

缓冲与隔振

立式瓦楞复合纸板静态压缩试验与有限元分析

李光, 李津乐

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 对立式瓦楞复合纸板的静态压缩过程进行试验研究和有限元分析, 研究不同楞型立式瓦楞复合纸板的力学性能。**方法** 制作 A 楞、AB 楞、B 楞等 3 种不同立式瓦楞复合纸板试样, 进行静态压缩实验, 得到其压缩应力-应变曲线; 建立 3 种楞型的立式瓦楞复合纸板有限元模型, 进行静力学分析, 得到其压缩应力-应变曲线, 并与实验结果进行对比分析。**结果** 试验和有限元分析均显示立式瓦楞复合纸板的静态压缩过程与蜂窝纸板的静态压缩过程类似, 包括弹性阶段、屈服阶段、平台阶段、密实化阶段, 试验和有限元分析所得到的压缩应力-应变曲线相吻合。纸板的峰值应力和平台应力与楞型有关, 且随着楞高的增大而减小。**结论** 通过试验研究和有限元分析方法得到了不同楞型立式瓦楞复合纸板的静态压缩性能, 对该新型材料的应用有重要参考价值。

关键词: 立式瓦楞复合纸板; 楞型; 静态压缩实验; 有限元分析

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0052-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.010

Static Compression Experiment and Finite Element Analysis of
Vertical Corrugated Composite Paperboard

LI Guang, LI Jin-le

(Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct experimental investigation and finite element analysis on the static compression process of the vertical corrugated composite paperboard, and study the mechanical properties of different flute corrugated composite paperboards. Three different vertical corrugated composite paperboards of A flute, AB flute and B flute were fabricated, and the compressive stress-strain curves were obtained after the static compression test. The finite element models of three vertical corrugated composite paperboards were established and the compressive stress-strain curves were obtained after statics analysis. The two kinds of curves were compared with the experimental results and analyzed. Both experiment and finite element analysis showed that the static compression process of vertical corrugated composite paperboard was similar to that of the honeycomb paperboard, including elastic stage, yield stage, platform stage and densification stage. The compressive stress-strain curves obtained from the experiment and finite element analysis fit well. The peak stress and the platform stress of the paperboard were related to flutes and decreased with the increase of the flute height. Static compression properties of different flute vertical corrugated composite paperboards are obtained in the methods of experimental investigation and finite element analysis. They have important reference value for the application of this new material.

KEY WORDS: vertical corrugated composite paperboard; flute; static compression experiment; finite element analysis

立式瓦楞复合纸板借鉴蜂窝板芯纸的排列结构, 改变传统瓦楞纸板的瓦楞纸卧式排列结构, 采用瓦楞纸立式排列结构, 是一种新型的环保包装材料。立式

瓦楞复合纸板与蜂窝纸板一样, 可用作物流过程中的缓冲吸能包装材料, 受载荷作用时, 可在几乎恒定的载荷下发生稳定的变形, 吸收大量的能量, 从而在包

收稿日期: 2017-12-17

基金项目: 天津市自然科学基金 (17JCTPJC54900)

作者简介: 李光 (1975—), 男, 博士, 天津科技大学副教授, 主要研究方向为包装机械、虚拟仿真、包装动力学。

装件受跌落冲击时保护产品免受损害^[1]。同时，立式瓦楞复合纸板有着比蜂窝纸板更高的抗压、抗弯和缓冲性能，可以代替传统的重型瓦楞纸板、蜂窝纸板和木材，符合国家节能减排和循环利用的产业政策，在物流运输包装领域有广阔的应用前景。

立式瓦楞复合纸板的力学特性与蜂窝纸板、瓦楞纸板有诸多相似之处，许多学者对此进行了深入研究。朱若燕^[2]、曾克俭^[3]分别研究了蜂窝纸板的静态和动态缓冲性能；王志伟^[4-5]研究了多层瓦楞纸板和蜂窝纸板的能量吸收特性，揭示了其应力-应变曲线变化的 4 个区段；付云岗^[6]、刘加红^[7]等研究了瓦楞纸板的压缩变形和缓冲性能；高德^[8-10]研究了钙塑瓦楞纸板准静态压缩与动态缓冲性能，并建立其本构模型。除此之外，有限元分析技术也广泛应用于缓冲包装材料分析。Li^[11]对铝蜂窝夹心板进行了试验研究和有限元分析；朱大鹏^[12]、滑广军^[13]、廖泽顺^[14]分别对蜂窝纸板振动传递特性、重型夹芯纸板侧压强度、新型绿色瓦楞蜂窝复合纸板力学性能进行了有限元仿真分析，从而更好了解材料的缓冲性能。

文中在上述研究工作的基础上，采用试验和有限元分析的方法，对立式瓦楞复合纸板的静态压缩性能进行研究，以期获得其应力-应变曲线，为该新型材料的应用提供参考。

1 立式瓦楞复合纸板静态压缩试验

1.1 试验材料

立式瓦楞复合纸板是由单瓦楞纸板，经过裁切、90°翻转、涂胶之后粘贴在一起形成立式排列结构，

再将面纸贴于其上、下表面形成的纸板。立式瓦楞复合纸板属于夹层结构，根据实验需要分别制作了夹层为 A 楞试样、AB 楞试样和 B 楞试样，其瓦楞排列方式见图 1，A 楞试样结构见图 2。试验所用的试样尺寸为 100 mm×100 mm×25 mm。

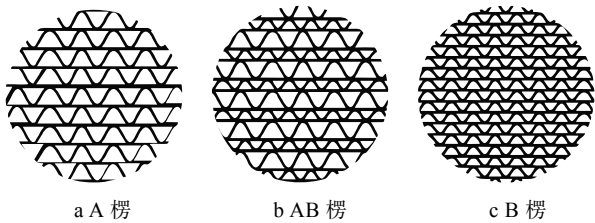


图 1 瓦楞排列方式
Fig.1 Corrugated arrangement

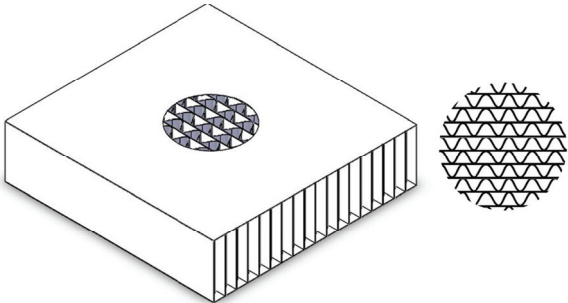


图 2 A 楞试样结构
Fig.2 Structure of A flute sample

3 种楞型立式瓦楞复合纸板的原纸材料相同，均为面纸定量为 160 g/m²、芯纸定量为 140 g/m² 的单瓦楞纸板，该纸板的原纸均由玖龙纸业有限公司生产，原纸材料属性见表 1。

表 1 面纸和芯纸的材料属性
Tab.1 Material properties of face layer and corrugated medium

类型	定量/(g·m ⁻²)	厚度/mm	环压强度/(N·m·g ⁻¹)	破裂强度/(kPa·m ² ·g ⁻¹)	抗张强度/(kN·m ⁻¹)	耐折次数
面纸	160	0.2	20.4	3.8	16.1	15
芯纸	140	0.2	18.5		13.7	

1.2 试验方法

根据 GB/T 4857.2《包装运输包装件温湿度调节》将试样进行标号，然后放入温度为 23 ℃、相对湿度为 50% 的恒温恒湿箱中处理 48 h，并保证温度误差在 ±2 ℃，湿度要求在任何 1 h 内的平均湿度不得超过规定相对湿度的 5%。

试验所用仪器为 Instron 3369 电子万能试验机，设定试验速率为 12 mm/min。试验步骤：随机抽取 5 个经过恒温恒湿处理过的试样作为实验对象；实验前测量试样的厚度作为试样的初始厚度；压板以 (12±3) mm/min 的速度沿厚度方向对试验样品逐渐增加载荷，压缩过程中记录压缩力和相应的变形量，记录

至少 10 个点来绘制对应的应力-应变曲线；当压缩载荷急剧增加时，卸去载荷并停止试验，3 min 后进行下一次试验。

1.3 试验结果

立式瓦楞复合纸板静态压缩前后对比见图 3，对试验得到的压缩载荷、压缩位移数据进行分析，将 3 种试样的压缩载荷-位移曲线转化为压缩应力-应变曲线。立式瓦楞复合板的应力-应变曲线见图 4，3 种试样的应力-应变曲线见图 5。由图 4 可以看出，应力-应变曲线包括弹性阶段 (OP)、屈服阶段 (PQ)、平台阶段 (QR) 和密实化阶段 (RS) 4 个部分，立式瓦楞复合板主要在平台阶段 (QR) 吸收能量。立式瓦

楞复合板是由面纸和瓦楞芯构成的网状结构,在受力时处于竖直状态的瓦楞芯的面纸与芯纸参与承载,与蜂窝纸板在受力时多个蜂窝参与承载的情况相似。传统蜂窝纸板的应力-应变曲线一般也分为线弹性、屈服、平台、密实化等4个阶段^[15],因此立式瓦楞复合板与蜂窝纸板力学行为相近。由图5可以看出,立式瓦楞复合板逐渐被压缩,依次经历弹性阶段、屈服阶段、平台阶段直至密实化阶段,且A楞试样的平台应力值最小,B楞试样的平台应力值最大,AB楞试样的平台应力值介于A楞试样和B楞试样之间。比较三者的压缩应变可以看出,3种试样均在压缩应变达到0.7~0.8时压溃,对应的应力值瞬间增大,试样进入密实化阶段,失去缓冲能力。



图3 静态压缩前后对比

Fig.3 Comparison before and after static compression

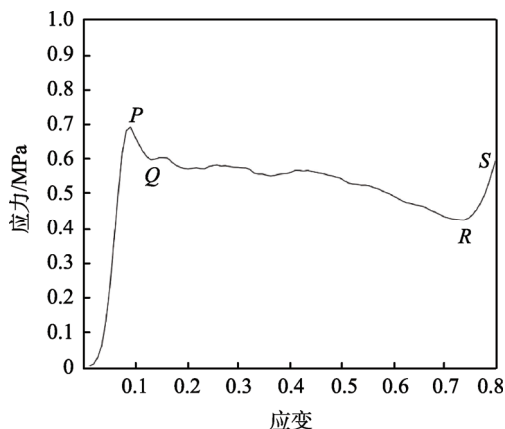


图4 立式瓦楞复合板应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of vertical corrugated composite paperboard

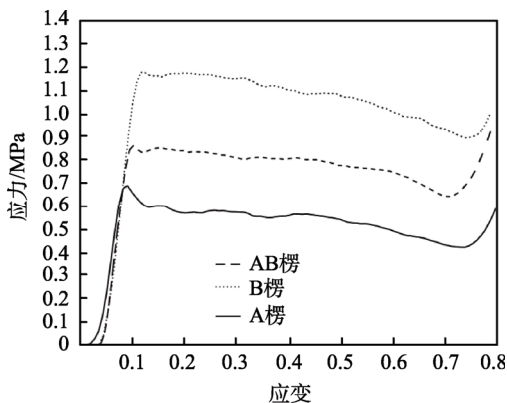


图5 3种试样的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of three samples

2 立式瓦楞复合纸板有限元分析

2.1 有限元模型

为了使有限元模型更接近试验模型,瓦楞形状的处理最为关键。CorelDRAW 是一款优秀的矢量绘图软件,有多种曲线绘图工具。首先在 CorelDRAW 中利用“贝塞尔工具”和“三点曲线工具”对瓦楞形状进行描绘。然后将文件导入 SolidWorks 中进行拉伸、阵列、装配等操作,最后得到立式瓦楞复合纸板三维模型,再将其导入 Ansys Workbench 中进行静态结构分析。由于立式瓦楞复合板属于典型的非线性材料,其变形具有粘弹塑性特点,属于大应变类型^[8]。文中采用双线性等向强化材料模型,面纸的基本参数中厚度为 0.2 mm,屈服应力为 6.555 MPa,弹性模量为 3.653 GPa,泊松比为 0.3,剪切模量为 1.405 GPa,芯纸的基本参数中厚度为 0.2 mm,屈服应力为 5.102 MPa,弹性模量为 2.606 GPa,泊松比为 0.3,剪切模量为 1.002 GPa。

有限元模型底部为刚性支撑板,上部为刚性压板,以此模拟压力试验机,上部刚性压板向下压缩过程中速度保持恒定,为 12 mm/min。刚性压板和刚性支撑板材料的密度为 7850 kg/m³,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3。中部立式瓦楞复合纸板模型尺寸为 100 mm×100 mm×25 mm。有限元网格划分时,立式瓦楞复合板采用 shell 163 单元,刚性压板和支撑板采用四边形单元。有限元模型中,瓦楞芯的面纸和芯纸设定为绑定 (Bonded) 关系,瓦楞芯与上下面纸同样设定为绑定 (Bonded) 关系,立式瓦楞复合板与上部刚性压板和下部刚性支撑板设置为点面接触。对刚性压板施加位移载荷,除压缩方向外,对底部刚性支撑板施加约束。为了收敛需要,沿瓦楞方向定义 5 个积分点。立式瓦楞复合纸板静态压缩有限元模型见图 6。



图6 静态压缩有限元模型

Fig.6 Static compression finite element model

2.2 有限元分析结果

以 A 楞型立式瓦楞复合纸板为例,典型阶段的变形见图 7,其中图 7a 为弹性阶段的变形情况,图 7b 为屈服阶段的变形情况,图 7c 为平台阶段的变形情况,图 7d 为密实化阶段的变形情况。为了便于观察瓦楞芯的结构变化,已隐藏立式瓦楞复合纸板的上部面纸。纸板初期压缩为弹性压缩阶段,瓦楞芯上端首先出现变形;在纸板压缩率增大到 10%后,进入屈服

阶段, 瓦楞芯的面纸和芯纸出现屈服; 在平台阶段, 纸板压缩率由 20% 增大到 70%, 瓦楞芯的屈服越来越大, 出现了大挠度的变形; 随着压缩的进行, 变形由瓦楞芯的上部传到下部, 纸板被压溃, 进入密实化阶段, 此时纸板压缩率为 75% 左右。由图 7 可以看出有限元仿真的变形结果与试验结果相一致。

在 Ansys 中输出接触反力, 经过处理后可以得到有限元仿真的立式瓦楞复合纸板静态压缩应力-应变曲线, 见图 8。对 A 楞试样的对比曲线进行分析, 发现初期应力增长较快, 峰值应力比试验结果大, 且平台应力一直高于试验结果, 在应变达到 0.7 时应力迅速增大, 进入压溃阶段。对 AB 楞试样的对比曲线进行分析, 发现初始阶段应力随应变的变化情况几乎一致, 但有限元分析的最大应力较大; 在平台阶段, 试验结果的平台应力缓慢减小, 而有限元分析的应力在平台应力值上下徘徊; 在密实化阶段之前, 试验分析

结果的应力值明显下降, 而有限元分析结果保持平稳。对 B 楞试样的对比曲线进行分析, 发现有限元分析曲线初期迅速上升, 应力值在应变为 0.1 时达到顶峰, 进入屈服阶段, 应力值下降较少, 平台阶段的应力值较平稳, 同样地, 在应变达到 0.7 时, 应力上升, 进入密实化阶段。

有限元模拟结果与试验模拟结果存在差异, 主要原因有以下几点: 有限元模型在建模时过于规范, 组成瓦楞芯的各个瓦楞条是通过阵列所得, 导致完全相同, 而实际生产的立式瓦楞复合板存在缺陷, 瓦楞条不尽相同; 静态压缩试验的面纸与芯纸是粘合剂粘贴在一起的, 而有限元分析时, 面纸与芯纸是多点约束, 且在压缩时阻碍了面纸与芯纸脱胶分离; 模型中设置的面纸和芯纸的参数可通过拉伸试验得到, 而该实验是压缩试验, 对结果会造成一定影响。

从 3 种试验的对比曲线可以看出, 试样所能承受

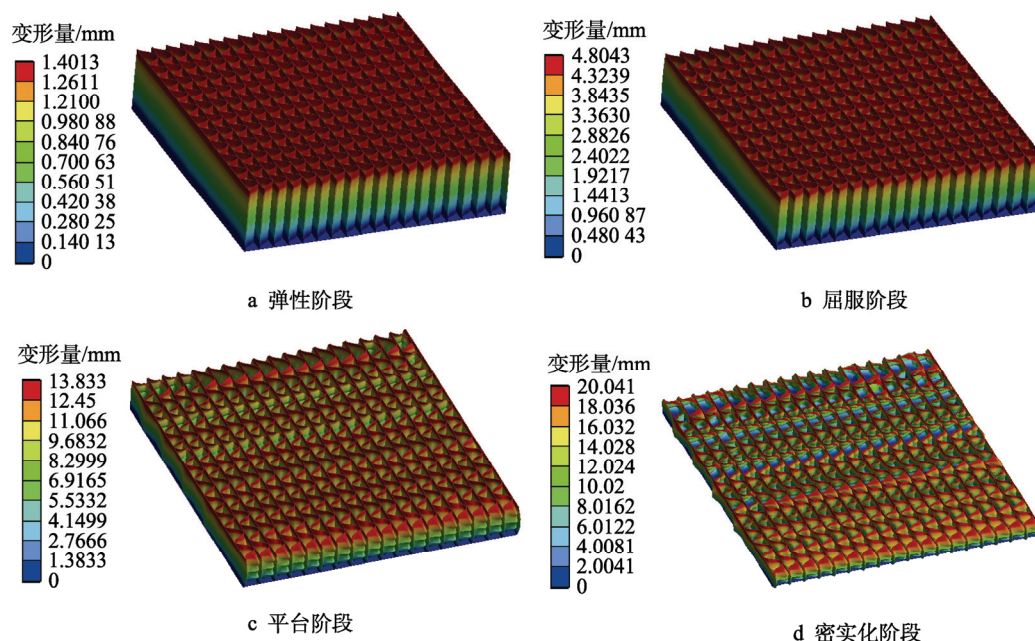


图 7 静态压缩变形

Fig.7 Static compression deformation

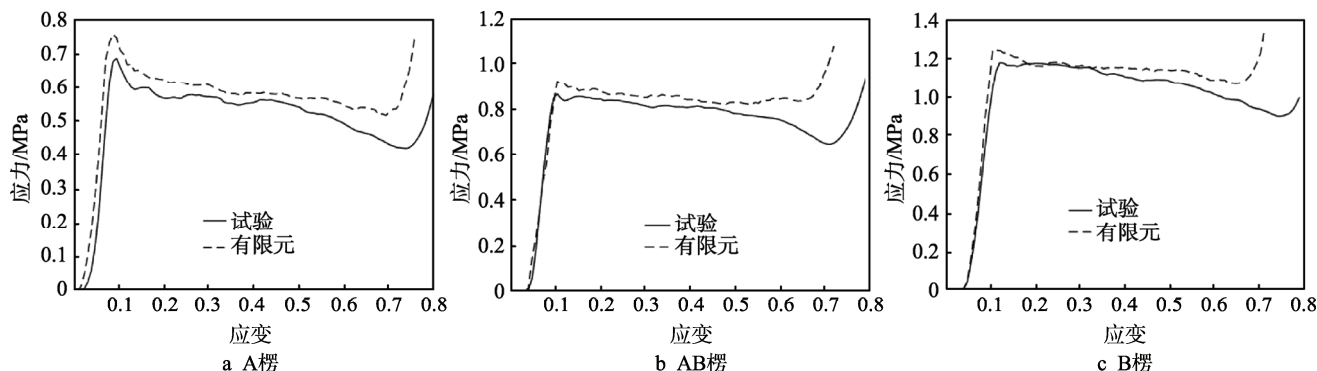


图 8 有限元分析与试验的应力-应变曲线对比

Fig.8 Comparison of stress-strain curves of finite element analysis and experiment

的最大应力从大到小依次为 B 楞、AB 楞、A 楞。可以看出,楞高越小,楞间距越小,能承受的最大应力较大。在实际的运输包装应用中,通过计算被包装物对立式瓦楞复合纸板产生最大应力的选择不同楞型的立式瓦楞复合纸板,最大应力值小于 0.8 MPa 时选择 A 楞纸板,最大应力值介于 0.8~1.0 MPa 时选择 AB 楞纸板,最大应力值介于 1.0~1.2 MPa 时选择 B 楞纸板,当最大应力值大于 1.2 MPa 时选择楞高比 B 楞更小的纸板作为芯板的立式瓦楞复合纸板,或者增加复合板的厚度。

3 结语

通过试验研究和有限元分析的方法得到了不同楞型立式瓦楞复合纸板的静态压缩性能,得到了 A 楞、AB 楞、B 楞等 3 种不同立式瓦楞复合纸板的应力-应变曲线,且经有限元分析得到的静态压缩应力-应变曲线与试验得到的曲线基本一致。

试验与有限元结果均显示,立式瓦楞复合纸板的静态压缩过程与蜂窝纸板的静态压缩过程类似,都是依次经过弹性阶段、屈服阶段、平台阶段、密实化阶段。

试验研究和有限元分析均表明,在相同温度和湿度下,纸板的峰值应力、平台应力与纸芯所采用的单瓦楞纸板的瓦楞类型有关,且随着楞高的增大而减小。

参考文献:

- [1] 王志伟,姚著. 蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 49—55.
WANG Zhi-wei, YAO Zhu. Experimental Investigation and Finite Element Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 49—55.
- [2] 朱若燕,尹琪,李厚民. 组合蜂窝纸板缓冲性能的静态试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(4): 105—107.
ZHU Ruo-yan, YIN Qi, LI Hou-min. Static Test Study on Buffer Performance of Combined Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2010, 25(4): 105—107.
- [3] 曾克俭,刘珊. 蜂窝纸板动态缓冲性能分析研究[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 15—18.
ZENG Ke-jian, LIU Shan. Analysis on Dynamic Cushioning Property of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 15—18.
- [4] WANG Zhi-wei, E Yu-ping. Energy Absorption Properties of Multi-layered Corrugated Paperboard in Various Ambient Humidities[J]. Materials and Design, 2011, 32: 3476—3485.
- [5] WANG Zhi-wei, E Yu-ping. Energy-absorbing Properties of Paper Honeycombs under Low and Intermediate Strain Rates[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 25: 173—185.
- [6] 付云岗,郭彦峰,王忠民. 瓦楞纸板的压缩变形及吸能特性研究[J]. 中国造纸学报, 2015, 30(3): 31—35.
FU Yun-gang, GUO Yan-feng, WANG Zhong-min. Compression Deformation and Energy Absorption Properties of Corrugated Paperboard[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2015, 30(3): 31—35.
- [7] 刘加红,温时宝,王泽鹏. 立方体层合瓦楞复合纸板的三向静态压缩性能研究[J]. 机械, 2014, 41(9): 30—34.
LIU Jia-hong, WEN Shi-bao, WANG Ze-peng. Study on Three-way Static Compressive Properties of Cubelaminated Corrugated Composite[J]. Machinery, 2014, 41(9): 30—34.
- [8] 高德,樊令强,冯军,等. 钙塑瓦楞纸板-蜂窝板复合结构缓冲功能实验分析[J]. 功能材料, 2014, 45(23): 23016—23019.
GAO De, FAN Ling-qiang, FENG Jun, et al. Cushioning Properties of Two-layered Cushioning Structure Stacked by Honeycomb and Calcium Plastic Board Subjected to Quasi-static Compressive Loadings[J]. Functional Materials, 2014, 45(23): 23016—23019.
- [9] 高德,冯军,卢富德,等. 平压单瓦钙塑瓦楞纸板本构模型[J]. 振动工程学报, 2014, 27(6): 852—857.
GAO De, FENG Jun, LU Fu-de, et al. Study on Constitutive Model of Single-wall Calcium Plastic Composite Corrugated Carboard under Flat Compression Loadings[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(6): 852—857.
- [10] 高德,武剑锋,卢富德,等. 预压缩多层钙塑瓦楞纸板准静态压缩与动态缓冲性能研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(3): 221—225.
GAO De, WU Jian-feng, LU Fu-de, et al. Mechanical and Cushioning Properties of Multilayer Calcium Plastic Corrugated Paperboard with Different Pre-compression Ratio[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(3): 221—225.
- [11] LI Shi-qiang, LI Xin, WANG Zhi-hua, et al. Finite Element Analysis of Sandwich Panels with Stepwise Graded Aluminum Honeycomb Cores under Blast Loading[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 80(1): 1—12.
- [12] 朱大鹏,赵跃利. 蜂窝纸板振动传递特性的试验研究与建模[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(4): 78—81.
ZHU Da-peng, ZHAO Yue-li. Experimental Study and Modeling of Vibration Transfer Characteristics of Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(4): 78—81.
- [13] 滑广军,廖泽顺,费伟民. 重型夹芯纸板侧压强度数值仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 107—110.
HUA Guang-jun, LIAO Ze-shun, FEI Wei-min. Numerical Simulation on Edgewise Compressive Strength of Heavy Sandwich Fiberboard[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 107—110.
- [14] 廖泽顺,马文书. 新型绿色瓦楞蜂窝复合纸板力学性能数值模拟分析[J]. 包装学报, 2017(2): 1—8.
LIAO Ze-shun, MA Wen-shu. Numerical Simulation Analysis of Mechanical Properties of New Type Green Corrugated Honeycomb Composite Paperboard[J]. Packaging Journal, 2017(2): 1—8.
- [15] 卢富德,高德. 蜂窝纸板一维动态本构关系及应用[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1): 38—44.
LU Fu-de, GAO De. One-dimensional Dynamic Constitutive Relationship and Application of Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 38—44.