

DOI: 10.3901/JME.2023.02.177

轻型无人机电池动态冲击性能研究^{*}

刘新华¹ 郭斌¹ 何蓉¹ 贾璞² 刘小川³ 郭亚周³ 杨世春¹

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院 北京 100191;

2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710065;

3. 中国飞机强度研究所结构冲击动力学航空科技重点实验室 西安 710065)

摘要: 随着民用无人机在各领域的大量应用,其安全问题引起了广泛关注,现有研究大多是以硬物撞击的形式分析无人机撞击航空器问题,很少关注其机载锂离子电池可能带来的安全隐患。为了更好地分析碰撞过程中轻型无人机电池包的破坏机理,先通过放电容量和倍率性能试验,进行电池寿命及一致性的评估,开展不同冲击能量的电池单体落锤冲击试验,研究冲击能量与单体失效模式的关系,随后通过不同荷电状态电池包的落锤冲击试验,研究其碰撞安全特性。结果表明,试验用单体和电池包均处于许用寿命范围内,且具有较好的一致性;冲击能量大小与单体的破坏模式密切相关,三个区域的冲击能量对应着三种不同的破坏形式,中等冲击能量对电池产生了最严重的破坏;机械冲击致使电池发生内短路,进而诱发热失控是导致电池包严重破坏的主要原因,这些结果为民用无人机整机碰撞问题的研究提供有益的启示。

关键词: 轻型无人机; 锂离子电池; 落锤试验; 安全; 热失控

中图分类号: V279

Research on Dynamic Impact Performance of Light-UAV Battery

LIU Xinhua¹ GUO Bin¹ HE Rong¹ JIA Pu² LIU Xiaochuan³ GUO Yazhou³
YANG Shichun¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710065;

3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics,
China Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065)

Abstract: With the widespread application of unmanned aerial vehicles(UAVs) in various fields, their safety issues caused by their collisions or crashes attract growing attention. Most of the existing studies analyze the impact of UAVs on civil aircraft in the form of hard object collisions, and seldom pay attention to the potential thermal runaway caused by their onboard lithium-ion batteries. In order to study the damage mechanism of the battery pack, the state of health(SOH) and consistency of battery are examined and the interaction between impact energy and failure mode is investigated through the drop-weight tests of cells. In addition, the safety behaviors of the light-UAV battery pack with different states of charge are studied under dynamical loading. The results show that both the cells and battery pack are within their allowable life and have good consistency; the impact energy value is closely related to the way of damage mode. The impact energy of the three areas corresponds to the three types of damage modes. Furthermore, the higher state of charge(SOC) and medium loading increases the damage of battery. And dynamic mechanical loading that triggers internal short circuit and thermal runaway of battery pack is the main reason for the severe damage of the pack. The results provide useful insights into the research on the collision problem of UAVs.

Key words: light unmanned aerial vehicles(UAVs); lithium-ion battery; drop-weight test; safety; thermal runaway

^{*} 国家重点研发计划(2016YFB0100300)和国家自然科学基金(U1864213)资助项目。20211224 收到初稿, 20220525 收到修改稿

0 前言

锂离子电池具有比功率高、比能量高、寿命长、充电速度快、无记忆效应等优点^[1],逐渐成为各类消费电子产品电池的主流,也成为消费类轻型无人机的主要能量来源。随着锂离子电池的推广应用,由电池引起的安全事故时有发生,包括轻型无人机、电动自行车和电动汽车等产品,给消费者带来了很大财产损失和安全风险。

由锂离子电池引起的安全事故以热失控为特征,通常由机械、电或热滥用等引起,在电池内部会相继发生一系列的不可逆产热反应,最终造成着火、爆炸等安全事故^[2],并且锂离子电池发生热失控着火后,即使使用液氮进行冲扫也不能有效终止其电化学反应^[3]。

随着无人机的应用推广,其产业链逐步走向成熟,并在各领域获得了深度应用,根据工信部印发的《关于促进和规范民用无人机制造业发展的指导意见》,到 2025 年民用无人机产值将达到 1 800 亿元^[4]。数量庞大的无人机,以及其“黑飞”问题的存在,对民航机场的运行产生了很大影响,如 2016 年,英航一架空客 A320 降落前遭到无人机撞击,成为世界首例无人机撞击客机事件;2017 年以来,无人机频繁造成航班调整、备降、延误甚至停飞^[5]。无人机与民航飞机的空中碰撞问题,成为了民航领域的研究热点。

2017 年,国内民航部门上海审定中心第一次开展无人机撞击民机试验,结果显示无人机导致风挡外层玻璃破碎。国内外的其他研究机构也进行了无人机撞击民机机身、尾翼、发动机的数值模拟或试验,结果都表明无人机会给民机带来严重破坏^[6]。但这些研究多是借鉴鸟撞方面的研究思路,将无人机撞击航空器问题等效成硬物撞击的形式。

典型的四旋翼消费级轻型无人机主要由碳纤维复合材料的机壳,4 个小电机和内嵌的 1 块锂离子电池等部件组成,其对民机的撞击伤害,主要源于硬质的电机和锂离子电池^[7]。

现有的无人机撞击民机的试验和仿真分析研究中,多是聚焦电机和质量较大的锂离子电池等硬质物体的冲击动力学效应和力学表征^[8],而很少关注作为能量体的机载锂离子电池本身的安全特性。实际上,轻型无人机上嵌载的锂离子电池,除了硬物冲击伤害外,在受到机械冲击负载作用的情况下,电池内部的机械形变可能会诱发内短路,造成起火

燃烧,甚至爆炸,同时还会释放大量的有毒气体^[9],由此造成的二次伤害,更需要引起关注。

另外,无人机在飞行过程中,可能会因无人机自身故障、遥控器故障、环境干扰或飞手失误等原因发生坠机或与建筑物碰撞等事故^[10],也会造成巨大的安全风险,急需进行相应场景下的电池安全性研究。

基于此,本文以国内某款四旋翼无人机电池为研究对象,分别通过单体和电池包落锤冲击试验,进行无人机与客机或建筑物碰撞后,或其他原因引起的坠机过程中,电池坠落时可能发生的安全风险研究。本文提供的结果为无人机电池安全性研究提供借鉴。

1 落锤冲击试验方案

1.1 试验样品参数

选择国内某款四旋翼轻型无人机电池进行研究,电池包/Pack 主要由外壳、电池组、电池管理系统电路板和电量指示灯等部件组成,其中电池组由 4 个软包单体串联构成,基本参数见表 1。

表 1 电池主要参数

	电池 Pack	单体
额定容量/(A·h)	3.85	3.85
标称电压/V	15.4	3.65
质量/g	294	61.5
尺寸/ $\frac{\text{长}}{\text{mm}} \times \frac{\text{宽}}{\text{mm}} \times \frac{\text{高}}{\text{mm}}$	97×60×43	65×45×8.5
电池类型	三元锂离子电池	
单体能量密度/(W·h/kg)	228.5	

根据清华大学电池安全实验室的《2019 锂离子动力电池安全研究报告》^[11],电池的安全事故通常发生在使用一段时间后,说明老化后电池的安全性能会有一定程度的下降。因此,试验样品选用在无人机上使用一段时间的电池,并依据电池可维持无人机悬停的时间,筛选获得一致性较好的 4 个电池 Pack 样品。其中,2 个用于进行电池 Pack 动态冲击安全性试验,另外 2 个 Pack 进行拆解,以获得电池单体,用于单体落锤冲击试验。电池 Pack 拆解过程如图 1 所示,按照单体在 Pack 中的位置,由下向上依次编号,用于冲击能量探索试验的单体编号为 01、02、03、04,验证试验的单体为 11、12、13、14。



图1 电池单体样品拆解

1.2 总体方案

总体试验方案包括电池单体和 Pack 的恒流放电容量测试, 不同温度 and 不同倍率的放电性能测试, 单体冲击损伤边界探索与验证试验, 以及电池 Pack 的落锤冲击试验, 具体的试验规划见图 2。

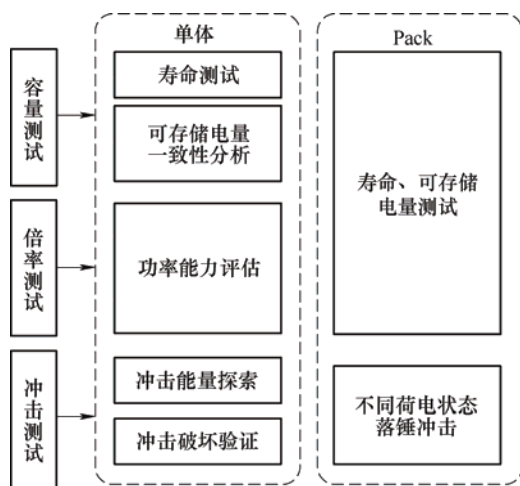


图2 总体试验方案

通常电池的健康状态(State of health, SOH, 即电池当前可放电容量与初始放电容量之比)下降到 80% 以下时, 认为电池使用寿命终止^[12]。另外, 无法在同一块电池上完成所有的落锤冲击试验。因此, 为了增强落锤冲击试验结果的可比性, 本文先通过电池单体和 Pack 的恒流放电容量试验, 进行电池寿命和当前可存储电量一致性的分析。

由于轻型无人机具有机动性强等特点, 对电池 Pack 和单体的放电功率有较高的要求, 因此, 通过倍率性能试验进行电池功率能力的评估, 当放电功率无法满足无人机使用需求时, 也可认定电池寿命终止, 同时通过倍率性能的放电容量, 也可辅助进行一致性的评价。

然后, 通过落锤冲击试验进行单体冲击损伤边界的摸底, 以便找到冲击能量与电池破坏模式的关系, 并进行相应的验证试验。

最后, 根据单体试验结果, 进行电池 Pack 的落锤冲击试验研究, 并根据单体试验总结的规律性, 分析造成 Pack 破坏模式的原因。

1.3 容量测试

通过容量测试得到电池当前实际的放电容量, 并与初始容量进行对比, 从而获得电池当前的 SOH。

单体容量测试在 25 °C 恒温箱中循环进行 3 次, 具体测试步骤包括: ① 1C(3.85 A)恒流充电到 4.2 V, 转恒压充电, 直到电流降到 0.05C, 停止; ② 静置 1 h; ③ 1C 恒流放电到 3.0 V, 记录放电容量; ④ 静置 1 h。取 3 次容量的平均值, 作为单体当前的实际容量。

具体的, 单体 11、12、13、14 分别进行 25 °C 的 1C 恒流放电容量测试。

电池模组的容量测试与单体容量测试类似, 同样在 25 °C 恒温箱中进行 3 次, 其具体步骤为: ① 1C(3.85 A)恒流充电到 16.8 V, 转恒压充电, 直到电流降到 0.6 A, 停止; ② 静置 1 h; ③ 1C 恒流放电到 12.0 V, 记录放电容量; ④ 静置 1 h。取 3 次容量的平均值, 作为模组当前的实际容量。

1.4 倍率性能测试

通常, 倍率性能测试分为两种情形, 一种是在同一温度下进行不同放电倍率的试验, 分析电流大小对电池性能的影响, 另一种是在同一放电倍率不同温度下进行的试验, 探究温度对电池放电性能的影响。

因此, 本文的倍率性能试验分为两部分, 其一, 在 25 °C 环境下, 分别进行 0.5C、1C 和 2C 的放电试验; 其二, 分别在 5 °C、25 °C、45 °C 环境温度下, 进行 1C 的放电试验。即在完成容量测试后, 单体 11 和 12 补充其他温度下的 1C 放电容量试验, 单体 13 和 14 增加 25 °C 下的其他倍率放电容量试验。

1.5 落锤冲击测试

落锤冲击试验使用如图 3 所示的设备, 主要包括落锤试验机、温度测试仪和示波器等。落锤试验机的锤头加载质量为 31.2 kg, 使用试验平台下部的设备传感器测得锤头重力为 305.5 N, 落锤锤头截面尺寸为宽 20 mm, 高 30 mm, 锤头的样品冲击面为半圆柱面。试验过程中, 使用金科 JK808 多路温度测试仪记录电池温度, 选用 K 型热电偶温度传感器测量电池各单体温度; 使用泰克的 TDS 2014C 示波器, 监控冲击试验过程中, 电池电压的变化情况。另外, 使用 Phantom 高速摄像机, 记录冲击试验过程中, 电池发生的热失控或损伤过程。

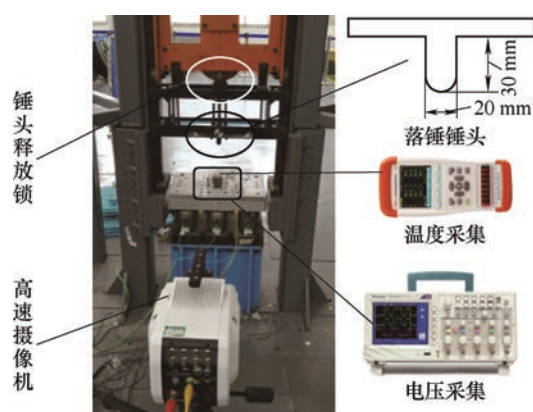


图 3 落锤冲击试验装置

《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例(征求意见稿)》中规定,微型无人机禁止在真高 50 m 以上空域飞行,轻型无人机禁止在真高 120 m 以上空域飞行,在微型与轻型无人机的禁飞边界 50 m 高度处,电池单体的重力势能为 30.1 J。本文以 50 m 高度为起始,即以 30 J 作为起始的冲击能量,根据实际的试验结果进行增大或减小,来探索冲击能量与电池破坏模式的关系。

落锤试验时,首先根据冲击能量计算锤头的高度,并通过提升装置将锤头提升至相应高度,然后通过释放锁释放锤头,锤头自由落体对电池单体或 Pack 进行冲击,通过调整提升的高度,调整冲击能量的大小。

落锤冲击试验前,在电池单体样品的正负极极耳上焊接电压采样线,以便通过示波器采集冲击过程中的电压变化,同时,在单体电极平面(即电池单体最大的平面)布置温度传感器,采集试验前后的温度变化。对于电池 Pack,保持 4 个电池单体之间的串联连接,在模组的总输出回路上焊接电压采集线,采集电池模组即 4 个单体串联后的电压,并在每个电池单体电极平面上布置温度传感器,采集落锤冲击试验前后,每节电池单体的温度变化,最后将电池 Pack 的外壳粘接牢固,恢复到初始状态。

表 2 为电池单体和 Pack 的落锤冲击试验安排,其中编号 01~04 的单体,进行冲击能量与电池破坏模式的关系摸底,然后用编号 11~14 的单体进行相应的验证试验,并根据上述试验结果,完成电池 Pack 的落锤冲击试验。另外,单体均在满电即荷电状态(State of charge, SOC)为 100% 的状态下进行落锤冲击试验, Pack 分别在 SOC 为 0% 和 100% 两个状态下试验。

表 2 落锤冲击试验

单体或 Pack 编号	SOC(%)	冲击能量/J
01	100	30
02	100	50
03	100	10
04	100	20
11	100	15
12	100	20
13	100	30
14	100	50
P1	0	200
P2	100	200

2 结果与讨论

2.1 寿命与一致性分析

图 4a 为电池单体 11、12、13、14 与新鲜电池在 25 °C 以 1C(3.85 A) 电流进行恒流放电的容量曲线,在初始阶段,欧姆阻抗和浓差极化引起一定程度的压降,随后电压逐渐下降,并近似呈线性关系,在放电末尾段,电压快速下降,很快达到了设置的放电截止电压,老化后的电池与新电池具有相同的变化趋势,且单体 11~14 的放电电压平台基本相近。

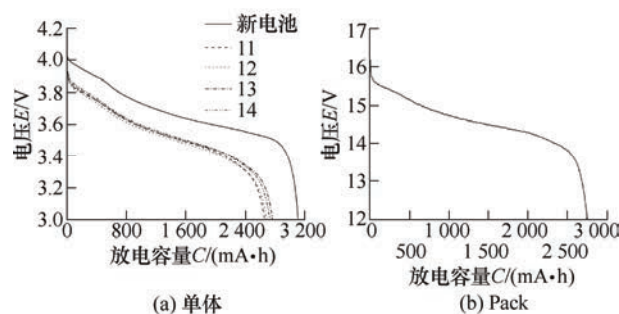


图 4 电池 1C 恒流放电容量

各电池单体的放电容量见表 3, 单体 11~14 的平均放电容量为 2 710.64 mA·h, 各单体相对于平均容量的偏差在 2% 以内。由此可知, 电池老化后, 在放电容量即可存储电量方面具有较好的一致性。

以新电池的 1C 放电容量 3 106.94 mA·h 为基准, 计算每个单体的 SOH, 结果显示, 各单体 SOH 都在 80% 以上, 平均值为 87.23%, 最大极差为 3.3%。因此, 用于进行落锤冲击试验的单体样品均处于寿命周期内。

表 3 常温 1C 放电容量与健康状态

单体编号	放电容量/(mA·h)	SOH(%)
新电池	3 106.94	100
11	2 659.85	85.6
12	2 686.48	86.5
13	2 764.78	88.9
14	2 731.43	87.9

电池 Pack 在 25 °C 下的 1C(3.85 A)恒流放电容量曲线如图 4b 所示, 累计放电容量为 2 750 mA·h, 与单体 11~14 的平均放电容量 2 710.64 mA·h 相差 1.4%, 其 SOH 为 88.5%, 处于其寿命周期内。

2.2 放电功率能力评估

图 5 为单体 11、12 在不同温度下的 1C 放电容量曲线, 两个电池不同温度下的放电电压变化趋势基本相同, 45 °C 时单体 12 线性段的放电电压平台较单体 11 低约 0.1 V, 是由于老化后欧姆阻抗和电荷转移阻抗变化引起, 但两个单体总的放电容量基本相同, 分别为 2 880.41 mA·h 和 2 819.22 mA·h。另外, 常温 25 °C 的放电容量分别为 2 659.85 mA·h 和 2 686.48 mA·h, 在 5 °C 温度下的放电容量分别为 2 211.52 mA·h 和 2 273.22 mA·h。

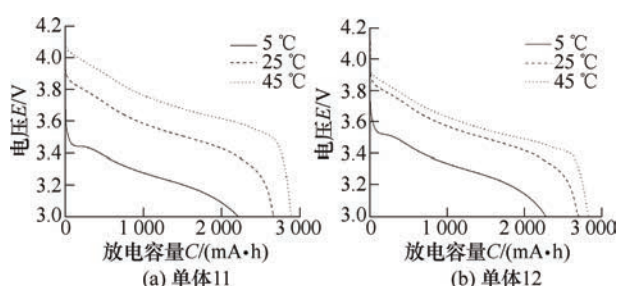


图 5 不同温度 1C 放电容量

由单体 11 和 12 的 1C 放电容量可以看出, 老化后两个单体在不同温度下的放电容量依然有较好的一致性, 且环境温度适当升高一定程度上可以提高电池的放电能力。然而, 当温度降低到 5 °C 左右, 两个单体的放电容量减少了 15% 左右, 主要是由于低温降低了电池活性, 增加了锂离子扩散迁移阻力。因此, 电池低温使用时, 为了提高放电能力, 常常会通过加热片对电池进行加热^[13]。

单体 13 和 14 在 25 °C 环境温度, 不同倍率下的放电容量曲线如图 6 所示, 可以看出倍率越大, 电池初始压降越大, 这主要是由电池内部的欧姆阻抗和极化现象造成的。

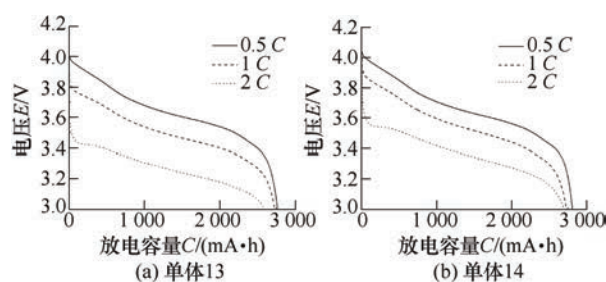


图 6 25 °C 不同倍率放电曲线

单体 13 的 0.5C 放电容量增加了 1.3%, 单体 14 增加了 2.9%, 2C 的放电容量单体 13 减少了 4.8%, 单体 14 减少了 1.2%。总体来看, 两个单体在不同倍率放电性能上, 放电曲线变化趋势和电压平台基本相同。

按单体 13 的 2C 放电容量(2 593.57 mA·h)计算, 若无人机以 2C(7.7 A, 对应最长飞行时间和悬停工况)的电流工作, 可以飞行 20 min(新电池可飞行 30 min), 说明电池还保持有一定的功率放电能力, 还能够满足轻型无人机的动力性能要求。

2.3 单体落锤冲击破坏模式

单体的放电容量测试结果表明, 各单体具有良好的寿命和电量一致性, 同时, 功率性能测试结果说明老化后的电池, 还可以满足无人机功率性能要求, 这为单体落锤冲击试验结果的对比, 奠定了良好的基础。

为了探索冲击能量与电池破坏模式的关系, 先以 30 J 作为落锤冲击的能量, 进行第一个单体的冲击试验, 并以 20 J 为增量, 向两边扩展, 进行 10 J 和 50 J 的试验, 然后根据这三个单体的试验结果, 确定另一块电池的冲击能量。

单体冲击能量探索试验结果如图 7 所示, 冲击能量 30 J 时, 电池发生快速燃烧; 50 J 时, 冲击区域产生严重变形, 电池极片断裂; 10 J 时, 电池表面出现了小凹痕, 但电池电压正常, 未出现硬短路。

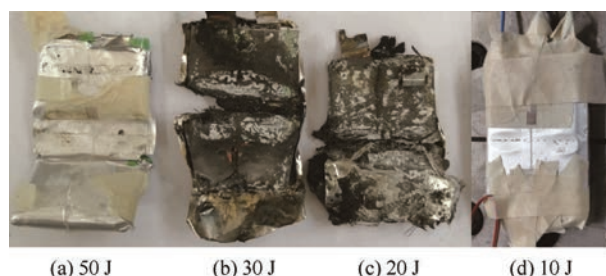


图 7 单体冲击能量探索试验

结合电池单体的损伤情况, 当冲击能量大于 50 J 时, 由于冲击区域严重变形, 电池极片断裂, 不会引起着火等热失控现象; 当冲击能量小于

10 J 时,冲击区域会出现明显压痕,冲击结束后,电池电压保持初始电压,电化学性能未完全失效。

为了进一步明确电池冲击热失控的边界,又进行了 20 J 的落锤冲击试验,试验后电池出现了热失控现象。因此,对应冲击能量的三个区域即 50 J 以上、10 J 以下和 20~30 J,电池分别出现了三种不同失效模式。

图 8 为电池单体落锤冲击验证试验结果,由于 10 J 摸底试验时电池表面仅出现了可见的压痕,为了更好的确定热失控边界,低冲击能量使用了 15 J,动态冲击后,电池表面出现了明显的压痕,但未出现漏液、冒烟和鼓包现象。20 J 的电池冲击后,随着电池温度升高,内部发生一系列副反应^[2],包括 SEI 分解、正负极氧化还原、电解液燃烧等,电池快速出现了膨胀、冒烟和着火,热失控过程如图 9 所示,电池首先开始膨胀,直到外部铝塑膜破裂,然后内部气体喷出,出现冒烟,紧接着电池开始快速着火,从高速摄像中发现着火同时还伴随固体物质喷发。

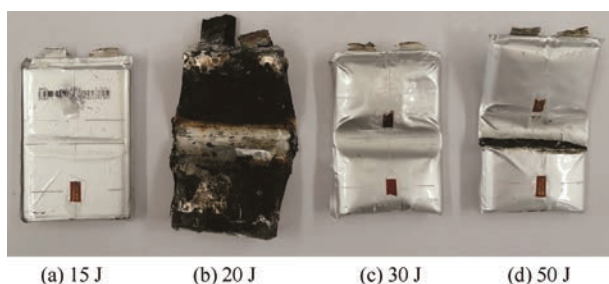


图 8 单体落锤冲击验证试验

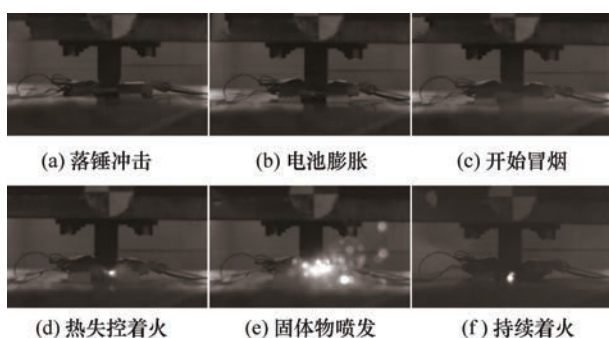


图 9 20 J 冲击后电池单体热失控过程

冲击能量 30 J 的电池出现了快速膨胀和漏液,并在试验后依然保持鼓胀状态,另从高速摄像中观察到冒烟现象,但没有着火。50 J 能量冲击电池后,电池极片和铝塑膜出现了明显断裂,试验台观察到有电解液流出,未出现冒烟着火等热失控现象,具体试验结果总结见表 4。

表 4 单体落锤冲击验证试验结果

单体或 Pack 编号	SOC(%)	冲击能量/J	冲击后试验现象
C1	100	15	表面明显压痕,无漏液冒烟
C2	100	20	快速膨胀,冒烟,着火
C3	100	30	快速膨胀,冒烟,漏液
C4	100	50	极片断裂,漏液,鼓包

单体落锤冲击验证试验进一步证实了冲击能量探索试验结果的分析,两轮试验表现出一致的规律性,即当冲击能量大于 50 J 时,冲击区域产生严重变形,极片断裂,不会发生着火等热失控现象;当冲击能量小于 15 J 时,冲击区域出现可见压痕,包装未破损,不会出现膨胀、冒烟、漏液等。而当冲击能量在 20~30 J 范围内时,落锤冲击后,会相继出现快速膨胀、冒烟、着火、固体物喷发等剧烈热失控现象,尤其是在 20 J 冲击能量时,试验结果具有很强的可重复性。

另外,从图 8 还可以看出,冲击能量越大,冲击区域的变形越大,造成的机械损坏越严重,然而在 20~30 J 范围内的特定能量冲击下,机械损伤会触发电池热失控,造成更严重的破坏。从图 10 可以看到 20 J 能量冲击下,电池热失控着火后依然在燃烧,电池本身破坏严重,并引燃外包装等易燃物。



图 10 20 J 冲击后电池热失控持续着火

图 11 为用示波器捕捉到的动态冲击时,每个单体在落锤冲击过程中的电压变化。由电压变化曲线,可以看出 15 J 能量冲击的电池电压稳定,虽然表面发生形变,但未出现短路现象。其他三个电池都出现了短路或电压下跌现象,30 J 和 50 J 动态冲击后,电池电压快速下降到 0.4 V 左右,发生了硬短路(不可恢复的短路)或开路^[14]。结合图 8 的结果分析,50 J 能量冲击下,电池由于极片断裂,出现了开路,而从两次 30 J 落锤冲击试验结果和电压曲线分析,造成 30 J 冲击电池电压快速下降的原因是极片断裂和

内部硬短路复合作用的结果。冲击能量 20 J 的电池电压曲线可以观察到从软短路(可恢复的短路)到硬短路的过渡, 最终电压稳定在 0.5 V 左右。

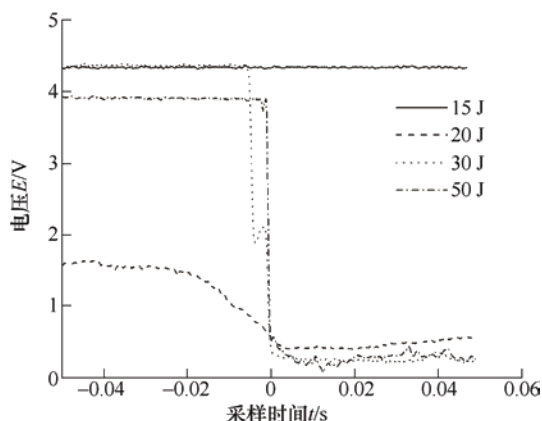


图 11 电池单体落锤冲击过程电压变化

内短路是热失控最常见的特征, 一旦发生内短路, 存储在电池材料中的电化能就会随着热量的产生自发释放^[15]。本文的软包电池由正极片、隔膜和负极片依次层叠后, 再卷绕起来, 最后用铝塑膜封装形成, 当落锤的冲击载荷作用在电池上时, 载荷逐层向下传递, 随着载荷的继续传递和变形区域的扩展, 会引起隔膜的变形或破裂, 集流体塑性变形等, 导致正负极直接接触短路, 焦耳热等产热引起电池温度升高, 进一步触发内部的链式产热副反应, 并最终导致冲击能量 20 J 的电池发生热失控。

落锤试验各单体电池的温度变化曲线如图 12 所示, 15 J 冲击后电池温度略有上升, 其他三个电池冲击后, 温度均出现快速上升; 30 J 与 50 J 能量冲击的电池分别达到 101.8 °C 和 95.9 °C 的最高温度, 未达到文献报道的热失控触发温度 200 °C 左右^[3], 没有触发热失控, 随后温度缓慢下降到室温; 20 J 动态冲击后, 电池由于内短路, 焦耳热等内部产热使电池经历缓慢升温后, 触发链式产热副反应, 引起温度快速升高, 并超过了 200 °C, 发生热失控着火, 最高温度达到了 356.7 °C, 电池能量释放完后, 温度快速下降。

20 J 冲击引起电池热失控后, 温度未达到一般文献报道的 800 °C 左右的最高温度, 主要与以下几个因素有关, ① 电池膨胀致使外铝塑膜破裂, 部分电解液流到试验平台, 电池内部电解液的减少, 降低了负极与电解液副反应的产热量, 而这部分热量是热失控过程两个主要的产热量之一^[12]; ② 为了更好地模拟实际坠机场景, 试验电池放置于开放环境, 与一般文献中的绝热封闭环境不同, 热失控后, 电池一方面与周围空气进行快速换热, 另一方面通

过传导方式与试验平台进行换热, 降低了升温速率; ③ 热失控过程中, 气体高速喷出时, 会带出一些内部活性物质, 也会减少副反应的产热量, 高速气流对电池也有一定的冷却作用^[16]。

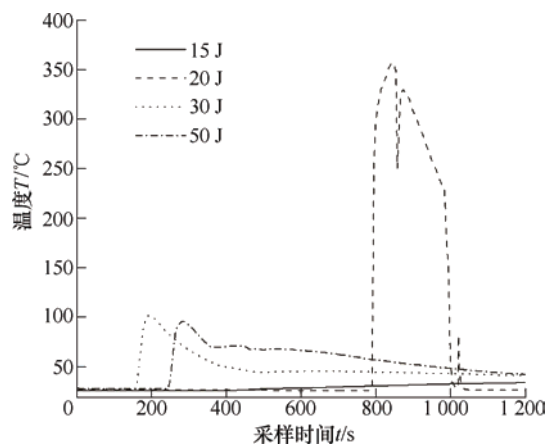


图 12 落锤冲击后电池单体温度变化

2.4 电池 Pack 落锤冲击失效机理

由于 Pack 在单体外部有外壳封装, 因此以单体断裂冲击能量 50 J 作为 Pack 冲击试验中每个单体的平均冲击能量, 即以 200 J 作为冲击能量进行 Pack 的落锤冲击试验。两个 Pack 分别在 0%SOC 和 100%SOC 状态下, 即完全放电和满电状态下进行试验, 结果如图 13 所示。

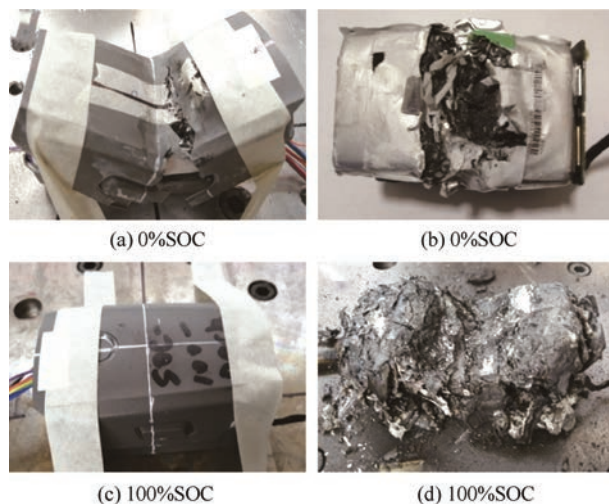


图 13 Pack 落锤冲击后损伤情况

0%SOC 的样品上壳严重变形, 并部分断裂, 随着能量的向下传递, 第一节单体破坏最严重, 冲击区域的活性材料形成了大量碎屑, 导致冲击区域两边电池极片断开, 电池损伤面积较单体冲击试验的大, 第二节电池有部分损伤现象, 第三、四节电池外包装完整, 由于电池处于完全放电状态, 未出现冒烟或着火现象。

100%SOC 的样品在 200 J 的能量冲击下,出现了爆燃现象,电池剧烈燃烧,释放大热量,使用灭火毯进行灭火后,观察到第一节和第二节电池有机械形变,且完全断裂,但第二节电池损伤面积较小,第三、四节电池没有冲击压痕,外形基本保持完整。结合锂离子电池热失控诱发机理分析,认为由于第一节和第二节单体冲击区域的正负极活性物质、电解液等混合并快速反应放热,以及出现了严重的内短路,电池快速出现热失控着火,前两节电池的热失控迅速向电池 Pack 扩散、蔓延,引燃所有可燃物质,并导致其他两节电池出现热失控。

0%SOC 电池 Pack 在动态冲击过程中的电压变化曲线如图 14 所示,由于用无人机将电池放电至自动关机,因此,初始电压为 14.4 V,随着冲击试验进行,第一节电池断开后,电压降到 10.8 V,出现第一个平台,总电压中少了一节电池电压,随后电压降到 8 V 左右时,因为锤头的反弹局部发生软短路而出现波动,电压最终稳定在 7.4 V,即 2 个单体的电压和,说明第三节和第四节电池未出现短路,结合冲击后的损伤情况,第一个单体活性物质混合并断开,第二个电池表面部分损伤,可知,第二个单体出现了硬短路,这也证实了 100%SOC 的 Pack 发生热失控是由活性物质混合反应放热和内短路引起。

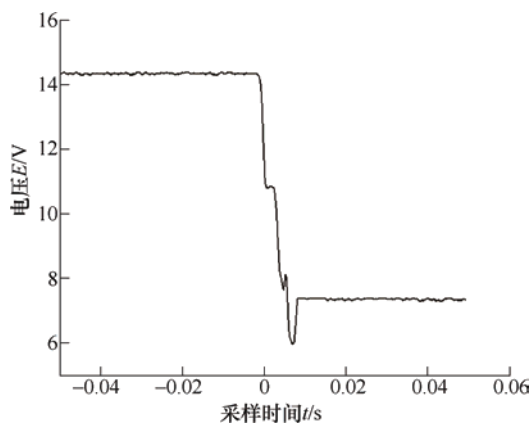


图 14 0%SOC 电池 Pack 电压变化

图 15 为电池 Pack 落锤冲击试验过程中,内部各单体的温度变化,按照各自的位置从上到下依次编号为 pc1、pc2、pc3 和 pc4。另外,pc1_0 表示 0%SOC 的 Pack 中的上面第一节电池,pc1_1 表示 100%SOC 的 Pack 中的上面第一节电池,其他编号以此类推。落锤冲击后,0%SOC 电池 Pack 的第一节和第二节温度变化基本相同,最高温度都达到了 80 °C 左右,第三节快速升温到 55 °C,第四节的升温比较缓慢,逐渐升温到 40 °C 左右。而 100%SOC

的 Pack 由于发生了热失控燃烧,四个单体都出现了剧烈升温。

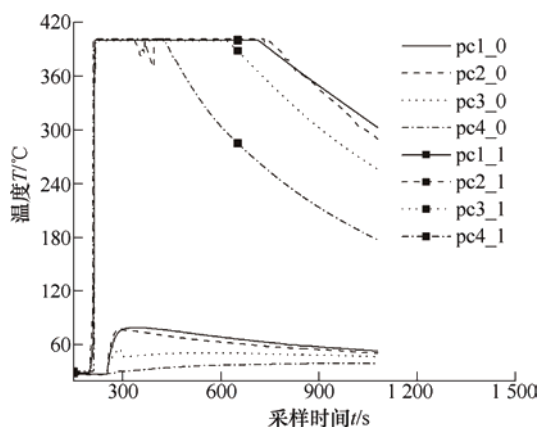


图 15 0%SOC 和 100%SOC 电池 Pack 中各单体温度

结合上述分析可知,电池 Pack 在落锤冲击时,首先外壳变形、开裂,吸收一部分能量,随着动态载荷引起的结构惯性效应逐层局部向下传递, Pack 内第一节单体断开,且冲击区域的活性材料破碎混合,第二节单体内部变形,形成硬短路,根据单体落锤冲击分析结果可知,单体内短路会引起热失控,因此,在活性材料混合放热和内短路产热的共同驱动下,前两节单体首先发生热失控,快速着火放热,并引起其他两节单体热失控,从而造成整个 Pack 的严重损坏,也可从 0%SOC 电池温度曲线得到证实。

另外,电池外壳内部的金属部件受到冲击后,会产生塑性变形,如果侵入电池内部,也会造成内短路热失控。

0%SOC 电池受冲击后最高温度为 80 °C,未引起热失控,而 100%SOC 电池发生了剧烈热失控,说明 SOC 对电池损坏形式和结果影响很大,且 SOC 越高造成的破坏越严重,与 JIA 等^[17]的研究结果一致。

3 结论

(1) 由于老化会一定程度上降低电池安全性,故本文选用无人机上使用一段时间的电池,通过放电容量和倍率性能试验,进行电池寿命、功率放电能力和一致性的评估。结果表明,试验用的电池单体和 Pack 的 SOH 在 86% 左右,均处于使用寿命范围内,放电功率可以满足无人机需求,且具有较好的一致性。

(2) 冲击能量大小与电池的破坏模式密切相关,通过单体落锤冲击能量探索和验证试验,证实三个区域的冲击能量对应着三种破坏形式。当冲击

能量大于 50 J 时, 冲击区域严重变形, 极片断裂, 不会发生热失控着火; 当冲击能量小于 15 J 时, 电池表面出现明显压痕, 但电压保持正常; 而当冲击能量在 20~30 J 时, 电池的机械形变引起内部出现严重内短路, 引起电池出现热失控, 快速燃烧。

整体来看, 冲击能量越大, 冲击区域的变形越大, 造成的机械损坏越严重, 然而当机械损伤触发热失控时, 会造成更严重的破坏, 这为电池 Pack 在落锤冲击过程中的损伤和热失控机理分析提供了重要的研究基础。

(3) 电池 Pack 在落锤冲击时, 随着动态载荷逐层向下传递, 首先出现外壳变形、开裂, 而后 Pack 内第一节单体断开, 且冲击区域的活性材料破碎混合, 第二节单体内部极片变形, 隔膜破裂, 形成硬短路, 第三、四节电池没有冲击压痕, 电压正常, 前两节电池冲击区域的活性物质碎屑快速反应放热和内短路产热, 触发了热失控, 并迅速向 Pack 扩散, 导致整个 Pack 出现非常严重的损坏。总之, 机械冲击下的内短路触发了热失控, 是导致 Pack 严重破坏的主要原因。

(4) 高负载率下, 电池 Pack 外壳内部的金属部件会产生塑性变形, 如果侵入电池内部, 也可能会造成内短路热失控, 因此在 Pack 设计时, 需要做好内部金属零件的绝缘防护, 另外, 可通过合理设计外壳吸能, 以降低发生事故时电池单体出现内短路而引发热失控的风险。

参 考 文 献

- [1] 邓成. 车用锂离子电池电热行为及状态估计研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017.
DENG Cheng. Study on electro-thermal behaviour and state estimation of li-ion battery for electric vehicles[D]. Beijing: Beihang University, 2017.
- [2] 任东生, 冯旭宁, 韩雪冰, 等. 锂离子电池全生命周期安全性演变研究进展[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 957-955.
REN Dongsheng, FENG Xuning, HAN Xuebing, et al. Recent progress on evolution of safety performance of lithium-ion battery during aging process[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 957-955.
- [3] LIU Xiang, REN Dongsheng, HSU H, et al. Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit[J]. Joule, 2018, 2(10): 2047-2064.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 关于促进和规范民用无人机制造业发展的指导意见[EB/OL]. [2017-12-22].
https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbys/gzdt/art/2020/art_73aee6b161b54841a7480b3da01f6234.html.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Guiding opinions on promoting and regulating the development of civil UAV manufacturing [EB/OL]. [2017-12-22]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbys/gzdt/art/2020/art_73aee6b161b54841a7480b3da01f6234.html.
- [5] 张序. 无人机撞击民机发动机叶片动态响应及破坏损伤数值研究[J]. 失效分析与预防, 2019, 14(6): 32-39.
ZHANG Xu. Numerical study on dynamic response and damage of unmanned aerial vehicle impacting engine fan blades of civil aircraft[J]. Failure Analysis and Prevention, 2019, 14(6): 32-39.
- [6] 吴志坚. 无人机撞击民机动态响应及破坏损伤数值研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018.
WU Zhijian. Numerical study on dynamic response and damage of the UAV impact civil aircraft[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018.
- [7] 刘继军, 刘小川, 郭军. 小型无人机和鸟体对飞机风挡冲击对比研究[C]//中国航空学会. 第六届中国国际无人驾驶航空器系统大会, 9月19日-23日, 2016, 中国国际展览中心. 北京: 航空工业出版社, 2016: 73-78.
LIU Jijun, LIU Xiaochuan, GUO Jun. Comparative study impact of aircraft windshield between small UAV and bird[C]//Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. The Sixth China International Unmanned Aircraft System Conference, September 19-23, 2016, China International Exhibition Center. Beijing: Aviation Industry Press, 2016: 73-78.
- [8] 郑奎涛, 龚明生, 蒋大鹏, 等. 基于火箭橇的无人机碰撞民用飞机试验技术研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 724-729.
ZHENG Kuitao, GONG Mingsheng, JIANG Dapeng, et al. Research on test technology of UAV impacting civil aircraft based on rocket sled[J]. Progress of Aviation Engineering, 2020, 11(5): 724-729.
- [9] KOCH S, FILL A, BIRKE K. Comprehensive gas analysis on large scale automotive lithium-ion cells in thermal runaway[J]. Journal of Power Sources, 2018, 398: 106-112.
- [10] 梁平, 郭瀚林, 钱济人, 等. 基于 FTA 模型的无人机坠机事故风险分析与对策研究[J]. 中小企业管理与科技, 2020(9): 100-103.
LIANG Ping, GUO Hanlin, QIAN Jiren, et al. Risks analysis and countermeasures research of UAV crash

- accident based on FTA model[J]. Management & Technology of SME, 2020(9): 100-103.
- [11] 冯旭宁. 2019 年动力电池安全性研究报告[R]. 北京: 清华大学电池安全实验室, 2019.
- FENG Xuning. Lithium-ion power battery safety research report[R]. Beijing: Battery Safety Laboratory of Tsinghua University, 2019.
- [12] REN Dongsheng, HSU H, LI Ruihe, et al. A comparative investigation of aging effects on thermal runaway behavior of lithium-ion batteries[J]. eTransportation, 2019(2): 100034-100047.
- [13] WANG Qian, JIANG Bin, LI Bo, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 106-128.
- [14] KISTERS T, SAHRAEI E, WIERZBICKI T. Dynamic impact tests on lithium-ion cells[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 108: 205-216.
- [15] FENG Xuning, OUYANG Minggao, LIU Xiang, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.
- [16] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- FENG Xuning. Thermal runaway initiation and propagation of lithium-ion traction battery for electric vehicle: Test, modeling and prevention[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [17] JIA Yikai, YIN Sha, LIU Binghe, et al. Unlocking the coupling mechanical-electrochemical behavior of lithium-ion battery upon dynamic mechanical loading[J]. Energy, 2019, 166: 951-960.
-
- 作者简介: 刘新华, 女, 1988 年出生, 助理教授。主要研究方向为新能源汽车动力电池系统。
E-mail: liuxinhua19@buaa.edu.cn
- 郭斌, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为电池老化机理。
E-mail: guobin2014@163.com
- 杨世春(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动汽车能源动力系统优化与控制、飞行汽车能源动力系统、电动汽车智能无人驾驶。
E-mail: yangshichun@buaa.edu.cn