

离心铸造液态金属充型流动过程中气泡的形核规律*

隋艳伟¹ 李邦盛¹ 刘爱辉² 熊艳才³ 郭景杰¹ 傅恒志¹

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001

2. 淮阴工学院机械工程系 淮安 223003

3. 北京航空材料研究院 北京 100095

摘要 对离心力场作用下液态金属充型流动过程中气体的溶解度、气泡的形核条件、形核功、临界形核半径以及形核率进行了定量研究。结果表明,在离心力场作用下气体的溶解度是一个梯度量,随着离心半径和离心角速度的增大而增大;气泡的形核功和临界形核半径也随着离心半径和离心角速度的增大而增大,而气泡的形核率相应地减小;离心半径和离心角速度越大,对气体溶解度和气泡形核的影响越明显;因此,在离心力场作用下可通过提高离心旋转角速度和离心半径减少气孔缺陷。

关键词 金属材料,离心铸造,理论分析,气泡,形核

分类号 TG249

文章编号 1005-3093(2008)06-0580-05

Gas bubble nucleation in centrifugal casting liquid metal filling and flow process

SUI Yanwei¹ LI Bangsheng^{1**} LIU Aihui² XIONG Yancai³ GUO Jingjie¹ FU Hengzhi¹

1.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

2.Department of Mechanical Engineering, Hua'iyin Institute of Technology, Huaian 223003

3.Beijing Institute of Aeronautical, Beijing 100095

* Supported by National Nature Science Foundation of China No.50434030.

Manuscript received January 28, 2008; in revised form May 10,2008.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(0451)86412198, E-mail: suiyanwei@tom.com

ABSTRACT By means of quantitative analysis method, gas solubility, gas bubble nucleation condition, nucleation work, critical nucleation radius, and nucleation rate in centrifugal casting liquid metal filling and flow process are studied. The results show that with increasing the centrifugal radius and angular velocity, gas solubility as a gradient vector in centrifugal field, gas bubble nucleation work, and critical nucleation radius increase, but gas bubble nucleation rate decreases. Meanwhile, the effect of the centrifugal radius and angular velocity on gas solubility and gas bubble nucleation is more significant with their increasing. Therefore, porosity can be reduced through increasing the centrifugal radius and angular velocity in centrifugal field.

KEY WORDS metallic materials, centrifugal casting, theoretical analysis, gas bubble, nucleation

离心铸造具有生产工艺和设备简单、生产效率高、组织致密和加工量少等优点^[1-4]。但是,由于金属熔体中含有气体,在离心力场作用下在液态金属凝固过程中可能产生气孔缺陷,而气孔不但减少铸件的有效截面积,在局部造成应力集中,成为零件断裂的裂纹源,增加缺口的敏感性,使金属强度下降,而且也降低零件的疲劳强度;对承受液压和气压的铸件,含

气孔能明显地降低其气密性^[5-7]。因此,开展离心铸造条件下气孔形成规律的研究,对于减少气孔产生提高铸件质量具有重要意义。目前国内外许多学者对离心铸造条件下气孔的产生进行了多方面的研究,认为离心力场可以减少气孔的产生,并分析了产生气孔的原因^[8-11]。但是这些研究大多是定性的,缺乏深入和系统的理论研究。因此本文对离心力场下气体的溶解度和气泡的形核规律进行深入系统的分析。

1 离心力场下气体溶解度的分布规律

在重力作用下,气体在金属中的溶解度与压力、

* 国家自然科学基金 50434030 资助项目。

2008 年 1 月 28 日收到初稿;2008 年 5 月 10 日收到修改稿。

本文联系人:李邦盛,教授

温度、合金成分及气体种类等因素有关。对一定成分的合金,影响气体在其中溶解度的主要因素是温度和压力,气体溶解度与温度和压力的关系为^[5]:

$$S = K_0 \sqrt{P/K_1} \exp\left(-\frac{\Delta H}{2RT}\right) \quad (1)$$

其中 K_0 为常数, K_1 为气体原子压力与气体分压力比值, P 为气体原子压力, ΔH 为气体溶解热, R 为气体常数, T 为绝对温度。

在离心力场作用下,液态金属中离心半径 r 处压力 P 等于重力下所受压力和离心压力之和,即

$$P = P_g + P_i \quad (2)$$

而离心力场中离心压力公式为^[12]:

$$P_i = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2) \quad (3)$$

其中 ρ 为金属密度, ω 为铸型旋转角速度, r 为离开旋转中心距离, r_0 为离心铸造自由表面半径。

将式 (2) 和 (3) 代入 (1) 得

$$\begin{aligned} S &= K_0 K_1^{-1/2} (P_g + P_i)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta H}{2RT}\right) \\ &= K_0 K_1^{-1/2} \left[P_g + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)\right]^{1/2} \\ &\quad \exp\left(-\frac{\Delta H}{2RT}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

对公式 (4) 偏微分得

$$\frac{\partial S}{\partial \omega} = \frac{K_0 K_1^{-1/2}}{2} (P_g + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2))^{-1/2} \rho \omega (r^2 - r_0^2) \exp\left(-\frac{\Delta H}{2RT}\right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial r} = \frac{K_0 K_1^{-1/2}}{2} (P_g + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2))^{-1/2} \rho \omega^2 r \exp\left(-\frac{\Delta H}{2RT}\right) \quad (6)$$

由式 (4) 可以看出: 气体原子在液态金属中的溶解度与离心力场作用下的离心半径和角速度有关,当忽略其它参数的影响只考虑离心半径和角速度时,则随着离心半径和角速度的增加气体的溶解度也相应增大,使得离心力场下的气体溶解度成为一个梯度量,即所谓的梯度溶解度,即距离离心铸造旋转中心越远气体溶解度越大。同时,由公式 (5)(6) 可知,无论 ΔH 是正还是负,等号右边的数值都为正值。因此,离心半径和角速度越大,梯度溶解度的增幅越大。

2 离心力场下气泡的形核条件

在重力和离心力耦合作用下,金属熔体中气泡的形核必须满足以下条件:

①合金熔体中溶解的气体处于过饱和状态而具有析出压力 ΔP ^[13];

对于 ΔP ,当金属液的温度由 T 减小到 T_1 时,如果气体溶解度不变,(1) 式的 S 不变,则由式 (1) 导出气体析出压力为^[5]

$$\Delta P = P/K_1 \left[\exp \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

将式 (2)、(3) 代入式 (7) 得

$$\begin{aligned} \Delta P &= K_1^{-1} \left[P_g + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2) \right] \\ &\quad \left[\exp \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

可以看出,在离心力场下析出压力随着离心半径和离心角速度的增大而增大,有利于气体原子向液态金属表面扩散析出。

②气泡内的气体压力大于作用于气泡的外压力^[13];

在此条件下,克服附加压力所作的膨胀功等于增大气泡表面积的表面功^[14] $P_{\text{subjoin}} dV = \sigma dA$ 设气泡为球形,则可得

$$P_{\text{subjoin}} = \frac{2\sigma}{r_1} \quad (9)$$

其中 σ 为合金熔体的表面张力, r_1 为气泡半径。

气泡上方金属液柱静压力^[13]

$$P_L = \rho g H \quad (10)$$

其中 g 为重力加速度, H 为气泡上方合金熔体液柱高度。

在离心压力场的作用下,不同离心半径处的压力可用式 (3) 表示,于是满足

$$P_g \geq P_{\text{at}} + P_i + P_L + P_{\text{subjoin}} \quad (11)$$

其中 P_g 为气泡中气体的压力, P_{at} 为合金熔体上方气相中的压力。

将式 (3)、(9) 和 (10) 代入 (11) 得

$$P_g \geq P_{\text{at}} + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2) + \rho g H + \frac{2\sigma}{r_1} \quad (12)$$

随着金属熔体中气体含量的降低, P_g 降低,在熔池深度为 H 处 t 时刻有

$$P_g = P_{\text{at}} + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2) + \rho g H + \frac{2\sigma}{r_1} \quad (13)$$

在式 (13) 中,角速度 ω 和离心半径 r 影响气泡内气体的压力 P_g ;

假设: ①气泡内的气体是理想气体; ②气泡为球形; ③在真空条件下即: P_{at} 忽略不计。则式 (13) 变为

$$P_g = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2) + \rho g H + \frac{2\sigma}{r_1} \quad (14)$$

为了在理论上分析气泡内气体压力随着离心转速和离心半径变化规律,取液柱的高度为 0.1 m,自

由表面的半径为 0 m 时离心的半径为 0.15 m, 气泡的半径为 0.2 mm, 则气泡内气体的压力与角速度的关系如图 1 所示. 当离心转速为 2000 rpm 时, 气泡内气体的压力与离心半径的关系如图 2 所示. 可以看出, 气泡内气体的压力随着角转速和离心半径的增大而增大, 角转速和离心半径越大越难形核, 且角速度和离心半径越大对气泡形核影响的幅度越大.

在熔池深度 H 以下的金属熔体中, 气泡无法形核. 此时气体的极限浓度为^[13]

$$C_m = K_2(P_{at} + P_i + P_L + \frac{2\sigma}{r_1})^{1/2} \quad (15)$$

其中 C_m 为气体的极限浓度, K_2 为常数.

将式 (13) 代入 (15) 中得

$$C_m = K_2[P_{at} + \frac{1}{2}\rho\omega^2(r^2 - r_0^2) + \rho gH + \frac{2\sigma}{r_1}]^{1/2} \quad (16)$$

从式 (16) 可以看出, 气体的极限浓度随着角速度和离心半径的增大而增大. 合金熔体中含有非金

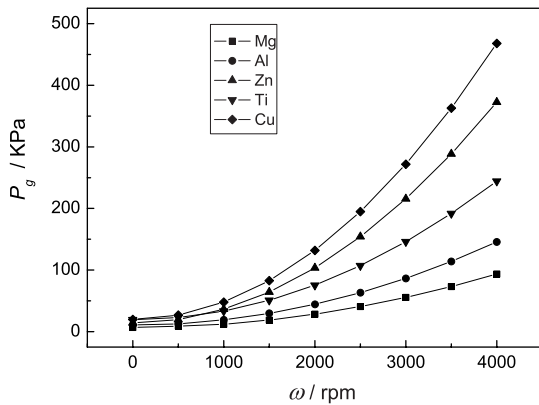


图 1 角速度对气泡内气体压力的影响

Fig.1 Effect of angular velocity on gas pressure in gas bubble

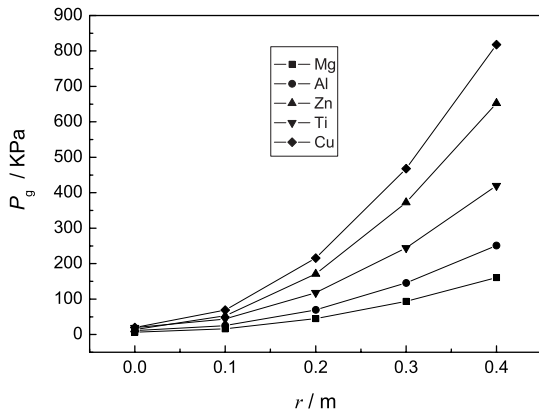


图 2 离心半径对气泡内气体压力的影响

Fig.2 Effect of centrifugal radius on gas pressure in gas bubble

属夹杂, 可成为气泡的形核基底. 当熔体中气体的含量高于平衡状态含气量, 且高于 C_m 值时, 将析出气泡. 由式 (12) 可知, 合金熔体所受的外加压力越大, 气泡越难形核.

3 离心力场下气泡的形核功、临界形核半径

在液态金属充型流动过程中, 气泡的形核功包括克服液态金属质点的交互作用力和克服外压力的功^[15-17], 即

$$W = U + P_1V \quad (17)$$

其中 U 为克服液态金属质点的交互作用力的功, P_1 为外压力, V 为气泡体积.

将式 (3)、(9) 和 (10) 代入式 (17), 得

$$W = U + [P_{at} + \frac{1}{2}\rho\omega^2(r^2 - r_0^2) + \rho gH + \frac{2\sigma}{r_1}]V \quad (18)$$

对式 (18) 求偏微分得

$$\frac{\partial W}{\partial \omega} = \rho\omega(r^2 - r_0^2)V \quad \frac{\partial W}{\partial r} = \rho\omega^2rV \quad (19)$$

式 (18) 和 (19) 表明, 形核功随着离心半径和离心角速度的增加而增大, 即不利于形核.

形核功和临界形核半径的关系式为^[18]

$$W = \frac{16\pi\sigma^3}{3\Delta G_V^2}, r^* = \frac{2\sigma}{\Delta G_V} \quad (20)$$

其中 ΔG_V 为单位体积的自由能. 将式 (18) 代入 (20) 可得

$$r^* = \frac{(3\frac{(U + (P_{at} + \frac{1}{2}\rho\omega^2(r^2 - r_0^2) + \rho gH + \frac{2\sigma}{r_1})V)}{\pi})^{1/2}}{2}} \quad (21)$$

从式 (21) 可知, 临界气泡形核半径随着离心半径和角速度的增大而增大, 表明离心半径和角速度越大, 气泡越难形核, 有利于减少气孔缺陷.

4 离心力场下气泡的形核率

在离心力场作用下, 液态金属充型流动过程中气泡的形核率为^[19]

$$N = \frac{nKT}{h} \exp(-\frac{W}{KT}) \exp(-\frac{\Delta G_A}{KT}) \quad (22)$$

其中 n 为单位体积内的气体原子数, h 为普朗克常量, K 为波尔兹曼常数, W 为形核功, ΔG_A 为扩散激活能.

在离心力场的作用下, 气体原子的扩散激活能为^[20]

$$\Delta G_A = KTf(1 + aP_i) \exp(\frac{b}{T}) \quad (23)$$

其中 f, a, b 都为常数.

将式 (3) 代入 (23), 得

$$\Delta G_A = KTf(1 + a\frac{1}{2}\rho\omega^2(r^2 - r_0^2)) \exp(\frac{b}{T}) \quad (24)$$

对式 (24) 求偏微分得

$$\frac{\partial \Delta G_A}{\partial \omega} = K T f a \rho \omega (r^2 - r_0^2) \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (25)$$

$$\frac{\partial \Delta G_A}{\partial r} = K T f a \rho \omega^2 r \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (26)$$

由式 (24)、(25) 和 (26) 可见, 液态金属中气体原子的扩散激活能随着离心半径和角速度的增大而增大。

将式 (18) 和 (24) 代入 (22), 得到

$$N = \frac{n K T}{h} \exp\left(-\frac{U + (P_{at} + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2) + \rho g H + \frac{2\sigma}{r_1}) V}{K T}\right) \exp\left(-\frac{K T f (1 + a \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)) \exp\left(\frac{b}{T}\right)}{K T}\right) \quad (27)$$

式 (27) 表明, 在离心力场的作用下气泡的形核率随着离心半径和角速度的增大而减小, 从而抑制气泡的形核, 减少气孔缺陷的产生。

5 结 论

1. 随着离心半径和角速度的增大, 气体的溶解度发生相应的变化, 使在离心力场下的气体溶解度变成一个梯度量, 即所谓的梯度溶解度。

2. 气泡的形核需要两个条件: 溶解于金属熔体中的气体处于过饱和状态而具有析出压力, 析出压力随着离心半径和角速度的增加而增大; 气泡内气体压力大于作用于气泡的外压力, 即

$$P_g \geq P_{at} + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2) + \rho g H + \frac{2\sigma}{r_1}$$

3. 气泡的形核功和临界形核半径随着离心半径和角速度的增大而增大, 离心半径和角速度越大, 气泡形核越困难, 因此可提高离心半径和角速度以减少气孔的形成。

4. 根据经典形核理论导出气泡形核率公式

$$N = \frac{n K T}{h} \exp\left(-\frac{U + (P_{at} + \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2) + \rho g H + \frac{2\sigma}{r_1}) V}{K T}\right) \exp\left(-\frac{K T f (1 + a \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)) \exp\left(\frac{b}{T}\right)}{K T}\right)$$

即在离心力场的作用下气泡的形核率随着离心半径和角速度的增大而减小。

参 考 文 献

- Wu Shiping, Liu Dongrong, Guo Jingjie, Li Changyun, Su Yanqing, Fu Hengzhi, Numerical simulation of microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy in vertical centrifugal casting, *Materials Science and Engineering A*, **426**, 240-249(2006)
- Halvae A, Talebi A, Effect of process variables on microstructure and segregation in centrifugal casting of C92200 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, **118**(1-3), 123-127(2001)
- G Chirita, D Soares, F S Silva, Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al-Si alloys, *Materials and Design*, **29**, 20-27(2008)
- R.A.Mesquita, D.R.Leiva, A.R.Yavari, W.J.Botta Filho, Microstructures and mechanical properties of bulk AlFeNd(Cu, Si) alloys obtained through centrifugal force casting, *Materials Science and Engineering A*, **452-453**, 161-169(2007)
- LI Qingchun, *Basis of Cast Forming Theory* (Beijing, China Machine Press, 1982) p.187-199 (李庆春, 铸件形成理论基础 (北京, 机械工业出版社, 1982) p.187-199)
- Kun-Dar Li, Edward Chang, Mechanism of nucleation and growth of hydrogen porosity in solidifying A356 aluminum alloy: an analytical solution, *Acta Materialia*, **52**, 219-231(2003)
- ZHANG Boning, *Centrifugal Casting* (Beijing, China Machine Press, 2004) p.50-65 (张伯明, 离心铸造 (北京, 机械工业出版社, 2004) p.50-65)
- TAN Yingyuan, Reasons for Producing Gas Hole and Prevention Measurement under Centrifugal Casting for Al-Si Alloy, *Journal of Wuhan Institute of Shipbuilding Technology*, **1**, 28-29(2003) (谭银元, Al-Si 合金离心铸造产生气孔的原因及防止措施, 武汉船舶职业技术学院学报, **1**, 28-29(2003))
- Wu. M, Auqthun. M, Wagner. I, Sahm. P. R, Spiekermann. H, Numerical simulation of the casting process of titanium tooth crowns and bridges, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **12**(6), 485-490(2001)
- SHENG Wenbin, GUO Jingjie, SU Yanqing, DING Hongsheng, JIA Jun, Analysis on inner defects in TiAl based alloy exhaust valve during the centrifugal foundry process in permanent mold, *Journal of Aeronautical Materials*, **20**(2), 40-45(2000) (盛文斌, 郭景杰, 苏彦庆, 丁宏升, 贾均, TiAl 基合金排气阀金属型离心铸造过程内部缺陷分析, 航空材料学报, **20**(2), 40-45(2000))
- Suzuki Ken-ichiro, Nishikawa Koji, Watakabe Sirou, Mold filling and solidification during centrifugal precision casting of Ti-6Al-4V alloy, *Materials Transactions, JIM*, **37**(12), 1793-1801(1996)
- J Wannasin, M C Flemings, Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process, *Journal of Materials Processing Technology*, **169**, 143-149(2005)
- GUO Jingjie, FU Hengzhi, *Alloy Melts and Its Treatment* (Beijing, China Machine Press, 2004) p.187-207 (郭景杰, 傅恒志, 合金熔体及其处理 (北京, 机械工业出版社, 2004) p.187-207)
- ZHAI Qijie, GUAN Shaokang, SHANG Quanyi, *thermodynamics of alloys Theory and application* (Beijing, Metallurgical Industry Press, 1999) p.121-138 (翟启杰, 关绍康, 商全义, 合金热力学理论及其应用 (北京, 冶金工业出版社, 1999) p.121-138)

- 15 Institute of Metallurgy Chinese academy of sciences translate, *Casting properties for Titanium alloys in Foreign Countries* (Shanghai, Shanghai science and Technology information research institute press, 1974) p.34-36
(中国科学院冶金研究所译, 国外钛合金的铸造性能 (上海, 上海科学技术情报研究所出版, 1974)p.34-36)
- 16 XU Zuyao, Phase Transformations Under Stress, *Heat Treatment*, **19**(2), 1-17(2004)
(徐祖耀, 应力作用下的相变, 热处理, **19**(2), 1-17(2004))
- 17 Kim S W, Lee U J, Woo K D, Kim D K, Solidification microstructures and mechanical properties of vertical centrifugal cast high speed steel, *Materials Science and Technology*, **19**(22), 1727-1732(2003)
- 18 CUI Zhongqi, LIU Beixing, *Metallurgy and Heat Treatment Principles* (Harbin, Harbin Institute of Technology Press, 1998) p.40-52
(崔忠圻, 刘北兴, 金属学与热处理原理 (哈尔滨, 哈尔滨工业大学出版社, 1998) p.40-52)
- 19 Tumbull D, Formation of crystal nuclei in liquid metals, *Journal of Applied Physics*, **21**(10), 1022-1028(1950)
- 20 Tiller W A, Jackson K A, Rutter J W, The redistribution of solute atoms during the solidification of metals, *Acta Materialia*, **1**, 428-437(1951)