

液体浸没条件下锂离子电池新型热灾害的研究进展与挑战

周彪¹, 葛慕滢¹, 王凯¹, 任常兴^{2,3,4}

(1. 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,北京 100091;2. 应急管理部天津消防研究所,天津 300381;
3. 工业与公共建筑火灾防控技术应急管理部重点实验室,天津 300381;4. 天津市消防安全技术重点实验室,
天津 300381)

摘要:在“碳达峰、碳中和”的背景下,浸没式液冷技术是具有良好应用前景的锂离子电池热管理技术之一。在新一代热管理系统中,锂离子电池热失控诱导火灾依然是一个重大的安全隐患。本文全面梳理了当前浸没式液冷技术的研究进展,分析了浸没条件下锂离子电池热灾害的多种模式,提出锂离子电池新型热灾害的研究趋势。首先,介绍了浸没式液冷技术及其优劣势、液冷方法以及液冷介质,重点介绍了相变液冷技术以及部分常用液冷剂的物性参数;其次,梳理了近年来浸没式液冷技术的进展与政策;再次,从浸没条件下锂离子电池老化、热失控以及二次灾害等方面对浸没条件下新型锂离子电池热灾害的模式进行了深入分析和讨论,并指出现有研究存在的不足;最后,提出未来浸没式液冷条件下,新型锂离子电池安全防护技术研究的发展方向。文章有助于提升浸没条件下锂离子电池组热安全性,增强热灾害发生后的应急能力。

关键词:锂离子电池;火灾;液冷剂;浸没式液冷技术;新型热灾害模式

中图分类号:X913.4;TM912 **文献标志码:**A

DOI:10.20168/j.1009-0029.2024.06.0767.07

随着“双碳”战略深入推进,锂离子电池、电化学储能、电动汽车等新能源领域均进入高速发展阶段^[1-2]。2022年,我国锂离子电池行业技术创新和转型升级发展持续加快,锂离子电池产量同比增长超130%^[3]。然而,在行业高速发展的同时,锂离子电池相关的事故却频繁发生,造成严重的经济财产损失乃至人员伤亡^[4-6]。为提升锂离子电池的安全性能,空气冷却、液体冷却、相变材料冷却等多种锂离子电池热管理系统被大量研究应用,其中锂离子电池浸没式液冷技术是最具有前景的热管理方式之一^[7-8]。

与空气冷却、间接液冷等热管理技术相比,锂离子电池浸没液冷技术具有高冷却效率、高温度均匀性以及高阻燃性等优势^[8-11],因此具有广阔的应用前景。然而,锂离子电池在浸没液冷条件下仍会发生热灾害事故^[12],目前针对锂离子电池浸没条件下的热行为以及热灾害研究较少。随着锂离子电池浸没液冷技术的广泛应用,开展锂离子电池浸没条件下的热灾害试验研究具有重要意义

义。因此,本文首先分析了常见的浸没式液冷方法以及介质,其次整理了近年来浸没式锂离子电池热管理技术的相关政策与进展,重点分析了浸没条件下锂离子电池热灾害的相关研究,最后对锂离子电池浸没式液冷系统研究的未来发展趋势进行展望,供学者和相关行业工程师参考。

1 浸没式锂离子电池冷却技术

1.1 液冷技术

浸没式锂离子电池冷却技术是指将锂离子电池浸泡于液冷剂中进行散热。当电池浸泡在冷却液中时,电池与液冷剂之间形成温度梯度,锂离子电池产生的热量向周围的液冷剂传递,在热传导与热对流的作用下热量由温度较高的电池传递至温度较低的液冷剂中,通过液冷剂和外部环境的热交换将热量排出系统,实现电池冷却。

在浸没式锂离子电池液冷系统中,电池浸泡在冷却液中降低了接触热阻,为冷却提供了均匀的、高热容量的热传输路径^[13]。与其他热管理方法相比,使用介电流体的浸没式冷却特点如表1所示。

表1 锂离子电池浸没式液冷技术优劣分析

Table 1 Advantages and disadvantages of immersion liquid cooling technology for lithium-ion batteries

优劣	具体内容	备注
优势	热均匀性好	能够通过减少电池正极和负极上的局部加热效应来提高电池表面温度的均匀性 ^[14]
	冷却效率高	与传统冷却方法相比,浸没式液冷冷却性能高 ^[15]
	阻燃性高	液冷介质大多不导电,不易燃,具有高阻燃性 ^[16]
	可靠性高	良好的冷却性能和热平衡性提高了电池的可靠性和稳定性 ^[13]
	结构简单	浸没式液冷无管道,结构简单
节能环保	使用相变流体,作为被动方案时能耗低 ^[16]	
劣势	体积、质量大	大量液冷介质会增加电池模块的质量和体积
	电池腐蚀	液冷介质会对电池以及密封材料造成腐蚀
	封装复杂	需要进行复杂、严格的密封封装以防止液冷介质泄漏
	维护困难	后期系统维护较为困难,如更换液冷介质等

基金项目:北京市科技新星计划项目(Z211100002121102);天津市多元投入重点项目(22JCZDJC00900);工业与公共建筑火灾防控技术应急管理部重点实验室开放课题(2023KLIB02)

1.2 液冷方法

锂离子电池浸没液冷技术包含多种方式,如半浸没液冷技术、全浸没液冷技术、静态液冷技术、动态液冷技术以及电池表面封膜浸没液冷技术等^[8, 10, 17],如图1所示。

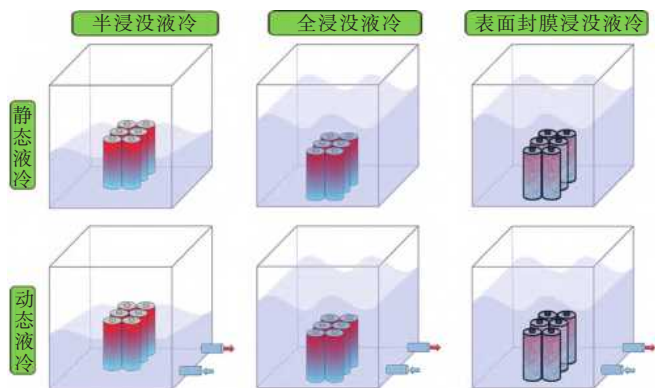


图1 浸没液冷技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of immersion liquid cooling technology

与单相液冷技术相比,相变液冷技术因相变过程可以吸收大量潜热而被广泛研究^[8],如图2所示。浸没式相变液冷是液冷剂在循环散热的过程中不断重复相变吸收潜热,达到散热目的的过程。

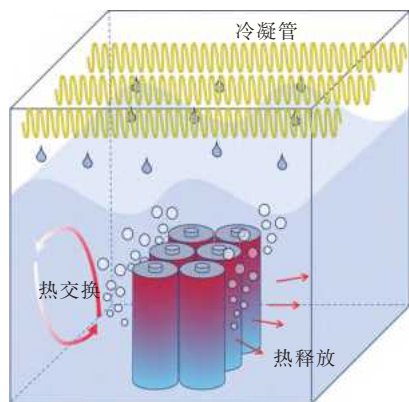


图2 相变液冷系统工作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phase change liquid cooling system

为保证锂离子电池的安全运行,寻找新型相变材料是重要手段之一。LI C等^[18]对自然对流、强制对流、矿物油(单相)和SF33流体(两相)4种冷却策略进行了比较,得出SF33两相流体冷却能有效地将电池温度保持在最佳范围内,并利用可视化分析确定了电池内的换热机理。WANG Y F等^[19]针对R1233ZD(E)/乙醇混合液冷剂的浸没式相变冷却特性进行试验研究,得出电池发热主要受工作电流影响。LI X X等^[20]设计了一种新型环氧密封胶复合相变(ESPE)浸没式液冷电池热管理系统,得出采用ESPE的电池模块具有优异的冷却效果和长期的耐腐蚀性能。LI Y等^[23]试验研究了FS49浸没式锂离子电池相变液冷系统冷凝器的冷却水流量与冷却水温度对冷却效果的影响,得出增加冷却水流量和降低冷却水温度

可以提高FS49的循环速率,提升系统的冷却性能。GOODARZI M等^[24]对电池组进行浸没式气液相变冷却试验,结果表明,降低隔间压力会降低电池的最高温度。相变浸没式液冷充分利用了液冷剂的蒸发潜热,具有高散热效率、高温度均匀性等优点,但为防止相变蒸气逸出引发其他灾害,对冷却系统的密封性要求大大提升。

1.3 液冷介质

电子氟化液、碳氢化合物、酯类、硅油类和水基流体是目前最常见的几类浸没式液冷剂^[9]。其中,电子氟化液具有广泛的热性能以及良好的介电性,但使用电子氟化液会大大增加系统的自身质量。碳氢化合物由于低成本、低毒性和合适的工作温度范围而被广泛运用于浸没液冷系统。酯类具有生物降解快、成本低、闪点高、耐湿性强和介电性好等优势。硅油电导率低,并且在高温和低温下具有良好的耐温性,但其黏度较大会导致系统泵功增大。水基流体具有较好的冷却性能并且成本较低,但使用水基流体进行浸没式液冷对锂离子电池系统的密封性要求高^[8]。

为了给锂离子电池组提供更好的冷却性能、减小电池最大温差、提升电池热均匀性并减小运行的最大温升,保证设备在正常温度内安全运行,学者们致力于寻找具有高散热系数、高热稳定性的浸没用液冷剂^[21, 25-26]。

对部分常用浸没式液冷剂物性参数进行总结,如表2所示。

1.4 小结

浸没式锂离子电池液冷技术将逐渐成为未来的核心散热技术,寻找性能更加优异的浸没式液冷剂仍是未来的研究重点。此外,除了研发新型液冷剂,未来针对浸没式液冷介质的研究也将不仅局限于单一液冷剂的开发。单一相液冷剂难以满足复杂多变的实际情况,因此针对多元复合液冷剂协同降温进行研究具有重要意义,值得深入探讨。

2 液冷技术相关政策及进展

随着锂离子电池的广泛使用,浸没式锂离子电池液冷热管理系统依靠其优越的性能脱颖而出并受到广泛的关注。同时,锂离子电池浸没液冷热管理系统也被广泛运用在工业领域^[9]。本文总结了近年来浸没式液冷技术的相关政策及进展,如表3所示。

3 锂离子电池浸没条件下新型热灾害模式

随着锂离子电池浸没式液冷热管理系统的大量推广以及应用,针对浸没条件下的锂离子电池热特性进行研究具有重要意义,此类研究有助于进一步了解浸没条件下锂离子电池可能发生的热灾害以及灾害特性,有助于提升灾前防范能力与灾后应急处理水平,为未来浸没式液冷技术的发展指明方向。

3.1 锂离子电池浸没条件下老化

据研究,锂离子电池老化过程中电池的热失控特性

主要取决于电池的降解过程和机理^[27]。ZENG J等^[28]对锂电池的老化因素进行分类,系统分析了电池老化过程中正负极材料、电解液和集流器的失效机理并阐明了外部老化因素。REN D S等^[27]试验研究了老化对锂离子电池热失控特性的影响,得出老化过程中电池热失控特性的演变主要取决于阳极-电解质热力学系统热稳定性变化。ZHANG G X等^[29]试验研究得出锂离子电池高温老化过程中电池热稳定性以及热危害均有所降低。ZHU N N等^[30]通过试验研究了不同荷电状态老化锂离子电池的热失控特性,得出高温储存提高了锂离子电池的热稳定性,老化锂电池在100% SOC状态下或更低SOC状态下均不会发生明显的火花喷射行为。

表2 部分液冷剂的物性参数
Table 2 Physical properties of some liquid coolants

材料	运动黏度 /mm ² /s	沸点/℃	密度 /kg/m ³	导热系数 /W/(m·K)	比热容 /J/(kg·K)	介电常数
Novec 649	0.40 (20℃)	49	1 600 (20℃)	0.059 0	1 103	1.8
Novec 7100	0.27 (20℃)	61	1 370.2 (20℃)	0.062 0	1 255	7.39
Fc72	0.38 (20℃)	56	1 680 (20℃)	0.057 0	1 100	1.75
SF33	0.30 (20℃)	33.4	1 383.5 (20℃)	0.077 0	1 200	32
Noah 3000A	1.353 (25℃)	110~115	1 815 (25℃)	0.062 3 (25℃)	1 177 (25℃)	1.79 (1 MHz)
Noah 3000EP	1.376 (25℃)	124.4	1 855 (25℃)	0.061 0 (25℃)	1 107 (25℃)	2.09 (1 MHz)
Noah 2100A	0.356 2 (25℃)	47	1 601 (25℃)	0.059 7 (40℃)	1 279 (25℃)	1.88 (12 GHz)
Noah 7160	3.05 (25℃)	156~160	1 810 (25℃)	0.066 0 (25℃)	1 151 (25℃)	4.8 (1 MHz)
SC-L600	3.4	165	1 810	0.101 4	—	3.83
HKT-170	1.7 (25℃)	170	1 780	0.065 0	960	<2.0
HKT-200	2.9 (25℃)	200	1 790	0.065 0	960	<2.0
HKT-230	4.7 (25℃)	230	1 810	0.065 0	960	<2.0
HKT-270	12 (25℃)	270	1 840	0.065 0	960	<2.0

不同于其他热管理方法,浸没液冷下锂离子电池将直接接触液冷剂,可能会加快电池老化甚至腐蚀破裂。为了更好地掌握锂离子电池浸没条件下的老化特性以及老化对热失控的影响,提升电池系统安全性,针对浸没条件下锂离子电池的老化特性进行研究具有重要意义。KOSTER D等^[31]对相同的18650电池组分别采用空气冷却系统与浸没式冷却系统进行循环试验老化分析,发现在浸没液冷条件下,电池组出现了在风冷条件下未出现的电池故障,分析原因可能是液冷剂从有缺陷的电池片

侵入电池罐内导致。然而,目前针对浸没条件下锂离子电池老化特性的深入研究较少,为了进一步掌握锂离子电池直接接触液冷剂时可能发生的老化、腐蚀对锂离子电池本身性能的影响,以及老化对浸没条件下锂离子电池热失控的影响,并且为浸没式冷却系统短期和长期的技术可行性和效率提出指导性建议,开展锂离子电池浸没条件下老化特性试验研究具有一定的必要性。

表3 近年浸没式液冷技术进展

Table 3 Recent advances in immersion liquid cooling technology

年份	单位	进展	备注
2018年	开放数据中心委员会(ODCC)	发布国内首部《液冷应用及发展白皮书》	提及浸没式液冷技术
2018年	—	首个互联网浸没式液冷数据中心建成	—
2021年	开放数据中心委员会(ODCC)	发布《浸没液冷服务器可靠性白皮书》	旨在提供指导性、操作性参考资料
2022年	美国两企业	发布《可持续发展数据中心转型白皮书》	探讨数据中心采用液浸冷却技术
2023年	工信部、中央网信办、国务院国资委等六部门	印发《算力基础设施高质量发展行动计划》	提出促进绿色低碳算力发展计划,强调支持液冷技术
2023年	三大电信运营商、相关代表企业	发布《电信运营商液冷技术白皮书》	提出未来三年液冷技术应用的发展愿景
2023年	中卫市人民政府	与某企业就浸没式液冷技术在数据中心热管理领域的合作事宜签署《战略合作协议》	—
2023年	南方电网	南方电网梅州宝湖储能电站正式投入运行	全球首个浸没式液冷储能电站
2023年	深圳市工业和信息化局	发布《深圳市创新产品推广应用目录(2023年第一批)》,某“浸没式液冷机柜”成功入选	—
2023年	印度新孟买	数据中心内部署浸没式液冷和直接接触液冷系统	—
2023年	澳大利亚	某公司在ST Telemedia全球数据中心推出用于AI和视觉计算的裸机云服务	采用浸没式液冷技术

3.2 锂离子电池浸没条件下热特性

3.2.1 锂离子电池浸没条件下热行为

针对锂离子电池浸没条件下热行为进行研究分析有利于更高效可靠地利用浸没式液冷技术,避免热灾害的发生。目前,学者们针对浸没式锂离子电池液冷技术冷却效果的影响因素进行了研究。部分学者对液冷剂浸没高度与冷却效果的关系进行研究,发现液冷剂的浸没高度越高,电池表面的最高温度、最大温差以及平均温度越小,热安全性也越高^[32-33]。部分学者针对浸没条件下液冷剂流速对冷却效果的影响进行研究。HUANG C等^[34]

通过试验研究了液冷剂质量流量对浸没液冷系统散热性能的影响,得出一定放电速率条件下液冷剂质量流量越大,电池组温升越小、功率消耗越大。LIU J H等^[35]通过仿真模拟试验分析了液冷剂流速与电池最大温升之间的关系,得出流速越快电池最高温度越小。LI Y等^[23]提出一种基于FS49的浸没式电池热管理系统,得出随着冷却水流量的增大,冷凝器与冷却水之间的对流换热系数也相应增大,但对流换热系数随冷却水流量增大的曲线具有收敛性,即当冷却水流量达到某一临界值时,进一步增大冷却水流量对冷却效果的提升有限。WANG Z P等^[36]提出一种浸入耦合直接冷却法,得出增加电池间隔、提高直冷液速度、降低直冷液温度和使用导热系数较高但运动黏度较小的浸没液可以提高直接冷却的性能。因此,提高液冷剂浸没高度、加大液冷剂流速、降低液冷剂温度、增加电池间隔等措施均可以提升系统的热安全性。此外,王国阳等^[37]开展了不同绝缘冷却液和不同充放电倍率下锂离子电池浸没冷却热管理研究,得出浸没冷却使温度大幅下降的同时会伴随充放电时间的缩短和总容量的下降。深入研究锂离子电池浸没液冷条件下的热行为,有助于提升浸没液冷系统的散热效率和热安全性。

3.2.2 锂离子电池浸没条件下热失控

已有针对浸没条件下锂离子电池热失控特性的研究。LIU F等^[38]利用加速量热仪进行试验,得出含氟浸没液冷剂的应用对锂离子电池浸没条件下热失控发生概率的影响较小,而锂离子电池热失控发生时,氟化液受高温热解产生的自由基有利于终止燃烧反应。文献还探讨了多种冷却剂对锂离子电池热失控的抑制机理,见图3。

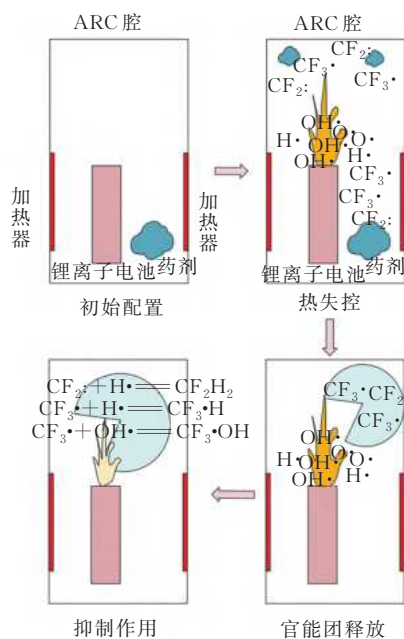


图3 含氟液冷剂对锂离子电池热失控抑制机理图^[38]

Fig. 3 Mechanism of inhibition of thermal runaway of lithium-ion battery by fluorine-containing liquid coolant^[38]

此外,LIU F等^[38]还针对novec 7500等7种典型的含氟液冷剂对锂离子电池热失控的影响进行了测试,研究得出氟化剂的加入会引起热失控峰值压力和峰值温度发生较大变化。当六氟丙烯三聚体、novec 7100、novec 7200、novec 7300和2-溴-3,3,3-三氟丙烯注入液冷系统后,热失控引起的峰值温度分别提高31.8%、22.2%、13.7%、4.9%和22.9%。而加入六氟丙烯二聚体和novec 7500后,峰值温度分别下降7.5%和28.9%。此外,加入氟化剂会增加锂离子电池热失控时的峰值压力,当加入六氟丙烯三聚体、六氟丙烯二聚体、novec 7100、novec 7200、novec 7300、novec 7500和2-溴-3,3,3-三氟丙烯时,锂离子电池热失控的峰值压力分别提高281.3%、75.0%、56.2%、50.0%、112.5%、56.3%和50.0%。BAI P X等^[12]通过过充试验研究了125 Ah圆柱形LFP电池浸泡在10#变压器油中的热失控特性,得出浸没液冷系统可有效防止热失控传播,但对电池热失控启动过程无明显影响。ZHOU H K等^[39]通过试验研究得出,基于沸腾相变的锂离子电池热管理系统不能完全避免过充造成的热失控,但可以有效降低故障电池的热失控程度并阻断热失控在整个电池组内传播。WU S Q等^[40]设计并测试了一种直接接触式液冷电池系统,表明直接接触式液冷系统可以有效抑制热失控的传播并且在短路保护方面具有一定优势。李雨泽^[41]开展了不同SOC的锂离子电池在液体浸没环境下的热失控试验,结果表明浸没式液冷能够有效抑制锂离子电池热失控灾害和减少有毒易燃气体产生,避免二次灾害的发生。

综上可知,浸没式液冷系统的应用不能避免电池热失控灾害的发生,只能从一定程度上减弱热失控程度并减缓热失控在电池组内的传播。然而,当前的研究并未深入阐述浸没液冷技术减缓热失控传播的机理,并且有关其减缓热失控传播的效果缺少定量分析。为了助力性能更好的浸没式液冷剂的遴选工作以及更好地掌握浸没条件下锂离子电池组热失控特性以及传播规律,提升储能行业热安全性,针对浸没式液冷技术对减缓锂离子电池热失控传播的机理进行研究,以及建立浸没条件下锂离子电池热失控传播定量分析模型具有重要意义。

3.3 锂离子电池浸没条件下二次灾害

3.3.1 液冷剂二次灾害

浸没液冷技术的应用对热失控发生的影响较小,但可以减弱热失控程度并减缓、抑制其在电池组内的传播^[12,38-39]。目前大多数研究主要聚焦于浸没液冷技术对锂离子电池热失控的防治效果以及浸没条件下热失控发生时电池本身的性能改变等方面,针对浸没条件下锂离子电池热失控对液冷剂的影响以及相关特性的研究较少。

锂离子电池热失控一旦发生,将产生难以中断的链式反应,产生的高温接近400℃^[42]。考虑到大多数液冷剂的沸点远远低于400℃^[8,16],锂离子电池组周围的液冷

剂吸收热失控时产生的大量热量可能会发生汽化、热解等反应,增加浸没液冷系统的潜在危险性。

LIU F等^[38]通过试验深入研究了LIB热失控与冷却剂挥发产生的混合气的安全性能,得出使用六氟丙烯三聚体冷却剂将造成较大的火灾爆炸危险。因此,针对浸没条件下锂离子电池热失控对液冷剂特性的影响进行研究有利于筛选高安全性、高效的液冷剂,避免电池热失控而引起液冷剂汽化、热解反应,以至其产物与热失控气体产物混合遇高温发生爆炸,导致二次爆炸灾害。

3.3.2 可燃气体二次灾害

锂离子电池一旦发生热失控,常伴随有各种物质从电池中喷射出来,包括气体、液体和固体。其中气体喷射产物主要含有二氧化碳、一氧化碳、氢气和短链烃,如甲烷、乙烯等,大部分为可燃物质^[8,43]。部分学者针对锂离子电池热失控时气体产物的危险性进行研究。ZHANG Q S等^[44]通过试验研究得出,随着电池荷电状态增加,电池热失控释放的废气组分种类增加,存在较大的气体燃烧和爆炸风险,并且部分气态产物具有较大的毒性和致癌性,将导致消防救援风险增加。PENG Y等^[45]对电池组进行了热失控试验,建立气体喷发模型,揭示单个电池发生热失控时排气温度、浓度和压力对电池组热灾害的影响,研究得出热排气会加速热失控向相邻电池的传播。此外,部分学者对电池热失控释放气体的爆炸极限进行了研究^[44,46-48]。WEI G等^[46]利用加速量热仪进行试验,研究了热失控特征和电池热失控气体产物的爆炸特性,得出电池热失控产生混合气体的爆炸下限。

然而目前针对浸没条件下锂离子电池热失控时的气体产物组分以及气体特性的研究较少。这些可燃气体产物在液冷系统的受限空间内聚集到达爆炸极限时,遇高温将会在密闭空间内发生严重的二次爆炸灾害。部分学者研究了受限空间内可燃气体的爆燃爆炸特性^[49-53],然而针对浸没条件下锂离子电池热失控气体产物在液冷系统密闭空间中的爆燃爆炸特性的研究较少。为避免浸没式液冷系统混合气体爆燃爆炸而引起二次灾害,亟须针对浸没条件下锂离子电池热失控气体产物组分、特性以及气体产物与汽化的液冷剂的混合气体特性进行研究,降低消防救援风险。此外,针对浸没液冷系统泄压装置的设计以及混合可燃气体产物的安全处置技术等方面进行研究具有一定的必要性。

4 总结与展望

本文针对浸没式液冷技术进行了系统分析与总结,认为未来浸没式液冷技术的发展趋势主要有以下几点:

1)锂离子电池老化会对电池性能以及热失控特性产生影响,为提升浸没式锂离子电池组的热安全性,为浸没式液冷系统短期和长期的技术可行性和效率提出指导性建议,亟须对浸没条件下锂离子电池的老化机理以及老化对浸没条件下热失控灾害的影响开展深入研究。

2)为加强对浸没条件下锂离子电池热灾害传播特性

的了解,助力性能更好的浸没式液冷剂的遴选以及更好地掌握浸没条件下锂离子电池组热失控特性以及传播规律,提升消防安全,定量研究浸没条件下锂离子电池热失控的传播特性具有一定必要性。

3)为提升浸没冷却系统整体安全性,深入研究浸没条件下锂离子电池热失控时高温对周围液冷剂的影响、浸没条件下锂离子电池热失控产生烟气成分与特性、混合气体在受限空间内爆燃爆炸特性是未来的研究趋势之一。

4)针对浸没条件下锂离子电池发生热灾害时的应对措施以及相关处理技术进行研究具有重要意义,如浸没条件下锂离子电池热失控后灭火剂的遴选、系统的泄压设计以及混合可燃气体的处置技术等。

参考文献:

- [1]唐雁雁.锂离子电池在电动汽车中的应用现状及发展综述[J].环境技术,2023,41(7):94-100.
- [2]张涛.《2030年前碳达峰行动方案》解读[J].生态经济,2022,38(1):9-12.
- [3]王政.2022年锂离子电池产量同比增长超130%:行业总产值突破1.2万亿元[N].人民日报,2023-02-26(1).
- [4]李晋,王青松,孔得朋,等.锂离子电池储能安全评价研究进展[J].储能科学与技术,2023,12(7):2282-2301.
- [5]郭霁瑶.每年1.8万起火灾事故背后 揭开锂电池安全内幕[J].中国经济周刊,2023(15):51-55.
- [6]宋爽,李福,唐西胜.锂离子电池安全状态评估研究进展[J].储能科学与技术,2023,12(11):3545-3555.
- [7]李嘉鑫,李鹏钊,王苗,等.锂离子电池热管理技术研究进展[J].过程工程学报,2023,23(8):1102-1117.
- [8]ROE C, FENG X N, WHITE G, et al. Immersion cooling for lithium-ion batteries—A review[J]. Journal of Power Sources, 2022, 525: 231094.
- [9]曾少鸿,吴伟雄,刘吉臻,等.锂离子电池浸没式冷却技术研究综述[J].储能科学与技术,2023,12(9):2888-2903.
- [10]ZHAO G, WANG X L, NEGNEVITSKY M, et al. An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119626.
- [11]朱佳佳,赵妍.数据中心浸没式液冷技术研究[J].通信管理技术,2022(1):12-15.
- [12]BAI P X, XU R C, LIU M Y, et al. Thermal runaway characteristics of LFP batteries by immersion cooling[J]. ACS Applied Energy Materials, 2023, 6(13): 7205-7211.
- [13]李哲,张华,盛雷.新能源汽车浸没式锂离子电池冷却技术研究进展[J/OL].制冷学报,1-12.
- [14]XIA G D, CAO L, BI G L. A review on battery thermal management in electric vehicle application[J]. Journal of Power Sources, 2017, 367: 90-105.
- [15]SURESH PATIL M, SEO J H, LEE M Y. A novel dielectric fluid

- immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113715.
- [16] 曾少鸿, 吴伟雄, 刘吉臻, 等. 锂离子电池浸没式冷却技术研究综述[J]. *储能科学与技术* 2023, 12 (9): 2888—2903.
- [17] LIU Y H, ALDAN G, HUANG X Y, et al. Single-phase static immersion cooling for cylindrical lithium-ion battery module[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 233: 121184.
- [18] LI C, WEN X, CAI W, et al. Experimental studies on two-phase immersion liquid cooling for Li-ion battery thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108748.
- [19] WANG Y F, LI B, HU Y L, et al. Experimental study on immersion phase change cooling of lithium-ion batteries based on R1233ZD (E)/ethanol mixed refrigerant[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 220: 119649.
- [20] LI X X, DENG J, HUANG Q Q, et al. Experimental investigation on immersion liquid cooled battery thermal management system with phase change epoxy sealant[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 264: 118089.
- [21] LI Y, ZHOU Z F, HU L M, et al. Experimental studies of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery under different discharging conditions[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 34: 102034.
- [22] LI Y, BAI M L, ZHOU Z F, et al. Experimental study of liquid immersion cooling for different cylindrical lithium-ion batteries under rapid charging conditions[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 37: 101569.
- [23] LI Y, BAI M L, ZHOU Z F, et al. Experimental investigations of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery pack under fast charging conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 227: 120287.
- [24] GOODARZI M, JANNESARI H, AMERI M. Experimental study of Li-ion battery thermal management based on the liquid-vapor phase change in direct contact with the cells[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106834.
- [25] WILLIAMS N P, TRIMBLE D, O'SHAUGHNESSY S M. Liquid immersion thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles: An experimental study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108636.
- [26] VAN GILS R W, DANILOV D, NOTTEN P H L, et al. Battery thermal management by boiling heat-transfer[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 79: 9—17.
- [27] REN D S, HSU H, LI R H, et al. A comparative investigation of aging effects on thermal runaway behavior of lithium-ion batteries[J]. *eTransportation*, 2019, 2: 100034.
- [28] ZENG J, LIU S F. Research on aging mechanism and state of health prediction in lithium batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108274.
- [29] ZHANG G X, WEI X Z, CHEN S Q, et al. Research on the impact of high-temperature aging on the thermal safety of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 87: 378—389.
- [30] ZHU N N, WANG X H, CHEN M Y, et al. Study on the combustion behaviors and thermal stability of aging lithium-ion batteries with different states of charge at low pressure[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 174: 391—402.
- [31] KOSTER D, MARONGIU A, CHAHARDAHCHERIK D, et al. Degradation analysis of 18650 cylindrical cell battery pack with immersion liquid cooling system. Part 1: Aging assessment at pack level [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106839.
- [32] 吴成会. 基于浸没式冷却的电动汽车锂离子电池的传热性能研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
- [33] LIU Q, SUN C, ZHANG J S, et al. The electro-thermal equalization behaviors of battery modules with immersion cooling[J]. *Applied Energy*, 2023, 351: 121826.
- [34] HUANG C, ZHU H X, MA Y J, et al. Evaluation of lithium battery immersion thermal management using a novel pentaerythritol ester coolant[J]. *Energy*, 2023, 284: 129250.
- [35] LIU J H, MA Q W, LI X B. Numerical study on heat dissipation performance of a lithium-ion battery module based on immersion cooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 66: 107511.
- [36] WANG Z P, ZHAO R J, WANG S, et al. Heat transfer characteristics and influencing factors of immersion coupled direct cooling for battery thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106821.
- [37] 王国阳, 赵路遥, 孔庆红, 等. 基于浸没冷却的锂离子电池热管理性能研究[J]. *电源技术*, 2022, 46(4): 408—411.
- [38] LIU F, HU Q W, JIANG C Y, et al. The suppression performance of fluorinated cooling agents on the Lithium-ion Batteries fire based on the Accelerating Rate Calorimeter (ARC)[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 42.
- [39] ZHOU H K, DAI C H, LIU Y, et al. Experimental investigation of battery thermal management and safety with heat pipe and immersion phase change liquid[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 473: 228545.
- [40] WU S Q, LAO L, WU L, et al. Effect analysis on integration efficiency and safety performance of a battery thermal management system based on direct contact liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 201: 117788.
- [41] 李雨泽. 浸没方式下液体抑制锂电池热失控技术研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- [42] CHAVAN S, VENKATESWARLU B, PRABAKARAN R, et al. Thermal runaway and mitigation strategies for electric vehicle lithium-ion batteries using battery cooling approach: A review of the current status and challenges[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108569.
- [43] WILLSTRAND O, PUSHM M, ANDERSSON P, et al. Impact of different Li-ion cell test conditions on thermal runaway characteristics and gas release measurements[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107785.
- [44] ZHANG Q S, NIU J H, ZHAO Z H, et al. Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states[J]. *Journal of Energy Storage*,

2022, 45: 103759.

- [45] PENG Y, WANG H B, JIN C Y, et al. Thermal runaway induced gas hazard for cell-to-pack (CTP) lithium-ion battery pack[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108324.
- [46] WEI G, HUANG R J, ZHANG G X, et al. A comprehensive insight into the thermal runaway issues in the view of lithium-ion battery intrinsic safety performance and venting gas explosion hazards[J]. *Applied Energy*, 2023, 349: 121651.
- [47] ZHOU W, LI G, ZHAO H R, et al. Experimental study of explosion parameters of hybrid mixture caused by thermal runaway of lithium-ion battery[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 178: 872–880.
- [48] WANG H B, XU H, ZHANG Z L, et al. Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway: A comparative study[J]. *eTransportation*, 2022, 13: 100190.
- [49] SONG S X, CHENG Y F, WANG W T, et al. Explosion behaviors of hybrid C₂H₂/CaC₂ dust in a confined space[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125783.
- [50] TAN B, SHAO Z Z, XU B, et al. Analysis of explosion pressure and residual gas characteristics of micro-nano coal dust in confined space[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 64: 104056.
- [51] WANG K, SU M Q, WEI L J, et al. Effect of initial turbulence on explosion behavior of stoichiometric methane-ethylene-air mixtures in confined space[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 161: 583–593.
- [52] ZHAO Z Z, LIANG Y T, GUO B L, et al. Explosion dynamics of premixed LPG/H₂ fuel in a confined space[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(92):36211–36221.
- [53] ZHOU G, KONG Y, QIAN X M, et al. Explosion dynamics and sensitivity analysis of blended LPG/DME clean fuel promoted by H₂ in a confined elongated space[J]. *Fuel*, 2023, 331: 125816.

Research progress and challenges of new thermal disasters of lithium-ion batteries under liquid immersion conditions

Zhou Biao¹, Ge Muying¹, Wang Kai¹,
Ren Changxing^{2,3,4}

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100091, China; 2. Tianjin Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Tianjin 300381, China; 3. Laboratory

of Fire Protection Technology for Industry and Public Building, Ministry of Emergency Management, Tianjin 300381, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Fire Safety Technology, Tianjin 300381, China)

Abstract: In the context of “peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality”, immersion liquid cooling technology is one of the lithium-ion battery thermal management technologies with good application prospects. In the new generation of thermal management systems, the thermal runaway-induced fire of lithium-ion batteries is still a major safety hazard. This paper provides a comprehensive overview of current research advances in immersion liquid-cooling technology, and multiple modes of thermal damage in lithium-ion batteries under immersion conditions are analyzed, and the research trend of thermal damage in new lithium-ion batteries is proposed. Firstly, immersion liquid cooling technology, its advantages and disadvantages, liquid cooling methods and liquid cooling medium are introduced, focusing on phase change liquid cooling technology and the physical parameters of some commonly used liquid cooling agents. Secondly, the progress and policies of immersion liquid cooling technology in recent years are sorted out. Thirdly, from the immersion conditions of lithium-ion battery aging, thermal runaway and secondary disasters and other aspects, the new lithium-ion battery thermal disaster mode is in-depth analyzed and discussed, pointing out the existing research deficiencies. And finally put forward in the future immersion liquid-cooling conditions, the new lithium-ion battery safety and protection technology research development direction. The research of this thesis will help to improve the thermal safety of lithium-ion battery packs under immersion conditions and enhance the post-disaster emergency response capability after thermal disasters.

Key words: lithium-ion battery; fire; liquid coolant; immersion liquid cooling technology; new thermal disaster mode

作者简介:周彪(1986—),男,山西文水人,中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,副教授,工学博士,主要从事新型含氟灭火剂的开发与评价、建筑火灾等方面的研究,北京市海淀区学院路丁11号,100091,zhoubiao1088@cumtb.edu.cn。

收稿日期:2023-11-08

修回日期:2023-12-26

(责任编辑:李艳娜)