

相对密度对泡沫镁合金动态力学性能的影响

杨冬丽¹, 徐正国², 杨杰³, 王琳¹, 杨院生²

(1. 北京理工大学材料学院, 北京 100081; 2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016;
3. 公安部第一研究所检测中心, 北京 100048)

摘要: 为研究相对密度对泡沫镁合金动态力学性能与吸能特性的影响, 利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置对不同密度的泡沫镁合金进行动态力学性能测试。研究表明: 随着相对密度的增大, 泡沫镁合金的屈服强度、平台应力显著增加, 致密应变相应减小。通过拟合, 得到材料屈服强度与相对密度的关系式。运用单位体积吸能量、吸能效率和理想吸能效率表征了材料的吸能特性。相对密度在一定范围内越大, 泡沫镁合金的单位体积吸能量越高, 吸能效率略有降低, 但稳定在 0.3 左右。随着相对密度的增加, 材料最大吸能效率所对应的应力值增大。泡沫镁合金的理想吸能效率值可达 0.9, 这表明该材料是一种吸能防护性能好的材料。

关键词: 金属材料; 泡沫镁合金; 相对密度; 动态力学性能; 吸能特性

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2013)10-1286-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.10.014

Effects of Relative Density of Magnesium Alloy Foams on Their Dynamic Mechanical Properties

YANG Dong-li¹, XU Zheng-guo², YANG Jie³, WANG Lin¹, YANG Yuan-sheng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China;
3. Testing Center, The First Research Institute of Ministry of Public Security, Beijing 100048, China)

Abstract: The effects of relative density of magnesium alloy foams on their dynamic mechanical properties and energy absorption characteristics are investigated. Split Hopkinson pressure bar (SHPB) is used to evaluate the dynamic compressive behaviors of magnesium alloy foams with different densities. The experimental results show that, with the increase in relative density, the yield stress and platform stress increase significantly while the densification strain decreases. Based on the experimental results, the fitting equations of yield stress and relative density are obtained. The energy absorption properties of metal foams are characterized by energy absorption per unit volume, energy absorption efficiency and ideal energy absorption efficiency. The higher the relative density of magnesium alloy foams is within a certain range, the higher the energy absorption capacity per unit volume is. The energy absorption efficiency decreases slightly, but it is steady at about 0.3, while the stress corresponding to the highest absorption efficiency increases. Magnesium foam is a kind of material with better protective performance, with the ideal energy absorbing efficiency reaching 0.9.

Key words: metallic material; magnesium alloy foam; relative density; dynamic mechanical property; energy absorption characteristic

0 引言

泡沫金属是一种由金属基体和气孔组成的新型复合材料,集合了轻质、吸能、散热、吸声、电磁屏蔽等各种优良性能,既有多孔有机聚合物不具备的较优力学性能和耐高温特性,又克服了多孔陶瓷材料的脆性,在汽车、航空航天、建筑等领域有着广泛的应用前景。泡沫金属在压缩过程中,有较长的塑性变形阶段,能够保持在相对较低应力下吸收大量能量,从而具有很高的吸能效率,常被用来作吸能缓冲防护材料,尤其在爆炸、高速冲击等结构中备受青睐^[1-3]。

目前,对泡沫金属的研究主要集中在泡沫铝材料,对泡沫镁的研究较少。与铝合金相比,镁合金的密度低、比强度高、降噪减震、生物降解吸收性好,具有超轻型结构及缓冲吸能特性的泡沫镁在一些应用中更具优势。现在,泡沫镁合金的研究还处于制备方法的探索阶段,对材料性能的了解很少,尤其对动态载荷下的力学性能^[4-5]。因此有必要对泡沫镁合金的动态力学性能及吸能特性进行研究。由于相对密度是泡沫材料最重要的结构特征参数之一,本文运用分离式霍普金森压杆(SHPB)对不同相对密度的泡沫镁合金进行动态压缩实验,分析了在某种高应变率条件下,相对密度对材料动态力学性能和吸能特性的影响,为泡沫镁合金的实际应用提供一定的实验基础。

1 实验材料和方法

实验所用材料是以 AZ91 镁合金为基体,采用熔体发泡法制备而成的闭孔泡沫镁。平均孔径为 0.6 ~ 1.6 mm,表观密度 ρ^* 在 0.18 ~ 0.7 g/cm³ 之间,基体材料密度 $\rho_s = 1.81$ g/cm³。动态压缩试样利用线切割从大块泡沫镁上切割而成,试样尺寸为 $\phi 30$ mm \times 8 mm。实验前分别用电子称、游标卡尺获取每个试样的质量和尺寸,以得到准确的相对密度 ρ^*/ρ_s 。图 1 为闭孔泡沫镁试样的宏观照片。

动态压缩实验是在 SHPB 装置上进行,子弹及压杆材料均为硬质铝,直径为 37 mm,长度分别为 800 mm、2 000 mm。入射杆、透射杆上分别贴有电阻应变片、半导体应变片,通过动态应变仪和数据采集系统分别获得入射脉冲 $\varepsilon_i(t)$ 、反射脉冲 $\varepsilon_r(t)$ 及透

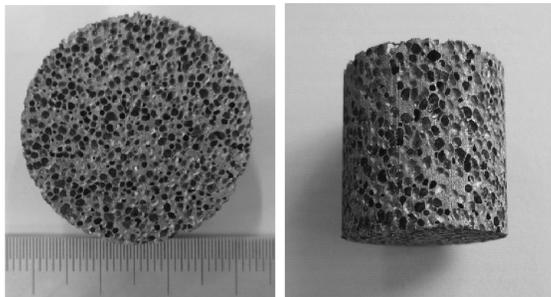


图 1 闭孔泡沫镁宏观照片

Fig. 1 Macro photographs of closed-cell magnesium foam

射脉冲 $\varepsilon_i(t)$,如图 2 所示。进而根据(1)式得出泡沫镁合金应力、应变、应变率随时间的变化规律。实验过程中,为减小试样与压杆间的摩擦,在界面处涂一层润滑剂。

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_0}{L}\varepsilon_r, \\ \varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{L}\int_0^t \varepsilon_r dt, \\ \sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A}\varepsilon_i(t), \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_0 、 A_0 、 E_0 和 L 分别为弹性压杆的波速、横截面积、弹性模量和试样的原始长度。

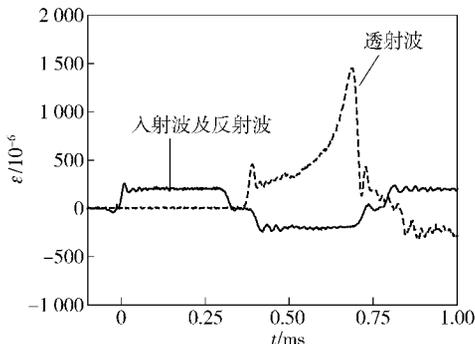


图 2 输入杆和输出杆上的原始波形

Fig. 2 Original waveforms recorded on incident and transmitting bars

2 实验结果与分析

2.1 相对密度对动态力学性能影响

图 3 为不同相对密度下泡沫镁合金的应力-应变曲线。由图可知,闭孔泡沫镁在动态压缩载荷加载下,应力-应变响应具有泡沫金属典型的三阶段

特征,即短暂的弹性区、较长的塑性平台及密实区。不难发现,与其他泡沫金属材料相比,泡沫镁合金从弹性区过渡到塑性坍塌段的峰值拐点越明显,而且密度较大,峰值拐点后应力回落严重,随着应变的增加应力重新上升^[3]。另外,随着相对密度的增加,泡沫镁合金塑性平台段的应力随应变的增加逐渐增大,产生一定的应变硬化现象。分析认为是泡沫镁合金密度的增加引起基体材料所占比重增大,随着应变的增加,泡沫镁合金逐渐被压垮,应力-应变曲线体现出更多基体材料所具备的压缩性能。

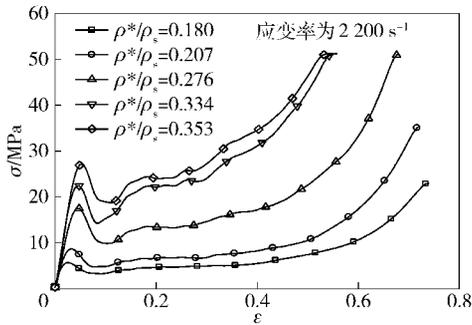


图 3 泡沫镁的动态应力-应变曲线

Fig. 3 Dynamic compressive stress-strain curves of magnesium foam

图 4 为相对密度对泡沫镁合金屈服强度、平台应力、致密化应力和应变的影响。可以看出,随着相对密度的增加,屈服应力、平台应力及致密化应力显著增加,致密化应变大大减小。当相对密度从 0.18 增加到 0.353 时,屈服应力和平台应力分别从 5.6 MPa、4.9 MPa 增大到 27.1 MPa、26.8 MPa,致密化应变从 0.64 减小到 0.36。Gibson 等^[1]发现泡沫材料的致密化应变随相对密度变化呈现一定的规律,如(2)式所示

$$\varepsilon_d = 1 - \alpha \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right), \quad (2)$$

式中: ε_d 、 ρ^* 和 ρ_s 分别为致密化应变、泡沫材料的表观密度和基体材料的密度。当基体材料是非金属材料时, α 取 1.4; 对于泡沫金属材料, α 值根据基体材料的不同在 1.4 ~ 2 间变化。根据实验结果可知, 当 $\alpha = 1.85$ 时, 可以较好地衡量泡沫镁合金致密应变与相对密度间的关系。

泡沫材料的力学性能主要取决于基体材料的性能和泡沫材料的结构, Gibson 等^[1]对泡沫金属材料进行模型化处理得到了材料屈服强度与相对密度的关系为

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = c \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^\alpha, \quad (3)$$

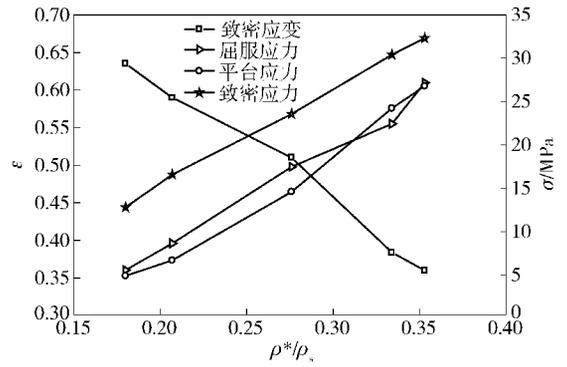


图 4 相对密度对泡沫镁动态力学性能影响

Fig. 4 Effect of relative density on dynamic mechanical properties

式中: σ_{pl}^* 和 σ_{ys} 分别为泡沫材料的屈服强度和基体材料的屈服强度; c 和 α 为反映孔结构和基体材料性能的因子。对本实验各屈服应力点按照(3)式进行拟合, 结果如表 1 所示。其中, 拟合参数: α 取值 2.25 ~ 2.4, c 取值 1.75 ~ 1.85。对比实测屈服强度与拟合结果, 发现拟合值与实测值很吻合。

表 1 屈服强度与相对密度的拟合结果

Tab. 1 Fit results of yield stress with relative density of magnesium foams

相对密度	实测屈服强度/MPa	拟合屈服强度/MPa	拟合参数 α	拟合参数 c
0.180	5.58	5.56	2.30	1.80
0.193	6.22	6.27	2.34	1.84
0.235	9.37	9.31	2.35	1.75
0.250	9.70	9.67	2.40	1.70
0.267	12.20	12.20	2.37	1.75
0.308	13.10	15.90	2.40	1.70
0.330	18.48	19.00	2.40	1.70
0.276	17.47	16.34	2.25	1.85
0.334	22.44	22.37	2.33	1.80
0.353	27.17	27.12	2.29	1.84

2.2 相对密度对吸能特性影响

泡沫材料的吸能量大小可用单位体积功

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

表示, 其中 σ 为流动应力, 是应变 ε 的函数, 单位体积功相当于应力-应变曲线下的积分面积^[6]。因此, 泡沫镁的吸能能力主要取决于应力平台的高度和宽度。

图 5 为不同密度的泡沫镁合金吸能量与应变的关系。可知, 泡沫镁合金的单位体积吸能量随应变

的增加而增加;不同相对密度的试样在相同应变下,吸能量相差较大。当应变为 0.3 时, $\rho = 0.180$, $W = 1.3 \text{ MJ/m}^3$, $\rho = 0.353$, $W = 6.6 \text{ MJ/m}^3$, 相对密度增加 49%, 吸能量增长了 80%。结合泡沫材料致密化应变随相对密度的变化得知, 虽然相对密度的增加引起致密应变的减小, 但因为平台应力大幅增加, 致使最终吸能量增高。因此, 在一定范围内, 增加泡沫镁合金的相对密度, 其吸能能力越好。

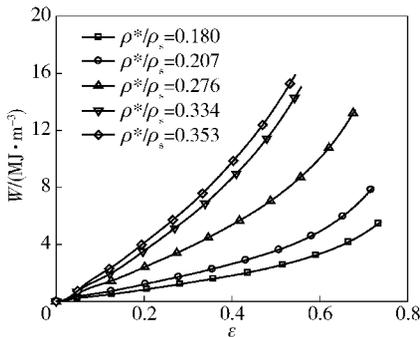


图 5 相对密度对单位体积吸能量的影响

Fig. 5 Effect of relative density on energy absorption per unit volume

Milts 等^[7]提出了用吸能效率 E 和理想吸能效率 I 评价泡沫材料的吸能特性, 如(5)式所示:

$$\begin{cases} E = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon}{\sigma_m} \\ I = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon}{\sigma_m \varepsilon_m} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ε_m 为任意时刻的应变; σ_m 为对应的应力; E 为泡沫材料的吸能量与相应应力的比值, 当吸能效率 E 最大时, 表明在该应力处, 材料处于最佳吸能状态, 以此可以判定泡沫材料作为缓冲器使用时的设计应力。图 6 为相对密度不同的泡沫镁合金吸能效率曲线。可见, 泡沫镁合金的吸能效率随相对密度的增大略有减小, 但基本稳定在 0.3 左右。相对密度为 0.180、0.207 的泡沫镁合金试样, 其吸能效率在 0.35 左右, 当相对密度增加到 0.33 左右时, 吸能效率降低到 0.3。

另外, 泡沫镁合金达到最大吸能效率时所对应的应力随密度的增加而增大, 意味着作为缓冲材料使用的泡沫镁允许设计的应力增大。曾斐等^[2]认为泡沫铝的吸能效率曲线中, 吸能效率最大时对应的应变 ε_m 与压实应变 ε_d 接近。图 6 中, 各条曲线上的星号代表该密度下泡沫镁合金被压

实时的吸能效率, 分析可知相对密度较高的泡沫镁基本符合上述规律, 而相对密度较小的泡沫镁吸能效率达到最大值的应变略小于压实应变。观察吸能效率的曲线形状, 还可以发现相对密度高的泡沫镁材料可以维持长时间的高吸能效率, 而相对密度较低的泡沫镁合金的吸能效率达到最大值后, 随着应力的增加迅速减小。此现象表明相对密度较高的泡沫镁合金作为缓冲器材料使用时, 允许设计的应力范围较宽。

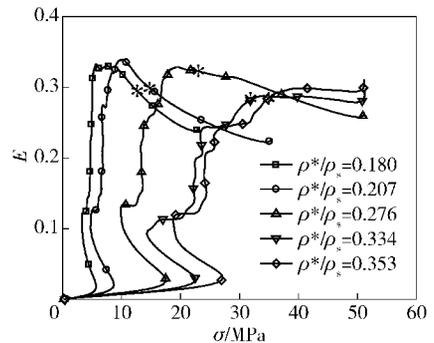


图 6 相对密度对吸能效率的影响

Fig. 6 Effect of relative density on energy absorption efficiency

理想吸能效率 I 为真实泡沫材料在压缩过程中的吸能量与理想吸能材料的吸能量比值。理想吸能材料的应力-应变曲线^[2]如图 7 所示, 塑性平台段非常平坦。实际泡沫材料的应力-应变曲线中, 弹性区过渡到塑性平台时常存在明显的应力回落, 而且平台后期产生明显的应变硬化现象。理想吸能效率越大, 表明该材料越接近于理想吸能材料。图 8 为泡沫镁的理想吸能效率曲线。可知, 各种密度下的泡沫镁均在应变 0.1 左右时理想吸能效率达到最大值, 但均已超过 1, 这与一般泡沫金属材料不同。泡沫镁合金的理想吸能效率大于 1, 并不意味着其吸能效果超出了理想的吸能材料, 而是因为其应变 0.1 处恰好是弹性区过渡到平台区的应力回落, 此时瞬时应力应变的乘积最小, 而吸能量一直在增加, 这造成了理想吸能效率大幅上升, 甚至大于 1。随着应变的增加, 材料处于塑性平台段, 拥有较高的理想吸能效率。相对密度越小, 材料保持较高理想吸能效率的时间越长。当应变增加到致密区时, 应力大幅上升, 理想吸能效率大大减小。不难发现, 在塑性平台区各种相对密度的泡沫镁合金, 其理想吸能效率可达到 0.9 左右, 这说明泡沫镁是一种优良的吸能材料, 而且密度大小对于理想吸能效率的最大值影响较小。

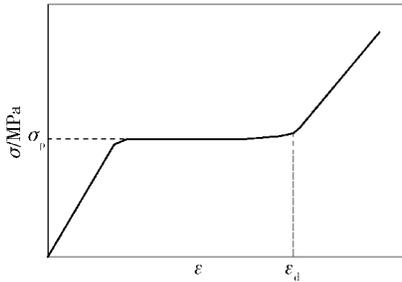


图 7 理想吸能材料的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of ideal energy-absorption material

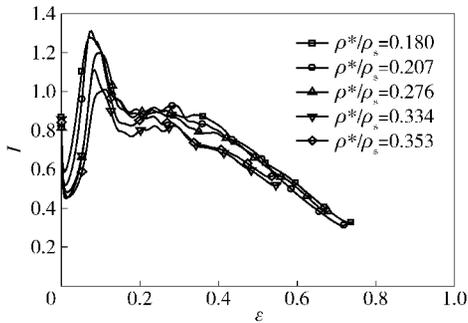


图 8 相对密度对理想吸能曲线的影响

Fig. 8 Effect of relative density on ideal energy absorption efficiency

3 结论

1) 泡沫镁合金在动态载荷加载下,力学响应规律与其他泡沫金属材料相似,其应力-应变曲线中具有典型的三阶段特征。随着相对密度的增加,泡沫镁合金的屈服强度、平台应力显著增加,致密化应变相应减小。通过拟合,得到闭孔泡沫镁屈服强度与相对密度的关系,其中 α 与 c 的取值范围分别为 2.25 ~ 2.4, 1.75 ~ 1.85。

2) 泡沫镁的单位体积吸能量随密度的增加而增加。吸能效率随着密度的增加,略有降低,但基本稳定在 0.3 左右,最大吸能效率对应的应力值增大,

对应的应变与致密应变接近。

3) 泡沫镁的理想吸能效率值可达到 0.9 左右,是一种吸能防护性能较好的材料,密度越小,保持较高理想吸能效率的时间越长。

本文只进行了一种高应变率条件下的动态力学实验,今后将进一步研究应变率对泡沫镁动态力学性能及吸能特性的影响。

参考文献 (References)

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids, structure and properties [M]. 2nd. Britain: Cambridge University Press, 1997.
- [2] 曾斐, 潘艺, 胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4): 358-362.
ZENG Fei, PAN Yi, HU Shi-sheng. Evaluation of cushioning properties and energy absorption capability of foam aluminum[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 358-362. (in Chinese)
- [3] 康颖安, 张俊彦, 谭加才. 相对密度对泡沫铝力学性能和能量吸收性能的影响[J]. 功能材料, 2006, 37(2): 247-249.
KANG Ying-an, ZHANG Jun-yan, TAN Jian-cai. Effect of relative density on the compressive property and energy absorption capacity of aluminum foams[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(2): 247-249. (in Chinese)
- [4] 陈利, 刘春雷. 闭孔泡沫镁材料静动态压缩力学性能与吸能特性[J]. 兵工学报, 2009, 30(增刊2): 197-202.
CHEN Li, LIU Chun-lei. Mechanical properties and energy absorption characteristic of magnesium foam under static and dynamic compression[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2): 197-202. (in Chinese)
- [5] Xu Z G, Fu J W, Luo T J, et al. Effects of cell size on quasi-static compressive properties of Mg alloy foams[J]. Materials and Design, 2012, 34: 40-44.
- [6] Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T, et al. Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading[J]. Scripta Mater, 1999, 40(8): 921-927.
- [7] Miltz J, Gruenbau G. Evaluation of cushioning properties of plastic foam compressive measurements [J]. Polymer Engineering and Science, 1981, 21(15): 1010-1014.