

锂电池运输包装设计与跌落仿真分析

李志强^{a,b}, 田洋洋^a, 刘随强^a

(陕西科技大学 a.轻工科学与工程学院 b.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要:目的 文中以深圳市某科技公司新型动力锂离子电池为研究对象,为其设计缓冲运输包装。方法 结合相关测试标准运用仿真软件 ANSYS Workbench 对锂电池及其包装件进行跌落仿真分析,并结合跌落试验结果以验证仿真模型的可靠性。结果 裸机跌落时,外壳等效应力最大值为 720.41 MPa,超过硬质铝合金的许用应力 325 MPa,外壳将会发生破裂;电芯的等效应力最大值为 363.4 MPa,超过铝的许用应力 280 MPa,可导致电芯损毁;锂离子电池运输包装件跌落仿真结果显示,外壳、电芯、散热板、PCB 板等各部件的最大等效应力值较裸机跌落时分别降低了 73.66%、39.82%、38.65%、81.70%,且其等效应力的最大值均未超过对应材料的屈服强度。结论 综合变形云图及实验结果,采用 EPP 泡沫和 BC 瓦楞纸箱的锂离子电池运输包装结构具有较好的防护效果,能够满足抗冲击强度要求。

关键词: 锂离子电池; 运输包装件; 跌落仿真; 危险品

中图分类号: TB482.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)21-0137-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.018

Transport Packaging Design and Drop Simulation Analysis of Lithium Battery

LI Zhi-qiang^{a,b}, TIAN Yang-yang^a, LIU Sui-qiang^a

(a. College of Bioresources Chemical & Materials Engineering b. National Experimental Teaching Demonstration Center for Light Chemistry Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to take a new power lithium battery produced by a technology company in Shenzhen as the research object and design a buffer transport package for such battery. According to the relevant test standards, the simulation software ANSYS Workbench was used to simulate the surface drop of the lithium battery and its package. Then, combined with the drop test results, the reliability of simulation model was verified. When bare battery dropped, the maximum equivalent stress of the shell was 720.41 MPa, exceeding the allowable stress of hard aluminum alloy of 325 MPa, and the shell cracked. Besides, the maximum equivalent stress of the battery core was 363.4 MPa, exceeding the allowable stress of aluminum of 280 MPa and causing damage to the battery core. The drop simulation results of the lithium battery transport package proved that the maximum equivalent stress values of the shells, cells, heat sinks, PCB boards and other components were reduced by 73.66%, 39.82%, 38.65%, and 81.70%, respectively, compared with those values generated when bare battery dropped. The maximum equivalent stress did not exceed the yield strength of the corresponding material. Comprehensive deformation cloud diagram and experimental results show that the lithium battery transport packaging structure adopting EPP foam and BC corrugated boxes has a good protective effect and can meet the requirements of impact strength.

KEY WORDS: lithium battery; transport package; drop simulation; dangerous goods

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 教育部“蓝火计划”(惠州)产学研联合创新资金项目(CXZJHZ201806)

作者简介: 李志强(1976—),男,硕士,副教授,主要研究方向为绿色包装技术。

锂电池作为一种快速发展的新能源产品,具有能量密度高、循环寿命长、对环境污染小等显著优点。近年来随着我国科技事业的发展及政策支持,目前我国是世界上排名第二的大容量锂电池生产国^[1]。危险品是易燃、易爆、有强烈腐蚀性、有毒等物品的总称,由于锂电池发热后易爆易燃的不稳定性能,因此其包装属于危险品包装范畴,相比一般产品的包装设计也具有更高的要求。

1 锂电池运输包装设计

1.1 国际危险品相关法规概述

危险品的运输及其包装受制于若干不同的国际规范,联合国(UN)关于危险品运输的建议是制订其他危险品规范的依据^[2],危险品所采取的运输方式不同,设计人员所应采取的国际法则或规章也有所不同。公路运输选择欧洲陆运协会(ADR)关于如何分类、包装、贴标签和运输危险品的操作要求;海洋运输选择《国际海运危险货物规则》(IMDG CODE);空运选择国际民用航空组织ICAO-TI或国际航空运输协会为IATA颁布的危险品规范^[3]。

1.2 锂电池包装设计方法

锂电池作为一种有易燃易爆风险的特殊产品,对包装的防护性能要求更高,通过试验的条件也更为严格,因此在进行锂电池运输包装设计时,应综合考虑产品结构及包装测试标准,选取合适的缓冲材料及尺寸后进行结构设计。该型锂离子电池的运输方式为海运出口,《国际海运危险货物规则》^[4]中将锂电池划分为第九类危险品,且运输时必须将第九类危险品锂电池专属标识印刷或以标签形式贴在外包装上^[5]。按照其危险程度,锂电池包装被划分为危险品II类包装,运输前应通过跌落高度为1.2 m的跌落试验^[6]。关于锂电池包装的设计和缓冲材料选择,王莉等^[7]、潘生林等^[8]指出,裸露的电池两极接触到其他导电体会引起短路,因此其缓冲包装须考虑绝缘防护因素,现行较为常用的方法是凹陷埋入式设计。李晓敏等^[9]指出,目前危险品常用内部缓冲包装材料为发泡塑料或瓦楞纸板、蜂窝纸板等纸制品。李明^[10]结合实际运输及管理情况,考虑运输便利性、降低成本以及防静电等因素指出,一般情况下,锂电池外包装按照内装物质量及装箱数量,应优先选择胶合板或纤维板材质。

1.3 锂电池运输包装方案设计及分析

该型号锂电池的最大外形尺寸为513 mm×352 mm×158 mm,产品质量为22 kg。锂电池产品流通途中最可能受到的冲击强度是中等冲击,根据经验估算法得到其许用脆值为70g。锂离子电池和电池组可选用的外包装

容器种类及其代码有:1-桶、3-罐、4-箱等。材料种类及其代码有:A-钢、B-铝、C-天然木、D-胶合板、F-再生木、G-纤维板、H-塑料、L-纺织品、M-多层纸等^[11]。考虑到实际运输情况和仓储条件等成本因素,此次设计的外包装选择纤维板箱(4G),缓冲内包装材料选择密度为30 kg/m³的发泡聚丙烯,为满足跌落测试中较大的跌落高度,经计算,衬垫厚度为60 mm。按照凹陷埋入式设计思路,并考虑包装结构稳定性等因素,将EPP缓冲衬垫主体结构设置为上下2个部分,将产品内嵌在缓冲材料中,并在产品凸出的结构部位做避位掏孔处理,这样既可固定产品,又能在产品受到外部载荷时起到较好的缓冲作用。

2 锂电池跌落仿真分析

研究表明,产品在流通环境中受损的主要原因为跌落冲击所造成^[12],为验证锂电池包装件在跌落工况下是否能够保护产品不受损坏,利用ANSYS Workbench中的显示动力学模块Explicit Dynamics来模拟裸机和包装件跌落试验过程并进行分析。根据《国际海运危险货物规则》,确定跌落高度为1.2 m,假设产品在跌落过程中做只受重力作用的自由落体运动且初速度为0 mm/s,重力加速度为9 806.6 mm/s²。为提高计算机的运算速度,可将跌落高度等效为1 mm,等效初速度为4 849.35 mm/s²。

2.1 锂电池运输包装设计及其三维模型导入

利用IRONCAD软件建立电池的三维模型并进行适当简化,保留主要部件为:外壳、上盖、电芯、电路保护板、散热铝板等。简化后的三维模型如图1所示。将模型文件导出成X-T格式后导入到仿真分析软件ANSYS Workbench中并进行删除圆角和切片处理^[13]。

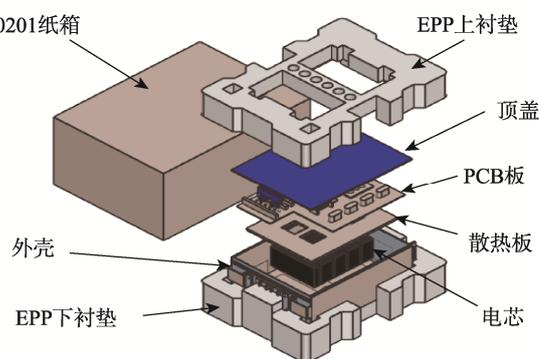


图1 简化后锂电池包装件三维模型
Fig.1 Simplified 3D model of lithium battery packaging components

2.2 材料参数定义

模型简化完成后,需要在ANSYS Workbench的前处理部分赋予各材料属性,自定义材料属性一般包

括材料密度、弹性模量、泊松比。瓦楞纸板本身为非线性材料, 但根据 ANSYS Workbench 显示动力学计算要求, 也可将其定义为各向同性材料, 弹性模量取其平均值进行计算。

缓冲衬垫 EPP 为非线性材料, 因此除了需要提供密度、弹性模量、泊松比等参数之外, 还需在材料属性 Property 中添加单轴塑性应变试验数据 Uniaxial Test Data 对 30 kg/m^3 的发泡聚丙烯材料进行静态压缩实验, 实验标准参考《GB/T 8168—2008 包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[14], 试验设备采用型号为 CMT44304 的微机控制电子万能试验机, 根据实验导出的原始数据载荷-位移曲线, 结合 Origin 绘图软件进行数据处理, 求得 EPP 的压缩应力-应变曲线如图 2 所示, 由图 2 可知, 密度为 30 kg/m^3 的 EPP, 其应力-应变曲线可以分为 3 个阶段, 即弹性阶段、屈服平台阶段和密实化阶段。线弹性阶段的图像近似一条直线, 斜率即为 EPP 的弹性模量。根据 EPP 线弹性阶段的数据点可以求出其线弹性阶段的弹性模量 $E=1.438 \text{ MPa}$ 。将实验数据有选择性的输入 55 个点 EPP 材料属性 Property 下的单轴塑性应变试验数据 Uniaxial Test Data 中, 以备后续求解。通过查阅相关资料, 得到各部件的属性见表 1。

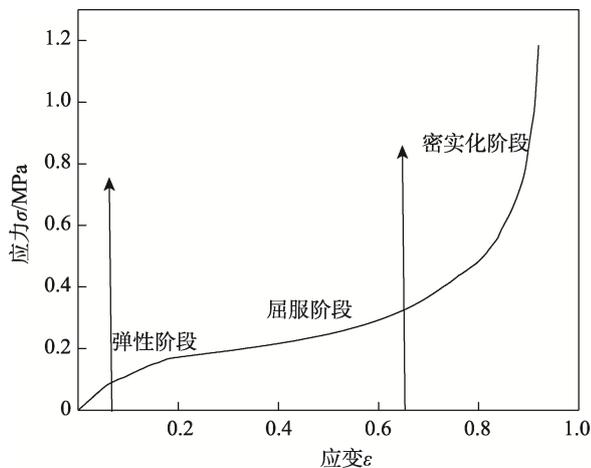


图 2 密度为 30 kg/m^3 的 EPP 应力-应变曲线
Fig.2 EPP stress-strain curve with a density of 30 kg/m^3

表 1 各部件材料参数表

Tab.1 Material parameters of each component

部件名称	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比
外壳 (铝合金)	2 850	74 200	0.36
电芯(铝)	2 700	70 000	0.33
散热板(铝)	2 700	70 000	0.33
PCB 板	4 990	2 400	0.13
EPP 衬垫	30	1.438	0.34
纸箱(BC 楞)	317	500	0.35
地面	4 078	250 000	0.28

2.3 接触类型设置和网格划分

考虑到锂电池包装件在运输过程中的实际情况, 将产品内部各部件之间的接触类型设置为 Bonded, 锂电池产品与 EPP 缓冲衬垫之间、衬垫与瓦楞纸箱之间设置为 Frictional, 摩擦系数设置为 0.2, 瓦楞纸箱与地面之间的接触类型设置为 Frictionless^[15]。模型的网格划分质量和数量将直接影响有限元求解的准确度和速度, 为减少由于网格划分不当带来的结果误差, 将不同部位采用不同的网格划分方式和大小, 将地面设置成刚性体^[16], 单元尺寸设置为 12 mm, 其余部位采用自动划分方式, 包装件总节点数为 55 073, 总网格数为 185 310, 整体网格划分结果见图 3。

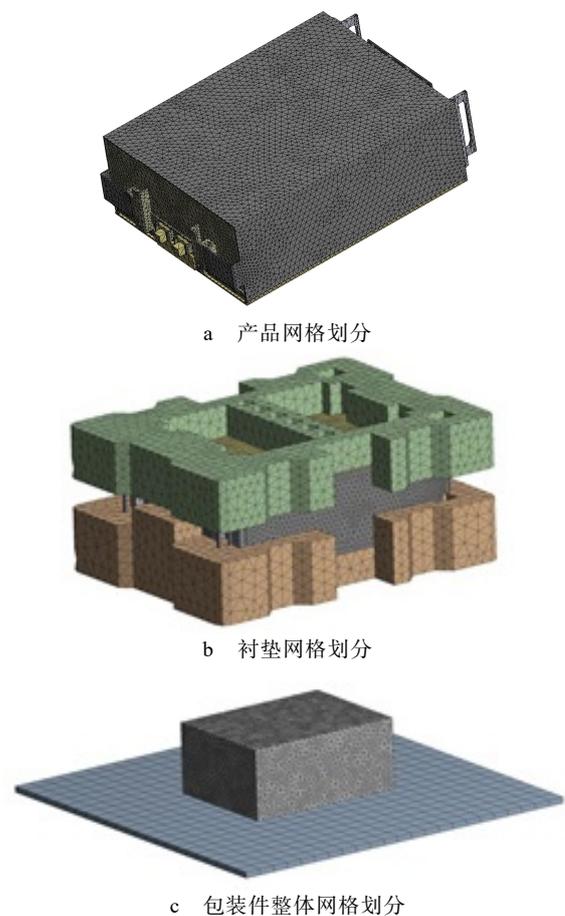


图 3 锂电池有限元模型
Fig.3 Finite element model of lithium battery

2.4 锂电池产品裸机跌落分析

对地面施加固定约束, 设置求解时间为 3 ms, 求解完成后查看锂电池各部件的等效应力值结果, 见图 4。

在锂电池裸机跌落分析的仿真结果中查看各部件等效应力的最大值: 产品外壳的上盖与把手接触的凸台部位等效应力的最大值为 720.41 MPa , 而外壳的屈服强度为 325 MPa , 因此外壳会发生破裂, 电芯上的等效应力的最大值为 363.4 MPa , 超过了铝的许用应力 280 MPa , 说明电芯会发生破损, 散热铝板等效应力

的最大值为 62.609 MPa, 小于铝的许用应力 280 MPa, PCB 电路板上等效应力的最大值为 67.798 MPa, 小于 PCB 的许用应力 130.6 MPa, 即散热铝板和 PCB 电路板在裸机跌落时等效应力的最大值均在安全范围内, 不会发生失效。所以为保障外壳和电芯在跌落过程中的安全性, 需要对锂电池产品进行缓冲包装设计。



图 4 锂电池裸机跌落等效应力云图
Fig.4 Equivalent stress cloud diagram for drop of bare lithium battery

2.5 锂电池包装件跌落分析

按照 2.4 节中的方法和初始条件设置, 对锂电池包装件进行面跌落仿真分析, 为保证碰撞结束后出现反弹阶段, 经过多次调试后, 将求解时间设置为 6 ms, 求解后查看运输包装件的等效应力云图, 见图 5。

在包装件的面落仿真过程中, 等效应力的最大值为 189.74 MPa, 远小于硬质铝合金 LY12 的许用应力 325 MPa, 电芯上的等效应力的最大值为 218.68 MPa, 小于铝的许用应力 280 MPa, 散热铝板上等效应力的最大值为 38.59 MPa, 小于铝的许用应力 280 MPa, PCB 电路板上等效应力的最大值为 12.41 MPa, 小于 PCB 的屈服强度 130.6 MPa, 因此, 锂电池包装件面跌落过程中, 各零件等效应力的最大值均小于其对应的许用应力, 不会发生损坏。根据锂电池产品裸机跌落和包装件跌落的仿真分析结果, 见表 2。

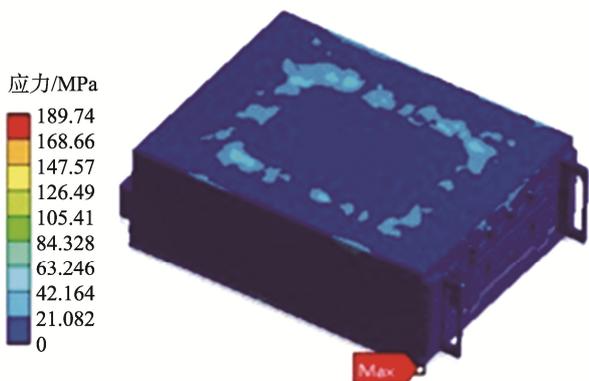


图 5 锂电池包装件跌落等效应力云图
Fig.5 Equivalent stress cloud diagram for drop of lithium battery packaging component

表 2 各部件等效应力最大值对比
Tab.2 Comparison of the maximum equivalent stress of each component

部件名称	裸机跌落等效应力最大值/MPa	包装件跌落等效应力最大值/MPa	降幅/%
外壳	720.41	189.74	73.66
电芯	363.4	218.68	39.82
散热板	62.906	38.59	38.65
电路板	67.798	12.41	81.70

3 模型的可靠性验证

在显式动力学仿真分析中, 求解结果收敛并非意味着仿真结果是正确的, 还需要进一步结合能量法与试验法进行可靠性验证。

3.1 能量法验证

在 ANSYS Workbench 的 Solution Information 中查看 Time Increment (时间步长) 信息, 一般来说, 时间步长间隔越小, 说明仿真精度越高, 求解结果越稳定。在显式动力学中, 时间步长的大小可以通过改变柔性体的网格大小来控制^[17-18], 图 6 是包装件在面跌落工况下的时间步长-循环步数变化曲线, 可以看出时间步长大小为 3.183×10^{-8} s, 几乎呈一条水平直线, 代表时间步长十分稳定, 几乎没有发生变化, 从而说明面跌落仿真结果具有一定的可靠性。

在 Solution Information 中追踪查看包装件的 Momentum Summary (动量摘要) 曲线, 如图 7 所示, 其中锂电池包装件在 X 轴、Y 轴方向上的动量和冲量都为 0。由于包装件的速度在沿 Z 轴的负方向上, 因此 Z 轴上的初始动量为负值, 随后动量开始逐渐降低, 冲量逐步增加, 直到 4.2 ms 时刻左右, 包装件系统的动量由负值转变为正值, 说明此时完成了碰撞过程, 包装件开始进入反弹阶段。

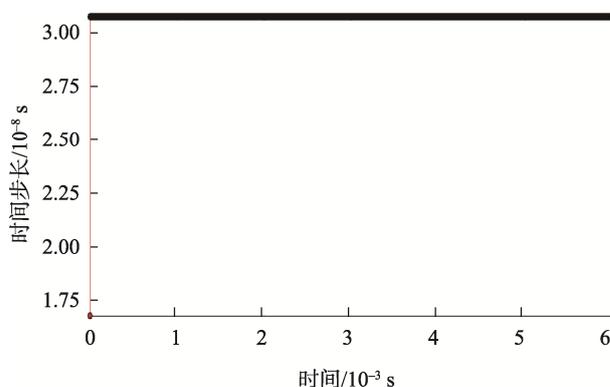


图 6 时间步长追踪曲线
Fig.6 Time step tracking curve

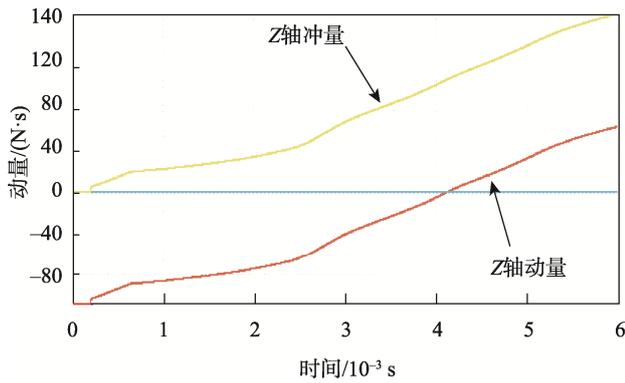


图 7 动量摘要追踪曲线
Fig.7 Momentum summary tracking curve

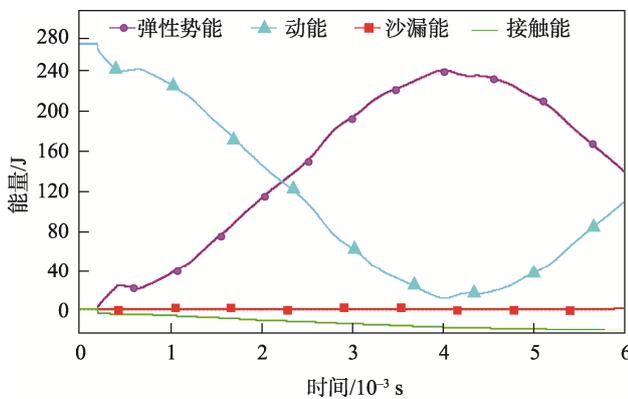


图 8 能量摘要追踪曲线
Fig.8 Energy summary tracking curve

在 Solution Output 下查看 Energy Summary (能量摘要) 曲线如图 8 所示, 其中包括 4 项能量指标: Internal Energy (弹性势能)、Kinetic Energy (动能)、Hourglass Energy (沙漏能) 和 Contact Energy (接触

能), 一般沙漏能要低于总能量的 5% 才认为仿真结果具有可靠性。由曲线可知, 0~0.27 ms 时段包装件还处于下落阶段, 弹性势能无变化, 但由于下落速度的增大, 动能曲线会出现一个小幅度的上升趋势。碰撞开始后, 缓冲衬垫开始压缩, 所以弹性势能增大, 系统动能开始降低, 变化趋势刚好相反。当其分别出现最大值和最小值时, 说明包装件和地面的碰撞完成, 开始进入反弹上升阶段, 符合实际情况。沙漏能最大值为 5.653 J, 系统总能量为 265.31 J, 求得沙漏能占总能量的 2.13%, 因此仿真结果具有一定的可靠性。

3.2 跌落试验验证

试验标准按照《国际海运危险货物规则》^[4]进行, 将跌落高度设置为 1.2 m 对锂电池运输包装件进行底面跌落试验, 本次跌落试验采用的设备为苏试生产的零跌落试验机, 型号为 CY-206, 搭配 Lansmont Test Partner3 数采设备采集试验数据, 试验过程见图 9。将加速度传感器固定在跌落面上, 采集到底面跌落工况下产品的加速度响应曲线如图 10 所示, 利用 Origin 软件对采集到的数据进行处理, 重新生成加速度响应曲线, 并将试验获取的总加速度与仿真总加速度进行对比, 如图 11 所示, 两者随时间变化的趋势几乎一样, 仿真得到的加速度响应峰值为 57.71g, 试验得到的加速度响应峰值为 63.56g, 峰值误差为 9.20%, 均未超过产品的许用脆值。考虑到锂电池仿真模型的简化和材料的等效处理, 仿真出现的误差在允许范围之内, 说明锂电池模型可靠, 仿真结果符合实际情况, 且试验结束后未发现纸箱以及衬垫内部结构有明显的变形或者开裂、破损、脱落等异常情况出现, 则可以判定此款运输包装方案防护性能良好, 能够满足跌落工况下的防护要求。



a TP3 数采设备



b 包装件跌落试验

图 9 跌落测试过程
Fig.9 Drop test process

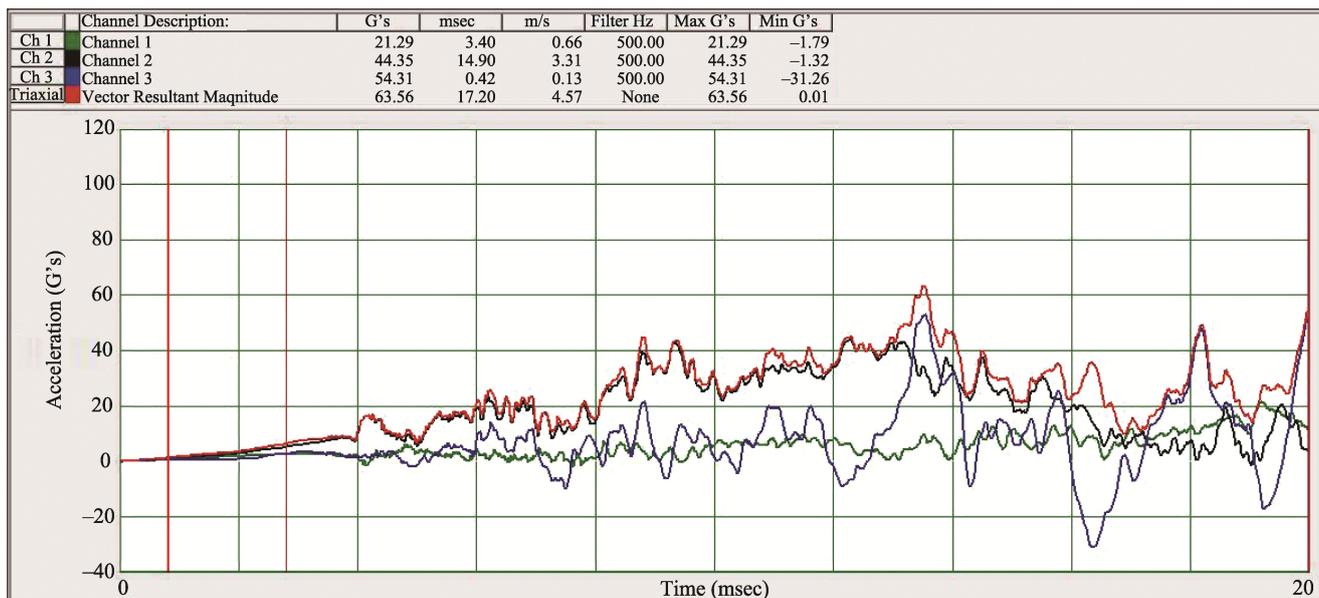


图 10 底面跌落试验产品加速度响应曲线
Fig.10 Acceleration response curve of bottom drop test product

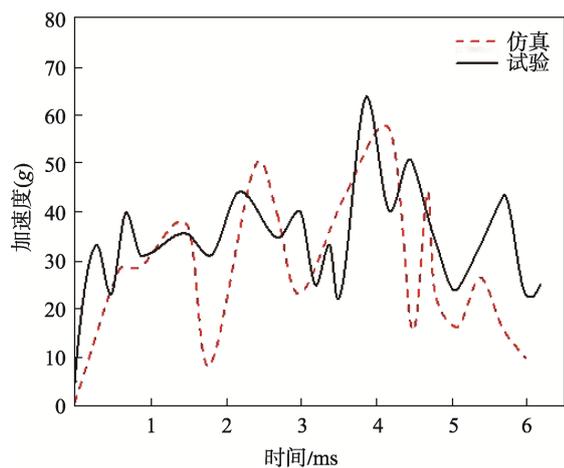


图 11 试验与仿真加速度响应曲线对比
Fig.11 Comparison between experimental and simulated acceleration response curves

4 结语

目前, 动力锂离子电池的使用范围越来越广泛, 文中首先根据危险货物分类鉴定, 对锂电池的相关法规和特定要求进行阐述, 再根据危险品II类包装的跌落实验要求, 对某型号锂电池产品选取 60 mm 厚度的 EPP 材料, 采用凹陷埋入式设计方法, 对该产品进行运输包装设计。在跌落仿真分析中, 相较于裸机产品, 对锂离子电池进行缓冲包装后, 产品各部件最大等效应力均大幅降低且处于安全范围内, 衬垫及外包装箱起到了良好的保护作用; 在原型包装件跌落试验中, 将底面跌落过程采集到的产品响应加速度和仿真中得到的响应加速度进行对比发现, 其误差在合理范围内且 2 种方法得到的峰值加速度都未超过

产品的许用脆值, 二者随时间的变化趋势一致, 说明了仿真结果的可信度, 同时验证了该尺寸缓冲结构能够满足锂电池跌落过程中的防护要求。

参考文献:

- [1] 张惠忠. 对锂电池所用“危包纸箱”的认知与探索[J]. 中国包装, 2019, 39(3): 45-49.
ZHANG Hui-zhong. Cognition and Exploration of “Dangerous Package Carton” Used in Lithium Battery[J]. China Packaging, 2019, 39(3): 45-49.
- [2] 联合国. 空运危险货物安全运输技术规则[M]. 海事局, 译. 北京: 海事局, 2013: 37-42.
United Nations. Safe Transport of Dangerous Goods by Air Technical Rules[M]. China MSA, Translated. Beijing: China MSA, 2013: 37-42
- [3] IATA Dangerous Goods Regulations, 59th Edition[S].
- [4] 联合国. 国际海运危险货物规则[M]. 海事局, 译. 北京: 海事局, 2020: 198-204.
United Nations. International Maritime Dangerous Goods Code[M]. China MSA, Translated. Beijing: China MSA, 2020: 198-204.
- [5] UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Twentieth Revised Edition[S].
- [6] 李明. 动力电池回收过程中的存放、包装和运输规则[J]. 物流技术, 2016, 35(9): 36-38.
LI Ming. Rules for Storage, Packaging and Transportation of Recycled Power Batteries[J]. Logistics Technology, 2016, 35(9): 36-38.
- [7] 王莉, 孙敏敏, 何向明. 锂离子电池安全性设计浅析[J]. 电池工业, 2017, 21(2): 36-39.
WANG Li, SUN Min-min, HE Xiang-ming. A Brief Review of the Design of Safety Characteristics of Li-Ion

- Batteries[J]. Chinese Battery Industry, 2017, 21(2): 36-39.
- [8] 潘生林, 童捷, 翟苏婉, 等. 出口锂电池危险品运输包装的安全设计与防护[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 27-30.
PAN Sheng-lin, TONG Jie, ZHAI Su-wan, et al. Safety Design and Protection of Transport Packaging for Exporting Lithium Batteries as Dangerous Goods[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 27-30.
- [9] 李晓敏, 张惠忠. 一种民用别墅储能锂电池运输纸箱的结构设计[J]. 中国包装, 2020, 40(5): 21-24.
LI Xiao-min, ZHANG Hui-zhong. Structural Design of Lithium Battery Transport Carton for Energy Storage in Civil Villas[J]. China Packaging, 2020, 40(5): 21-24.
- [10] 李明. 废旧锂电池包装的技术要求及相关规则[J]. 电池, 2018, 48(1): 3-7.
LI Ming. Technique Requirements and Regulations for Packing of Waste Lithium Batteries[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(1): 3-7.
- [11] 刘继福, 郭纯武, 刘嘉鑫. 聚合物锂电池软包装材料的瓶颈突破[J]. 中国包装, 2012, 32(7): 51-58.
LIU Ji-fu, GUO Chun-wu, LIU Jia-xin. Bottleneck Breakthrough of Flexible Packaging Materials in Li-Polymer[J]. China Packaging, 2012, 32(7): 51-58.
- [12] 余意, 韩勇, 潘迪, 等. 基于有限元法儿童座椅包装件的跌落优化分析[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 115-123.
YU Yi, HAN Yong, PAN Di, et al. Drop Optimization Analysis of Child Seat Package Based on Finite Element Method[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(23): 115-123.
- [13] DADKHAH F, ZECHER J. ANSYS Workbench Software Tutorial with Multimedia CD Release 11[M]. Mission: Schroff Development Corporation, 2008
- [14] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
GB/T 8168-2008, Static Compression Test Method for Cushioning Materials for Packaging[S].
- [15] 卜杨, 张新昌. 基于 Ansys Workbench 的吸尘器振动与跌落仿真[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 122-127.
BU Yang, ZHANG Xin-chang. Simulation of Vibration and Drop of Vacuum Cleaner Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 122-127.
- [16] 路乐意, 孙忠伟, 卢强, 等. 电机包装件跌落分析及仿真[J]. 微电机, 2021, 54(4): 108-110.
LU Le-yi, SUN Zhong-wei, LU Qiang, et al. Dropping Impact Analysis and Simulation of a Motor Package[J]. Micromotors, 2021, 54(4): 108-110.
- [17] MÜLKOĞLU O, GÜLER M A, ACAR E, et al. Drop Test Simulation and Surrogate-Based Optimization of a Dishwasher Mechanical Structure and Its Packaging Module[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 55(4): 1517-1534.
- [18] 戴成, 裴宝浩. 一种刚柔耦合动力学仿真分析方法的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(5): 19-21.
DAI Cheng, PEI Bao-hao. Study on a Rigid-Flexible Coupling Dynamics Simulation Analysis Method[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2021, 34(5): 19-21.

责任编辑: 曾钰婵