

铅酸蓄电池耐高温性能研究

陈绍林 刘艳娜 秦争光

杭州华宇新能源研究院有限公司 浙江 杭州 311305

摘要: 铅酸蓄电池在高温环境下存在诸多失效问题,本文深入分析了电极材料、电解液、隔膜的高温行为及气体生成机制,探讨了高温对容量、循环寿命、内阻和充电接受能力等关键性能参数的影响。针对性提出电极材料改性、电解液体系优化、隔膜材料升级和电池结构设计改进等优化策略,并阐述了耐高温铅酸蓄电池在工业、电动汽车及特殊环境等领域的应用适配性。

关键词: 铅酸蓄电池; 高温失效机制; 性能优化策略; 应用场景适配性

引言: 铅酸蓄电池作为成熟储能装置,应用广泛。然而,在高温环境下,铅酸蓄电池性能衰减显著,电极材料结构改变、电解液分解、隔膜收缩及气体生成等问题频发,导致容量下降、循环寿命缩短、内阻增大、充电接受能力变差,严重影响在高温场景下的可靠使用。因此,深入研究铅酸蓄电池耐高温性能,分析失效机制,提出优化策略,并探索应用适配性,对提升高温性能、拓展应用范围具有重要意义。

1 铅酸蓄电池高温失效机制分析

1.1 电极材料高温行为

铅酸蓄电池正极活性物质以二氧化铅为主要成分,在高温环境下面临显著的结构演变挑战。当温度超过常规工作范围,二氧化铅晶格结构开始出现不可逆转变,晶粒尺寸增大导致比表面积下降,直接削弱了电化学反应活性位点数量^[1]。这种结构劣化过程伴随氧析出反应的加剧,加速了正极板栅与活性物质界面的腐蚀,形成高电阻的硫酸铅层。负极活性物质海绵状铅在高温条件下表现出明显的软化特征,铅晶粒间的结合力随温度升高而减弱,导致活性物质颗粒脱落进入电解液。脱落的铅颗粒不仅造成电池容量衰减,还会在电池底部沉积形成铅沉积层,可能引发内部微短路现象。

1.2 电解液高温反应

硫酸电解液体系在高温条件下呈现双重失效模式。温度升高直接加速硫酸分子的热运动,当温度突破电解液沸点临界值时,硫酸开始以气态形式逸出,造成电解液量持续减少。这种物理蒸发过程伴随化学分解反应,部分硫酸分子在高温下分解为三氧化硫和水蒸气,进一步加剧电解液损耗。电解液浓度随水分蒸发呈现非线性变化,初期浓度升高导致溶液粘度增加,离子迁移阻力增大;后期因硫酸过度分解,浓度反而下降,形成恶性循环。电解液浓度的异常波动直接反映在电池内阻变化

上,实验数据显示,当电解液密度偏离标准值 0.05g/cm^3 时,电池内阻可增加30%以上。

1.3 隔膜高温稳定性

作为电池内部的关键组件,隔膜材料在高温环境下会面临严峻的考验。聚乙烯或超细玻璃纤维隔膜在温度超过玻璃化转变温度后,其分子链段运动会加剧,导致材料发生收缩。这种收缩的横向收缩率可达一定比例,直接造成隔膜孔隙结构的改变。原本均匀分布的微孔会发生闭合或变形,孔隙率显著下降。孔隙结构的改变会阻碍离子的传输通道,导致局部区域出现离子浓差极化现象。更为严重的是,隔膜的收缩还可能引发正负极板的直接接触,形成金属性短路通道。这种失效模式往往会导致电池在短时间内发生热失控,对电池的安全使用构成严重威胁。

1.4 气体生成与内部压力

高温环境显著强化了电解水副反应的动力学过程。当电池处于过充状态或高温条件下,水分解反应速率呈指数级增长,每升高 10°C ,气体生成速率增加约1.5倍。正极析出的氧气与负极析出的氢气在电池内部积聚,形成混合气体压力场。实验研究表明,当内部压力超过 0.3MPa 时,传统橡胶密封结构开始出现永久变形,压力继续升高至 0.5MPa 时,安全阀开启概率大幅增加。异常压力积累不仅威胁电池结构完整性,还会加速电解液干涸,形成压力-容量衰减的恶性循环机制。

2 高温对铅酸蓄电池关键性能参数的影响

2.1 容量衰减机制

高温环境通过双重路径加速铅酸蓄电池容量衰减。在电化学层面,活性物质与板栅的结合强度随温度升高显著下降,海绵状铅与二氧化铅颗粒在热应力作用下更易从板栅表面剥落,导致有效反应物质减少。这种脱落过程伴随硫酸铅结晶的异常生长,高温条件下硫酸铅

晶粒尺寸增大且结晶度提高,形成难以还原的硬质沉积层^[2]。物理层面,电解液在高温下的蒸发与分解造成液面下降,部分活性物质因电解液浸润不足而失去电化活性。自放电过程在高温条件下呈现非线性加速特征,每升高10℃,自放电速率约增加1.2倍,这种加速源于高温强化了杂质离子的迁移能力与电极副反应动力学。

2.2 循环寿命变化

高温对循环寿命的侵蚀体现在容量损失的累积效应上。充放电循环过程中,高温加速了正极板栅的腐蚀进程,铅合金在硫酸电解液中的腐蚀速率随温度升高呈指数增长,当温度从25℃升至45℃时,腐蚀速率可提升2-3个数量级。腐蚀产物在板栅表面形成高电阻层,阻碍电荷传输通道,导致每次循环的容量损失率增加。负极活性物质在高温循环中经历持续的结构重构,铅晶粒尺寸增大导致比表面积下降,电化学反应活性位点减少,这种结构劣化在多次循环后形成不可逆的容量衰减。

2.3 内阻动态特性

高温对电池内阻的影响呈现明显的差异化特征。欧姆内阻的升高主要源于电解液体系的物理变化,虽然高温能提高离子迁移速率,但电解液蒸发导致的浓度变化与硫酸分解产生的气体夹杂,综合作用使得离子传输通道的畅通性下降,离子电导率反而降低。极化内阻的增加则与电化学反应界面的状态改变密切相关,高温环境强化了电极/电解液界面的副反应,形成的高电阻钝化层阻碍了电荷转移过程,这种界面阻抗的增加在电池老化过程中尤为显著。内阻升高与电池性能劣化形成相互强化的恶性循环,内阻的增加导致电池发热量上升,进一步推高工作温度,这种热-阻耦合效应最终加速电池的整体失效进程。

2.4 充电接受能力

高温环境对充电过程的影响集中体现在氧循环反应的强化。当电池接近满充状态时,正极析氧反应随温度升高急剧增强,生成的气体在电池内部形成压力梯度,阻碍氢离子在负极的还原过程。这种氧循环的加剧导致充电效率下降,实验数据显示,45℃环境下充电效率较25℃时降低15%-20%。为维持充电接受能力,需对充电制度进行适应性调整,包括降低充电电压上限以抑制气体析出、采用多阶段恒压充电控制策略,以及通过脉冲充电技术改善离子扩散条件,这些措施共同作用可部分抵消高温对充电过程的负面影响。

3 铅酸蓄电池耐高温性能优化策略

3.1 电极材料改性

针对铅酸蓄电池在高温环境下性能衰减的问题,电

极材料改性是提升耐高温能力的关键途径。正极方面,通过引入特定添加剂可显著增强高温结构稳定性^[3]。这类添加剂能够在二氧化铅晶格中形成稳定的结合位点,抑制高温下晶粒的异常长大与比表面积的降低,从而维持电化学反应活性位点的数量。同时,添加剂还能在正极板栅与活性物质界面形成保护层,减缓高温腐蚀进程,降低高电阻硫酸铅层的生成速率。负极方面,采用合金化策略可有效提升高温抗软化能力。通过在海绵状铅中添加特定金属元素,可形成固溶体或金属间化合物,增强铅晶粒间的结合力,防止高温下活性物质颗粒的脱落。这种合金化负极在高温循环过程中表现出更好的结构稳定性,能够维持较高的电化学反应活性,延缓容量衰减。

3.2 电解液体系优化

电解液体系优化是提升铅酸蓄电池耐高温性能的另一重要手段。高温稳定型电解液成分设计聚焦于调整硫酸与水的比例,并引入特定溶剂或添加剂,以拓宽电解液的工作温度范围。这类电解液在高温下具有更低的蒸气压和更高的热稳定性,能够有效减少物理蒸发与化学分解造成的电解液损耗。同时,电解液添加剂的引入可进一步抑制分解与蒸发过程。这类添加剂能够通过形成保护膜或改变电解液分子间作用力,降低硫酸分子的热运动活性,从而减缓高温下的分解速率。此外,添加剂还能提高电解液的离子电导率,补偿因浓度变化导致的离子迁移阻力增加,维持电池在高温下的充放电效率。

3.3 隔膜材料升级

隔膜材料升级对于提升铅酸蓄电池高温安全性至关重要。耐高温隔膜材料的选型需综合考虑材料的热稳定性、机械强度与化学兼容性。聚酰亚胺、聚砜等高性能聚合物材料因具有优异的耐高温性能与机械强度,成为隔膜升级的理想选择。这类材料在高温下能够保持尺寸稳定性,防止因收缩导致的孔隙结构改变与内部短路风险。隔膜结构优化则聚焦于孔隙率与孔径分布的调控。通过采用多层复合结构或梯度孔径设计,可在保证离子传输效率的同时,抑制高温下隔膜的形变与孔隙闭合,维持均匀的离子传输通道,降低局部浓差极化与内部短路风险。

3.4 电池结构设计改进

电池结构设计改进是提升铅酸蓄电池耐高温性能的系统性方案。散热结构优化聚焦于提高电池的热扩散效率。通过优化极柱、壳体等关键部件的导热性能,并引入散热鳍片、液冷通道等强化散热结构,可有效降低电池工作温度,减缓高温对电极材料与电解液的损害。热

管理策略则强调根据电池工作状态与环境温度动态调整散热强度,实现热平衡的精准控制。密封设计改进则聚焦于提高高温气体排放的适应性^[4]。通过优化安全阀的开启压力与排气通道设计,可在保证电池密封性的同时,及时释放高温下产生的混合气体,防止内部压力过高引发的结构破坏与热失控风险。

4 耐高温铅酸蓄电池的应用场景适配性

4.1 工业领域应用需求

在工业生产体系中,高温工业设备对配套电池的耐高温性能提出了严苛要求。冶金、化工等行业的生产设备常处于高温环境,传统电池在高温下易出现容量衰减、内阻增大等问题,难以满足设备长时间稳定运行的需求。耐高温铅酸蓄电池凭借优化的电极材料与电解液体系,能够在较高温度区间内维持稳定的电化学反应,确保高温工业设备在连续作业过程中获得可靠的电力支持。储能系统作为工业领域能量调节的关键环节,在高温环境下的运行稳定性同样至关重要。高温会加速储能电池的老化进程,降低充放电效率,甚至引发安全隐患。耐高温铅酸蓄电池通过结构与材料改性,有效提升了热稳定性与循环寿命,能够在高温储能场景中保持高效、安全的能量存储与释放,为工业生产的连续性与稳定性提供有力保障。

4.2 电动汽车在高温地区的电池性能保障

电动汽车在高温地区的应用面临电池性能衰减的挑战。高温会加速电池内部化学反应速率,导致电极材料结构破坏、电解液分解等问题,进而引发容量衰减、功率下降等性能劣化现象。耐高温铅酸蓄电池针对高温环境进行了专项优化,通过采用耐高温电极材料、稳定型电解液与高效隔膜,有效抑制了高温对电池性能的负面影响。在高温地区行驶的电动汽车搭载此类电池,能够维持更稳定的续航里程与动力输出,提升用户体验与车辆可靠性。轨道交通备用电源作为保障列车安全运行的重要设施,在高温适应性设计方面同样不容忽视。耐高温铅酸蓄电池凭借卓越的热稳定性与长循环寿命,能够在轨道交通备用电源系统中发挥关键作用,确保在高温等极端条件下为列车提供可靠的应急电力支持。

4.3 特殊环境应用需求

沙漠、热带等极端气候区域对电池的可靠性提出了极高要求。这些地区常年高温,且伴有强日照、沙尘等恶劣环境条件。高温会加速电池内部化学反应,导致电池老化速度加快;沙尘则可能侵入电池内部,影响电池的正常工作,降低使用寿命。耐高温铅酸蓄电池通过强化材料的耐高温性能,采用特殊的散热结构以及优化密封设计,有效提升了在极端气候下的适应能力。其耐高温材料能在高温下保持性能稳定,散热结构可及时将电池产生的热量散发出去,密封设计能阻止沙尘进入,使得这类电池能够在高温环境中保持稳定的性能输出,抵御沙尘侵蚀,满足沙漠、热带地区户外设备长期用电的需求。在一些大型户外勘探设备、野外科研监测装置等领域,同样需要具备良好的高温性能的电池^[5]。这些设备往往在野外长时间工作,面临高温、日晒等复杂环境。耐高温铅酸蓄电池凭借自身优势,能够为这些设备提供稳定可靠的电力,确保设备在恶劣环境下正常运转,助力相关工作的顺利开展。

结束语

通过对铅酸蓄电池耐高温性能的系统研究,明确了高温失效机制及对关键性能参数的影响,提出的优化策略有效提升了电池的耐高温能力。耐高温铅酸蓄电池在工业、电动汽车及特殊环境等领域展现出良好的应用适配性,能够满足不同场景下对电池性能的严苛要求,为相关领域的发展提供了可靠的电力支持,推动了铅酸蓄电池技术的进步与应用拓展。

参考文献

- [1]牛义生,张文龙,查立平,等.起动型铅酸蓄电池高温性能研究[J].蓄电池,2021,58(3):114-118.
- [2]赵弟,宋艳龙,杨占欣,等.铅酸蓄电池SAEJ240b高温寿命研究[J].蓄电池,2021,58(5):213-216.
- [3]徐兴泽,徐涛,刘畅,等.抽酸电流对铅酸蓄电池性能的影响[J].蓄电池,2024,61(4):169-173.
- [4]陈二霞,孙海涛,霍玉龙,等.铅酸蓄电池用改性氮化碳材料的研究[J].蓄电池,2022,59(5):201-205.
- [5]官云茜,郁金星,李栋,等.温度对3种不同材料铅酸蓄电池极板老化的影响[J].金属功能材料,2024,31(1):114-120.