

金属/氢共晶定向凝固制备 GASAR 多孔 Cu-Cr 合金

宋群玲^{1,2}, 金青林¹, 李再久¹, 杨天武¹, 周 荣¹

(1. 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093;

2. 昆明冶金高等专科学校 冶金材料学院, 昆明 650093)

摘 要: 在 0.6 MPa 的纯氢气氛中, 采用金属/氢共晶定向凝固技术, 制备得到不同 Cr 含量的 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金试样($x=0, 0.3\%, 0.5\%, 0.8\%, 1.0\%, 1.3\%$ (质量分数, %)), 并研究了 Cr 含量对多孔 Cu-xCr 合金气孔率和气孔平均直径的影响规律。结果表明: 随 Cr 含量的逐渐增大, 氢在合金熔体中的溶解度相应增加, 导致多孔 Cu-xCr 合金试样的气孔率缓慢增高; 此外, 随 Cr 含量的增加, 受糊状区宽度变化的影响, 气孔的平均直径呈先增大后减小的趋势。

关键词: Cu-Cr 合金; 多孔金属; 金属/氢共晶定向凝固; 气孔率; 糊状区

中图分类号: TG146; TG291

文献标志码: A

Fabrication of GASAR porous Cu-Cr alloy with metal/hydrogen eutectics directional solidification

SONG Qun-ling^{1,2}, JIN Qing-lin¹, LI Zai-jiu¹, YANG Tian-wu¹, ZHOU Rong¹

(1. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Faculty of Metallurgy and Materials, Kunming College of Metallurgy, Kunming 650093, China)

Abstract: GASAR porous Cu-xCr ($x=0, 0.3\%, 0.5\%, 0.8\%, 1.0\%, 1.3\%$ (mass fraction)) alloys were fabricated by the metal/hydrogen unidirectional solidification method under a hydrogen gas pressure of 0.6 MPa. The effect of the chromium content on the pore structure was investigated. The results show that the difference of hydrogen solubility between liquid and solid contributes to the increase of porosity with increasing Cr content. With increasing Cr content, the average pore diameter tends to firstly increase, and then decrease.

Key words: Cu-Cr alloy; porous metal; metal/hydrogen eutectics directional solidification; porosity; mushy zone

金属/氢共晶定向凝固, 是近年来发展起来的制备多孔金属的新工艺^[1-6]。其原理是在真空中熔化金属, 然后加入高压 H₂(或 H₂ 和 Ar 的混和气), 当 H₂ 溶解达到饱和后, 把金属熔体浇到铸型中进行定向凝固。凝固过程中 H₂ 析出形成气泡并与金属基体协同定向生长, 沿凝固方向形成规则排列的圆柱状气孔的多孔结构。GASAR 多孔金属不仅具有传统多孔金属的轻质、高比强度和比刚度、吸音吸能等特点, 而且还有很多

特殊的性能, 比如各向异性, 很小的应力集中效应、独特的热学和电学特性等^[7-12]。

由于纯金属凝固时的固液界面基本保持为平界面, 从而更易获得气孔分布均匀、内壁光滑的规则多孔结构, 导致目前 GASAR 多孔金属的绝大多数研究都基于纯金属基体, 相应的凝固理论也都是建立在纯金属体系之上^[13-14]。然而纯金属一般力学性能较差, 这极大地限制了 GASAR 多孔金属的应用与推广, 因

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51164018); 国家自然科学基金委员会-云南省人民政府联合基金重点项目资助(u0837603)

收稿日期: 2014-03-06; **修订日期:** 2014-08-14

通信作者: 金青林, 教授, 博士, 电话: 0871-65136755; E-mail: songqunling@126.com

此,合金化作为提高多孔金属力学性能的最有效方式受到了 GASAR 研究者越来越多的关注^[15-16]。

前期大量研究^[17-23]发现,采用 GASAR 工艺可以比较容易获得气孔结构规则且分布均匀的多孔纯金属,却很难获得类似结构的多孔合金。产生这种现象的原因主要有以下两点:1) 相较于纯金属,合金的热导率一般较低,较低的热导率将导致凝固速率降低,从而使固/液界面很难捕获足够多的气泡以形成 GASAR 多孔结构^[17-18];2) 区别于纯金属的平界面凝固,合金凝固时,界面前沿将形成一个固液两相区—糊状区,当糊状区宽度达到一定范围时,糊状区内游离的固相将对气孔的定向生长产生阻碍,从而影响到气孔的规则性及均匀性^[19]。为解决合金低热导率的问题,IKEDA 等^[20]将连续区域熔炼技术及连续铸造技术引入 GASAR 多孔合金的制备,以上两种方法均可实现对凝固速率的精确控制,从而降低热导率对气孔结构的影响。然而,这种工艺上的改进并不能降低糊状区凝固对多孔合金气孔结构的影响,这点可从用连续区域熔炼技术制得的多孔不锈钢^[20]、碳钢^[21]试样以及用连铸法制得的多孔 Al-Si^[22]、Al-Cu^[23]合金试样的气孔形貌上看出。为弱化糊状区对气孔结构的影响,JIANG 等^[16]根据二元合金平衡相图,选取固/液温度区间几乎为零的单相 Cu-34.6%Mn(质量分数)合金为研究对象,制备气孔结构较为规则的多孔 Cu-Mn 合金,并研究不同凝固模式下的气孔结构变化规律,该研究很好拓展了金属-氢共晶定向凝固理论。然而,其均并未进一步研究合金元素含量对多孔合金气孔结构的影响规律及内在机制。此外,对共晶系而言,当从初生相(单相)、亚共晶(双相)过度到共晶(单相)时,合金

元素含量的增加对基体与气孔协同定向生长影响规律的研究也尚未见报道。基于以上几点,鉴于铜合金优异的热导性能及广泛的应用背景,本文作者以 Cu-xCr 合金为研究对象,采用模铸法制备 GASAR 多孔 Cu-Cr 合金,并研究 Cr 含量对多孔 Cu-xCr 合金气孔率、平均气孔直径的影响规律及内在机制。

1 实验

采用模铸法(见图 1)制备 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金。将纯度为 99.99% 的电解铜和纯度为 5.7% 的 Cu-Cr 中间合金,按照不同的质量分数配好放入石墨坩埚,将炉内真空度抽至 1 Pa 左右后,打开循环水冷却系统并开始利用感应加热使金属熔化。然后充入 0.6 MPa 的氢气(99.9%),保温 10 min 后浇入预热温度为 1456 K 的石墨铸型中,得到 GASAR 多孔 Cu-xCr($x=0, 0.3\%, 0.5\%, 0.8\%, 1.0\%, 1.3\%$ (质量分数))合金铸锭。通过改变 Cr 含量来获得不同气孔率和孔径的凝固试样,凝固试样为圆柱形,直径为 95 mm,高度受炉料和孔隙率的影响在 120~160 mm 之间。试验获得多孔 Cu-0.3%Cr、Cu-0.5%Cr 合金试样为单相合金,多孔 Cu-0.8%Cr、Cu-1.0%Cr 合金试样为亚共晶成分,多孔 Cu-1.3%Cr 合金试样为共晶成分。

试样的整体平均气孔率 ε (试样中气孔所占的体积分数)是根据 Archimedes 原理用排水法测得。用线切割方法沿试样中心轴将试样纵向切开,观察气孔的纵向生长情况。然后从 75 mm 高度处垂直于纵向中心轴将试样横向切开,观察横截面上的气孔结构。将切开的试样截面用乙醇进行清洗、砂纸打磨后,用 MF

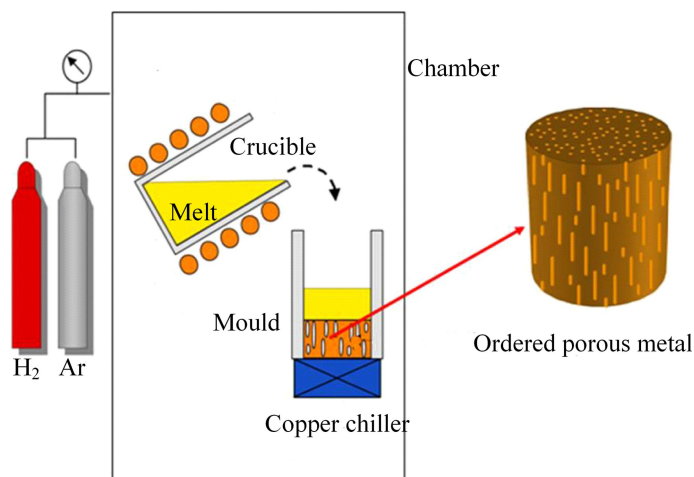


图 1 模铸法定向凝固制备 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金原理图

Fig. 1 Schematic illustration of mold casting technique for fabrication of GASAR porous Cu-xCr alloy

3010 型扫描仪采集气孔形貌图像, 用以分析气孔的生长、大小及分布特征, 试样横截面气孔平均直径、孔长以及气孔长径比等气孔结构参数通过 Image J 图像分析软件定量计算获得。

2 实验结果

图 2 所示为 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金的横剖面和纵剖面的气孔形貌。实验得到的试样气孔定向生长较好, 气孔规则、均匀。气孔形貌参数为: 气孔直径为 0.1~3 mm, 孔长 0.1~60 mm, 长径比为 1~600, 平均气孔率为 34%~45%。与 GASAR 多孔 Cu 相比, 气孔平均直径增加, 气孔变短, 当 Cu-xCr 合金名义成分从单相($x=0, 0.3\%, 0.5\%$)、亚共晶成分($x=0.8\%, 1.0\%$)到共晶成分($x=1.3\%$)演变时, 气孔形貌、气孔率和气孔平均直径均发生较大的变化, 平均气孔率逐渐增加, 气孔平均直径先增加后降低。

3 分析与讨论

3.1 Cr 含量对 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金平均气孔率的影响

在 GASAR 凝固中, 综合考虑扩散系数和凝固速率, 由于 GASAR 工艺凝固过程基本属于铸件无限长、固相无扩散、液相有限扩散的凝固, 因此, GASAR 多孔 Cu-xCr 合金沿凝固方向溶质扩散距离很短。GASAR 工艺属于快速凝固, 本研究中设定凝固速率高达 $v=2.5\text{ mm/s}$, 使得氢不会长距离纵向扩散从试样顶部逸出。如果没有发生气体逸出, 根据理想气体定律和质量守恒, 可以用下列公式计算^[24]最终获得试样的理论气孔率:

$$\varepsilon = \frac{(c_l - c_s)RT}{p_{at} + p_h + p_c + (c_l - c_s)RT}$$

(1)

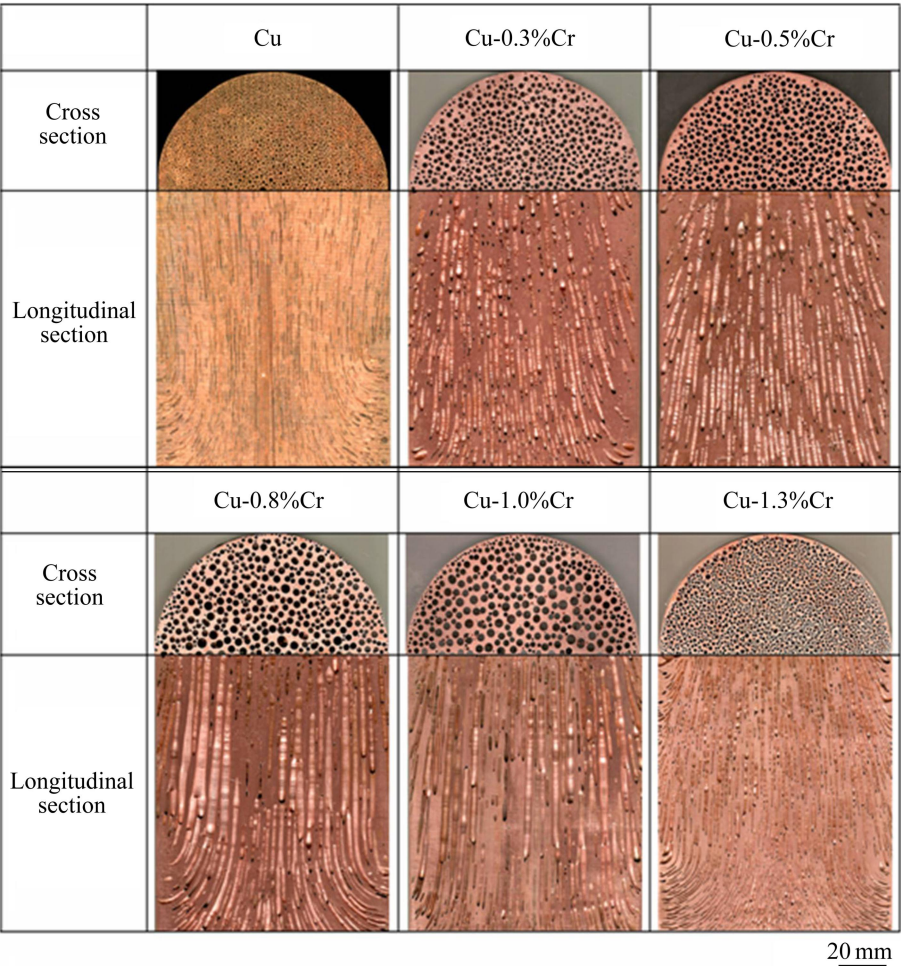


图 2 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金的气孔形貌

Fig. 2 Gas pore morphologies of GASAR porous Cu-xCr alloys fabricated under hydrogen gas pressure of 0.6 MPa

式中: c_l 和 c_s 分别是氢在金属液相和固相中的平均溶解量, 单位为 mol/m^3 ; p_{at} 为装置内气体的总压力, Pa; p_h 为金属液的静压力, Pa; p_c 是因表面张力所引起的附加压力, Pa。根据气泡内外力平衡, 气泡内压力 p_p 等于装置内气体的总压力 p_{at} 、金属液的静压力 p_h 以及因表面张力所引起的附加压力 p_c 之和即 $p_p = p_{\text{at}} + p_h + p_c$ 。试样中气相符合理想气体定律 $p_p V_p = nRT$ (其中 V_p 为气泡体积, R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$)。当试样高度取值 140 mm 时, 计算得到金属液的静压力 $p_h = 9408 \text{ Pa}$, 气孔半径取值 1 mm , 则 $P_c = 2\sigma/r_g = 4720 \text{ Pa}$ [24]。

GASAR 多孔合金试样的理论气孔率的求解关键在于氢在合金液相和固相中的平均溶解量的计算, 即孔隙率主要由合金固液两相中氢气的溶解度差来决定, Cu-xCr 合金固相和液相中的氢气溶解度可用 Sievert 公式计算得到:

$$x_H = \sqrt{p_{H_2} / p_0} \exp[-\Delta G_m^0 / (RT)] \quad (2)$$

对于低合金成分 Cu-xCr 合金, 氢在合金熔体中溶解过程的摩尔自由能变化 ΔG_m^0 值的近似计算公式可表示为 [18]

$$\Delta G_m^0 = \sum_i x_i \Delta G_i^0 - \Delta G_m^{\text{ex}} \quad (3)$$

式中: x_i 是合金元素 i 在合金熔体中的摩尔分数; 试样制备压力为 0.6 MPa , 铸型预热温度为 1456 K , 合金的摩尔过剩自由能 ΔG_m^{ex} 可用 Redlich-kister 公式 [25] 计算得到:

$$\Delta G_m^{\text{ex}} = x_1 x_2 \sum_{n=0}^2 (x_1 - x_2)^n L_n \quad (4)$$

对于 Cu-xCr 二元合金, n 取值 2, 二元合金相互作用系数 L_n 参数 [26] 及氢在纯金属中的溶解度值如表 1 所列。

表 1 Cu-Cr 合金相互作用系数及氢在纯金属中的溶解度值
Table 1 Interaction coefficients of Cu-Cr system and solubilities of hydrogen in some metals

Metal	Phase	Interaction coefficient	Ref.
$L_0 = 35495.91288 - 2.95799274T$			
Cu-Cr	Liquid	$L_1 = -1001.17645$ $L_2 = 5704.64789$	[26]
Cu	Liquid	$x_H = 4.8220 \times 10^{-4}$	[14]
	Solid	$x_H = 1.3212 \times 10^{-4}$	
Cr	Liquid	$x_H = 2.9698 \times 10^{-4}$	[14]

x_H : Mole fraction.

经计算, H_2 在 Cu-xCr 合金固液相中溶解度差随 Cr 含量的增加而逐渐增大如图 3 所示。由图 3 可看出, 孔隙率依赖于凝固过程中从固相中排出的 H_2 量, 即由 H_2 在合金的固液相中溶解度差来决定, 随 Cr 含量增加, H_2 在固液相中溶解度差逐渐增大, 即供气泡形核并长大的 H_2 量增加, 因此, 理论气孔率应随合金 Cr 含量的增加而增加, 将 H_2 在 Cu-xCr 合金固液相中溶解度值代入式(1)中可以计算在不同成分下的理论气孔率。图 4 所示为 Cu-xCr- H_2 体系($x=0, 0.3\%, 0.5\%, 0.8\%, 1.0\%, 1.3\%$ (质量分数, %))的 GASAR 凝固试样气孔率的实验值与理论值的比较。由图 4 可看出, 孔隙率随着 Cr 含量的增加而增大。未添加合金化元素 Cr 时, 纯铜试样孔隙率的实验结果和理论计算值吻合良好。但当合金化元素 Cr 含量不断增加时, 孔隙率理

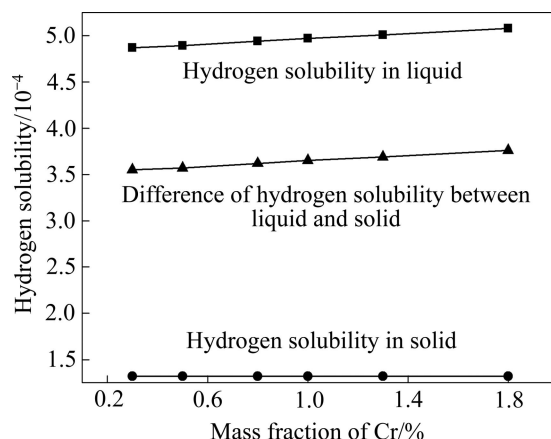


图 3 H_2 在液态和固态 Cu-xCr 合金中的溶解度差

Fig. 3 Difference of hydrogen solubility between liquid and solid of Cu-xCr alloys

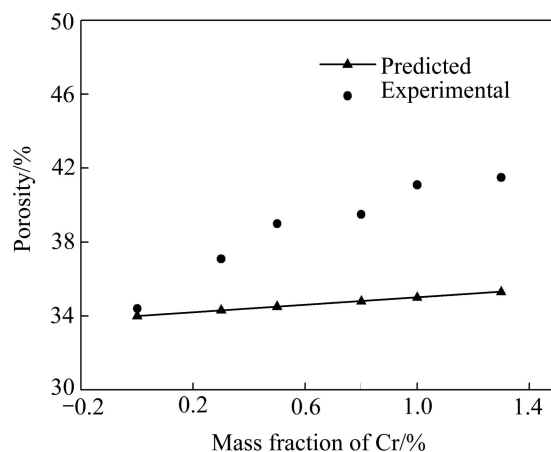


图 4 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金的气孔率的实验值与理论值的比较

Fig. 4 Comparison between predicted and experimental porosities of GASAR porous Cu-xCr

论计算值与实验结果则存在一定偏差, 且偏差随 Cr 含量增加而逐渐增大。其原因是 Cr 的加入改变了固液界面前沿凝固区间的大小, 凝固区间的扩大阻碍了 H_2 的逸出, 造成固液界面前沿 H_2 过饱和度增大, 导致气泡形核驱动力增大, 进而导致气孔率上升。其次, 当合金成分从单相 Cu-xCr 合金($x=0, 0.3\%, 0.5\%$), 过度到亚共晶 Cu-xCr 合金($x=0.8\%, 1.0\%$), 直到共晶 Cu-xCr 合金($x=1.3\%$)成分时, 合金可采取平面、胞状、柱状枝晶和等轴枝晶的凝固模式, 使得氢气的扩散路径变得复杂也是造成气孔率偏差的另一个因素。

3.2 Cr 含量对 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金气孔平均直径的影响

图 5 所示为 Cr 含量对 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金试样平均气孔直径的影响。由图 5 可看出, 试样的平均孔径随 Cr 含量增加呈先增大后减小的趋势。当 Cr 含量为 0.8% (质量分数) 时, 达到最大值; 超过 0.8% Cr (质量分数) 后, 试样气孔平均孔径开始减小; 当 Cr 含量为 1.3% (质量分数) 时, 气孔平均孔径达到最小值。

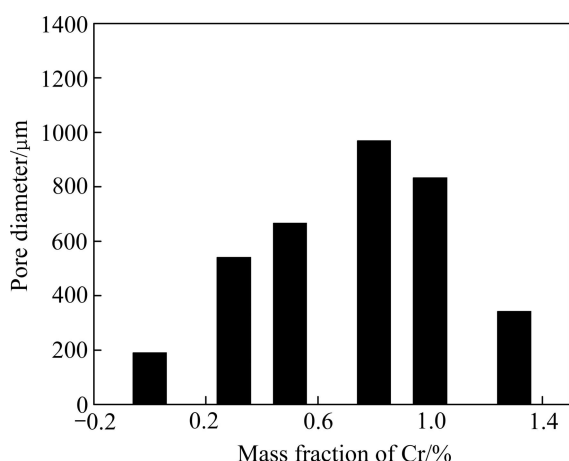


图 5 Cr 含量对 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金气孔平均直径的影响

Fig. 5 Effect of Cr contents on porosity(a) and pore diameter(b) of ordered porous Cu-Cr alloys

相对于 GASAR 多孔金属近乎平界面的凝固模式, 合金固液温度区间的存在使得 GASAR 多孔合金凝固模式变得更加复杂, 直接影响孔的析出和长大^[12]。合金固液共存的糊状区长度 l 可以简单用固液相线的温度间隔(T_l-T_s)与近似常量的液相温度梯度 G_l 算出, 即

$$l \approx \frac{T_l - T_s}{G_l} \quad (5)$$

而合金凝固界面前沿的 l 主要取决于固液相线的温度间隔(T_l-T_s), 观察图 6 可以发现, 随着 Cr 含量的增加, 固液两相区的宽度先增大后减小, 当 Cr 含量为 0.8% 时, l 达到最大值。与此相对应, GASAR 多孔 Cu-xCr 合金的气孔平均孔径也是先增大后减小(见图 2)。糊状区 l 值越大, 气泡聚合时间越长, 从而促成了气泡长大。此外, 糊状区 l 值越大, 气泡上方糊状区内固相越多, 增加了气泡纵向生长的阻力, 导致在凝固界面已经形核的气泡不能顺利长大, 或只能依附已经具有一定尺寸的气孔合并长大, 也是造成气孔的粗化又一原因。

此外, GASAR 多孔 Cu-xCr 合金凝固界面存在液相/初生 α -Cu 相和液相/共晶相两个界面, 气孔形核长大受制于两个界面析出的 H_2 量。随着凝固行为的进行, 液相/初生 α -Cu 相凝固界面析出的 H_2 通过扩散进入远离 α -Cu 相的液相。初生 α -Cu 相间隙液相随着 α -Cu 相的析出很快达到共晶成分而析出共晶相。如前所述, GASAR 凝固过程可视为铸件无限长、固相无扩散、液相有限扩散的凝固。因此, 液相/共晶相界面后析出的 H_2 则主要通过纵向扩散进入共晶相远端液相。随着糊状区 l 增大, 固液两相区固相增多, 增加了 H_2 扩散溢出的阻力, 因此, 导致扩散进入气孔的 H_2 量增加, 也是造成气孔粗化的另一原因。

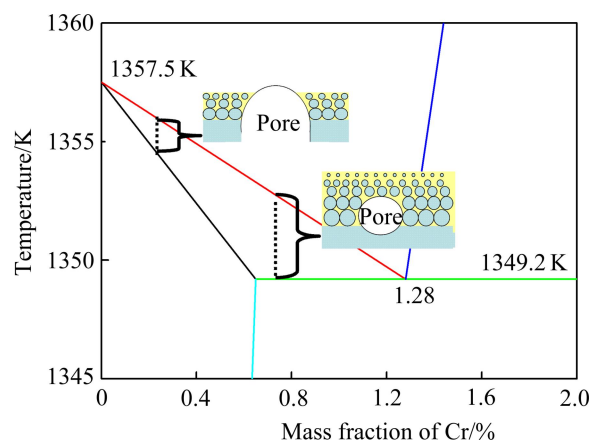


图 6 Cr 含量对糊状区宽度和 GASAR 多孔 Cu-Cr 合金气孔的影响

Fig. 6 Effects of Cr contents on width of mushy zone and pore growth of GASAR porous Cu-Cr alloys

4 结论

1) 采用金属/氢共晶定向凝固技术, 在 0.6 MPa 的纯 H_2 氛中, 制备了 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金试样

($x=0.3\%$, 0.5% , 0.8% , 1.0% , 1.3% (质量分数)), 合金成分从单相、亚共晶演变到共晶成分。

2) 建立了 Cu-xCr 合金熔氢量的热力学模型并进行了 GASAR 多孔 Cu-xCr 合金理论气孔率的计算。结果表明: GASAR 多孔 Cu-xCr 合金的溶氢量、气孔率的理论计算值与实验值均随 Cr 含量的增加而增大。随着 Cr 含量的增加, 合金凝固模式的改变和糊状区的宽度增加是多孔 Cu-xCr 合金气孔率理论计算值与实验结果偏差增大的主要原因。

3) 随 Cr 含量的增加, GASAR 多孔 Cu-xCr 合金糊状区的宽度 l 呈先增大后减小的变化趋势; 与此相对应, 气孔平均孔径值先增加后减小。糊状区内固相增多阻碍气孔长大, 延长气孔长大时间是造成气孔粗化的一个原因。另外, 糊状区内的固相阻碍了氢气的扩散溢出, 增加扩散进入气孔的氢气量, 也是造成气孔粗化的原因。

REFERENCES

- NAKAJIMA H. Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores[J]. *Progress in Materials Science*, 2007, 52(7): 1091–1173.
- BANHART J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(6): 559–632.
- SHAPOVI V I, BOYKO L. Gasar—A new class of porous materials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(6): 407–410.
- HYUN S K, NAKAJIMA H. Anisotropic compressive properties of porous copper produced by unidirectional solidification[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 340(1/2): 258–264.
- HYUN S K, NAKAJIMA H. Effect of solidification velocity on pore morphology of lotus-type porous copper fabricated by unidirectional solidification[J]. *Materials Letter*, 2003, 57(21): 3149–3154.
- YAMAMURA S, SHIOTA H, MURAKAMI K, NAKAJIMA H. Evaluation of porosity in porous copper fabricated by unidirectional solidification under pressurized hydrogen[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 318(1/2): 137–143.
- 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.
- 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.
- DRENCHEV L, SOBCZAK J, MALINOV S. Gasars: A class of metallic materials with ordered porosity[J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 22(10): 1135–1147.
- NAKAJIMA H, HYUN S K, OHASHI H, OTA K, MURAKAMI K. Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties[J]. *Colloids and Surfaces A*, 2001, 179(2/3): 209–214.
- 黄 峰, 杨天武, 李再久, 黎振华, 金青林, 周 荣. 规则多孔铜压缩性能的各向异性[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(3): 604–610.
HUANG Feng, YANG Tian-wu, LI Zai-jiu, LI Zhen-hua, JIN Qing-lin, ZHOU Rong. Anisotropy compressive properties of ordered porous copper[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(3): 604–610.
- 彭 震, 杨天武, 李再久, 黎振华, 金青林, 周 荣. 规则多孔铜的拉伸性能及其各向异性[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(5): 1405–1051.
PENG Zhen, YANG Tian-wu, LI Zai-jiu, LI Zhen-hua, JIN Qing-lin, ZHOU Rong. Tensile properties and anisotropy of ordered porous copper[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(5): 1405–1051.
- ZHANG H W, CHEN L T, LIU Y, LI Y X. Experimental study on heat transfer performance of lotus-type copper heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 56(1/2): 172–180.
- 张华伟, 李言祥, 刘 源. 氢在 Gasar 工艺中常用纯金属中的溶解度[J]. *金属学报*, 2007, 42(2): 113–118.
ZHANG Hua-wei, LI Yan-xiang, LIU Yuan. Hydrogen solubility in pure metals for gasar process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, 42(2): 113–118.
- 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.
- JIANG G R, LI Y X, LIU Y. Influence of solidification mode on pore structure of directionally solidified porous Cu-Mn alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(1): 88–95.
- TAKUYA I, MASAKAZU T, HYUN S K, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type porous Ni_3Al by unidirectional solidification[C]// NAKAJIMA H, KANETAKE N. *Porous Metals and Metal Foaming Technology*. Kyoto: The Japan Institute of Metals, 2005: 229–232.
- 刘 源, 李言祥, 张华伟, 万 疆. 藕状规则多孔结构形成的

- 压力条件和气孔尺寸的演变规律[J]. 金属学报, 2005, 41(8): 886–890.
- LIU Yuan, LI Yan-xiang, ZHANG Hua-wei, WAN Jiang. Pressure condition for formation of lotus-type regular porous structure and evolution of pore size[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 41(8): 886–890.
- [19] 李再久, 金青林, 杨天武, 蒋业华, 周 荣. Gasar 连铸工艺制备藕状多孔 Cu-Zn 合金[J]. 金属学报, 2013, 49(6): 757–762.
- LI Zai-jiu, JIN Qing-lin, YANG Tian-wu, JIANG Ye-hua, ZHOU Rong. Fabrication of lotus-type porous Cu-Zn alloys with the gasar continuous casting process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(6): 757–762.
- [20] IKEDA T, TSUKAMOTO M, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type porous stainless steel by unidirectional solidification under hydrogen atmosphere[J]. *Materials Transactions*, 2002, 43(11): 2678–2684.
- [21] HYUN S K, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-structured porous iron by unidirectional solidification under nitrogen gas[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2002, 4(10): 741–744.
- [22] PARK J S, SUZUKI S, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type porous Al-Si alloys using continuous casting technique[C]// LEFEBVRE L P, BANHART J, DUNAND D C. *Porous Metals and Metallic Foams*. Montreal: DEStech Publications, 2007: 229–232.
- [23] LEE P D, HUNT J D. Hydrogen porosity in directionally solidified aluminium-copper alloys: A mathematical model[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(8): 1383–1398.
- [24] LIU Y, LI Y X. A theoretical study of Gasarite eutectic growth[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 49: 379–386.
- [25] ALCOCK C B, RICHARDSON F D. Dilute solutions in molten metals and alloys[J]. *Acta Metallurgica*, 1958, 6(6): 385–395.
- [26] ZENG K J, MARKO H. Thermodynamic analysis of stable and metastable equilibria in the Cu-Cr system[J]. *Calphad*, 1995, 19(1): 93–104.

(编辑 李艳红)