绿色包装与循环经济

锂电池可回收有机硅胶包装设计及其性能分析

廖昌宇，田野，王德森
（哈尔滨商业大学 轻工学院，哈尔滨 150000）

摘要：目的 针对目前锂电池包装密封性差，正负极容易被潮湿环境损坏的情况，设计一种内包装采用 HL-1029 有机硅胶包裹锂电池，外包装用瓦楞纸盒包装的结构。**方法** 根据锂电池型号及尺寸计算 HL-1029 包裹体厚度，建立包装件三维模型，在有限元环境中分析 3 500 mm 码垛高度以及 1 200 mm 跌落高度下，瓦楞纸箱、瓦楞纸隔板、HL-1029 包裹体以及锂电池的应力云图。**结果** 3 500 mm 码垛高度以及 1 200 mm 跌落高度下，锂电池所受的静应力和等效应力分别为 0.03 MPa 和 8.80 MPa，锂电池所受静应力和等效应力均未超出其材料的屈服强度。**结论** 综合有限元分析结果，HL-1029 包裹体可为锂电池运输过程中提供充分的防护，并且具有极高的可循环性。研究可为锂电池以及精密电子元器件的密封性包装提供研究思路。

关键词：锂电池；有机硅胶；跌落仿真
中图分类号：TB482.2；TB485.1；TB485.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-3563(2024)09-0218-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.09.028

Design and Performance Analysis of Recyclable Silicone Gel Packaging for Lithium Battery

LIAO Changyu, *TIAN Ye*, *WANG Desen*

(College of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150000, China)

ABSTRACT: The work aims to design a structure of HL-1029 silicone gel wrapping lithium battery inside and cardboard box packaging outside to deal with the poor sealing of lithium battery packaging and the fact that the positive and negative poles are easy to be damaged in a wet environment. The thickness of the HL-1029 package was calculated based on the model and size of the lithium battery. A packaging model was established. And the stress patterns of the corrugated cardboard box, corrugated paper partition, HL-1029 package, and lithium battery under a stacking height of 3 500 mm and a drop height of 1 200 mm in a finite element environment were analyzed. At a stacking height of 3 500 mm and a drop height of 1 200 mm, the static stress and equivalent stress of the lithium battery was 0.03 MPa and 8.80 MPa, respectively. It was found that the static and equivalent stress on the lithium battery did not exceed the yield strength of the material. Based on the comprehensive finite element analysis results, the HL-1029 package can provide sufficient protection for the transportation of lithium batteries and has exceptionally high recyclability. The research can offer research ideas for the sealing packaging of lithium batteries and precision electronic components.

KEY WORDS: lithium battery; silicone gel; drop simulation

收稿日期：2023-07-11
基金项目：国家自然科学基金（41772387）；黑龙江省自然科学基金（LH2020E027）；哈尔滨商业大学青年创新人才支持项目（2019CX04）
***通信作者**

目前市场上常见的锂电池包装方法无法对其两极形成有效的保护，在运输过程中由于湿度等环境因素，可能导致锂电池发生爆炸并产生有毒气体[1-3]。通过对锂电池可回收包装的研究，可以降低安全隐患，促进节能减排。

Fang 等[4-5]在真空环境中将氮化硼泡沫（BNF）和聚二甲基硅氧烷（PDMS）相互渗透组成的新型柔性聚合物复合材料，发现该复合材料具有优异的综合性能。Yang 等[6]研究了可压缩聚氨酯（PU）泡沫电池垫对软包电池的防护性能，发现 PU 泡沫能够很好地减轻外部冲击对软包电池的影响。王天佑等[7]提出了一种外包装为瓦楞纸板，内包装为发泡聚乙烯（EPE）的锂电池包装方法，模拟结果表明锂电池所受应力为其许用应力的 4.40%。徐博易等[8]制得 HL-1029 有机硅胶试件，通过单轴拉伸试验得出其应力-应变参数，并在有限元软件中模拟其对轴承的防护性能。

本文提出一种内包装采用 HL-1029 有机硅胶包裹锂电池，外包装采用瓦楞纸盒包装的方式。在有限元环境中对包装件进行静应力分析以及跌落分析，分别得到包装件各部分的应力云图。收集整理有限元模拟数据，分析该可回收包装结构对锂电池的缓冲性能。

1　锂电池可回收包装设计

1.1　可回收材料

本文针对某品牌 18650 型锂电池的运输包装，采用 HL-1029 有机硅胶以及瓦楞纸盒作为包装材料。有机硅胶具有表面张力小、耐高低温、电绝缘好等性质[9-10]，文中选用的高透明灌封有机硅胶 HL-1029[11]，为双组分室温硫化硅橡胶，具有 A、B 2 个组分，如图 1 所示。其可以在室温环境下实现固化，具体各项使用参数如下：A 和 B 的质量比为 1∶1，胶化时间为 8~12 h（25 ℃），暴露在空气中可使用时间为 1 h（25 ℃，混合量为 100 g），硬化时间为 24 h（25 ℃）。

本文设计的包装结构在内包装方面选择用 HL-1029 完全包裹锂电池，其防水防潮、密封稳定的特性，可以很好地解决锂电池因正负极裸露在潮湿环境而导致热失控的问题[7]。HL-1029 具有很好的透视性，无需将锂电池从包裹体中取出，就可以直观地观察到锂电池是否有变形破损。同时，HL-1029 未固化前为可流动的黏稠液体，具有非常好的可塑性，能够对不同形状规格的锂电池进行封装。最后，可以将使用后的 HL-1029 进行回收，通过物理破碎的方法，将其碾碎成细小颗粒，在下次包装时可以加入约占 HL-1029 包裹体总质量 33%的回收颗粒充当填料，与新的 HL-1029 溶液一起浇铸，降低包装成本，充分循环利用，其循环原理如图 2 所示。

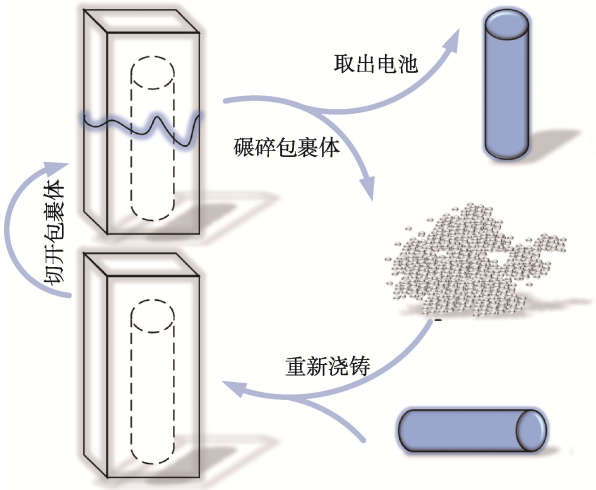


图 2　HL-1029 包裹体循环利用原理
Fig.2 Schematic diagram for recycling of HL-1029 package

HL-1029 包裹体可以通过浇铸的方法制得。首先，通过 3D 打印技术得到 HL-1029 包裹体的浇铸模具，如图 3 所示，并将模具的各部件依次拼装。随后，将锂电池放入浇铸模具中倒入 HL-1029 有机硅胶溶液，其中溢流孔的作用为方便排出多余的 HL-1029 有机硅胶溶液以及浇铸时产生的气泡。

图 1　HL-1029 有机硅胶
Fig.1 HL-1029 silicone gel

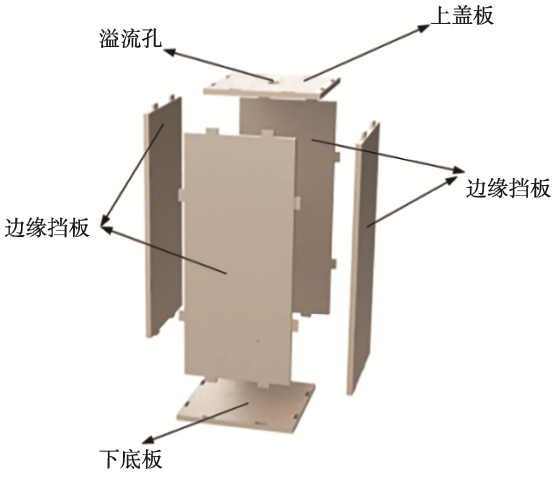


图 3　HL-1029 包裹体浇铸模具
Fig.3 Casting mold of HL-1029 package

在室温条件下放置 24 h，待其完全固化便可进行脱模。为了方便脱模，可以在浇铸前对模具内壁喷洒适量的脱模剂，其流程如图 4 所示。

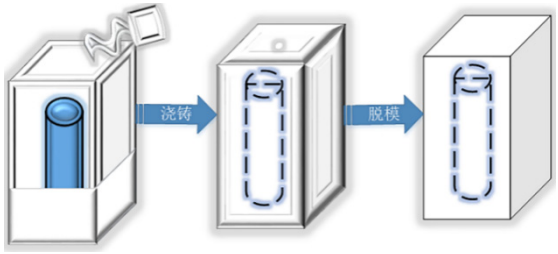


图 4　HL-1029 包裹体浇铸流程
Fig.4 Flow chart of HL-1029 package casting

瓦楞纸盒因其纸板结构中空缺体积较大，故具有良好的减震缓冲性能，可避免被包装物品受碰撞和冲击。根据 GB/T 6543—2008，选用 C 楞单瓦楞纸盒，厚度为 4 mm，其结构如图 5 所示。

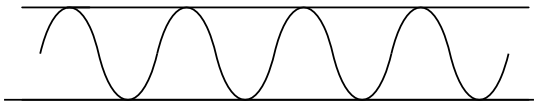


图 5　单瓦楞纸盒结构
Fig.5 Single corrugated box structure

1.2　HL-1029 有机硅胶包裹体厚度计算

本文中被包装的锂电池质量为 0.046 kg，底部直径 18 mm，高度 65 mm，其脆值 G 选为 180G。根据《国际海运危险货物规则》等运输规定，锂电池为第 9 类危险品，其跌落实验的高度必须满足 1.20 m。因此，最终确定有限元分析的跌落高度 H 为 1 200 mm[12-13]。

将锂电池竖直放在 HL-1029 有机硅胶上，锂电池受到的缓冲面积 A 是其底部与 HL-1029 的接触面积，通过计算可得 A 的值为 2.54×10^{-4} m^2，有机硅胶受到的最大应力 σ_c 由式（1）可以得到[8]。

$$\sigma_c=\frac{mG}{A}=0.33\ \text{MPa} \tag{1}$$

式中：m 为锂电池质量。

根据文献[9]与文献[11]中的相关研究，由 HL-1029 硅胶材料的本构关系可知，其应力-缓冲系数曲线如图 6 所示。

结合图 6 中的曲线，可得当应力为 0.33 MPa 时，所对应的缓冲系数 C_H 为 1.30，则 HL-1029 包裹体的厚度 δ 由式（2）可以得到[8]。

$$\delta=\frac{C_H H}{G}=8.70\ \text{mm} \tag{2}$$

包裹体的最小厚度为 8.70 mm 时，才能达到缓冲要求。因为锂电池为特殊危险品，为了提高防护性能，最终取包裹体的厚度为 9 mm。

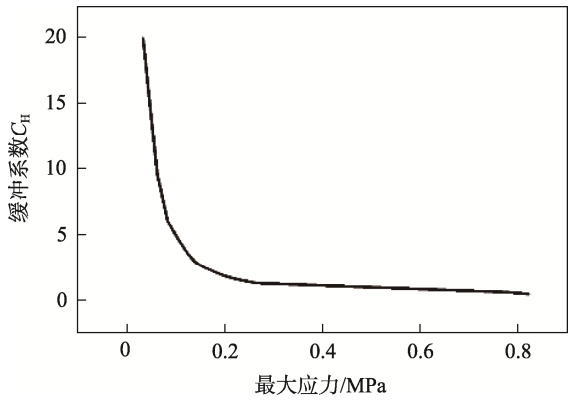


图 6　HL-1029 硅胶材料的应力-缓冲系数曲线
Fig.6 Stress-buffer coefficient curve of HL-1029 silicone material

2　锂电池可回收包装有限元仿真

2.1　包装建模

文中锂电池的底部圆形直径 d=18 mm，高 H_l=65 mm，外包装盒选取 C 楞单瓦楞纸盒，厚度为 4 mm。结合上述对 HL-1029 包裹体厚度的计算，包裹体的尺寸分别为长 $L_{HL\text{-}1029}$=36 mm、宽 $W_{HL\text{-}1029}$=36 mm、高 $H_{HL\text{-}1029}$=83 mm，如图 7 所示。

根据 GB/T 4892—2021 的相关规定，瓦楞纸箱的长宽之比一般不大于 2.50∶1，高宽比一般不大于 2∶1，不小于 0.15∶1。因此，综合上述规定将锂电池以及 HL-1029 包裹体以三行五列的排列方式包装，如图 8 所示。同时，为了方便将包裹体从瓦楞纸箱里面拿出，用厚度为 4 mm 的瓦楞纸板将各包裹体隔开。

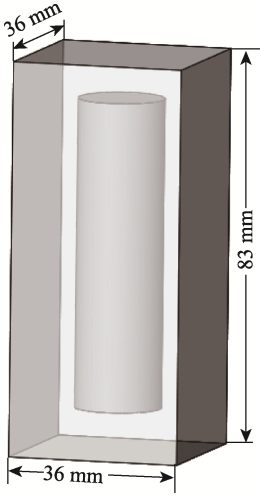


图 7　HL-1029 包裹体尺寸
Fig.7 Dimensions of HL-1029 package

2.2　有限元仿真前处理

锂电池其结构主要由正负极、安全阀、密封圈、壳体等部件组成[14-19]。为了分析方便，选择锂电池外

壳作为主要研究对象，同时单独将锂电池的网格大小设置为 3 mm。包装件、锂电池的网格划分以及材料属性如图 9a、图 9b 和表 1 所示。

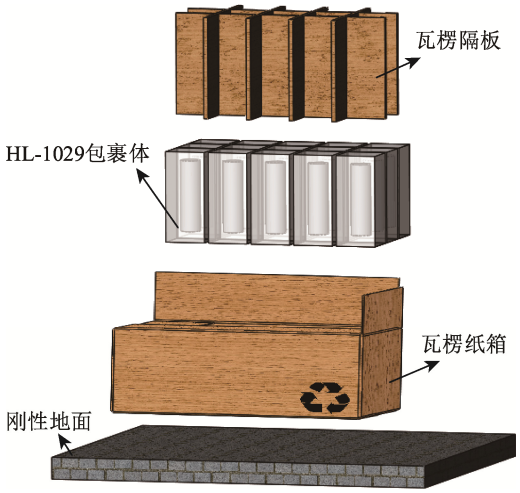
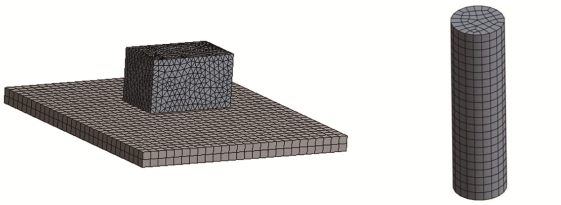


图 8　包装件爆炸图
Fig.8 Explosion diagram of packaging



a 包装件网格划分图　　b 锂电池网格划分图

图 9　网格划分
Fig.9 Diagram of meshing

表 1　材料属性
Tab.1 Material attribute

物体	密度/（kg·m^{-3}）	弹性模量/MPa	泊松比
瓦楞纸盒	160	2×10^{2}	0.34
HL-1029	970		
电池外壳	2 864	2.06×10^{5}	0.30

为了简化求解过程，将包装件设置为距离刚性地面 10 mm 处，给予其一个初始速度 v，其大小由式（3）可得[8]。

$$v=\sqrt{2gH}=4.88\ \text{m/s}^2 \tag{3}$$

3　仿真结果分析

3.1　码垛高度和强度安全系数选择

码垛高度以及强度安全系数与包装件的运输方式、运输时间等因素有关。根据国家相关规定，其数值如表 2 和表 3 所示[20]。

表 2　码垛高度
Tab.2 Stacking height

存储方式	基础值		适用范围	
	时间/d	高度/mm	时间/d	高度/mm
公路	1	2 500	1~7	1 500~3 500
铁路	1	2 500	1~7	1 500~3 500
水运	1~7	3 500	1~28	3 500~7 000
仓储	1~7	3 500	1~28	1 500~7 000

表 3　强度安全系数
Tab.3 Strength factor of safety

存储时间/d	安全系数
1	1
(1,3]	1.2
(3,6]	1.5
>6	2

综上所示，考虑到锂电池的特殊性，选取码垛高度 H_m=3 500 mm，强度安全系数 k=2，包装件总质量为 2.38 kg。根据式（4）可以求出底部包装件所受静载荷 F[20]。

$$F=k\times\frac{H_m-h}{h}\times9.80\times m_p=1570\ \text{N} \tag{4}$$

式中：k 为强度安全系数；H_m 为码垛高度；h 为包装件高度；m_p 为包装件质量。

3.2　静力学结果分析

在有限元软件中，将包装件底部设置为固定，对其顶部施加 1 570 N 的竖直向下的压力。瓦楞纸箱以及瓦楞纸隔板所受的应力及变形情况如图 10a 和图 10b 所示。在静载荷的作用下，瓦楞纸箱以及瓦楞纸隔板所受的最大静应力分别为 0.60 MPa 和 0.70 MPa，最大应力均出现在瓦楞纸箱以及瓦楞纸隔板的顶部。由于瓦楞纸的强度极限为 1.05 MPa，所以瓦楞纸箱以及瓦楞纸隔板未受到破坏。

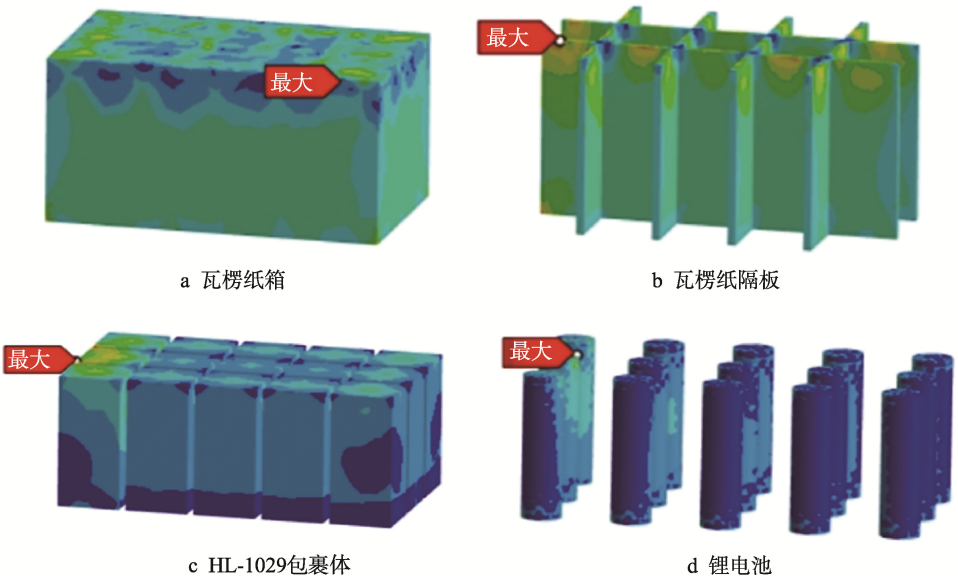
HL-1029 包裹体以及锂电池的应力及变形情况如图 10c 和图 10d 所示。在静载荷的作用下，HL-1029 包裹体以及锂电池所受的最大静应力分别为 2.30×10^{-3} MPa 和 0.03 MPa，最大应力均出现在包裹体以及锂电池的顶部，由于锂电池的屈服强度为 132.20 MPa，包裹体以及锂电池未受到破坏。

3.3　1 200 mm 高度跌落结果分析

包装件跌落后，瓦楞纸箱以及瓦楞纸隔板所受应力和变形情况如图 11 所示。由图 11 可以看出，在

3.00×10^{-3} s 以及 4.5×10^{-3} s 时，瓦楞纸箱、瓦楞纸隔板所受等效应力最大，最大应力分别为 1.70 MPa 和 1.20 MPa。最大应力出现在瓦楞纸箱以及瓦楞纸隔板的底部，其数值均大于瓦楞纸的强度极限 1.05 MPa，说明瓦楞纸箱以及瓦楞纸隔板均受到一定的破坏。

HL-1029 包裹体以及锂电池所受应力以及变形情况如图 12 所示。由图 12 可以看出，在 4.50×10^{-3} s 以及 1.20×10^{-3} s 时，HL-1029 包裹体、锂电池所受等效应力最大，最大应力分别为 0.35 MPa 和 8.80 MPa。最大应力出现在包裹体以及锂电池的底部，包裹体有一定程度的变形，但锂电池跌落所受最大应力远小于其屈服应力，锂电池没有遭到破坏。

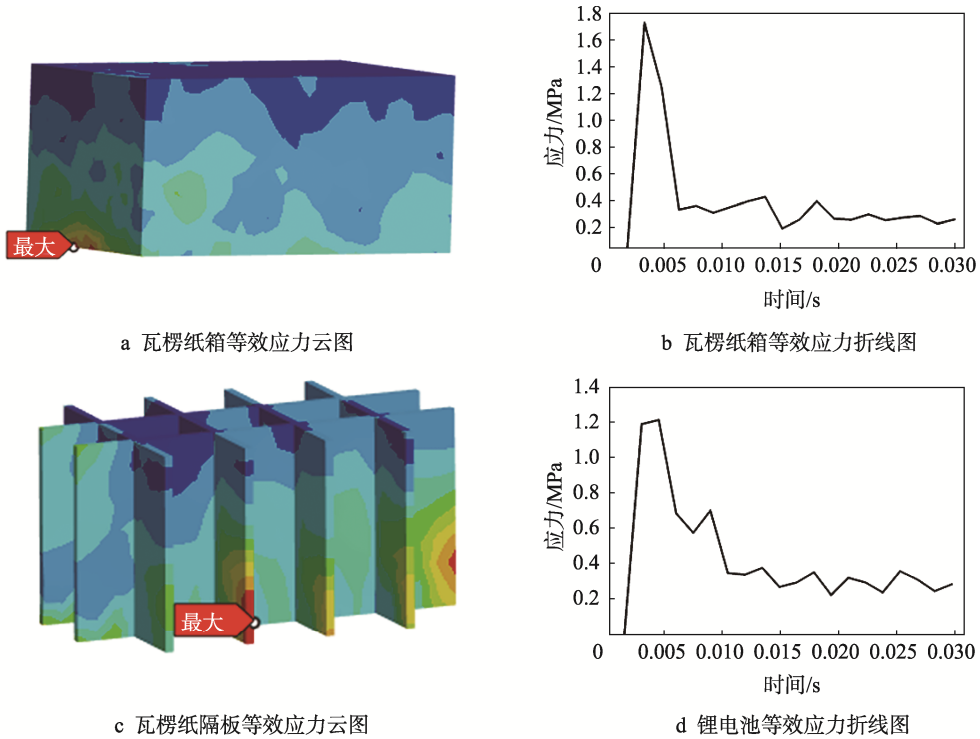


a 瓦楞纸箱　　b 瓦楞纸隔板

c HL-1029包裹体　　d 锂电池

图 10　包装件各部分静应力云图

Fig.10 Static stress pattern of each part of packaging

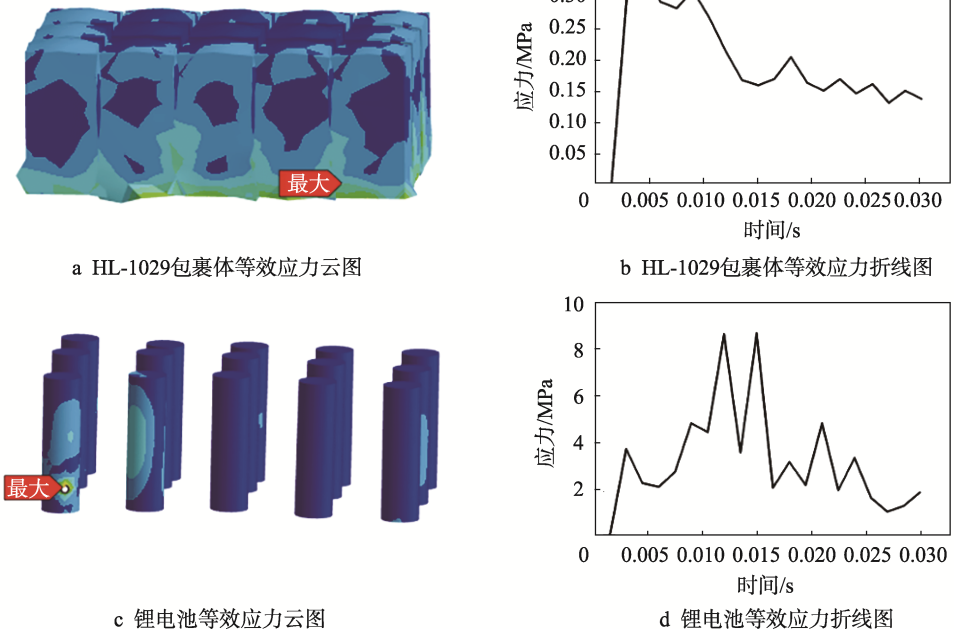


a 瓦楞纸箱等效应力云图　　b 瓦楞纸箱等效应力折线图

c 瓦楞纸隔板等效应力云图　　d 锂电池等效应力折线图

图 11　瓦楞纸箱和瓦楞纸隔板的等效应力云图及等效应力折线图

Fig.11 Equivalent stress pattern and equivalent stress line diagram of corrugated box and corrugated paper partition



a HL-1029包裹体等效应力云图　　b HL-1029包裹体等效应力折线图

c 锂电池等效应力云图　　d 锂电池等效应力折线图

图 12　HL-1029 包裹体和锂电池的等效应力云图及等效应力折线图
Fig.12 Equivalent stress pattern and equivalent stress line diagram of HL-1029 package and lithium battery

4　结语

文章对所提出的锂电池可回收包装的缓冲性能进行了分析，有以下结论：

1）针对目前锂电池包装密封性差，正负极容易被潮湿环境损坏的情况，提出了一种内包装采用 HL-1029 有机硅胶包裹锂电池，外包装采用瓦楞纸箱包装的包装方式。其中瓦楞纸箱以及 HL-1029 有机硅胶都可以重复利用，绿色环保。

2）通过对包装件进行静应力分析，分别得到包装件各部分的应力云图。结果表明在 3 500 mm 码垛高度下，锂电池所受的静应力大小为 0.03 MPa，远小于锂电池的屈服应力。

3）在有限元环境中对包装件进行跌落模拟，分别得到包装件各部分的应力云图。结果表明在 1 200 mm 跌落高度下，锂电池所受的等效应力大小为 8.80 MPa，该包装结构能够很好地为锂电池提供保护。

参考文献：

[1] ELIA G A, KRAVCHYK K V, KOVALENKO M V, et al. An Overview and Prospective on Al and Al-Ion Battery Technologies[J]. Journal of Power Sources, 2021, 481(1): 228870.

[2] HSUEH T H, WANG M C, LIU S E. Sputtered Silver on the Current Collector for Anode-Less NMC111 Gel Polymer Electrolyte Lithium Batteries[J]. Electrochemistry Communications, 2023, 150: 107478.

[3] BESCH K M, PALSSON H. A Supply Chain Perspective on Green Packaging Development-Theory Versus Practice[J]. Packaging Technology and Science, 2016, 29(1): 45-63.

[4] FANG H, BAI S, WONG P C. Thermal, Mechanical and Dielectric Properties of Flexible BN Foam and BN Nanosheets Reinforced Polymer Composites for Electronic Packaging Application[J]. Composites Part A, 2017, 100: 71-80.

[5] SEBASTIAN A, CANH M V, DINESHKUMAR M, et al. Dual 3D Networks of Graphene Derivatives Based Polydimethylsiloxane Composites for Electrical Insulating Electronic Packaging Materials with Outstanding Electromagnetic Interference Shielding and Thermal Dissipation Performances[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 462: 142017.

[6] YANG C B, SUNDERLIN N, WANG W, et al. Compressible Battery Foams to Prevent Cascading Thermal Runaway in Li-Ion Pouch Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2022, 541: 231666.

[7] 王天佑，卢秋婷，梁怡良，等. 圆柱形动力锂电池的绿色包装设计及跌落仿真试验[J]. 包装工程，2023，44(5): 291-296.
WANG T Y, LU Q T, LIANG Y L, et al. Green Packaging Design and Drop Simulation Test of Cylindrical Power Lithium Battery[J]. Packaging Engineering,

2023, 44(5): 291-296.

[8] 徐博易, 于蕾, 田野. 高精密轴承套杯式缓冲垫性能试验研究[J]. 包装学报, 2020, 12(2): 64-70.
XU B Y, YU L, TIAN Y. Experimental Study on the Performance of High Precision Bearing Cup Cushion[J]. Packaging Journal, 2020, 12(2): 64-70.

[9] WU F, CHEN N, CHEN R J, et al. Self-Regulative Nanogelator Solid Electrolyte: A New Option to Improve the Safety of Lithium Battery[J]. Advanced Science, 2016, 3(1): 1500306.

[10] 田野, 罗荣超, 廖昌宇, 等. 仿生蛛网结构有机硅胶缓冲垫缓冲性能[J]. 包装工程, 2022, 43(3): 155-160.
TIAN Y, LUO R C, LIAO C Y, et al. Cushioning Performance of Biomimetic Cobweb Silicone Cushion[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(3): 155-160.

[11] 廖昌宇. 仿生蛛网结构有机硅胶缓冲垫缓冲性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021: 10-20.
LIAO C Y. Study on Cushioning Performance of Biomimetic Spider Web Structure Organic Silicone Cushion[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2021: 10-20.

[12] 赵旭东, 黄玉军, 陈剑平, 等. 航空锂电池特殊运输装备现状及其适航要求[J]. 物流科技, 2022, 45(15): 51-53.
ZHAO X D, HUANG Y J, CHEN J P, et al. Current Situation and Airworthiness Requirements of Aviation Lithium Battery Special Transport Equipment[J]. Logistics Sci-Tech, 2022, 45(15): 51-53.

[13] 罗薇, 张春龙, 吉海龙, 等. 船舶载运锂电池柜式储能系统安全运输条件分析及建议[J]. 中国海事, 2022(8): 18-21.
LUO W, ZHANG C L, JI H L, et al. Analysis and Suggestions on Safe Shipping Conditions of Lithium Battery as Energy Storage Cabinet on Ships[J]. China Maritime Safety, 2022(8): 18-21.

[14] HAREANCZ F, SINKA T. Investigation of Nickel Coated Steel Tapes Welded Joints[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1246(1): 12-33.

[15] ELZOHRY A M, KHORSHED L A, ADEl A. Chemical, Electrochemical and Corrosive Wear Behavior of Nickel-plated Steel and Brass-Plated Steel Based Coins from Egypt in Artificial Sweat[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2021, 16(8): 1-16.

[16] 刘奉英, 余琨, 彭朋飞, 等. 冲孔镀镍钢带拉伸性能的模拟与实验研究[J]. 功能材料, 2017, 48(11): 11108-11112.
LIU F Y, YU K, PENG P F, et al. Simulation and Experimental Investigation on the Tensile Properties of Nickel-Plated Punched Steel Strips[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(11): 11108-11112.

[17] ONG T C, SARVGHAD M, LIPPIATT K. Investigation of the Corrosion of Electro-Less Nickel-Plated Alloys in Molten Salt and Its Effect on Phase Change Properties for Energy Storage Applications[J]. Solar Energy, 2022, 236(1): 512-521.

[18] CAO B F, LI J Q, LIU C F. Defect Detection of Nickel Plated Punched Steel Strip Based on Improved Least Square Method[J]. Optik, 2020, 206: 164331.

[19] GUTIÉRREZ M I J, SIERRA S M G, RAMÍREZ C A G. Effect of Electrodeposition Parameters and Surface Pretreatment on the Electrochemical Hydrogen Production Using Nickel-Plated Stainless Steel Electrodes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(11): 7667-7675.

[20] 王成位. 公路运输中红酒瓶内衬结构缓冲特性分析与优化[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022: 11-12.
WANG C W. Analysis and Optimization of Structural Buffer Characteristics of Wine Bottle Lining in Road Transportation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022: 11-12.