DOI:10.27055/j.1674-5590.2026.05.004

锂离子电池火灾防治技术研究进展

郭一博[a,b], 姜霁原[b,c], 张海军[b,c], 周晓猛[b,c]
(中国民航大学 a. 天津市航空装备安全性与适航技术创新中心; b. 民航热灾害防控与应急重点实验室;
c. 安全科学与工程学院,天津 300300)

摘 要: 锂离子电池在电子产品、电动汽车和储能电站等诸多领域的应用日益广泛。但锂离子电池的安全性问题不容忽视,在过充、过热、机械挤压等滥用条件下,锂离子电池极易发生热失控(TR,thremal runaway)现象,进而造成严重的火灾甚至爆炸事故。本文综述了近年来锂离子电池火灾防治技术的研究进展,对气体灭火剂、水系灭火剂、泡沫灭火剂、干粉灭火剂、新型灭火剂及锂离子电池火灾抑制策略等进行了讨论,并对锂离子电池火灾防治技术的前景进行了展望,指出在未来研究中亟须开发兼具高效灭火和冷却性能、低毒环保的新型复合灭火剂,并深入优化灭火策略,进而提升对锂离子电池系统热失控及火灾传播的抑制效果。

关键词: 锂离子电池安全;热失控;火灾防治;灭火剂;灭火策略
中图分类号: V328;TM912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)05-0031-12

Research progress in fire prevention and control technologies for lithium-ion batteries

GUO Yibo[a,b], *JIANG Jiyuan*[b,c], *ZHANG Haijun*[b,c], *ZHOU Xiaomeng*[b,c]
(a. *Tianjin Aviation Equipment Safety and Airworthiness Technology Innovation Center*; b. *Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Hazards Prevention and Emergency Response*; c. *College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin* 300300, *China*)

Abstract: Lithium-ion batteries are increasingly widely used in many fields such as electronic products, electric vehicles and energy storage power stations. However, the safety problems of lithium-ion batteries cannot be ignored. Under abuse conditions such as overcharging, overheating and mechanical extrusion, lithium-ion batteries are highly prone to thermal runaway (TR), which may in turn cause serious fires and even explosion accidents. This paper reviews the research progress in fire prevention and control technologies for lithium-ion batteries in recent years. It discusses gaseous, water-based, foam, dry powder and novel fire extinguishing agents, as well as fire suppression strategies for lithium-ion batteries. The prospects of fire prevention and control technologies for lithium-ion batteries are also discussed. It is pointed out that future research urgently needs to develop novel composite fire extinguishing agents that combine high fire extinguishing efficiency and cooling performance with low toxicity and environmental friendliness. Fire extinguishing strategies should be further optimized so as to improve the suppression effects on thermal runaway and fire propagation in lithium-ion battery systems.

Key words: lithium-ion battery safety; thermal runaway; fire prevention and control; fire extinguishing agent; fire extinguishing strategy

在全球绿色能源转型背景下,以锂离子电池为代表的新能源储能技术快速发展。凭借能量密度高、寿命长、体积小、环境友好等优势,锂离子电池已广泛应用于信息家电、电化学储能电站和新能源汽车等领域[1-3]。然而,在过充、过热、机械挤压等滥用条件下,锂离子电池易发生热失控(TR,thermal runaway),温度骤升并释放有毒和易燃气体,进而引发火灾甚至爆炸,造成财产损失和人员伤亡[4-5]。2020—2024年,全球共记录了超过11 000起与锂离子电池相关的事件[6],且常伴随复燃、连锁传播和爆炸风险,已成为制约新能源行业安全发展的关键问题。

锂离子电池火灾同时涉及A、B、C、E 4类火灾,具

收稿日期:2026-09-11; **修回日期:**2026-10-17
基金项目:天津市航空装备安全性与适航技术创新中心开放基金资助(JCZX-2026-KF-03)
作者简介:郭一博(1996—),男,河北张家口人,讲师,博士,研究方向为锂电池火灾防治技术.
通信作者简介:周晓猛(1975—),男,山东济宁人,教授,博士,研究方向为新型气体灭火剂研发、飞机防火技术等.

有热释放速率大、升温快、持续时间长、扑救困难等特点。国内外学者围绕锂离子电池火灾的灭火剂和火灾抑制策略开展了大量实验：部分灭火剂虽能迅速扑灭明火，但冷却不足，易复燃，甚至增加有毒气体释放[7-8]；通过材料改性提升锂离子电池本征安全性虽可降低热失控概率[9-10]，但事故频率仍居高不下。因此，如何高效抑制热失控及火灾传播，是当前研究的重点。

针对上述问题，本文从锂离子电池热失控机理出发，以其灭火剂和火灾抑制策略为主线，系统梳理了十余年来锂离子电池火灾防治技术的研究进展。文献筛选兼顾基础实验与工程验证，重点纳入灭火效率、冷却性能、抗复燃能力及毒性风险等维度的公开研究，为锂离子电池火灾防治技术提供了参考方向。

1　锂离子电池火灾介绍

1.1　锂离子电池的工作原理

锂离子电池主要由正极材料、负极材料、电解液、隔膜以及电池外壳材料等部分组成。锂离子电池的工作原理，本质上是锂离子在正极与负极之间的往复迁移。在锂离子电池充电过程中，Li^+从正极脱嵌，经过电解液穿过隔膜嵌入负极，此时负极处于富锂状态；在放电过程中，Li^+从负极脱嵌，经过电解液穿过隔膜重新嵌入正极，此时正极处于富锂状态。锂离子电池的工作原理如图 1 所示。

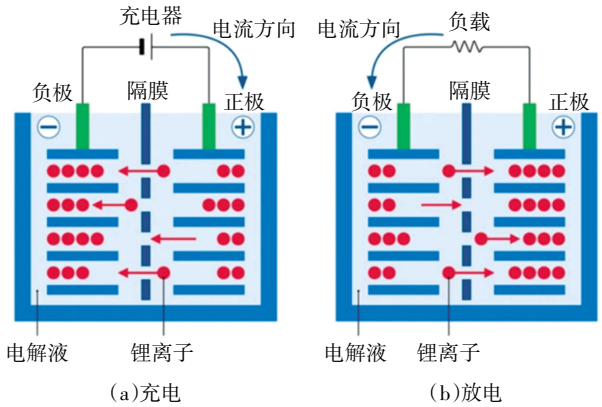


图 1　锂离子电池的工作原理

Fig.1　Working principle of lithium-ion batteries

1.2　锂离子电池热失控及火灾特点

1.2.1　锂离子电池热失控

锂离子电池热失控是一种由于各种原因而引发的链式化学反应现象，热失控散发出的大量热量和有害气体会引起锂离子电池的燃烧和爆炸等，如图 2所示[11]。锂离子电池热失控大致分为以下 4 个阶段[11]：阶段Ⅰ（0 ℃ ~ 90 ℃）：一些金属离子如 Li^+、Mn^{2+}、Co^{2+}、Ni^{2+}发生溶解；阶段Ⅱ（90 ℃ ~ 150 ℃）：当温度达到90 ℃左右时，固体电解质界面（SEI，solid electrolyte interface）膜在高温下开始分解，负极的活性物质与电解液接触发生化学反应，使锂离子电池的温度不断上升，同时在此阶段还会产生一些可燃气体，导致锂离子电池发生轻微的膨胀，当温度升高至 130 ℃左右，锂离子电池的隔膜开始熔化，导致锂离子电池内部发生部分短路；阶段Ⅲ（150 ℃~300 ℃）：当温度高于150 ℃时，锂离子电池内部短路会使温度继续升高，在此温度下隔膜塌陷，导致锂离子电池内部发生大规模短路现象；阶段Ⅳ（300 ℃以上）：锂离子电池内部的正极和负极材料、电解质及其他材料急剧分解，发生燃烧或爆炸现象。

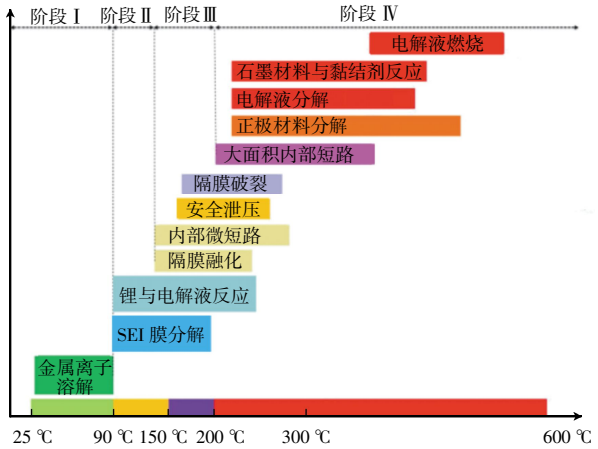


图 2　温度升高时锂离子电池内部的放热化学反应

Fig.2　Exothermic chemical reactions inside lithium-ion batteries at elevated temperatures

诱发锂离子电池热失控的原因主要包括电滥用、机械滥用和热滥用 3 个方面[7-8]。电滥用主要包括过充电、过放电以及内外短路 3 种形式。过充电会导致大量的锂离子沉积在电池的负极，形成锂枝晶，正极的锂离子重度脱出还会引发晶格塌陷并释放大量氧气（O_2），进而导致热失控的发生；过放电会导致大量锂离子从负极脱出嵌入正极，SEI 膜发生分解，铜离子通过隔膜移动到正极沉积形成铜枝晶，造成电池内短路，引发电池热失控；内外短路会诱发电池内部各种链式化学反应的发生进而导致热失控[12]。机械滥用如挤压、针刺和碰撞等可能导致电池内部隔膜结构遭到损坏，电池的正负极材料直接接触，形成内短路。内短路会触发剧烈的电化学反应，产生大量的焦耳热，温度快速升高引发各种链式化学反应，从而触发锂离子电池热失控[13]。热滥用主要包括过热和高温等，过量的热量输入会直接触发电池热失控的链式反应。热滥用很少

单独存在,通常是由机械滥用和电滥用发展而来的[14]。

1.2.2　锂离子电池火灾特点

锂离子电池火灾与普通的火灾不同[15],其同时涉及 A、B、C、E 4 类火灾,可同时表现出 4 类火灾的特点[16]。隔膜、外壳等固体组分燃烧对应 A 类;电解液等液体组分燃烧并释放有毒气体对应 B 类;热失控释放的可燃气体参与燃烧对应 C 类;电池作为带电设备对应 E 类。在锂离子电池热失控过程中,锂离子电池内部发生化学反应并释放出大量气体;气体不断积累导致电池内部压力逐渐增加,压力达到阈值时,电池的安全阀打开,释放可燃气体和电解液,随着热失控加剧,从安全阀喷射出猛烈的射流火[17-18]。锂离子电池火灾有热释放速率大、升温速度快、持续时间长、火灾扑救困难等特点,且热传递会导致电池模块中的热失控传播,使火灾事故扩大。因此,开发兼顾降温、抑爆与防复燃的高效灭火技术,是当前锂离子电池安全研究的重点方向之一。

2　锂离子电池热灾害防治技术

2.1　锂离子电池火灾灭火剂

2.1.1　气体灭火剂

气体灭火剂是以气态形式存在或通过气化释放至火场,通过物理或化学作用抑制燃烧的灭火介质。其核心特征在于依赖气体分子的扩散性和反应活性,在不依赖液体或固体覆盖的前提下,快速渗透火源区域,通过降低 O_2 浓度的物理窒息、吸收热量的物理冷却以及中断燃烧链式反应的化学抑制作用等方式实现灭火。气体灭火剂通常具有无残留、不导电、对设备损害小等优势,尤其适用于精密电子设备、电力设施或密闭空间如储能舱等的火灾扑救。然而在锂离子电池火灾场景中,常规气体灭火剂虽能快速熄灭外部明火,但其缺乏足够的冷却降温能力,难以抑制电芯内部持续放热,普遍存在复燃风险。因此,除常规气态应用外,部分研究开始探索利用典型气体灭火介质的低温液态或固态形态(如液氮、干冰),通过液相汽化或固相升华过程中的显著吸热效应,提升对电芯热失控及复燃的抑制效果。下文按灭火作用机理将其分为两类讨论:二氧化碳(CO_2)和氮气(N_2)以物理窒息、稀释 O_2 等单纯物理作用为主;七氟丙烷(C_3HF_7)、全氟己酮($C_6F_{12}O$)和 2-溴-3,3,3-三氟丙烯($C_3H_2BrF_3$)(简称 2-BTP)则兼具物理冷却与化学抑制的双重作用,灭火效率和抗复燃潜力通常相对更高。气体灭火剂对锂离子电池火灾抑制效果的对比如表 1 所示。

表 1　气体灭火剂对锂离子电池火灾的抑制效果总结

Tab.1　Summary of the suppression effects of gaseous fire extinguishing agents on lithium-ion battery fires

灭火剂	优缺点	抑制效果
CO_2	优点:来源广泛、成本低廉;灭火后无残留;干冰形态具有显著冷却能力 缺点:高温下可能促进一氧化碳(CO)生成;有窒息风险	适用于锂离子电池火灾的初期抑制和封闭环境,但其冷却能力不足、复燃风险高,难以单独应对大规模或持续热失控场景,灭火和冷却效果有限
N_2	优点:无毒环保、灭火后对设备损害小、来源广;液氮形态冷却能力极强 缺点:N_2 几乎无冷却能力;液氮储运不便、成本较高	液氮通过汽化吸热迅速降低火场温度,可抑制锂离子电池热失控。N_2 可扑灭外部火焰,但冷却效果不足
C_3HF_7	优点:灭火效率高、臭氧消耗潜能(ODP,ozone depletion potential)值为 0 缺点:冷却能力有限;高温热解产生氟化氢(HF);成本较高	能扑灭明火,但灭火和冷却效果有限,不能完全抑制锂离子电池火灾,且在释放过程中仍有火焰存在
$C_6F_{12}O$	优点:灭火效率高、ODP 为 0、温室效应潜能(GWP,global warming potential)值极低、绝缘性能好、对电子精密设备无损伤 缺点:可能产生有毒气体	能快速熄灭锂离子电池的明火,但无法完全阻止电池内部反应,对灭火后电池的降温效果较差,存在复燃风险
2-BTP	优点:灭火效率较高;瞬时冷却速率快 缺点:分解产物具有腐蚀性、有复燃风险	能快速抑制锂离子电池外部明火,有效抑制锂离子电池的复燃

(1)CO_2 灭火剂是一种高效、环保且成本较低的灭火剂,适用于多种类型火灾,其主要依靠窒息作用和部分冷却作用灭火,广泛应用于电气火灾。但在锂离子电池火灾中,其灭火效果有限。Xu 等[19]通过实验发现,CO_2 能够抑制锂离子电池火灾中的可燃气体燃烧和喷射火焰,但在释放 CO_2 时,仍然观察到火焰,其冷却效果不如水雾灭火剂显著,适用于初期火灾的控制。刘昱君等[20]研究了多种不同灭火剂对锂离子电池火灾的灭火行为及灭火效率,研究表明 CO_2 灭火剂无法有效熄灭电池火,在释放灭火剂 2 s 后电池发生了复燃现象。此外,Liu 等[21]提出干冰可以作为锂离子电池灭火剂,经实验验证干冰在火灾发展初期具有最佳抑制效果,且其抑制效果与放电量呈正相关。对 50 Ah 储能电池的进一步验证证实,干冰可在 3 s 内扑灭明火,同时显著降低表面温度,有效阻止热失控的蔓延。

(2)N_2 是空气的主要成分,化学性质稳定且无毒无害。N_2 灭火剂主要通过降低环境中 O_2 浓度实现物理窒息灭火,其效果高度依赖于空间的封闭性;然而,单纯的气相惰化仅能阻断外部燃烧链式反应,缺乏对电芯内部热失控余热的深度清除能力,致使明火熄灭后

复燃风险依然较高。此外，在开放或通风良好的环境中，N_2 难以维持有效灭火浓度，导致灭火效率大幅下降。鉴于此，近年来研究焦点逐步由 N_2 向液氮等具备强吸热效应的低温液态灭火介质拓展。Wang 等[22]研究了 C_3HF_7、CO_2、N_2 对不同正极材料锂离子电池火焰的抑制效果，实验结果表明，3 种灭火剂均有抑制效果，对锂离子电池燃烧火焰的抑制效果排序为：C_3HF_7 > CO_2 > N_2。Huang 等[23]研究了液氮对锂离子电池热失控的抑制、延迟和冷却效果，在电池表面温度达到临界热失控温度之前施加液氮可以防止电池发生热失控。液氮对电池热失控表现出优异的抑制、延迟和冷却效果，并且其对电池的循环性能没有显著影响。Yu 等[24]研究了将液氮用于大容量方形锂电池模组的热失控传播抑制，对 11、13、18 kg 液氮注入量的比较分析表明，虽然更大的液氮注入量能提高冷却速率，但过量注入会导致热吸收效率的边际效益递减。研究确定 13 kg 的注入量是最佳平衡点。

（3）C_3HF_7 是一种常用的洁净灭火剂，主要通过中断燃烧链式反应并辅以少量汽化吸热实现灭火。ODP 值为 0，不导电、无残留，适用于精密电子设备及封闭空间。通常以加压液态储存，喷放时经闪蒸汽化，汽化潜热约为 132.6 kJ/kg，可吸收部分热量降低燃烧区温度，具有较高的灭火效率，但对高温电芯的持续冷却能力有限，且其 GWP 值较高，实际应用中需在环保性与灭火效能间权衡。Xu 等[19]通过实验测试了 C_3HF_7 对锂离子电池火灾的灭火效果，其灭火时间为22 s，可将电池表面峰值温度降低 142 ℃，冷却效果优于 CO_2 但弱于水雾。Sun 等[25]研究了不同灭火剂对受限空间热失控传播的抑制效果，结果表明，即使采取了热管理措施，锂离子电池模块中也会发生热失控传播，灭火试验中 C_3HF_7 的散热量为 24.8 kJ，其几乎不能抑制热失控传播。Liu 等[26]研究发现采用 C_3HF_7 作为保护性气体可有效降低锂离子电池热失控反应的总放热量，且随着 C_3HF_7 浓度的增加，其对热释放过程的喷射时间和燃烧时间的延迟效应更加明显。当密封箱内的 C_3HF_7 浓度为 100%时，锂离子电池的表面温度和总放热量达到最低值。

（4）$C_6F_{12}O$ 是一种新型环保高效的高沸点灭火剂[27]，ODP 值为 0 且 GWP 值极低，符合环保法规要求。其常温下呈液态，喷放后迅速汽化，兼具强吸热降温与化学抑制自由基反应的双重灭火机制，灭火效率高，同时灭火后无残留，对精密电子设备无腐蚀损伤，是替代传统哈龙灭火剂的理想选择。然而，在锂离子电池火灾防控中，$C_6F_{12}O$ 存在明显的局限性：虽能快速扑灭明火并延缓热失控传播，但其单一的汽化冷却机制难以在高温环境中持续导出电芯内部积聚的热量，致使单独应用仍存在复燃风险。Sun 等[25]研究了 $C_6F_{12}O$ 对受限空间热失控传播的抑制效果，研究结果表明 $C_6F_{12}O$ 不能阻止热失控的传播，但可以降低电池温度，减缓热传递速率，延长热失控的传播时间。刘昱君[28]研究了 $C_6F_{12}O$ 对三元动力锂离子电池火灾的抑制效能及机理。研究表明，$C_6F_{12}O$ 能够有效地抑制锂离子电池的火灾，其灭火机理包括化学抑制、降温冷却以及隔绝氧气。赵光金等[29]以磷酸铁锂离子电池模组为试验对象，搭建了舱级试验平台，研究了 $C_6F_{12}O$ 在簇级释放和舱级释放两种方式下的灭火效果。结果显示，簇级释放能够在 4 s 内扑灭明火，降温速率达 1.37 ℃/s；舱级释放则在 46 s 内扑灭明火，降温速率为 0.81 ℃/s，两者均能有效防止复燃。Liu 等[30]研究发现 $C_6F_{12}O$ 可以迅速扑灭锂离子电池火灾而不发生再燃，但冷却效果不足。Zhao 等[31]研究了 $C_6F_{12}O$ 对三元锂离子电池火灾的抑制作用，研究表明 $C_6F_{12}O$ 降低 CO 的含量效果好，并且其蒸气能长时间存在空气中持续抑制锂离子电池火焰。

（5）2–BTP 是一种有机溴化合物灭火剂，具有较高的灭火效率。其能够在短时间内释放出大量的活性溴自由基，这些自由基可以迅速与火焰中的活性自由基发生反应，中断燃烧的链式反应，从而快速扑灭火焰[8]。在应对锂离子电池火灾时，这种快速灭火性能对于控制火势蔓延和减少火灾损失至关重要。2–BTP 不仅具有化学抑制灭火作用，还能在一定程度上通过吸热降温来辅助灭火。当 2–BTP 分解时，会吸收大量的热量，有助于降低电池的温度，减缓电池的热失控反应，进一步提高灭火效果。但对于锂离子电池内部深处的火灾，2–BTP 灭火剂可能难以完全渗透到电池内部的所有区域，从而难以彻底扑灭内部火灾。贺元骅等[32]研究了 $C_6F_{12}O$ 和 2–BTP 两种清洁气体灭火剂对航空运输场景下锂离子电池火灾的扑灭和抑制效果，在 3 种不同环境压力下分析了施加灭火剂前后锂离子电池表面的温度变化。低压下 2–BTP 和 $C_6F_{12}O$ 均能有效降低锂离子电池火焰中自由基浓度，快速扑灭明火；2–BTP 的降温和抑制温升效果明显优于 $C_6F_{12}O$，能更好地抑制锂离子电池之间的连锁热失控。徐会升等[33]研究了 2–BTP 对 75 Ah 的三元软包锂离子电池的灭火与降温效果，2–BTP 能够在 13 s 内扑灭明火，灭火和降温效果明显，能够有效抑制锂离子电池的复燃。

2.1.2　水系灭火剂

水系灭火剂主要以水为连续相,通过添加润湿剂、阻燃剂或增稠剂等制成,施放形式涵盖水喷淋及细水雾等。得益于水极高的比热容与汽化潜热,足量持续的水系灭火剂可有效扑灭明火并深度降低电芯温度。然而,水的导电性会造成电池的外部短路,导致二次事故,在一定程度上限制了其在锂离子电池火灾中的应用。水系灭火剂可按施放形态与功能侧重进一步划分:水喷淋,浸没冷却强度最高,但用水量大且难以渗入模组间隙;细水雾虽节水,却易受热羽流偏转,停喷后易出现温度反弹[34];添加表面活性剂、碱金属盐或增稠剂的功能性水系,则通过增强渗透、化学抑制及保水驻留等方面,在同等喷放量下显著提升抗复燃能力。许晓元等[35]进行了不同注入策略下的电池热失控实验,发现在 40 s 内向发生热失控的电池模块箱注入浸没液能够抑制电池温度上升,最大冷却速率可达 78.7 ℃/s。周洁等[36]开展了 $C_6F_{12}O$ 和细水雾对三元锂离子电池热失控火灾的灭火试验,实验结果表明细水雾灭火剂在锂离子电池热失控时能有效降低电池表面温度和升温速率,有效扑灭电池表面的明火,但在数分钟后电池会发生复燃现象。Wang 等[37]综合考虑了表面张力、电导率、气体吸收能力和成本等因素,确定了功能性添加剂含量最高的微乳液体系配方,经灭火实验评估,该微乳液的灭火效果优于纯水雾,冷却速率是细水雾的 1.33 倍。

2.1.3　泡沫灭火剂

泡沫灭火剂具有灭火效果好、成本低、污染小等优点,在扑救 A、B 类火灾中得到了广泛应用[38]。泡沫灭火剂是通过生成覆盖性泡沫层实现灭火的化学制剂,灭火机理主要为冷却降温和隔绝 O_2。泡沫在燃烧物表面形成连续覆盖层而阻断 O_2 供应,析出的液体通过吸热降低燃烧物温度,同时稀释 O_2 浓度。锂离子电池火灾具有高温、易复燃及热失控传播特性,传统泡沫可能因冷却效率不足或无法阻断链式反应而效果有限。新型环保泡沫通过提升界面稳定性和降温速率,展现出潜在应用前景。Xu 等[39]研究了凝胶泡沫的发泡性能、泡沫稳定性、灭火效果等,其在锂离子电池表面形成了一层具有良好防复温效果的隔离层,显著抑制了火焰的进一步燃烧,无复温和复燃现象。Cui 等[40]进行了全尺寸火灾实验来评估泡沫的灭火效率,实验结果表明,0.743 m^3/kWh 的泡沫消耗量可以有效地抑制电动汽车中全尺寸锂离子电池组的热失控。Zhou 等[41]以壳聚糖(CTS,chitosan)为凝胶骨架增强材料,制备了一种新的凝胶蛋白泡沫灭火剂。灭火实验结果表明,凝胶蛋白质泡沫灭火剂组的热失控火焰面积为 2 150.13 cm^2,比蛋白质泡沫灭火剂组的热失控火焰面积小 25.90%。使用凝胶蛋白质泡沫灭火剂组的灭火时间为 8 s,比未使用灭火剂组缩短 71.43%,比使用蛋白质泡沫灭火剂组缩短 38.46%。

2.1.4　干粉灭火剂

干粉灭火剂是一种由微细无机盐和防潮添加剂组成的干燥粉末,主要通过化学抑制中断燃烧链式反应和物理隔绝 O_2 的双重作用扑灭火焰[42–43]。按其传统应用主要分为 ABC 干粉(磷酸铵盐,适用固/液/气/电气火灾)与 BC 干粉(碳酸氢钠,适用液/气/电气火灾),具有灭火响应快、成本低廉、储存稳定及绝缘性好等优势,广泛用于家庭、车辆及工业场所;但其灭火后残留具腐蚀性且难清理,在密闭空间易影响能见度与呼吸安全。尽管传统干粉可迅速扑灭锂离子电池外部明火,但其缺乏持续深位冷却能力,火焰熄灭后仍具复燃及向相邻电池传播热失控的风险。鉴于此,近年来的研究正转向开发新型干粉原料以弥补冷却短板,包括引入具有结晶水脱附吸热特性的水合无机盐(如硫酸铝铵十二水合物、十二水合硫酸铝钾)、具有层间膨胀隔热能力的层状硅酸盐矿物(如改性蛭石、蒙脱土)等,旨在通过物理相变冷却、隔热屏障构建与化学抑制的协同作用,提升粉体对锂离子电池火灾的抑制效能。刘昱君等[20]发现 ABC 干粉可在 10 s 内扑灭火焰,无复燃现象,但冷却效果有限。He 等[44]研发了一种将 ABC 干粉与十二水合磷酸氢二钠(DHPD,disodium hydrogen phosphate dodecahydrate)相结合的复合粉体灭火剂。在油池火实验中,35% DHPD@ABC 可在 20 s 内将火场温度降低 297 ℃,冷却性能提升了 34%;TR 抑制测试中,该灭火剂能迅速将电池温度降至 162 ℃,冷却效率提高了 80%,并有效阻止了热失控的蔓延。Shi 等[45]选取膨胀蛭石粉经无机盐改性后用于灭火实验,实验结果表明,在相同的工作条件下,从灭火时间、温度抑制能力、复燃情况及毒性抑制效果等角度分析,$MgCl_2$ 蛭石粉具有最高的灭火效率。

2.1.5　新型灭火剂

由于传统灭火剂多存在作用机理单一,难以应对锂离子电池热失控过程中复杂的固–液–气多相燃烧及内部过热的问题,大量学者正在探索一些新型灭火剂来抑制锂离子电池火灾,例如水凝胶灭火剂、干水

灭火剂、微胶囊灭火剂等。

1)水凝胶灭火剂

水凝胶是一种以水为连续相、高分子聚合物为网络骨架的三维交联体系,近年来在锂离子电池消防领域引起了广泛关注。其灭火机理主要依靠持续物理冷却、表面窒息及成膜隔热作用。水凝胶灭火剂结合了传统水系强冷却与固体灭火剂长驻留的优点,既通过网络保水实现分阶段深位吸热,又能黏附成膜阻隔氧气与热辐射,有效抑制复燃及热失控传播。刘淳元等[46]探究了水凝胶灭火剂对大容量锂离子电池热失控的抑制效果,水凝胶受热后,内部孔状结构被破坏,有利于其黏附在物体表面持续降温;使用水凝胶灭火降温时,电池表面最大降温速率是水的 2 倍,水凝胶喷放结束后,锂离子电池温度回升速率仅为水的一半。Yuan 等[47]进行了甲基纤维素(MC,methyl cellulose)基水凝胶和羧甲基纤维素(CMC,carboxymethyl cellulose)基水凝胶与纯水的对比实验,发现由于流体流动性相对较低,水凝胶的初期灭火能力略弱于纯水,但其短期和长期冷却能力显著优于纯水,且 CMC 基水凝胶的短期冷却速率和长期冷却速率均优于 MC 基水凝胶。陆剑心等[48]研究了一种使用 CMC 与氯化铝溶液混合制备的水凝胶络合物灭火剂,发现在喷射灭火剂后,锂离子电池组温度迅速降低至热失控温度 200 ℃以下,水凝胶灭火剂对射流火焰有一定的限制作用,能阻碍多个电池间热失控传递,且在使用水凝胶灭火后电池未出现复燃现象。

2)干水灭火剂

干水是一种以水性液滴为核、疏水性固体粉末为壁的核壳结构材料,近年来在消防领域引起了广泛的关注。其灭火机理主要依靠物理冷却、窒息和化学抑制作用[49]。干水灭火剂结合了传统水系灭火剂和干粉灭火剂的优点,既具有较强的冷却作用,又能通过化学抑制和窒息等方式有效灭火。Li 等[50]研究了干水灭火剂对锂离子电池火灾的灭火效果,结果表明干水灭火剂能够有效抑制锂离子电池热失控的传播,具有比水基灭火剂更高的热散失能力,且灭火后电池表面残留物较少,易于清理。孔令冬[51]研究了干水灭火剂的制备工艺参数,制备出了包覆纯水的干水灭火剂并开展了灭火实验,结果表明干水灭火剂可通过多种灭火机制联合发挥作用,对锂离子电池火灾具有较好的灭火效能。汪洋[52]开展了干水抑制锂离子电池热失控试验,并探索了干水释放压力和不同化学组分改性对其抑制效果的影响,发现干水对抑制 18650 型锂离子电池热失控具有积极作用,可以有效压制、减弱锂电池燃爆后的火焰,并成功中断了锂电池热失控的传播。

3)微胶囊灭火剂

微胶囊是以聚合物材料为外壳,以液体或固体材料为内核的物质,粒径通常介于 1~1 000 μm 之间[53],其能够在常温下保持稳定,在高温条件下迅速触发并释放灭火剂[54-55]。这种特性使得灭火剂能够在火灾初期迅速响应,有效抑制火势的蔓延。微胶囊的特殊核壳结构抑制了芯材的挥发,使灭火剂在常温下保持稳定,免受光照、温度、湿度的影响,而且在高于一定温度时会自动触发释放灭火剂,具有良好的物理吸热和化学抑制作用,显著提高灭火剂的灭火性能,为锂离子电池热失控早期防治提供了可能。Zhou 等[56]以七氟环戊烷和 $C_6F_{12}O$ 为灭火剂芯材,制备了具有优异阻燃能力的微胶囊灭火剂,成功扑灭了锂离子电池火灾。Bai 等[57]将三元复合核心——$C_6F_{12}O$、七氟环戊烷($C_5H_3F_7$)和 2-BTP 封装在三聚氰胺-尿素-甲醛(MUF,melamine-urea-formaldehyde)树脂外壳中,通过原位聚合合成了能阻断热失控的自适应热敏微胶囊 (TM,thermosensitive microcapsule)灭火剂。经实验证实,TM 使单节锂离子电池的峰值热失控温度降低 14.0 ℃,升温速率降低 0.17 ℃/s。微胶囊灭火剂技术侧重于热失控发生后的主动抑制,而微胶囊涂覆技术作为一种被动热防护手段,在锂电火灾预防领域也备受关注。Wei 等[58]设计了由三聚氰胺-脲醛树脂外壳和八水合氢氧化钡($Ba(OH)_2\cdot 8H_2O$)为核心材料的含水微胶囊,在温度超过 120 ℃时,微胶囊的有机外壳就会破裂并释放出封装的核心材料,能够在不显著影响电池电化学性能的前提下,实现稳定的长期循环并提高电池安全性。Zhang 等[59]将包含 $C_6F_{12}O$ 和 $C_5H_3F_7$ 的微胶囊灭火剂涂敷于软包电池表面,成功熄灭了由外部点燃的火焰。各类微胶囊灭火剂制备的对比如表 2 所示。

2.1.6　各种灭火剂对比分析

1)灭火效果

在锂离子电池火灾防治领域,不同灭火剂的灭火效果存在差异。气体灭火剂方面,$C_6F_{12}O$ 表现出卓越的灭火效果,其快速降温与窒息作用可以有效阻断火灾中的燃烧链式反应;其次是 C_3HF_7 和2-BTP;CO_2 和 N_2 灭火能力有限,无法有效抑制深层的化学反应,灭火后容易发生复燃现象,但其固态(干冰)或液态(液氮)形式凭借显著的吸热降温特性,在抑制锂离子电池热失控方面展现出良好的应用潜力。水系灭火剂凭借水的高比热容和汽化潜热,具有强物理冷却能

表 2　微胶囊灭火剂制备汇总

Tab.2　Summary of the preparation of microencapsulated fire extinguishing agents

制备人	制备方法	芯材	壳层	灭火效果
Wei 等[58]	原位聚合法	$Ba(OH)_2·8H_2O$	三聚氰胺–脲醛树脂	在微胶囊作用下,加速量热测试表明,热失控过程中的最高温度降低了 106.2 ℃
Zhang 等[59]	原位聚合法	$C_6F_{12}O$、$C_5H_3F_7$	MUF	将微胶囊灭火剂涂敷于软包电池表面,成功熄灭了由外部点燃的火焰
Guo 等[60]	原位聚合法	$C_6F_{12}O$、甲基九氟丁醚	MUF	微胶囊灭火剂涂敷在 18650 型锂离子电池表面,成功延迟了电池热失控发生的时间并抑制了热失控的传播
Zhou 等[56]	复合凝聚法	$C_6F_{12}O$、$C_5H_3F_7$	海藻酸钠、CTS	微胶囊灭火剂与 ABC 干粉协同使用,成功扑灭了锂离子电池火灾
武艳[61]	复合凝聚法	二溴四氟乙烷	明胶、阿拉伯胶、乳清分离蛋白	燃烧物加入微胶囊灭火剂后,火焰可在短时间内熄灭
Li 等[62]	微流控技术	$C_6F_{12}O$	阻燃光固化树脂	蜡烛火焰在微胶囊破碎的瞬间(0.3 ms 以下)熄灭

力,水喷淋、细水雾和功能性水均可有效扑灭明火,但水接触电池可能引发外部短路。干粉与泡沫灭火剂难以形成稳定的持续降温层,冷却能力相对有限,即便明火扑灭后仍存在深层燃烧的风险。

2)复燃与抑制热失控传播情况

CO_2、N_2、C_3HF_7、$C_6F_{12}O$ 及普通干粉等虽可扑灭外部明火,但普遍存在冷却不足、难以抑制电芯内部持续放热的问题,因而复燃和热失控传播风险较高。2–BTP 在降温和抑制温升方面优于 $C_6F_{12}O$,可抑制连锁热失控,但仍存在复燃风险。液氮、干冰凭借强相变吸热可抑制、延迟甚至阻断热失控传播。水系灭火剂冷却能力最强,但导电短路风险使其难以完全阻断热失控传播;细水雾停喷后易温度反弹并复燃,功能性水系和微乳液可提升抗复燃能力。泡沫灭火剂中,传统泡沫冷却不足,但凝胶泡沫、凝胶蛋白泡沫等可形成稳定覆盖层,抑制复温和复燃,全尺寸泡沫可抑制电池组热失控。传统干粉灭火剂可快速扑灭明火,但深层冷却不足,仍存在深层燃烧和传播风险;复合干粉、改性蛭石粉等通过相变冷却和隔热屏障提升抑制效果。新型灭火剂中,水凝胶可显著降低温升和温度回升速率,抑制复燃和热失控传播;干水可压制火焰并中断热失控传播;微胶囊可降低峰值热失控温度、延迟热失控,并用于电池表面主动防护。不同灭火剂对锂离子电池火灾抑制效果的对比如表 3 所示。

表 3　不同灭火剂对锂离子电池火灾的抑制效果

Tab.3　Suppression effects of different fire extinguishing agents on lithium–ion battery fires

电池类型	灭火剂种类	明火熄灭情况	复燃情况	抑制热失控传播情况
$LiNi_xCo_yMn_zO_2$(NCM)/graphite[19]	CO_2	有明火	—	—
	C_3HF_7	有明火	—	—
	细水雾灭火剂	灭火熄灭	—	—
21700 型锂离子电池[32]	$C_6F_{12}O$	扑灭明火	—	—
	2–BTP	扑灭明火	—	—
18650 型钴酸锂锂离子电池[63]	CO_2	扑灭明火	复燃	—
	ABC 干粉	扑灭明火	复燃	—
	3%水成膜泡沫灭火剂	扑灭明火	复燃	—
18650 型锂离子电池[31]	细水雾灭火剂	—	—	成功抑制
	BC 干粉	—	—	不能抑制
	ABC 干粉	—	—	不能抑制
	$C_6F_{12}O$	—	—	不能抑制
60 Ah 磷酸铁锂离子电池[64]	干粉	—	复燃	不能抑制
	CO_2	—	复燃	不能抑制
	细水雾	—	复燃	不能抑制
	3%水成膜泡沫	—	未复燃	成功抑制
	水	—	未复燃	成功抑制
	C_3HF_7	—	未复燃	成功抑制
	$C_6F_{12}O$	—	未复燃	成功抑制
	水凝胶	—	未复燃	成功抑制
	液氮	—	未复燃	成功抑制

3)抑制毒性效果

在锂离子电池灭火剂中,C_3HF_7 因具有较高的 GWP 值,在温室效应方面存在显著缺陷。$C_6F_{12}O$ 和 C_3HF_7 在高温下分解会产生有毒物质 HF,这种腐蚀性气体不仅危害救援人员呼吸道健康,还会对精密电子设备造成不可逆损伤。2–BTP 的 ODP 值为 0 且 GWP 值较低,但其在高温下会分解生成溴化氢(HBr)和 HF 等剧毒腐蚀性气体,毒性风险大需严格防护。液氮在相变过程仅释放 N_2,不会产生有毒分解产物。水系灭火剂在接触高温电池时,会加速热失控进程并促进电解液分解,显著增加 HF 的释放浓度。泡沫灭火剂在锂电火灾中不直接生成卤化氢,但残液可能引入持久性有机污染物,且泡沫与电解液混合物会显著降低电池表面绝缘电阻、具有一定腐蚀性。干粉灭火剂的主要毒性风险源于其粉尘污染,超细颗粒物可深入人体肺泡引发炎症,且磷酸盐成分遇高温电池可能生成五氧化二磷(P_2O_5)等刺激性烟雾。

2.2　锂离子电池火灾的抑制策略

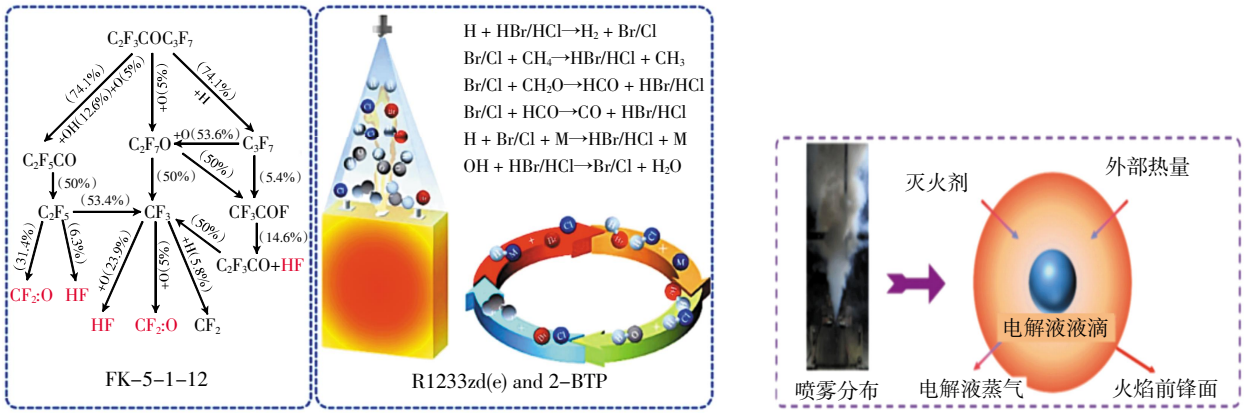
锂离子电池火灾复杂性高,扑救难度大,单一灭火剂的灭火效果与冷却效果存在一定的缺陷,因此,

需要采取有效的灭火策略弥补单一灭火剂的不足。锂离子电池火灾的灭火策略主要包括协同灭火策略、间歇式喷雾灭火策略、相变材料冷却策略等。

2.2.1　协同灭火策略

协同灭火策略是指通过结合多种灭火剂或技术手段，利用其互补优势实现更高效、更安全的锂离子电池火灾控制，如图 3 所示[64-65]。

单一灭火剂的灭火性能有限，不能充分抑制锂离子电池热失控现象，因此在实际应用中会将两种及两种以上的灭火剂进行结合使用，以充分发挥灭火剂的



（a）化学抑制　　（b）物理抑制

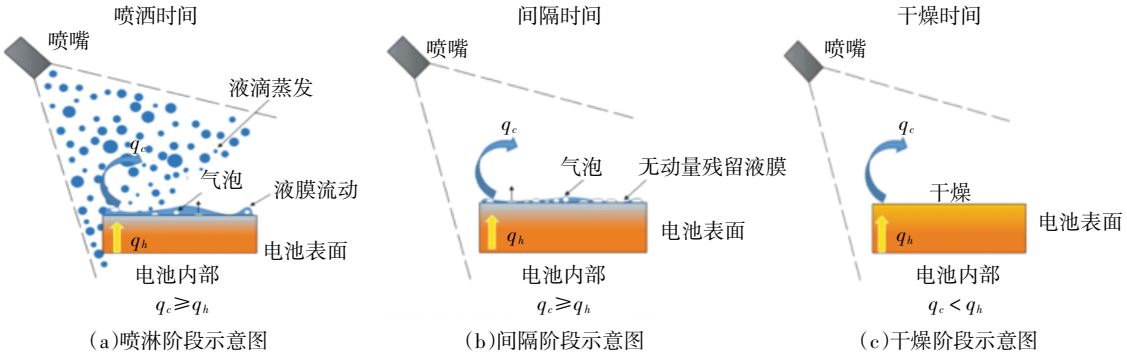
图 3　协同灭火策略

Fig.3　Synergistic fire extinguishing strategy

灭火和冷却的协同效果。协同灭火策略不仅提升了灭火效率，还能减少单一灭火剂的局限性。Deng 等[64]研究了 $C_6F_{12}O$、反式–1–氯–3,3,3–三氟丙烯（R1233zd(e)）和 2–BTP 在不同配比下对 280 Ah 磷酸铁锂离子电池火灾的抑制效果。实验结果表明，在 $C_6F_{12}O$∶R1233zd(e)∶2–BTP 的质量比为 5∶5∶1 时，灭火时间和峰值HF浓度分别为 $C_6F_{12}O$ 的 20.83%和 3.80%，R1233zd(e)和2–BTP 适合作为$C_6F_{12}O$ 的 HF 抑制添加剂。Zhou 等[56]研究了微胶囊灭火剂与氮气、ABC 干粉灭火剂三者协同灭火机理，并比较分析了 N_2+ABC 干粉+微胶囊、N_2+ABC 干粉和 N_2 的灭火效果，这三种方法的最高火焰温度分别降低了 52.10%、40.53%和 23.95%，火焰熄灭时间分别缩短了 71.02%、64.12%和 22.48%，N_2+ABC 干粉+微胶囊的灭火效率最高。Zhang 等[66]设计了一种新型的气体灭火剂（$C_6F_{12}O$，CO_2 和C_3HF_7）与水雾的协同灭火方法，并评估其对锂离子电池火灾的抑制效果，结果表明协同灭火方法的抑制效果优于单一灭火剂。Li 等[67]将干粉灭火剂与含结晶水的无机相变材料相结合，使用 ABC 干粉与十二水合硫酸铝铵（$NH_4Al(SO_4)_2\cdot 12H_2O$）进行了不同配比的实验，研究表明该复合干粉灭火剂具有较高的冷却性能，能够抑制锂离子电池热失控的传播。

2.2.2　间歇喷雾灭火策略

间歇式喷雾灭火策略是一种通过脉冲式分阶段喷洒灭火剂以优化冷却效率和资源利用的主动控制技术。其核心机制在于利用热惯性效应：在喷雾间隔期，电池表面温度因内部余热传导逐渐回升，而下一阶段喷雾通过快速蒸发吸收更多热量，形成循环降温过程，如图 4 所示[68]，其中，q_c 为电池表面散热速率，q_h 为电池内部传热速率。



（a）喷淋阶段示意图　（b）间隔阶段示意图　（c）干燥阶段示意图

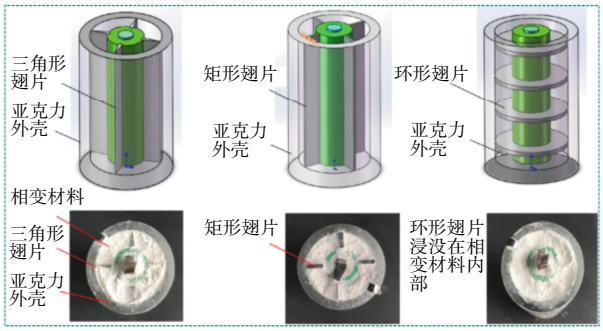
图 4　间歇喷雾灭火策略

Fig.4　Intermittent spray fire extinguishing strategy

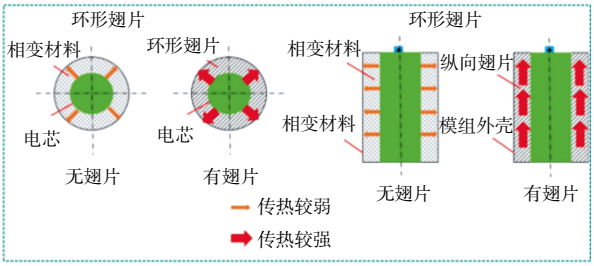
间歇式喷雾具有耗水量少、冷却效果好等优点,在锂离子电池热管理领域得到了广泛应用[69]。Yao 等[70]使用 $C_6F_{12}O$ 和细水雾评估了各种间歇喷雾模式下对锂离子电池火灾的灭火和冷却能力。实验表明 $C_6F_{12}O$ 和间歇式水雾喷雾的组合能迅速熄灭火焰,$C_6F_{12}O$ 与间歇性水雾喷洒相结合时,展现出最有效的冷却效果,并最终阻止热失控的传播。Zhang 等[71]通过改变间歇喷雾的占空比和周期来讨论其对锂离子电池热失控的灭火、冷却和抑制能力,提出了一种新抑制策略。Gao 等[72]提出了一种水雾与液氮交替使用的冷却策略,水雾预喷洒可在电池表面形成水膜,从而减弱液氮的膜沸腾效应并提高冷却效率,而液氮的超低温则能迅速抑制内部放热反应。对于磷酸铁锂离子电池,10 s 预喷洒和 5 s交替间隔的方案表现最佳。对于三元锂离子电池模块,120 s 和 180 s 的交替策略有效延缓了 TR 的出现并抑制了爆燃。

2.2.3　相变材料冷却策略

相变材料(PCM,phase change material)冷却策略是一种基于潜热吸收的被动热管理技术,通过材料在固态与液态转变过程中吸收或释放大量热量,有效抑制锂离子电池的热失控传播。相变材料通常采用石蜡、脂肪酸或复合盐等,被封装在电池模块或外壳中,其相变温度设计为接近电池安全阈值,如图 5 所示[73]。当电池温度升至相变点时,相变材料熔化吸收热量,将电池温度稳定在安全范围内,延缓热失控进程。Hussain 等[74]将镍泡沫/石蜡与铜泡沫/石蜡复合材料用于锂离子电池被动热管理。实验表明,该材料可降低电池温度达 34%,有效抑制局部过热。Ping 等[75]开发了磷酸氢二钠十二水合物/二氧化硅复合相变材料,应用于 18650 电池包。在锂离子电池以 3 倍于其额定容量的电流放电时,电池峰值温度降低 23.7%,热失控触发时间延迟 495 s,并兼具阻燃性,显著抑制热蔓延。Yao 等[76]设计了一种基于树脂–糠醛聚合物框架的复合相变材料,其纳米级多孔结构结合防泄漏特性,在针刺测试中保持结构完整性,质量保留率达 99.84%,适用于高安全需求场景。这些相变材料的冷却策略通过结合高导热填料或结构设计,在延迟热失控触发、抑制温度骤升及阻断热蔓延方面具有协同优势,适配高密度电池组,为电池安全管理提供了多路径解决方案。



(a)3 种翅片放置示意图



(b)有/无 PCM 传热速率比较

图 5　相变材料冷却策略

Fig.5　Phase change material cooling strategy

3　结语

本文综述了近年来锂离子电池火灾防治技术的研究进展,对气体灭火剂、水系灭火剂、泡沫灭火剂、干粉灭火剂、新型灭火剂及灭火策略等在抑制锂离子电池热失控及火灾方面的表现进行了讨论。研究表明,现有单一灭火剂均存在局限性:气体灭火剂虽然能快速扑灭明火,但冷却能力普遍不足,难以彻底抑制内部电化学反应,易导致复燃,部分气体在高温下还可能分解产生 HF 等有毒气体;水系灭火剂冷却效果显著,但水会存在引发电池外部短路的风险,并可能增加有毒气体 HF 的释放;泡沫灭火剂灭火效率高、隔氧效果好,但冷却能力弱于水系灭火剂;干粉灭火剂灭火速度快但冷却效果差、残留物难清理、复燃风险高;新型灭火剂为锂离子电池早期火灾的防控提供了新思路。现有的灭火剂由于自身的缺陷和不足,不能满足对锂离子电池火灾的防治要求。为了提高锂离子电池火灾的灭火效率和冷却效率,本文介绍了协同灭火策略、间歇喷雾灭火策略、相变材料冷却策略。这些策略通过发挥不同的优势,在灭火效率、冷却效果、抑制热失控传播等方面展现出更佳的潜力。

目前,锂离子电池火灾防治技术仍面临众多挑战,未来研究中亟须开发兼具高效灭火和冷却性能、低毒环保的新型复合灭火剂,并深入优化灭火策略,提升对电池模组热失控传播的抑制效果。同时,锂离子电池火灾早期防治技术是重要的研发热点,加快微胶囊技术的发展和提高相变材料的热管理效率,使其能更

有效地对电池系统进行被动防护。针对日益增长的大型电化学储能电站和电动汽车的消防安全需求,需要开展大规模储能系统的测试验证,将实验室成果转化为实际工程应用。

参考文献:

[1] 陆豪宇, 沈文锋, 吕大伍, 等. 锂电池热失控安全防护研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(14): 5–23.

[2] 夏向阳, 谭欣欣, 单周平, 等. 储能电站锂离子电池本体安全关键技术及新技术应用情况[J]. 中国电力, 2024, 57(11): 1–17.

[3] 张文婧, 肖伟, 伊亚辉, 等. 锂离子电池安全改性策略研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 104–123.

[4] García A, Monsalve–Serrano J, Lago Sari R, et al. An optical investigation of thermal runaway phenomenon under thermal abuse conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 246: 114663.

[5] Zhang Lin, Zhao Chunpeng, Liu Yujun, et al. Electrochemical performance and thermal stability of lithium ion batteries after immersion[J]. Corrosion Science, 2021, 184: 109384.

[6] Lithium–ion battery incident reporting[EB/OL]. [2026–10–13]. https://www.ul.com/insights/lithium–ion–battery–incident–reporting.

[7] Wang Qingsong, Mao Binbin, Stoliarov 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.

[8] Yuan Shuai, Chang Chongye, Yan Shuaishuai, et al. A review of fire–extinguishing agent on suppressing lithium–ion batteries fire[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 62: 262–280.

[9] Liao Zhenghai, Zhang Shen, Li Kang, et al. A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium–ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2019, 436: 226879.

[10] Zhang Lu, Zhang Xiaohua, Tian Guiying, et al. Lithium lanthanum titanate perovskite as an anode for lithium ion batteries[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3490.

[11] Li Huang, Duan Qiangling, Zhao Chunpeng, et al. Experimental investigation on the thermal runaway and its propagation in the large format battery module with $Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O_2$ as cathode[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 375: 241–254.

[12] 袁奥特, 蔡涛, 刘政辰, 等. 基于电化学阻抗谱的锂离子电池电滥用失效预警研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(7): 2306–2321.

[13] 乔荣涵, 桑林, 张中洋, 等. 石墨与锂金属负极对混合固液锂离子电池短路与针刺安全性的影响[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3657–3665.

[14] 梁坤峰, 宋义天, 周训, 等. 磷酸铁锂锂离子电池模组热失控分析[J]. 电池, 2025, 55(4): 738–744.

[15] Liu Tong, Liu Yangpeng, Wang Xishi, et al. Cooling control of thermally–induced thermal runaway in 18 650 lithium ion battery with water mist[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 111969.

[16] GB/T 4968—2008 火灾分类[S].

[17] Liu Pengjie, Li Yongqi, Mao Binbin, et al. Experimental study on thermal runaway and fire behaviors of large format lithium iron phosphate battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 192: 116949.

[18] Zhong Guobin, Mao Binbin, Wang Chao, et al. Thermal runaway and fire behavior investigation of lithium ion batteries using modified cone calorimeter[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 135(5): 2879–2889.

[19] Xu Jiajia, Guo Pengyu, Duan Qiangling, et al. Experimental study of the effectiveness of three kinds of extinguishing agents on suppressing lithium–ion battery fires[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 115076.

[20] 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.

[21] Liu Yongcheng, Zhang Guowei, Zhao Gangqiang, et al. Study on inhibitory efficacy of dry ice as a novel fire extinguishing agent for lithium–ion batteries[J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2026, 25: 100437.

[22] Wang Shilin, Gong Xu, Shao Ruihua, et al. Suppression effects of different extinguishing agents on vent gases fires from lithium–ion batteries after thermal runaway: a comprehensive experimental and numerical study[J]. Fire Safety Journal, 2024, 148: 104227.

[23] Huang Zonghou, Liu Pengjie, Duan Qiangling, et al. Experimental investigation on the cooling and suppression effects of liquid nitrogen on the thermal runaway of lithium ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2021, 495: 229795.

[24] Yu Xianyu, Zhang Xiaoqiang, Li Shuo, et al. Study on thermal runaway characteristics and liquid nitrogen inhibition effect of large–format lithium–ion battery modules[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 250: 127281.

[25] 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 Environmental Protection, 2022, 167: 299–307.

[26] Liu Zhongqun, Zhu Yunhao, Li Rui, et al. The experimental investigation of thermal runaway characteristics of lithium battery under different concentrations of heptafluoropropane and air[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 84: 110828.

[27] Tang Xuyao, Wang Yang, Cui Junwei, et al. Thermal diffusivity measurement of trans–1–chloro–3, 3, 3–trifluoropropene (R1233zd(e)) and dodecafluoro–2–methylpentan–3–one (Novec1230) by the dynamic light scattering method[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2020, 65(9): 4236–4241.

[28] 刘昱君. 全氟己酮抑制三元动力锂离子电池火灾效能及机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.

[29] 赵光金, 胡玉霞, 李博文, 等. 簇或舱级释放全氟己酮对磷酸铁锂电池的灭火效果[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(12): 4263–4270.

[30] Liu Yujun, Liu Jianxiang, Zhao Zhiwei, et al. The efficiency of dodecafluoro–2–methylpentan–3–one in suppressing NCM 811 lithium–ion battery fire[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 186: 1432–1446.

[31] Zhao Junchao, Xue Feng, Fu Yangyang, et al. A comparative study on the thermal runaway inhibition of 18650 lithium–ion batteries by different fire extinguishing agents[J]. iScience, 2021, 24(8): 102854.

[32] 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.

[33] 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实验研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(7): 873–876.

[34] 张培红, 张鑫, 李子建, 等. 双相流细水雾抑制锂离子电池热失控蔓延试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(8): 1185–1192.

[35] 许晓元, 张少禹, 卓萍, 等. 基于浸没技术的锂电池模组热失控抑制研究[J]. 消防科学与技术, 2025, 44(5): 585–589.

[36] 周洁, 何骁龙. 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, 41(2): 236–240.

[37] Wang Kuo, Yuan Shuai, Zhang Jianqi, et al. Microemulsion fire extinguishing agent for lithium ion battery: preparation, characterization and application[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 107: 114985.

[38] Wang Kun, Fang Jun, Shah H R, et al. A theoretical and experimental study of extinguishing compressed air foam on an n–heptane storage tank fire with variable fuel thickness[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 138: 117–129.

[39] Xu Chaohang, Li Yajun, Zhang Xiankai, et al. Preparation and characterization of fire–extinguishing efficiency of novel gel foam for lithium–ion battery fires[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 197: 106999.

[40] Cui Yan, Liu Jianghong, Han Xin, et al. Full–scale experimental study on suppressing lithium–ion battery pack fires from electric vehicles[J]. Fire Safety Journal, 2022, 129: 103562.

[41] Zhou Gang, Li Yuying, Liu Yang, et al. Preparation of environment–friendly gel–protein foam and its fire suppression performance for lithium–ion batteries[J]. Fuel, 2025, 384: 133979.

[42] 张宇明, 邹高万, 郜冶, 等. ABC 干粉对爆燃火焰传播抑制实验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(4): 449–453.

[43] Zhao Qi, Chen Xianfeng, Yang Manjiang, et al. Suppression characteristics and mechanisms of ABC powder on methane/coal dust compound deflagration[J]. Fuel, 2021, 298: 120831.

[44] He Zhanwen, Guo Yibo, Zhou Xiaomeng, et al. Ammonium phosphate–based dry powder and $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ composite powder for suppressing the thermal runaway of lithium–ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2025, 654: 237819.

[45] Shi Yaqin, Xing Zhixiang, Liu Yecheng, et al. Research on the inhibition of thermal runaway in power lithium–ion batteries by modified vermiculite powder[J]. Fire Technology, 2025, 61(6): 4103–4131.

[46] 刘淳元, 张国维, 杨林, 等. 水凝胶对三元锂电池热失控抑制效果研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 186–194.

[47] Yuan Shuai, Wang Kuo, Wang Yan, et al. Preparation of environmentally friendly hydrogel and its application in cooling of thermal runaway of ternary lithium ion battery[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 152: 120303.

[48] 陆剑心, 张英, 马出原, 等. 水凝胶对磷酸铁锂电池灭火实验性能[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2637–2644.

[49] Li Xiutao, Zhu Yuxian, Du Kang, et al. Experimental study on suppression of thermal runaway propagation of lithium–ion battery by salt hydrate based dry powder extinguishants[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 60: 104629.

[50] Li Xiutao, Du Kang, Zhu Yuxian, et al. Dry water: toward an ideal extinguishant for lithium–ion battery fire[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 80: 110204.

[51] 孔令冬. 锂电池火干水灭火剂设计制备及灭火效能研究[D]. 北京: 军事科学院, 2021.

[52] 汪洋. 干水材料的制备和灭火效能及其对锂电池热失控的抑制机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.

[53] Gao Zhenhai, Rao Shun, Zhang Tianyao, et al. Bioinspired thermal runaway retardant capsules for improved safety and electrochemical performance in lithium–ion batteries[J]. Advanced Science, 2022, 9(5): 2103796.

[54] Li Jiongchao, Xing Yuedong, Liu Hongming, et al. Fabrication of thermally activated fire–extinguishing microcapsules and silicone rubber composite[J]. Composites Communications, 2025, 53: 102256.

[55] Liu Hao, Zhang Tianwei, Zhang Man, et al. Preparation and thermal responsiveness of microencapsulated fluorinated liquids for automatic fire extinguishing[J]. Heliyon, 2024, 10(5): e27454.

[56] Zhou Gang, Li Yuying, Liu Yang, et al. Preparation of a novel environmental–friendly lithium–ion battery fire suppression microcapsule and its fire extinguishing mechanism in coordination with ABC dry powder[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 448: 141438.

[57] Bai Zujin, Zhang Pei, Kang Furu, et al. Thermal runaway suppression mechanism of thermosensitive microcapsules for lithium–ion batteries[J]. Polymers, 2025, 17(17): 2374.

[58] Wei Zhenwei, Peng Yong, Yuan Qingyan, et al. A novel self–adaptive microcapsule mitigating the thermal runaway hazards of lithium–ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 136: 118238.

[59] Zhang Weixin, Wu Lin, Du Jinqiao, et al. Fabrication of a microcapsule extinguishing agent with a core–shell structure for lithium–ion battery fire safety[J]. Materials Advances, 2021, 2(14): 4634–4642.

[60] Guo Yibo, Wang Xiangjian, Gao Jianjun, et al. In situ extinguishing mechanism and performance of self–portable microcapsule fire extinguishing agent for lithium–ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 93: 112393.

[61] 武艳. 卤代烃灭火剂微胶囊的制备及其性能研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.

[62] Li Chen, Bian Hairui, Ding Dang, et al. Enhancing safety in small confined spaces with thermally triggered fire–extinguishing microcapsules from microfluidics[J]. Lab on a Chip, 2024, 24(4): 904–912.

[63] 李毅, 于东兴, 张少禹, 等. 典型锂离子电池火灾灭火试验研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 120–125.

[64] Deng Jie, Chen Baohui, Lu Jiazheng, et al. Ternary composite extinguishing agent realizes low HF generation, high efficiency and safe suppression of 280Ah lithium iron phosphate battery fire[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 103: 114290.

[65] Liu Yujun, Duan Qiangling, Xu Jiajia, 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.

[66] Zhang Lin, Li Yongqi, Duan Qiangling, et al. Experimental study on the synergistic effect of gas extinguishing agents and water mist on sup–

pressing lithium–ion battery fires[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101801.

[67] Li Xiutao, Zhang Mengjie, Zhou Zhenyang, et al. A novel dry powder extinguishant with high cooling performance for suppressing lithium ion battery fires[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 42: 102756.

[68] Zhang Lin, Duan Qiangling, Meng Xiangdong, et al. Experimental investigation on intermittent spray cooling and toxic hazards of lithiumion battery thermal runaway[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115091.

[69] Liu Yubin, Gao Qing, Wang Guohua, et al. Experimental study on active control of refrigerant emergency spray cooling of thermal abnormal power battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116172.

[70] Yao Yongzheng, Jiang Yi, Chen Fang, et al. Experimental study of the strategy of $C_6F_{12}O$ and water mist intermittent spray to suppress lithium–ion batteries thermal runaway propagation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 91: 105407.

[71] Zhang Lin, Duan Qiangling, Xu Jiajia, et al. Experimental investigation on suppression of thermal runaway propagation of lithium–ion battery by intermittent spray[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 58: 106434.

[72] Gao Xinzeng, Kong Depeng, Huo Juntao, et al. Experimental study on fire extinguishing of lithium–ion batteries by alternating synergistic strategies of water mist and liquid nitrogen under low–temperature conditions[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 134: 117986.

[73] Weng Jingwen, Ouyang Dongxu, Yang Xiaoqing, et al. Optimization of the internal fin in a phase–change–material module for battery thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167: 114698.

[74] Hussain A, Shahid H, Ali I, et al. Passive thermal management system of lithium–ion batteries employing metal foam/PCM composite for the development of electric vehicles[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(1): 505–522.

[75] Ping Ping, Dai Xinyi, Kong Depeng, et al. Experimental study on nano–encapsulated inorganic phase change material for lithium–ion battery thermal management and thermal runaway suppression[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 463: 142401.

[76] Yao Zhubin, Xie Jiekai, Fu Tieqiang, et al. One–pot preparation of phase change material employing nano–scaled resorcinol–furfural frameworks[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 484: 149553.

（责任编辑：刘雅婷）

（上接第 30 页）

[13] 刘永欣, 王含柏. 雷达管制班组协作模型[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(4): 5–8.

[14] 石玉生, 田志强, 黄伟芬. 基于团队和任务维度的团队情境意识评价方法[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 216–223.

[15] 王燕青, 刘超群, 李苗. 基于交互认知模型的飞行机组团队情境意识实验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 305–311.

[16] Taylor R M. Situational awareness rating technique (SART): the development of a tool for aircrew systems design[M]//Situational Awareness. London: Routledge, 2017: 111–128.

[17] 王燕青, 周士琦, 刘超群. 飞行学员注视方式对团队情境意识的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7784–7789.

[18] Mathieu J E, Heffner T S, Goodwin G F, et al. The influence of shared mental models on team process and performance[J]. Journal of Applied Psychology, 2000, 85(2): 273–283.

[19] Cicchetti D V, Allison T. A new procedure for assessing reliability of scoring EEG sleep recordings[J]. American Journal of EEG Technology, 1971, 11(3): 101–110.

[20] Gao Shan, Wang Lei. How flight experience impacts pilots′ decision–making and visual scanning pattern in low–visibility approaches: preliminary evidence from eye tracking[J]. Ergonomics, 2024, 67(10): 1284–1300.

[21] Dehais F, Behrend J, Peysakhovich V, et al. Pilot flying and pilot monitoring′s aircraft state awareness during go–around execution in aviation: a behavioral and eye tracking study[J]. The International Journal of Aerospace Psychology, 2017, 27(1/2): 15–28.

[22] Artman H. Team situation assessment and information distribution[J]. Ergonomics, 2000, 43(8): 1111–1128.

（责任编辑：孟　欣）