DOI: 10.11883/bzycj-2024-0320

轻型消费级无人机软包锂离子电池在机械强冲击载荷下的力学响应特性*

郭亚周，刘小川，白春玉，王计真
（中国飞机强度研究所强度与结构完整性全国重点实验室，陕西 西安 710065）

摘要： 为研究轻型消费级无人机锂离子电池在高能量冲击下的动响应模式及爆炸着火特性，评估锂离子电池在动态冲击时的安全性能，以某轻型消费级无人机软包锂离子电池为研究对象，采用落锤冲击及气炮冲击实验方法，结合轻型无人机实际应用场景分别开展了软包电池组落锤冲击及电池高速冲击铝板测试实验，探讨不同电池电量的软包电池组在受冲击后的变形模式及着火情况，结合电池的机械变形响应及其着火演化特性分析了软包锂离子电池的冲击安全性。研究结果表明，轻型消费级无人机软包锂离子电池在常规电池外壳防护的条件下受面外方向载荷冲击后的着火风险高于面内方向载荷冲击后的着火风险；锂离子电池着火风险与电池电量、冲击速度等具有明显相关性，锂离子电池本身的力学响应主要受自身材料及结构影响，电池电量并不会影响电池的机械力学碰撞响应；本文中所采用的锂离子电池样本在电池电量为 100% 时以 50 m/s 的速度撞击铝板以及电池电量为 50% 以下时以 85 m/s 速度撞击铝板后燃烧风险均相对较低。

关键词： 软包锂离子电池；高速冲击；机械载荷；变形模式；着火风险
中图分类号： O389; V214.8　　**国标学科代码：** 1303599　　**文献标志码：** A

Dynamic response characteristics of soft-pack lithium batteries for light consumer drones under mechanical strong impact loads

GUO Yazhou, LIU Xiaochuan, BAI Chunyu, WANG Jizhen
（*National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity*, *Aircraft Strength Research Institute of China*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*）

Abstract: In order to study the dynamic response mode and explosion ignition characteristics of lithium battery in light and small unmanned aerial vehicle (UAV) under high-energy impact, and evaluate the safety performance of lithium battery under dynamic impact, this paper takes the soft-package lithium battery as the research object, and have used the drop-hammer impact and gas gun impact test methods to carry out the drop hammer impact of the soft-package battery pack and the high-velocity impact of the battery on the aluminum plate. The deformation mode and ignition of the soft-package lithium battery under different battery power after impact were studied respectively. Combined with the mechanical deformation response and ignition characteristics of the battery, the impact safety of the small soft-package lithium battery was analyzed. The results show that the ignition risk of small soft-package lithium battery after being impacted by loads in the out-of-plane direction under the conditions of conventional battery shell protection is much higher than that under the condition of out-of-plane load impact. The ignition risk of lithium battery is obviously related to battery power and impact velocity. The thickness of the impacted aluminum plate has little effect on the ignition risk of lithium battery. Due to the buffering effect of the external battery shell, the lithium battery for light and small UAV has a relatively low risk of ignition after an unpredictable heading impact accident at low altitude in the urban environment.

* 收稿日期：2024-08-31；修回日期：2024-12-03
第一作者：郭亚周（1994—　），男，硕士，工程师，guoyazhou623@163.com
通信作者：刘小川（1983—　），男，博士，研究员，liuxiaochuan@cae.ac.cn

Keywords: soft-package lithium battery; high-speed impact; mechanical load; deformation mode; ignition risk

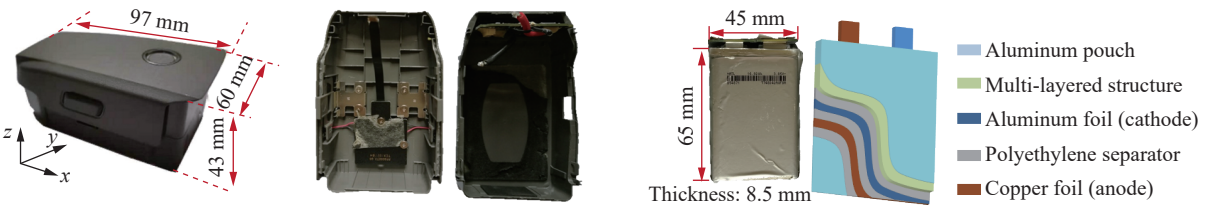
低空经济作为我国战略性新兴产业，逐渐成为中国新质生产力的代表，其中民用无人机作为低空经济的先行者是中国制造的一张靓丽名片，近些年涌现出了一批无人机全球龙头企业，使得我国具备了低空经济产业的全球竞争优势。无人机中以空机质量不超过 4 kg，最大起飞质量不超过 7 kg，最大平飞速度不超过 100 km/h 的轻型消费级无人机占据了民用无人机市场显著份额，轻型消费级无人机在个人娱乐、安防等领域的成功应用促进了其蓬勃发展[1-3]。低空经济腾飞，需让安全先行。尽管轻型消费级无人机给诸多行业带来了便利，但由于其飞行高度低、速度快、上手门槛低等产品特点导致无人机给各个行业和生活带来便利的同时也带来了公共安全风险，特别是轻型消费级无人机大多应用在城市环境，应用场景通常人口密度相对较大，无人机由于自身主观或客观原因可能会产生不可忽视的人员和财产安全风险[4-6]，有研究表明无人机在高能量碰撞冲击场景下，其碰撞严重性主要由电池、电机、摄像头等集中质量决定，而其中电池所造成的安全风险最为严重[7]。几乎所有的轻型消费级无人机动力能源系统均为锂离子电池，锂离子电池虽然具有体积小、能量密度高等优点，但是其安全性问题较为突出，主要就是因为热冲击、短路、外部机械载荷等原因产生热失控而引起的燃烧爆炸等问题，而外部机械载荷又是锂离子电池极易发生热失控的极端情况，当锂离子电池受到外部机械因素影响时，破损部位从内部易发生短路，导致内部产生大量的热，从而导致热失控[8-10]。诸如无人机在自身运输过程可能产生外部的挤压和碰撞产生机械载荷引起电池失效热失控进而造成燃烧后等后果，这种场景下电池所受的机械载荷多为面外的挤压载荷；另外当无人机在自身操作飞行过程中也有可能发生碰撞事故，碰撞事故可分为 2 类：第 1 类是无人机飞行过程中在航向方向上与其他物体发生撞击，这类场景下根据目前主流轻型消费级无人机锂离子电池安装方式可知大部分情况下电池所受的机械在和多为面内的冲击挤压载荷；第 2 类是无人机由于自身或外部原因意外跌落与地面发生碰撞，这类场景下电池既可能受到面外载荷也可能受到面内载荷。以上无人机锂离子碰撞事故均有可能造成严重后果，因此，电池作为无人机的主要结构部件，研究电池安全对摸清无人机碰撞安全底线，对促进低空经济产业健康快速发展有着迫切的行业需求和重要的应用价值。目前，轻型消费级无人机常用的电动能源系统为软包锂离子电池模组，学者们对软包锂离子电池机械冲击安全性开展了广泛研究。Jia 等[11] 通过分别开展软包锂离子电池压缩实验和落锤实验，研究了软包锂离子电池在动态载荷作用下的力学机械与电化学耦合失效行为，发现电池组件的机械变形和材料失效共同决定了电池在受到冲击后的响应模式。Zhu 等[12] 分别开展了完全约束下的面内压缩、填充泡沫边界面内压缩、圆形冲头面内压痕等 3 种不同类型的实验，考察了锂离子电池在平面压缩下的变形模式，定量的分析了电池的载荷及应力应变响应，阐释了电池在平面压缩下的渐进折叠机制。Pan 等[13] 借助实验和分析方法，探讨了软包锂离子电池在冲击载荷下变形破坏和失效过程，建立了精细化锂离子电池有限元模型，研究了冲击载荷下锂离子电池内部的短路机理，分析了电池单元内部材料的动态变形过程。Zhu 等[14] 建立了软包锂离子电池精细化有限元模型，通过对集中典型载荷工况的数值模拟，摸清了锂离子电池在受到外部载荷时电池内部结构的变形形式和失效顺序，发现电池单体的破坏过程分为 2 个典型的阶段。Chen 等[15] 利用落锤试验机分别开展了圆形压头和平形压头对软包锂离子电池的冲击损伤差异性，讨论了加载速度和电池充电状态对锂离子电池性能的影响。Zhang 等[16] 研究了 18 650 圆柱形电池外壳在不同加载方式下的塑性属性和断裂形式，发现在某些加载方式下，电池外壳的变形模式与电池整体的变形很相似，说明外壳在某些加载方式下起到了主要抵抗变形的作用。而 Wierzbicki 等[17] 在对 18 650 圆柱形单体电池进行局部冲击破坏时，发现电池内芯起主要的承载作用，电池外壳和端帽只起辅助作用。Sahraei 等[18] 建立了圆柱形电池模型，对电池包的冲击响应进行了仿真分析，发现在冲击过程中电池最容易受到损坏的部位是电池之间的连接处。Li 等[19-21] 和 Zhou 等[22] 研究了锂离子电池隔膜材料、电池各电极材料在动态加载下的应变率损伤效应及失效行为，同时基于多场分析方法研究了锂离子电池在机械滥用条件下的内短路和热失控行为机理及其机械电化学耦合损伤失效情况，解释了机械载荷作用下电池的电化学退化机制。2017 年，Olivares[23] 指出无人机电池作为不稳定部件在受到飞机撞击后极有可能发生爆炸或燃烧风险，同时也划分了锂离子电池 3 层级的着火风险等级。郭亚周等[24] 基于落锤冲击实验方法开展了无

人机用软包锂离子电池在冲击载荷下的实验测试，对比研究了不同电量电池单体的冲击安全性，分析了不同冲击速度/能量下电池内部电压及温度的变化规律。Meng 等[25] 研究了飞机前缘结构与无人机之间的碰撞安全性，研究发现了飞机前缘结构在与无人机撞击时，无人机锂离子电池作为潜在着火危险源可能对飞机飞行安全造成严重威胁。刘新华等[26] 开展了落锤冲击无人机锂离子电池实验，研究了不同落锤能量下锂离子电池损伤严重性，初步揭示了机械冲击载荷诱发锂离子电池包热失控的电化学响应规律。

综上所述，轻型消费级无人机运行场景复杂，特别是当无人机与地面车辆或其他飞行器高速撞击时，所带来的瞬时高能量冲击导致了锂离子电池极有可能产生爆炸或燃烧。目前，有关软包锂离子电池动态冲击研究更多的是基于标准实验方法开展的准静态或低速、低能量冲击测试与分析，针对无人机碰撞场景下的高速、高能量冲击研究则相对较少。基于此，本文中利用落锤冲击装置和高速气炮，开展软包锂离子电池在高能量加载下的面内和面外冲击实验，研究不同冲击载荷形式下锂离子电池碰撞响应的差异性，分析不同电量下锂离子电池高速冲击着火特性，基于高速摄像系统装置观察软包锂离子电池高速撞击下的变形模式，找出典型无人机软包锂离子电池在不同撞击速度下的变形响应模式，以期为未来软包锂离子电池安全防护提供数据支撑。

1　试　件

选用某款轻型消费级无人机锂离子电池为试件，如图 1 所示，该锂离子电池包括聚碳酸酯塑料外壳、4 个袋装软包锂离子电池单体串联而成的电池组以及内部一些其他电路板等部件，其中软包电池单体主要由多种材料复合轧制而成的堆叠结构、电解液以及铝制复合外包膜组成，堆叠结构主要由阳极、阴极以及隔膜组成，阴极由涂覆有活性材料的铝箔构成，阳极由涂覆有石墨的铜箔构成，隔膜是微孔聚丙烯材料。所选的电池试件基本性能如表 1 所示。如图 1(a) 中坐标系所示，电池采用面内和面外 2 种加载方式，其中载荷在 X 方向上加载传递则为面内加载方式，在 Z 方向上加载传递则为面外加载方式。



(a) Complete lithium battery　　(b) Battery shell　　(c) Battery unit components and composition

图 1　实验用锂离子电池

Fig. 1　Lithium-ion batteries used in experiments

表 1　实验用锂离子电池参数

Table 1　Parameters of lithium-ion batteries used in experiments

电池类型	标称电压/V	充电限制电压/V	尺寸/mm	质量/g
电池单体	3.85	4.40	65.0×45.0×8.5	61.5
整颗电池	15.40	17.60	97.0×60.0×43.0	294.0

2　实验装置

2.1　落锤冲击实验装置

采用落锤冲击实验装置开展软包锂离子电池圆柱面冲击挤压实验，落锤冲击实验装置如图 2 所示，g 为重力加速度。实验中用到的主要设备有锂离子电池实验件、落锤机构、电磁锁、测力平台(载荷传感器)、高速摄像机等，其中落锤机构包括吊篮、配重块和压头，吊篮和压头总质量为 21.17 kg，配重块质量为 10 kg。

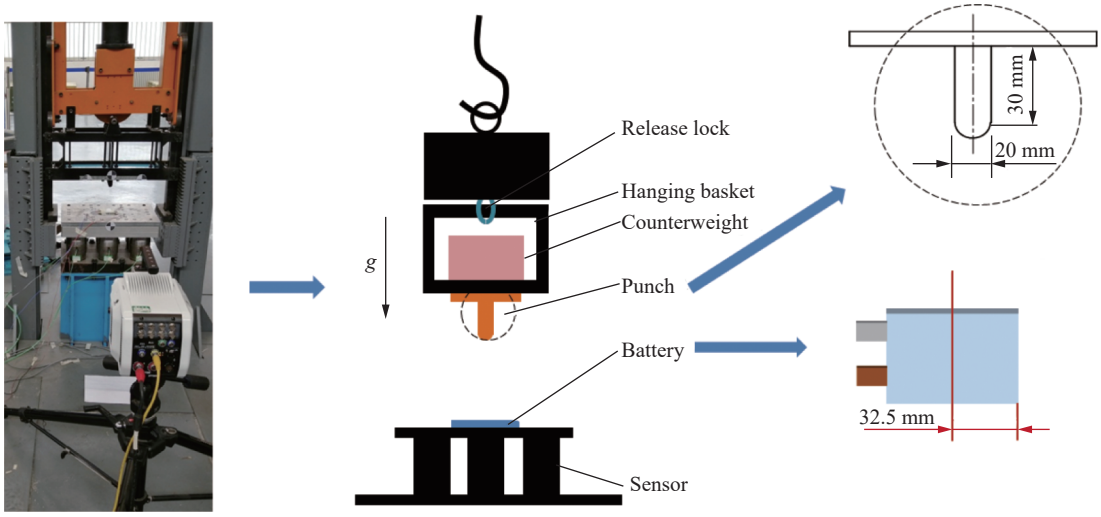


图 2　落锤冲击实验装置

Fig. 2　Drop-weight impact experimental device

锂离子电池面内冲击压缩实验的测试项目主要包括冲击载荷、锂离子电池宏观变形响应、着火爆炸响应等。冲击载荷由测力平台的载荷传感器测量，传感器采样率为 10 kHz；冲击能量和冲击速度由落锤机构的质量和落锤机构的初始下落高度决定，采用保持落锤机构质量不变、改变落锤机构下落高度的方式来调整冲击能量。实验过程中，将锂离子电池试件放置在测力平台上，并调整位置使压头对准锂离子电池中间位置，再由电磁起吊装置将落锤机构提升至目标高度。各个系统准备完毕好后，由电磁锁释放落锤机构，自由落体跌落撞击电池实验件，同步触发各测试子系统，并在实验件完全静止后结束本次实验。面外冲击实验中高速摄像机设定帧率为 2 000 Hz，实验测试工况如表 2 所示。

表 2　面外落锤冲击实验工况

Table 2　Conditions for out-of-plane drop-weight impact experiments

试件	电池充电状态/%	冲击能量/J
整颗电池D1	0	200
整颗电池D2	50	200
整颗电池D3	100	200

2.2　高速气炮冲击实验装置

基于高速气炮装置开展软包锂离子电池面内冲击实验，高速气炮冲击实验装置如图 3 所示。高速

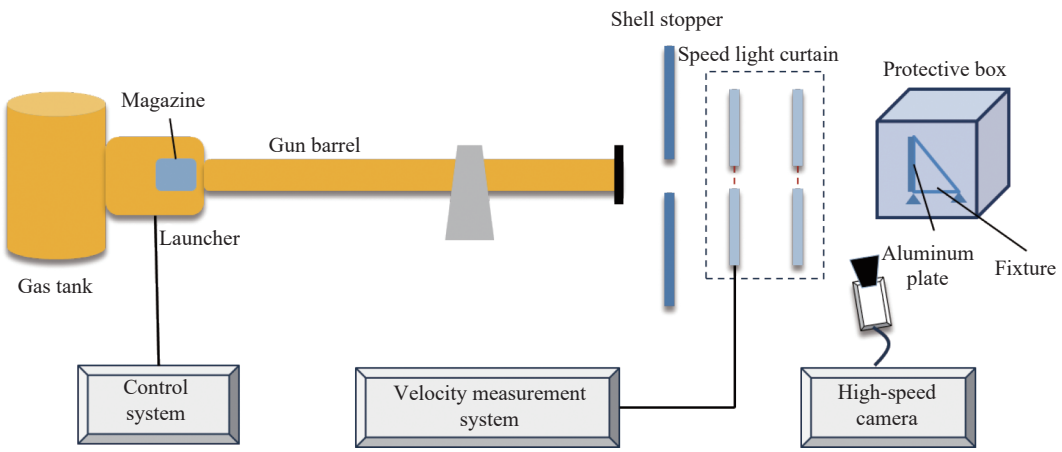


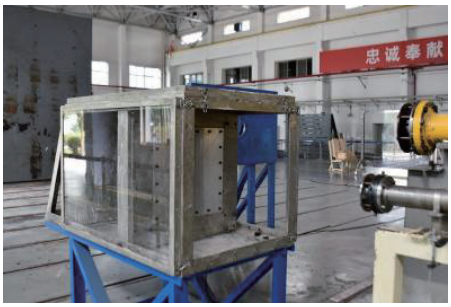
图 3　高速气炮冲击实验装置

Fig. 3　High-speed gas-gun impact experimental device

气炮冲击实验装置主要是由储气罐、发射装置、控制系统、激光测速系统、高速摄像系统、数据记录仪等设备构成。如图 4 所示，实验过程中锂离子电池放置在经过设计制备的弹托内，锂离子电池速度由储气罐内的气压控制，由发射装置发射锂离子电池，锂离子电池发射后撞击在铝板上。铝板被安装在电池防爆燃防护箱内，铝板背部撞击点附近径向和横向共布置 6 个应变片，如图 5 所示。面内冲击实验中高速摄像机设定帧率为 2 000 Hz，实验测试工况如表 3 所示。

图 4　电池及弹托

Fig. 4　Battery and sabot



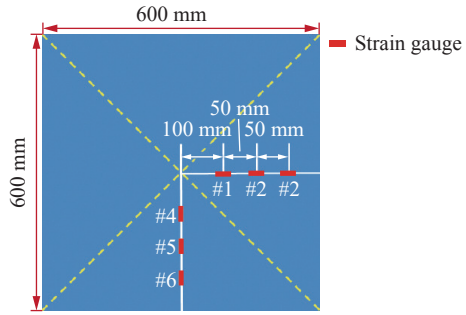


图 5　防护箱及应变片布置

Fig. 5　Protective box and layout of strain gauges

表 3　面内气炮冲击实验工况

Table 3　Conditions for in-plane gas gun impact experiments

试件	电池充电状态/%	铝板厚度/mm	冲击能量/J	冲击速度/
整颗电池D4	0	5	1 062	85
整颗电池D5	50	5	1 062	85
整颗电池D6	100	5	1 062	85
整颗电池D7	100	2	201	37
整颗电池D8	100	2	368	50
整颗电池D9	100	2	529	60
整颗电池D10	100	2	1 062	85

3　实验结果及分析

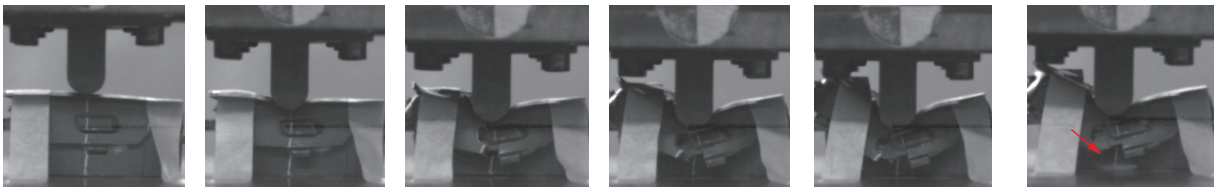
3.1　面内冲击与面外冲击变形响应的差异

针对锂离子电池面内冲击和面外冲击的差异性，选取了电池 100% 充电状态下的带外壳的整颗电池分别进行了落锤冲击和气炮冲击实验，其中气炮冲击实验速度为 37 m/s，冲击对象为 2 mm 厚铝板，折合冲击能量为 201 J，落锤冲击实验能量设定为 200 J，两者冲击能量可近似看作一致。

对于锂离子电池面外冲击，锂离子电池受落锤面外冲击变形响应过程见图 6，面内气炮冲击实验响应过程见图 7，可以看出，当冲击能量为 200 J 时，面外与面内冲击响应时间基本一致，均在 10 ms 左右，两者撞击响应过程则具有一定的差异性。

撞击初始阶段，面内冲击落锤冲头接触锂离子电池上半部壳体，面外气炮冲击锂离子电池头部开始接触被撞击铝板；撞击 2.5 ms 时，面外落锤撞击锂离子电池上部外壳，上半部外壳与下半部外壳迅速脱

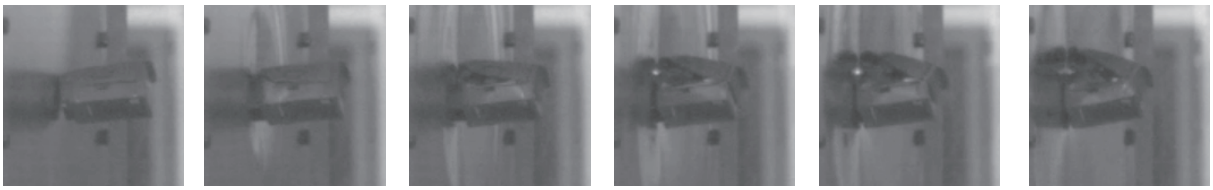
扣，上半部电池壳两端开始发生翘曲。与面外落锤冲击相比，该时刻下面内气炮冲击下锂离子电池撞击铝板，铝板被撞击部位迅速发生塑性变形后形成凹坑，铝电池在撞击瞬间前端上下外壳脱扣，上下壳同时发生塑性变形，并且互相之间开始呈现以开口运动。



(a) 0 ms　(b) 2.5 ms　(c) 5.0 ms　(d) 7.5 ms　(e) 10.0 ms　(f) 10.0 ms

图 6　面外落锤冲击实验锂离子电池变形响应过程

Fig. 6　Deformation response process of in out-of-plane drop-weight experiment



(a) 0 ms　(b) 2.5 ms　(c) 5.0 ms　(d) 7.5 ms　(e) 10.0 ms　(f) 12.5 ms

图 7　面内气炮冲击实验锂离子电池变形响应过程

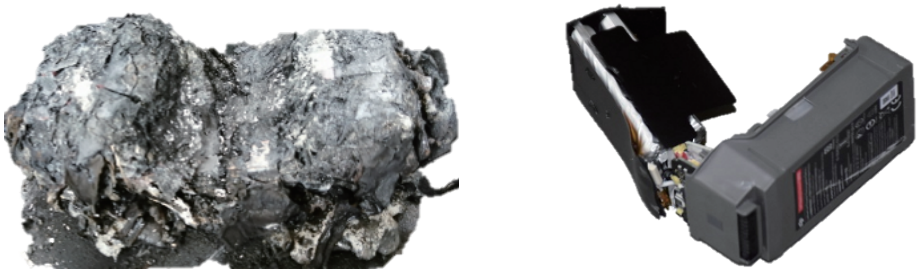
Fig. 7　Deformation response process of in in-plane gas gun impact experiment

撞击 5.0 ms 时，面外冲击落锤继续向下运动，锂离子电池上半部外壳在受到撞击位置发生翘曲开裂破坏，从落锤下降位置可以看出锂离子电池内部 4 个电池单体最上部分单体由于落锤冲击挤压作用开始发生破坏，落锤冲击期间有粉末物质溅出。该时刻下面内气炮冲击锂离子电池持续撞击铝板，被撞击铝板变形量进一步变大，锂离子电池上半部外壳与下半部外壳在冲击方向上持续脱扣，上半部外壳向上翘曲发生塑性变形，此时可以看到锂离子电池内部单体，由于锂离子电池前端有连接 4 个单体的电路板，同时电路板与前部外壳之间存有空隙，因此此时虽然外壳发生明显变形，但是电池单体并未与面板相撞。

撞击 7.5 ms 时，面外冲击落锤能量仍未被完全吸收，持续向下撞击，此时电池外壳断裂长度增大，电池外壳继续发生翘曲，此时最上层电池单体完全被挤压破坏，落锤开始与第 2 层电池单体接触，冲击过程中持续有粉末物质溅出。该时刻下面内气炮冲击锂离子电池变形继续变大，上半部外壳与下半部分外壳开口增大，此时外壳与电池内部电路板之间空隙被压实，4 个单体开始在面内方向上撞击铝板。

撞击 10.0 ms 时，面内冲击落锤达到最低点位置，锂离子电池上半部外壳达到最大变形，外壳两侧几乎完全断裂，上半部分外壳发生严重弯曲变形，此时第 2 层电池单体逐渐开始发生破坏，落锤冲击基本结束，锤头开始发生反弹。此时面内冲击气炮能量被完全吸收，锂离子电池发生最大程度变形，上半部外壳与下半部外壳完全脱扣，开始逐渐分离，此时 4 个电池单体发生了部分挤压变形，但总体变形量不大。

如图 8(a) 所示为 100% 充电状态电池在 200 J 能量冲击后的整体形貌，从图 6 (f) 可知当落锤冲击发生后 10 ms 后，电池单体内部发生化学反应，开始有烟雾从电池内部冒出，随后电池内部反应愈发剧烈，逐渐有明火产生，火花携带大量粉末状物质从内部喷出后电池开始发生剧烈燃烧，最后完全烧毁。如图 8(b) 所示为面内气炮冲击后电池形貌，可以看出，无人机锂离子电池上半部壳体受撞击后与下半部壳体完全分离，下半部壳体发生弹性后恢复，电池包上部 2 颗电池单体由于撞击作用影响与下部电池单体脱粘，电池单体与电路板之间的连接尚完好，电池单体的撞击端明显发生明显变形，但是整颗电池整体完好，电池有轻微发热，被撞铝板变形相对较小，铝板结构上没有残留黑色物质，电池在撞击过程中没有物质泄露。



(a) Out-of-plane drop-hammer impact　　(b) In-plane gas-gun impact

图 8　100% 充电状态电池在 200 J 冲击后的形貌

Fig. 8　Morphologies of batteries with 100% state of charge after impact of 200 J

综上所述，当锂离子电池分别承受面内冲击和面外冲击时，面外落锤冲击时整个过程中撞击端外壳卡扣、自身塑性变形以及电池单体的挤压变形作为主要的能量吸收单元，能量大部分被撞击端电池单体所吸收，电池单体在外部铝封皮破损后内，电池电解液从内部流出，短时间内电池逐渐冒烟，热量在电池内部积聚，造成电池内部热量逐步升高发生热失稳后活性材料燃耗，进而电池发生爆燃；面内气炮冲击时由于电池一般在面内方向上电池单体连接电路板之间与电池外壳有一定空间距离，因此当电池在高速撞击到被撞物时，大部分能量都被外壳变形所吸收，而正是因为电池单体与外壳之间的间距存在，使得冲击能量能够获得较大缓冲，缓冲后 4 个电池单体同时承受面内载荷，尽管有一定的挤压，但是并未发生着火。因此，当锂离子电池承受面外冲击载荷时着火风险高于面内冲击。

3.2　电量对锂离子电池力学响应特性的影响

针对不同电量的电池碰撞进行了研究，选取了 3 种不同充电状态下的整颗电池分别进行了落锤冲击实验和气炮冲击实验，电池的充电状态分别为 0%、50% 和 100%，落锤能量均为 200 J，气炮冲击速度为 85 m/s，折算冲击能量为 1 062 J，面外落锤冲击场景下的不同电量电池撞击后变形和失效响应如图 9 所示，面内气炮冲击场景下的不同电量电池撞击后变形和失效响应如图 10 所示。

(a) 0%　　(b) 50%　　(c) 100%

图 9　面外落锤冲击下不同电量电池受碰撞的形貌

Fig. 9　Morphologies of batteries with different states of charge after out-of-plane drop-hammer impact

(a) 0%　　(b) 50%　　(c) 100%

图 10　面内气炮冲击条件下电池受碰撞响应

Fig. 10　Morphologies of batteries with different states of charge after under in-plane gas-gun impact

在 200 J 冲击能量的面外落锤冲击实验中，电量为 0% 的电池并未爆炸、燃烧等相应的电化学行为，仅在实验现象伴随有刺鼻性气味；电量为 50% 的电池则在撞击后迅速冒烟，有着火趋势，但是后续并未造成电池着火；电量为 100% 的电池在受撞击后快速冒烟并伴有明火出现，热量进一步积聚后内部活性

材料以火苗状被喷出电池外，进而导致电池迅速着火，电池着火之后内部 4 个电池单体以及电池上下壳均被焚毁，损坏极为严重。不同电量电池在 200 J 能量落锤冲击下的力/电压响应如图 11 所示。从载荷响应模式上来看，整颗电池在受到落锤撞击后撞击载荷主要呈现“驼峰式”响应，这是由于整颗电池不仅包括电池单体，同时还包括电池壳体。当落锤接触电池上壳时，撞击载荷开始响应，此时逐渐形成第一个撞击载荷峰值，随着落锤继续向下运动，电池上壳自身结构以及与下壳之间的连接关系被破坏，电池上壳失去承载能力，导致了撞击载荷下降，随后落锤继续撞击至内部堆叠的电池单体，进而形成第 2 个撞击载荷峰值，并最终呈现出“驼峰式”载荷响应状态，不同电量电池在受到相同能量撞击后再撞击力曲线趋势和峰值上都具有较好一致性，并未因为电量不同而呈现

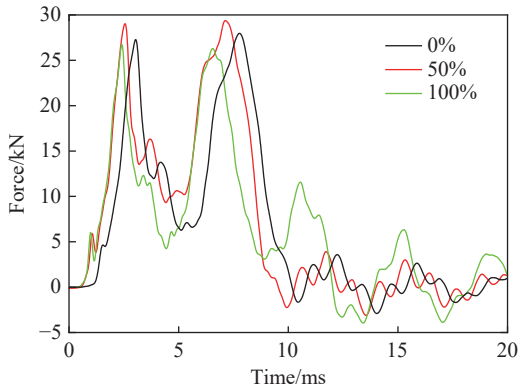


图 11　不同电量电池受落锤撞击力随时间的变化

Fig. 11　Impact force of punch on batteries with different capacities varying with time

在 85 m/s 冲击速度的面内气炮冲击实验中，电池芯产生巨大的变形，且电池芯内部的电路结构都可以看到，但是并没有明显的燃烧现象，由于铝板较厚，铝板未产生明显肉眼可见的变形，但是铝板上有大量残留的黑色物质，说明电池在碰撞的时候有物质泄漏，电池外壳在撞击后呈现花瓣式分裂破坏吸收大量能量，电量为 0% 的电池内部几乎没有活性化学物质，所以内部并未发生短路，没有发热发生燃烧，同时电池也未产生发热现象；电量为 50% 的电池冲击过程响应则与电量为 0% 的电池类似，电池壳体在撞击过程中被完全破坏损毁，但是由于电池电量并未不足，电池内化学物质不足以使得电池发生燃烧反应，但电池单体表面明显有温度升高，电池整体处于电化学不稳定状态；电量为 100% 的电池在撞击过程中被破坏成几片后迅速产生冒烟着火的现象，后灭火毯掩盖但并未降低火势，电池仍剧烈燃烧，燃烧后的电池呈黑色焦炭状。不同电量电池撞击铝板后典型部位应变曲线对比见图 12，可以看出，3 种电量的电池在相同撞击工况下的力学动态响应基本一致。

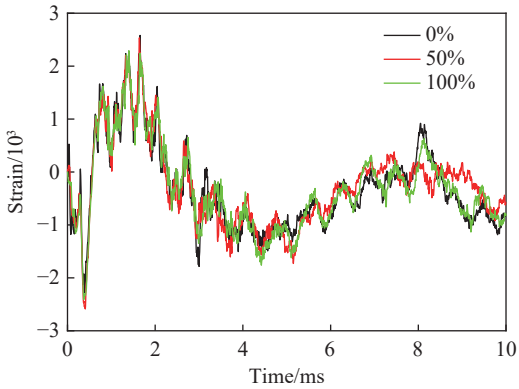


图 12　不同电量电池气炮冲击铝板典型部位应变

Fig. 12　Typical strain of aluminum plate impacted by gas cannon in different electric quantity

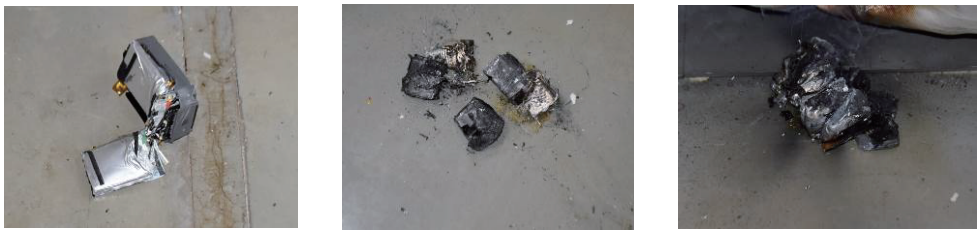
综上所述，锂离子电池电量与其碰撞着火特性具有强相关关系，电池锂离子电池本身的力学响应受自身材料及结构特征影响，电池电量并不会影响电池的机械力学碰撞响应情况。本文中所采用的 50% 电量锂离子电池在以 85 m/s 速度撞击 5 mm 厚铝板时发生起火爆炸的概率较低。

3.3　冲击速度对锂离子电池着火特性的影响

选取了 3 种不同冲击速度分别进行了 100% 电量电池气炮冲击实验，冲击速度分别为 50、60 和 85 m/s，电池在不同速度气炮冲击下的碰撞响应情况如图 13 所示，不同速度气炮冲击下铝板的碰撞响应情况如图 14 所示。

从图 13 可以看出，当电池以 50 m/s 的速度撞击铝板时，电池整体在撞击后首先发生上下外壳脱扣，上层电池单体脱粘飞出，产生较大变形，电池外壳在受撞击后发生塑性变形，电池整体外形保持相对完好，并未产生爆燃现象。当电池以 60 m/s 的速度撞击铝板时，电池首先分裂成几个部分，发生了严重破

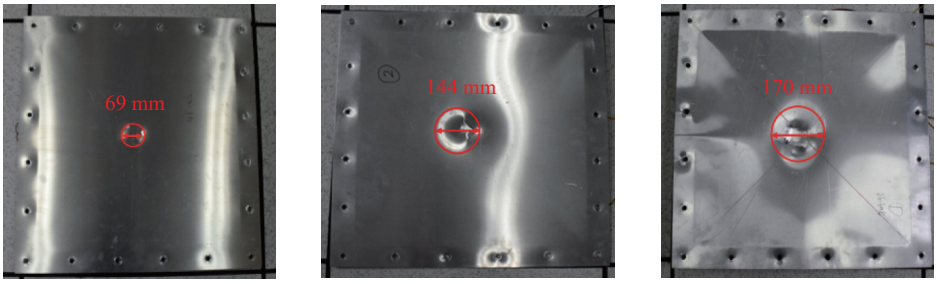
坏后电池内部化学物质发生剧烈的电化学反应，进而急速冒烟起火并伴之有爆燃，电池外壳少部分被烧毁，大量电池芯裸露在外，底部电池单体尚能看出完整电池形态。当电池以 85 m/s 的速度撞击铝板时，电池解体破碎后迅速燃烧，4 颗电池单体均着火严重，电池单体外裹壳体全部被烧毁。



(a) 50 m/s　　(b) 60 m/s　　(c) 85 m/s

图 13　不同速度电池撞击 2 mm 厚铝板后的形貌

Fig. 13　Response of batteries impacting 2-mm-thickness aluminum plate at different velocities



(a) 50 m/s　　(b) 60 m/s　　(c) 85 m/s

图 14　2 mm 厚铝板受不同速度电池撞击后形貌

Fig. 14　Response of 2-mm-thickness aluminum plate to battery impact at different velocities

从图 14 可以看出，当电池以 50 m/s 的速度撞击 2 mm 厚铝板时，铝板上并未有黑色物质，表明电池虽然在撞击后发生解体，但是电池单体外部铝包膜并未受到损坏，电池整体相对完好，撞击 2 mm 厚铝板后凹坑水平最大宽度为 69 mm，铝板变形相对较小；当电池以 60 m/s 的速度撞击铝板时，铝板上残留有黑色电解物质，铝板变形区域面积进一步增大，撞击中心凹坑水平最大宽度为 144 mm；当电池以 85 m/s 的速度撞击铝板时，铝板上残留更多黑色电解物质，电池单体在撞击过程中即发生破裂，铝板在固支边范围内发生整体塑性变形，整块铝板被撞击成拱状，撞击中心凹坑水平最大宽度进一步增大为 170 mm。

2 mm 厚铝板受不同冲击速度电池撞击后 #1 应变片部位的应变数据如图 15 所示，可以看出，当电池撞击 2 mm 厚铝板后，85 m/s 撞击下 #1 应变片位置应变峰值为 3 302.7，60 m/s 撞击下对应应变片位置的应变峰值为 3 063.3，50 m/s 撞击下对应变片位置的应变峰值为 1 458.2。以上分析可以看出，在锂离子电池气炮冲击实验中，60 m/s 速度撞击能量是 50 m/s 速度撞击的 1.44 倍，撞击结果显示 60 m/s 速度撞击凹坑尺寸是 50 m/s 撞击工况的 2.09 倍，典型部位应变是 50 m/s 撞击工况的 2.1 倍；85 m/s 速度撞击能量是 50 m/s 速度撞击的 2.89 倍，撞击结果显示 85 m/s 速度撞击凹坑水平最大宽度是 50 m/s 撞击工况的 2.46 倍，典型部位应变则是 50 m/s 撞

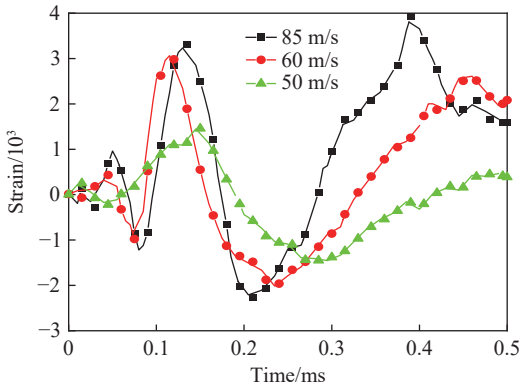


图 15　不同速度撞击下铝板受电池撞击典型部位应变随时间的变化

Fig. 15　Strain-time curves of typical parts at aluminum plates impacted by batteries at different velocities

击工况的 2.26 倍。除此之外，当电池电量为 100% 时，本文中所选择的轻型无人机锂离子电池以 50 m/s 撞击 2 mm 厚铝板后燃烧风险相对较低。

4　结　论

利用落锤冲击装置和高速气炮，开展了软包锂离子电池在高能量加载下的面内和面外冲击实验，研究了不同冲击载荷形式下锂离子电池的碰撞响应差异性，分析了不同电量锂离子电池高速冲击着火特性，基于高速摄像系统装置观察了软包锂离子电池高速撞击下的变形模式，找出了典型无人机软包锂离子电池撞击安全速度阈值，得到以下主要结论。

(1) 锂离子电池承受面外冲击载荷时着火风险远高于面内冲击，适当提高电池外壳的强度及增大外壳与电池单体之间的空间距离能够降低锂离子电池受撞击着火风险。

(2) 锂离子电池碰撞着火特性与其电量具有强相关关系，锂离子电池本身的力学响应主要受自身材料及结构影响，电池电量并不会影响电池的机械力学碰撞响应。

(3) 本文中所采用的锂离子电池样本在电池电量为 100% 时以 50 m/s 的速度撞击铝板以及电池电量为 50% 以下时以 85m/s 速度撞击铝板后燃烧风险均相对较低。

参考文献：

[1] CHEN X, ZOU Q, BAI J, et al. An information integration technology for safety assessment on civil airborne system [J]. Aerospace, 2024, 11(6): 459. DOI: 10.3390/AEROSPACE11060459.

[2] ZHANG H H, TIAN T, FENG O G, et al. Research on public air route network planning of urban low-altitude logistics unmanned aerial vehicles [J]. Sustainability, 2023, 15(15): 12021. DOI: 10.3390/SU151512021.

[3] FAN J J, FAN L L, NI Q H, et al. Perception and planning of intelligent vehicles based on BEV in extreme off-road scenarios [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(4): 4568–4572. DOI: 10.1109/TIV.2024.3392753.

[4] 余莎莎, 陈艺君, 张学军. 城市低空场景下无人机运行对地风险量化评估 [J]. 北京航空航天大学学报, DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0244.
YU S S, CHEN Y J, ZHANG X J. Urban low scenario drone operation of quantitative risk assessment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0244.

[5] 韩鹏, 赵嶷飞, 刘宏. 无人机地面撞击风险评估体系构建及趋势展望 [J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(1): 40–47. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5590.2021.01.008.
HAN P, ZHAO Y F, LIU H. Assessment system construction and trend foresight of UAV ground impact risk [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2021, 39(1): 40–47. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5590.2021.01.008.

[6] XIA C Y, YANG C R, XUE K, et al. A conflict risk analysis of MAV\UAV Flight in shared airspace [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2021, 2021(1): 1692896. DOI: 10.1155/2021/1692896.

[7] 郭亚周, 刘小川, 郭军, 等. 微型无人机和鸟体撞击飞机风挡玻璃对比实验 [J]. 实验力学, 2020, 35(1): 167–173. DOI: 10.7520/1001-4888-18-111.
GUO Y Z, LIU X C, GUO J, et al. Comparative experiment of aircraft windshield glass subjected to micro-UAV and bird body impact [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(1): 167–173. DOI: 10.7520/1001-4888-18-111.

[8] MEIER J D. Material characterization of high-voltage lithium-ion battery models for crashworthiness analysis [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2013.

[9] ZHANG X W, SAHRAEI E, WANG K. Deformation and failure characteristics of four types of lithium-ion battery separators [J]. Journal of Power Sources, 2016, 327: 693–701. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.078.

[10] 朱瑞卿, 胡玲玲, 周名哲. 锂离子电池多次冲击下的失效模式及损伤机制 [J]. 固体力学学报, 2023, 44(6): 795–804. DOI: 10.19636/j.cnki.cjsm42-1250/o3.2023.032.
ZHU R Q, HU L L, ZHOU M Z. Failure modes and damage mechanisms of lithium-ion batteries under repeated impacts [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2023, 44(6): 795–804. DOI: 10.19636/j.cnki.cjsm42-1250/o3.2023.032.

[11] JIA Y K, YIN S, LIU B H, et al. Unlocking the coupling mechanical-electrochemical behavior of lithium-ion battery upon

dynamic mechanical loading [J]. Energy, 2019, 166: 951–960. DOI: 10.1016/j.energy.2018.10.142.

[12] ZHU J E, KOCH M M, LIAN J H, et al. Mechanical deformation of lithium-ion pouch cells under in-plane loads: Part I: experimental investigation [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(9): 090533. DOI: 10.1149/1945-7111/ab8e83.

[13] PAN Z X, LI W, XIA Y. Experiments and 3D detailed modeling for a pouch battery cell under impact loading [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101016. DOI: 10.1016/j.est.2019.101016.

[14] ZHU J E, LI W, WIERZBICKI T, et al. Deformation and failure of lithium-ion batteries treated as a discrete layered structure [J]. International Journal of Plasticity, 2019, 121: 293–311. DOI: 10.1016/j.ijplas.2019.06.011.

[15] CHEN X P, WANG T, ZHANG Y, et al. Dynamic mechanical behavior of prismatic lithium-ion battery upon impact [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(13): 7421–7432. DOI: 10.1002/er.4774.

[16] ZHANG X W, WIERZBICKI T. Characterization of plasticity and fracture of shell casing of lithium-ion cylindrical battery [J]. Journal of Power Sources, 2015, 280: 47–56. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.077.

[17] WIERZBICKI T, SAHRAEI E. Homogenized mechanical properties for the jellyroll of cylindrical lithium-ion cells [J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 467–476. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.04.135.

[18] SAHRAEI E, KAHN M, MEIER J, et al. Modelling of cracks developed in lithium-ion cells under mechanical loading [J]. RSC Advances, 2015, 5(98): 80369–80380. DOI: 10.1039/C5RA17865G.

[19] LI H G, GU J H, PAN Y J, et al. On the strain rate-dependent mechanical behavior of PE separator for lithium-ion batteries [J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 194: 105079. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.105079.

[20] LI H G, GU J H, ZHOU D, et al. Rate-dependent damage and failure behavior of lithium-ion battery electrodes [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 303: 110143. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110143.

[21] LI H G, ZHOU D, ZHANG M H, et al. Multi-field interpretation of internal short circuit and thermal runaway behavior for lithium-ion batteries under mechanical abuse [J]. Energy, 2023, 263: 126027. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126027.

[22] ZHOU D, LI H G, LI Z H, et al. Toward the performance evolution of lithium-ion battery upon impact loading [J]. Electrochimica Acta, 2022, 432: 141192. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.141192.

[23] Olivares G. FAA sUAS COE task A3 UAS airborne collision hazard severity evaluation [R]. Washington: FAA, 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.30840.08968.

[24] 郭亚周, 刘小川, 白春玉, 等. 轻小型无人机锂离子电池在冲击载荷下机械/电化学耦合失效特性试验 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 14002–14010. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.31.049.
GUO Y Z, LIU X C, BAI C Y, et al. Mechanical/electrochemical coupling failure characteristics tests of light and small UAVs lithium battery under impact load [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 14002–14010. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.31.049.

[25] MENG X H, SUN Y J, YU J Y, et al. Dynamic response of the horizontal stabilizer during UAS airborne collision [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 126: 50–61. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.11.015.

[26] 刘新华, 郭斌, 何瑢, 等. 轻型无人机电池动态冲击性能研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(2): 177–186. DOI: 10.3901/JME.2023.02.177.
LIU X H, GUO B, HE R, et al. Research on dynamic impact performance of light-UAV battery [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(2): 177–186. DOI: 10.3901/JME.2023.02.177.

(责任编辑　张凌云)