

## 藕状多孔铜轴向压缩变形行为与本构关系

姚迪, 刘新华, 刘雪峰, 谢建新

(北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

**摘要:** 在氢气压力为 0.2 MPa、熔体温度为 1 200 °C 条件下采用定向凝固法制备  $d45\text{ mm}\times 120\text{ mm}$  的藕状多孔纯铜棒材, 研究藕状多孔金属的压缩变形过程及其影响因素, 分析藕状多孔材料的压缩变形机理, 采用线性回归分析方法建立藕状多孔材料的压缩变形本构关系。结果表明: 藕状多孔铜的压缩变形过程分为弹性变形、以孔壁塑性屈曲为主的大塑性变形和密实化 3 个阶段; 大塑性变形阶段的主要变形机理是孔壁先呈波形弯曲, 然后产生塌陷和折叠变形; 藕状多孔铜沿平行气孔方向静态压缩时应力—应变曲线受应变速率影响很小。

**关键词:** 藕状多孔金属; 定向凝固; 变形行为; 本构关系

中图分类号: TG146; TG115

文献标识码: A

## Axial compressive deformation behaviors and constitutive relation for lotus-type porous copper

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

(Advanced Materials and Technologies Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Lotus-type porous copper bars of 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 and its effect factors were investigated. The deformation mechanism of lotus-type porous copper was also analyzed and discussed. The compressive mechanical model of lotus-type porous metals was established using the method of linear regression. The results show that the deformation of lotus-typed porous copper consists of three stages of elastic deformation, large plastic yield deformation with mainly pore wall buckling, collapse and densification. The main deformation mechanism in the large plastic deformation stage is that the pore walls buckle in a periodic wave and then collapse and fold. The strain rate has little effect on the compressive stress parallel to the direction of pores.

**Key words:** lotus-type porous metal; unidirectional solidification; deformation behaviors; constitutive relation

多孔金属材料具有密度低、比表面积大、吸能减震、消音降噪、透气透水, 以及加工性能好、比强度和比刚度高等优良特性, 被广泛应用于交通运输、石油化工、航空航天等各个领域<sup>[1-3]</sup>。近年来发展起来的固气共晶定向法<sup>[4]</sup>所制备的藕状多孔金属, 具有单方向规则排列长而直的孔隙, 克服了由于球形或近球形

孔隙的存在而不利于材料力学性能的缺点<sup>[5]</sup>, 使其在平行于孔的轴线方向上不存在明显的应力集中<sup>[6-7]</sup>, 力学性能优于泡沫金属等多孔材料, 是一种结合结构性和功能性的高性能多孔材料。因此, 这种特殊的多孔材料具有广阔的潜在应用前景, 既可作为一类新型的工程结构材料用于汽车、航空航天、造船、机械制造

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674008); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0083)

收稿日期: 2007-11-21; 修订日期: 2008-03-26

通讯作者: 谢建新, 教授, 博士; 电话: 010-62332254; E-mail: jxxie@mater.ustb.edu.cn

和建筑等方面,也可作为功能材料用于催化剂载体、消音器、电池电极、隔热、散热、水净化及声音控制等方面<sup>[5]</sup>。

多孔材料的力学性能是其重要的应用特性,历来受到研究者的重视<sup>[6-10]</sup>。GIBSON和ASHBY<sup>[11]</sup>、GREDIAC<sup>[12]</sup>对蜂窝材料和泡沫材料等的力学性能进行了比较系统的研究,提出相关变形机制和力学模型。但结果显示,多孔材料的力学行为和变形机制往往与特定的多孔结构有关。对于藕状多孔材料的力学性能,尤其是压缩力学性能,国内外学者已开展相关研究<sup>[6,13-14]</sup>,但关于其变形过程及其变形机理的深入研究却未见报道。因此,本文作者以藕状多孔纯铜为对象,研究藕状多孔金属沿平行于孔隙方向进行压缩时的变形机理,并在此基础上建立其压缩变形本构关系。

## 1 实验

### 1.1 藕状多孔材料的制备

采用如图1所示的自制压力定向凝固装置,利用固气共晶法制备藕状多孔纯铜棒。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1200℃。达到1200℃后通入压力为0.2 MPa的氢气,保温1 h,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,其内径45 mm,高150 mm。将铸型预热至900℃(受设备对铸型加热能力的限制,理论上铸型加热温度应接近或高于纯铜的熔点),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。

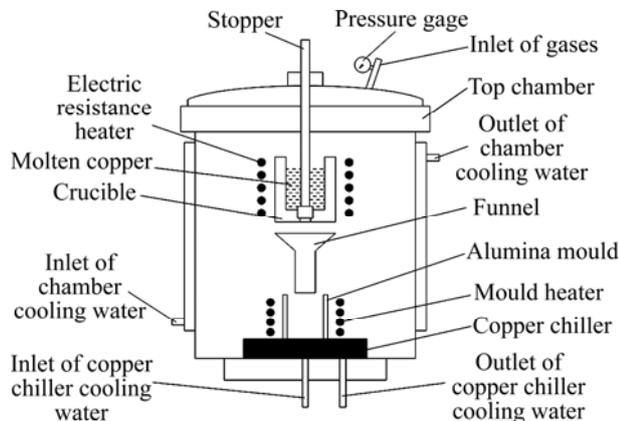


图1 高压定向凝固装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of fabrication apparatus for lotus-type porous metals

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 $d10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的圆柱形试样,试样轴线与气孔方向平行,以使压缩变形方向平行于气孔方向。采用称量和体积测量确定所制试样的密度,然后通过计算得到试样的孔隙率。采用数码照相方法获得试样横截面孔隙图像,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

压缩实验在300 kN万能材料实验机上进行。记录压缩载荷—行程曲线,数据经处理后得到试样的应力—应变曲线。为了研究压缩变形机理,需要观察藕状多孔材料在不同的变形程度时孔的形貌和孔壁的变形状况。根据所获得的压缩变形应力—应变曲线的特点,分别在变形量为0.15、0.3、0.5和0.75时终止压缩变形,然后沿压缩方向切开试样,采用SEM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,用于不同变形程度实验的试样取自棒坯的同一高度段。观察分析表明,取自同一高度的试样其孔隙形貌与尺寸分布十分相近。为了考察应变速率对藕状多孔金属压缩变形的影响,应变速率分别取为 $10^{-3}$ 、 $4\times 10^{-3}$ 和 $10^{-2}$ /s。

### 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,采用回归分析法推导出藕状多孔材料的压缩变形过程本构关系。

## 2 结果与讨论

### 2.1 藕状多孔纯铜试样

制备了直径和高度分别为45和120 mm的藕状多孔纯铜棒坯。图2所示为棒坯去除上部和下部的无孔部分后横截面和纵截面形貌的照片。对试样的分析结果表明,其气孔直径尺寸范围为0.3~1.2 mm,平均直径约为0.81 mm。采用线切割从棒坯制备直径10 mm、高度20 mm的圆柱形压缩试样,形貌如图3所示。棒坯和试样的孔隙率通过式(1)计算得出,约为48%。

$$P = 1 - \frac{\rho_1}{\rho(\text{Cu})} \quad (1)$$

式中  $P$  为孔隙率;  $\rho_1$  为藕状多孔铜的密度;  $\rho(\text{Cu})$  为纯铜的密度。

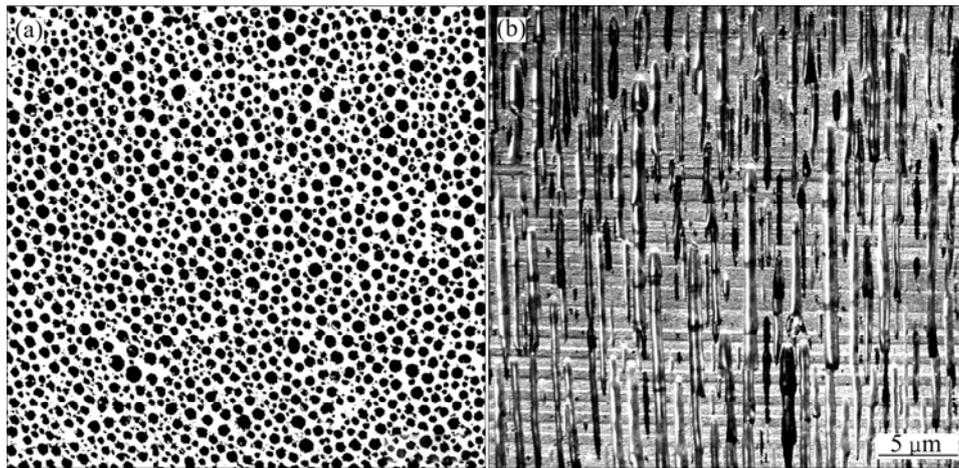


图 2 藕状多孔纯铜孔隙形貌

Fig.2 Photographs of lotus-type porous pure copper: (a) Cross section; (b) Vertical section

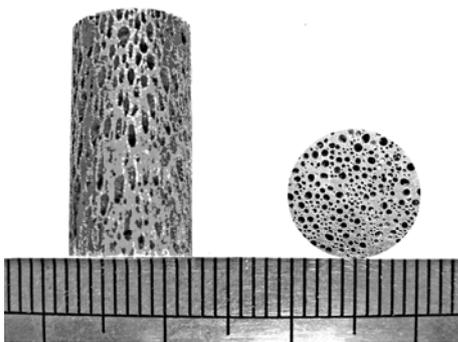


图 3  $d10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$  的圆柱形压缩试样

Fig.3 Cylindrical compression sample of 10 mm in diameter and 20 mm in height

## 2.2 藕状多孔纯铜的压缩变形过程与变形机理

图 4 所示为孔隙度约 48% 的藕状多孔纯铜试样压缩变形名义应力—应变曲线, 作为对比, 致密纯铜的压缩应力—应变曲线也示于图 4 中。图 5 所示为压缩变形不同阶段试样纵截面的 SEM 像。从图 4 可以看出, 藕状多孔纯铜的压缩变形过程可分为 3 个主要阶段: 应变量小于 0.003 时, 应力随应变快速线性增长, 为弹性变形阶段; 在应变量约为 0.003~0.6 的范围内, 应力随应变先以较快速度增长, 随后增长变缓, 基本保持为较小幅度增长, 图 5(b)和(c)及后续分析结果表明, 此阶段发生了以孔壁塑性屈曲为主的变形; 当应变量大于 0.6 时, 应力随应变量增加急剧增加, 对应于多孔材料的密实化阶段, 如图 5(d)所示。对第二个阶段(即塑性屈曲阶段)的应力应变曲线特点及孔隙结构变形特点的进一步分析表明, 该阶段又可以分为孔壁塑性铰粗、孔壁塑性弯曲和孔壁塑性塌陷与折叠 3 个不同的塑性变形过程。上述变形各阶段的大致划分

I~V 阶段, 如图 4 所示。

### 2.2.1 弹性变形阶段

弹性变形在加载初期发生, 直至变形达到弹性极限, 如图 4(b)的第 I 段所示。可以认为, 弹性变形阶段以孔壁的轴向压缩弹性变形为主, 并可能发生一定程度的孔壁弹性弯曲变形。其特点是, 应力随应变线性增大, 外力去除后变形消失, 所以难以通过压缩后的试样观察到。

### 2.2.2 塑性屈曲阶段

塑性变形阶段始于弹性压缩变形极限之后, 如上所述, 主要可分为 3 个变形阶段。当达到弹性变形极限之后变形进一步增加时, 首先发生孔壁的塑性铰粗变形, 之后由于弹性弯曲和变形不均匀性的存在, 当作用于孔壁的力矩超过纯塑性矩(孔壁发生塑性屈曲的临界力矩)时, 孔壁就会发生塑性弯曲, 进而发生藕状多孔材料的塑性塌陷和折叠。

在塑性变形过程的开始阶段(名义应变小于约 0.15), 随着应变增加, 应力基本线性增加(图 4 中第 II 段), 表明此时气孔的孔壁在达到弹性压缩极限之后开始发生较小的塑性铰粗, 变形过程稳定进行。而当变形进一步增大时, 铰粗过程开始失稳, 在名义变形量约为 0.15 时, 孔壁开始出现轻微的塑性弯曲, 如图 5(a)所示。而塑性弯曲产生之后, 这种结构便处于力学上的失稳状态, 进一步变形则相对容易进行。因此, 当名义应变大于 0.15 时, 应力增加速度比较缓慢, 如图 4 中第 III 段所示; 而在名义应变大于 0.43 时, 随应变的增加应力增加的速度又加快。从图 5(b)所示的孔隙结构的变形形貌可知, 在变形的第 III 阶段(应变在 0.15~0.43 之间), 孔隙结构发生的主要变形是孔壁由

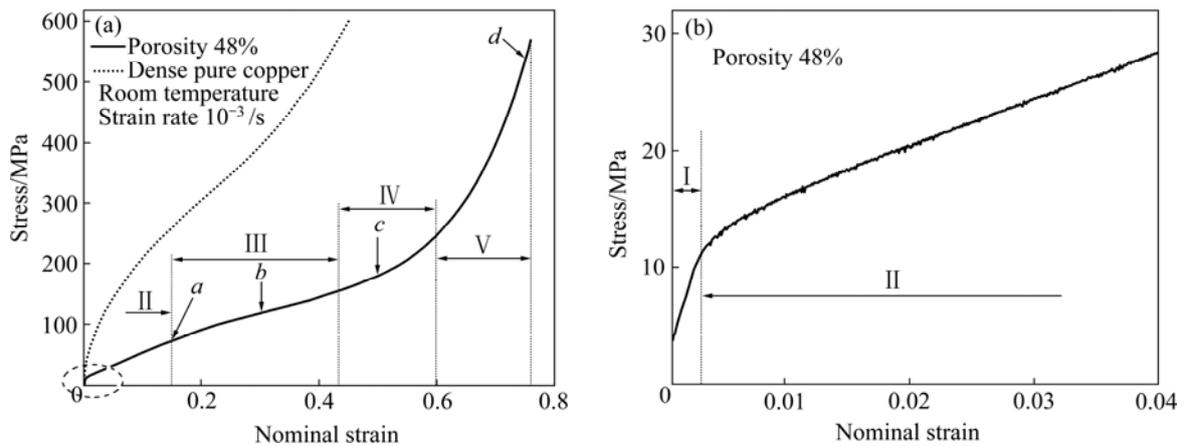


图4 藕状多孔铜的表观压缩应力—应变曲线

Fig.4 Apparent compressive stress—strain curves for lotus-type porous pure copper: (a) Whole stress—strain curve; (b) Magnified stress—strain curve in (a)

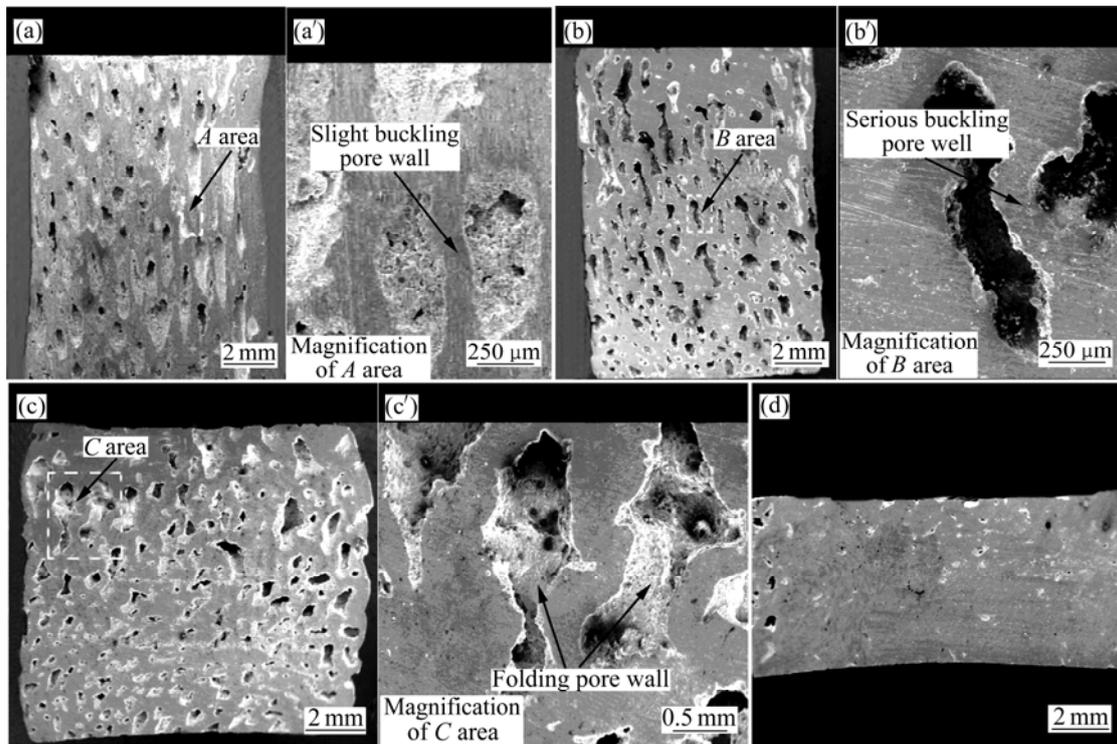


图5 藕状多孔铜在不同压缩变形量时的纵截面形貌照片

Fig.5 Longitudinal section photographs of lotus-type porous pure copper with different compressive deformations: (a) 0.15; (b) 0.3; (c) 0.5; (d) 0.75; (a') Magnification of A area in (a); (b') Magnification of B area in (b); (c') Magnification of C area in (c)

轻微弯曲到严重弯曲为主的塑性屈曲，而结合图 5(c)所示的孔壁出现严重塌陷和折叠的形貌可以判断，在第III阶段还可能有一部分气孔的孔壁发生更严重的周期性弯曲和少量折叠。随着应变的继续增大(应变在 0.43~0.6 之间)，应力快速增加，如图 4 中第IV段所示。从如图 5(c)所示孔隙结构的变形形貌可以看出，在该阶段孔壁已经由严重弯曲发展为塌陷、折叠变形，塌陷的孔壁开始向孔隙填充，进而折叠接触在一起。经

过此阶段的变形之后，应力随应变的增加进一步加快，从图 5(c)显示的在名义应变为 0.75 时试样已经基本密实化来看，实际上在应变大于 0.6 之后开始进入密实化阶段。

需要指出的是，上述塑性变形的各个阶段并不是截然分开的，而是互相交叉、逐渐过渡的。这是因为：由于同一试样中气孔的大小、壁厚存在不均匀性，同时同一气孔的直径大小在沿压缩方向上由于在制备时

也难以保证完全一致; 另外, 从图 5 还可看出, 由于样品侧表面周围的气孔较中央的气孔所受的约束少, 处于样品中央的气孔比周围的气孔先闭合, 这说明试样在压缩过程中各部位的应力状态也不完全一致。因此, 在整体发生塑性屈曲时, 由于气孔分布、气孔大小、孔壁厚度的不均匀性, 每个气孔发生塑性屈曲的程度不同。不仅如此, 在整体发生屈曲的前期, 可能有一些气孔仍处于弹性变形阶段; 而在整体发生屈曲的后期, 部分气孔已经发生密实化, 因此, 塑性屈曲阶段的应力仍呈一定的上升趋势。同时, 由于气孔的不均匀性使得藕状多孔纯铜试样压缩时不像密实材料那样向两侧产生膨胀而呈对称的鼓形, 而是向某一侧突出, 如图 5 所示。对多孔材料而言, 由于孔隙中存在气体, 因此, 在变形过程中将产生孔隙中的气体流动, 从而对材料的变形过程产生影响, 增加变形抗力。但由于藕状多孔金属的气孔基本上是通孔, 气体流动比较自由, 因此, 附加应力实际上很小, 可以忽略不计。

综上所述, 在塑性屈曲的过程中, 孔壁受到压缩载荷作用所产生的变形形式主要有孔壁的轴向压缩微粗变形和塑性弯曲折叠变形, 而孔壁的弯曲和折叠变形是最主要的形式, 从图 5 (b)和(c)的局部放大图可以清楚看出, 孔壁发生弯曲和折叠变形时, 是以连续周期性的波形发生的, 因此, 单个气孔的压缩变形过程可用图 6 所示的理想模型描述。

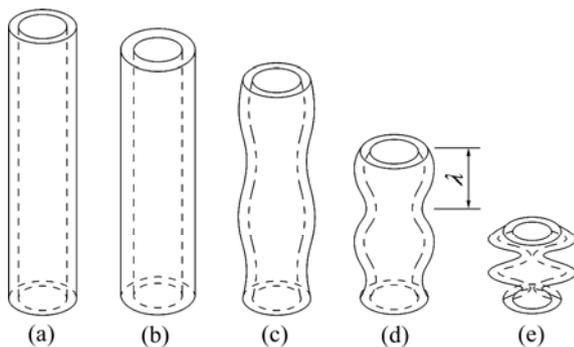


图 6 藕状多孔铜的气孔单元变形过程示意图

**Fig.6** Schematic diagrams of cell deformation for lotus-type porous copper: (a) Elastic deformation; (b) Plastic upsetting deformation; (c), (d) Slight and severe plastic buckling in periodic wave; (e) Plastic collapse

### 2.2.3 密实化阶段

在这个阶段中, 以波形变形的孔壁开始接触压合在一起, 孔壁材料自身也受到压缩变形, 应力—应变曲线急剧上升(应变大于 0.6), 斜率与致密纯铜压缩曲线的斜率逐渐趋于一致, 表明材料已逐渐完成孔隙的闭合进而接近完全密实化。图 5(d)所示为压缩变形

75%时试样纵截面的 SEM 照片, 可以看出, 样品中心的气孔接近于完全闭合, 但侧表面层的气孔由于处于自由变形区而不易完全闭合。

### 2.3 应变速率对压缩应力应变关系的影响

为了研究应变速率对藕状多孔金属压缩变形的影响, 在应变速率分别为  $10^{-3}$ 、 $4 \times 10^{-3}$ 和  $10^{-2}$  /s 的条件下进行了压缩实验。一般而言, 金属在压缩变形时, 随应变速率增加, 位错的运动速度将加快, 滑移面由不利位向向有利位向的转动、晶间滑移和扩散蠕变等都来不及充分完成, 其应力—应变曲线表现出加工硬化现象。文献[15]和[16]的研究表明, 泡沫多孔材料和致密纯铜在较低应变速率压缩时其应力—应变曲线均受应变速率的影响。而对于藕状多孔纯铜, 本研究发现不同应变速率下藕状多孔纯铜压缩时的应力—应变曲线基本重合, 如图 7 所示。这一现象可认为是由于如下两个因素所引起的: 1) 藕状多孔材料基本上是通孔, 压缩时孔内气体可以逸出, 孔内气体对孔壁的变形不产生约束作用, 这与闭孔的泡沫多孔材料是不同的; 2) 由于内部孔隙的存在, 位错和晶界将更容易产生滑移, 使得藕状多孔铜的应力—应变曲线受应变速率的影响很小。有关详细机理尚有待深入研究。此外, 本研究工作是在准静态压缩条件下进行的, 应变速率的变化范围较小, 更高的应变速率下的变形行为, 也有待进一步研究。

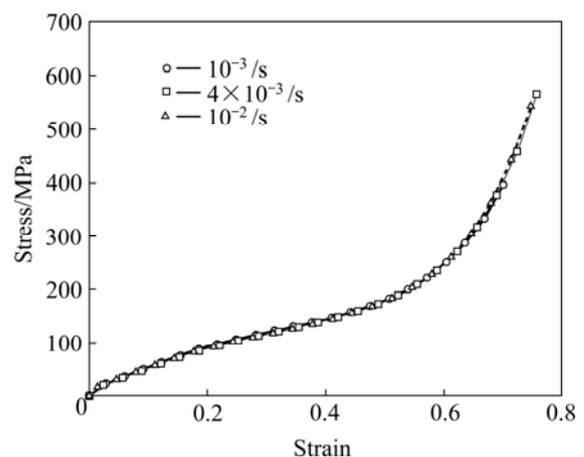


图 7 藕状多孔铜的不同应变速率的应力—应变曲线

**Fig.7** Compressive stress—strain curves with different strain rates of lotus-type porous copper

### 2.4 藕状多孔铜压缩变形本构关系

图 8 所示为不同应变的压缩变形表观应力和孔隙率的关系曲线。从图 8 中可以看出, 在不同的应变量下, 压缩应力和孔隙率之间均满足指数关系式, 即

$$\sigma = \exp(-AP) \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为表观压缩应力;  $A$  为系数;  $P$  为孔隙率。

一般对致密材料和小孔隙率材料而言, 应力应变曲线随应变的增加会产生明显的硬化现象, 而对于多孔材料, 孔隙率越大, 硬化现象越不明显。因此, 在图 8 中, 孔隙率越大, 不同应变时的压缩应力值越趋于一致。

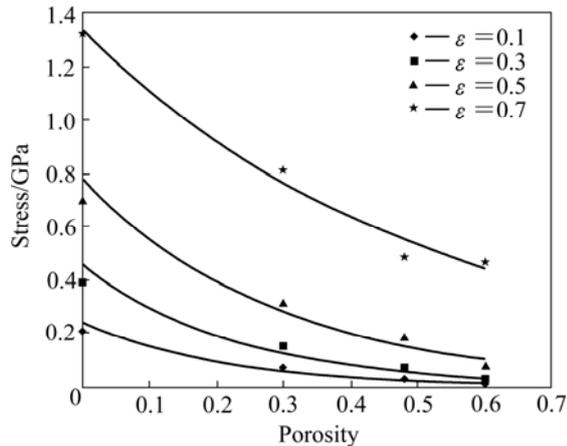


图 8 不同应变条件下的应力与孔隙率关系曲线

Fig.8 Stress—porosity curves with different strain rates

根据图 4 所示的压缩应力—应变曲线可知, 弹性阶段处于应变很小的阶段, 因此, 在建立本构关系时可以忽略不计。从图 4(a)所示多孔铜的应力应变曲线可以看出, 在塑性屈服阶段, 藕状多孔铜的本构关系符合三次曲线关系, 因此可得出当孔隙率一定时的应力—应变关系为

$$\sigma = B\varepsilon^3 + C\varepsilon^2 + D\varepsilon + E \quad (3)$$

式中  $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  为常系数;  $\sigma$  为表观压缩应力;  $\varepsilon$  为表观压缩应变。

在密实化阶段( $\varepsilon > 0.6$ ), 应力和应变符合指数关系式, 即

$$\sigma = \exp(F\varepsilon) \quad (4)$$

式中  $F$  为系数;  $\sigma$  为表观压缩应力;  $\varepsilon$  为表观压缩应变。

由于藕状多孔铜在低应变速率压缩条件下是应变速率不敏感材料, 结合式(2)~(4)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。

在塑性屈服阶段( $\varepsilon \leq 0.6$ )模型函数为

$$\sigma = \exp(-AP)(B\varepsilon^3 + C\varepsilon^2 + D\varepsilon + E) \quad (5)$$

式中  $\sigma$  为表观压缩应力;  $\varepsilon$  为表观压缩应变;  $P$  为孔

隙率。

在密实化阶段( $\varepsilon > 0.6$ )模型函数为

$$\sigma = G \exp(-AP) \exp(F\varepsilon) \quad (6)$$

式中  $\sigma$  为表观压缩应力;  $\varepsilon$  为表观压缩应变;  $P$  为孔隙率;  $A$ 、 $F$ 、 $G$  为常数。

将式(5)和式(6)进行线性处理, 并将实验数据导入 Mathematica 软件, 进行多元线性求解, 得到式(5)和式(6)中各系数值, 再将其分别代入式(5)和式(6)中, 得到藕状多孔铜在静态压缩时的本构方程为

$$\sigma = \begin{cases} \exp(-2.98P)(5830\varepsilon^3 - 5319\varepsilon^2 + 2604\varepsilon + 10) & (\varepsilon \leq 0.6) \\ 54 \exp(-2.98P) \exp(4.77\varepsilon) & (\varepsilon > 0.6) \end{cases} \quad (7)$$

应用式(7), 对不同孔隙率的试样在不同应变下的理论应力值进行了计算, 绘制了理论应力—应变曲线, 并与实测压缩曲线进行了对比, 如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 本构方程(7)的计算结果和实验值吻合良好。

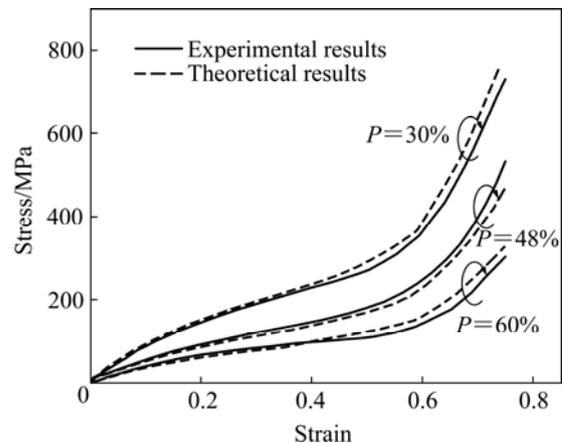


图 9 不同孔隙率藕状多孔铜理论应力—应变关系曲线与实测曲线的比较

Fig.9 Comparison of experimental and theoretical compressive stress—strain curves with different porosities

### 3 结论

1) 藕状多孔铜的压缩变形过程可分为弹性变形、以孔壁塑性屈曲为主的塑性变形和密实化 3 个阶段, 其中孔壁塑性屈曲时的主要变形机理是孔壁先后发生周期性波形弯曲、塌陷和折叠变形。

2) 藕状多孔纯铜准静态压缩变形本构关系可以建立为

$$\sigma =$$

$$\begin{cases} \exp(-2.98P)(5830\varepsilon^3 - 5319\varepsilon^2 + 2604\varepsilon + 10) & (\varepsilon \leq 0.6) \\ 54 \exp(-2.98P) \exp(4.77\varepsilon) & (\varepsilon > 0.6) \end{cases}$$

3) 在小应变速度  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  /s 的范围内, 藕状多孔纯铜沿平行气孔方向压缩时应力应变曲线受应变速率的影响很小。

## REFERENCES

- [1] 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 cellular materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [2] 杨亚政, 杨嘉陵. 轻质多孔材料研究进展[J]. 力学季刊, 2007, 28(4): 503-516.  
YANG Ya-zheng, YANG Jia-ling. Progress in research work of light materials[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2007, 28(4): 503-516.
- [3] 杨雪娟, 刘颖. 多孔金属材料的制备及应用[J]. 材料导报, 2007, 21(4): 380-383.  
YANG Xue-juan, LIU Ying. Preparation and applications of porous metal material[J]. Materials Review, 2007, 21(4): 380-383.
- [4] SHAPOVALOV V I. Method for manufacturing porous articles. US181549[P]. 1993-01-26.
- [5] 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 gas-arter porous metals-state of the art[J]. Materials Review, 2003, 17(4): 1-4.
- [6] 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.
- [7] HYUN S K, IKEDA T, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type porous iron and its mechanical properties[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2004, 5: 201-205.
- [8] 王曦, 虞吉林. 泡沫铝的单向力学行为[J]. 实验力学, 2001, 16(4): 438-443.  
WANG Xi, YU Ji-lin. Uniaxial mechanical behavior of aluminum foam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4): 438-443.
- [9] 王飞, 李剑荣. 蜂窝铝结构单向压缩、失稳和破坏机制研究[J]. 力学学报, 2001, 33(6): 741-748.  
WANG Fei, LI Jian-rong. A study of instability and collapse of aluminum honeycombs under uniaxial compression[J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, 33(6): 741-748.
- [10] HYUN S K, NAKAJIMA H. Bending properties of porous copper fabricated by unidirectional solidification[J]. Materials Letters, 2004, 58(6): 1082-1086.
- [11] GIBSON L J, ASHBY M F. Failure surfaces for cellular materials under multi-axial loads—I. Modeling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1989, 31: 635-663.
- [12] GREDIAC M. A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores[J]. International Journal of Solids and Structures, 1993, 30: 1777-1788.
- [13] HYUN S K, NAKAJIMA H. Anisotropic compressive properties of porous copper produced by unidirectional solidification[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 340: 258-264.
- [14] 谢建新, 刘新华, 刘雪峰, 方玉诚, 王浩. 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, FANG Yu-cheng, WANG Hao. Fabrication and characterization of lotus-type porous pure copper bar[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(11): 1869-1873.
- [15] 刘培生. 多孔固体结构与性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
LIU Pei-sheng. Cellular solids: structure and properties[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [16] TANNER B, MCDOWELL L. Deformation, temperature and strain rate sequence experiments on OFHC Cu[J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15: 375-399.

(编辑 龙怀中)