

缓冲与隔振

层合方式和压缩方向对层合瓦楞纸板压缩性能的影响

孙德强^{a, b}, 李耿^{a, b}, 李国志^{a, b}, 金强维^{a, b}, 李靖靖^{a, b}, 史英惠^{a, b}, 胡昕^{a, b}

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室

b.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究层合方式和压缩方向对层合瓦楞纸板压缩性能的影响。**方法** 通过静态压缩对平齐式和交错式等2种层合瓦楞纸板的3个方向进行实验, 得到相应的应力-应变曲线, 运用能量效率法对其峰应力、平均抗压强度、总吸能和比能量吸收进行对比分析。**结果** 2种层合方式的瓦楞纸板在 x 、 y 、 z 方向的应力-应变曲线走势大致相似, 峰应力、平均抗压强度、总吸能和比能量吸收均为 x 方向最大, y 方向次之, z 方向最小。在 x 、 y 、 z 各个方向上, 平齐式层合瓦楞纸板的峰应力、平均抗压强度、总吸能和比能量吸收均高于交错式层合瓦楞纸板。**结论** 不同层合方式和压缩方向对层合瓦楞纸板压缩性能的影响较大, 设计重型缓冲包装时可以优先选择平齐式层合瓦楞纸板的 x 方向, 可以更好地达到提高缓冲效果和节约材料的目的。

关键词: 层合方式; 压缩方向; 层合瓦楞纸板; 能量效率法

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0001-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.001

Influence of Laminating Style and Compression Direction on Compression Properties of Laminated Corrugated Paperboard

SUN De-qiang^{a, b}, LI Geng^{a, b}, LI Guo-zhi^{a, b}, JIN Qiang-wei^{a, b}, LI Jing-jing^{a, b},
SHI Ying-hui^{a, b}, HU Xin^{a, b}

(a. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper Development

b. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education,
Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of laminating style and compression direction on compression properties of laminated corrugated paperboard. Through static compression, three directions of two types (overlapping type and interlacing type) of laminated corrugated paperboards were tested and the corresponding stress-strain curves were obtained. The peak strength, mean crushing strength, total energy absorption and specific energy absorption were comparatively analyzed with energy efficiency method. The stress-strain curves of corrugated paperboards of the two laminating styles in the respective directions of x , y and z were generally similar. For the two types of laminated corrugated paperboard, the peak strength, mean crushing strength, total energy absorption and specific energy absorption were the largest in the x direction, followed by those in the y direction, and the smallest was in the z direction. The peak strength, mean crushing strength, total energy absorption and specific energy absorption of overlapping laminated corrugated paperboard were higher than those of interlacing laminated corrugated paperboard in the directions of x , y and z . Different laminating styles and compression directions have a greater influence on the compression properties of laminated corrugated paperboard. In the design of heavy-duty cushioning packaging, the x direction of flush laminated corrugated paper-

收稿日期: 2018-04-09

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: 孙德强(1976—), 男, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为多孔材料力学性能测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发。

board can be preferentially selected, which can better achieve the purpose of improving the cushioning effect and saving materials.

KEY WORDS: laminating style; compression direction; laminated corrugated paperboard; energy efficiency method

层合瓦楞纸板由芯纸和面纸规则复合而成, 具有强度高、质量轻和易于废弃处理的特点, 主要用于机电设备等重型产品的包装, 通常用作纸箱、托盘和托箱等^[1]。层合瓦楞纸板根据层合方式的不同, 可分为平齐式和交错式层合瓦楞纸板, 目前对瓦楞纸板的研究主要集中在平齐式瓦楞纸板垂直于面纸方向, 即 z 方向的研究, 对交错式瓦楞纸板以及其余 2 个方向的研究甚少, 因此研究层合方式和压缩方向对瓦楞纸板压缩性能的影响有着一定的理论意义和实用价值。

Sek 等^[2]建立了瓦楞纸板基于静态及准动态压缩试验数据的缓冲特性数学模型。Lu 等^[3]对正弦波瓦楞纸板在横向载荷作用下, 面板的局部压溃、纸板的整体变形进行了理论与试验研究。郭金玲^[4]通过静态压缩试验获得多层瓦楞纸板的应力-应变曲线, 并对其破坏模式及破坏机理进行了分析。温时宝^[5]研究了楞型不同、厚度相同, 楞型相同、厚度不同的瓦楞纸板结构, 分析了瓦楞方向上纸板的静态压缩性能。Magnucki 等^[6]研究了具有横向正弦瓦楞主芯和 2 个夹层面与钢泡沫芯的 7 层钢梁, 制定了梁的 2 个分析模型, 解决了梁的三点弯曲和轴向压缩问题。Wang^[7]分析了多层瓦楞夹层结构的压缩行为。刘晔等^[8]分析了典型的三重组合瓦楞纸板静态平压应力-应变曲线规律, 按线性、正弦、正切曲线分段建立非线性数学模型。Cao 等^[9]研究了多层瓦楞夹层结构异面压缩冲击载荷下的力学行为, 揭示了相邻层之间的相互作用。刘晔等^[10]以重型商品包装中广为采用的三重组合瓦楞纸板为对象, 通过静态平压、边压和侧向压缩实验, 从应力应变关系、压缩失效形态上讨论了 3B 和 X-PLY(B) 型组合板材的强度特性与承压规律。Wang^[11]基于静态压缩实验, 考虑多层瓦楞纸板的结构因素, 获得了能量吸收模型。Lestari 等^[12]介绍了一种新的测量方法来估计夹层结构的横向剪切刚度特性, 并根据实验结果估计夹层结构的弹性模量和横向剪切模量。温时宝等^[13]通过静态压缩试验, 对 B 楞和 C 楞层合瓦楞纸板 3 个方向的平压性能进行了研究, 并绘制了其载荷变形曲线和应力-应变曲线。

这里将通过静态压缩的方式对层合瓦楞纸板进行试验, 得出不同层合方式、不同压缩方向的层合瓦楞纸板的应力-应变曲线和变形模式, 通过能量效率法对其峰应力、平均抗压强度、总吸能和比能量吸收等进行对比分析, 得出层合方式以及压缩方向对层合瓦楞纸板压缩性能的影响。

1 实验

1.1 材料与仪器

采用 C 楞瓦楞纸板(陕西天成纸业有限公司生产), 纸板面纸和芯纸的定量均为 130 g/m^2 。黏合剂为熊猫白胶(汉高粘合剂有限公司上海分公司生产)。参照 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[14], 试验样品均由手工制作, 先利用纸板取样器将瓦楞纸板裁成一定规格的样片, 再根据不同的层合方式将样片用黏合剂粘合起来, 为了排除其他因素对试验结果的影响, 所有样品的结构尺寸均为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。为了保证试验的可靠性以及减小相关误差的影响, 文中所有规格的试样均制作了 3 个相同的样品对其进行试验。对试验样品进行编号处理, 平齐式用 A 表示, 交错式用 B 表示, 即 A-x 表示平齐式层合瓦楞纸板沿 x 方向进行压缩的样品。层合方式和压缩方向见图 1。

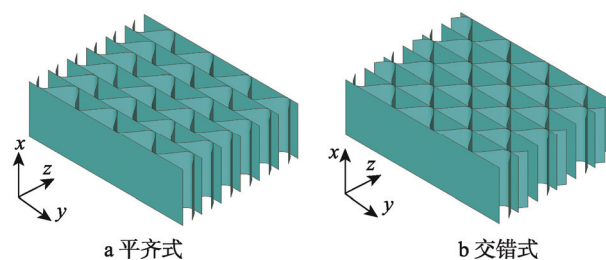


图 1 不同层合方式瓦楞纸板

Fig. 1 Corrugated paperboard with different laminating styles

试验所使用的实验设备为微机控制电子万能试验机(CMT4304, 美特斯工业系统(中国)有限公司生产), 见图 2。试验过程中, 在样品的上下表面各放置 1 块面积大于样品面积的钢板, 以保证样品受压均匀。

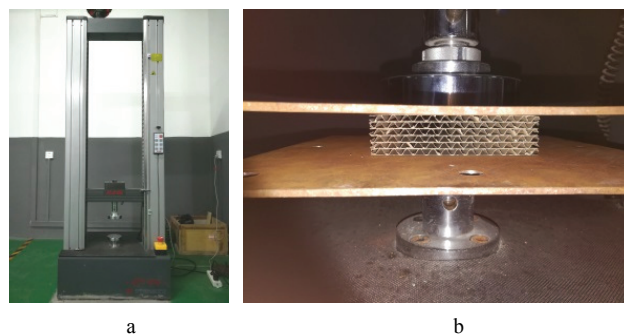


图 2 实验仪器及样品压缩示意

Fig. 2 Schematic diagram of test equipment and sample compression

1.2 方法

试验前先对样品进行预处理，将样品在温度为 20 ℃、相对湿度为 70% 的环境条件下处理 24 h 以上。参照 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》，以 (12±3) mm/min 的速度对每种规格的 3 个样品进行施压，直至试样被压溃，试验中可以自动获得试验过程的力-位移曲线。通过对 3 个样品取平均值的方式，得到压缩过程的应力-应变曲线，然后通过能量效率法^[15-16]对样品的结构性能进行比较研究。

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线

平齐式和交错式 2 种层合瓦楞纸板在 x , y , z 方向压缩的应力-应变曲线见图 3。2 种层合方式的纸板在 x , y , z 方向的曲线走势大致相似。对于 x 方向压缩的样品，纸板开始压缩时发生弹性变形，应力随应变呈线性增长；达到峰应力后产生弹性屈曲，进入屈服阶段，应力迅速回落；之后进入平台阶段，应力以微小幅度波动式下降；当应变达到密实化应变时瓦楞纸板进入密实化阶段，应力随应变增加而急剧上升。对于 y 方向压缩的样品，应力-应变曲线同样会呈现弹性阶段、屈服阶段、平台阶段和密实化阶段，不过曲线在平台阶段时，应力随着应变的增加稳定在某个值附近，以微小幅度摆动。对于 z 方向压缩的样品，应力-应变曲线会呈现弹性阶段、平台阶段和密实化阶段，即应力在达到峰应力后进入平台阶段，在平台阶段呈现不规则的近似水平的波浪状曲线，之后进入密实化阶段。

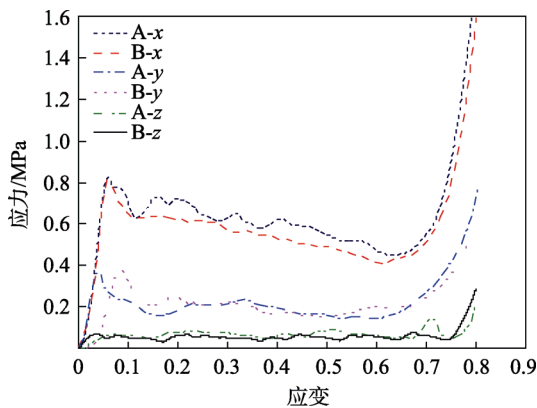


图 3 应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve

2.2 能量吸收效率

样品在一个特定应变 ε_a 处的能量吸收效率 E_f 被定义为：

$$E_f(\varepsilon_a) = \frac{\int_0^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_a}, 0 \leq \varepsilon_a \leq 1 \quad (1)$$

式中： σ_a 为应变 ε_a 对应的应力。

密实化应变 ε_D 为胞壁挤压在一起时的临界应变，用最大能量吸收效率值所对应的应变 ε_i 来表示，满足如下条件：

$$\left. \frac{dE_f(\varepsilon_i)}{d\varepsilon_i} \right|_{\varepsilon_i=\varepsilon_D} = 0, 0 \leq \varepsilon_i \leq 1 \quad (2)$$

样品的能量吸收效率曲线见图 4，可以看出各条曲线呈现出大致相同的变化趋势。在到达密实化应变之前，随着应变的增加，能量吸收效率逐渐上升，只是 z 方向压缩的样品波动幅度较大，这是由样品在该方向是逐层压溃导致的。密实化应变对应于应力-应变曲线中应力开始急剧增加的那个点。从这个点开始，样品仍然可以通过塑性变形吸收能量，但其吸收效率却开始降低。由图 4 可以看出， z 方向压缩的密实化应变和最大能量吸收效率普遍高于 x 和 y 方向。在 3 个方向上，平齐式层合瓦楞纸板的最大能量吸收效率均高于交错式层合瓦楞纸板。

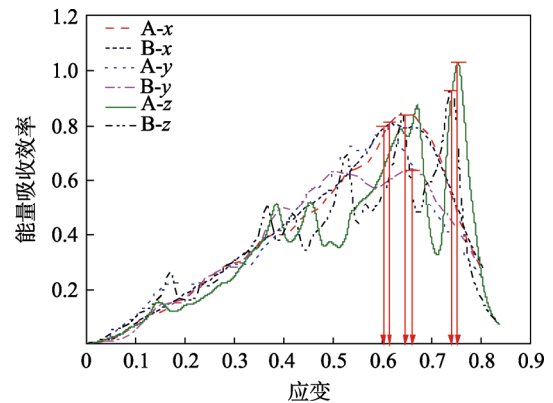


图 4 能量吸收效率

Fig.4 Energy absorption efficiency

2.3 压缩强度

峰应力 σ_{max} 是评估载荷承载能力的关键指标，表示试验中的初始峰值压溃力；平均抗压强度 σ_m 是用来评估样品能量吸收性能的有效指标，计算方法为^[15]：

$$\sigma_m = \frac{1}{\varepsilon_D} \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

2 种层合方式纸板在 3 个方向压缩的峰应力和平均抗压强度见图 5。对于 2 种层合瓦楞纸板，峰应力和平均抗压强度均为 x 方向最大， y 方向次之， z 方向最小。平齐式层合瓦楞纸板的峰应力在 x 方向为 y 方向的 2.13 倍， z 方向的 11.86 倍，平均抗压强度 x 方向为 y 方向的 3.11 倍， z 方向的 8.43 倍；交错式层合瓦楞纸板的峰应力在 x 方向为 y 方向的 2.22 倍， z 方向的 11.71 倍，平均抗压强度 x 方向为 y 方向的 2.84 倍， z 方向的 10.8 倍。在 x , y , z 各个方向上，平齐式瓦楞纸板的峰应力和平均抗压强度均略高于交错式瓦楞纸板，但差距较小。

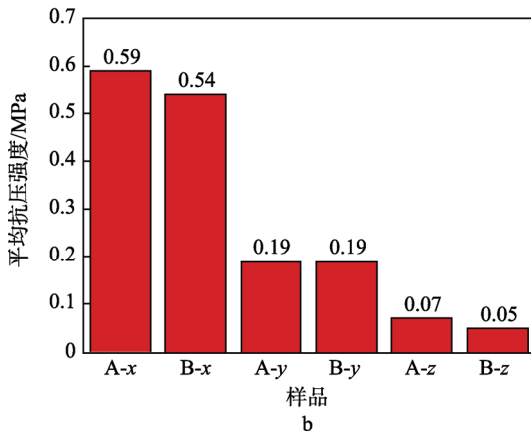
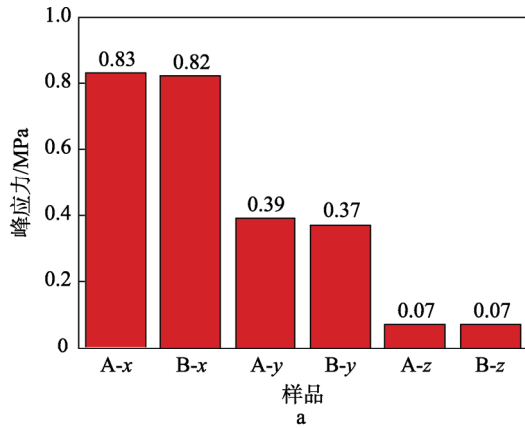


图5 峰应力和平均抗压强度
Fig.5 Peak strength and mean crushing strength

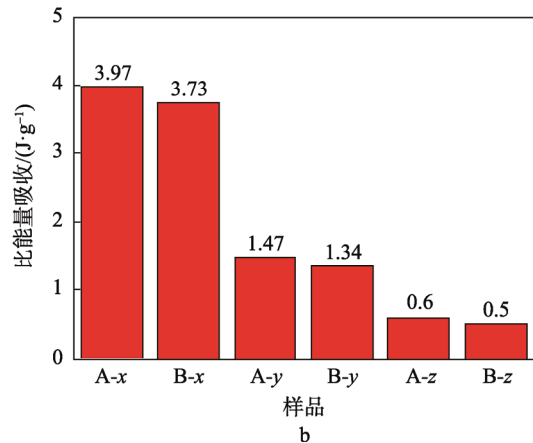
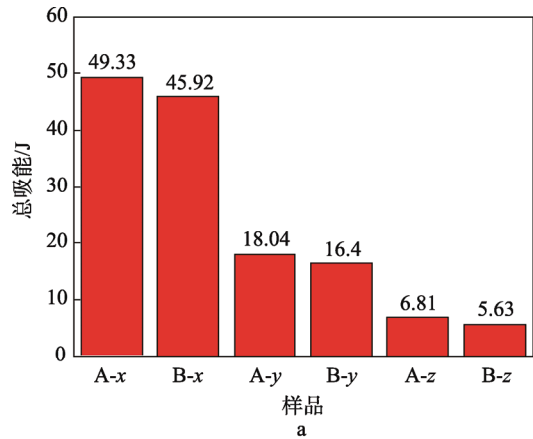


图6 总吸能和比能量吸收
Fig.6 Total energy absorption and specific energy absorption

2.4 能量吸收

总吸能的计算公式为：

$$E_a = \int_0^l P dl \tag{4}$$

式中： P 为压缩载荷； l 为压缩位移。

比能量吸收 SEA 是比较不同结构之间能量吸收性能的重要指标，等于结构在变形过程中吸收的总能量除以结构质量：

$$SEA = \frac{E_a}{m} \tag{5}$$

式中： m 为样品的质量。

2种层合方式纸板在3个方向压缩的总吸能和比能量吸收见图6。对于2种层合瓦楞纸板，总吸能和比能量吸收均为 x 方向最大， y 方向次之， z 方向最小。平齐式层合瓦楞纸板 x 方向的总吸能为 y 方向的2.73倍， z 方向的7.24倍， x 方向的比能量吸收为 y 方向的2.7倍， z 方向的6.62倍；交错式层合瓦楞纸板 x 方向的总吸能为 y 方向的2.8倍， z 方向的8.16倍， x 方向的比能量吸收为 y 方向的2.78倍， z 方向的7.46倍。在 x ， y ， z 各个方向上，平齐式层合瓦楞纸板的总吸能和比能量吸收均高于交错式层合瓦楞纸板，分别约为1.07倍、1.10倍和1.21倍。

3 结语

通过静态压缩试验对不同层合方式、不同方向的层合瓦楞纸板进行研究，通过能量效率法进行对比分析，得出如下结论：2种层合瓦楞纸板在3个方向的应力-应变曲线基本相似，但总体抗压强度和能量吸收情况为 x 方向最好， y 方向次之， z 方向最差；在 x ， y 和 z 方向上，平齐式层合瓦楞纸板的总体抗压强度和能量吸收效果均优于交错式层合瓦楞纸板。在设计重型缓冲包装时，可以优先选择平齐式层合瓦楞纸板的 x 方向，来更好地达到提高缓冲效果和节约材料的目的。

参考文献：

[1] 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. Investigation of 3 Directions Static Flatwise Compression Properties for Cubic Laminated Structure from Corrugated Composite Paperboard[J]. Machinery, 2014, 41(9): 30—34.

[2] SEK M A, KIRKPATRICK J. Prediction of the Cushioning Properties of Corrugated Fiberboard from Static

- and Quasi-dynamic Compression Data[J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 10(2): 87—94.
- [3] LU T J, CHEN C, ZHU G. Compressive Behaviour of Corrugated Board Panels[J]. *Journal of Composite Materials*, 2001, 35(23): 2098—2126.
- [4] 郭金玲. 探讨瓦楞纸板的破坏模式和破损机理[J]. *印刷技术*, 2012(2): 28—29.
GUO Jin-ling. Discuss the Failure Mode and Damage Mechanism of Corrugated Board[J]. *Printing Technology of Publishing and Commercial Printing*, 2012(2): 28—29.
- [5] 温时宝. 层合瓦楞纸板结构沿瓦楞方向的准静态压缩性能研究[J]. *包装工程*, 2011, 32(9): 30—32.
WEN Shi-bao. Quasi-static Compressive Properties of Laminated Structure of Corrugated Paperboard along Corrugated Direction[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(9): 30—32.
- [6] MAGNUCKI K, MAGNUCKA-BLANDZI E, WITTENBECK L. Elastic Bending and Buckling of a Steel Composite Beam with Corrugated Main Core and Sandwich Faces-theoretical Study[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(2): 1276—1286.
- [7] WANG D M. Cushioning Properties of Multi-layer Corrugated Sandwich Structures[J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2009, 11(1): 57—66.
- [8] 刘晔, 王振林, 高德, 等. 三重组合瓦楞纸板静态平压性能的理论建模[J]. *包装工程*, 2004, 25(5): 162—164.
LIU Ye, WANG Zhen-lin, GAO De, et al. Modeling of the Static Plain Compression Performance of Triple Wall Corrugated Fiber Board[J]. *Packaging Engineering*, 2004, 25(5): 162—164.
- [9] CAO B T, HOU B, LI Y L, et al. An Experimental Study on the Impact Behavior of Multilayer Sandwich with Corrugated Cores[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 109: 33—45.
- [10] 刘晔, 王振林, 周建伟, 等. 三重组合瓦楞纸板压缩承载规律的实验研究[J]. *包装工程*, 2003, 24(3): 43—45.
LIU Ye, WANG Zhen-lin, ZHOU Jian-wei, et al. An Experimental Study of the Compressive Intensity Rule of Triple Wall Corrugated Fiber Board[J]. *Packaging Engineering*, 2003, 24(3): 43—45.
- [11] WANG D M. Energy Absorption Diagrams of Multi-layer Corrugated Boards[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science Edition)*, 2010, 25(1): 58—61.
- [12] LESTARI W, QIAO P, SONG G, et al. Evaluation of Bending and Shear Moduli of Sandwich Structures by Dynamic Response Based Technique[C]// *Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2013.
- [13] 温时宝, 薛蕾. 层合瓦楞纸板三向静态平压性能研究[J]. *包装学报*, 2011(2): 40—44.
WEN Shi-bao, XUE Lei. Research of 3 Direction Static Flat Compression Properties for Laminated Corrugated Paperboard[J]. *Packaging Journal*, 2011(2): 40—44.
- [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, Testing Method of Static Compression for Packaging Cushioning Materials[S].
- [15] LIU Q, FU J, MA J, et al. Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with EPP Foam[J]. *Composites Part B Engineering*, 2017, 130(7): 236—247.
- [16] 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.