

# 双相流细水雾抑制锂离子电池热失控蔓延试验研究

张培红, 张鑫, 李子建, 姜雪  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 为抑制锂离子电池热失控及其蔓延, 构建氮气与细水雾(NWM)双相流系统. 通过改变系统施加压强和作用时间, 对比分析电池表面温度和附近烟气体积分数以及NWM的冷却功率和电池模块的热量累积, 阐述NWM系统抑制锂离子电池模块热失控蔓延的机制及有效性. 结果表明, 在NWM冷却电池模块表面和窒息机制的协同作用下, 电池模块射流火的持续时间显著降低; 且NWM压强越大, 作用时间越长, 会使电池表面的最高温度越低, 相邻电池之间TR蔓延的时间间隔越长, 表明NWM抑制锂离子电池热失控蔓延的有效性显著增强.

**关键词:** 锂离子电池; 热失控; 氮气; 细水雾; 冷却作用; 窒息机制

中图分类号: X 932 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)08-1185-08

## Experimental Study on the Suppress Effect of Biphasic Flow Water Mist on Thermal Runaway Propagation in Lithium-Ion Batteries

ZHANG Pei-hong, ZHANG Xin, LI Zi-jian, JIANG Xue

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

**Abstract:** To suppress the thermal runaway (TR) and its propagation in lithium-ion batteries, a nitrogen and water mist (NWM) biphasic flow system is constructed. By changing the pressure and duration of the system, comparing the surface temperature and the volume fraction of flue gas emitted from the batteries, and analyzing the cooling power of NWM and the heat accumulation in the battery module, the mechanism and effectiveness of NWM system in suppressing TR propagation in the lithium-ion battery module are studied. The results show that under the synergistic effect of NWM cooling the battery module surface and the suffocation mechanism, duration of the jet fire of the battery module is significantly reduced. Moreover, higher NWM pressure and longer duration of the system leads to lower peak temperature on the battery surface, and time intervals for TR propagation between adjacent batteries increases, demonstrating a significantly enhanced effectiveness of NWM in suppressing the propagation of TR in lithium-ion batteries.

**Key words:** lithium-ion battery; thermal runaway (TR); nitrogen; water mist; cooling effect; asphyxiation mechanism

面对能源问题和环境问题的双重压力, 以锂离子电池为动力的新能源汽车发展迅猛. 然而, 由于热失控 (thermal runaway, TR) 引起的锂离子电池安全事故频发<sup>[1-3]</sup>, 抑制锂离子电池 TR 及蔓延的技术措施已成为制约新能源汽车发展的重

要条件<sup>[4-5]</sup>.

国内外学者针对锂离子电池 TR 及蔓延的控制技术进行了大量卓有成效的研究. Feng 等<sup>[6]</sup>认为热阻层可以有效地防止相邻电池之间的传热及 TR 的蔓延. 文献<sup>[7-8]</sup>的研究结果表明铝板的

隔热性能良好,可以有效抑制电池模块 TR 的蔓延.然而,铝板等隔热材料只能对锂离子电池模块 TR 的蔓延进行被动控制,不能主动抑制 TR 危害.围绕锂离子电池的灭火技术,文献[9-10]的研究结果表明,尽早使用七氟丙烷和全氟己酮能有效熄灭锂离子电池火灾,并建议使用较长的持续作用时间以避免复燃.刘昱君等<sup>[11]</sup>试验研究表明,CO<sub>2</sub>近距离喷射能够快速熄灭锂离子电池火灾,但在停止喷射后会发生复燃.以上灭火剂主要利用窒息机制控制锂离子电池 TR 及火灾,然而锂离子电池表面仍处于较高温度,容易发生复燃.细水雾灭火技术因其环保、灭火效率高、水渍少、电绝缘性好等优势,在控制可燃气体火灾、电气火灾等方面得到了广泛应用.赵军超等<sup>[12]</sup>验证了低压细水雾系统抑制箱内锂离子电池模块早期热失控的有效性,但他并未对比不同参数细水雾抑制电池模块 TR 蔓延的冷却和隔氧窒息作用机制.文献[13-14]利用细水雾与 CO<sub>2</sub>, HFC-227ea, 全氟己酮协同作用的方法抑制锂离子电池热失控,结果表明协同方法的作用效果优于单独使用细水雾.Zhang 等<sup>[15]</sup>的研究结果表明,氮气与细水雾协同能高效地抑制锂离子单电池 TR 及电池复燃,但并未对其抑制电池模块 TR 蔓延的有效性进行研究.

本文搭建氮气与细水雾(nitrogen and water mist, NWM)双相流系统抑制锂离子电池模块 TR 及其蔓延的试验平台,对比分析不同压强和持续作用时间条件下 NWM 双相流系统的冷却作用和窒息效应,为锂离子电池新能源汽车领域的安全发展提供有力的技术支撑.

## 1 试验模型构建

采用尺寸为 120 mm×60 mm×7 mm 的三元锂离子软包电池 LiNi<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>(NCM)进行试验,电池容量为 5 A·h,质量为(100±0.6) g,荷电状态为 100%.电池模块由内侧竖直放置的 5 块电池和外侧的夹层结构组成,其中外侧的夹层结构由钢板、绝缘板和加热器组成,如图 1a 所示.最外层两块钢板的功能为固定电池,并模拟电池内部的紧密排列和相互间的作用压力.钢板的内侧是绝缘板,防止电池与钢板直接接触向外界传热.加热器位于绝缘板与电池 1 之间,与电池 1 直接接触,尺寸与电池相同,设置恒定功率为 350 W.从左至右依次为电池  $i$  ( $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ),靠近加

热器的表面标记为左表面,远离加热器的表面标记为右表面,每块电池沿着左右两个表面对角线均匀布置 6 个 K 型热电偶  $p_j$  ( $j \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ),如图 1b 和图 1c 所示.热电偶响应时间为 1 s,精度为 ±1.5 °C.在电池模块上方 50 cm 高度放置集烟罩和烟气分析仪,具体布置情况如图 2 所示.测试期间,环境温度保持在(20±2) °C.

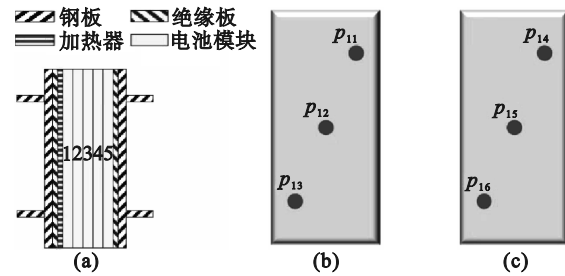


图 1 电池和热电偶的排布方式

Fig. 1 Arrangement of the batteries and thermocouples

(a)—电池模块;(b)—电池 1 左表面;(c)—电池 1 右表面.

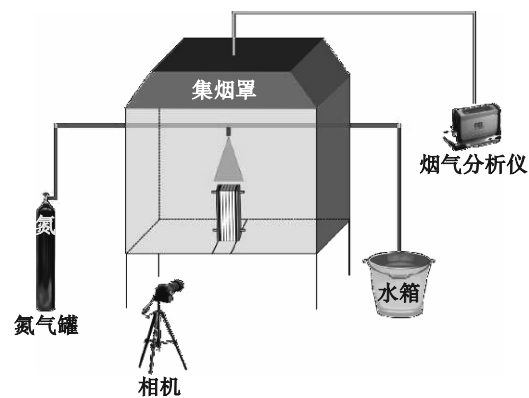


图 2 试验布置

Fig. 2 Arrangement of test

试验中 NWM 双相流系统由氮气(N<sub>2</sub>)罐、减压阀、水箱和喷头等组成,试验布置见图 2.通过控制减压阀的压力调节 NWM 的喷洒速率.该系统可产生粒径  $D_{50}$  为 40~50 μm 的 15°圆锥体超水雾区域.喷头设置于电池上方 30 cm 处,试验控制 N<sub>2</sub> 压强分别为 0.4, 0.5, 0.6 MPa. NWM 试验均在电池 1 发生 TR 时手动停止加热器,同时开启 NWM 系统,试验方案设置如表 1 所示.为了获得可靠数据,每组试验重复 3 次.

## 2 电池模块 TR 分析

电池模块 TR 试验 1 不施加 NWM 以和后续的 NWM 抑制电池模块 TR 的试验 2~试验 7 进行对比分析.由于每块电池制造工艺和热传递过程

的非稳定性等原因,每组试验各电池的 TR 过程具有一定的差异. TR 过程中各电池表面温度变化可分为 3 个阶段,如图 3 所示.以试验 1 中电池 1 表面温度变化为例,阶段 I 为电池 TR 的初期阶段,升温速率较快,温度从环境温度升至 100 °C 左右.阶段 II 为电池 TR 的前期阶段,电池开始膨胀,内部达到临界压力开始有气体泄漏.阶段 III 为电池发生 TR,产生大量烟气并伴随火星、爆燃、射流火等现象(如图 4 所示),电池表面温度快速上升至最高值,本次试验中各电池的最高温度范围为 629~722 °C.电池 1 在 528 s 触发 TR,过程中产生的热量通过电池间热传导、射流火火焰的热辐射等形式向电池 2 和其他电池传递,电池 2 在 534 s 触发 TR 并在 1 s 后产生射流火.电池 3, 4, 5 依次在 546, 567, 586 s 进入热失控状态,电池 1 TR 至电池 5 TR 整个过程中始终伴随射流火,射流火持续 96 s,电池模块的 TR 过程于 643 s 结束(见图 4).

渐增加,并且,电池 3→4 的 TR 蔓延时间达到峰值 (18±1) s.因为电池 5 相邻绝缘板,热量散失效果差,电池 5 内部温升速率加快,因此 TR 由电池 4 蔓延至电池 5 的时间  $t_{4\rightarrow5}$  较  $t_{3\rightarrow4}$  降低至 15 s 左右.因此,电池模块的热管理系统需严格监控各电池温度的变化,以便实现对于热失控的早期探测、报警,提高控制 TR 蔓延的应急响应能力.

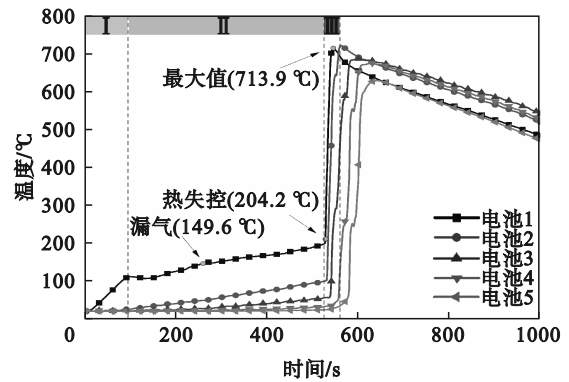


图 3 电池模块的平均温度

Fig. 3 The average temperature of battery module

表 1 试验方案设置

Table 1 Experimental scheme settings

试验	工作压力	持续时间	雾滴 $D_{50}$	$N_2$ 流量	水雾流量
	MPa	s	$\mu\text{m}$	$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	$\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$
1	—	—	—	—	—
2	0.4	30	50	52	140
3	0.5	30	45	56	160
4	0.6	30	40	61	180
5	0.4	60	50	52	140
6	0.5	60	45	56	160
7	0.6	60	40	61	180

注:试验 1 不施加 NWM.

### 3 NWM 抑制 TR 蔓延和射流火的有效性

鉴于锂离子电池 TR 过程中的有毒气体泄漏、射流火及爆燃等危险性严重,如果能在 TR 的阶段 I 或阶段 II 施加 NWM,电池模块 TR 及蔓延的危险性就更易得到控制.一旦电池 TR 过程进入阶段 III,电池表面温度迅速升高,内部自热化学反应和电化学反应速度急速增加,常规方法几乎无法控制电池模组内 TR 的蔓延.然而,实际工程中常常由于种种原因造成消防系统启动时间延迟.本文将在电池 1 发生 TR 的瞬间启动 NWM,重点讨论 NWM 的压强和持续作用时间对处于阶段 III 的电池模块 TR 及其蔓延过程的抑制作用.

定义 TR 由电池  $i$  蔓延至电池  $i+1$  的间隔时间为电池  $i \rightarrow i+1$  的 TR 蔓延时间  $t_{i \rightarrow i+1}$ .在热传导机制主导下,电池 1→2, 2→3 和 3→4 的 TR 蔓延时间逐

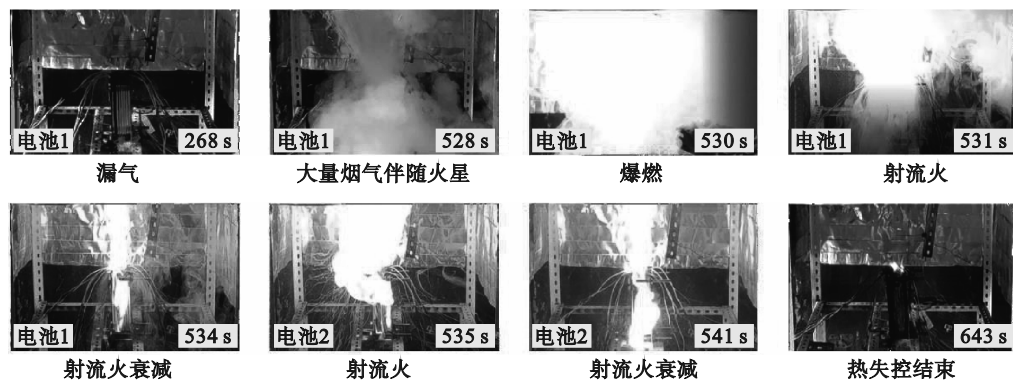


图 4 电池模块 TR 射流火及其蔓延过程

Fig. 4 Battery module TR with a jet flame and its propagation process

### 3.1 不同压强 NWM 持续作用 30 s 抑制 TR 蔓延的有效性

在试验 2~试验 4 中,工作压强 0.4~0.6 MPa NWM 系统持续作用 30 s 情况下,电池模块表面温度如图 5 所示,其中图 5 阴影部分为细水雾的释放阶段.以试验 2 为例,在电池 1 触发 TR 的时刻(741 s)启动压强为 0.4 MPa 的 NWM 系统,由图 5a 可以看出,虽然在 NWM 作用的 30 s 过程中电池 1~电池 5 的表面温度仍迅速上升,但电池 1~电池 5 最高温度均比试验 1 的电池最高温度要低.其中电池 2,3,4 的表面温度呈现短暂下降又

上升的回弹现象,表明当 NWM 的压强和释放时间不足时,虽然内部放热反应的强度因外部冷却而降低,但难以完全抑制电池内部的放热反应,因此,电池表面温度继续升高,最终整个电池模块均发生 TR.表 2 为 TR 向相邻电池蔓延的持续时间  $t_{i \rightarrow i+1}$ ,试验 2 中电池 1 TR 蔓延至电池 5 用时 105 s,与对照试验的蔓延时长 45 s 相比,说明 NWM 具有明显抑制 TR 蔓延的效果.因此在实际应用中即使 NWM 的压强和持续时间不足,也能为后续采取应急措施和人员逃生等提供宝贵时间.

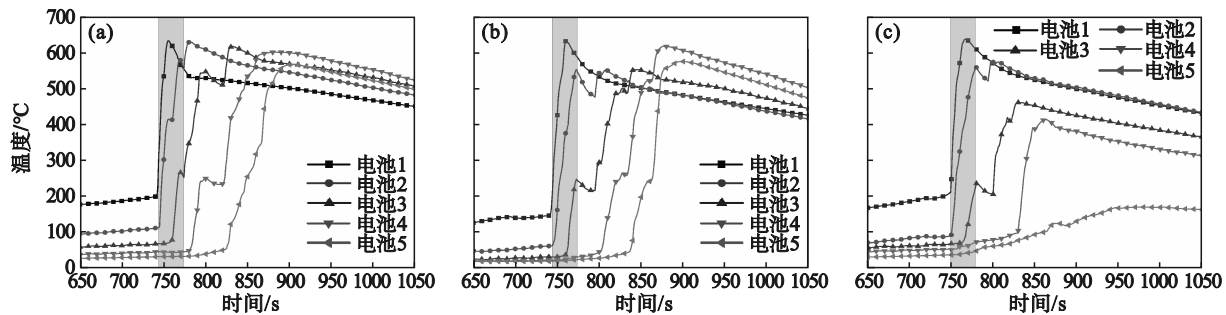


图 5 试验 2~试验 4 电池模块的平均温度

Fig. 5 The average temperature of battery model for test 2~4

(a)—试验 2; (b)—试验 3; (c)—试验 4.

表 2 TR 蔓延时间  $t_{i \rightarrow i+1}$   
Table 2 TR propagation time  $t_{i \rightarrow i+1}$  s

试验	$t_{1 \rightarrow 2}$	$t_{2 \rightarrow 3}$	$t_{3 \rightarrow 4}$	$t_{4 \rightarrow 5}$	总计
1	7	7	18	13	45
2	5	18	27	55	105
3	8	19	46	35	108
4	6	23	54	—	—
5	6	24	7	14	73
6	5	10	—	—	—
7	6	24	—	—	—

试验 3 的电池表面温度变化如图 5b 所示,虽然 NWM 双相流系统的工作压强提高到了 0.5 MPa,但仍未能有效阻止电池模块 TR 的蔓延.与试验 2 对比,电池表面最高温度进一步得到降低,且 TR 总蔓延时间略有延长.但是,电池 2 和电池 3 的回弹幅度更明显,并相继触发 TR.在 NWM 结束后第 43 s,电池 4 触发 TR,电池 3→4 TR 蔓延时间  $t_{3 \rightarrow 4}$  进一步延长.在电池表面残留雾滴冷却效应及氮气窒息效应的协同作用下,减缓了电池内部热化学反应,电池升温过程缓慢,电池 4 在 TR 触发时刻后 62 s 达到最高温度.随着液滴蒸发和外界环境中氮气浓度逐渐降低,电池 5 在 TR 触发后 40 s 便达到了最高温度.

由图 5c 可以看出,NWM 在压强为 0.6 MPa 时,虽然电池 1,2 温度变化趋势与试验 3 相同,但电池 3,4 的最高温度分别降低至 461 和 463 °C,且 TR 蔓延时间较试验 3 进一步被延长;电池 5 没有触发 TR.因此在作用时间 30 s 的条件下,NWM 压强为 0.6 MPa 是阻止电池模块 TR 蔓延的转折点.

### 3.2 不同压强 NWM 持续作用 60 s 抑制 TR 蔓延的有效性

进一步地,开展了试验 5~试验 7 压强分别为 0.4, 0.5 和 0.6 MPa,对比分析在持续作用时间为 60 s 条件下,不同工作压强 NWM 对电池模块 TR 的抑制效果.如图 6a 所示,试验 5 中电池 1 最高温度达到了 609 °C,与试验 2 相差不大,但 NWM 结束后电池 1 表面温度持续下降到 300 °C 以下;电池 2 的最高温度大幅降低至 479 °C;电池 3 表面最高温度达到 207 °C 即开始下降;关闭 NWM 后电池 3 的表面温度降低至 150 °C 左右,持续了约 200 s.然而,当停止施加 NWM 后,电池 3 在 569 s 再次触发 TR,其二次 TR 时表面最高温度达到了 600 °C.电池 4 在 576 s 发生 TR,且最高温度达到了 644 °C;电池 5 亦在 590 s 发生 TR.电池 3 表面温

度的变化过程说明当前工况处于抑制电池模块 TR 蔓延的临界点,如果能够通过延长 NWM 的作用时间或增大 NWM 的工作压强,实现对电池 3

表面温度反弹以及二次 TR 的控制,将有效抑制电池模块 TR 的蔓延.

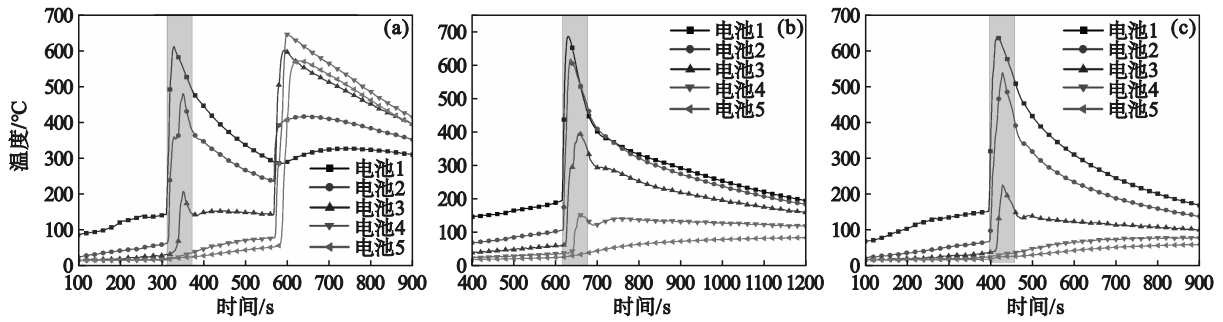


图 6 试验 5~试验 7 电池模块的平均温度

Fig. 6 The average temperature of battery model for test 5~7

(a)—试验 5; (b)—试验 6; (c)—试验 7.

由图 6b 可以看出,在 NWM 停止施加后,各电池表面温度并未发生回弹现象,且电池 4、5 没有发生 TR,表明在 NWM 作用 60 s 的有限时间内,压强 0.5 MPa 可以有效阻止 TR 向电池 4 及电池 5 蔓延.

由图 6c 可以看出,电池 3 最高温度进一步降低至 225 °C,电池 4、电池 5 表面温度始终低于 80 °C.观察试验 7 结束后电池模块表面情况(见图 7),电池 3 靠近加热器的电池左表面有轻微损坏,右表面无明显损坏,整体观察轻微鼓包;电池 4、电池 5 表面没有发生损坏且试验前后质量不变,表明电池 4、电池 5 未发生 TR.

### 3.3 不同压强和持续作用时间 NWM 抑制电池模块射流火的有效性

NWM 对电池模块射流火的抑制作用如表 3 所示.可见电池模块在 NWM 作用后,即使电池 3、4 和 5 仍发生了 TR,但均未产生射流火.随着 NWM 压强和持续时间的增加,射流火持续时间由对照试验的 96 s 最低降至 20 s,展现了 NWM 系统强大的控制射流火的能力.

表 3 试验 1~试验 7 TR 射流火抑制作用及其持续时间  
Table 3 Jet flame suppression and duration of test 1~7

试验	电池 1	电池 2	电池 3	电池 4	电池 5	射流火持续时间/s
1	√	√	√	√	√	96
2	√	√	×	×	×	29
3	√	√	×	×	×	24
4	√	√	×	×	—	22
5	√	√	×	×	×	31
6	√	√	×	—	—	22
7	√	√	×	—	—	20

注:√代表有射流火;×代表无射流火;—代表电池没有发生 TR.

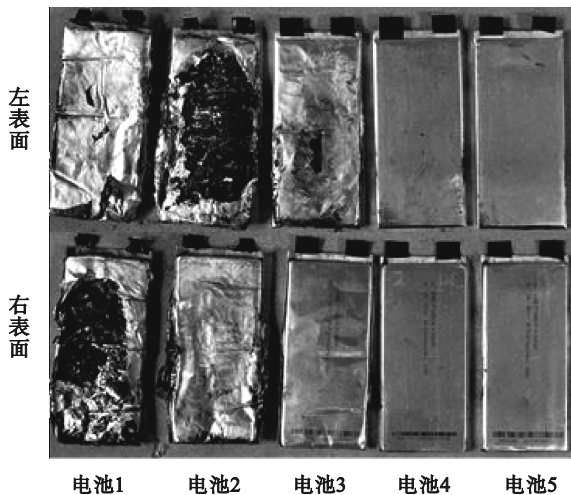


图 7 试验 7 结束后电池表面图

Fig. 7 The pictures of each battery after TR for test 7

综上,随着 NWM 双相流系统工作压强和作用时间的增大,其抑制电池模块 TR 蔓延的效果愈加显著.

### 3.4 试验结果与讨论

#### 3.4.1 NWM 对电池表面热积累的衰减作用

假设当电池表面温度高于 100 °C 时,所有雾滴立即在电池表面蒸发.试验测得 NWM 在工作压强为 0.4、0.5 和 0.6 MPa 时,到达单块电池表面的雾滴体积流量分别为  $2.13 \times 10^{-7}$ 、 $2.43 \times 10^{-7}$ 、 $2.74 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ .因此,单块电池上的 NWM 冷却功率  $P_b$  可表示为

$$P_b = c_w (t_{\text{boil}} - t_0) Q_b \rho_w + h_f Q_b \rho_w \quad (1)$$

其中: $c_w$  为水的比热容,  $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$ ;  $t_{\text{boil}}$  为水的沸点;  $t_0$  为环境温度  $20 \text{ °C}$ ;  $Q_b$  为单块电池上的

NWM 体积流量;  $h_f=2\ 257\ \text{kJ/kg}$ , 为水的蒸发潜热;  $\rho_w$  为水的密度. 工作压强为 0.4、0.5 和 0.6 MPa 时,  $P_b$  分别为 552.34、631.25、710.15 W.

热量积累代表了电池  $i$  自加热开始至达到最高温度期间积累的热量, 是表征 TR 危害和探究电池模块间传热的关键参数, 可由式 (2) 计算得到<sup>[16]</sup>.

$$H_a = c_b m_{i,b} (t_{i,\max} - t_0). \quad (2)$$

其中:  $H_a$  为热量积累;  $c_b=1.10\ \text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ , 为电池热容;  $m_{i,b}$  为测试后的电池  $i$  的质量;  $t_{i,\max}$  为电池  $i$  的最高温度. 选择工作压强为 0.6 MPa, 作用时间为 30 s 和 60 s, 对比试验 4, 试验 7 与试验 1 中各电池的热量积累来研究 NWM 对产热的影响. 如图 8 所示, 试验 1 中各电池的  $H_a$  均在  $(72\pm 5)\ \text{kJ}$  范围内. 在 NWM 作用下, 随着作用时间的延长, 从电池 1 到电池 5, 各电池的热量积累逐渐降低, 验证了 NWM 可以有效衰减电池模块 TR 传递的热量, 并且持续时间越长抑制热量传递效果越显著.

电池触发 TR 后在短时间便可积累较高的热量. 因此一旦锂离子电池 TR, 其内部的放热反应具有较高的热量积累功率, 其中电池  $i$  在 TR 过程中的热量积累功率  $P_{i,b}$  为

$$P_{i,b} = c_b m_{i,b} \frac{dT}{dt}. \quad (3)$$

式中,  $dT/dt$  为温度随时间变化的一阶导数. 试验 1 中  $P_{1,b}$  在 TR 触发时为 3 090.08 W; TR 过程中,

$P_{1,b}$  最大值为 6 954.75 W. 由于 TR 的电池内部热量积累功率远远大于试验中 NWM 作用在电池上的冷却功率, 这也解释了在电池 1 处于 TR 时开启 NWM, 无法有效抑制电池 1 进一步 TR 的原因.

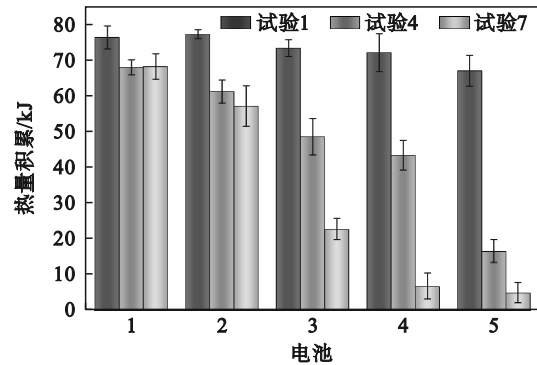


图 8 试验 1, 4, 7 的电池热量积累

Fig. 8 Heat accumulation of each battery in test 1, 4, 7

### 3. 4. 2 NWM 对电池表面温度的冷却作用

图 9 给出了试验 1 和试验 7 中电池 1 左表面位置 ( $p_{11}, p_{12}, p_{13}$ )、右表面位置 ( $p_{14}, p_{15}, p_{16}$ ) 温度. 如图 9a 所示, 用加热器直接加热电池 1 时, 左表面温度迅速升高, 由于软包电池的叠层结构和温度差异, 传热量沿着电池厚度方向和表面, 迅速向电池 1 右表面以及电池 2~5 传递, 各电池依次发生了 TR. 对比电池表面不同位置 TR 后温度分布, 电池下方温度最高, 电池中间次之, 电池上方温度最低.

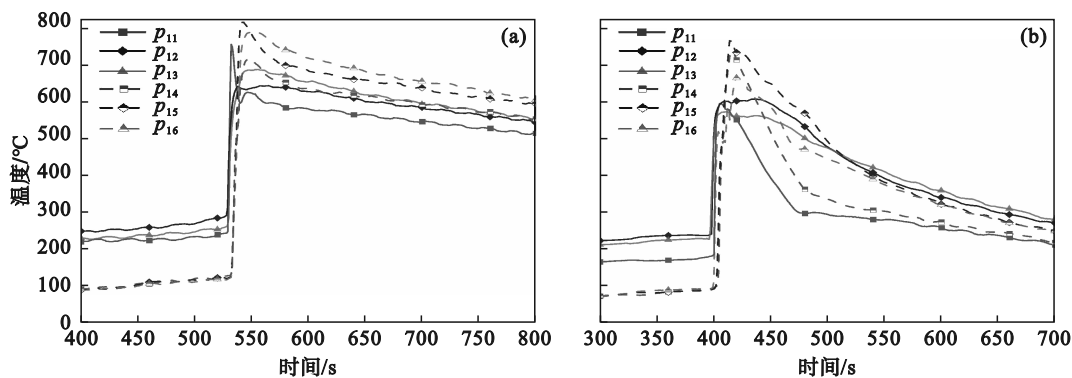


图 9 试验 1 和试验 7 中电池 1 表面各位置的平均温度

Fig. 9 The average temperature of battery 1 surface at each location in test 1 and test 7

(a)—试验 1; (b)—试验 7.

图 9b 所示为试验 7 中电池 1 左、右表面共 6 个位置的温度变化曲线. 根据热电偶测得的电池表面温度, 在电池 1 触发 TR 的时刻 ( $t=398\ \text{s}$ ), 电池 1 左表面从上至下  $p_{11}, p_{12}$  和  $p_{13}$  的温度分别为 180.6、240.2 和 347.7  $^\circ\text{C}$ . 由于 NWM 布置在电池模块的上方, 电池上表面的温度较其他位置始终

被控制得最低. 然而电池模块 TR 在伴有射流火的前提下, 有部分细水雾雾滴穿过射流火区域被消耗, 没有全部作用在电池表面. 试验 7 在 418 s 时射流火灾被扑灭, 在 NWM 作用的前 20 s 电池模块伴随射流火期间,  $p_{11}$  经历了由 TR 的触发温度升至最高温度 594.9  $^\circ\text{C}$  后再降至 557.6  $^\circ\text{C}$ , 降温

速率为  $2.87\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ . 在 NWM 作用的后 40 s 期间电池模块喷射火被扑灭,  $p_{11}$  温度降至  $359.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降温速率为  $4.95\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ . 因此电池模块伴有射流火期间, NWM 的冷却作用会受到抑制, 在实际应用中应最大限度减少射流火的持续时间, NWM 才能以最大冷却功率直接作用在电池表面, 以达到抑制电池模块蔓延的最佳效果.

综上所述, NWM 具有良好的冷却能力, 可以防止电池模块 TR 的蔓延. 应用 NWM 时, 电池表面温度在数秒内迅速下降, 相邻电池之间的热传递就被抑制, 一旦电池内部加热速率超过 NWM 冷却速率, 电池 TR 不可阻挡, 在电池 TR 期间 NWM 冷却效果可以忽略不计. 因此, 要抑制 TR 蔓延, 必须满足两个条件: ① 电池内部热量积累必须低于 NWM 冷却功率; ② 在 NWM 应用过程中, 电池表面温度必须得到很好的控制, 终止后不得发生连续加热过程.

#### 3.4.3 NWM 对电池 TR 的窒息作用

选取 NWM 压强最大、作用时间最长的试验 7 与试验 1 电池模块 TR 过程中产生的气体成分进行对比, 如图 10 所示. 试验 7 在 NWM 的窒息效应作用下, 使得可燃气体不完全燃烧, 参与反应的  $\text{O}_2$  量降低, 限制了  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  通过燃烧转化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 导致  $\text{CO}_2$  的生成量减少,  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  体积分数增加.

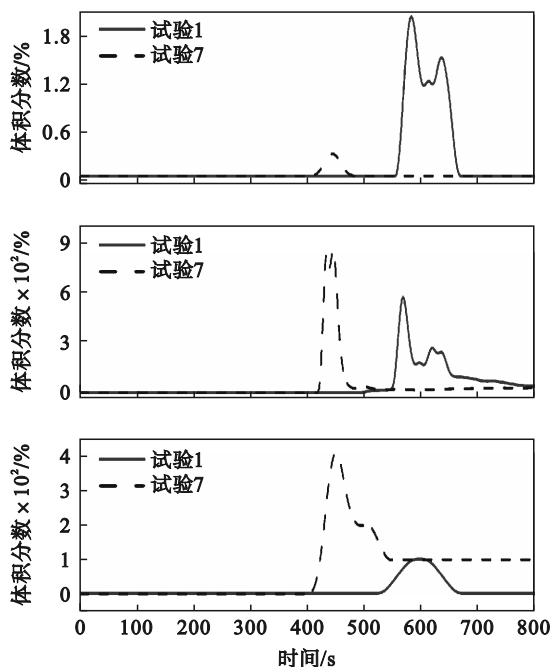


图 10 试验 1 和试验 7 电池模块 TR 过程中各烟气含量  
Fig. 10 Content of each flue gas during the TR process of the battery module in test 1 and test 7

(a)— $\text{CO}_2$ ; (b)— $\text{CO}$ ; (c)— $\text{H}_2$ .

## 4 结 论

1) NWM 具有良好抑制电池模块 TR 蔓延的效果. NWM 的压强越大, 持续时间越长, 电池的最高温度也越低, 越能有效地延长相邻电池之间的 TR 蔓延时间或终止电池模块 TR 蔓延.

2) NWM 可以有效扑灭电池模块射流火灾, 并且在氮气和超细水雾共同作用下, 后续电池即使发生 TR 也未伴随射流火.

3) 试验均在电池 1 触发 TR 时启动 NWM ( $0.4\sim 0.6\text{ MPa}$ ) 双相流系统, 由于电池 TR 时热量积累功率远大于 NWM 的冷却功率, 对电池 1 的最高温度及抑制其 TR 蔓延的影响并不明显, 但对后续电池的热量积累控制效果随着作用压强和持续时间的增大愈发明显. 即使电池模块 TR 被控制, 仍需要注意一段时间后电池温度可能会发生回弹, 回弹现象可能会导致 TR 重新蔓延.

4) 在 NWM 双相流系统窒息机制作用下, 电池模块 TR 过程中产生的  $\text{CO}_2$  体积分数降低,  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  的体积分数增加.

#### 参考文献:

- [1] Chiu K C, Lin C H, Yeh S F, et al. An electrochemical modeling of lithium-ion battery nail penetration [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 251: 254 - 263.
- [2] 张培红, 袁威, 魏钟源, 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.)
- [3] Wang Z, Yang H, Li Y, et al. Thermal runaway and fire behaviors of large-scale lithium-ion batteries with different heating methods [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 379(5): 120730.
- [4] Wang Q S, Mao B B, Stolarov S L, 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.
- [5] Zhao L H, Sottos N R. Autonomous strategies for improved performance and reliability of Li-ion batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 11(5): 2003139.
- [6] Feng X N, He X M, Ouyang M G, et al. Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25 Ah  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  large format lithium-ion battery [J]. *Applied Energy*, 2015, 154: 74-91.
- [7] Yuan C C, Wang Q S, Wang Y, et al. Inhibition effect of different interstitial materials on thermal runaway propagation in the cylindrical lithium ion battery module [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 39-50.
- [8] Li Q B, Yang C B, Santhanagopalan S, et al. Numerical investigation of thermal runaway mitigation through a passive thermal management system [J]. *Journal of Power*

- Sources, 2019, 429: 80-88.
- [9] Wang Q S, Shao G Z, Duan Q L, et al. The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppressing the lithium titanate battery fire [J]. *Fire Technology*, 2016, 52(2): 387-396.
- [10] Liu Y J, Yang K, Zhang M J, et al. The efficiency and toxicity of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one in suppressing lithium ion battery [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 65: 532-540.
- [11] 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.)
- [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): 1897-1903.  
(Zhao Jun-chao, Fu Yang-yang, 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): 1897-1903.)
- [13] Zhang L, Li Y Q, Duan Q L, et al. Experimental study on the synergistic effect of gas extinguishing agents and water mist on suppressing lithium-ion battery fires [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101801.
- [14] Liu Y J, Duan Q L, Xu J J, et al. Experimental study on a novel safety strategy of lithium-ion battery integrating fire suppression and rapid cooling [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 28: 101185.
- [15] Zhang T W, Liu H, Song J W, et al. Synergistic inhibition effect on lithium-ion batteries during thermal runaway by N<sub>2</sub>-twin-fluid liquid mist [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 37: 102269.
- [16] Feng X N, Sun J, Ouyang M G, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium-ion battery module [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 275: 261-273.

(上接第 1142 页)

- [6] Shi H Y, Yuan S M, Zhang C, et al. A cutting force prediction model for rotary ultrasonic side grinding of CFRP composites considering coexistence of brittleness and ductility [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(5): 2403-2414.
- [7] Huang C, Zhou M, Zhang H J. A cutting force prediction model in axial ultrasonic vibration end grinding for BK7 optical glass considering protrusion height of abrasive grits [J]. *Measurement*, 2021, 180: 109512.
- [8] Lei X F, Xiang D H, Peng P C, et al. Establishment of dynamic grinding force model for ultrasonic-assisted single abrasive high-speed grinding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 300: 117420.
- [9] Yang Z C, Zhu L D, Lin B, et al. The grinding force modeling and experimental study of ZrO<sub>2</sub> ceramic materials in ultrasonic vibration assisted grinding [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(7): 8873-8889.
- [10] Malkin S, Guo C S. *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives* [M]. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008.
- [11] 杨军, 李志鹏, 李伟, 等. 基于不同单颗磨粒模型的微细磨削力研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(8): 54-62.  
(Yang Jun, Li Zhi-peng, Li Wei, et al. Study on micro-grinding force based on different single abrasive particle models [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(8): 54-62.)
- [12] Ma L J, Gong Y D, Chen X H. Study on surface roughness model and surface forming mechanism of ceramics in quick point grinding [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 77(2): 82-92.
- [13] Wang D X, Ge P Q, Bi W B, et al. Grain trajectory and grain workpiece contact analyses for modeling of grinding force and energy partition [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(9): 2111-2123.
- [14] Kumar V C, Hutchings I M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration [J]. *Tribology International*, 2004, 37(10): 833-840.
- [15] 郎献军, 何玉辉, 唐进元, 等. 基于磨粒突出高度为瑞利分布的磨削力模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(10): 3386-3391.  
(Lang Xian-jun, He Yu-hui, Tang Jin-yuan, et al. Grinding force model based on prominent height of abrasive submitted to Rayleigh distribution [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(10): 3386-3391.)
- [16] 孙立业, 李红双, 韩廷水, 等. 端面平磨氧化铝陶瓷磨削力影响因素实验研究[J]. *中国工程机械学报*, 2022, 20(2): 161-166.  
(Sun Li-ye, Li Hong-shuang, Han Ting-shui, et al. Experimental study on influencing factors of grinding force of end face grinding alumina ceramics [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2022, 20(2): 161-166.)