

冲压薄板长寿命铅酸蓄电池

刘艳娜 陈绍林 毛雁芳

杭州华宇新能源研究院有限公司 浙江 杭州 311305

摘要：本文围绕板栅设计、寿命策略、技术挑战，对冲压薄板技术在铅酸蓄电池长寿命、性能提升的应用展开研究：通过优化铅钙锡铋合金配比与冲压工艺参数，实现板栅微观结构精准控制；采用抗腐蚀涂层、电解液添加剂及梯度结构设计，有效抑制板栅腐蚀与硫化衰减；针对薄板制造一致性难题，提出伺服冲压与激光修复方案；结合三维导电网络与热管理技术，提升大电流放电与快速充电能力。研究突破了传统铅酸蓄电池在循环寿命、功率密度及环境适应性方面的技术瓶颈，为高可靠性储能设备动力、储能电池开发提供理论依据与实践路径。

关键词：冲压薄板；铅酸蓄电池；长寿命设计；抗腐蚀技术

引言：铅酸蓄电池因成本低廉、技术成熟，长期占据储能与动力市场主导地位，但其循环寿命短、功率密度低等缺陷制约了应用拓展。传统浇铸板栅存在晶粒粗大、应力集中等问题，导致深循环工况下容量快速衰减；电解液分层与硫酸盐化现象加剧了电池性能劣化，难以满足高倍率充放电与宽温域使用需求。冲压薄板技术通过超薄化设计与精密成型工艺，显著提升了板栅比表面积与结构均匀性，为延长电池寿命提供了物理基础。

1 冲压薄板板栅设计原理

1.1 材料选择与优化

冲压薄板板栅是铅酸蓄电池的核心构成部件，材料自身性能直接影响电池的耐久性与功率输出水平。高纯铅凭借优异的耐腐蚀性，成为板栅制造的基础材料，但纯铅的机械强度与导电性能难以适配高倍率充放电场景的使用需求^[1]。钙、锡、铋等元素的引入的可构建性能均衡的铅合金体系，钙元素能够细化合金晶粒结构，增强板栅抗蠕变性能；锡元素可提升合金流动性，改善冲压成型效果；铋元素可在板栅表面形成致密氧化膜，有效抑制电解液对基体的侵蚀。低钙高锡合金因兼顾优良的抗腐蚀性加工性能，已逐渐发展成为当前冲压薄板板栅的主流合金类型。合金元素的配比需严格遵循热力学相图规律，钙含量过高易诱发晶间腐蚀现象，锡含量不足则会显著削弱合金延展性。正交实验法可用于合金配方的优化，钙含量控制在0.06%至0.08%区间，锡含量维持在1.8%至2.2%范围，能够有效降低合金在45℃环境下的腐蚀速率。铋元素的添加量需结合电解液成分进行调整，在硫酸浓度为1.28g/cm³的电解液体系中，铋含量控制在0.02%至0.05%时，可形成厚度最优的表面保护膜。

1.2 冲压工艺关键参数

冲压压力的精准控制是决定板栅微观结构质量的核

心环节，压力不足会导致板栅晶粒粗大、孔隙率超标，压力过大则易引发裂纹扩展。将冲压压力控制在120至150MPa区间，可实现板栅密度与孔隙率的合理平衡，既保障电解液的渗透效率，又能维持板栅足够的机械强度。模具设计需融合流体动力学与电化学理论，六边形蜂窝网格布局相较于传统矩形网格，可有效提升电流分布的均匀性。筋条的宽度与间距可通过有限元分析方法进行优化，筋条宽度选取0.8至1.0mm、间距设定为2.5至3.0mm，能够降低深循环工况下板栅的应力集中系数。多级冲压工艺可实现板栅厚度均匀性的精准控制，首道工序通过粗冲形成板栅基础轮廓，后续工序采用精冲工艺修正厚度偏差，最终使产品厚度极差控制在±0.05mm以内。

1.3 板栅与活性物质结合机制

表面处理技术通过物理改性与化学修饰双重手段提升板栅与活性物质的粘附力，机械抛光可去除合金表面的氧化层，暴露新鲜的金属基体；酸洗处理可在板栅表面形成纳米级凹坑结构，增加板栅与活性物质的接触面积。化学镀镍电沉积工艺可在板栅表面形成2至5μm厚的铅镍表层，能够诱导活性物质中二氧化铅优先在板栅表面沉积，进而提升两者结合强度。固化工艺通过温度梯度的精准控制促进板栅与活性物质界面处化学键的形成，分阶段升温策略中，60℃低温段可氧化板栅表面的游离铅，85℃中温段能够促进四碱式硫酸铅晶核生成，120℃高温段完成晶型转化与化学键重排。经优化固化工艺处理后的板栅，与活性物质界面处的Pb-O-Pb化学键密度显著提升，可有效抑制充放电过程中界面剥离现象的发生。

2 长寿命设计策略

2.1 抗腐蚀技术

铅酸蓄电池的耐久性主要受正极板栅在硫酸电解液

中的腐蚀速率影响,合金化改进通过调控元素组成可有效抑制电化学反应的发生。铅钙锡合金体系中,钙元素会在晶界处形成致密氧化层,阻断电解液向基体内部的渗透路径;锡元素可细化晶粒结构,降低板栅局部腐蚀的发生倾向^[2]。铋元素能够优化腐蚀产物结构,在硫酸浓度为 $1.28\text{g}/\text{cm}^3$ 的电解液体系中,铋含量为 0.03% 时,板栅表面氧化膜的致密性达到最佳状态。合理的合金元素配比能够形成有效的防护机制,减少板栅在电解液中的腐蚀,延长电池的使用寿命。表面涂层技术通过构建物理屏障延长板栅使用寿命,导电聚合物涂层如聚吡咯、聚苯胺,可形成连续的电子传导网络,抑制氧气析出反应的发生。无机氧化物涂层中,二氧化钛借助光催化效应分解表面腐蚀产物,氧化铝凭借高化学稳定性阻隔电解液与板栅基体的接触。涂层与基体的结合强度可通过等离子喷涂工艺优化,喷涂功率控制在 15 至 18kW 区间,能够显著降低涂层剥落率。

2.2 抑制硫化与容量衰减

硫酸盐化是导致铅酸蓄电池容量衰减的主要原因,电解液添加剂通过调控酸度分布可有效抑制硫酸铅结晶生长。磷酸根离子可吸附在硫酸铅晶体表面,阻碍晶体长大过程;硫酸钠通过同离子效应降低硫酸铅的溶解度,促使生成细小均匀的硫酸铅晶粒。电解液添加剂的作用能够改变硫酸铅结晶的生长环境,减少大尺寸硫酸铅晶体的形成,从而抑制电池容量的衰减。电解液成分的优化可显著提升电池循环后的容量保持率。充电制度的优化重点在于破坏硫酸铅结晶的物理结构,脉冲充电技术通过高频脉冲电流产生的机械振动,可使大尺寸硫酸铅晶体碎裂为微小颗粒,既能提升充电效率,又能降低硫酸铅结晶尺寸。充电末期施加短暂过电压可促进氧气析出,通过氧气循环机制氧化负极表面的硫酸盐,有效延长电池的深循环寿命。

2.3 结构稳定性增强

板栅筋条设计需兼顾机械强度与导电性能,筋条宽厚比的优化可通过有限元分析实现,筋条宽度与厚度比值控制在 3.5 至 4.0 区间时,板栅在充放电循环中的应力集中系数可降低至 1.6 以下。梯度结构设计可进一步增强板栅抗疲劳能力,边缘区域加厚至 1.2mm 以承受装配过程中的应力作用,中心区域减薄至 0.8mm 以降低板栅内阻。隔板匹配技术通过物理隔离作用防止枝晶穿透,超细玻璃纤维AGM隔板凭借 92% 至 95% 的高孔隙率实现电解液的高效吸附, 0.5mm 的厚度可有效阻挡直径大于 $2\mu\text{m}$ 的枝晶。橡胶隔板通过硫化工艺形成三维交联结构,抗穿刺强度较传统PE隔板大幅提升。隔板与板栅的间距控制需

结合电解液浸润特性,间距设定为 0.3mm 时,既能保证离子传导效率,又能有效避免短路风险,优化后的隔板体系在 1000 次循环后的厚度变化率可控制在较低水平。

3 技术挑战与解决方案

3.1 薄板制造一致性

板栅薄板化进程对冲压设备提出更高要求,板栅厚度降低时,模具间隙需控制在高精度范围内,传统机械式冲床难以满足这一需求^[3]。伺服电动冲床通过数字闭环控制实现位移补偿,压缩重复定位误差,配合高刚性床身结构,可有效抑制高速冲裁过程中的振动干扰。润滑系统采用微量雾化喷射技术,形成均匀油膜,降低冲裁力波动幅度,保障薄板成型的稳定性。在线检测体系需具备微米级的缺陷识别能力,激光三角测量仪以高采样频率扫描板栅表面,构建三维形貌图,精准捕捉厚度偏差。电导率分布检测通过四端子法实现,当局部电导率差异超出允许范围时,系统自动触发报警并定位缺陷坐标。缺陷修复环节引入脉冲激光熔覆技术,针对厚度不足区域进行选择材料补充,修复层与基体熔合区无裂纹产生,结合强度满足使用要求。

3.2 活性物质利用率与寿命平衡

极板厚度与孔隙率的协同优化是兼顾电池初始性能与循环衰减的关键,薄极板可提升活性物质利用率,但易导致结构脆化。梯度孔隙设计通过表层低孔隙率促进电解液渗透,芯部高孔隙率保障结构强度,既能提升放电量,又能有效控制循环寿命衰减率。循环过程中板栅结构稳定性的监测依赖多物理场耦合分析,原位X射线断层扫描技术可非破坏性观测极板内部孔隙演变,当孔隙连通率超出安全范围时,系统及时预警结构失效风险。应变传感器阵列贴附于极板表面,实时采集充放电过程中的形变数据,结合有限元模型反演应力分布,为板栅结构优化提供量化依据。

3.3 成本与规模化生产

原材料成本的优化重点在于回收铅的高效利用,火法精炼工艺通过控制氧势梯度实现杂质选择性氧化,可将回收铅纯度提升至 99.95% ,能耗较电解法显著降低。湿法冶金技术采用柠檬酸-过氧化氢体系,在 60°C 条件下实现铅的高效浸出,浸出率可达 98% ,且避免有毒气体产生。工艺简化从缩短流程与降低能耗两个路径推进,连续化涂板技术将传统间歇式工艺改为辊压传输,生产节拍大幅提升,单位面积能耗显著下降。固化环节采用分段变温控制,前期 80°C 快速脱水,后期 110°C 深度氧化,总固化时间大幅缩短,蒸汽消耗量显著减少,有效提升生产效率并降低能耗。

4 性能提升方向

4.1 大电流放电能力

大电流工况下, 电池内阻成为制约功率输出的关键因素, 板栅导电性的优化需从材料与结构两个维度同步推进^[4]。高纯铅基合金可降低杂质含量, 减少电子散射现象, 提升导电性能; 晶粒细化工艺可缩短电子传输路径, 通过晶粒尺寸的精准控制降低板栅电阻率。三维网状结构设计可增加导电通路数量, 提升电流分布均匀性, 避免局部过热引发的性能衰减。极群组装压力控制直接影响接触电阻与活性物质利用率, 压力不足会导致接触面松动, 压力过大则会压碎活性物质颗粒。组装压力维持在0.8至1.0MPa区间, 可稳定极群接触电阻, 保障活性物质充分参与电化学反应。压力分布的均匀性可通过弹性垫片设计实现, 锥形垫片能够降低端电压偏差, 确保大电流放电时各单格电池性能的一致性。

4.2 快速充电适应性

负极材料的改进重点在于抑制析氢副反应, 碳添加剂通过形成导电网络加速电子转移, 同时提高析氢过电位。石墨烯与纳米碳管复合添加剂可显著降低析氢电流密度, 在3C充电速率下仍能维持较高的充电效率。表面修饰技术可进一步增强析氢抑制效果, 氮掺杂碳层在负极表面构建的电子屏障, 可显著提高析氢反应的活化能。热管理策略通过优化散热结构防止充电过程中的热失控, 相变材料填充外壳可吸收充电过程中产生的热量, 石蜡基复合材料在55℃时发生相变, 吸热能力可达200J/g。液冷通道设计通过强制对流加速热量导出, 冷却液流速控制在0.5m/s时, 电池表面温度均匀性偏差可控制在2℃以内。温度反馈控制系统根据实时温升调整充电功率, 确保40℃环境下仍能保持2.5C的持续充电能力。

4.3 环境适应性

宽温工作范围的实现依赖电解液配方的创新, 凝固点的降低可通过添加乙二醇或无机盐实现, 含15%乙二醇的电解液在-30℃环境下仍能保持良好流动性, 较传统电

解液的工作温度下限显著扩展。沸点的提升可借助离子液体添加剂, 双三氟甲烷磺酰亚胺锂可将电解液沸点提高至120℃, 满足60℃高温环境的使用需求。电解液黏度的调控同样关键, 硫酸浓度调整至1.15g/cm³时, -20℃下的离子电导率可维持在0.3S/cm以上。抗震设计需兼顾结构强度与能量吸收能力, 外壳材料选用玻璃纤维增强聚丙烯, 抗冲击强度较ABS塑料大幅提升, 同时保持较低的密度。内部缓冲结构采用蜂窝状支撑架, 通过塑性变形吸收振动能量, 在10g冲击加速度下, 活性物质脱落量可控制在较低水平^[5]。模块化设计进一步增强抗震性能, 独立密封的单格结构可防止振动引发的电解液泄漏, 确保电池在10至200Hz振动频率范围内仍能稳定输出能量。

结束语

冲压薄板技术通过材料、工艺与结构的协同创新, 显著提升了铅酸蓄电池的耐久性与功率密度。抗腐蚀与硫化抑制技术延长了电池使用寿命, 梯度设计与三维网络强化了电池稳定性。尽管面临薄板制造一致性等挑战, 但伺服冲压、激光修复等工艺改进已为规模化生产奠定基础, 推动铅酸蓄电池向高可靠、长寿命方向升级, 满足多领域对经济型电源的需求。

参考文献

- [1]陈俊, 韦国旺, 韦乾坤, 等. 长寿命铅酸电池循环稳定性与工艺参数优化[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(9): 11-12, 18.
- [2]黄耀思, 陈俊, 韦乾坤, 等. 长循环寿命、高能量密度的铅碳电池构建与研究[J]. 企业科技与发展, 2023(6): 39-41, 58.
- [3]夏三保, 高翔. 高炭负极铅酸动力电池的深循环寿命研究[J]. 时代汽车, 2021(21): 153-154.
- [4]刘德波, 吴昱澎, 许珂大, 等. 源于钛基铅酸电池的再生钛基体作为板栅集电体的研究[J]. 高等学校化学学报, 2024, 45(7): 111-120.
- [5]毛君龙, 陈文钢. 基于粒子群改进的LS-SVM阀控式铅酸蓄电池寿命评估[J]. 蓄电池, 2022, 59(2): 70-74, 86.