

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0175

航空动力锂离子电池热失控行为与 气体燃爆危险性研究进展*

杨娟^{1,2}, 牛江昊³, 魏陟珣³, 胡佳宁³, 包防卫³, 张青松^{1,3}

(1. 中国民航大学天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室, 天津 300300;

2. 中国民航大学工程技术训练中心, 天津 300300;

3. 中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 动力锂离子电池安全是制约电动航空器运行与适航取证的技术瓶颈问题, 影响全球电动航空的发展。由锂离子电池热失控引发的燃烧、爆炸等失效事件将造成机毁人亡的灾难性后果。本文旨在为相关研究人员介绍锂离子电池热失控爆炸特性的研究现状, 从锂离子电池热失控燃爆行为、热失控气体爆炸极限以及热失控气体爆炸危险性评估三方面进行阐述: 在锂离子电池热失控燃爆行为方面, 介绍了锂离子电池热失控发展过程, 分析了热失控冲击特征参数测定方法, 总结了热射流演变机制及射流火焰的模拟仿真与实验方法; 针对热失控气体的爆炸极限, 对比国内外气体爆炸极限测试标准, 总结了热失控气体爆炸极限理论计算方法, 并对原位检测爆炸极限的创新方法进行了介绍; 在热失控气体爆炸危险性评估方面, 介绍了老化锂离子电池危险性评估方法, 以及爆炸危险性参数指标。提出未来的研究将侧重于先进诊断技术、增强电解质稳定性、多尺度建模、先进抑制技术以及建立标准化测试流程和技术法规等领域。

关键词: 航空动力锂离子电池; 热失控; 气体燃爆; 爆炸冲击

中图分类号: O384

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

A review of thermal runaway impacts and gas explosion of aviation propulsion lithium-ion batteries

YANG Juan^{1,2}, NIU Jianghao³, WEI Zhixun³, HU Jianing³, BAO Fangwei³, ZHANG Qingsong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Technology and Equipment of Tianjin Urban Air Transportation System,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Engineering Techniques Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

3. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The safety of propulsion lithium batteries is a technical bottleneck problem restricting the operation and airworthiness certification of electric aircraft and affects the development of electric aviation worldwide. Failure events such as combustion and explosion triggered by thermal runaway of lithium batteries will cause the catastrophic consequences of aircraft destruction and casualties. This paper aims to introduce the status of aircraft lithium battery thermal runaway explosion characteristics for relevant researchers from three aspects, respectively, lithium-ion battery thermal runaway combustion and explosion behavior, thermal runaway gas explosion limit and thermal runaway gas explosion hazard assessment. In terms of

* 收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(U2033204); 天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室开放基金(TJKL-UAM-202302); 中央高校基本科研业务费(3122023025)

第一作者: 杨娟(1983—), 女, 硕士, 副教授, haishi_yj11@126.com

通信作者: 张青松(1977—), 男, 博士研究生, nkzqsong@126.com

lithium-ion battery thermal runaway explosion behaviors, introduced the lithium-ion battery thermal runaway development process, analyzed the determination of the parameters of the thermal runaway impact characteristics, summarized the evolution of the thermal jet mechanism and the simulation of jet flame and experimental methods; For the thermal runaway gas explosion limit, compared with national and international testing standards for the explosion limit of gases, concluded the theoretical calculation of the explosion limit of thermal runaway gas, as well as in-situ detection of the explosion limit of innovative methods are introduced; In the thermal runaway gas explosion risk assessment, a method of ageing lithium-ion battery risk assessment is proposed by innovatively combining CT non-destructive testing technology with explosion limit in-situ testing method. Based on the characteristics of lithium-ion battery thermal runaway gas explosion limit and pressure rise rate, the factors of explosion danger and explosion severity are obtained, and the explosion risk calculation formula explosion danger parameter indicators are innovated. It proposes that future research will focus on areas such as advanced diagnostic techniques, enhanced electrolyte stability, multi-scale modelling, advanced inhibition techniques, and the establishment of standardized testing processes and safety regulations. It proposes that future research will focus on areas such as advanced diagnostic techniques, enhanced electrolyte stability, multi-scale modeling, advanced inhibition techniques, and the establishment of standardized test procedures and technical regulations.

Keywords: aviation propulsion lithium-ion batteries; thermal runaway; gas explosion; explosive shock

“双碳”目标背景下, 交通电气化被认为是应对能源危机与减少环境污染的有效解决方案。在航空领域, 发展绿色航空, 采取电推进系统取代传统燃油系统, 成为了实现节能减排目标的必然选择^[1]。在我国低空经济战略性新兴产业的重大决策部署以及全球碳中和大趋势和新能源交通渗透率快速增长的背景下, 电动航空器如垂直起降飞行器(electric vertical take-off and landing, eVTOL)、电动飞机等由于其低碳环保、噪声低、自动化等级高、运行成本低、安全可靠的优势, 成为国内外航空领域的发展热点。据预测, 电动航空的全球市场规模就将在 2028 年达到 24 751.5 亿元^[2]。锂离子电池因其密度高、重量轻、循环寿命长等优势, 成为电动航空应用领域最有前途的候选产品。

作为唯一推进动力供电电源, 锂离子电池安全至关重要。然而, 欧盟航空安全局(European Aviation Safety Agency, EASA)表明, 即使从最优供应商处选用最可靠的锂离子电池单体, 并施以适当的检查和测试, 也无法完全避免产品存在潜在的缺陷。这些缺陷的存在, 使锂离子电池因受到电气、机械和环境等多因素影响而产生失效成为可能。当锂离子电池处在热滥用(如加热、高温环境等)、机械滥用(如针刺、挤压等)、电滥用(如过充、过放等)的情况下, 电池温度升高, 电池内部发生各种化学反应, 包括固体电解质界面膜(solid electrolyte interface membrane, SEI)分解、负极和电解质发生反应、隔膜融化、电解液受热分解、正极与电解液反应等, 反应产生大量的热量与气体, 这一过程被认为锂离子电池发生了热失控^[3-5]。热失控过程引发急速的电压损失、释放大量的热量和危害性气体, 对于飞行安全影响极大^[6]。此外, 在实际飞行中, 飞行器将会面临低温、低压等特殊环境条件, 将会导致电池内部材料性能发生变化^[7]。而对于电动航空器而言, 起飞和降落阶段的短时高倍率放电可能导致锂离子电池发生过度放电现象^[8], 这些条件都与电动汽车的锂离子电池运行工况存在显著差异, 它们对锂离子电池性能所造成的影响不仅关系到航空器的安全运行, 也成为制约电动航空器适航取证和广泛应用的主要技术瓶颈。

电池热失控过程伴随着释放出大量的可燃气体, 其燃爆所释放的热量会导致相邻电池的发热和失效, 触发多节锂离子电池热失控连锁反应, 从而导致大规模的电池失效发展成为剧烈的爆炸行为。结合航空应用和适航需求, 通过研究工作确定锂离子电池热失控气体的爆炸特性, 有效评估锂离子电池热失控的危害性后果, 是推动动力锂离子电池在飞机上的安全使用的有效技术路径。本文中, 将针对锂离子电池热失控燃爆行为、热失控气体爆炸极限以及燃爆危险性后果三方面进行探讨, 评估现有研究在航空动力电池安全性领域的不足, 并提出针对性的研究建议, 以期电动航空器的安全设计和适航认证提供科学依据。

1 锂离子电池热失控燃爆行为

1.1 锂离子电池热失控燃爆发生发展过程

作为航空器动力能源,锂离子电池系统通常具备单体容量大、能量密度高、装配数量多等特点,然而,当前航空动力锂电池的应用尚处于起步阶段,大规模的装机实例相对较少。因此,直接针对航空动力锂电池系统的热失控研究数据有限。通过借鉴大尺度电池系统的热失控研究成果,可以间接获得有关航空动力锂电池失效机理的热失控温度、热失控火焰行为等重要信息。这些研究成果不仅有助于理解在航空运行特殊条件下电池系统的行为,也为航空动力锂电池系统的设计和安全评估提供了数据支撑。随着电动航空技术的不断进步和应用的逐步扩大,这些初步的研究将为未来航空动力锂电池的安全性研究奠定坚实的基础。Ping 等^[9]对大尺寸高能 50 Ah LiFePO₄(LFP)/石墨电池组进行了全尺寸燃烧试验,发现 100% SOC(state of charge)电池组的燃烧行为可分为 8 个阶段(如图 1 所示):电池膨胀、第 1 次喷射火焰、稳定燃烧、第 2 次喷射火焰、稳定燃烧、第 3 次喷射火焰,随后是稳定燃烧、减弱和熄灭,当电池温度达到 175~180 °C 时,电池会着火,火焰最高温度可达 1 500 °C。热释放率(heat release rate, HRR)根据电池产生的氧气和内部短路的焦耳效应而变化。电池的充电状态对电池的最大 HRR、总发热量和质量损失有显著影响。此外, Ping 等^[10]还应用锥形量热计在不同的入射热流下对 100% SOC 的 LiNiCoAlO₂(LNCA) 18 650 电池进行了过热实验,发现当电池暴露在大于 35 kW/m² 的入射热流中时,会同时发生火灾和爆燃现象。当电池芯温度高于 132 °C 时,压力阀开启,若空气中热失控释放气体浓度高于可燃下限时,阀门开启即发生火灾。爆燃发生在电池温度达到 200 °C 左右后,主要由阴极分解、溶剂燃烧和阳极相关热反应引起,爆燃时电池和火焰的极端温度分别超过 820 和 1 035 °C。

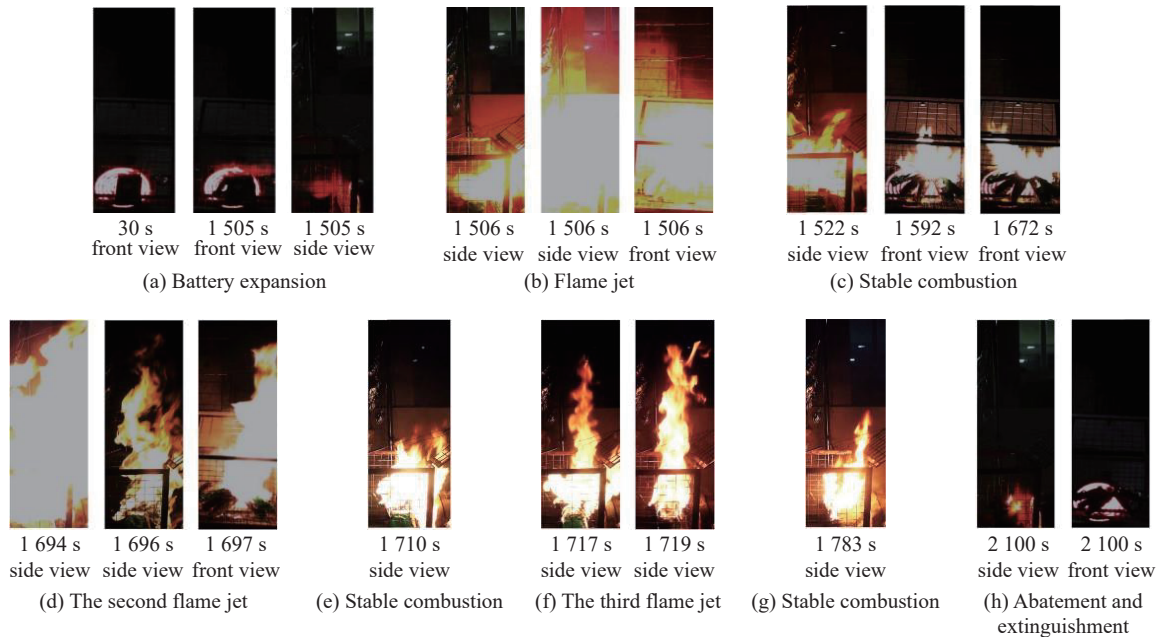


图 1 100% SOC 电池全尺寸燃烧测试中燃烧现象的不同时间戳对应的视频截图(侧面和正面)^[10]

Fig. 1 Video screenshots corresponding to different time stamps of combustion phenomena in the full-scale combustion test of 100% SOC batteries (side and front)^[10]

航空锂离子电池适航符合性验证过程中,依据 RTCA DO-311A《航空可充电锂电池和电池系统最低性能标准》,需采取外部加热方式触发热失控,以判定系统热失控包容性。热滥用作为锂离子电池热失控最根本的触发因素,当电池内部热量积累到一定程度时,锂离子电池将会发生热失控现象,伴随着可燃性气体及内容物的释放。张青松等^[11]利用自主设计的锂离子电池热滥用实验平台,对不同包装、数

量、SOC, 结合航空器运行环境条件, 遵循航空标准 RTCA DO-311A 的实验要求, 对锂离子电池开展了燃爆特性研究, 评估了航空锂离子电池的热失控风险, 确定了在飞行过程中可能的失效模式和后果。由图 2 可以看出, 锂离子电池的热失控过程表现出了明显的冲击行为, 整个燃爆可分为 2 个阶段: 第 1 阶段, 电池受到外部加热后, 电池内部的电解液开始蒸发, 由液体变为气体, 内部压力增大, 由于电池外壳为刚性材料, 在高压作用下几乎不会发生形变, 导致内部压力急剧增高, 直至超出正极附近泄压阀的最大泄压量程, 导致内部气体通过卸压孔喷出, 出现初爆现象; 第 2 阶段, 随着温度继续升高并达到电解液燃点后, 因电池内部存在大量的电解液蒸气及可燃物质, 使得锂离子电池迅速燃烧, 在短时间内温度激升, 导致更多的电解液汽化燃烧, 内部压力急剧升高, 最终发生剧烈的燃烧爆炸现象, 并伴随强大的冲击力。

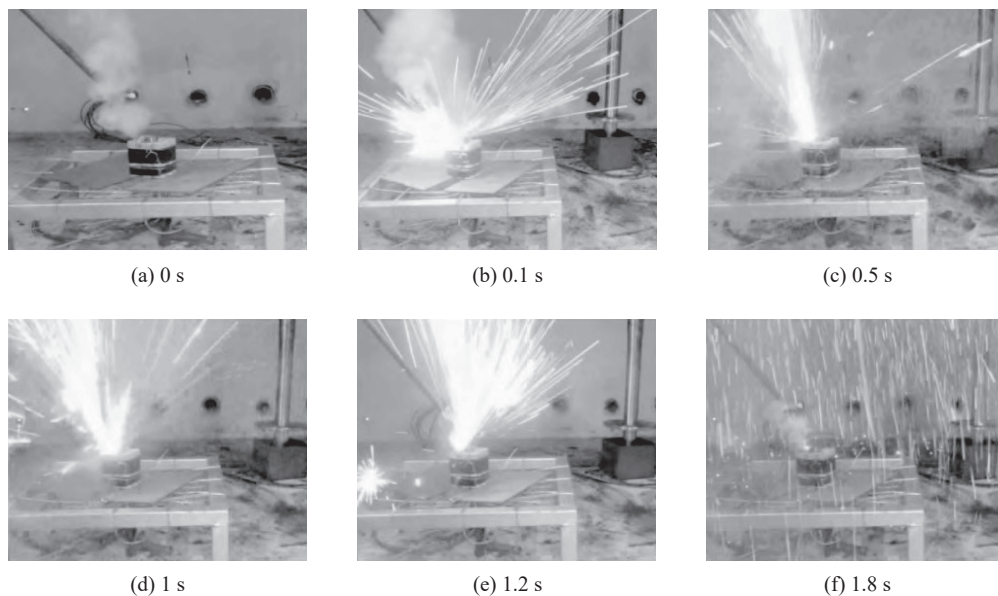


图 2 锂离子电池热失控发展过程^[1]

Fig. 2 Development of thermal runaway in lithium-ion batteries^[1]

综上, 可将锂离子电池的热失控燃爆行为分为热失控冲击和热射流两部分。其中, 热失控冲击是指电池内部化学反应失控导致温度急剧上升, 进而可能引起压力急剧升高和物理结构破坏的现象。在电池过充、过热或内部短路等情况下, 电池内部的化学反应加速, 产生大量热量。如果热量不能及时散发, 会导致电池温度持续升高, 可能触发 SEI 层分解、电解液分解、正极材料与电解液反应等放热反应, 形成正反馈循环, 导致电池内部压力的急剧升高, 进而诱发电池发生爆炸, 对周围环境和设备造成冲击^[12]。热射流通常伴随着热失控冲击同时发生, 电池热失控时其内部的高压气体和蒸气通过电池安全阀或破裂的壳体迅速喷出, 形成高速的热气流。当电池内部的压力超过壳体的承受极限时, 气体和蒸气会通过泄压阀或壳体裂缝迅速释放。这些高速喷出的气体和蒸气携带大量热量, 形成热射流。热射流具有高速、高温和携带可燃物质的特点, 可以迅速传播火源, 引发邻近电池或材料的燃烧, 甚至可能引发锂离子电池热失控爆炸多米诺连锁反应, 从而对电池系统的安全性构成严重威胁, 增加整个电池系统的安全风险。

在航空器飞行过程中, 航空动力锂离子电池的热失控燃爆可能导致严重的飞行事故, 危及飞机上的乘客和机组人员的生命安全, 甚至造成机毁人亡的灾难性事件。因此, 了解和研究锂离子电池热失控燃爆行为的发生和发展规律对于提升航空动力锂离子电池的安全水平至关重要, 进而满足适航法规对电动航空器安全性目标的要求。因此, 为剖析锂离子电池热失控燃爆行为的发生发展规律, 本文中将对热失控冲击压力和热射流特性分别展开论述。

1.2 锂离子电池热失控冲击压力

航空器的质量和重心分布是飞行安全的重要考量因素, 动力锂离子电池的设计必须兼顾高能量密

度和轻量化要求, 因此, 为确保在有限的空间内满足飞行器的性能需求, 动力锂离子电池装机条件通常为电池舱受限空间。一旦航空动力锂离子电池发生热失控, 由于受限空间内无法迅速隔离电池并控制火势, 燃爆可能会导致爆炸或火灾, 对飞行器和乘员造成严重威胁。因为飞机难以立即着陆并展开应急处置, 在航空器飞行过程中发生热失控事件的后果可能会更加严重。锂离子电池热失控会引起火灾、爆炸和气体排放, 排放出的气体不仅有毒性、易燃性等特点, 其喷射过程还会带来明显的冲击行为, 冲击波将对电池舱体造成冲击风险。借鉴针对能量密度相对较高的三元体系锂离子电池在密闭空间中的热失控冲击特性相关研究, 可深入了解在航空器受限空间内锂离子电池热失控冲击危险性。在冲击压力测试方面, Chen 等^[13] 利用如图 3 所示的

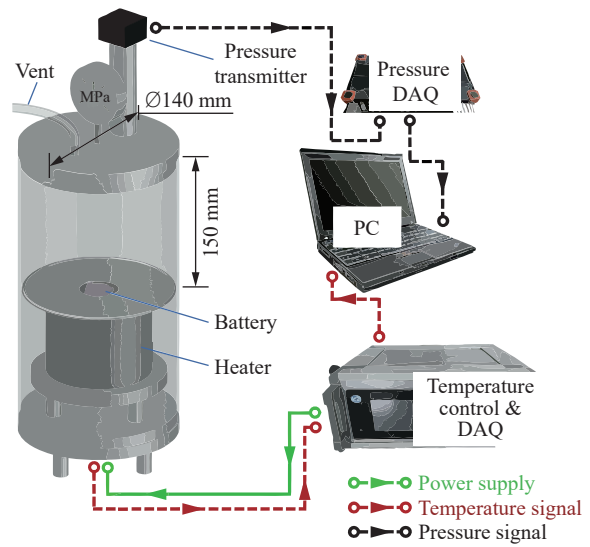


图 3 冲击压力测试装置^[13]
Fig. 3 Impact pressure test device^[13]

自制半封闭空间装置对电池在不同充电状态和外部加热功率条件下进行了冲击压力测试, 分析了安全阀开启的压力和持续时间, 并记录了从安全阀开启至热失控强烈喷射阶段之间的间隔时间。分析图 4 中压力变化的初始升压温度 (temperature of initial pressure-rise, T_{IPR}) 和峰值压力温度 (temperature of maximum pressure, T_{MP}) 可得出: 初始压力上升温度和最大压力温度随着电池 SOC 的升高而下降, 较高的 SOC 会导致初始压力上升, 并在相对较低的温度下更容易达到最大压力。从图 5 所示的锂离子电池热失控冲击压力变化率 (dp/dt) 曲线可以看出, 热失控并不是一次性喷出所有火焰和气体, 过压的释放是一个剧烈的振荡过程, 这种情况在锂离子电池 SOC 较高的情况下尤其显著。此外, Chen 等^[13] 推测在半封闭空间内, 当电池靠近人的胸部时, 单个 18650 型能量密度为 248 Wh/kg 的锂离子电池热失控可能导致的事死亡率接近 10%, 航空动力锂电池的能量密度更高时, 危险性也相应提高。

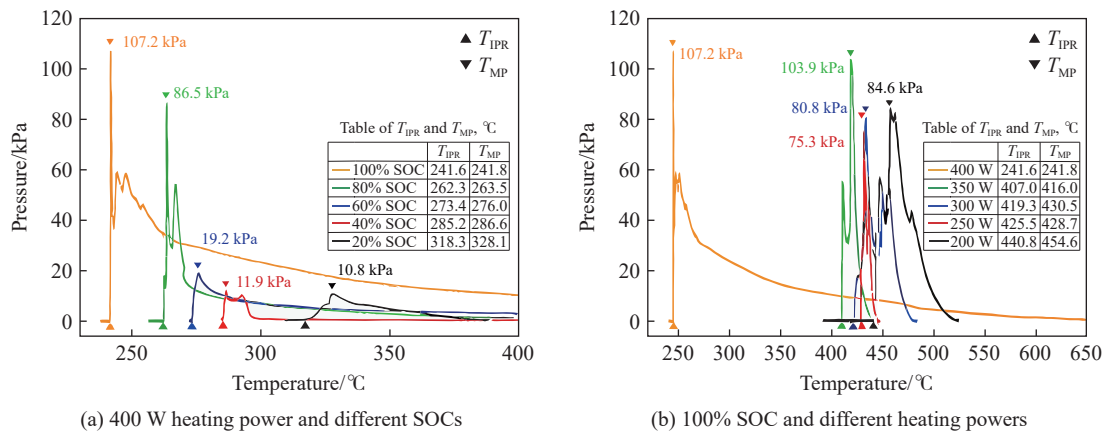


图 4 强烈喷射阶段内冲击压力随温度的变化^[13]
Fig. 4 Impact pressure versus the temperature in the intense ejection stage^[13]

在锂离子电池系统多节电池热失控过程中, 冲击压力是影响火焰传播及热量传播的重要因素, 目前在这一领域的研究相对较少。Chen 等^[14] 使用加热棒替代了封装包中心位置的电池, 以过热的方式触发整个封装包内所有电池热失控, 并在封装包的右侧和后侧设置压力传感器以记录热失控喷射火焰的冲击压力变化规律, 具体实验设置如表 1 所示。

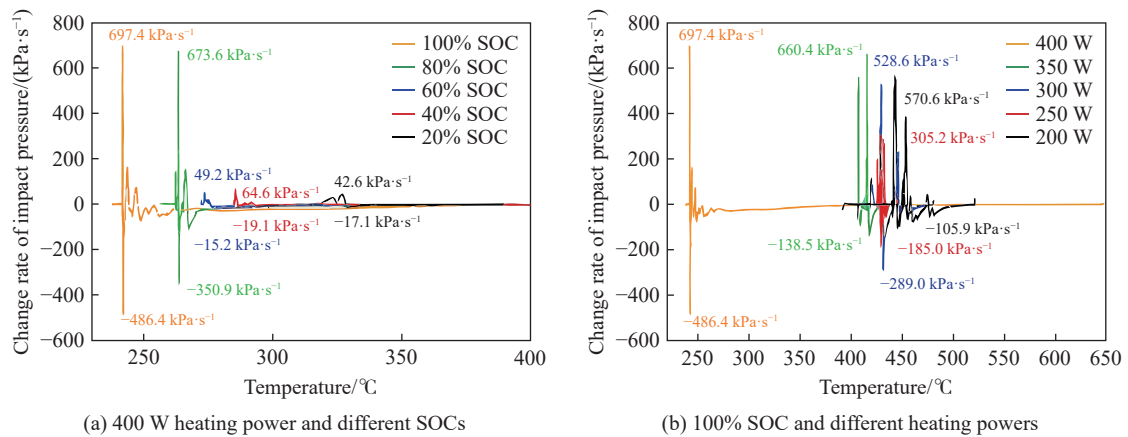


图 5 强烈喷射阶段内冲击压力变化率随温度的变化曲线^[13]

Fig. 5 Change rate of impact pressure versus the temperature in the intense ejection stage^[13]

表 1 冲击压力测试设置^[14]

Table 1 Impact pressure test settings^[14]

测试编号	电池封装结构	电池数量	压力传感器位置
A	6×6	35节电池 +1个加热棒	传感器1(右侧): 水平方向距中心30 cm, 垂直方向距电池封装包上端7.5 cm(R-30); 传感器2(右侧): 水平方向距中心40 cm, 垂直方向距电池封装包上端10 cm(R-40); 传感器3(背面): 与传感器1相同(B-30)
B	10×10	99节电池 +1个加热棒	传感器1(右侧): 水平方向距中心40 cm, 垂直方向距电池盒上端10 cm(R-40) 传感器2(背面): 水平方向距中心50 cm, 垂直方向距电池盒上端12.5 cm(R-50)

在多次锂离子电池热失控实验中,可以明显测量到强烈的冲击压力,并且 B-30 和 R-30 在相同距离处的两个压力值不同,气体冲击压力变化规律如图 6 所示(1 psi=6 894.757 Pa),发生这一现象的主要原因应与热失控火弹射的方向性有关,热失控火弹射方向是不确定的,面向弹射方向的压力传感器可以承受较高的冲击压力。此类研究可用于优化电池在电动航空器的装机设计,避免热失控对关键结构和系统的影响。同时,也为后续航空动力锂离子电池的相关研究提供了研究方向,针对受限空间内航空动力锂离子电池的特殊安全性问题,通过在实验室或模拟飞行环境中对电池的热失控行为、安全控制措施的效果等进行测试,可以获取更具有针对性的数据和实验结果用以设计提升航空动力锂离子电池的安全性。

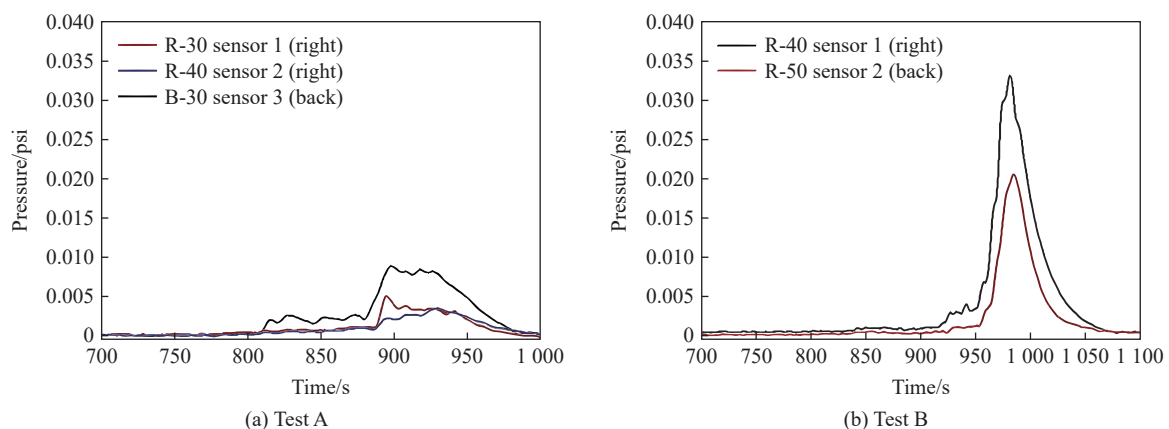


图 6 热失控气体不同方位冲击压力随时间的变化^[14]

Fig. 6 Variation of impact pressure with time of different orientations of thermal runaway gas^[14]

1.3 锂离子电池热失控射流特性

锂离子电池热失控过程中随着温度的逐步升高,内部会发生一系列化学反应,释放出大量的热与气体,当电池内部压力超过电池可承受最大压力时,气体将会从电池内部喷出产生射流。研究射流行为有助于充分了解在热失控情况下电池内部的气体释放过程,用于锂离子电池的装机热防护系统的设计,例如航空锂离子电池的热管理系统。通过分析射流的特性,可以确定喷射过程中压力、温度和速度的变化,从而有效预测并采取相应措施应对潜在的安全风险。在航空器等装机要求严苛的环境下,正确设计热管理系统可以有效减轻热失控事件带来的影响。

在电池内部压力的驱动下,热失控的喷射过程涉及电池以快速的速度从减压阀口喷射出多相高温流。Zou 等^[15]通过对 100%SOC 的 38 Ah $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ /石墨方形锂离子电池的一侧加热以触发热失控,用喷流表现、温度和速度表征了热失控射流的行为,总结出 4 个阶段(如图 7 所示):第 1 阶段,减压阀被迫发出一种独特的声音,喷射的主要成分可能是气液相中的电解质,这个阶段只持续了数秒;第 2 阶段或过渡阶段,此阶段热失控射流具有介于第 1 阶段和第 2 阶段之间的射流特征,白色和灰色射流间歇性出现,这个阶段的射流同样只持续了很短的时间;第 3 阶段看似稳定,但可能出现射流倾斜、火花爆裂、射流火等特殊现象;第 4 阶段可能包括初始动量较低的羽流。

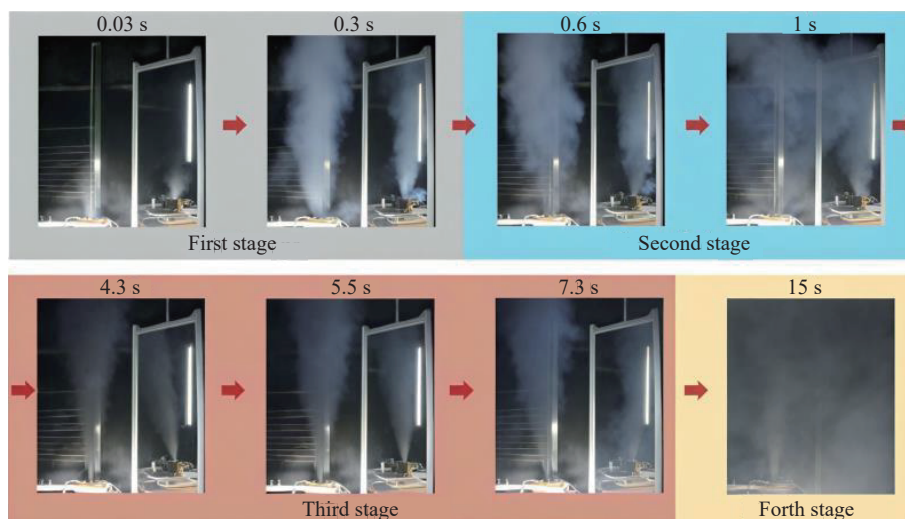


图 7 锂离子电池热失控典型射流行为^[15]

Fig. 7 Typical ejection behaviors of lithium-ion battery thermal runaway^[15]

Mao 等^[16]建立了 18650 型锂离子电池射流特性和火焰动力学的集总模型,并通过实验进行了验证,发现锂离子电池热失控的射流非常复杂,整个过程由一个具有源项的瞬态过程(反应同时产生气体)组成,并且气体生成速率影响锂离子电池的内压,内压影响喷嘴处的流动状态。随着射流的衰减,出口气流由阻塞流过渡到亚音速流,射流火焰由动量流过渡到浮力流,当锂离子电池陷入热失控时,气体产生速率急剧升高至 2.724 g/s,孔口处的峰值气体速度为 162.0 m/s。该研究解释了锂离子电池火灾动态行为,填补了热失控期间气体产生速率和射流速度的知识空白。

锂离子电池热失控所产生的射流火焰与其他可燃物燃烧的火焰不同,热失控火焰除了具有热量、喷射火焰等特征外,内部还包含气体、蒸气和颗粒的高温混合物(jet fire and high-temperature mixture, JFHM)。Chen 等^[17]以不同的充电状态(SOC)或加热功率加热 18650 电池,使其发生热失控,并通过高速红外摄像机捕捉到火焰弹射过程,以半定量的方式得到了 JFHM 的演化过程,如图 8 所示, JFHM 的垂直喷射呈现明显的 V 形,而水平喷射从正面来看更分散,得到了 JFHM 垂直火焰长度和水平火焰长度等参数,提出了一种半定量分析方法来评价喷射的高温范围。

航空器锂离子电池系统的安装环境具备典型的受限空间特征,为研究锂离子电池在受限空间内的

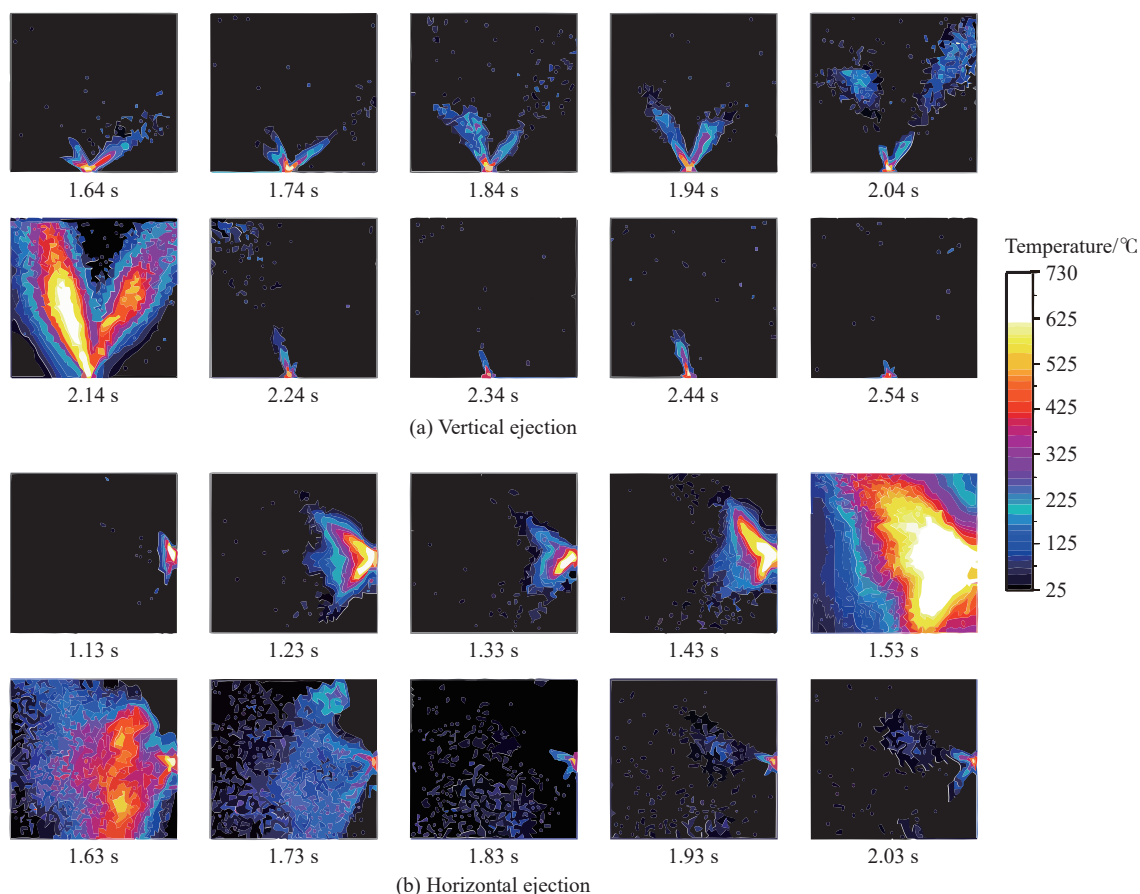
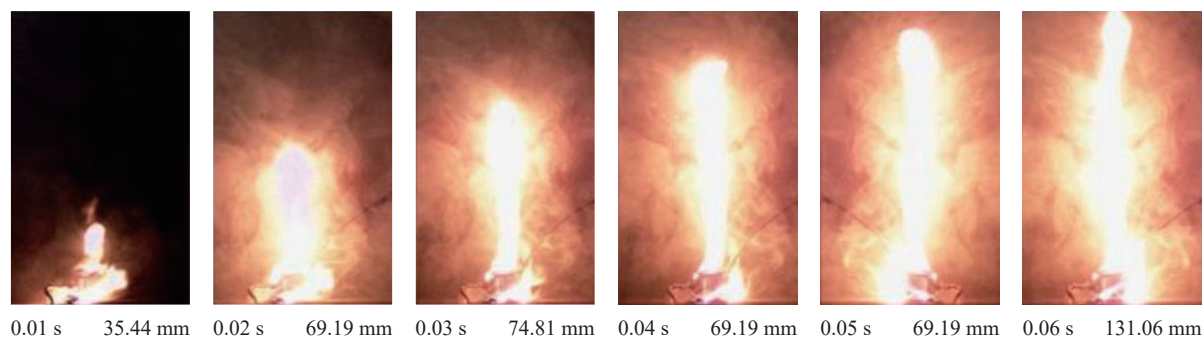
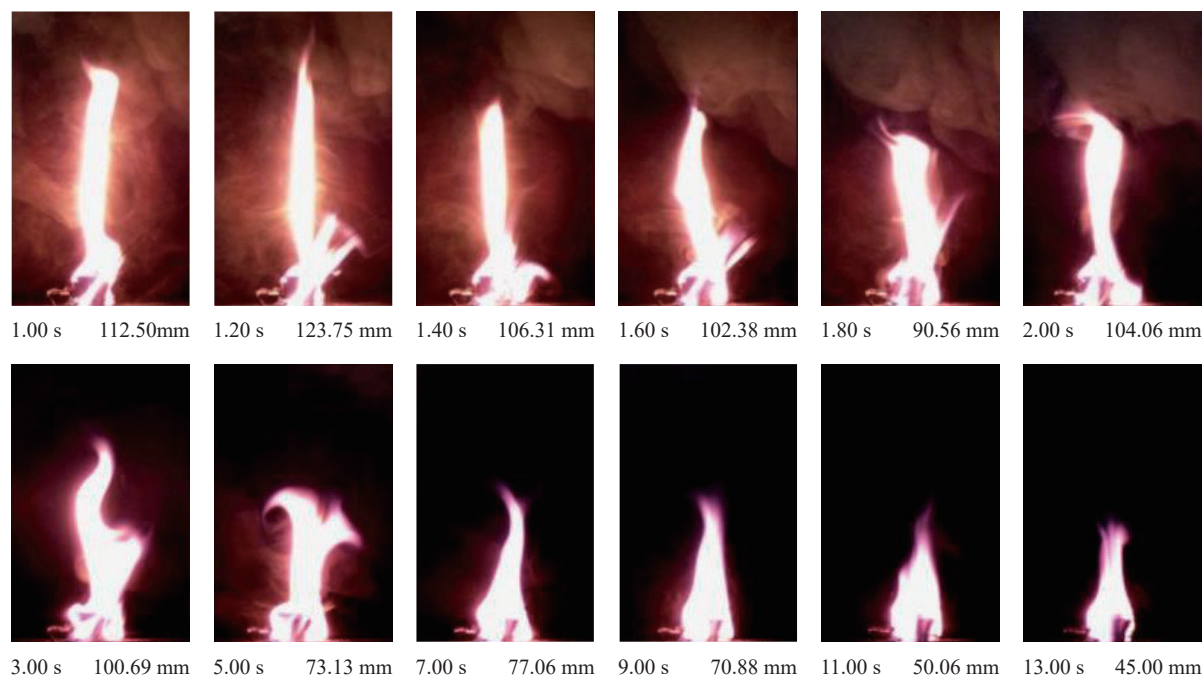


图 8 400 W 热功率下 100% SOC 锂离子电池热失控过程红外图像^[17]
 Fig. 8 Infrared images of thermal runaway process of 100% SOC LIB at 400 W heating power^[17]

热失控气体燃烧情况,张青松等^[18]使用高速摄像机记录不同外部加热功率下锂离子电池热失控过程气体燃烧的热射流火焰高度,如图 9 所示。该研究建立了受限空间内锂离子电池热解气体燃烧的产热模型,并基于火焰高度估算热失控气体燃烧热释放速率使用 Fluent 软件模拟受限空间内热解气体燃烧导致环境温度变化并进行实验验证,发现锂离子电池热失控时气体燃烧会产生稳定火焰,火焰持续燃烧约 16 s,当外部热源加热功率升高时,热解气体燃烧火焰高度峰值与热释放速率峰值都随之升高。受限空间内锂离子电池热失控气体燃烧产热模型得到模拟结果与实验测量所得数据基本吻合,表明了模型的可靠性。锂离子电池热失控时气体燃烧产生的稳定火焰特性的相关研究,有助于针对航空动力锂电池制定更合理的安全措施和设计更有效的热防护系统,以应对潜在的热失控危险。同时,在设计电池系统时,可以考虑该研究结果中提到的外部热源对热解气体燃烧火焰高度和热释放速率的影响,进一步优化系统结构和安全措施。



图 9 锂离子电池热失控射流火焰的发展过程及火焰高度^[18]Fig. 9 Development process and flame height of thermal runaway ejecta flame of lithium-ion battery^[18]

2 锂离子电池热失控气体爆炸极限

2.1 爆炸极限测定方法

锂离子电池热失控释放气体爆炸是一个非常严重的风险因素,在航空器锂离子电池舱受限空间内气体燃爆威力更为巨大,极易引发周围电池发生大规模的二次燃爆。在当前典型锂离子电池爆炸危险性分析中,爆炸极限、层流火焰温度和最大爆炸超压是用于评价整体危险性的关键指标。其中,爆炸极限是评价可燃气体可燃性和爆炸性的重要参数之一,可用于确定锂离子电池在运输、使用和储存过程中不被爆炸性气体伤害的阈值。层流火焰温度和最大爆炸超压是表征热失控气体爆炸时刻的危险参数。测定热失控气体的爆炸特性对航空器锂离子电池的安全性管理和电动航空器的安全运行具有重要意义。通过爆炸极限的测定可以评估和理解在不同条件下气体爆炸可能发生的情况,有助于识别潜在的风险因素和爆炸特性参数,为制定有效的安全措施和风险管控策略提供依据,为航空器锂离子电池舱的安全设计提供重要参考。在电动航空器设计初期,测定结果可确定航空锂电池的爆炸危险级别,为电池舱的结构设计、安全隔离措施和防护系统等安全防护等级的设立提供依据,确保电池系统在工作 and 异常情况下的安全性。目前,存在多种在气体爆炸领域中关于爆炸极限的测定装置、点火装置和判定依据^[19],如表 2 所示。

早期热失控未大面积传播时,会在电池包、电池舱或局部机舱内部通过燃烧、释放气体营造出高温高压环境,高温高压条件下可燃性气体或蒸汽的爆炸极限测定包括测定装置、点火方式和判定依据较常温常压下完全不同。因此,有必要进一步研究高温高压条件下爆炸极限的测定装置、测定方法,尤其是爆炸现象的判定依据仍不清晰。

表 2 可燃气体爆炸极限测试方法^[19]Table 2 Test methods for explosion limit of flammable gases^[19]

国别	标准体系	应用范围	测定装置	点火装置	判定标准
中国	GB/T12474—2008 ^[20]	常压下空气中爆炸极限	管式装置: 硬质玻璃反应管, 管内径 60 mm±5 mm, 管长 1400 mm±50 mm, 壁厚≥2 mm	电火花引燃, 放电电极距离底部≥100 mm, 间距为 3~4 mm	目测火焰: 火焰非常迅速传播至管顶; 一定的速度缓慢传播

表 2 (续)
Table 2 (Continued)

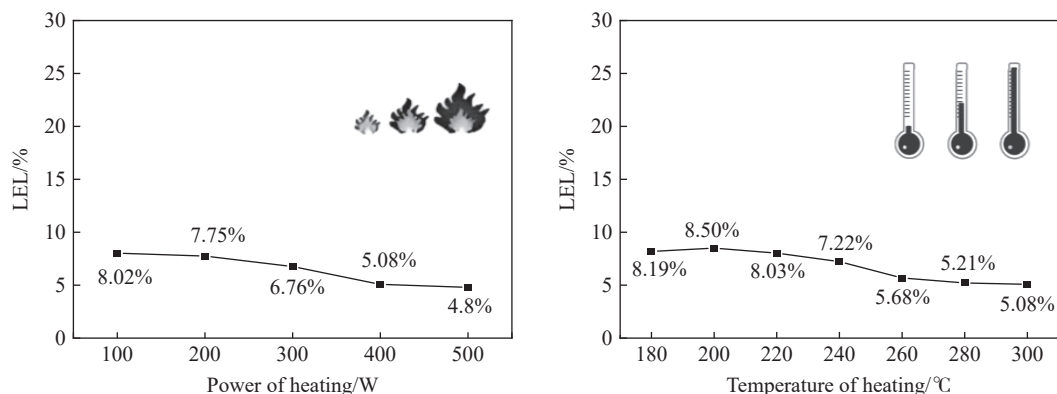
国别	标准体系	应用范围	测定装置	点火装置	判定标准
中国	GB/T 21844—2008 ^[21]	常温至150 ℃和常压下易燃 性浓度极限, 燃烧上限 UFL及下限浓度LFL	5 L/12 L长颈玻璃瓶	中心点火: 10 mm长熔丝; 或 电火花电极间隙6~10 mm; 或高压电弧6 mm间距, 30 mA等; 化学点火引燃	目测观察火焰传播: 到达瓶壁 或至少离器壁13 mm运动沿瓶 壁传播≥90°
		空气中可燃范围/爆炸范围: 可燃上限、可燃下限	厚玻璃圆筒, 内径≥50 mm, 高 度≥300 mm	火花发生器, 电极间距 5 mm, 10 J/次	目测火焰是否通过反应管传 播, 火焰分离并传播, 传播至 少10 cm为易燃。氢气可采用 温度测量探针
美国	ASTM E 681 ^[23]	常压高温(室温至150 ℃)	球式装置: 5 L球形玻璃容器, 内径 222 mm	中心电火花引燃, 15 kV, 持 续0.4 s, 约4 J	目测不低于0.2 m
	ASTM E 918 ^[24]	高温高压(室温至200 ℃, 初 始压力不大于1.38 MPa)	金属容器, 容积V≥1L, 内径D≥ 76 mm	115 V电熔丝	初始压力提升量不低于7%
欧盟	EN 1839 ^[25]	常压, 室温至200 ℃	管式装置: 柱形玻璃管, 长度L≥ 300 mm, 内径D80±2 mm; 球形装置: 球形或圆柱形体积V≥ 5 L, 长径比1~1.5	管式: 高压电火花引燃, 持续 0.2 s, 约2 J球形: 10~20 J熔 丝, 间距5 mm, 截面2.5~ 7 mm ²	管式测定: 目测火焰传播0.1 m 球式测定: 初始压力提升5%
			prEN 17624 ^[26]	高温高压(室温至400 ℃, 常 压至10.0 MPa)	球形装置, 1 L, 3 L, 5 L和10 L

2.2 爆炸极限理论计算方法

目前, 在热失控气体爆炸极限理论计算方面, 大量学者进行了广泛的研究。褚英杰等^[27]首先选用改进的 Le-Chatelier 方程等理论模型对常温、常压下混合气体的爆炸极限进行了估算, 再采用 Zabetakis 方程对不同的初始气压、温度进行了修正, 来研究气压、温度的变化对混合可燃气体的爆炸极限的影响, 最后通过实际实验进行了验证。研究表明, 采用 Le-Chatelier 方程等理论计算模型对爆炸下限 (lower explosion limit, LEL) 的计算结果具有较高的准确度, 这些理论计算模型适用于压力试验环境下混合可燃气体爆炸极限的估算与分析。

Baird 等^[28]在评估锂离子电池热解气体爆炸极限的计算方法时, 对 Le-Chatelier 定律和临界绝热火焰温度法 (critical adiabatic flame temperature, CAFT) 进行了比较分析。他们指出, Le-Chatelier 定律在评估电池热失控气体的爆炸极限时可能存在一定的误差, 因为这种方法是针对碳氢化合物的爆炸极限计算而设计, 而电池热失控产生的气体中不仅包含碳氢化合物, 还有氢气、一氧化碳以及惰性气体如二氧化碳等。另一方面, CAFT 方法是一种确定空气-可燃气体-稀释剂混合气体爆炸下限的另一种方法。在 CAFT 方法的标准应用中, 烃类混合物的临界温度被设定为 1573 K。然而, 这个温度对于含氢的混合气体来说并不适用, 因此 CAFT 方法在计算热失控气体的爆炸极限时也存在局限性。

相关学者在修正和应用 Le-Chatelier 定律的替代方法上进行了一定的探索。Bounaceur 等^[29]针对 CAFT 法进行了改进, 通过对每种可燃气体的绝热温度加权求和来表征混合气体的绝热临界温度。基于 Bounaceur 方法所求得的结果优于未经改进的 Le-Chatelier 法和 CAFT 法。Chen 等^[30]采用气相色谱质谱联用仪探究了加热功率和加热温度对 LiNi_xMn_yCo_zO₂ 锂离子电池热失控气体组分的影响, 并依据探测到的气体组分应用改进后的 Le-Chatelier 公式进行了爆炸极限的理论计算, 同时采用实验对爆炸下限的计算结果进行误差检验, 误差均小于 5%。如图 10 所示, 锂离子电池热失控气体的爆炸极限会随加热功率和加热最高温度的升高而逐渐降低, 使得热失控气体的爆炸危险性升高。

图 10 热失控气体爆炸极限与加热功率和加热温度的关系^[30]Fig. 10 Thermal runaway gas explosion limit with heating power and temperature change relationship^[30]

张伟等^[31]引入航空应用场景中的低气压环境开展了热失控气体爆炸极限研究。他们通过收集不同气压及 SOC 状态下锂离子电池的热失控气体并进行组分分析, 分析结果如表 3 所示, 并依据气体组分含量应用改进后的 Le-Chatelier 方法计算了热失控气体爆炸极限。在 30 kPa 环境压力下, 25% SOC 和 100% SOC 的锂离子电池热失控气体的爆炸极限范围分别为 6.58%~24.38% 和 8.01%~53.35%。在 101 kPa 环境压力下, 25% SOC 和 100% SOC 的锂离子电池热失控气体的爆炸极限范围分别为 6.08%~22.58% 和 8.89%~46.81%。由此可以看出, 随着 SOC 的升高, 电池的热失控反应变得更加剧烈, 释放的易燃气体更多, 爆炸极限范围也随之变宽。当锂离子电池热失控发生所处环境的压力越低, 由于周围空气中氧气含量不足, 锂离子电池热失控释放的易燃气体燃烧消耗量相对较少, 易燃气体和惰性气体在空气中所占的比例相对增大, 从而导致热失控气体的爆炸极限范围也随压力的降低而变宽。综上所述, 锂离子电池热失控气体的潜在爆炸危险性随 SOC 的增大而上升, 并且随环境压力的降低而上升。

Zhang 等^[32]在锂离子电池热失控气体爆炸极限的研究中发现, 在爆炸上限 (upper explosion limit, UEL) 的计算过程中, 由于爆炸上限处可燃物的反应不完全, Le-Chatelier 在此过程中并不能较好地适配。但从热力学的角度来看, 空气气氛下可燃气体的爆炸极限本质上是反应热产生与系统散热之间的能量平衡极限, 可燃气体释放的能量以耗氧量计, 在数值上等于可燃气体和空气在系统中损失的总热量, 该原理适用于爆炸上限处的反应极限状态, 因此引入氧消耗法计算爆炸上限。氧消耗法的原理是无论反应过程如何, 单位质量的氧气被消耗的同时, 放出的热量都是大致恒定的, 这一原理不仅可用于大多数基于氧气的强氧化还原反应, 对爆炸上限处的反应极限状态也同样适用。根据热失控气体爆炸极限的理论计算结果, 可发现锂离子电池热失控气体的爆炸上限随电池 SOC 的提高呈现先降后升的变化趋势, 这与不同 SOC 电池热失控产生的 CO 和可燃烃类含量差异有关: SOC 低时由于反应较充分, 产生的热解气体主要组分为 CO₂, CO 和可燃烃类占比较少; 而当电池处于较高 SOC 水平时, 由于热失控剧烈而导致反应不完全, 产生的 CO 较多而 CO₂ 较少, 同时也因为负极更多的活泼锂离子经过还原和亲核反应与电解液产生更多的不饱和烃而使得热失控气体的爆炸极限范围进一步扩大。

2.3 爆炸极限的原位测定方法

热失控气体中含有大量的高沸点组分, 如碳酸二甲酯 (dimethyl carbonate, DMC) 和碳酸甲乙酯 (ethyl

表 3 不同实验条件下 CO₂、CO 和 H₂ 的生成体积^[31]Table 3 production volume of CO₂, CO and H₂ under different experimental conditions^[31]

环境压力/kPa	SOC/%	气体生成体积/L		
		CO ₂	CO	H ₂
30	25	0.07	0	0.04
	100	0.58	1.03	0.72
101	25	0	0.18	0.14
	100	1.26	1.51	0.93

methyl carbonate, EMC), 其沸点分别为 90 和 107 °C, 这些组分在收集过程中的冷凝效应会对爆炸极限的计算结果产生较大偏差。为了保证爆炸极限的原位测定和气体成分分析的准确性, Zhang 等^[33] 搭建了原位爆炸极限测定平台, 如图 11 所示, 基于二分法原理对热失控气体的爆炸极限进行了原位测定。为保证锂离子电池热失控气体的原位性, 避免热失控气体与氧气反应, 在实验开始前使用氮气对装置内进行洗气, 并在装置外部覆盖加热胶带, 通过温控仪进行恒温控制温度恒定为 110 °C, 防止热失控气体中高沸点成分凝结。该研究对不同 SOC 的商用 NCM 811 电池热失控释放气体的爆炸特性进行了检测, 共经过了 96 次重复实验, 确保测定结果的误差小于 0.5%, 研究表明, 锂离子电池热失控气体的爆炸下限随电池 SOC 的提高先升后降, 爆炸上限随 SOC 的提高呈近似线性提高, 爆炸极限范围随 SOC 的提高而变宽。

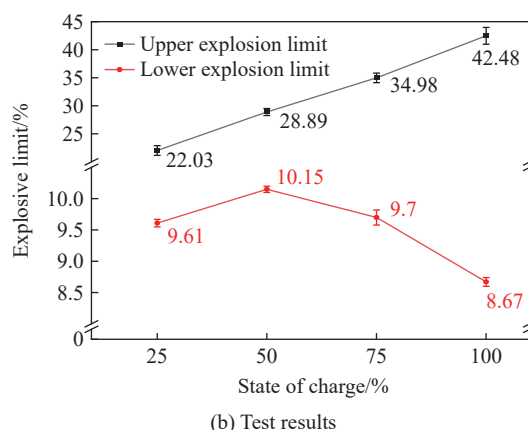
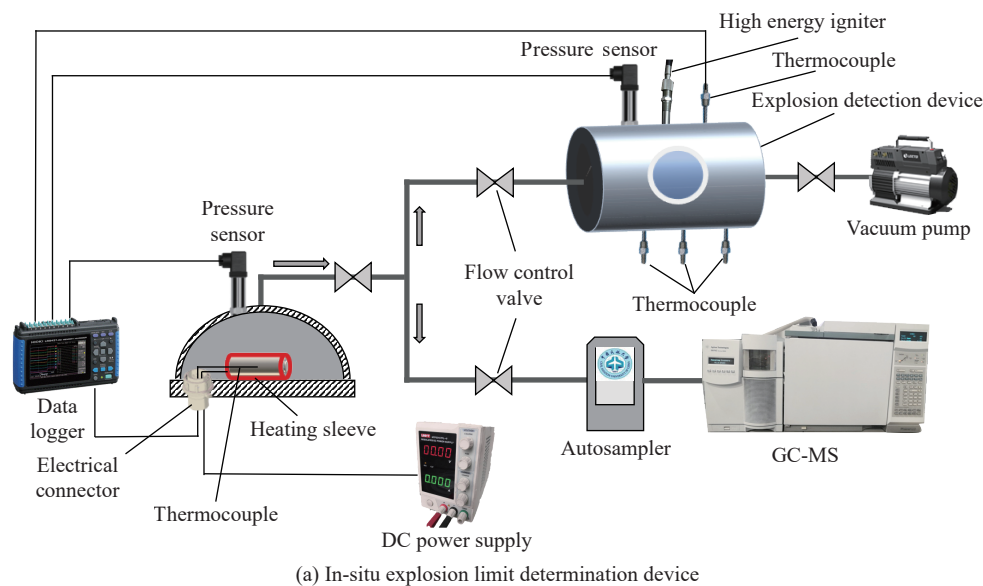


图 11 爆炸极限原位测定装置及测试结果^[33]

Fig. 11 In-situ explosion limit determination device and test results^[33]

考虑到锂离子电池在电动航空器的真实应用场景, 张青松等^[32] 搭建了锂离子电池爆炸极限测试平台, 采用气相色谱-质谱联用仪监测不同气压下电池释放气体的组分及比例, 针对高空低气压环境下的锂离子电池热失控气体进行了研究。选用 100% SOC 的 18650 型电池在 30、70 和 101 kPa 的不同环境压力下开展了实验, 发现随着环境压力的降低, 热失控气体的爆炸极限范围也随之变宽。同时 CO₂ 含量减少, 而不饱和烃 C₄H₈、C₄H₆ 和 C₅H₁₀ 等气体含量增加, 而这也正是低压环境下爆炸风险更大的原因。气相质谱色谱仪技术虽然在气体检测精度方面具有一定的优势, 但其分析时间长且不具备原位性。因此, 张青松等^[34] 采用气体拉曼光谱与气相质谱色谱仪联用技术, 探究了航空低气压下不同 SOC 对锂离子电

池热失控气体爆炸极限的影响。研究表明,压力和 SOC 越高,锂离子电池热失控生成的气体越多,气体的毒性越大;压力越低, SOC 越高,电池热解气体的爆炸极限越宽,气体潜在的爆炸危险性更高。此外,气体拉曼光谱技术和气相质谱色谱仪的互补性在分析电池热解气体方面具有较强优势,特别是针对航空锂离子电池热失控早期预警特征的气体 CO、CO₂、PF₃ 和 C₂H₄ 及电解液(C₃H₆O₂、C₃H₆O₃、C₄H₈O₂)的分析。

目前针对航空锂离子电池特殊工况下的爆炸特性的研究仍不完善,在后续的研究中,可深入研究航空锂离子电池爆炸的动力学和热力学特性,探讨爆炸释放气体的组成、温度和速度等对爆炸过程的影响。结合实验数据和数值模拟结果,建立更精确的爆炸模型,为爆炸特性的预测和管理提供更可靠的依据。此外,还应对航空锂离子电池系统的安全防护技术开展研究,提高电池系统在爆炸情况下的包容性和安全性。在未来应进一步研究航空锂离子电池爆炸的预防和应对技术,包括新型材料的应用和热管理系统的设计等,不断优化电池系统的安全性设计和热防控技术,提高航空锂离子电池系统在热失控危险情况下的耐受性和应对能力,从而降低发生热失控气体二次爆炸的风险。

3 锂离子电池热失控气体爆炸危险性后果评估

3.1 热失控气体爆炸风险评定

锂离子电池热的失控产气若得不到有效释放,当存在点火源或高温物体时,热失控气体燃烧释放的热量可能会导致相邻电池的发热和失效,从而导致大规模的电池失效发展成为剧烈的爆炸行为。有害气体爆炸后果的量化评定结果是航空器系统安全设计的重要输入。目前,针对锂离子电池的危险性后果评估的研究偏少。Zhang 等^[35]通过外部加热使不同 SOC 锂离子电池在 N₂ 环境下发生热失控,并提出了使用基于气体爆炸指数的锂离子电池喷发指数定量分析气体爆炸危险性。Wang 等^[36]根据电池过充电行为和热失控特性,提出了一种安全评估评分系统来评估电池的安全性,使用热失控发生时间、最大温差(maximum temperature difference, MTD)超过 10 °C 的时间、热失控最高温度和热失控最大温升速率四个参数评估锂离子电池热失控危险性。Kim 等^[37]主要使用锥形量热仪测量锂离子电池热失控火灾风险评估相关的燃烧热释放速率,并提出了一个考虑热释放速率峰值和时间等的综合参数来评估火灾和爆炸危险程度。Shan 等^[38]通过研究锂离子电池热失控温度和爆炸带来的冲击波超压,采用风险矩阵方法评估了锂离子电池热失控的风险,其中使用压力代表后果程度,温度代表发生概率。Somandepalli 等^[39]利用 20 L 燃烧室对爆炸范围和爆炸严重度进行了实验测定,测定得到锂离子电池比甲烷具有更大的爆炸极限范围,利用化学点火器点燃燃烧室内与空气配比的气体,得到热失控释放气体的爆炸上下限,热失控气体的可燃下限约为 6.3%。Baird 等^[28]使用开源化学动力学建模工具(Cantera)估算锂离子电池的爆炸下限、层状火焰速度和最大过压,量化了锂离子电池的爆炸危险性。Li 等^[40]对 NCA(LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂)和 LFP 锂离子电池进行了外部加热,使其热失控,研究电池热失控释放气体的燃烧爆炸特性,包括燃烧上下限、可燃性危险指数和防火安全阈值等,其中可燃性危险指数用可燃上下限的差值与下限之比表示。此外, Li 等^[41]还基于 Somandepalli 等^[39]、Essl 等^[42]、Golubkov^[43-44]、Lammer 等^[45]和 Zhang 等^[46]在惰性气氛中进行的 29 次热失控测试,定量报告了 4 种主流电池的热失控气体火灾三角形对应的 3 个火灾边界,研究发现点火温度随点火源类型的不同而变化很大。因此,控制 SOC 和/或选择合理的电池类型可以改变热失控燃爆所需热失控气体与氧气的混合气体浓度,有望有效降低锂离子电池在实际工作应用中起火的概率。

张青松等^[47]针对锂离子电池热失控气体爆炸危险性的评估提出了热失控气体爆炸敏感性的概念。首先,基于锂离子电池热失控气体的爆炸极限、升压速率等特征,得到爆炸危险度和爆炸严重度等因子作为爆炸敏感性的特征参数,并用爆炸风险定量表征了锂离子电池热失控气体的危险程度,发现高 SOC 电池热失控释放的气体更容易爆炸,易造成二次燃爆危害的发生,且爆炸发生后高 SOC 电池在爆炸上下限附近爆炸的严重度比低 SOC 电池更大;在爆炸极限范围中间浓度节点时,高 SOC 电池的爆炸

严重度比低 SOC 更大; 在爆炸上下限附近时, SOC 越高热失控产气的爆炸风险越大; 在爆炸极限中间节点时, 高 SOC 电池的爆炸风险明显高于低 SOC 电池的爆炸风险, 且对于同一 SOC 电池, 爆炸极限范围中间浓度节点的爆炸风险明显高于其他浓度节点, 具有更大的危险性。

通过对锂离子电池热失控气体的爆炸后果进行评估, 可以确定在特定条件下电池发生爆炸的可能性和严重程度, 以指导电动航空器电池制造商改进电池设计, 选择更安全的电池材料, 提高电池的热稳定性和机械强度, 从而降低热失控和爆炸的风险。在电动航空器设计初期, 锂离子电池爆炸危险量化后果评估参数可用于电池安装位置、散热系统、隔离措施等航空动力锂电池系统的安全性设计。此外, 锂离子电池热失控和爆炸特性评估可为未来电动航空器的锂离子电池安全防控技术提供研究思路, 如开发新型电池管理系统(battery management system, BMS)监测航空锂电池系统工作过程中的温度、气体浓度等, 以实现更有效地监控和控制电池状态。

3.2 老化锂离子电池热失控气体的爆炸危险性

持续适航安全性是航空器全寿命周期运行的重要属性。随着飞行器起降次数的累积, 锂离子电池循环老化不可避免。聚焦老化后锂离子电池热失控后的产气爆炸危险性并探索两者关联, 可为持续适航维护保障措施提供指引。杨娟等^[48]将计算机断层扫描(computed tomography, CT)无损检测与原位检测热失控气体爆炸危险性相结合, 针对不同循环充电次数的老化锂离子电池开展了研究, 使用 CT 无损检测技术对老化电池内部结构进行扫描(图 12), 发现在电池循环圈数超过 80 圈后, 电池层状结构发生明显形变。

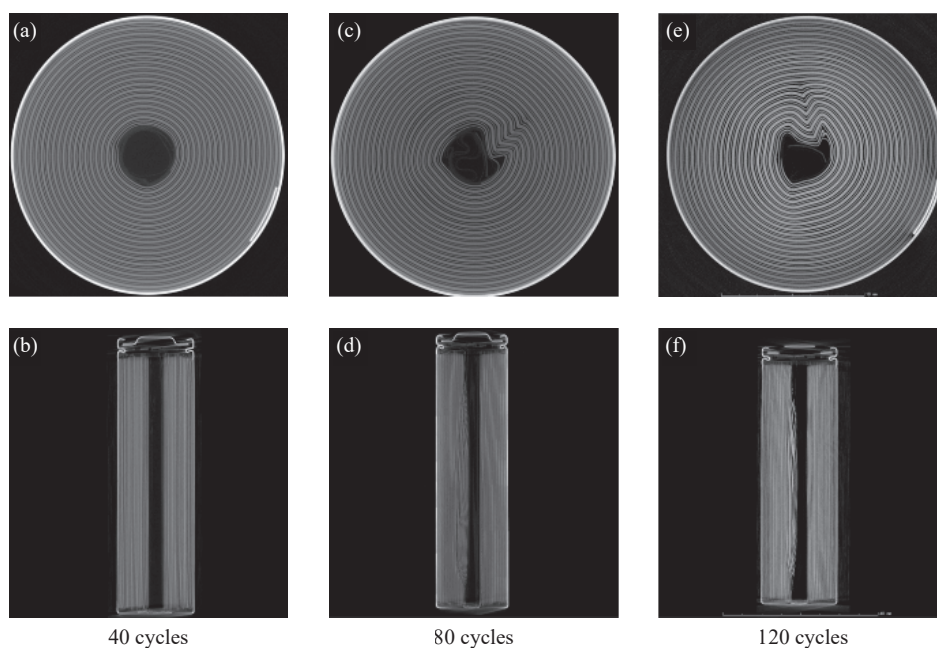


图 12 不同老化程度电池 CT 扫描图^[48]

Fig. 12 CT scans of batteries with different degrees of ageing^[48]

由图 13 可知, 老化 40 圈后电池热失控气体的爆炸下限上升, 火焰温度和爆炸压力也开始回升, 即热失控气体的爆炸危险性回升。老化锂离子电池在各种滥用工况下发生热失控的可能性随着循环积累而提高。随着老化程度的加重, 热失控气体爆炸下限表现出上升的趋势, 爆炸上限基本保持不变, 爆炸范围总体呈现收敛的趋势。根据锂电池 CT 扫描图象与热失控气体爆炸极限测定结果可得知, 电池内部结构形变程度越严重, 电池内部反应越不充分, 电解液蒸汽等其他可燃物质未参与反应便逸出电池, 因此在 40 圈循环老化之后, 随着老化程度的加重, 热失控气体爆炸危险性回升。

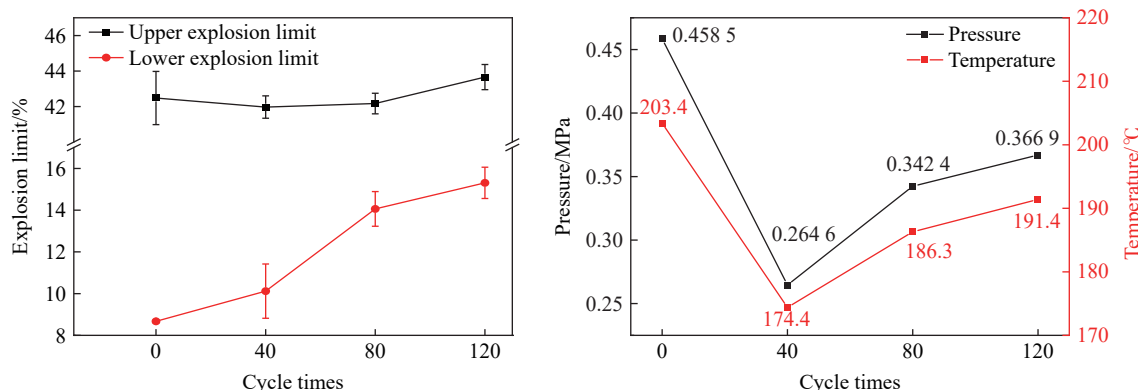


图 13 老化锂离子电池热失控气体爆炸极限、爆炸压力和温度随循环圈数的变化^[48]

Fig. 13 Variation of thermal runaway gas explosion limits, explosion pressure and temperature of aging lithium-ion batteries with cycle times^[48]

老化锂离子电池爆炸危险性的研究可为航空器的持续适航维护提供了科学依据,特别是在评估和预测电池老化对飞行安全的影响方面,通过了解电池老化后热失控气体的爆炸特性,可以制定更有效的电池维护和更换策略,以减少飞行中的安全风险。研究结果有助于改进电池设计,提高电池的安全性和可靠性,从而延长电动航空器的使用寿命。对于航空器的适航认证和安全监管而言,研究成果可提供重要的危险程度等技术参数,有助于制定更完善的适航要求。

4 结论与展望

由于航空器运行环境的特殊性,锂离子电池热失控及爆炸将会引发灾难性后果,从全球电动航空的发展近况来看,航空锂离子电池安全问题较大程度上限制了电动航空器的适航取证和大规模应用。本文综述了电池热失控期间发生爆炸的机理及其后果,围绕锂离子电池热失控爆炸冲击、热失控气体燃爆热射流、热失控气体爆炸极限测定以及气体燃爆危险性评估的国内外研究现状进行了分析。

(1) 在电池热失控爆炸冲击方面,国内外已开展了大量的实验研究,基本阐明了锂离子电池热失控失效机理,并对热失控燃烧爆炸行为及冲击发展过程进行了一定的探索。但现有研究主要集中在对单节电池燃爆冲击行为的研究,对触发机制的机理性分析较少,并且缺乏与实际应用场景结合的多节电池热失控燃爆分析。随着航空动力锂离子电池系统的广泛应用及其安全性问题的凸显,研究工作可结合实验与仿真的手段对热失控爆炸冲击行为与多节电池热失控传播的影响规律进一步开展。

(2) 在锂离子电池热失控气体燃爆行为方面,国内外已对不同类型的锂离子电池开展了广泛的研究,总结了锂离子电池热失控热射流形成机制及发生发展过程,揭示了热失控产气产热过程与射流火焰行为,一定程度上完善了锂离子电池热失控火灾动力学。

(3) 在锂离子电池热失控气体爆炸极限方面,国内外标准虽然关于可燃气体爆炸极限的测定已经具备了成熟的测定方法,但还未有针对锂离子电池热失控气体的标准流程。相关学者已在理论计算的公式改进与原位测定方面进行了大量的探索,对锂离子电池热失控气体燃爆危险性有了初步的了解。然而,锂离子电池热失控所释放气体的危险性研究多关注于电池本身如 SOC、材质等各指标变量,在实际使用场景下,过充、循环老化、工作环境温度、振动等对电池的影响仍需进一步深入研究。

(4) 锂离子电池热失控气体爆炸敏感性概念的提出,可系统阐述爆炸发生的可能性,但目前该研究工作缺乏对气体爆炸起始条件的关注,应扩充对可燃性危险指数和防火安全阈值等安全性指标的研究,形成一套安全性评估体系来评估锂离子电池的安全状态。

研究锂离子电池热失控和燃爆行为,量化评估锂离子电池热失控爆炸冲击的危险性,不仅可用于优化锂离子电池自身设计,且有助于有针对性地研发预警、抑制和灭火等防护措施;研究成果还可以为适

航标准的制定提供科学依据, 确保电池产业的规范发展; 这一研究方向的深入探索对于新兴能源技术在电动航空领域的安全应用和可持续发展起到关键作用, 为可持续能源航空提供有力支持。

参考文献:

- [1] 黄俊, 杨凤田. 新能源电动飞机发展与挑战 [J]. *航空学报*, 2016, 37(1): 57–68. DOI: 10.7527/S1000-6893.2015.0274.
HUANG J, YANG F T. Development and challenges of electric aircraft with new energies [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(1): 57–68. DOI: 10.7527/S1000-6893.2015.0274.
- [2] XU J J, CAI X Y, CAI S M, et al. High-energy lithium-ion batteries: recent progress and a promising future in applications [J]. *Energy & Environmental Materials*, 2023, 6(5): e12450. DOI: 10.1002/eem2.12450.
- [3] FENG X N, REN D S, HE X M, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries [J]. *Joule*, 2020, 4(4): 743–770. DOI: 10.1016/j.joule.2020.02.010.
- [4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电动汽车用动力蓄电池安全要求: GB 38031-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Electric vehicles traction battery safety requirements: GB 38031-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [5] FENG X N, OUYANG M G, LIU X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review [J]. *Energy Storage Materials*, 2018, 10: 246–267. DOI: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
- [6] 杨娟, 胡佳宁, 佟佳成, 等. 航空锂电池热失控高温喷射冲击实验研究 [J]. *航空学报*, 2025, 46(14): 430965. DOI: 10.7527/S1000-6893.2024.3096.
YANG J, HU J N, TONG J C, et al. Experimental study on high-temperature jet impact induced by thermal runaway in aviation lithium-ion batteries [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(14): 430965. DOI: 10.7527/S1000-6893.2024.3096.
- [7] ZHAO W Y, GUO Z X, MA Z C, et al. Coupled effect of low temperature and electrolyte immersion on the tensile properties of separators in lithium-ion batteries [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(35): 41783–41792. DOI: 10.1021/acsami.3c05450.
- [8] GUO Z X, YANG S G, ZHAO W Y, et al. Overdischarge-induced evolution of Cu dendrites and degradation of mechanical properties in lithium-ion batteries [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 78: 497–506. DOI: 10.1016/j.jechem.2022.12.013.
- [9] PING P, WANG Q S, HUANG P F, et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 285: 80–89. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.03.035.
- [10] PING P, KONG D P, ZHANG J Q, et al. Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy Li-ion cells by over-heating [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 398: 55–66. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.044.
- [11] 张青松, 郭超超, 秦帅星. 锂离子电池燃爆特征及空运安全性研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(2): 50–55. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2016.02.009.
ZHANG Q S, GUO C C, QIN S X. Study on lithium-ion batteries explosive characteristics and aviation transportation safety [J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(2): 50–55. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2016.02.009.
- [12] YANG J, LIU W, ZHAO H, et al. Experimental investigation of lithium-ion batteries thermal runaway propagation consequences under different triggering modes [J]. *Aerospace*, 2024, 11(6): 438. DOI: 10.3390/aerospace11060438.
- [13] CHEN S C, WANG Z R, YAN W, et al. Investigation of impact pressure during thermal runaway of lithium ion battery in a semi-closed space [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115429. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115429.
- [14] CHEN M Y, OUYANG D X, LIU J H, et al. Investigation on thermal and fire propagation behaviors of multiple lithium-ion batteries within the package [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113750. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113750.
- [15] ZOU K Y, CHEN X, DING Z W, et al. Jet behavior of prismatic lithium-ion batteries during thermal runaway [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115745. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115745.
- [16] MAO B B, ZHAO C P, CHEN H D, et al. Experimental and modeling analysis of jet flow and fire dynamics of 18650-type lithium-ion battery [J]. *Applied Energy*, 2021, 281: 116054. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116054.
- [17] CHEN S C, WANG Z R, LIU J H. A semi-quantitative analysis of infrared characteristics of thermal runaway ejection

- behaviour of lithium-ion battery [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 71: 108166. DOI: 10.1016/j.est.2023.108166.
- [18] 张青松, 翟祺悦, 赵子恒. 受限空间锂离子电池热解气体燃烧释能研究 [J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(12): 1711–1714. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2021.12.002.
- ZHANG Q S, ZHAI Q Y, ZHAO Z H. Study of energy release from pyrolysis gas combustion of Li-ion battery in confined space [J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(12): 1711–1714. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2021.12.002.
- [19] 任常兴, 蒋乐章, 王玥, 等. 高温高压条件下可燃气体爆炸极限测定标准对比研究 [J]. *标准科学*, 2023(2): 73–77, 100. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2023.02.012.
- REN C X, JIANG Y Z, WANG Y, et al. Comparative study on determination standards for the explosion limits of the combustible gas at high temperature and pressure [J]. *Standard Science*, 2023(2): 73–77, 100. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2023.02.012.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 空气中可燃气体爆炸极限测定方法: GB/T 12474-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Method of test for explosion limits of combustible gases in air: GB/T 12474-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 化合物 (蒸气和气体) 易燃性浓度限值的标准试验方法: GB/T 21844-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases): GB/T 21844-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 化学品危险性分类试验方法 气体和气体混合物燃烧潜力和氧化能力: GB/T 27862-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Testing method for classification of chemical hazards: fire potential and oxidizing ability of gases and gas mixtures: GB/T 27862-2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [23] ASTM International. Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases): ASTM E681-2009 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- [24] CEN. Determination of explosion limits of gases and vapours: EN 1839 [S]. Brussels: CEN, 2012.
- [25] ASTM International. Standard practice for determining limits of flammability of chemicals at elevated temperature and pressure: ASTM E918-83 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2011.
- [26] CEN. Determination of explosion limits of gases and vapours at elevated pressures, elevated temperatures or with oxidizers other than air: prEN 17624 [S]. Brussels: CEN, 2021.
- [27] 褚英杰, 李旭朝, 陈自强, 等. 安全壳压力试验中多元混合可燃性气体的爆炸极限研究 [J]. *核科学与工程*, 2023, 43(1): 151–158. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2023.01.023.
- CHU Y J, LI X C, CHEN Z Q, et al. The study of the flammability limits of the multicomponent gas in the containment pressure test [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2023, 43(1): 151–158. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2023.01.023.
- [28] BAIRD A R, ARCHIBALD E J, MARR K C, et al. Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 446: 227257. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227257.
- [29] BOUNACEUR R, GLAUDE P A, SIRJEAN B, et al. Prediction of flammability limits of gas mixtures containing inert gases under variable temperature and pressure conditions [C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte: ASME, 2017. DOI: 10.1115/GT2017-64172.
- [30] CHEN S C, WANG Z R, WANG J H, et al. Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 63: 103992. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103992.
- [31] 张伟, 郝朝龙, 刘添添, 等. 航空压力环境对锂离子电池热解气体爆炸极限影响 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(11): 155–162. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.11.022.
- ZHANG W, HAO C L, LIU T T, et al. Influence of aviation pressure environment on explosion limit of pyrolysis gas from lithium-ion batteries [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(11): 155–162. DOI: 10.11731/j.issn.1673-

- 193x.2022.11.022.
- [32] 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. DOI: 10.1016/j.est.2021.103759.
- [33] ZHANG Q S, NIU J H, YANG J, et al. In-situ explosion limit analysis and hazards research of vent gas from lithium-ion battery thermal runaway [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56: 106146. DOI: 10.1016/j.est.2022.106146.
- [34] 张青松, 包防卫, 牛江昊. 环境压力对锂电池热失控产气及爆炸风险的影响 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(7): 2263–2270. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0192.
- ZHANG Q S, BAO F W, NIU J H. Risk analysis method of thermal runaway gas explosion in lithium-ion batteries [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(7): 2263–2270. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0192.
- [35] ZHANG Y J, WANG H W, LI W F, et al. Quantitative analysis of eruption process of abused prismatic Ni-rich automotive batteries based on in-chamber pressure [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 31: 101617. DOI: 10.1016/j.est.2020.101617.
- [36] WANG Z P, YUAN J, ZHU X Q, et al. Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials: a comparison study [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 55: 484–498. DOI: 10.1016/j.jechem.2020.07.028.
- [37] KIM S W, PARK S G, LEE E J. Assessment of the explosion risk during lithium-ion battery fires [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 80: 104851. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104851.
- [38] SHAN T X, WANG Z P, ZHU X Q, et al. Explosion behavior investigation and safety assessment of large-format lithium-ion pouch cells [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 72: 241–257. DOI: 10.1016/j.jechem.2022.04.018.
- [39] SOMANDEPALLI V, MARR K, HORN Q. Quantification of combustion hazards of thermal runaway failures in lithium-ion batteries [J]. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2014, 3(1): 98–104. DOI: 10.4271/2014-01-1857.
- [40] LI W F, WANG H W, ZHANG Y J, et al. Flammability characteristics of the battery vent gas: a case of NCA and LFP lithium-ion batteries during external heating abuse [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 24: 100775. DOI: 10.1016/j.est.2019.100775.
- [41] LI W F, RAO S, XIAO Y, et al. Fire boundaries of lithium-ion cell eruption gases caused by thermal runaway [J]. *iScience*, 2021, 24(5): 102401. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102401.
- [42] ESSL C, GOLUBKOV A W, GASSER E, et al. Comprehensive Hazard Analysis of Failing Automotive Lithium-Ion Batteries in Overtemperature Experiments [J]. *Batteries*, 2020, 6: 30. DOI: 10.3390/batteries6020030.
- [43] GOLUBKOV A W, FUCHS D, WAGNER J, et al. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. [J] *RSC Advance*. 2014, 4: 3633–3642. DOI: 10.1039/c3ra45748f.
- [44] GOLUBKOV A W, SCHEIKL S, PLANTEU R, et al. Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes – impact of state of charge and overcharge. [J] *RSC Advances*. 2015, 5: 57171–57186. DOI: 10.1039/c5ra05897j.
- [45] LAMMER M, KÖNIGSEDER A, HACKER V. Holistic methodology for characterisation of the thermally induced failure of commercially available 18650 lithium ion cells. [J] *RSC Advances*. 2017, 7: 24425–24429. DOI: 10.1039/c7ra02635h.
- [46] ZHANG Y, WANG H, LI W, et al. Size distribution and elemental composition of vent particles from abused prismatic Ni-rich automotive lithium-ion batteries. [J] *Journal of Energy Storage*. 2019, 26: 100991. DOI: 10.1016/j.est.2019.100991.
- [47] 张青松, 包防卫, 牛江昊. 三元锂电池热失控产气爆炸风险评估研究 [J/OL]. *电源学报*, 2023-12-20 [2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20231219.1347.012.html>.
- ZHANG Q S, BAO F W, NIU J H. Study on risk assessment of thermal runaway gas explosion of ternary lithium battery [J/OL]. *Journal of Power Supply*, 2023-12-20[2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20231219.1347.012.html>.
- [48] 杨娟, 牛江昊, 张青松. 循环老化锂离子电池热失控气体原位爆炸极限实验分析 [J]. *航空学报*, 2023, 44(23): 428529. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.28529.
- YANG J, NIU J H, ZHANG Q S. *In-situ* explosion limit of thermal runaway gas explosion in cyclic aging lithium-ion batteries: experimental analysis [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(23): 428529. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.28529.

(责任编辑 张凌云)