

文章编号:1009-3087(2013)03-0146-05

聚氨酯蜂窝纸板静力学性能和吸能性能

张勇^{1,2}, 陈力³, 谢卫红²

(1. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 空军勤务学院 机场工程与保障系, 江苏 徐州 221000;
3. 解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要:将聚氨酯填充到蜂窝纸板的孔隙中制作了聚氨酯蜂窝纸板复合材料并对其进行静态压缩试验,进而对其吸能特性进行研究,并对影响复合材料的一些因素进行逐个分析,找到它们影响复合材料静态缓冲性能的内在规律。结果表明:复合材料的弹性极限(从0.224 0 MPa提高到0.542 2 MPa)和屈服应力(约为填充前的3~4倍)较单纯蜂窝纸板增长明显;单纯蜂窝纸板材料和聚氨酯蜂窝纸板复合材料的抗压强度和屈服应力随着蜂窝孔径的增大而减小,随着厚度增大略有提升,孔径对其力学性能的影响非常显著;复合材料吸能量较复合前2种材料大幅增加,约为复合前2种材料吸能量总和的1.85倍;吸能效率和理想吸能效率都优于复合前2种材料。

关键词:聚氨酯蜂窝纸板;静态压缩试验;复合材料;吸能性能

中图分类号:TB3

文献标志码:A

Static Performance and Energy Absorption Capacity of the Honeycomb Paperboard Filled with Polyurethane

ZHANG Yong^{1,2}, CHEN Li³, XIE Wei-hong²

(1. Mechanics & Architecture Eng. College, China Univ. of Mining & Technol., Xuzhou 221008, China;
2. Dept. of Airport Eng. and Safeguard, Air force Service College, Xuzhou 221000, China;
3. College of Defense Eng., PLA Univ. of Science & Technol., Nanjing 210007, China)

Abstract: A kind of composite buffering material was made by filling the voids of honeycomb paperboard with polyurethane. Static compression tests were performed to evaluate the energy absorption capacity of the material. Based on the tests results, the mechanical behaviors of the material under different conditions were analyzed, the inherent influencing laws of some factors on the material's static buffering performance were obtained. It was shown that the elasticity limit (increased from 0.224 0 MPa to 0.542 2 MPa) and yield stress (about 3~4 times the yield stress of the honeycomb paperboard) of composite material increased obviously. Compression strength and yield stress varied inversely with the void diameter, and directly with thickness of the honeycomb paperboard and composite material. The influence of void diameter on the mechanical properties of the composite material was very significant. The absorbed energy of the composite material was about 1.85 times the total absorbed energy of the honeycomb paperboard and polyurethane. The energy absorption efficiency and the ideal energy absorption efficiency of the composite material were better than those of honeycomb paperboard and polyurethane.

Key words: honeycomb paperboard filled with polyurethane; static compression test; energy absorption capacity; composite material

泡沫材料和蜂窝结构是应用最广的2种防护型包装材料。目前对蜂窝纸板的静态压缩性能和动态缓冲性能国内外的研究已有不少文献。郭彦峰等通过动态压缩试验获得了蜂窝纸板的最大加速度-静应力曲线的特征系数和经验公式^[1];高士龙提出了不规则结构参数对蜂窝纸静态压缩力学性能的影响

响^[2];曾克俭等从理论和试验上得出蜂窝纸板综合性能最优时的厚度和内径^[3];王冬梅从蜂窝纸板的结构和力学角度分析得到蜂窝纸板的压缩破坏主要与纸蜂窝芯的结构和蜂窝胞壁的屈曲有关^[4];许红平建立一系列蜂窝纸分析模型,有限元MSC. Marc进行抗压分析,得到蜂窝纸压缩变形过程和临界屈曲值,最后得到边长值对其性能的影响^[5];还有很多研究蜂窝纸板静、动态力学性能及其影响参数的文献^[6-11]。作者通过将聚氨酯泡沫塑料填充到蜂窝纸板的空隙中,制得一种能够改善蜂窝纸板材料

收稿日期:2012-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008306)

作者简介:张勇(1980—),男,博士生。研究方向:工程结构与材料。

缓冲性能的复合缓冲材料。该复合材料兼有两者的优点,对可变载荷的缓冲与防震可能具有一定的自适应能力,能从一定程度上提升材料缓冲性能,对包装材料的缓冲吸能防护的研究具有重要意义。

1 实验部分

1.1 蜂窝纸板材料

蜂窝纸板材料由山东省济南三铭绿环包装制品有限公司生产,选用了3种规格蜂窝纸板:孔径6 mm、厚度15 mm;孔径8 mm、厚度20 mm;孔径10 mm、厚度20 mm。该纸板质量稳定,面纸克重200~250 g/m²,芯纸克重为130 g/m²,涂胶克重110 g/m²,孔径比*i*约为1,蜂窝面纸厚度为0.4 mm,单层芯纸厚度0.18 mm。

1.2 聚氨酯材料

采用上海沪涇建材有限公司生产的单组分聚氨酯泡沫填缝剂(简称OCF)来得到聚氨酯泡沫,将聚氨酯填缝剂瓶罐倒置并均匀晃动约1 min,然后打

开喷嘴将均匀发泡的聚氨酯泡沫冲入自制的模具,待其固化后拆模,并根据试验所需切割成厚度为20、15、10 mm的单纯聚氨酯试件。

1.3 聚氨酯蜂窝纸板复合材料制备

将上面得到的蜂窝芯置于一个筛子之上,这样做是为了使得填充时蜂窝芯内的气体可以顺利排出。然后,将刚发泡的半固体状的聚氨酯泡沫用喷头均匀喷涂在蜂窝纸芯表面,这时要从纸质蜂窝芯的喷涂聚氨酯泡沫一面进行加压,筛子保持了另一面的空气流通性,使得聚氨酯泡沫能够通过纸质蜂窝芯并从另一端溢出,呈现馒头状泡沫;必要时可以用平整的工具向下施加压力以使泡沫均匀贯穿整个蜂窝纸芯。放置十几分钟待其固化,用刀具将上下鼓出多余的聚氨酯泡沫削平。

为了确定填充量,用电子秤测量复合前后各蜂窝纸板的质量,其中填充后的复合材料的质量包括上下两层面纸。

测得的数据如表1所示。

表1 复合材料填充前与填充后质量对比

Tab.1 Mass of honeycomb paperboard vs. mass of composite material

孔径大小/ mm	厚度/ cm	复合前各蜂窝纸板质量/g			复合前平 均质量/g	复合后聚氨酯蜂窝纸板质量/g			复合后平 均质量/g	质量增 量/g
		1	2	3		1	2	3		
6	1.5	63	59	58	60	112	117	113	114	54
8	2.0	54	57	54	55	104	104	107	105	50
10	2.0	54	53	52	53	101	103	102	102	49

从表1可以看出,复合后的质量几乎为复合前质量的两倍,这说明聚氨酯填充的效果比较明显。另外,添加聚氨酯后,各孔径材料的密度相差不大,即孔径大小对复合材料密度的影响并不显著。

1.4 静态压缩试验

试验时的环境温度为32℃,环境湿度为30%。试验在长春科新试验仪器有限公司生产的微机控制电子万能试验机上进行,试验机规格为100 kN,准确度等级为0.5级,设定加载速度为10 mm/min。各试件编号及其规格如表2所示,各规格数据为3个试件平均之后的尺寸。其中,孔径大小是指蜂窝芯内芯的直径。

2 结果与讨论

2.1 填充聚氨酯前后静力学性能对比分析

根据1号和6号试件的试验数据得到孔径6 mm厚度、15 mm蜂窝纸板在填充聚氨酯前后的应力-应变曲线,如图1所示。

表2 试件参数

Tab.2 Test parameter

试件 编号	试件种类	孔径/ mm	厚度/ mm	直径/ mm
1	纯蜂窝纸板	6	15	38
2	纯蜂窝纸板	8	20	38
3	纯蜂窝纸板	10	20	38
4	纯聚氨酯	无	15	40
5	纯聚氨酯	无	20	40
6	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	6	15	44
7	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	8	20	44
8	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	10	20	44
9	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	6	6	44
10	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	6	20	44
11	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	8	6	44
12	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	8	15	44
13	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	10	6	44
14	聚氨酯蜂窝纸板复合材料	10	15	44

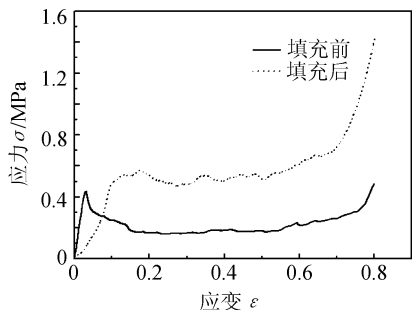


图1 蜂窝纸板填充聚氨酯前后应力-应变曲线

Fig. 1 Honeycomb paperboard stress-strain curve vs. composite material stress-strain curve

填充前为单纯蜂窝纸板,填充后为复合材料,由于填充使得试件直径略有增长,2种试件直径略有差别,填充前为38 mm,填充后为44 mm。

从应力-应变曲线中容易看出,在静态载荷条件下,蜂窝纸板的静态压缩过程可以分为明显的4个阶段:弹性阶段、失稳阶段、屈服阶段、压实阶段。聚氨酯的填充增强作用使得蜂窝纸板的失稳阶段变得不再明显,代之的是一个延长的弹性(类弹性)阶段。

填充后的聚氨酯蜂窝纸板复合材料其屈服应力大大高于填充前(约为填充前的3~4倍),几乎与弹性极限大致相当,这就使得填充后材料的屈服平台较高,从而大大提升了蜂窝纸板材料的缓冲性能,对其是一个良好的改善。

填充的聚氨酯材料使本来会有的失稳阶段基本消失,从而为蜂窝纸板将其增强了的弹性极限水平(从0.224 0 MPa提高到0.542 2 MPa)在屈服阶段保持下去发挥了重要作用。

2.2 静态力学性能影响因素分析

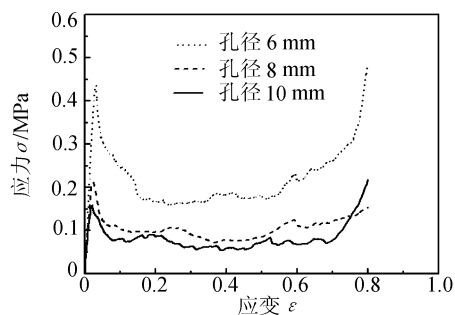
为了研究影响复合材料静态力学性能的主要因素,根据试验数据对单纯蜂窝纸板材料和复合材料的静态力学性能影响因素进行分析,见图2。

图2(a)为孔径6、8和10 mm的单纯蜂窝纸板材料试件的应力-应变曲线对比图。从图中可以看出随着孔径的增大,蜂窝纸板材料的抗压和屈服强度减小,吸能水平也相应地下降。并且,孔径对其力学性能的影响非常显著。

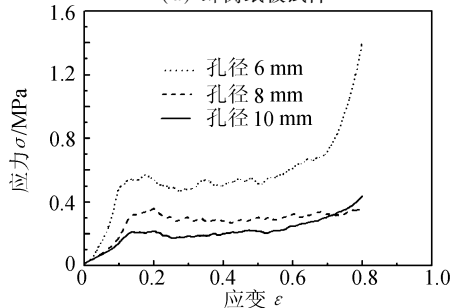
图2(b)为孔径6、8和10 mm的复合材料应力-应变曲线对比图。容易看出,与孔径对单纯蜂窝纸板的影响类似,随着孔径的增大,复合材料的抗压和屈服强度减小,吸能水平也相应下降。

图2(c)为孔径8 mm条件下3种不同厚度复合材料试件的应力-应变曲线对比图。从图中可以看

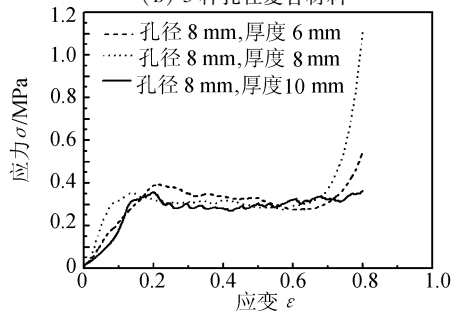
出,在屈服阶段内,基本呈现出随缓冲材料厚度增大其屈服强度相应下降的规律,但是这种影响并不明显。



(a) 蜂窝纸板试件



(b) 3种孔径复合材料



(c) 3种厚度复合材料

图2 单纯材料与复合材料静力学性能对比分析

Fig. 2 Analysis of static performance of Honeycomb paperboard and composite material

2.3 主要吸能评价指标

得到材料的应力-应变曲线后,就可以对其缓冲吸能特性进行分析。下面对评价材料吸能性能的主要标准进行介绍。

2.3.1 缓冲材料吸能量评价

在应力-应变曲线中,从开始压缩到致密阶段所围的面积 Q 表示单位体积的缓冲材料压缩到致密阶段的过程中所吸收的能量,它可以表示吸能能力的大小。 Q 可由下式给出:

$$Q = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

2.3.2 吸能效率 E

Miltz等^[12]提出的吸能效率(E)的定义为:

$$E = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma d\varepsilon / \sigma_i \times 1 = Q / \sigma_i \quad (2)$$

式中, ε_i 为任意应变, σ_i 为对应的应力, 式(2)表明吸能效率 E 为缓冲材料在到达某应变 ε_i 时所吸收的能量与对应应力 σ_i 的比值。当吸能效率 E 达到最大值时, 表明在该应力处缓冲材料的吸能特性最好, 其性能可以得到最大的发挥。

2.3.3 理想吸能效率 I

Miltz 等提出的理想吸能效率 I 的定义为:

$$I = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma d\varepsilon / (\sigma_i \times \varepsilon_i) = Q / (\sigma_i \times \varepsilon_i) \quad (3)$$

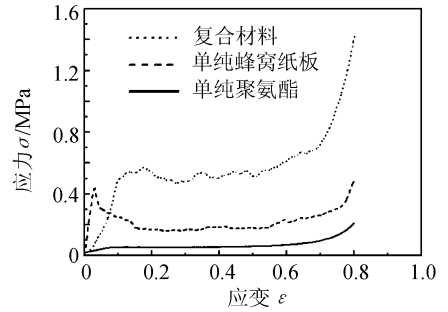
式中, ε_i 为任意应变, σ_i 为对应的应力。式(3)表明, I 为缓冲材料在压缩过程中任意应变下所吸收的能量与理想吸能材料在相同应变下的吸能量之比。理想的吸能材料在压缩过程中经过很小的弹性变形后, 迅速到达一个很宽的平台屈服阶段, 然后再进入压实阶段。

2.4 复合材料吸能性能分析

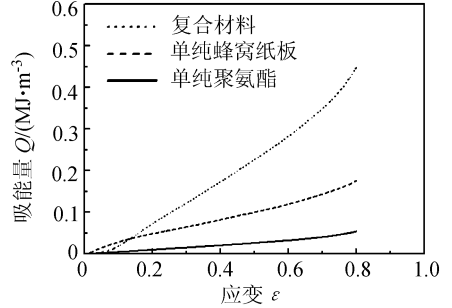
为方便分析, 以孔径 6 mm 的蜂窝纸板为例, 根据采样数据做出单纯蜂窝纸板材料(1号试件)与单纯聚氨酯材料(4号试件)和复合材料(6号试件)的应力-应变曲线如图3所示。3种试件的直径分别为 38、40 和 44 mm; 厚度均为 15 mm。

图3(a)为3种材料的应力-应变曲线, 取压缩开始至屈服阶段末期为研究阶段进行积分计算, 单位体积的复合材料、纯蜂窝纸板和纯聚氨酯3种材料吸收能量分别约为: 0.349、0.152 和 0.037 MJ/m³。由上述计算可以看出, 未复合前两种材料的总吸能量为 0.189 MJ/m³, 复合后材料的吸能量为 0.349 MJ/m³, 复合后材料吸能量约为复合前2种材料吸能量总和的 1.85 倍。这就是说, 聚氨酯增强蜂窝纸板并不是2种材料吸能能力的简单叠加, 2种材料在新复合材料中相互影响相互依赖, 作为一个整体来发挥其缓冲吸能作用, 因此得到的复合材料其吸能量较各自单独的吸能量有了大幅度的增加。

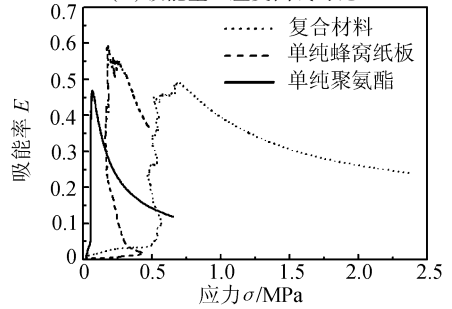
图3(b)为6 mm 孔径聚氨酯蜂窝纸板复合材料与2种单纯材料(单纯蜂窝纸板和单纯聚氨酯)的吸能量-应变($Q-\varepsilon$)曲线, 从图中容易看出, 除了在应变 0~0.133 很短的范围内单纯蜂窝纸板的单位体积的吸能量略大于聚氨酯蜂窝纸板外, 在 0.133~0.8 的大部分范围内(与聚氨酯蜂窝纸板复合材料的屈服阶段大致相当), 复合材料的吸能水平显著高于2种单纯材料。



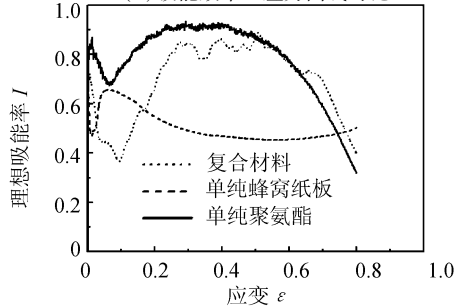
(a) 应力-应变曲线对比



(b) 吸能量-应变曲线对比



(c) 吸能效率-应力曲线对比



(d) 理想吸能效率-应变曲线对比

图3 复合材料与两单纯材料的4种曲线对比

Fig. 3 Results of four kinds of curves

分别计算在屈服结束点处3种材料的吸能效率 E 和理想吸能效率 I , 得到聚氨酯蜂窝纸板复合材料与2种单纯材料(单纯蜂窝纸板和单纯聚氨酯)的吸能效率分别为: 0.484、0.526 和 0.439, 理想吸能率分别为: 0.691、0.476 和 0.658。从吸能率和理想吸能率上来看, 复合后材料吸能率与单纯材料非常接近, 而理想吸能率则较复合前2种单纯材料的理想吸能率高。

图 3(c) 为 6 mm 孔径复合材料与 2 种单纯材料的吸能效率 - 应力曲线, 从中可以看到, 在达到最大吸能效率 (即吸能效果最佳点) 时, 3 种材料所对应的应力大小为: 聚氨酯蜂窝纸板复合材料 > 单纯蜂窝纸板 > 单纯聚氨酯, 这就是说, 复合材料适合于重型、表面硬度较大的产品包装, 而单纯蜂窝纸板适合于中型、表面硬度适中的产品包装, 而单纯聚氨酯则适用于软质小硬度产品包装。

从图 3(d) 中可以看出, 当 $0.169 < \text{应变} < 0.768$ 时, 聚氨酯蜂窝纸板复合材料的吸能效率大大高于单纯蜂窝纸板, 而在此应变范围内 2 种材料正好处于屈服阶段这个对缓冲防护材料来说最重要也是最受关注的阶段。经过计算, 在此阶段内, 聚氨酯蜂窝纸板复合材料平均理想吸能效率约为 0.82, 单纯蜂窝纸板材料的平均理想吸能效率约为 0.45, 复合后材料 (新型材料) 约为复合前单纯蜂窝纸板材料 (现役材料) 的 1.82 倍。从理想吸能效率 I 这个评价指标来看, 聚氨酯蜂窝纸板复合材料表现较优秀。

3 结 论

1) 蜂窝纸板材料受压时表现出明显的 4 个阶段: 弹性阶段、失稳阶段、屈服阶段、压实阶段, 但是填充的聚氨酯材料使本来会有的失稳阶段基本消失, 从而使蜂窝纸板复合材料的弹性极限水平 (从 0.224 0MPa 提高到 0.542 2MPa) 和屈服应力 (约为填充前的 3 - 4 倍) 大大高于填充前, 大大提升了蜂窝纸板材料的缓冲性能。

2) 单纯蜂窝纸板材料和聚氨酯蜂窝纸板复合材料的抗压和屈服强度随着蜂窝孔径的增大而减小, 随着厚度增大略有提升, 孔径对其力学性能的影响非常显著。

3) 复合材料吸能性能大幅提高, 吸能量约为复合前两种材料吸能量总和的 1.85 倍; 吸能效率 E 和理想吸能效率 I 均为最优秀, 是最佳的缓冲吸能衬垫材料。

参考文献:

[1] Guo Yanfeng, Zhang Jinghui, Fu Yungang, et al. Test and analysis of dynamic cushioning property of honeycomb paperboard[J]. 2002, 23(6): 6 - 8. [郭彦峰, 张景绘, 付云岗, 等. 蜂窝纸板动态缓冲特性曲线测试分析[J]. 包装工程, 2002, 23(6): 6 - 8.]

[2] Gao Shilong. Analysis of compression performance of the paper honeycomb core with anomalous structure based on

FEM[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 53 - 55. [高士龙. 基于 FEM 的不规则纸芯结构的蜂窝纸压缩性能分析[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 53 - 55.]

[3] Zeng Kejian, Lu Xiang. Research on the comprehensive functions of the honeycomb board[J]. 2002, 23(6): 44 - 46. [曾克俭, 吕翔. 蜂窝纸板综合性能研究[J]. 包装工程, 2002, 23(6): 44 - 46.]

[4] Wang Dongmei. Compression breakage properties research on the honeycomb fibreboard[J]. 2006, 27(1): 37 - 39. [王冬梅. 蜂窝纸板压缩破坏机理研究[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 37 - 39.]

[5] Xu Hongping. The analysis on resisting compression of honeycomb paperboard on MSC MARC[J]. Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition, 2008, 7(6): 465 - 480. [许红平. 基于 MSC. Marc 的蜂窝纸板抗压性能分析[J]. 杭州师范大学学报, 2008, 7(6): 465 - 480.]

[6] Yan Lirong, Xie Yong. Dynamic cushioning properties of combination of honeycomb paperboard and EPE[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 27 - 31. [言利容, 谢勇. 蜂窝纸板/EPE 组合材料的动态缓冲性能[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 27 - 31.]

[7] Yoshiaki Yasui. Dynamic axial crushing of multi-layer honeycomb panels and impact tensile behavior of the component members[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(6): 659 - 671.

[8] Shafizadeh J E, Seferis J C. Scaling of honeycomb compressive yield stresses. Smitubted to composite: Part A[J]. Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(7): 681 - 688.

[9] Zhu Ruoyan, Yin Qi, Li Houmin. Study of the performance of combinatorial honeycomb paperboards through the static compression[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2010, 25(4): 105 - 106. [朱若燕, 尹琪, 李厚民. 组合蜂窝纸板缓冲性能的静态试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(4): 105 - 106.]

[10] Li Pengfang, Zhang Yu, Lu Chaohui, et al. Static compression test and simulation analysis of honeycomb paperboard[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(1): 34 - 35. [李鹏芳, 张珏, 卢朝晖, 等. 蜂窝纸板静态压缩试验研究及其模拟分析[J]. 包装工程, 2010, 31(1): 34 - 37.]

[11] Hao Wei, Li Yong, Luo Yuqing. Study on themechanical properties of the moderate and high density Nomex honeycomb[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002, 22(2): 41 - 45. [郝巍, 李勇, 罗玉清. 中、高密度 Nomex 蜂窝力学性能研究[J]. 航空材料学报, 2002, 22(2): 41 - 45.]

[12] Miltz J, Gruenbaum G. Evaluation of cushion properties of plastic foams compressive measurement[J]. Polymer Eng Sci, 1981, 21(15): 1010 - 1014.