

泡沫金属在单双向拉压载荷作用下的表征分析

刘培生^{1,2}

(1. 北京师范大学 射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875)

摘要: 探讨泡沫金属的单向压缩以及双向拉压行为, 并研究了该材料单双向拉伸性能, 进一步分析该材料在承受各种单双向拉压载荷时的不同响应方式。结果表明: 在泡沫金属材料受到不同的单双向拉压载荷作用而产生破坏时, 其承受的各向名义应力大小与多孔体的孔率都可表达为一个统一的数理关系; 对于一个确定的多孔体材料, 其单双向压缩负载能力要分别大于其单双向拉伸负载能力。

关键词: 泡沫金属; 多孔金属; 多孔材料; 多向载荷

中图分类号: TB 383

文献标识码: A

Analysis of porous open-cell metal foams under uniaxial and biaxial loadings

LIU Pei-sheng^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Radiation Beam Technology and Material Modification of National Ministry of Education,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The behaviors of uniaxial compression and biaxial tension-compression for metals foams were investigated. The different responding ways were further analyzed combining the research results of properties of uniaxial and biaxial tensions of these materials. The results indicate that the relationship between the nominal stress and the porosity can be expressed as an uniform mathematical-physical formula for the foamed metals under various uniaxial and biaxial loads when the porous body endures the fracture. The loading ability of compression is more than that of tension for the same porous material under uniaxial or biaxial loads.

Key words: metal foam; porous metal; porous material; multi-load

泡沫金属具有许多优异的性能, 用途广泛涉及到分离、过滤、布气、消音、吸震、包装、屏蔽、热交换、生物移植、电化学过程等许多领域^[1-2]。近年来, 一些研究者提出了一种新型的多孔结构, 有人称之为“格子材料”, 也有人称之为“点阵材料”, 它们是具有规则孔形和孔穴呈周期排列的一类新型多孔金属材料^[3-5]。但从一些文献来看, 尚存在如下几点主要的不足: 1) 其孔穴尺寸在数毫米到厘米级之间, 不能适于或不宜用于某些领域(如生物医学工程、光学工程、电

子工程等)的某些场合(孔穴尺寸在微米级以下的微格子金属材料需用合成法、模板填隙反演法^[1]等方式来制备); 2) 制备上还有一些实际困难, 与理论设计尚有差距; 3) 有关研究主要为理论方面, 实际研制还处于实验室阶段, 离市场化生产和应用尚需时日。而自由发泡型(随机发泡型)泡沫金属材料历史悠久, 应用普遍, 制备工艺成熟并不断发展, 市场广泛且性能日益改善, 能满足一般的应用需求和较为严格的使用条件。因此, 对随机发泡型多孔材料的进一步研究仍然

具有重要的理论意义和实际意义。高孔率泡沫金属在工程领域的诸多应用^[1-2, 6-7]，使其力学行为受到人们的高度重视^[1, 8-21]，而其中的拉伸和压缩性能则是最为基础的。本研究在前期相关工作对泡沫金属单双向拉伸性能研究^[11, 19-20, 22]的基础上，对该材料的单向压缩以及双向拉压行为进行进一步的探讨，分析了各种单双向拉压载荷作用下的泡沫金属有关力学关系，从而得出系统性的关于泡沫金属在单双向拉压载荷作用下的系列力学表征，进而为有关材料制备和应用设计者提供参考依据。

1 分析模型

各向同性的均匀结构三维网状泡沫金属由金属棱柱(孔棱, 孔筋)和连通性孔隙构成。为简化其拉伸和压缩性能分析, 可将其结构模型综合而抽象地表征为^[11, 20, 22]: 构成多孔体的这些棱柱规则地按立方体对角线方式连接, 从而形成大量正交密积的体心立方方式八面体孔隙单元(见图 1)。图 1 中的作用力 F 和 F' 源于外加载荷 σ 。这些密积的单元八面体构成整个多孔泡沫体。由于工艺的圆整性, 多孔体中的金属棱柱在汇合结点处的承载能力一般大于棱柱体本身, 故断裂破坏一般发生在棱柱体上。多孔体在承受单双向拉、压载荷时, 其金属棱柱体内部任何位置产生的最大拉应力达到对应密实材质的抗拉强度(σ_0)大小时, 就会导致造成多孔体整体破坏的断裂出现。

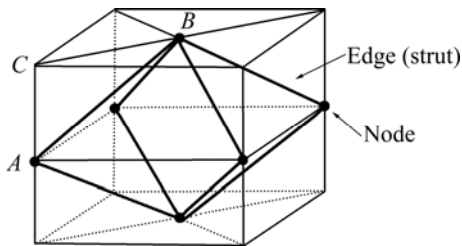


图 1 各向同性开孔泡沫金属的结构模型(八面体模型)
Fig.1 Structural unit of octahedron for isotropic open-cell metal foams

2 数理关系

2.1 单向拉伸和单向压缩

上述多孔体内的单元八面体是排列规则的均匀结

构, 故在受到外加载荷时, 其受力也是均匀的。当多孔体受到外加载荷时, 意味着其内部单元八面体中的棱柱也会受到相应的作用力, 从而产生偏转或具有偏转的趋势。对于本分析模型中的棱柱, 无论在结构上还是在受力状态上, 都是完全等价的, 因此任何一条棱柱都可表征其它的棱柱^[11, 19-20, 22]。将图 1 中某一棱柱(AB)隔离出来进行受力分析(见图 2), 并将棱柱受力作悬臂梁近似处理(如其中假定侧结点 A 固定, 而顶结点 B 受外加载荷作用)。对于密积中的单元八面体, 其每一棱柱为 3 个八面体单元所共用。设多孔体只受竖向外加载荷(应力大小为 σ)的单向作用, 左右和前后两个方向的外加载荷为零, 则受力分析仅需考虑有竖轴向拉伸力或压缩力的单元, 即对图 1 中的棱柱(AB)只需考虑图中示出的主单元(其轴向与外加载荷 σ 的方向一致)^[11]。根据文献[11], 先基于棱柱的“脆性破坏”假设和细梁理论, 得出单向拉伸载荷作用下(即 σ 为拉伸载荷)多孔体中由弯矩引起的最大正应力大小为

$$\sigma_{01} \approx 2\sqrt{6\sqrt{3}\pi}(1-\theta)^{-\frac{3}{2}}\sigma \tag{1}$$

式中 σ 为多孔体单向拉伸或单向压缩载荷的应力大小; θ 为多孔体的孔隙率。

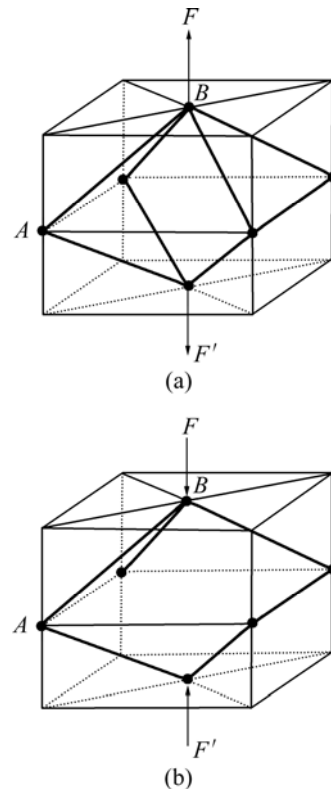


图 2 八面体模型单向受力分析图
Fig.2 Octahedron unit under uniaxial loading for isotropic metal foams: (a) Uniaxial tension; (b) Uniaxial compression

对应的轴向拉应力大小为

$$\sigma_{02} \approx \frac{\sigma}{1-\theta} \tag{2}$$

由上述两式得到棱柱所受最大正应力(拉应力)为

$$\sigma_{\max} = \sigma_{01} + \sigma_{02} \approx \left[2\sqrt{6\sqrt{3}\pi}(1-\theta)^{-\frac{3}{2}} + (1-\theta)^{-1} \right] \sigma \tag{3}$$

最后得出一般性三维网状泡沫金属在单向拉伸载荷作用下发生破坏时,其承受的名义应力大小与孔率的关系可表达为

$$\sigma \approx K(1-\theta)^m \sigma_0 \tag{4}$$

式中 K 是材料常数,取决于多孔体的材质种类和制备工艺条件,因而集中了材质种类、材质缺陷、孔隙具体形状和大小分布等因素的综合作用; m 为对应致密材料的塑脆性指标,介于 1~1.5 之间:当对应的为脆性材质时, m 取 1.5;对应的为柔软材质时, m 取 1。脆性越大, m 取值越大,即越趋近于 1.5。当对应的为塑性适中的一般金属或合金时,可近似取 $m \approx 1.25$,比如金属镍。

更精确一点的关系可表达为

$$\left[1 + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi} (1-\theta)^{\frac{1}{2}} \right] \sigma \approx K(1-\theta)^m \sigma_0 \tag{5}$$

按照完全类似的处理和推演方法,可得出单向压缩载荷作用下(即 σ 为压缩载荷)多孔体中由弯矩引起的最大正应力大小仍然可用式(1)表达,而对应的轴向压应力大小则也可用式(2)表达。对应于式(1)这样比较精确的表征,由此最后可得棱柱所受的最大拉应力关系为

$$\left[1 - \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi} (1-\theta)^{\frac{1}{2}} \right] \sigma \approx K(1-\theta)^m \sigma_0 \tag{6}$$

而棱柱所受的最大压应力关系则为

$$\left[1 + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi} (1-\theta)^{\frac{1}{2}} \right] \sigma \approx K(1-\theta)^m \sigma'_0 \tag{7}$$

式中 σ'_0 为多孔体对应致密材质的抗压强度。

2.2 双向拉压

承前所述,在多孔体受到双向载荷作用时,仍可

将图 1 中某一棱柱(AB)隔离出来进行受力分析(见图 3),并假定侧结点(A)固定而顶结点(B)受外加载荷作用。对于密积中的单元八面体,其每一棱柱为 3 个八面体单元所共用。设多孔体受到上下和左右两个方向的外加载荷作用,其应力大小依次为 σ_1 和 σ_2 。图 1 中的双向拉压受力分析需考虑有轴向拉伸力或有轴向压缩力的单元,即对图 1 中的棱柱(AB)需考虑图中示出的主单元(其轴向与外加载荷 σ_1 的方向平行)以及主单元左上角的副单元(其轴向与外加载荷 σ_2 的方向平行)。根据文献[22],先基于棱柱的“脆性破坏”假设和细梁理论,得出双向拉伸载荷作用下(即 σ_1 和 σ_2 同为拉伸载荷)多孔体中由弯矩引起的最大正应力大小为

$$\sigma_{01} \approx 2\sqrt{6\sqrt{3}\pi}(1-\theta)^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \tag{8}$$

对应的轴向拉应力大小为

$$\sigma_{02} \approx \frac{1}{1-\theta} (\sigma_1 + \sigma_2) \tag{9}$$

由上述两式得到棱柱所受最大正应力(拉应力)为

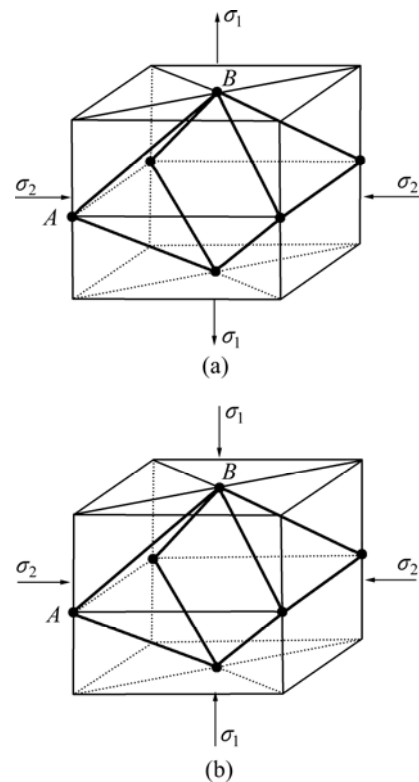


图 3 八面体模型双向受力分析图

Fig.3 Octahedron unit under biaxial loading for isotropic metal foams: (a) Tensiling in one direction and compressing in another direction; (b) Biaxial compression

$$\sigma_{\max} = \sigma_{01} + \sigma_{02} \approx 2\sqrt{6\sqrt{3}\pi}(1-\theta)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} + (1-\theta)^{-1}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (10)$$

最后得出一般性三维网状泡沫金属在双向拉伸载荷作用下(即 σ_1 和 σ_2 同为拉伸载荷)发生破坏时,其承受的名义应力大小有如下关系

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}(1-\theta)^{\frac{1}{2}}(\sigma_1 + \sigma_2) \approx K(1-\theta)^m \sigma_0 \quad (11)$$

2.2.1 一向拉伸一向压缩载荷作用

按照与文献[22]完全类似的处理和推演方法,最后可得出多孔体在一向拉伸一向压缩载荷作用下(见图 3(a),如 σ_1 为拉伸载荷,而 σ_2 为压缩载荷)发生破坏时,两个名义主应力与孔率的数理关系表征为

$$\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) + \sigma_1\sigma_2} + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}(1-\theta)^{\frac{1}{2}}(\sigma_1 - \sigma_2) \approx K(1-\theta)^m \sigma_0 \quad (12)$$

2.2.2 两向同为压缩载荷作用

仍按照与文献[22]完全类似的处理和推演方法,最后可得出多孔体在两向压缩载荷作用下(见图 3(b),即 σ_1 和 σ_2 同为压缩载荷)发生破坏时,两个名义主应力与孔率的数理关系表征为

$$\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) - \sigma_1\sigma_2} - \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}(1-\theta)^{\frac{1}{2}}(\sigma_1 + \sigma_2) \approx K(1-\theta)^m \sigma_0 \quad (13)$$

3 承载判据

3.1 单向拉伸和单向压缩

对于同种致密材质而言,其抗压强度总是大于或等于其抗拉强度,即 $\sigma'_0 \geq \sigma_0$ 。因此,泡沫金属材料在单向拉伸载荷作用下若满足条件

$$\left[1 + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}(1-\theta)^{\frac{1}{2}} \right] \sigma \geq K(1-\theta)^m \sigma_0 \quad (14)$$

时,多孔体将产生破坏。

泡沫金属材料在单向压缩载荷作用下若满足条件

$$\left[1 - \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}(1-\theta)^{\frac{1}{2}} \right] \sigma \geq K(1-\theta)^m \sigma_0 \quad (15)$$

时,多孔体也将产生破坏。

根据上述关系式,可以推知:对于相同孔率 θ 的泡沫金属材料,若由相同材质和相同工艺方式制备(即其材料常数 K 相同,其塑性指标 m 亦相同),则由式(15)得出的破坏载荷 σ 的大小会大于由式(14)得出的破坏载荷 σ 的大小,即多孔体对于单向压缩的负载能力要大于其单向拉伸的负载能力。

3.2 双向拉压

3.2.1 双向拉伸载荷作用

泡沫金属材料在双向拉伸载荷作用下若满足以下关系时,多孔体将产生破坏^[22]。

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}(1-\theta)^{\frac{1}{2}}(\sigma_1 + \sigma_2) \geq K(1-\theta)^m \sigma_0 \quad (16)$$

3.2.2 一向拉伸一向压缩载荷作用

泡沫金属材料在一向拉伸(σ_1)一向压缩(σ_2)载荷作用下若满足关系时,多孔体将产生破坏。

$$\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) + \sigma_1\sigma_2} + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}(1-\theta)^{\frac{1}{2}}(\sigma_1 - \sigma_2) \geq K(1-\theta)^m \sigma_0 \quad (17)$$

3.2.3 两向同为压缩载荷作用

泡沫金属材料在两向同为压缩载荷作用下若满足以下关系时,多孔体将产生破坏。

$$\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) - \sigma_1\sigma_2} - \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}(1-\theta)^{\frac{1}{2}}(\sigma_1 + \sigma_2) \geq K(1-\theta)^m \sigma_0 \quad (18)$$

3.2.4 分析讨论

根据式(14)~(18)的对比分析,并考虑到其中的 $\sigma'_0 \geq \sigma_0$,可以推知:对于相同孔率 θ 的泡沫金属材料,若由相同材质和相同工艺方式制备(即其材料常数 K 相同,其塑脆性指标 m 亦相同),有如下结果:

1) 当多孔体在同样大小的 σ_1 和 σ_2 双向载荷作用下,即 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时,有式(16)的左边小于式(17)的左边,可见泡沫金属材料在双向拉伸载荷作用下的承载能力会大于其在一向拉伸一向压缩载荷作用下的承载能力。

2) 对于由最大拉应力引起的破坏,由于式(18)的左边小于式(16)的左边,可见泡沫金属材料在双向压缩载荷作用下的负载能力要大于其双向拉伸载荷作用下的负载能力。

3) 当多孔体承受的双向载荷大小相同时,即 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时,有(16)的左边大于式(14)的左边,式(18)的左边则小于式(14)的左边,可见泡沫金属材料在双向拉伸载荷作用下的承载能力会小于其在单向拉伸载荷作用下的承载能力,而其在双向压缩载荷作用下的承载能力却会大于其在单向拉伸载荷作用下的承载能力。

4) 当多孔体在同样大小的双向载荷作用下,即 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时,式(16)的左边大于式(15)的左边,而式(18)的左边则小于式(15)的左边,可见泡沫金属材料在双向拉伸载荷作用下的承载能力会小于其在单向压缩载荷作用下的承载能力,而其在双向压缩载荷作用下的承载能力却会大于其在单向压缩载荷作用下的承载能力。

4 结论

1) 对各向同性的三维网状高孔率泡沫金属材料,在单双向拉压载荷(σ_1 和 σ_2)作用下发生破坏时,其承受的名义应力大小可统一表达成如下关系式:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi}$$

$$(1-\theta)^{\frac{1}{2}}(\sigma_1 + \sigma_2) \approx K(1-\theta)^m \sigma_0$$

2) 对于相同孔率 θ 的泡沫金属材料,若由相同材质和相同工艺方式制备,则多孔体在单向压缩时的负

载能力要大于其在单向拉伸时的负载能力,在双向压缩载荷作用下的负载能力要大于其双向拉伸载荷作用下的负载能力。

REFERENCES

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. 多孔固体结构与性能[M]. 刘培生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. LIU Pei-sheng, transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LIU Pei-sheng. Introduction to porous materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [3] QUEHEILLALT D T, WADLEY H N G. Cellular metal lattices with hollow trusses[J]. Acta Materialia, 2005, 53(2): 303-313.
- [4] MOHR D. Mechanism-based multi-surface plasticity model for ideal truss lattice materials[J]. International Journal of Solids and Structure, 2005, 42(11/12): 3235-3260.
- [5] 刘培生. 多孔金属格子材料的制造方法[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(S): 535-538.
LIU Pei-sheng. Preparation methods for porous metallic lattice materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(S): 535-538.
- [6] BANHART J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(3): 559-632.
- [7] LIU P S, LIANG K M. Functional materials of porous metals made by P/M, Electroplating and some other techniques[J]. J Mater Sci, 2001, 36(21): 5059-5072.
- [8] ASHBY M F, EVANS A, FLECK N A, GIBSON L J, HUTCHINSON J W, WADLEY H N G. Metal foams: A design guide[M]. Boston: Elsevier Science, 2000.
- [9] NAGAKI S, SOWERBY R, GOYA M. An anisotropic yield function for porous metal[J]. Mater Sci Eng A, 1991, 142(1): 163-168.
- [10] SILVA M G D A, RAMESH K T. The rate-dependent deformation and localization of fully dense and porous Ti-6Al-4V[J]. Mater Sci Eng A, 1997, 232(1): 11-22.
- [11] LIU P S. The tensile strength of porous metals with high porosity[J]. J Adv Mater, 2000, 32(2): 9-16.
- [12] BADICHE X, FOREST S, GUIBERT T, BIENVENU Y, BARTOUT J D, IENNY P, CROSET M, BERNET H. Mechanical properties and non-homogeneous deformation of open-cell nickel foams: application of the mechanics of cellular solids and of porous materials[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 289(2): 276-288.

- [13] NIEH T G, HIGASHI K, WADSWORTH J. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams[J]. *Mater Sci Eng A*, 2000, 283(1): 105-110.
- [14] BENOUALI A H, FROYEN L, DELERUE J F, WEVERS M. Mechanical analysis and microstructural characterisation of metal foams[J]. *Mater Sci Technol*, 2002, 18(5): 489-494.
- [15] KWON Y W, COOKE R E, PARK C. Representative unit-cell models for open-cell metal foams with or without elastic filler[J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 343(1): 63-70.
- [16] CHOE H, DUNAND D C. Mechanical properties of oxidation-resistant Ni-Cr foams[J]. *Mater Sci Eng A*, 2004, 384(1/2): 184-193.
- [17] LIU P S. Effect of preparation conditions on relative elongation of nickel foam[J]. *Mater Sci Technol*, 2004, 20(5): 669-672.
- [18] 卢子兴, 石上路. 低密度开孔泡沫材料力学模型的理论研究进展[J]. *力学与实践*, 2005, 27(5): 13-20.
LU Zi-xing, SHI Shang-lu. Theoretical studies on mechanical models of low density foam[J]. *Mechanics and Engineering*, 2005, 27(5): 13-20.
- [19] 刘培生. 关于多孔材料的新模型[J]. *材料研究学报*, 2005, 19(6): 64-68.
LIU Pei-sheng. A new model for porous materials[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2005, 19(6): 64-68.
- [20] LIU P S. Mechanical behaviors of porous metals under biaxial tensile loads[J]. *Mater Sci Eng A*, 2006, 422(1/2): 176-183.
- [21] 卢子兴, 陈鑫, 张家雷. 各向异性弹性开孔泡沫压缩行为的数值模拟[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(5): 564-567.
LU Zi-xing, CHEN Xin, ZHANG Jia-lei. Numerical modeling of high strain compression of anisotropic elastic open-cell foams[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(5): 564-567.
- [22] 刘培生. 泡沫金属双向承载的力学模型[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(4): 567-574.
LIU Pei-sheng. Mechanical model for metallic foams under biaxial loads[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(4): 567-574.

(编辑 李艳红)