

金属纤维烧结毡力学本构关系的实验研究

马 军^{1,2}, 王建忠², 李爱君², 葛 渊², 宋卫东³, 汤慧萍², 金 峰¹

(1. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016)

(3. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 实验研究了 316L 不锈钢纤维烧结毡的变形能、杨氏模量、强度等力学性能与材料相对密度之间的本构关系。研究表明, 金属纤维烧结毡沿面内方向的拉伸断裂能和压缩变形能与相对密度分别成线性关系和幂大于 1 的抛物线关系。金属纤维烧结毡沿面内方向拉伸或压缩时的模量和强度与材料相对密度均成线性关系。这反映了金属纤维烧结毡受面内方向应力时结点间纤维骨架以拉伸(压缩)变形为主。

关键词: 金属纤维烧结毡; 力学性能; 本构关系; 拉伸主导变形

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)12-3710-06

金属纤维烧结毡是由 6~200 μm 丝径, 长度在 5~50 mm 的金属纤维经气相/液相沉积法混合而成毛毡, 再经高温固相烧结而成的一种具有正交各向异性网状结构的金属多孔材料(结构如图 1 所示), 根据纤维材料种类可分为 316L 不锈钢纤维毡、FeCrAl 合金纤维毡、Cu 纤维毡、Ti 纤维毡等。这种材料具有高孔隙率、高比表面积、高比强度, 还具有一般金属多孔材料所不具备的高延伸率。金属纤维烧结毡的这些特性使其在过滤分离^[1]、吸声降噪^[2,3]、冲击防护^[4]、医用人体植入材料^[5]等方面具有良好的应用前景。作为一种轻质多孔材料, 金属纤维烧结毡的力学性能受到广泛关注^[6-8]。其力学性能-相对密度本构关系是反映金属纤维烧结毡力学属性的基本关系。目前研究者建立了多个微观力学模型, 从理论上预测了力学性能本构关系。Markaki 等^[9,10]将金属纤维烧结毡网状结构的受力变形简化为网状结构中所有结点间单根纤维单独受力的线性叠加, 然后将单根纤维等效为与受力方向有一定夹角的悬臂梁, 基于悬臂梁的弯曲变形来推导金属纤维烧结毡的弹性模量。模型预测杨氏模量与相对密度成 3 次方关系。Delince 等^[11]建立了金属纤维烧结毡的周期性结构模型, 并且将试验观察的纤维空间取向角的平均值作为特征值代入模型, 预测了纤维毡各向异性的杨氏模量和剪切模量, 这些模量与相对密度的 1~2 次方成正比。Jin 等^[12]基于金属纤维烧结毡面内方向力学性能与厚度方向力学性能的彼此独立性,

建立了只考虑面内方向力学性能的 2D 有限元模型, 这个模型是金属纤维烧结毡的代表性体积单元, 由大量随机分布的直纤维构成。这个有限元模型给出的面内方向的弹性模量与相对密度的本构关系为线性关系。以上力学模型给出的金属纤维烧结毡的本构关系彼此之间差别很大, 说明目前对金属纤维烧结毡的力学变形机制还存在争议。为了澄清金属纤维烧结毡的本构关系, 本工作对 316L 不锈钢纤维烧结毡的拉伸、压缩变形模量和强度以及应变能进行了实验研究, 以实验数据为基础建立了金属纤维烧结毡的模量、强度与相对密度的本构关系, 并讨论了金属纤维烧结毡的变形机制。

1 实 验

采用丝径为 28 μm 的 316L 不锈钢纤维毛毡为原料, 将其用模具从厚度方向(图 1a 中的 z 方向)预压缩以控制相对密度为 10%~30%, 然后在真空烧结炉中 1200 $^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h 烧结, 使纤维之间形成冶金结合(如图 1c 中金相照片所示, 这时纤维之间会出现晶界)。烧结完成后将纤维烧结毡从模具中取出, 得到 14(x) cm \times 14(y) cm \times 1(z) cm 的烧结成品(x, y 方向如图 1a 所示, 为面内方向)。为了进行拉伸和压缩试验, 用线切割将其切为 13(x) cm \times 1(y) cm \times 1(z) cm 的拉伸试样和 2(x) cm \times 1(y) cm \times 1(z) cm 的压缩试样。拉伸和压缩试验均在 Instron 5967 试验机上进行, 因为面内方向是

收稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51134003); 爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)开放课题(KFJJ17-14M)

作者简介: 马 军, 男, 1980 年生, 博士生, 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049, E-mail: mj@c-nin.com

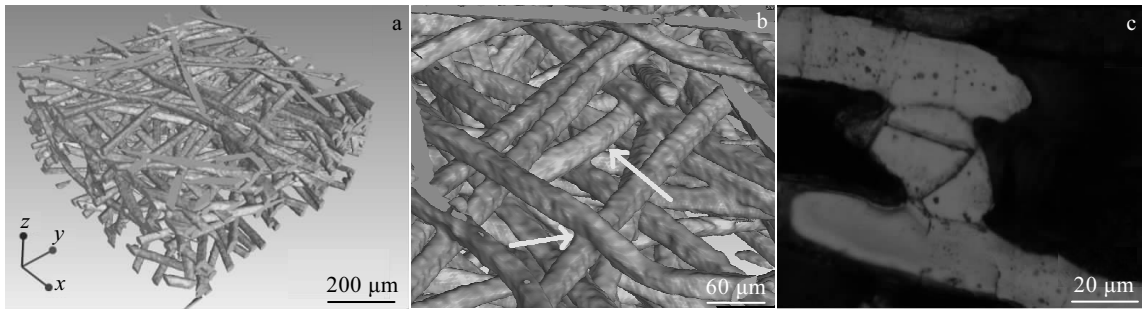


图 1 316L 不锈钢纤维烧结毡的微观结构

Fig.1 Microstructures of sintered 316L stainless steel fiber felt: (a) three-dimensional structure, (b) the white arrows show nodes between fiber skeleton and sintering, and (c) grain boundary between fibers

金属纤维烧结毡作为力学材料应用时的主要加载方向，因此上述实验均沿面内方向（ x 方向）加载，加载速率为 1.5 mm/min，拉伸试样标距为 5 cm，在两夹持端浸入 502 胶以防止被夹持力压溃。采用在弹性加载阶段多次卸载的方法，测量卸载模量，拉伸屈服强度取为应变为 0.2%时的强度，拉伸断裂强度取为拉伸曲线的应力峰值。压缩屈服强度取为纤维毡进入屈服平台前的应力峰值。为了准确测量拉伸试验的应变，使用了引伸计测量材料小于 1.5%时的应变。在上海同步辐射光源（SSRF）进行了同步辐射 CT 实验以提取不锈钢纤维烧结毡的三维孔结构。

2 结果与讨论

不同相对密度的烧结 316L 不锈钢纤维毡的拉伸应力应变曲线和压缩应力应变曲线列于图 2。从图 2 中可见，拉伸应力应变曲线呈典型的双线性特征，即在弹性变形阶段和塑性变形阶段的应力与应变都成近似线性关系，但弹性变形阶段的曲线斜率远大于塑性变形阶段。随着相对密度的提高，材料的强度和伸长率持续提高，但伸长率在相对密度达到 24%~30%之间后基本保持不变。而材料的压缩曲线在经过弹性区压缩应力经过一个峰值后出现明显的平台区，在这个平台区随着压缩应变的增长，压缩应力基本保持不变，平台区结束后压缩应力出现明显的上升，平台区的长度随着相对密度的降低而明显增加。通过计算应力应变曲线覆盖的面积，可以得出在拉伸或压缩应变时单位体积试样的应变能，从图 3a 中可以看出拉伸断裂能与材料的相对密度成正比，根据 Markaki 等^[9,10]提出的金属纤维毡变形模型，宏观断裂能是材料内部全部纤维断裂能的总和，而随着相对密度的增加，材料内部纤维数量也应该相应增加，因此宏观拉伸断裂能与材料相对密度成正比符合 Markaki 等人的模型。对于

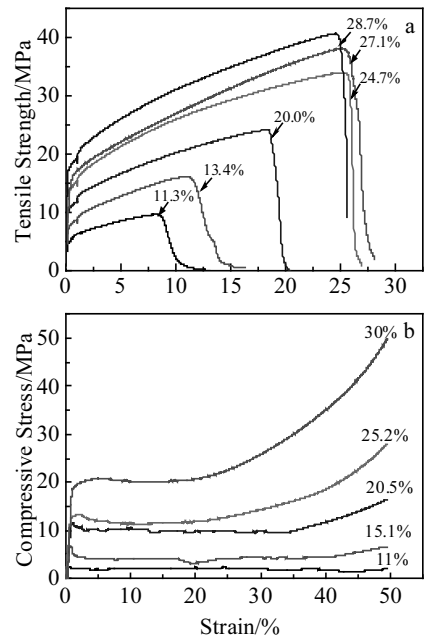


图 2 不同相对密度的 316L 不锈钢纤维烧结毡的拉伸和压缩应力应变曲线

Fig.2 Tensile (a) and compressive (b) stress-strain curves of sintered 316L stainless steel fiber felt with different relative density

压缩应变能，若应变区域取小于 20%，则对于所有试样均处于压缩平台区，压缩应变能也应该与相对密度成正比，而当压缩应变取 50%时，随着相对密度的增加，应变曲线在平台区后端出现明显的上翘，相对密度越高上翘越严重，因此导致压缩应变能与相对密度成幂大于 1 的抛物线关系，见图 3b。随着相对密度提高，压缩应变能加速上升。

以下讨论 316L 不锈钢纤维毡的面内杨氏模量、屈服强度以及抗拉强度等基本力学参量与相对密度的关系，图 4 是面内拉伸加载条件下的强度、模量与相

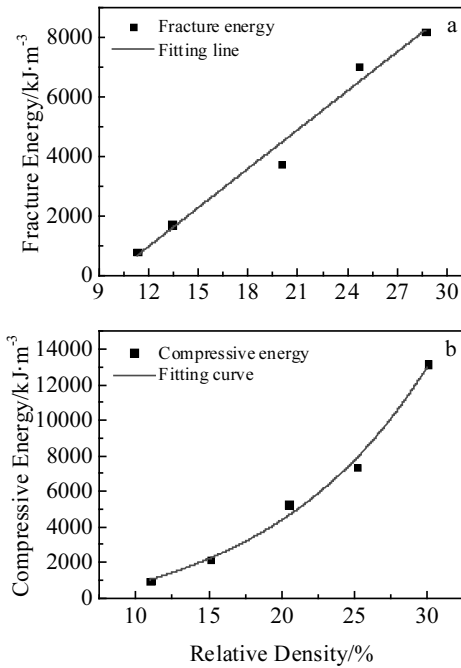


图 3 316L 不锈钢纤维烧结毡的拉伸断裂能、压缩能与相对密度的关系

Fig.3 Relationship between tensile fracture energy (a), compressive energy (b) and relative density of sintered 316L stainless steel fiber felt

对密度的关系图，从图中可见抗拉强度与相对密度的线性关系符合较好，而屈服强度和杨氏模量的测量值在拟合直线上上下下散布较大，这可能是由于金属纤维毡的线弹性阶段不够明显，总是包含着一定比例的塑性变形，从而导致测量值不够准确所致。但是若排除那些分散性偏大的点，如相对密度为 25% 时的点，则其

余点之间仍然具有较好的线性关系。其抗拉强度、屈服强度和杨氏模量与相对密度的关系可分别用式 (1) ~ (3) 表示：

$$\frac{\sigma_b^*}{\sigma_b} = 0.57\rho_r \tag{1}$$

$$\frac{\sigma_s^*}{\sigma_s} = 0.62\rho_r \tag{2}$$

$$\frac{E^*}{E} = 0.29\rho_r \tag{3}$$

式中， σ_b^* 为 316L 不锈钢纤维烧结毡的抗拉强度； σ_b 为对应致密材料的抗拉强度； σ_s^* 为 316L 不锈钢纤维烧结毡的拉伸屈服强度； σ_s 为对应致密材料的拉伸屈服强度； E^* 为 316L 不锈钢纤维烧结毡的拉伸杨氏模量； E 为对应致密材料的杨氏模量； ρ_r 为 316L 不锈钢纤维烧结毡的相对密度。

图 5 是沿面内方向压缩加载条件下的强度、模量与相对密度的关系图，随着材料相对密度的降低，压缩屈服强度和弹性模量逐渐降低，与拉伸加载类似，有些数据点如相对密度为 25% 时的屈服强度和杨氏模量偏离拟合线较大，但总体上屈服强度和杨氏模量与相对密度近似呈线性关系，可分别由式 (4)、(5) 表示：

$$\frac{\sigma_{ys}^*}{\sigma_{ys}} = 0.83\rho_r \tag{4}$$

$$\frac{E_c^*}{E} = 0.11\rho_r \tag{5}$$

其中， σ_{ys}^* 为 316L 不锈钢纤维烧结毡压缩屈服强度； σ_{ys} 为对应致密材料的压缩屈服强度； E_c^* 为 316L 不锈钢纤维烧结毡压缩杨氏模量。

Deshpande 等^[13]指出在类桁架或点阵结构的多孔

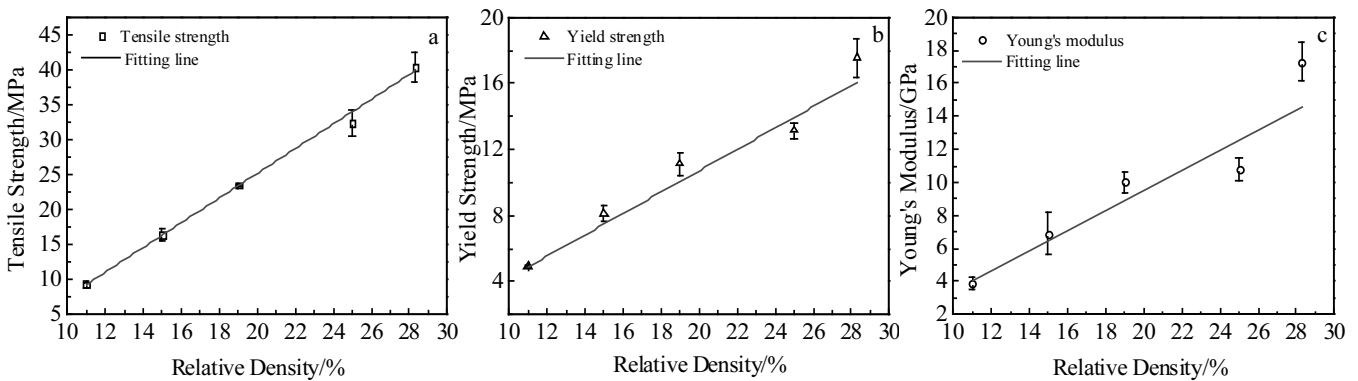


图 4 316L 不锈钢纤维烧结毡的面内抗拉强度、拉伸屈服强度、拉伸杨氏模量与相对密度的关系

Fig.4 Relationship between in-plane tensile strength (a), tensile yield strength (b), tensile Young's modulus (c) and relative density of sintered 316L stainless steel fiber felt

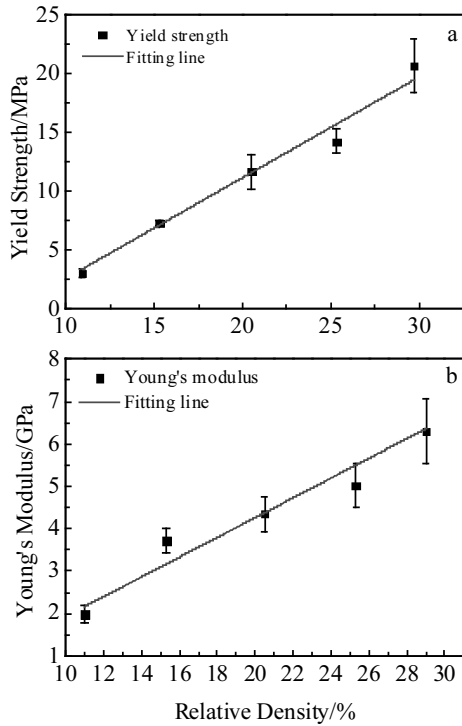


图 5 316L 不锈钢纤维烧结毡的面内压缩屈服强度、压缩杨氏模量与相对密度的关系

Fig.5 Relationship between in-plane compressive yield strength (a), compressive Young's modulus (b) and relative density of sintered 316L stainless steel fiber felt

材料变形过程中，由于结构的不同，会出现拉伸（压缩）变形模式和弯曲变形模式 2 种不同的主导变形模式，所谓拉伸（压缩）主导变形是指材料中的杆或梁以轴向拉伸或压缩变形为主，很少出现横向弯曲，这种变形模式充分发挥了构成杆或梁的材料本身的强度或刚度，因此具有这种主导变形模式的多孔材料比刚度或比强度较高，宏观强度或模量与相对密度成线性关系，特殊结构的点阵材料以及本研究中的 316L 不锈钢纤维烧结毡在面内方向的变形就属于这种变形模式主导。而弯曲主导变形模式是指材料中的杆或梁以横向弯曲变形为主，而轴向伸展或压缩只占很少一部分，这种变形模式没有充分发挥材料本身的强度或刚度。因此具有这种主导变形模式的多孔材料其比刚度和比强度较低，其宏观强度或模量与相对密度成幂大于 1 的抛物线关系，泡沫铝的变形就属于这种变形模式主导。

316L 不锈钢纤维烧结毡的力学性能与相对密度的线性本构关系可以推广到具有相似结构的其它种类的金属纤维烧结毡的力学性能本构关系。即金属纤维

烧结毡的模量和强度（拉伸或压缩加载时）与其相对密度均满足线性关系，可统一由式（6）表示：

$$\frac{\sigma_b^*(\sigma_s^*, \sigma_{ys}^*, E^*)}{\sigma_b(\sigma_s, \sigma_{ys}, E)} = k\rho_r \tag{6}$$

式中， k 为与纤维直径有关的常数。

Gibson 和 Ashby^[14]研究了金属泡沫材料的压缩性能，得出了其力学性能本构关系，如式（7）所示：

$$\frac{\sigma_s^*(E^*)}{\sigma_s(E)} = C\rho_r^n \tag{7}$$

式中， σ_s^* 为金属泡沫材料的压缩屈服强度； σ_s 为金属泡沫材料对应致密材料的压缩屈服应力； C 为由试验决定的常数，它与孔的几何形状有关； n 为相对密度的幂，取值范围在 1.5~2。

将式（6）、（7）做示意图，如图 6 所示（假设 ρ_r 前的系数相等）。可以看出，多孔材料的相对密度相同时，金属纤维烧结毡沿面内方向的相对强度或模量高于金属泡沫材料的强度或模量。因此从理论上来说，金属纤维烧结毡比金属泡沫更适合作为结构支撑材料。

虽然一般情况下金属纤维烧结毡的面内变形以纤维骨架的拉伸（压缩）变形主导，然而根据梁的屈曲变形原理^[15]，当受轴向压应力的梁的长度超过某临界值时，会发生失稳，梁的变形模式由轴向压缩变形转变为横向屈曲变形。将金属纤维烧结毡的结点间纤维骨架等效为悬臂梁，则可得出，当结点间纤维骨架的长度超过某一临界值时，在材料受到面内压缩时，纤维骨架的主导变形模式会由轴向压缩变形转变为横向屈曲变形（即弯曲变形）主导。根据欧拉屈曲模型，对于固定直径的纤维骨架（等效于相同长度和直径的悬臂梁），存在一个临界骨架长度如式（8）：

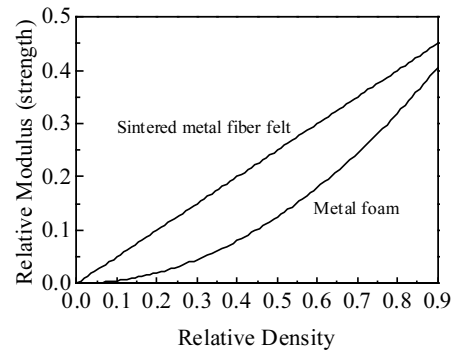


图 6 金属纤维烧结毡与金属泡沫材料的相对强度或模量比较
Fig.6 Contrast of relative strength or modulus between sintered metal fiber felt and metal foam

表 1 316L 不锈钢纤维烧结毡中烧结结点数量、结点间纤维骨架平均长度与相对密度的关系

Table 1 Relationship between number of sintering joints, average length of fiber-ligaments and relative density in sintered 316L stainless steel fiber felt

Relative density/%	10	15	20	28
Joint's density/mm ⁻³	232	632	1084	1785
Average length of fiber-ligament/μm	350	192	150	127

$$l_{cr} = \pi d \left(\frac{E_s}{64\sigma_{ys}K^2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

根据测量, 本研究中所使用的 316L 不锈钢纤维弹性模量 E_s 为 119.4 GPa, 屈服强度 σ_{ys} 为 99 MPa; 式中常数 $K=0.5$, d 为纤维直径。

当纤维骨架的长度大于这个临界长度 l_{cr} 时纤维骨架的欧拉弹性屈曲应力小于其轴向屈服应力, 即纤维骨架在发生轴向屈服前先发生弹性屈曲变形, 纤维骨架主导变形模式会从压缩变形过渡到弯曲变形。对于 316L 不锈钢纤维烧结毡在面内方向的压缩变形, 当纤维直径 d 为 28 μm (即梁的直径为 28 μm) 时, 这个临界长度为 371 μm。根据 CT 试验可获得 316L 不锈钢纤维烧结毡的三维结构图如图 1 所示, 图 1b 中白色箭头所示分别为结点间纤维骨架以及烧结结点。基于材料的三维结构可以统计出不同相对密度的试样中的结点间纤维骨架平均长度, 列于表 1。从表 1 中可见随着相对密度的增加, 骨架平均长度持续减小, 当相对密度为 10% 时, 骨架平均长度为 350 μm, 接近上述纤维骨架临界长度, 即对于受面内压缩应力的金属纤维烧结毡, 当相对密度小于 10% 时, 主导变形模式转化为弯曲变形。考虑到主导变形模式为弯曲变形时材料的强度或模量较低, 因此纤维直径 28 μm 的 316L 不锈钢纤维烧结毡用于作承受压缩应力的结构支撑材料时相对密度不应低于 10%。而这种材料在承受面内拉伸应力时则不存在这种转变, 结点间纤维骨架的主导变形模式一直为拉伸变形。

3 结 论

1) 金属纤维烧结毡沿面内方向的拉伸断裂能和压缩变形能与相对密度分别成线性关系和幂大于 1 的抛物线关系。

2) 金属纤维烧结毡沿面内方向拉伸或压缩时的模量和强度与材料相对密度均成线性关系。这反映了金属纤维烧结毡受面内方向应力时结点间纤维骨架以拉伸(压缩)变形为主。特别的是, 当金属纤维烧结毡受面内方向压缩时, 由于纤维骨架的屈曲变形, 当相对密度低于 10% 时结点间纤维骨架主导变形模式由压缩变形过渡为弯曲主导变形。

参考文献 References

[1] Lefebvre L P, Banhart J, Dunand D C. *Adv Eng Mater*[J], 2008, 10(9): 775

[2] Zhang B, Chen T N. *Appl Acoust*[J], 2009, 70(2): 337

[3] Ao Qingbo(敖庆波), Wang Jianzhong(王建忠), Tang Huiping(汤慧萍) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(1): 2646

[4] Wang Jianyong(王建永), Tang Huiping(汤慧萍), Xi Zhengping(奚正平) *et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2010, 15(4): 378

[5] Markaki A E, Clyne T W. *Biomaterials*[J], 2004, 25(19): 4805

[6] Wang Jianzhong(王建忠), Xu Zhongguo(许忠国), Ao Qingbo(敖庆波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(6): 1636

[7] Neelakantan S, Tan J C, Markaki A E. *Scripta Materialia*[J], 2015, 106: 30

[8] Zhao T F, Chen C Q. *Mechanics of Materials*[J], 2014, 70: 33

[9] Markaki A E, Clyne T W. *Acta Materialia*[J], 2003, 51(5): 1341

[10] Markaki A E, Clyne T W. *Acta Materialia*[J], 2003, 51(5): 1351

[11] Delince M, Delannay F. *Acta Materialia*[J], 2004, 52(4): 1013

[12] Jin M Z, Chen C Q, Lu T J. *J Mech Phys Solids*[J], 2013, 61(1): 161

[13] Deshpande V S, Fleck N A, Ashby M F. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2001, 49(8): 1747

[14] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997

[15] Budynas R G. *Advance Strength and Applied Stress Analysis* [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1998

Experimentally Study on the Constitutive Relations Between Mechanical Properties and Relative Density of Sintered Metal Fiber Felt

Ma Jun^{1,2}, Wang Jianzhong², Li Aijun², Ge yuan², Song Weidong³, Tang Huiping², Jin Feng¹

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The constitutive relations between the deformation energy, Young's modulus, strength and the relative density of sintered 316L stainless steel fiber felt were studied. The in-plane tensile fracture energy varies linearly with relative density, while the in-plane compressive energy varies nonlinearly. The in-plane Young's modulus and strength of sintered metal fiber felt show linear dependence on relative density. The linear in-plane property scaling of sintered metal fiber felt suggests that the in-plane deformation of the fiber-ligaments is stretching-dominated.

Key words: sintered metal fiber felt; mechanical property; constitutive relation; stretching-dominated

Corresponding author: Tang Huiping, Ph. D. Professor, State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231095, E-mail: hptang@c-nin.com