

硅橡胶填充多孔金属材料静态压缩力学行为研究^{*}

王二恒¹, 李剑荣¹, 虞吉林¹, 程和法²

(1. 中国科学技术大学材料力学行为和设计中科院重点实验室, 安徽合肥 230026)

(2. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要:对两种有硅橡胶填充的多孔金属材料进行了单向压缩实验,一种是三维开孔泡沫铝,另一种是二维圆孔铝合金蜂窝。实验结果表明,硅橡胶填充以后,泡沫铝的应力应变曲线表现为弹性变形和塑性平台两个阶段,密实阶段不明显,且屈服应力和屈服平台长度相对无填充材料有明显增加;圆孔铝合金蜂窝的刚度和屈服应力也显著增加,屈服平台明显增长,显示出在单向压缩情况下更好的吸能性能。通过分析圆孔铝合金蜂窝的变形过程,发现由于填充的橡胶的体积不可压缩性,导致变形过程中孔壁被拉伸,改变了多孔材料的传统变形模式,从而改善了材料的性能。

关键词:泡沫铝;圆孔铝合金蜂窝;力学性能;橡胶填充

中图分类号: O334;TB33

文献标识码: A

0 引言

多孔金属材料作为多功能工程材料,尤其是新近出现的泡沫金属材料,具有低密度、高的比刚度和比强度以及良好的吸能、隔音和绝热性能^[1],在各种军用和民用的工程结构中展现广泛的应用前景。近几年来,泡沫金属材料的生产技术日趋成熟,也加速了人们对其应用研究的步伐^[2]。

利用多孔金属材料优异的力学性能,发展新型的复合材料和结构也成为当前泡沫金属材料研究的一个方向。例如,通过热处理工艺研制氧化铝陶瓷和泡沫铝合金的夹层复合板^[3]以提高陶瓷的抗冲击能力,将粘性物质填充到开孔泡沫金属材料中以增强其阻尼性能和改进其力学性能^[4,5]。

在开孔泡沫铝中填充高分子材料,如硅橡胶,可构成铝/硅橡胶复合材料。由于这种复合材料中的铝及硅橡胶各自呈连续状,相互穿插交叉,将其中的任何一相去除便剩下另外一相的三维连通孔结构的多孔材料,并能独立承载,因此这类材料被称为网络交织复合材料(In-

* 收稿日期:2003-10-10

基金项目:国家自然科学基金(10072059和90205003)和中科院王宽诚博士后奖励基金资助项目

作者简介:王二恒,男,1979年生,博士生。E-mail:wangkgl@mail.ustc.edu.cn

terpenetrating Phase Composite, 简称 IPC 材料)^[6]. 在力学性能方面, 金属相铝或铝合金的强度远高于硅橡胶材料, 而填充的硅橡胶是一种超弹性材料, 具有不可压缩性和高延性, 其延展性远高于铝和铝合金. 因此, 两者交织后的铝/硅橡胶复合材料的性能可望比多孔金属材料有较大提高. 本文对硅橡胶填充的开孔泡沫铝和圆孔铝合金蜂窝进行了单向压缩实验, 并与无填充的开孔泡沫铝和圆孔铝合金蜂窝的力学行为进行了比较, 通过对比硅橡胶填充的二维圆孔蜂窝和三维开孔泡沫的力学行为, 分析了填充的硅橡胶对多孔金属材料力学行为的影响, 以便为高分子填充泡沫金属的设计和和应用提供依据.

1 材料和试件:

实验所用泡沫铝材料从中科院固体物理所得到, 是采用加压渗流法制备. 具体过程是: 将经过预脱水处理的一定粒径的可溶性粒子装入金属模具中, 再放在炉内在 400 ~ 700 温度下预热, 同时在电阻坩锅炉内熔化工业纯铝至 700 ~ 800 . 将铝液浇入模具中后再在液面施加 $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 的压力, 使铝液渗入粒子的缝隙中. 冷却后, 将铝/粒子复合体中的可溶性粒子溶解去除, 便可得到开孔结构的泡沫铝, 且泡沫铝的孔径就是所采用可溶性粒子的粒径. 图 1(a) 显示了泡沫铝材料微观结构的扫描电镜照片.

本实验所用泡沫铝的孔径为 1 ~ 2 mm, 密度约为 1.1 g/cm^3 , 相对密度为 0.4. 用电火花



图 1 开孔泡沫铝微观结构的 SEM 照片

Fig.1 SEM image of open cell aluminum foams

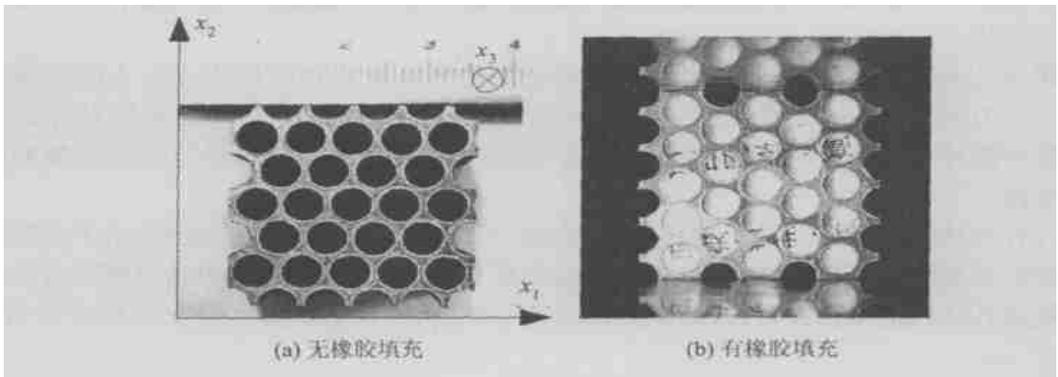


图 2 圆孔蜂窝铝照片

Fig. 2 The images of aluminum honeycombs

线切割将泡沫铝加工成压缩实验所需样品的尺寸： $\phi 25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。在泡沫铝样品中注入硅橡胶液体，经固化后即得到橡胶填充的开孔泡沫铝。改变注入工艺可得到不同剩余孔隙度的硅橡胶填充泡沫铝，本次试验所用硅橡胶填充试件的剩余孔隙率为 16%。图 1(b) 显示了橡胶填充泡沫铝材料微观结构的扫描电镜照片，其中白色鼓出的是硅橡胶填充物。

本试验所用类蜂窝材料为自制圆孔铝合金蜂窝，是选用 19 mm 厚的 LY12 铝合金板材，钻出直径 4.2 mm、孔间距为 5 mm、规则密排的平行圆孔，然后用电火花线切割将板材加工成实验所需样品的尺寸 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ ，其相对密度为 0.4。同样，在孔洞内浇注硅橡胶液体，固化后得到硅橡胶填充蜂窝。从图 2 可以看出，圆孔蜂窝由于孔洞规则，填充质量更好，可以达到 100% 的填充（体积百分比）。

2 实验结果分析和讨论

2.1 组元材料的单向压缩行为

我们对组元材料的单轴压缩力学行为进行了研究，制备了基体材料（纯铝、铝合金 LY12）和填充材料（硅橡胶）的压缩试样。纯铝和铝合金 LY12 试件的尺寸为 $\phi 12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ，在 MTS810.23 材料试验机上加载，硅橡胶试件的尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ ，在岛津材料试验机上加载，加载应变率均为 10^{-3} s 。图 3(a)、(b) 是工业纯铝和 LY12 铝合金单轴压缩下的工程应力-应变曲线，均表现为线性硬化的材料行为，其中工业纯铝的屈服强度约为 47 MPa，硬化模量约为 170 MPa；LY12 铝合金的屈服强度约为 450 MPa，硬化模量约为 2 000 MPa。图 3c 是硅橡胶单轴压缩下的工程应力-应变曲线，表现为典型超弹性的材料行为。

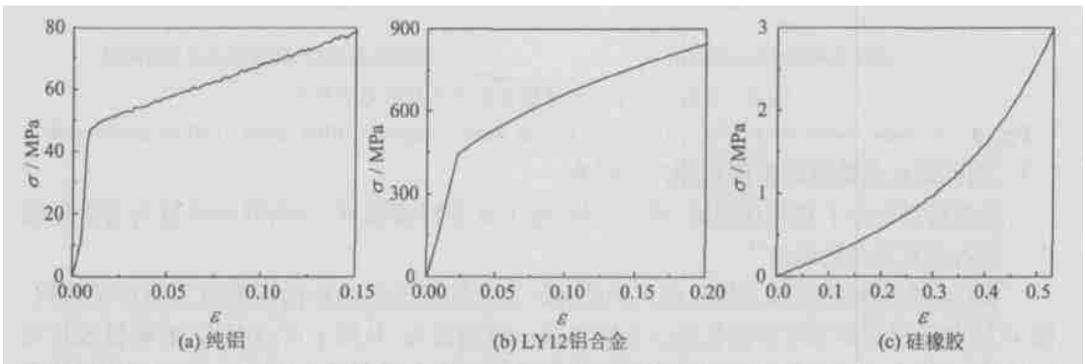


图 3 单轴压缩工程应力应变曲线

Fig. 3 Engineering stress-strain curves

2.2 泡沫铝的单向压缩下的力学行为

王曦和虞吉林对开孔泡沫铝的单向力学行为进行了研究，发现开孔泡沫铝的单向拉伸曲线可以用 Ramberg-Osgood 模型描述，而单向压缩曲线表现为弹性阶段-塑性平台阶段-密实阶段^[7]。

我们将有橡胶填充和无橡胶填充的开孔泡沫铝的单向压缩行为进行了比较。图 4(a) 显示了有无填充的泡沫铝单向压缩曲线。开始阶段二者重合，从应变 5% 开始，有填充泡沫铝的应力水平开始高于无填充泡沫铝，而当应变达到 42%（即无填充泡沫铝开始进入密实阶段）后，无填充泡沫铝应力水平迅速提高，而有填充泡沫铝的应力水平基本不变。可见，普通

无橡胶填充泡沫铝在单向压缩下表现出典型三段变形模式,有明显的密实阶段.橡胶填充后的泡沫铝在单向压缩下密实阶段不明显,而平台应变更大,达到 60%,平台应力也更高.

试验中所用的橡胶填充泡沫铝未完全填充,仍有 16% 的剩余孔隙.因此在有橡胶填充泡沫铝压缩过程的初始阶段,由于剩余的孔隙的存在,材料表现的变形行为与泡沫铝骨架一致,并未受到填充的硅橡胶的影响,因此有无橡胶填充的泡沫铝的压缩应力-应变曲线是基本重合的.当宏观轴向应变逐步增大,胞棱塑性坍塌进入屈服阶段,硅橡胶与铝骨架之间的剩余孔隙由于泡沫铝的体积可压缩性也逐步被压实,硅橡胶开始逐步参与到泡沫铝的变形中来.由于硅橡胶是不可压缩材料,一方面,硅橡胶将阻止或延缓胞棱发生塑性坍塌,使得应力曲线有明显提高;另一方面,硅橡胶的体积不可压缩特性必然导致侧向变形变大,从而使胞棱不断受拉破坏.随变形增加,硅橡胶进一步将铝骨架向侧向挤开,形成了类似硅橡胶和铝骨架的复合叠层结构,因此材料的轴向应力增加有限,应力平台也得以延长.从下面的橡胶填充蜂窝的变形情况我们可以看得更清楚.

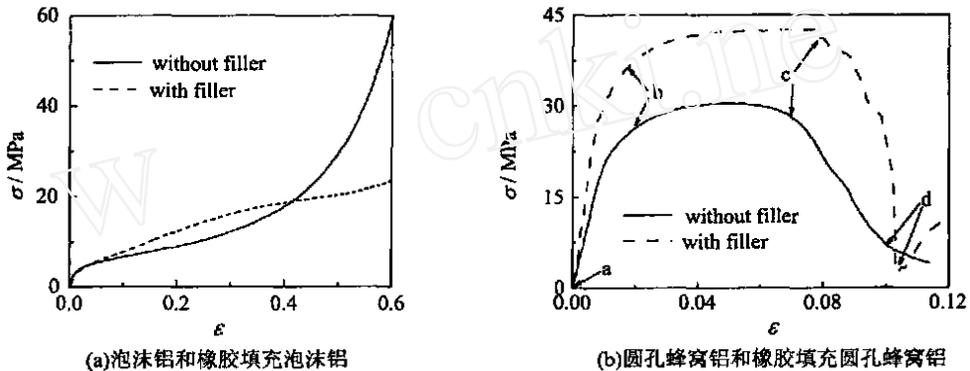


图 4 单向压缩下有无橡胶填充多孔铝的力学行为

Fig. 4 Mechanic behavior of cellular aluminum with or without elastomer filler under uniaxial compression

2.3 圆孔铝合金蜂窝的单向压缩力学行为

类蜂窝材料由于其形状规则,便于分析,便于试验观察验证,在研究泡沫材料力学性能中一直占据着重要的地位^[8].

我们将有橡胶填充和无橡胶填充的圆孔铝合金蜂窝的面内单向压缩行为进行了比较.图 4(b)显示了有无填充的圆孔铝合金蜂窝单向压缩曲线.从图上可以看出,有硅橡胶填充以后,圆孔铝合金蜂窝材料的初始刚度和屈服平台高度也都有很大的增加.和有硅橡胶填充的泡沫铝有所不同,硅橡胶对于圆孔蜂窝材料力学性能的影响在一开始就表现出来.这是因为蜂窝材料的填充率可达到 100%,而泡沫铝由于孔洞形状复杂,难以完全填充,使得硅橡胶填充泡沫铝开始时的行为基本上为未受硅橡胶影响的泡沫铝本身的行为.

图 5 显示了有填充和无填充圆孔蜂窝铝的变形模式.刚开始变形时,无硅橡胶填充圆孔铝合金蜂窝以孔壁弯曲为主要变形模式进入屈服阶段,而有硅橡胶填充圆孔铝合金蜂窝以孔壁弯曲及内部橡胶受挤压为主要变形模式进入屈服阶段,从图 5(b)中可以看出,蜂窝本身变形模式基本是一样的,但有填充蜂窝内的橡胶明显有被挤出的趋势,由于硅橡胶体积不可压缩性,其抵抗变形而引起的胞壁内压分布改善了胞壁弯曲的行为从而提高了试件的刚

度和屈服平台应力. 随变形量增大, 无填充蜂窝的孔壁向孔内塑性坍塌, 孔洞面积被压缩, 直至完全压实. 这个过程是随孔壁塑性坍塌渐进进行的, 表现为压缩应力应变曲线的相对缓慢

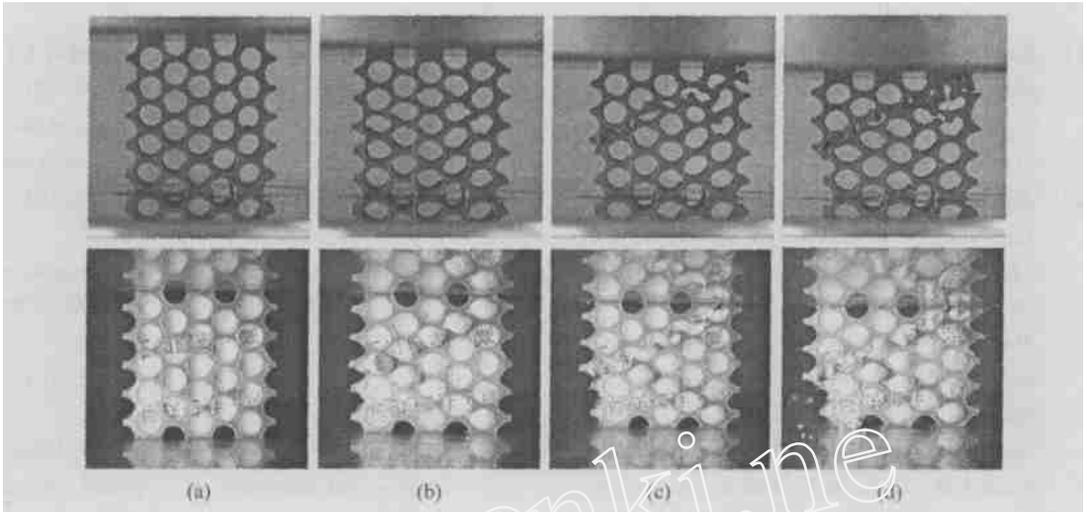


图 5 圆孔蜂窝铝和橡胶填充圆孔蜂窝铝的压缩变形和破坏模式 (其中字母对应图 4(b) 上标注的时刻)

Fig. 5 The deformation and failure of aluminum honeycomb with or without silicate rubber under compression (corresponding to fig. 4(b))

下降. 而有填充蜂窝的孔壁由于填充硅橡胶阻挡, 无法向孔内塑性坍塌, 表现为孔洞整体剪切变形破坏, 上下两部分间发生明显的整体滑移. 从图 5(c) 可以看出, 有填充蜂窝的孔壁受到横向拉伸, 以保持孔洞面积基本不变, 直至孔壁被完全拉断. 最后, 材料分成上下两个部分和中间的硅橡胶层, 见图 5(d). 这个过程是随孔壁拉伸断裂突发进行的, 表现为压缩应力应变曲线的突然卸载 (图 4(b)). 与泡沫铝的行为不同, 试验的圆孔铝合金蜂窝的压缩曲线在较小应变下就卸载, 且没有压实段. 这是由于圆孔铝合金蜂窝的塑性屈服主要因为形成了一条剪切带 (图 5(b)、(c)、(d)), 胞壁在这条剪切带上出现整体断裂, 结构发生破坏, 又由于剪切带的特征尺寸只是一个孔洞的大小, 因此圆孔铝合金蜂窝无法达到完全压实段的就失去承载能力, 导致应力应变曲线迅速卸载.

可以上面的分析可以看出, 填充的硅橡胶完全改变了圆孔蜂窝的变形模式, 通过其体积不可压缩和超弹性的力学性能, 改善了孔壁弯曲变形的行为, 增加了孔壁的拉伸变形, 从而使屈服应力增加和应力平台延长, 这也是硅橡胶填充物改进泡沫铝性能的原因.

3 结论

() 在单向压缩条件下, 硅橡胶填充开孔泡沫铝的应力应变曲线表现为弹性变形阶段和塑性平台阶段, 密实阶段不很明显. 和普通无填充泡沫铝相比, 屈服应力提高, 应力平台变长.

() 在单向压缩条件下, 硅橡胶填充圆孔蜂窝铝比普通圆孔蜂窝铝有更大的刚度和屈服应力, 屈服平台也有明显伸长. 硅橡胶填充物是通过改变圆孔蜂窝铝的孔壁变形模式使得填充后的材料有更优越的性能.

参 考 文 献

- [1] Evan A G, Hutchinson J W, Ashby M F. Multi-functionality of cellular metal systems[J]. Progress in Materials Science, 1998, 43(3): 171-221.
- [2] Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(6): 559-632.
- [3] Markaki A E, Clyne T W. Energy absorption during failure of layered metal foam/ceramic laminates[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 323: 260-269.
- [4] Kwon Y W, Cooke R E, Park C. Representative unit-cell models for open-cell metal foams with or without elastic filler[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 343: 63-70.
- [5] Cheng H F, Han F S. Compressive behavior and energy absorbing characteristic of open cell aluminum foam filled with silicate rubber[J]. Scripta Materialia, 2003, 49: 583-586.
- [6] Clark D R. Interpenetrating phase composites[J]. J Am. Ceram. Soc., 1992, 75: 739-759.
- [7] 王曦, 虞吉林. 泡沫铝的单向力学行为[J]. 实验力学, 2001, 16(4): 438-443.
- [8] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Oxford: Pergamon, 1997.

Investigation of Static Compression Behavior of Cellular Materials With Silicate Rubber Filler

WANG Er-heng¹, LI Jian-rong¹, YU Ji-lin¹, CHENG He-fa²

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, USTC, Hefei 230026, China)

(2. School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Quasi-static uni-axial compressive experiments were conducted on two cellular metals, i. e., open-cell aluminum foams and circle-hole aluminum alloy honeycombs, filled with silicate rubber. Compared with those without silicate rubber filler, the uni-axial stress-strain curve of aluminum foams with the filler has higher and longer collapse plateau, and no conspicuous densification region. The circle-hole aluminum alloy honeycombs with silicate rubber also have a higher modulus, higher and longer collapse plateau than those without the filler. The results show that the cellular materials with silicate rubber filler exhibit excellent performance in absorbing energy under uni-axial compression. Based on the deformation process of circle-hole aluminum alloy honeycomb, we found that the cell wall was elongated due to the incompressibility of the silicate rubber filler. This mechanism changed the cellular materials' deformation mode and improved their performance.

Key words: aluminum foam; circle-hole aluminum alloy honeycomb; mechanical properties; silicate rubber filler