某型号锂电池全纸化包装件跌落仿真分析

巩桂芬^{a,b,c}, 何兴娟^{a,b,c}, 周健民^{a,b,c}, 张美琦^{a,b,c}

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术与特种纸品开发重点研究室 b.中国轻工业纸基功能 材料重点实验室 c.轻化工程国家级实验教学示范中心,西安 710021)

摘要:目的 验证锂离子电池全纸化运输包装件的防护性能。方法 依据锂离子电池的产品特性、流通环 境以及包装防护等多方面要求,选用合适的纸质包装材料得到全纸化的包装方案,选用仿真分析软件对 包装件进行跌落模拟,得到其应力、应变等相关数据。结果 由跌落仿真分析可知,最大应力出现在外 壳上盖凸台位置,其应力值为 346.06 MPa,超过外壳最大许用应力值 (325 MPa),外壳发生破损。锂 电池包装件跌落时,外壳等效应力值为 1.211 MPa,仿真得到的应力值均未超过材料的许用应力,不会 发生损坏。结论 该包装结构能够在运输过程中吸收大部分的冲击能量,能很好地保护内部产品不受损 伤,具有良好的防护性能。

关键词:碳中和;锂电池;跌落仿真 中图分类号:TB482.2 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)13-0277-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.033

Simulation Analysis on Fall of a Type of Lithium Battery Fully Paper-based Packaging Parts

GONG Gui-fen^{a,b,c}, HE Xing-juan^{a,b,c}, ZHOU Jian-min^{a,b,c}, ZHANG Mei-qi^{a,b,c}

 (a. Key Laboratory of Paper Technology and Special Paper Product Development of Shaanxi Province
 b. China Key Laboratory of Light Industry Paper-based Functional Materials c. National Experimental Teaching Demonstration Center of Light Chemical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to verify the protective performance of fully paper-based transport packaging for lithium-ion batteries. Based on the product characteristics, circulation environment, packaging protection and other requirements of lithium-ion batteries, a suitable paper packaging material was selected to obtain an all-paper packaging solution, and simulation analysis software was used to simulate the drop of the packaging parts and obtain their stress and strain data. As a result of the drop simulation, the maximum stress was 346.06 MPa at the top cover tab, which exceeded the maximum permissible stress value of 325 MPa and caused damage to the case. When the lithium battery packaging dropped, the equivalent stress value of the case was 1.211 MPa. The simulated stress values did not exceed the permissible stress of the material and no damage occurred. The conclusion shows that the packaging structure can absorb most of the impact energy during transport. It can protect the internal product well from damage and has good protective properties. **KEY WORDS:** carbon neutral; lithium battery; drop simulation

收稿日期: 2023-01-13

基金项目:国家自然科学基金 (51575327);陕西省教育厅重点实验室及基地项目 (16JS014);陕西省教育厅 2014陕西本 科高校专业综合改革试点子项目 (陕教高[2014]16号)

作者简介: 巩桂芬 (1974—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为缓冲包装动力学、运输包装和包装结构设计。

社会发展、环境恶化引起人们对全球气候的关注, 双碳目标再次出现在大众的视野^[1], 企业积极响应,大力发展新能源产业,加快"碳达峰、碳中和"目标的实现,其符合国家利益,体现国际责任。党的二十大报告中再次强调低碳、绿色、可持续发展,"双碳"目标必将给包装行业带来广泛而深刻的系统性变革。

锂离子电池凭借着众多优点,成为较理想的能源 载体^[2],是目前储能产品中竞争力较强、应用较广泛 的产品之一^[3]。我国锂电池出口量从 2016 年起逐年 增加^[4],同时对包装行业提出更高要求。锂电池中含 有大量的活泼性金属锂,易燃,安全性不高。运输或 缓冲不当都将引起电池损坏或爆炸,包装设计安全性 尤为重要^[5]。本文以某品牌 12 V、288 kC 的锂电池为 研究对象,运用 CREO 6.0 和 ANSYS Workbench 对 锂电池运输包装件进行跌落仿真分析,模拟实际运输 过程中可能出现的工况。通过等效应力、应变云图, 并结合材料屈服强度和许用应力综合判断包装方案 的可行性。

1 锂电池及其包装件模型建立

1.1 锂电池运输包装材料选择与设计

锂电池属于危险品,包装时需选择强度、防潮等 性能好的材料。目前,市场上常见的包装材料为泡沫 材料,其虽性能优良,但使用后难回收难降解,对环 境产生很大影响。可降解材料的价格昂贵且多数还处 于试验探索阶段,难以批量化生产并作为包装材料广 泛应用。纸质材料因具有价格低廉、污染小、可回收 处理等优点,成为多数包装企业的首选,也是国内外 研究的热点,瓦楞纸板、纸浆模塑、蜂窝纸板等是目 前制造业运用最多的纸质包材。瓦楞纸板相较于纸浆 模塑和蜂窝纸板,具有很多优点,如成本低廉,原材 料充足,易加工生产,废弃物可回收利用;缓冲性能 优良,材质柔软,易于折叠;多种性能结构交叉使用, 结构精巧;瓦楞纸板密度小,质量轻,不易产生静电。

本文选用 BC 瓦楞纸板作为缓冲材料,底部承受的质量大,则采用两侧纸板向内折叠的方式,提高抗 压性能。一侧产品有凸起,纸板依据产品的凸起折叠, 增大受力面积,避免应力集中导致产品发生损伤。锂 电池包装件三维图形如图 1 所示。

1.2 锂电池三维模型的建立

某型号锂电池的基本尺寸为 320 mm×210 mm× 162 mm, 主要零部件含有产品外壳、顶盖、散热板、 PCB电路板、电芯、导线以及螺栓螺母等元器件。利 用 CREO 三维软件绘制锂电池样品的三维模型,对模 型合理简化、减少模型网格划分的次数以此来提高计 算效率,减少工作量。模型简化是对整体模型结构分 析影响不大的区域或是在模拟中没有实用意义的曲 面、倒角等进行省略及简化处理^[6]。简化后模型如图 1 所示。



b 包装件3D模型

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

1.3 材料性能参数定义

仿真软件一般包含了大部分且常用的材料参数, 锂电池的所有零部件材料参数未完全包含其中,需自 行定义。材料属性的添加需包含其基本参数,如材料 密度、弹性模量、泊松比等^[7-8]。根据制造商提供的 信息和数据可知,锂电池各零件对应材料的相关参数 信息如表1所示。其中,由于铝合金外壳属于非线性 材料,且在实际过程中属于主要受力部件,是保障产 品不发生损伤的前提。因此在铝合金材料参数设置 时,需要增加材料的屈服强度,提高数据的准确性和 仿真的可靠性,更加符合工程实际。

表 1 包装件各部位材料参数 Tab.1 Material parameters of each packaging part

| 材料 | 密度/ (g·m ⁻³) | 弹性模量 <i>E</i> /GPa | 泊松比μ | 屈服 强度/MPa |
|-------------|-----------------------------|-----------------------|------|--------------|
| 外売 (铝合金) | 2 850 | 74.2 | 0.36 | 325 |
| 电芯(铝) | 2 700 | 70 | 0.33 | — |
| 散热板(铝) | 2 700 | 70 | 0.33 | — |
| PCB 板 | 4 990 | 2.4 | 0.13 | — |
| 地面 | 4 078 | 250 | 0.28 | — |

瓦楞纸板由于纸张纤维取向性表现出各向异性, 在 x(MD 即为机械方向)、y(CD 即纸板楞向)、z(TD 即厚度方向)3个方向上表现出不同的材料性能,是 一种正交各向异性的材料。软件数据库缺少相关的材 料参数,无法直接对瓦楞纸板赋予相应参数。

瓦楞纸板芯纸层为波纹结构,在仿真过程中需对 其进行等效。目前等效理论主要有3种。一是等效成 同一材质、均匀密度但是厚度不同的单层板^[9-11];二 是混合等效成厚度相同的正交各向异性板^[12-15];三是 利用正弦函数模型等效,得到瓦楞纸板的9个等效参 数,即为弹性模量 $E(E_x, E_y, E_z)$ 、剪切模量 $G(G_{xy}, G_{yz}, G_{xz})$ 以及泊松比 $\mu(\mu_{xy}, \mu_{yz}, \mu_{xz})$ ^[16]。瓦楞纸 板作为缓冲衬垫,其结构较为复杂,会涉及到很多单元 和节点。为方便计算,选用第2种等效方式,材料参数 如表2所示。线性等效会与实际的非线性材料产生一定 的误差,但是考虑到材料的各向异性、结构的复杂性以 及材料生产的缺陷性,其误差是在可接受的范围内。

表 2 BC 楞型瓦楞纸板等效材料参数 Tab.2 Equivalent material parameters of BC corrugated board

| <i>E_x</i> / MPa | <i>Ey∕</i> MPa | <i>E_z/</i> MPa | <i>G_{xy}/</i> MPa | <i>G_{yz}/</i> MPa | <i>G_{xz}/</i> MPa | μ_{xy} | μ_{yz} | μ_{xz} |
|-------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|
| 31.83 | 54.66 | 0.16 | 10.64 | 1.56 | 0.57 | 0.38 | 0.01 | 0.01 |

1.4 接触类型设置

依据锂电池在运输途中可能发生的多种状况,并 考虑计算求解时间。将锂电池产品内部各零部件设置 为绑定接触,锂电池与缓冲衬垫之间会出现细微的相 对滑动,因此产品与衬垫之间选用摩擦接触。依据摩 擦特性将其大小设置为 0.2,包装箱与地面之间选用 为无摩擦接触形式。

1.5 网格划分

有限元分析的精确性、收敛性及高效性^[17]与网格 划分质量的优劣息息相关,因此需要严格控制网格质 量。复杂的结构单元一般选用四面体网格进行划分, 由于锂电池零部件较多,本文主要选用六面体和四面 体网格联合划分,保证每个零部件在厚度方向上至少 有2层网格。经过多次修改后,网格的平均单元质量为 0.71,总结点数为416001,总网格单元数为373214, 整体模型网格划分见图2。

2 包装件动力学分析

在货物运输过程中,通常会因为人工搬运或是叉 举操作不当而使包装件发生跌落或碰撞^[18],引起外箱 破损导致产品损坏。选用仿真软件的显示动力学模块 对包装件进行跌落模拟,分析包装的性能。主要从锂 电池无包装跌落开始,到包装件跌落仿真,对比观察 2 次跌落过程中应力-应变情况,找到产品的脆弱部 位,并检验包装的保护性和可靠性。



c 包装件网格划分

图 2 包装件模型网格划分 Fig.2 Meshing of packaging part model

2.1 对锂电池产品进行跌落仿真分析

依据联合国制定的 UN38.3 可知, 锂电池属于第 9 类危险品^[19], 其包装方案与性能测试需要按照危险 品测试标准执行。该锂电池出口到欧洲各个地区, 因 此运输包装需满足出口锂电池运输包装的相关法规 要求。依据法规^[5]锂电池包装件属于II类包装, 跌落 高度应为 1.2 m。根据 GB/T 21599—2008《危险品 包 装跌落试验方法》^[20]和国际安全运输协会 ISTA-1A 标准, 对锂电池裸机底面进行跌落仿真分析。

假设锂电池在跌落过程中只受到重力因素影响, 等效于自由落体运动。为提高计算效率,则可以采 用等效高度为1mm,等效初速度为4849.4mm/s, 以垂直于地面的速度向下移动。在重力作用下,施 加的重力加速度为9806.6mm/s²。对地面施加固定 约束^[21],求解时间设置为3ms。求解后查看锂电池 的等效应力和总变形量,如图3所示。



图 3 锂电池面跌落仿真分析结果 Fig.3 Simulation results of lithium battery surface drop

锂电池裸机面跌落仿真分析结果显示,产生等效应力最大值点位于外壳上盖凸台位置,最大等效应力 值为 346.06 MPa,外壳屈服强度为 325 MPa,超过外 壳最大屈服强度,因此外壳在裸机跌落的过程中可能 会发生损坏。电芯的等效应力值为 43.48 MPa, PCB 板上的等效应力为 42.35 MPa,散热板的等效应力值 为 54.68 MPa,均小于对应材料的屈服强度,因此在 跌落的过程中锂电池内部不会产生一定的损伤,仅需 保证产品外壳不发生损坏。

2.2 对包装件进行面跌落仿真分析

根据前文所描述的模拟方法和条件,模拟锂电池

包装件底面跌落过程,并在此基础上进行分析计算。 模拟分析结果如图4所示。

包装件底面跌落仿真分析结果显示,各个部件的最 大值均未超过其对应材料的许用应力,不会产生失效。

等效应变分析:通过对比分析锂电池裸机跌落和 包装件跌落分析结果可知,最大值出现在锂电池与缓 冲包装先接触的位置,此处产生的冲击力最大,衬垫 吸收的能量较多。等效应变随时间变化如图 5 所示, 在 0~1 ms 时衬垫等效应变呈直线增长,并在 1.5 ms 时刻达到第 1 个峰值后继续持续增加;在 2.75 ms 时 刻达到最大值,达到最大值后逐渐下降并趋于稳定。 查看产品外壳的等效应变情况,如图 6 所示。在



图 4 包装件面跌落仿真分析结果 Fig.4 Simulation results of packaging part surface drop



图 5 底面跌落工况下缓冲衬垫等效应变情况 Fig.5 Equivalent strain of cushion liner under bottom drop condition



图 6 底面跌落工况下电池外壳等效应变情况 Fig.6 Equivalent strain of battery case under bottom drop condition

0~0.15 ms 时应变未发生明显变化; 0.15~1.05 ms 阶段应变值逐步增大,并达到了最大值。达到最大值后逐渐减小并趋于稳定,说明包装件在刚接触地面时刻冲击能量被缓冲材料吸收,因此传递到产品上的冲击能量变小,应变延迟。这与实际跌落工况下的应变相吻合,反映出缓冲包装具有良好的能量吸收性能。在1.05 ms 时刻外壳的变形量达到了最大值,最大值为1.776×10⁻⁵ mm,远小于铝合金的许用应变。因此,在底面跌落工况下,外壳不会发生损坏。

选用同样的设置方法对锂电池包装件的顶面、短侧面以及长侧面进行跌落仿真分析。分析结果显示,包装件的最大等效应力值分别为135、140和125 MPa,均小于外壳材料的许用应力。最大应力应变均未超过产品各部件的最大屈服强度,不会对内部产品产生损伤,因此,外包装在受到跌落响应时能起到保护产品性能的作用。

能量曲线变化可以反映出包装件在跌落过程中 的能量变化情况。根据图 7 的能量曲线可知, 0.2 ms 之前包装件处于自由下落过程,弹性势能稳步增长, 随着下落速度的增大,动能出现了大幅度增加。包装 件触地后,缓冲衬垫开始压缩,势能逐步增大,动能 变小后趋于稳定,二者变化互补,实现能量的动态平 衡。在能量守恒分析中,沙漏能一般小于总能量的 10%^[22]。由图 7 可知,包装件跌落过程中最大沙漏能 为 15 J,总能量为 190.98 J,沙漏能为总能量的 7.85%, 因此可验证仿真结果的可靠性。



图 7 能量追踪曲线 Fig.7 Energy summary tracking curve

2.3 对包装件进行角跌落仿真分析

等效应力分析:等效应力曲线如图 8b 所示,在



Fig.8 Equivalent forces of packaging parts under angular drop conditions

0~0.5 ms 时等效应力值缓慢增长;在 0.5~1.5 ms 时迅 速增大,并在 1.5 ms 时达到最大值 46.82 MPa,达到 最大值后逐步减小,并在 2.5 ms 时趋于稳定。最大值 出现在角与地面接触的位置。由于在冲击的过程中产 生的作用力全部集中在一点上,所以此处产生的应力 值最大,与实际的跌落情况相符合。

变形量分析:等效应变曲线如图 9b 所示,在 0~1.5 ms 时变形量缓慢增加,在1.5~2.0 ms 时变形量 增加速度逐渐变快,在2.5 ms 时增长速率逐步达到最 大值,在2.5~3.0 ms 增长速率逐渐变缓,变形量最大 值为9.19 mm。包装件受到碰撞后冲击能量首先传递 到包装箱上,其次是内部缓冲衬垫,最后通过衬垫传 递到产品上。通过分析发现,最大变形量为9.19 mm, 未超过纸箱及缓冲衬垫的最大变形量,说明缓冲衬垫 能很好地保护内部产品不受损伤。

3 试验验证

根据前文所述的危险品包装件跌落标准,本次选

用苏试跌落试验机进行锂电池包装件的跌落测试, Lansmont Test Partner 3(简称 TP3)数据采集系统用 来收集数据并分析。TP3 能够在产品跌落过程中,捕 捉到产品加速度的瞬态变化情况,便于后期对产品受 力情况的分析,试验所用设备如图 10 所示。

试验开始前需根据跌落工况选择并固定传感器;试验结束后利用数据处理软件选取合适时间阶 段得到的加速度响应曲线,并与仿真数据进行对比 分析。由图 11 可以看出,试验和仿真曲线随时间变 化趋势趋于一致,且不同跌落工况下的最大响应加 速度均小于产品脆值。仿真得到的响应加速度峰值 为 57.3g,试验得到的响应加速值峰值为 62.5g,均 未超过产品的许用脆值(70g),满足包装需求。试 验和仿真所得的响应加速度曲线未完全重合,最大 响应加速度之间的误差为 8.32%,在允许范围之内, 说明仿真具有可靠性。试验结束后,包装件未出现 破损,内部产品也未发生破损、凹陷等损伤,说明 包装系统具有很好的防护性能,能满足产品包装防 护的需求。



图 9 角跌落工况下包装件等效应力情况 Fig.9 Equivalent forces of packaging parts under angular drop conditions



a TP3数据采集系统

b 跌落试验机

图 10 跌落试验设备 Fig.10 Drop test equipment



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

4 结语

利用三维建模和模拟分析软件,对某品牌 12 V、 288 kC 的锂电池包装件进行有限元仿真分析,主要模 拟包装件在运输过程中可能发生因人工搬运或是叉 举过程引起的跌落。分析结果表明,锂电池在 1.2 m 高度下跌落,各零部件均不会发生损坏,包装具有很好的防护效果。不足的是,本文仅研究跌落工况下的包装件响应情况,其他更多工况下的响应情况仍需进一步研究。此文主要研究单一瓦楞纸板缓冲结构可满足的锂电池各工况要求,后续可选用多种缓冲结构进行研究分析,为同类型的产品提供更多参考。

参考文献:

- 张磊. 迈向 2060 碳中和——聚焦脱碳之路上的机遇 和挑战[R]. 北京:北京绿色金融与可持续发展研究 院,高瓴产业与创新研究院,2021.
 ZHANG Lei. Towards 2060 Carbon Neutrality - Focusing on the Opportunities and Challenges on the Road to Decarbonization[R]. Beijing: Beijing Institute of Green Finance and Sustainable Development, High Tide Institute of Industry and Innovation, 2021.
- [2] 韩啸,张成锟,吴华龙,等. 锂离子电池的工作原理 与关键材料[J]. 金属功能材料, 2021, 28(2): 37-58.
 HAN Xiao, ZHANG Cheng-kun, WU Hua-long, et al. Working Principle and Key Materials of Lithium Ion Battery[J]. Metallic Functional Materials, 2021, 28(2): 37-58.
- [3] TRANSPORT D G. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: Model Regulations[M]. United Nations: United Nations Publication, 2021: 542-643.
- [4] 刘达. 2022 年中国锂离子电池行业出口现状与区域市 场格局分析 出口额再创新高[R/OL]. 深圳:前瞻产 业研究院. 2022. https://www.qianzhan.com/analyst/ detail/220/220330-b24010cc.html

LIU Da. China's Lithium-ion Battery Industry Export Status and Regional Market Pattern Analysis in 2022, Export Value to a New High[R/OL]. Shenzhen: Foresight Industry Research Institute, 2022. https://www.qianzhan.com/analyst/ detail/220/220330-b24010cc.html

[5] 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.

[6] 邓志辉,李亮,刘红达,等. 卧式吸尘器包装结构有限元研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(4): 7-13.
 DENG Zhi-hui, LI Liang, LIU Hong-da, et al. Finite Element Verification of Packaging Structure of Horizontal Vacuum Cleaner[J]. Light Industry Machinery,

2018, 36(4): 7-13.

[7] 李文茜, 刘子建. 家用陶瓷汤锅结构热力学有限元分析[J]. 中国陶瓷, 2015, 51(6): 40-44.

LI Wen-xi, LIU Zi-jian. Structural Thermodynamics Finite Element Method Analysis of Household Ceramic Stockpot[J]. China Ceramics, 2015, 51(6): 40-44.

- [8] 常江, 巩雪, 李丹婷, 等. 鸡蛋缓冲包装设计及力学 性能分析[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 55-58.
 CHANG Jiang, GONG Xue, LI Dan-ting, et al. Design and Mechanical Properties Analysis of Egg Cushioning Packaging[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 55-58.
- [9] CHEON Y J, KIM H G. An Equivalent Plate Model for Corrugated-core Sandwich Panels[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(3): 1217-1223.
- [10] 贺妙欣, 钱怡. 瓦楞纸板屈曲临界载荷的一种等效计 算方法[J]. 包装工程, 2010, 31(1): 38-41.
 HE Miao-xin, QIAN Yi. An Equivalent Calculation Method of Critical Load of Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(1): 38-41.
- [11] BIANCOLINI M E, BRUTTI C. Numerical and Experimental Investigation of the Strength of Corrugated Board Packages[J]. Packaging Technology and Science, 2003(16): 47-60.
- [12] PARK K J, JUNG K, KIM Y W. Evaluation of Homogenized Effective Properties for Corrugated Composite Panels[J]. Composite Structures, 2016, 140: 644-654.
- [13] 周廷美,陈菲菲. 瓦楞夹层结构等效弹性常数的多步 均匀化方法[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(17): 141-144.

ZHOU Ting-mei, CHEN Fei-fei. Multi-Step Homogenization Method for Equivalent Elastic Constant of Corrugated Sandwich Structure[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(17): 141-144.

[14] 马宴苹. AB 型双瓦楞纸板衬垫缓冲性能的试验研究
[D]. 西安: 西安理工大学, 2007: 18-22.
MA Yan-ping. Experimental Study on Cushioning Performance of AB Double Corrugated Board Liner[D].

Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007: 18-22.

- [15] 孟超莹. 瓦楞形状对瓦楞纸板力学性能的影响分析
 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 12-33.
 MENG Chao-ying. Influence of Corrugated Shape on Mechanical Properties of Corrugated Board[D].Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 12-33.
- [16] PARK J, CHANG S, JUNG H M. Numerical Prediction of Equivalent Mechanical Properties of Corrugated Paperboard by 3D Finite Element Analysis[J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 79–73.
- [17] LEE M H, PARK J M. Flexural Stiffness of Selected Corrugated Structures[J]. Packaging Technology and Science: An International Journal, 2004, 17(5): 275-286.
- [18] 张帆,杨懿,吴四鹏. 基于 Ansys Workbench 的电炖锅包 装设计与仿真分析[J]. 包装工程, 2020, 41(1): 95-102.
 ZHANG Fan, YANG Yi, WU Si-peng. Packaging Design and Simulated Analysis of Electric Cookers Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(1): 95-102.
- [19] United Nations. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods-Manual of Tests and Criteria[M]. New York and Geneva: United Nations Publication, 2017: 6-20.
- [20] GB/T 21599—2008, 危险品 包装跌落试验方法[S]. GB/T 21599—2008, Test Method for Dropping of Dangerous Goods Packaging[S].
- [21] 郭晓庆. 提高偏心振动磨性能和动力学建模精度的研究[D]. 天津:河北工业大学, 2012: 15-35.
 GUO Xiao-qing. Study on Improving the Performance and Dynamic Modeling Accuracy of Eccentric Vibration Mill[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012: 15-35.
- [22] 任建行, 翟明, 蒋奔. 基于 ANSYS LS-DYNA 的塑料 模具冲蚀过程分析[J]. 塑料科技, 2020, 48(11): 91-97.
 REN Jian-xing, ZHAI Ming, JIANG Ben. Analysis of Erosion Process of Plastic Mold Based on ANSYS LS-DYNA[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(11): 91-97.

责任编辑:曾钰婵