

装备防护

芯纸厚度对瓦楞纸板边压强度的影响及模拟

郑银环¹, 李虎胜¹, 王思远¹, 贾伟萍², 刘文婷²

(1. 武汉理工大学, 武汉 430070; 2. 湖北中烟工业有限责任公司, 武汉 430040)

摘要: **目的** 针对瓦楞纸板的强度设计未进行系统研究的问题, 通过改变楞纸的厚度研究瓦楞结构的改变对其边压强度的影响。**方法** 对 WH81287 型号的五层 BE 型瓦楞纸箱进行取材, 对瓦楞纸板进行边压强度 (Edge Crush Test, ECT) 试验, 通过试验数据验证有限元软件中模型的可靠性, 并在 Matlab 中对数据进行分析, 通过调整瓦楞芯纸厚度以用于瓦楞纸板的强度设计。**结果** 在边压强度的试验中, 根据实验数据可以得到, 瓦楞纸板的平均变形量为 0.824 0 mm, 最大边压力均值为 1 041.2 N。在仿真分析中, B 瓦厚度趋近于 0.210 0 mm 时, 瓦楞纸板的最大变形量均趋近于 1.195 0 mm, 最大等效应变均趋近于 0.115 0, 最大等效应力趋近于 23.500 0 MPa; 在 B 瓦厚度增加或减少过多时, 瓦楞纸板的最大变形量呈现逐渐增加的趋势, 最大等效应变与最大等效应力出现陡增或骤减。**结论** 通过不同楞纸厚度与各参数之间的函数曲线图, 找到了瓦楞纸板的最优参数, 其最大变形量最小, 最大等效应力、应变均较小且趋于稳定, 这为实际应用中瓦楞纸板的强度设计提供了指导, 提升了瓦楞纸板楞纸结构的设计效率。

关键词: 瓦楞纸板; 边压强度; 有限元分析; 芯纸厚度; 强度设计

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)01-0286-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.033

Effects and Simulation of Core Paper Thickness on Edge Crush Strength of Corrugated Board

ZHENG Yin-huan¹, LI Hu-sheng¹, WANG Si-yuan¹, JIA Wei-ping², LIU Wen-ting²

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. China Tobacco Hubei Industrial LLC, Wuhan 430040, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of changes in corrugated structure on its edge crush strength by changing the thickness of corrugated board to address the problem that the strength design of the corrugated board is not systematically studied. A WH81287 five-layer corrugated case was taken as the research material. Edge Crush Test (ECT) was conducted on the corrugated board. The test data were used to verify the reliability of the model in the finite element software, and the data were analyzed in Matlab to adjust the thickness of the corrugated core paper for the strength design of corrugated board. In the ECT, it can be seen from the test data that the average deformation of the corrugated board was 0.824 0 mm and its maximum average edge crush strength was 1 041.2 N. In the simulation analysis, the thickness of tile-B tended to be 0.210 0 mm. The maximum deformation of the corrugated board tended to be 1.195 0 mm, the maximum equivalent strain tended to be 0.115 0, and the maximum equivalent stress tended to be 23.500 0 MPa. When the

收稿日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金 (52005376)

作者简介: 李虎胜 (1998—), 男, 硕士生, 主攻机械工程方向。

通信作者: 郑银环 (1974—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为机电系统动力学分析与仿真和 CAD/CAE 技术。

thickness of tile-B increased or decreased too much, the maximum equivalent strain and the maximum equivalent stress increased or decreased sharply. According to the function curves between different corrugated board thicknesses and various parameters, the optimal parameters of the corrugated board are found. The maximum deformation is the minimum, and the maximum equivalent stress and strain are small and tend to be stable. This provides guidance for the strength design of corrugated paper in practical applications, and improves the design efficiency of corrugated paper structure of corrugated paper.

KEY WORDS: corrugated board; edge crush strength; finite element analysis; core paper thickness; strength design

目前,传统的包装材料主要包括纸类、塑料、金属、陶瓷、竹木、玻璃、皮质等,在不同领域各种材料均有涉及。由于塑料皮革等材料难降解,金属玻璃等不够轻便,部分材料成本太高等原因,瓦楞结构材料已经逐渐成为包装材料中重要的一环。并且随着我国物流行业的快速发展,瓦楞纸箱已经成为运输包装行业的主要装载形式^[1]。瓦楞纸箱作为现代运输方式中的主要容器,以其加工较为简单、成本低、绿色环保等多种优势,已经广泛应用于包装用基础设施领域。同时不同的瓦楞楞型^[2]与楞形组合可以生产适合各种环境运输的产品,瓦楞原纸在通过黏合、折叠等处理后,可以制作成为缓冲力强^[3-4]、硬度高的瓦楞纸箱。包装产品在进行运输、储存等环境下受到挤压、变形^[5]等疲劳损坏时,很大程度上会导致内部产品的破坏。在不增加成本的情况下,提高瓦楞纸箱的抗压强度是诸多企业拟解决的问题,因此,文中主要对瓦楞纸板芯纸厚度进行研究,这对瓦楞纸板的强度设计有着重要的意义。

对夹层强度设计优化等方面,很多学者都已经做过相关研究。Xing等^[6]通过研究黏结参数对双向波纹蜂窝铝压缩力学性能的影响,得到不同的胶黏剂类型对黏结强度有不同的影响,相同黏结层厚度、不同粒度式样的压缩性能也不同。李耿^[7]对瓦楞结构材料瓦楞方向的力学性能进行了研究,得到不同楞型材料瓦楞方向上的抗压强度等特性的差异。孙爽^[8]对瓦楞的面纸和芯纸相互作用的瓦楞纸板纵向压缩力学行为进行了研究,在微小结构下反映出结构参数对瓦楞纸板压缩性能的影响。Garbowski等^[9-10]通过研究横向剪切模量在波纹材料性能中的作用,发现影响瓦楞纸板包装承载能力的一个重要因素就是横向剪切刚度。该学者还对不同穿孔瓦楞纸箱的抗压强度进行了估算,通过数值分析得出不同类型穿孔瓦楞纸箱抗压强度的规律。刘志家等^[11]通过对瓦楞纸板家具进行有限元分析及结构优化设计研究,通过实验设计及仿真分析得出优化后的纸板,减少了纸板的用材,提高了纸板的性能。Bai等^[12]通过对单壁波纹板的准静态轴向压缩机理进行研究,改善了凹槽的力学性能,对瓦楞纸板的强度设计提供了有效帮助。Gao等^[13]研究了在绿色发展理念下包装垫的减缩设计,通过轻量化设计使用瓦楞纸代替塑料的方法对缓冲包装进行设计。Park等^[14-15]基于有限元分析预测瓦楞纸板的等效力

学性能,同时对瓦楞包装平压强度进行有限元仿真,得出结论:在通过有限元分析应用计算时,应考虑到因凹槽引起的载荷增加的特性。Ge等^[16]学者研究出了一种新型双瓦楞波纹芯的夹层结构,发现双瓦楞波纹芯的夹层结构材料比传统的单波纹芯拥有更好的压缩性能。以上学者对夹层结构的强度设计等大多对瓦楞的楞型、材料等进行研究,关于瓦楞芯纸厚度对瓦楞纸板边压强度的影响研究较少。

文中以WH81287型号的五层BE型瓦楞纸板为研究对象,对其进行瓦楞纸板的边压强度试验及有限元仿真分析。通过Solidworks三维建模软件及Ansys Workbench有限元软件对瓦楞纸板进行边压强度仿真分析,将仿真分析中的最大变形量、最大等效应力应变等数据与实验数据相结合,进行数据分析,得到楞纸厚度组合与最大变形量、最大等效应力应变的函数关系式,研究函数关系曲线的变化规律,对瓦楞纸板的强度设计提供指导。

1 边压强度试验

1.1 试验设备及标准

根据GB/T 450—2008《纸和纸板试样的采取及试样纵横向、正反面的测定》^[17],在取样器中对WH81287型号的五层BE型瓦楞纸箱进行瓦楞纸板的取样,取样尺寸为100 mm×25 mm的矩形纸板,取样器型号为ASR-PJ-BY瓦楞纸板边压取样器,采自广东艾斯瑞仪器科技有限公司,见图1a。原材料为WH81287型五层BE型瓦楞纸箱,采自湖北省武汉市卷烟厂。在进行边压强度试验之前,根据GB/T 10739—2002《纸、纸板和纸浆试样处理和试验的标准大气条件》^[18],将瓦楞纸板在试验标准〔温度为(23±1)℃、相对湿度为50%±2%〕的高低温交变湿热试验箱中进行24 h的恒温恒湿预处理。GDS-408高低温交变湿热试验箱采自江苏淮安市中亚试验仪器有限公司,见图1b。根据GB/T 6546—2021《瓦楞纸板边压强度的测定》^[19]进行试验,使用压缩强度试验机以速度12.5 mm/min对瓦楞纸板进行准静态压缩,直至压溃,压缩的载荷方向为垂直于瓦楞纸板的瓦楞方向。PN-CT300F压缩强度试验机采自杭州品享科技有限公司,见图1c。

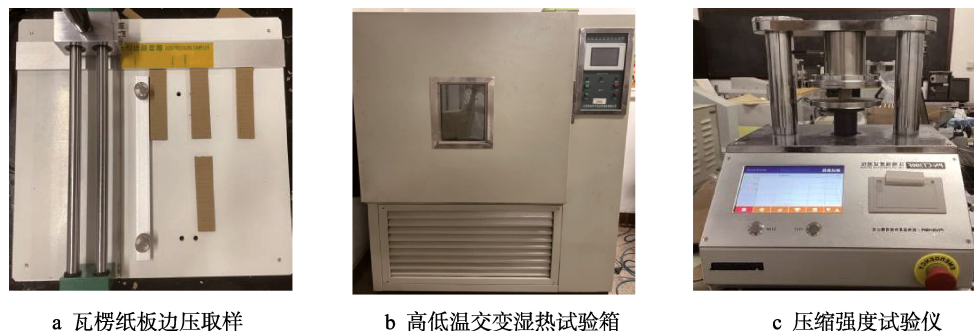


图 1 瓦楞纸板边压强度试验仪器
Fig.1 Edge crush strength test of corrugated board

1.2 试验结果

根据试验测得 20 组实验数据,得到瓦楞纸板的平均最大边压力值为 104 1.2 N,平均变形量为 0.824 mm,见表 1。在仿真分析中,将仿真结果与试验数据相对比,验证仿真数据的准确性,以便于后续的瓦楞纸板优化设计的仿真分析。

表 1 纸板边压实验数据
Tab.1 Data of paperboard edge crush test

组别	最大边压力值/N	变形量/mm
1	1 054.4	0.76
2	1 035.4	0.79
3	1 060.8	0.84
4	1 065.4	0.78
5	1 121.2	1.07
6	1 032.0	0.78
7	1 071.7	0.79
8	1 016.5	0.78
9	1 043.1	0.79
10	1 042.8	1.03
11	1 034.5	0.8
12	1 043.4	0.87
13	1 025.8	0.75
14	1 038.1	0.78
15	1 051.2	0.85
16	1 048.2	0.78
17	1 067.7	0.86
18	1 030.3	0.86
19	1 037.7	0.77
20	1 064.3	0.75
平均值	1 041.2	0.824

2 有限元的模型建立及前处理

2.1 三维模型的建立

模型与取样尺寸一致,为 100 mm×25 mm 的矩形纸板,瓦楞纸板主要由五层原纸组成:内面纸、B 型瓦楞(简称 B 瓦)、中间垫纸、E 型瓦楞(简称 E 瓦)、外面纸,见图 2a。型号 WH81287 的五层 BE 型瓦楞纸箱的原纸参数:内面纸厚度为 0.269 0 mm;B 型瓦楞楞高为 5 mm,瓦楞周期为 50 个/300 mm,厚度为 0.225 0 mm;中间垫纸厚度为 0.177 0 mm;E 型瓦楞楞高为 2 mm,瓦楞周期为 95 个/300 mm,厚度为 0.177 0 mm;外面纸厚度为 0.269 0 mm。考虑到实际情况,在垂直于瓦楞纸板方向加上类似压缩试验仪器的上、下压板,几何模型见图 2b。在 SolidWorks 软件中进行三维建模,导出的文件格式为 x_t,将模型导入 Ansys Workbench 有限元软件中,进行网格划分及后续的仿真分析。

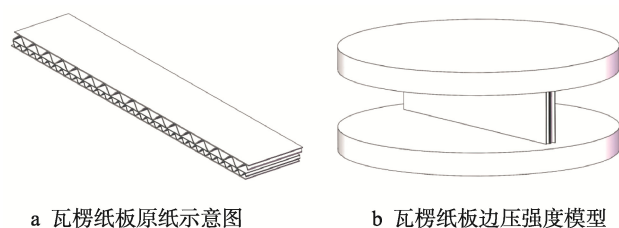


图 2 瓦楞纸板三维模型
Fig.2 Three dimensional model of corrugated board

2.2 确定材料参数

由于 ANSYS Workbench 的 Engineering Data 材料库中并没有瓦楞纸板或其他类似的材料参数类型,需要对瓦楞纸板的材料参数自行定义。瓦楞纸板的材料参数属性主要包括材料的密度、弹性模量、泊松比。五层原纸中的内面纸、外面纸、中间垫纸属于面纸,B 瓦与 E 瓦属于芯纸。面纸与芯纸的各项材料参数见表 2。模拟压缩强度实验的上下板采用理想刚塑性材料 RIGID。

表 2 瓦楞原纸的材料参数
Tab.2 Material parameters of corrugated base paper

材料	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比
面纸	1 086	7 326	0.34
芯纸	1 086	5 614	0.33

2.3 定义载荷与约束

在对瓦楞纸板进行边压强度试验时, 纸板受到一个缓慢的匀速垂直向下的载荷, 可以将其视为准静态的压缩试验。对瓦楞纸板垂直于瓦楞方向的上方圆板施加一个垂直向下、大小为 1 041 N 的力载荷 (Force), 对瓦楞纸板垂直于瓦楞方向的下方添加圆板的圆周施加固定约束 (Fixed Support), 见图 3。

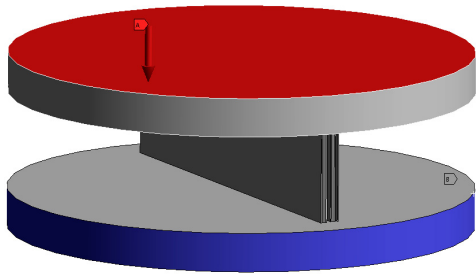


图 3 瓦楞纸板的载荷与约束
Fig.3 Load and restraint of corrugated board

2.4 网格划分与接触设置

有限元的网格划分是模型求解中非常重要的部分, 网格划分的精度直接影响计算的结果。由于瓦楞纸板各向异性的特性, 对 B 瓦和 E 瓦的网格划分要进行单独的尺寸处理。考虑到计算机运行速度及仿真结果的准确性, 对 B 瓦及 E 瓦采用六面体网格划分, 网格大小为 0.3 mm, 约束的圆板及其他原纸采用网格大小为 3 mm 的自由网格划分, 见图 4。

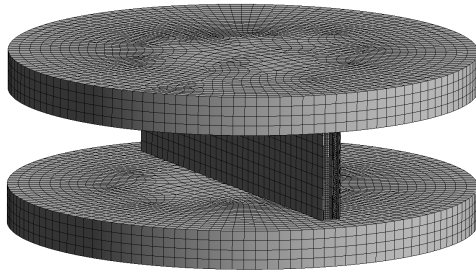


图 4 三维模型网格划分
Fig.4 Mesh generation of 3D model

在 Ansys Workbench 中一共有 5 种接触类型: 绑定接触 (Bonded)、无分离摩擦 (No Separation)、无摩擦的 (Frictionless)、有摩擦的 (Frictional)、粗糙 (Rough)。考虑到实际情况, 将瓦楞原纸之间的摩擦

设置为绑定接触 (Bonded), 瓦楞纸板与圆板之间的接触设置为粗糙 (Rough) 接触。

2.5 WH81287 型瓦楞纸板仿真结果

按照 2.2—2.4 节的各项前处理设置, 对 B、E 瓦不同厚度组合的瓦楞纸板进行仿真分析, 以 WH81287 型的瓦楞纸板为例, 瓦楞纸板在受到 1 014 N 的力时, 在纸板的近受力处及纸板两端处变形量最为明显, 见图 5。WH81287 型 (B 瓦厚度为 0.225 0 mm, E 瓦厚度为 0.177 0 mm) 瓦楞纸板的最大变形量为 1.197 8 mm, 最大等效应变为 0.116 6, 最大等效应力为 23.324 0 MPa。在瓦楞纸板的边压强度试验中, 瓦楞纸板的平均变形量为 0.824 0 mm, 对于有限元软件来说, 允许存在一定的误差, 并且有限元仿真其主要目的在于反应曲线的趋势, 而文中试验结果与有限元仿真分析的结果相接近, 在合理范围内。这也验证了瓦楞纸板的三维模型建立及有限元的前处理设计具有一定可靠性, 则在后续的仿真分析中, 可以对不同 B、E 瓦厚度组合的瓦楞纸板进行求解分析。

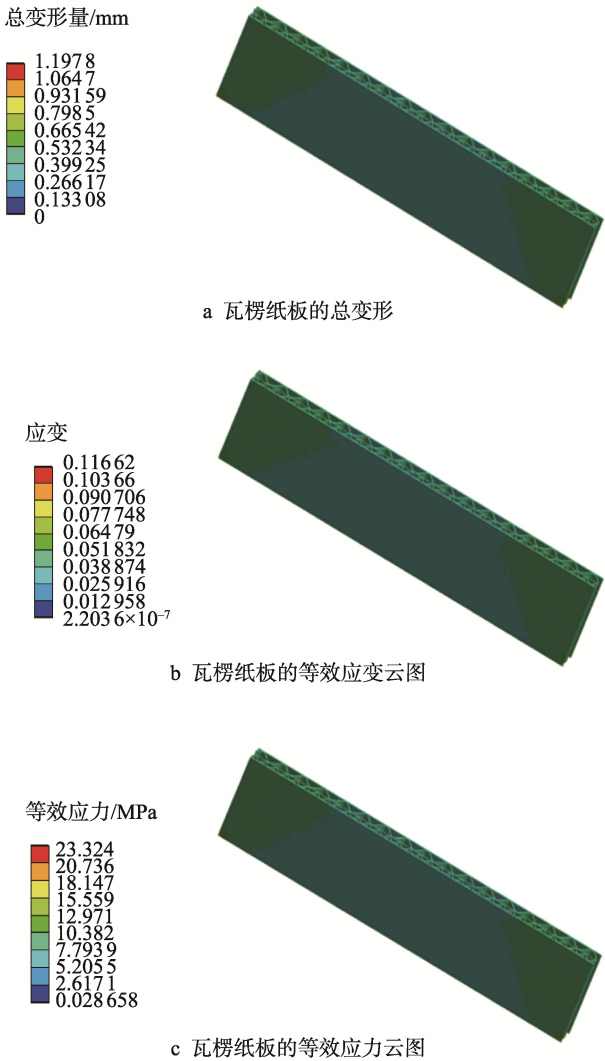


图 5 WH81287 型瓦楞纸板变形云图
Fig.5 Cloud chart of WH81287 corrugated board deformation

3 瓦楞纸板强度设计

3.1 瓦楞纸板强度设计方法

对瓦楞纸箱的强度设计最根本在于瓦楞结构本身的设计。目前,瓦楞的楞型、周期、楞高、楞数等都有相关国家标准的规定,即瓦楞的基本结构无法改变,因此,可以尝试对瓦楞楞纸的厚度进行增减,在合理的范围内研究瓦楞楞纸厚度的最佳组合。在瓦楞纸板的五层原纸中,两层瓦楞纸对瓦楞纸板的抗压强度影响最大。以 B 瓦和 E 瓦原纸质量的总和为定量, B 瓦和 E 瓦原纸的厚度组合为变量,使用控制变量法的原则,研究瓦楞楞纸厚度组合对瓦楞纸板边压强度的影响。通过有限元软件对不同瓦楞厚度组合的瓦楞纸板进行仿真分析,得到其最大变形量、最大等效应变、最大等效应力。将得到的各项数据拟合成曲线,或研究参数的变化趋势,为瓦楞的强度设计提供指导。

通过 Solidworks 三维建模软件中的“测量”、“质量属性”等工具栏可以知道,型号 WH81287 的五层 BE 型瓦楞纸板,试样中 B 瓦原纸厚度为 0.225 0 mm,面积为 3 361.940 0 mm²,体积为 756.889 0 mm³; E 瓦原纸厚度为 0.177 0 mm,面积为 3 650.620 0 mm²,体积为 646.427 0 mm³,则 B 瓦和 E 瓦的体积之和为 1 403.316 0 mm³。对 B、E 瓦原纸的厚度进行改变,得到式(1)。

$$3\ 361.940\ 0x + 3\ 650.620\ 0y = 1\ 403.316\ 0 \quad (1)$$

式中: x 为 B 瓦厚度; y 为 E 瓦厚度。

以型号 WH81287 五层 BE 型瓦楞纸板的原纸参数为基准,在 Matlab 软件中运用 Function 算法得到 B、E 瓦不同厚度组合的数据,根据对市场进行调研,考虑到实际情况的应用, B 瓦与 E 的厚度在 0.155 0~0.300 0 mm、0.246 3~0.108 2 mm 内取值。B、E 瓦楞厚度的不同厚度组合取值见表 3。

3.2 仿真结果与数值分析

在后续的仿真分析中,对 B、E 瓦不同厚度组合的瓦楞纸板进行求解,将 B 瓦厚度值与最大变形量拟合成关系曲线,见图 6。利用 Matlab 软件将曲线转化为函数关系式为:

$$\rho = 1.289 - 0.045 \cos(34.4\alpha) - 0.113 \sin(34.4\alpha) - 0.021 \cos(68.8\alpha) + 0.027 \sin(68.8\alpha) \quad (2)$$

式中: α 为变量,即 B 瓦厚度值,对应的函数值 ρ 为最大变形量。

从拟合的曲线可以看出,在 B 瓦楞纸厚度处于 0.185 0~0.240 0 mm、E 瓦楞纸厚度处于 0.214 1~0.163 4 mm 时,瓦楞纸板的最大变形量最小,且趋于稳定状态,最大变形量在 1.195 0 mm 上下浮动,在 B 瓦厚度大于 0.240 0 mm、E 瓦厚度小于 0.172 7 mm 时,瓦楞纸板的最大变形量有明显的增加趋势,在后续呈现出不稳定的变化趋势。

利用 Matlab 软件将 B 瓦厚度值与最大等效应变、最大等效应力之间的关系转换为关系曲线,见图 6b、c。利用 Matlab 软件将曲线转化为函数关系式为:

$$\delta = 0.013\ 6 \cos(45.91\alpha) + 0.002\ 8 \sin(45.91\alpha) - 0.000\ 4 \cos(91.82\alpha) - 0.006\ 8 \sin(91.82\alpha) - 0.001\ 6 \cos(137.73\alpha) - 0.003\ 6 \sin(137.73\alpha) - 0.002\ 6 \cos(183.64\alpha) + 0.007\ 0 \sin(183.64\alpha) + 0.129\ 7 \quad (3)$$

式中: α 为变量,即 B 瓦厚度值,对应的函数值 δ 为最大等效应变。

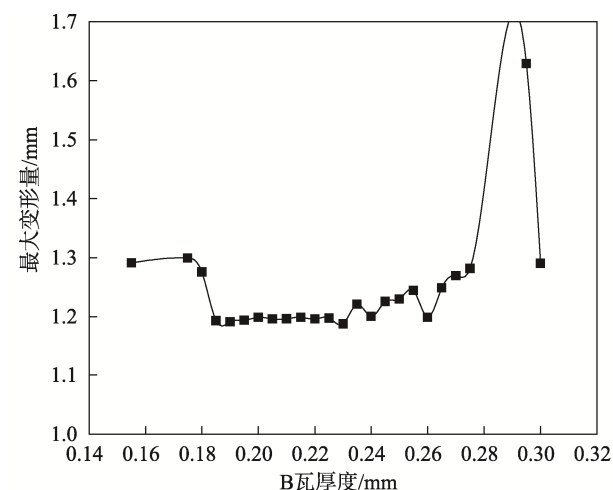
$$\varphi = 0.826\ 8 \cos(38.24\alpha) - 1.870\ 0 \sin(38.24\alpha) + 0.294\ 3 \cos(76.48\alpha) + 0.604\ 2 \sin(76.48\alpha) + 0.827\ 8 \cos(114.72\alpha) - 0.410\ 1 \sin(114.72\alpha) - 0.621\ 9 \cos(152.96\alpha) - 0.014\ 2 \sin(152.96\alpha) + 25.37 \quad (4)$$

式中: α 为变量,即 B 瓦厚度值,对应的函数值 φ 为最大等效应力。

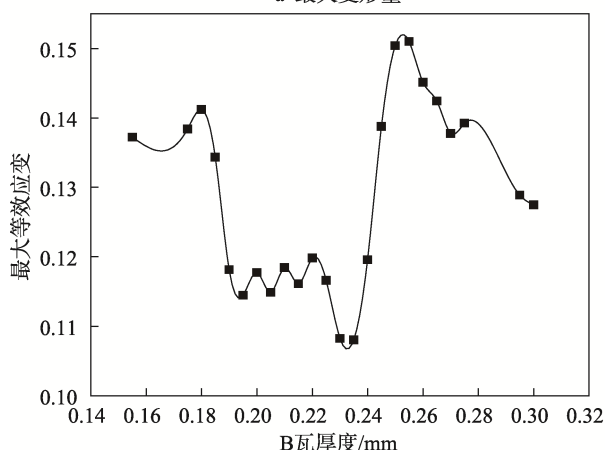
表 3 B、E 瓦厚度的取值
Tab.3 Value of thickness of tile-B and tile-E

瓦型	楞纸厚度/mm					
B 瓦	0.155 0	0.175 0	0.180 0	0.185 0	0.190 0	0.195 0
E 瓦	0.246 3	0.223 3	0.218 7	0.214 1	0.209 5	0.204 9
B 瓦	0.200 0	0.205 0	0.210 0	0.215 0	0.220 0	0.225 0
E 瓦	0.200 3	0.195 7	0.192 0	0.186 4	0.181 8	0.177 0
B 瓦	0.230 0	0.235 0	0.240 0	0.245 0	0.250 0	0.255 0
E 瓦	0.172 7	0.168 0	0.163 4	0.158 8	0.154 2	0.149 6
B 瓦	0.260 0	0.265 0	0.270 0	0.275 0	0.295 0	0.300 0
E 瓦	0.145 0	0.140 4	0.135 8	0.131 2	0.112 8	0.108 2

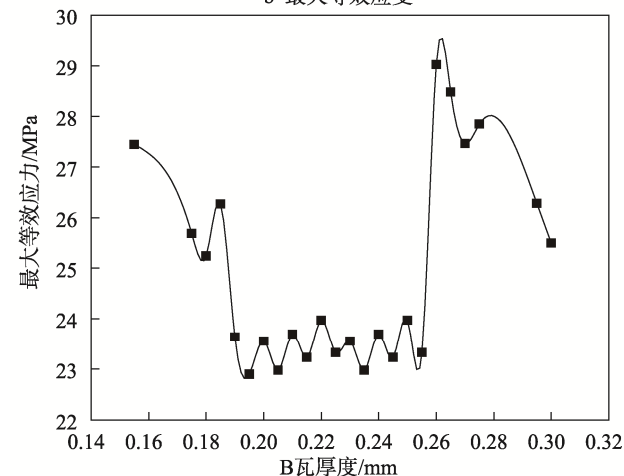
从图6中可以看出,在B瓦厚度为0.185 0~0.230 0 mm、E瓦厚度为0.214 1~0.172 7 mm时,其最大等效应变、最大等效应力较小且趋于稳定状态,最大等效应变在0.115 0上下浮动,最大等效应力在23.500 0 MPa上下浮动,这与图6b相对应。



a 最大变形量



b 最大等效应变



c 最大等效应力

4 结语

首先通过瓦楞纸板的边压强度试验得到平均最

大边压力值与平均变形量,将得到的试验数据与仿真分析的数据相结合,对瓦楞纸板的三维模型进行验证。利用 Solidworks 三维建模软件和 ANSYS Workbench 有限元软件对 WH81287 型五层 BE 型瓦楞纸板进行有限元仿真分析,得出以下结论:从瓦楞纸板的楞纸结构出发,通过 Matlab 软件计算得到 B、E 楞纸厚度的不同组合。在仿真分析中,将数据进行拟合后可知,在 B 瓦楞纸厚度处于 0.185 0~0.230 0 mm、E 瓦楞纸厚度处于 0.214 1~0.172 7 mm 时,瓦楞纸板的最大变形量、最大等效应变与最大等效应力稳定且较小。不同楞纸厚度与各参数之间的函数曲线图,以及文中所涉及改变瓦楞厚度的方法,为瓦楞纸板强度设计提供了理论支撑,也为实际应用中瓦楞纸板的强度设计提供了指导,提升了瓦楞纸板楞纸结构的设计效率。

文中从理论的角度验证了瓦楞楞纸厚度组合的可能性,该研究选取了瓦楞纸板的边压强度这一种力学性能进行分析,对其他力学性能的分析是未来的研究目标。

参考文献:

- [1] 孙德强,石威,李彬,等.基于 Ansys Workbench 的投影仪运输包装仿真分析[J].包装工程,2021,42(9): 11-16.
SUN De-qiang, SHI Wei, LI Bin, et al. Simulation Analysis of Projector Transport Packaging Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 11-16.
- [2] 李耿,孙德强,李国志,等.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, Sun De-qiang, Li Guo-zhi, et al. 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] SHU C F, HOU S J, ZHANG Y X, et al. Crashworthiness Analysis and Optimization of Different Configurations Multi-Layered Corrugated Sandwich Panels under Crush Loading[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2021, 23(7): 2901-2922.
- [4] 刘武,钟云飞.三角瓦楞缓冲衬垫设计及缓冲性能研究[J].包装工程,2020,41(11): 90-95.
LIU Wu, ZHONG Yun-fei. Design and Cushioning Performance of Triangular Corrugated Cushioning Insert[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(11): 90-95.
- [5] 白婧.瓦楞结构的轴向压溃响应研究[D].无锡:江南大学,2020: 9-12.
BAI Jing. Study on Axial Crushing Response of Corru-

- gated Structure[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 9-12.
- [6] XING You-dong, YANG Si-yi, LU Shi-qing, et al. Effect of Bonding Parameters on Compression Mechanical Properties of Bi-Directional Corrugated Honeycomb Aluminum[J]. The Journal of Adhesion, 2022, 98(4): 348-366.
- [7] 李耿. 瓦楞结构材料瓦楞方向静力学性能的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019: 44-48.
- LI Geng. Study on Static Properties of Corrugated Structural Materials in Corrugating Direction[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2019: 44-48.
- [8] 孙爽. 基于面纸和芯纸相互作用的瓦楞纸板纵向压缩力学行为研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 33-37.
- SUN Shuang. Research on the Longitudinal Compression Mechanical Behavior of Corrugated Paperboard Based on the Face Paper-core Paper Interaction[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 33-37.
- [9] GARBOWSKI T, GAJEWSKI T, GRABSKI J K. Role of Transverse Shear Modulus in the Performance of Corrugated Materials[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(17): 3791.
- [10] GARBOWSKI T, GAJEWSKI T, GRABSKI J K. Estimation of the Compressive Strength of Corrugated Cardboard Boxes with Various Perforations[J]. Energies, 2021, 14(4): 66-70.
- [11] 刘志家. 瓦楞纸板家具有限元分析及其结构优化设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021: 20-28.
- LIU Zhi-jia. Finite Element Analysis and Structural Optimization Design of Corrugated Board Furniture[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021: 20-28.
- [12] BAI J, WANG J, PAN L, et al. Quasi-Static Axial Crushing of Single Wall Corrugated Paperboard[J]. Composite Structures, 2019, 226: 91-95.
- [13] GAO Z, DONG W P, JI X M, et al. Research on the Reduction Design of Fragile Product Cushion Packaging under the Green Development Concept[C]// 2020 International Symposium on Energy Environment and Green Development, 2020.
- [14] PARK J, CHANG S, JUNG H M. Numerical Prediction of Equivalent Mechanical Properties of Corrugated Paperboard by 3D Finite Element Analysis[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(22): 101-110.
- [15] PARK J M, SIM J M, JUNG H M. Finite Element Simulation of the Flat Crush Behavior of Corrugated Packages[J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(17): 68-74.
- [16] GE L, ZHENG H Y, LI H M, et al. Compression Behavior of a Novel Sandwich Structure with Bi-Directional Corrugated Core[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 161: 55-61.
- [17] GB/T 450—2008, 纸和纸板试样的采取及试样纵横向、正反面的测定[S].
- GB/T 450—2008, Paper and Board-Sampling for Testing and Identification of Machine and Cross Direction Wire Side and Felt Side[S].
- [18] GB/T 10739—2002, 纸、纸板和纸浆试样处理和试验的标准大气条件[S].
- GB/T 10739—2002, Paper, Board and Pulps—STANDARD Atmosphere for Conditioning and Testing[S].
- [19] GB/T 6546—2021, 瓦楞纸板 边压强度的测定[S].
- GB/T 6546—2021, Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrugated Fibreboard—Determination of Edgewise Crush Resistance[S].

责任编辑: 曾钰婵