

新型叠层结构瓦楞纸板设计及其动态性能研究

仲晨¹, 周丽娜², 刘莉², 夏征²

(1. 中山火炬职业技术学院, 广东 中山 528400; 2. 曲阜师范大学, 山东 日照 276826)

摘要: **目的** 设计一种新型叠层结构瓦楞纸板, 解决传统瓦楞纸板耐反复冲击性能较差等问题, 获得缓冲及防振性能提升的包装用新型瓦楞纸板。**方法** 首先设计新型纸板芯纸结构; 其次设定新型纸板和传统纸板参数, 并手工制作试样; 最后对这2种纸板分别进行动态缓冲性能试验和随机振动试验, 对比分析2种纸板性能。**结果** 动态缓冲性能对比试验表明, 在不同跌落高度下新型纸板的缓冲性能优于传统纸板; 在反复冲击条件下, 新型纸板的累积缓冲性能亦优于传统纸板的。随机振动试验表明, 新型纸板的减振区间为63.4~200 Hz, 而传统纸板在5~200 Hz内无减振现象; 新型纸板在40 Hz左右的振动传递率达到峰值4.2, 传统纸板的固有频率为163 Hz, 新型纸板在此频率下弹性模量相对较小; 新型纸板用于公路、铁路运输包装设计时应避开40 Hz的共振频率。**结论** 与传统纸板相比, 新型纸板的动态缓冲性能及减振性能均有提升。

关键词: 瓦楞纸板; 新型结构; 性能; 缓冲; 防振

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)09-0206-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.025

Design and Dynamic Performance of New Corrugated Board with Laminated Structure

ZHONG Chen¹, ZHOU Li-na², LIU Li², XIA Zheng²

(1. Zhongshan Torch Polytechnic, Guangdong Zhongshan 528400, China;

2. Qufu Normal University, Shandong Rizhao 276826, China)

ABSTRACT: The work aims to design a new kind of corrugated board with laminated structure, to solve the problems of poor repeated impact resistance of traditional corrugated board and obtain a new corrugated board with improved cushioning and damping performance for packaging. Firstly, the corrugating medium structure of the new corrugated board was designed. Secondly, the parameters of the new corrugated board and the traditional corrugated board were set, and the samples were made manually. Finally, the dynamic cushioning performance test and random vibration test were carried out to the two kinds of corrugated boards, and the performance of the two corrugated boards was compared and analyzed. The dynamic cushioning test showed that the cushioning performance of the new corrugated board was better than that of the traditional one under varied drop heights. Under repeated impact, the cumulative cushioning performance of the new corrugated board was also better than that of the traditional one. The random vibration test proved that the damping range of the new corrugated board was 63.4~200 Hz, while the traditional one had no damping performance in the range of 5~200 Hz. The vibration transitivity of the new corrugated board reached a peak value of 4.2 at about 40 Hz. At the natural frequency of 163 Hz of the traditional corrugated board, the elastic modulus of the new corrugated board was relatively small. The resonance frequency of 40 Hz should be avoided when the new corrugated board was used in the packaging design for highway and railway transportation. Compared with the traditional corrugated board, the dynamic cushioning

收稿日期: 2022-06-05

基金项目: 广东省教育厅2021年度普通高校重点科研平台和项目(2021GCZX020)

作者简介: 仲晨(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为物流包装和包装结构设计。

通信作者: 夏征(1978—), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为包装设计。

performance and vibration damping performance of the proposed corrugated board are improved.

KEY WORDS: corrugated board; new structure; performance; cushioning; damping

目前, 运输包装的常用材料以塑料和纸质材料为主, 塑料材料以发泡聚乙烯 (EPE)、发泡聚苯乙烯 (EPS)、发泡聚丙烯 (EPP)、气柱等为代表, 多作为内部缓冲材; 纸质材料以瓦楞纸板、蜂窝纸板等为主, 多作为外包装。尽管塑料缓冲材具有质轻、缓冲性能好等优点, 但随着绿色可持续发展成为国家战略^[1]以及禁塑令的推出, 快递包装减量化、绿色化越来越受到重视。以瓦楞纸箱为代表的纸质包装作为典型的“绿色包装”, 其市场占有率逐年递增, 市场份额从 2015 年的 26% 上升到 2021 年的 49%^[2]。

瓦楞纸板作为运输包装的主力军, 对其相关的研究一直是包装领域的经典课题。例如, 有学者对瓦楞纸板的生产工艺进行了调研, 李生辉^[3]对瓦楞纸板生产线的上、下瓦楞辊等部件做了深入研究, 利用振动相关的力学模型和中心距振动方程, 并结合仿真软件分析在不同转速下, 瓦楞辊应力变化及运动规律, 进而对瓦楞纸生产线作出相应的改进; 匡雪萍^[4]研究了防水型、保鲜型及纳米型瓦楞纸板的生产工艺, 为其他功能性瓦楞纸板生产工艺提供参考; 齐辉等^[5]利用 Flexsim 软件对瓦楞纸板工艺制作流程进行仿真, 并提出了该生产系统的不合理之处。此外, 国内外不少学者还对瓦楞纸板的缓冲性能进行了研究, 如孙德强等^[6]采用共面静压和共面冲击等多种试验方法, 研究单瓦楞纸板奇偶层相交错时 4 种交错角度对其缓冲性能的影响; 刘武等^[7]以三角形支撑结构件为基础, 运用静态压缩试验分析三角瓦楞结构件的缓冲性能, 为设计瓦楞缓冲结构提供了理论基础; Park 等^[8]运用有限元方法分析了瓦楞纸板的正交各向异性的性能; Guo 等^[9]通过静态压缩和跌落冲击压缩试验, 评价了瓦楞纸板复合分层结构的压缩性能和缓冲能量吸收性能。还有不少学者在瓦楞纸板组合结构方面进行了探究, 如王章莘等^[10]利用瓦楞纸板与纸浆模塑建立组合结构, 通过动载试验与静载试验对纸浆模塑的缓冲性能进行分析, 并对纸浆模塑外部尺寸、内结构高度及波纹间距合理设计, 从而使包装内部缓冲结构与餐具更好的融合, 同时极大程度地降低跌落冲击时对餐具造成的损伤与破坏; 娄巧莲^[11]在传统瓦楞纸板芯纸结构的基础上, 提出并制备了 45° 夹芯复合板, 并探讨多种因素对该角度芯纸复合结构平压性能和弯曲性能造成的影响; Dimitrov 等^[12]通过对瓦楞纸板边压强度进行研究, 解决了 Maltenfort 模型中瓦楞纸板临界强度性能之间的线性回归常数等问题。

2020 年疫情以来, 我国瓦楞包装行业面临“订单少、成本高、利润低”的困局。在此形势下, 瓦楞包装企业只有积极进行技术创新, 及时占领行业制高点才能形成新的利润增长点^[13-14]。其中, 开发新型瓦楞

纸箱和新型瓦楞纸板是创新转型非常可行的思路。经上述资料调研发现, 目前对瓦楞纸板的研究多针对普通瓦楞纸板, 对瓦楞纸板结构的创新研究尚鲜见报道。基于此, 本课题对瓦楞纸板芯纸结构进行设计, 提出一种新型结构瓦楞纸板, 并进一步研究了其动态缓冲性能, 为瓦楞纸板的技术创新提供参考。

1 新型瓦楞纸板结构设计

1.1 结构描述

传统瓦楞纸板 (以下简称“传统纸板”) 由上、下面的面纸及中间的芯纸构成三层结构。其芯纸按瓦楞圆弧的大小分为 V 形、U 形和 UV 形 3 种, 但不论何种类型芯纸, 从立体结构看, 传统纸板芯纸是一个向上凸起, 向下凹陷的规则波纹; 从截面形状看, 芯纸结构由一个个呈三角状或近似三角的折线连接而成。

本文提出的新型叠层结构瓦楞纸板 (下称“新型纸板”) 在传统纸板三层结构基础上对芯纸结构进行创新。新型芯纸如图 1 所示。图 1a 是芯纸的平面结构, 图 1b 是其立体结构。新型芯纸保留了传统纸板芯纸的平行线主体结构, 以便在生产时可以被压缩为手风琴状, 利于在储纸平台上操作。与传统纸板芯纸的不同之处在于, 在平行线间设计有呈一定角度的对折线, 折叠后呈正反挤压痕状态, 使得芯纸成型后呈现上下两层的立体结构。上层结构形状为立体六角菱形, 折痕在其上下棱角的连接直线上, 顺着直线折叠, 使折叠处向下凹陷。六角菱形的左右两边向上凸起, 并与毗邻的六角菱形相连, 从而形成六角菱形连排状态。由于连排的六角菱形有向下凹陷和向上凸起结构, 因此它们可以被横向压缩在一起。下层结构呈 V 形结构, V 形结构与六角菱形结构的凸起处和凹陷处分别处在同一直线上。从立体角度看, 六角菱形结构的侧面形状是等腰梯形, 其向上凸起处比 V 形结构的楞峰高, 整体形成高-低-高的结构形态。

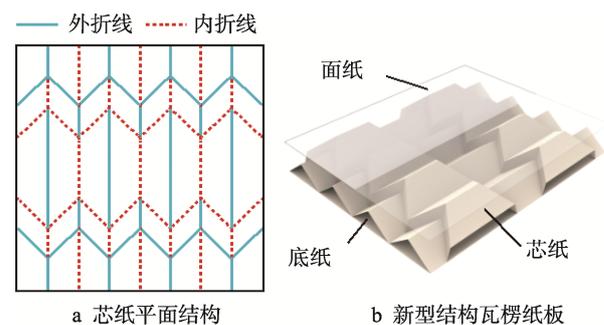


图 1 新型叠层结构瓦楞纸板

Fig.1 New corrugated board with laminated structure

1.2 参数设定

新型纸板芯纸参数如图2所示,图2a、b和c分别为芯纸参数示意图、芯纸成型后纵压线方向(与楞向平行)截面及横压线方向(与楞向垂直)截面。其中, x_1 为楞间距, mm; x_2 为起楞高度, mm; x_3 为六角菱形长度, mm; θ_1 为六角菱形顶点半角角度, ($^\circ$); θ_2 为起楞垂线与水平面夹角, ($^\circ$); θ_3 为芯纸定型时截面三角形边线与水平面夹角, ($^\circ$)。

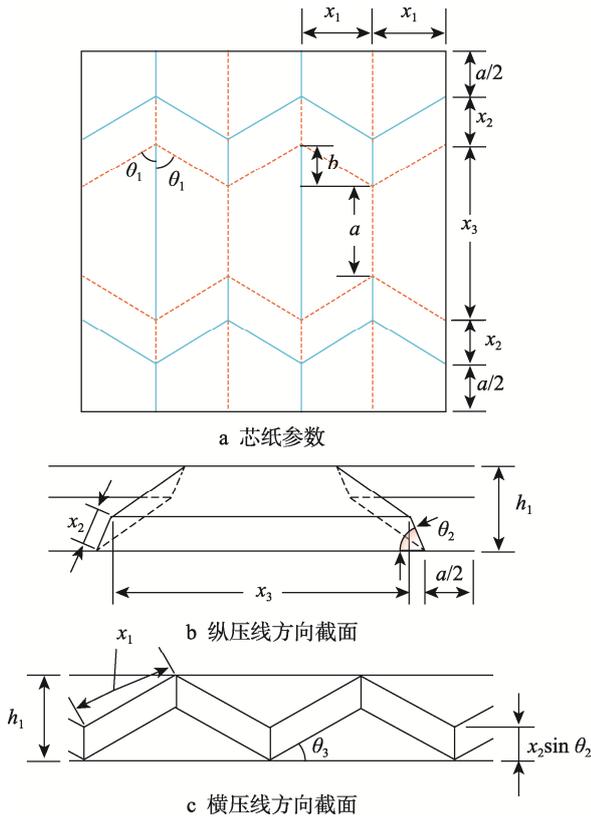


图2 新型纸板芯纸结构
Fig.2 Corrugating medium structure of new corrugating board

基于三角函数关系计算可知,纸板成型后的芯纸高度 h_1 如式(1)所示。

$$h_1 = x_1 \sin \theta_3 + x_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

由图2a可知, $b = x_1 / \tan \theta_1$, 故 $a = x_3 - 2b$ 。成型前原纸纵向长度为 $x_3/2 + x_2 + a/2 = x_2 + x_3 - b$ (简便起见,取图2a纵向半图计算)。由图2b可知,成型后芯纸纵向长度为 $a/2 + x_2 \cos \theta_2 + x_3/2 = x_2 \cos \theta_2 + x_3 - b$, 则芯纸的纵向收缩率 β_1 如式(2)所示。

$$\beta_1 = 1 - \frac{x_2 \cos \theta_2 + x_3 - b}{x_2 + x_3 - b} = \frac{x_2(1 - \cos \theta_2)}{x_2 + x_3 - b} \quad (2)$$

由图2a可知,成型前原纸横向长度为 $2x_1$,由图2c可知,成型后芯纸横向长度为 $2x_1 \cos \theta_3$,则芯纸的横向收缩率 β_2 如式(3)所示。

$$\beta_2 = 1 - \frac{x_1 \cos \theta_3}{x_1} = 1 - \cos \theta_3 \quad (3)$$

2 试验

2.1 试验设计

考虑到瓦楞纸板的主要用途是作为运输包装材料,本文重点考查新型纸板在动态冲击下的动态缓冲性能。通过对比试验进行新型纸板动态缓冲性能分析,这里将传统的单楞三层瓦楞纸板作为性能对比标准。考虑到新型纸板试样需手工制作完成,制作过程中在成型、黏合等工序均存在制作误差,致使试样性能较工业生产瓦楞纸板性能有所降低。若将手工制作新型纸板与工业生产瓦楞纸板直接比较,数据可信度不足,故作为对比标准的传统纸板也一并利用相同材料由手工制作,以最大限度地降低手工打样导致的数据误差。

2.2 试样制作

瓦楞纸板国家标准^[15]中要求瓦楞纸箱生产用纸材料必须符合规定,箱纸定量为250、280、300、320、360 g/m²,瓦楞原纸的定量为125、150、180 g/m²。基于此,本文试样所用芯纸优选为125 g/m²瓦楞原纸,面纸优选为250 g/m²的箱纸板。

2.2.1 新型纸板试样制作

为便于制作与对比,新型纸板芯纸参数设定如表1所示。由式(2)和(3)计算可知,试样芯纸的 β_1 和 β_2 分别0.17和0.29。

表1 新型纸板芯纸参数设定
Tab.1 Setting of parameters of corrugating medium of new corrugating board

x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	θ_1 / $^\circ$	θ_2 / $^\circ$	θ_3 / $^\circ$
5	3	20	45	90	45

新型纸板试样制作共分为如下3步。

1) 芯纸初步成型。根据上述设定参数,利用包装结构设计软件 ArtiosCAD 绘制芯纸平面结构,使用打样机(ESKO,康思博 V3型)对芯纸打样,然后进行手工折叠形成立体芯纸。

2) 芯纸精确成型。由于立体芯纸具有手风琴式的可收缩性,为保证试样成型精度,设计了如图3所示的U形定型框。该定型框由底板和2个侧板组成,材料采用厚度为5mm的亚克力板以保证框体刚度。在两侧板上打有直径为2mm的小孔(加工精度下限),孔间距等于所设计新型纸板芯纸的楞间距。在两侧板孔中按S型回路穿直径为0.1mm的尼龙细线,细线呈绷紧的直线状态。试样制作时将已呈立体状态的芯纸架放在尼龙细线上,以确保其横向楞间距精度;沿尼龙细线方向设有定位卡扣,两定位卡扣间距由式(2)计算得出,以确保其纵向缩进精度。

3) 黏合面纸和底纸。用棉棒把淀粉黏合剂均匀

地涂抹在已定型好的芯纸楞线上, 贴合一侧的面纸形成单楞双层纸板。放置约 10 min, 把单楞双层纸板取下, 翻转 180°后黏合另一侧底纸, 最终形成单楞三层纸板。

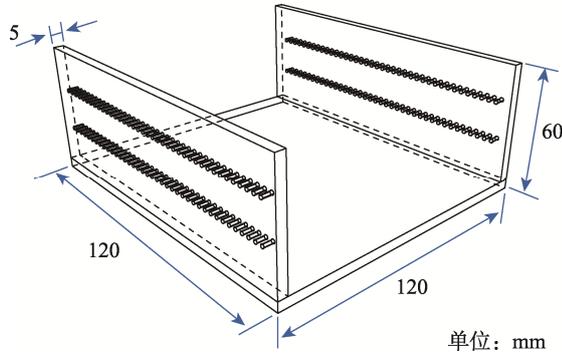


图 3 U 型亚克力定位框
Fig.3 U-shape acrylic fixing frame

2.2.2 传统纸板试样制作

传统纸板结构相对简单, 其制作与新型纸板大致相同, 具体过程省略。试样参数设定为 $\theta_3=45^\circ$, 楞间距为 5 mm。

由于手工制作时试样厚度下限限制及芯纸结构的改变, 新型纸板与传统纸板的试样高度不同。最终, 传统纸板及新型纸板试样厚度分别为 (5 ± 0.2) mm 和 (7 ± 0.2) mm。

2.3 试验设备及方法

2.3.1 试样预处理

在进行试验前, 将纸板试样放置于温度为 20 °C、相对湿度为 70% 的标准环境条件下 24 h 以上。

2.3.2 动态缓冲特性试验

通常材料的动态缓冲特性应使用材料动态压缩试验机进行检测^[16]。本文使用材料动态压缩试验机 (西安广博检测设备有限公司, XG-HC 型) 进行预试验, 发现受手工试样精度限制及试验机落锤最小质量限制, 该设备无法获得低应力状态下的加速度数据, 致使动态缓冲特性曲线不完整 (参见图 4)。因此, 本文基于动态压缩原理, 利用冲击试验机^[17] (苏试试验设备有限公司, CL-20 型) 进行新型纸板的动态缓冲性能试验 (参见图 5)。

1) 试验准备: 将试样材料固定于冲击台中央, 其上放置一定质量的铁板作为产品模拟物; 将加速度传感器 1 固定于冲击台上, 将加速度传感器 2 固定于铁板上表面中央位置, 两传感器另一端均与数据采集仪 TP3 (美国 Lansmont 公司, Lite 型) 连接, 以采集冲击加速度曲线数据。

2) 试样参数: 设置等效跌落高度 h 分别为 150、300、500 和 700 mm, 以检验新型纸板在不同跌落高度

下的缓冲性能; 纸板面积分别为 40 mm×40 mm、50 mm×50 mm、60 mm×60 mm、70 mm×70 mm、80 mm×80 mm 及 90 mm×90 mm, 以获得不同的静应力数据; 铁板质量为 0.35 kg。

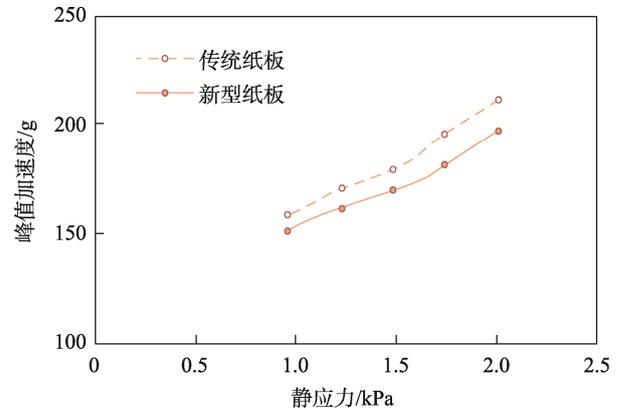


图 4 动态缓冲特性预试验
Fig.4 Preliminary test for dynamic cushioning performance

3) 试样步骤: ①将冲击台抬升至某一预定的等效跌落高度, 由铁板和试样材料组成的缓冲系统和冲击台一起跌落, 冲击台撞击下部缓冲垫瞬间由 TP3 采集冲击数据; ②更换新的纸板试样进行重复性试验 5 次, 完成某一应力点下的数据采集; ③更换不同面积的纸板试样, 并重复步骤①和②, 完成某一跌落高度下的缓冲特性曲线; ④重复步骤①至③, 完成不同跌落高度下缓冲特性曲线。

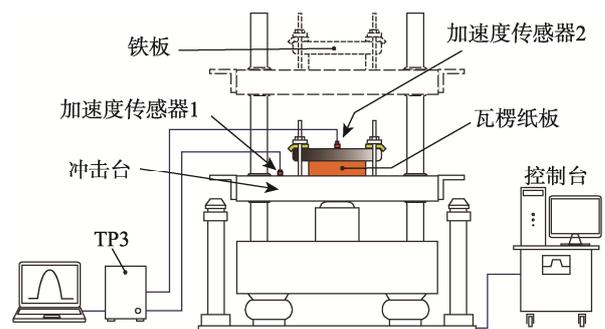


图 5 动态缓冲特性试验
Fig.5 Dynamic cushioning performance test

2.3.3 振动特性试验

设计对比试验检验新型纸板的防振性能^[18], 试验设备为电磁振动试验机 (苏试, TBS-630 型), 振动方式设定为随机振动, 试验场景如图 6 所示。

1) 试验设计: 将纸板试样固定在振动台中央; 纸板上放置用以模拟产品的平板玻璃; 将加速度计 1 固定于平板玻璃上表面中心以采集振动响应信号, 加速度计 2 固定于振动台上以反馈振动台控制。

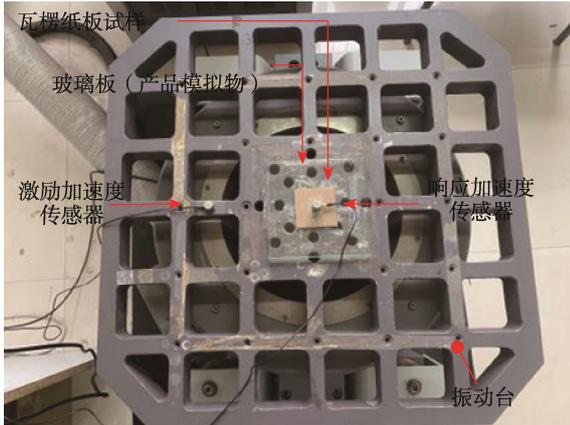


图6 随机振动试验
Fig.6 Random vibration test

2) 试样参数: 试验材料采用新型纸板和传统纸板作为缓冲衬垫, 2种纸板试样尺寸(长×宽×厚)分别为 60 mm×60 mm×7 mm 和 60 mm×60 mm×5 mm; 平板玻璃尺寸为 150 mm×150 mm×5 mm; 激励 PSD 曲线由 GB/T 4857.23—2021 中的公路运输严酷水平 1 随机振动 PSD 曲线表示, 激振数据如表 2 所示。

3) 试样步骤: ①将纸板和平板玻璃依次放在振动台上并固定, 并使振动台、纸板和平板玻璃的几何形心重合; ②在振动台上和平板玻璃上分别安装加速度传感器; ③在振动测试系统 CR-300 软件中进行目标谱和参数设定, 开始测试; ④记录 2 种纸板的振动传递率曲线。

表 2 随机振动 PSD 曲线 (公路运输严酷水平 1)
Tab.2 PSD curve used in random vibration test (hazard level 1 of road transportation)

频率/Hz	功率谱密度/(g ² ·Hz ⁻¹)
8	0.007
12	0.016
30	0.006
40	0.015
60	0.001 4
100	0.001
200	0.000 05

3 数据处理与结果分析

3.1 数据处理

基于冲击试验数据绘制最大加速度-静应力曲线。根据公式 $\sigma=F/A$, 可计算不同的静应力值。式中, σ 为静应力, Pa; F 为载荷, N; A 为承压面积, m²。基于 TP3 采集的加速度-时间曲线可得某静应力下的最大响应加速度。由于同一应力下进行了 5 次重复性

试验, 数据处理后的加速度为该应力点下的加速度平均值。

基于随机振动试验数据绘制振动传递率曲线。频谱值由试验数据直接获取; 根据公式 $T_r=G_{out}/G_{in}$, 可计算不同频率下的振动传递率。式中, T_r 为振动传递率; G_{out} 和 G_{in} 分别为响应加速度和激振加速度。

3.2 结果分析

3.2.1 缓冲性能分析

图 7a 和图 7b 分别表示在 150、300、500 和 700 mm 等效跌落高度下 2 种纸板首次跌落及 2~6 次跌落平均的加速度-静应力曲线对比, 图 7a 和图 7b 同时标注了各应力点下重复性试验的标准偏差。首次跌落条件下, 2 种纸板加速度下降程度对比数据见表 3。

由图 7 可知, 不论是不同跌落次数下的对比, 还是不同跌落高度下的对比, 新型纸板的最大加速度-静应力曲线均低于相对应的传统纸板曲线, 这表明新型纸板的缓冲性能整体上优于传统纸板的。由表 3 可知, 在 h 为 300 mm 和 500 mm 条件下, 新型纸板较传统纸板的加速度下降了约 1/4, 缓冲效果提升显著; 在 h 为 150 mm 和 700 mm 条件下, 新型纸板较传统纸板的加速度下降了约 16%, 缓冲效果亦有改善。

就首次跌落而言, 随着跌落高度的增加, 传统纸板及新型纸板的最大加速度-静应力曲线的最低点(包装设计时安全性最高)均由高静应力向低静应力移动, 说明 2 种纸板的最佳缓冲状态均随跌落高度的增加而由重载向轻载移动。对比 2~6 次跌落平均值可知, 随着跌落次数的增加, 2 种纸板的加速度最小值均有显著增加, 可见缓冲性能均呈下降状态。

图 8 是 2 种纸板在不同跌落高度下, 2~6 次累计跌落与首次跌落的加速度最小值的增幅对比。可知, 随着跌落高度的增加, 新型纸板在累积冲击下的加速度增幅更小, 说明其累积冲击下的缓冲性能更佳。但注意到 h 为 150 mm 和 300 mm 时的新型纸板加速度增量比传统纸板的高, 说明在低跌落条件下, 新型纸板因其独特双层结构而具有较好恢复性, 使其累计跌落后仍保持了足够刚度, 造成累计跌落与首次跌落加速度的增幅较大; 而高跌落条件下新型纸板的双层结构被压缩变形, 柔性增加, 表现出更强的缓冲效果。

3.2.2 防振性能分析

图 9 是 2 种纸板在随机振动中的振动传递率曲线对比。新型纸板的减振区间为 63.4~200 Hz, 而传统纸板在 8~200 Hz 内无减振。可见在 63.4~200 Hz 频率下, 新型纸板具有良好的减振效果。考虑到航空运输振动能量主要集中在高频区, 故新型纸板特别适合航空运输包装。相较于新型纸板的固有频率(40 Hz), 传统纸板在 163 Hz 达到最大振动传递率 6.1, 说明新型纸板弹性模量相对较小, 刚度相对较弱, 具有更好

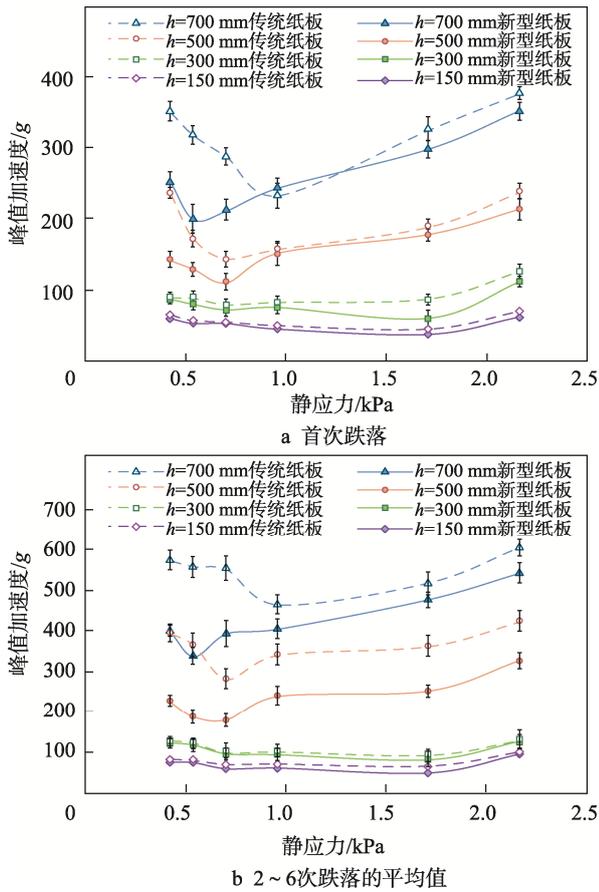


图 7 最大加速度-静应力曲线

Fig.7 Peak acceleration-static stress curves

表 3 首次跌落条件下新型纸板与传统纸板加速度下降程度对比

Tab.3 Comparison of decline degree of acceleration between new corrugated board and traditional corrugated board under the first drop

等效跌落高度 h/mm	新型纸板加速度最小值/g	传统纸板加速度最小值/g	降低百分比/%
150	37.6	45.0	17
300	60.2	79.1	24
500	110.2	143.5	23
700	198.5	232.6	15

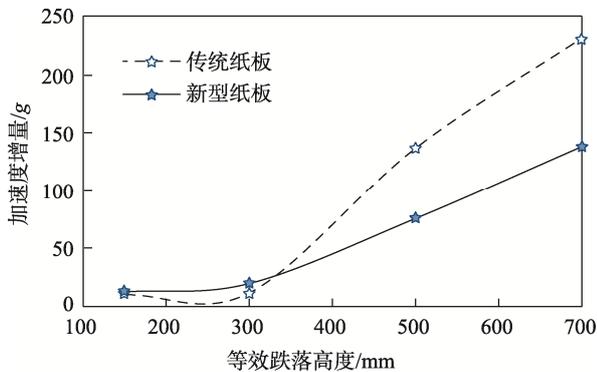


图 8 2~6 次跌落平均值较首次跌落的加速度增量

Fig.8 Acceleration increment of average value under 2-6 drops compared with that under the first drop

的柔软性。注意到在 63.4 Hz 频率以下时, 2 种纸板在 40 Hz 附近的 T_r 均有(次级)峰值, 新型纸板的 T_r 达到 4.2 左右, 显著高于传统纸板的 $T_r=1.54$ 。0~50 Hz 是公路运输的能量集中频带, 可见新型纸板在该频带的减振效果不理想, 故利用新型纸板进行公路运输包装应避免 40 Hz 这一共振频率。

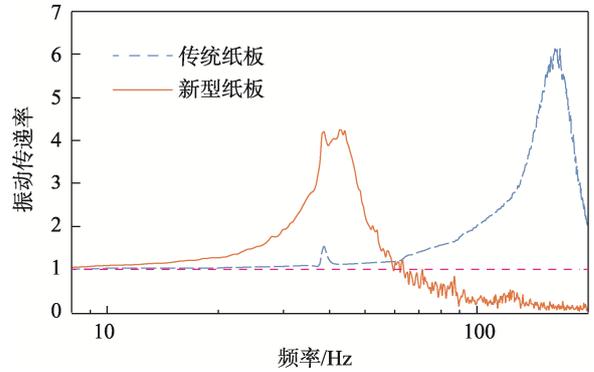


图 9 振动传递率曲线

Fig.9 Vibration transitivity curves

4 结语

设计了一种新型叠层结构瓦楞纸板, 并与传统三层瓦楞纸板进行对比, 分析了新型纸板的动态缓冲性能及防振性能, 得出以下结论。

1) 动态缓冲性能对比试验表明, 在不同跌落高度下, 新型纸板的缓冲性能优于传统纸板的; 在反复冲击条件下, 新型纸板的累积缓冲性能亦优于传统纸板的。随跌落高度的增加, 新型纸板与传统纸板一样, 其缓冲性能均呈下降趋势。

2) 随机振动试验表明, 新型纸板较传统纸板的减振性能整体上更优, 特别是在高频区新型纸板的减振效果更为显著, 适用于航空运输包装设计。新型纸板同样适用于公路、铁路运输包装, 但应在设计时避开 40 Hz 的共振点。

3) 得益于新型纸板独特的双层结构, 使其在低跌落条件下具有较好恢复性, 并在累计跌落后仍保持足够刚度; 在高跌落条件下其双层结构被压缩变形, 柔性增加, 表现出更强的缓冲效果。双层结构与 2 个弹簧串联等效, 使其在振动方面具有减振效果。

4) 本文采用手工试样制作, 试验数据在一定程度上存在误差。下一步拟进行有限元仿真, 进一步提高数据可信度, 并从理论上分析新型纸板的缓冲机理。另外, 振动试验中新型纸板在低于 63.4 Hz 条件下的减振效果不理想, 分析得出原因应与新型纸板双层结构参数有关, 最优减振参数的确定应是下一步研究目标。

参考文献:

[1] 国务院办公厅. 国务院办公厅转发国家发展改革委等

- 部门关于加快推进快递包装绿色转型意见的通知[EB/OL](2020.12.14)[2021.07.11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-12/14/content_5569345.htm.
- Office of the State Council. Notice of the General Office of the State Council Transmitting the Opinions of the National Development and Reform Commission and Other Departments on Accelerating the Green Transformation of Express Packaging[EB/OL](2020.12.14) [2021.07.11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-12/14/content_5569345.htm.
- [2] 李超. 明杰包装有限公司关系营销策略研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2021: 29-40.
LI Chao. Study on Relationship Marketing Strategy of Mingjie Packaging Co., LTD[D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2021: 29-40.
- [3] 李生辉. 瓦楞纸生产线关键部件的分析与研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020: 17-20.
LI Sheng-hui. Analysis and Research on Key Components of Corrugated Paper Production Line[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2020: 17-20.
- [4] 匡雪萍. 功能性瓦楞纸制品生产工艺研究[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(7): 8-9.
KUANG Xue-ping. Research on Production Technology of Functional Corrugated Paper Products[J]. Paper Equipment and Materials, 2021, 50(7): 8-9.
- [5] 齐辉, 李万军, 刘舒曼. 瓦楞纸板生产过程仿真[J]. 机械工程师, 2018(12): 82-84.
QI Hui, LI Wan-jun, LIU Shu-man. Analysis of Process Simulation about Corrugated Cardboard Production[J]. Mechanical Engineer, 2018(12): 82-84.
- [6] 孙德强, 郝静, 李靖靖, 等. 奇偶层交错对瓦楞纸板缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 108-114.
SUN De-qiang, HAO Jing, LI Jing-jing, et al. Influences of Odd and even Layer Interleaving on Cushioning Properties of Corrugated Paper Fiberboard[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 108-114.
- [7] 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.
- [8] PARK J, PARK M, DONG S C, et al. Finite Element-Based Simulation for Edgewise Compression Behavior of Corrugated Paperboard for Packaging of Agricultural Products[J]. Applied Sciences, 2020, 10(19): 6716.
- [9] GUO Yan-feng, JI Mei-juan, FU Yun-gang, et al. Cushioning Energy Absorption of Composite Layered Structures including Paper Corrugation, Paper Honeycomb and Expandable Polyethylene[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2019, 54(3): 176-191.
- [10] 王章苹, 张金. 基于陶瓷瓷碟包装的缓冲结构设计研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8420-8424.
WANG Zhang-ping, ZHANG Jin. Research on Buffer Structure Design Based on Ceramic Dish Packaging[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(22): 8420-8424.
- [11] 娄巧莲. 家具用瓦楞夹芯复合纸板结构创新及性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021: 34-36.
LOU Qiao-lian. Research on Structure Innovation and Performance of Corrugated Sandwich Composite Board for Home Use[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021: 34-36.
- [12] DIMITROV K, HEYDENRYCH M. Relationship between the Edgewise Compression Strength of Corrugated Board and the Compression Strength of Liner and Fluting Medium Papers[J]. Southern Forests-A Journal of Forest Science, 2009, 71(3): 227-233.
- [13] 钟福明. 低碳经济背景下印刷包装行业转型升级策略研究[J]. 中国包装, 2021, 41(9): 28-30.
ZHONG Fu-ming. Research on the Transformation and Upgrading Strategy of Printing and Packaging Industry under the Background of Low-carbon Economy[J]. China Packaging, 2021, 41(9): 28-30.
- [14] 陈璐. 低碳经济背景下包装行业转型升级模式思考[J]. 经济师, 2022(4): 52.
CHEN Lu. Thinking about Transformation and Upgrading Mode of Packaging Industry under Background of Low Carbon Economy[J]. China Economist, 2022(4): 52.
- [15] GB/T 6544—86, 瓦楞纸板国家标准[S].
GB/T 6544—86, National Standard of Corrugated Board[S].
- [16] GB/T 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩实验方法[S].
GB/T 8167—2008, Experimental Method for Dynamic Compression of Cushioning Materials for Packaging[S].
- [17] GB/T 4857.5—92, 包装 运输包装件 跌落试验方法[S].
GB/T 4857.5—92, Packaging—Transport packages—Vertical Impact Test Method by Dropping[S].
- [18] GB/T 4857.23—2021, 包装 运输包装件基本试验第 23 部分: 垂直随机振动试验方法[S].
GB/T 4857.23—2021, Packaging—Basic Tests for Transport Packages—Part 23: Vertical Random Vibration Test Method[S].