文章编号：1000-5773(2012)02-0171-06

复合应力下泡沫铝屈服行为实验研究*

周志伟，王志华，赵隆茂，树学峰

（太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所，山西太原　030024）

摘要：采用 ARCAN 双轴加载装置和材料实验机(INSTRON 5544)，对相对密度为 8.5% 的闭孔泡沫铝(Alporas)进行了不同应变率下的双轴加载实验。在宏观等效应变率为 7.0×10^{-3}～1.0×10^{-1} s^{-1} 范围内测得实验屈服面，并与泡沫金属的 3 种屈服准则进行了比较。比较结果表明：在主应力空间下，实验屈服面与 Miller 和 Deshpande-Fleck 屈服准则吻合较好，Gibson 屈服准则过小估计了测试泡沫铝的实验屈服面；被测泡沫铝的实验屈服面在宏观等效应变率 7.0×10^{-3}～1.0×10^{-1} s^{-1} 范围内对应变率不敏感。

关键词：复合应力；泡沫铝；尺寸效应；屈服面；应变率效应

中图分类号：O347.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

泡沫金属材料具有密度小、轻质、高比强度等优异特性，在工业领域特别是高技术领域受到越来越广泛的重视，并应用于航空航天、铁道车辆、汽车、军事、建筑及包装等工业领域。而这些工程应用都需要对泡沫金属的力学本构模型进行深入的研究。鉴于泡沫金属材料内部几何缺陷、微观形貌的复杂性，以及由此导致的变形和失效力学行为特征及机制的迥异性，从宏观唯象层次上建立本构模型，成为泡沫金属材料本构力学行为研究的重要途径。目前，国内外对于泡沫金属材料的屈服准则及其本构模型已有了一些研究。Gibson 等人[1]基于描述泡沫材料的正立方体模型，提出了一个泡沫材料多轴失效的理论屈服准则，并利用泡沫塑料的多轴加载实验证明其屈服准则总体趋势的合理性。Miller[2]基于针对土壤的 Drucker-Prager 屈服准则，提出了一个适用于塑性可压缩固体的弹塑性本构模型，通过实验数据说明了单轴拉压强度不对称泡沫金属在 σ_e-σ_m 空间屈服面近似圆形的特征。

Deshpande-Fleck[3]基于粉末压实模型，提出了一种自相似屈服函数，并对 3 种具有不同密度的泡沫铝进行了三轴静水压缩和三轴等比例压缩实验，结果表明，自相似模型能精确预计测试泡沫的实验屈服应力。Ruan 等人[4]等人对一系列相对密度的闭孔泡沫铝进行了轴向应变率在 10^{-4}～10 s^{-1} 范围内的三轴等比例压缩实验，以验证上述 3 种屈服准则，结果表明，实验与 Miller 和 Deshpande-Fleck 屈服准则吻合较好，而 Gibson 屈服准则过大估计了实验屈服面。Chen 等人[5]基于弹性余能形式引出两标量式的特征应力和特征应变，并结合相应的应力势和屈服流动法则，提出一套既可用于塑性可压缩固体又可用于塑性不可压缩固体的本构模型框架。王二恒等人[6]基于 Chen 和 Lu 等人[5]提出的压缩弹塑性固体唯象本构模型框架(Chen-Lu 模型)，建立了泡沫铝的准静态本构模型，并通过单轴压缩、三轴静水压缩、三轴等比例压缩和径向受约束轴向压缩实验，得到了轴向宏观应力-应变曲线，验证了 Chen-Lu

* **收稿日期**：2010-12-20；**修回日期**：2011-03-26

基金项目：国家自然科学基金(11172195，10972153，11172196)；山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划；教育部新世纪优秀人才计划

作者简介：周志伟(1982—)，男，博士研究生，主要从事冲击动力学、轻质材料与结构力学行为及其计算机仿真研究. E-mail：rainzzw@163.com

通讯作者：树学锋 (1964—)，男，教授，博士生导师，主要从事冲击动力学、弹塑性动力学研究. E-mail：shuxf@tyut.edu.cn

模型能够很好地描述泡沫铝材料在压缩占主导的应力状态下的响应。

上述三轴静水压缩实验($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3<0$)、三轴等比例压缩实验($\sigma_1=\sigma_2$,$\sigma_3<0$)和径向受约束轴向压缩实验($\sigma_1$,$\sigma_2$,$\sigma_3<0$),都是在泡沫试件的轴向和径向直接建立起主应力方向而得到的屈服应力状态。这类实验方法只能获得特殊的屈服应力状态(2 个主应力相等,3 个主应力都小于零,集中在主应力空间第七卦限的特殊区域上)。而在实际工程应用中,泡沫金属材料的工况往往是在复杂应力状态下,所以研究复杂应力状态,特别是最接近实际工况的压剪复合应力状态下泡沫金属的屈服行为,对泡沫金属材料的设计与实际工程应用都有重要意义,但是这方面的工作在国内还未见有报道。Doyoyo 和 Wierzbicki[7] 对两种泡沫铝(Alporas 和 Hydro)进行了准静态(加载速度 0.05 mm/s)双轴加载实验,获得了平面压剪和拉剪复合应力状态下的屈服应力,并与其提出的唯象屈服模型吻合较好。模型中考虑了泡沫铝的单轴拉压屈服强度不对称、与材料的各向异性等因素,但实验获得的主要是拉剪复合应力状态数据,且未考虑到应变率效应对泡沫铝实验屈服面的影响。由于金属泡沫的结构、形状和基体材料的不均匀性,使得尺寸效应、应变率效应、材料各向异性等都是必须要考虑的因素。本研究将对相对密度为 8.5%的闭孔泡沫铝在宏观等效应变率在 $7.0\times10^{-3}\sim1.0\times10^{-1}\ s^{-1}$ 范围进行双轴加载实验,以此研究复杂应力状态下泡沫铝的屈服行为,并验证已提出的 3 种屈服准则。实验中采用的蝶形试件能减弱尺寸效应对实验数据的影响,提高了实验数据的精度。

2 实 验

2.1 材料和试件制备

实验中采用由德国 Shinko Wire 公司生产的闭孔泡沫铝(Alporas)进行测试。泡沫铝的主要性能:基体材料 Al-Ca-Ti 合金,平均密度 230 kg/m^3,相对密度 8.5%,杨氏模量 1.00 GPa,泊松比 0.33,平均孔径 3.5 mm。

在以往的泡沫金属单轴实验中,主要采用圆柱形或矩形试件进行测试。由于泡沫金属内部材料与结构的不均匀,变形失效首先出现在承载能力最弱的胞孔带附近,最弱胞孔带被完全压实后其它胞孔带才开始出现压缩塑性变形。因此实验应力-应变曲线受试件形状和尺寸影响较大。Wierzbicki 和 Doyoyo[8] 通过实验与理论研究发现,蝶形试件的变形失效首先发生在试件的中心部分,这种在确定的局部区域发生变形失效而获得的应力-应变曲线受试件形状和尺寸效应影响较小,有较好的可重复性。本研究采用蝶形试件进行双轴加载实验,试件中心部分长为 25 mm、厚为 10 mm,以此保证至少有 8 个胞孔分布。所有蝶形试件都采用线切割技术从厂家提供的 500 mm×500 mm×200 mm 矩形块材料上直接切割获取,切割后采用环氧树脂 AB 胶把双轴加载装置中的金属连接件与蝶形试件进行粘接,然后固定于压力模具下至少 24 h,以保证环氧树脂胶固化强度最大。如图 1 所示。

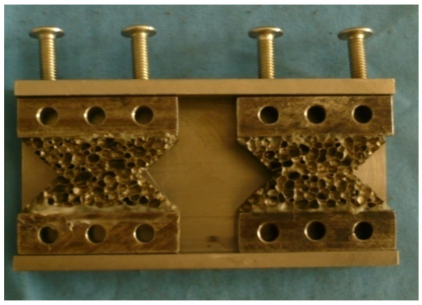


图 1 压力模具中的蝶形试件

Fig. 1 Butterfly specimens in the pressure fixture

2.2 双轴加载实验

双轴加载实验采用改进型 Arcan 装置与 INSTRON5544 材料实验机。改进型 Arcan 装置是由两个对称的金属半圆盘和中心部分的蝶形试件组成,金属半圆盘与加载设备之间采用爪形夹具作为过渡,并采用多钉连接,使得半圆盘在竖直平面内的旋转自由度受到约束(单钉条件下未限制)。半圆盘对试件产生一个不可忽略的水平力 F_H。图 2 为改进型 Arcan 装置的原理图,其中蝶形试件中心部分与加载方向的夹角定义为加载角,通过变化加载角度可以进行一系列的双轴加载实验。图 3 为蝶形试件中心部分的应力状态。Mohr 等人[8] 对改进型的 Arcan 装置进行了理论和有限元分析,提出了在蝶形试件中心部分各应力分量的表达式((1)式~(4)式)

$$\sigma_{xy} = \left[\frac{\cos\alpha}{(\beta_x - 1)\sin^2\alpha + 1}\right]\frac{V}{S} \tag{1}$$

$$\sigma_{yy} = \left[\frac{\beta_x \sin\alpha}{(1 - \beta_x)\cos^2\alpha + \beta_x}\right]\frac{V}{S} \tag{2}$$

$$\sigma_{xx} = \gamma\sigma_{yy} \tag{3}$$

式中:γ 是泡沫铝的弹性泊松比,$S=250\ \text{mm}^2$ 为试件中心部分面积,V 是竖直方向载荷,β_x 为试件刚度,对于各向同性材料,刚度为

$$\beta_x = 2/(1-\gamma) \tag{4}$$

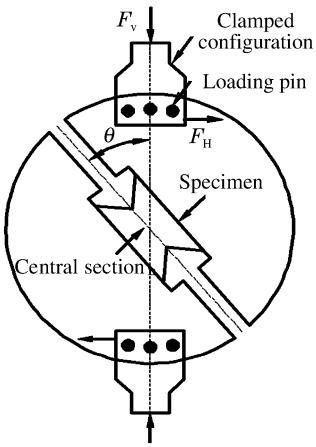


图 2 改进型 Arcan 装置原理图

Fig. 2 Schematic of the modified Arcan apparatus

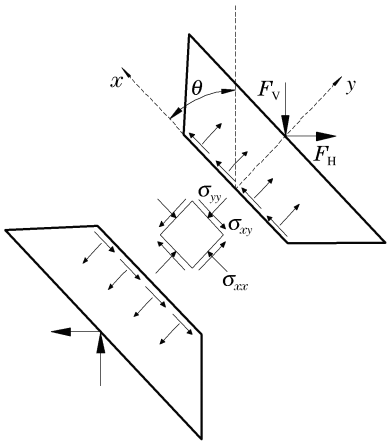


图 3 蝶形试件中心部分应力状态

Fig. 3 State of stress at the central section of the butterfly specimen

3 实验结果与分析

3.1 双轴加载实验结果

双轴加载实验分别采用 3 种加载速度(2.5、0.25、0.025 mm/s),由 INSTRON 实验机上的传感器直接测得竖直方向的位移-载荷曲线,图 4 是加载速度为 0.025 mm/s 时的各角度曲线,曲线初始载荷与位移成线性变化,之后由于中心部分胞孔的连续垮塌而引起刚度减弱,致使曲线的斜率逐渐降低,一直持续到加载的峰值,曲线的峰值在压剪和拉剪实验中分别代表不同的破坏失效模态。在拉剪实验中,曲线峰值代表试件中心部分胞孔壁开始被撕裂,最终导致整个试件发生延展性断裂。在压剪实验中,试件受压曲线峰值代表试件中心部分的胞孔开始塑性崩塌,之后进入应力平台阶段。

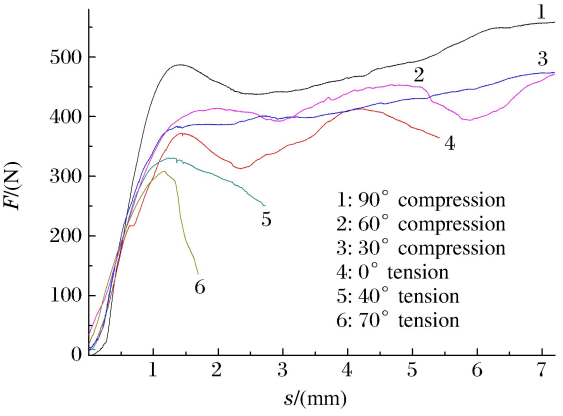


图 4 不同角度下竖直方向载荷-位移曲线

Fig. 4 Vertical load-displacement curves for different loading angles

3.2 初始屈服面的确定

基于双轴实验中测得的屈服载荷与(1)式~(4)式,可以确定出各角度加载下屈服点的各应力分量,如图 5 和图 6 所示。在加载角小于或等于 40°时,正应力随角度的增大而显著增大;当加载角大于 40°时,正应力随角度的增长幅度明显减缓。而在 0°~90°时,剪应力随角度的增大而逐渐减小。当加载角度为 0°时,材料的剪切强度在 0.67~0.74 MPa 之间;在加载角 20°附近,σ_{xx} 和 σ_{xy} 大致相等,此时正剪应

力对材料的屈服影响各半;而当加载角小于 20°时,剪应力对材料的屈服起主导作用;大于 20°时,正应力占主导作用。需要说明的是:当加载角度为 90°时,并不是单轴拉伸或压缩状态,试件的中心部分仍然有剪应力,这主要是由于多钉连接产生的横向载荷 F_H 造成的。由于各加载角度下屈服点二维复合应力状态的两个非零主应力与零值主应力之间大小关系不恒定,所以选择在两个非零主应力空间作出实验屈服面。

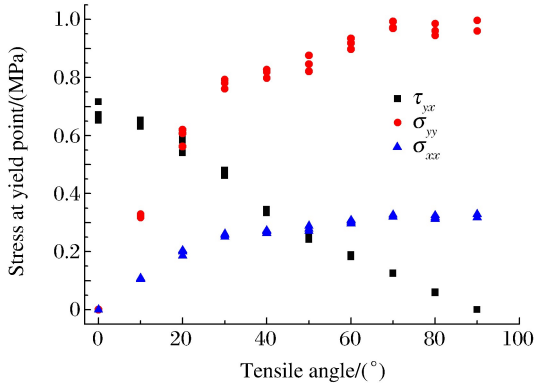


图 5 各角度下拉剪屈服点应力

Fig. 5 Variation of the measured normal and shear stresses at the yield point with the loading angle

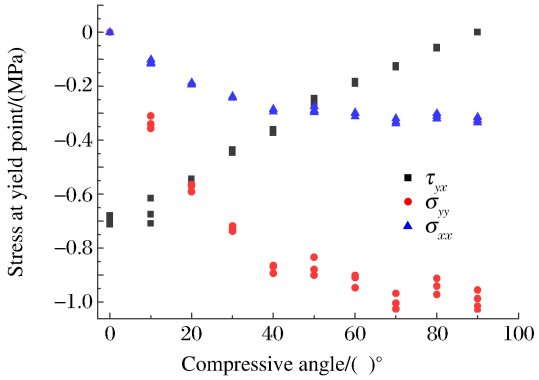


图 6 各角度下压剪屈服点应力

Fig. 6 Variation of the measured normal and shear stresses at the yield point with the loading angle

Gibson 和 Ashby[1] 基于描述泡沫材料的正立方体模型,提出了泡沫材料多轴加载屈服面

$$\pm\frac{\sigma_e}{\sigma_{pl}^*}+0.81\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{pl}^*}\right)^2=1 \tag{5}$$

式中:σ_e 是 Mises 等效应力,σ_m 是平均应力,σ_{pl}^* 是单轴屈服强度,取 $\sigma_{pl}^*=(\sigma_c+\sigma_t)/2$,根据泡沫铝(Alporas)的单轴拉伸压缩屈服强度 $\sigma_{pl}^*=0.96$ MPa,可得理论屈服面

$$\pm\frac{\sqrt{\sigma_{max}^2\sigma_{min}^2-\sigma_{max}\sigma_{min}}}{0.96}+0.0081\,(\sigma_{max}+\sigma_{min})^2=1 \tag{6}$$

Miller[2] 基于针对土壤的 Drucker-Prager 屈服准则,提出了唯象的金属泡沫弹塑性本构模型

$$f=\sigma_e-\gamma p+\frac{\alpha'}{d_0\sigma_c}p^2-d_0\sigma_c\leqslant 0 \tag{7}$$

式中:p 是静水压缩应力(平均应力),σ_c 是单轴压缩屈服强度,参数 γ、α'、d_0 由 β 和塑性泊松比 γ_{pl} 确定,β 为材料压拉伸强度比。

$$\beta=\sigma_c/\sigma_t \tag{8}$$

$$\gamma=\frac{6\beta^2-12\beta+6+9(\beta^2-1)/(1+\gamma_{pl})}{2\,(\beta+1)^2} \tag{9}$$

$$\alpha'=\frac{45+24\gamma-4\gamma^2+4\gamma_{pl}(2+\gamma_{pl})(-9+6\gamma-\gamma^2)}{16\,(1+\gamma_{pl})^2} \tag{10}$$

$$d_0=\frac{1}{2}\left(1-\frac{\gamma}{3}+\sqrt{\left(1-\frac{\gamma}{3}\right)^2+\frac{4\alpha'}{9}}\right) \tag{11}$$

相对密度为 8.5%的闭孔泡沫铝(Alporas)的塑性泊松比 $\gamma_{pl}=0.024$,$\beta=1.021$,$\gamma=0.046$,$\alpha'=2.646$,$d_0=1.224$,可得屈服面为

$$\sqrt{\sigma_{max}^2+\sigma_{min}^2-\sigma_{max}\sigma_{min}}-0.015(\sigma_{max}+\sigma_{min})+0.248\,(\sigma_{max}+\sigma_{min})^2=1.188 \tag{12}$$

Deshpande-Fleck 基于粉末压实模型提出了一种自相似模型,屈服函数为

$$f=\frac{1}{[1+(\alpha/3)^2]}[\sigma_e^2+\alpha^2\sigma_m^2]-\sigma_y^2\leqslant 0 \tag{13}$$

$$\alpha=3\left(\frac{0.5-\gamma_{pl}}{1+\gamma_{pl}}\right)^{1/2} \tag{14}$$

式中:σ_y是单轴屈服强度,取$\sigma_y=(\sigma_c+\sigma_t)/2$,$\alpha$是由塑性泊松比确定的屈服面形状参数,定义了椭圆屈服面的偏心率,可得屈服面为

$$(\sigma_{max}+\sigma_{min})^2-2.047\sigma_{max}\sigma_{min}=0.941 \quad (15)$$

图 7 是理论唯象屈服面与在加载速度为 0.025 mm/s下的双轴实验数据(数据平均值)的比较,结果表明,Miller 与 Deshpande-Fleck 屈服准则吻合较好。

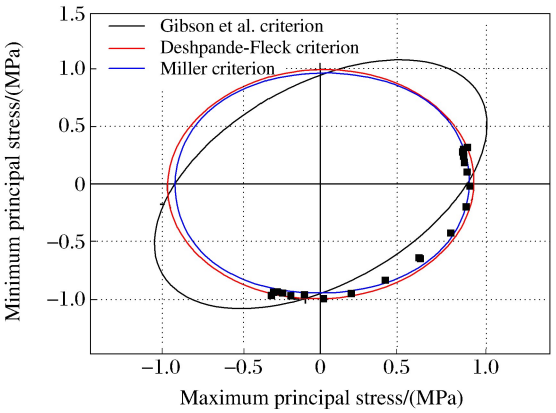


图 7　唯象屈服面与双轴实验数据

Fig. 7　Comparison of the phenomenological yield surface with the measured biaxial yield data

4　应变率效应研究

在改进型 ARCAN 装置中,加载圆盘、爪形夹具与金属键的刚度远大于泡沫铝试件的刚度,在分析中可以当成刚体,可得到碟形试件整个边界的位移,如图 8 所示。整个试件上表面的位移与加载设备位移相同,令加载设备在竖直方向的位移为 $s=vt$,可以得到试件表面的位移为

$$s_x=s\cos\theta \quad (16)$$

$$s_y=s\sin\theta \quad (17)$$

由于试件在初始屈服前属于小变形,所以可以假设蝶形试件在整个实验中的边界条件与宏观应变为

$$u_x(x,y)=s_x/2+s_xy/H \quad (18)$$

$$u_y(x,y)=s_y/2+s_yy/H \quad (19)$$

$$\varepsilon_x(x,y)=\partial u_x/\partial x=0 \quad (20)$$

$$\varepsilon_y(x,y)=\partial u_y/\partial y=s_y/H \quad (21)$$

$$\gamma_{xy}(x,y)=\partial u_x/\partial y+\partial u_y/\partial x=s_x/H \quad (22)$$

而复合应力状态下等效应变率为

$$\varepsilon_e=2\sqrt{J_2}/\sqrt{3}=\sqrt{2[(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2+(\varepsilon_y-\varepsilon_z)^2+(\varepsilon_z-\varepsilon_x)^2+6(\gamma_{xy}^2+\gamma_{yz}^2+\gamma_{zx}^2)]/9} \quad (23)$$

由(23)式得到蝶形试件在二维复合应力-应变状态下的等效应变率为

$$\dot{\varepsilon}_e=2vt\sqrt{1+2\cos^2\theta}/3H \quad (24)$$

由(24)式可以得到实验中最大宏观等效应变率($v=2.5$ mm/s,$\theta=0°$)$\dot{\varepsilon}_e=0.1155\ s^{-1}$,最小宏观等效应变率($v=0.025$ mm/s,$\theta=90°$)$\dot{\varepsilon}_e=0.0007\ s^{-1}$,整个实验是在这个宏观等效应变率范围内进行的。图 9 是 3 个理论屈服面与在 3 种加载速度下得到的屈服主应力(同速度、同角度下所测 3 个数据的平均值)的比较,从图 9 中可以看出,3 种加载速度下的实验数据变化不大,在上述宏观等效应变率范围内,实验屈服面对应变率不敏感。

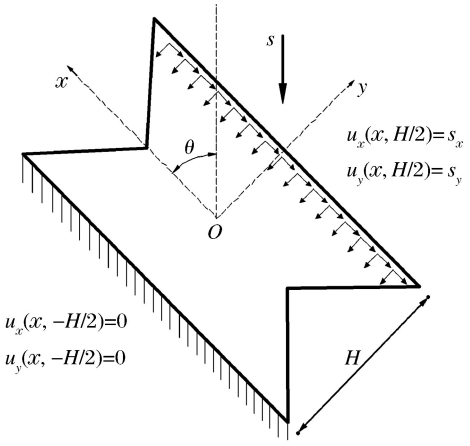


图 8　蝶形试件边界条件

Fig. 8　Boundary conditions of the butterfly specimen

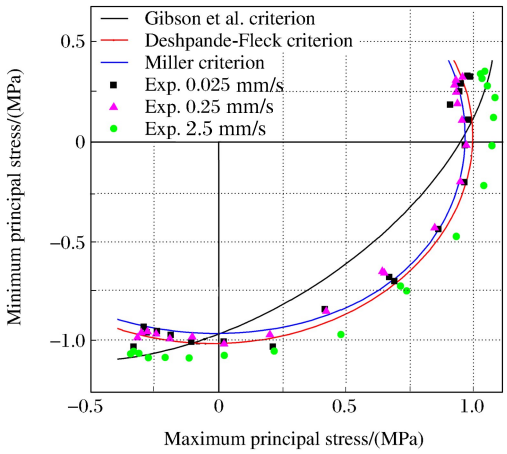


图 9　不同加载速度下双轴实验数据

Fig. 9　Measured biaxial yield data at different strain rate

5 结 论

采用改进型 ARCAN 装置进行了宏观等效应变率在 $7.0\times10^{-3}\sim1.0\times10^{-1}$ s^{-1}范围内的多角度双轴加载实验,将实验屈服面与 3 种已提出的泡沫金属材料屈服准则进行比较。结果表明,实验数据与 Miller 和 Deshpande-Fleck 屈服面吻合较好。被测泡沫铝的实验屈服面在宏观等效应变率为 $7.0\times10^{-3}\sim1.0\times10^{-1}$ s^{-1}范围内对应变率不敏感。

References:

[1] Gibson L J, Ahsby M F, Zhang J, et al. Failure surfaces of cellular materials under multiaxial loads—Ⅰ Modelling [J]. Int J Mech Sci, 1989, 31(9): 635-633.

[2] Miller R E. A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behaviour of foamed metals [J]. Int J Mech Sci, 2000, 42(4): 729-754.

[3] Deshpande V S, Fleck N A. Isotropic constitutive models for metallic foams [J]. J Mech Phys Solids, 2000, 48(6-7): 1253-1283.

[4] Ruan D, Lu G, Ong L S, et al. Triaxial compression of aluminium foams [J]. Compos Sci Technol, 2007, 67(6): 1218-1234.

[5] Chen C, Lu T J, Fleck N A. Effect of imperfections on yielding of two-dimensional foams [J]. J Mech Phys Solids, 1999, 47(11): 2235-2272.

[6] Wang E H, Yu J L, Wang F, et al. A theoretical and experimental study on the quasi-static constitutive model of aluminum foams [J]. Chinese Journal of Theoretical Applied Mechanics, 2004, 36(6): 673-679. (in Chinese)
王二恒, 虞吉林, 王 飞, 等. 泡沫铝材料准静态本构关系的理论和实验研究 [J]. 力学学报, 2004, 36(6): 673-679.

[7] Doyoyo M, Wierzbicki T. Experimental studies on the yield behavior of ductile and brittle aluminium foams [J]. Int J Plastic, 2003, 19(8): 1195-1214.

[8] Mohr D, Doyoyo M. Analysis of the arcan apparatus in the clamped configuration [J]. J Compos Mater, 2002, 36(22): 2583-2594.

[9] Gioux G, McCormack T M, Gibson L J. Failure of aluminum foams under multiaxial loads [J]. Int J Mech Sci, 2000, 42(6): 1097-1117.

Experimental Investigation on the Yield Behavior of Aluminum Foams under Combined Stress States

ZHOU Zhi-Wei, WANG Zhi-Hua, ZHAO Long-Mao, SHU Xue-Feng

(*Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: The initial yield behavior of Alporas closed-cell aluminium foams with relative density 8.5% under biaxial loading has been experimentally investigated using the Arcan apparatus and the universal testing machine(INSTRON 5544). The experimental yield surfaces measured from biaxial experiments are compared with various proposed phenomenological yield surface models. The comparison result indicates that the experimental data are consistent with both Miller and Deshpande and Fleck criteria. Biaxial experiments have been carried out on aluminium foams at various loading velocities to study the effect of strain rate on the initial yield surface. The results showed that the initial yield stresses of Alporas closed-cell aluminium foams are not sensitive to the equivalent strain rate ranged from 7.0×10^{-3} s^{-1} to 1.0×10^{-1} s^{-1}.

Key words: combined stress; aluminum foam; size effect; yield surface; strain rate effect