

包装装备跌落撞击缓冲特性分析

刘平, 白永钢

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 获得尺寸和质量最小的缓冲结构。**方法** 基于能量守恒原理, 建立包装装备缓冲结构撞击环境缓冲特性理论分析的数学模型, 获得正撞和侧撞工况下缓冲结构尺寸和防护效果的变化关系。研究采用新型泡沫填充蜂窝材料的缓冲结构设计, 优选泡沫填充蜂窝材料参数。建立缓冲结构撞击环境的物质点法计算模型, 开展高速撞击的数值仿真。分析包装装备在撞击环境下的吸能效果, 获得被保护产品的速度变化曲线。**结果** 在不同撞击姿态的撞击环境下, 缓冲结构尺寸随撞击能量的增大而增大, 缓冲材料密度减小和平台应力增大可减小缓冲结构尺寸。优选密度为 600 kg/m^3 的泡沫填充蜂窝材料, 可使得缓冲结构尺寸和质量最小, 相比于传统木材, 可降低质量约 49%。物质点数值计算分析验证了该缓冲结构可将高速撞击速度降低到目标低速撞击水平。**结论** 采用泡沫铝填充蜂窝吸能材料的缓冲结构, 满足撞击环境缓冲防护的安全性需求, 可大幅降低整体质量。

关键词: 缓冲结构; 能量守恒; 物质点法; 泡沫铝填充蜂窝材料

中图分类号: TJ03

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)05-0094-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.014

The Cushion Performance Analysis of Packaging Equipment under Impact

LIU Ping, BAI Yong-gang

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The paper aims to obtain optimistic structure of cushion component with the lowest size and mass. The theoretical models for analysis of dynamic behavior of cushion component in packaging equipment under impact environment were established based on conservation of energy, and the relationships of the size of cushion component versus protective performance were gained including both cases of front impact and side impact. New design with foam filled honeycomb (FFH) material of cushion component was studied, and accordingly the best parameters of FFH were chosen. The numerical models of cushion component during impact were realized and computed. The protective effect of cushion component was analyzed, and the velocities of equipment to be protected were attained. During impacts of different attitudes, the sizes of cushion component increased with impact energy increasing and decreased when density and plateau stress increased. When the sizes and mass of cushion component was lowest, the density for FFH was found to be 600 kg/m^3 . And the mass of cushion component with FFH was reduced by 49% compared to spruce. The computational results using Material Point Method validated that the cushion

收稿日期: 2021-04-02; 修订日期: 2021-04-16

Received: 2021-04-02; Revised: 2021-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(11602255)

Fund: National Natural Science Foundation of China (11602255)

作者简介: 刘平(1987—), 女, 助理研究员, 主要研究方向为力学、机械设计。

Biography: LIU Ping (1987—), Female, Assistant researcher, Research focus: mechanics, mechanical design.

引文格式: 刘平, 白永钢. 包装装备跌落撞击缓冲特性分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 094-099.

LIU Ping, BAI Yong-gang. The cushion performance analysis of packaging equipment under impact[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 094-099.

component with FFH could reduce the high impact velocity to target value of low impact velocity. The cushion component designed with FFH satisfied security demands of cushion component under impact, and could reduce the total mass largely.

KEY WORDS: cushion component; conservation of energy; material point method; foam filled honeycomb

易爆产品在运输过程中,可能遭遇异常跌落撞击环境,会对该产品造成损伤,危害其结构和功能完整性。在产品外加装包装箱,作为运输过程中的缓冲防护装置,对于易爆产品运输过程的安全性至关重要。该包装箱的缓冲防护效果直接影响易爆产品的安全性,尤其是当易爆产品内部含有含能材料时。因此,针对包装箱结构开展异常冲击环境下的动态力学响应特性研究具有重要的意义^[1]。

包装箱的缓冲结构是异常撞击环境下缓冲防护的主要吸能部件^[2-3]。该缓冲结构通常采用多孔疏松材料,如泡沫和木材等^[4-6]。包装装备在设计时,还需要考虑制造成本、运输成本、使用操作等方面的问题,故而需要包装装备在满足防护要求的前提下,尺寸和质量尽可能小。

目前由于易爆产品面临的运输冲击环境越发严酷,传统的缓冲材料已不能满足易爆产品的安全防护需求。鉴于泡沫填充蜂窝材料在动态冲击环境中优良的力学行为,可作为缓冲结构一种可选的新型材料。泡沫填充蜂窝材料在静态和动态情况下均具有比纯泡沫和纯蜂窝更优良的吸能效果,近年来国内外学者针对其动态力学性能、吸能效率等开展了大量的研究^[7-10]。

物质点法是一种可以描述复杂结构大变形的无网格数值计算方法^[11]。该方法不仅可以用来复现复杂结构的细观大变形,还可用来描述宏观高速撞击的损伤情况^[12-16]。采用物质点法来描述泡沫填充蜂窝材料的动态力学行为机制^[10],计算结果均与试验吻合,验证了物质点法模拟泡沫填充蜂窝材料动态加载力学响应的适用性。

文中首先采用理论分析的方法,基于能量守恒,建立了易爆产品不同撞击姿态下描述缓冲结构吸能效果与高速冲击、质量、空间约束的关系,开展了高速冲击环境下缓冲结构的优化设计工作。采用物质点法对设计的缓冲结构进行防护效果的验证,分析了传递到被保护产品的冲击能量,评估其撞击环境安全性。

1 运输冲击环境

1.1 典型包装箱结构

包装装备安装在被保护易爆产品外部,用于保证易爆产品在撞击过程中的安全性。包装装备缓冲结构如图 1 所示。在撞击过程中,通过包装装备缓冲结构的变形吸能,使得传递到易爆产品的高速撞击能量降

低到其自身可防护的低速撞击水平。

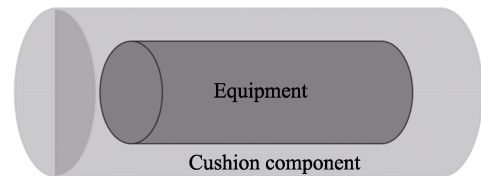


图 1 包装装备缓冲结构

Fig.1 Schematic diagram of cushion component in packaging equipment

1.2 撞击姿态

在易爆产品运输撞击过程中,包装装备可能遭遇各种撞击姿态,包括正碰、侧碰等,如图 2 所示。由于缓冲结构和易爆产品为圆柱结构,不同的撞击姿态对其撞击过程的缓冲吸能效果有影响。

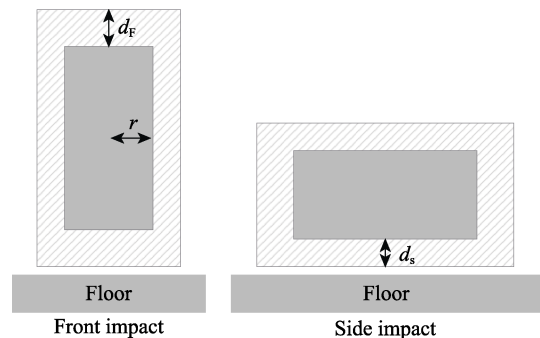


图 2 撞击姿态

Fig.2 Schematic diagram of impact attitude

2 新型材料缓冲结构设计

2.1 正撞

在包装装备高速撞击过程中,正撞撞击时,冲击能量完全作用在端面缓冲层上,如图 2 所示。由于高速冲击过程中,动态结构响应呈现局域化的特征,保守分析假设所有的冲击动能均由被保护体前撞击方向上有效面积的缓冲材料来耗散。那么,缓冲材料的有效面积 $A(x)$ 为:

$$A(x) = \pi r^2 \quad (1)$$

式中: x 为缓冲材料的压缩量; r 为内箱体的端面直径。忽略重力,冲击动能的耗散完全由缓冲材料吸收,则可得:

$$\int_0^{d_m} P(x) dx = \frac{m(v^2 - v_r^2)}{2} \quad (2)$$

式中: $P(x)$ 为缓冲材料的反作用力; v 为有效载荷的初速度; v_r 为有效载荷的剩余速度; d_m 为缓冲层的最大压缩量; m 为有效质量。

缓冲结构材料通常选用多孔吸能材料, 其应力应变曲线包括弹性段、平台段和压实段, 其中平台段为主要吸能效果的区域^[17]。因此, 假设缓冲吸能全部由平台段来实现, 平台段的应力为 σ_c , 则:

$$P(x) = \sigma_c \cdot A(x) \quad (3)$$

假设缓冲材料平台段在压缩到 W (%) 以后到达压实段, 可取:

$$d_m = d \cdot W \quad (4)$$

有效质量 m 包括被保护体质量 m_1 和端面缓冲材料的质量 m_2 。由于有效面积上的缓冲结构质量包括两部分, 因此 $m_2 = 2\pi r^2 d_F \rho$, ρ 为缓冲材料的密度。结合以上各式, 积分可得, 正撞工况下, 缓冲材料的厚度为:

$$d_F = \frac{m_1(v^2 - v_r^2)}{2\sigma_c \pi r^2 \cdot W - 2\pi r^2 \rho(v^2 - v_r^2)} \quad (5)$$

2.2 侧撞

与正撞击略有不同, 在侧撞过程中, 缓冲结构材料的有效面积 $A(x)$ 随着压缩量变化, 如图 3 所示, 计算如下:

$$A(x) = L \cdot 2\sqrt{R^2 - (R-x)^2} = L \cdot 2R \sin \varphi \quad (6)$$

式中: L 为被保护体长度; R 为包装箱外径, $R = r + d_s$ 。

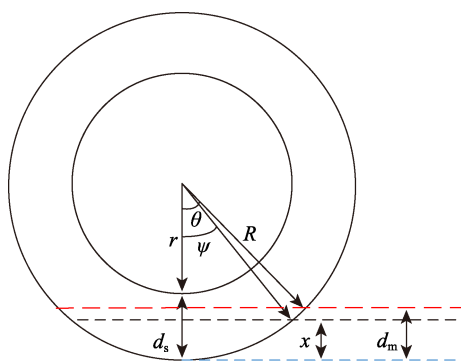


图3 侧撞截面

Fig.3 Schematic diagram of cross section for side impact

此时根据能量守恒可得:

$$\int_0^{d_m} \sigma_c \cdot 2L \sqrt{R^2 - (R-x)^2} dx = \frac{(m_1 + m_3)(v^2 - v_r^2)}{2} \quad (7)$$

式中, 包裹被保护体缓冲材料的质量 $m_3 = L(\pi R^2 - \pi r^2)\rho$ 。令:

$$\begin{cases} x = R - R \cos \varphi \\ d_m = R - R \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

代入式 (7) 后积分可得:

$$\sigma_c \cdot LR^2 \cdot \left(\cos^{-1} \frac{R-d_m}{R} - \frac{(R-d_m)\sqrt{R^2 - (R-d_m)^2}}{R^2} \right) = \frac{(m_1 + L(\pi R^2 - \pi r^2)\rho)(v^2 - v_r^2)}{2} \quad (9)$$

按照缓冲材料压缩率 $d_m = d_s \cdot W$ 来计算, 结合式 (9) 和式 (4) 可得 d_s 与撞击能量的关系。

2.3 缓冲层厚度与撞击能量的关系

根据 2.1 和 2.2 的公式, 针对现有被保护体采用木材材料^[5-6]来分析针对不同的撞击能量情况下对缓冲材料厚度的要求, 目标是将被保护体的撞击速度降低到同一低速撞击水平。在正撞和侧撞工况下, 缓冲结构厚度随撞击速度的变化关系如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 撞击速度越小, 缓冲层厚度越小。这是由于撞击速度小, 需吸收的动能越小。在实际进行缓冲结构设计时, 需根据缓冲结构需防护的速度以及选用的缓冲材料动态力学参数, 确定可防护该撞击的缓冲结构尺寸。

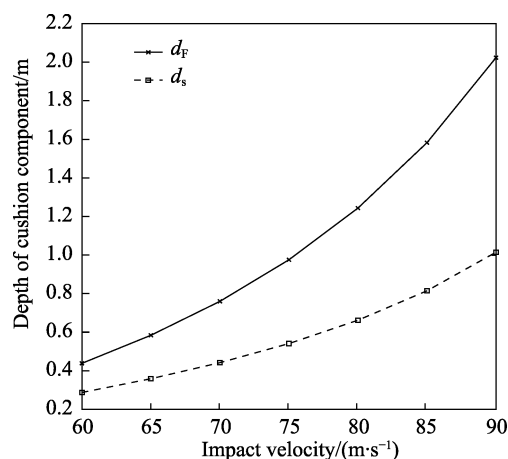


图4 缓冲结构厚度与撞击速度的关系

Fig.4 Depth of cushion components versus impact velocity

为选取合适的缓冲结构材料, 分析缓冲结构材料参数对缓冲结构厚度的影响, 主要考虑缓冲结构的密度和平台应力。正撞和侧撞工况下, 缓冲材料的密度和平台应力对缓冲结构厚度的影响如图 5 所示。从图 5a 中可以看出, 在防护相同的撞击能量时, 缓冲材料厚度随缓冲密度的增大而增大, 随平台应力的增大而减小。这是因为, 由于缓冲层密度增加, 质量增加, 需耗散的动能增加, 缓冲层厚度增加。从图 5b 中可以看出, 平台应力越大, 单位质量可耗散的动能越大。当需耗散的动能总量一定时, 所需质量越小, 缓冲层厚度越小。因此, 在选取缓冲层材料时, 应考虑密度小和平台应力大的材料, 从而达到降低整体缓冲结构质量的目的。

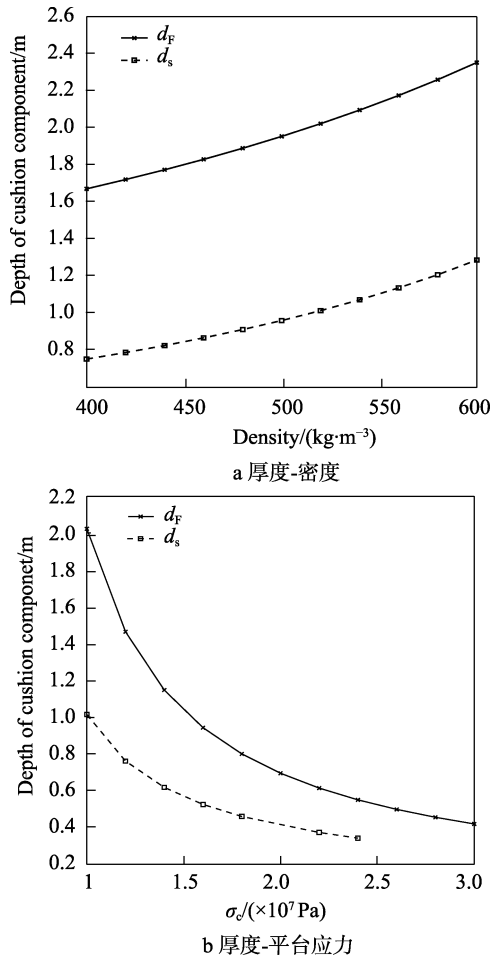


图 5 缓冲材料参数与缓冲结构尺寸的关系

Fig.5 The relationship between sizes of cushion component and material parameters: a) depth v.s. density; b) depth v.s. plateau stress

3 缓冲结构冲击环境特性分析

3.1 缓冲材料优选

泡沫填充蜂窝材料 (FFH) 由于密度小和平台应力较高, 是可以作为包装装备缓冲结构的优良材料^[18-20]。基于文献[7]中 FFH 材料动态力学性能研究结论, 其平台应力随密度的增加而增加。根据不同密度 FFH 材料的应力应变曲线, 结合式 (5) 和式 (9) 获得缓冲结构尺寸和质量随 FFH 密度的变化情况。高速撞击环境下, 缓冲结构尺寸和对应质量随 FFH 密度的变化关系如图 6 所示。可以看出, 正撞和侧撞的尺寸随 FFH 密度的增大而降低。这是由于密度增大, 导致平台应力大大增加, 从而降低了缓冲结构的尺寸。由此可以得出, 在当前分析的 FFH 密度范围内, 在 FFH 材料密度为 400 kg/m³ 时, 缓冲结构质量最大, 在 600 kg/m³ 时, 质量最小。相比于传统木材材料而言, 正撞和侧撞工况下, 厚度分别可降低约 48% 和 67%, 质量至少可降低约 49%。

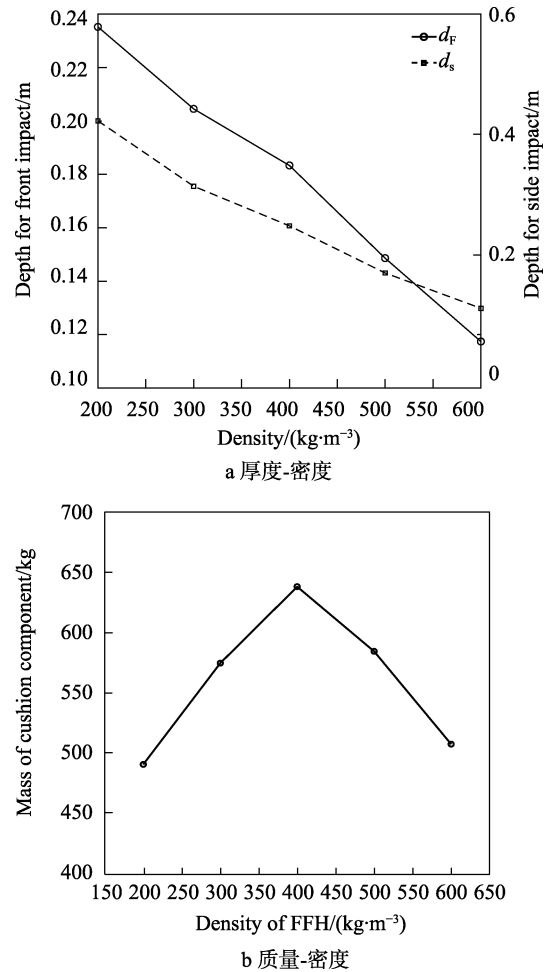


图 6 FFH 缓冲结构尺寸和质量对密度的变化关系

Fig.6 The variation relationship between sizes and mass of FFH cushion component and density: a) depth v.s. density; b) mass v.s. density

3.2 动态力学分析

为了使缓冲结构的质量和尺寸最小, 优选 FFH 材料密度为 600 kg/m³。建立缓冲结构的物质点模型, 获得在高速撞击工况下材料的变形和吸能情况。在被压实情况下, 缓冲结构的变形情况如图 7 和图 8 所示, 其中灰色区域为缓冲结构, 内部为被保护产品, 黑色区域为进入塑性平台段区域, 白色区域为塑性应变压实区域。从图 7 中可以看出, 对于正向撞击而言, 缓冲材料在 0.05 ms 未产生塑性变形, 撞击面略微压扁; 在 0.2 ms 时, 开始进入塑性变形平台段; 随后在 0.25 ms 左右, 开始从撞击点附近出现压实区域; 直至 1.0 ms 时, 在撞击方向下方的缓冲材料基本完全被压实。对于侧向撞击而言, 从图 8 中可以看出, 缓冲材料在 0.5 ms 未产生塑性变形, 撞击点附近略微压扁; 在 0.15 ms 开始进入塑性变形平台段; 在 0.2 ms 开始出现压实区域; 直至 1.0 ms, 缓冲材料被压实, 可能出现破坏。

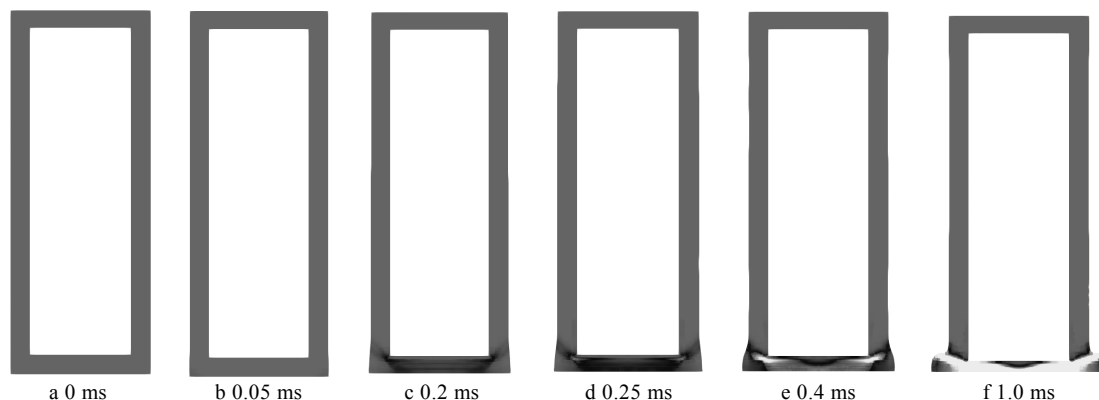


图7 正撞击工况的FFH缓冲材料变形过程

Fig.7 The deformation processes of FFH cushion component during front impact

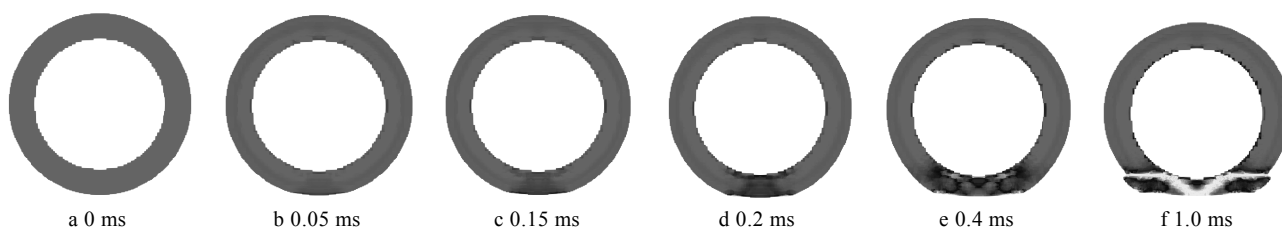


图8 侧撞击工况的FFH缓冲材料变形过程

Fig.8 The deformation processes of FFH cushion component during side impact

被保护产品的速度变化情况如图9所示。从图9中可以看出,在缓冲材料完全被压实的情况下,被保护体的速度均降低到低速撞击水平以下,验证了在高速撞击条件下采用FFH缓冲结构的缓冲防护效果,可达到保护产品的目的。

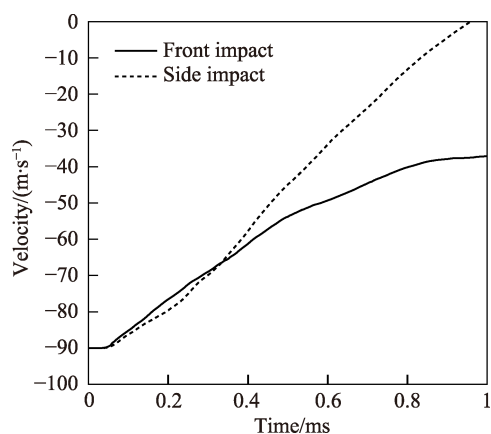


图9 被保护体在不同撞击工况下速度变化情况

Fig.9 The velocity variation of protected object under different impact cases

4 结论

1) 建立了在正撞和侧撞姿态的高速撞击下,缓冲结构尺寸与防护效果的数学分析模型,获得了缓冲结构尺寸和质量随撞击速度、材料参数的变化关系,为动力学结构设计和材料选型提供了依据。

2) 采用新型FFH材料设计缓冲结构,优选 600 kg/m^3 密度的FFH材料作为缓冲结构材料,可使得正撞工况缓冲结构厚度降低48%,侧撞工况厚度降低67%,质量降低约49%。

3) 物质点法数值计算验证了FFH缓冲结构的防护效果,在缓冲材料被压实时,被保护产品速度可以从高速撞击降低到目标低速撞击水平。

参考文献:

- [1] SLAVIN A M. Simulation of impact of the generic accident-resistant packaging (GAP)[R]. United States: Materials Research Bulletin, 1994.
- [2] 葛任伟, 欧阳勇, 张怀宇, 等. 抗事故包装箱缓冲结构厚度计算方法研究[J]. 机械设计与制造, 2011, 2(12): 38-40.
GE Ren-wei, OU YANG Yong, ZHANG Huai-yu, et al. Research of computing methods of thickness of buffering structure of accident resistant packing cases[J]. Machinery design & manufacture, 2011, 2(12): 38-40.
- [3] 钟卫洲, 张则熊, 刘小刚, 等. 多层包装箱冲击缓冲效应数值分析[J]. 中国测试, 2018, 44(10): 184-188.
ZHONG Wei-zhou, ZHANG Ze-xiong, LIU Xiao-gang, et al. Numerical analysis on impact cushion behavior of multilayer container[J]. China measurement & test, 2018, 44(10): 184-188.
- [4] 徐伟芳, 谢若泽, 钟卫洲. 抗事故包装箱的跌落冲击分析技术[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 25-30.
XU Wei-fang, XIE Rou-ze, ZHONG Wei-zhou. Drop

- impact analysis technique of accident-resistant container[J]. Packing engineering, 2017, 38(21): 25-30.
- [5] 钟卫洲, 邓志方, 黄西成, 等. 中应变率加载下云杉各向异性力学行为研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 25-33. ZHONG Wei-zhou, DENG Zhi-fang, HUANG Xi-cheng, et al. Investigation on anisotropic behavior of spruce mechanical properties under medium strain rate loading conditions[J]. Engineering mechanics, 2016, 33(5): 25-33.
- [6] 钟卫洲, 邓志方, 魏强, 等. 不同加载速率下木材失效行为的多尺度数值分析[J]. 中国测试, 2016, 42(10): 79-84. ZHONG Wei-zhou, DENG Zhi-fang, WEI Qiang, et al. Multi-scale numerical analysis of failure behavior of wood under different speed loading conditions[J]. China measurement & test, 2016, 42(10): 79-84.
- [7] 甄建伟, 安振涛, 陈玉成, 等. 蜂窝增强泡沫塑料的静态力学性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 223-228. ZHEN Jian-wei, AN Zhen-tao, CHEN Yu-cheng, et al. Quasi-static and dynamic mechanical properties of honeycomb reinforced plastic foam[J]. Acta materiae compositae sinica, 2011, 28(3): 223-228.
- [8] NIKNEJAD A, LIAGHAT G H, NAEINI H M, et al. Theoretical and experimental studies of the instantaneous folding force of the polyurethane foam-filled square honeycombs[J]. Materials and design, 2011, 32(1): 69-75.
- [9] MAHMOUDABADI M Z, SADIGHI M. A study on the static and dynamic loading of the foam filled metal hexagonal honeycomb—Theoretical and experimental[J]. Materials science & engineering A, 2011, 530: 333-343.
- [10] 刘平, 王相玉, 黄舟. 泡沫填充蜂窝材料动态力学性能的物质点法模拟[J]. 复合材料学报, 2020, 37(9): 2230-2239. LIU Ping, WANG Xiang-Yu, HUANG Zhou. Dynamic behavior simulation of foam filled honeycomb using material point method[J]. Acta materiae compositae sinica, 2020, 37(9): 2230-2239.
- [11] 张雄, 刘岩, 廉艳平. 物质点法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015. ZHANG Xiong, LIU Yan, LIAN Yan-ping. Material point method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [12] LIU Ping, LIU Yan, ZHANG Xiong, et al. Investigation on high-velocity impact of micron particles using material point method[J]. International journal of impact engineering, 2015, 75: 241-254.
- [13] LIU Ping, LIU Yan, ZHANG Xiong. Internal-structure-model based simulation research of shielding properties of honeycomb sandwich panel subjected to high-velocity impact[J]. International journal of impact engineering, 2015, 77: 120-133.
- [14] LIU Yan, GONG Wei-wei, ZHANG Xiong. Numerical investigation of influences of porous density and strain-rate effect on dynamical responses of aluminum foam[J]. Computational materials science, 2014, 91: 223-230.
- [15] LIU Yan, SI Xue-na, LIU Ping. Mesoscopic modeling and simulation of 3D orthogonal woven composites using material point method[J]. Composite structures, 2018, 203(1): 425-435.
- [16] 张雄, 刘岩, 张帆, 等. 极端变形问题的物质点法研究进展[J]. 计算力学学报, 2017, 34(1): 1-16. ZHANG Xiong, LIU Yan, ZHANG Fan, et al. Recent progress of material point method for extreme deformation problems[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2017, 34(1): 1-16.
- [17] 宋宏伟, 虞钢, 范子杰, 等. 多孔材料填充薄壁结构吸能的相互作用效应[J]. 力学学报, 2005(6): 697-703. SONG Hong-wei, YU Gang, FAN Zi-jie, et al. Interaction effect in energy absorption of porous material filled thin-walled structure[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2005(6): 697-703.
- [18] 鄂玉萍, 张喜俊. 泡沫填充型蜂窝纸板面外压缩性能实验研究[J]. 振动与冲击, 2017(20): 146-150. E Yu-ping, ZHANG Xi-jun. An experimental study on out-of-plane compressive behavior of a honeycomb paperboard filled with foams[J]. Journal of vibration and shock, 2017(20): 146-150.
- [19] 刘强, 陈航. EPP 泡沫填充对铝蜂窝压缩性能的影响研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(3): 49-52. LIU Qiang, CHEN Hang. Experimental and numerical investigation into the compression characteristics of aluminum honeycomb panel filled with EPP[J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2017(3): 49-52.
- [20] 刘强, 何兆亨, 陈航. EPP 泡沫填充对铝蜂窝动态冲击性能的影响研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(4): 45-50. LIU Qiang, HE Zhao-heng, CHEN Hang. Experimental investigation into the dynamic impact responses of aluminum honeycomb panel filled with epp foam[J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2018(4): 45-50.