

[文章编号] 1004- 0609(2001)S2- 0081- 05

多孔铝合金的压缩应力-应变特征及能量吸收性能^①

郑明军, 何德坪, 陈 锋

(东南大学 材料科学与工程系, 南京 210096)

[摘 要] 研究了多孔 ZL101 铝合金(AlSi7Mg0.45)的压缩应力-应变曲线与孔结构的关系。随孔径的减小, 它的弹性模量从 270 MPa 增加到 550 MPa; 屈服强度(σ_0)从 3 MPa 增加到 20 MPa; 随孔隙率的减小, 屈服强度增加。多孔铝合金具有高的比强度, 其 $\sigma_0^{2/3}/\rho$ (梁)及 $\sigma_0^{1/2}/\rho$ (板)分别为 2.5~7.0 和 1.6~4.1, 与钢和 Al 合金相当, 而密度只有 Al 合金的 40%, 可用作轻质结构材料; 它的吸能能力(C)可达到 3~7 MJ/m³, 又可用作吸能缓冲材料使用。

[关键词] 多孔铝合金; 孔径; 孔隙率; 比强度; 能量吸收

[中图分类号] TG 146.2

[文献标识码] A

以较大的孔径 d (0.3~5.5 mm), 较高的孔隙率 P (60%~90%) 为结构特征的超轻型金属结构, 正成为 21 世纪前沿热点材料之一^[1~5]。多孔铝通常可分为闭孔的胞状铝和通孔的多孔铝两大类。目前的研究重点是胞状纯铝, 对多孔铝合金的研究相对较少。与胞状铝相比, 多孔铝合金除了通孔结构以外, 其孔径 d (0.3~3 mm) 及孔隙率 P (60%~75%) 均较胞状铝小。特殊的通孔结构产生了不同于一般金属材料的特殊性能。它是一种以流通性能为主, 具备多种优良特性的物理功能材料如: 轻质、透流、高比强、冲击能量吸收、阻尼减震、降噪、隔热、散热等, 具有广泛的应用前景。对应用而言, 首先应满足一定的力学性能指标, 压缩是主要的受力状态, 因而研究压缩下的力学性能和能量吸收性能具有重要的意义。迄今为止, 文献[6]和[7]研究了胞状铝及合金的压缩及能量吸收性能, 而对多孔铝合金尚未见报道, 本文作者研究多孔 ZL101 铝合金(AlSi7Mg0.45)在压缩条件下应力-应变特征及能量吸收性能。

合金样品, 尺寸为 d 100 mm。经线切割加工得到 36 mm × 10 mm 的试样, 用作力学性能研究。

压缩实验在万能实验机上进行。实验时将压力

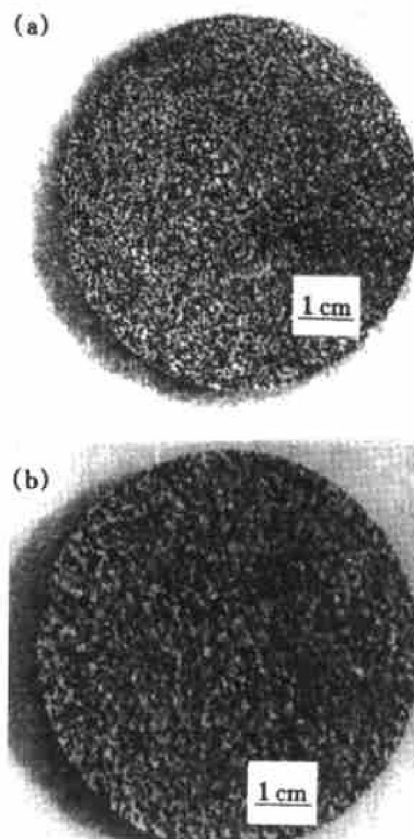


图 1 多孔铝合金样品

Fig. 1 Porous aluminum alloy with different pore diameters
(a) —0.38 mm; (b) —2.85 mm

1 实验方法

采用渗流法制备了孔隙率、孔径可变的多孔铝合金。其原理是将高温铝合金熔液在压力驱动下渗入经特殊处理的多孔介质间隙中, 待合金熔体凝固后去除介质材料, 即可得到多孔铝合金。图 1(a) 和 (b) 所示分别是孔径为 0.38 mm 和 2.85 mm 的多孔铝

① [基金项目] 国家自然科学基金资助(50081002)

[收稿日期] 2001- 03- 09; [修订日期] 2001- 06- 08

[作者简介] 郑明军(1971-), 男, 博士。

传感器及位移传感器输出的信号经电阻应变仪处理后输入 X-Y 函数记录仪, 绘出力-位移曲线, 经处理以后, 得到应力-应变曲线。压头移动速率为 $1.5 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$ 。

当多孔铝合金受压变形时, 将吸收外界的机械能。通常用吸能本领 $C^{[8-10]}$ (单位体积所吸收的能量), 吸能效率 $E^{[11]}$, 表征多孔金属的吸能特性。吸能本领 C 和吸能效率 E 的计算方法分别如下:

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

$$E = \frac{\int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon}{\sigma_{\max} \epsilon_{\max}} \quad (2)$$

式中 σ —压缩应力; ϵ —应变; $\epsilon_{\max}$ —所考察的最大应变; $\sigma_{\max}$ —位移时的最大应力。

由式(1)和(2)可知, 吸能本领等于 $\sigma\epsilon$ 曲线下所包含的面积(见图2阴影部分), 而吸能效率则等于真实材料与理想材料(其压缩应力-应变曲线为一水平的直线)压缩到相同应变时两者吸能本领的比值, 即图2中阴影面积与矩形面积之比。这两个参数反映了材料吸能性能的优劣, 对于工程设计来说是非常重要的参数。

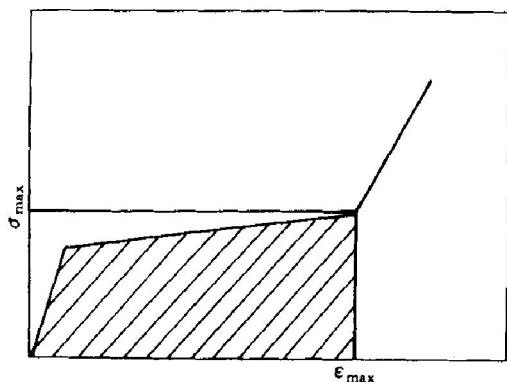


图2 吸能能力及吸能效率示意图

Fig. 2 Schematic of energy absorption capability and energy absorption efficiency

2 试验结果及分析

2.1 多孔铝合金压缩 $\sigma\epsilon$ 曲线及影响因素

多孔铝合金的压缩 $\sigma\epsilon$ 曲线一般分为弹性、平台和致密化3个阶段, 如图3所示。

弹性阶段: 应力与应变呈线性关系。这一阶段的应变值很小, 均小于5%。线弹性阶段是由于孔壁发生弹性变形所引起的。随孔径的增大, 多孔铝合金的弹性模量 E 下降很快, 如图4所示。

平台阶段: 弹性阶段后, 应力随应变的变化逐

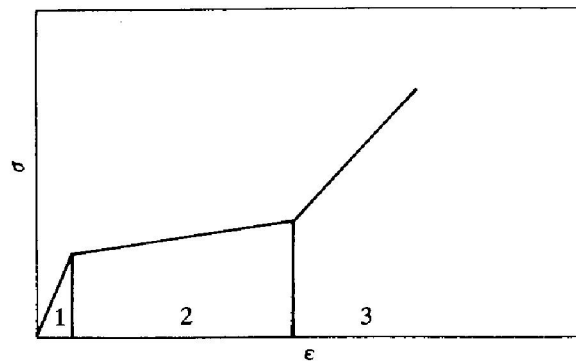


图3 多孔铝合金应力-应变曲线示意图

Fig. 3 Compressive stress-strain curve of porous aluminum alloy

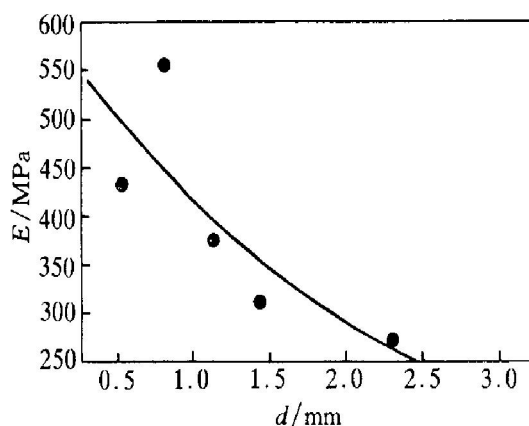


图4 孔径对弹性模量的影响

Fig. 4 Relationship between pore diameter and elastic modulus

渐偏离线性而趋于平缓, 进入平台阶段(屈服阶段)。这一阶段是由于孔壁发生屈服, 从而产生了变形。因为多孔铝合金的孔隙率比较高, 压缩过程中金属骨架不会立即接触, 达到致密, 因此可以在应力增长很小的情况下, 使得应变大幅增加。

试验结果表明, 在这一阶段, 孔径和孔隙率的变化都会对屈服应力产生影响。从图5可以看出, 在孔隙率保持一定的情况下, 孔径越大屈服应力越低。从图6可以看出, 在孔径保持不变时, 多孔铝合金的孔隙率升高, 它的屈服应力也随之降低。

致密化阶段: 随着应变的继续增加, 多孔铝合金的孔壁将互相接触, 也就是说, 这时几乎是对基体金属的压缩, 于是导致了应力的迅速上升, 从而进入致密化阶段。

2.2 多孔铝合金的比强度

从 $\sigma\epsilon$ 曲线可以获得对工程及实际应用有重要参考价值的指标—比强度。对于承受弯曲负载的装置来说, 对于梁构件应提供较高的 $\sigma_c^{2/3}/\rho$, 对于板

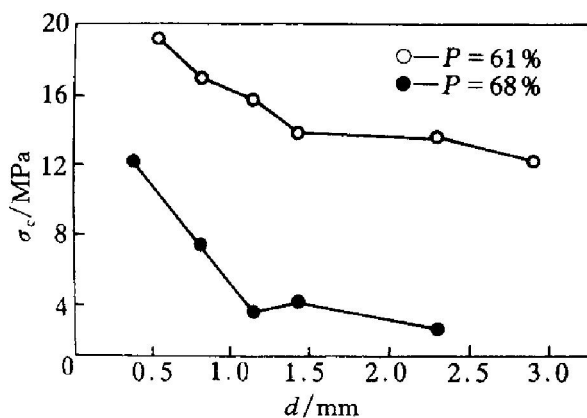


图 5 屈服应力与孔径、孔隙率的关系

Fig. 5 Relationship between yield stress and pore diameter, porosity

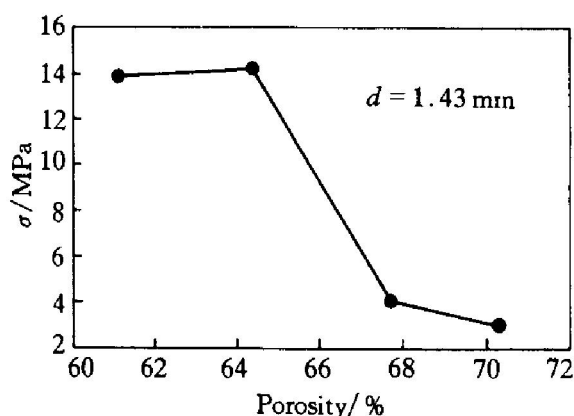


图 6 屈服应力与孔隙率的关系

Fig. 6 Relationship between yield stress and porosity

构件则要求 $\sigma_c^{1/2}/\rho$ 值较高(式中 σ_c 和 ρ 分别为材料的压缩屈服强度(MPa)和密度(t/m^3))^[12]。现将多孔铝合金的这几个指标与常用钢和铝的比较列于表 1。

从表 1 以可以看到, 就比强度而言多孔铝合金与常用材料钢和铝相当, 但 ρ 只有 Al 合金的 40%。因此, 多孔铝合金可以作为轻质结构材料使用。

表 1 钢、铝和多孔铝合金的比强度

Table 1 Specific strength of steel, aluminum and porous aluminum alloy

Material	$\sigma_c^{2/3}/\rho$	$\sigma_c^{1/2}/\rho$
Steel ^[12]	4.3	1.5
ZL101	9.3	4.14
Aluminum ^[12]	6.2	3.7
Porous Al alloy	2.5~7.0	1.6~4.1

2.3 多孔铝合金的能量吸收图和吸能能力

在线性阶段, 多孔铝合金所吸收的能量较少, 而在平台阶段, 由于骨架的屈服、断裂, 多孔铝合

金可以在应力变化范围不大的范围内产生很大的应变, 从而吸收大量的能量。因此多孔铝合金的吸能能力取决于其应力-应变曲线的形状, 而后者与孔径、孔隙率等因素密切相关。

将多孔铝合金 σ - ε 曲线上每一点所对应的应力作为横坐标, 曲线下所包含的面积 W , 即此应力下单位体积所吸收的能量作为纵坐标, 就获得了多孔铝合金的能量吸收图。它描述了多孔铝合金形变过程中单位体积吸收的能量随应力增加的变化趋势。

图 7 所示为典型的多孔铝合金能量吸收图。从图中可以看到, 在能量吸收曲线上有一个肩部。肩部以前的低应力阶段, 吸能能力随应力的增加而迅速增大, 它对应着 σ - ε 曲线的平台阶段, 这时, 应力虽然增加不多, 但是应变却迅速增大, 使得所吸收的能量增加很快。肩部以后, 能量增加的趋势变缓, 它对应着应力-应变曲线的压实阶段, 这一阶段应力虽然迅速增大, 但由于应变增加的速率很小, 因此能量增加的速率不大, 它表示此时的能量吸收效率已经很低了。从以上分析可以得到图中肩部是从平台阶段到压实阶段的转变区域。

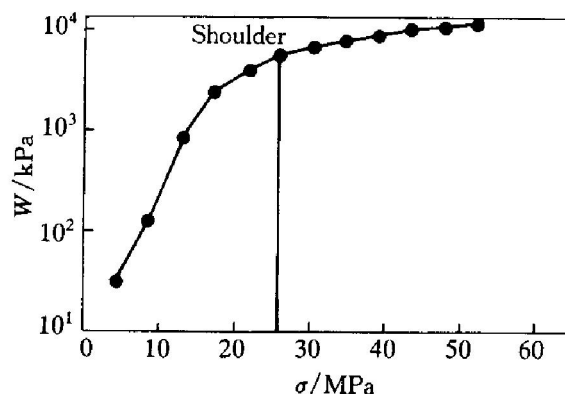


图 7 多孔铝的能量吸收图

Fig. 7 Energy-absorption diagram

在实际应用中, 总是要求缓冲材料的平台应力小于被保护物品所能承受的最大应力 σ_m , 如果平台应力高于这一应力, 则不能充分利用缓冲材料的吸能能力, 起不到保护作用; 如果平台应力低于这一应力, 则有可能在能量被完全吸收之前被压实, 导致应力迅速上升, 超过 σ_m 而达不到保护物品的目的。因此实际应用中, 要求多孔铝合金能量吸收图中肩部所对应的应力尽可能接近于 σ_m , 此时的吸能能力才具有实际意义。通过实验数据计算可以得到, 本实验范围内, 多孔铝合金在此处的吸能能力为 $3\sim 7 \text{ MJ/m}^3$, 与它较低的屈服应力相比, 该吸能能力是比较可观的。

从图 8 中可以看到, 当孔隙率不变时, 随孔径

的减小, 能量吸收图的肩部向图的右上方移动。这说明, 在低应变阶段, 大孔径多孔铝合金的吸能能力优于小孔径多孔铝合金, 在高应变阶段则相反。

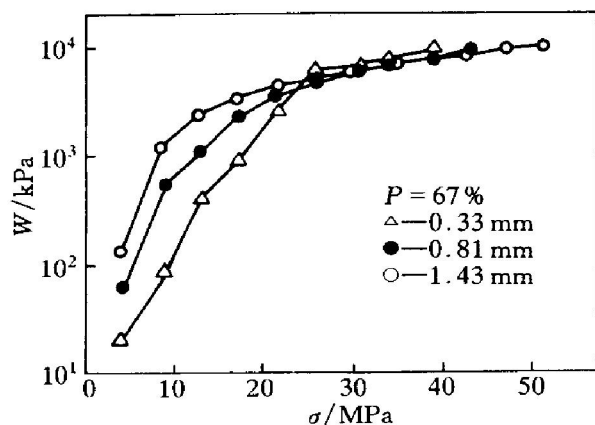


图 8 孔径的变化对能量吸收图的影响

Fig. 8 Influence of change of pore diameter on energy-absorption diagram

从图 9 中可以看到, 当孔径不变时, 随孔隙率的降低, 能量吸收图的肩部向图的右上方移动, 这说明, 低应变阶段, 高孔隙率多孔铝合金的吸能能力优于低孔隙率多孔铝合金。

以上这两点是与多孔铝合金平台应力的大小密切相关的。因为它的平台应力随孔隙率和孔径的减小而增大, 在压缩应力作用下, 当大孔径、高孔隙率多孔铝合金进入 σ - ϵ 曲线的平台阶段时, 小孔径、低孔隙率多孔铝合金还处于线弹性阶段, 这时大孔径、高孔隙率多孔铝合金所吸收的能量必然较大。当小孔径、低孔隙率多孔铝合金的平台阶段到来时, 大孔径、高孔隙率多孔铝合金已进入压实阶段。随着应力的增加, 前者的能量增长速度超过后者, 当应力达到一定水平时, 前者所吸收的能量将超过后者, 于是就形成了图 8 和图 9 所示的情况。

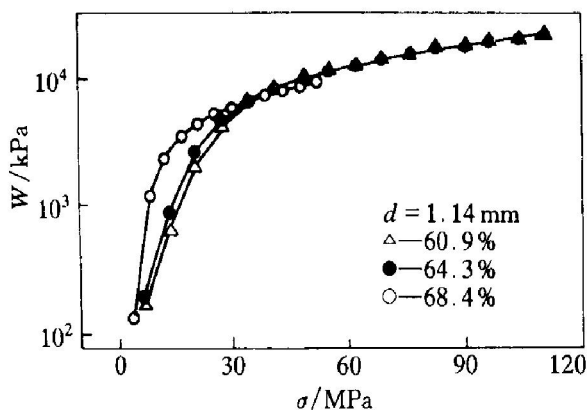


图 9 孔隙率的变化对能量吸收图的影响

Fig. 9 Influence of change of porosity on energy-absorption diagram

2.4 多孔铝合金的能量吸收效率

从图 10 中可以看到能量吸收效率在应变为 0.1 ~ 0.3 之间出现峰值, 当孔隙率不变时, 峰的宽度和高度都是随着孔径的减小而增大, 这说明小孔径多孔铝合金的吸能效率要优于大孔径多孔铝合金。

从图 11 中可以看到, 孔径不变时吸能效率在

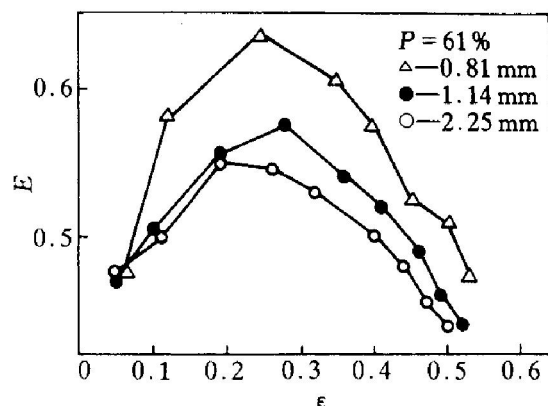


图 10 孔径的变化对能量吸收效率的影响

Fig. 10 Influence of change of pore diameter on energy absorption efficiency

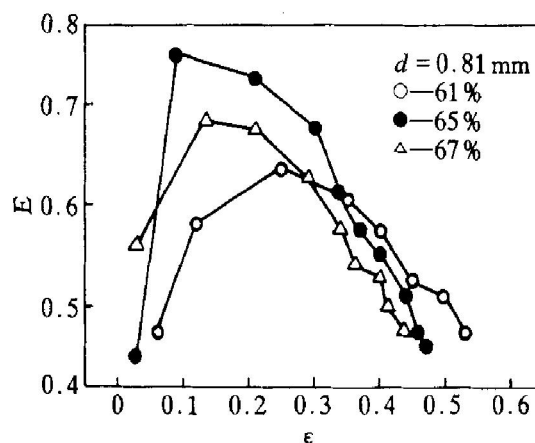


图 11 孔隙率的变化对能量吸收效率的影响

Fig. 11 Influence of change of porosity on energy absorption efficiency

孔隙率为 65% 左右出现一个峰值, 高于或低于这一孔隙率都会导致吸能效率的降低。

从以上两点可以得到, 在本实验范围内, 要达到最高的吸能效率, 必须尽可能降低多孔铝合金的孔径, 并且使孔隙率保持在 65% 左右。

3 结论

1) 多孔铝合金的压缩应力-应变曲线由弹性阶段、平台阶段、致密化阶段三部分组成。

2) 随孔径的增加, 多孔铝合金的弹性模量下降很快。孔径和孔隙率的增加, 屈服强度降低。

3) 多孔铝合金具有相当于钢和铝的比强度及小的密度, 因而可以作为轻质结构材料使用。

4) 多孔铝合金具有能量吸收能力, 可以用作冲击防护材料。

5) 多孔铝合金的能量吸收效率在孔隙率为 65%、应变为 0.1~0.3 左右时出现峰值; 并且, 孔径越小, 吸能效率越高。

[REFERENCES]

- [1] Ashby M F, Evans A G, et al. Metal Foams [M]. Boston: B-H Press, 2000, 6.
- [2] WU Zhao-jin(吴照金), HE De-ping(何德坪). Changes in porosity of foamed Al during solidification [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(18): 1667.
- [3] YANG Dong-hui(杨东辉), HE De-ping(何德坪). Porosity of porous Al alloy [J]. Science in China (B), 2001, 44(4): 411-419.
- [4] HE De-ping(何德坪), ZHANG Yong(张勇). 铝熔体在多孔介质中的渗流过程 [J]. Journal of Material Research (材料研究学报), 1997, 11: 113.
- [5] SONG Zhen-lun(宋振纶), HE De-ping(何德坪). 铝熔体泡沫形成过程中粘度对孔结构的影响 [J]. Journal of Material Research (材料研究学报), 1997, 11: 257.
- [6] WANG Bin(王斌), HE De-ping(何德坪), SHU Guang-ji(舒光冀), et al. 泡沫铝合金的压缩性能及其能量吸收 [J]. Acta Metallurgica Sinica (金属学报), 2000, 10: 1037.
- [7] WU Zhao-jin(吴照金), HE De-ping(何德坪). 胞状铝的压缩变形和吸能性能研究 [J]. Journal of Application Science (应用科学学报), 2001(4). (In press).
- [8] McIntyre A, Anderton G E. Fracture properties of a rigid polyurethane foam over a range of densities [J]. Polymer, 1979, 20: 247.
- [9] Davies G J, Zheng Shu. Metallic foams: their production, properties and applications [J]. Journal of Materials Science, 1983, 18: 1899.
- [10] Ashby M F. The mechanical properties of cellular solids [J]. Metallurgical Transaction A, 1983, 14A: 1755.
- [11] Miltz J, Gruenbaum G. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements [J]. Polym Eng Sci, 1981, 21: 1010.
- [12] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids—Structure and Properties (Second Edition) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

Compressive stress-strain behavior and energy absorption capability of porous aluminum alloy

ZHENG Ming-jun, HE De-ping, CHEN Feng

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

[Abstract] The relationship between the compressive behavior and the energy absorption capability of the porous aluminum alloy was investigated. The results show that, the elastic modulus increases from 270 MPa to 550 MPa and the yield strength increases from 3 MPa to 20 MPa with the decrease of the pore diameter; the yield strength increases with the decrease of the porosity; the porous aluminum alloy has high specific strength and energy absorption capability. Its $\sigma_c^{2/3}/\rho$ (beam) and $\sigma_c^{1/2}/\rho$ (board) reach to 2.5~7.0 and 1.6~4 respectively. These data correspond to those of steel and Al.

[Key words] porous aluminum alloy; pore diameter; porosity; specific strength; energy absorption

(编辑 何学锋)