

城市轨道交通车辆钛酸锂电池安全防护技术可行性研究

丁朝奉 张凤丽 赵正虎

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘要 [目的] 锂离子电池的短路、热失控及由此引起的爆燃等安全问题已成为城市轨道交通车辆应用发展的瓶颈之一。因此,城市轨道交通行业急需需要对钛酸锂电池的安全防护技术进行研究,以确保城市轨道交通的正常运营与安全。[方法] 通过电池单体设计的选择、模组的设计与验证,以及电池管理系统的设计、充放电管理、故障管理、系统测试与验证、电池箱体仿真设计、试验验证及其他物理防护措施实施等方面进行分析,验证了钛酸锂电池在城市轨道交通上运用的安全防护可行性。[结果及结论] 通过不同防护措施的实施,可将钛酸锂电池的短路、热失控及爆燃等的安全风险降至可控范围,从而确保钛酸锂电池作为备用及临时动力电源系统在城市轨道交通车辆上安全运用。

关键词 城市轨道交通车辆; 钛酸锂电池; 安全防护

中图分类号 TM912.1:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.032

Feasibility Study on Safety Protection Technology of Lithium Titanate Battery for Urban Rail Transit Vehicles

DING Chaofeng, ZHANG Fengli, ZHAO Zhenghu
(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Safety issues such as short circuit, thermal runaway, and resulting explosion of lithium-ion batteries have become one of the bottlenecks for the application and development in urban rail transit vehicles. Therefore, the urban rail transit industry urgently needs to research the safety protection technology for lithium titanate batteries to ensure the normal operation and safety of urban rail transit. [Method] Through analysis of battery cell design selection, module design and verification, battery management system design, charge and discharge management, fault management, system testing and verification, battery pack simulation design, experimental verification, and implementation of other physical protection measures, the feasibility of safety protection of lithium titanate batteries in urban rail transit is validated. [Result & Conclusion] By implementing various protective measures, the safety risks of short circuit, thermal runaway, and explo-

sions of lithium titanate batteries can be reduced to a controllable range, thereby ensuring the safe application of lithium titanate batteries as a backup and temporary power supply system in urban rail transit vehicles.

Key words urban rail transit vehicle; lithium titanate battery; safety protection

钛酸锂电池具有体积小、质量轻、寿命长、轻量化及节能环保等优良的性能^[1],在地铁、有轨电车等轨道交通车辆中作为自牵引及备用电池得到应用。然而,随着钛酸锂电池越来越广泛的应用,其安全问题也日益凸显,如短路、过热可能引起的爆燃等严重问题。这些问题不仅影响城市轨道交通的正常运营,还会对乘客和运营人员的安全造成严重威胁。本文将针对钛酸锂电池短路及热失控方面的安全风险,在地铁车辆上运用的安全防护措施进行可行性研究,以确保列车的安全运营。

1 电池单体安全防护

蓄电池单体是钛酸锂电池系统的基础组成部分,首先需要确保单体安全。从电池单体的设计及安全性上分析,选用负极活性物质是钛酸锂材料的电池结构,钛酸锂材料的尖晶石结构,具备三维的 Li^+ 迁移通道,更适宜 Li^+ 的嵌入和脱出,即其本身材料属性决定了钛酸锂电池一方面可以安全地适应大倍率充放电工况;另一方面,其具有更高的嵌锂电位(1.55 V),即使低温、大倍率充电情况下,也无法使负极达到锂的还原电位,从根本上消除了金属锂枝晶产生的可能性^[2],降低了电池发生内部短路的风险。电池析锂电位示意图如图1所示。

钛酸锂负极材料作为具有高安全性的电池材料,其高安全性的机制主要是由于在发生短路时(穿刺和杂质造成内部短路),钛酸锂分子状态产生变化: $\text{Li}_{7/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4 \rightarrow \text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$,此时高电

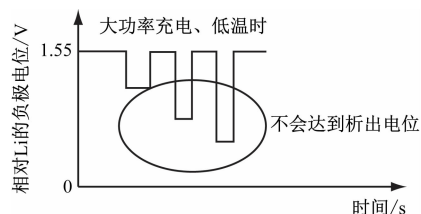


图1 电池析锂电位示意图

Fig. 1 Diagram of battery lithium evolution potential

导率的 $\text{Li}_{7/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$ 转变成为高阻态的 $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$, 而产生的 $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$ 具有较好的绝缘性能, 可有效地降低瞬间电流, 使发热量大幅度降低, 以保证电池在短时间内温升较慢; 同时, 其能有效抑制电池短路后的发热、热量蔓延及热失控。图2为某钛酸锂电池结构示意图。

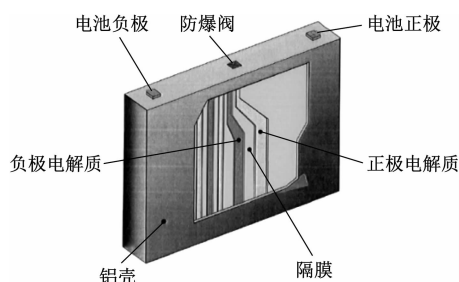


图2 某钛酸锂电池结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of a lithium titanate battery

针对电池过充导致的发热、鼓包问题, 电池单体采用金属外壳结构同时设置泄压通道, 当电芯因过热或其他异常, 内部压力大于泄压阀动作值时, 泄压阀打开, 释放内部压力。

2 电池模组安全防护

根据 GB/T 21413.1—2018《轨道交通 机车车辆电气设备 第1部分: 一般使用条件和通用规则》, DC 110 V 设备最小电气间隙考虑海拔高度为 2 000 m, 修正系数为 1.13 时为 1 mm, 而耐受电压为 1.5 kV。针对此要求, 在绝缘及封装上采用耐受电压可达 10 kV 的蓝膜, 电池间采用满足欧盟标准的 EN 45545-2《铁路应用—铁路车辆的防火保护—第2部分: 材料和元件的防火要求》的 PC(聚碳酸酯) 隔离, 其最小间隙大于 1.5 mm, 耐受电压可达 8 kV, 满足标准及使用要求。同时, 隔板设计为突出加强筋结构, 可隔离热量传递并保障气流畅通, 有利于散热。

为防止模组间短路对电池造成二次伤害, 模组正极设置熔断器。另外, 为保证信号采集准确及安

全, 模组内每个单体均设置电压电流采集点, 除 BMS(电池配有管理系统) 实时监控外, 每个电压采集点均设置防短路熔断器, 从而有效防止采集线造成电池短路。模组结构及短路防护示意图如图3所示。

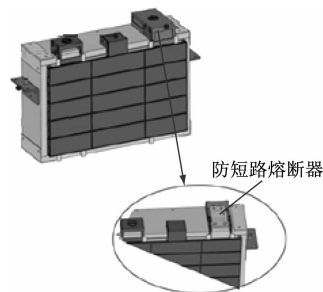


图3 模组结构及短路防护示意图

Fig. 3 Diagram of module structure and short-circuit protection

由于轨道交通车辆的特殊安全需要, 模组结构设计需在轻量化的基础上进行结构加强, 以保证电池在模组内稳定工作。电池及模组除满足 IEC 62928《铁路应用-机车车辆-车载锂离子牵引电池》、IEC 62973-5《铁路应用-机车车辆-辅助电源系统用电池-第5部分: 锂离子电池》等常规标准外, 还需严格按照 Q/CRRC J39《轨道交通用动力电池单体和模块》、TJ/JW 126—2020《机车、动车组用锂离子动力电池试验暂行技术规范第1部分: 电池单体和模块》等标准所规定的安全性要求进行安全试验, 尤其是短路测试试验。

3 电池系统安全防护

BMS 至少具有对电池状态的监测、显示、数据存储、传输、充放电控制及均衡等功能, 其包括电压、电流、温度、SOC(剩余电量)、SOH(健康度)等。在电池状态异常时, BMS 可记录并发出报警信息, 同时能根据控制策略做出相应的保护措施, 以保证电池正常使用并延长使用寿命。当 BMS 检测到单体电压过低、过高、互差过大、总压过高、过低、充电电流过大及 SOC 过低等故障时, 需根据具体数值来判断故障等级, 并发送相应报警信息。当故障等级达到严重时, BMS 会上报充电机, 并主动切断主接触器来保护电池。BMS 架构示意图如图4所示。

短路及热失控主要来源于充放电的过程, 而 BMS 能根据不同充电阶段的特点, 输出允许最大电压 U_{\max} 及电流 I_{\max} , 充电机按接收到的允许最大充

电电压及电流后对电池进行充电,可避免热失控。电池充电逻辑示意图如图5所示。

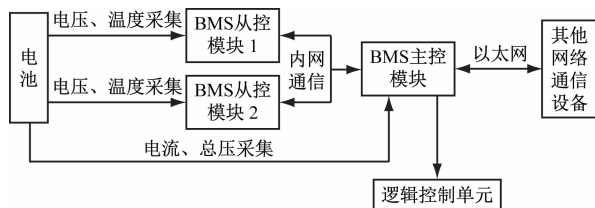


图4 BMS架构示意图

Fig.4 BMS architecture diagram

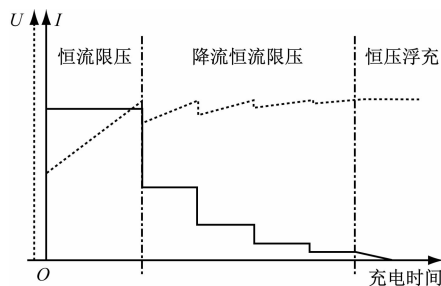


图5 电池充电逻辑示意图

Fig.5 Diagram of battery charging logic

轨道交通车载电池的特点：

1) 作为备用能源,长期工作在浮充状态,为避免电池差异在长期浮充状态下发生故障,BMS实时检测电池单体最大电压与最小电压差;当互差达到设定阈值时,BMS启动均衡功能;此时,最高电压单体以微小的电流持续放电,直至单体电压互差小于设定值后关闭均衡工作模式。正常充电温升曲线如图6所示。

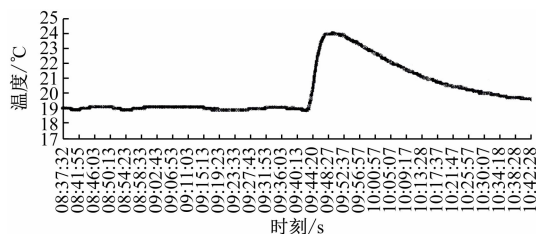


图6 正常充电温度曲线

Fig.6 Curve of normal charging temperature rise

2) 电池间歇需要作为动力电池使用,其特性使得电池组需以约 $2C$ (2倍额定容量放电)的电流放电,但系统由多个模组组成,因此需分别检测模组温度,来控制模组间差异,以保证电池组温升及运行状态正常。大电流充放电温升曲线如图7所示。

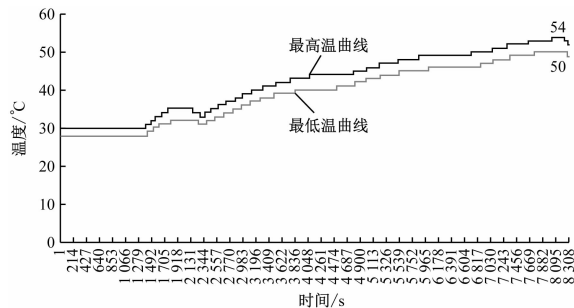


图7 大电流充放电温度曲线

Fig.7 Curves of high current charging and discharging temperature rise

除上述的逻辑外,为防止系统过充,针对充电设置以下多重安全防护:

1) BMS设定的单体充电上限电压为 U_h ,当电压超过 $U_h + 0.15\text{ V}$ 时,系统将发送报警信息至TC-MS(列车监控管理系统),提示进行系统检查。同时,BMS控制充电机逐渐降低输出电压至标称值,使系统进入放电状态,直至系统总压降低至标称值;这使得单体平均电压至标称值,低于安全标准电压 X ,可防止过充。若出现通信故障,充电机也将直接降低输出电压至标称值。

2) 若上述防护失效,充电机继续充电:当单体电压超过 $U_h + 0.25\text{ V}$ 或系统总压超过设定值时,BMS切断供电接触器以隔离电池,如因BMS系统故障未切断接触器,系统电压继续升高,电压保护继电器触发,通过硬线切断接触器,防止过充。

3) 若上述防护全部失效,BMS将分别通过网络数据流及硬线给充电机发送停机指令,要求停止外部供电,防止过充。

4) 在前述充电防护全部失效的情况下,根据DC 110 V供电标准,充电机最高输出电压为137.5 V,通过电池组串并联设计,使得平均到单体电池的最高电压低于安全标准电压 U_h ,从根本上决定电池系统的安全性。

当电池严重馈电后,BMS断开供电接触器进行欠压保护。此时,系统需按设置的应急充电进行补充电,同时保护逻辑将禁止列车激活。为降低充电温升及防止热失控,应急充电机需采用限制电流方式进行充电,并时刻监控总电压。当总电压达到预定值时即可结束应急充电,按照首次上电要求,先激活BMS系统并完成检测后系统方能正常工作。

4 电池箱体及其他防护

电池箱作为电池系统的承载载体,防护安全性

也至关重要。首先,从材料选择及结构设计上入手,箱体框架采用强度较高的金属材料,能够直接承担电池的载荷并实现移动。同时,设置锁定装置及限位止挡,保障运营及检修过程中电池稳定,防止电池受外力作用导致内部严重变形受损发生内短路,引发剧烈电化学反应,从而产生高热量,最终导致热失控,引起电池的燃烧爆炸^[3-4]。同时,箱体上设置防爆阀,确保箱内气压过高时的有效泄压,同时箱门设置防脱结构,实现箱门可靠连接不分离。

其次,从仿真及试验验证上展开,电池箱严格按照 TJ/JW 127—2020《机车、动车组用锂离子动力电池试验暂行技术规范第 2 部分:电池包和系统》等标准进行仿真,并进行箱体试验验证,以保证电池在使用及碰撞中不会发生裂纹及变形,从而最大限度降低电池发生短路的风险。箱体结构变形仿真分析截图见图 8。

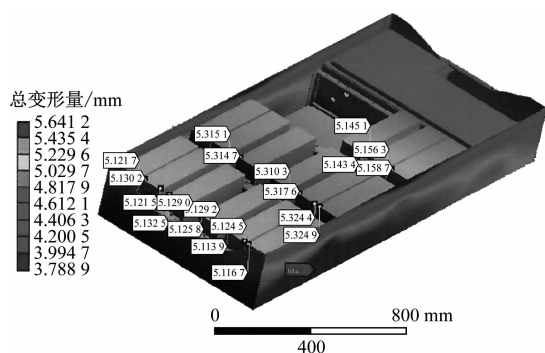


图 8 箱体结构变形仿真分析截图

Fig. 8 Screenshot of box structure deformation simulation analysis diagram

然后,是箱体内电气系统零部件选择及防护。设备选型方面,可根据工况计算,选用符合轨道交通标准及实际工况要求的高可靠性部件,所有通信线缆均采用屏蔽线缆并可靠接地;采用金属外壳的BMS系统设备降低电磁干扰影响。金属裸露外壳均采取接地保护,采用至少2个接地点的冗余及可靠电气连接,裸露器件及电缆均采用绝缘护套二次防护;接口方面,内外接口均设置防护器件(如熔断器、二极管等),防止因过流或短路等造成的电池及器件损伤。防火及阻燃方面,非金属材料选用性能符合EN 45545-2的阻燃材料,最大限度防止火灾发生。

再次,箱体采用水密性全密封设计,选用密封等级为 IP67 以上的连接器,箱体防护性能至少满足 IP54 等级的要求,并按照 GB 60 529《外壳防护等级

(IP 代码)》进行箱体试验验证。

最后,电池箱系统参照 TJ/JW124《机车、动车组牵引用动力电池系统安全设计暂行技术规范》中灭火的要求进行设计,配置主动灭火装置,从而最大限度地防止火灾的发生。主动灭火系统构成示意图见图9。灭火装置的灭火剂采用常压存贮全氟己酮,其具有良好的气相绝缘性能,耐电强度可达110 kV;可带电启动且喷发后能全部气化,无污渍,无痕迹,对电池及精密设备无任何影响,适宜扑灭电气火灾。全氟己酮还具有快速的热交换效率,可瞬间降低箱内温度,灭火剂分子亦可破坏燃烧的链式反应自由基,以达到抑制火灾的作用。

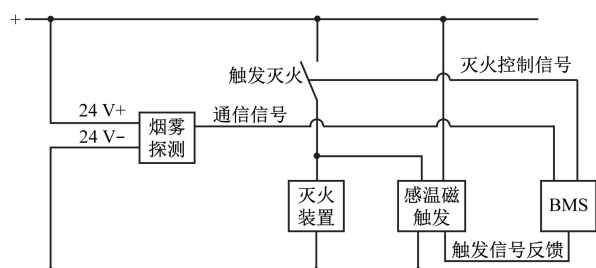


图9 主动灭火系统构成示意图

Fig. 9 Diagram of active fire extinguishing system composition

5 结语

钛酸锂电池系统的可靠性和安全性从器件、结构、电气性能、防火性能及使用与维护等多方面进行分析,通过相关措施及危险规避对运用过程中可能出现的短路进行了分析规避。当电池发生短路时,电池系统具有保护机制避免短路造成整个供电系统的损伤,BMS 会迅速切断主接触器进行保护,停止输出,并可将电池短路后的实时数据上传至列车管理系统,在发生火灾时亦可通过灭火装置快速灭火。故此,钛酸锂电池系统及相关防护措施降低了电池发生短路的可能性,有效地规避了电池短路及热失控后所造成的风险,可保障电池系统的可靠性及安全性,提高钛酸锂电池系统在城市轨道交通车辆上运用的安全性能。但是,由于城市轨道交通车辆运行环境的特殊性,钛酸锂电池在城市轨道交通车辆上运用的可靠性及安全性问题还需要经过长期实际运用的检验。

(下转第 166 页)

表 3 2 种车型能耗试验数据对比表

Tab.3 Comparison of energy consumption experimental results between two train models

项目	异步齿轮箱列车能耗/(kWh)	永磁直驱列车能耗/(kWh)	永磁直驱列车能耗降低比例/%
上行	148.1	114.6	22.6
下行	191.7	150.2	21.6
合计	339.8	264.8	22.1

参考文献

- [1] 刘军良, 张彦华, 马喜成, 等. 降低地铁车辆牵引能耗的措施与建议[J]. 电力机车与城轨车辆, 2016, 39(1): 75.
LIU Junliang, ZHANG Yanhua, MA Xicheng, et al. Measures and suggestions for reducing traction energy consumption of metro vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016, 39(1): 75.
- [2] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究[J]. 机车电传动, 2010(5): 15.
FENG Jianghua. Study on the permanent magnet synchronous motor drive system of rolling stock[J]. Electric Drive for Locomotives, 2010(5): 15.
- [3] 吴冬华, 孙传铭. 基于永磁电机牵引系统高速动车组的研制[J]. 机车电传动, 2019(1): 35.
WU Donghua, SUN Chuanming. Development of high-speed EMUs based on permanent magnet motor traction system[J].

Electric Drive for Locomotives, 2019(1): 35.

- [4] 周永刚, 陈超录, 刘雄. 地铁永磁直驱牵引系统设计方法[J]. 机车电传动, 2015(6): 34.
ZHOU Yonggang, CHEN Chaolu, LIU Xiong. Metro permanent magnet direct-driving traction system design method[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(6): 34.
- [5] 刘宝林. 地铁列车能耗分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(4): 65.
LIU Baolin. Analysis on energy consumption of metro train[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2007, 30(4): 65.
- [6] 梁广深, 黄隆飞. 地铁 B 型车牵引能耗与再生制动节能效果分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(2): 27.
LIANG Guangshen, HUANG Longfei. Analysis of energy consumption and renewable energy saving effect of metro B-type train[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(2): 27.
- [7] 楚永萍, 胡定祥, 周亮. 地铁车辆新型永磁直驱转向架的设计和分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(6): 17.
CHU Yongping, HU Dingxiang, ZHOU Liang. Design and analysis of a new-type metro bogie with permanent magnet driving motors[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 17.

· 收稿日期:2023-12-05 修回日期:2024-01-05 出版日期:2024-05-10
Received:2023-12-05 Revised:2024-01-05 Published:2024-05-10
· 通信作者:陈小伟,正高级工程师,csrxcw@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 162 页)

参考文献

- [1] 胡振恺, 雷博, 李勇琦, 等. 储能用锂离子电池安全性测试与评估方法比较[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1650.
HU Zhenkai, LEI Bo, LI Yongqi, et al. Comparative study on safety test and evaluation methods of lithium-ion batteries for energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1650.
- [2] 张双虎, 迟彩霞, 乔秀丽, 等. 锂离子电池负极析锂问题的分析及对策[J]. 电源技术, 2023, 47(6): 709.
ZHANG Shuanghu, CHI Caixia, QIAO Xiuli, et al. Analysis and solutions of lithium plating on anode for lithium-ion battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(6): 709.
- [3] 赵亚文, 黄彥, 张言茹. 轨道交通动力锂离子电池安全性测

试标准分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2505.

- ZHAO Yawen, HUANG Yu, ZHANG Yanru. Analysis of safety test standard of rail transit power lithium-ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2505.
- [4] 周礼. 电动汽车锂离子电池温度性能研究[J]. 专用汽车, 2022(5): 15.
ZHOU Li. Study on temperature performance of lithium-ion battery for electric vehicle[J]. Special Purpose Vehicle, 2022(5): 15.

· 收稿日期:2023-11-12 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-12 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10
· 通信作者:丁朝奉,高级工程师,cfding_csr@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license