

楞型对瓦楞结构材料瓦楞方向准静态力学性能的影响

李耿^{a, b}, 孙德强^{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** 研究不同楞型瓦楞结构材料在准静态条件下对瓦楞方向相关力学性能的影响。**方法** 通过有限元模拟的方法, 在准静态压缩条件下, 得到不同楞型的瓦楞结构材料在瓦楞方向上的变形模式、应力-应变曲线等, 通过能量效率法对其峰应力、密实化应变、平均抗压强度和单位体积吸收能量等进行对比分析。**结果** 在同一壁厚条件下, A, C, B, E 这4种楞型的峰应力、平均抗压强度、单位体积吸收能量依次增大; 对于任一楞型来说, 峰应力、平均抗压强度、单位体积吸收能量随壁厚的增大而增大, 且与其呈线性关系; 随着壁厚的增大, A, C, B, E 这4种楞型的峰应力、平均抗压强度、单位体积吸收能量的增长幅度依次增大。**结论** 楞型对瓦楞结构材料瓦楞方向的力学性能有显著影响, 在其他条件相同的情况下, A, C, B, E 这4种楞型的力学性能依次增强。

关键词: 楞型; 瓦楞结构材料; 瓦楞方向; 力学性能

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)19-0075-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.19.014

Influence of Flute Type on Quasi-static Mechanical Properties of Corrugated Structure Materials in the Corrugation Direction

LI Geng^{a, b}, SUN De-qiang^{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 different flute-type corrugated structure materials under the quasi-static condition on the relevant mechanical properties in the corrugation direction. Based on the method of finite element simulation, the deformation patterns and stress-strain curves of corrugated structural materials of different flute types in the corrugation direction were obtained under the quasi-static compression conditions. Peak strength, densification strain, mean crushing strength and energy absorption per volume were comparatively analyzed in energy efficiency method. For the corrugated structural materials of same wall thickness, the peak strength, mean crushing strength and energy absorption per volume of the four flute types of A, C, B and E were successively increased. For the corrugated structural materials of any flute type, the peak strength, mean crushing strength and energy absorption per volume would linearly increase as the thickness increased. The growth rates of peak strength, mean crushing strength and energy absorption per volume of the four flute types of A, C, B and E were successively increased with the increase of wall thickness. The flute type has a significant influence on mechanical properties of the corrugated structure materials in the corrugation direction. Under the same conditions of other factors, the mechanical properties of the four flute types of A, C, B and E are successively enhanced.

收稿日期: 2018-05-18

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: 李耿(1993—), 男, 陕西科技大学硕士生, 主攻运输包装、包装材料。

通信作者: 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的测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发。

KEY WORDS: flute-type; corrugated structure materials; corrugation direction; mechanical properties

瓦楞结构材料是由单层瓦楞规则复合而成,是二维多孔材料的一种,具有质量轻、刚度好、可缓冲吸能、易加工成型的特点。在包装领域,瓦楞结构材料可制作瓦楞隔板、瓦楞隔垫等,在产品包装防护系统中,瓦楞结构材料可以被合理地放置于包装箱和产品之间,通过压缩变形与缓冲吸能作用来实现产品的包装保护与安全运输。由此,研究楞型对瓦楞结构材料瓦楞方向力学性能的影响,具有重要的经济价值和科学研究意义。

Sek 等^[1]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。Qiao 等^[2]基于等效分析的能量方法和原理,导出正弦瓦楞结构的面内刚度公式,进行有限元建模和实验测试以验证所提出的分析公式的准确性。Bartolozzi 等^[3]推导了瓦楞夹层结构的弹性模量公式和剪切模量公式,并应用有限元模型进行了验证。温时宝^[4]研究了楞型不同、厚度相同和楞型相同、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^[5]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,解决了梁的三点弯曲和轴向压缩问题。Wang^[6]分析了多层瓦楞夹层结构的压缩行为,发现相同类型的、具有不同层的瓦楞结构的抗压强度相似。Cao 等^[7]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。廖泽顺等^[8]基于有限元软件 Ansys 建立了 A, C, B, E 型瓦楞纸板的有限元模型,对其横向边压强度进行了屈曲分析。Lestari 等^[9]介绍了一种新的测量方法来估计夹层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。Nordstrand 等^[10]通过有限元方法分析了瓦楞夹层结构面板的局部弯曲对整体结构后屈曲的影响。Fadiji 等^[11]在不同的环境条件下,对瓦楞纸板进行边压强度试验,结果表明纸板的力学性能受环境条件的影响较大。Yuan 等^[12]通过数学分析与有限元相结合的方法,对 UV 形瓦楞结构进行力学分析,从而获得了最佳的 UV 形瓦楞纸板结构尺寸。孙德强等^[13]采用有限元法,获取了关于多层 U 形 A 瓦楞动力学性能的力学参数,明确了结构参数和冲击速度对多层 U 形 A 瓦楞冲击动力学性能的影响,得到关于多层 U 形 A 瓦楞的动态峰应力的经验公式。

文中将通过有限元模拟的方法,在准静态压缩条件下,得到不同楞型的瓦楞结构材料在瓦楞方向上的变形模式、应力-应变曲线等,通过能量效率法^[14-15]对其峰应力、密实化应变、平均抗压强度和单位体积吸收能量等进行对比分析,研究楞型对瓦楞结构材料

瓦楞方向准静态力学性能的影响。

1 计算模型

文中采用的瓦楞形状为 UV 形,以正弦曲线来近似表示瓦楞芯材的波纹曲线,不同楞型结构模型特征单元的基本参数见表 1。

表 1 不同楞型结构模型的基本参数
Tab.1 Basic parameters of different flute-type structure models mm

楞型	楞高	楞宽
A	5	10
C	4	8
B	3	6
E	2	4

为了使模拟结果更加接近实验结果,文中采用基于单元阵列的有限元模型,见图 1。经尝试性模拟后,样品的尺寸设定为 60 mm×60 mm,厚度为 15 mm。利用有限元分析工具 Ansys/LS-DYNA 建立模型,所有孔壁采用具有 5 个积分点的 Belytschko-Tsay 壳单元 Shell 163 进行网格划分。样品置于上压板 P 之下,底部边线上节点的所有自由度约束为 0,压板以恒定的压缩速度向下运动,最终使得样品被完全压溃。在变形过程中,样品所有可能发生接触的表面均定义为单面接触。样品与上压板之间定义为自动面面接触,摩擦因数为 0.02。样品基体材质为双线性应变硬化的理想弹塑性模型,典型材料是铝合金,其力学参数为:弹性模量 $E_s=68.97$ GPa,屈服应力 $\sigma_{ys}=292$ MPa,正切刚度 $E_{tan}=689.7$ MPa,泊松比 $\mu=0.35$,密度 $\rho=2700$ kg/m³。在类静态压缩条件下,该铝合金视为应变

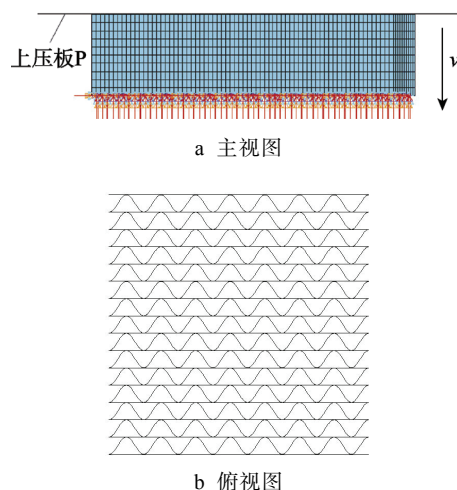


图 1 有限元分析模型

Fig.1 Finite element analytic model

率不敏感。模拟结果显示, 在 3 m/s 的压缩速度下, 样品的动能密实化之前最多不会超过相应总吸收能量的 2%^[16], 因此模拟选用的所有压缩速度都设为 3 m/s。

2 结果与讨论

2.1 变形模式及应力-应变曲线

瓦楞结构材料(以壁厚 0.1 mm 的 C 楞为例)在不同应变下的变形模式见图 2。变形首先在靠近上压板处发生, 此时为弹性变形, 之后发生折曲变形, 进入平台阶段, 折曲变形不断向下扩展, 当折曲扩展至样品底部时进入密实化阶段。

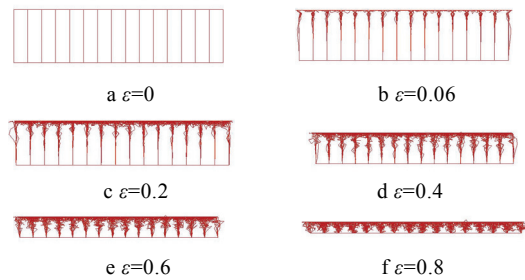


图 2 瓦楞结构材料变形模式
Fig.2 Deformation models of the corrugated structure materials

同一壁厚不同楞型(以 0.1 mm 壁厚为例)瓦楞结构材料的应力-应变曲线见图 3, A, C, B, E 这 4 种楞型的应力-应变曲线走势大致相同, 可以分为线弹性阶段、屈服阶段、平台阶段和密实化阶段。在线弹性阶段, 样品只发生弹性变形, 应力随应变以线性关系增长; 之后达到一个峰值后进入屈服阶段, 应力迅速回落; 随后进入平台区, 应力在某一个值附近以微小幅度波动; 最后达到密实化应变时, 样品进入密实化阶段, 应力随应变急剧上升。同一楞型不同壁厚(以 C 楞为例)瓦楞结构材料的应力-应变曲线见图 4, 曲线趋势基本相似, 也由线弹性阶段、屈服阶段、平台阶段和密实化阶段 4 个部分组成。

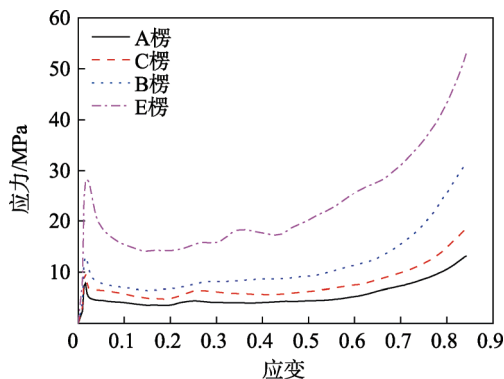


图 3 不同楞型瓦楞结构材料的应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of corrugated structural materials of different flute types

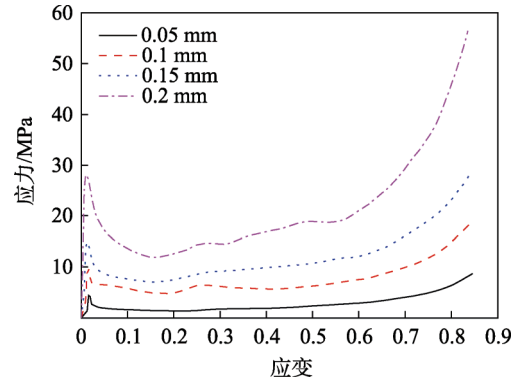


图 4 不同壁厚瓦楞结构材料的应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves of corrugated structural materials of different wall thicknesses

2.2 峰应力

峰应力是评估承载能力的关键指标, 表示压缩过程中的初始峰值压溃力。4 种楞型的样品在不同壁厚条件下的峰应力见图 5。在同一壁厚条件下, A, C, B, E 这 4 种楞型的峰应力依次增大, 以 0.1 mm 壁厚为例, 峰应力分别为 7.8, 9.75, 13.01, 28.24 MPa。对于任一楞型来说, 壁厚越大, 峰应力越大, 峰应力随壁厚的增大而增大, 且与其呈线性关系。随着壁厚的增加, 不同楞型样品的峰应力增长幅度不同, A, C, B, E 这 4 种楞型的增长幅度逐渐增大, A 楞的增长幅度最小, 斜率为 84.62, E 楞的增长幅度最大, 斜率为 463.94。

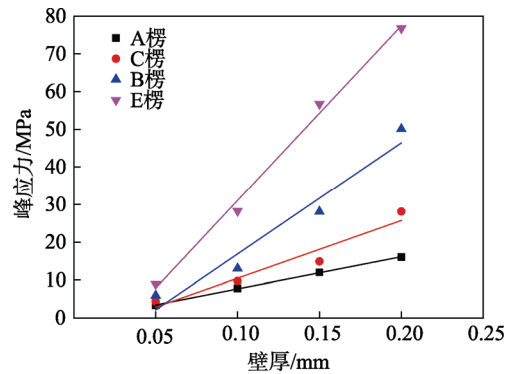


图 5 峰应力曲线
Fig.5 Peak strength curve

2.3 密实化应变

样品在一个特定应变 ε_a 处的吸收能量效率 E_f 被定义为:

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

式中: σ_a 为应变 ε_a 对应的应力。

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

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

每种楞型的样品在不同壁厚条件下的密实化应变见图6。对于C、B、E楞来说,密实化应变在0.1 mm壁厚处最大,且依次增大,分别为0.62, 0.63, 0.67。对于A楞来说,密实化应变在0.1 mm壁厚处最小,最大密实化应变在0.2 mm处,为0.68,可能是因为A楞单个瓦楞形状尺寸较大,在单元阵列中包含的特征单元数量少,其结构组成过于稀疏。

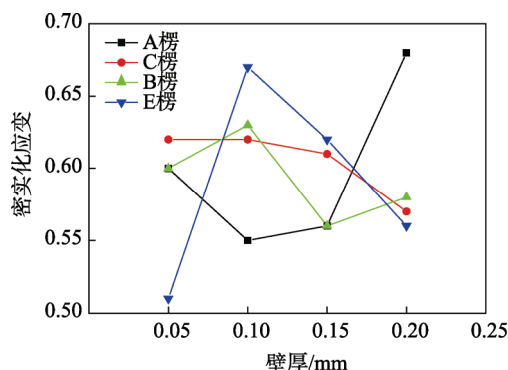


图6 密实化应变曲线
Fig.6 Densification strain curve

2.4 平均抗压强度

平均抗压强度 σ_m 是用来评估样品吸收能量性能的有效指标,由式(3)得出:

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

4种楞型的样品在不同壁厚条件下的平均抗压强度见图7。在同一壁厚条件下,A、C、B、E这4种楞型的平均抗压强度依次增大,以0.1 mm壁厚为例,平均抗压强度分别为4.15, 5.99, 8.39, 18.75 MPa。对于任一楞型来说,壁厚越大,平均抗压强度越大,平均抗压强度随壁厚的增大而增大,且与其呈线性关系。随着壁厚的增大,不同楞型样品的平均抗压强度增长幅度不同,A、C、B、E这4种楞型的增长幅度逐渐增大,其斜率依次为61.88, 90.7, 153.3, 292。

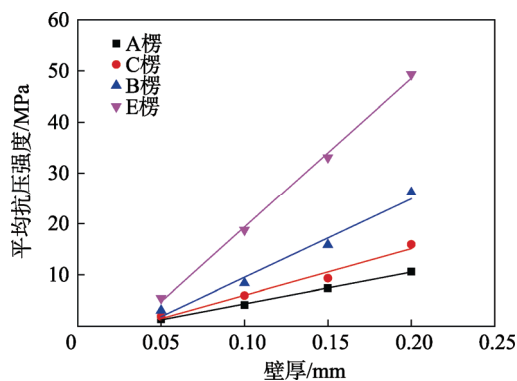


图7 平均抗压强度曲线
Fig.7 Mean crushing strength curve

2.5 单位体积吸收能量

总吸能 E_a 的计算公式为:

$$E_a = \int_0^l p dl \quad (4)$$

式中: p 为压缩载荷; l 为压缩位移。

单位体积吸收能量 E_v 是比较不同结构之间吸收能量性能的重要指标,等于结构在变形过程中吸收的总能量除以结构体积:

$$E_v = \frac{E_a}{V} \quad (5)$$

式中: V 为样品的体积。

4种楞型的样品在不同壁厚条件下的单位体积吸收能量见图8。在同一壁厚条件下,A、C、B、E这4种楞型的单位体积吸收能量依次增大,以0.1 mm壁厚为例,单位体积吸收能量分别为4.52, 6.31, 9.41, 19.07 MJ/m³。对于任一楞型来说,壁厚越大,单位体积吸收能量越大,单位体积吸收能量随壁厚的增大而增大,且与其呈线性关系。随着壁厚的增大,不同楞型样品的单位体积吸收能量增长幅度不同,A、C、B、E这4种楞型的增长幅度依次增大,A楞的增长幅度最小,斜率为63.1, E楞的增长幅度最大,斜率为268.2。

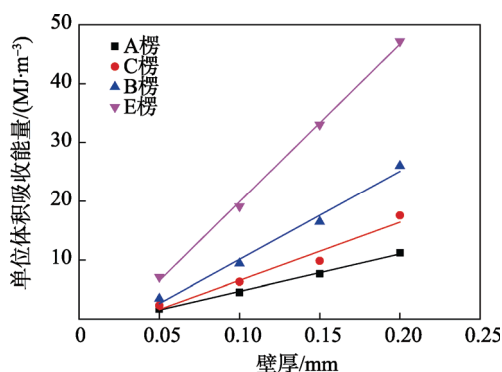


图8 单位体积吸收能量曲线
Fig.8 Energy absorption per volume curve

3 结语

通过有限元仿真研究了楞型对瓦楞结构材料瓦楞方向准静态力学性能的影响,得出如下结论。

1) 在压缩过程中,不同楞型瓦楞结构材料的变形模式和应力-应变曲线趋势大致相同,都会经历弹性阶段、屈服阶段、平台阶段和密实化阶段。

2) 在同一壁厚条件下,A、C、B、E这4种楞型的峰应力、平均抗压强度、单位体积吸收能量依次增大;对于任一楞型来说,峰应力、平均抗压强度、单位体积吸收能量随壁厚的增大而增大,且与其呈线性关系;随着壁厚的增大,A、C、B、E这4种楞型的峰应力、平均抗压强度、单位体积吸收能量的增长

幅度依次增大。

3) A楞的密实化应变与C, B, E楞的密实化应变变化趋势不尽相同, 可能与A楞的结构组成过于稀疏有关。

4) 虽然A, C, B, E这4种楞型瓦楞结构材料瓦楞方向上的抗压强度、吸收能量等力学性能依次增强, 但在缓冲包装设计时应根据产品的实际需要选择合理的楞型进行设计, 以达到节约材料和保护产品的目的。

参考文献:

- [1] SEK M A, KIRKPATRICK J. Prediction of the Cushioning Properties of Corrugated Fibreboard from Static and Quasi-dynamic Compression Data[J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 10(2): 87—94.
- [2] QIAO P, WANG J, HU G. On the Mechanics of Composite Sinusoidal Honeycomb Cores[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2005, 18(1): 42—50.
- [3] BARTOLOZZI G, PIERINI M, ORRENIUS U, et al. An Equivalent Material Formulation for Sinusoidal Corrugated Cores of Structural Sandwich Panels[J]. *Composite Structures*, 2013, 100(5): 173—185.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] WANG D M. Cushioning Properties of Multi-layer Corrugated Sandwich Structures[J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2009, 11(1): 57—66.
- [7] 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.
- [8] 廖泽顺, 滑广军, 谢勇, 等. 瓦楞纸板横向边压强度有限元分析[J]. *包装工程*, 2014, 35(13): 56—60.
LIAO Ze-shun, HUA Guang-jun, XIE Yong, et al. Finite Element Analysis on Transverse Compressive Strength of Corrugated Board Edge[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(13): 56—60.
- [9] 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.
- [10] NORDSTRAND T, ALLANSSON A. Stability and Collapse of Corrugated Board Panels, Numerical and Experimental Analysis[C]// *Proceeding of 6th International Conference on Sandwich Structure*, Florida, 2003.
- [11] FADIJI T, BERRY T, COETZEE C J, et al. Investigating the Mechanical Properties of Paperboard Packaging Material for Handling Fresh Produce under Different Environmental Conditions: Experimental Analysis and Finite Element Modelling[J]. *Journal of Applied Packaging Research*, 2017: 20—34.
- [12] YUAN W, ZHANG G M, LIAO D Z, et al. Corrugated Board Flute-shaped Finite Element Analysis and Optimization[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 477: 1205—1209.
- [13] 孙德强, 方众望, 罗显洲, 等. 多层U形A瓦楞结构材料的共面力学性能[J]. *包装工程*, 2014, 35(13): 8—12.
SUN De-qiang, FANG Zhong-wang, LUO Xian-zhou, et al. In-plane Dynamics of Multilayer A-type U-shaped Corrugated Structure Materials[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(13): 8—12.
- [14] 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: 236—247.
- [15] 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.
- [16] 王青春, 范子杰. 利用LS-DYNA计算结构准静态压溃的改进方法[J]. *力学与实践*, 2003, 25(3): 20—23.
WANG Qing-chun, FAN Zi-jie. Improvement in Analysis of Quasi-static Collapse with LS-DYNA[J]. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(3): 20—23.