

中文引用格式:杨娟,梁雪,包防卫,等. 航空锂电池热失控气体爆炸风险评估试验研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(2):93-101.

英文引用格式:YANG Juan, LIANG Xue, BAO Fangwei, et al. Experimental study on explosion risk assessment of thermal runaway gas from aviation lithium batteries[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 93-101.

航空锂电池热失控气体爆炸风险评估试验研究^{*}

杨娟^{1,2}副教授,梁雪³,包防卫⁴,张青松^{**2,3}教授

(1 中国民航大学 工程技术训练中心,天津 300300;2 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;3 中国民航大学 安全科学与工程学院,天津 300300;4 德州市德城区交通运输局,山东 德州 253000)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0183

资助项目:国家重点研发计划项目(2025YFF1502100);中央高校基本科研业务费自然科学基金重点项目(3122024058);深圳市科技计划项目(KJZD20240903100707011)。

【摘要】 为提升航空锂电池的适航性评估的准确性,评估航空锂电池热失控气体爆炸包容性测试中丙烷混合气体的等效替代可行性;基于适航标准要求,通过试验对比分析标准体积分数丙烷与不同荷电状态(SOC)锂电池热失控原位气体的爆炸特性;采用三元锂电池,构建专用试验平台,系统测量不同SOC下热失控气体的爆炸温度、最大爆炸超压及升压速率。结果表明:锂电池热失控气体爆炸极限范围随SOC升高而显著扩宽,最大爆炸超压为0.519 8 MPa,爆炸威力指数为1.093 9;丙烷在标准体积分数范围(3.85%~4.25%)内最大爆炸超压达0.822 5 MPa,爆炸威力指数为1.501 7,其爆炸潜力高于多数SOC工况下的热失控气体。直接采用标准丙烷体积分数进行爆炸包容性验证可能导致过度试验,造成安全裕度偏高。丙烷可作为初步评估介质,但在等效替代方面需结合电池实际SOC状态优化测试体积分数。

【关键词】 航空锂电池; 热失控气体; 爆炸风险; 丙烷混合气体; 适航性评估; 等效替代

Experimental study on explosion risk assessment of thermal runaway gas from aviation lithium batteries

YANG Juan^{1,2}, LIANG Xue³, BAO Fangwei⁴, ZHANG Qingsong^{2,3}

(1 Engineering Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2 Tianjin Key Laboratory of Urban Air Traffic System Technology and Equipment, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 3 College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
4 Dezhou Decheng District Bureau of Transportation, Dezhou, Shandong 253000, China)

Abstract: To improve the accuracy of airworthiness assessment for aviation lithium batteries, this paper evaluated the feasibility of equivalent substitution of propane mixed gas in the explosion containment test of thermal runaway gases of aviation lithium batteries. Based on airworthiness standards, the explosion characteristics of standard volume fraction propane and in-situ thermal runaway gases from lithium batteries

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0093-09; 收稿日期:2025-09-18; 修稿日期:2025-12-13

** 通信作者:张青松(1977—),男,河北晋州人,博士,教授,主要从事民航危险品运输安全与锂电池火灾方面的研究。E-mail: nkzqsong@126.com。

at different states of charge (SOC) were experimentally compared and analyzed. Ternary lithium batteries were employed, and a dedicated experimental platform was constructed to systematically measure the explosion temperature, maximum explosion overpressure, and pressure rise rate of the thermal runaway gases under different SOC. The results indicate that the explosion limit range of the lithium battery thermal runaway gases significantly widens with increasing SOC, with a maximum explosion overpressure of 0.519 8 MPa and an explosion power index of 1.093 9. For propane within the standard volume fraction range (3.85% to 4.25%), the maximum explosion overpressure reached 0.822 5 MPa, with an explosion power index of 1.501 7, its explosion potential being higher than that of thermal runaway gases under most SOC conditions. Directly adopting the standard propane concentration for explosion containment verification may lead to over-testing, resulting in an excessively high safety margin. Propane can serve as a preliminary assessment medium, but for equivalent substitution, the test concentration needs to be optimized in combination with the actual SOC state.

Keywords: aviation lithium battery; thermal runaway gas; explosion risk; propane mixed gas; airworthiness assessment; equivalent substitution

0 引言

当前,电动航空的发展受电池性能与安全性制约^[1-3]。航空锂电池在滥用条件下易发生热失控,且已导致大量航空事故^[4-5]。美国航空联邦管理局(Federal Aviation Administration,FAA)的研究报告显示,2006年3月3日—2024年10月3日,共有575起涉及锂电池的航空相关事件^[6]。为保证航空安全,国内外民航局对航空锂电池安全提出了明确适航要求。中国民用航空规章《正常类飞机适航规定》(CCAR-23-R4)规定,对于电池或电动力系统运行中可能的着火或过热情况,应当具备隔离和降低其对飞机危害的措施。FAA《锂电池专用条件》(25-359-SC)要求,锂电池系统在运行期间因故障而释放的爆炸性或有毒气体,不会在飞机内累积到危险的数量。《可充电锂电池和电池系统的最低运行性能标准》(RTCA DO-311A)要求,锂电池系统发生故障并在存在火源的情况下释放可燃气体时,电池一旦发生爆炸可被系统包容,确保“无碎片释放,无火焰逸出”。

试验方法可有效评估锂电池系统爆炸的包容性,且参考《机载设备环境条件和试验程序》(RTCA/DO-160G),可使用点燃丙烷-空气的混合气体(3.85%~4.25%丙烷)模拟航空爆炸环境,验证机载设备的抗燃爆能力。然而,航空锂电池在热失控下会释放大量高温可燃气体,其危险特性与标准丙烷混合气体存在显著差异。因此,有必要比较丙烷-空气混合气体与锂电池热失控原位气体的爆炸特性,评估丙烷作为等效替代介质的适用性,进而

制定合理的适航性评估方法以提升爆炸包容性测试的可靠性。

近年来,国内外学者围绕丙烷及其混合气体的爆炸行为开展了广泛研究,ZHANG Changshuai等^[7]研究了狭窄空间内的火焰传播与压力特性。DEWEY等^[8]研究了不同化学计量比条件下的爆炸波特征。LIU Yi^[9]、QIAO Zhenglong^[10]和 LIU Shizheng^[11]等分别研究了混合燃料的爆炸压力特征、阻塞结构对爆炸传播的影响,以及爆燃向爆轰的转变过程等。与此同时,关于锂电池热失控气体的研究主要集中于热失控机制、危险性评估和气体成分分析,WANG Zhirong等^[12]建立多因素风险模型;ZHANG Qingsong等^[13]测试了电池热失控的爆炸极限与威力;PENG Rongqi^[14]和赵春朋^[15]等分别采用系统模拟和试验验证手段评估爆炸危险性;张青松等^[16]利用原位检测和光谱分析等技术快速表征热失控气体组成及危险性。

综上,上述研究涵盖了丙烷混合气体和锂电池原位气体的爆炸特性,分析了不同条件下的爆炸行为、压力变化、气体成分及其对环境的影响。这些研究为理解气体燃爆特性提供了试验数据和理论模型,但尚未形成统一的评估体系。鉴于此,笔者拟提出一种结合爆炸极限和威力指数的混合气体爆炸风险评估模型,搭建专用测试平台,对不同比例的丙烷混合气体和不同荷电状态(State of Charge,SOC)的锂电池热失控气体进行精确的定量评估,以期适航性评估中的安全设计及验证审定提供关键数据支持。

1 热失控气体爆炸风险评估模型

风险指某一特定危险事件发生的可能性和后果的结合。风险的评估通常涉及对事故发生的可能性 L 和事故后果的严重性 S 的评估^[17]。在评估航空锂电池热失控气体爆炸风险时,需要同时考虑爆炸可能性及严重性。该模型适用于评估丙烷作为热失控气体的等效替代方案,提供定量依据。

张青松^[18]和 WANG Tao^[19]等在探讨气体爆炸特性的研究中指出,在特定体积分数范围内,可燃性气体与空气的混合物在火源作用下将引发燃烧或爆炸。爆炸极限范围越宽,气体混合物发生爆炸的概率越高。据此,利用爆炸极限量评估气体混合物发生爆炸的可能性 L ,计算公式如下:

$$L = \frac{(U_E \times U_L)^{\frac{1}{2}} - U_L}{(U_E \times U_L)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式中: U_E 为爆炸上限,%; U_L 为爆炸下限,%。

爆炸威力指数 K 用于量化可燃气体或粉尘与空气形成的混合物在封闭容器内发生爆炸时的破坏能量^[20]。其由最大爆炸超压 $P_{\max}$ 与平均升压速度 v 的乘积得出,用于评价爆炸的潜在破坏性。因此, S 计算公式如下:

$$S = K = P_{\max} \times v \quad (2)$$

最大爆炸超压指爆炸过程中容器内出现的最高压力,直接反映爆炸的破坏强度;平均升压速度则表

示压力从初始上升至峰值的平均速率,用以表征爆炸的发展速度。

2 热失控气体爆炸风险评估试验

选用同批次的锂电池作为样品,其标称容量为 2 600 mAh,充电截止电压为 4.2 V,放电截止电压为 2.75 V,标称电压为 3.63 V,电池阳极为石墨,阴极为镍钴锰 ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$, NCM),50% SOC、70% SOC、100% SOC 的两端电压分别为 3.66、3.82 和 4.14 V。

电池采用恒流-恒压方式,在充放电测试装置上完成循环测试。为确保一致性,先以 0.2 C (520 mA) 的放电速率将电池电压降低至放电截止电压 2.75 V,再以恒压限流的方式将电池充至相应的 SOC,反复循环 3 次。充电完成后,将电池置于 25 ℃ 的恒温箱中静置 24 h,以确保电池温度均衡且状态稳定,从而降低试验过程中的潜在误差。

电池热失控触发与混合气体爆炸特性检测平台由锂电池热失控触发装置和混合气体爆炸装置 2 个部分组成,如图 1 所示。其中,锂电池热失控触发装置采用 3 L 密闭反应舱,通过加热套筒精确加热舱内的锂电池,并以 K 型热电偶实时监测温度。当电池热失控后立即关闭电源,准备进行气体爆炸特性测试。混合气体爆炸装置用于评估热失控气体和丙烷气体的爆炸特性,特别针对爆炸包容性测试。5 L 的点火舱内装有电子点火源和 4 个高度相同、位置

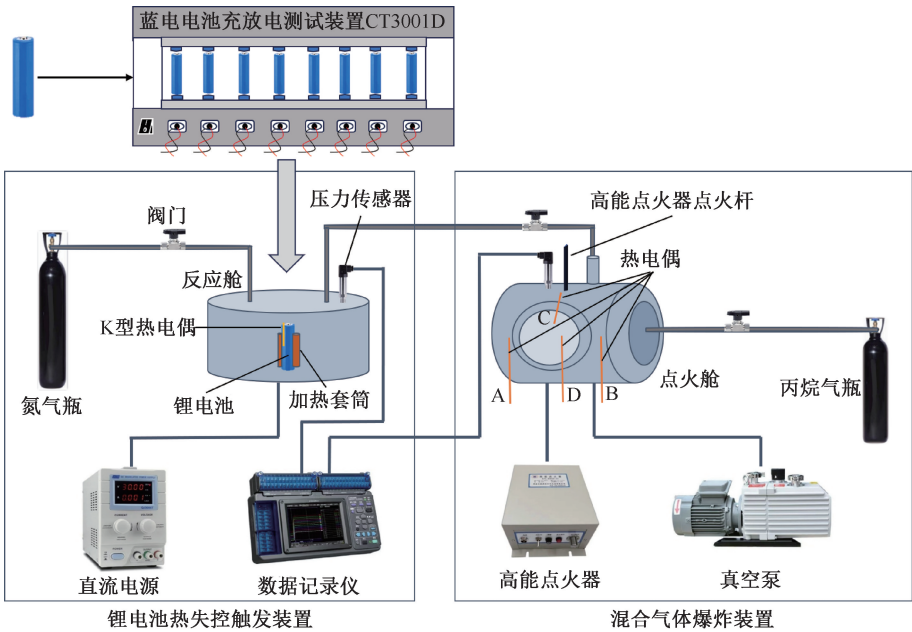


图 1 热失控触发与混合气体爆炸特性检测平台

Fig. 1 Thermal runaway trigger and mixed gas explosion characteristics test platform

不同的温度传感器,用于记录爆炸温度变化与热辐射,A、B 热电偶对称固定于舱体侧壁中心,C 热电偶位于装置后部,D 热电偶位于装置中部。反应舱与点火舱通过通气管道和阀门连接,以控制气体输送。2 舱顶部均安装压力传感器并接入数据记录仪,用于监测和记录舱内压力变化。

试验前,通过加热带加热通气管道和点火舱,防止气体冷凝,并对反应舱进行多次洗气,随后使用真空泵和 99.99%纯度的氮气建立惰性环境。在热失控触发后,根据气体量及目标体积分数计算热失控气体与空气的混合比例,并通过阀门系统控制气体流量和压力。按照先引入热失控气体或丙烷气体、后引入空气的顺序进行混合,使气体均匀。使用高能点火装置点燃混合气体,通过二分法精确调控体积分数以获得最大爆炸超压的特定体积分数。连续点火并记录压力变化,直至连续 2 次测量结果之间的差异低于 0.05%,确保数据的精确性和可靠性。

3 混合气体爆炸分析

3.1 热失控混合气体爆炸

在密闭的电池热失控反应舱中,锂电池在加热套筒作用下温度逐步升高并最终进入热失控。热失控混合气体在爆炸极限范围内遇到点火源会发生爆炸反应,在试验时,使用 4 K 高清摄像机记录点火舱内火焰变化,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,火焰由点燃、扩散到熄灭的全过程。初始点火瞬间,可燃组分与氧气迅速反应形成高温火焰。随后因混合气体中多种可燃气体的持续参与,火焰强度达到峰值。最终随着可燃气体的消耗和氧气比例的降低,燃烧趋于减弱直至熄灭。整个过程受气体成分、温度、压力以及与氧气混合比例等因素影响,其中,氧气浓度是决定燃烧能否持续的关键因素。

航空锂电池热失控是一个涉及内部短路、电解液分解、固体电解质界面层分解以及正极材料分解的复杂过程,这些过程在高温下产生大量气体,包括可燃气体如氢气、甲烷和乙烯^[21]。当这些气体与空气混合并达到爆炸极限时,在点火源的作用下迅速燃烧,释放大热量。热电偶记录的温度变化曲线反映了热失控气体燃烧过程中能量释放的动态特性,其中,温度的快速上升与热失控气体的高燃烧速率相一致。

从点燃热失控气体到温度达到最大值,热失控气体平均用时 3.4 s,舱内 4 个热电偶记录的平均升温幅度为 105.1 °C,其中,C 处热电偶记录到的最高

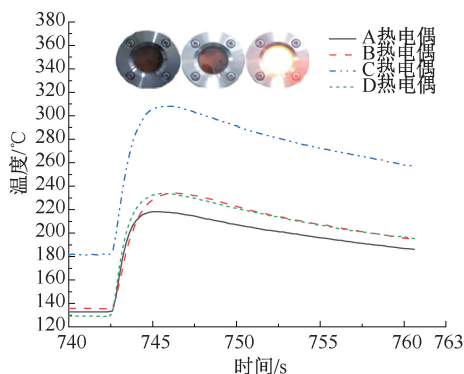


图 2 热失控混合气体爆炸温度变化

Fig. 2 Temperature change of thermal runaway mixed gas explosion

升温幅度达到 127.8 °C。测得的火焰最高温度集中在火焰的后部,这表明:在爆炸极限范围内,气体点燃的火焰并不是完整的火球,而是从点火源产生出更倾向于射流火焰的形状,从中间产生并向其四周辐射。

3.2 丙烷混合气体爆炸

依据《机载设备环境条件和试验程序》(RTCA/DO-160 G),丙烷混合气体在航空器环境条件测试中的推荐体积分数范围为 3.85%~4.25%。试验在点火舱内进行,通过精确计量的丙烷与空气混合,选取 3.90%和 4.25%这 2 个体积分数点进行试验。利用高精度热电偶在点火舱内不同位置(A、B、C、D)实时监测温度变化,同时使用 4 K 高清摄像机记录舱内火焰变化,如图 3 所示,按照时间顺序排列,展示不同工况下火焰形态的变化趋势与爆炸发生时的热效应。

从图 3a 可以看出,在 3.90%的丙烷体积分数下,点火舱内出现明亮的黄色火焰,4 个热电偶记录了不同程度的温度上升,其中,靠近点火源的 C、D 点升温更明显,4 个热电偶的平均升温为 154.7 °C,其中,C 点最高达 195.1 °C,温度峰值约在点火后 4 s 出现,表明爆炸反应相对较慢。相比之下,图 3b 中 4.25%的丙烷产生更明亮、接近白色的火焰,这意味着燃烧更为充分,4 个热电偶的平均升温增加至 173.3 °C,C 点最高达 212 °C,温度峰值提前至约 3.5 s,说明较高体积分数下爆炸反应更为迅速^[22]。

丙烷混合气体的爆炸特性受其体积分数影响显著。较高体积分数下,反应物的碰撞频率增加,燃烧速率加快,能量在短时间内快速释放,引起显著升温,同时更多自由基生成也进一步促进剧烈反应。在较低体积分数(3.90%)下,气体混合不充分导致

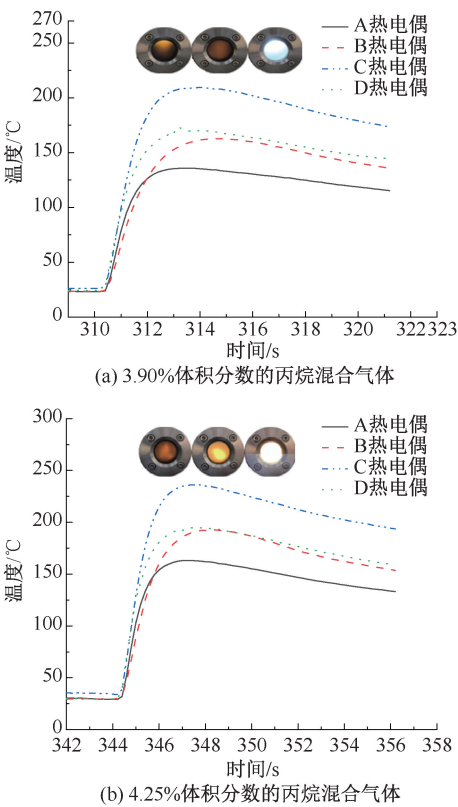


图 3 丙烷混合气体爆炸温度变化

Fig.3 Change of explosion temperature of propane gas mixture

燃烧速率和热释放速率较低;而在较高体积分数(4.25%)下,气体混合更为充分,燃烧更完全、热释放更集中,温度上升更快。这种体积分数依赖性趋势反映了丙烷混合气体的爆炸潜力及其热动力学特征。

对比航空锂电池热失控气体和丙烷混合气体的爆炸温度特性,2 种气体在爆炸反应速度和升温幅度上存在明显差异。丙烷混合气体在 4.25% 体积分数时温升最高达 212 °C (3.90% 时为 195.1 °C),爆炸潜力更强。热失控气体虽然在 3.4 s 内迅速达到温度峰值,但其最高温升仅 127.8 °C。这些结果表明:尽管热失控气体的爆炸反应速度较快,却不及高体积分数丙烷混合气体的能量释放水平。丙烷混合气体的高温升强调了在高体积分数条件下的潜在热风险,而热失控气体的快速反应速度则提示了在热失控条件下对快速响应的需求。

4 爆炸可能性分析

热失控气体与空气的混合需要在一定的比例范围内方可燃烧或爆炸。三元锂电池热失控混合气体以及丙烷混合气体的爆炸极限见表 1。

表 1 不同气体的爆炸极限

Table 1 Explosion limits of different gases			
气体种类	荷电状态	爆炸上限/%	爆炸下限/%
热失控原位气体 ^[18]	100%SOC	30.16	8.80
	70%SOC	24.26	9.10
	50%SOC	18.75	9.21
丙烷 ^[23]	—	9.50	2.20

不同 SOC 锂电池热失控气体的爆炸极限具有一定的规律性。随着 SOC 降低,其爆炸上限下降,而下限相对稳定并略有上升。同时,该类气体爆炸极限明显高于丙烷,表明在相同条件下具有更大的潜在爆炸风险。尽管其爆炸极限范围更宽,但爆炸概率还取决于气体的浓度、环境条件、点火源的能量等因素。因此,爆炸范围宽不意味着其爆炸概率一定高于丙烷。

在分析锂电池热失控气体发生爆炸的可能性时,根据不同 SOC 锂电池热失控气体爆炸上下限分别进行计算,见表 2。

表 2 不同 SOC 锂电池热失控气体的爆炸发生概率

Table 2 Explosion probability of thermal runaway gas in lithium batteries with different SOC	
荷电状态	发生爆炸的概率 <i>L</i>
100%SOC	0.459 8
70%SOC	0.387 5
50%SOC	0.299 1

由表 2 可知:*L* 随 SOC 增加也逐渐增大,表明高 SOC 电池在热失控中因能量密度更高而具有更大的爆炸风险。这种趋势表明: SOC 与热失控爆炸风险之间存在正相关关系。高 SOC 状态下释放的可燃气体浓度更高,从而更易形成爆炸性混合物。丙烷气体爆炸概率计算见表 3。

表 3 丙烷的爆炸发生概率

Table 3 Probability of propane explosion			
气体种类	爆炸上限/%	爆炸下限/%	发生爆炸的概率 <i>L</i>
丙烷	9.50	2.20	0.518 8

由表 3 可知:丙烷混合气体的爆炸发生概率 *L* (0.518 8) 高于 100% SOC 锂电池热失控混合气体的爆炸发生概率 *L* (0.459 8)。这表明在该条件下,丙烷混合气体达到爆炸条件的可能性略高于锂电池热失控混合气体。

5 爆炸严重性分析

5.1 混合气体最大爆炸超压分析

在爆炸极限范围内深入分析不同 SOC 状态下

锂电池热失控混合气体的爆炸超压特性,数据表明:随着混合气体中热失控混合气体体积分数的增加,最大爆炸超压的变化趋势呈现出明显的非线性特征,如图 4 所示,这一现象在不同 SOC 的电池中均有体现。

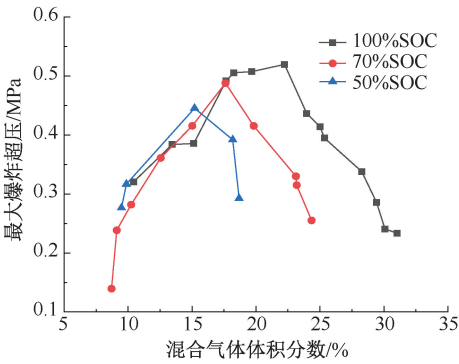


图 4 热失控原位气体最大爆炸超压曲线
Fig. 4 Maximum explosion pressure curve of thermal runaway in-situ gas

由图 4 可知:不同 SOC 电池的最大爆炸超压均随热失控混合气体体积分数先升高后下降。100% SOC 电池热失控气体体积分数在 22.23% 时达到峰值 0.519 8 MPa;70% SOC 和 50% SOC 电池分别在 17.61% 和 15.20% 时达到峰值 0.488 0 和 0.445 5 MPa。总体趋势表明:在低体积分数区,氧气供应相对充足,热失控气体的增加有助于提升燃烧反应的强度,从而增加爆炸超压^[24];体积分数过高时氧气供应不足,限制了燃烧反应的进行,进而影响了爆炸超压的进一步增加。同时,SOC 越低,峰值超压越小,说明较低 SOC 状态下可燃物与能量释放减少,从而削弱了爆炸强度。

锂电池的 SOC 直接影响电池内部化学反应的活跃程度和反应物的量。SOC 越高,电极材料分解、电解液汽化越剧烈,产生的可燃气体和反应热越多,使密闭空间中气体累积更快、温升更高。随着 SOC 的增加,热失控触发更早、气体生成速率更高。不同的 SOC 下,电池材料的分解温度和反应速率也会有所不同,影响气体的产生和压强。此外,更多反应热会进一步升高气体温度并加速膨胀,导致系统压力继续上升。

综合上述分析,锂电池的 SOC 对热失控混合气体的爆炸超压特性有显著影响。热失控气体的体积分数及最大爆炸超压关系见表 4。高 SOC 释放的能量更多,从而导致更高的爆炸超压;但当气体体积分数超过临界值、氧气不足时,爆炸压力反而会下降。

表 4 热失控气体的体积分数及最大爆炸超压

Table 4 Volume fraction and maximum explosion overpressure of thermal runaway gas

荷电状态	热失控气体体积分数/%	最大爆炸超压/MPa
100%SOC	22.23	0.519 8
70%SOC	17.61	0.488 0
50%SOC	15.20	0.445 5

对不同体积分数丙烷进行爆炸试验得到的压力曲线如图 5 所示,从图 5 可以看出,丙烷体积分数与最大爆炸超压之间的关系也是非线性的。当丙烷体积分数从 2.52% 增加至 4.25% 时,爆炸超压先缓慢上升后急剧增加。在体积分数达到 4.10% 时显著增至 0.704 3 MPa,并在 4.21% 时达到峰值 0.822 5 MPa。这种趋势与 RTCA/DO-160G 标准中推荐的丙烷混合物(3.85%~4.25%)的爆炸环境相一致。3.40% 时的轻微下降可能受温度波动或压力传感器的瞬时误差等偶然因素影响。当丙烷体积分数超过 4.21% 后,由于氧气不足导致燃烧受限,爆炸超压反而下降。

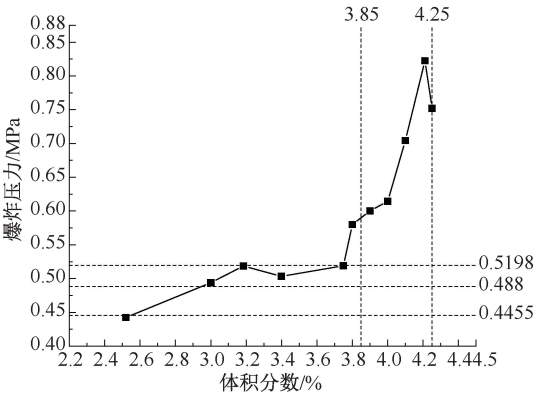


图 5 不同体积分数丙烷混合气体最大爆炸超压曲线

Fig. 5 Maximum explosion overpressure curve of propane gas mixture with different volume fractions

选取标准范围内压力最低点 3.90% 体积分数与不同 SOC 下锂电池热失控混合气体最大爆炸超压体积分数进行对比分析,试验结果如图 6 所示。

由图 6 可知:随着 SOC 的降低,锂电池热失控混合气体的最大爆炸超压也随之下降,爆炸潜力也逐渐下降。相比丙烷在约 240 s 迅速上升至峰值 0.600 3 MPa,再迅速衰减,热失控气体的爆炸压力上升更缓、峰值出现更晚,且随 SOC 不同依次出现在约 440 (100% SOC)、540 (70% SOC) 和 630 s (50% SOC),峰值分别为 0.519 8、0.488 0 和 0.445 5 MPa。另外,电池 SOC 越大,最大爆炸超压

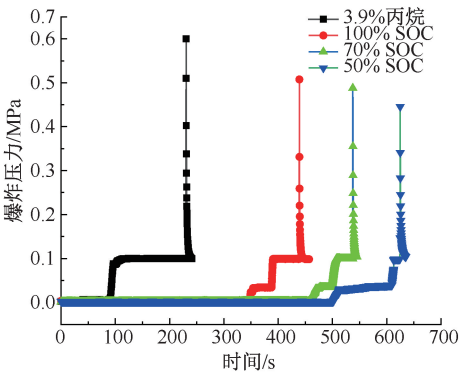


图 6 混合气体爆炸的压力曲线
Fig. 6 Pressure curve of mixed gas explosion

所需的热失控气体体积分数越大,这与其爆炸上限的趋势是相同的,主要源于高 SOC 电池累积的放热副反应更多、可燃气体产量更高,使达到峰值压力所需体积分数相应提高。

5.2 爆炸后果的严重性分析

计算分析不同 SOC 状态下锂电池热失控混合气体的爆炸平均升压速度可得到升压曲线如图 7 所示,结合不同体积分数气体最大爆炸超压曲线,可以得出,随着混合气体中热失控气体体积分数的增加,平均升压速度的变化趋势与最大爆炸超压曲线呈现出相似的非线性特征。

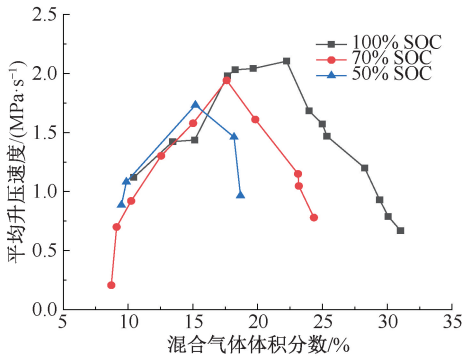


图 7 热失控原位气体平均升压速度曲线
Fig. 7 Average pressure rise velocity curve of in-situ thermal runaway gas

从最大爆炸超压的角度来看,100% SOC 电池在 22.23% 体积分数时达到了 0.519 8 MPa,其平均升压速度在此体积分数下达到最大值 2.104 5 MPa/s,说明该体积分数下燃烧最为剧烈。70% SOC 电池在 17.61% 体积分数时的最大爆炸超压和升压速度分别为 0.488 0 MPa 和 1.942 5 MPa/s。均低于 100% SOC。50% SOC 电池在 15.20% 体积分数下的峰值爆炸超压和升压速度分别下降至 0.445 5 MPa 和 1.733 5 MPa/s。整体表明: SOC 越

低,热失控混合气体的爆炸强度越弱。
综合分析可知: SOC 不仅影响热失控混合气体的最大爆炸超压,还影响爆炸反应的速率。高 SOC 下爆炸反应更为剧烈,而低 SOC 时爆炸强度和速率均有所降低。选择不同 SOC 电池在最大爆炸超压时的代表体积分数,其爆炸威力指数 K 见表 5。

表 5 不同 SOC 锂电池的爆炸威力指数
Table 5 Explosive power index of different SOC lithium batteries

荷电状态	最大爆炸超压/MPa	平均升压速度 v / (MPa · s ⁻¹)	爆炸威力指数 K
100%SOC	0.519 8	2.104 5	1.093 9
70%SOC	0.488 0	1.942 5	0.947 9
50%SOC	0.445 5	1.733 5	0.772 3

计算结果显示丙烷混合气体的平均升压速率为 2.501 5 MPa/s,爆炸威力指数 K 为 1.501 7。对比不同 SOC 锂电池热失控混合气体可见:其爆炸威力指数 K 随 SOC 升高而增加,100% SOC 时已接近丙烷,爆炸潜力较高;然而随着 SOC 降低, K 值和最大爆炸超压均显著下降,显示出较低的爆炸潜力。

6 结 论

1) 锂电池试验结果表明:随着 SOC 提高,锂电池热失控混合气体的爆炸强度和发生概率明显增加。100% SOC 的最大爆炸超压最高(0.519 8 MPa),高于 70% SOC(0.488 0 MPa)和 50% SOC(0.445 5 MPa),爆炸可能性也最大($L=0.459 8$),说明高 SOC 电池更危险。

2) 不同 SOC 的锂电池热失控气体发生爆炸时,其爆炸曲线均呈现“先升后降”的非线性变化特征。随着热失控气体体积分数增加,最大爆炸超压和上升速率先增加,在最佳体积分数处达到峰值后再下降。100% SOC 电池在 22.23% 体积分数下达到最大压力峰值(0.519 8 MPa)、升压速度为 2.104 5 MPa/s。说明爆炸压力与上升速率均受气体体积分数显著影响,并存在最优体积分数区间。

3) 对于该类型航空锂电池,在特定试验条件下,使用标准范围内的丙烷混合气体(如 4.25% 体积分数下最大爆炸超压为 0.822 5 MPa, $K=1.501 7$)进行航空机载设备可靠性检验,可以作为一种初步的评估方法。但需进一步研究不同工况、不同老化程度电池的热失控特性,以优化等效替代策略并验证其在适航性评估中的普适性。

4) 锂电池热失控气体的爆炸可能性随 SOC 升高而增强,但其最大爆炸超压与威力指数整体低于标准体积分数丙烷,从理论上说明丙烷替代易导致适航验证中安全裕度偏高。由此可见:适航试验中的替代介质应基于热失控气体的真实爆炸行为进行参数化匹配,以实现爆炸风险的等效表征。

参 考 文 献

[1] NILS T, ELEONORE P, KATARZYNA M, et al. Towards sustainable regional aviation: environmental potential of hybrid-electric aircraft and alternative fuels[J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 45: 371-385.

[2] 欧阳明高. 我国节能与新能源汽车发展战略与对策[J]. 汽车工程, 2006(4): 317-321.
OUYANG Minggao. Development strategy and countermeasures for energy conservation and new energy vehicles in China[J]. Automotive Engineering, 2006(4): 317-321.

[3] 张青松,贾燕,翟祺悦,等. 受限空间锂离子电池热失控热传递仿真研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 65-72.
ZHANG Qingsong, JIA Yan, ZHAI Qiyue, et al. Simulation of thermal runaway heat transfer of Li-ion battery in confined space[J]. China Safety Science Journal, 2019, 34(6): 65-72.

[4] 来鑫,陈权威,顾黄辉,等. 面向“双碳”战略目标的锂离子电池生命周期评价:框架、方法与进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 3-18.
LAI Xin, CHEN Quanwei, GU Huanghui, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries towards the "dual carbon" strategic goal: framework, methods, and progress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 3-18.

[5] 贺元骅,赵逸明,张俐恒,等. 辐射对流散热下大尺寸三元锂电池热模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 49-55.
HE Yuanhua, ZHAO Yiming, ZHANG Liheng, et al. Research on thermal model of large format ternary lithium battery under radiation convection heat dissipation[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 49-55.

[6] 杨娟,胡佳宁,佟佳成. 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): 1-11.
YANG Juan, HU Jianing, TONG Jiacheng. Experimental study on thermal runaway high temperature jet impact of aviation lithium batteries[J]. Acta Aeronautica Sinica, 2025, 46(14): 1-11.

[7] ZHANG Changshuai, DONG Hongguang, ZHOU Yonghao, et al. Flame behavior and pressure characteristics of vented propane-air explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 85: DOI: 10.1016/j.jlp.2023.105168.

[8] DEWEY J, SOCHET I. Analysis of the blast waves from the explosions of stoichiometric, rich, and lean propane/oxygen mixtures[J]. Shock Waves, 2021, 31(2): 165-173.

[9] LIU Yi, CHEN Jian, BAI Mingqi, et al. Experimental study on explosion behavior of propane-dimethyl ether blends[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 77: DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104777.

[10] QIAO Zhenglong, MA Heng, YI Long. Effect of a perforated polyethylene material on propane: air explosion in a confined space[J]. ACS Omega, 2022, 7(28): 24 746-24 756.

[11] LIU Shizheng, CHEN Xiang, ZHAO Ningbo, et al. Experimental study on initiation and propagation behavior of propane/oxygen/nitrogen detonation wave[J]. Fuel, 2021, 293: DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120487.

[12] WANG Zhirong, CHEN Shichen, HE Xinrui, et al. A multi-factor evaluation method for the thermal runaway risk of lithium-ion batteries[J]. Energy Storage, 2022, 45: DOI: 10.1016/j.est.2021.103767.

[13] ZHANG Qingsong, NIU Jianghao, YANG Juan, et al. In-situ explosion limit analysis and hazards research of vent gas from lithium-ion battery thermal runaway[J]. Energy Storage, 2022, 56: DOI: 10.1016/j.est.2022.106146.

[14] PENG Rongqi, PING Ping, WANG Gongquan, et al. Numerical investigation on explosion hazards of lithium-ion battery vented gases and deflagration venting design in containerized energy storage system[J]. Fuel, 2023, 351: DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128782.

[15] 赵春朋,王青松,余彦. 密闭空间中锂离子电池的热爆炸危险性[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(3): 424-430.
ZHAO Chunpeng, WANG Qingsong, YU Yan. Thermal explosion hazards of lithium-ion batteries in hermetic space[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(3): 424-430.

[16] 张青松,刘添添,郝朝龙,等. 锂离子电池热失控气体快速检测及危险性分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023,49(9):2 227-2 233.

ZHANG Qingsong, LIU Tiantian, HAO Chaolong, et al. Study on rapid analysis method of thermal runaway gas composition and risk of lithium ion battery[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(9): 2 227-2 233.

[17] MIN Hao, YAO Nie. Hazard identification, risk assessment and management of industrial system: process safety in mining industry[J]. Safety Science, 2022, 154: DOI:10. 1016/j. ssci. 2022. 105863.

[18] 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:1-12. [2025-12-30]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20231219.1347.012>.

ZHANG Qingsong, BAO Fangwei, NIU Jianghao. Study on Risk assessment of ternary lithium battery thermal runaway gas Explosion[J/OL]. Journal of Power Sources: 1-12. [2025-12-30]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20231219.1347.012>.

[19] WANG Tao, LUO Zhenmin, HU Wen, et al. Effects of flammable gases on the explosion characteristics of CH₄ in air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 183-190.

[20] 和丽秋. 消防燃烧学[M]. 北京:机械工业出版社,2014:97-113.

[21] AMANO K, HAHN S, BUTT N, et al. Composition and explosibility of gas emissions from lithium-ion batteries undergoing thermal runaway[J]. Batteries, 2023, 9(6):DOI:10. 3390/batteries9060300.

[22] GONG Hanzheng, LIANG Huimin, ZHANG Qi. Explosion hazard of propane/air mixture in tank under transient high temperature[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2024, 149(24): 14 925-14 942.

[23] WANG Yalei, QI Chang, NING Ye, et al. Experimental determination of the lower flammability limit and limiting oxygen concentration of propanal/air mixtures under elevated temperatures and pressures[J]. Fuel, 2022, 326:DOI:10. 1016/j. fuel. 2022. 124882.

[24] LIU Jialong, ZHANG Yun, ZHOU Longfei, et al. Influencing factors of lithium-ion battery thermal runaway in confined space[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: DOI:10. 1016/j. est. 2023. 109125.

作者简介： 杨 娟 （1983—）,女,湖北鄂州人,硕士,副教授,主要从事航空锂电池安全性及适航符合性技术方面的研究。E-mail: j_yang@cauc.edu.cn。

