

中文引用格式:何路,付江锋,孙蓉,等. 气凝胶灭火剂防控锂电池热失控效能研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(5):153-160.

英文引用格式:HE Lu, FU Jiangfeng, SUN Rong, et al. Research on effectiveness of aerogel fire extinguishing agents in preventing thermal runaway of lithium batteries[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 153-160.

气凝胶灭火剂防控锂电池热失控效能研究^{*}

何路¹副教授, 付江锋¹, 孙蓉²高级工程师, 朱国庆¹教授,

程庆迎¹副教授, 郭峰^{**1}特聘研究员

(1 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;

2 国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0757

资助项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3009900);国家消防救援局2023年科技项目(2023XFCX16);江苏省科技计划项目(BE2023688);“双一流”建设提升自主创新能力项目(2022ZZCX05K05)。

【摘要】 针对气凝胶灭火剂在锂离子电池热失控防控中的效能评价问题,选取三元铝壳单体锂电池和18650电池模组为试验对象,采用不同灭火处置方式系统开展灭火剂效能对比试验,并与水的灭火效能进行对比。结果表明:气凝胶灭火剂对不同数量三元铝壳单体锂电池和18650电池模组均表现出比水更优异的灭火性能和降温效果;对于4块三元铝壳单体锂电池,使用水灭火后电池温度回升至492℃;而气凝胶灭火剂的灭火速度为水的4.5倍,并能有效防止电池的复燃;对于8块三元铝壳单体锂电池以及2个18650电池模组,气凝胶灭火剂仍展现出良好的灭火效果,灭火时间短,降温效果显著,无复燃。采用大流量持续喷射气凝胶灭火剂灭火、大流量喷射灭火后小流量降温以及容器内喷射并淹没等不同的灭火策略,具有不同的灭火效果。气凝胶灭火剂不仅能快速扑灭初期电池火灾,而且其预热发泡机制和良好的泡沫稳定性,可有效降低电池温度和防止可燃气体与空气的进一步混合。

【关键词】 锂电池; 灭火效能; 热失控; 气凝胶灭火剂; 灭火处置

Research on effectiveness of aerogel fire extinguishing agents in preventing thermal runaway of lithium batteries

HE Lu¹, FU Jiangfeng¹, SUN Rong², ZHU Guoqing¹, CHENG Qingying¹, GUO Feng¹

(1 School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 2 Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing Jiangsu 211103, China)

Abstract: In order to evaluate the effectiveness of aerogel fire suppressants in preventing and controlling thermal runaway of lithium-ion batteries, this study selected aluminum-shell ternary lithium-ion battery cells and 18650 battery modules as experimental subjects. By employing differentiated fire suppression approaches (including application methods and operational parameters), comparative experiments on extinguishing efficacy were conducted in a systematic manner, with parallel comparisons to water-based fire suppression systems. The results show that the aerogel extinguishing agent has better fire extinguishing

* 文章编号:1003-3033(2025)05-0153-08; 收稿日期:2025-01-15; 修稿日期:2025-03-21

** 通信作者:郭峰(1990—),男,河北涿州人,工学博士,特聘研究员,主要从事燃烧学、火灾科学及消防工程方面的研究。E-mail: cumt-guofeng@hotmail.com.

performance and cooling effect than water for different quantities of ternary aluminum-shell single lithium batteries and 18650 battery modules. For four ternary aluminum shell single lithium batteries, using water to extinguish fire will cause the battery temperature to rise to 492 °C, which cannot quickly and effectively reduce battery temperature. The extinguishing speed of an aerogel extinguishing agent is 4.5 times that of water, and it can effectively prevent the battery from reburning. For 8 ternary aluminum shell single lithium batteries and two 18650 battery modules, the aerogel extinguishing agent still shows a good fire extinguishing effect, short fire extinguishing time, significant cooling effect and no reburning. Use of the aerogel extinguishing agent and fire extinguishing strategies of continuous spraying with large flow, small flow cooling after large flow spraying and spraying and flooding in containers have different fire extinguishing effects. Results show that the aerogel extinguishing agent can not only effectively extinguish initial battery fire, but also its preheating foaming mechanism and good foam stability can effectively reduce battery temperature and prevent further mixing of combustible gas and air.

Keywords: lithium battery; fire extinguishing efficiency; thermal runaway; aerogel extinguishing agent; fire-fighting disposal

0 引言

随着全球对气候变化的深刻认识,实现碳中和已成为全人类的共同目标^[1]。在这一背景下,储能电站作为清洁能源存储与电力系统稳定运行的核心设施,其热失控火灾隐患已成为制约行业发展的关键性安全问题,开发高效、环保的灭火技术具有重要意义^[2]。

目前,广泛应用的灭火剂可分为气体和液体2类,其灭火机制各有不同。气体灭火剂灭火原理主要是窒息、冷却、抑制和中断链式反应。张坚等^[3]研究发现,七氟丙烷垂直喷射扑灭磷酸铁锂电池火灾的效果最优。徐会升等^[4]研究发现,溴代三氟丙烯比水、七氟丙烷、五氟乙烷对电池火灾的灭火降温效果好。贺元骅等^[5]发现,低压环境下三氟丙烯比全氟己酮能更好扑灭和抑制锂离子电池火。孙一楠等^[6]通过锂离子电池组燃爆试验发现,液氮可快速冷却高温电池,阻断内部反应链。由于气体灭火剂储存量少,无法持续冷却^[7]。刘昱君等^[8]研究发现,水、全氟己酮、七氟丙烷、磷酸铵盐干粉及二氧化碳均能快速扑灭大容量锂离子电池明火,抑制升温效果依次减弱。陈小雨等^[9]发现火探管材料可在锂离子电池热失控时快速响应,通过释放水系灭火剂快速降低电池温度。张艳等^[10]的研究结果表明:含非离子表面活性剂的细水雾通过降低表面张力、提升起泡倍数与泡沫脆变性,可有效延缓锂电池热失控。侯双平等^[11]发现,复合添加剂比单一添加剂对锂电池火灾的降温及灭火效能更优。赵军超等^[12]试验结果表明:低压细水雾系统可有效抑制动力电池箱火灾及电池早期热失控,且未出现复燃与

模组间热失控传播。然而,细水雾也存在灭火时间长、毒性气体生成等问题^[7]。除上述灭火剂外,大量学者正在探索新型灭火剂。WANG Peng^[13]发现,烷基葡萄糖酰胺与有机硅表面活性剂具有更优表面张力及发泡性能,可替代氟碳类作为泡沫灭火剂。张作睿等^[14]发现,水凝胶灭火剂可快速扑灭明火,有效阻断电池热失控行为。气凝胶泡沫灭火剂密度低、结构稳定、导热能力差、热稳定性好,在多个领域已有广泛应用^[15]。LIU Chunxiao 等^[16]发现,气凝胶比传统灭火剂的灭火性能好。刘通等^[17]发现气凝胶比细水雾有更为出色的明火抑制效果。

当前,气凝胶灭火剂在灭火器、喷水枪及消防管路系统中的应用无需特殊的材料或结构设计调整,但关于气凝胶灭火剂的灭火处置方案,学术界尚缺乏深入研究和系统性的探讨。因此,笔者拟从应用的可行性和便利性考虑,针对不同电池类型、数量的电池火开展灭火处置试验,并与水灭火进行对比;同时,基于气凝胶灭火剂的特点,提出灭火剂施加时机、施加方式、覆盖范围等方面的电池灭火处置对策,以期为锂电池火灾防控提供创新的理论指导。

1 气凝胶灭火试验设计

1.1 锂电池与气凝胶灭火剂的特性及参数

使用商用三元铝壳单体锂电池及 18650 电池模组开展灭火试验。三元锂电池正极材料由镍钴锰氧化物或镍钴铝酸锂组成,负极则通常采用石墨材料,单节尺寸为 148 mm×52 mm×102 mm(长×宽×高),容量为 114 Ah;18650 电池模组包含 52 单节电池,单节电池直径 18 mm,高度 65 mm,容量为 2.5 Ah。2 种电

池的荷电状态均为 70%。所用气凝胶灭火剂是将粒径 10~100 μm 的无机多孔气凝胶颗粒、含磷阻燃剂、含氮阻燃剂、亲水剂按质量比混溶于水基体系制得,质量分数分别为 2%~10%、15%~18%、13%~16%、3%~5%^[15]。气凝胶灭火剂为淡黄色、透明液体,密度为 1.18 g/cm³, pH 为 7.43, 表面张力为 14.46 mN/m,黏度为 2.11 mPa·s,凝固点为-16 ℃。

1.2 锂电池灭火试验工况与装置布置

表 1 为不同类型锂电池的灭火试验工况。采用串联电池组的方式模拟实际电池组的灭火工况。采用红外热像仪和数据记录仪采集热失控过程中电池

的温度,由高清摄像机采集热失控过程中的影像数据。灭火剂喷枪开口的直径为 1 cm,灭火剂流量可调节,流量范围为 1.8~3.6 L/s。采用 3 种灭火策略:以大流量 3.6 L/s 持续喷射灭火,迅速覆盖火源;采用小流量 1.8 L/s 降温,在初期迅速控制火势的同时,有效降低灭火剂用量,适合小规模电池火的处置;以 1.8~3.6 L/s 的流量采用容器内喷射并淹没的策略在火灾发生地内部进行精准喷射,实现高效率的初期降温,并减少灭火剂的浪费。灭火试验台与场景布置如图 1 和图 2 所示,热电偶的编号为 TC1—TC9。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental conditions						
工况	电池类型	电池数量/个	汽油用量/mL	支架高度/cm	油池长×宽×高/ (cm×cm×cm)	灭火剂类型
1	三元铝壳单体锂电池	4	500	20	30×30×5	水
2	三元铝壳单体锂电池	4	500	20		气凝胶
3	三元铝壳单体锂电池	8	1 000	20	60×30×5	气凝胶
4	18650 电池模组	2	800	20	30×30×5	气凝胶
5	三元铝壳单体锂电池	4	500	3	60×30×20	气凝胶

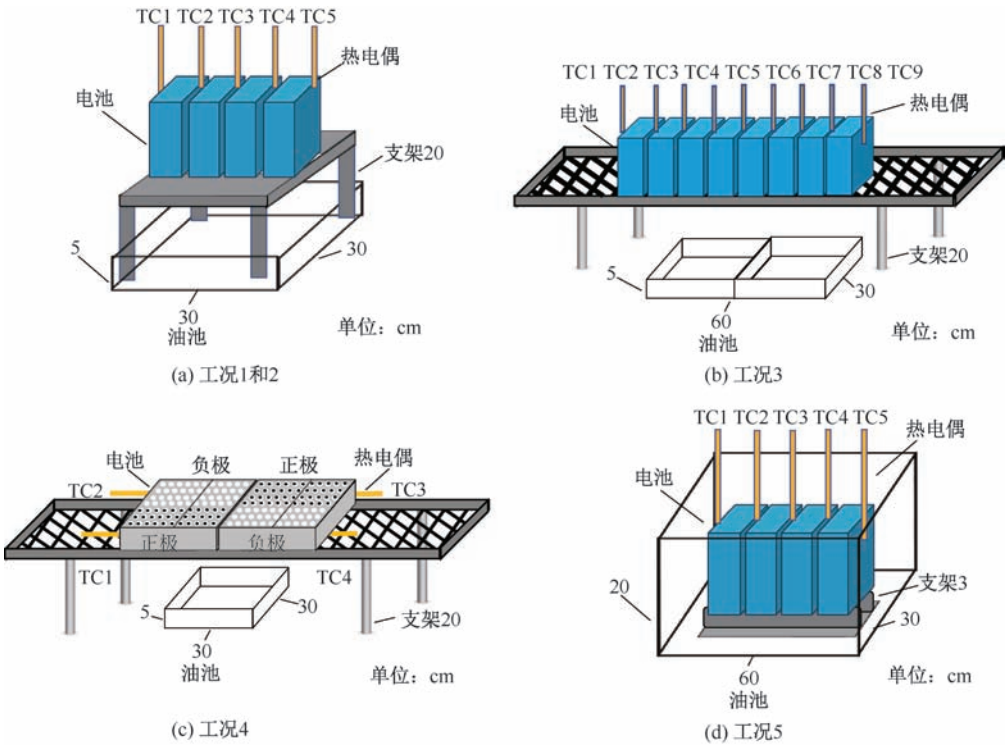


图 1 三元铝壳单体锂电池与 18650 电池模组试验台

Fig. 1 Experimental setup for ternary aluminum-shell single lithium batteries and 18650 battery module

1.3 消防员及灭火处置方法

参与试验的消防员身着消防避火服,在电池热失控时,按照预定的操作路线,以最大流量对油池中

的明火进行快速扑灭,随后集中力量扑灭由电池引发的射流火,最终持续喷射以降低温度,并观察电池是否会发生复燃。

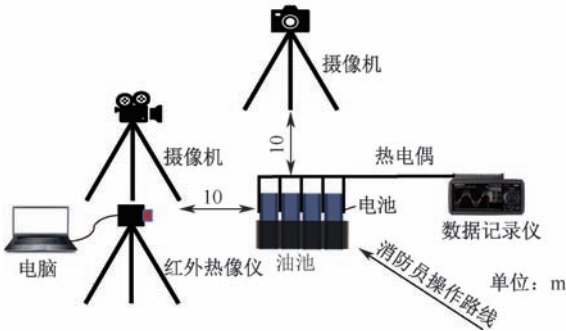


图2 场景布置
Fig.2 Scene layout

2 锂电池热失控灭火效能分析

2.1 气凝胶灭火剂与水的灭火效能对比分析

气凝胶灭火剂与水的灭火试验过程及电池

温度变化如图3、图4所示。水灭火试验中,电池于165 s 发生热失控,2 s 后启动水灭火,9 s 扑灭明火,全程需 59 s 完成灭火降温,且全程维持大流量灭火;水作用终止后,电池温度迅速反弹至 223.2 ℃,出现显著温升。水的持续作用虽使电池温度由 416℃ 骤降至 23 ℃,但 TC4 处温度回升至 330 ℃;终止供水后,电池温度在 1 000 s 内多次突破 200 ℃,最高达 492 ℃。气凝胶灭火试验中,电池在 193 s 热失控后,4 s 启动灭火剂灭火,3 s 扑灭明火,全程耗时 46 s(大流量喷射 22 s,小流量降温 24 s)。气凝胶灭火剂能够持续控温,电池温度从 550℃ 骤降至 20 ℃,全程未出现复燃迹象;气凝胶作用后电池温度始终低于 100 ℃,远低于水作用后的电池温度;明火扑灭后 44 s 内,水灭火组烟气释放量显著高于气凝胶组。

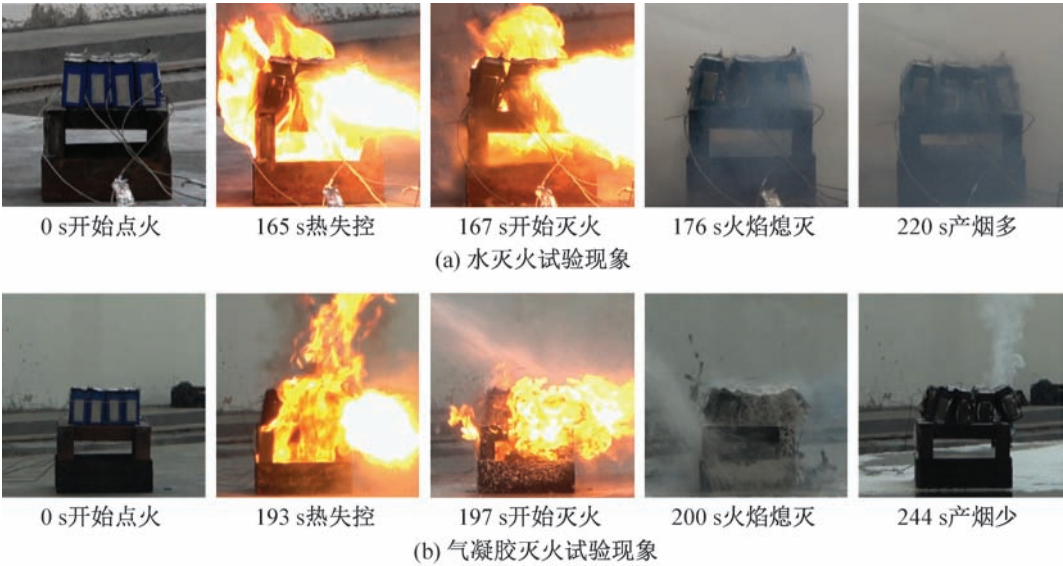


图3 工况1和工况2灭火试验现象

Fig. 3 Fire-fighting test phenomenon under condition 1 and 2

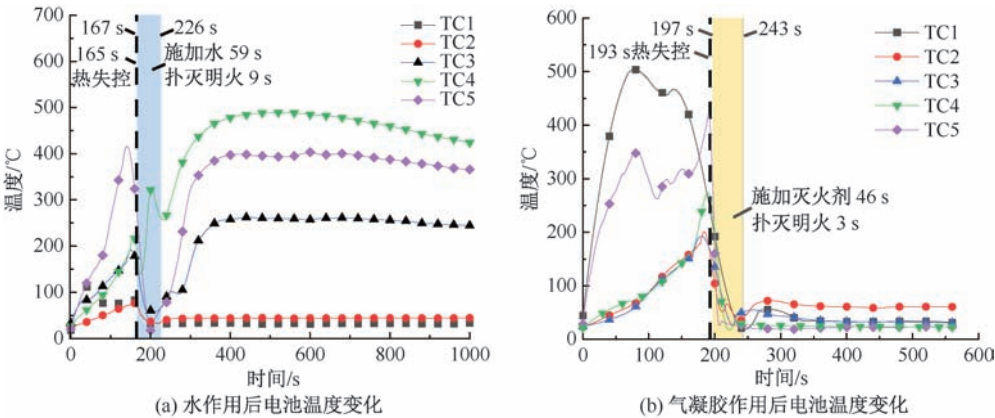


图4 工况1和工况2电池温度变化

Fig.4 Battery temperature change under condition 1 and 2

2.2 气凝胶灭火剂对不同数量的三元铝壳单体锂电池的灭火效能分析

图 5 为工况 3 条件下灭火试验现象和电池温度变化,从中可以看出:当电池在 89 s 发生热失控时,采用气凝胶灭火剂于 92 s 开始介入,用时 3 s 扑灭明火,火焰熄灭时表面温度降至 146.7 ℃;整个灭火过程持续 83 s(包含 23 s 大流量灭火和 60 s 小流量降温 2 个阶段);灭火剂介入后电池表面温度持续

下降,最终电池温度从峰值 813 ℃ 降至 20 ℃,全程未发生复燃现象;火焰熄灭后 44 s 内烟气生成量显著减少。尽管 TC2 处因热源位于电池底部,因喷枪无法正对喷射,在灭火结束后出现短暂温度波动,但最高回升温度始终低于 120 ℃。充分说明气凝胶灭火剂对不同规模三元铝壳锂电池具有显著优势,灭火时间短、降温效率高。

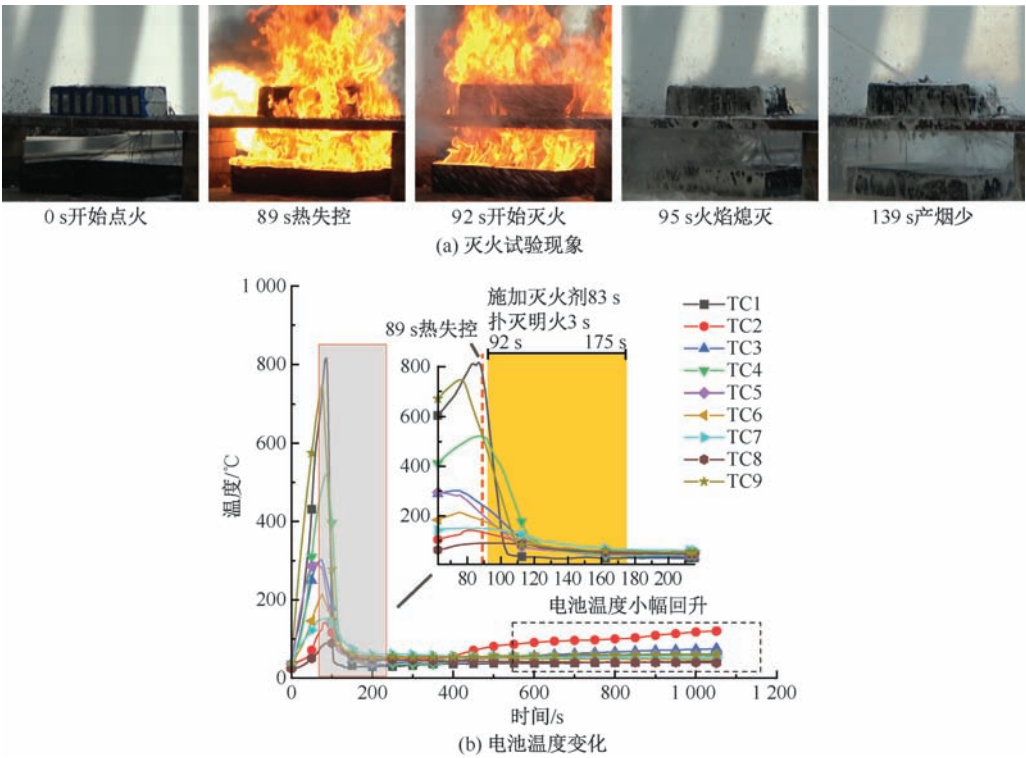


图 5 工况 3 灭火试验现象和电池温度变化
Fig. 5 Fire-fighting test phenomenon and battery temperature change under condition 3

2.3 气凝胶灭火剂对不同型号电池的灭火性能分析

图 6 为工况 4 条件下灭火试验现象和电池温度变化。可以看出,电池在 192 s 发生热失控,气凝胶灭火剂于 197 s 启动喷射,历时 8 s 扑灭明火,火焰熄灭时温度降至 100 ℃;灭火过程持续 52 s,(包含 13 s 大流量灭火和 39 s 小流量降温);灭火剂作用期间电池温度从峰值 933 ℃ 降至 50 ℃,远低于热失控临界温度;灭火停止后,电池温度仍持续下降并稳定于 100 ℃ 以下,该状态持续至 800 s 未发生波动;火焰熄灭后 44 s 内烟气生成量明显减少,全程未出现复燃现象。气凝胶灭火剂对 18650 电池模组仍有良好的灭火效能。

2.4 气凝胶灭火剂采用浸没方式对电池的灭火性能分析

图 7 为气凝胶灭火剂对 4 块三元铝壳单体锂电池火的灭火效果。电池于 166 s 发生热失控,气凝胶灭火剂在 172 s 启动大流量喷射,用时 2 s 扑灭明火;灭火阶段持续 10 s 结束,电池温度从峰值 708 ℃ 骤降至 10 ℃;火焰熄灭后 44 s 内烟气生成量锐减;TC2 处温度回升至 326 ℃,主要原因是灭火时间太短导致降温不充分。为此,灭火剂以小流量持续喷射 25 s 直至淹没容器,使电池温度再次显著下降,最终稳定于 100 ℃ 以下。利用气凝胶灭火剂可以有效扑灭初期电池火灾,由于灭火时间较短,会导致电池温度回升,但在灭火剂淹没电池之后,气凝胶

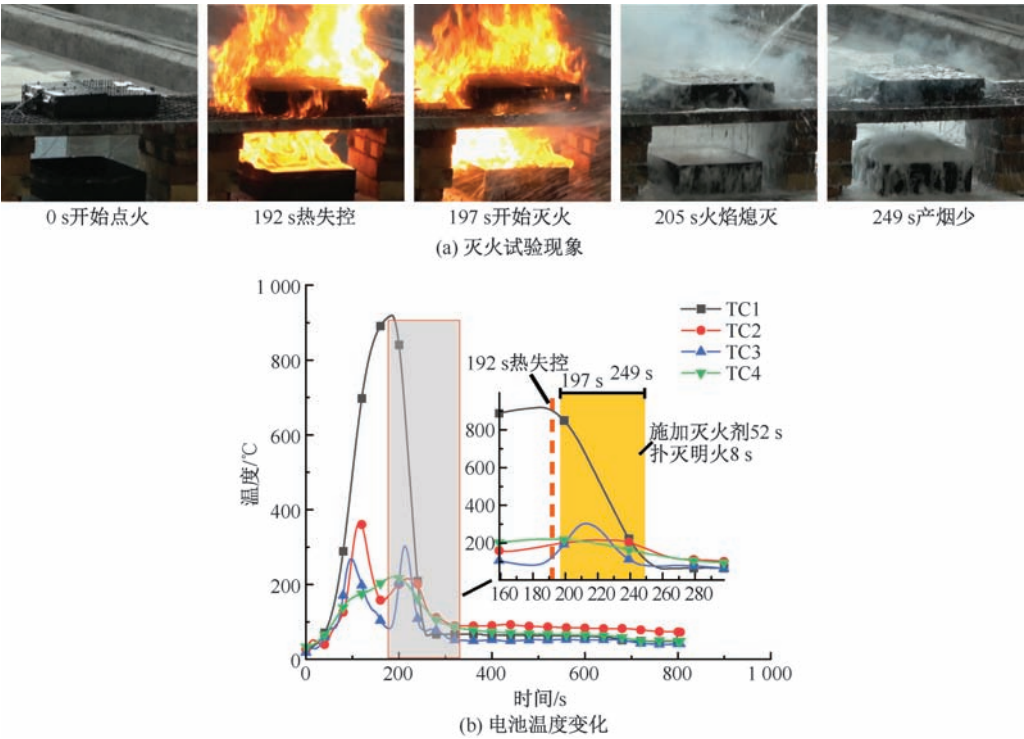


图 6 工况 4 灭火试验现象和电池温度变化

Fig. 6 Fire-fighting test phenomenon and battery temperature change under condition 4

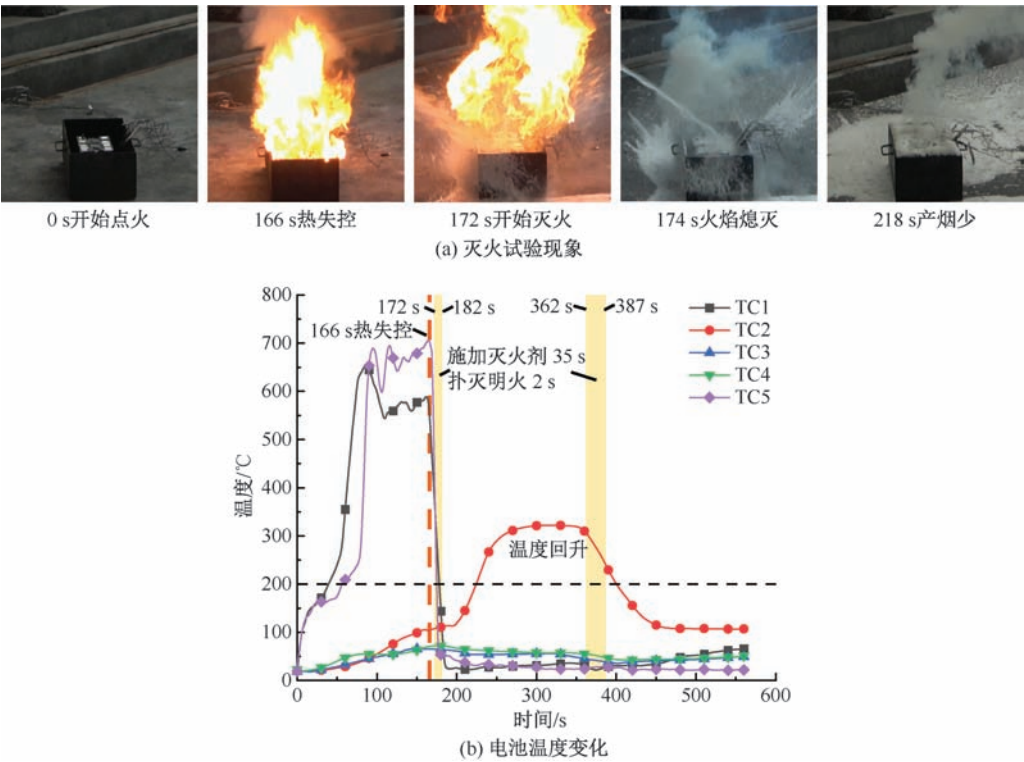


图 7 工况 5 灭火试验现象和电池温度变化

Fig. 7 Fire-fighting test phenomenon and battery temperature change under condition 5

灭火剂预热发泡,产生的泡沫对电池完全覆盖,实现有效降温 and 隔绝可燃气体和空气的进一步混合。

3 结 论

1) 气凝胶灭火剂的灭火性能和降温效果明显优于水,并且气凝胶灭火剂相比水可以更好抑制烟气的产生。气凝胶灭火剂用时 3 s 可扑灭明火,而水需要 9 s 扑灭明火。同时,气凝胶灭火剂在 46 s 的灭火时间内,电池温度从最高 550 ℃ 降至最低 20 ℃,并且电池温度在灭火结束后低于 100 ℃;而水在 59 s 的灭火时间内,电池温度出现回升现象,

最高达到 330 ℃,并且在灭火结束后也出现了温度回升现象,最高达到 492 ℃。

2) 气凝胶灭火剂对不同规模三元铝壳单体锂电池以及不同型号锂电池均有良好的灭火效果,灭火时间短,降温效果显著,无复燃。对于前者,气凝胶灭火剂用时 3 s 扑灭明火,并且在灭火剂作用 83 s 的时间内,电池温度从最高 813 ℃ 降至最低 20 ℃。对于后者,气凝胶灭火剂 8 s 扑灭明火,并且在灭火剂作用 52 s 的时间内,电池温度从最高 933 ℃ 降至最低 50 ℃。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Fuquan, BAI Fanlong, LIU Xinglong, et al. A review on renewable energy transition under China's carbon neutrality target[J]. Sustainability, 2022, 14(22): DOI:10.3390/su142215006.
- [2] CHOMBO V P, LAOONUAL Y. A review of safety strategies of a Li-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2020, 478: DOI:10.1016/j.jpowsour.2020.228649.
- [3] 张坚, 李建勇, 张明杰, 等. 七氟丙烷对磷酸铁锂储能电池的灭火效果[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8): 1168-1170, 1181.
ZHANG Jian, LI Jianyong, ZHANG Mingjie, et al. Fire extinguishing effect of heptafluoropropane on fire of lithium iron phosphate energy storage batteries[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8): 1168-1170, 1181.
- [4] 徐会升, 丛晓民, 赵林双, 等. 溴代三氟丙烯对电池火灾的灭火效果试验研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(7): 873-876.
XU Huisheng, CONG Xiaomin, ZHAO Linshuang, et al. Experimental study on extinguishing efficiency of 2-BTP on battery fires[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(7): 873-876.
- [5] 贺元骅, 沈俊杰, 王海斌. 低压下不同新型清洁气体灭火剂抑灭 21700 型锂离子电池火研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 53-58.
HE Yuanhua, SHEN Junjie, WANG Haibin. Study on extinguishing 21700 lithium battery fire with different new clean gas extinguishing agents under low pressure[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(12): 53-58.
- [6] 孙一楠, 张国维, 贾伯岩. 液氮对高温锂离子电池防火抑爆效果试验研究[C]. 2020 中国消防协会科学技术年会论文集, 2020: 945-951.
- [7] 程怡玮, 郎需庆, 焦金庆, 等. 锂电池灭火剂研究进展[J]. 安全、健康和环境, 2023, 23(8): 1-9.
CHENG Yiwei, LANG Xuqing, JIAO Jinqing, et al. Research progress of extinguishing agent for lithium battery[J]. Safety Health & Environment, 2023, 23(8): 1-9.
- [8] 刘昱君, 段强领, 黎可, 等. 多种灭火剂扑救大容量锂离子电池火灾的试验研究[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1105-1112.
LIU Yujun, DUAN Qiangling, LI Ke, et al. Experimental study on fire extinguishing of large-capacity lithium-ion batteries by various fire extinguishing agents [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1105-1112.
- [9] 陈小雨, 王骁, 王涛, 等. 水基型火探管式灭火技术扑救锂离子电池火灾有效性研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(2): 210-216.
CHEN Xiaoyu, WANG Xiao, WANG Tao, et al. Research on the effect of water-based fire detection tubes fire suppression technology on extinguishing lithium-ion battery fire [J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(2): 210-216.
- [10] 张艳, 彭伟, 刘小勇, 等. 含添加剂细水雾对锂电池热失控延缓效果研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(4): 504-509, 577.
ZHANG Yan, PENG Wei, LIU Xiaoyong, et al. Study on retarding effect of water mist containing additive on thermal runaway of lithium battery [J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(4): 504-509, 577.

[11] 侯双平, 朱顺兵, 王文豪. 含添加剂的水系灭火剂抑制锂离子电池火灾试验研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(8):1 135-1 140.
HOU Shuangping, ZHU Shunbing, WANG Wenhao. Experimental study on fire suppression of lithium-ion battery with aqueous extinguishing agent containing additives[J]. Fire Science and Technology, 2023,42(8):1 135-1 140.

[12] 赵军超, 付阳阳, 薛峰, 等. 低压细水雾系统扑救锂电池箱火灾的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 1 897-1 903.
ZHAO Junchao, FU Yangyang, XUE Feng, et al. Experimental study on suppressing lithium battery package fires by low-pressure water mist system [J]. Journal of Safety and Environment, 2022,22(4):1 897-1 903.

[13] WANG Peng. Application of green surfactants developing environment friendly foam extinguishing agent [J]. Fire Technology, 2015, 51(3):503-511.

[14] 张作睿, 张国维, 朱国庆, 等. 水凝胶灭火剂对磷酸铁锂电池组灭火效能研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 161-168.
ZHANG Zuorui, ZHANG Guowei, ZHU Guoqing, et al. Research on fire-extinguishing performance of hydrogel fire extinguishing agent on lithium iron phosphate battery pack[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(1):161-168.

[15] 安春. 一种水基气凝胶高效灭火剂及其制备方法:中国,202011182063. 5[P]. 2020-10-29.

[16] LIU Chunxiao, ZHU Guoqing, CHEN Chunna, et al. Research on the fire-extinguishing effectiveness of a new nano -scale aerogel fire-extinguishing agent [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 37: DOI: 10.1016/j. tsep. 2022. 101625.

[17] 刘通, 唐国才, 王亮, 等. 气凝胶灭火剂抑制锂离子储能电池热失控特性研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(1): 107-112.
LIU Tong, TANG Guocai, WANG Liang, et al. Inhibition of thermal runaway of energy storage battery by aerogel-based fire extinguishing agent[J]. Fire Science and Technology, 2024,43(1):107-112.



作者简介： 何 路 （1991—）,男,安徽铜陵人,工学博士,副教授,主要从事城市地下工程火灾防控及新型灭火药剂等方面的研究。E-mail:6218@cumt.edu.cn。