

侧喷超细水雾抑制锂离子电池热失控传播

刘旭东, 姜雪, 韩浩, 张培红
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 为探究侧喷位置对锂离子电池(lithium-ion batteries, LIBs)热失控传播的影响, 搭建了氮气和水的两相流超细水雾(NWM)试验平台, 通过改变NWM在LIB模块侧方的施加位置, 对比分析了不同侧喷位置NWM的冷却作用、衰减热辐射作用及窒息作用, 以及施加位置不同时NWM抑制锂离子电池热失控传播的主导机制。结果表明: 火焰对LIB模块热失控的传播具有促进作用。极耳位置施加NWM抑制LIB模块热失控传播的效果更加显著, 且以窒息和衰减火焰热辐射为主导作用; 在中间位置施加NWM, 其抑制热失控传播的主导机制为冷却LIB模块表面温度。

关键词: 锂离子电池; 热失控; 氮气; 超细水雾; 冷却作用

中图分类号: X 932 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)05-0145-08

Inhibition of Thermal Runaway Propagation of Lithium-Ion Batteries by Side Spray of Ultra-fine Water Mist

LIU Xu-dong, JIANG Xue, HAN Hao, ZHANG Pei-hong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Pei-hong, E-mail: zhangpeihong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to explore the influence of side spray position on thermal runaway propagation of lithium-ion batteries (LIBs), a nitrogen and water two-phase flow ultra-fine water mist (NWM) test platform was set up. By changing the position of NWM applied on the side of LIB module, the cooling, thermal radiation attenuation and asphyxiation effects of NWM at different side injection locations, and the dominant mechanism of NWM inhibiting runaway thermal propagation of lithium-ion batteries at different locations were compared and analyzed. The results show that flame can promote the thermal runaway propagation of LIB module. The effect of NWM applied at the pole position on LIB module thermal runaway propagation is more significant, and the smothering and attenuating flame thermal radiation play a leading role. When NWM is applied in the middle position, the dominant mechanism to inhibit runaway thermal propagation is to cool the surface temperature of the LIB module.

Key words: lithium-ion batteries; thermal runaway; nitrogen; ultra-fine water mist; cooling effect

随着锂离子电池(lithium-ion batteries, LIBs)在新能源领域的迅猛发展, 由于外热源、过充过放或电池不一致性等引发电池模块热失控^[1-4], 进而带来新能源汽车及电化学储能电站火灾爆炸事故的风险^[5-8]。近年来, 国内外学者围绕抑制锂离子电池热失控及其传播的措施开展了大量的研究, 发现二氧化碳、氮气、哈龙等灭火剂具有一定

的抑制锂离子电池火灾的效果, 但容易造成复燃。Sun等^[9]通过对比HFC-227ea、C₆F₁₂O和水喷雾对2块117 Ah三元电池的抑制作用, 发现水喷雾的散热量最大, 可防止热失控蔓延。刘昱君等^[10]通过采用不同灭火剂对38 Ah单体动力电池进行灭火实验, 认为抑制热失控电池表面温度效果优劣依次为水、全氟己酮、HFC、ABC干粉和

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074065)

作者简介: 刘旭东(1999—), 男, 山东济宁人, 东北大学硕士研究生; 张培红(1969—), 女, 河南南阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

CO₂.Saw 等^[11]、郭东亮等^[12]、Cui 等^[13]通过数值模拟和试验的方法,证明了细水雾通过吸热冷却、窒息、衰减热辐射等作用,可以抑制锂电池热失控及其复燃,但往往需要长时间施加.Zhang 等^[14]发现热失控期间内,细水雾能够阻止 CO₂产生,但会增加 CO, HF 等气体的生成.在细水雾的基础上,人们通过增加添加剂来提高细水雾的抑制能力.Xu 等^[15]对比含有不同添加剂的细水雾抑制单体锂离子电池热失控效果,得出含有特定添加剂的细水雾可以改善电池的冷却效果,但冷却效果会受到表面张力和起泡性双重影响.由于氮气会参与电池燃烧反应,形成三元碰撞,从而降低电池内部反应能力^[16],氮气和细水雾的结合受到了关注.Zhang 等^[17]研究了 N₂-C₆F₁₂O 和 N₂-H₂O 对容量为 3 400 mA·h 的单体 18650 型锂离子电池热失控的抑制,得到氮气双相流细水雾可以同时提高冷却速率和灭火效率,有效抑制锂离子电池复燃.Jiang 等^[18]研究 0.3~0.7 MPa 低压氮气双相流细水雾对锂离子电池模块热失控传播的控制作用,结果表明氮气双相流细水雾可以有效抑制电池热失控在电池模块中的传播.

对于新能源汽车锂离子电池热失控控制措施,应充分考虑消防设备的移动性和便携性,以及安装空间的限制,在 LIB 模块的侧面实施低压双相流细水雾可以很好解决上述问题.本文将 0.3 MPa 氮气驱动的双相流超细水雾(NWM)喷头分别布置在 LIB 模块侧面中间位置和极耳位置,讨论 NWM 不同作用位置对 LIB 模块热失控

传播的抑制作用及主导机制,以期为锂离子电池的推广应用提供技术支撑.

1 试 验

试验采用广东精进能源有限公司三元锂离子电池(LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂),几何尺寸为 136 mm×64 mm×7 mm,电池质量(100±3)g,标称容量 5 000 mA·h.利用电池充放电检测设备,以 0.2 C 的电流进行充放电,电压范围在 2.75~4.20 V 之间,如此循环 3 次.随后以 4.20 V 恒定电压充电,直到 100% SOC(SOC 指电池的充电状态)为止.最后,将 5 块 SOC 为 100% 的电池用 2 块 2 mm 厚钢板紧固,以保证 LIB 模块中各电池之间保持紧密接触的状态.在其中 1 块钢板的内侧依次设置与电池尺寸相同的隔热棉及电加热板,将紧邻电加热板的电池编号为电池 1,次之为电池 2,依此类推.将 NWM 喷头分别布置在模块侧面中间位置及电池极耳高度,距离 LIB 模块侧面 300 mm,试验采用的虹吸喷头雾化锥角为 15°.在 LIB 表面边缘和中心位置分别布置热电偶,热电偶精度为 ±1.5 °C,每 1 s 记录 1 次数据.采用德国 MRU 公司 VARIO plus 烟气分析仪,探测 LIB 模块上方和细水雾包围面内 O₂, CO₂ 等气体成分的变化,每 2 s 记录 1 次数据.分别在试验平台顶盖及侧方布置了辐射热流计,辐射热流计量程为 ±200 kW/m²,灵敏度为 2 μV/(W·m⁻²),试验布置如图 1 所示.

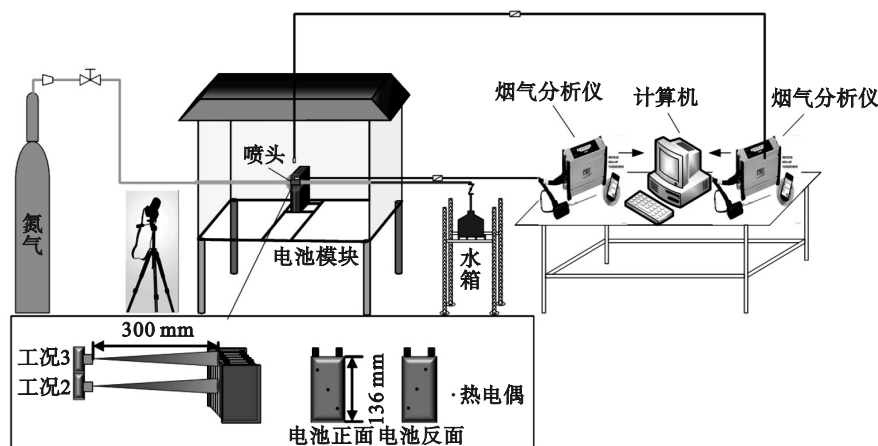


图 1 试验布置

Fig. 1 Arrangement of test

共进行了 3 种工况(见表 1)的试验,初始环境温度均为(15±2)°C.首先进行 LIB 模块热失控试验,电加热板功率设置为 350 W,当第 1 块电池

触发热失控时断开加热片.进一步地,在同样的加热条件下,当第 1 块电池发生热失控时施加 NWM,对比分析不同位置侧喷超细水雾抑制 LIB

模块热失控传播的主导机理及有效性. NWM 持续时间 60 s, N₂ 压力保持在 0.3 MPa. 为避免偶然性, 每组试验重复 3 次.

表 1 试验工况
Table 1 Test conditions

工况	作用位置	SOC	NWM	持续时间/s	气体流量	液体流量	雾滴粒径 $D_{v0.9}/\mu\text{m}$
					(L·min ⁻¹)	(mL·min ⁻¹)	
1		100%	关闭				
2	电池中间	100%	开启	60	45	120	96.8
3	电池极耳	100%	开启	60	45	120	96.8

2 试验结果分析

2.1 不同位置的抑制过程

3 种工况 LIB 模块热失控过程如图 2 所示. 可以看出, 由于生产制造过程等原因, 电池触发热失控的时间和表现形式可能存在差异, 但热失控

的表现形式通常包括电池膨胀、冒烟、电火花、喷射火焰、燃烧、爆炸等^[19]. 在工况 1 中, 电池 1 于 524 s 出现射流火焰, 热失控由电池 1 传递到电池 5 的时间为 49 s. 电池 2~5 分别在 528, 536, 558 和 575 s 时出现射流火焰, 火焰在极耳上方剧烈燃烧, 使 LIB 模块表现出电池 *i* 火焰未熄灭或减弱时就导致电池 *i*+1 出现射流火焰的连续燃烧现象.

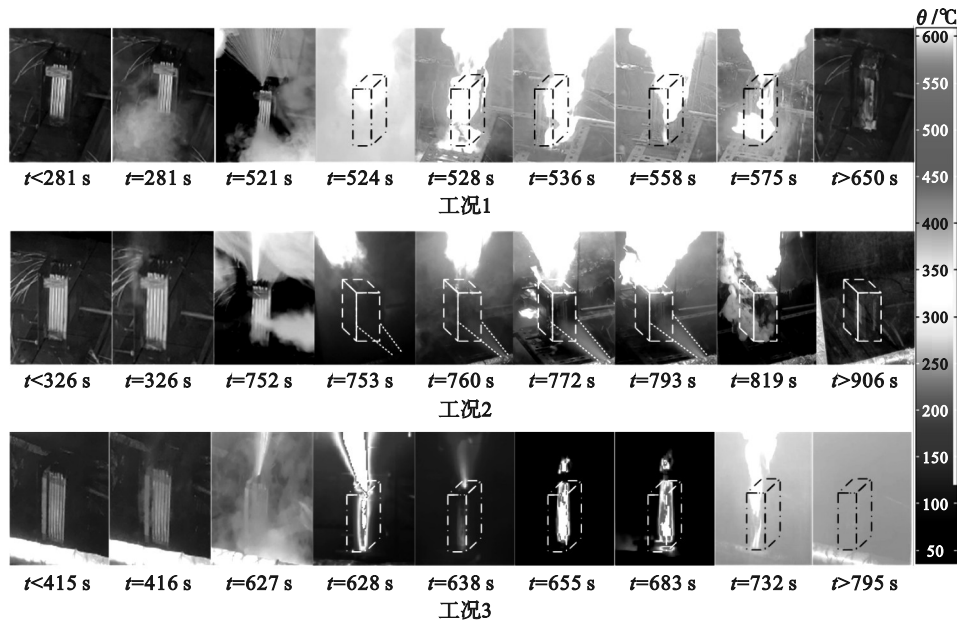


图 2 不同工况锂离子电池模块特征过程

Fig. 2 Characteristic processes of lithium-ion battery modules in different working conditions

在工况 2 中, 电池 1 在 326 s 时出现烟气, 烟气排放持续 426 s 后, 在 753 s 时电池 1 出现射流火焰, 此时断开加热片, 开启 NWM. 由于 NWM 作用在模块中间位置, 难以直接对火焰起到冷却和窒息作用, 电池 1 在 NWM 施加的瞬间火焰仅呈现一定程度的减弱. 在电池 1 的火焰热辐射和热传导的协同作用下, 760 s 时电池 2 出现火焰, 火焰持续 10 s 后减弱, 期间电池 3 喷射出的可燃物质被引燃. 与工况 1 相比, 电池 3, 4 出现射流火的时间分别延迟至 772, 793 s. 在 813 s 时断开 NWM, 电池 5 在 819 s 时出现火焰. 相较于电池 1~4, 电池

5 火焰燃烧最剧烈.

工况 3 在 416 s 时电池安全阀开启, 627 s 时大量可燃物质从电池内部喷出, 1 s 后电池 1 出现喷射火焰. 在 628 s 时启动 NWM, 由于 NWM 直接对准极耳处的火焰根部, 在 NWM 的窒息作用和动力学拉伸作用下, 工况 3 中电池 1 的火焰于 3 s 后被熄灭. 整个过程中电池 2~4 均未产生明火, 试验中出现大量烟气, 只能借助红外热像仪观察剩余电池的热失控过程. 由图 2 工况 3 可以看出, 638 s 时电池 2 出现热失控, 可燃物质喷出后无火焰产生. 电池 3, 4 与电池 2 现象相同. 688 s 时 NWM 断

开,电池 5 经过 65 s 触发热失控并伴随火焰的产生.

在工况 1~3 中,电池 i 与电池 $i+1$ 之间平均热失控传播时间如图 3 所示.相较于工况 1,工况 2,3 热失控传播的总时间分别延长到 94, 138 s.

值得注意的是,工况 2 处于 t_{4-5} 时,即使施加 NWM,电池 4,5 仍触发热失控.在 NWM 断开瞬间,电池 4,5 的温度分别是 522 和 239 °C,在断开 NWM 后,电池 4,5 几乎同时到达最高温度,导致工况 1,2 的 t_{4-5} 延长.当工况 3 处于 t_{4-5} 的阶段时,在 NWM 的作用下电池 4 的温度开始下降且电池 5 未触发热失控,在 NWM 断开瞬间,温度分别是 224 和 34 °C.

工况 2,3 的 t_{4-5} 存在明显差异,与各自的热失控过程紧密相关.工况 2 因为火焰持续存在导致 LIB 模块温度无法下降,即使施加 NWM 仍无法阻止电池热失控.而工况 3 在热失控传播的过程中无火焰产生,使得 LIB 模块在 NWM 的作用下热失控传播得到有效抑制.这说明抑制 LIB 模块在热失控传播的过程中控制火焰的必要性.

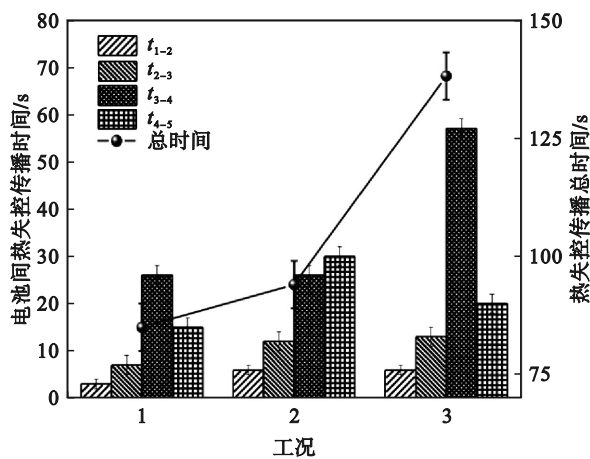


图 3 不同工况下热失控传播时间

Fig. 3 Thermal runaway propagation time under different working conditions

图 4 为工况 1~3 热失控后的电池表面.对比热失控后 LIB 模块表面破损程度发现,即使工况 2 中 NWM 对 LIB 模块表面有更大的冷却作用面积,但是未能有效控制火焰,因此其对 LIB 模块热失控传播的抑制作用较弱,导致表面破损程度较为严重.

2.2 窒息作用

通过对比 NWM 施加在 LIB 模块中间位置和极耳位置的气体体积分数(见图 5),发现 NWM 施加在中间位置时 O_2 体积分数随着 NWM 的施加略有减少,同时产生了较多的 CO_2 .NWM 施加在极耳位置时 O_2 体积分数远低于中间位置工况,

产生的 CO_2 体积分数最低.说明 NWM 施加在极耳位置时窒息作用较 NWM 施加在中间位置更显著.

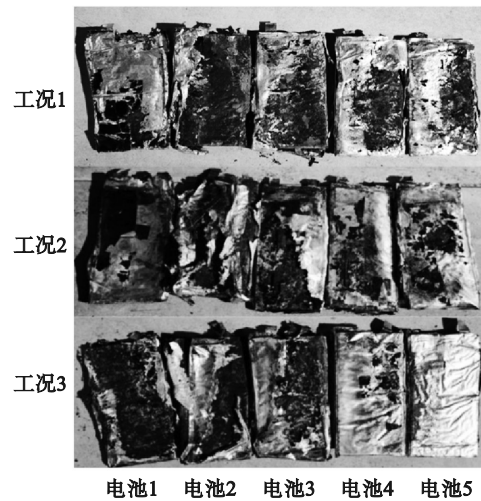


图 4 电池燃烧后图片

Fig. 4 Picture of the battery after combustion

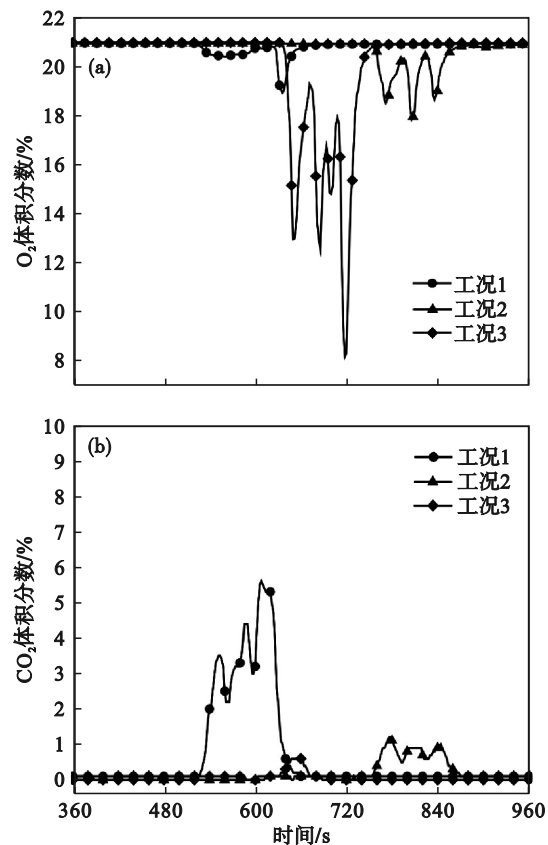


图 5 不同工况下 O_2 和 CO_2 体积分数变化

Fig. 5 Variation of O_2 and CO_2 volume fraction under different working conditions

(a)— O_2 体积分数; (b)— CO_2 体积分数.

2.3 衰减热辐射

利用试验测量得到的辐射热流(见图 6),分析 NWM 抑制 LIB 模块热失控时控制火焰的必

要性.由图6和图2对比可见,辐射热流与热失控过程中火焰变化趋于一致.工况2时因为NWM不能有效抑制火焰,导致辐射热流较大.工况3时在NWM施加后火焰快速熄灭,这时图6中的辐射热流在零附近波动;在NWM断开后,电池5热失控,出现火焰,探测到的辐射热流明显增加.

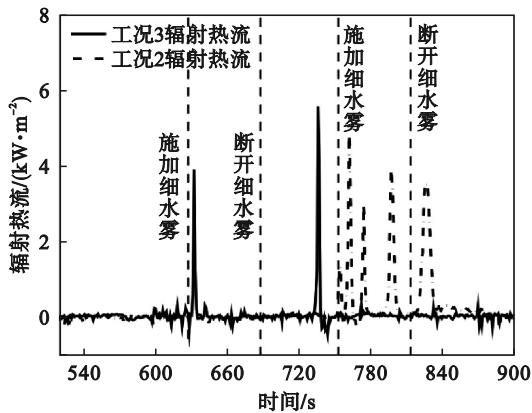


图6 不同工况的侧方辐射热流

Fig. 6 Lateral radiant heat flow under different working conditions

工况3较工况2有更明显的衰减火焰热辐射,主要体现在改变火焰形态、大幅度降低火焰高度、减少了火焰表面积.当火焰被拉伸后,火焰表面与受辐射表面之间的角系数减小,进一步降低了火焰热辐射到达受辐射表面的总量.

2.4 冷却作用

图7和图8说明了不同工况下LIB模块各电池表面温度和电池间热传导通量随NWM作用的变化.由图7可见,与工况1相比,NWM可以降低LIB模块中单电池的最高温度,无NWM(工况1)时,电池1,2的最高温度分别是683和686℃,NWM施加在中间位置(工况2)和NWM施加在极耳位置(工况3)时电池1,2的最高温度分别降低到666,665℃和613,612℃.

定义电池*i*到电池*i+1*的热传导通量为 $q_{i-(i+1)}$ ($i=1,2,3,4$),不同工况下LIB模块各电池间热传导通量的变化如图8所示.由图8可见,在NWM作用期间内电池间热传导通量逐渐降低,延缓了热失控的传播.虽然工况2中NWM施加在中间位置时 $q_{i-(i+1)}$ 均小于NWM施加在极耳位置,但工况2的电池表面最高温度仍明显高于工况3,这是因为中间位置NWM的施加未能有效衰减火焰对电池表面的辐射热反馈.

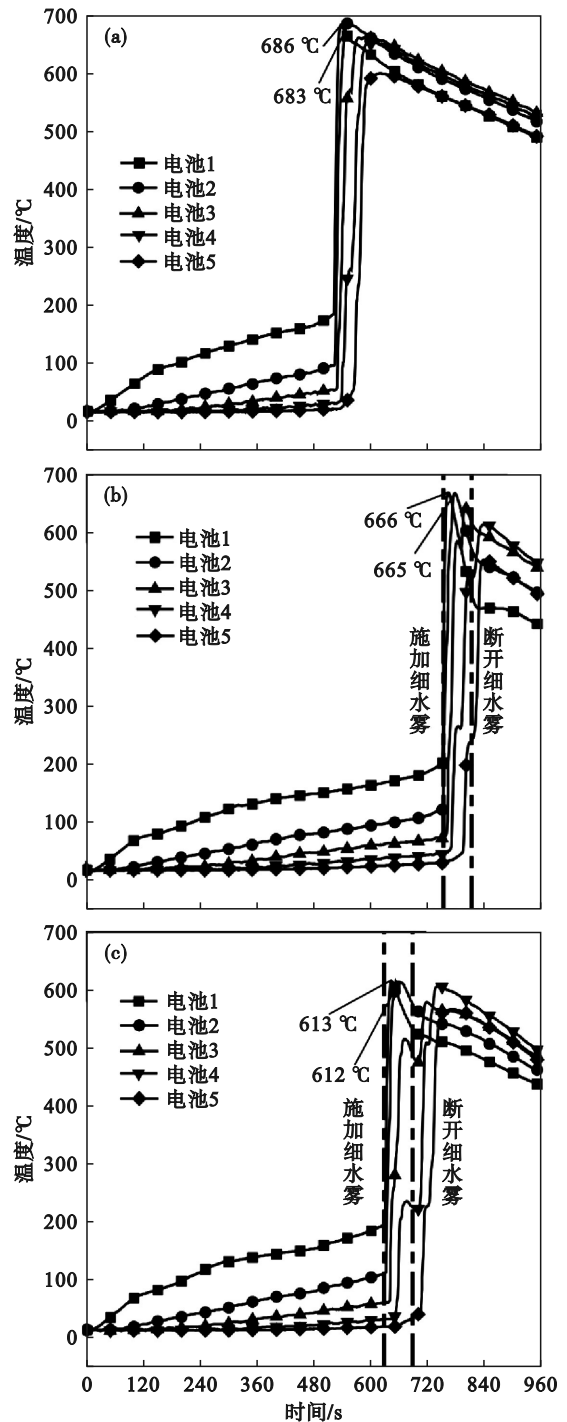


图7 不同工况的电池温度

Fig. 7 Battery temperature under different working conditions

(a)—工况1; (b)—工况2; (c)—工况3.

不同工况的平均温升速率 β 可利用式(1)计算.计算结果如图9所示,可以看出,NWM能够明显降低电池温升速率.由电池1,2的平均温升速率的对比可见,在NWM施加的初期,NWM不同的作用位置抑制热失控传播效果接近.随着NWM的持续作用,工况3中电池3~5的平均温升速率下降趋势更加显著,其中工况3中电池5温

升速率仅为 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$,这是因为 NWM 雾滴通过蒸发增加了电池表面向环境散热,同时,NWM 的窒息和衰减热辐射作用进一步延缓了电池温升.

$$\beta = \frac{\theta_{\text{end},i} - \theta_{\text{start},i}}{60}, i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}. \quad (1)$$

其中: $\theta_{\text{start},i}$ 表示第 1 块电池发生热失控时电池 1~5 的温度; $\theta_{\text{end},i}$ 表示第 1 块电池热失控 60 s 后电池 1~5 的温度.

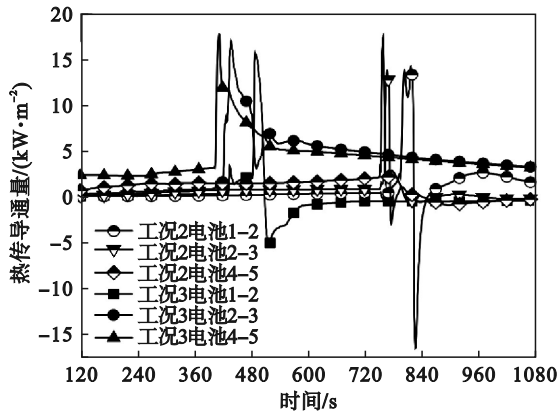


图 8 不同工况下电池间热传导通量

Fig. 8 Heat conduction flux between batteries under different working conditions

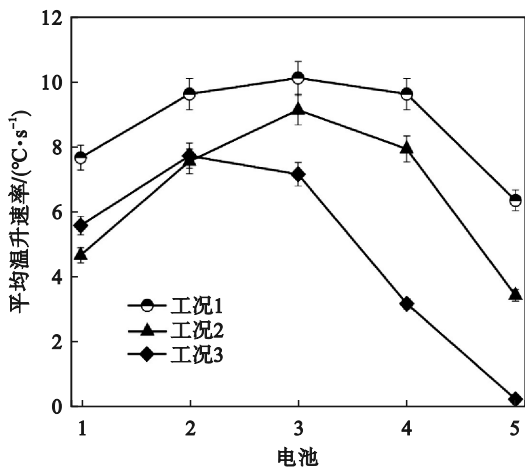


图 9 不同工况下电池平均温升速率

Fig. 9 Average temperature rise rate of battery under different working conditions

工况 1~3 的电池 1,2 最高温度随着火焰强度的衰减而减小,同时 NWM 延迟热失控的时间随着火焰强度的衰减而增加,说明火焰在 LIB 模块热失控过程中会促进其传播.以工况 1~3 的火焰平均温度(见图 10)及电池 2 表面平均温度(见图 11)为例进行说明.

对于工况 2,当 NWM 施加在中间位置时,NWM 使电池间火焰平均温度的最高值下降 $259\text{ }^{\circ}\text{C}$,电池 2 最高温度下降 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$.电池温度较火

焰温度更难下降是因为 NWM 施加在中间位置时直接作用 LIB 模块表面,可降低电池表面温度,抑制内部化学反应,并减少气体和固体可燃物的排放量,但 NWM 对火焰抑制作用较弱,火焰仍会继续对电池表面进行大量辐射热反馈,导致电池表面温度下降幅度减小.

工况 3 在 NWM 施加的时间内火焰最高温度下降 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,电池最高温度下降 $74\text{ }^{\circ}\text{C}$.这是因为工况 3 中 NWM 直接作用在极耳位置的火焰根部附近,导致火焰在持续燃烧 3 s 后熄灭,火焰对电池表面的辐射热反馈得到有效抑制.因此,虽然工况 3 对电池表面的冷却作用比工况 2 弱,但其衰减火焰辐射热反馈的作用更显著,最终导致工况 3 的电池 2 最高温度更低.

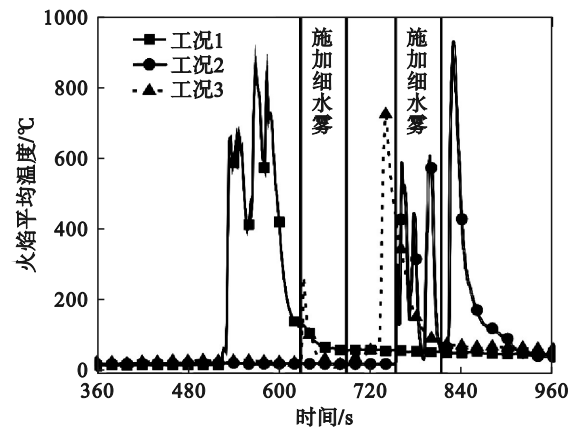


图 10 不同工况下火焰平均温度

Fig. 10 Average flame temperature under different working conditions

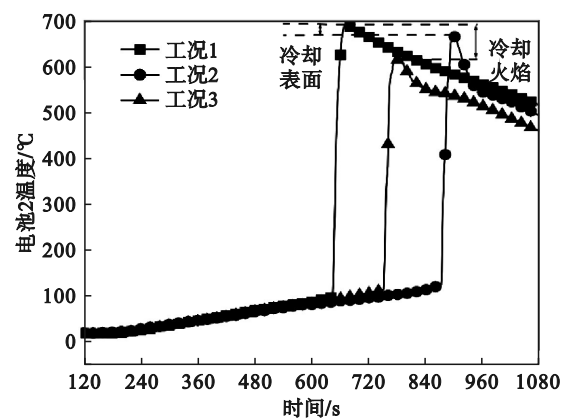


图 11 不同工况下电池 2 温度

Fig. 11 Temperature of battery 2 under different working conditions

2.5 热传递机制

电池热失控过程中能量变化复杂,根据贺元骅等^[20]的研究,主要涉及 LIB 模块的内部化学反应热 Q_{chem} ,LIB 模块的电能释放热 Q_{elec} 及对环境

的散热 Q_{envi} , 本文将 Q_{envi} 视为 LIB 模块与环境之间的热交换, 将 Q_{envi} 视为相等的常数, 考虑 LIB 模块热失控产生的火焰对 LIB 模块辐射热反馈 Q_{flame} , 能量守恒方程可以表示为

$$Q_i = Q_{chem} + Q_{elec} + Q_{flame,i} - Q_{envi}, i \in 1, 2, 3. \quad (2)$$

式中: Q_i 表示不同工况下 LIB 模块热量变化; $Q_{flame,i}$ 表示不同工况下火焰对 LIB 模块的辐射热反馈. NWM 抑制电池热失控时, 通过汽化潜热吸收电池模块热失控产生的热量, 该热量用 $Q_{w,i}$ 表示, 工况 1 时未施加 NWM, 故 $Q_{w,1}=0$, 此时能量守恒方程改进为式(3):

$$Q_i = Q_{chem} + Q_{elec} + Q_{flame,i} - Q_{envi} - Q_{w,i}, i \in 1, 2, 3. \quad (3)$$

式(4)和式(5)可表示不同施加位置较工况 1 时的能量变化.

$$Q_1 - Q_2 = Q_{flame,1} - Q_{flame,2} + Q_{w,2} = cm(\theta_{60s,1} - \theta_{60s,2}), \quad (4)$$

$$Q_1 - Q_3 = Q_{flame,1} - Q_{flame,3} + Q_{w,3} = cm(\theta_{60s,1} - \theta_{60s,3}). \quad (5)$$

其中: c 为电池比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; m 为 LIB 模块总质量, g ; θ_{60s} 为不同工况下第 1 次触发热失控开始到持续 60 s 为止的平均温度, °C . 经计算, 得到工况 1 中 $\theta_{60s,1}=397 \text{°C}$, 工况 2 中 $\theta_{60s,2}=389 \text{°C}$, 工况 3 的 $\theta_{60s,3}=311 \text{°C}$.

由式(6)可知, 将 NWM 施加在极耳位置时, NWM 的冷却作用及衰减火焰热辐射的作用更加显著, 是造成 LIB 模块总能量下降, 进而抑制热失控传播的重要原因.

$$\Delta Q = cm(397 - 311) - cm(397 - 389) = 78cm. \quad (6)$$

式中 ΔQ 为工况 2 和 3 与工况 1 散热量的差值.

综上, NWM 主要通过改变火焰形态和降低火焰表面温度来衰减热辐射. 延缓或控制 LIB 模块的热失控应着重抑制火焰的发展, 及时熄灭火焰能够大幅度延长热失控的传播时间, 在实际应用中可以为人员疏散和逃生争取更多的机会.

3 结 论

1) 在抑制 LIB 模块热失控的过程中应注重对火焰的控制, 火焰会促进 LIB 模块热失控的传播, 控制火焰能够更好延缓热失控. NWM 施加在极耳位置时能够快速熄灭火焰, 且在 NWM 作用期间内电池热失控不会出现明火.

2) NWM 不同的作用位置主导机制存在差异, 试验验证了极耳位置时主导机制是通过冷却

火焰及窒息作用控制火焰发展, 从而衰减火焰热辐射, 阻止热失控的蔓延. 中间位置是通过冷却 LIB 模块表面温度间接影响火焰, 从而对热失控进行抑制. 结果表明极耳位置更好. 通过对比烟气变化, 间接说明 NWM 对延缓 LIB 模块热失控传播的有效性.

3) NWM 能够有效延长热失控的传播时间, NWM 不同施加位置延长热失控传播效果存在差异, NWM 施加在中间位置时虽能更好减少电池间的热传导通量, 但难以控制火焰, 使得降温效果不及 NWM 施加在极耳位置.

参考文献:

- [1] Jin Y, Zhao Z X, Miao S, et al. Explosion hazards study of grid-scale lithium-ion battery energy storage station [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 42: 102987.
- [2] Fernandes Y, Bry A, de Persis S. Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 389: 106-119.
- [3] Lai X, Zheng Y J, Zhou L, et al. Electrical behavior of over discharge-induced internal short circuit in lithium-ion cells [J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 278: 245-254.
- [4] 张培红, 袁威, 魏钟原, 等. 湿热环境下 NCM 三元锂离子电池热失控分析 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6): 881-887.
(Zhang Pei-hong, Yuan Wei, Wei Zhong-yuan, et al. Thermal runaway analysis of NCM lithium-ion battery in humid and hot environment [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(6): 881-887.)
- [5] Wang Q S, Mao B B, Stolarov S I, et al. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 73: 95-131.
- [6] Blomgren G E. The development and future of lithium ion batteries [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2017, 164(1): A5019-A5025.
- [7] Feng X N, Ouyang M G, Liu X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review [J]. *Energy Storage Materials*, 2018, 10: 246-267.
- [8] Lyu P, Liu X, Qu J, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage [J]. *Energy Storage Materials*, 2022, 31: 195-220.
- [9] Sun H L, Zhang L, Duan Q L, et al. Experimental study on suppressing thermal runaway propagation of lithium-ion batteries in confined space by various fire extinguishing agents [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 167: 299-307.
- [10] 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实验研究 [J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(6): 1105-1112.
(Liu Yu-jun, Duan Qiang-ling, 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.)
- [11] Saw L H, King Y J, Yew M C, et al. Feasibility study of mist cooling for lithium-ion battery [J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 2592-2597.
- [12] 郭东亮, 郭鹏宇, 孙磊, 等. 细水雾对磷酸铁锂储能电池模

