文章编号: 1004-0609(2011)03-0604-07

规则多孔铜压缩性能的各向异性

黄峰,杨天武,李再久,黎振华,金青林,周荣

(昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093)

摘 要:在氢气或氢气和氩气的混合高压气氛中,采用定向凝固技术制备规则多孔铜材料;在室温下测试不同气 孔率规则多孔铜在不同方向的压缩性能;研究气孔率和压缩方向对规则多孔铜力学性能的影响规律。结果表明: 当气孔率和压缩方向不同时,规则多孔铜的压缩应力一应变曲线表现出不同的特征;当压缩方向相同时,规则多 孔铜的压缩屈服强度随气孔率的增加而降低;规则多孔铜的力学性能呈现明显的各向异性,其屈服强度和能量吸 收能力随着压缩方向与气孔方向夹角的增大而减小;当压缩方向与气孔方向的夹角为0°时,其屈服强度和能量吸 收能力最大。

关键词:规则多孔铜;定向凝固;屈服强度;压缩变形 中图分类号:TG146;TG115 文献标志码:A

Anisotropic compressive properties of ordered porous copper

HUANG Feng, YANG Tian-wu, LI Zai-jiu, LI Zhen-hua, JIN Qing-lin, ZHOU Rong

(School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Porous copper with long cylindrical pores aligned in one direction was fabricated by directional solidification under high-pressure atmosphere of hydrogen or gas mixture of hydrogen and argon. Compressive tests of the ordered porous copper with different porosities in different directions were carried out. The relationship between strength and porosity or compressive direction was investigated. The results show that the compressive stress–strain curves vary with porosity and compressive direction. Under the same compressive direction, as the porosity increases, the compressive yield strength of the ordered porous copper decreases. The mechanical properties of the ordered porous copper show obvious anisotropy, and the yield strength and energy absorption capacity of the ordered porous copper decrease with the increase of the angle between pore axis and compressive direction. The yield strength and energy absorption capacity of porous copper are the largest when the angle between pore axis and compressive direction is equal to 0°.

Key words: ordered porous copper; unidirectional solidification; yield strength; compressive deformation

多孔金属材料由于其密度低、刚度大、比表面大、 减震性能好及消声效果好等优异性能,正逐渐成为一 种常用的工程材料,在一些高技术领域获得了广泛的 应用^[1-3]。

传统方法制备的多孔材料,如烧结型和发泡型, 由于孔洞形状不规则、分布无规律性及孔洞内表面不 光滑,容易引起应力集中效应,从而降低基体的力学 性能,如较低的抗拉强度和延展性^[4-5]。1993年, SHAPOVALOV^[6]提出了一种利用金属--气体共晶定向 凝固制备规则多孔金属的新方法。该方法制备的多孔 材料其气孔呈圆柱形且排列方向一致,通常称为规则 多孔材料。规则多孔材料与传统多孔材料相比,具有 优异的性能,如较小的应力集中、较优的力学性能和 较强的导热能力等^[7-9]。

基金项目:国家自然科学基金云南联合基金资助项目(u0837603) 收稿日期:2010-01-19;修订日期:2010-11-20 通信作者:周荣,教授:电话:0871-5176355; E-mail:huangfeng2005@sohu.com

作为一种性能优异的工程材料,规则多孔金属材料的力学性能受到研究者们的广泛关注,并取得了许多成就。SIMONE 和 GIBSON^[10]研究了规则多孔金属的单向压缩性能,发现其压缩性能与气孔率密切相关。随后,HYUN 和 NAKAJIMA^[11]及 TANE 和 IKEDA^[12]的研究进一步表明:多孔金属的压缩性能不但依赖于气孔率,还与气孔方向密切相关。最近,刘新华等^[13-14]对规则多孔铜的压缩性能进行了研究,并建立了沿垂直于气孔和平行于气孔方向的压缩变形本构关系。但是,已有压缩特性的研究多局限于平行或垂直于气孔的方向,并不能完整地描述规则多孔材料的各向异性。因此,本文作者通过不同方向的单向压缩实验,进一步研究规则多孔金属材料不同气孔方向的压缩特性,找出压缩方向对规则多孔金属材料压缩性能的影响规律,为其实际应用提供依据。

1 实验

1.1 规则多孔铜的制备

规则多孔铜在自行研制的真空感应熔炼高压定向 凝固装置中制备,如图1所示。在高压氢气或氢气和 氩气的混合气体下,通过电磁感应加热,在坩埚中熔 炼高纯度铜(99.99%)。在熔炼温度为1143℃,保温 30 min,使氢气充分溶入熔体中。之后,提起控制杆使 坩埚旋转 90°,熔体顺着漏斗流入带有水循环冷却装 置且侧面保温的铸型中进行自下而上的定向凝固。由 于氢气在铜的固相与液相中存在溶解度差异,在定向 凝固过程中,溶解在铜溶液中的氢气在固-液相线逸 出,形成平行于凝固方向的圆柱状气孔。通过控制氢 气和氩气的气压及凝固速度,得到不同气孔率(p)的铸 锭。

图 2 所示为试样的纵截面和横截面照片。所获圆 柱形铸锭的直径为 60 mm,最大高度随所用炉料的质 量 及 气 孔 率 而 变 化 。 材 料 整 体 的 气 孔 率 根 据 Archimedes 原理用排水法测得。

1.2 压缩实验

按 GB/T7314—2005 设计圆柱体的压缩试样,试 样直径为 10 mm、高为 18 mm,其照片如图 3 所示。 用电火花线切割机从铸锭中切取气孔方向与压缩方向 呈 0°、30°、45°、60°和 90°角的试样(分别简称为 0°、 30°、45°、60°和 90°方向),用来研究规则多孔材料在 不同气孔方向的力学性能。



图1 规则多孔铜的定向凝固装置示意图

Fig.1 Schematic illustration of solidification apparatus for ordered porous copper: (a) Melting; (b) Solidification



图 2 规则多孔铜的横截面和纵截面照片(气孔率为 0.48) Fig.2 Photographs of ordered porous copper with porosity of 0.48: (a) Transverse section; (b) Longitudinal section



图 3 气孔方向与压缩方向呈不同角度规则多孔铜的压缩试样照片(气孔率为 0.48)

Fig.3 Photographs of order porous copper with porosity of 0.48 for compressive test at different angles between pore axis and compressive direction: (a), (a') 0° ; (b), (b') 30° ; (c), (c') 45° ; (d), (d') 60° ; (e), (e') 90°

室温下, 压缩实验在量程为 100 kN 的 CSS-44100 电子万能试验机上进行,压缩速率为1 mm/min。利用计算机记录载荷和压头位移值,通过载荷和位移 值得到应力一应变曲线。在应力一应变曲线上以 0.2% 残留应变时的应力作为屈服强度。

2 结果与讨论

2.1 多孔铜的压缩特征

不同气孔率规则多孔铜的应力—应变曲线如图 4 所示。由图 4 可知:应力—应变曲线的斜率随着气孔 率的增加而减小,即应变相同时气孔率大的试样的应 力小。这表明,随着气孔率的增加,试样越容易被压 缩。

在不同压缩方向上规则多孔铜的应力一应变曲线 如图 5 所示。当试样气孔率相同时,其应力一应变曲 线的斜率与压缩方向相关,表现出明显的各向异性。 在低应变阶段,曲线的斜率随着压缩方向与气孔方向 夹角的增大而减小,即 0°方向斜率最大, 30°、45°、 60°和 90°方向的斜率依次减小。然而,在高应变阶段, 曲线斜率的变化正好相反, 90°方向斜率增至最大, 60°、45°、30°和 0°方向的斜率依次减小。

规则多孔铜材料的应力一应变曲线因压缩方向不 同而显示出不同的特征,这可能由以下两方面的原因 造成。



图 4 不同气孔率规则多孔铜在 90°方向的应力—应变曲线 Fig.4 Compressive stress—strain curves of ordered porous copper with different porosities in 90° compressive direction

首先,变形方式不同。规则多孔铜压缩变形方式 取决于压缩方向与气孔方向。以气孔率为0.48的规则 多孔铜材料为例,其压缩试样不同变形量(应变分别为 0.1、0.3、0.5和0.8)的纵截面如图6所示。由图6可 以看出:0°方向试样单向压缩时向两侧产生膨胀而呈 对称的鼓形,变形以孔壁塑性屈曲为主。孔壁受到压 缩载荷作用先产生轴向压缩镦粗变形,然后产生塑性 弯曲,继而塌陷和折叠变形而逐渐密实化。孔壁的弯 曲和折叠变形是主要的变形形式。90°方向试样单向压 缩时没有产生膨胀而呈鼓形,变形以气孔的塑性屈曲 为主。低应变时,发生气孔塑性压扁和塌陷而改变气



图 5 在不同压缩方向上规则多孔铜的应力一应变曲线(气 孔率为 0.34)



孔结构为主的塑性变形。当压缩进一步进行时,气孔 发生严重的塑性塌陷,继而逐渐密实化。30°、45°和 60°方向因载荷和结构的不对称产生与压缩方向呈一 定角度倾斜变形;30°方向变形类似0°方向变形,两 侧产生少量膨胀但不是很明显,孔壁发生弯曲和折叠 变形;60°方向变形类似90°方向,以气孔塑性屈曲为 主。当应变为0.5时,45°、60°和90°方向试样基本压 实,而0°和30°方向还有一定量的气孔。显然,规则 多孔铜的压缩变形主要以气孔孔壁塑性变形为主,应 力一应变曲线的形状变化与气孔结构的变形特征有 关。

另外,不同压缩方向上气孔周围的应力集中程度 不同。应力集中对多孔材料的力学性能有很大的影响, 其强度随着应力集中的增加而减小^[11]。一般用应力集



图 6 多孔规则铜试样在不同压缩方向及不同应变下的纵截面图(气孔率为 0.48)

Fig.6 Photographs of vertical cross-sections of ordered porous copper with porosity of 0.48 in different compression directions after compression test at different strains

中系数表示应力集中程度,其表达式为

$$K = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{n}}} \tag{1}$$

式中: *K* 为应力集中系数; *σ*_n 为名义应力; *σ*_{max} 为最 大局部应力。根据文献[15]中应力集中系数表计算得 出: 当气孔率和孔径相同时,0°方向的应力集中系数 最小; 30°、45°、60°和 90°方向的应力集中系数依次 增大。应力集中系数越大,*σ*_{max} 越大,即气孔周围的 最大应力越大,当*σ*_{max}达到屈服应力时,气孔发生变 形。因此,压缩方向与气孔方向夹角越大的试样越易 发生变形,即低应变时应力—应变曲线斜率越小。

由此,应力一应变曲线因压缩方向不同而显示不 同特性,这可能由变形方式和应力集中效应不同引起。

2.2 多孔铜的压缩屈服强度

试样在不同压缩方向上的屈服强度与气孔率的关 系如图 7 所示。由图 7 可知,各个压缩方向上试样的 屈服强度都随气孔率的增加而减少。



图 7 不同压缩方向上规则多孔铜屈服强度与气孔率的关系

Fig.7 Relationship between compressive yield strength and porosity of ordered porous copper in different compressive directions

当气孔率相同时,规则多孔铜的屈服强度随压缩 方向与气孔方向夹角的增大而减小,即 0°方向的屈服 强度最大,30°、45°、60°和 90°方向的屈服强度依次 减小。这主要由以下 3 方面的原因引起。

1) 气孔方向与压缩方向的变化导致有效承载面积变化。一般来说,有效承载面积越大,能承载的载荷越大。0°、30°、45°、60°和 90°方向试样的承载面积如图 8 所示。图 8 中: *R* 为气孔半径,白色区域为有效承载面。当气孔率相同时,0°方向的有效承载面积最大,30°、45°、60°和 90°方向的有效承载面积依



图 8 0°、30°、45°、60°和 90°方向试样承载面积示意图 Fig.8 Schematic diagrams of load-bearing areas in different directions: (a) 0°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 90°

次减小,所以,屈服强度随压缩方向与气孔方向夹角 的增大而减小。

2) 材料由定向凝固而成的柱状晶组成,其晶粒具 有一定的择优取向,不同压缩方向上的晶向不同。对 于面心立方(FCC)材料,其弹性和屈服行为与晶向有 很大关系^[10]。沿原子密度最大的晶向的屈服强度,显 示出明显的优越性^[16]。图 9 所示为规则多孔铜的 XRD 谱。从图 9 可知,与致密纯铜的 XRD 谱相比,规则 多孔铜的择优取向晶面为(220),即规则多孔铜晶粒的 生长方向为(110)晶向,因此,气孔的轴向也与晶粒生 长方向(110)晶向相同。铜是面心立方(FCC)晶体结构, 其原子密排方向是(110)晶向,所以,沿着该晶向的力 学性能具有明显的优势。当压缩方向不同时,压缩载 荷与柱状晶的生长方向不同,屈服强度表现出差异。 0°方向试样压缩方向与晶粒生长方向平行,即为原子 密排方向,所以,其屈服强度最大。

3) 不同压缩方向上气孔周围引起应力集中程度 不同,其对材料的力学性能有较大的影响^[10-11]。材料 的强度随应力集中的增加而减小^[11]。当气孔率和孔径 相同时,应力集中系数随压缩方向与气孔方向夹角的 增大而减小,所以,0°方向的屈服强度最大,30°、45°、 60°和90°方向的力学性能依次变差。

综上所述,规则多孔铜屈服强度的各向异性可能

608

是由试样的气孔结构、晶粒取向和应力集中效应不同 引起。综合考虑以上3个因素可以定性地分析出0°方 向试样的屈服强度最大,30°、45°和60°方向的屈服强 度依次降低,90°方向的屈服强度最差。



图9 规则多孔铜 XRD 谱

Fig.9 XRD pattern of ordered porous copper

2.3 多孔铜的能量吸收能力

规则多孔铜的压缩应力一应变曲线如图 10 所示。 由图 10 可知,曲线分为 3 个阶段:第1 阶段为弹性变 形阶段,主要以线弹性方式发生变形;第2 阶段为屈 服阶段,此阶段孔壁产生屈曲的同时气孔被压塌,出 现一个应力平台;第3 阶段为密实阶段,这时气孔完 全坍塌,曲线的斜率增大即应力急剧增加。





Fig.10 Compressive stress—strain curve of ordered porous metal

由应力一应变曲线可知,其存在一个长的应力平 台,多孔金属材料的抗压性能和能量吸收能力与这一 区域密切相关^[17]。多孔材料气孔压塌在几乎恒定的应 力下进行,当达到密实阶段时,应力急剧增加,表明 材料结构完全发生变化。因此,可以用密实化开始点 的应变ε_D (见图 10)来表征多孔材料结构是否被完全破 坏。压缩多孔铜材料时所做的功由孔壁的弹性屈曲和 塑性屈曲来吸收。当达到密实化开始点应变 ε_D 时,单 位体积吸收的能量可以通过应力一应变曲线所围成的 面积计算^[18]:

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) \mathrm{d}\varepsilon \tag{2}$$

式中: W为单位体积吸收的能量; σ_ε为应变。

规则多孔铜沿不同方向压缩到密实化开始点时单位体积吸收的能量和气孔率的关系如图 11 所示。由图 11 可知,其吸收的能量随着气孔率的增加而减少。这表明,随着气孔率的增加,规则多孔铜的能量吸收能力降低。当试样的气孔率相同时,其单位体积吸收的能量随压缩方向与气孔方向夹角的增大逐渐减少,这主要是因为随着夹角的增大,规则多孔材料的强度降低、延展性变差。0°方向的能量吸收能力最大,30°、45°、60°和 90°方向的能量吸收能力依次降低。



图 11 不同气孔率规则多孔铜在不同压缩方向单位体积吸收的能量

Fig.11 Absorbed energy per volume of ordered porous copper with different porosities in different compressive directions

3 结论

 多孔铜的压缩变形行为取决于材料的气孔率 和压缩方向。应力一应变曲线表现出明显的各向异性, 其原因主要由压缩变形方式和应力集中效应不同引 起。

2) 由于各个方向上有效承载面积、晶粒取向和应 力集中效应的不同,规则多孔铜材料各方向上的屈服 强度不同。0°方向的屈服强度最大,30°、45°、60°和 90°方向的屈服强度依次降低,且均随气孔率的增加而 降低。

3) 规则多孔铜材料能量吸收能力与气孔方向有关, 0°方向的能量吸收能力最大, 30°、45°和 60°方向的能量吸收能力逐渐降低, 90°方向的能力能量吸收能力最差。

REFERENCES

[1] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 4-9.

LIU Pei-sheng. Introduction to cellular materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 4–9.

 [2] 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.

YAGN Xue-juan, LIU Ying. Preparation and applications of porous metal material[J]. Materials Review, 2007, 21(4): 380–383.

 [3] 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.

- [4] 张华伟,李言祥,刘源. Gasar 工艺中金属-氢二元相图的研究[J]. 金属学报, 2005, 41(1): 55-59.
 ZHANG Hua-wei, LI Yan-xiang, LIU Yuan. Study of metal-hydrogen binary phase diagram in Gasar process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(1): 55-59.
- [5] LIU Y, LI Y X, WAN J. Metal-gas eutectic growth during unidirectional solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37 (9): 2871–2877.
- [6] SHAPOVALOV V I. Method of manufacture of porous articles. USA patent: 181549 [P]. 1993–01–26
- [7] 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.
- [8] NAKAHATA T, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type silver with directional pores by unidirectional solidification in oxygen

atmosphere[J]. Materials Transactions, 2005, 46(3): 587-592.

- [9] NAKAJIMA H. Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores[J]. Progress in Materials Science, 2007, 52(1): 1091–1173.
- [10] SIMONE A E, GIBSON L J. The compressive behavior of porous copper made by the GASAR process[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32: 451–457.
- [11] HYUN S K, NAKAJIMA H. Anisotropic compressive properties of porous copper produced by unidirectional solidification[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 340: 258–264.
- [12] TANE M, IKEDA T. Compressive properties of lotus-type porous stainless steel[J]. Journal of Materials Research, 2006, 21(1): 185–193.
- [13] 刘新华,姚 迪,刘雪峰,谢建新. 藕状多孔纯铜沿垂直气孔 方向的压缩变形行为与本构关系[J]. 中国有色金属学报, 2009,19(7):1237-1244.

LIU Xin-hua, YAO Di, LIU Xue-feng, XIE Jian-xin. Deformation behaviors and constructive relation of lotus-type porous pure copper under compressive direction perpendicular to pores[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(7): 1237–1244.

 [14] 姚 迪, 刘新华, 刘雪峰, 谢建新. 藕状多孔纯铜轴向压缩变 形行为与本构关系[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(11): 1996-2001.

YAO Di, LIU Xin-hua, LIU Xue-feng, XIE Jian-xin. Axial compressive deformation behaviors and constructive relation of lotus-type porous copper[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(11): 1996–2001.

- [15] MASATAKA N. 应力集中[M]. 李安定译. 北京: 机械工业出版社, 1976: 269-280.
 MASATAKA N. Stress concentration[M]. LI An-ding tranl. Beijing: China Machine Press, 1976: 269-280.
- [16] 崔忠圻. 金属学及热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000:18.

CUI Zhong-qi. Metallography and heat treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 18.

[17] 刘培生. 多孔固体结构与性能[M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 275-285.

LIU Pei-sheng. Cellular solids: Structure and properties[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 275–285.

[18] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids[M]. London: Cambridge University Press, 1997: 16–21.

(编辑 陈卫萍)