高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 32 卷　第 3 期
2018 年 6 月

高　压　物　理　学　报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 32, No. 3
June, 2018

DOI:10.11858/gywlxb.20170655

闭孔泡沫铝准静态压剪性能研究*

李雪艳,李志斌,张　舵

(国防科技大学理学院,湖南 长沙　410073)

摘要:通过添加斜端面垫块和长方体套筒,利用材料试验机对闭孔泡沫铝进行准静态下的压剪复合加载实验。改变斜端面垫块的角度,得到泡沫铝在不同压剪加载路径下的力学性能。对试样进行受力分析,得到泡沫铝在压剪空间的屈服面。同时采用有限元软件 LS-DYNA 对闭孔泡沫铝的压剪加载过程进行数值模拟,仿真屈服面与实验屈服面吻合较好。仿真研究表明,密度相同的泡沫铝,在一定孔径范围内,胞孔尺寸越大,屈服应力越大,泡沫铝的承载能力越好。

关键词:压剪复合加载;闭孔泡沫铝;十四面体模型;屈服面;孔径

中图分类号:O341　　**文献标识码**:A

闭孔泡沫铝材料由于其重量轻、高比刚度、高比强度和良好的电磁屏蔽性能等优良特性,广泛应用于航空航天、汽车运输、军事等领域[1]。目前对泡沫铝的研究多集中于简单应力状态下的研究[2-4]。然而在实际应用中,泡沫金属材料受到的载荷作用往往是复杂的。例如,轻质泡沫材料在汽车中主要应用在保险杠、车架等部件,而在发生事故时这些部件受到的不会是单纯的拉伸或者压缩作用,材料主要受压剪加载作用而被破坏。因而研究泡沫金属在多轴加载下的宏观力学行为有重要的意义。

Gioux 等[5]采用双轴加载和三轴等比例加载装置测量得到了泡沫铝在准静态下的屈服面,Deshpande 等[6]引入静水压实现了对 Alporas 和 Duocel 两种泡沫铝的多轴加载,Ruan 等[7]实现了对 5 种不同密度 CYMAT 泡沫铝的三轴压缩。这些装置的应用为泡沫铝复合加载测试积累了重要的实验结果,但多数实验装置过于复杂。为了实现复杂应力状态的研究,一种简单的压剪复合加载的思想得到了关注。崔云霄等[8]通过改进杆系,将入射杆的后端面由原来的平面改为两个与轴线成 45°角的楔形面进行了剪切信号的测试;郑文等[9]通过添加对称的两个斜端面垫块实现了准静态和动态压剪复合加载。目前,国内外对于泡沫金属的屈服准则及其本构模型已有了一些研究。Gibson 等[10]基于描述泡沫材料的正立方体单胞模型,推导出了泡沫材料理论多轴失效屈服准则。Miller[11]通过改进 Drucker-Prager 屈服准则提出了一个唯象的泡沫金属各向同性弹塑性本构模型,模型中充分考虑到了材料的拉压屈服强度不对称性和材料的塑性可压缩性。

泡沫金属结构、形状和基体材料的不均匀性,使试件尺寸、加载应变率和胞孔尺寸等因素都会对材料的力学行为造成影响。Nieh 等[12]认为胞孔尺寸对材料屈服强度的影响可以忽略,Onck 等[13]建立模型进行分析后认为屈服强度随孔径与试件尺寸比值的增加逐渐增大且最终趋向稳定。因此,孔径对材料屈服强度的影响一直存在争议。

基于上述现状,本研究采用实验和数值模拟结合的方法研究闭孔泡沫铝在压剪复合加载下的力学性能,首先通过添加斜端面垫块和套筒对闭孔泡沫铝进行准静态下的压剪复合加载实验,然后利用有限元软件 LS-DYNA 对压剪加载过程进行数值模拟,验证上述压剪复合加载实验方法所获得数据的可靠性。最后仿真分析了胞孔尺寸对泡沫铝屈服面的影响。

* **收稿日期**:2017-10-09;**修回日期**:2017-11-08
基金项目:国家自然科学基金(11402299)
作者简介:李雪艳(1991—),女,硕士,主要从事材料的动态力学性能研究. E-mail:15073146797@163.com
通信作者:李志斌(1985—),男,博士,讲师,主要从事材料的动态力学性能研究. E-mail:lizhibin@nudt.edu.cn

© 2018 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics　http://www.gywlxb.cn

1　实验装置及原理

1.1　实验方案

通过添加斜端面垫块和长方体套筒，在材料试验机上实现对闭孔泡沫铝的压剪复合加载，如图 1 所示，其中套筒、斜端面垫块是本实验装置的主要改进部分。套筒的材质是工业用聚四氟乙稀，其作用是尽量减小加载过程中斜端面垫块与套筒之间的摩擦力，在整个加载过程中套筒约束了斜端面垫块的运动行程始终在轴线方向。本研究共设计了 6 种倾斜角(10°、20°、30°、40°、50°、60°)的斜端面垫块。为了防止试样在加载过程中发生滑动，通过增大垫块表面的摩擦度来增大试样与垫块之间的摩擦力。试件是底面直径 32 mm、高 10 mm 的圆柱形，具体尺寸和加载条件见表 1，试件的密度为 0.49 g/cm^3。

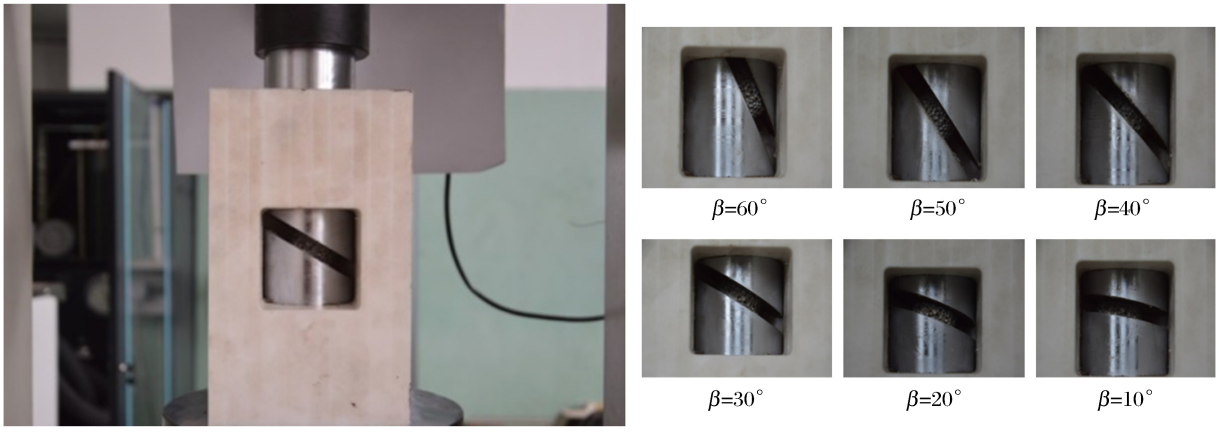

图 1　压剪复合加载实验装置

Fig. 1　Devices for combined compression-shear loading experiment

表 1　试件尺寸和加载条件

Table 1　Specimen size and loading conditions

Diameter/mm	Height/mm	Density/(g · cm^{-3})	Loading angle/(°)	Loading speed/(mm · min^{-1})
32.50	9.88	0.49	10	1
31.92	10.24	0.49	20	1
32.50	10.00	0.49	30	1
31.94	10.06	0.49	40	1
32.00	10.22	0.49	50	1
32.00	10.08	0.49	60	1

1.2　试件受力分析

如图 2 所示，定义垫块的倾角 β 为斜面与底面的夹角，静态实验中试件受力平衡，当垫块倾角为 β 时，若试件受到压力 F，此时泡沫铝试件受到法向的压力 F_n 和切向的剪力 F_s，根据力平衡可以得到

$$F_n \cos\beta + F_s \sin\beta = F \tag{1}$$

再对图 2(b)进行变形分析，若试样长度为 L，轴向变形为 s，因为变形量是小量，且实验中试件与垫块不发生相对滑动，则试件上的法向应变 ε 和切向应变 γ 应满足

$$\varepsilon = \frac{s\cos\beta}{L}, \gamma = \alpha \approx \tan\alpha \approx \frac{s\sin\beta}{L} \tag{2}$$

当试件处于弹性状态内，试件应力-应变满足

$$F_n = \sigma A_s = E\varepsilon A_s, F_s = \tau A_s = G\gamma A_s \tag{3}$$

式中：E 和 G 分别是试件的弹性模量和剪切模量，关系为

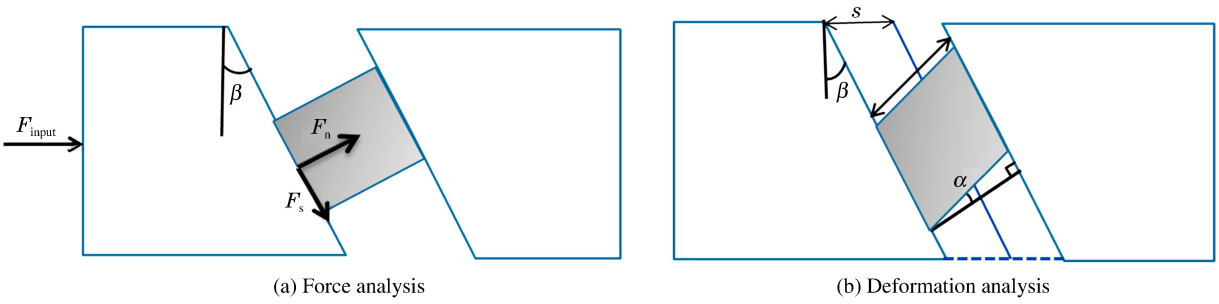

图 2　试样受力分析和位移关系

Fig. 2　Force analysis and deformation analysis for specimen

$$E=2(1+\nu)G \tag{4}$$

式中:ν 是试件的泊松比,将(2)式和(4)式代入(3)式可得

$$\frac{F_s}{F_n}=\frac{\tau A_s}{\sigma A_s}=\frac{G\gamma}{E\varepsilon}=2(1+\nu)\cos\beta \tag{5}$$

将(5)式代入(1)式可得到最终的法向力与切向力的表达式

$$F_n=\frac{2(1+\nu)\cos\beta}{(1+2\nu)\cos^2\beta+1}F \tag{6}$$

$$F_s=\frac{\sin\beta}{(1+2\nu)\cos^2\beta+1}F \tag{7}$$

进一步可以得到法向应力与切向应力的表达式

$$\sigma=\frac{F_n}{A_s}=\frac{2(1+\nu)F\cos\beta}{[(1+2\nu)\cos^2\beta+1]A_s} \tag{8}$$

$$\tau=\frac{F_s}{A_s}=\frac{F\sin\beta}{[(1+2\nu)\cos^2\beta+1]A_s} \tag{9}$$

法向应变 ε 和切向应变 γ 由(2)式给出,这样就可以得到在弹性段试件的法向应力-应变曲线和切向应力-应变曲线。

2　实验结果分析和讨论

2.1　表观载荷-位移关系

图 3 给出了密度为 0.49 g/cm^3 的闭孔泡沫铝试件在不同加载角度下压剪复合加载的表观载荷-位移曲线。曲线的形状与单轴压缩实验结果类似。初始峰值载荷定为泡沫铝的屈服载荷。整个载荷-位移曲线可以分为 3 个阶段:第 1 阶段是加载到初始峰值载荷,该阶段的主要材料性能指标是屈服载荷;第 2 阶段是从屈服载荷到材料开始被压实,该阶段的主要指标是塑性平台载荷 P_p;第 3 阶段是载荷急剧上升的压实阶段。在整个平台阶段,曲线上下波动,这种现象与泡沫铝的特殊微观结构有关。

塑性平台载荷通过(10)式确定

$$P_p=\frac{1}{S_d-S_y}\int_{S_y}^{S_d}p\,\mathrm{d}s \tag{10}$$

式中:S_y 是载荷-位移曲线中峰值载荷点对应的位移,S_d 是试样开始进入压实阶段时对应的位移。压实位移通过能量吸收效率曲线 E 确定,当能量吸收效率 E 达到最大时所对应的位移为压实位移,如图 4 所示。能量吸收效率 E 为

$$E=\frac{1}{PS}\int_0^s p\,\mathrm{d}s \tag{11}$$

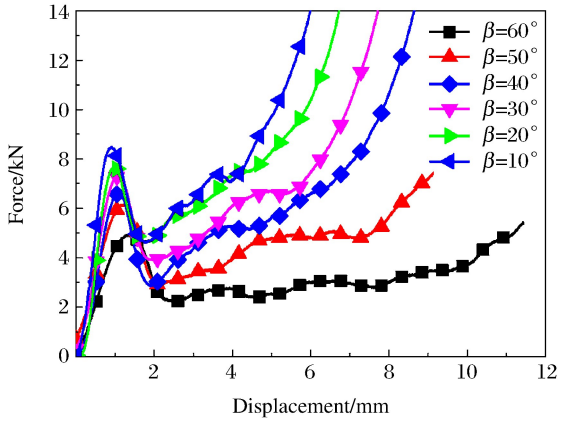

图 3　不同加载角度下的表观载荷-位移曲线

Fig. 3　Overall force-displacement in different loading angles

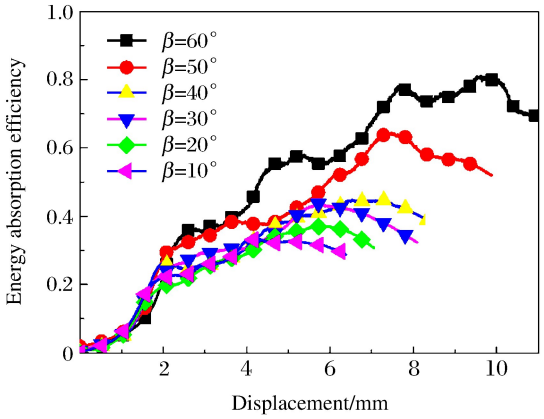

图 4　不同加载角度下的能量吸收效率曲线

Fig. 4　Energy absorption efficiency in different loading angles

图 5 给出了闭孔泡沫铝在不同加载角度下的屈服载荷和塑性平台载荷，从图中可以看出，随着加载角度的增加，屈服载荷和塑性平台载荷逐渐降低。分析原因主要是：随着加载角度的增加，试件所受的剪切载荷分量增加，又因为泡沫铝的剪切强度和刚度远低于抗压强度和刚度，所以加载角度越大，试件承载能力越弱。

2.2　准静态压缩曲线法向和切向分量

在这里指出，本工作侧重在研究泡沫铝的初始屈服行为。其法向应力和切向应力分别由(8)式和(9)式得到。图 6 给出了闭孔泡沫铝法向方向和切线方向的应力-应变关系曲线。可以看出，随着加载角度的增加，法向屈服应力逐渐减小，而切向屈服应力逐渐增大。由图 6 还可以看出，法向应力-应变曲线的初始斜率基本相等，但是切向应力-应变曲线的初始斜率差别很大，而且随着加载角度的增加，这种差异增大。

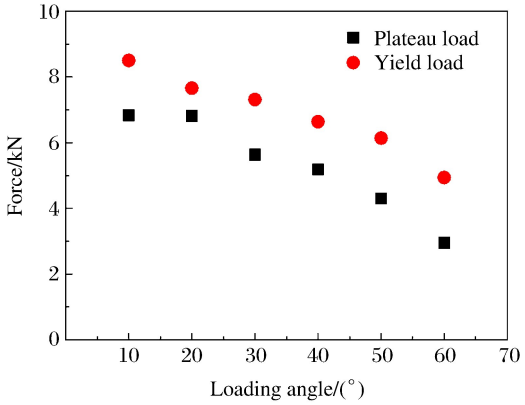

图 5　不同加载角度下的屈服载荷和平台载荷

Fig. 5　Yield load and plastic plateau load in different loading angles

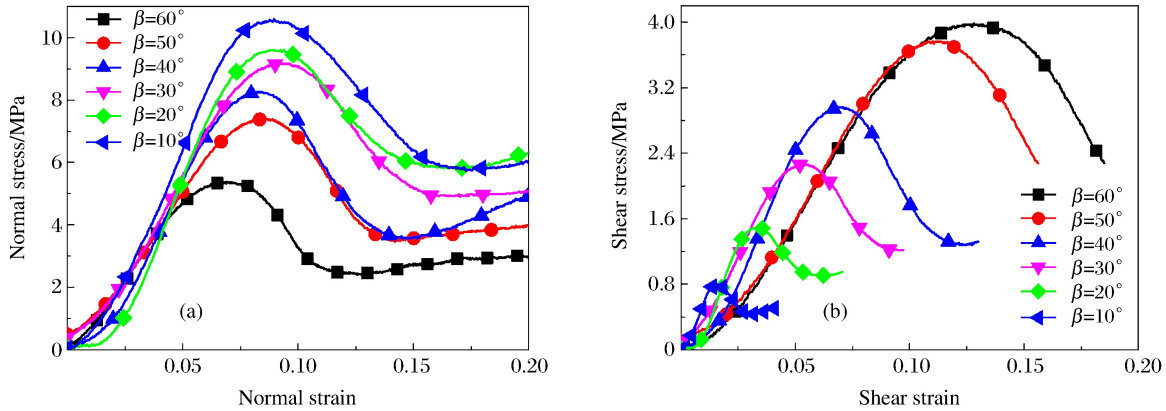

图 6　分解的应力-应变曲线

Fig. 6　Decomposition of quasi-static compression

3　数值分析

3.1　模型建立

为了进一步验证上述压剪复合加载实验所获数据的可靠性,采用有限元软件 LS-DYNA 建立压剪复合加载实验的实体模型,有限元模型如图 7 所示,模型由上斜端面垫块、下斜端面垫块和泡沫铝组成,泡沫铝模型采用 4 节点壳单元,壳单元尺寸为 0.15 mm,垫块采用实体单元,单元尺寸为 0.19 mm。有限元模型网格单元数量总共为 97.5 万。十四面体单胞尺寸设置为 2 mm,十四面体壳单元厚度设置为 0.084 mm,对应的泡沫铝密度为 0.49 g/cm^3(与实验采用的泡沫铝一致)。

应该注意的是,由于聚四氟乙稀材料具有良好的自润滑性和较小的摩擦力,因此本研究忽略了垫块和聚四氟乙稀间的摩擦力,在压剪复合加载实验装置的有限元模型中也没有建立聚四氟乙稀套筒。为了与实验相对照,同样设计了 10°、20°、30°、40°、50°、60°共 6 个加载角度的有限元模型。根据文献[14]结果,3×3×3 的重复堆叠模型的压缩应力-应变关系在三维空间中会明显收敛,本研究建立的压缩模型为 7×7×5,大于 3×3×3 模型,因此模拟结果可信度较高。

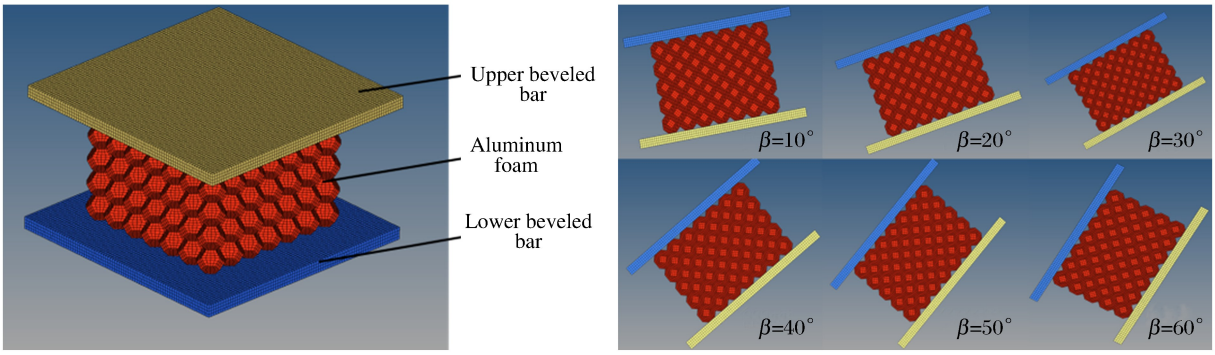

图 7　不同加载角度下的压剪复合加载有限元模型

Fig. 7　Finite element model of combined compression-shear loading in different loading angles

3.2　计算参数与接触设置

有限元模型中材料参数如表 2 所示。斜端面垫块与泡沫铝之间采用罚函数接触(*CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE)定义接触,泡沫铝内部自身接触(*CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE)。

表 2　各单元材料和材料模型

Table 2　Material and material models for elements

Part name	Material	Density/(g·cm^{-3})	Material model
Upper beveled bar	45 steel	7.83	Rigid
Lower beveled bar	45 steel	7.83	Rigid
Shell element matrix	Aluminum alloy	2.70	PLASTIC_KINEMATIC

下斜端面垫块被施加固定的约束,上斜端面垫块以恒定速度竖直向下压缩,根据文献[15]可知,如果仿真加载速度与实验速度相同(1 mm/min),则模拟时间将会太长。通过增加仿真加载速度可以缩短计算时间,前提是保证动能与内能的比例以及沙漏能与内能的比例都在 5%以下,那么整个加载过程可以看作是准静态压缩过程。因此,本研究也采用提高数值模拟中加载速度的方法,上斜端面垫块加载速度为 0.03 m/s。

3.3　数值模拟结果分析

图 8 给出了 7×7×5 的泡沫铝有限元模型在不同压缩应变下的变形图。从图 8 可以看出，压剪复合加载时变形不再均匀，且胞体的坍塌是一层一层推进的。整个过程是胞壁的屈曲折叠，这和实验所观察到的现象一致。压缩过程中出现明显的压剪带，首先在压剪带位置孔洞被挤压缩小，随后孔洞被压实甚至坍塌，试样在压剪带位置受损最严重。

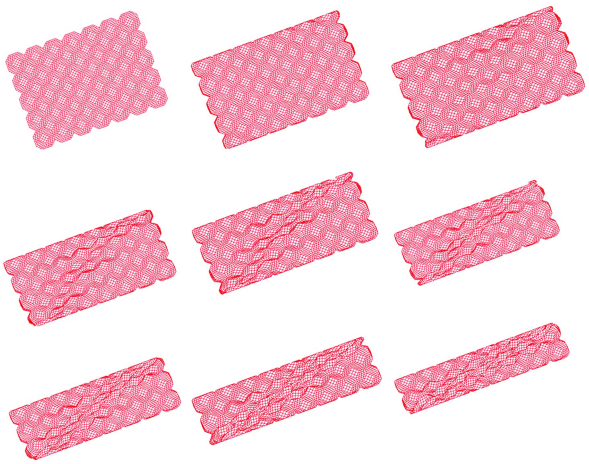

图 8　十四面体模型在不同应变下的变形模式(加载角度 30°)

Fig. 8　Deformation model of tetrakaidecahedron model at different strains (loading angle 30°)

3.3.1　表观压力-位移曲线比较

由于泡沫铝的变形局部化，我们使用表观压力-位移曲线来描述泡沫材料的宏观力学行为。其中压力通过(12)式计算

$$p = F_{\text{input}}/S \tag{12}$$

式中：F_{input}是垫块与泡沫铝之间的竖直方向的接触力，S 是泡沫铝试样的截面积。

将数值模拟获得的压力-位移曲线与实验结果进行比较，如图 9 所示，为了图像的清晰，我们仅列出单轴压缩(加载角度 0°)下和加载角度为 50°两种工况下的比较结果。可以看出，在第 1 阶段，仿真曲线的初始峰值与实验一致，然而，弹性段的斜率有明显的差异；在第 2 阶段，相比较实验曲线，仿真曲线有更多的波动，但二者的平均强度相当；在第 3 阶段，数值曲线与实验曲线一致性较好。

3.3.2　初始峰值强度和平台强度比较

本研究通过初始峰值强度和平台强度两个指标来量化验证数值模拟的可靠性。不同加载角度下的初始峰值强度和平台强度的实验结果和数值模拟结果如图 10 所示。当加载角度为 30°时，数值模拟的初始峰值强度和实验差异最大，相差 8.2%。对于平台强度，数值结果与实验结果有较好的一致性。

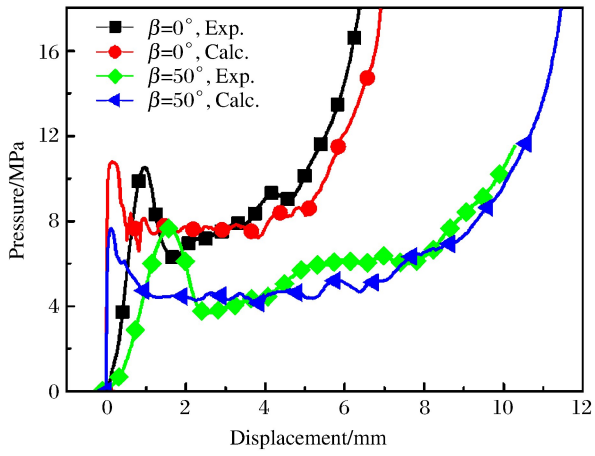

图 9　实验和数值模拟的表观压力-位移曲线比较

Fig. 9　Comparison of numerical and experimental overall pressure-displacement

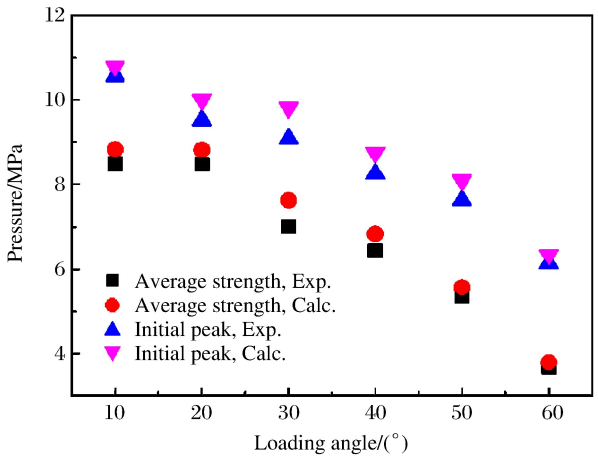

图 10　实验和数值模拟的初始峰值强度、平台强度比较

Fig. 10　Comparison of numerical and experimental initial peak and average strength

3.3.3　实验屈服面与仿真屈服面比较

利用(8)式和(9)式可以得到数值模拟中不同加载角度下泡沫材料屈服时的法向应力和切向应力，将其列于(σ,τ)空间内，可得到图 11 所示的屈服面数值仿真结果。与屈服面实验结果比较发现，仿真屈服面与实验屈服面吻合较好。接下来，采用 LS-DYNA 进一步分析胞孔尺寸对材料屈服面的影响。

3.3.4　胞孔尺寸对屈服面的影响

在有限元模拟中,通过改变十四面体壳单元的厚度来改变泡沫铝的密度。为了研究胞孔尺寸对屈服面的影响,选取四组具有相同密度(0.49 g/cm^3),但是胞孔尺寸不同(0.5、1.0、2.0 和 3.0 mm)的泡沫铝作为研究对象,相应的壳单元厚度为 0.021、0.042、0.084 和 0.126 mm。数值模拟得到不同胞孔尺寸下泡沫铝的屈服面,如图 12 所示,可以看出,在本研究的孔径范围内,胞孔尺寸越大,泡沫铝的屈服应力越大。分析其原因:闭孔泡沫铝主要由胞孔和胞壁组成,当密度相同时,平均孔径越大,则胞壁越厚。而屈服应力基本上与胞壁的厚度正相关。因此,胞孔尺寸越大,屈服应力越大,泡沫铝的承载能力越好。

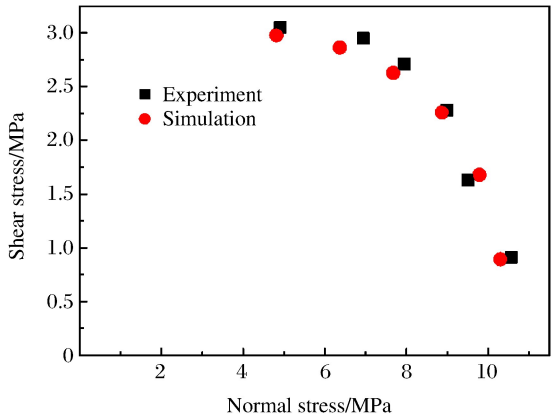

图 11　实验屈服面与仿真屈服面比较

Fig. 11　Comparison of experiment and simulation yield surface

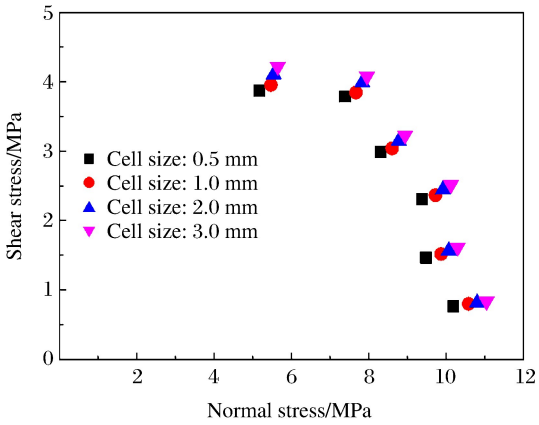

图 12　胞孔尺寸对屈服面的影响

Fig. 12　Effect of cell size on yield surface

4　结　论

通过添加斜面垫块和长方体套筒,在材料试验机上实现对闭孔泡沫铝的压剪复合加载,并进行了加载角度从 10°～60°共 6 种不同加载路径的准静态实验。通过对试样进行受力分析以及实验结果处理,得到了泡沫铝材料在压剪空间的屈服面,同时采用有限元软件 LS-DYNA 分析验证了实验方法的可靠性。主要结论如下:

(1) 随着加载角度的增加,试件所受的剪切载荷分量增加,试件屈服载荷和塑性平台载荷逐渐降低;

(2) 通过比较实验和数值模拟得到的表观压力-位移曲线、屈服载荷和平台载荷等参数,验证了数值模拟结果的可靠性;

(3) 压剪复合加载时泡沫铝变形不再均匀,且胞体的坍塌是一层一层推进的,压缩过程中出现明显的压剪带,试件首先在压剪带位置孔洞被挤压缩小,随后孔洞被压实甚至坍塌,试样在压剪带位置受损最严重;

(4) 相同密度的泡沫铝在一定孔径范围内,胞孔尺寸越大,屈服应力越大,泡沫铝的承载能力越好。

参考文献:

[1]　刘培生,李铁藩,傅超. 多孔金属材料的应用 [J]. 功能材料,2001,32(1):12-15.
LIU P S,LI T F,FU C. Application of porous metal materials [J]. Functional Materials,2001,32(1):12-15.

[2]　胡时胜,王悟,潘艺,等. 泡沫材料的应变率效应 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):13-18.
HU S S,WANG W,PAN Y,et al. Strain rate effect on the properties foam materials [J]. Explosion and Shock Waves,2003,23(1):13-18.

[3] 潘艺,胡时胜,魏志刚.泡沫铝动态力学性能的实验研究 [J].材料科学与工程,2002,20(3):341-343.
PAN Y,HU S S,WEI Z G. Experimental study on dynamic behavior of foamed aluminum [J]. Materials Science and Engineering,2002,20(3):341-343.

[4] 郑明军,何德坪,陈锋.多孔铝合金的压缩应力-应变特征及能量吸收性能 [J].中国有色金属学报,2001,11(专辑 2):81-85.
ZHENG M J,HE D P,CHEN F. Compressive stress-strain behavior and energy absorption capability of porous aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2001,11(S2):81-85.

[5] 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.

[6] DESHPANDE V S,FLECK N A. Isotropic constitutive models for metallic foams [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2000,48(6/7):1253-1283.

[7] RUAN D,LU G,ONG L S,et al. Triaxial compression of aluminium foams [J]. Composites Science and Technology,2007,67(6):1218-1234.

[8] 崔云霄,卢芳云,林玉亮,等.一种新的高应变率复合压剪技术 [J].实验力学,2006,21(5):584-590.
CUI Y X,LU F Y,LIN Y L,et al. A new combined compression-shear loading technique at high strain rates [J]. Journal of Experimental Mechanics,2006,21(5):584-590.

[9] 郑文,徐松林,蔡超,等.基于 Hopkinson 压杆的动态压剪复合加载实验研究 [J].力学学报,2012,44(1):124-131.
ZHENG W,XU S L,CAI C,et al. A Study of dynamic combined compression-shear loading technique based on Hopkinson pressure bar [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2012,44(1):124-131.

[10] GIBSON L J,ASHBY M F,ZHANG J,et al. Failure surfaces of cellular materials under multiaxial loads-I. Modeling [J]. International Journal of Mechanical Sciences,1989,31(9):635-663.

[11] MILLER R E. A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behavior of foamed metals [J]. International Journal of Mechanical Sciences,2000,42(4):729-754.

[12] NIEH T G,et al. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams [J]. Material Science and Engineering A,2002,283(1/2):105-110.

[13] ONCK P R,ANDREWS E W,GIBSON L J. Size effects in ductile cellular solids (Part Ⅰ):modeling [J]. International Journal of Mechanical Sciences,2001,43(3):681-699.

[14] 卢子兴,张家雷.低密度闭孔金属泡沫压缩屈服行为的数值模拟 [J].北京航空航天大学学报,2009,35(3):318-321.
LU Z X,ZHANG J L. Numerical simulation on compressive yielding behavior of closed-cell metal foam with low density [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2009,35(3):318-321.

[15] 时学鹏.考虑几何不规则度的泡沫金属建模及其本构关系研究 [D].广州:华南理工大学,2014.
SHI X P. Study on modeling and constitutive relation considering the geometric irregularity [D]. Guangzhou:South China University of Technology,2014.

Mechanical Behaviors of Closed-Cell Aluminum Foams under Quasi-Static Compression-Shear Loads

LI Xueyan,LI Zhibin,ZHANG Duo

(*College of Science*,*National University of Defense Technology*,*Changsha* 410073,*China*)

Abstract: In the present work, we conducted the quasi-static compression-shear experiments on the closed-cell aluminum foams using an improved testing machine and installing beveled bars and a column sleeve. By changing the angle of the inclined beveled bars we obtained the mechanical properties of the aluminum foams in different compression-shear loading paths, and then figured out the aluminum foam's experiment yield surface from the force analysis of the specimen used. At the same time, we simulated the compression-shear process of the closed-cell aluminum foams using the finite element software LS-DYNA. The simulated yield surface is in good agreement with the experimental yield surface. The results show that, for the aluminum foams of the same density and in a given range of the cell size, the yield strength of the closed-cell aluminum foams increases with the increase of the cell size, and so does its load capacity.

Keywords: compression-shear loading; closed-cell aluminum foams; tetrakaidecahedron model; yield surface; cell size