

文章编号: 1004-0609(2004)03-0385-06

高比强多孔铝合金中空层合圆管的压缩性能^①

李鲲鹏, 何德坪

(东南大学 材料科学与工程系, 南京 210096)

摘 要: 研制了高比强多孔铝合金中空层合圆管, 测试了层合圆管的压缩应力—应变曲线, 并研究了其性能。结果表明: 层合圆管的压缩变形过程经历 3 个阶段, 即线弹性阶段、屈服平台阶段和紧实阶段; 紧实应变可用多孔铝合金的紧实应变表示; 由应力—应变曲线计算出层合圆管的能量吸收性能, 发现其吸收能量超过铝合金空管和中空多孔铝合金吸收能量之和; 同时其吸能效率高于 60%。

关键词: 高比强多孔铝合金; 中空层合圆管; 压缩; 吸能能力; 吸能效率

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Performance of hollow cylindrical sandwich with high specific strength porous Al alloy core under compression

LI Kunpeng, HE Deping

(Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The hollow cylindrical sandwich with high specific strength porous Al alloy core was prepared. The stress—strain curves of the sandwich were measured and the properties of hollow cylindrical sandwich were investigated. The results show that the stress—strain curves of the sandwich consist of elasticity, collapse plateau and densification segments. The densification strain of the hollow cylindrical sandwich can be expressed by using that of porous Al alloy. The energy absorption property was obtained from the stress—strain curves. The energy absorption capacity is higher than the sum of that of the Al alloy tube and the porous Al alloy core. The energy absorption efficiency is higher than 60%.

Key words: high specific strength porous Al alloy; hollow cylindrical sandwich; compression; energy absorption ability; energy absorption efficiency

以高孔隙率为结构特征的超轻型金属结构(包括通孔多孔铝和闭孔胞状铝), 采用少量金属实现了结构材料的轻质多功能化, 包括: 轻质、高比强、阻尼、能量吸收、降噪(吸声、隔声、消声)、隔热、阻燃等多种物理性能, 成为 21 世纪前沿热点材料之一, 发展高比强超轻型金属结构及其层合结构设计^[1~10]成为当前新趋势。20 世纪 50 年代以来, 胞状铝一直作为研究重点, 近年由于高技术需求使得高比强多孔铝合金成为当前前沿研究领域的重点。

为提高能量吸收性能, 文献[5]研究了闭孔胞状铝的层合圆管的能量吸收性能, 但由于设计不如意, 因而压缩能量吸收曲线波动较大。文献[7]改进了设计方法, 使高比强闭孔泡沫铝合金层合圆管获得了较为平稳的压缩能量吸收性能。

本文作者在 Al-Si 系多孔铝合金制备的基础上, 通过加入合金元素, 制备出高强度的新型多孔铝合金, 并结合工程实际的需要, 研制了多孔铝合金中空层合圆管。研究了该结构在静态压缩条件下

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50231010; 90205005)

收稿日期: 2003-05-26; 修订日期: 2003-10-13

作者简介: 李鲲鹏(1977-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 何德坪, 教授; 电话: 025-83794119; E-mail: dphe@seu.edu.cn

应力—应变(σ — ϵ)曲线及形变过程、吸能能力、吸能效率。

1 实验

采用渗流法制备了孔结构均匀、孔径 d 为 3 mm、孔隙率 θ 为 61%~67% 的多孔铝合金试样, 采用线切割加工成实验试样。考虑到实际应用要求, 与文献[7]不同, 本文研究了如下尺寸的多孔铝合金中空层合圆管的压缩能量吸收性能: 内半径(R_1)有 2 种, 分别为 9 mm 和 6 mm, 外半径(R_2)为 17.5 mm, 高(h)为 60 mm 的多孔铝合金中空圆柱试样, 用作中空层合结构的夹芯; 加工了壁厚(t)分别为 0.5 和 1 mm, 内半径(R)为 17.5 mm, 高 60 mm 的铝合金圆管作为中空层合结构的套管。将加工好的套管和多孔铝合金夹芯组合起来得到中空层合圆管试样(如图 1 所示)。试样在 WD-10A 型万能试验机上进行压缩试验, 其分辨率为 100 N, 量程为 100 kN, 以 2 mm/min 的压缩速率进行单向压缩, 将加载量和压缩位移量通过传感器及电阻应变仪, 输入到 x — y 函数记录仪, 采集压力—位移曲线, 数据处理后得到 σ — ϵ 曲线。根据 σ — ϵ 曲线可得到表观弹性模量、屈服应力、吸能能力和吸能效率。

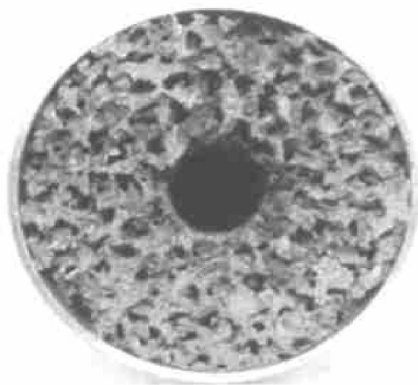


图 1 中空层合圆管结构

Fig. 1 Structure of hollow cylindrical sandwich with porous Al alloy

2 结果与讨论

2.1 中空层合圆管结构的压缩变形过程

中空层合圆管的压缩变形随时间的变化过程如图 2 所示。可以看出, 最开始在顶端形成环状的屈圈, 当面板材料达到屈服应力 σ_s 时, 面板顶部先屈

服。屈圈之后是面板和夹芯的第一次紧实阶段, 随着变形的增加, 紧接着又是面板形成屈圈、面板屈曲、面板和夹芯的紧实等过程, 直到整个样品被压实。

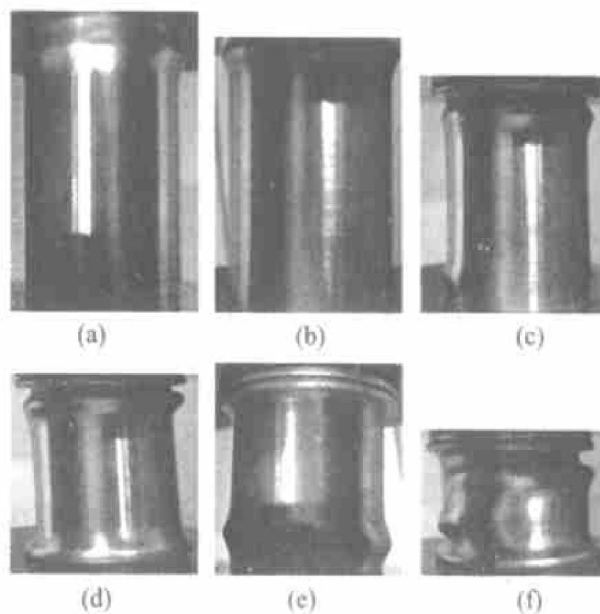


图 2 中空层合圆管压缩过程

Fig. 2 Compressive process of hollow cylindrical sandwich

(a) —35 s; (b) —55 s; (c) —300 s;
(d) —480 s; (e) —550 s; (f) —700 s

2.1.1 中空层合圆管和中空多孔铝合金在静态压缩下的 σ — ϵ 曲线及其比较

由图 3 可看出, 这种中空层合圆管结构的 σ — ϵ 曲线表现为 3 个阶段, 即线弹性阶段、屈服平台阶段和紧实阶段。多孔铝合金中空层合圆管的弹性模量和屈服应力比相同孔隙率的中空多孔铝合金明显提高。随着多孔铝合金夹芯孔隙率的减小, 中空层合圆管结构的 σ — ϵ 曲线上移, 屈服强度 σ_s 增加。多孔铝合金内部为三维网状结构, 各个通孔之间有基体金属骨架连接, 孔隙率高, 金属骨架相对细小, 则强度低; 孔隙率低, 其骨架相对粗大, 则强度高。多孔铝合金夹芯的孔隙率对于中空层合圆管结构的强度有直接影响。

2.1.2 线弹性变形阶段和表观弹性模量

中空层合圆管的压缩曲线开始表现为线弹性阶段。在此区间应力与应变呈线性关系, 该阶段的应变值很小, 均小于 5%。 σ — ϵ 曲线表现为直线, 直线斜率为多孔铝合金中空层合圆管的表观弹性模量。弹性变形过程中, 面板和多孔铝合金夹芯弹性弯曲, 可以把这种结构看成简单的单向复合材料^[11], 则有

$$E = E_f \varphi_f + E_c \varphi_c \quad (1)$$

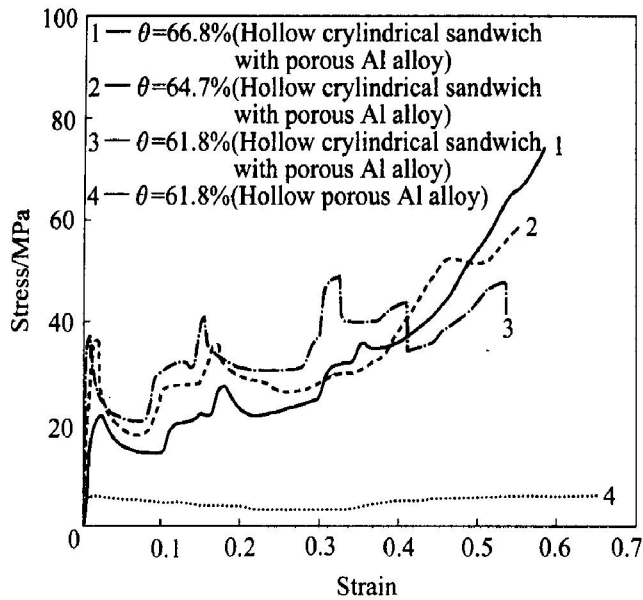


图3 夹芯孔隙率不同的多孔铝合金中空层合圆管和中空多孔铝合金的压缩 σ - ε 曲线

Fig. 3 Compressive σ - ε curves of hollow cylindrical sandwich with different core porosity and hollow porous Al alloy

式中 E 为多孔铝合金中空层合圆管的表观弹性模量; E_f , φ_f 和 E_c , φ_c 分别为面板材料和夹芯材料的弹性模量和体积分数。

多孔铝合金夹芯的弹性模量与基体材料之间的关系为^[1]

$$E_c = (0.1 \sim 4.0) (\rho_f / \rho_s)^2 E_f \quad (2)$$

式中 ρ_f 为多孔铝合金的密度; ρ_s 为实体铝合金的密度(由于多孔铝合金的基体材料和面板材料相同, 所以用 E_f 表示)。

结合式(1)、(2)可得到该中空层合圆管弹性模量和面板弹性模量之间的关系为

$$E/E_f = \varphi_f + (0.1 \sim 4.0) (\rho_f / \rho_s)^2 \varphi_c \quad (3)$$

2.1.3 塑性变形阶段及其影响因素

当弹性应变增大到屈服应变时, 中空层合圆管的 σ - ε 曲线进入塑变屈服阶段, 迅速下降, 这主要是面板材料屈曲之后所能承受的载荷突然减小, 此时只靠夹芯及面板与夹芯之间的相互作用承载。随着应变的增加, 屈曲被压实, 第2次弹性阶段出现, 应力增大, 再次达到另一个高应力值之后, 应力突然减小, 在 σ - ε 曲线上表现为锯齿状。

图4表明, 夹芯孔隙率相同时, 随夹芯中孔半径的减小, 中空层合圆管的 σ - ε 曲线上移, 屈服阶段波动变得更为剧烈。

图5表明, 夹芯孔隙率相同时, 随面板厚度的增加, 中空层合圆管的 σ - ε 曲线大幅度上移, 压缩强

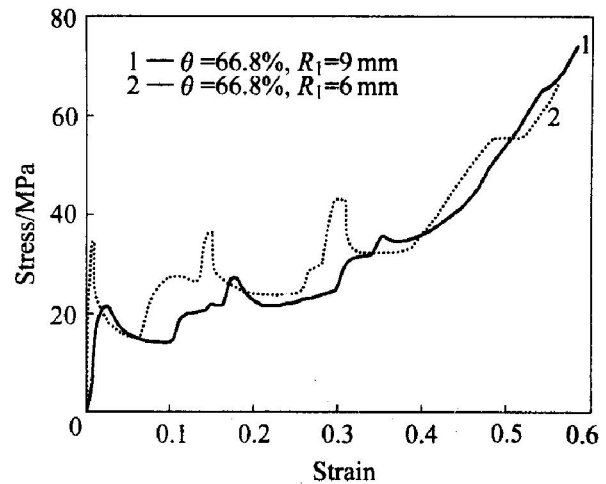


图4 夹芯孔隙率相同、夹芯中孔半径不同的多孔铝合金中空层合圆管压缩 σ - ε 曲线

Fig. 4 compressive σ - ε curves of hollow cylindrical sandwich with same core porosity and different core inside radius

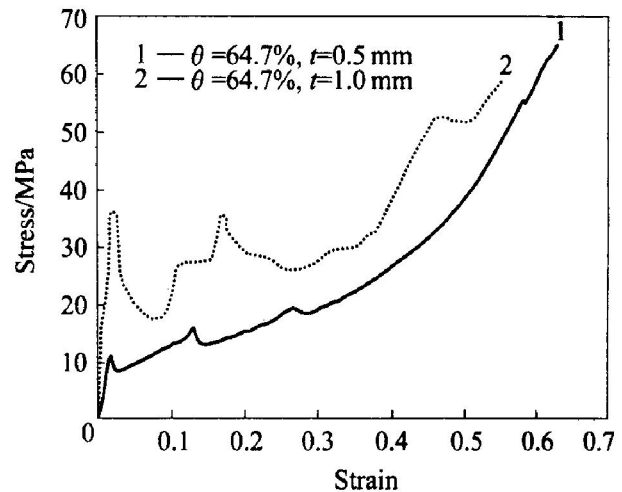


图5 夹芯孔隙率相同、面板壁厚不同的中空层合圆管压缩 σ - ε 曲线

Fig. 5 Compressive σ - ε curves of hollow cylindrical sandwich with same core porosity and different face sheet thickness

度提高很多, 但屈服阶段波动变得更为剧烈。

因而, 在研制中空层合圆管时, 合适地选取夹芯的中孔半径和面板的厚度可以使压缩 σ - ε 曲线避免大的波动。

2.1.4 致密化阶段

随着应变继续增加, 面板被压缩到各个屈圈相互接触, 夹芯孔壁开始压溃至互相接触, 此时几乎是对样品基体材料的压缩, 于是导致应力的迅速上升, 从而进入致密化阶段。高比强多孔铝合金中空层合圆管在达到紧实应变之前, σ - ε 曲线的平台段应变范围很宽, 和多孔铝合金的 σ - ε 曲线的应

变范围区别很小, 因此中空层合圆管的紧实应变 ε_D 可用多孔铝合金的紧实应变 $\varepsilon_D^{[1]}$ 来表示, 即:

$$\varepsilon_D = (0.9 \sim 1.0) [1 - 1.4 \rho_f / \rho_s + 0.4 (\rho_f / \rho_s)^3] \quad (4)$$

2.2 中空层合圆管的压缩吸能性能

高比强多孔铝合金在塑性变形阶段, 由于通孔之间的金属骨架的屈服、断裂, 多孔铝合金可以在应力变化不大的范围内产生很大的应变, 从而吸收大量的能量。中空层合圆管结构采用高强度的基体材料作面板来提高其抗压能力, 同时保持其紧实应变不变, 从而提高了能量吸收能力。

采用吸能能力和吸能效率来表征中空层合圆管的吸能性能。以中空层合圆管的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线与应变轴之间所包围的面积来表示其单位体积所吸收的能量 $W^{[12, 13]}$, 用吸能能力与对应的最大应力和应变的乘积的比值来表示其吸能效率 $E^{[14]}$, 用公式表示为

$$W = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \quad (5)$$

$$E = \frac{\int_0^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon}{\sigma_{\max} \cdot \varepsilon_{\max}} \quad (6)$$

根据式(5)和(6), 用数学软件对中空层合圆管的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线进行逐点积分, 可获得压缩过程中对应于不同应变 ε 的吸能能力和吸能效率曲线 ($W-\varepsilon$, $E-\varepsilon$)。

图6表明, 多孔铝合金中空层合圆管在线弹性阶段, 吸能能力增加不大, 能量吸收效率迅速增加; 在塑性变形段的初期, 能量吸收效率达到峰值, 随着应变的增加, 吸能能力继续增加, 能量吸收效率在宽范围 ($0.04 \leq \varepsilon \leq 0.40$) 维持在一个较高水平 (60% 以上)。在紧实阶段, 随着应变的增加, 应力继续增加, 能量吸收效率降低。

2.2.1 不同组合的中空层合圆管压缩吸能性能比较

由图6可见, 多孔铝合金中空层合圆管的吸能效率随夹芯孔隙率的增加变化不大, 吸能能力随夹芯孔隙率的减小而增加。

由图7可见, 夹芯孔隙率相同时, 夹芯中孔半径小的多孔铝合金中空层合圆管的压缩吸能能力更强, 吸能效率相近。

由图8可见, 夹芯孔隙率相同时, 面板厚的多孔铝合金中空层合圆管的压缩吸能能力更强, 吸能效率相近。

2.2.2 多孔铝合金中空层合圆管、多孔铝合金夹芯和铝合金空管压缩吸能性能比较

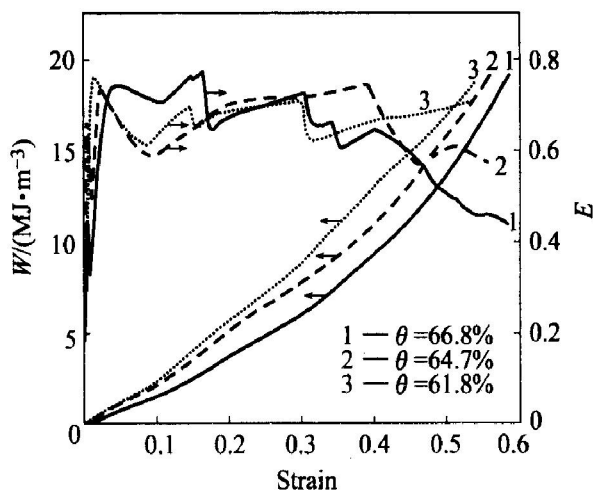


图6 夹芯孔隙率不同的中空层合圆管的压缩吸能能力和吸能效率曲线

Fig. 6 Compressive energy absorption ability and energy absorption efficiency curves of hollow cylindrical sandwich with different core porosity

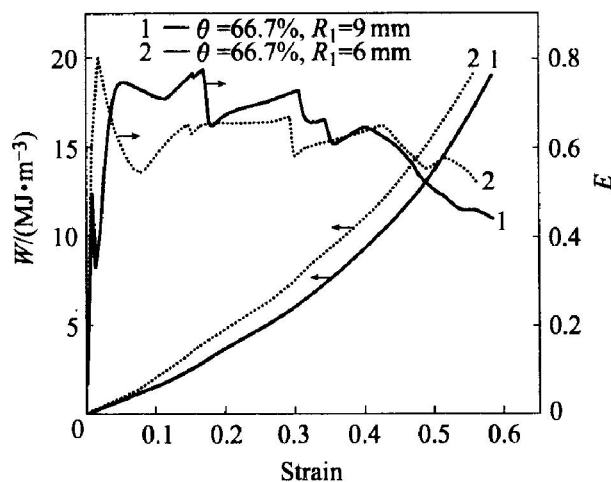


图7 夹芯孔隙率相同、夹芯中孔半径不同的中空层合圆管的压缩吸能能力和吸能效率

Fig. 7 Compressive energy absorption ability and energy absorption efficiency curves of hollow cylindrical sandwich with same core porosity and different core inside radius

从图9可以看出, 中空层合圆管结构的力-位移曲线与 $\sigma-\varepsilon$ 曲线具有相似性, 同样表现为3个阶段, 即线弹性阶段、屈服平台阶段和紧实阶段。力-位移曲线与位移轴之间包含的面积就是其所吸收的能量 $W_v^{[5]}$, 用公式表示为

$$W_v = \int_0^{S_{\max}} F dS \quad (7)$$

式中 $S_{\max}$ 为位移极值; F 为压缩力; S 为位移。由图9可见, 曲线1为多孔铝合金夹芯的力-位移曲线。

位移曲线, 曲线 2 为铝合金空管的力—位移曲线, 曲线 3 为曲线 1、曲线 2 两者的叠加曲线, 但实际测得的中空层合圆管的力—位移曲线 4, 远高于曲线 3。增加的能量吸收部分为 W_v^{Int} , 是由于压缩过程中铝合金空管和多孔铝合金夹芯之间的相互作用。中空层合圆管结构吸收的能量用公式表示为

$$W_v^{Filled tube} = W_v^{Tube} + W_v^{Porous} + W_v^{Int} \quad (8)$$

多孔铝合金夹芯对于管壁提供内部的支撑, 缩短了管壁单个屈曲的压缩长度, 增加了单位长度内

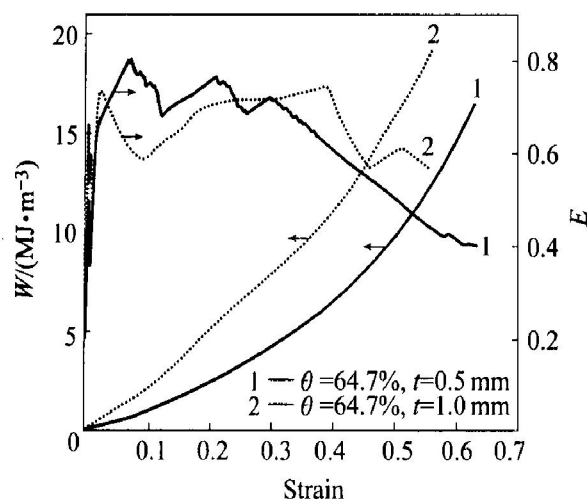


图 8 夹芯孔隙率相同面板壁厚不同的中空层合圆管的压缩吸能能力和吸能效率

Fig. 8 Compressive energy absorption ability and energy absorption efficiency curves of hollow cylindrical sandwich with same core porosity and different face sheet thickness

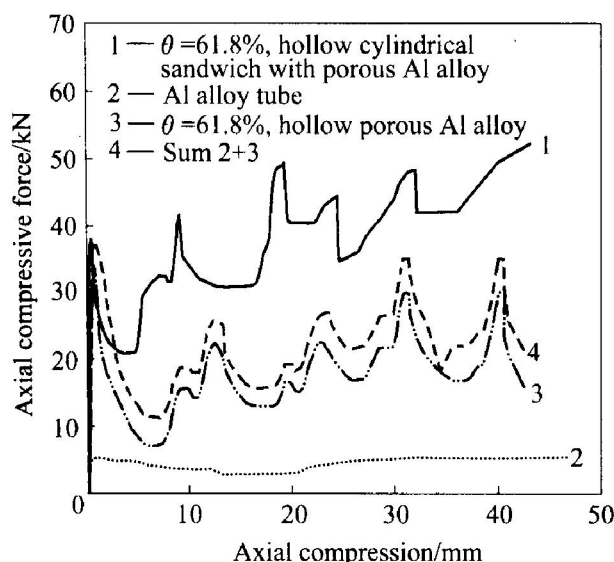


图 9 多孔铝合金中空层合圆管、中空多孔铝合金夹芯和铝合金空管的力—位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves for hollow cylindrical sandwich with porous Al alloy, Al alloy tube and hollow porous Al alloy

的屈曲数, 从而吸能能力得到较大提高。

由图 10 可见, 多孔铝合金中空层合圆管比多孔铝合金夹芯的吸能效率略低, 但是较为稳定, 同时吸能能力有大幅度提高, 是多孔铝合金夹芯吸能能力的 8 倍左右。在飞机和汽车等的结构设计中, 设计人员优先考虑采用单位质量吸能能力(比吸能)大, 吸能效率高的吸能元件^[15]。多孔铝合金中空层合圆管克服了多孔铝合金吸能能力低而吸能效率高的矛盾, 在保持轻质、高的吸能效率(> 60%) 同时, 大幅提高吸能能力, 符合结构设计中吸能元件的使用要求。

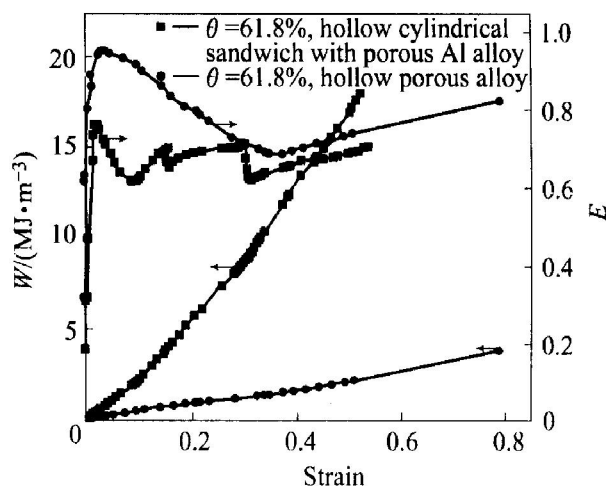


图 10 中空层合圆管和多孔铝合金夹芯的吸能能力和吸能效率

Fig. 10 Compressive energy absorption ability and energy absorption efficiency curves of hollow cylindrical sandwich and hollow porous Al alloy core

3 结论

1) 在单向压缩条件下, 高比强多孔铝合金中空层合圆管的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线由线弹性变形阶段、屈服平台阶段和紧实阶段组成。

2) 高比强多孔铝合金中空层合圆管的弹性模量和屈服应力比多孔铝合金明显提高。紧实应变可以用多孔铝合金的紧实应变来表示。

3) 高比强多孔铝合金中空层合圆管的压缩吸能能力大大高于多孔铝合金夹芯, 超过多孔铝合金夹芯和铝合金空管吸收能量之和, 同时保持高的吸能效率(> 60%)。

REFERENCES

- [1] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. Metal

- Foams: A Design Guide[M]. USA: Butterworth-Heinemann Press, 2000. 1-5.
- [2] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids Structures and Properties(second edition) [M]. Great Britain: Cambridge University Press, 1999. 1-528.
- [3] WU Zhao-jin, HE De-ping. Changes in porosity of foamed Al during solidification[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(18): 1667-1672.
- [4] YANG Dong-hui, HE De-ping. Porosity of porous Al alloy[J]. Science in China(B), 2001, 44(4): 411-419.
- [5] Haberling C, Haldenwanger H G. Aluminum foams for energy absorbing structures under axial loading[A]. John B. Metal Foams and Porous Metal Structures[C]. Germany: Verlag MIT, 2001. 37-40.
- [6] ZHENG Ming-jun, HE De-ping, DAI Ge. Additional force field in the cooling process of the cellular Al alloy[J]. Science in China(B), 2002, 45(6): 598-607.
- [7] 席国胜, 何德坪, 李鲲鹏. 高比强泡沫铝合金中空层合圆管的性能[J]. 材料研究学报, 2003, 17(2): 162-168.
- XI Guo-sheng, HE De-ping, LI Kun-peng. Performance of hollow cylindrical sandwich with high specific strength foamed Al alloy core[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(2): 162-168.
- [8] 郑明军, 何德坪, 陈 锋. 多孔铝合金的压缩应力-应变特征及能量吸收性能[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 81-85.
- ZHENG Ming-jun, HE De-ping, CHEN Feng. Compressive stress-strain behavior and energy absorption capability of porous aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 81-85.
- [9] 郑明军, 何德坪. 新型轻质高比强胞状铝合金压缩及能量吸收性能[J]. 材料研究学报, 2002, 16(5): 473-478.
- ZHENG Ming-jun, HE De-ping. Deformation and energy absorption characteristic of high strength cellular Al alloy[J]. Chinese Journal of Material Research, 2002, 16(5): 473-478.
- [10] Gradinger R, Seirzberger M, Rammerstorfer F G, et al. Aluminum foam filled steel tubes as composite shock absorbers[A]. John B. Metal Foams and Porous Metal Structures[C]. Germany: Verlag MIT, 2001. 313-316.
- [11] 万志敏, 桂良进, 谢志民, 等. 复合材料圆柱壳的能量吸收能力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(3): 80-83.
- WAN Zhi-min, GUI Liang-jin, XIE Zhi-min, et al. Energy absorption ability of cylindrical composite shells[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(3): 80-83.
- [12] McIntyre A, Anderton G E. Fracture properties of a rigid polyurethane foam over a range of densities[J]. Polymer, 1979, 20: 245-249.
- [13] Ashby M F. The mechanical properties of cellular solids[J]. Metallurgical Transaction A, 1983, 14: 1753-1758.
- [14] Miltz J, Gruenbaum G. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements[J]. Polym Eng Sci, 1981, 21: 1007-1013.
- [15] 万志敏, 赵桂范, 杜星文. 复合材料结构的能量吸收[J]. 材料科学与工艺, 2001, 9(3): 247-249.
- WAN Zhi-min, ZHAO Gui-fan, DU Xing-wen. Energy absorption in structures of composite materials[J]. Materials Science and Technology, 2001, 9(3): 247-249.

(编辑 陈爱华)