

航空机载锂离子电池热失控特性研究进展

谢松, 李明浩, 巩译泽, 陈现涛*

中国民用航空飞行学院民航安全工程学院, 广汉 618307

摘要 航空机载条件下锂离子电池的热安全问题是制约其在航空领域应用的关键因素, 相关科学问题是国内外的研究热点。从锂离子电池及其产品在航空应用及运输过程中的热安全问题出发, 综述了航空低温、低压及封闭空间下电池热失控行为及机理的研究, 分析了电池在相应体系下的热失控温度、热失控时间、热释放速率、质量损失、热失控蔓延等热失控特征行为及规律, 提出今后的研究应聚焦在航空低温、低压环境协同作用下锂离子电池的热失控行为及机理方面。

关键词 锂离子电池; 飞行环境; 低压环境; 低温环境; 热失控

当今世界, 随着绿色、环保理念的不断普及, 新能源技术的不断进步, 航空制造的步伐正朝着“电推进技术”方向不断迈进^[1-2], 其中作为新能源应用研究热点的锂离子电池也受到航空制造业的广泛关注^[3-4]。2013年, 全球首个在飞机主电源和辅助动力装置电源采用锂离子电池的波音787多电飞机投入商业运营; 2019年, 中国采用锂离子电池作为飞机动力的锐翔4座全电飞机在沈阳财湖机场完成首飞^[5]。与此同时, 锂离子电池在航空领域的

应用中也暴露出诸多安全问题。据美国联邦航空管理局(FAA)披露, 自2006年1月至2020年11月, 有关锂离子电池(部分为锂金属电池)的航空安全事故已达274起^[6-8]。其中, 2013年1月, 日本航空一架波音787飞机发生了因辅助动力电池内短路而导致的冒烟事故。这一事件的发生引发了社会各界对于锂离子电池安全问题的广泛担忧, 同时也引起了国内外科学家的广泛关注^[9-12]。但由于航空机载锂离子电池运行环境涉及飞行低温、低气压,

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-02-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0809500), 四川省科技计划项目(2018GZYZF0069), 中国民用航空飞行学院面上项目(J2020-105)

作者简介: 谢松, 副研究员, 研究方向为航空电源与安全, 电子信箱: xiesong@cafuc.edu.cn; 陈现涛(通信作者), 副教授, 研究方向为航空消防与救援, 电子信箱: xiantaochen@cafuc.edu.cn

引用格式: 谢松, 李明浩, 巩译泽, 等. 航空机载锂离子电池热失控特性研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(11): 118-125; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.11.013

目前国内外还较少有研究机构具备相关的实验条件。目前国际上主要是FAA和美国国家航空航天局(NASA)在从事这方面的实验研究;国内暂时只有中国科学技术大学、中国民航大学和中国民用航空飞行学院具备相关的实验研究条件。除此之外,其他机构和高校鲜有针对航空低温、低压条件下电池热失控行为研究的实验平台。鉴于这方面的研究对于推动航空电动飞机的发展,提升航空动力电池的设计、生产及研发水平具有重要意义,以下对与民航飞机运行温度、气压环境下锂离子电池热失控相关的国内外研究进行梳理和总结。

1 锂离子电池及其热安全特性

目前市场上广泛应用的锂离子电池按照电解液形态分为液态锂离子电池和固态锂离子电池。液态锂离子电池负极多为石墨,正极多为钴酸锂、锰酸锂、镍钴锰酸锂、镍钴铝酸锂或磷酸铁锂^[13]。而固态锂离子电池与液态电解质锂离子电池相比,正极几乎一致,主要在于负极材料和电解质层面的差距,按照电解质材料的不同分为聚合物、氧化物、硫化物3种^[14]。固态锂离子电池与液态锂离子电池相比能量密度高、耐高温、不挥发且更加安全。固态锂离子电池的发展主要体现在电解质方面的进步:在聚合物固体电解质方面,加拿大魁北克制造出的固态电池可以在1/3C下循环1000多次;在硫化物固体电解质方面,Murayama于2001年发现的玻璃陶瓷 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$,锂离子电导率达到 10^{-2} S/cm;在氧化物固体电解质方面,1976年合成了 $\text{Na}_{1-x}\text{Zr}_2\text{Si}_x\text{P}_{3-x}\text{O}_{12-x}$ 等材料,命名为NASICON,接着新型石榴石型含过渡金属氧化物的锂离子快速导体 $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ 出现^[15]。但是固态锂离子电池距大规模商用还有一定距离,目前市场上仍以液态锂离子电池为主。锂离子电池的正极材料又分为有机电极材料和无机电极材料,目前市场上常见的锂离子电池采用如 LiCoO_2 、 LiNiO_2 、 $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ 、 LiFePO_4 等过渡金属氧化物类无机正极材料^[16]。例如,波音在787机型辅助动力电源中采用的正是以

钴酸锂为正极的锂离子电池^[8](图1),而中国锐翔电动飞机的动力电源则采用了镍钴锰酸锂为正极的锂离子电池^[5]。但由于无机正极材料实际可用比容量提升空间有限,制作原料会消耗大量的矿藏,同时也存在一定程度的安全隐患,所以出现了有机电极材料。有机电极材料理论比容量更高、可弯曲、原料更易从自然界获取,是一种极好的迭代品。目前研究较多的锂电池有机正极材料一般分为导电聚合物、含硫化合物、氮氧自由基、含氧共轭化合物等4种^[17]。但采用有机正极材料存在导电性差、容量衰减快、易在电解液中发生溶解等问题,尚不具备商业化的条件。

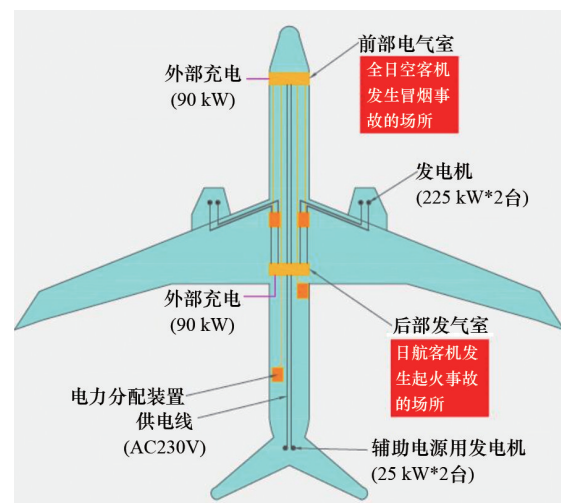


图1 B787锂电池布置及事故位置示意

在锂离子电池的热安全性方面,目前主要考虑的是已经商业化的无机液体锂离子电池。其中,引发电池热失控的原因主要来自于内部热平衡的破坏,当电池遭受挤压、针刺、碰撞等外部作用时易导致电池短路,产生大量的热量;或者当电池受到过充、过放、高温作用后,会加速内部电解液和电极之间的化学反应,产生大量的热量,这些热量聚集到一定程度便会引发电池的热失控^[18-19]。电池热失控过程中,电池内部将经历负极表面固态电解质(SEI)膜的分解、负极表面嵌锂与电解液的反应、隔膜收缩分解、正极与电解液的反应、电解液自身分解、负极与黏结剂的反应、电池与外界接触后电解液的燃烧等过程^[20-22](图2)。

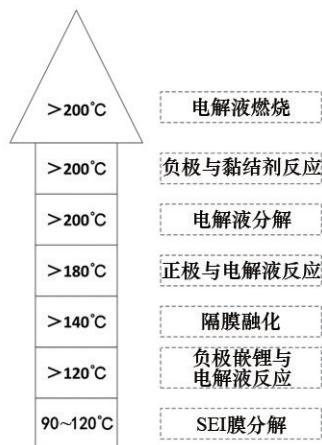


图2 锂离子电池热失控过程

2 锂离子电池热失控对民航飞机的危害

民航飞机巡航高度约为1万m,此时外部环境压力约为26 kPa,温度约-50℃。为了保证乘客的舒适性,机舱内压力通常保持在75~84 kPa,温度约在25℃^[11]。然而,如果飞机遭遇突发情况而失压,舱内人员及组件将面临机体外低温和低压的环境。锂离子电池一旦发生热失控,会泄露出包括CO₂、CO、HF、SO₂在内的大量有毒刺激性气体^[23-24]。其中CO作为锂离子电池热失控产生的主要气体,对人体有极大的危害性(表1)。对于民航客机而言,密闭的机舱环境将导致电池热失控产生的烟气迅速传播至整个机舱,严重危及机舱人员的生命安全。电池在热失控蔓延的过程中,表面最高温度可达1100℃^[25]。此外,锂离子电池热解产生的气体还具有爆炸危险性,一般用爆炸极限判断其危险程度,爆炸极限一般指可燃气体在空气中的体积百分比含量,并且随着电池荷电状态(SOC)的提高,气体爆炸范围会随之扩大(表2)^[26],严重威胁飞机及人员安全。

表1 CO浓度对人体的危害性

CO浓度/10 ⁻⁶	接触时间/min	生理反应
250	130~210	头痛,乏力
500	55~130	头痛加剧
1650	20	恶心,头晕
3200	5~10	痉挛
6400	10~15	死亡

表2 不同荷电状态下电池热解气的爆炸极限

荷电状态/%	爆炸上限/%	爆炸下限/%
50	32.4	5.13
100	38.4	6.22
150	42.1	6.09

2.1 低气压对锂离子电池热失控特性的影响

2.1.1 热释放速率

热释放速率(HRR)是评价燃烧物的燃烧效率和强度的重要参数。陈明毅等^[27-30]在101.8和64.3 kPa这2个压力环境下使用18650型锂离子电池开展热失控研究。实验采用加热器以恒定功率加热电池,测量了不同压力环境下3组SOC电池的HRR。研究表明,低压环境下电池HRR峰值普遍低于常压环境(表3)。

表3 不同压力环境下电池HRR峰值随SOC的变化情况

气压/kPa	HRR峰值/kW		
	SOC 0%	SOC 50%	SOC 100%
100.8	2.86	5.1	2.84
64.3	0.91	2.42	1.1

沈俊杰等^[31]在30 kPa低压和常压环境下,研究对比了21700和18650型锂离子电池的HRR情况。研究表明,在30和101 kPa压力环境下,21700电池燃爆产生的HRR分别为9.37和12.56 kW,18650电池燃爆产生的HRR分别为6.13和9.89 kW,即在低压环境下,18650和21700电池的HRR都相对更低。刘奕等^[32]研究了30、50、70和90 kPa这4个低压环境下软包锂离子电池的HRR,得出了与沈俊杰等^[31]相同的规律。

2.1.2 热失控燃烧温度

孙强^[25]在30、60和101 kPa这3个压力环境下探究热失控传播规律,并探究了不同压力环境对于锂离子电池热失控释放温度的影响。在101 kPa下,实验用的7节电池在整个热失控过程中相继发生热失控,产生了7个温度峰值,当压力降至60 kPa时,峰值温度数量减少到4个,且高温峰值宽度减小,高温持续时间也变短,当压力降低至30 kPa时,峰值温度数量继续减少,高温峰值宽度和高温持续时间也继续变短。沈俊杰等^[31]在30 kPa压力

环境下测得 21700 和 18650 锂离子电池的热失控峰值温度分别为 750 和 600℃, 皆低于 101 kPa 下的 800 和 650℃。谢松等^[33-34]通过热源触发经过充放电循环的锂离子电池热失控, 研究了低压条件下循环老化锂离子电池的热安全特性。研究表明, 对于未循环的电池, 当外部压力从 95 kPa 降到 20 kPa 时, 峰面积温度从 668℃ 下降到 622℃; 对于循环 60 次的电池, 峰面积温度从 512℃ 降至 487℃。通过对比可以看出峰面积温度随 SOC 的增大而增加, 随充放电循环次数和倍率的增多而下降。

2.1.3 质量损失

陈明毅等^[27-30]使用 100% SOC 的电池在不同气压下进行测试, 电池组数量分别为 4、9、16 和 25。结果表明, 在 64.3 和 100 kPa 下, SOC 分别为 0%、50%、100% 的锂离子电池质量损失分别为 3.8、6.7、17.6 和 4.4、7.9、19.3 g, 即在电池个数相同的前提下, 常压下的锂离子电池质量损失更大。与此同时, 陈明毅等^[35]还研究了不同压力条件下 SOC 对钴酸锂电池热失控燃烧热量的影响, 发现电池 SOC 从 0% 增长到 50% 的过程中, SOC 每增加 1%, 则电池燃烧热量在合肥市增加 1.57 kJ, 在拉萨市只增加 0.62 kJ。付阳阳等^[36-37]通过实验得出压力对气体浓度梯度的影响要大于扩散系数, 气体扩散通量随着压力降低而减少, 导致热解气体更难从锂离子电池内部释放出来, 导致热解速率减慢, 质量损失速率降低。同时, 低压环境下浮力减小导致对流减弱, 氧气供给不足抑制了燃烧反应, 导致燃烧反应速率减慢, 释放的气体难以二次燃烧, 导致质量损失率降低。

2.1.4 热失控时间

陈明毅等^[27-30]通过实验发现 18650 锂离子电池的安全阀在 64.3 kPa 的环境下比在 101.6 kPa 下更容易破裂, 气体释放时间也更早, 研究认为安全阀破裂临界压力是不变的常数, 而低压环境下所需压力更低, 所以导致安全阀提前破裂^[11]。付阳阳等^[36-37]在 30 kPa 下测得锂离子电池的放气时间约为 101 kPa 下的 1.4 倍, 认为当环境压力降低时, 气体浓度降低, 锂离子电池内部热反应速率减慢导致产热量不足^[11], 电池内部压力升高需要更长的时间, 所以导致热失控时间延长。谢松等^[33]在不同压

力环境下探究经过循环老化处理后的锂离子电池的热失控规律, 发现循环次数增加缩短了气体释放与点火之间的时间间隔, 而压力降低延长了燃烧时间, 两者都会使热失控时间提前。谢松等^[34]在先前实验的基础上发现充放电倍率的增加会导致气体释放和热失控时间的提前, 并且在 20 kPa 环境下具有不同充放电倍率的电池之间的热失控时间差比在 95 kPa 时更大。谢松等^[38]进一步研究发现, SOC 的增加缩短了电压降和热失控时间, 受电池内外压差、传热系数、O₂ 浓度、对流换热等多方面因素的影响, 所有电池的电压下降时间都比气体释放时间提前, 首次揭示了热失控时间与锂离子电池环境压力之间的 U 型关系。

贺元骅等^[39]从同一低压环境下不同 SOC 锂离子电池的热失控特性出发, 在 60 kPa 下对 25%、50%、75%、100% 这 4 种 SOC 电池进行热失控特性探究, 发现燃爆时间按照 SOC 从小到大依次减少。

2.1.5 热失控扩展蔓延规律

胡棋威^[40]研究了电池容量、环境密封性和电池间距对 18650 锂离子电池热失控扩展蔓延的影响。发现单体电池容量越大、间距越小则越容易发生电池间的扩展蔓延, 并据此确定了不同容量电池的相对安全间距^[25]。陈明毅等^[27-30]对同一 SOC、不同电池个数(4、9、16 和 25)、在不同压力下的燃烧行为进行了实验。研究表明, 水平放置电池上下层受热不均匀, 各层电池点燃变化是偶发的。多电池的组别和单个电池燃烧现象类似, 中间的电池最先被点燃, 然后热量通过扩展蔓延不断触发周围电池热失控。向硕凌等^[41]在 20 和 100 kPa 压力环境下对 7 节锂离子电池进行热失控处理, 电池按照个数呈 2-3-2 排列。在 100 kPa 压力环境下, 当第一排的 2 节电池热失控后, 池体温度急剧升高, 放出浓烟并伴有火星, 停止加热后火焰向后 5 节电池蔓延。与前两节电池现象不同的是后 5 节电池有明显的燃烧燃爆过程, 可燃气体伴随火星大量喷射而出。在 20 kPa 下, 后 5 节电池只有大量烟气释放, 没有燃烧燃爆现象。Steve 等^[42]在密闭空间内对单节 18650 锂离子电池进行热失控处理, 经测量, 热失控产生的热量以及气体释放给密闭空间增加了

193 kPa 的压力。孙强^[25]在 30 和 101 kPa 两种不同环境压力下探究 7 节 18650 锂离子电池的热失控扩展过程,研究表明,30 kPa 下扩展蔓延比 101 kPa 环境下的速度有所减缓,没有高温区域,高温峰值主要集中在热失控扩展完成后的燃烧过程。结合向硕凌和孙强的研究结果,从 20 和 30 kPa 下的扩展蔓延情况来看,电池热失控扩展蔓延受压力影响大,热失控扩展蔓延速率相对较低,燃烧燃爆现象减弱导致热量释放减少。

2.2 空间及气氛对电池热安全特性的影响

2.2.1 封闭和开放空间

刘全义等^[43]从不同 SOC 锂离子电池在密闭和敞开空间中的热失控规律出发,分别在敞开和密闭环境体系下采用加热棒触发电池热失控,其中 0% SOC 的电池只释放烟气,没有燃爆和明火现象发生,而 50% SOC 的电池上述现象非常明显。锂离子电池热失控的最高温度在两种环境体系下基本相同,密闭环境下达到最大温度的时间更晚一点。邓志斌等^[44]使用 50% SOC 的 18650 锂离子电池,在敞开体系中测得锂离子电池发生热失控时池体温度为 283℃,燃爆时池体温度 626℃。在金属外包装的半封闭环境下,锂离子电池爆炸时间比敞开体系下早了 130 s。结合上述刘全义和邓志斌的研究成果,归纳得出密闭体系中,大量烟气的释放导致内外部压差减小,烟气释放速率降低,变相延长热失控时间;半封闭体系下热失控燃爆喷射出高温、易导热的内部电芯物质,加快了相邻电池的热失控进程。在此基础上,邓志斌等^[45]通过设置采用加热棒触发双电池和单电池热失控,研究了不同触发能量对热失控火灾在多组电池间的扩展蔓延情况。研究表明,双节电池同时热失控引发的热传播速度明显高于单节电池。Somandepalli 等^[46]在密闭空间内对不同 SOC 锂离子电池热失控后的混合气体进行了收集分析,结果显示锂离子电池热失控的主要气体为 CO₂、CO、H₂、CH₄ 和 C₂H₄。其中,CO₂ 含量随着 SOC 的增加而减少,CO 含量随着 SOC 的增加而增加(表 4)。

郭超超等^[26]在 Somandepalli 的基础上将混合气体与另外一种可燃气体配对,利用理查特里(Leuchteil-

表 4 不同 SOC 锂离子电池热失控气体组成及含量

气体组分	气体含量(%Vol)		
	SOC 50%	SOC 100%	SOC 150%
CO ₂	32.00	30.00	20.90
CO	3.61	22.09	24.50
H ₂	30.00	27.70	29.70
CH ₄	6.47	6.46	8.34
C ₂ H ₄	5.78	2.96	11.00

ier)公式计算了混合气的爆炸极限。研究表明爆炸极限范围随着 SOC 的升高而增大,SOC 对爆炸上限影响较大,对爆炸下限影响较小,锂离子电池热解气的爆炸极限范围要比普通烃类气体更大,危险性更高。

2.2.2 不同环境气氛

郭君等^[47]在空气、N₂及水雾等 3 种环境气氛下探究锂离子电池之间的热量传递与热失控火灾扩展情况(表 5)。其中,在空气和 N₂ 环境中热失控温度峰值达到了 786.18 和 744.49℃,水雾环境中则只有 273.44℃,明显低于前两者。CO 体积分数从高到低排序依次为 N₂>空气>水雾环境,耐热极限温度相差不大。研究表明,惰性气体环境不能阻止热失控发生,但是可以延长锂离子电池燃爆响应时间,提高锂离子电池耐热极限,抑制锂离子电池二次燃烧反应的发生。惰性气体环境 O₂ 含量不足导致更多 CO 的产生,危险性加剧,而水雾环境中由于锂离子电池爆炸后完整结构被破坏,内部化学反应遭到抑制,使得 CO 体积分数降低。

表 5 锂离子电池在不同环境气氛下的热失控参数

环境气氛	热失控峰值温度/℃	热失控响应时间/s	CO 体积分数/10 ⁻⁶	耐热极限温度/℃
空气	786.18	295	1137	220±2
N ₂	744.49	356	1325	226±3
水雾	273.44	315	2049	231±1.5

2.3 低温环境下锂离子电池的热失控特性

目前,对于低温环境下锂离子电池的热失控研究还极为匮乏,现有研究主要涉及一些低温条件下电池电化性能及产热特性^[48-51]。例如,欧阳东旭

等^[49]探讨了低温对锂离子电池循环性能的影响。研究表明,电池在低温下循环过程中温升更高,电池表面温度的均匀性变差,单个电池内部温度的不均匀性随着循环速率升高而升高。此外,低温会加剧电池老化速度。在此基础上,欧阳东旭等^[50]的研究还发现温度升高、温差和电压差的加剧会导致电池的一致性变差,与高温环境相比,低温环境会造成更严重的均匀性。陈现涛等^[51]选择磷酸铁锂电池在 25、10、-10 和 -20℃ 等环境温度下进行充放电循环实验。结果表明,低温环境下,电池容量随温度下降而降低,-10、-20℃ 的低温环境下,电池内部应力明显高于 25 和 10℃。张青松等^[52]在常温常压以及机舱模拟环境下对 CR2032 型扣式锂锰电池进行了热失控研究。研究发现,在常压、20℃ 的条件下,电池平均加热 220 s 发生热失控,电池表面最高温度达到 239.3℃;在常压、环境温度 7.8℃ 情况下,电池发生热失控的时间缩短了 5 s 左右,热失控后的表面最高温度达到 369.5℃。在低压 83 kPa、环境温度为 8.5℃ 时,电池热失控所需时间再次小幅提前,表面最高温度达到了 520.1℃。除以上研究外,目前还鲜有关于低温条件下锂离子电池热失控规律及特性研究的报道。

3 结论

从民航飞机飞行的温度压力环境出发,梳理了目前涉及飞行低温、低压环境的锂离子电池热失控研究进展,得出主要结论如下。

1) 低压环境下 HRR 明显低于常压,且峰值随着压力的降低呈递减趋势。

2) 热失控峰值温度随着压力降低而逐渐减小,随 SOC 的增大而增加,随充放电循环次数和倍率的增多而下降。

3) 低压环境下电池热失控起始温度、质量损失率相对常压都更低。

4) 低压环境下较低的 O₂ 浓度对热失控中的燃烧反应有一定的抑制作用,释放的气体难以二次燃烧。

5) 受电池内外压差、传热系数、O₂ 浓度、对流

换热等多方面因素的影响,电池热失控时间随环境压力的降低并不呈简单的线性关系,而是表现出先减后增的 U 型关系。

6) 结合 20 和 30 kPa 下的扩展蔓延情况来看,电池热失控扩展蔓延受压力影响大,热失控扩展蔓延速率相对较低,燃烧燃爆现象减弱导致热量释放减少。

7) 密闭体系中,大量烟气的释放导致内外部压差减小,烟气释放速率降低,变相延长热失控时间;半封闭体系下热失控燃爆喷射出高温、易导热的内部电芯物质,加快了相邻电池的热失控进程。

8) 环境温度越低,热失控发生后电池表面最高温度越高。

现有研究主要从航空低压环境出发,研究相应环境下电池的热失控规律和特性,但目前对于低温环境下锂离子电池热失控的研究还较为匮乏,尤其在低温、低压协同作用下锂离子电池热失控行为的研究方面还几乎是空白。因此,未来还应加强温度、压力协同作用下航空机载锂离子电池热失控特性及机制的研究,推动中国在航空机载锂离子电池设计制造、运行管理、火灾防控、适航审定等方面的发展。

参考文献 (References)

- [1] 穆作栋,程文渊,宋刚.电推进技术在航空业的应用[J].航空科学技术,2019,30(11):30-35.
- [2] 孙侠生,程文渊,穆作栋,等.电动飞机发展白皮书[J].航空科学技术,2019,30(11):1-7.
- [3] Goodenough J B, Kim Y. Challenges for rechargeable Li batteries[J]. Chemistry of Materials, 2010, 22: 587-603.
- [4] 杨敏.锂离子电池在航空领域的应用再现曙光[J].航空维修与工程,2017(9):30-32.
- [5] 范振伟,杨凤田,项松,等.我国电动飞机发展现状及建议[J].航空科学技术,2019,30(11):18-21.
- [6] Thomas F, Mills G, Howe R, et al. Lithium battery fires: Implications for air medical transport[J]. AirMed International, 2012, 31(5): 242-248.
- [7] Williard N, He W, Hendricks C, et al. Lessons learned from the 787 dreamliner issue on LIBs reliability[J]. Energies, 2013, 6(9): 4682-4695.

- [8] 方谋, 赵骁, 陈敬波, 等. 从波音 787 电池事故分析大型动力电池组的安全性[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(1): 42-46.
- [9] Wang Q, Mao B, Stolarov S, et al. A review of lithium ion batteries failure mechanisms and fire prevention strategies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73: 95-131.
- [10] Golubkov A W. Transport of lithium batteries as cargo via airupdate on recent activity[R]. Atlantic City: International aircraft systems fire protection working group, 2015.
- [11] 王淮斌, 杜志明. 低压环境下锂离子电池安全性研究进展[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(6): 884-890.
- [12] 贺元骅, 郭君, 王海斌. 民航锂电池运输热灾害危险特性综述[J]. 民航学报, 2019, 3(3): 88-90.
- [13] Hannan M A, Hoque M M, Mohamed A, et al. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 771-789.
- [14] 穆道斌, 谢慧琳, 吴伯荣. 锂离子电池固体电解质的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(4): 415-427.
- [15] Skundin A, Kulova T, Rudy A, et al. All solid state thin-film lithium-ion batteries: Materials, technology, and diagnostics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- [16] Lyu H, Sun X G, Dai S. Organic cathode materials for lithium-ion batteries: Past, present, and future[J]. Advanced Energy and Sustainability Research, 2020, 2: 2000044.
- [17] 赵经纬, 陈嘉苗, 陆嘉晟, 等. 有机聚合物锂电池正极材料的制备与研究[J]. 江西化工, 2019(6): 334-337.
- [18] Maleki H, Deng G P, Anani A, et al. Thermal stability studies of Li-ion cells and components[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146(9): 3224-3229.
- [19] Macneil D D, Dahn J R. The reaction of charged cathodes with nonaqueous solvents and electrolytes: I. $\text{Li}_{0.5}\text{CoO}_2$ [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(11): 1205-1210.
- [20] Richard M, Dahn J. Accelerating rate calorimetry study on the thermal stability of lithium intercalated graphite in electrolyte. I. Experimental[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146 (6): 2068-2077.
- [21] Roth E P, Doughty D H. Thermal abuse performance of high-power 18650 Li-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2004, 128(2): 308-318.
- [22] Jiang L, Wang Q, Sun J. Electrochemical performance and thermal stability analysis of $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ cathode based on a composite safety electrolyte[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 351:260-269.
- [23] 秦帅星, 郭超超. 锂离子电池热解气体释放特性研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(11): 1592-1596.
- [24] Wang Q, Sun J, Chu G. Lithium ion battery fire and explosion[J]. Fire Safety Journal, 2005, 8: 375-382.
- [25] 孙强. 低压环境对锂离子电池热灾害扩展特性影响研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2018.
- [26] 郭超超, 张青松. 锂离子电池热解气体爆炸极限测定及其危险性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(9): 46-49.
- [27] 陈明毅. 常压和低压下锂原电池、锂离子电池火灾行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [28] Chen M Y, Liu J H, He Y P, et al. Study of the fire hazards of lithium-ion batteries at different pressures[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 1061-1074.
- [29] Chen M Y, Liu J H, Lin X, et al. Combustion characteristics of primary lithium battery at two altitudes[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 124(2): 865-870.
- [30] Chen M Y, Liu J H, Ouyang D X, et al. Experimental investigation on the effect of ambient pressure on thermal runaway and fire behaviors of lithium-ion batteries[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(2): 1-14.
- [31] 沈俊杰, 王海斌, 贺元骅, 等. 低压环境下不同三元圆柱锂电池热失控危险特性对比研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 110-115.
- [32] 刘奕, 张旭, 陈现涛, 等. 不同压力下软包装锂离子电池的热失控研究[J]. 电池, 2020, 50(3): 237-241.
- [33] Xie S, Ren L X, Yang X Y, et al. Influence of cycling aging and ambient pressure on the thermal safety features of lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2020, 448: 227425.
- [34] Xie S, Ren L, Gong Y, et al. Effect of charging/discharging rate on the thermal runaway characteristics of lithium-ion batteries in low pressure[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(14): 140503.
- [35] Chen M Y, Ouyang D X, Weng J W, et al. Environmental pressure effects on thermal runaway and fire behaviors of lithium-ion battery with different cathodes and state of charge[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 130: 250-256.
- [36] 付阳阳. 典型锂离子电池和电解液燃烧特性及航空运输环境对其影响机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大

- 学, 2017.
- [37] Fu Y Y, Song L, Long S, et al. Ignition and combustion characteristics of lithium ion batteries under low atmospheric pressure[J]. *Energy*, 2018, 161: 38–45.
- [38] Xie S, Sun J, Chen X T, et al. Thermal runaway behavior of lithium-ion batteries in different charging states under low pressure[J/OL]. *International Journal of Energy Research*, 2020, <https://doi.org/10.1002/er.6200>.
- [39] 贺元骅, 王春晓, 王耀帅, 等. 低压环境下 18650 型锂离子电池热失控特性[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(8): 310–314.
- [40] 胡棋威. 锂离子电池热失控传播特性及阻断技术研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2015.
- [41] 向硕凌, 王春晓, 孙强, 等. 常压及巡航低压环境下锂离子电池热失控特性[J]. *消防科学与技术*, 2019, 38(8): 1164–1166.
- [42] Steve S, Thomas M. Propagation of lithium battery fire in an inert environment[R]. Atlantic City, NJ: Federal Aviation Administration, 2014.
- [43] 刘全义, 韩旭, 孙中正, 等. 不同环境体系下锂离子电池热失控特性实验研究[J]. *安全*, 2019, 40(4): 42–46.
- [44] 邓志彬, 韩旭, 刘全义, 等. 不同体系中 18650 型锂离子电池热失控传播过程研究[J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(2): 246–249.
- [45] 邓志彬, 孙强, 贺元骅. 18650 型锂离子电池热失控火灾扩展触发条件研究[J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(5): 690–693.
- [46] Somandepalli V, Marr K, Horn Q. Quantification of combustion hazards of thermal runaway failures in lithium-ion battery[J]. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2014, 3(1): 98–104.
- [47] 郭君, 贺元骅, 王海斌, 等. 热失控下环境体系对锂离子电池火灾危险性的影响[J]. *消防科学与技术*, 2020, 39(8): 1160–1164.
- [48] 朱蕾, 荆海晓, 乔雪, 等. 低温条件下锂离子电池电、热性能研究[J]. *汽车实用技术*, 2019(18): 42–44.
- [49] Ouyang D X, He Y P, Weng J W, et al. Influence of low temperature conditions on lithium-ion batteries and the application of an insulation material[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(16): 9053–9066.
- [50] Ouyang D X, Hu J Y, Chen M Y, et al. Effects of abusive temperature environment and cycle rate on the homogeneity of lithium-ion battery[J]. *Thermochimica Acta*, 2019, 676: 241–248.
- [51] Chen X T, Wang C X, Sun Q, et al. Study on thermomechanical coupling characteristics of embedded sensor lithium batteries under low-temperature environment[J]. *Energy Storage*, 2020, 2: e107.
- [52] 张青松, 白伟. 冷链航空运输中锂锰电池安全性的影响因素[J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(6): 813–816.

Review of the thermal runaway characteristics of airborne lithium-ion batteries

XIE Song, LI Minghao, GONG Yize, CHEN Xiantao*

College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China

Abstract The thermal safety problem of lithium-ion batteries under aviation airborne conditions is a key factor that restricts their application in the aviation field. The related scientific issues are the research hotspots at home and abroad. This paper reviews the thermal runaway problem of lithium-ion batteries and their products in aviation application and transportation. Thermal runaway characteristics and mechanisms of the batteries under low temperature, low pressure and enclosed space conditions are presented. Thermal runaway behaviors and laws of the batteries are introduced from the five aspects: thermal runaway temperature, thermal runaway time, heat release rate, mass loss, and thermal runaway spreading law. It is proposed that future research should be focused on thermal runaway behaviors of lithium-ion batteries concerning the synergistic effect of low temperature and low pressure environments.

Keywords lithium-ion battery; flight environment; low pressure; low temperature; thermal runaway ●



(责任编辑 王志敏)