

中文引用格式:刘永成,张国维,赵刚强,等. 干冰对锂离子电池单体热失控抑制效能的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 227-234.

英文引用格式:LIU Yongcheng, ZHANG Guowei, ZHAO Gangqiang, et al. Study on suppression effect of dry ice on thermal runaway of lithium-ion battery cells[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 227-234.

干冰对锂离子电池单体热失控抑制效能的影响研究^{*}

刘永成^{1,2}, 张国维^{1,2}教授, 赵刚强³, 刘淳元^{1,2}, 于龙飞^{1,2}, 陈泽威^{1,2}

(1 中国矿业大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057; 2 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 3 潘石高端装备制造江苏有限公司, 江苏 徐州 221009)

中图分类号: X913.3

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0422

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3090503); 广东省科技计划项目(2024B111080001)。

【摘要】 为开发锂离子电池专用的新型有效的灭火剂, 搭建试验平台, 开展干冰对 20 Ah 磷酸铁锂离子电池(简称锂离子电池)热失控抑制效能研究。结果表明: 1.5 kg 干冰能阻断锂离子电池热失控早期的进程; 干冰对锂离子电池热失控的抑制效能与喷射量呈正相关, 干冰喷射量提升至 2.6 kg 时可抑制锂离子电池急剧热失控阶段的进程。干冰的相变吸热速率与环境温度梯度呈正相关, 但干冰冷却率和有效利用率并非随着喷射量和环境温度的提升而增加, 试验中, 随着在电池泄压前将干冰喷射量从 0.65 kg 增至 2.6 kg 时, 干冰冷却率与有效利用率呈现先升高后减小的趋势, 而随着热失控的剧烈程度和环境温度的升高, 二者分别从 67.5%、7.8% 降至 15.4% 和 4.1%。

【关键词】 锂离子电池; 热失控; 干冰; 降温; 抑制效能

Study on suppression effect of dry ice on thermal runaway of lithium-ion battery cells

LIU Yongcheng^{1,2}, ZHANG Guowei^{1,2}, ZHAO Gangqiang³, LIU Chunyuan^{1,2},
YU Longfei^{1,2}, CHEN Zewei^{1,2}

(1 Shenzhen Research Institute, China University of Mining and Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China; 2 School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 3 Jiangsu Fanshi High-end Equipment Manufacturing Co., Ltd., Xuzhou Jiangsu 221009, China)

Abstract: To develop a novel and effective fire-extinguishing agent dedicated to lithium-ion batteries, this study established an experimental platform. Experiments were conducted on 20 Ah lithium-ion phosphate batteries to investigate the inhibitory efficacy of dry ice on the thermal runaway of lithium-ion batteries. Experimental results indicate that dry ice can successfully inhibit the thermal runaway process of lithium-ion batteries: specifically, spraying 1.5 kg of dry ice in the experiment effectively blocked the early-stage thermal runaway of the battery. Furthermore, the inhibitory efficacy of dry ice on battery thermal runaway shows a positive correlation with its spray amount—increasing the dry ice spray amount to 2.6 kg enabled successful suppression of the battery's severe thermal runaway stage. In addition, the

phase change heat absorption rate of dry ice is positively correlated with the ambient temperature gradient; however, the cooling rate and effective utilization rate of dry ice do not increase with the rise in spray amount or ambient temperature. In the experiment, when the dry ice spray amount was increased from 0.65 kg to 2.6 kg before battery pressure relief, both the cooling rate and effective utilization rate of dry ice exhibited a trend of first increasing and then decreasing. Moreover, as the severity of thermal runaway and ambient temperature increased, the two decreased from 67.5% and 7.8% to 15.4% and 4.1%, respectively. This study may provide a reference for the development of lithium-ion batteries fire-extinguishing agents.

Keywords: lithium-ion battery; thermal runaway; dry ice; temperature cooling; suppression effect

0 引言

在“双碳”战略目标的快速驱动下,以锂离子电池为核心的储能、新能源汽车等相关行业快速发展。然而,以热失控为特征的锂离子电池安全事故时有发生^[1],造成大量人员伤亡和财产损失^[2],使锂离子电池安全事故受到越来越多的关注。

国内外学者针对锂离子电池热失控进程及防护开展了大量研究。FENG Xuning 等^[3]提出阐释链式反应进程的能量释放图,并建立一种降低热失控风险的三级防护理论;APPLEBERRY 等^[4]验证了超声诊断可在灾难性失效前提供可操作的过充预警;BAI Jinlong 等^[5]发现,压力升高会加速热失控触发、缩短火焰喷射时长,但同时会提高火焰温度与扩散面积;曹勇^[6]等发现,气凝胶垫均可抑制电池模组热失控蔓延且增大气凝胶垫厚度可以有效降低被保护电池的峰值温度;王春力等^[7]将一氧化碳和温度作为探测依据,实现了锂离子电池热失控的早期预警。前人对热失控进程以及早期监测防护等方面的研究取得了显著成果,然而,针对扑灭锂离子电池火灾的方式尚未有定论,这是由于迅速灭火和快速降温是锂离子电池灭火剂的关键^[8-9],而传统灭火剂存在无法快速灭火、降温能力不足、电池易复燃等问题。如七氟丙烷虽然可以扑灭单个电池和小规模电池火灾,但无法阻止电池的复燃^[10];全氟己酮虽能快速灭火和降温,但存在毒性气体生成的问题^[11];液氮存在运输、储存成本较高的难题^[12];水基灭火剂存在用水量大、电气安全性的问题^[13]等。干冰是二氧化碳的固体形式,其相变温度为-78.5℃,常温常压下会迅速升华吸热(潜热 573 kJ/kg)并释放大

量二氧化碳气体,常用于用于工业生产^[14]、工业清洗^[15]、低温试验^[16]等领域。目前,针对干冰在消防领域的研究大多集中于在煤矿火灾,如高玉坤^[17]等

采用 Fluent 软件建立了采空区滞留干冰的渗流场与浓度场三维模型,研究了其对煤矿火灾的影响;LIU Wei 等^[18]自主开发了一种加速干冰升华的装置,并成功应用于几起煤矿早期自燃火灾的灭火中。当前,有关干冰抑制锂离子电池火灾的研究尚存在空白,而干冰满足电池灭火剂快速灭火和冷却降温^[19]的要求,是一种潜在的电池灭火剂。

鉴于此,笔者拟选用 20 Ah 磷酸铁锂离子电池作为对象,开展试验研究,探讨干冰作为灭火剂降低锂离子电池表面温度、阻断热失控进程作用,以期

为锂离子电池火灾防控技术提供参考。

1 试验方案与干冰作用过程分析

1.1 试验电池

试验所用电池为尺寸 27 mm×70 mm×135 mm 的方形磷酸铁锂离子电池,容量为 20 Ah,标称电压为 3.2 V。试验前,电池均按照标准充放电方式循环充电至 100% 荷电,并至少静置 24 h,使其内部电压稳定。为了防止电池在加热过程中因鼓包和泄压而造成的位移,使用自制的电池夹具固定电池,并在电池的侧面、非加热面以及安全阀上方布置若干热电偶,监测电池表面温度的变化。电池布置方式与温度测点如图 1 所示。

1.2 试验平台

自主搭建储能电池火灾干冰灭火试验平台,如图 2 所示。试验平台由集烟罩、数据采集器、高清摄像机、干冰喷射系统和不锈钢电池盒等组成,其中,电池盒长 62 cm、宽 41 cm、高 25.5 cm,并设有观察窗。

1.3 试验方案

为深入研究干冰对锂离子电池热失控的抑制效能,使用 3 mm 干冰并以 0.8 MPa 压缩空气为驱动

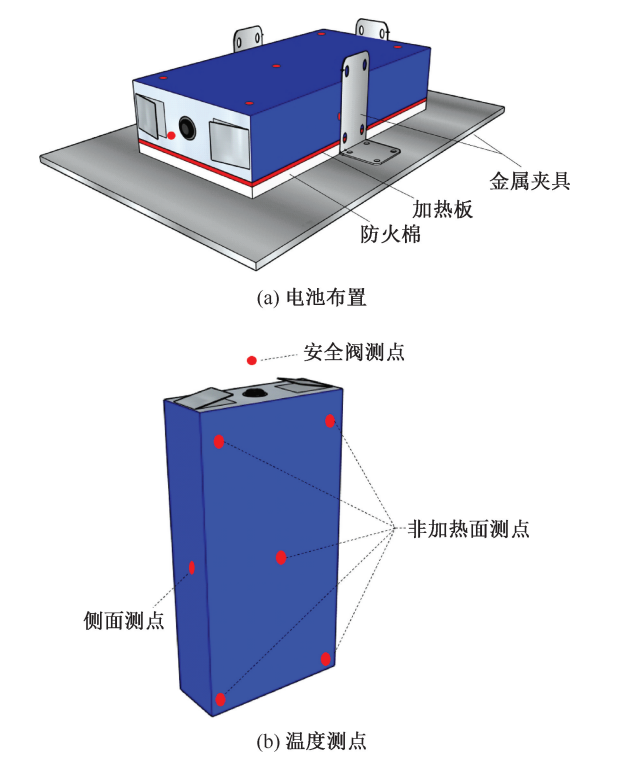


图 1 电池布置与温度测点

Fig.1 Battery layout and temperature measuring points

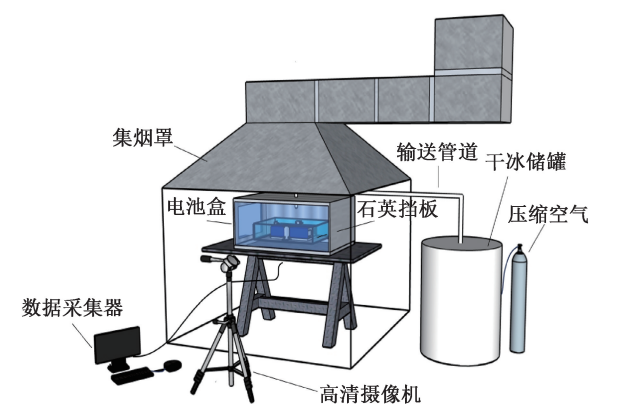


图 2 试验平台

Fig.2 Experimental platform

气体,通过输送管道将干冰从储罐中喷射至电池表面,管道直径为 38 mm,喷射口距电池表面距离为 15 cm。同时,在电池的外围布置石英挡板,以减少干冰浪费,并模拟电池在受限空间内的使用情况。使用功率为 500 W 的加热板作为外部热源触发热失控。在设定的热失控阶段喷射干冰并同时关闭加热板电源。采用数据采集器记录电池表面温度数据,并观察电池热失控状况。以非加热面平均温度作为电池表面温度进行分析。试验工况见表 1,其中,工况 0 为空白对照组试验。

表 1 试验工况			
Table 1 Experimental condition			
工况设置	喷射时机	喷射量/kg	喷射时间/s
0	—	—	—
1	安全阀开启前	1.5	15
2	安全阀开启后	1.5	15
3	急剧热失控	1.5	15
4	安全阀开启前	0.65	8
5	安全阀开启前	1.5	15
6	安全阀开启前	2.6	30
7	急剧热失控	1.5	15
8	急剧热失控	2.6	30

2 干冰对锂离子电池热失控抑制效能的影响研究

2.1 锂离子电池热失控现象

电池热失控过程分为 4 个阶段,即被动加热阶段(阶段 I)、安全阀泄压阶段(阶段 II)、急剧热失控阶段(阶段 III)和阴燃阶段(阶段 IV)。图 3 为对照组温度变化,其中, t_{TC1} 、 t_{TC2} 、 t_{TC3} 分别为电池非加热面温度、侧面温度及安全阀处温度, U_0 为电池电压。由于电池制造工艺、批次与各电池单体内部构造的不同,达到电池热失控各阶段所需的时间有所不同,但热失控的进程和各阶段温度总体一致。

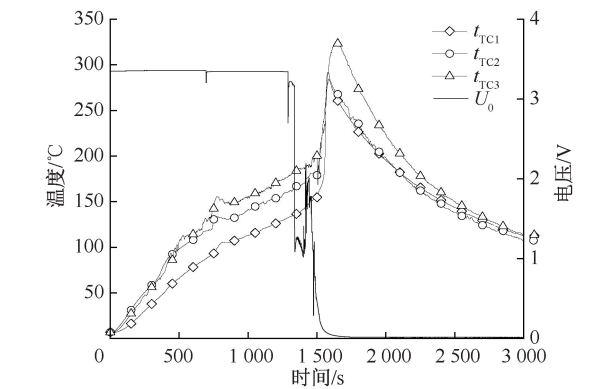


图 3 对照组温度变化

Fig.3 Temperature change of control group

电池在外部热源的作用下内部温度不断升高,会逐渐经历电池容量衰减,固体电解质界面膜分解等过程^[20]。试验进行至 734 s 时(电池非加热面温度为 95 ℃),电池安全阀破裂并释放大量热和高温烟气,电池由被动加热阶段到达安全阀泄压阶段,随后进入急剧热失控阶段。处于急剧热失控阶段的电池内部电解液加剧分解、隔膜进一步融化,导致正负极直接接触并引发电池内部大规模短路,使电池电

压在剧烈波动后急剧下降至 0 V。剧烈的化学反应促使电池喷出大量电解液和高温烟气,在此过程中电池表面温度经小幅度下降后急剧上升,试验进行至 1 579 s 时达到峰值 291.8 °C。需要注意的是,急剧热失控阶段是锂离子电池热失控过程中最危险的阶段,此阶段电池表面温度呈指数型上升趋势,伴随大量热量和可燃气体释放,严重时可能引发燃烧或爆炸事故,因此,抑制电池热失控的进程或减少电池在此阶段的产热量与产气量是研究的重点。电池非加热面温度达到峰值后逐渐下降至室温的过程为电池的阴燃阶段。在此阶段,电池内部副反应和自产热基本停止,但电池余温依旧很高,若不加以控制,会导致电池与相邻电池和环境之间进行换热,发生连锁反应。

2.2 干冰对热失控不同阶段抑制效能的影响

工况 1—工况 3 下,电池表面温度 t_1 、 t_2 、 t_3 和电压 U_1 、 U_2 、 U_3 的变化如图 4 和图 5 所示。工况 1 下,电池在加热至 323 s 时达到峰值温度 97.3 °C,在干冰的作用下,电池表面温度在 360 s 时达到最低 31.5 °C,之后小幅度回升,最高回升温度为 41.6 °C,然后逐渐下降至室温。在此试验过程中,电池电压保持不变。将电池表面温度回升超过 90 °C 且温升速率连续 3 s 大于 1 °C/s 作为电池复燃标准。从结果来看,工况 1 下电池安全阀未打开,电池电压和质量与试验前保持一致,说明在电池泄压前喷射 15 s 的干冰能够有效抑制锂离子电池热失控的进程。分析工况 2 表面温度,电池表面温度在 471 s 时达到峰值 119.9 °C,在干冰的作用下温度迅速降低,至 509 s 时达到 35.4 °C,随后电池温度缓慢回升至 44.3 °C,又逐渐降低至室温。试验过程中电池电压在经历一段时间的波动后在干冰的成功抑制下恢复稳定。这说明在电池刚刚泄压时施加一定量的干冰也可以有效抑制热失控的进程。在工况 3 中,电池表面温度于 635 s 时到达峰值 326.8 °C,在干冰作用下于 660 s 时降低至 181.6 °C,随后迅速回升至 278.8 °C。在此试验过程中,电池电压在经历大幅度的波动后电压降低为 0。综上,喷射 15 s 的干冰并不能阻断电池的急剧热失控的进程,原因是干冰升华吸收的热量低于电池急剧热失控产生的热量。

工况 1—工况 3 中,电池表面最高降温速率分别为 -6.75、-9.5 和 -28 °C/s,这是由于锂离子电池热失控越剧烈,释放的热量就越多,周围环境温度也就越高,而干冰的相变潜热吸收速率与温度梯度正

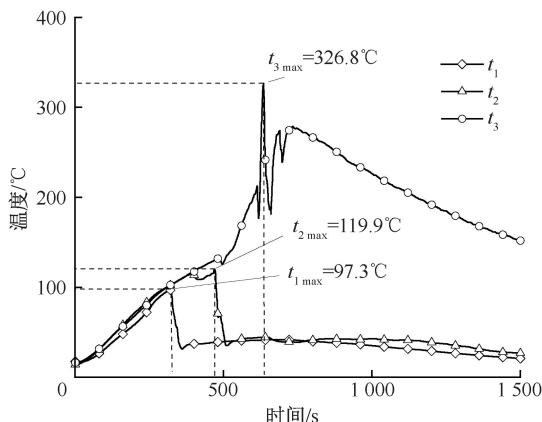


图 4 工况 1—工况 3 的温度变化

Fig. 4 Temperature change curve under working conditions 1-3

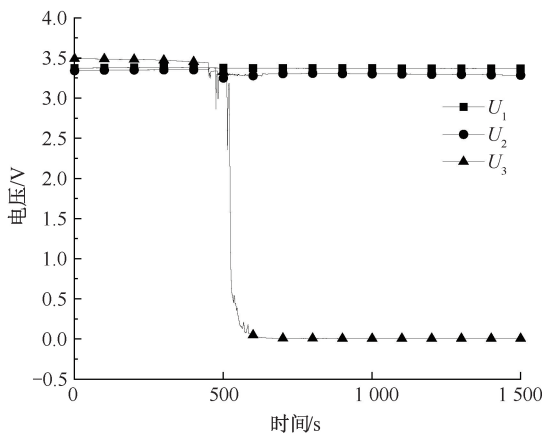


图 5 工况 1—工况 3 电压变化

Fig. 5 Voltage variation under working conditions 1-3

相关,同时,高温环境增强 CO_2 气体的扩散,使其更快覆盖高温区域,通过相变吸热主导的快速降温与高浓度 CO_2 对氧化链式反应的同步抑制形成双重协同效应,从而表现为降温速率随热失控剧烈程度同步提升。此外,高温的环境也可能引发干冰与电池表面接触界面的瞬态微对流,进一步强化热传递效率。虽然在锂离子电池热失控早期与泄压阶段,喷射一定量的干冰能够有效阻止电池热失控的进程,但少量干冰对于电池急剧热失控时期的抑制效果并不明显,这是由于电池在急剧热失控阶段的产热量远大于干冰升华吸收的热量。

2.3 干冰喷射量对锂离子电池热失控抑制效能的影响

图 6 为工况 4—工况 8 下电池表面温度变化曲线。以工况 4 为例,电池非加热面平均温度最大值为 104.6 °C (252 s),在电池达到泄压阶段前喷射 8 s (0.65 kg) 干冰;温度迅速下降至最低 38.1 °C (281

s),随后缓慢回升,最高回升温度为 67.2 ℃ (334 s)。这表明在热失控早期喷射少量的干冰可以抑制 电池热失控进程。表 2 为工况 4—工况 8 下各参数 对比。

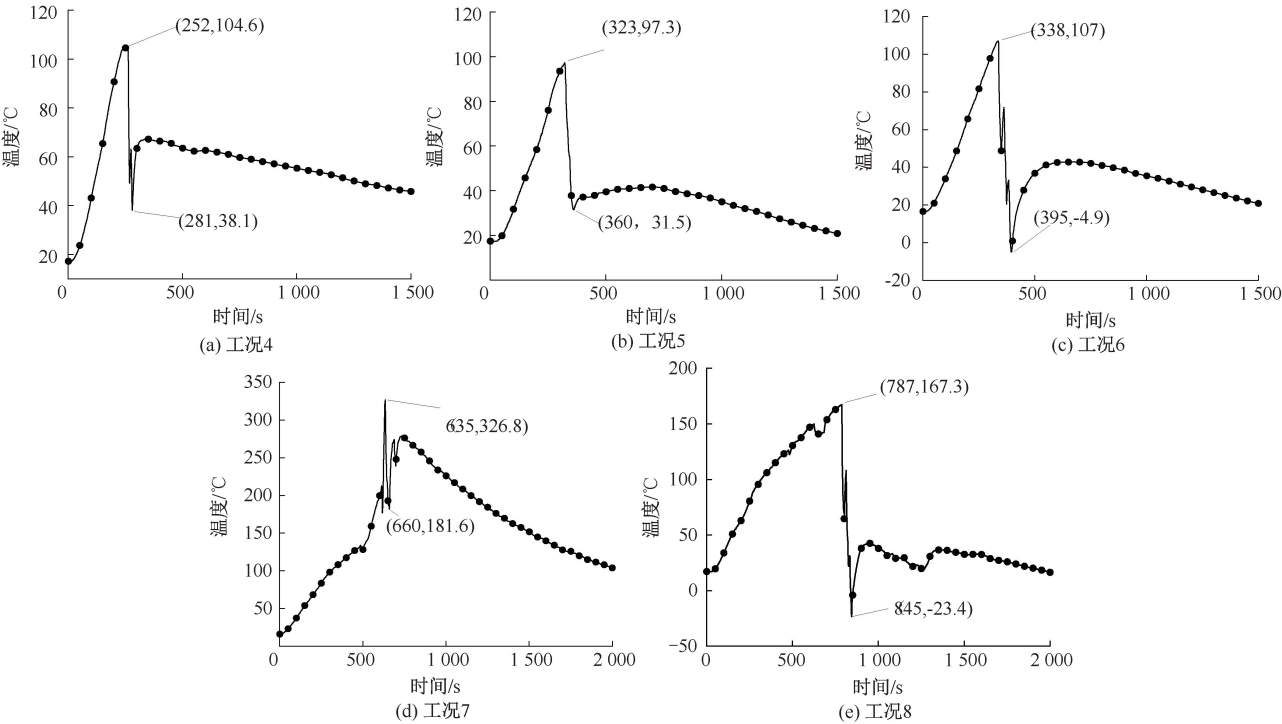


图 6 工况 4—工况 8 温度变化

Fig. 6 Temperature change under working conditions 4—8

表 2 工况 4—工况 8 下各参数对比

Table 2 Comparison of parameters under working conditions 4—8							
工况	干冰喷射质量 m/kg	电池表面最高温度 $t_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	电池表面最低温度 $t_{\text{min}}/^\circ\text{C}$	最大温降 $\Delta t_i/^\circ\text{C}$	最大温降所需时间 τ_i/s	最大温升 $\Delta t_u/^\circ\text{C}$	最大温升所需时间 τ_u/s
4	0.65	104.6	38.1	66.5	29	29.1	53
5	1.5	97.3	31.5	65.8	37	10.1	303
6	2.6	107	-4.9	111.9	57	47.9	613
7	1.5	326.8	181.6	145.2	25	97.2	72
8	2.6	167.3	-23.4	190.7	58	66.6	100

对工况 4—工况 6,工况 5 的降温幅度为 65.8 ℃,几乎持平于工况 4 的 66.5 ℃,而工况 6 的降温效能显著提升,降温幅度达 111.9 ℃,这是由于少量的干冰的抑制效能存在明显的临界阈值效应,即在电池泄压前喷射一定范围的干冰时,由于电池产热较少,少量干冰即可抑制电池热失控的热量传递,而大量的干冰喷射导致电池局部温度骤降过快,引发电池内部温度梯度增大。

工况 7 和工况 8 下,最大降温幅度显著高于泄压前喷射的对应工况,这是由于热失控导致的高温环境加速了干冰的升华,显著提升了潜热吸收速率与 CO₂ 气体的扩散效率,即干冰升华吸热能力与电池表面温度呈正相关关系。工况 7 中,电池表面温

度从峰值 326.8 ℃降低至 181.6 ℃且温度发生大幅度的回升,高于电池复燃的标准温度,说明 1.5 kg 的干冰抑制效能有限。工况 8 中,将干冰喷射量提升至 2.6 kg,成功将电池表面最高温度抑制在 167.3 ℃。

通过对比发现,随着喷射干冰质量的增加,电池表面温度回升至最高所需时间增长,如工况 4—工况 6 所需时间分别为 29、37、57 s,这是由于电池在各阶段释热量与干冰升华吸热量均相对稳定,环境温度得以维持在一定区间。未升华的干冰会形成固体热阻屏障,其厚度与质量随喷射量增加而增大,从而更持久地抑制电池内部化学反应,延缓温度回升。综上,随着干冰质量的增加,其对热失控的抑制效能

也随之增加。

2.4 热量特性分析

电池热量特性主要有：

$$m_a = m - m_b \tag{1}$$

$$Q = cm_d(t_{\max} - t_0) \tag{2}$$

$$Q_s = cm_d(t_{\max} - t_e) \tag{3}$$

$$Q_i = m_a h \tag{4}$$

$$\eta = (Q_s/Q) \times 100\% \tag{5}$$

$$\varepsilon = (Q_s/Q_i) \times 100\% \tag{6}$$

式中： m_a 为实际消耗干冰的质量，kg； m 为喷射干冰的质量，kg； m_b 为试验结束后剩余干冰质量，kg； Q 为电池热失控产生的热量，kJ； c 为电池比热容，kJ/(kg·℃)； m_d 为电池质量，kg； $t_{\max}$ 为电池表面最高温度，℃； t_0 为加热前电池表面温度，℃； Q_s 为干冰实际吸收电池的热量，kJ； t_e 为干冰喷射后电池表面最高回升温度，℃； Q_i 为干冰理论上吸收热量，kJ； h 为干冰升华潜热，kJ/kg； η 为干冰冷却率； ε 为干冰有效利用率。

将试验看成在理想环境下进行，忽略干冰与电池进行换热以外的热量损失与温度回升后降温过程中的热量交换，不考虑电池因热失控而产生的质量损失， m_d 取 0.51 kg， h 取 573 kJ/kg， t_0 取 15℃， c 取 1.1 kJ/(kg·℃)，计算得到热量参数，见表 3。

表 3 热量参数

Table 3 Heat parameter

工况	Q/kJ	Q_s/kJ	Q_i/kJ	$\eta/\%$	$\varepsilon/\%$
1	46.2	31.2	401.1	67.5	7.8
2	58.8	42.4	456.1	72.1	9.3
3	174.9	26.9	653.22	15.4	4.1
4	50.3	21.0	280.77	41.7	7.5
5	46.2	31.2	401.1	67.5	7.8
6	51.6	30.4	555.8	58.9	5.5
7	174.9	26.9	653.22	15.4	4.1
8	85.4	43.4	716.25	50.8	6.1

在泄压前、泄压后、急剧热失控阶段喷射 1.5 kg 干冰，冷却率分别达到 67.5%、72.1%、15.4%，有效利用率分别为 7.8%、9.3%、4.1%，泄压前后喷射冷却率与有效利用率接近，而急剧热失控阶段相应参

数均明显降低。分析剩余干冰质量，发现工况 1、工况 2 剩余干冰量接近，而工况 3 剩余干冰量仅为工况 1、工况 2 的一半，表明高温环境会导致干冰快速升华，喷射干冰不足导致电池周围未形成有效热阻屏障，使干冰冷却率和有效利用率降低。

泄压前不同喷射量（工况 4—工况 6）下的吸热量及相关参数如图 7 所示，泄压前电池积聚总热量为 46.2~51.6 kJ，喷射的干冰质量从 0.65 kg 增至 2.6 kg，干冰吸收的热量（21、31.2、30.4 kJ）和冷却率（41.7%、67.5%、58.9%）先升高后略微降低，而有效利用率（7.5%、7.8%、5.5%）先略微升高后降低，说明干冰对锂离子电池热失控早期抑制效能存在某一临界阈值。

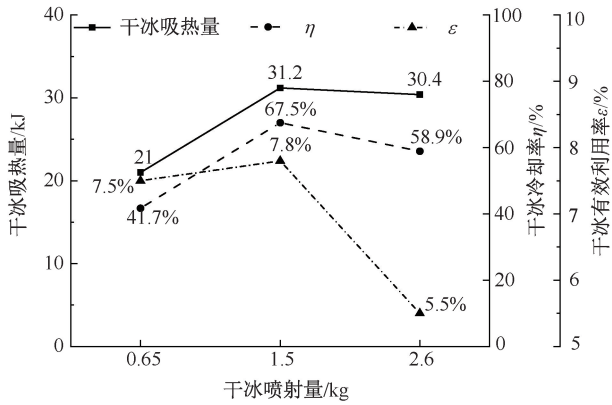


图 7 工况 4—工况 6 热量参数

Fig. 7 Diagram of heat parameters under working conditions 4 — 6

3 结 论

1) 在电池安全阀开启前后喷射 1.5 kg 的干冰，能够分别将电池表面回升温度控制在 41.6 和 44.3℃ 以下，但在急剧热失控阶段，喷射时电池表面最高回升温度达 278.8℃，说明喷射 1.5 kg 的干冰能够抑制电池热失控早期的进程，但对急剧热失控阶段的抑制效能有限。

2) 增加干冰喷射量可以有效提高电池表面最大降温幅度，当干冰喷射量从 0.65 提升至 2.6 kg，电池表面最大降温幅度提升 68%。

参 考 文 献

[1] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]. 北京:清华大学, 2016.
FENG Xuning. Induction and propagation mechanisms, modeling and prevention of thermal runaway in vehicle-mounted lithium-ion power batteries[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.

- [2] 王庭华, 翟宏举, 秦鹏, 等. 模组箱体空间内磷酸铁锂离子电池热失控及其传播行为研究[J]. 火灾科学, 2022, 31(1): 25-34.
WANG Tinghua, ZHAI Hongju, QIN Peng, et al. Study on the thermal runaway and its propagation behaviors of lithium iron phosphate battery in module box space[J]. Fire Safety Science, 2022, 31(1): 25-34.
- [3] FENG Xuning, OUYANG Minggao, LIU Xiang, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.
- [4] APPLEBERRY M C, KOWALSKI J A, AFRICK S A, et al. Avoiding thermal runaway in lithium-ion batteries using ultrasound detection of early failure mechanisms[J]. Journal of Power Sources, 2022, 535: DOI:10.1016/j.jpowsour.2022.231423.
- [5] BAI Jinlong, WANG Zhirong, GAO Tianfeng, et al. Effect of mechanical extrusion force on thermal runaway of lithium-ion batteries caused by flat heating[J]. Journal of Power Sources, 2021, 507: DOI:10.1016/j.jpowsour.2021.230305.
- [6] 曹勇, 杨大鹏, 朱清, 等. 大容量磷酸铁锂离子电池模组热失控研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(7): 2 462-2 469.
CAO Yong, YANG Dapeng, ZHU Qing, et al. Thermal runaway of large capacity lithium-iron phosphate battery pack[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(7): 2 462-2 469.
- [7] 王春力, 贡丽妙, 亢平, 等. 锂离子电池储能电站早期预警系统研究[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1 152-1 158.
WANG Chunli, GONG Limiao, KANG Ping, et al. Research on early warning system of lithium ion battery energy storage power station [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1 152-1 158.
- [8] 黄江, 金建泉, 赵梁, 等. 锂离子电池火灾灭火剂及灭火策略研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(11): 2 121-2 132.
HUANG Jiang, JIN Jianquan, ZHAO Liang, et al. Review of fire extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion battery fire [J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(11): 2 121-2 132.
- [9] 张淇厚, 李思成, 刘佳玲. 抑制锂离子电池火灾的新型灭火剂研究进展[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(8): 1 138-1 144.
ZHANG Qihou, LI Sicheng, LIU Jialing. Research progress of new fire extinguishing agents for suppressing lithium battery fires[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(8): 1 138-1 144.
- [10] WANG Qingsong, SHAO Guangzheng, DUAN Qiangling, et al. The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppressing the lithium titanate battery fire[J]. Fire Technology, 2016, 52(2): 387-396.
- [11] SUN Huanli, ZHANG Lin, DUAN Qiangling, 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 Environment Protection, 2022, 167: 299-307.
- [12] HUANG Zonghou, ZHANG Yue, SONG Laifeng, et al. Preventing effect of liquid nitrogen on the thermal runaway propagation in 18650 lithium ion battery modules[J]. Process Safety and Environment Protection, 2022, 168: 42-53.
- [13] ZHANG Jianqi, FAN Tao, YUAN Shuai, et al. Patent-based technological developments and surfactants application of lithium-ion batteries fire-extinguishing agent[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 88: 39-63.
- [14] 辛明泽, 王兵, 刘战强, 等. 干冰颗粒射流冷却铣削 Inconel 718 切削性能评价研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(12): 79-86.
XIN Mingze, WANG Bing, LIU Zhanqiang, et al. Research on cutting performance evaluation of milling process for Inconel 718 assisted with dry ice particle jet cooling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(12): 79-86.
- [15] 曾勇, 郑潇天, 赵雪雅, 等. 工业油污干冰清洗数值模拟与试验[J]. 中国表面工程, 2025, 38(2): 381-397.
ZENG Yong, ZHENG Xiaotian, ZHAO Xueya, et al. Dry ice cleaning for industrial oil pollution and numerical simulation[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(2): 381-397.
- [16] 霍军良, 唐治国, 邱宗君, 等. 节流作用下 CO₂ 管道放空过程的冻堵风险实验研究[J]. 化工学报, 2025, 76(4): 1 898-1 908.
HUO Junliang, TANG Zhiguo, QIU Zongjun, et al. Experimental research on risk of freezing and plugging during CO₂ pipeline venting under throttling effect[J]. CIESC Journal, 2025, 76(4): 1 898-1 908.

[17] 高玉坤, 刘阜鑫, 付明明, 等. 采空区滞留干冰防灭火数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 32–35.
GAO Yukun, LIU Fuxin, FU Mingming, et al. Numerical simulation study on fire preventing and extinguishing technology by dry ice in mined area[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(1): 32–35.

[18] LIU Wei, QIN Yueping, YANG Xiaobin, et al. Early extinguishment of spontaneous combustion of coal underground by using dry-ice’s rapid sublimation: a case study of application[J]. Fuel, 2018, 217: 544–552.

[19] 黄宗侯. 锂离子电池热失控传播机制及基于液氮的阻隔抑制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
HUANG Zonghou. Study on thermal runaway propagation mechanism of lithium-ion battery and prevention technology based on liquid nitrogen[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024.

[20] 孙一楠. 磷酸铁锂离子电池热失控特性及液氮防灭火效能试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
SUN Yinan. Experimental study on thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate batteries and fire-fighting effectiveness of liquid nitrogen[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

作者简介: 刘永成 (2001—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 研究方向为锂离子电池火灾防控技术。E-mail: 1402203958@qq.com。



《中国学术期刊影响因子年报(2025 版)》发布

中国学术期刊影响因子年报 (自然科学与工程技术·2025版)	
期刊来源: 中国安全科学学报	编辑: GSF-JIFR 2025 240K
主办单位: 中国矿业大学	出版单位: 中国矿业大学出版社
主编/编辑: 中国矿业大学	研究层次: 技术研究
CN / ISSN: CN 11-2565/X ISSN 1003-2033	
计量指标统计	
一、期刊影响力统计	二、期刊影响力统计
三、期刊影响力统计	四、期刊影响力统计
五、期刊影响力统计	六、期刊影响力统计
七、期刊影响力统计	八、期刊影响力统计
九、期刊影响力统计	十、期刊影响力统计
十一、期刊影响力统计	十二、期刊影响力统计
十三、期刊影响力统计	十四、期刊影响力统计
十五、期刊影响力统计	十六、期刊影响力统计
十七、期刊影响力统计	十八、期刊影响力统计
十九、期刊影响力统计	二十、期刊影响力统计
二十一、期刊影响力统计	二十二、期刊影响力统计
二十三、期刊影响力统计	二十四、期刊影响力统计
二十五、期刊影响力统计	二十六、期刊影响力统计
二十七、期刊影响力统计	二十八、期刊影响力统计
二十九、期刊影响力统计	三十、期刊影响力统计
三十一、期刊影响力统计	三十二、期刊影响力统计
三十三、期刊影响力统计	三十四、期刊影响力统计
三十五、期刊影响力统计	三十六、期刊影响力统计
三十七、期刊影响力统计	三十八、期刊影响力统计
三十九、期刊影响力统计	四十、期刊影响力统计
四十一、期刊影响力统计	四十二、期刊影响力统计
四十三、期刊影响力统计	四十四、期刊影响力统计
四十五、期刊影响力统计	四十六、期刊影响力统计
四十七、期刊影响力统计	四十八、期刊影响力统计
四十九、期刊影响力统计	五十、期刊影响力统计
五十一、期刊影响力统计	五十二、期刊影响力统计
五十三、期刊影响力统计	五十四、期刊影响力统计
五十五、期刊影响力统计	五十六、期刊影响力统计
五十七、期刊影响力统计	五十八、期刊影响力统计
五十九、期刊影响力统计	六十、期刊影响力统计
六十一、期刊影响力统计	六十二、期刊影响力统计
六十三、期刊影响力统计	六十四、期刊影响力统计
六十五、期刊影响力统计	六十六、期刊影响力统计
六十七、期刊影响力统计	六十八、期刊影响力统计
六十九、期刊影响力统计	七十、期刊影响力统计
七十一、期刊影响力统计	七十二、期刊影响力统计
七十三、期刊影响力统计	七十四、期刊影响力统计
七十五、期刊影响力统计	七十六、期刊影响力统计
七十七、期刊影响力统计	七十八、期刊影响力统计
七十九、期刊影响力统计	八十、期刊影响力统计
八十一、期刊影响力统计	八十二、期刊影响力统计
八十三、期刊影响力统计	八十四、期刊影响力统计
八十五、期刊影响力统计	八十六、期刊影响力统计
八十七、期刊影响力统计	八十八、期刊影响力统计
八十九、期刊影响力统计	九十、期刊影响力统计
九十一、期刊影响力统计	九十二、期刊影响力统计
九十三、期刊影响力统计	九十四、期刊影响力统计
九十五、期刊影响力统计	九十六、期刊影响力统计
九十七、期刊影响力统计	九十八、期刊影响力统计
九十九、期刊影响力统计	一百、期刊影响力统计

由《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社出版、中国科学文献计量评价研究中心编制的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2025 版)》(简称《年报 2025 版》)发布。

《年报(2025 版)》计量指标统计显示:
《中国安全科学学报》影响力指数(CI)为 1 162. 509, CI 学科排序为 1/24。

其他指标如下:
2024 年载文量为 441, 可被引文献量为 350, 可被引文献比为 0. 79。复合总被引频次为 14 026, 即年指标为 0. 229, 复合影响因子为 3 085, 复合他引影响因子为 2. 539, 5 年影响因子为 3. 408, 他引 5 年影响因子为 3. 035。