

疲劳损伤对蜂窝纸板平台应力的影响

范志庚¹, 张治国¹, 王军²

(1. 浙江科技学院, 杭州 310023; 2. 江南大学, 无锡 214122)

摘要: **目的** 研究在不同疲劳损伤条件下, 蜂窝纸板平台应力的变化规律和损伤机理。**方法** 首先将蜂窝纸板进行温湿度预处理, 然后对其进行 5 种预压缩后再进行不同次数的疲劳压缩, 接着进行准静态压缩, 最后得到不同疲劳损伤条件下蜂窝纸板的本构关系曲线。**结果** 蜂窝纸板疲劳损伤因原纸纤维无规则排序刚度下降而引起, 疲劳损伤对蜂窝纸板平台应力影响较大, 在不同疲劳损伤条件下, 疲劳损伤对蜂窝纸板平台应力的影响有一定的规律。**结论** 蜂窝纸板在运输过程中受到疲劳损伤后, 必须考虑其平台应力的变化。

关键词: 蜂窝纸板; 疲劳损伤; 本构关系; 平台应力

中图分类号: TB484.1; TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0049-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.010

The Effect of Fatigue Damage on the Plateau Stress of Honeycomb Paperboard

FAN Zhi-geng¹, ZHANG Zhi-guo¹, WANG Jun²

(1. Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to study the plateau stress variation of honeycomb paperboard and fatigue damage mechanism under different conditions. First, honeycomb paperboard was subject to temperature and humidity pretreatment. Then, 5 precompression and different times of fatigue compression were carried out, followed by the quasi-static compression. Finally, the constitutive relation curves of honeycomb paperboard were obtained under different fatigue damage conditions. The fatigue damage of the honeycomb paperboard was caused by the reduction of the irregularly arranged stiffness of the paper fibers. Fatigue damage had great influence on the plateau stress of honeycomb paperboard. Under different fatigue damage conditions, fatigue damage had certain laws regarding the plateau stress of honeycomb paperboard. After the fatigue damage of honeycomb paperboard during transportation, the change of its plateau stress must be considered.

KEY WORDS: honeycomb paperboard; fatigue damage; constitutive relation; plateau stress

蜂窝纸板是目前在包装运输上使用较多的环保缓冲材料, 其具有良好的缓冲性能。前期研究人员对蜂窝材料力学性能进行了深入的理论和实验研究。Gibson^[1]借助弯曲变形理论, 建立了经典的 Gibson 理论公式。Balawi^[2]发现金属蜂窝梁剪切和弯曲等性能与施加的载荷方向有关, 提出了相对密度概念, 用此概念从理论本质上阐述了相对密度对蜂窝芯材料

性能的影响。郭彦峰等^[3]通过实验研究了蜂窝纸板的冲击能量特性和振动传递性能。卢立新等^[4]构建了由剥离强度和环压强度作为控制参量的蜂窝纸板临界屈曲载荷计算公式。鄂玉萍等^[5-7]通过理论与实际的结合, 建立了蜂窝纸板平台应力预报模型和能量吸收预报模型。王志伟^[8-9]研究并建立了适用于蜂窝纸板的正切型非线性包装系统破损边界曲线。

收稿日期: 2017-10-06

基金项目: 浙江省文化厅 2017 年度文化科研项目 (zw2017083); 浙江省食品物流装备技术研究重点实验室开放基金 (KF2016013yb)

作者简介: 范志庚 (1979—), 男, 博士, 浙江科技学院讲师, 主要研究方向为包装动力学、包装材料。

在瓦楞纸板方面,刘同文^[10]研究发现在一定频率不同载荷下,瓦楞纸板结构的刚度减小,疲劳剩余强度有所提高。孙聚杰、卢立新等^[11]通过实验发现,瓦楞纸板在疲劳损伤后剩余强度和承载能力均降低。在蜂窝材料疲劳压缩方面,Shenoi^[12]研究了泡沫复合夹层高聚物的疲劳破坏模式,发现夹层材料破坏的主要模式是芯材的剪切失效和表面破损。Belingardi^[13]等通过四点弯曲疲劳实验,研究了含有预置缺陷的蜂窝夹芯板疲劳损伤规律,发现有预置缺陷的蜂窝板与无预置缺陷的蜂窝板的失效机理完全不同。Jen^[14]等采用正弦波形的应力条件研究了蜂窝夹芯板的疲劳破坏行为,发现疲劳失效的主要模式是蜂窝芯材料与面板材料发生脱粘。Belouettar^[15]等通过四点弯曲疲劳实验,研究了不同种类的蜂窝芯层材料及芯层厚度的疲劳寿命,验证了面板与芯层之间的胶粘剂发生脱粘为失效模式。在蜂窝纸板疲劳压缩方面,孙中振、王军等^[16]对蜂窝纸板进行疲劳振动实验,发现随着疲劳振动和相对湿度的增加,蜂窝纸板的缓冲系数、屈服强度、承载能力以及能量吸收特性都有一定程度的下降。范志庚等^[17]通过蜂窝纸板疲劳振动试验,得到了单自由度和二自由度蜂窝纸板包装系统内共振条件参数的变化规律。

疲劳损伤对蜂窝纸板平台应力有一定影响。这里将在疲劳压缩实验的基础上,研究总结不同条件下蜂窝纸板本构关系变化情况以及蜂窝纸板平台应力的变化规律。

1 实验

1.1 试样

实验采用的蜂窝纸板尺寸为 0.1 m×0.1 m,厚度为 40 mm,芯纸厚度为 0.2 mm,定量规格为 105 g/m²,面纸定量规格为 200 g/m²,厚跨比分别为 0.0263, 0.0238 和 0.0219。

1.2 条件

实验设定环境条件:相对湿度 50%,温度 23 ℃,试样放入恒温恒湿箱中预处理时间为 24 h 以上。该实验采用的主要设备:恒温恒湿箱,THS-A7C-100AS,用于对蜂窝纸板试样的预处理;万能电子材料试验机,对材料进行预压缩处理和准静态压缩;电液伺服材料试验机,MTS322,设置压缩频率为 10 Hz,用于蜂窝纸板试样的疲劳压缩实验。

1.3 步骤

首先,在万能电子材料试验机上进行预压缩率 ε_p 为 15%, 20%, 25%, 30%, 40% 的 5 种蜂窝纸板预压处理。然后,将预压缩后的蜂窝纸板试样进行疲劳压缩实验,将其固定在电液伺服材料试验系统上,实验参数的设定中,疲劳压缩率为 10%,压缩频率为 10 Hz,压缩次数 n 分别为 10^4 , 2×10^4 , 3×10^4 , 5×10^4 次。最后,蜂窝纸板试样疲劳压缩后,在万能电子材料试验机上对试样进行准静态压缩,记录应力-应变关系曲线,每种条件下对 8 个试样进行实验,实验值取 8 个试样数据的平均值。

2 厚跨比

将万能试验机获得的疲劳压缩后的准静态本构关系取平均值后,分别以预压缩率为 20%, 30%, 40% 进行疲劳压缩后得到本构关系曲线,见图 1—3,疲劳压缩位移为 4 mm,每个试样都进行 1×10^4 , 2×10^4 , 3×10^4 , 5×10^4 次的疲劳压缩。

从图 1—3 可以看出,蜂窝纸板在疲劳压缩后,其静态压缩的初始峰应力已经完全消失,整个准静态压缩阶段变成 3 个阶段,包括弹性阶段、平台阶段和密实化阶段,平台应力是整个平台阶段应力的平均值。各情况下的平台应力数据见表 1。

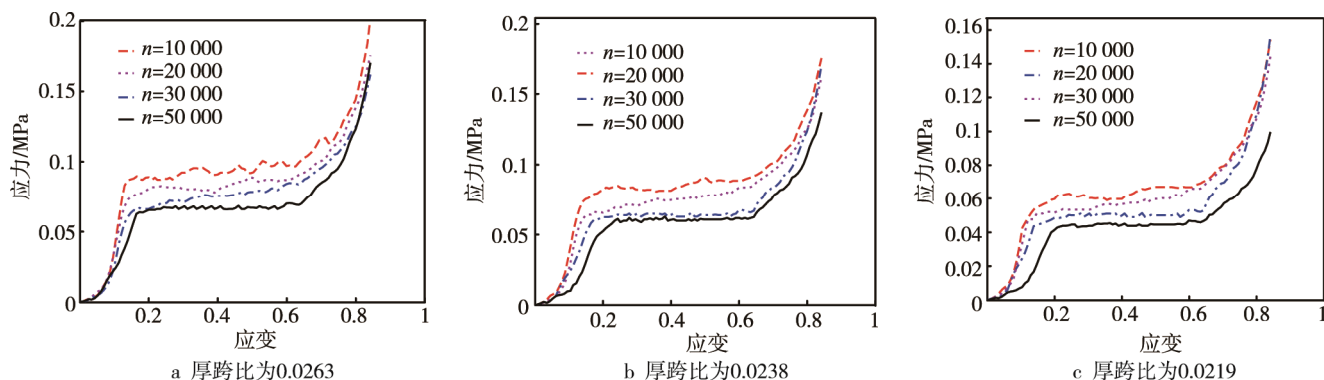


图 1 预压缩率为 20% 的疲劳损伤本构关系

Fig.1 The constitutive relation of fatigue damage when $\varepsilon_p=20\%$

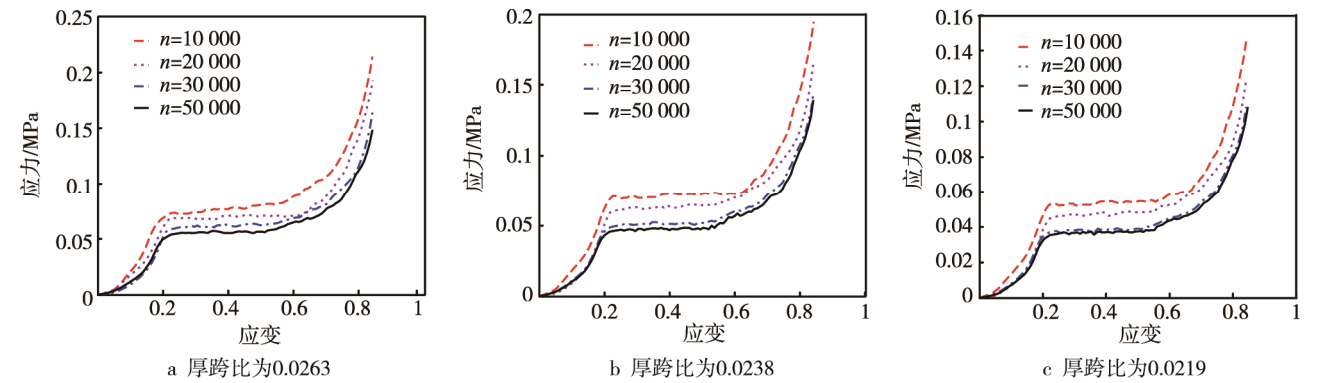


图 2 预压缩率为 30% 的疲劳损伤本构关系
Fig.2 The constitutive relation of fatigue damage when $\varepsilon_p=30\%$

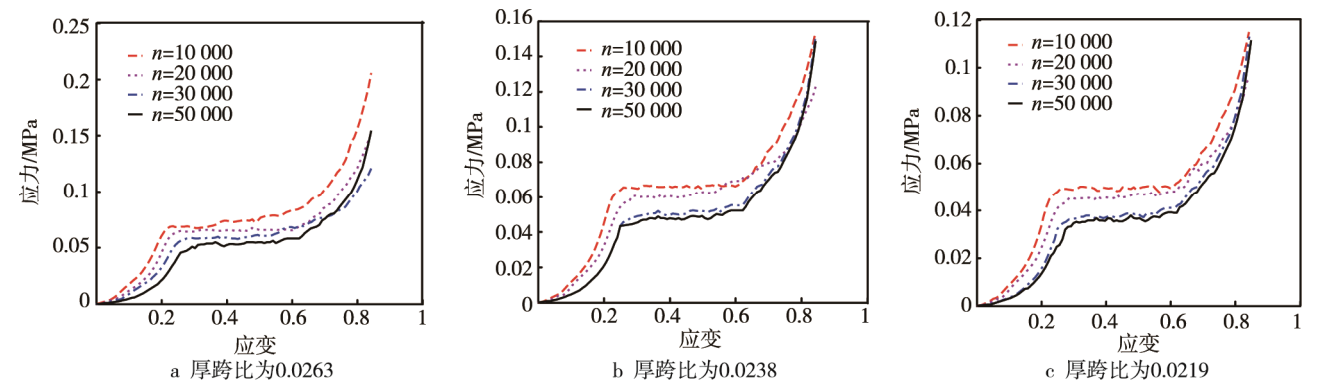


图 3 预压缩率为 40% 的疲劳损伤本构关系
Fig.3 The constitutive relation of fatigue damage when $\varepsilon_p=40\%$

表 1 疲劳损伤后平台应力
Tab.1 The plateau stress after FD

预压 缩率/%	厚跨比	平台应力/MPa				
		$n=0$	$n=1\times10^4$	$n=2\times10^4$	$n=3\times10^4$	$n=5\times10^4$
20	0.0263	0.106	0.093	0.084	0.076	0.065
	0.0238	0.092	0.085	0.075	0.065	0.062
	0.0219	0.068	0.064	0.057	0.051	0.049
30	0.0263	0.087	0.078	0.070	0.065	0.059
	0.0238	0.078	0.072	0.064	0.054	0.052
	0.0219	0.059	0.054	0.048	0.041	0.040
40	0.0263	0.078	0.073	0.065	0.056	0.055
	0.0238	0.072	0.066	0.058	0.051	0.048
	0.0219	0.054	0.050	0.044	0.038	0.036

从表 1 可以看出，蜂窝纸板疲劳损伤平台应力变化呈现 2 种不同的趋势：蜂窝纸板在一定次数的疲劳压缩后，其平台应力从开始到 3×10^4 次疲劳压缩后下降显著；然而从 3×10^4 次到 5×10^4 次疲劳压缩后，平台应力下降趋缓。

从预压缩率为 15% 的条件下可以看出，疲劳压缩 3×10^4 次之前，蜂窝纸板平台应力分别下降了 29.3%，27.9% 和 23.4%，说明由于蜂窝纸板的厚跨比减小，其平台应力下降比例趋势亦随之下降。例如，当厚跨

比为 0.0263 时，疲劳压缩从 3×10^4 次一直到 5×10^4 次，平台应力下降比例仅为 4.9%。

3 预压缩率

蜂窝纸板在相同压缩次数、不同预压缩率疲劳压缩情况下的本构关系曲线见图 4—7，压缩次数分别为 1×10^4 ， 2×10^4 ， 3×10^4 ， 5×10^4 次，这里为了便于区分，以厚跨比为 0.263 和 0.0238 为例，并选取了其中 4 种不同的预压缩率，即 15%，25%，30%，40%。

从图 4—7 可以看出，在相同压缩次数下，蜂窝纸板平台阶段的起始位置应变增大，平台应力下降明显，而且平台应力随预压缩率的增大，其偏移趋势更加明显。5 种预压缩率下疲劳损伤平台应力见表 2，可以看出，预压缩率对蜂窝纸板的平台应力具有一定影响。在预压缩率为 25% 处，变化趋势分为 2 个阶段。蜂窝纸板平台应力在一定次数的疲劳压缩后，预压缩率为 15%~25% 时下降显著，预压缩率为 25%~40% 时下降微弱。蜂窝纸板平台应力在一定次数的疲劳压缩下，当厚跨比为 0.0263 时，预压缩率从 15%~25% 时平台应力分别下降了 21.69%，21.28%，20.24% 和 22.78%，随着预压缩率的增加，平台应力的下降趋势在 21% 左右；预压缩率为 25%~40% 时，平台应力下降趋势减缓，平均下降了 12% 左右。

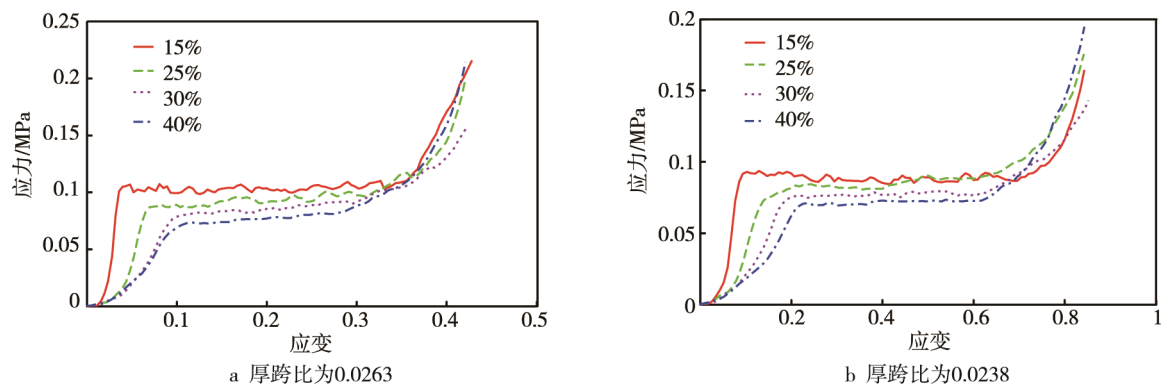
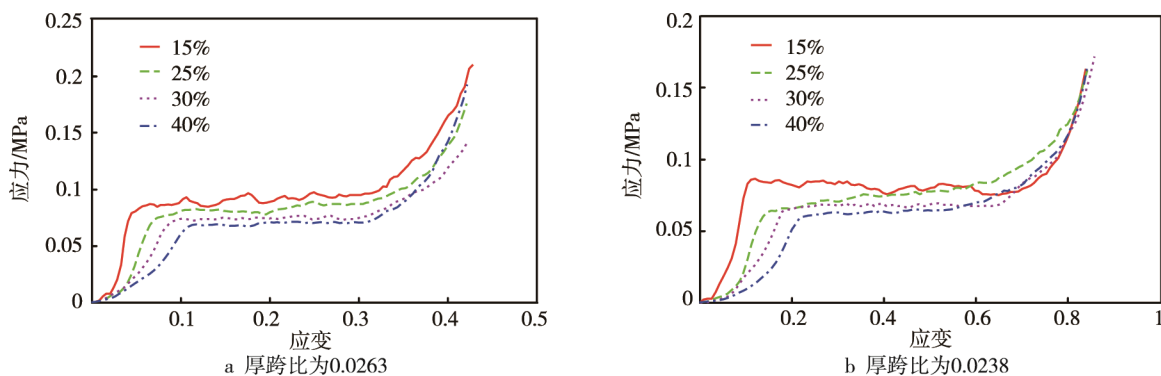
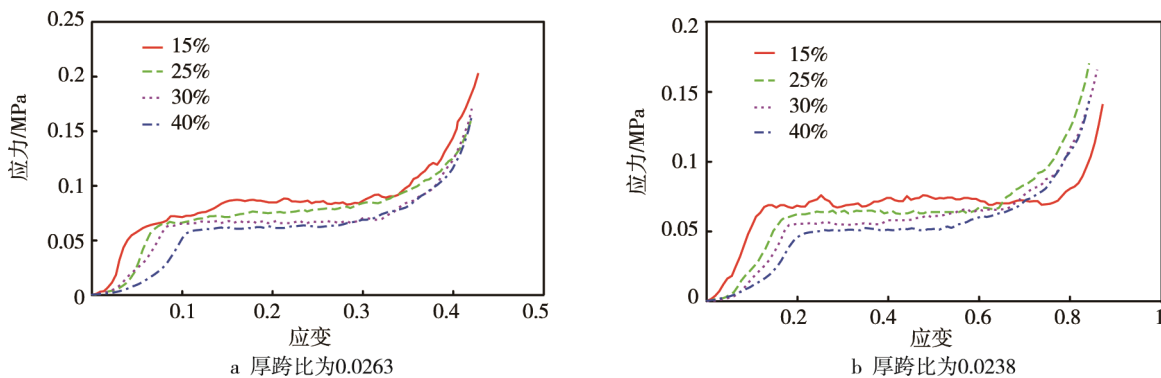
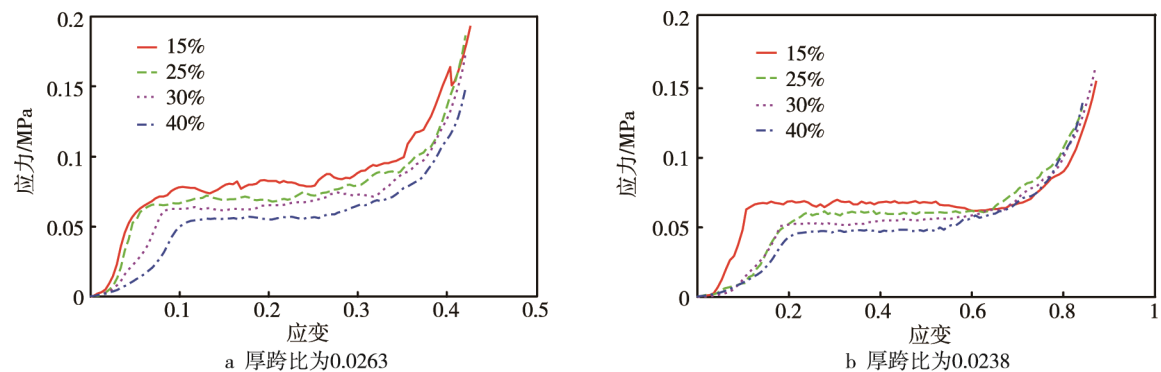
图4 压缩次数为 10^4 时不同预压缩率的疲劳损伤本构关系Fig.4 The constitutive relation of fatigue damage under different pre-compression rates when $n=10^4$ 图5 压缩次数为 2×10^4 时不同预压缩率的疲劳损伤本构关系Fig.5 The constitutive relation of fatigue damage under different pre-compression rates when $n=2 \times 10^4$ 图6 压缩次数为 3×10^4 时不同预压缩率的疲劳损伤本构关系Fig.6 The constitutive relation of fatigue damage under different pre-compression rates when $n=3 \times 10^4$ 图7 压缩次数为 5×10^4 时不同预压缩率的疲劳损伤本构关系Fig.7 The constitutive relation of fatigue damage under different pre-compression rates when $n=5 \times 10^4$

表 2 5 种预压缩率下疲劳损伤平台应力
Tab.2 The plateau stress of FD under 5 different pre-compression rates

厚跨比	压缩次数	平台应力/MPa				
		$\varepsilon_p=15\%$	$\varepsilon_p=20\%$	$\varepsilon_p=25\%$	$\varepsilon_p=30\%$	$\varepsilon_p=40\%$
0.0263	1×10^4	0.106	0.093	0.083	0.078	0.073
	2×10^4	0.094	0.084	0.074	0.070	0.065
	3×10^4	0.084	0.076	0.067	0.065	0.056
	5×10^4	0.079	0.065	0.061	0.059	0.055
0.0238	1×10^4	0.092	0.085	0.078	0.072	0.066
	2×10^4	0.082	0.075	0.069	0.064	0.058
	3×10^4	0.071	0.065	0.059	0.054	0.051
	5×10^4	0.068	0.062	0.056	0.052	0.048

4 损伤机理分析

蜂窝纸板在疲劳压缩时，原来保持直立状态的蜂窝胞壁材料出现不同程度的屈曲变形，形成损伤缺陷。塑性变形与疲劳压缩次数有关，该缺陷随压缩次数的增加在纸板体内不断扩展。

疲劳压缩发生在材料弹塑性阶段，此时纸板所受作用力较大，蜂窝纸板发生弹性变形的同时伴随着塑性变形。蜂窝胞壁的塑性变形在外力去除后不能完全恢复，并随着疲劳压缩的继续而增加，其起到弹性作用的应变率随之减小，蜂窝纸板结构的刚度下降，缓冲吸能能力亦随之下降，且是不可逆的塑性变形。蜂窝纸板的塑性变形是其材料结构性损伤的主要原因，该过程是单向不可逆过程。

蜂窝纸板疲劳压缩过程中，蜂窝胞壁壁板原纸纤维在垂直方向上发生位错滑移，规则排列的纤维因滑移而变为无规则排列。原纸中的基体与纤维的泊松比不同，纤维屈曲方向不一致，疲劳损伤导致应变较大时发生基体开裂，原先规则排列的原纸纤维因发生滑移而发生无规则排列。受到压缩的蜂窝胞壁的连续纤维可看作细长的杆体，在疲劳循环作用下刚度逐渐下降，导致结构能量吸收性能下降。

5 结语

疲劳效应对蜂窝纸板平台应力影响较大。疲劳压缩 3×10^4 次左右时，疲劳损伤平台应力分为 2 个变化阶段：在受到持续疲劳压缩后，蜂窝纸板的平台应力从开始到 3×10^4 次时下降比较显著；从 3×10^4 次到 5×10^4 次压缩时，疲劳损伤对平台应力影响不大。另外，疲劳效应对蜂窝纸板平台应力的影响随厚跨比的增大而增大。

在不同预压缩率下，经历一定次数的疲劳压缩后，平台应力在预压缩率为 15%~25% 时变化非常显著，预压缩率为 25%~40% 时变化微弱。随着预压缩

率的增加，平台应力的下降趋势在 21% 左右；预压缩率为 25%~40% 时，平台应力下降趋势减缓，平均下降了 12% 左右。由此，运输包装设计时，必须考虑蜂窝纸板疲劳损伤后缓冲性能的变化。蜂窝纸板疲劳损伤是不可逆过程，其平台应力和能量吸收能力都随疲劳压缩次数的增加而下降。

参考文献：

[1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties (Second Edition)[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[2] BALAWI S, ABOT J L. The Effect of Honeycomb Relative Density on Its Effective In-plane Elastic Moduli: An Experimental Study[J]. Composite Structure, 2008, 84(4): 293—299.

[3] GUO Yan-feng, ZHANG Jing-hui. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Shock and Vibration, 2004, 11(5): 521—531.

[4] LU Li-xin, SUN Ya-ping, WANG Zhi-Wei. Critical Buckling Load of Paper Honeycomb under Out-of-plane Pressure[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(3): 141—150.

[5] WANG Zhi-wei, E Yu-ping. Mathematical Modeling of Energy Absorption Property for Paper Honeycomb in Various Ambient Humidities[J]. Materials and Design, 2010, 31(9): 4321—4328.

[6] E Yu-ping. Energy Absorption Properties of Paper-based Packaging Materials as Response to Various Ambient Humidities[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(8): 155—159.

[7] E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Effect of Relative Humidity on Energy Absorption Properties of Honeycomb Paperboards[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(8): 471—483.

[8] WANG Zhi-wei. On Evaluation of Product Dropping Damage[J]. Packaging Technology and Science, 2002, 15(3): 115—120.

[9] WANG Zhi-wei. Dropping Damage Boundary Curves for Cubic and Tangent Package Cushioning Systems[J]. Packaging Technology and Science, 2002, 15(5): 263—266.

[10] 刘同文, 钱怡. 瓦楞纸板结构的疲劳剩余强度[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2010, 9(6): 671—673.

LIU Tong-wen, QIAN Yi. Study on Residual Strength of Corrugated Board Structure under Fatigue Loading [J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2010, 9(6): 671—673.

- [11] 孙聚杰, 卢立新. 疲劳压缩对瓦楞纸板性能的影响[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2007, 6(5): 570—573.
SUN Ju-jie, LU Li-xin. Effect of Fatigue Compression on the Properties of Corrugated Fiberboard[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2007, 6(5): 570—573.
- [12] SHENOI R A, CLARK S D, ALLEN H G. Fatigue Behavior of Polymer Composite Sandwich Beams[J]. Composite Material, 1995, 29(18): 2423—2445.
- [13] BELINGARDI G, MARTELLA P, PERONI L. Fatigue Analysis of Honeycomb Composite Sandwich Beams[J]. Composites, 2007, 38(4): 1183—1191.
- [14] JEN Y M, CHANG L Y. Effect of Thickness of Face Sheet on the Bending Fatigue Strength of Aluminum Honeycomb Sandwich Beams[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(4): 1282—1293.
- [15] BELOUETTAR S, ABBADI A. Experimental Investigation of Static and Fatigue Behavior of Composites Honeycomb Materials Using Four Point Bending Tests[J]. Composite Structures, 2009, 87(3): 265—273.
- [16] 孙中振, 王珺, 王军. 疲劳振动对蜂窝纸板缓冲性能影响[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 1—4.
SUN Zhong-zhen, WANG Jun, WANG Jun. Effect of Vibration Fatigue on Cushion Performance of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 1—4.
- [17] 范志庚, 卢立新, 王军. 疲劳效应对蜂窝纸板系统的内共振条件参数影响的研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(11): 203—207.
FAN Zhi-geng, LU Li-xin, WANG Jun. Effect of Fatigue Damage on Inner-resonance Conditions Parameters of a Honeycomb Paperboard System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(11): 203—207.