

金属泡沫复合材料夹芯结构的压痕响应实验*

王新筑^{1,2,3}, 周雄³, 朱炳杰⁴, 彭向和³

- (1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025;
2. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;
3. 重庆大学航空航天学院非均质材料力学重庆市重点实验室, 重庆 400040;
4. 国防科技大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:金属泡沫夹芯结构是近年来新出现的一种明显具有结构和功能一体化特点的新型轻质材料,它在临近空间飞行器、航海及汽车等领域有着广阔的应用前景。以纤维增强复合材料面板、闭孔泡沫铝芯子为特征的复合材料夹芯结构为研究对象,对其在球形压头作用下的压痕响应、损伤模式、变形机制和失效机理进行理论分析和实验研究。研究发现,泡沫铝复合材料夹芯结构的压痕响应是夹芯结构的各个组成部分的响应、相互作用以及压头属性的综合作用结果。泡沫铝复合材料夹芯结构在球压头作用下的损伤模式为基体开裂、纤维断裂、层间分层、泡沫铝的屈服及剪切断裂五种失效模式。

关键词:金属泡沫;夹芯结构;压痕响应;损伤模式;失效机理

中图分类号:V258 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)01-189-05

Indentation experiment of composite sandwich structure with metal foam core

WANG Xinzhu^{1,2,3}, ZHOU Xiong³, ZHU Bingjie⁴, PENG Xianghe³

- (1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Chongqing Key Laboratory of Heterogeneous Material Mechanics, College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400040, China;
4. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Sandwich structure with metal foam core is a newly emerged sandwich structure in recent years, and will be widely used in near space flight vehicle, navigation and automobile fields due to its high flexural rigidity and strength, multifunction. Theoretical analysis and experimental studies on the indentation response, damage modes, deformation mechanism and failure mechanism of the composite sandwich panel with fibre-reinforced polymer face and aluminum foam core under the action of rigid spherical-end indenter were conducted. Study results show that the load-indentation response is a combined consequence of the individual responses of the sandwich components, their structural interactions and the indenter properties. The failure models of the sandwich panel under the spherical-end cylindrical indenter can be summarized as matrix cracking, fiber fracture, face/core debonding, the yield and shear of the aluminum foam.

Key words: metal foam; sandwich structure; indentation; damage mode; failure mechanism

典型的夹芯结构是由三个主要部分构成的,即两个强度和刚度较大的薄面板和隔开它们的较厚但重量轻的芯子,如图1所示。面板一般是通过黏接等方式和芯子连接的,从而可实现载荷在面板和芯子之间的传递,显然夹芯结构的弯曲刚度会远大于和面板同材料、夹芯结构同重量的单一实体板。夹芯结构的力学性能和面板与芯子的

材料参数及几何形状均息息相关,夹芯结构芯子的作用如图2所示,即所谓的夹芯效应^[1-2]。

目前出现了许多创新构型的结构形式,如金属泡沫夹芯结构^[3]和点阵夹芯结构^[4]等(如图3所示)。这些新型结构的提出,一方面是为了满足承载而具有的高比强、高比刚度,另一方面要求结构具有散热、隔热、吸能及降噪等功能。金属泡

* 收稿日期:2015-05-28

基金项目:汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金资助项目(20121110);汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金资助项目(31315010);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR14325501);中国博士后基金面上资助项目(2011M500067)

作者简介:王新筑(1976—),男,黑龙江友谊人,讲师,博士,硕士生导师,E-mail:wxx@cqu.edu.cn

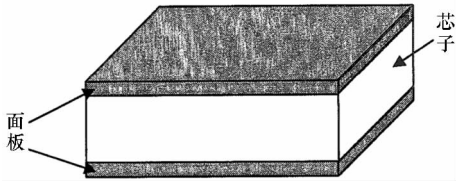


图 1 典型夹芯结构示意图 [1]

Fig. 1 Schematic of typical sandwich structure [1]

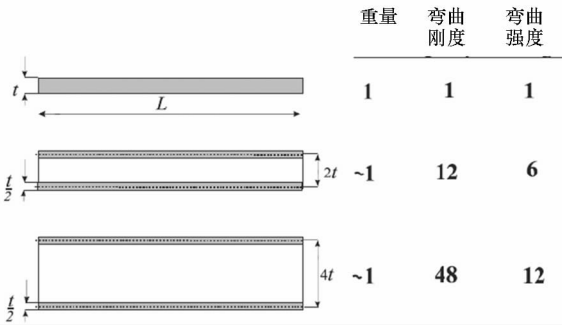
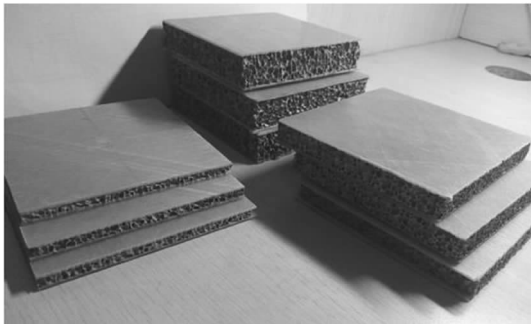


图 2 夹芯效应 [2]

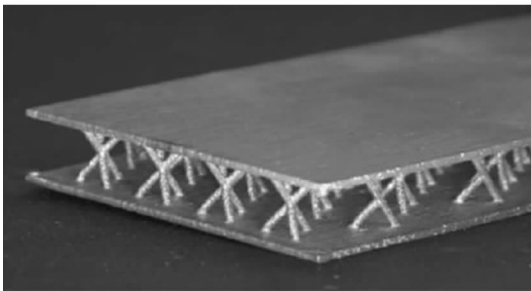
Fig. 2 Sandwich effect [2]

泡沫夹芯结构比目前广泛使用的蜂窝夹芯结构具有一系列突出优点,如其在工作温度超过 300 °C 时力学性能仍能保持稳定、可在潮湿环境中使用、对应变率不敏感、抗腐蚀性强、能加工成复杂形状、制造成本低廉、环保、符合国际发展趋势等。



(a) 金属泡沫夹芯结构 [2]

(a) Metal foam sandwich structure



(b) 点阵夹芯结构 [3]

(b) Lattice sandwich structure

图 3 多功能轻质复合材料结构

Fig. 3 Lightweight multi-functional composite structure

国外对金属泡沫夹芯结构的研究以 Gibson、Hutchinson 和 Fleck 等为代表。Gibson 等 [5] 研究了铝合金面板、铝合金泡沫夹芯结构在三点弯曲载荷下的失效模式,得到了失效载荷图,并将理论分析结果与实验结果及有限元模拟结果进行了对比,结果吻合较好。Hutchinson 等 [6] 从试验和数值角度研究了完好和含缺陷面板的金属泡沫夹芯梁在四点弯曲载荷作用下的失效机制及承载能力,给出了完好夹芯梁在不同尺寸下的失效图,揭示面板含缺陷会导致刚度急剧衰减。Harte 和 Fleck 等 [7] 通过实验方法对铝面板铝合金泡沫夹芯结构分别在四点弯曲和 S-N 疲劳曲线下的疲劳失效模式进行了研究,研究发现主要的失效模式有面板疲劳失效、芯子剪切及芯子凹陷等几种,此外,Chen 等 [8] 从理论上和试验上及有限元模拟中研究了不同芯子和面板厚度的泡沫夹芯梁在四点弯曲载荷作用下的失效模式,发现主要有面板屈服、凹陷及芯子的剪切破坏等几种。研究表明,结构的失效机制取决于几何尺寸和材料的选择,基于极限载荷理论分析所得到的结果与有限元模拟及实验值吻合得较好,其可被用来进行重量的最优化设计。

国内对金属泡沫夹芯结构的研究以东南大学、哈尔滨工业大学及中国科学技术大学为代表,其中,只有哈尔滨工业大学吴林志课题组研究的金属泡沫夹芯结构的面板为复合材料面板。东南大学何德坪课题组对金属泡沫夹芯结构的静力学性能做了很多工作 [9-10]。Wang 等 [11] 系统地研究了固支条件开孔泡沫夹芯在准静态载荷下的变形和失效模式,得到了较为完备的失效模式。

2003 年, Yu 等 [12] 利用 SHPB 装置研究了铝面板、开孔金属泡沫芯子夹芯结构在静载和动载弯曲作用下的失效机制,对比结果表明,由于大的局部应力集中和损伤,动载荷下梁的吸能性比静载下的低。王新筑等研究了金属泡沫复合材料夹芯结构分别在侧压和三点弯曲载荷下的失效模式和损伤机理 [13-14]。

1 压痕实验

所研究的泡沫铝复合材料夹芯板的面板为单层预浸料(高强玻璃纤维/环氧树脂—S2/TDE-85)按 [45°/ -45°/0°/ -45°/45°] 铺层角度手糊铺设而成,即对称均衡斜交层合板。该铺设可避免层合板在受载时发生翘曲,采用 45° 这个特殊角度,在工艺操作时还容易精确掌握与控制,且可获得较大的面内剪切刚度和强度。单层预浸料的厚度

为 0.2 mm, 芯子为熔体发泡法制备的闭孔泡沫铝, 其平均孔径为 2.0 mm 左右, 相对密度为 0.15, 厚度为 15 mm。面板和芯子是采用二次固化方法黏接在一起的。

半球形压头的材质为 A3 钢, 经过调质处理, 压头直径为 12.7 mm。为排除尺寸效应, 获得可信的实验结果, 试件的长和宽尺寸应是压头直径的 4~5 倍, 故金属泡沫复合材料夹芯板实验试件的最终尺寸为 60 mm × 60 mm × 17.2 mm, 每组 5 个试件。压痕实验采用的是 INSTRON5569 万能材料试验机, 在室温下以位移加载方式加载, 加载速率为 1 mm/min。试件放置在刚性平压卡具上, 相当于刚性基础。由试验机上的传感器自动记录载荷和压头位移。为减少压头和试件间的摩擦, 提高测量精度, 压头在加载前均采用润滑剂进行润滑。泡沫铝复合材料夹芯板在球形压头作用下的典型 P-h 响应曲线如图 4 所示。如要研究泡沫铝复合材料夹芯板压痕的微观变形机制, 就需对实验后的泡沫铝复合材料夹芯板试件的压痕部位进行细观分析, 因此采用金刚石片切割机将夹芯板试件的压痕变形区域沿着纵轴的方向剖开。将切开后的压痕变形区域用数码相机拍下, 如图 5 所示。

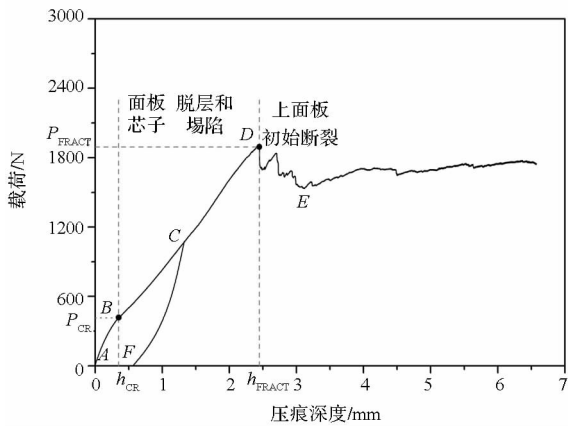
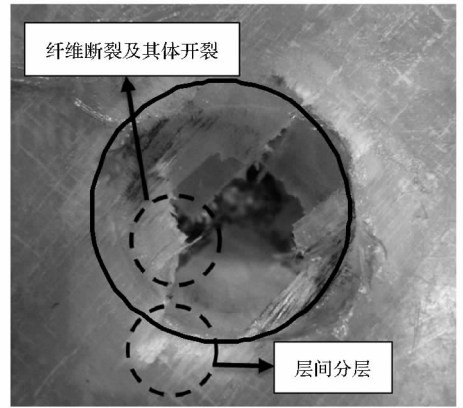


图4 泡沫铝复合材料夹芯板在球形压头作用下的典型 P-h 响应曲线

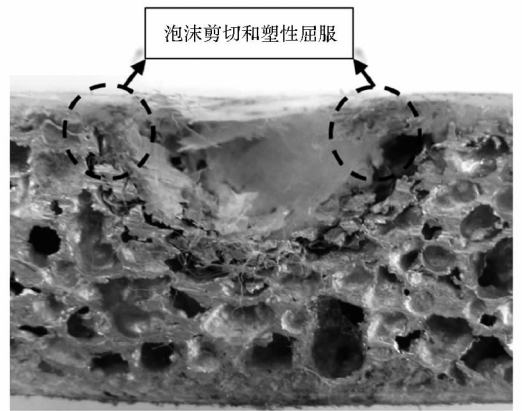
Fig. 4 Typical P-h curve of Al foam composite sandwich panel under the spherical-end indenter

2 分析与讨论

由图 4 可见, 在球压头作用下, 泡沫铝复合材料夹芯板的上面板首先发生弹性弯曲变形, 由于复合材料上面板向下方向的弯曲变形和复合材料上面板弯曲区域下方对应的泡沫芯子受到不均匀压缩载荷的作用, 位移场由复合材料面板和泡沫芯子属性及压头的形状共同决定。此时状态对应于图 4 压痕响应曲线中的弹性响应 AB 段。



(a) 俯视图
(a) Top view



(b) 纵向剖开横截面
(b) Cross-sectional views of the indentation

图 5 泡沫铝复合材料夹芯板在球形压头作用后的压痕照片

Fig. 5 Indentation macrographs of Al foam composite sandwich panel under the spherical-end indenter

当泡沫芯子发生屈服时, 它对面板的支撑力开始变小, 此时还可听见面板发生层间脱层时所发出的轻微响声, 上面板和压头对应的区域出现可视的局部发白现象, 复合材料面板出现层间脱层并不会显著降低整体面板的弯曲刚度。这时泡沫芯子也发生了塑性屈服。逐渐扩大的复合材料面板层间脱层使面板的强度和刚度逐渐降低, 同时由于泡沫芯子发生了屈服, 其对复合材料面板的支撑力变小, 因此可观察到过了屈服点 B (对应的压痕深度 h_{CR}) 后的曲线的刚度变小, 从而曲线出现转折。变形在本质上是要消耗能量的, 因此, 泡沫芯子的塌陷区的扩展成为主要能量吸收机制, 泡沫芯子塌陷的同时还伴随有面板层间脱层的扩展。所以在以载荷发生急剧下降为特征的面板初始断裂点 D 之前, 载荷一直是在增加的, BD 段曲线较光滑且呈线性, 这是由泡沫铝在球

压头作用下的弹塑性响应和此阶段接触力在面板上的分布较均匀所导致的。

在压痕深度达到 D 点所对应的压痕深度 h_{FRAC} 时,可听见压痕试样发出明显的响声,这是由于面板在球压头作用下,纤维发生脆性断裂而发出的声音。此时,上面板和球压头接触区内的刚度会急剧下降,所以载荷也会急剧下降。待上面板内的纤维完全断裂后,球压头几乎完全穿透了上面板,并直接作用于泡沫铝芯子上,这时夹芯板的压痕响应主要是由泡沫铝芯子所控制的。当压痕深度小于球压头的半径时,随着压痕深度的不断增加,面板层间脱层的扩展和纤维断裂仍在继续,同时球压头与泡沫铝芯子之间的接触面积也在不断地扩大,因此图中 E 点之后的压痕响应曲线也在不断地升高。但在卸载后,由于塌陷的泡沫铝芯子的松弛效应,剩余压痕会随着时间的增加而沿路径 CF 减小。复合材料面板和泡沫铝芯子塌陷区所分别产生的残余压痕组成了整体结构的残余压痕,如图 6 所示(图中 w_0 为面板的压痕深度)。由复合材料面板的弹性和泡沫铝芯子的弹塑性属性可知,在压痕载荷被撤除后,复合材料面板会倾向于回到它的初始位置,但由于已损伤的泡沫铝芯子产生了塑性变形,因此它会抵抗复合材料面板的回弹趋势。泡沫铝芯子所施加的力会把芯子往下拉,但复合材料面板的内在弯曲载荷会倾向于平衡泡沫芯子的这种作用,因此最终会在损伤的芯子和面板之间达到一种力的平衡状态,最终导致不可恢复的永久压痕的存在。较大的剩余压痕深度是由具有较高剩余刚度和拉伸强度的泡沫芯子所产生的。假如泡沫芯子发生了断裂,那么复合材料面板将回到它的初始位置,从而将面板下的损伤泡沫芯子所掩盖。另外,如果复合材料面板发生了断裂,由于其没有足够的局部刚度将自己拉回到原始状态,那么就一定会留下较大的剩余压痕深度。

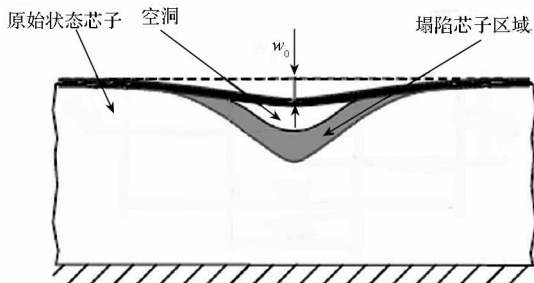


图 6 出现面芯间脱层的泡沫铝复合材料夹芯板的局部损伤示意图

Fig. 6 Schematic of local damage of Al foam composite sandwich panel with face/core debond

由图 5(a) 可知,当球形压头压入一定深度时,上面板在压头作用下发生断裂时的断口形貌近似为十字花型,图中实线圈所围成的区域表示压头与面板的接触面积,在实线圈和虚线圈之间的区域可以明显看到发白的现象,这是由于面板发生脱层而造成的。由图 5(b) 可清晰看到上面板发生了断裂、层间脱层以及上面板下方的泡沫孔的塑性坍塌。

泡沫铝复合材料夹芯结构的压痕响应是夹芯结构的各个组成部分的响应、相互作用以及压头属性的综合作用结果。通过在实验过程中的观察和图 5 压痕区域剖开的形貌特征,并结合复合材料的相关理论知识^[15] 可知泡沫铝复合材料夹芯板在球头圆柱形压头作用下主要有基体开裂、纤维断裂、层间分层及泡沫铝芯子的屈服和剪切断裂五种失效模式。

根据图 4 中上面板在断裂之前的加载段曲线特征,拟采用双段模型对泡沫铝复合材料夹芯板在上面板断裂前的加载压痕响应曲线段进行模拟,即:

$$P(u) = \begin{cases} C_0 h^\alpha & 0 \leq h \leq h_{CR} \\ C_1 + C_2 h^{C_3} & h_{CR} \leq h \leq h_{FRAC} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_0, C_1, C_2, C_3 和 α 分别为幂函数中的系数和指数。对于加载的弹性阶段, h_{CR} 为对应于泡沫铝发生初始损伤或弹性区结束时的临界压痕深度, h_{FRAC} 对应于夹芯结构上面板发生初始损伤时的压痕深度。弹性区的压痕响应经常可采用线性理论模型来进行描述,即 $\alpha = 1$, 虽然文献[16 - 17] 表明 $\alpha \neq 1$, 但实际压痕深度远大于面板厚度, 因此由 $\alpha = 1$ 所带来的误差可以忽略不计。

对于加载阶段响应曲线的描述,其关键是对临界压痕深度 h_{CR} 的确定。对于复合材料层合板,经常将发生不可恢复剩余压痕时的对应压痕深度作为 h_{CR} ^[18],但对于复合材料夹芯结构而言,虽然其芯子已出现了损伤,但复合材料面板还是可能会回弹到初始的位置,所以上述的方法不适合,因此,采用泡沫铝芯子的平压屈服强度作为判据是可行的,经计算,泡沫铝复合材料夹芯板在球头圆柱形压头作用下的 $h_{CR} = 0.34 \text{ mm}$ 。

在较低载荷时,泡沫铝芯子即会出现残存的永久压痕,因此卸载压痕响应曲线与加载压痕响应曲线有显著不同。

最早采用幂函数来描述钢板在球压头下的卸载压痕响应曲线的工作是 Crook 在 1952 年做的^[19]。由图 4 中的卸载曲线 CF 段可知,球压头作用下的典型卸载响应曲线也是符合幂函数属性

的,因此本文也采用幂函数模型的形式来描述泡沫铝复合材料夹芯板在其上面板断裂之前的卸载压痕响应曲线:

$$P_{UL}(h) = P_{MAX} \left[\frac{h - h_{RES}}{h_{MAX} - h_{RES}} \right]^m, \quad h_{CR} \leq h \leq h_{FRACT} \quad (2)$$

式中: P_{UL} 是对应于卸载段响应曲线的载荷; P_{MAX} 和 h_{MAX} 分别为卸载开始时对应的载荷和压痕深度; h_{RES} 为完全卸载后的残余压痕深度; m 为卸载段曲线的幂函数指数。

对比理论拟合曲线和实验曲线,如图7所示,二者的吻合程度较好,相关系数为0.9632。

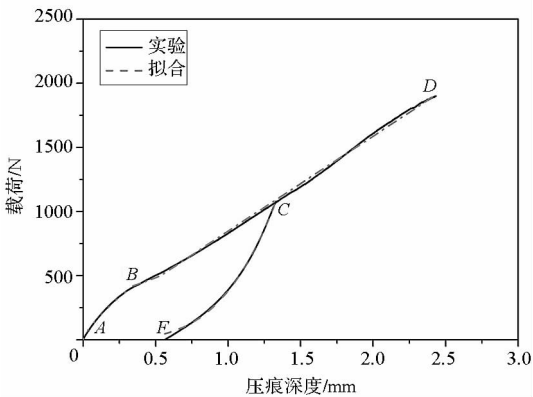


图7 泡沫铝复合材料夹芯板在球头圆柱形压头作用下的典型P-h响应曲线和理论拟合曲线

Fig.7 Typical P-h response curves and fitting curves of Al foam composite sandwich panel under spherical-end indenter

3 结论

准静态压痕响应曲线有四段典型特征,泡沫铝复合材料夹芯板的压痕响应是整体结构各个组成部分的响应、相互作用以及压头属性的综合作用结果。泡沫铝复合材料夹芯板在球头圆柱形压头作用下的损伤模式总计有基体开裂、纤维断裂、层间分层及泡沫铝芯子的屈服及剪切断裂五种。分别采用双段和幂函数模型对泡沫铝复合材料夹芯板在上面板断裂之前的加载和卸载压痕响应曲线段进行了模拟,模拟结果和实验曲线吻合较好。

参考文献 (References)

[1] Zenkert D. An introduction to sandwich construction [M]. London, UK; EMAS, 1997.
 [2] Allen H G. Analysis and design of structural sandwich panels [M]. Oxford, UK; Pergamont Press, 1969.
 [3] 王新筑. 金属泡沫复合材料夹芯结构的力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
 WANG Xinzhu. Research on the mechanical behavior of

composites sandwich structure with metallic foam core [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
 [4] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(16): 2331-2343.
 [5] McCormack T M, Miller R, Kesler O, et al. Failure of sandwich beams with metallic foam cores [J]. Solids and Structures, 2001, 38(28/29): 4901-4920.
 [6] Bart-Smith H, Hutchinson J W, Fleck N A, et al. Influence of imperfections on the performance of metal foam core sandwich panels [J]. Solids and Structures, 2002, 39(19): 4999-5012.
 [7] Harte A M, Fleck N A, Ashby M F. The fatigue strength of sandwich beams with an aluminium alloy foam core [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(6): 499-507.
 [8] Chen C, Harte A M, Fleck N A. The plastic collapse of sandwich beams with a metallic foam core [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(6): 1483-1506.
 [9] 赵龙, 何德坪, 单键. 高比强度高孔隙率泡沫铝合金三明治梁 [J]. 材料研究学报, 2004, 18(5): 485-493.
 ZHAO Long, HE Deping, SHAN Jian. Sandwich beams with high porosity and specific strength Al alloy foam core [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2004, 18(5): 485-493. (in Chinese)
 [10] 尚金堂, 何德坪. 泡沫铝层合梁的三点弯曲变形 [J]. 材料研究学报, 2003, 17(1): 31-38.
 SHANG Jintang, HE Deping. Deformation of sandwich beams with Al foam cores in three-point bending [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(1): 31-38. (in Chinese)
 [11] Jing L, Wang Z H, Zhao L M. Failure and deformation modes of sandwich beams under quasi-static loading [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 29/30/31/32: 84-88.
 [12] Yu J L, Wang X, Wei Z G, et al. Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminum-foam core [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(3): 331-347.
 [13] Wang X Z, Wu L Z, Wang S X. Buckling response of metallic foam composite sandwich panels subjected to edgewise compression [J]. Advanced Materials Research, 2009, 79/80/81/82: 1241-1244.
 [14] 王新筑, 吴林志, 孙雨果. 金属泡沫复合材料夹芯结构三点弯曲下的力学性能研究 [C]//中国力学学会成立50周年暨中国力学学会学术大会, 2007: 343-345.
 WANG Xinzhu, WU Linzhi, SUN Yugu. The mechanical behavior of composites sandwich structure with metallic foam core under three-point bending [C]//The 50th Anniversary of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2007: 343-345. (in Chinese)
 [15] Chung D D L. Composite materials: science and applications [M]. 2nd ed. London, UK; Springer, 2010.
 [16] Chen C F. Cylindrical indentation of orthotropic laminates on elastic foundation [J]. Journal of Composites Technology and Research, 2000, 22(3): 127-135.
 [17] Anderson T, Madenci E. Graphite/epoxy foam sandwich panels under quasi-static indentation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 67(4): 329-344.
 [18] Tan T M, Sun C T. Use of statical indentation laws in the impact analysis of laminated composite plates [J]. Journal of Applied Mechanics, 1985, 52(1): 6-12.
 [19] Crook A W. A study of some impacts between metal bodies by a piezoelectric method [C]// Proceedings of the Royal Society, London, UK, 1952: 212(A).