

泡沫铝夹芯板低速冲击性能研究

祖国胤, 刘佳, 李小兵, 孙世亮
(东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 对包套轧制及胶粘泡沫铝夹芯板进行了低速冲击试验, 分析了两种夹芯板在低速冲击下的力学响应及破坏形式. 结果表明, 两种结合界面的夹芯板都具有吸能特性, 但冶金结合夹芯板抗冲击的缓冲时间明显长于胶粘结合夹芯板. 随着加载冲量的增加, 冶金结合夹芯板的屈服载荷和平台载荷增加, 缓冲时间缩短, 抗冲击过程表现出明显的应变率效应. 冶金结合夹芯板破坏模式主要为芯层剪切、压实和面板塌陷.

关 键 词: 泡沫铝夹芯板; 低速冲击; 破坏模式; 极限载荷; 冶金结合

中图分类号: TG 146.21

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)11-1583-05

Research on the Low-Velocity Impact Performance of Aluminum Foam Sandwich Panels

ZU Guo-yin, LIU Jia, LI Xiao-bing, SUN Shi-liang

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZU Guo-yin, E-mail: zugy@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The low-velocity impact tests on the aluminum foam sandwiches (AFS) with a metallic bonding and adhesive bonding between face sheets and foam core were carried out. The mechanical response and failure mode of two kinds of AFS was studied. The results showed that the two kinds of AFS have the ability of energy absorption, but the buffer time of AFS with a metallic bonding between face sheets and foam core is longer than that of the adhesive structure. With the increase of load, the yield load and platform load of the AFS with a metallic bonding between face sheets and foam core increase and the buffer time reduces, showing an obvious strain rate effect during the test. The failure modes of the AFS with a metallic bonding between face sheets and foam core are core shear, core compaction and panel bending deformation.

Key words: aluminum foam sandwiches (AFS); low-velocity impact; failure mode; yield load; metallic bonding

泡沫铝夹芯板与泡沫铝材料相似, 在承受载荷时最显著的特性为应力-应变曲线表现出很长的平台区, 因而泡沫铝夹芯板可有效地吸收大量能量. 泡沫铝夹芯板既在宏观上具有夹芯结构的复合特征, 又克服了单一泡沫铝材料强度低的特点, 被认为是一种新型结构功能一体化复合材料^[1-2]. 目前, 泡沫铝夹芯板已在轨道交通、汽车制造、航空航天等领域得到应用^[3-4], 被认为是多孔泡沫金属材料规模化应用的重要方向^[5].

泡沫铝夹芯材料的制备方法主要包括胶粘法和粉末冶金发泡法, 工业上泡沫铝夹芯板的主要

制备方法是胶接法^[6]. 粉末冶金发泡工艺是近年来研究较为深入的泡沫铝夹芯板的主要制备方法^[7]. 泡沫铝夹芯板由于具有良好的吸能特性, 可承受一定的塑性变形, 并且不会出现类似实体结构材料承载时突然断裂的现象, 在吸能材料领域有着非常广阔的应用前景. 另一方面, 泡沫铝夹芯板具有高比刚度和高比强度, 可以在较小的结构质量下承受较高的载荷^[8]. 车体材料需要良好的抗外部撞击性能, 所以针对泡沫铝夹芯板抗冲击性能的研究是十分必要的.

国内外学者对泡沫铝夹芯材料的吸能和抗冲

击性能进行了大量研究,认为其理想吸能效率可达 0.8 以上,是一种优良的吸能材料,可有效衰减冲击波^[9]. 为了深入研究泡沫铝夹芯板在低速冲击载荷下的响应,本研究以胶粘法和包套轧制粉末冶金法制备的泡沫铝夹芯板为研究对象^[10],主要研究两种夹芯板在低速冲击载荷作用下的响应及冶金结合夹芯板在不同加载冲量下的载荷-位移和能量-时间曲线,并分析两种界面结合夹芯板在低速冲击后的破坏状态,以期为实际应用提供理论依据.

1 实验材料和实验方法

实验采用空气雾化法生产的 AlSi12 铝合金粉和氢化钛粉末. 包套轧制粉末冶金法使用的管材选用成形性好、耐蚀能力强的 A3003 铝合金管材,尺寸为长 120 mm,外径 40 mm,壁厚 3 mm. 胶粘夹芯板铝面板亦为 3003 合金板材. 粉末冶金法泡沫铝夹芯板制备工艺如图 1 所示.

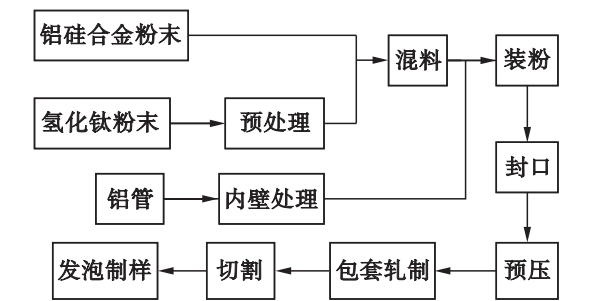


图 1 泡沫铝夹芯板制备工艺流程图
Fig. 1 Process diagram of aluminum foam sandwichs

用线切割机将发泡制得的泡沫铝切边后,用金属黏结 AB 胶将铝面板与切好的泡沫铝芯层粘合,在一定压力下使面板与芯层接触并在室温下保持 1 h. 两种结合方式的泡沫铝夹芯板检测试样尺寸均为 55 mm × 20 mm × 10 mm,试样宏观形貌如图 2 所示.

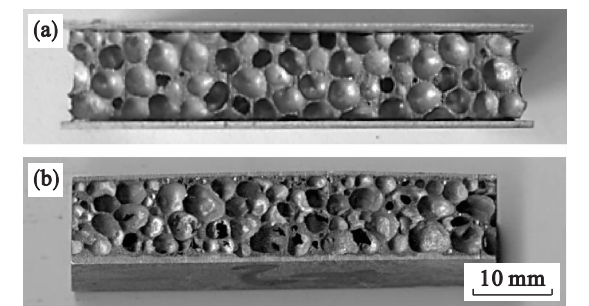


图 2 不同类型泡沫铝夹芯板
Fig. 2 AFS specimens with different bonding interface
(a) —胶粘夹芯板; (b) —冶金结合夹芯板.

低速冲击试验在 Instron Dynatup 9250 落锤冲击实验机进行. 通过控制落锤落下高度即可获得不同加载冲量,并通过信号和数据采集装置记录实验结果,绘制出不同加载冲量下载荷、能量和位移随冲击时间的变化曲线.

2 结果与讨论

2.1 泡沫铝夹芯板低速冲击力学性能

图 3 为两种结合方式泡沫铝夹芯板典型的载荷-时间-能量曲线. 在载荷-时间曲线上弹性阶段波动较为剧烈,这是落锤锤头与静止夹芯板的初始接触造成的. 当变形增加到一定程度后波动逐渐变小,说明锤头所受载荷逐渐稳定,从弹性弯曲波理论可知这与冲击开始时弹性弯曲波的弥散效应特点有关.

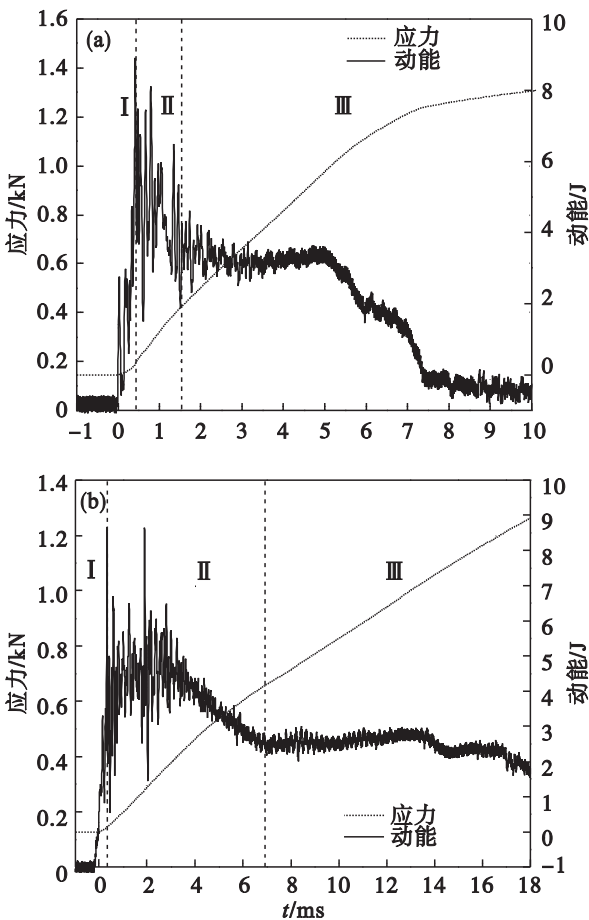


图 3 泡沫铝夹芯板典型载荷-时间-能量曲线
Fig. 3 Typical load-times-energy curve of AFS
(a) —胶粘夹芯板; (b) —冶金结合夹芯板.

从曲线可知,两种界面结合夹芯板变形过程均分为 3 个阶段. 第 I 阶段为弹性压缩阶段,此阶段为落锤锤头接触夹芯板表面的初始阶段,载荷迅速升高,且均在 1ms 以内便达到了弯曲极限载荷值. 而后进入第 II 阶段,即夹芯板失效破坏阶

段,胶粘结合夹芯板载荷值经过较短时间下降到平台应力区,而冶金结合夹芯板载荷下降速率明显低于前者,这与夹芯板在低速冲击下的失效模式有直接关系.在第Ⅲ阶段,两种夹芯板均具有明显的平台应力区,胶粘结合夹芯板平台应力区保持时间较短,大约保持 3.5 ms 后便开始下降到最低点,而冶金结合夹芯板平台应力区时间明显更长,大约保持 11 ms 后仍然有继续延长的趋势,冲击缓冲时间大约为前者的 3 倍.综上分析可知,两种结合界面夹芯板均具有抗冲击吸能特性,但冶金结合夹芯板缓冲时间明显更长,因此冶金结合夹芯板具有更好的缓冲特性.

图 4 为泡沫铝夹芯板冲击过程的载荷 - 位移曲线.第Ⅰ阶段为线弹性阶段,夹芯板承载的载荷值随着锤头的落下迅速升高.第Ⅱ阶段,两种界

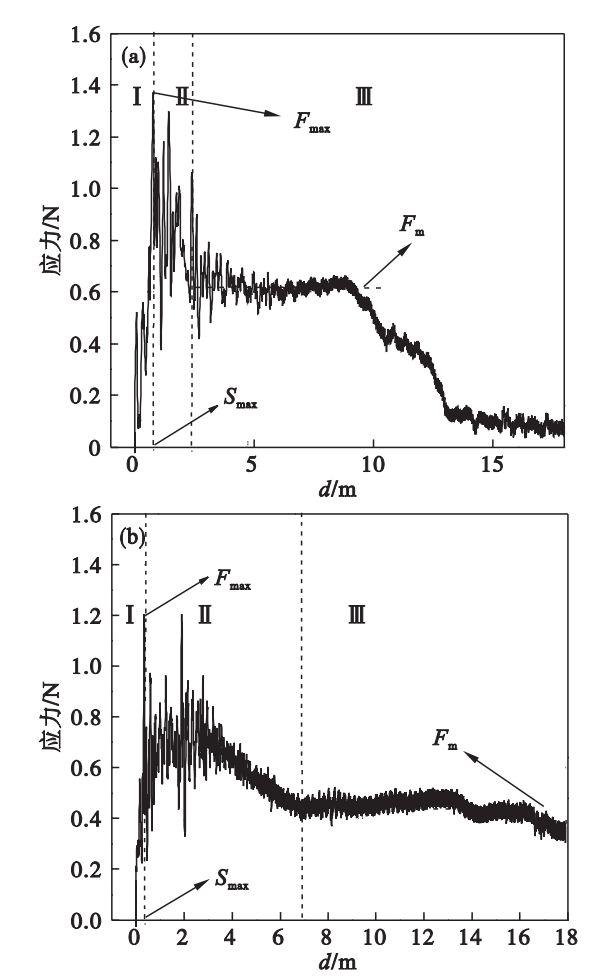


图 4 泡沫铝夹芯板典型载荷 - 位移曲线
Fig. 4 Typical load - deflection curve of AFS
(a) —胶粘夹芯板; (b) —冶金结合夹芯板.

面结合夹芯板载荷均随着失效的发生迅速降低到平台应力区,胶粘结合夹芯板下降持续位移较短,而冶金结合夹芯板下降到平台应力所需位移明显要大于前者.随后两种夹芯板进入第Ⅲ阶段,胶

粘结合夹芯板在锤头下降到 9 mm 左右时承载能力便开始逐渐减小,而冶金结合夹芯板当锤头下降到 18 mm 时仍然具有一定的承载能力.防护性材料通常是靠吸收外来撞击能量来起保护作用的,并使得作用在被防护材料上的力小于某个许可值.因此,平台区平均载荷值也是能量吸收的重要参数指标.图 4 表明,泡沫铝夹芯板经过很短的线弹性阶段后便进入平台应力区,因此在冲击过程中大部分冲击能量在平台应力区被夹芯板的塑性变形过程吸收,且该平台区间越长,则能够有效吸收的冲击能量也越多.

2.2 不同加载冲量时冶金结合夹芯板的低速冲击响应

对冶金结合夹芯板施加不同冲量,测得的载荷 - 位移曲线和能量 - 时间曲线如图 5 所示,并将实验结果列于表 1.随着加载冲量从 20 J 逐渐增加到 70 J,极限载荷从 1.093 kN 增加到 1.465 7 kN,增加了 34.1%,平台载荷从 0.409 3 kN 增加到 0.611 3 kN,增加了 49.4%.

随着加载冲量的增加,冲击载荷逐渐升高.这是因为铝面板是应变率敏感材料,且金属的塑性变形在微观机制上是源于位错滑动、晶界滑移等,而在室温条件下,位错滑动在材料塑性变形中起主导作用.冲击速度增大,使得位错等正常运动所需要的时间不足,造成位错等缺陷在晶界处大量塞积,因此需要更大的外加应力推动位错运动满足材料变形要求,最终导致材料强度上升.夹芯板芯层泡沫铝材料在受到冲击作用时,泡孔破裂,破裂后的泡壁相互交错,使得芯层进一步变形的阻力增大,这也是导致材料强度上升的另一个重要原因.

从图 5d 能量 - 时间曲线可知,随着加载冲量的增加,夹芯板能量吸收能力明显提升.这是因为随着冲击速度增加,芯层泡孔中的气体越难被挤出,将气体压出所做的功就越大,消耗的能量就越多,夹芯板材料吸收能量就越多.图中出现拐点与夹芯板变形过程密切相关.

导致应变率效应的主要原因是面板材料和芯层铝硅合金材料均为应变率敏感材料,而且在冲击过程中,泡孔中的气孔绝热压缩使应力升高.另外,泡孔结构存在微惯性效应,即致密度不同的组织,压力波传递的速度有所不同;在较疏松的组织中传递较快,在较致密的组织中传递较慢,所以冲击载荷在泡孔结构中的传播速度较快,这也是产生应变率效应的原因.从整个加载位移可知,在冲量为 20,50 J 时,加载位移可在较低应力水平上保持 18 mm 以上而不完全失效,在 70 J 冲量下加载

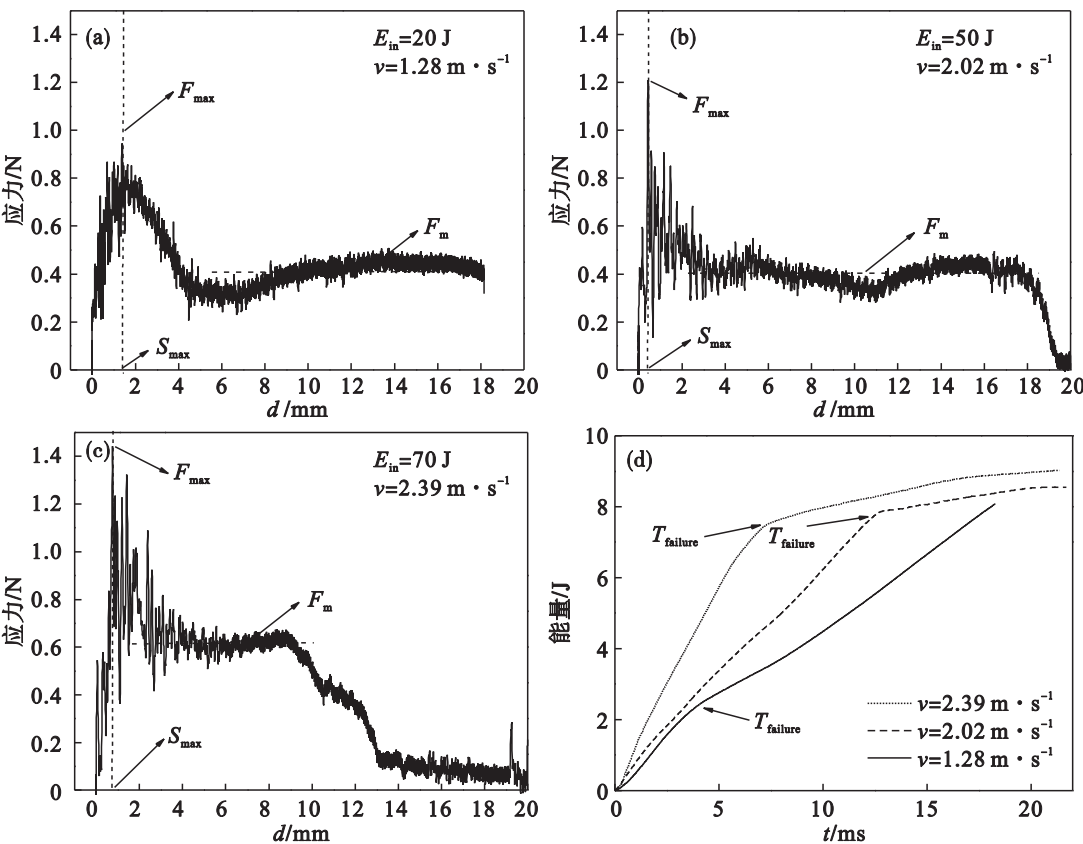


图 5 不同加载冲量时冶金结合泡沫铝夹芯板冲击实验的载荷 - 位移曲线和能量 - 时间曲线

Fig. 5 Load-deflection and energy-time curves of the AFS impact tests with metallurgical bonding interface under different impact energies

(a) — 冲量 20 J; (b) — 冲量 50 J; (c) — 冲量 70 J; (d) — 能量 - 时间曲线.

位移也可以保持在 13 mm 左右. 综上可知, 在各种加载冲量情况下, 冶金结合泡沫铝夹芯板均具有较长的平台应力区, 具有更好的缓冲特性. 从图 5d 能量 - 时间曲线可知, 最终能量吸收值随着加载冲量的增加而升高.

表 1 冶金结合夹芯板在 20, 50, 70 J 冲量下的冲击实验结果

Table 1 Average impact parameters for metallurgical bonding AFS at 20, 50 and 70J

加载冲量	最大应力	v	d	平均应力	破坏时间	能量
J	kN	($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	mm	kN	ms	J
20	1.093 0	1.385 5	1.378 4	0.409 3	18.267 8	8.081 9
50	1.378 8	0.286 9	0.426 1	0.399 4	12.808 2	8.549 4
70	1.465 7	0.436 4	0.777 2	0.611 3	7.379 2	9.026 5

2.3 不同加载冲量时两种泡沫铝夹芯板的破坏模式

图 6 为冶金结合泡沫铝夹芯板和胶粘泡沫铝夹芯板在不同冲量下的破坏形态. 从宏观外貌观察, 虽然加载冲量不同, 但两种夹芯板的破坏状态近似相同, 均为面板塌陷和芯层剪切失效. 从图中可以明显看出, 冶金结合泡沫铝夹芯板的界面结合非常牢固, 即使夹芯板整体发生了断裂, 面板和泡沫铝芯层之间的界面仍然未发生任何分层失效, 这表明冶金结合泡沫铝夹芯板的界面结合强

度较高, 泡沫铝芯层与面板结合紧密, 不会出现脱粘现象. 相反, 从图 6 中可以看出胶粘泡沫铝夹芯板在不同加载冲量下的破坏形式主要为泡沫铝芯层的整体剪切断裂, 而在落锤压下位置, 泡沫铝芯层与面板已发生弯曲脱粘失效, 因此胶粘泡沫铝夹芯板在承受冲击载荷时容易发生夹芯结构的整体失效, 从而导致自身较低的抗冲击能力. 冶金结合夹芯板随着加载冲量的增加, 中心局部化变形更明显, 塌陷程度更深. 剪切裂纹随着锤头的位移最初在泡沫铝一端扩展, 而后穿过锤头压实的泡

沫铝区域开始在另一端出现. 冲击变形造成剪切裂纹沿着芯层中性面扩展到夹芯板的边缘, 这一

扩展过程消耗了大量的冲击能量.

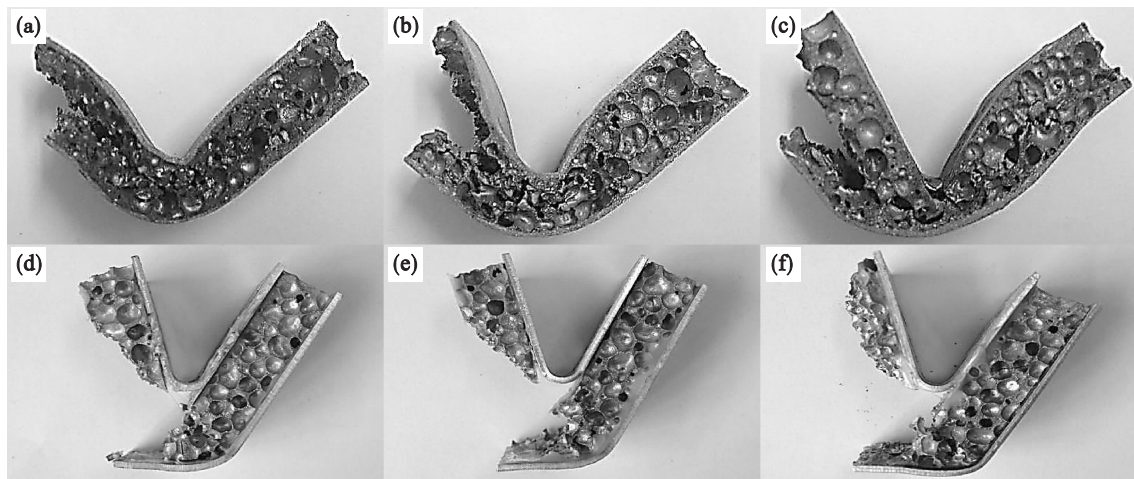


图 6 两种结合界面泡沫铝夹芯板在不同冲量下的冲击破坏模式

Fig. 6 Failure modes of the AFS with different impact energies

(a) — 冶金结合法, 冲量 20 J; (b) — 冶金结合法, 冲量 50 J; (c) — 冶金结合法, 冲量 70 J;

(d) — 胶粘法, 冲量 20 J; (e) — 胶粘法, 冲量 50 J; (f) — 胶粘法, 冲量 70 J.

3 结 论

1) 两种结合界面泡沫铝夹芯板的低速冲击载荷—位移曲线可分为 3 个阶段: 弹性压缩阶段、失效破坏阶段和平台应力阶段. 冶金结合泡沫铝夹芯板平台应力区间更长, 对冲击载荷具有更好的缓冲效果.

2) 不同加载冲量时的低速冲击试验表明, 随着加载冲量的增加, 冶金结合泡沫铝夹芯板的极限载荷和平台载荷值均升高, 缓冲时间有所缩短, 冲击过程中夹芯板表现出明显的应变率效应.

3) 两种泡沫铝夹芯板冲击后的破坏模式有很大不同, 胶粘结合夹芯板的破坏模式主要为泡沫铝芯层剪切断裂和芯层与面板脱粘, 而冶金结合夹芯板破坏形式主要为芯层剪切压实和面板塌陷, 夹芯板整体结构保持良好, 因此更适合用作抗冲击防护材料.

参考文献:

- [1] Palano F, Nobile R, Dattoma V, et al. Fatigue behaviour of aluminium foam sandwiches [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2013, 36(12): 1274–1287.
- [2] Jasion P, Magnucki K. Global buckling of a sandwich column with metal foam core [J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2013, 15(6): 718–732.
- [3] Mu Y L, Yao G C, Liang L S, et al. Deformation mechanisms of closed-cell aluminum foam in compression

[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 63(6): 629–632.

- [4] Basturk S B, Tanoglu M. Development and mechanical behavior of FML/aluminium foam sandwiches [J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 20(5): 789–802.
- [5] Kim Y C, Cho J U. Comparative study between impact behaviors of composites with aluminum foam and honeycomb [J]. *Current Nanoscience*, 2014, 10(1): 23–27.
- [6] Rajaneesh A, Sridhar I, Rajendran S. Impact modeling of foam cored sandwich plates with ductile or brittle faceplates [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5): 1745–1754.
- [7] 梁晓军, 朱勇刚, 陈锋. 等. 泡沫铝芯三明治板的粉末冶金制备及其板/芯界面研究 [J]. *材料科学与工程学报*, 2005, 23(1): 77–80.
(Liang Xiao-jun, Zhu Yong-gang, Chen Feng, et al. Research on preparation of aluminum foam sandwich by powder metallurgical method and face plate/foam core interfacial microstructure [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2005, 23(1): 77–80.)
- [8] Mohan K Y, Tick H, Idapalapati S, et al. Impact response of aluminum foam core sandwich structures [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 529(1): 94–101.
- [9] Jing L, Xi C Q, Wang Z H, et al. Energy absorption and failure mechanism of metallic cylindrical sandwich shells under impact loading [J]. *Materials & Design*, 2013, 52(3): 470–480.
- [10] 宋滨娜, 祖国胤, 姚广春, 等. 包套轧制粉末冶金法制备泡沫铝三明治板 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(2): 277–280.
(Song Bin-na, Zu Guo-yin, Yao Guang-chun, et al. Preparation of aluminum foam sandwich panels by powder-filled tube rolling [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2011, 32(2): 277–280.)