缓冲与隔振

奇偶层交错对瓦楞纸板缓冲性能的影响

孙德强 ^{a,b}, 郝静 ^{a,b}, 李靖靖 ^{a,b}, 安兴 ^{a,b}, 孙玉瑾 ^{a,b} (陕西科技大学 a.陕西省造纸技术与特种纸品开发重点研究室

b.轻化工程国家级实验教学示范中心,西安 710021)

摘要:目的 研究在奇偶层交错方式下, 交错角度对瓦楞纸板缓冲性能的影响。方法 将单瓦楞纸板按奇 偶层交错的方式进行多层粘合以制备试样, 交错角度分别为 0°, 30°, 45°, 60°和 90°, 采用共面静压、 侧向静压和共面冲击的试验方法, 对各试样共面和侧向的缓冲性能进行研究。结果 与奇偶层不交错的 样品相比, 在共面静压下, 奇偶交错使瓦楞纸板的初始峰应力、平台应力、密实化单位体积变形能和密 实化比吸能分别提高了 4.15%~9.38%, 6.49%~10.39%, 5.00%~7.94%和 7.43%~10.81%; 在沿瓦楞方向 侧向静压下, 抗压强度和平台应力分别减少了 1.18%~14.34%和 0.89%~20.66%, 密实化比吸能和密实化 单位体积变形能与交错角度近似呈二次函数关系。在共面冲击载荷下, 当交错角度一定时, 总能量吸收 与冲击能近似呈一次函数关系。结论 奇偶层交错一定角度能改善瓦楞纸板的共面缓冲性能, 降低其沿 瓦楞方向的侧向缓冲性能。

关键词: 瓦楞纸板; 奇偶层交错; 共面静压; 侧向静压; 共面冲击; 缓冲性能 中图分类号: TS484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)03-0108-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.016

Influences of Odd and Even Layer Interleaving on Cushioning Properties of Corrugated Paper Fiberboard

SUN De-qiang^{a,b}, HAO Jing^{a,b}, LI Jing-jing^{a,b}, AN Xing^{a,b}, SUN Yu-jin^{a,b}

(a.Shaanxi Provincial Key Lab of Papermaking Technology and Specialty Paper Development,
 b.National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education,
 Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study influences of interleaving between odd and even layers on the cushioning performance of corrugated paper fiberboard. The single corrugated paper fiberboard was staggered in the interleaving manner between odd and even layers to multi-layer samples with the interleaving angles of 0° , 30° , 45° , 60° and 90° , respectively. The in-plane and lateral cushioning properties of the multi-layer corrugated paper fiberboard were studied under in-plane static compression, lateral static compression and in-plane impact loadings. In comparison with the multi-layer single corrugated paper fiberboard with the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving angles of 0° , under in-plane static compression, the interleaving ing between odd and even layers made the initial peak stress, plateau stress, densification stain energy per unit volume and

收稿日期: 2019-10-31

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:郝静(1994-),女,陕西科技大学硕士生,主攻瓦楞纸板的缓冲性能与包装设计。

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。

densification specific absorption energy of multi-layer single corrugated paper fiberboard increase by 4.15%~9.38%, 6.49%~10.39%, 5.00%~7.94% and 7.43%~10.81%, respectively. Under the lateral compression along the corrugated direction, the compressive strength and plateau stress were reduced by 1.18%~14.34% and 0.89%~20.66%, respectively, while the densification specific energy absorption and plateau strain energy per unit volume were related with the interleaving angles by the law of approximate quadratic function relationship. Under in-plane impact loadings, the total energy absorption was approximately linearly with the impact energy for a given interleaving angle. Interleaving between odd and even layers at a certain angle can improve the in-plane cushioning performance of corrugated paper fiberboard and reduce its lateral compression performance along the corrugated direction.

KEY WORDS: corrugated paper fiberboard; interleaving between odd and even layers; in-plane static compression; lateral static compression; in-plane dynamic shock; cushioning properties

夹层结构因其低密度、高比能量吸收和优异的力 学性能受到人们的广泛关注,主要应用于建筑、军事、 航空等领域。瓦楞纸板作为夹层材料的一种,由内外 衬纸与中间的圆弧状原纸粘合制备而成,是一种抗压 强度高、缓冲性能优良的缓冲包装材料^[1-2]。

大量学者对瓦楞纸板的静动态压缩性能展开了 研究,采用的方法包括夹层板理论^[3—4]、试验法^[5—8] 和有限元法^[9]等。对于瓦楞纸板动态冲击性能,Sek 和 Rouillard^[10]研究了压缩过程对多层瓦楞纸板应力-应变特性的影响,并对材料在未压缩、预压缩和动态 冲击载荷下的力学行为分别进行了分析。王冬梅等^[11] 以结构参数(如瓦楞芯层壁厚等)一定的多层复合瓦 楞结构为研究对象,考虑应变率效应,对多层瓦楞纸 板的动态平台进行了预测。Wang^[12—13]等在不同的温 度和相对湿度环境下对多层瓦楞纸板进行处理,得到 了不同环境因素下瓦楞板的压缩响应和能量吸收 性能。

为实现瓦楞纸板更好的应用,人们开始关注不同 组合方式下新结构形式瓦楞纸板的性能,其中关于瓦 楞纸板的不同交错方式及交错角度的研究逐渐增多。 目前常见交错方式有正交和平行排列型^[14]、重叠型和 相对型^[15]和折叠型^[16]等。另外,交错角度的不同也 会对瓦楞纸板的性能产生很大影响。郭娟和刘功^[17] 制备了一种新型的4层双拱瓦楞纸板,其中粘合角度 分别为45°,90°和180°,并对其各项强度进行了试 验分析。在前人基础上,车庆浩等^[18]研究了粘合角度 为75°的瓦楞纸板的性能。孙聚杰和郝笑梦^[19]采用试 验法研究了交错角度为0°,30°,45°和90°的双瓦楞 纸板,得到了相关强度与交错角度的拟合公式。在其 他排列方式和交错角度下,关于瓦楞纸板静动态压缩 载荷下缓冲性能的研究甚少,这也为后人关于瓦楞纸 板的研究方向提供了思路。

文中尝试将瓦楞纸板以不同的角度进行奇偶层 交错,采用共面静压、沿奇数层瓦楞方向的侧向静压 和共面冲击的试验方法,对各奇偶层交错的多层瓦楞 纸板的共面和侧向缓冲性能进行研究。

1 试验

1.1 材料

试验用材料取自陕西天成纸业有限公司制造的 瓦楞形状为 UV 形的 C 型单瓦楞纸板,内外衬纸和芯 纸定量均为 130 g/m²。采用百得熊猫白乳胶将单瓦楞纸 板按奇偶层交错的方式进行多层粘合,该白乳胶的粘合 强度足以保证试样受压后层间不会出现撕裂现象。

瓦楞纸板结构见图 1, x 表示机械加工方向, 垂 直于瓦楞辊轴向; y 表示横向, 平行于瓦楞辊轴向; z 方向称为共面方向, 垂直于内外衬纸平面。多层瓦 楞纸板奇偶层交错角度为 θ ,其取值范围为 0°~90°。 θ 分别取 0°, 30°, 45°, 60°和 90°, 粘合形成的样品见 图 2。奇数瓦楞芯层均为 0°单瓦楞板,偶数层为交错 角度的单瓦楞板,在同一组试验条件下,保证瓦楞芯 层数相同,且粘合的层数尽量多,以消除层数对响应 的影响。 交错角度为 θ 的共面静压样件编号为 "F-OE- θ ",共面冲击试样编号为"D-OE- θ ",规格均为 100 mm×100 mm×28 mm;静态侧压样件编号为 "E-OE- θ ",规格为 60 mm×60 mm×25 mm。

1.2 标准

参照 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压 缩试验方法》^[20]、GB/T 8167—2008《包装用缓冲材 料动态压缩试验方法》^[21]和 GB/T 1454—2005《夹层 结构侧压性能试验方法》^[22]对 5 种角度的试样分别



图 1 瓦楞纸板空间结构示意 Fig.1 Spatial structure of corrugated paperboard



图 2 交错一定角度的瓦楞纸板试样 Fig.2 Staggered corrugated sample with a certain angle

进行共面静态压缩和冲击试验以及沿瓦楞轴向的侧 向静压试验。将试样在温度为 20 ℃,相对湿度为 75% 的环境中放置 24 h 以上。

1.3 仪器

以试样的奇数芯层单瓦楞板的结构方向为基准, 分别沿其 z 和 y 方向,采用 SANS 万能材料试验机以 12 mm/min 的速率对试样进行共面静压和侧向静压 试验,得到相应的力-位移曲线。另外,采用 XG-HC 型动态压缩试验机沿 z 方向对试样进行共面冲击试 验,并得到加速度-时间曲线,其中落锤质量为 25 kg, 跌落高度为 0.14, 0.18, 0.22, 0.26 和 0.30 m。

1.4 数据处理方法

能量吸收效率 η 是表征材料缓冲特性的一个重 要指标,能量吸收效率越高,缓冲性能越好;反之, 缓冲性能越差。当材料被压溃时,其承受的应力呈指 数增加,此时的应变称为密实化应变 ε_D,计算方法见 式(1)^[23]:

$$\eta = \frac{\int_0^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) \mathrm{d}\varepsilon}{\sigma_i} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\eta(\varepsilon_i)}{\mathrm{d}\varepsilon_i}\bigg|_{\varepsilon=\varepsilon_0} = 0 \tag{2}$$

式中:压缩应变为 ε_i时,对应的压缩应力为 σ_i。 在应力-应变曲线的平台阶段,材料的平台应力 σ_m 被定义为^[23]:

$$\sigma_{\rm m} = \frac{1}{\varepsilon_{\rm D}} \int_0^{\varepsilon_{\rm D}} \sigma(\varepsilon) \mathrm{d}\varepsilon \tag{3}$$

材料被完全压溃,即达到密实化时吸收的总能量 $E_{\rm D}$ 见式(4)^[24]。

$$E_{\rm D} = \int_{0}^{x_{\rm D}} F(x) \mathrm{d}x \tag{4}$$

比较不同缓冲材料或结构能量吸收特性的另一 重要指标是比吸能(*S*_{EA}),其中密实化时的比吸能 计算见式(5)。

$$S_{\text{EAD}} = \frac{E_{\text{D}}}{m}$$
(5)

式中: m 为试样的质量 (g)。

同理,材料密实化时单位体积变形能 *E*_{0D}的计算 见式(6)^[25]。

$$E_{\rm 0D} = \int_{0}^{\varepsilon_{\rm D}} \sigma(\varepsilon) \mathrm{d}\varepsilon \tag{6}$$

在材料的冲击试验中,冲击能 *E*_i 为落锤做自由 落体运动得到的势能,而接触力 *F* 可表示为落锤的 重力^[24]。

将落锤在最初接触压缩材料时临界速度 v_1 与脱 离材料时速度 v_2 的绝对值之和定义为速度的变化 量^[24],即:

$$\Delta v = |v_1| + |v_2| = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt$$
(7)

$$=\sqrt{2gh} \tag{8}$$

式中:*h* 为落锤跌落高度(m);*G*(*t*)为加速度 时间函数。

由能量守恒定律,在落锤和压缩材料组成的系统中,落锤动能的变化量等价于材料吸收的总能量 *E*^[25],即:

$$E = \frac{1}{2}m_0 \left(v_1^2 - v_2^2\right)$$
(9)

式中: m_0 为洛锤质量(g)。

2 结果与讨论

2.1 共面静压

 v_1

2.1.1 应力-应变曲线

共面静压时试样的应力-应变曲线见图 3,包括线 弹性区、塑性屈服区、平台区和密实化区。以 F-OE-0° 为例,在线弹性区,应力随应变的增加呈线性增长, 增至初始峰应力,此过程中试样底部的瓦楞首先发生 倾斜,见图 4a;随着应变的增加,应力开始减小,



图 3 共面静压应力-应变曲线 Fig.3 Stress-strain curves of specimens under in-plane static compression



图 4 F-OE-0°变形模式 Fig.4 Failure process of F-OE-0°

进入塑性屈服阶段,这时试样底层瓦楞被压溃,见图 4b;由于瓦楞芯逐层坍塌,几何尺寸发生变化,此时 相邻瓦楞产生相互约束,导致变形局部化,发生应力 波传递,且应力在很大的应变范围内几乎保持不变, 此时处于平台区。值得注意的是,此处出现与试样瓦 楞芯层数对应的7个波峰,即试样的变形模式为逐层 渐进压溃,其局部变形见图4c;最后当瓦楞纸板各 个层面压缩完全后应力急剧增加,此时进入密实化 区,试样的变形见图4d。

2.1.2 性能对比

不同交错角度试样的初始峰应力和平台应力见 图 5,发现当交错角度增大时,上述两指标均先增大 后减小,且均在 60°时取最大值。与无交错试样相比, 其余试样的初始峰应力和平台应力分别提高了 4.15%~9.38%和 6.49%~10.39%。此外,瓦楞纸板的能 量吸收性能随交错角度的不同而产生较大差异。共面 静压下的能量吸收曲线见图 6,可知当交错角度依次 增加时,密实化单位体积变形能和密实化比吸能均先









增大后减小,因为材料的能量吸收很大程度上取决于 其平台应力,此趋势与图5相吻合。与无交错试样相 比,其余试样的密实化单位体积变形能和密实化比吸 能分别提高了5.00%~7.94%和7.43%~10.81%。

2.2 侧向静压

2.2.1 应力-应变曲线

以 E-OE-0°为例,观察试样的变形(见图 7)。 由图 7a 可知,试样的顶部首先发生变形,并伴随底 部的轻微褶皱,其他交错角度试样的最初变形也发生 在接近上下压缩板的位置,此时的应力与应变呈正比 例关系;随着试样的继续变形,应力减小,进入屈服 区,见图 7b,此时试样底部也开始出现褶皱;由于 瓦楞间尺寸的约束和限制,试样继续发生"S"形的变 形(见图 7c),进入平台阶段,且随交错角度的增 大,应力-应变曲线下移;在密实化阶段,应力呈指 数增加,此时出现开裂和脱层,即面纸和里纸均与相 邻的瓦楞芯纸脱离,且内部瓦楞芯纸发生了开裂,见 图 7d。此外,分析应力-应变曲线(见图 8),发现 当交错角度变大时,对应的曲线呈规律性地依次下 降,其中交错角度为0°时,曲线明显高于其他角度的 曲线。



图 7 E-OE-0°变形过程 Fig.7 Compressive process of E-OE-0°



图 8 侧向静压下试样的应力-应变曲线 Fig.8 Stress-strain curves of specimens under lateral static compression

2.2.2 性能对比

交错角度对试样抗压强度和平台应力的影响见 图 9,发现虽然交错角度在逐渐增加,但曲线最初几 乎保持平稳,而当超过临界点(分别出现在 60°和 45° 附近)时,曲线开始下降,且减小程度逐渐增大。与 无交错试样相比,其余试样的抗压强度和平台应力分 别减小了 1.18%~14.34%和 0.89%~20.67%。



图 9 不同交错角度试样的侧向静压应力曲线 Fig.9 Stress of specimens with different interlacement under lateral static compression

经分析得试样吸收的能量与交错角度密切相关。侧向 静压下的密实化比吸能见图 10,由于交错角度变大, 密实化比吸能依次减小,且在 45°~90°范围内下降明 显,这与图9曲线变化一致。相比于无交错试样,其 余试样的密实化比吸能减少了 2.54%~18.34%,利用 Matlab软件编程得到密实化比吸能 *S*EAD 与交错角度*θ* 的拟合关系,见式(10)。

S_{EAD}=2.471-7.024×10⁻⁴ θ-9.571×10⁻⁵ θ² (10) 侧向静压下的能量吸收曲线见图 11,当应力在 一定范围内(0.3~0.5 MPa)时,变形能随应力呈 Z 形增长,且曲线肩点包迹线与交错角度呈线性阶梯状 递减的规律性分布。当交错角度为 90°时,纸板吸收 的能量最少且对应曲线肩点位于最左侧,该现象与其



图 10 侧向静压下的密实化比吸能

Fig.10 Densification specific energy absorption of specimens under lateral static compression



Fig.11 Energy absorption diagram of specimens under lateral static compression

应力-应变曲线明显低于其他交错角度相吻合。相比 于无交错试样,其余试样的密实化单位体积变形能减 少了 2.58%~19.40%。侧向静压下的密实化单位体积 变形能见图 12,密实化单位体积变形能 *E*oD 与交错角 度*b*的关系可由式(11)所示的的二次函数表示。

 $E_{0D} = 0.327 - 1.782 \times 10^{-4} \theta - 1.190 \times 10^{-5} \theta^2 \tag{11}$



图 12 侧向静压下的密实化单位体积变形能 Fig.12 Densification deformation energy per unit volume

of specimens under lateral static compression

2.3 共面冲击

2.3.1 接触力-时间曲线

在共面冲击试验中,评价试样缓冲性能的重要指标是落锤与试样之间的接触力。以跌落高度为 0.26 m为例,随着接触时间的增加,接触力先增大而后减小为 ((见图 13))整个冲击过程的时间历程约 13 ms。在 0~5 ms时,由于试样变形产生反弹力使落锤速度减小; 5~9 ms时,试样变形加大,接触力继续增大直至最大值,此时试样被完全压缩,变形量达到峰值,而落锤速度减为 0; 9~13 ms时,由于试样的弹力超过落锤自身重力,落锤开始反弹,速度从 0逐渐反向增加,试样也开始恢复部分变形。观察曲线尖点,发现不同交错角度下其峰值均维持在 14 kN 左右。

2.3.2 性能对比

总能量吸收-冲击能曲线见图 14。材料通过自身 的变形来吸收冲击能,进而起到缓冲作用,由于所有 接触时间均与交错角度无关,进而导致当落锤跌落高 度不变时,材料变形量几乎相同,即吸收的总能量无









材料厚度相同,且最大接触力以及落锤与材料的明显 差异,此结果在图 14 中得到验证。此外材料吸收的 总能量与冲击能近似呈一次函数关系,曲线斜率约为 0.76,即接近76%的冲击能被材料以变形能的形式吸 收,其余能量以内能形式散失。

3 结语

文中以瓦楞纸板为研究对象,采用共面静压、侧 向静压和共面冲击试验方法,研究获得了奇偶层交错 瓦楞纸板的性能,经分析得到以下结论。

1)在共面静压下,奇偶交错使瓦楞纸板的共面 初始峰应力、平台应力、密实化单位体积变形能和密 实化比吸能分别提高了 4.15%~9.38%,6.49%~ 10.39%,5.00%~7.94%和 7.43%~10.81%。在共面冲 击下,材料的最大接触力和总能量吸收与交错角度几 乎无关,且同一交错角度下,总能量吸收与冲击能近 似呈一次函数关系。

2) 在沿瓦楞方向的侧向静压下,抗压强度和平 台应力分别减少了 1.18%~14.34%和 0.89~20.67%,而 密实化比吸能和密实化单位体积变形能与交错角度 近似呈二次函数关系。

参考文献:

- 肖锋, 谌勇, 章振华, 等. 夹层结构冲击动力学研究 综述[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 1—7.
 XIAO Feng, CHEN Yong, ZHANG Zhen-hua, et al. Review on Impact Dynamics of Sandwich Structure[J].
 Vibration and Impact, 2013, 32(18): 1—7.
- [2] 彭国勋. 瓦楞包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2007: 250—255.
 PENG Guo-xun. Corrugated Packaging Design[M].
 Beijing: Printing Industry Press, 2007: 250—255.
- [3] ABBÈS B, GUO Y Q. Analytic Homogenization for Torsion of Orthotropic Sandwich Plates: Application to Corrugated Cardboard[J]. Composite Structures, 2010, 92(3): 699–706.
- [4] GIAMPIERI A, PEREGO U, BORSARI R. A Constitutive Model for the Mechanical Response of the Folding of Creased Paperboard[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(7): 2275–2287.
- [5] HARRYSSON A, RISTINMAA M. Large Strain Elastic-plastic Model of Paper and Corrugated Board[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(11): 3334–3352.
- [6] LEPPNEN T, ERKKILÄ A L, KOUKO J, et al. A Plasticity Model for Predicting the Rheological Behavior of Paperboard[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 106/107: 38–45.
- [7] LU F D, GAO D. Quasi-static and Impact Responses of

Multi-layered Corrugated Paperboard Cushion by Virtual Mass Method[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27(11): 867—881.

- [8] LU F D, LIU X J, GAO D. Compression Response of Composite Cushioning Materials in Series by Virtual Parameter Methods[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(10): 901—914.
- [9] YALI M, ZHEN G, LIANG Z, et al. Finite Element Analysis of Buckling of Corrugated Fiberboard[J]. Open Mechanical Engineering Journal, 2014, 8(1): 257–263.
- [10] SEK M A, ROUILLARD V. Behaviour of Multi-layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems under Impact Loads[J]. Applied Mechanics and Materials, 2007, 43(4): 345–347.
- [11] 王冬梅,柏子游,龚户祥,等. 瓦楞夹层结构动态力 学性能评估[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 94—97.
 WANG Dong-mei, BAI Zi-you, GONG Hu-xiang, et al. Evaluation of Dynamic Mechanical Properties of Corrugated Sandwich Structures[J]. Vibration and Impact, 2014, 33(3): 94—97.
- [12] WANG D M, GONG H X, BAI Z Y. Effect Investigation of Relative Humidity and Temperature on Multi-layer Corrugated Sandwich Structures[J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2013, 15(2): 156– 167.
- [13] WANG Z W, E Y P. Energy Absorption Properties of Multi-layered Corrugated Paperboard in Various Ambient Humidities[J]. Materials & Design, 2011, 32(6): 3476-3485.
- [14] 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.
- [15] 潘幸珍. 复合瓦楞纸板结构性能的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007: 10—15.
 PAN Xing-zhen. Study on Structural Performance of Composite Corrugated Board[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007: 10—15.
- [16] WANG D M. Cushioning Properties of Multi-layer Corrugated Sandwich Structures[J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2009, 11(1): 57–65.
- [17] 郭娟, 刘功. 新型瓦楞纸板(双拱)组合结构性能的研

究[J]. 包装工程, 2005, 26(1): 52—53.

GUO Juan, LIU Gong. Study on Structural Performance of New Corrugated Board (Double Arch)[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(1): 52—53.

- [18] 车庆浩, 孙诚, 刘功. 新型四层瓦楞纸板的性能研究
 [J]. 包装工程, 2006, 27(3): 39—41.
 CHE Qing-hao, SUN Cheng, LIU Gong. Performance
 Study of New Four-layer Corrugated Board[J]. Pack-aging Engineering, 2006, 27(3): 39—41.
- [19] 孙聚杰,郝笑梦.不同组合角度瓦楞纸板缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 43—45.
 SUN Ju-jie, HAO Xiao-meng. Study on Cushioning Performance of Corrugated Board with Different Combination Angles[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 43—45.
- [20] GB/T 8168—2008,包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
 GB/T 8168—2008, Test Method for Static Compression of Cushioning Materials for Packaging[S].
- [21] GB/T 8167—2008,包装用缓冲材料动态压缩试验方法[S].
 GB/T 8167—2008, Test Method for Dynamic Compression of Cushioning Materials for Packaging[S].
- [22] GB/T 1454—2005, 夹层结构侧压性能试验方法[S]. GB/T 1454—2005, Test Method for Lateral Compression Performance of Sandwich Structures[S].
- [23] LIU Q, FU J, WANG J S, et al. Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with EPP Foam[J]. Composites Part B, 2017, 130: 236—247.
- [24] 彭国勋.物流运输包装设计(第2版)[M].北京:印刷 工业出版社,2014:10—115.
 PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design (2nd Edition)[M]. Beijing: Printing Industry Press,2014:10—115.
 [25] GIBSONLG, ASHBY MF. 多孔固体结构与性能(第
 - 二版)[M]. 刘培生,译. 北京:清华大学出版社, 2003: 283—294. GIBSON L G, ASHBY M F. Structure and Properties of Porous Solids (2nd Edition)[M]. LIU Pei-sheng, Translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 283—294.