文章编号：1004-0609(2014)06-1531-07

Gasar 连铸工艺制备藕状多孔铜

李再久，金青林，杨天武，蒋业华，周　荣

(昆明理工大学 材料科学与工程学院，昆明 650093)

摘　要：利用自行开发研制的 Gasar 连铸装置，拉制 *d* 15 mm×600 mm 的藕状多孔铜连铸试样，并研究氢气压力和试样的下拉速率对藕状多孔铜气孔结构的影响。结果表明：随着氢气压力及下拉速率的增加，连铸试样中气孔尺寸分布逐渐变得均匀；气孔率随氢气压力的增大而减小，而下拉速率对气孔率的影响不大；随下拉速率和氢气压力的增加，气孔的形核率增大，氢气向每个气孔的扩散量减少，导致气孔平均孔径减小及气孔数密度增加。
关键词：多孔材料；藕状多孔 Cu；Gasar 连铸工艺；气孔率
中图分类号：TG146　　**文献标志码**：A

Fabrication of lotus-type porous Cu with continuous casting Gasar process

LI Zai-jiu, JIN Qing-lin, YANG Tian-wu, JIANG Ye-hua, ZHOU Rong

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

Abstract: Lotus-type porous Cu specimens with size of *d* 15 mm×600 mm were fabricated by self-made continuous casting Gasar process. The effects of hydrogen gas pressure and withdraw rate on the pore structures of lotus-type porous Cu were investigated. The results show that the pore size distribution becomes homogeneous gradually with increasing the hydrogen gas pressure and withdraw rate. The porosity decreases with increasing the hydrogen gas pressure, while it is independent of the withdraw rate. With increasing the hydrogen gas pressure and withdraw rate, the hydrogen content diffused in each pore during solidification decreases with an increase in the pore nucleation rate, which leads to the decrease of the average pore diameter and the increase of the pore number density.
Key words: porous material; lotus-type porous Cu; continuous casting Gasar process; porosity

Gasar 工艺是一种利用金属−气体共晶定向凝固转变(L→S+H_2)制备多孔金属的新工艺。在一维定向凝固条件下，由该工艺制备的多孔金属结构类似藕根，因此也称为藕状多孔材料[1−5]。与传统方法(粉末烧结、纤维烧结、铸造、沉积等)制备的多孔材料相比，藕状多孔材料气孔结构的特殊性(呈圆柱形且沿凝固方向定向排列于金属基体中)使其不仅具有传统多孔材料密度低、刚度高、比表面积大、减震、隔热等特性[6]，还具有特殊的综合性能优势，如优异的力学性能[7−9]、热交换性能[10−11]以及摩擦磨损性能[12]，这使得藕状多孔材料在过滤器、自润滑轴承、气体分散器、热交换器、阻尼元件、催化剂载体、电磁电极等领域都有重要的潜在应用价值。

气孔的尺寸大小和分布的均匀性等结构参数是影响藕状多孔金属性能的关键因素[7−12]。为提高多孔金属的性能以满足其潜在的工程应用，开展藕状多孔金属材料的结构控制研究，获得具有均匀气孔分布的大尺寸藕状多孔金属是目前 Gasar 工艺研究的一个新兴方向。制备藕状多孔材料的方法主要是简单模铸法[3−5]，该方法简单易行，热量很容易从熔体经凝固试

基金项目：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(u0837603)；国家自然科学基金资助项目(51164018)
收稿日期：2013-10-21；**修订日期**：2014-01-02
通信作者：周　荣，教授；电话：0871-65136755；E-mail: zre@kmust.edu.cn

样向水冷铜底传递，然而随凝固试样高度的增加，凝固速率的变缓将导致气孔孔径逐渐变粗[3, 13]，这将影响试样整体的气孔率及气孔尺寸分布的均匀性；此外，由于 Gasar 工艺中的凝固速率主要取决于材料本身的热导率，因此，对于热导率较小的材料而言，在较小的固−液界面推进速率下(凝固速率)将很难捕获足量的气泡而难以形成藕状多孔结构；也即用模铸法很难制备出热导率较低、气孔尺寸和气孔率分布均匀的藕状多孔材料。为了解决低热导率材料的制备问题，NAKAJIMA 等[14−16]引入了一种新型的制备藕状多孔材料的新方法——连续区域熔炼法。该工艺的优点是可以通过改变棒状试样的下降速度来控制凝固速率，从而忽略热传导系数对凝固速率的影响，制备出热导率较低的、气孔尺寸和气孔率整体分布均匀的藕状多孔材料。然而，连续区域熔炼法只适用于较小直径范围内的多孔棒材的制备，很难制备具有工程应用潜力的大尺寸板(圆)坯，且由于侧向喷雾冷却方式，因此，该工艺制备的多孔金属气孔侧向生长较为严重。

为进一步优化藕状多孔金属的制备工艺，本文作者所在课题组将连续铸造法(简称连铸法)应用于藕状多孔金属的制备[17]。连铸法的优点在于界面推移速度(凝固速率)完全由下拉速率决定，而且在整个凝固过程中凝固速率均可保持恒定不变，整个凝固过程可以在近似稳态下进行[18]，在一定的下拉速率下控制的藕状多孔连铸试样具有相同的孔洞分布和气孔率等气孔结构参数。连铸法为解决制备大尺寸及低热导率的藕状多孔材料提供了技术保障。但目前国际上对连铸法的研究刚起步，相应的文献较少。基于此，本文作者在国内开展用连铸法制备具有均匀孔洞分布的大尺寸藕状多孔材料的实验研究工作，主要介绍藕状多孔铜的连铸工艺，研究连铸工艺参数(氢气压力和试样下拉速率)对多孔铜结构(气孔率、平均气孔直径和气孔数密度)的影响。

1 实验

图 1 所示为本课题组自行开发研制的 Gasar 连铸装置示意图。连铸实验采用高纯铜(99.99%，质量分数)，首先将称量好的铜放入熔炼坩埚中，抽真空至 1 Pa 后缓慢加热至金属熔化，关闭真空系统，充入高纯氢气至给定压力(0.6 及 1.0 MPa)后，在 1573 K 保温 10 min 以保证氢气充分溶解，然后将铜熔体通过漏斗浇入连铸坩埚中，此时开启下拉系统，铜液流出并在结晶器内凝固，在牵引杆的带动下逐渐拉制出藕状多孔铜连铸试样；连铸时下拉速率(v)分别设定为 5、10、15 和 20 mm/min，待连铸坩埚中的铜液拉制完成后，关闭装置电源，待温度降至 343 K 后泄压取样。连铸试样为 d 15 mm 的圆杆，其长度由气孔率和原料质量决定。

用线切割方法将连铸试样沿横向和纵向切开，观察气孔的生长；然后在 200、300 和 400 mm 这 3 个不同高度处截取 50 mm 试样并沿垂直于中心轴切开，观察气孔大小和分布特征。定义多孔铜横截面上的气孔数密度(n)为单位面积 S(5 mm×5 mm)上的气孔数，n 和平均气孔直径(d)由 Image J 图像分析软件统计获得，整个试样的平均气孔直径定义为 3 个横断面上的统计平均值；多孔铜连铸试样的气孔率(ξ)根据阿基米德原理测得。

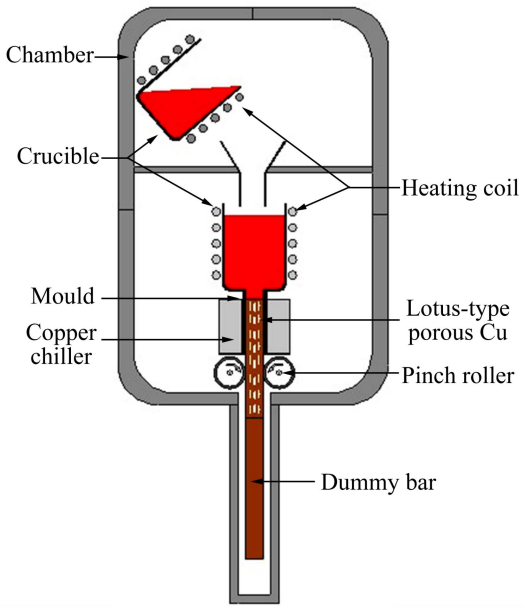


图 1 Gasar 连铸装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous casting apparatus

2 结果与讨论

藕状多孔铜连铸试样为 d 15 mm×600 mm 的圆杆，其横、纵截面如图 2 所示。由图 2 可知，在氢气压力为 0.6 MPa、下拉速率为 5 mm/min 试样的横截面中，气孔尺寸分布极不均匀，大直径气孔(直径大于 2 mm)和小直径气孔同时出现，从纵截面图中发现，在大孔的内部还有小孔出现，说明大孔由许多小孔合并长大而成；随着下拉速率的不断增高，气孔直径逐渐减小且分布越来越均匀。此外，在相同的下拉速率下，气孔直径随氢气压力的增大而减小，说明在多铜连铸

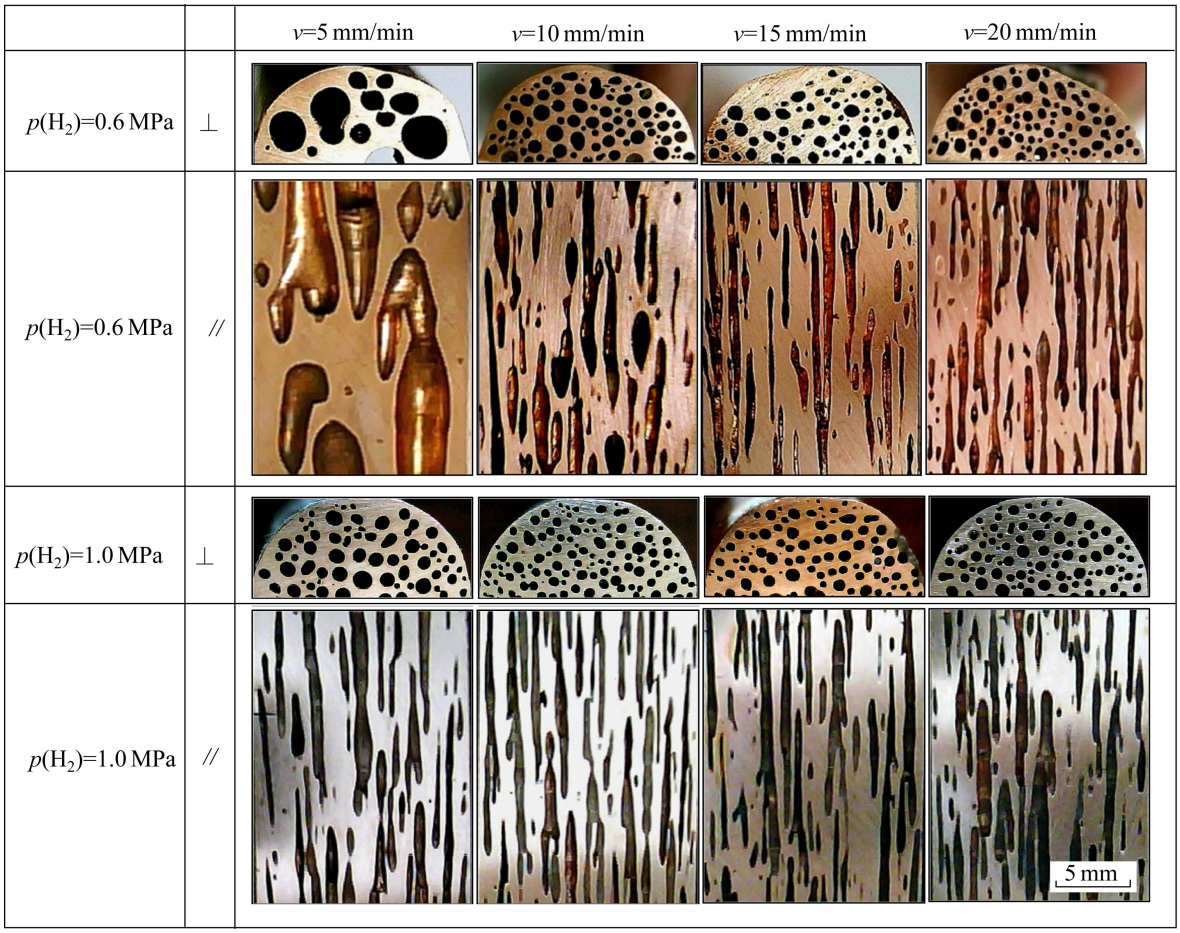


图 2　不同下拉速率和氢气压力下藕状多孔 Cu 连铸试样的横、纵截面图

Fig. 2　Cross-sections perpendicular and parallel to withdraw direction of lotus-type porous Cu fabricated at various withdraw rates and hydrogen gas pressures by continuous casting technique

过程中，气孔尺寸不仅与下拉速率有关，还受到氢气压力的影响。

图 3 所示为典型的连铸多孔铜试样的显微金相图。由图 3 可知，多孔铜的显微组织由单一取向且发达的柱状晶组成；气孔沿柱状晶生长方向定向分布于金属基体中，且每个晶粒包含几个气孔，但大部分气孔分布在晶界上。造成这种现象的原因可能有以下两点：1) 晶界上空位和位错等缺陷较多，溶质原子的扩散速度较快[19]，导致晶界附近溶质浓度较高，在发生相变时，气孔容易在晶界附近形核和长大；2) 由于气孔和柱状晶的尺寸在同一数量级范围内，对于在晶内形核和长大的气孔，气孔和金属液相间表面能导致气孔直径逐渐变大，从而使气孔分布逐渐靠近晶界。

2.1　连铸工艺参数对藕状多孔铜气孔率的影响

图 4 所示为藕状多孔铜连铸试样的气孔率(ξ)随连铸工艺参数的变化。由图 4 可见，随氢气压力的增加，气孔率降低；然而，随着下拉速率的增加，气孔率几乎保持不变。这与 HYUN 等[13]用模铸法及 IKEDA 等[16]用连续区域熔炼法制备的藕状多孔金属的规律一致。

藕状多孔材料的气孔是由氢气在金属固−液两相中的溶解度差造成的——不溶于金属固相的氢气随凝固过程的进行，不断在固−液界面处富集，当浓度达到临界形核浓度后，气泡形核并随金属固相一起共生生长，从而形成沿凝固方向定向排列的藕状多孔结构，图 2 所示；气孔率主要由氢气在固−液两相的溶解度差值决定，而凝固速率(下拉速率)对气孔率的影响不大。

有关藕状多孔金属的气孔率，YAMAMURA 等[5]和张华伟等[20]做了大量的实验和理论研究工作，并建立了各自不同的气孔率预测模型。二者均基于凝固过程中溶质氢的质量守恒原理，不同点在于对氢在金属固相中的平均溶解度($\overline{c_S}$)的不同理解及其后续求解上。YAMAMURA 等[5]利用 Sievert 定律计算

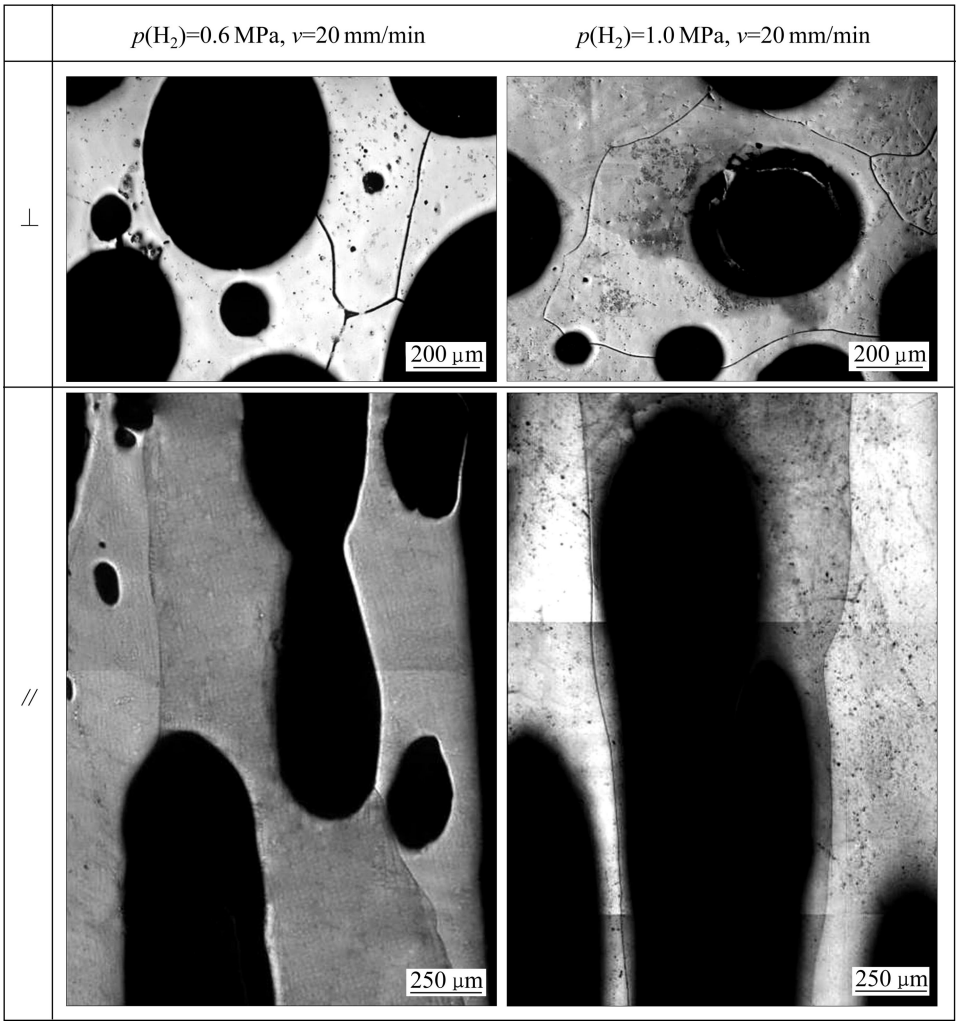


图 3 藕状多孔 Cu 连铸试样的典型显微金相图

Fig. 3 Typical metallographs of lotus-type porous Cu fabricated by continuous casting technique

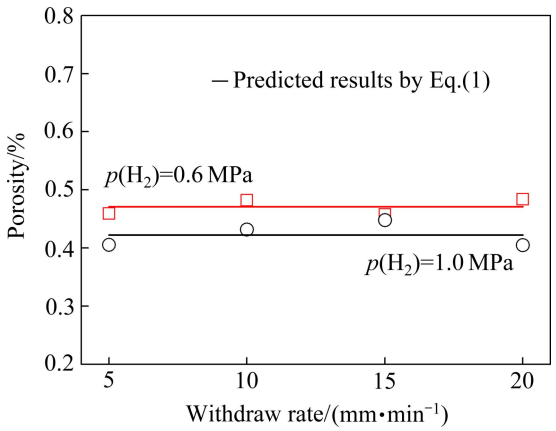


图 4 压力为 0.6 和 1.0 MPa 下多孔铜气孔率与下拉速率的关系

Fig. 4 Relationship between porosity and withdraw rate of porous Cu fabricated at hydrogen gas pressures of 0.6 and 1.0 MPa

$\overline{c_S}$ ($\overline{c_S}=\gamma(T)\sqrt{p(H_2)}$，$\gamma(T)$ 为与温度 T 和气体压力 $p(H_2)$ 有关的系数)；张华伟等[20]从金属/气体共晶转变的角度认识$\overline{c_S}$，得到$\overline{c_S}=k_0\overline{c_L}\dfrac{\rho_S}{\rho_L}$ (k_0 为溶质平衡分配系数，$\overline{c_L}$ 为凝固界面上液相的平均溶质浓度，ρ_L 和 ρ_S 分别为液态金属和固态金属的密度)；并通过对凝固界面前沿液相中溶质场的分析求解出$\overline{c_L}$，在考虑氢气逸出的条件下(定义逸出系数 a 为逸出氢的量与金属液相中溶解氢的量的比值)，得到式(1)所示的气孔率理论预测模型。

$$\xi=\frac{\left[\dfrac{c_0}{\rho_L}(1-a)-\dfrac{\overline{c_S}}{\rho_S}\right]\dfrac{RT_m}{p_b}}{\left[\dfrac{c_0}{\rho_L}(1-a)-\dfrac{\overline{c_S}}{\rho_S}\right]\dfrac{RT_m}{p_b}+\dfrac{1}{\rho_S}} \tag{1}$$

式中：ξ 为藕状多孔金属的气孔率；c_0 为氢在初始金

属熔体中的溶解量；R 为摩尔气体常数；T_m 是金属熔点；p_b 是气泡内氢气的压力，由式(2)给出：

$$p_b = p(H_2) + \rho_L gh + \frac{2\sigma_{M-H_2}}{r} \quad (2)$$

式中：$p(H_2)$ 是实验过程中所加氢气的压力；h 为气泡上方金属熔体的高度；r 为气泡半径；σ_{M-H_2} 为金属与氢气间的表面张力。

从模型预测的结果看，张华伟等[20]的预测更精确，适用范围也更为广泛。由此利用式(1)的理论模型计算在本实验条件下的气孔率，结果如图 4 所示。由图 4 可知，理论预测的气孔率和实验值吻合较好。

此外，在 Gasar 连铸过程中，氢气一方面提供气泡形核生长的驱动力，另一方面作为凝固压力的一部分起到阻碍气泡形核生长的作用。在连铸实验过程中，随氢气压力升高，氢气将更多地表现为阻力，从而导致气孔率随氢气压力升高而减小[20]。

2.2　连铸工艺参数对多孔铜气孔数密度和平均气孔直径的影响

图 5 和 6 所示分别为藕状多孔铜试样单位面积上的气孔数密度(n)和平均气孔直径(d)随连铸工艺参数的变化。由图 5 和 6 可知，随氢气压力及下拉速率的增大，多孔铜气孔数密度增加，而平均孔径减小；此外，在不同的下拉速率范围内气孔数密度和平均孔径的变化幅度不同：在较低的下拉速率下(＜15 mm/min)，二者受工艺参数的影响较大；而随下拉速率的逐渐增加，连铸工艺参数对气孔数密度和平均孔径的影响越来越小。

连铸技术的优点在于可以通过对下拉速率的宏观调控来达到对界面推移速率(凝固速率)的微观控制，

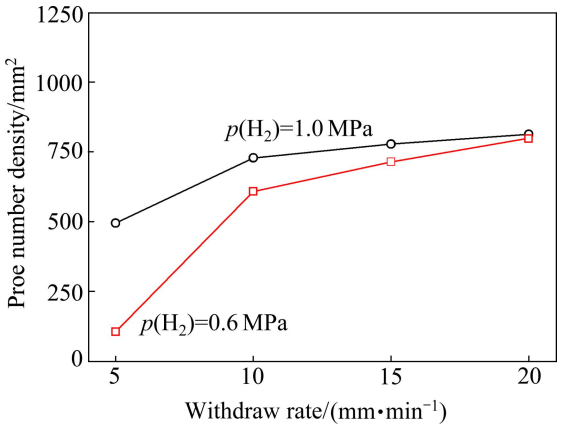


图 5　氢气压力为 0.6 和 1.0 MPa 下多孔铜气孔数密度与下拉速率的关系

Fig. 5　Relationship between pore number density and withdraw rate of porous Cu fabricated at hydrogen gas pressures of 0.6 and 1.0 MPa

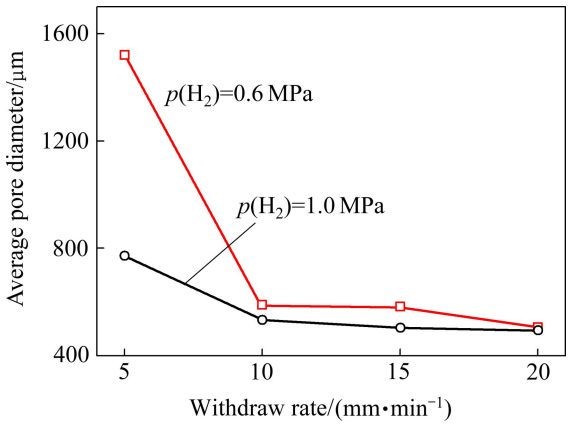


图 6　氢气压力为 0.6 和 1.0 MPa 下多孔铜平均气孔直径与下拉速率的关系

Fig. 6　Relationship between average pore diameter and withdraw rate of porous Cu fabricated at hydrogen gas pressures of 0.6 and 1.0 MPa

凝固速率虽对气孔率的影响较小，但对气孔数密度和孔径有重要影响。欲弄清 Gasar 连铸过程中氢气压力和下拉速率对多孔铜气孔数密度和孔径的影响机理，须引入 Gasar 凝固中气泡的形核机制。

前期大量研究[21−22]发现，气泡均质形核所需的外加压力过大(GPa 级)，因此，Gasar 工艺中的气泡大多以金属熔体中存有的大量高熔点杂质和夹杂物为核心进行非均匀形核。以平界面气泡的非均质形核为例，当系统中出现一个半径为 R 的气泡时，其对体系自由能的影响可表示为

$$\Delta G_{hetero} = \left(4\pi R^2 \sigma_{M-H_2} - \frac{4\pi R^3}{3} p_b\right) f(\theta) \quad (3)$$

式中：$f(\theta)$ 为形状影响因子，对于平界面的非均质形核[19]，有：

$$f(\theta) = \frac{(2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2}{4} \quad (4)$$

对 Cu-H_2 系，取润湿角 θ =134°，表面张力 σ_{Cu-H_2} =1.31 J/m^2。根据式(3)和(4)，可计算出不同氢气压力下气泡在杂质平界面上形核时的体系自由能变化曲线，结果图 7 所示。根据经典形核理论，自由能曲线上的极大值 ΔG^*_{hetero} 表征形成可连续生长的气泡必须克服激活能—形核功。从图 7 可以看出，随氢气压力的增加，气孔形核所需克服的形核功(由系统能量起伏补足)减小，从而使高气压系统下的气泡形核更加容易，最终导致系统形核率增大。这是随氢气压力的增加，多孔铜气孔数密度增加和平均孔径下降的主要原因之一。

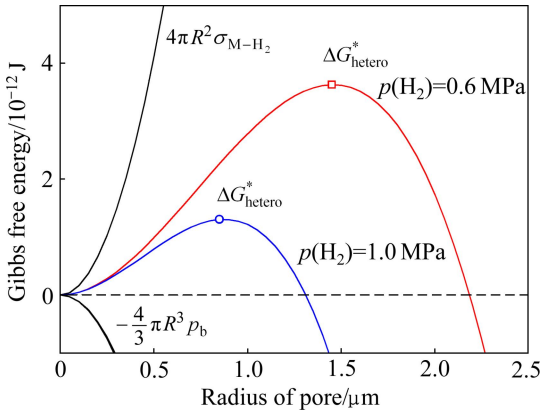


图 7 气泡形核时系统吉布斯自由能变化曲线

Fig. 7 Gibbs free energy curves of pore heterogeneous nucleation on flat surface

PARK 等[23]建议用式(5)计算连铸过程中的气孔非均匀形核率 I:

$$I=\frac{NkT}{h}\exp\left(-\frac{16\pi}{3kT}\frac{\sigma^3_{M-H_2}}{\Delta p^2}f(\theta)\right) \tag{5}$$

式中：N 为熔体中的原子数；k 为波尔兹曼常数；h 为普朗克常数；Δp 为气泡内压力与环境间的压力差。根据文献[23]，Gasar 连铸工艺中的凝固速率(下拉速率)v 与Δp 具有如下关系：

$$v\propto\Delta p^n \quad (1\leqslant n\leqslant 2) \tag{6}$$

式中：n 为经验常数。根据式(5)和(6)可知，随着下拉速率的增加，压力差升高，从而导致气孔的形核率增加。由于在一定温度和氢气压力下，固−液界面处参与形核的氢气为衡量，随着气孔的形核率增加，氢气向每个气孔扩散量的减少，从而导致多孔铜气孔数密度增加和平均孔径下降。

此外，一旦气泡在固−液界面附近形核，其周围熔体中的溶质氢将不断扩散进入气孔，使其一方面随金属固相沿凝固方向一起共生生长形成藕状多孔结构；另一方面，由于临界气泡形核半径 (10 μm 左右)较小，其所导致气孔内壁所受的附加压力($2\sigma_{M-H_2}/R$)较大(MPa 级)，故在表面能的作用下，气孔孔径会逐渐变大。而固−液界面处不溶于固相中的溶质氢除了必须扩散进入气孔外，还必须维持新气泡形核所必需的形核浓度(气泡形核浓度大于生长浓度)，这样将导致形核率在达到一定的极值后就不再随下拉速率的增加而升高，这时随下拉速率的进一步增加，气孔数密度和孔径的变化将逐渐趋于一致，如图 5 和 6 所示。

3 结论

1) 利用自行开发的 Gasar 连铸装置，成功地拉制出了 d 15 mm×600 mm 的藕状规则多孔铜连铸试样。

2) 在连铸过程中，随着氢气压力的增大，氢气的阻力作用比驱动力作用更加明显，导致气孔率随之减小，而下拉速率对气孔率的影响不大。

3) 随着下拉速率和氢气压力的增加，气孔的形核率增大，导致多孔铜气孔数密度增加而平均气孔直径逐渐减小。

REFERENCES

[1] 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.

[2] NAKAJIMA H, HYUN S K, OHASHI K, OTA K, MURAKAMI K. Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties[J]. Colloids and Surfaces, 2001, 179: 209−214.

[3] 刘 源, 李言祥, 张华伟. 藕状多孔金属 Mg 的 Gasar 工艺制备[J]. 金属学报, 2004, 40(11): 1121−1126.
LIU Yuan, LI Yan-xiang, ZHANG Hua-wei. Fabrication of lotus-structured porous magnesium with Gasar process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(11): 1121−1126.

[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.

[5] 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: 137−143.

[6] 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.

[7] 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.

[8] HYUN S K, MURAKAMI K, NAKAJIMA H. Anisotropic mechanical properties of porous copper fabricated by unidirectional solidification[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 299: 241−248.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 陈刘涛, 张华伟, 刘　源, 李言祥. 定向凝固多孔 Cu 热沉传热性能实验研究[J]. 金属学报, 2012, 48(3): 329−333.
CHEN Liu-tao, ZHANG Hua-wei, LIU Yuan, LI Yan-xiang. Experimental research on heat transfer performance of directionally solidified porous copper heat sink[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(3): 329−333.

[12] 申芳华, 李再久, 杨天武, 金青林, 蒋业华, 周　荣. 规则多孔铜基自润滑材料的干摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 150−156.
SHEN Fang-hua, LI Zai-jiu, YANG Tian-wu, JIN Qing-lin, JIANG Ye-hua, ZHOU Rong. Dry tribological property of a new self-lubricating material fabricated with ordered porous copper[J]. Tribology, 2012, 32(2): 150−156.

[13] HYUN S K, NAKAJINA H. Effect of solidification velocity on pore morphology of lotus-type porous copper fabricated by unidirectional solidification[J]. Materials Letters, 2003, 57: 3149−3154.

[14] KASHIHARA M, YONETANI H, KOBI T, HYUN S K, SUZUKI S, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type porous carbon steel via continuous zone melting and its mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 524: 112−118.

[15] KUJIME T, HYUN S K, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type porous carbon steel by the continuous zone melting method and its mechanical property[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(2): 393−398.

[16] IKEDA T, AOKI T, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type porous stainless steel by the continuous zone melting technique and mechanical properties[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(1): 77−86.

[17] 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.

[18] 刘　源, 李言祥, 刘润发, 周　荣, 蒋业华, 黎振华. 连铸法 Gasar 工艺中抽拉速率对多孔金属结构影响的理论分析[J]. 金属学报, 2010, 46(2): 129−134.
LIU Yuan, LI Yan-xiang, LIU Run-fa, ZHOU Rong, JIANG Ye-hua, LI Zhen-hua. Theoretical analysis on effect of transference velocity on structure of porous metals fabricated by continuous casting Gasar process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(2): 129−134.

[19] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
CUI Zhong-qi. Metallurgy and heat treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

[20] 张华伟, 李言祥, 刘　源. 藕状规则多孔 Cu 气孔率的理论预测[J]. 金属学报, 2006, 42(11): 1165−1170.
ZHANG Hua-wei, LI Yan-xiang, LIU Yuan. Evaluation of porosity in lotus-type porous Cu fabricated with Gasar process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(11): 1165−1170.

[21] 张华伟, 李言祥. 金属熔体中气泡形核理论分析[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4864−4871.
ZHANG Hua-wei, LI Yan-xiang. Study on bubble nucleation in liquid metal[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4864−4871.

[22] LIU Y, LI Y X. Theoretical analysis of bubble nucleation in GASAR materials[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(4): 830−834.

[23] PARK J S, HUYN S K, SUZUKI S, NAKAJIMA H. Effect of transference velocity and hydrogen pressure on porosity and pore morphology of lotus-type porous copper fabricated by a continuous casting technique[J]. Acta Materialia, 2007, 55: 5646−5654.

(编辑　陈卫萍)