

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2021.04.006

磷酸铁锂电池在城市轨道交通中的应用

代伟¹, 张斌¹, 陈林²

(1. 北京市地铁运营有限公司, 北京 100044; 2. 北京市地铁运营有限公司供电分公司, 北京 100044)

摘要: 通过磷酸铁锂蓄电池与阀控式铅酸蓄电池在城市轨道交通中的应用对比, 结合北京地铁 8 号线整合 UPS 和直流屏经改造, 使用高安全浮充式防火型磷酸铁锂蓄电池替换原有阀控式铅酸蓄电池的实际运行效果进行分析, 为城市轨道交通蓄电池的选型提供新途径。

关键词: 城市轨道交通; 磷酸铁锂电池; 阀控式铅酸蓄电池; 过充; 浮充; 安全

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2021)04-0034-05

Application of LiFePO₄ Battery in Urban Rail Transit

DAI Wei¹, ZHANG Bin², CHEN Lin³

(1. Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100044;

2. Power Supply Branch of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100044)

Abstract: Through a comparison of the application of a LiFePO₄ battery and VRLA battery in urban rail transit, combined with the transformation of Beijing Metro Line 8 to integrate UPS and DC panels, the actual operation effect of using a high safety floating protection LiFePO₄ battery to replace the original VRLA battery is analyzed, which provides a new method for the selection of urban rail transit batteries.

Keywords: urban rail transit; LiFePO₄ battery; VRLA battery; overcharge; floating charge; safety

目前, 阀控式铅酸蓄电池凭借成熟的技术和丰富的规格, 广泛应用于城市轨道交通后备电源领域^[1]。以北京地铁 8 号线为例, UPS 和直流屏改造前所使用的蓄电池均为阀控式铅酸蓄电池, 型号主要有 500Ah/2V、120Ah/12V、128V/12V、54Ah/12V、90Ah/12V。按蓄电池组参考使用年限 5 年估算, 每年有大量蓄电池需要进行更新改造, 废旧蓄电池的报废处理, 新蓄电池的重新安装, 以及现状蓄电池的维护都需要投入巨大的人力物力。随着中国蓄电池行业的快速发展, 可供选择的蓄电池种类越来越多, 城市轨

道交通行业有必要寻找在使用寿命、占地面积、智能管理以及运营维护等方面性能更加优秀的蓄电池种类^[2]。

近年来, 随着清洁低碳能源的深入推进, 各种新型储能电池不断涌现^[3]。在众多类型储能电池中, 锂离子电池因具有能量密度高、使用寿命长、环保等优点而受到广泛关注, 近年来发展迅速, 主要应用在大型储能、电动汽车、通信备电等领域。

当前市场比较成熟的锂离子电池主要包括磷酸铁锂电池、三元锂电池、锰酸锂电池、钴酸锂电池、钛

收稿日期: 2021-01-19 修回日期: 2021-05-06

第一作者: 代伟, 男, 本科, 从事城市轨道交通供电专业运营维护、资产维护管理工作, daiwei@bjsubway.com

引用格式: 代伟, 张斌, 陈林. 磷酸铁锂电池在城市轨道交通中的应用[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(4): 34-38.

DAI Wei, ZHANG Bin, CHEN Lin. Application of LiFePO₄ battery in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(4): 34-38.

酸锂电池等, 各类锂离子电池性能参数对比情况见表 1。钴酸锂电池具有高比容量, 但安全性最差^[4], 且成本高, 寿命相对较短; 锰酸锂电池成本低, 但其材料本身不太稳定, 容易分解产生气体, 且高温性能较差, 电池温度不能超过 80℃, 其循环寿命衰减较快、寿命相对较短; 三元锂电池(镍钴锰酸锂、镍钴铝酸锂)比容量高, 但其防起火安全性和高成本方面存在较大的负面影响; 磷酸铁锂电池的比容量低, 但其安全性

能优异, 即使在高温下仍可保持较稳定的结构, 使得磷酸铁锂电池安全可靠, 甚至在电池出现变形损坏时也不会出现冒烟、起火等安全事故, 另外, 磷酸铁锂原料资源较为丰富, 极大地降低了材料及电池的使用成本; 钛酸锂电池具有高安全、长寿命、耐温宽等特点, 但钛酸锂电池成本偏高, 而且比容量也比其他锂离子电池低, 这些缺点限制了钛酸锂电池的广泛应用。

表 1 各类锂离子电池性能对比

Table 1 Comparison of Li-ion battery performance

正极材料	钴酸锂	锰酸锂	镍钴锰酸锂	镍钴铝酸锂	磷酸铁锂	锰酸锂或镍钴锰酸锂
负极材料	石墨	石墨	石墨	石墨	石墨	钛酸锂
标称电压/V	3.60	3.70	3.60	3.60	3.20	2.40
工作电压范围/V	3.0~4.2	3.0~4.2	3.0~4.2	3.0~4.2	2.5~3.65	1.80~2.85
比容量/mAh·g ⁻¹	150~200	90~120	130~220	200~260	130~150	50~80
循环寿命/次	500~1000	300~700	1000~2000	1000~2000	>3000	3000~7000
安全性	差	较差	较差	差	很好	很好
成本	很高	低	高	高	低	较高
晶体结构	层状	尖晶石	层状	层状	橄榄石	尖晶石或层状

与汽车用动力电池类似, 城市轨道交通后备电源系统对蓄电池也具有较高的要求, 尤其在使用寿命、安全性及成本方面要求更高^[5]。就城市轨道交通领域备电要求而言, 结合应用环境, 磷酸铁锂电池是最好的选择。

1 磷酸铁锂电池和铅酸电池的应用对比

1.1 性能对比

磷酸铁锂电池与阀控式铅酸蓄电池的各项性能对比见表 2, 从表 2 可以看出, 磷酸铁锂电池在能量密度、使用寿命、充放电效率、大电流放电、环境适应性、环保等方面, 都明显优于阀控式铅酸蓄电池。

表 2 磷酸铁锂电池和阀控式铅酸蓄电池性能对比

Table 2 Performance comparison of lithium iron phosphate battery and valve-controlled lead-acid battery

序号	电池性能	铁锂电池	铅酸电池
1	单体电压/V	3.2	2.0
2	质量比能量/Wh·kg ⁻¹	110~130	30~50
3	体积比能量/Wh·L ⁻¹	210~240	80~120
4	循环寿命/次	>3 000	300~500
5	倍率放电能力	4C	1C
6	能量转化效率	>95%	80%
7	工作温度/℃	-20~60	0~40
8	环保性	无污染	污染

1.2 占地面积和重量对比

以北京地铁 8 号线二期车站整合 UPS 为例, 使用上海航天电源技术有限责任公司生产的主备 2 套型号为 ES384V500Ah 的高安全浮充式防火型磷酸铁锂电池组替换原有 2 组 192 只 500Ah/2V 阀控式铅酸蓄电池, 其安装方式、安装尺寸和重量对比见表 3。通过对比可以看出, 磷酸铁锂电池占地面积是铅酸蓄电池的 67%, 重量是铅酸蓄电池的 34%。铅酸蓄电池占地面积过大、重量太重等问题, 严重影响了日后电源系统的扩容改造, 同时日常维护更换也十分不方便。

表 3 磷酸铁锂电池和铅酸电池尺寸和重量对比

Table 3 Comparison of dimensions and weight of lithium iron phosphate and lead acid batteries

序号	电池类型	安装方式	安装尺寸/mm	重量/kg
1	铁锂电池	机柜	6 000×800×2 000	5 500
2	铅酸电池	双层双列	7 968×900×2 000	15 944

1.3 结构对比

阀控式铅酸蓄电池和磷酸铁锂电池安装情况如图 1 和图 2 所示。从图 1 和图 2 可以看出, 相比于阀控式铅酸蓄电池, 磷酸铁锂电池组结构集成度更高, 整体电流稳定性更好, 降低了多组电池外部接线级联

安全风险，同时统一采用标准 4U 电池模块，提高了机房空间的利用率和整体美观度。



图 1 阀控式铅酸蓄电池安装情况
Figure 1 Installation of valve-controlled lead-acid batteries



图 2 磷酸铁锂蓄电池组安装情况
Figure 2 Installation of lithium iron phosphate batteries

1.4 智能化管理对比

铅酸蓄电池在目前使用过程中很少配置电池管理系统，即使配置了电池管理系统通常也是由第三方企业开发，不同厂家的电池和电池管理系统可能存在不兼容情况。磷酸铁锂电池应用时均会配置电池管理系统，通过智能化的电池管理系统，不仅可以对当前电池状态进行精准检测，还可以根据长期数据统计对电池健康状态、劣化程度进行判断，解决了铅酸电池使用时需人工对每只电池进行巡检的问题。

1.5 运维对比

表 4 为磷酸铁锂电池和阀控式铅酸蓄电池维护内容和维护周期对比表。从表 4 可以看出，铅酸电池由于没有入网，为了能掌握电池性能，常规办法就是现场测量，但是测量效率很低。磷酸铁锂电池通过联网技术可以实现蓄电池的远程监控、自动报警、可视化监控，不仅对当前电池状态进行精准检测，还可以根据长期数据统计对电池健康状态、劣化程度进行判断，后期维护工作要明显少于阀控式

铅酸蓄电池。

表 4 磷酸铁锂电池和阀控式铅酸蓄电池运维对比
Table 4 Comparison of operation and maintenance of lithium iron phosphate battery and valve-controlled lead-acid battery

序号	维护内容	维护周期	
		铁锂电池	铅酸电池
1	运行环境温度检测	免维护	每月一次
2	蓄电池外观检测，是否有漏液、爬酸现象	免维护	每季度一次
3	电池架及蓄电池本体清灰	免维护	每季度一次
4	蓄电池端电压现场检测	免维护	每季度一次
5	蓄电池内阻现场检测	免维护	每年一次
6	蓄电池母线连接点紧固	每年一次	每年一次
7	蓄电池核容试验及均充电	每两年一次	每年一次

2 城市轨道交通磷酸铁锂电池的安全性分析

由于城市轨道交通具有建筑结构复杂、客流集中、空间相对密闭、人员疏散困难等特点，相比于其他火灾，城市轨道交通火灾一旦发生，会对人民的生命和财产安全构成严重威胁^[6]。因此，在磷酸铁锂电池大规模应用过程中，电池的安全性能至关重要，必须结合应用的工况特点和要求对磷酸铁锂电池的火灾特性进行深入研究。

原则上，磷酸铁锂电池在正常使用条件下是安全的，人们更加关注在误用或者滥用条件下的安全问题。从根本上来说，磷酸铁锂电池最终表现出来的安全事故都是伴随着内、外部短路，温度急剧升高甚至发生起火、爆炸，即电池热失控。因此，要实现磷酸铁锂电池的安全应用，对各种因素引起热失控的防控是关键。

2.1 电芯失效

电芯安全性失效主要有以下几点。

2.1.1 内部短路

电芯内短路的诱因有机械滥用、生产缺陷和锂枝晶生长，前两种因素只要保证电池的生产品质和电池的规范使用即可避免，而锂枝晶的生长却无法通过上述方法排除。液态电解质的电芯进行充放电循环时，当石墨中所嵌入的锂含量超过其容量后，多余的锂离子就会和负极中穿梭而来的电子结合，由于电流密度和锂离子分布不均等因素，锂离子在负极表面不均匀沉积形成锂枝晶。锂枝晶生长到一定程度后便会刺破隔膜，造成电芯内短路。

2.1.2 漏液

电芯漏液的原因有外力损伤、碰撞、安装不规范造成密封结构被破坏、焊接缺陷、封合胶量不足造成密封性能不好等。电芯漏液后整个电池模块的绝缘失效，容易发生外短路。

2.1.3 负极析锂

过充、快充、电池老化、低温充电等都会导致电芯负极析锂。发生负极析锂后，锂金属不可还原，导致电池容量不可逆衰减。析锂达到一定严重程度，形成锂枝晶，会刺穿隔膜发生内短路^[7]。

2.1.4 电芯鼓胀

电芯胀气主要是因为电池内部发生副反应产生气体，最为典型的是与水发生副反应。此外，高温存储及过充过放也会导致电芯胀气。

2.2 电池管理系统失效

在轨道交通领域，电池管理系统主要实现的功能有：对电池工作状态实施监测；对电池的荷电状态和健康程度进行分析；电池异常状态预警；均衡管理；对电池状态进行实时控制。电池管理系统失效会造成以下严重的事故：

- 1) 电池管理系统电压检测失效导致电池过充电或过放电。
- 2) 电池管理系统温度检测失效导致电池工作温度过高。
- 3) 电磁干扰导致电池管理系统通信丢失，引发电池过充电或过放电。

2.3 Pack 系统集成失效

Pack 系统集成失效通常会造成以下后果。

- 1) 螺母松动、端子接触不良会导致导体连接阻抗过大，造成高压线路温度升高，极端情况下会导致电池系统着火。
- 2) 高压接触器粘连导致电池过充或过放。
- 3) 高压线路老化、绝缘失效、化学腐蚀、电气间隙不足、爬电距离不足、材料选择不当、外来金属导致电池系统外部短路。

3 城市轨道交通磷酸铁锂电池的安全性设计

为避免和防控上述不安全因素产生，磷酸铁锂电池的安全设计是关键。安全的磷酸铁锂电池设计包含电芯成分、电池管理系统功能、安全结构设计。

3.1 电芯成分

磷酸铁锂电池在城市轨道交通应用时通常安装在

专用的电池室内，应用环境友好，不会出现环境过热、短接的情况，因此其应用安全性的关键在于不能出现电池过充。

城市轨道交通磷酸铁锂电池组通常由多节单体电池通过串并联方式组成，单体之间的不一致性会导致在充电过程中各单体电池的电压存在差异，如果没有采取任何的均衡措施，单体之间的差异将逐渐增大，最终导致个别单体过充或过放。因此，传统的磷酸铁锂电池不具备在城市轨道交通领域进行浮充应用的条件^[8-9]。

相比于传统磷酸铁锂电池，此次使用的磷酸铁锂电池为适应轨道交通蓄电池浮充运行要求，在常规磷酸铁锂电池基础上做了以下改进。

1) 电解液中添加一定比例的氧化-还原剂，目的在于在电池内部建立一种防过充的电化学自我保护机制，正常浮充状态，氧化-还原剂相对稳定地存在于电解液中，不参加任何化学或电化学反应，对电池宏观电化学性能没有影响，当电池过充到氧化-还原添加剂的氧化电位时，添加剂在正极氧化，扩散到负极还原，通过添加剂在正负极间的来回穿梭，使电池电压不再升高，避免了正负极活性材料的氧化还原，从而避免过充安全事故的发生^[10]。

2) 选用陶瓷隔膜防止电芯内部短路。

3) 在电解液中添加特殊阻燃添加剂，有效提高电解液燃点，降低电解液的可燃度。

3.2 电池管理系统功能

通过添加氧化-还原添加剂，可以起到一定的自主均衡能力，但长期自主均衡将会使电池过热。为了弥补电池自主均衡能力的不足，ES384V500Ah 磷酸铁锂电池组采用主被动均衡技术，即充电时对电池组中电压最低的单体电池进行补电，对电压最高的单体电池进行放电，实现电池组中各单体电池电压的实时动态均衡，保证每个单体电池都能充满，减少由于自放电等原因导致的容量差异，提高电池一致性。如图 3 所示，自 2020 年 1 月至今，ES384V500Ah 电池组在以 3.45 V/cell 浮充运行过程中，通过主被动均衡使单体电压差保持在 80 mV 以内。

此外，电池管理系统还具有如图 4 所示的功能，可实现对电池的数据采集、安全保护、状态分析、能量控制、信息管理，保证电池安全、高效，长时间稳定工作。

3.3 安全结构设计

ES384V500Ah 磷酸铁锂电池组从电芯、模块、机柜三层级安全结构设计，有效避免火灾风险。

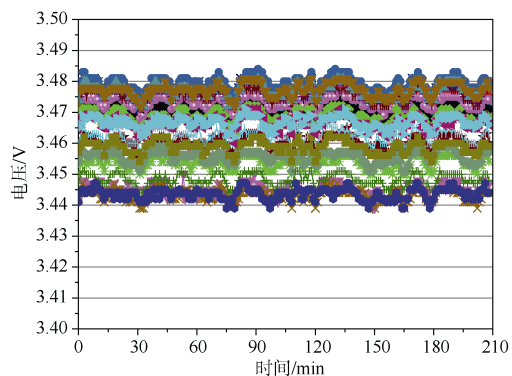


图3 ES384V500Ah 电池组内单体浮充电压曲线
Figure 3 ES384V500Ah Floating voltage curve of single cell in battery pack

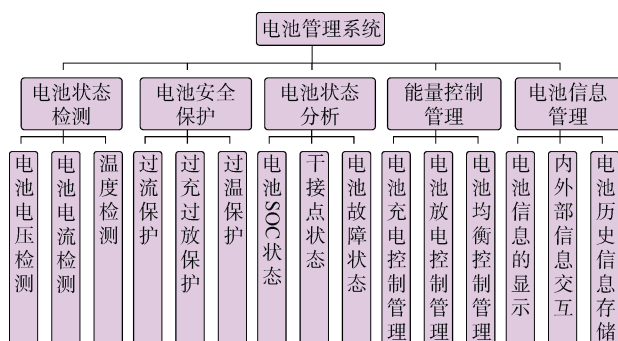


图4 电池管理系统功能

Figure 4 Function of Battery Management System

1) 电芯壳体采用整体拉伸工艺一体化设计,上盖板同电芯壳体采用激光焊接,保证结构强度及密封性。同时顶部采用泄压阀设计,防止内部压力过大导致电池壳体破裂甚至爆炸。

2) 电芯间采用绝缘导热并且阻燃的材料进行隔离,并采用焊接一体化结构连接,在保证可靠的同时,当外部发生短路时,可断开连接,防止短路安全事故的发生。电池模块内部设计导流气路,可有效防止气体聚集在极柱附近。同时,电池模块采用密闭设计,可以有效隔绝空气,在极端情况下不会燃烧。

3) 系统采用 19 英寸标准机柜,可提供 40 U 自主安装空间。在追求通风散热以及轻量化设计的同时满足 IP20 防护等级要求。电池机柜内部所有的电气连接点无一裸露,均采用定制化的 PC 绝缘材料防护,既美观又安全。

4 结语

对比阀控式铅酸蓄电池和高安全浮充式防火型磷酸铁锂电池两种蓄电池在北京地铁 8 号线的运行情况

可以看出,高安全浮充式防火型磷酸铁锂电池组在能量密度、大电流充放电特性、安全性、可靠性、运维等方面更具优势,更适合城市轨道交通的应用。

参考文献

- [1] 刘海鹏. 磷酸铁锂电池在轨道交通供电系统中的应用[J]. 中国科技纵横, 2016, (8): 29-30.
- [2] 宋麟, 李继元. 磷酸铁锂电池在铁路通信领域中的应用[J]. 通信电源技术, 2019, 36(S1): 62-65.
SONG Lin, LI Jiyuan. Application of lithium iron phosphate battery in railway communication[J]. Telecom power technologies, 2019, 36(S1): 62-65.
- [3] 汪伟伟, 丁楚雄, 高玉仙, 等. 磷酸铁锂及三元电池在不同领域的应用[J]. 电源技术, 2020, 44(9): 1383-1386.
WANG Weiwei, DING Chuxiong, GAO Yuxian, et al. Application of LFP and NCM batteries in different fields[J]. Chinese journal of power sources, 2020, 44(9): 1383-1386.
- [4] 李玉昇, 何茜, 张瑜. 通信用锂电池安全设计与应用探讨[J]. 通信电源技术, 2020, 37(z1): 147-151.
LI Yusheng, HE Xi, ZHANG Yu. Discussion on safety design and application of LiFePO₄ battery for communication[J]. Telecom power technologies, 2020, 37(z1): 147-151.
- [5] 蒋新华, 王晓保, 那伟, 等. 磷酸铁锂电池在轨道交通中的应用[C]//上海市电机工程学会、上海市电工技术学会第十一届学术年会论文集, 2012: 105-109.
JIANG Xinhua, WANG Xiaobao, NA Wei, et al. Application research on LiFePO₄ lithium ion battery in rail transportation[C]//Proceedings of the 11th annual conference of ShangHai society for electrical engineering and ShangHai society for electrical engineering technology, 2012: 105-109.
- [6] 孙文海, 李斌兵. 地铁火灾应急预案的制定[J]. 武警学院学报, 2010, 26(4): 19-22.
- [7] 王其钰, 王朔, 张杰男, 等. 锂离子电池失效分析概述[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1008-1025.
WANG Qiyu, WANG Shuo, ZHANG Jianan, et al. Overview of the failure analysis of lithium ion batteries[J]. Energy storage science and technology, 2017, 6(5): 1008-1025.
- [8] 齐明辉, 王政, 严家明, 等. 浮充保护型磷酸铁锂电池在煤矿中的应用[J]. 煤矿安全, 2019, 2(4): 113-116.
QI Minghui, WANG Zheng, YAN Jiaming, et al. Application of floating charge protective iron phosphate lithium battery in coal mine[J]. Safety in coal mines, 2019, 2(4): 113-116.
- [9] 岑凯加. 浮充式保护型磷酸铁锂电池应用研究[J]. 大众用电, 2016, (9): 30-31.
- [10] 杨忠亮, 蒋新华, 於崇干. 磷酸铁锂蓄电池浮充特性提升策略研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(5): 72-75.
YANG Zhongliang, JIANG Xinhua, YU Chonggan. Promotion strategy of LFP battery floating charging characteristics[J]. Low voltage apparatus, 2016(5): 72-75.

(编辑: 王艳菊)