

文章编号: 1001-1455(2005)05-0400-05

填充硅橡胶的泡沫铝复合材料的力学性能*

田 杰, 胡时胜

(中国科学技术大学中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 用渗流法向开孔泡沫铝-硅合金和泡沫纯铝中充填硅橡胶获得含硅橡胶的泡沫材料, 在材料试验机 and SHPB 上对含硅橡胶的复合材料进行动态与准静态压缩实验。实验结果表明: 含硅橡胶的泡沫复合材料只有弹性段和塑性段两个阶段, 具有更高的应变率敏感性, 其应力-应变曲线抖动幅度比较大。

关键词: 固体力学; 应变率敏感; 压缩实验; 泡沫铝; 硅橡胶; 抖动

中图分类号: O347; TG146.21

国标学科代码: 130 · 1515

文献标志码: A

1 引 言

多孔泡沫金属是近 20 年来迅速发展的新型结构功能材料, 因这种材料具有独特的力学行为而受到各国研究人员的广泛关注^[1~2]。泡沫铝作为一种新型的工程结构材料具有许多优良的性能, 主要是良好的缓冲吸能特性, 另外还有隔音、隔热和耐腐蚀等特性^[3~4]。因此, 已经成功地用于升降机的减震垫、传送器的安全垫、汽车消声器等领域, 另外还可作为化学反应的催化剂、过滤器等^[5]。

目前在研究泡沫铝的力学行为时, 主要是将其作为一种多孔材料, 即使对于闭孔的泡沫铝, 也很少考虑基体与泡孔内的空气或其他气体混合的相互作用^[6]。只有当泡沫铝在高速变形条件下, 由于气体的迅速压缩和在泡孔中的高速流动导致对变形阻力的增大从而影响泡沫铝的应变率效应时, 才不得不考虑泡孔中的气体对泡沫铝整体变形的影响^[7]。泡沫铝作为缓冲吸能材料时通常应力不超过某个临界值, 但单纯的泡沫材料在其压实后应力却急剧上升; 如果向开孔泡沫铝的孔洞中填充其他比较软的介质(如液体或软材料)时, 泡沫铝的力学行为(特别是动态力学行为)将发生变化, 填充物对泡沫铝的力学性能与吸能特性将产生重要影响。余兴泉和何德坪^[8~9]研究了这种复合材料的制备方法, 发现填充了高聚物的泡沫铝是内耗值更高的阻尼材料, 而目前有关这种含高分子填充物泡沫铝的动态力学性能的研究还很少。

本文中采用在开孔的泡沫铝材料中充填硅橡胶的橡胶泡沫铝复合材料, 研究含软橡胶泡沫铝的复合材料的准静态和动态力学行为。

2 材料制备和实验方案

2.1 试样制备

本次实验使用的泡沫材料均采用渗流铸造工艺制备。所用基体材料一种为铝-硅合金 ZAlSi12, 其中硅含量为 12%, 另一种是纯铝, 未填充前制备的泡沫材料的平均密度为 1.0 g/cm^3 。将制备的泡沫材料用线切割加工成 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的准静态压缩试样和 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的动态压缩试样。由于采用渗流铸造工艺, 泡沫材料的泡孔是三维连通孔结构, 而且孔径大小相差很小, 然后在真空负压下, 将已与固化剂混合均匀的液态硅橡胶向泡沫材料的孔隙中渗流, 当泡沫材料中所有孔隙被填充后, 在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温使硅橡胶固化, 从而得到含硅橡胶的泡沫铝材料。

* 收稿日期: 2004-08-03; 修回日期: 2004-11-22

基金项目: 国家自然科学基金委和中国工程物理研究院联合基金项目(10076020)

作者简介: 田 杰(1979—), 女, 博士研究生。

2. 2 实验方案

实验研究包括两部分：动态和准静态压缩试验。高应变率($10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$)下材料的压缩试验是在分离式霍普金森压杆(SHPB)装置上进行的。SHPB 的实验装置见图 1。由于泡沫材料的波阻抗较低,透射波很弱,因此采用半导体应变片测量透射波信号可使信噪比提高 50 倍,提高了实验精度。准静态压缩实验(10^{-3} s^{-1})是在 MTS810 材料试验机上进行的。

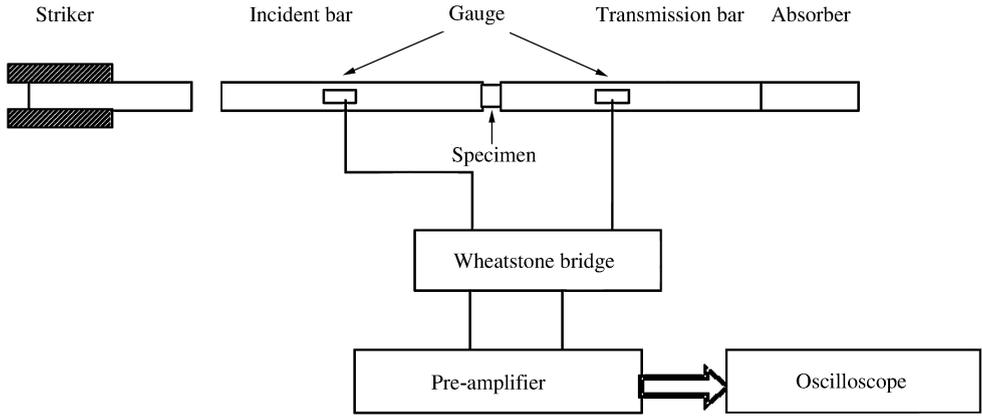


图 1 霍普金森压杆装置示意图

Fig. 1 Schematic of split Hopkinson press bar set-up

3 实验结果与分析

图 2(a)为泡沫铝-硅合金的动静态压缩实验结果,泡沫金属的变形可以明显分为三个阶段:弹性区、屈服平台区以及致密区^[10]。铝硅合金呈现明显的脆性,在应力-应变曲线上的表现是第二阶段屈服平台区比较平缓。图 2(b)是泡沫纯铝的动静态应力-应变曲线,泡沫纯铝的第二阶段为逐渐上翘的趋势,其平台不是十分明显,也就是说,在屈服段,泡沫铝的应力随应变的增大而略微增加。因此,虽然泡沫铝-硅合金的屈服强度明显高于泡沫纯铝,但是由于其平台段比较长,平台区应变可以达到 0.50,其缓冲吸能性能总体上要优于泡沫纯铝。

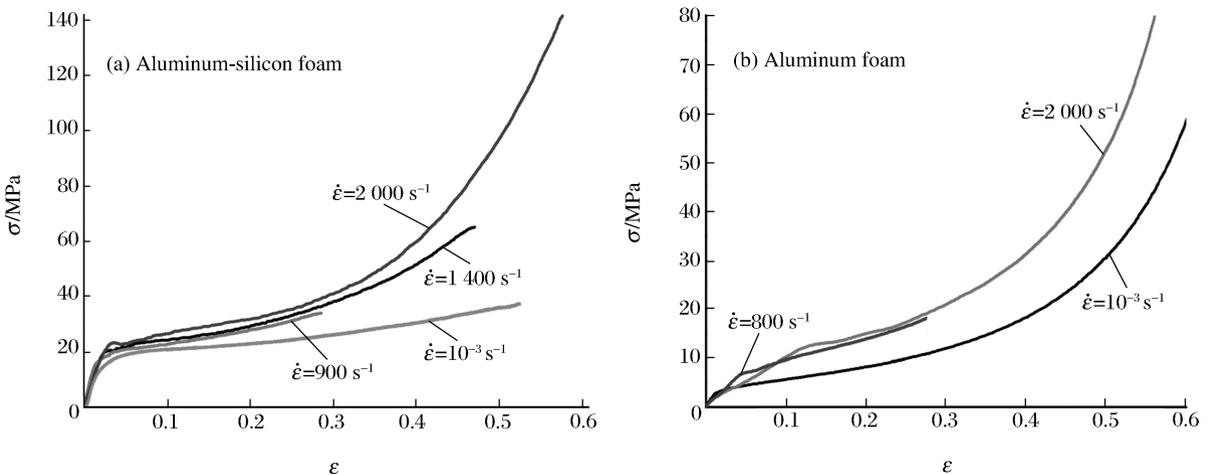


图 2 准静态和动态压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Compression stress-strain curves

图3是泡沫纯铝和含硅橡胶的泡沫纯铝复合材料的准静态压缩应力-应变曲线(应变率为 10^{-3} s^{-1})。与泡沫纯铝相比,填充了硅橡胶的泡沫纯铝复合材料由于其硅橡胶的强度很低,其弹性段变形主要是由泡沫铝承载,因此填充了硅橡胶的泡沫纯铝复合材料的弹性段和泡沫纯铝曲线几乎重合。进入塑性变形后,在应变小于0.46(见图3)时,填充了硅橡胶的泡沫纯铝复合材料的曲线高于泡沫纯铝,其原因主要是硅橡胶的不可压性起了作用,使填充了硅橡胶的复合材料的曲线高于泡沫纯铝。继续压缩时,泡沫纯铝中的泡孔坍塌并被压实,因此应力随着应变急剧上升,而填充了硅橡胶的泡沫纯铝复合材料中的硅橡胶由于它的不可压性,阻碍了孔壁的坍塌,即使发生了坍塌,由于硅橡胶的存在,破损的泡孔壁不能被压实,此后的复合材料等同于一般的两相复合材料,所以填充了硅橡胶的泡沫纯铝复合材料的应力-应变曲线的后面部分要比泡沫纯铝的平缓得多。从变形后的扫描电镜的照片(见图4)也可以看出,填充了硅橡胶的泡沫纯铝复合材料在发生较大变形($\epsilon=0.65$)后,垂直于压缩方向的平面内大量的孔壁发生了断裂,而且有更大的宏观裂纹在试样中扩展,图4中的箭头所示即孔壁断裂处,而不含硅橡胶的泡沫纯铝在相同的应变下没有发生此现象。

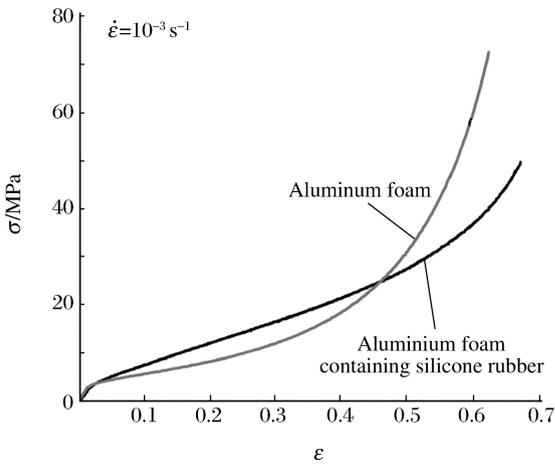


图3 两种材料的准静态压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Compression stress-strain curves of two materials under quasi-static loading

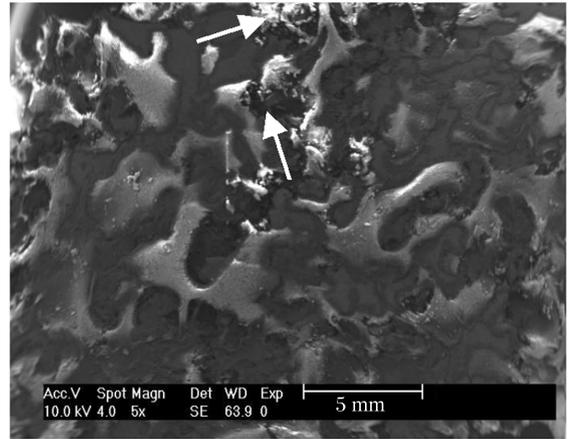


图4 含硅橡胶的泡沫纯铝的孔壁裂纹($\epsilon=0.65$)

Fig. 4 Fracture of aluminum foam containing silicone rubber

图5(a)是含硅橡胶的泡沫纯铝的准静态和动态压缩应力-应变曲线。泡沫铝属于多孔材料,因此其应力-应变曲线包含“三阶段”;但填充了硅橡胶后的泡沫铝已不再属于多孔材料。从图中可以看出,含硅橡胶的泡沫纯铝动态应力-应变曲线包含弹性段和塑性段两个阶段,两个阶段是平稳过渡的,没有多孔材料的致密化阶段,当泡孔被压破后呈复合材料的变形。动态压缩的曲线抖动相对静态来说比较大,而且随着应变率增大,抖动也越明显,类似于低密度的闭孔泡沫铝的动态曲线的震荡现象^[11~12]。后者的震荡现象是由于密度低时,泡沫铝的变形不均匀,泡孔发生坍塌引起的。而含硅橡胶的泡沫铝的动态曲线的抖动,则是因为动态压缩时硅橡胶的不可压缩而导致泡孔壁的断裂引起的。孔内硅橡胶的横向膨胀导致纵向孔壁发生坍塌断裂,而一旦孔壁断裂,受约束的硅橡胶向外伸展,阻力下降,曲线出现抖动。由于纯铝韧性好,孔壁被横向挤破是连续的过程,因此导致了曲线的连续抖动现象。另外,含硅橡胶的泡沫纯铝复合材料 also 具有很高的应变率敏感性,随着应变率的提高,其屈服强度和流动应力均显著升高。这种应变率效应既有泡沫铝的应变率效应,又有硅橡胶的应变率效应,还有两者组合后的应变率效应。

图5(b)是填充了硅橡胶的泡沫铝-硅合金复合材料的准静态和动态压缩应力-应变曲线。复合材料的动态压缩变形不均匀,进入塑性屈服后,材料变形表现了明显的失稳,其曲线先升高到最大值再降低,在应变为0.25左右时达到最低,然后应力再随着应变的增加而增加。这种失稳的原因是由于铝-硅合金比纯铝脆,因此弹性段主要是孔壁承载,此时部分孔壁出现应力集中。应力增加、应力集中处首先超

过屈服强度,进入塑性段后,由于泡孔内硅橡胶的不可压缩性,发生应力集中的孔壁发生断裂。随着应变率的增大,硅橡胶在动态压缩时对脆性的铝-硅合金的动态变形影响变大,这种失稳断裂更明显,其曲线抖动也更明显。由于泡孔壁被硅橡胶横向挤破是突变过程,因此动态压缩的曲线抖动幅度要比静态曲线增大很多,随着应变率的增加,抖动的幅度也变得越来越。含硅橡胶的泡沫铝-硅合金要比单纯的泡沫铝-硅合金的应变率效应敏感。含硅橡胶的泡沫铝的准静态屈服强度 $\sigma_s \approx 11.2 \text{ MPa}$,而应变率 $\dot{\epsilon} = 2100 \text{ s}^{-1}$ 时,动态屈服强度 $\sigma_d \approx 31 \text{ MPa}$,是 σ_s 的将近3倍。由于其应变率效应很敏感,因此在受到冲击时可以吸收更多的能量,可望有新的应用前景。

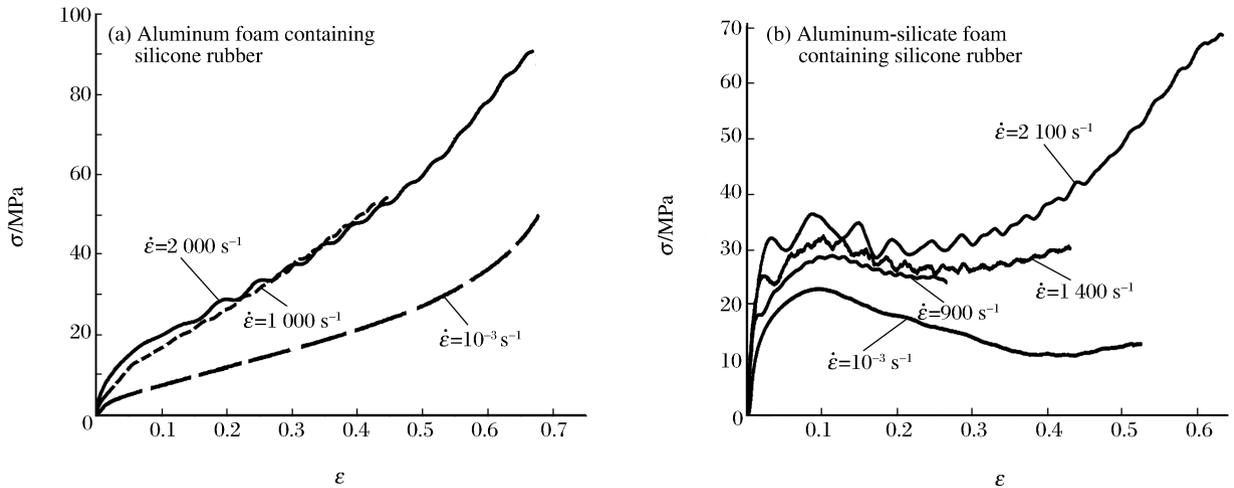


图5 准静态和动态压缩应力-应变曲线
Fig. 5 Compression stress-strain curves

4 结论

(1) 泡沫铝属于多孔材料,填充了硅橡胶的泡沫铝是复合材料。因此前者的变形有“三个阶段”,后者只有弹性段和塑性段两个阶段。

(2) 填充硅橡胶的泡沫纯铝的弹性段和塑性段是平稳过渡的,因为纯铝韧性好,孔壁被横向挤破是连续的过程,而填充硅橡胶的泡沫铝-硅合金的两个阶段不是平稳过渡的,中间是失稳过渡的,因为铝-硅合金的脆性,孔壁被横向挤破是突变过程。

(3) 含硅橡胶的泡沫复合材料都是应变率十分敏感的,这是硅橡胶的变形随着应变率的增加对泡孔变形影响变大导致的,另外由于硅橡胶被限制在泡孔内而不可压缩,复合材料的应力-应变曲线震荡比较大。

(4) 含硅橡胶的泡沫纯铝压缩后成了硅橡胶和铝的复合材料;含硅橡胶的泡沫铝-硅合金的压缩曲线先升高达到最大值再降低,在应变为 0.25 左右时达到最低。压缩后,基本上所有的孔壁都发生了断裂。

参考文献:

[1] Triantafyllidis N, Schraad M W. Onset of failure in aluminum honeycombs under general in-plane loading[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998,46(6):1089-1124.
 [2] Gioux G, McCormack T M, Gibson L J. Failure of aluminum foams under multiaxial loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000,42(6):1097-1117.
 [3] 余欢,方立高,严青松. 多孔泡沫铝的制备及其吸声性能测定[J]. 热加工工艺,2001(1):35-36.
 YU Huan, FANG Li-gao, YAN Qing-song. The fabrication of porous aluminum alloys and the testing of the sound

absorbent property[J]. *Hot Working Technology*, 2001(1):35-36.

- [4] 于英华,李智超,刘敬福.多孔泡沫铝性能研究现状及应用前景展望[J]. *辽宁工程技术大学学报*,2003,22(2):259-260.
- YU Ying-hua, LI Zhi-chao, LIU Jing-fu. Research present situation and prospect for application on porous foam aluminum[J]. *Journal of Liaoning Technology University*, 2003,22(2):259-260.
- [5] 张勇.充满生机的新型功能材料——泡沫金属[J]. *山东工程学院学报*,1994,8(3):1-6.
- ZHANG Yong. Porous metals—A kind of new functional materials with vigor and vitality[J]. *Journal of Shandong Institute of Engineering*, 1994,8(3):1-6.
- [6] Andrews E, Sanders W, Gibson L J. Compressive and tensile behavior of aluminum foams[J]. *Materials Science and Engineering*, 1999,270(2):113-124.
- [7] Kathryn A Dannemann, James Lankford Jr. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000,293(1/2):157-164.
- [8] 何德坪,余兴泉,陈锋. P/MCs 新型复合材料制备、结构及阻尼性能[J]. *材料研究学报*,1996,10(4):347-350.
- HE De-ping, YU Xing-quan, CHEN Feng. Fabrication, structure and damping capacity of new type P/MCs[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 1996,10(4):347-350.
- [9] 余兴泉,何德坪. 泡沫金属——高分子聚合物的复合体机械阻尼性能研究[J]. *功能材料*,1996,27(2):171-175.
- YU Xing-quan, HE De-ping. Research on the mechanical damping properties of the compound of metallic foam and polymer[J]. *Journal of Functional Materials*, 1996,27(2):171-175.
- [10] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids*[A]. *Structure and Properties*[M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [11] Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminium alloy foams[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000,24(3):277-298.
- [12] Kathryn A Dannemann, James Lankford Jr. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams[J]. *Materials Science and Engineering*, A, 2000,293:157-164.

Investigation on mechanical properties of the composites of aluminum foam containing silicone rubber

TIAN Jie^{*}, HU Shi-sheng

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: The aluminium foam containing silicone rubber was fabricated by infiltrating silicone rubber into the open-cell aluminum foam. The dynamic compressive experiments and quasi-static experiments were conducted on material test system and SHPB, respectively. The results show that the compressive stress-strain curves of the composites of aluminium foam containing silicone rubber are characterized by two distinct regions, i. e. elastic region and plateau region; and are more sensitive in strain rate, and larger oscillation in compression curve.

Key words: solid mechanics; strain rate sensitivity; compressive experiment; aluminium foam; silicone rubber; oscillation

* Corresponding author: TIAN Jie
E-mail address: tianjie@mail.ustc.edu.cn
Telephone: 0551-3601249