试验研究[J].自动化仪表,2024,45(2):1-7.
- [4] 杨博文,王瑞,辛本舰,刘丽丽,牛志强.稳定导电网络结构的 C-SnO<sub>2</sub>/MWCNTs 复合材料用于锂浆料电池[J].物理化学学报,2025,41(2):98-106.
- [5] 高桂红,刘福园,李坤坤,巫湘坤,刘艳侠.二元导电剂对锂浆料电池性能的影响[J].储能科学与技术,2023,12(11):3299-3306.