

瓦楞纸板楞形参数对力学性能的影响

宋卫生, 薛阳, 边文慧, 孙艳美
(河南牧业经济学院, 郑州 450046)

摘要: **目的** 研究瓦楞纸板楞形参数对力学性能的影响规律, 以达到在保证力学性能的基础上, 减少材料的使用, 降低生产成本。**方法** 在国标规定的范围内, 均匀选取了瓦楞纸板的楞宽、楞高以及楞峰半径的实验值, 设计单因素实验, 推导出芯纸压缩比系数公式。利用有限元方法进行准静态压缩试验, 得出瓦楞纸板的边压强度以及边压强度与压缩比系数的比值。**结果** 压缩比系数随楞宽和楞峰半径的增加逐渐降低, 随楞高的增加逐渐增高, 楞宽的影响程度最大, 其次是楞高, 楞峰半径最小; 边压强度随楞宽的增加逐渐降低, 随楞高的增加整体趋势为逐渐增高, 边压强度随楞峰半径的增加, 其变化波动较大, 在楞峰半径为 1.3 mm 时边压强度最大。边压强度与压缩比系数的比值在单因素变化的情况下, 楞宽为 3.4 mm 时最大, 楞高为 3.75 mm 时最大, 楞峰半径为 1.3 mm 时最大。**结论** 瓦楞几何参数对瓦楞纸板的边压强度和压缩比系数均有明显的影响, 所以选择合适的几何参数组合可以在保证强度的基础上降低材料的使用量。

关键词: 瓦楞纸板; 楞形; 几何参数; 压缩比系数; 边压强度

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)17-0147-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.17.020

Influence of Corrugated Parameters of Corrugated Board on Mechanical Properties

SONG Wei-sheng, XUE Yang, BIAN Wen-hui, SUN Yan-mei

(Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the use of materials and production cost on the basis of ensuring mechanical properties by studying the law of influence of corrugated parameters of corrugated board on mechanical properties. In the range of national standard, the experimental values of the width, height and radius of the corrugated board were selected uniformly. The single factor experiment was designed to deduce the compression ratio coefficient of the core paper. The finite element method was used for quasi-static compression test to obtain the edge crush resistance of corrugated board and the ratio of edge crush resistance to compression ratio coefficient. The compression ratio coefficient gradually decreased with the increase of the width of the corrugated unit and the radius of the corrugated peak, and increased with the increase of the height of the corrugated unit. The width of the corrugated unit had the largest influence, followed by the height of the corrugated unit and then the radius of the corrugated peak. The edge crush resistance gradually decreased with the increase of the width of the corrugated unit, and increased with the increase of the height of the corrugated unit. The edge crush resistance fluctuated greatly with the increase of the radius of the corrugated peak. The edge crush resistance was the largest at 1.3 mm. Under the condition of single factor variation, the ratio of edge crush resistance to compression ratio coefficient was the largest when the width of the corrugated unit was 3.4 mm, the height of the corrugated unit was 3.75 mm, and the radius of the corrugated peak was 1.3 mm. The corrugated geometric parameters have obvious influence on

the edge crush resistance and compression ratio coefficient of corrugated board; therefore, choosing the appropriate combination of geometric parameters can reduce the use of materials on the basis of ensuring the edge crush resistance.

KEY WORDS: corrugated board; corrugated type; geometric parameter; compression ratio coefficient; edge crush resistance

瓦楞纸板被广泛应用于产品的运输包装。瓦楞纸板的楞形包括 U 形、UV 形、V 形。UV 形瓦楞综合了 U 形瓦楞和 V 形瓦楞的优点,在国内外得到了广泛使用。瓦楞纸板的楞形参数对其力学性能和材料用量以及面纸与芯纸粘合牢度等方面均有影响^[1],但是瓦楞辊的主要参数、楞形历来不被国外供应商公开,国内瓦楞设备生产企业基本上以引进样机后仿制为主要方法,在瓦楞楞形参数方面的研究相对较少^[2]。

赵亮^[3]简化并建立了 3 层瓦楞纸板的几何模型,并通过有限元软件 Ansys 对瓦楞进行屈曲分析,并得到了理想状态下的屈曲载荷。以楞高和楞宽为自变量,观察 2 个变量对应屈曲载荷的变化规律,进而研究瓦楞纸板的形状与力学性能之间的关系。孟超莹^[4]在 Ansys 建立了 U 形、UV 形、V 形的 3 种不同楞形的瓦楞纸板有限元模型,并对其进行了抗压性能、缓冲性能的分析,比较分析瓦楞形状对其力学性能的影响。袁玮^[5]同样建立了 3 种楞形结构的有限元模型,在众多模型中确定了最佳的楞形结构尺寸,为最优 UV 瓦楞纸板的设计生产提供数学依据。樊令强^[6]利用 Matlab 平台中的遗传算法工具箱对瓦楞芯纸压缩比系数进行优化计算,降低了原材料的利用量。以上研究均为瓦楞楞形参数的优化提供了指导和依据,但主要对象是瓦楞纸板的平压性能和缓冲吸能效果,对于材料使用量和企业常测量的边压强度的综合研究基本上没有涉及。文中利用有限元分析法,探究 UV 形瓦楞纸板的楞形参数对瓦楞纸板边压强度以及瓦楞芯纸压缩比系数的影响规律,以期在保证瓦楞纸板力学性能的基础上,降低材料的使用量。

1 楞形参数的确定

目前瓦楞辊的楞形轮廓曲线可分为准渐开线齿廓、圆弧-直线齿廓以及三圆弧两直线相连的齿形等 3 种^[7]。圆弧-直线齿廓的楞峰、楞谷都是圆弧,两侧为与楞峰、楞谷圆弧相切的线段,这种齿形不仅可以提高纸板的性能,而且可以提高生产效率^[8]。文中以该种楞形为研究对象。在参考 GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》^[9]中对楞形参数规定的基础上,将楞形几何参数进一步地明确为楞峰半径、楞宽以及楞高^[10]。从图 1 中的几何关系,可以看出,将变量确定为楞峰半径 r ,二分之一楞宽 x ,楞峰圆弧与楞谷圆弧中心的垂直距离 y ,在不影响主变量的同时,更加便于模拟分析所用模型的构建^[11]。

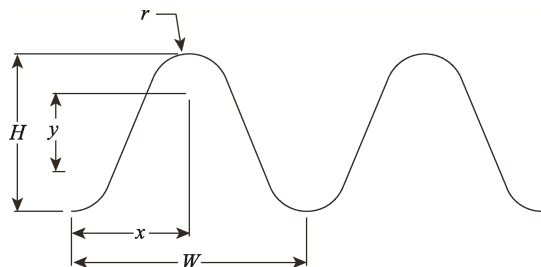


图 1 瓦楞几何参数

Fig.1 Geometric parameters of corrugated unit

根据图 1 可以得到式 (1)。

瓦楞芯纸的压缩比系数:

$$C_r = \left[2 \times \left[2 \times \left(\arctan \frac{2 \times (H - 2 \times r)}{W} + \arcsin \frac{2 \times r}{\sqrt{\frac{W^2}{4} + (H - 2 \times r)^2}} \right) \times r + \sqrt{\frac{W^2}{4} + (H - 2 \times r)^2 - 4 \times r^2} \right] \right] \cdot W^{-1} \quad (1)$$

式中: W 为楞宽,其值为图 1 中 x 值的 2 倍; r 为楞峰半径; H 为楞高,其值为 y 值加 2 倍的 r 值。

2 试验设计

文中选用 C 型瓦楞纸板作为研究对象。GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》中规定 C 型瓦楞纸板楞高 H 在 3.5~4.0 mm 之间,楞宽 W 在 6.8~7.9 mm 之间,300 mm 内的楞数为 41 ± 3 。参考以上数据,确定试验的瓦楞建模参数自变量见表 1。

表 1 楞形几何参数的取值

Tab.1 Value of corrugated geometric parameters

楞宽/mm	楞高/mm	楞峰半径/mm
6.8	3.5	0.4
6.9	3.55	0.5
7	3.6	0.6
7.1	3.65	0.7
7.2	3.7	0.8
7.3	3.75	0.9
7.4	3.8	1
7.5	3.85	1.1
7.6	3.9	1.2
7.7	3.95	1.3
7.8	4	1.4
7.9		

文中通过单因素实验的方式研究楞宽 W 、楞高 H 以及楞峰半径这 3 个量各自对边压强度的影响规律。然后根据式 (1) 得出瓦楞压缩比系数随以上 3 个量的变化规律。在此基础上研究在用纸量一定的情况下, 楞宽 W 、楞高 H 以及楞峰半径这 3 个量各自对边压强度的影响规律。

3 有限元模拟分析

为了提高计算速度和便于网格的划分与控制, 文中在 Ansys 中采用自下而上的方式构建壳模型, 单元类型选择 shell 163^[12], 芯纸与上层面纸的厚度取 0.26 mm, 下层底纸的厚度取 0.27 mm, 有限元模型见图 2。芯纸以及上下面纸的物性参数见表 2^[13]。模拟压缩试验机的压板采用 RIGID 材料模型, 保证在压缩过程中不变形。

表 2 瓦楞纸板材料参数
Tab.2 Material parameters of corrugated board

材料参数	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/MPa	切应力/ GPa
面纸	1040	7.6	0.34	80	2.836
芯纸	1040	5.4	0.34	200	2.015
底纸	1040	6.66	0.34	120	2.485

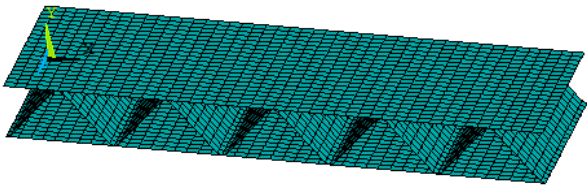


图 2 瓦楞纸板有限元模型
Fig.2 The finite element model of corrugated board

根据 GB/T 6546—1998《瓦楞纸板边压强度的测定法》^[14]的要求, 压缩试验仪可动压板的升降速度为 (12.5±2.5)mm/min, 对瓦楞纸板进行准静态压缩。经学者研究^[15], 只要保证动能与内能的比值不超过 2%, 就能在尽量降低计算时间的同时, 保证准静态压缩的模拟精度。经实验对比发现, 600 mm/min 作为压缩速度最为合适。得到压缩最大值后, 按照 GB/T 6546—1998《瓦楞纸板边压强度的测定法》的计算方法, 结合试样的长度得到边压强度。

4 结果与分析

4.1 瓦楞参数对压缩比系数的影响

瓦楞的几何参数变化势必会影响瓦楞芯纸的压缩比系数和力学性能^[13]。压缩比系数随楞宽、楞高和

楞峰半径单因素变化时的相应数据见表 3。

表 3 瓦楞参数单因素变化的压缩比系数
Tab.3 Compression ratio coefficient of single factor variation of corrugated parameters

楞宽/mm	楞高/mm	楞峰半径/mm
1.35	1.35	1.35
1.358	1.359	1.353
1.366	1.367	1.357
1.375	1.376	1.362
1.384	1.385	1.366
1.393	1.394	1.371
1.403	1.404	1.376
1.413	1.413	1.381
1.423	1.422	1.387
1.434	1.431	1.393
1.445	1.441	1.399
1.457		1.406

楞宽作为变量时, 楞高设为 3.5 mm, 楞峰半径设为 0.4 mm, 楞宽在 7.9~6.8 mm 之间以步长为 0.1 mm 递减变化。从表 2 可以看出, 随着楞宽的增加, 压缩比系数逐渐减小, 在 GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》规定的变化范围内, 压缩比系数随楞宽递减的降低率为 7.9%。

楞高作为变量时, 楞宽设为 6.8 mm, 楞峰半径设为 0.4 mm, 楞宽在 3.5~4.0 mm 之间以步长为 0.05 mm 递增变化。随着楞高的逐渐增加, 压缩比系数在逐渐增大, 在 GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》规定的变化范围内, 随楞高变化的增高率为 6.7%。

楞峰半径作为变量时, 楞宽设为 6.8 mm, 楞宽设为 3.5 mm, 楞峰半径在 0.4~1.5 mm 之间以步长为 0.1 mm 递增变化。随着楞峰半径的增加, 压缩比系数逐渐减小, 在 GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》规定的变化范围内, 随楞峰半径变化的降低率为 4.1%。

可以看出楞宽对芯纸材料的使用量影响最大, 其次是楞高, 最小是楞峰半径。增加楞宽可以降低压缩比系数, 但是增加楞高和楞峰半径会导致压缩比系数升高。

4.2 瓦楞参数对边压强度和边压强度与压缩比系数比值的影响

从图 3 可以看出, 在楞高和楞峰半径不变的情况下, 在 GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》规定的变化范围内, 边压强度随楞宽的增加而逐渐降低。结合表 2 中的数据, 压缩比系数随楞宽的增加也逐渐降低, 边压强度随楞宽递减的降低率为 13.8%。图 4 的基本走势与图 3 相同, 虽然在 3.75~3.9 mm 之间略有波动, 但边压强度比压缩比系数随楞宽的整体走势也是逐

渐降低的,边压强度与压缩比系数的比值随楞宽递减的降低率为 5.4%。在楞高和楞峰半径一定以及芯纸用量一定的情况下,楞宽为 3.4 mm 时,瓦楞纸板所具有的边压强度最高。

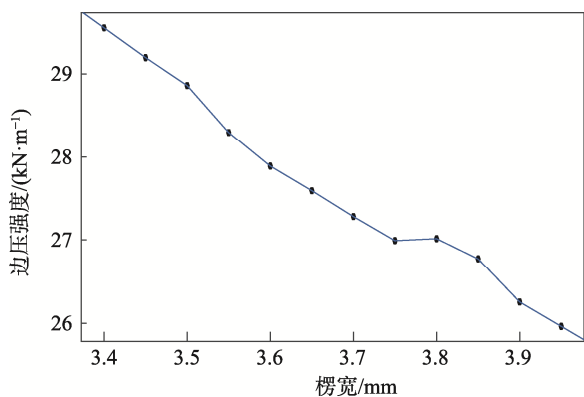


图3 边压强度随楞宽变化曲线

Fig.3 Curve of edge crush resistance changing with the width of the corrugated unit

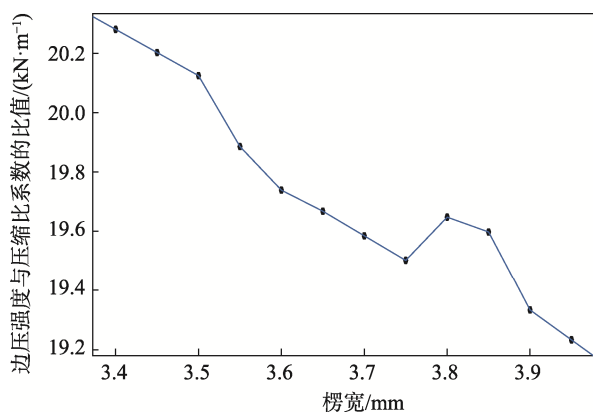


图4 边压强度与压缩比系数的比值随楞宽变化曲线

Fig.4 Curve of the ratio of edge crush resistance to compression ratio coefficient changing with the width of the corrugated unit

从图 5 可以看出,在楞宽和楞峰半径不变的情况下,在 GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》规定的变化范围内,边压强度随楞高的增加而逐渐增加。结合表 2 中的数据,压缩比系数随楞高的增加也逐渐增加,边压强度随楞高递增的增高率为 7.1%。从图 6 可知,边压强度与压缩比系数的比值随楞高的变化并不是单调的,在 3.5~3.75 mm 之间是递增的,但在 3.75~4 mm 之间是递减的。在楞宽和楞峰半径不变以及芯纸用质量一定的情况下,楞高为 3.75 mm 时,瓦楞纸板的边压强度是最高的。

从图 7 可以看出,在楞宽和楞高不变的情况下,在 GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》规定的变化范围内,边压强度随楞峰半径的变化明显是非线性的。楞峰半径 0.6 mm 时,边压强度最低,楞峰半径为 1.3 mm 时,边压强度最高,相对增高率为 23.2%,存在较为明显

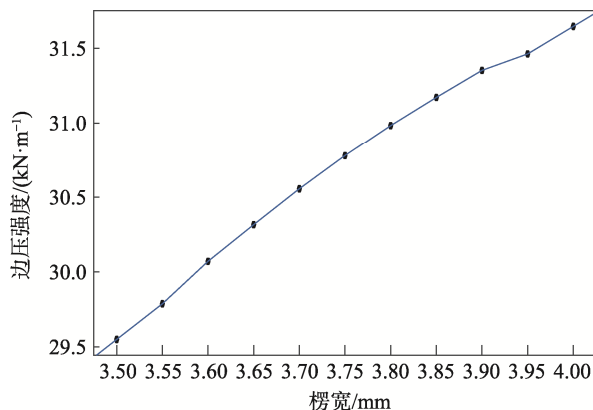


图5 边压强度随楞高变化曲线

Fig.5 Curve of edge crush resistance changing with the height of the corrugated unit

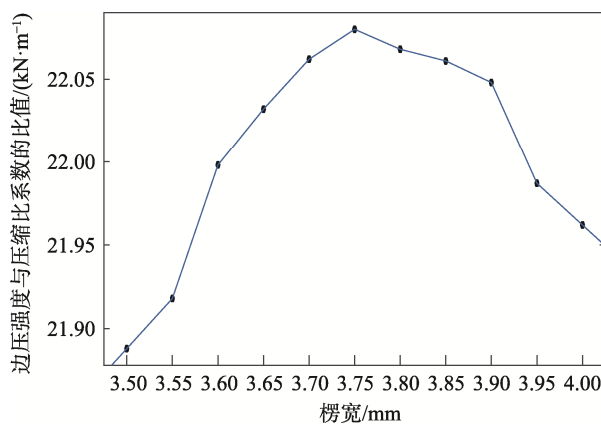


图6 边压强度与压缩比系数的比值随楞高变化曲线

Fig.6 Curve of the ratio of edge crush resistance to compression ratio coefficient changing with the height of the corrugated unit

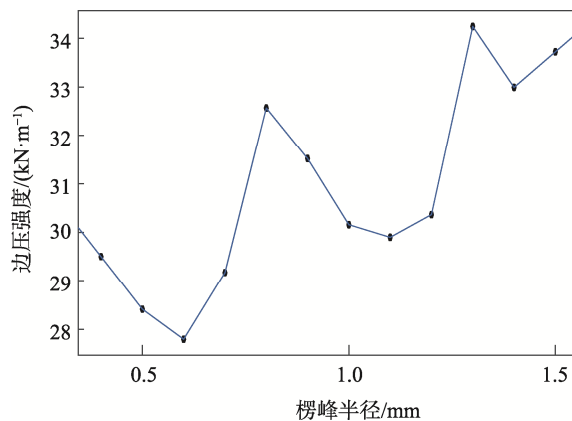


图7 边压强度随楞峰半径变化曲线

Fig.7 Curve of edge crush resistance changing with the radius of the corrugated peak of the corrugated unit

的波动。从图 8 可以看出,边压强度比压缩比系数随楞峰半径的变化趋势基本和图 7 相似,同样也是在 1.3 mm 处的值最高,与最低点的相对增高率为 20%。也就是说在楞宽和楞高不变以及单位芯纸用量的情况下,楞峰半径为 1.3 mm 时,瓦楞纸板的边压强度最高。

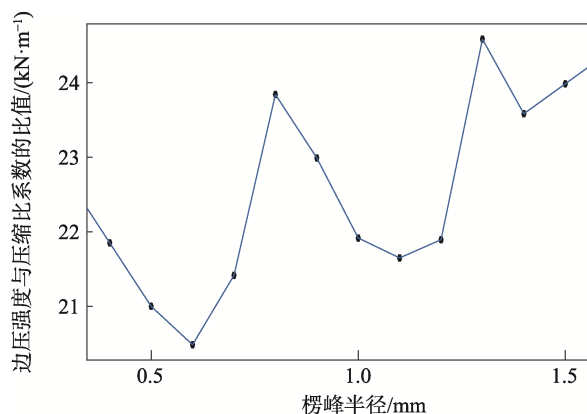


图8 边压强度与压缩比系数的比值随楞峰半径变化曲线
Fig.8 Curve of the ratio of edge crush resistance to compression ratio coefficient changing with the radius of the corrugated peak of the corrugated unit

5 结语

通过准静态模拟压缩试验研究了在GB/T 6544—2008《瓦楞纸板》规定的变化范围内,C型瓦楞的楞高、楞宽以及楞峰半径对芯纸压缩比系数、边压强度以及边压强度与压缩比系数比值的影响。通过对比得出结论:压缩比系数随楞宽和楞峰半径的增加是逐渐降低的,随楞高的增加是逐渐增高的,影响程度楞宽最大,其次是楞高,楞峰半径最小;边压强度随楞宽的增加逐渐降低,随楞高的增加整体趋势逐渐增高,边压强度随楞峰半径的增加,其变化波动较大,1.3 mm时边压强度最大。边压强度与压缩比系数的比值在单因素变化的情况下,楞宽3.4 mm时最大,楞高3.75 mm时最大,楞峰半径1.3 mm时最大。文中试验分析仅仅得到了瓦楞几何参数对反映用纸量的压缩比系数和边压强度的影响规律,针对具体区域的气候特点还需要进一步通过优化试验,得到具体的最优参数。

参考文献:

- [1] 刘伯. 瓦楞纸板力学性能的有限元分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2004: 7—11.
LIU Bo. Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Corrugated Board[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004: 7—11.
- [2] 李耿. 楞型对瓦楞结构材料瓦楞方向准静态力学性能的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(19): 75—79.
LI Geng. Influence of Flute Type on Quasi-static Mechanical Properties of Corrugated Structure Materials in the Corrugation Direction[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(19): 75—79.
- [3] 赵亮. 基于有限元的瓦楞纸板楞型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 26—38.
ZHAO Liang. Research on Corrugated Board Based on Finite Element[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 26—38.
- [4] 孟超莹. 瓦楞形状对瓦楞纸板力学性能的影响分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 35—49.
MENG Chao-ying. Analysis of the Influence of Corrugated Shape on the Mechanical Properties of Corrugated Board[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 35—49.
- [5] 袁玮. 基于有限元的瓦楞纸板瓦楞波形优化设计的研究[C]// 2013 中国食品包装学术论文集, 2013: 202.
YUAN Wei. Corrugated Board UV Flute-shaped Structure Size Optimization Design Based on the Finite Element[C]// Proceedings of China Food Packaging Academic Conference, 2013: 202.
- [6] 樊令强. 基于遗传算法的瓦楞辊齿形参数优化[J]. 包装工程, 2014, 35(7): 44—48.
FAN Ling-qiang. Optimization of Corrugated Roller Tooth Profile Parameters Based on Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 44—48.
- [7] 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.
- [8] 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: 302—303.
- [9] GB/T 6544—2008, 瓦楞纸板[S].
GB/T 6544—2008, Corrugated Board[S].
- [10] 孟建新. 以折楞率为设计目标的瓦楞辊齿形几何参数的设计程序[J]. 包装与食品机械, 1996, 14(1): 15—18.
MENG Jian-xin. Design Program of Geometric Parameters of Corrugating Roll Tooth Profile with Corrugating Rate as Design Objective[J]. Packaging and Food Machinery, 1996, 14(1): 15—18.
- [11] 王金容. 基于ANSYS的Double-Ply瓦楞纸板的缓冲性能研究[D]. 珠海: 暨南大学, 2012: 43—46.
WANG Jin-rong. Study on Cushioning Performance of Double Ply Corrugated Board Based on ANSYS[D]. Zhuhai: Jinan University, 2012: 43—46.
- [12] 车庆浩. 新型四层瓦楞结构的性能研究及灰色分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2005: 19—23.
CHE Qing-hao. Performance Research and Grey Analysis of a New Four Layer Corrugated Structure[D]. Tianjin: Tianjin University of Science Technology, 2005: 19—23.
- [13] 孟卓, 孙秦. 薄壁结构数值计算中的壳单元标定技术[J]. 机械设计与制造, 2012(7): 253—255.
MENG Zhuo, SUN Qin. Shell Element Calibration Technique in Numerical Calculation of Thin-walled Structures[J]. Machinery Design Manufacture, 2012(7): 253—255.
- [14] GB/T 6546—1998, 瓦楞纸板边压强度的测定法[S].
GB/T 6546—1998, Determination of Edgewise Compressive Strength of Corrugated Board[S].
- [15] İNCE F, TÜRKMEN H S, MECİTOĞLU Z, et al. A Numerical and Experimental Study on the Impact Behavior of Box Structures[J]. Procedia Engineering, 2011, 10(7): 1736—1741.