

文章编号: 1001-4888(2016)05-0593-07

泡沫铝夹芯梁四点弯曲性能试验研究^{*}

辛亚军, 肖博, 程树良, 李慧剑

(燕山大学 河北省重型装备与大型结构力学可靠性重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 通过准静态四点弯曲试验对泡沫铝夹芯梁的弯曲力学性能进行了测试, 研究了它的破坏过程、破坏形态和典型荷载—位移曲线, 分析了芯层厚度和面层厚度等参数对其弯曲力学性能的影响。结果表明, 泡沫铝夹芯梁四点弯曲破坏过程历经三个阶段, 呈现三种失效模式: 整体弯曲破坏、局部屈曲破坏以及整体屈曲破坏; 芯层厚度和面层厚度对夹芯梁的弯曲承载力和吸能效果有明显影响; 在本试验参数范围内, 芯层厚度为 25mm, 面层厚度为 0.4mm 时, 夹芯梁具有最优弯曲力学性能。

关键词: 准静态四点弯曲; 泡沫铝; 夹芯梁; 失效模式; 弯曲承载力

中图分类号: TG115 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-15-231

0 引言

泡沫铝是一种具有高孔隙率和较大孔径类似泡沫状的新型结构功能材料。由于其独特的多孔结构, 使其在压缩状态下表现出一个较长的塑性应变过程^[1,2]。在承受荷载使其塌陷至一个更加稳定的状态前能够吸收很大的能量并保护其他结构免受损坏^[3]。它是一种具有良好吸能特性的轻质、高阻尼材料^[4]。三明治夹芯复合材料因为具有高比强度、质量轻、能达到使用设计要求的刚度与强度, 因此在汽车制造业、航空航天、建筑行业等领域引起了广泛的关注^[5]。泡沫铝夹芯梁是由高强度面板与泡沫铝芯层结合而成^[6], 泡沫铝夹芯梁的常用制备方法有胶接法^[7]、焊接法^[8]等, 此外泡沫金属法、固体发泡法等制备工艺^[6,7]也得到了发展。

早在 1948 年, 美国 Sosonik^[9]将金属汞加入到熔融状态下的泡沫铝中, 成功制备出了多孔泡沫铝材料。人们逐渐对这种泡沫铝材料优越的力学性能进行了大量的研究。近年来, 许多学者对泡沫铝夹芯梁从数值模拟与实验方面进行了研究。L. L. Yan^[10]等将泡沫铝切成瓦楞状, 做成三明治夹芯梁, 对其进行了三点弯曲测试, 分析了弯曲强度, 破坏机制等, 并将所得的数据与模拟得出的模型进行了对比, 得出了夹芯梁初始破坏的力学性能; Guoyin Zhu^[11]等通过对泡沫铝夹芯梁进行三点弯曲实验, 得到了泡沫铝夹芯梁的抗弯强度和破坏形态, 分析了泡沫铝夹芯梁失效的主要原因, 并且优化了泡沫铝夹芯梁的抗弯强度; Yiming Jen^[12]等对泡沫铝夹芯梁的两阶段弯曲疲劳模式在压入破坏模式下进行研究分析, 得出了荷载的加载顺序对泡沫铝夹芯梁的累计疲劳效应有较大的影响。Xiaolei Zhu^[6]等人通过 MAT-ALB 提出了一个新颖的建立泡沫铝夹芯梁模型的方式, 在 ABAQUS/Explicit 中建立了三点弯曲作用下的失效模式, 并将其计算得到的破坏临界荷载与理论模型做了对比, 得出了泡沫铝夹芯梁剪切破坏的演化规律; E. E. Theotokoglou^[13]等对泡沫铝夹芯板裂缝的开裂形式进行了模拟, 发现面板的开裂是由底板先开裂从而扩大到上部, 通过数值模拟的结果得出了裂缝的开展是因为上部受到了复杂荷载作用。

^{*} 收稿日期: 2015-12-01; 修回日期: 2016-02-21

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2013203183); 住建部科技项目(2013-K2-2)

通讯作者: 程树良(1975—), 男, 副教授, 主要从事多孔材料力学性能研究。Email: slcheng@ysu.edu.cn

国内外的许多学者^[14-19]还对泡沫铝夹芯板结构的制备方法、粘接部位的变形模式和其承受荷载时的破坏形式进行了深入研究。

本文采用胶结法,利用配置好的环氧树脂做粘结剂,将铝板与丝网泡沫铝芯体粘接在一起做成泡沫铝夹芯梁,为了研究泡沫铝夹芯梁的弯曲力学性能,对其进行准静态下的四点弯曲试验,研究测试其力学性能,分析泡沫铝夹芯梁的失效模式和破坏过程,研究了不同芯层厚度、面层厚度因素下对其吸能能力和最大弯曲荷载的影响,并与纯泡沫铝梁进行对比,最后得到了最优的面层厚度与最大弯曲荷载。

1 试验部分

1.1 试验材料

泡沫铝芯材采用北京金艾伯特泡沫金属有限公司生产的丝网状开孔泡沫铝,密度为 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$,平均主孔径 2.5mm ,孔隙率 85% ,通孔率 95% 以上;粘接剂选用由廊坊诺尔信化工有限公司生产的 DY.E.44 型环氧树脂和 DY.EP 型固化剂配制。

1.2 试件制作

根据试验目的,将长 a 为 240mm ,宽 b 为 40mm 的泡沫铝夹芯梁用工业乙醇除去表面油脂,放于自然通风处晾干;将铝板裁成 $240\text{mm}\times 40\text{mm}$ 与芯层一样大小的铝板,为便于其与芯层的粘接,将铝板表面用砂纸打磨后再用工业乙醇擦洗干净并自然晾干。将配置好的环氧树脂均匀涂抹在铝板表面,然后将处理好的丝网泡沫铝芯层缓慢平稳地粘贴在铝板上,使其四边与铝板对齐,另一侧也同样处理。在室温条件下养护三天。选取不同芯层厚度 $H=20/25/30\text{mm}$ 的泡沫铝,铝板厚度 $t=0.2/0.4/0.6\text{mm}$,共制作了六组试件(18 个),结构示意图如图 1 所示,详细参数如表 1 所示。



图 1 试件图片

Fig. 1 Test specimen picture

表 1 试件参数

Tab. 1 Specimen number and parameter

试件编号	试件尺寸 $a\times b(\text{mm})$	芯体厚度 $H(\text{mm})$	面层厚度 $t(\text{mm})$
B1-1/2/3	240×40	20	0.4
B2-1/2/3		25	0
B3-1/2/3			0.2
B4-1/2/3			0.4
B5-1/2/3			0.6
B6-1/2/3		30	0.4

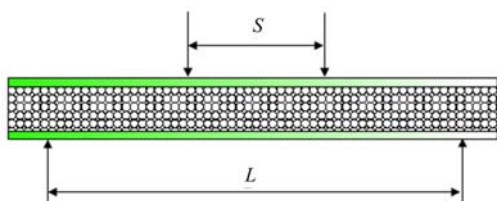


图 2 加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the specimen

1.3 试验加载

选用长春科新试验仪器有限公司生产的 WDW3100 微控电子万能试验机对试件进行加载。所有试件均在压头为 $1\text{mm}/\text{min}$ 的速度下进行试验。加载示意图如图 2 所示,加载系统如图 3 所示。四点弯曲试验依据 ASTM Standard C393-63, Standard Test Method for Flexural Properties of Flat Sand-

wich Constructions 进行,由计算机自动采集所有试验数据。试验制作的四点弯曲压头直径为 30mm ,跨度 L 为 210mm ,加载压头跨距 S 为 70mm 。

2 试验结果和分析

2.1 破坏过程和破坏模态

试验中观察了试件受力变化全过程, 试验过程大致经历三个阶段。第一阶段为整体受力阶段, 试件外形基本没有变化, 夹芯梁整体主要发生弹性变形(图 4(a))。第二阶段为上面层失效阶段, 随着试验的继续, 夹芯梁整体略显弯曲, 其将所承受的荷载由上面层传递给芯层和下面层, 上面层主要承受压力而下面层主要承受拉力, 由于压力作用, 上面层使得芯体与面层逐渐发生界面剥离, 根据面层厚度不同表现为三种破坏形态: 铝板厚度为 0.2mm 时, 由于此时铝板较薄强度较低, 所以在试验过程中, 并未与芯体脱离, 仅仅轻微皱起(图 4(b1)(b2)); 铝板厚度为 0.4mm 时, 在压头下方出现压痕, 压头附近铝板出现局部屈曲, 但上表面并未完全脱离芯体(图 4(c1)(c2)); 铝板厚度为 0.6mm 时, 此时铝板强度较高, 上表面两个压头中间部位铝板受挤压拱起, 两压头之间的铝板与芯体完全脱离, 呈现整体屈曲(图 4(d1)(d2))。第三阶段为整体破坏阶段, 随着位移的增加, 下面层所受到的拉力逐渐增大, 此时下面层开始破坏出现裂缝, 裂缝不断扩大, 最终导致芯体被拉伸破坏(图 4(e1)(e2)(e3))。前两个阶段夹芯板下面层只是产生拉伸变形, 最后一个阶段下面层产生了断裂, 断裂情形如图 4(f1)(f2)所示。



图3 加载系统

Fig. 3 Loading system

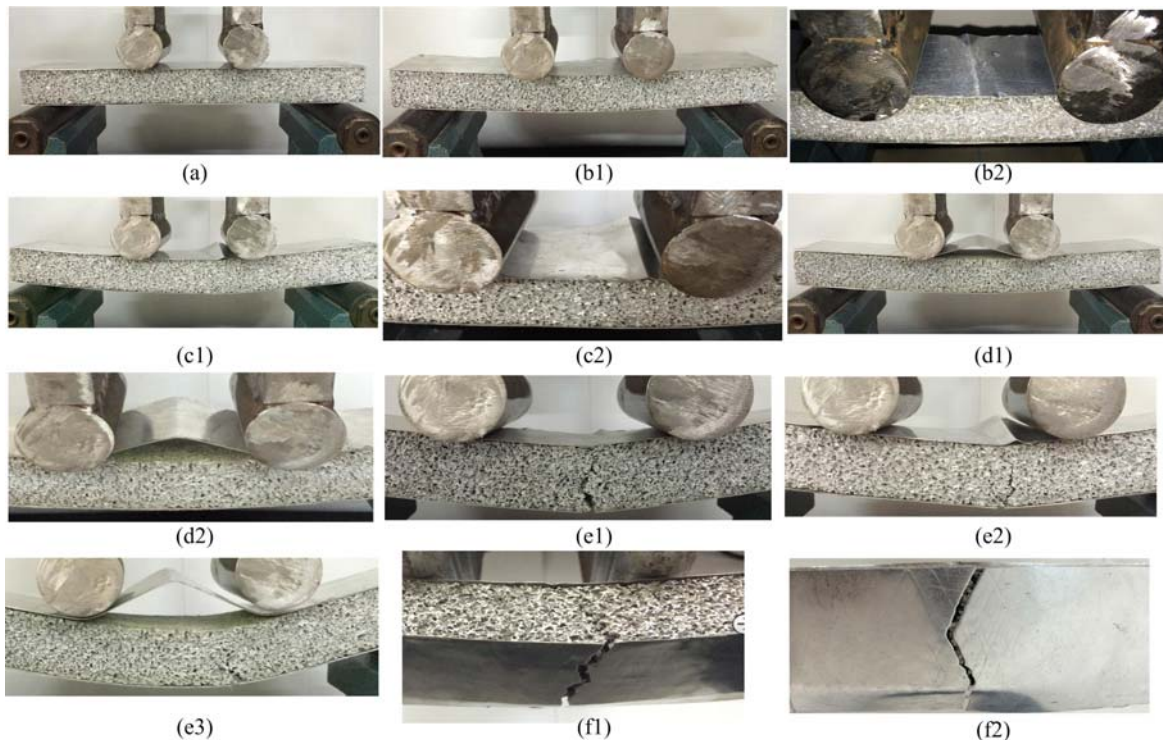


图4 夹芯梁四点弯曲破坏模式($H=25\text{mm}$)

Fig. 4 Failure modes of four-point bending aluminum foam sandwich beam($H=25\text{mm}$)

根据试验现象和试验结果, 总结出泡沫铝夹芯梁在四点弯曲作用下有三种破坏模式: 整体弯曲破坏、局部屈曲破坏、整体屈曲破坏。图 5 为三种破坏模式的典型荷载—位移曲线。当试件呈现整体弯曲破坏时, 由图中曲线 Type I 可以看出, 初始阶段荷载随着位移的增加呈线性增长, 达到最大弯曲荷载, 因为此时铝板较薄, 强度较低, 使得芯体直接受力, 导致下面层受拉力而开裂, 使曲线突然下降; 当试件呈整体局部屈曲时, 由图中曲线 Type II 可以看出, 初始时荷载随着位移的增加呈线性增长达到第一个峰值时, 由于上面层铝板强度有所提高引起上面层局部屈曲从而曲线出现轻微振动, 随后荷载继续增加

达到最大弯曲荷载,最后由于下面层的开裂而使得曲线突然下降;当试件呈现整体屈曲破坏时,由图中曲线 Type III 可以看出,开始时荷载随位移的增加呈线性增长,在 0.78mm 左右处出现轻微振动,因为此时铝板较厚,强度较高,导致压头中间的上层面由于受到压力挤压从而产生屈曲与芯体脱离,随后曲线继续上升,芯体与下面层受力增大,当达到最大弯曲荷载后,由于下面层的开裂而使得曲线突然下降。

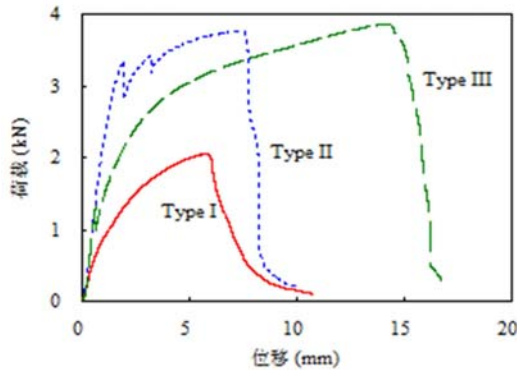


图 5 三种破坏模式的典型曲线

Fig. 5 Typical curves of three failure mode

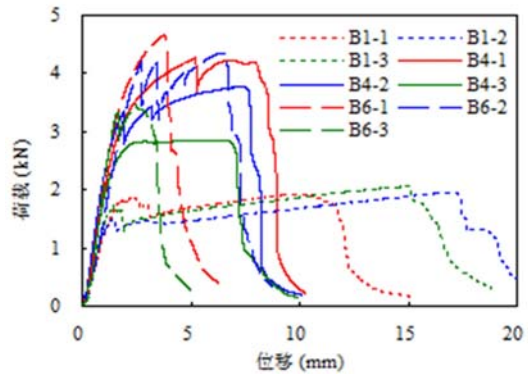


图 6 不同芯层厚度夹芯梁的荷载—位移曲线

Fig. 6 Force-displacement curves of sandwich beam with different core thickness

2.2 试验结果分析

2.2.1 芯层厚度的影响

为了对比,在其他条件相同的情况下做了三组试件 B1/B4/B6 (H 分别为 20/25/30mm) 的试验,图 6 为泡沫铝夹芯梁在不同芯层厚度下的荷载—位移曲线,图 7 为泡沫铝夹芯梁最大弯曲荷载和平均吸能量对比,其中试件受压过程中材料的吸能量 E 可以用材料的荷载—位移曲线与位移轴之间所包含的面积来计算^[21]。

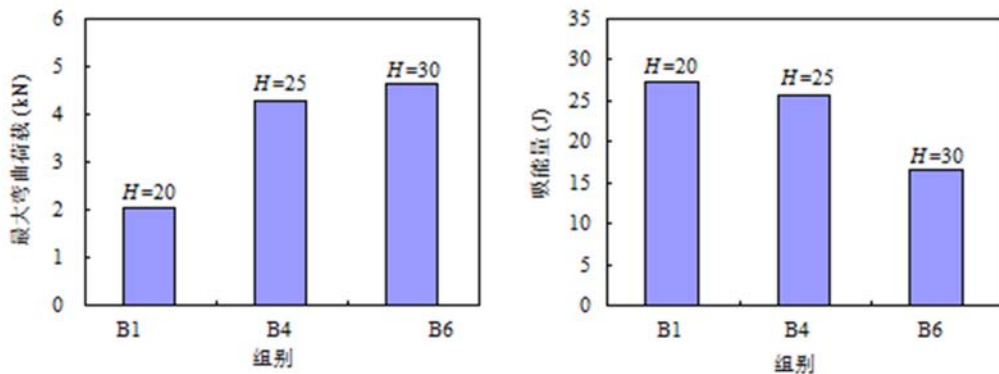


图 7 不同芯层厚度夹芯梁的最大弯曲荷载和吸能量

Fig. 7 Maximum bending load and energy absorption capability of sandwich beam with different core thickness

由图分析可知,随着芯层厚度的增大,最大弯曲荷载显著增大,但吸能量却逐渐降低,结构的塑性也相对减小,随着夹芯板芯层厚度的增加,最大挠度逐步减小,变形能力下降。这是由于随着芯层厚度的增加,结构下部所承受的拉应力逐渐增大,因此在承受较大荷载时使得构件下表层过早破坏。B6 的最大弯曲荷载分别 B1、B4 组的 2.26 倍、1.09 倍;B1、B4 的吸能量是 B6 的 1.64 倍、1.54 倍。由上述分析可知,芯层厚度对试件的吸能量与最大弯曲强度有较大影响。

2.2.2 面层厚度的影响

为了对比,在其他条件相同的情况下做了四组试件 B2/B3/B4/B5 (t 分别为 0/0.2/0.4/0.6mm) 的试验,图 8 为试件厚度为 25mm 时各组试件的荷载—位移曲线,图 9 为各组试件的最大弯曲荷载和平均吸能量对比。因 B5-1 试件试验过程发生上层面整体脱离,试验后剖解发现是由于面层与芯体之间粘接

不实所致,因此,此试件作为异常件数据不计入分析。

通过荷载—位移曲线对比发现,随着上面层厚度的增加,夹芯梁的变形能力逐渐增大,强度也逐渐提高,由于面层较厚,导致 B5 组试件上面层整体屈曲,上面层不再承受压力退出工作,所以其强度比 B4 组略低。从图 9 可以明显看到,纯泡沫铝梁 B2 的抗弯能力非常小,其最大弯曲荷载仅仅为 0.77kN,而 B3/B4/B5 组的最大弯曲荷载分别为 2.05kN,4.27kN 和 3.86kN;通过对比吸能量可以发现,B5 的吸能量分别是 B4、B3、B2 的 8.63 倍,4.66 倍和 1.62 倍。由上述分析可知,夹芯板面层厚度对弯曲强度和吸能量有显著的影响。

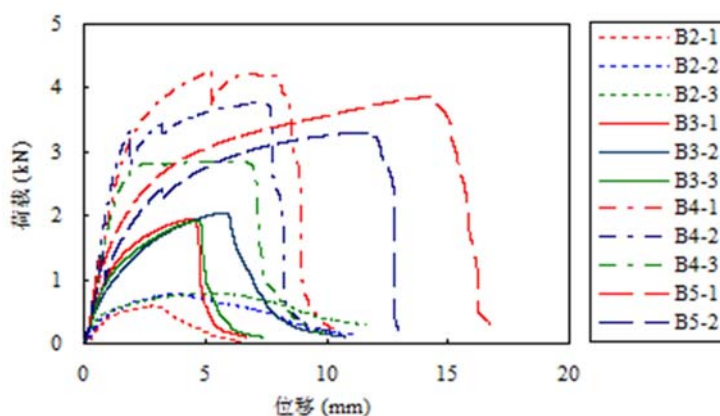


图 8 不同面层厚度夹芯梁的荷载—位移曲线

Fig. 8 Force-displacement curves of sandwich beam with different face sheet thickness

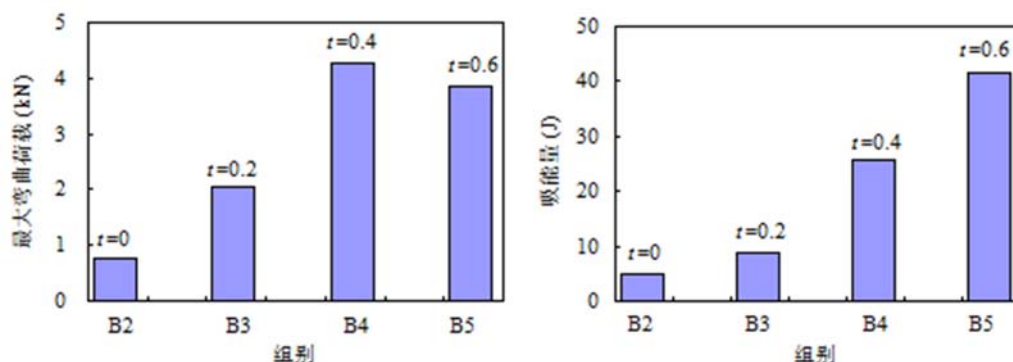


图 9 不同面层厚度夹芯梁的最大弯曲荷载和吸能量

Fig. 9 Maximum bending strength and energy absorption capability of sandwich beam with different face sheet thickness

由以上分析可知,增加夹芯梁面层厚度,其抗弯强度和吸能量都有明显提高;增加夹芯梁芯层厚度,其抗弯强度有增加趋势,但是吸能量和变形能力呈下降趋势。因此改变面层对夹芯梁弯曲力学性能的影响程度大于改变芯层对其力学性能的影响,就本试验参数范围内研究可知,在芯层厚度为 25mm,面层厚度为 0.4mm 时可以得到最优的弯曲性能。

3 结论

通过准静态四点弯曲试验测试了泡沫铝夹芯梁的四点弯曲力学性能,研究了其破坏过程和失效模式,分析了不同芯层厚度和面层厚度对试件的弯曲强度和吸能能力的影响。试验结果表明,泡沫铝夹芯梁在四点弯曲作用下表现出了较好的抗弯承载力与吸能能力,试验过程大致经历三个阶段,呈现出整体弯曲破坏、局部屈曲破坏、整体屈曲破坏三种失效模式。

随着芯层厚度的增大,弯曲强度显著增大,但吸能效果却逐渐降低,结构的变形能力减小。随着面层厚度增加,夹芯梁的变形能力和弯曲强度逐渐增加,吸能能力也呈增长趋势,但是面层较厚时上面层

为整体屈曲失效,会影响其力学性能。在本试验参数范围内,芯层厚度 $H=25\text{mm}$,面层厚度 $t=0.4\text{mm}$ 时夹芯梁得到最优弯曲力学性能。

参考文献:

- [1] Raul R U. Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, A281:1-7.
- [2] Tbeals J, Thompson M S. Density gradient effectson aluminium foam compressive behavior[J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32:3593-3600.
- [3] Lu G, Yu T X. Energy absorption of structures and materials[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003.
- [4] Banhart J, Seeliger H W. Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and application[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2013, 10:793-802.
- [5] Mohan K, Hon Y T, Idapalapati S, et al. Failure of sandwich beams consisting of alumina face sheet and aluminum foam core in bending[J]. 2005, 409:292-301.
- [6] Xiaolei Zhu, Shigang Ai, Xiaofeng Lu, et al. Collapse models of aluminum foam sandwiches under static three-point bending based on 3D geometrical reconstruction[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 85:38-45.
- [7] 危民喜, 张军民. 复合夹芯板的制造简介[J]. 粘接, 2004, 25(5):50-57 (WEI Minxi, ZHANG Junmin. Introduction on composite sandwich panel fabrication[J]. *Adhesion in China*, 2004, 25(5):50-57 (in Chinese))
- [8] 张敏, 陈长军, 姚广春. 泡沫铝夹芯板的制备技术[J]. 材料导报, 2008, 22(1):85-89 (ZHANG Min, CHEN Changjun, YAO Guangchun. Manufacturing technology of Al foam sandwich[J]. *Materials Review*, 2008, 22(1):85-89 (in Chinese))
- [9] 蒂吉斯切 H P, 克雷兹特 B. 多孔泡沫金属[M]. 周芸 译. 北京:化学工业出版社, 2005:24-26 (Degischer H P, Kriszt B. Handbook of cellular metals[M]. ZHOU Yun, transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 24-26 (in Chiness))
- [10] Yan L L, Han B, Yu B, et al. Three-point bending of sandwich beams with aluminum foam-filled corrugated cores [J]. *Maerials and Design*, 2014, 60:510-519.
- [11] Guoyin Zu, Rihuan Lu, Xiaobing Li, et al. Three-point bending behavior of aluminum foam sandwich with steel panel[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23:2491-2495.
- [12] Yiming Jen, Fulung Teng, Tacheng Teng. Two-stage cumulative bending fatigue behavior for adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich panels[J]. *Materials and Design*, 2014, 54:805-813.
- [13] Theotokoglou E E, Tzourlomos I I. Crack kinking in sandwich structures under three-point bending [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2010, 53:158-164.
- [14] Bastawros A-F, Bart-Smith H, Evans A G. Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48:301-322.
- [15] Insu Jeon, Tadashi Asahina. The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell Al foam [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53:3415-3423.
- [16] Bele E, Bouwhuis B A, Codd C, et al. Structural ceramic coatings in composite microtruss cellular materials [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(15): 6145-6154.
- [17] Paul A, Seshacharyulu T, Ramamurty U. Tensile strength of a closed-cell Al foam in the presence of notches and holes[J]. *Scripta Materialia*, 1999, 40(7):809-814.
- [18] 敬霖, 王志华, 赵隆茂. 多孔金属及其夹芯结构力学性能的研究进展[J]. 力学与实践, 2015, 37(2):1-24 (JING Lin, WANG Zhihua, ZHAO Longmao. Advances in studies of the mechanical performance of cellular metals and related sandwich structures[J]. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(3):1-24 (in Chinese))
- [19] 金明江, 赵玉涛, 戴起勋 等. 泡沫铝/PC 树脂/铝合金叠层复合材料的制备与性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(4):584-587 (JIN Mingjiang, ZHAO Yutao, DAI Qixun, et al. Study on fabrication and properties of Al foams/PC resin/Al alloy laminated composites[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2005, 23(4):584-587 (in Chinese))
- [20] 辛亚军, 李慧剑, 赵旭亚 等. 环氧树脂/泡沫铝一体型复合夹层板压缩及弯曲试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30

- (4):421—428 (XIN Yajun, LI Huijian, ZHAO Xuya, et al. Compression and bending tests on integrated composite sandwich panel of epoxy resin/aluminum foam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4): 421—428 (in Chinese))
- [21] Dong Ruan, Guoxing Lu. Quasi-static indentation tests on aluminum foam sandwich panels[J]. Composite Structures, 2010, 92:2039—2046.

Experimental Study of Four-point Bending Performance of Aluminum Foam Sandwich Beam

XIN Ya-jun, XIAO Bo, CHENG Shu-liang, LI Hui-jian

(Key Laboratory of Mechanical Reliability for Heavy Equipments and Large Structures of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Quasi-static four-point bending experiment was carried out to investigate the flexural performance of aluminum foam sandwich beam. The destruction process, failure mode and typical force-displacement curve were studied. The impact of parameters such as core layer thickness and surface layer thickness on the flexural performance of aluminum foam sandwich beam was analyzed. Results indicate that the four-point bending destruction process of aluminum foam sandwich beam undergoes three stages and presents three failure modes: overall bending failure, local buckling failure and overall buckling failure, respectively. The impact of core layer thickness and surface layer thickness of sandwich beam on maximum bending bearing capacity and energy absorption capacity is very obvious. In the range of parameters used in this experiment, when the core layer thickness is 25mm and surface layer thickness is 0.4mm, the aluminum sandwich beam presents the optimal flexural performance.

Keywords: quasi-static four-point bending tests; aluminum foam; sandwich beam; failure mode; bending bearing capacity