

锂离子电池包火灾抑制实验研究

林涛¹, 刘正元², 吕婷婷³, 张瑾⁴, 林文彪¹, 赵旭峰¹, 蒋奉兵¹

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 中车大连机车研究所有限公司, 辽宁 大连 116000;
3. 中车大连机车车辆有限公司, 辽宁 大连 116045; 4. 湖南有色金属职业技术学院, 湖南 株洲 412006)

摘要: 商用新能源车辆锂离子电池包电压高、能量大, 为保证车辆安全运行, 通常需配备灭火装置, 预防电池包热失控或在发生热失控后及时扑灭明火。以锂离子电池包和全氟己酮灭火装置为实验对象, 研究全氟己酮灭火装置对锂电池的降温 and 灭火效果。实验结果表明, 当电池温度到达 80 °C 时释放全氟己酮, 可在 333 s 内将电池温度降低到 60 °C, 降温速率为 3.6 °C/min, 全氟己酮灭火装置对于锂电池包潜在的热失控具有缓和预防作用; 当电池发生热失控并出现持续性明火时释放全氟己酮, 可在 18 s 内将明火扑灭, 且不复燃, 全氟己酮灭火装置对于锂电池包热失控初期产生的火灾具有良好的灭火效果, 可阻止或延缓锂电池包热失控的进一步蔓延。

关键词: 锂离子电池包; 全氟己酮灭火装置; 降温; 灭火

中图分类号: TM911

DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2025.17.059

Experiments on Fire Suppression of Lithium-ion Battery Pack

LIN Tao¹, LIU Zhengyuan², LV Tingting³, ZHANG Jin⁴, LIN Wenbiao¹, ZHAO Xufeng¹, JIANG Fengbing¹

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. CRRC Dalian Locomotive Research Institute Co., Ltd., Dalian 116000, China;

3. Zhongche Dalian Locomotive Vehicle Co., Ltd., Dalian 116045, China;

4. Hunan Non-ferrous Metals Vocational and Technical College, Zhuzhou 412006, China)

Abstract: Lithium-ion battery packs in commercial new energy vehicles possess high voltage and substantial energy capacity. To ensure vehicle safety, fire suppression systems are typically installed to prevent thermal runaway or to promptly extinguish open flames following thermal runaway events. This study examines the cooling and fire suppression performance of perfluorohexanone extinguishing devices applied to lithium-ion battery packs. Experimental results demonstrate that when the battery temperature reaches 80 °C, the release of perfluorohexanone reduces the battery temperature to 60 °C within 5 minutes and 33 seconds, achieving a cooling rate of 3.6 °C per minute. The perfluorohexanone extinguishing system effectively mitigates and prevents potential thermal runaway in lithium battery packs. Furthermore, upon occurrence of thermal runaway accompanied by sustained open flames, perfluorohexanone extinguishes the flames within 18 seconds without re-ignition. These findings confirm that perfluorohexanone extinguishing devices provide effective fire suppression during the early stages of thermal runaway and can inhibit or delay further propagation of thermal events in lithium-ion battery packs.

Key words: lithium-ion battery pack; perfluorohexanone fire suppression devices; cooling; extinguishing

0 引言

由于在能量密度、循环寿命、节能环保等方面具有优良的性能, 锂离子电池包已在新能源车辆中得到广泛应用。商用新能源车辆锂离子电池包电压高、能量大, 因此在安全性方面具有更高的要求, 通常需配备消防灭火装置。为保证电池包的应用安全, 需对消防灭火装置的灭火效能进行研究, 确保能有效预防锂电池热失控或在出现热失控时能及时熄灭明火并防止复燃, 阻断危害的进一步蔓延。

目前, 锂电池灭火实验的研究大多集中在单体锂电池或模组层面, 无法有效验证灭火剂对电池包的火灾抑制效果。通过搭建实验平台, 以锂离子电池包和全氟己酮灭火装置为实验对象, 研究全氟己酮灭火装置对锂电池的降温效果, 以及验证锂离子电池包热失控产生持续明火时全氟己酮灭火装置的火灾抑制效果。

1 锂电池灭火技术发展现状

1.1 锂离子电池灭火技术分类

相比传统火灾, 锂电池灭火主要有以下两个难题: 一是锂电池火灾为气液复合燃烧, 扩散蔓延迅速, 快速灭火

收稿日期: 2025-05-20

作者简介: 林涛(1987—), 从事电化学储能系统技术研究工作。

难度大；二是锂电池热失控为电化学反应，可自发持续，灭火后防复燃难度大。常用的灭火剂包括水基型灭火剂、气体灭火剂、溶胶灭火剂等^[1]。不同种类灭火剂的优缺点如下。

(1)水基型灭火剂。水基灭火剂使用较广泛，降温效果好，主要原因是水的比热容较大，能快速吸收大量热量，使电池内部未反应的活性物质降温，抑制电池进一步的温升。但新能源车辆锂离子电池包电压高，注水可能导致锂离子电池内部短路，造成设备大面积损坏，存在扩大火势的风险，且电池包有外壳封闭，大部分水滴因受遮挡而无法抵达火焰中心区，造成灭火效率降低。

(2)气体灭火剂。目前在锂电池储能系统中广泛应用的灭火气体为七氟丙烷(C_3HF_7)和全氟己酮($C_6F_{12}O$)，灭火机理包括物理抑制和化学抑制。研究表明七氟丙烷可在几秒内迅速扑灭锂电池明火，但喷射完成后容易发生复燃^[2]，而且七氟丙烷等传统氢氟烃灭火剂由于具有明显的温室效应，使用逐步受限；全氟己酮主要通过相变吸热，降低电池表面温度^[3]，此外可通过含氟物质(CF_3 、 CF_2)捕获燃烧自由基，快速灭火。全氟己酮和七氟丙烷灭火剂在电化学储能领域应用均较为广泛。

(3)溶胶灭火剂。气溶胶因具有环境友好、无毒无害、成本低及维护方便等特点^[4]，故目前已成为主流的灭火剂之一，但仍缺乏冷却能力，在应用期间，电池温度仍处于较高水平，灭火剂停止释放后，电池极易发生复燃。

1.2 全氟己酮灭火剂在锂电池应用研究现状

目前的锂电池灭火研究主要集中在电池单体或模组实验层面。文献[5]搭建了锂电池燃烧-抑制实验平台，以额定容量为150 Ah的三元铝壳动力锂离子电池单体为研究对象，研究全氟己酮及细水雾灭火装置对热失控锂离子电池的灭火降温效果，结果表明全氟己酮灭火装置能快速灭火，最大降温速率为15.4 °C/s。文献[6]开展了全氟己酮对车用三元锂离子电池热失控火灾的灭火实验，结果表明三元锂离子电池热失控时表面最高温度超过500 °C，表面最大升温速率达到18.93 °C/s；全氟己酮灭火剂能有效扑灭电池初期明火，并有效降低电池表面最高温度和最大升温速率。文献[7]探讨了储能电站电池火灾抑制技术，通过实验研究了全氟己酮对243 Ah储能磷酸铁锂锂离子电池的单体、电池模组的灭火及热失控传播抑制效果，为储能电站锂离子电池系统的消防设计提供了理论依据和技术支持。

2 实验设计

2.1 实验条件

实验在(25±10)°C(室温)、15%~90%相对湿度、86~106 kPa大气压力的环境中进行。测量仪器仪表及测量精度：K型铠装热电偶，测量精度为0.1 °C；万用表，测量精度为0.001 V。

2.2 实验对象描述

(1)实验电池包。电池包由若干个方形铝壳磷酸铁锂电池单体串联组成，质量为200 kg，尺寸为930 mm×680

mm×250 mm，外壳防护等级为IP67，壳体安装有消防火灾探测器及灭火喷头。实验前将电池包充满电^[8]。

(2)全氟己酮灭火装置。灭火剂采用全氟己酮，目前全氟己酮气体作为新型灭火剂尚缺乏有指导意义的设计规范(标准)。山东省发布了地方标准DB 37/T 3642—2019《全氟己酮灭火系统设计、施工及验收规范》^[9]，给出了气体灭火浓度的计算方法。按照该标准进行灭火剂用量计算：

$$W=K \times \frac{V}{S} \times \frac{C_1}{100-C_1}$$

式中，W为灭火设计用量或惰化设计用量，kg； C_1 为灭火设计浓度或惰化设计浓度(%)，取8；S为灭火剂过热蒸气在101 kPa和防护区最低环境温度下的比容，m³/kg；V为防护区的净容积，按照电池包体积，取0.158 m³；K为海拔高度修正系数，按规定取1。

灭火剂在101 kPa大气压、不同温度下的过热蒸气比容S为：

$$S=K_1+K_2T=0.05544$$

式中， $K_1=0.0664$ ； $K_2=0.000274$ ；T为防护区内最低环境温度，按常规取-40 °C。

由此可计算出W=0.248 g；考虑到1.5倍的过量系数，5%瓶组残余药剂量，及先降温、后灭火的工作模式，采用不小于1.3 kg的双瓶灭火剂组组成的灭火装置，可满足锂离子电池包降温和灭火的实验需求。

2.3 实验平台搭建

参考CCCF/XFJJ-01《电动客车动力锂离子电池箱火灾防控装置通用技术要求》^[10]，按照如下实验步骤搭建实验平台。

(1)将电池单体等效替代物、被测电池单体、监测模块等按图1所示位置安装于电池包内部，并于被测电池单体极耳处及背部中心位置用高温胶带粘贴热电偶，标记热电偶编号。

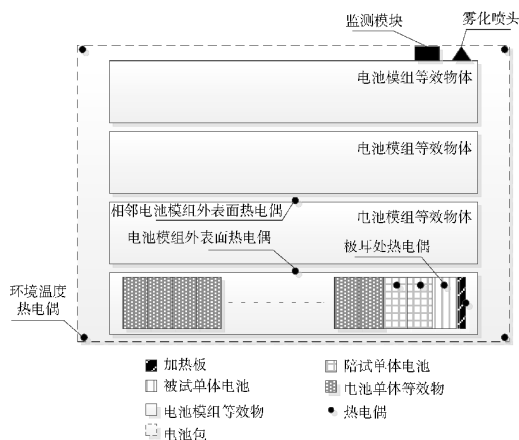


图1 实验电池包内部布置示意图

(2)将被试电池单体与可控温加热板压紧，保证二者紧密接触。

(3)介质释放管路组件安装在磷酸铁锂电池包端部(距电池模组最远端)，模拟最差喷射情况。

(4)将抑制主机或消防钢瓶连接至介质喷射管路组件。

(5)将监测模块、内置摄像头、热电偶通信线缆连接

至数据采集设备。

(6)实验过程中记录的所有热电偶温度数据,通过数据采集盒传至上位机,上位机软件每秒记录一次所有通道的温度数据并保存为TXT格式输出,输出文件包含时间、通道号及温度数据;监测模块的探测数据通过CAN通信传至消防控制器,再由消防控制器通过以太网传至上位机,上位机软件每秒记录一次所有探测数据并保存为Excel格式输出。设备接线拓扑图如图2所示。

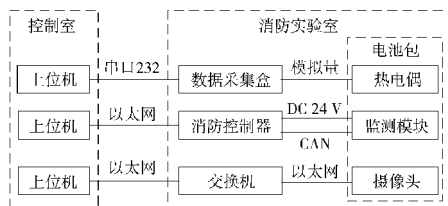


图2 实验设备接线拓扑图

(7)架设视频采集设备并开启。

(8)检查实验设备连线,确认所有设备处于工作状态。

2.4 实验项目与方法

磷酸铁锂电池包火灾抑制实验包括电池包降温实验和电池包灭火实验。

2.4.1 电池包降温实验

降温实验主要研究全氟己酮灭火装置的降温效果。当电池单体到达一定温度,有热失控风险时,通过提前释放灭火剂对锂电池进行降温,预防潜在的热失控和热扩散风险。

(1)如图1所示,将热电偶布置在电池单体、电池模组及电池包中,监测环境和锂电池不同位置的温度。

(2)启动可控温加热板,当电池单体极耳处温度到达80℃且维持10s以上时,灭火装置自动触发降温信号,执行降温喷射流程,将其中1瓶全氟己酮灭火剂喷射出进行降温。

(3)灭火装置开始喷射后,记录电池包内各测温点的温度数据。

2.4.2 电池包灭火实验

灭火实验主要研究全氟己酮灭火装置对锂电池明火的抑制效果。当个别电池单体发生热失控并出现持续性的明火时,通过扑灭热失控初期产生的火焰,避免热失控面积进一步扩大并防止复燃。

(1)如图1所示,将热电偶布置在电池单体、电池模组及电池包中,监测环境和锂电池不同位置的温度。

(2)启动加热板,加热电池单体直至发生热失控且泄压阀打开,关闭加热板。

(3)开启泄压阀附近高压电点火装置直至出现明火,起火后持续燃烧3min或被加热电池单体背面温度超过150℃(以先到者为准)(参考CCCF/XFJJ-01《电动客车动力锂离子电池箱火灾防控装置通用技术要求》)时,手动启动灭火装置,执行灭火喷射流程,将另外1瓶全氟己酮灭火剂喷射出进行灭火。

(4)明火扑灭后,每隔3min在电池包内采用电点火装置点火1次,观察电池包是否有复燃现象,记录规定时

间内电池包各测温点的温度数据。

3 结果与分析

3.1 降温实验结果

按照2.4.1进行电池包降温实验,电池单体极耳处温度到达80℃且维持10s以上,启动喷射全氟己酮灭火剂,喷射后电池单体极耳处温度和电池单体背部温度变化如图3所示。可以看出,1123s启动灭火抑制装置喷射时,电池单体极耳处温度为80℃,1456s时喷射完毕,电池单体极耳处温度降低至60℃,持续时间为333s,降温速率为3.6℃/min。停止喷射后,电池温度缓慢下降,4000s时停止实验,电池温度为41℃。从停止喷射到停止实验,降温速率为0.45℃/min。由此可知,全氟己酮持续喷射过程的降温速率远高于停止喷射后的降温速率,对于锂电池潜在的热失控具有预防作用。

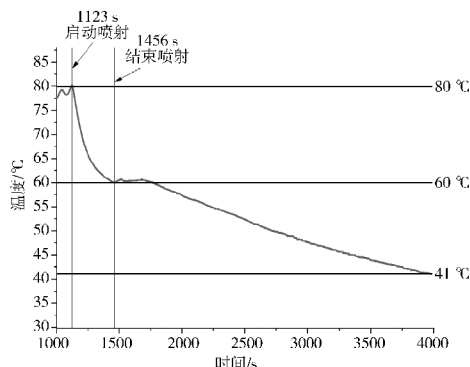


图3 全氟己酮降温实验温度随时间变化曲线

3.2 灭火实验结果

按照2.4.2进行电池包灭火实验,电池单体在364s开启泄压阀,发生热失控,随后启动泄压阀附近的高压电点火装置,对热失控产生的可燃气体进行点火;电池包在507s出现明火,持续186s后在693s启动喷射全氟己酮灭火剂;喷射至711s,明火被扑灭,直至3000s时实验结束,每隔3min在电池包内采用电点火装置点火1次,均出现复燃现象。实验后检查电池单体状态,热失控电池单体的相邻电池单体均未发生热失控。电池单体极耳处温度变化如图4所示。全氟己酮可在明火出现后18s扑灭火焰,且不再复燃,对于锂电池热失控初期产生的火灾具有良好的灭火效果,可阻止或延缓锂电池热失控的进一步蔓延。

4 结语

本研究使用全氟己酮灭火装置对锂离子电池包进行降温和灭火实验,实验结果表明:在电池温度上升至80℃但尚未产生热失控时释放全氟己酮灭火剂,可在5分33秒内将电池温度降低到60℃,降温速率3.6℃/min,全氟己酮灭火装置对于锂电池潜在的热失控具有缓和预防作用;在锂电池发生热失控并出现持续性的明火时释放全氟己酮灭火剂,可在18s内扑灭明火且不复燃,全氟己酮灭

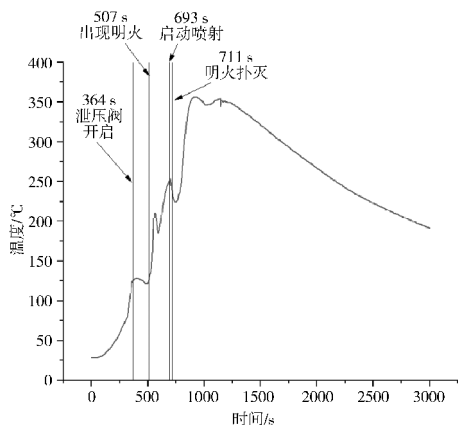


图4 全氟己酮灭火实验温度随时间变化曲线

火装置对于锂电池包热失控初期产生火灾具有良好的灭火效果，可以阻止或延缓锂电池包热失控的进一步蔓延。研究可为锂离子电池包消防灭火装置的实验项点、实验方法和实验评定标准的选择与设计提供借鉴，并为全氟己酮灭火装置在锂电池包或由多个电池包串并联组成的电池系统层级的灭火效果提供数据支持，对车载动力电池的消防设计具有重要意义。

参考文献

[1]刘显君,段强领,黎可,等.多种灭火剂扑救大容量锂离子电

池火灾的实验研究[J].储能科学与技术,2018,7(6):1105-1112.

[2]黄强,陶风波,刘洋,等.气液灭火剂对磷酸铁锂电池模组灭火能效研究[J].中国安全科学学报,2020,30(3):53-59.

[3]余彬彬,蒋新生,禹进,等.全氟己酮抑制航空煤油燃烧实验及化学动力学研究[J].化工学报,2022,73(4):1834-1844.

[4]周云鹏,李莹滢.电化学储能电站火灾特点及灭火剂选用分析[J].山东化工,2022,51(9):192-194.

[5]谢卓衡,王子阳,张刚,等.全氟己酮及细水雾灭火装置对大容量三元锂离子电池的灭火实验[J].储能科学与技术,2022,11(2):652-659.

[6]周洁,何晓.全氟己酮和细水雾抑制三元锂离子电池火灾有效性研究[J].消防科学与技术,2023,2(18):236-240.

[7]Lin Z,Fu M Y,Yong Q Li,et al.Experimental study on the efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing large-scale battery module fire[J].Fire Technology,2023,59:1247-1267.

[8]Huang P F,Wang Q S,Li K,et al.The combustion behavior of large scale lithium titanate battery[J].Scientific Reports,2015,5:7788-7791.

[9]DB 37/T 3642—2019 全氟己酮灭火系统设计、施工及验收规范[S].

[10]CCCF/XFJJ-01 电动客车动力锂离子电池箱火灾防控装置通用技术要求[S].

(上接第 200 页)

5 实例分析

5.1 工程背景

以一栋高层办公建筑为例，建筑总高度为 52.8 m，共 17 层。该建筑的电气工程复杂，强电竖井需安装多种电气设备，包括配电柜、开关柜、变压器、母线槽、电缆桥架及配电箱等。该办公建筑的供电电压为 220 V，通过阻燃电力电缆由室外变电站进行供电，高压配电室和低压配电室都设置在地下室内部。

5.2 指标设置

对该工程运用本文方法安装母线槽、配电箱、电缆桥架和电缆，通过对安装完成后强电竖井内电气设备进行检测和性能测试，观察该方法是否可以提高强电竖井内电气设备的安装质量。

5.3 结果分析

本工程电气设备检测结果和性能测试结果见表 1。可以看出，本文方法能够减少电气设备的本身故障和安装过程中的故障问题，保障各电气设备正常运行，满足了建筑物的电气需求。

表 1 电气设备检测结果

电气设备	设备故障检测	性能测试
配电箱	配电箱牢固可靠	配电箱正常运行

续表

电气设备	设备故障检测	性能测试
母线槽	母线槽无损伤、无变形	电气设备的正常运行
电缆桥架	能够承受所铺设电缆的重量,定位准确	吊线定位、支架距离控制正常
电缆	电缆无损坏和磨损	电缆性能正常

6 结语

本文通过制定科学的施工质量控制措施，显著提升电气设备的安装质量，降低故障发生的可能性，从而保障建筑电气系统的整体性能，但本文技术在电气设备安装成本消耗上并未采取一定的措施，因此未来应继续探索这一领域，不断引入新技术、新工艺和新材料，降低成本的消耗，进一步提高电气设备的安装施工水平。

参考文献

[1]郑树国.风力发电项目升压站电气设备的安装调试及管理[J].水利水电技术(中英文),2022,53(S2):83-85.

[2]贾志杰,范松海,王志川,等.高压开关柜局部放电检测设备的机械特性保护与检修[J].铸造,2022,71(8):1082-1083.

[3]杨敏,王成.住宅建筑电气工程强电竖井内电气设备安装施工研究[J].居舍,2024(23):69-72.

[4]王永卿.建筑电气强电竖井内电气设备安装施工质量控制分析[J].建材发展导向,2024,22(11):22-24.