

藕状多孔铜沿垂直于气孔方向的压缩变形行为与本构关系

刘新华, 姚 迪, 刘雪峰, 谢建新

(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 采用定向凝固法, 在氢气压力为 0.2 MPa, 熔体温度为 1 200 °C 的条件下制备 d 45 mm $\times$ 120 mm 的藕状多孔纯铜棒材, 研究藕状多孔金属垂直于气孔方向的压缩变形过程及其影响因素, 分析压缩变形机理。结果表明: 藕状多孔铜沿垂直于气孔方向的压缩变形过程可分为弹性变形、气孔的塑性屈曲、气孔的密实化和密实化后的塑性变形 4 个阶段, 其中塑性屈曲阶段的主要变形机理为多孔材料在垂直载荷的作用下先后形成若干个变形带, 在变形带内圆形气孔先后以压扁和塌陷的方式进行塑性变形; 采用回归分析方法建立藕状多孔金属沿垂直于气孔方向的压缩变形本构关系。

关键词: 气体/金属共晶定向凝固; 藕状多孔金属; 压缩变形; 变形行为; 本构关系

中图分类号: TG 146; TG 115

文献标识码: A

Deformation behaviors and constructive relation of lotus-type porous copper under compressive direction perpendicular to pores

LIU Xin-hua, YAO Di, LIU Xue-feng, XIE Jian-xin

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The lotus-type porous copper bars with 45 mm in diameter and 120 mm in length were fabricated by unidirectional solidification at hydrogen pressure of 0.2 MPa and molten temperature of 1 200 °C. The compressive deformation process of the lotus-type porous copper with pore perpendicular to the compressive direction and its effect factors were investigated. The deformation mechanism of lotus-type porous copper with pores perpendicular to the compressive direction was also analyzed and discussed. The results show that the deformation of the lotus-typed porous copper consists of four stages of elastic deformation, plastic yield deformation, densification and plastic deformation after densification. The main deformation mechanism in the plastic yield stage is that several deformation bands generate sequentially under the perpendicular loading, and in these deformation bands the pores are deformed by flattening and collapsing sequentially. Based on the above results, the compressive mechanical model of the lotus-type porous metals with pores perpendicular to the compressive direction is established using the method of linear regression.

Key words: gas-metal eutectic unidirectional solidification; lotus-type porous metal; compressive deformation; deformation behaviors; constitutive relation

多孔金属材料以各种特有性能在许多领域得到越来越广泛的应用^[1-3]。其中, 藕状多孔材料由于具有单方向规则排列长而直的孔隙, 具有优异的性能特点, 如表观密度低、透过性高、应力集中小、比力学性能高等。因此, 藕状多孔材料的研究开发引起了广泛的

重视^[4-7], 不仅已在很多场合得到应用, 如特种过滤器、陶瓷催化剂载体、宇航工业中使用的超轻 Mg 板、水净化中使用的氧气发生器及火箭燃烧室中使用的蒸发冷却元件等, 而且被认为在医用植入体材料、汽车轻量化结构材料、流体轴承材料、航空航天轻型结构件

材料等诸多领域具有广泛的应用前景^[6]。

多孔金属材料在用作结构材料时,往往承受各种载荷的作用,压缩载荷是其经常遇到的典型载荷。关于压缩性能及压缩变形机制的研究能够为多孔材料在冲击减震等领域的应用提供参考,因而受到研究者们的高度重视,对于泡沫状和蜂窝状等多孔材料的压缩性能及其变形机制已有较多的研究^[8-14]。关于藕状多孔金属的压缩力学性能也有一些研究报道^[15-17],但有关变形过程及变形机理的深入研究鲜见报道。因此,本文作者以藕状多孔纯铜为对象,在前期关于平行于气孔方向压缩变形行为研究^[18]的基础上,研究沿垂直于孔隙方向进行准静态压缩时的变形行为,并建立相应的压缩变形本构关系。

1 实验

1.1 藕状多孔材料及压缩试样的制备

制备实验所采用的固气共晶定向凝固装置,与文献^[16]相同。实验时,先对凝固装置抽真空,当真空度达到 1.0 Pa 后开启加热装置熔化金属,设定温度为 1 200 °C,达到 1 200 °C 后通入压力为 0.2 MPa 的氢气,保温 1 h,以使气体在金属液中充分溶解达到饱和。采用氧化铝陶瓷铸型,内径 45 mm,高 150 mm。将铸型预热至 1 100 °C,然后提起塞棒,使金属液在漏斗的导引下注入加热的铸型中进行定向凝固。

将制备的铸棒去除上部和下部的无孔部分后,采用线切割制备 $d 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的圆柱形试样,试样轴线与气孔方向垂直,以使压缩变形方向垂直于气孔方向。采用称量和体积测量法确定所制试样的密度,然后通过计算得到试样的孔隙率^[16]。采用数码照相方

法获得铸棒横截面及纵截面孔隙图像,然后采用图像处理软件分析孔径尺寸分布。

1.2 压缩变形实验及变形机理的研究

压缩实验在 300 kN 万能材料试验机上进行。记录压缩载荷—行程曲线,经数据处理后得到试样的表观应力—应变曲线。为了观察藕状多孔材料在不同的变形程度时孔的形貌和气孔的变形状况,根据所获得的表观应力—应变曲线的特点,在表观压缩应变分别 0.05、0.15、0.25、0.35、0.50 和 0.60 时终止压缩变形,然后沿与气孔方向垂直的试样子午面切开试样,采用数码照相观察内部孔隙的变形情况,分析其压缩变形机理。为增加实验结果的可比性,用于不同变形程度的试样取自所制备棒坯的同一高度段。

1.3 压缩变形本构关系的建立

在压缩变形机理分析的基础上,综合考虑应变、孔隙率和应变速率的影响,采用回归分析法建立藕状多孔铜沿垂直于气孔方向压缩变形的本构关系。

2 结果与讨论

2.1 藕状多孔纯铜试样

制备直径和高度分别为 45 mm 和 120 mm、孔隙较为细小均匀的藕状多孔纯铜棒坯,孔隙形貌如图 1 所示。结果表明,棒坯气孔直径尺寸为 0.3~1.2 mm,平均直径为 0.81 mm。采用线切割从棒坯上截取直径 10 mm、高度 20 mm 的圆柱形压缩试样,试样轴向与气孔方向垂直,试样表面形貌如图 2 所示。棒坯和试样的孔隙率通过 1.1 节所述方法测定,约为 48%。

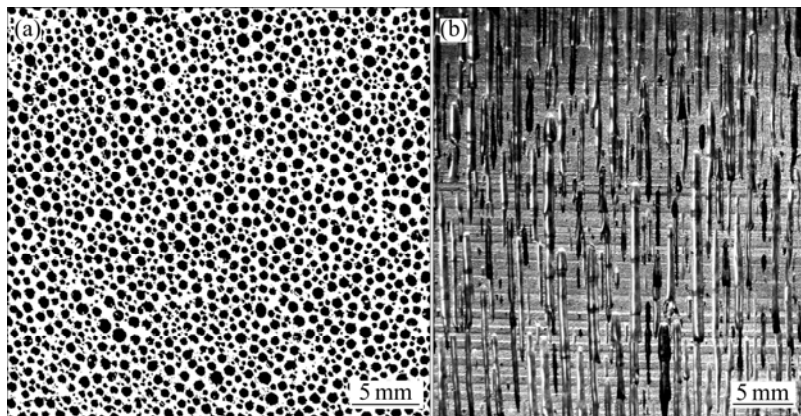


图 1 藕状多孔纯铜棒坯孔隙形貌

Fig.1 Photographs of lotus-type porous pure copper: (a) Cross section; (b) Vertical section

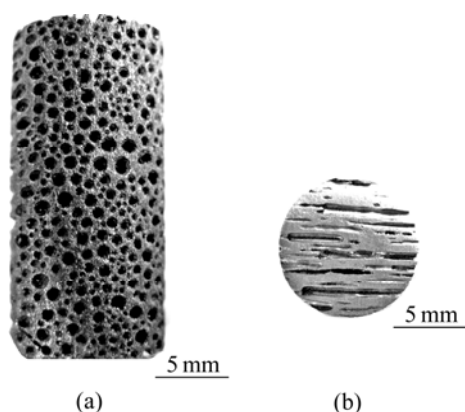


图 2 d 10 mm $\times$ 20 mm 圆柱形压缩试样形貌

Fig.2 Photographs of cylindrical compression sample with 10 mm in diameter and 20 mm in height: (a) Cylindrical surface; (b) Cross section

2.2 藕状多孔纯铜的压缩变形过程与变形机理

图 3 所示为孔隙率为 48% 的藕状多孔纯铜在压缩方向垂直于气孔方向时的表观应力—应变曲线。为了对比分析, 将同一藕状多孔纯铜平行于气孔方向压缩时的表观应力—应变曲线及采用相同定向凝固方法制备的致密纯铜的压缩曲线也示于图 3 中。从应力—应变曲线变化趋势看, 藕状多孔纯铜(包括平行压缩和垂直压缩)与致密纯铜的应力—应变特点不同, 在压缩应变较小(<0.5)时, 有一个较明显的应力平台区; 而藕状多孔纯铜平行于气孔和垂直于气孔压缩时的应力—应变曲线也明显不同, 本文后续的研究表明, 这与两个方向压缩变形时孔隙变形特点不同有关。压缩变形曲线表明, 藕状多孔纯铜沿垂直于气孔方向的压缩变形过程大致可以分为 4 个阶段: 当应变很小(约 0.05 以下)时, 应力随应变快速线性增长, 为弹性变形阶段

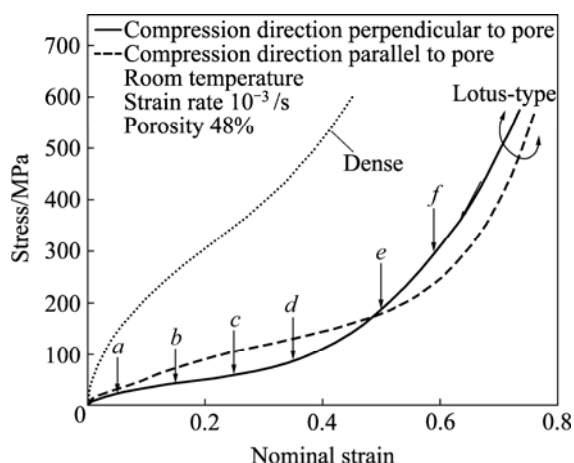


图 3 纯铜压缩变形表观应力—应变曲线

Fig.3 Nominal stress—strain curves of lotus-type and dense pure coppers in compression deformation

(由于此阶段在很小的应变阶段发生, 从图 3 中不能明显看出); 当应变量小于约 0.28 时, 应力先以较快的速度增长, 随后进入接近线性缓慢增长的平台区, 但其平台区显然没有平行气孔方向压缩曲线的宽, 这与两个方向压缩时孔隙结构的变形特点不同有关, 本文后续的结构分析表明, 此时发生气孔塑性压扁、塌陷等以孔隙结构改变为主的塑性变形; 当应变量为 0.28~0.6 时, 应力随应变的增长逐渐加快, 表明此时孔隙在经历塌陷变形后逐渐密实化; 当应变大于 0.6 时, 应力—应变关系曲线上升的趋势与斜率已基本上与致密纯铜的相同, 表明孔隙已接近完全闭合, 发生与近致密纯铜压缩变形相同的塑性变形。

为了进一步分析藕状多孔纯铜沿垂直于气孔方向压缩时的变形行为, 对处于不同变形阶段的压缩试样的孔隙结构变化情况进行了观察分析。图 4(a)~(f)所示为藕状多孔纯铜试样在垂直于气孔方向压缩时不同变形阶段的纵截面照片(分别对应于图 3 中的 a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 f 点), 图 4(g)和(h)所示分别为 4(b)、(d)中 A 和 B 部分的局部放大图, 图 4(i)和(j)所示分别为未压缩试样和 4(a)中气孔形貌的局部放大图。从图 4 所示的整个压缩变形过程中气孔结构的演变图景可以发现, 在压缩变形过程中, 整个试样的气孔变形并非均匀进行, 而是通过若干个局域化变形带首先开始变形扩展。在塑性屈曲阶段, 当应变较小(0.05 左右)时, 气孔发生由圆形变为椭圆的塑性变形, 如图 4(a)和(j)所示。当应变增加到 0.15 左右后, 变形开始产生明显的不均匀变形, 产生垂直于加载方向的局部变形带, 如图 4(b)和(c)所示。从图 4(g)所示的 A 区域局部放大图可以更清楚地看出, 在两条虚线之间的局部变形带中, 气孔发生了严重的塑性塌陷, 但尚未完全闭合, 而在邻近该变形带的区域, 气孔仅产生了较小的塑性变形, 仍基本保持小变形时的椭圆形。正是由于这种局部的结构塌陷, 使变形相对容易, 因而应力随应变增加缓慢, 出现了应力平台。但由于垂直于气孔压缩时孔壁的屈曲和塌陷的空间比平行气孔压缩时要小, 即垂直于气孔压缩时孔壁开始塌陷而接触的应变量要小得多, 所以平台区明显要比平行气孔压缩曲线的窄。当应变大于约 0.28 时, 如图 4(d)和(h)所示, 局域变形带内的孔隙开始闭合, 而局域变形带之外的区域(新的变形带)进入较显著的塌陷变形过程, 因而进一步变形所需的载荷增加速度上升, 表观应力—应变曲线的斜率逐渐增大。此后, 先塌陷局域化变形带接近密实化, 局域变形带之外的气孔进入密实化过程, 如图 4(e)所示。当应变大于 0.5 以后, 新老变形带的密实化程度基本相同, 进入在发生密实化的同时产生较粗的塑性变形,

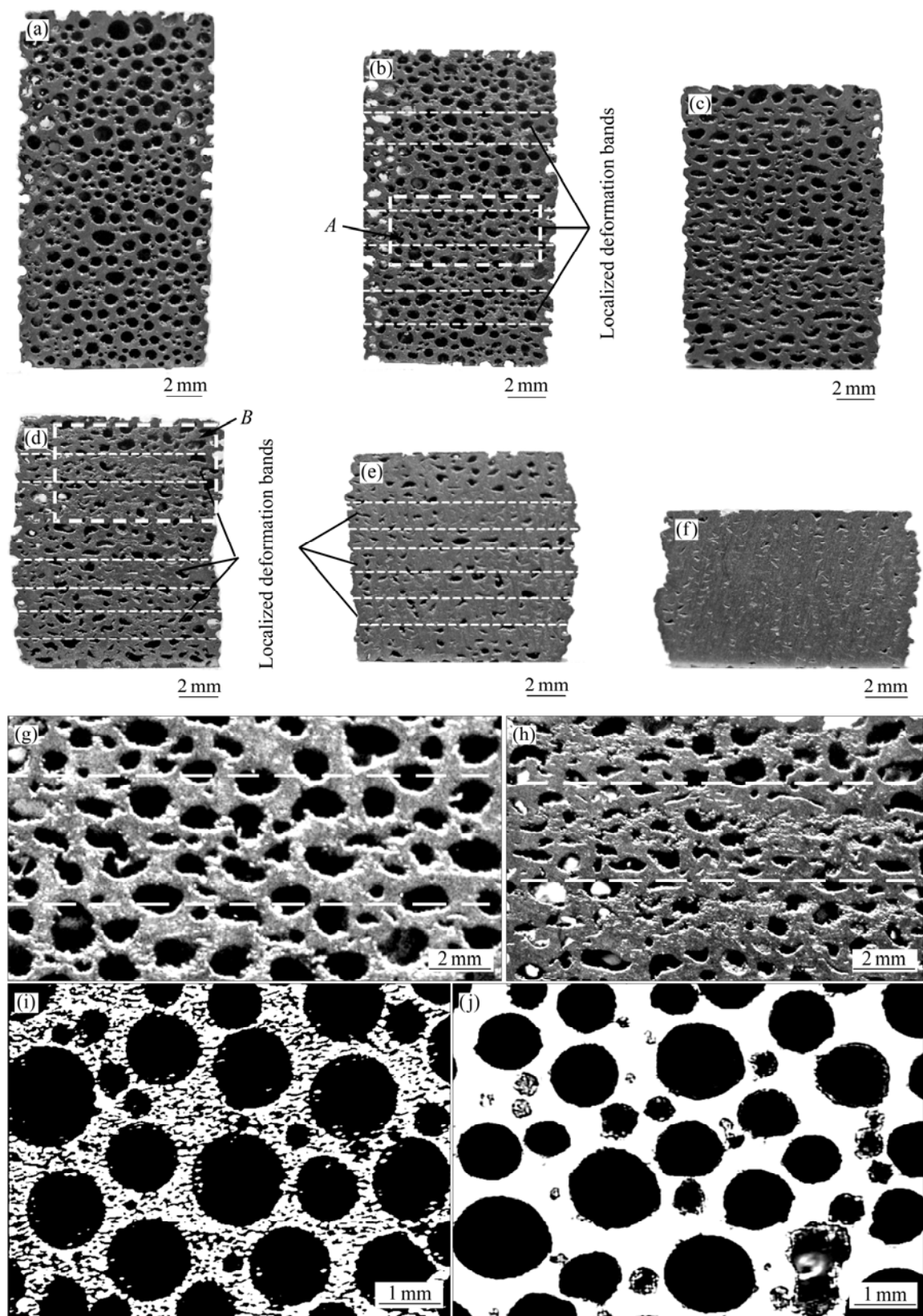


图 4 压缩方向垂直于孔轴时不同变形量的纵截面形貌

Fig.4 Vertical section images of lotus-type porous copper after different compression deformations: (a) 5%; (b) 15%; (c) 25%; (d) 35%; (e) 50%; (f) 60%; (g) and (h) Magnified images of zones *A* and *B*; (i) Magnified image of original pores; (j) Magnified image in (a)

试样直径明显增大, 如图 4(f)所示。综合图 3 和 4 的结果, 可以认为当应变小于 0.5 时, 气孔孔壁本身所受到的镦粗和延展等压缩变形较小, 藕状多孔铜的压缩变形主要以气孔孔壁塑性失稳变形为主, 这一点从图 4(a)~(d)所示的压缩试样的直径没有明显变粗也可得到证明; 而当应变大于 0.5 时, 气孔绝大部分密实化, 如图 4(f)所示, 这时的变形主要是孔壁材料自身的压缩变形, 即发生以整体塑性镦粗为主、少量气孔完全闭合为辅的变形。上述这种先产生局域变形带并在变形带内发生较大变形而后逐步推进的变形行为, 在具有正六边形均匀孔结构的蜂窝铝垂直于气孔方向压缩变形时也可观察到^[10], 但其具体的微观机制无研究报道。就本文的研究对象而言, 可能是由于孔隙率的分布不均匀所引起的, 即孔隙率大的地方先变形而形成变形带, 这还有待进一步的研究。从图 4(d)、(e)、(f)还可以看出, 由于变形带在变形过程中不同时产生, 而变形带中气孔的变形又主要以塑性失稳为主, 所以难以避免在变形后期整体变形产生一定程度的失稳, 表现为试样侧边不够平直, 出现边浪。

由上述分析可知, 变形带的形成和发展对整个变形过程有重要影响, 因此, 有必要对其进行进一步分析和讨论。为此, 对图 4(g)和(h)中两虚线之间的变形带中孔隙结构的形貌进行了进一步分析。不难看出,

单个气孔在整个变形过程中主要通过如图 5 所示的 3 种方式之一发生变形直至完全闭合, 即椭圆化后向下塌陷、椭圆化后向上塌陷、椭圆化后拉长和压扁。由于气孔受单向压缩作用, 开始变形时沿垂直于加载方向椭圆化, 如图 4(j)所示。随着变形的进行, 由于气孔原始形态、分布状态不均以及局部所受应力状态不同等, 导致各个气孔发生变形的方式不同, 呈现出 3 种不同典型的扁平化方式。通过仔细观察可发现的另一个现象是, 某一气孔与水平方向上相邻气孔及对角相邻气孔有相反的塌陷方向, 即一个呈“上弦月”塌陷, 则另一个呈“下弦月”塌陷; 而同一列气孔则具有相似的塌陷方式。这可能是由于这样的变形方式有利于整个变形过程的稳定性。对于一些直径较小气孔, 由于其直径相对周围孔壁尺寸相差较大, 往往会按照图 5(c)所示的模式直接被压扁并闭合。但总体而言, 由于藕状多孔金属的孔壁厚度相对气孔直径较小, 图 5(a)和(b)所示的变形模式是主要模式。

根据图 5 所示的单个气孔结构演变模型, 可以给出包含一个局域变形带的藕状多孔金属沿垂直气孔方向压缩时变形带形成和发展过程的一种理想模型, 如图 6 所示。在此模型中假设气孔均匀排列, 且变形带中只有两排气孔发生变形(实际结构中可能涉及 2~4 排气孔), 变形带之外气孔仅发生较小的变形。

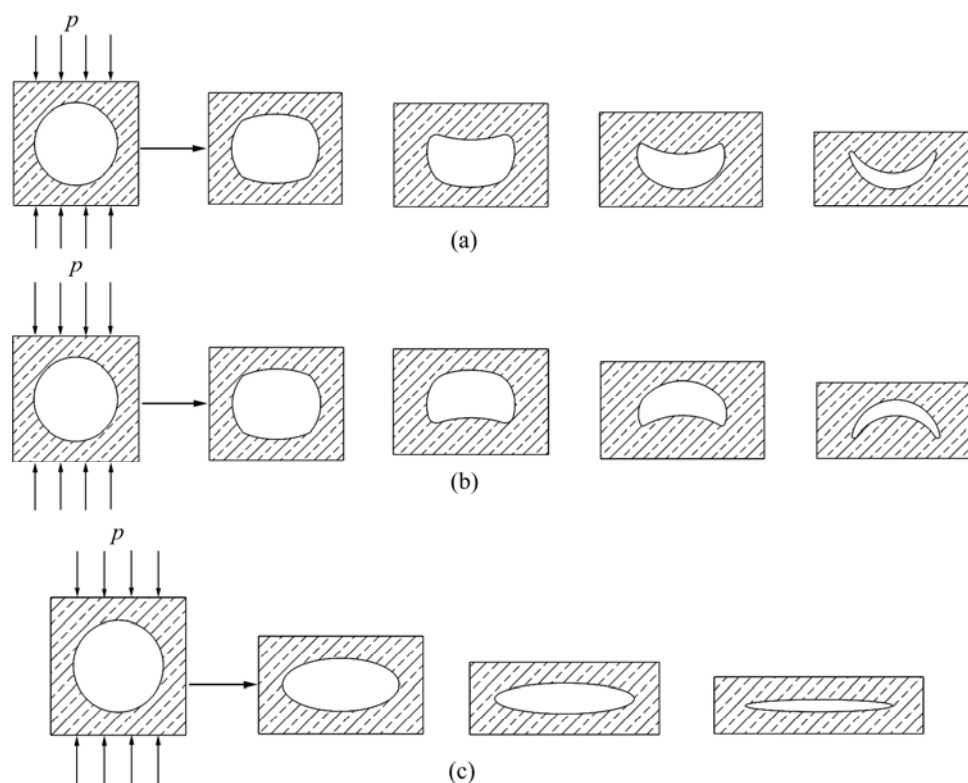


图 5 垂直于气孔压缩时的气孔变形过程示意图

Fig.5 Schematic drawing of pore deformed configuration compressed perpendicular to pores: (a) Collapse downwards; (b) Collapse upwards; (c) Collapse elliptically

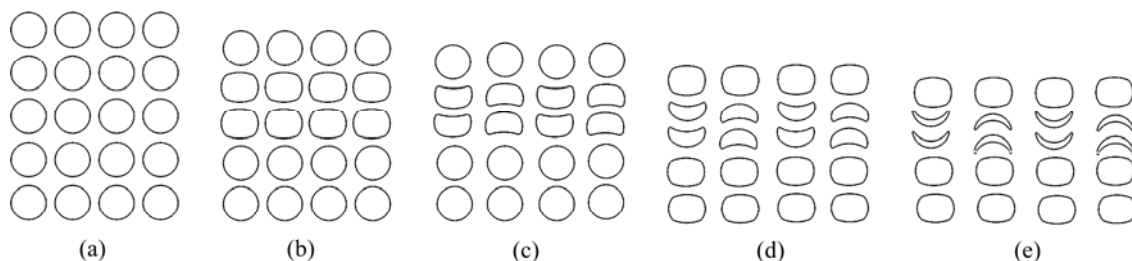


图 6 藕状多孔金属压缩变形过程中变形带的形成和发展模型

Fig.6 Models for forming and development of one deformation zone during compression deformation of lotus-type porous metal:

(a) Undeformed stage; (b)–(e): Different plastic deformed stages

2.4 藕状多孔铜压缩变形本构关系

由于藕状多孔铜在低应变速率静态压缩条件下是应变速率不敏感材料, 可建立常温下不同塑性变形阶段藕状多孔纯铜孔隙率和应变对压缩应力影响的模型函数式, 即:

$$\sigma = k(\varepsilon)f(P) \quad (1)$$

式中: $k(\varepsilon)$ 为与应变相关的系数; $f(P)$ 为与孔隙率 P 有关的函数; σ 为表观压缩应力; ε 为表观压缩应变。

图 7 所示为不同应变条件下压缩变形表观应力和孔隙率的关系曲线。从图 7 中可以看出, 压缩应力和孔隙率之间满足指数关系, 即:

$$\sigma = \begin{cases} 239.78 \exp(-4.5P), & \varepsilon = 0.1 \\ 450.38 \exp(-4.2P), & \varepsilon = 0.3 \\ 776.03 \exp(-3.4P), & \varepsilon = 0.5 \\ 1036.9 \exp(-2.7P), & \varepsilon = 0.6 \\ 1363.7 \exp(-2.3P), & \varepsilon = 0.7 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知, 式(1)可具体表示为式(3)的形式:

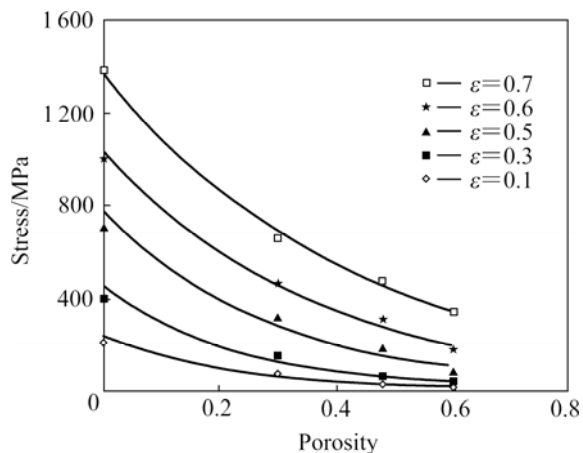


图 7 不同应变条件下的应力与孔隙率的关系

Fig.7 Porosity dependence of stress at different strains

$$\sigma = k(\varepsilon) \exp(-aP) \quad (3)$$

式中: a 为系数。

从式(2)可以看出, 随着应变 ε 的变化, 系数 a 也不断变化, 其关系如图 8 所示。从图 8 可以看出, a 和 ε 符合二次曲线关系, 即:

$$a = -4.88\varepsilon^2 + 0.054\varepsilon + 4.58 \quad (4)$$

由式(2)可知, 当应变分别为 0.1、0.2、0.3、0.5、0.6 和 0.7 时, 式(3)中的 $k(\varepsilon)$ 分别为 239.78、450.38、776.03、1 036.9 和 1 363.7, 它们之间的关系如图 9 所示。从图 9 中可以看出, $k(\varepsilon)$ 和 ε 符合指数关系, 即:

$$k(\varepsilon) = 183.73 \exp(2.88\varepsilon) \quad (5)$$

结合式(3)、(4)和(5), 得到藕状多孔铜在静态压缩时的本构方程为

$$\sigma = 183.73 \exp(2.88\varepsilon) \exp[(4.88\varepsilon^2 - 0.054\varepsilon - 4.58)P] \quad (6)$$

应用式(6), 对不同孔隙率的试样在不同应变下的表观应力值进行计算, 绘制应力—应变曲线, 并与实测压缩曲线进行对比, 如图 10 所示。从图 10 中可以

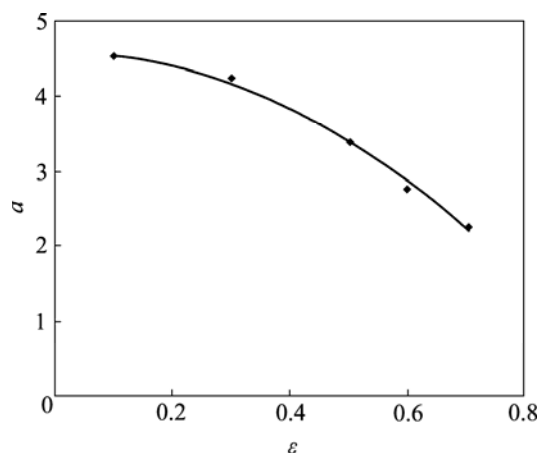


图 8 系数 a 与应变 ε 的关系

Fig.8 Relationship between a and strain ε

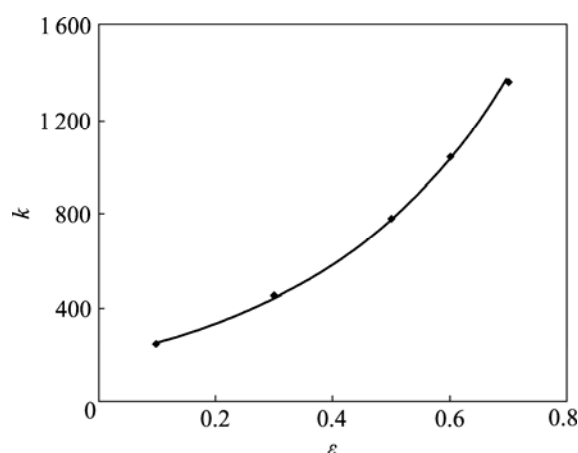
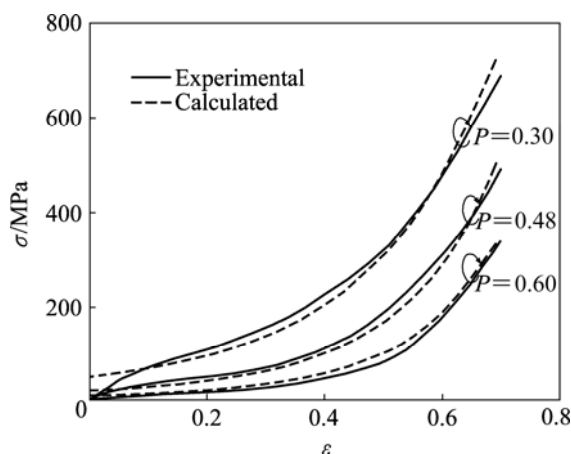
图9 函数 k 与应变 ε 的关系Fig.9 Relationship between k and strain ε 

图10 不同孔隙率藕状多孔纯铜计算应力—应变关系曲线与实测曲线的比较

Fig.10 Comparison of calculated and experimental stress—strain curves of different porosities

看出, 本构方程(6)的计算结果和实验值吻合良好。

3 结论

1) 藕状多孔铜沿垂直于气孔方向的压缩变形过程可分为弹性变形、气孔的塑性屈曲、气孔的密实化和密实化后的緻粗变形4个阶段。

2) 藕状多孔纯铜垂直于气孔方向压缩时, 在试样内先后形成若干个变形带, 发生不均匀变形; 在变形带内圆形气孔以先压扁后塌陷的方式进行塑性变形。

3) 压缩变形过程中, 气孔因原始形态、局部分布状态和应力状态的不同, 呈现3种不同塌陷变形方式, 即上弦月塌陷、下弦月塌陷和扁平化塌陷。

4) 建立了藕状多孔纯铜沿垂直于气孔方向的准静态压缩变形本构关系, 所建本构关系与实验结果吻合良好。

REFERENCES

- [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 Pei-sheng, LI Tie-fan, FU Chao. Applications of porous metal materials[J]. Functional Materials, 2001, 32(1): 12–15.
- [2] 张茂勋, 何福善, 常凯. 多孔金属材料的特性与用途[J]. 机电技术, 2004(z1): 164–166.
ZHANG Mao-xun, HE Fu-shan, CHANG Kai. Characteristics and applications of porous metal materials[J]. Mechanical and Electrical Technology, 2004(z1): 164–166.
- [3] 汤慧萍, 张正德. 金属多孔材料发展现状[J]. 稀有金属材料与工程, 1997, 26(1): 1–6.
TANG Hui-ping, ZHANG Zheng-de. Developmental states of porous metal materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1997, 26(1): 1–6.
- [4] 刘源, 李言祥, 张华伟. 金属—气体共晶定向凝固制备藕状多孔金属的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(1): 1–5.
LIU Yuan, LI Yan-xiang, ZHANG Hua-wei. Preparation of Lotus-type porous metal with metal-gas eutectic directional solidification[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2005, 25(1): 1–5.
- [5] ALVAREZ K, HYUN S K, TSUCHIYA H. Corrosion behavior of lotus-type porous high nitrogen nickel-free stainless steels[J]. Corrosion Science, 2008, 50: 183–193.
- [6] 李言祥, 刘源. 金属/气体共晶定向凝固规则多孔金属的研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(4): 1–4.
LI Yan-xiang, LIU Yuan. Directional solidification of metal/gas eutectics and gasarite porous metals—State of the art[J]. Materials Review, 2003, 17(4): 1–4.
- [7] HYUN S K, NAKAJIMA H. Effect of solidification velocity on pore morphology of lotus-type porous copper fabricated by unidirectional solidification[J]. Materials Letters, 2003, 57(21): 3149–3154.
- [8] AFONSO L, ROSA M E, FORTES M A. Interfaces between honeycomb foams: Defect content and behaviour under deformation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2007, 309: 38–48.
- [9] FOO C C, CHAI G B, SEAH L K. Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure[J]. Composite Structures, 2007, 80: 588–594.
- [10] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [11] 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.
- [12] ZHOU Yun, ZUO Xiao-qing, SUN Jia-lin, NUTT S R. Cell-structure and mechanical properties of closed-cell aluminum foam[J]. Trans Nonferrous Met Soc, 2004, 14(2): 340–344.
- [13] YOU X H, WANG F, WANG L C. The structure control of aluminum foams produced by power compacted foaming process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 17(3): 279–282.
- [14] HYUN S K, MURAKAMI K, NAKAJIMA H. Anisotropic mechanical properties of porous copper fabricated by unidirectional solidification[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 299: 241–248.
- [15] HYUN S K, NAKAJIMA H. Anisotropic compressive properties of porous copper produced by unidirectional solidification[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 340: 258–264.
- [16] 谢建新, 刘新华, 刘雪峰. 藕状多孔纯铜棒的制备与表征[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(11): 1869–1873.
- XIE Jian-xin, LIU Xin-hua, LIU Xue-feng. Fabrication and characterization of lotus-type porous pure copper bar[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(11): 1869–1873.
- [17] TANE M, IKEDA T. Compressive properties of lotus-type porous stainless steel[J]. Journal of Materials Research, 2006, 21(1): 185–193.
- [18] 姚迪, 刘新华, 刘雪峰, 谢建新. 藕状多孔铜沿平行于气孔方向压缩变形行为与本构关系[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(1): 1–7.
- YAO Di, LIU Xin-hua, LIU Xue-feng, XIE Jian-xin. Deformation behaviors and constructive relation parallel to pores of lotus-type porous copper[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(1): 1–7.

(编辑 李向群)