

结晶压力对真空差压铸造铝合金二次枝晶间距的影响

严青松, 余欢, 芦刚, 熊博文, 卢百平, 邹勋

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

摘要: 通过测试与分析不同结晶压力下真空差压铸造 ZL114A 铝合金的二次枝晶间距, 研究结晶压力对真空差压铸造铝合金二次枝晶间距的影响; 并建立真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距与结晶压力和壁厚的关系。结果表明, 结晶压力对真空差压铸造铝合金二次枝晶间距影响显著, 对于相同壁厚的试样, 随着结晶压力的增大, 铝合金二次枝晶间距减小; 在同一结晶压力下, 随着壁厚的减小, 铝合金二次枝晶间距减小; 结晶压力小于 350 kPa 时, 壁厚对二次枝晶间距影响较大; 结晶压力大于 350 kPa 时, 结晶压力对二次枝晶间距影响较大。

关键词: 铝合金; 真空差压铸造; 结晶压力; 二次枝晶间距; 壁厚

中图分类号: TG249.2

文献标志码: A

Effect of crystallization pressure on secondary dendrite arm spacing of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy

YAN Qing-song, YU Huan, LU Gang, XIONG Bo-wen, LU Bai-ping, ZOU Xun

(School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The effect of crystallization pressure on the secondary dendrite arm spacing of vacuum counter-pressure casting ZL114A aluminum alloy was studied through testing and analyzing the secondary dendrite arm spacing (SDAS) subjected to different crystallization pressures. Meanwhile, the relationships among the secondary dendrite arm spacing of vacuum counter-pressure casting ZL114A aluminum alloy and crystallization pressure and wall thickness were established. The results indicate that the effect of crystallization pressure on the secondary dendrite arm spacing of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy is obvious. For the samples with the same wall thickness, the secondary dendrite arm spacing of aluminum alloy decreases with the increase of crystallization pressure. Under the same crystallization pressure, the secondary dendrite arm spacing of aluminum alloy decreases with the decrease of wall thickness. When the crystallization pressure is less than 350 kPa, the effect of wall thickness on the secondary dendrite arm spacing is obvious, while when the crystallization pressure is more than 350 kPa, the effect of crystallization pressure on secondary dendrite arm spacing is obvious.

Key words: aluminum alloy; vacuum counter-pressure casting; crystallization pressure; secondary dendrite arm spacing; wall thickness

铝合金铸件具有良好的力学性能和耐蚀性、较高的比强度, 且生产工艺简单, 成本较低, 因此其应用非常广泛^[1-3]。但是铝合金铸造组织的枝晶都比较粗大, 特别是早期凝固形成的二次枝晶臂间距在凝固后期变得更粗大。二次枝晶臂间距大小直接影响铝合金成分偏析、第二相及显微孔洞的分布, 从而对铝合金

铸件组织和性能产生影响。因此, 要获得晶粒细小、组织致密的铝合金铸件必须控制和改善凝固过程, 保证有良好的凝固补缩条件, 即凝固过程补缩通道畅通, 液态金属在枝晶间的流动性良好。液态金属在枝晶间的流动受合金本身的性质与外力作用, 而往往外力作用影响很大。特别是压力作用下的结晶凝固, 这是一

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51261025); 西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放基金资助项目(SKLSP201325)

收稿日期: 2013-08-08; 修订日期: 2013-10-12

通信作者: 严青松, 教授, 博士; 电话: 0791-83953326; E-mail: yanqs1973@126.com

个非平衡的凝固过程, 对枝晶的生长产生了较大的影响。

早在 20 世纪 70 年代, BATSHJEB 等^[4]就对压力作用下合金的结晶过程进行了大量的研究, 他们提出压力会使晶粒细化、组织致密。这引起了国内外专家对压力下结晶研究的极大兴趣。差压铸造作为一种反重力铸造工艺, 由于采用较高的压差进行保压凝固, 在整个凝固过程中金属熔体都受到压力场的作用, 因此, 可以获得晶粒细小、组织致密的铸件^[5-7]。20 世纪 80 年代, AKAD^[8]对差压铸造铝合金铸件的凝固过程进行了研究, 通过分析不同压力下铝合金铸件的组织和性能, 认为压力具有使铝合金液通过凝固枝晶间的狭窄通道向补缩区流动的驱动作用, 具有良好的补缩效果, 会使晶粒细化、组织致密, 并提出差压铸造铝合金熔体的补缩流量与凝固压力大小有关。2003 年, 董秀琦等^[9]对差压铸造的凝固过程进行了研究, 建立了差压铸造液态金属补缩速度模型, 认为差压铸造过程中液态金属的补缩速度主要与结晶凝固时的保压压力大小、补缩通道大小、液固共存区的温度梯度、液态金属的表面张力、合金结晶温度范围等有关, 这为差压铸造的补缩能力提供了理论指导。从 2000 年开始, 严青松等^[10-12]对复杂薄壁铝合金铸件真空差压铸造的凝固行为进行了研究, 提出真空差压铸造铝合金的凝固过程具有挤渗效应, 挤渗效应会使枝晶发生显微塑性变形直至断裂, 有利于液态金属在枝晶间良好的流动, 并建立了真空差压铸造工艺的凝固补缩过程数学模型, 认为补缩速度主要取决于凝固时保压压力大小, 保压压力越大, 晶间处的补缩速度就越快, 补缩效果就越好。

目前, 国内外专家对压力下的补缩过程和模型进行了大量研究, 但主要是从宏观方面提出压力对凝固的补缩效应, 对真空差压凝固条件下枝晶生长的影响很少报道。因此, 系统研究结晶压力对真空差压铸造铝合金二次枝晶间距的影响, 获得真空差压铸造铝合金二次枝晶间距与结晶压力和壁厚的关系, 为真空差压铸造铝合金的枝晶生长提供理论指导。

1 实验

采用自制的 VCPC 型真空差压铸造设备进行实验, 试样采用薄板, 其外形尺寸为 60 mm×150 mm×(3, 6, 9, 12) mm 4 种壁厚, 如图 1 所示。铸型采用砂型铸造, 合金为 ZL114A(ZAlSi7Mg1A), 浇注温度 700 ℃左右, 采用 5 种不同的结晶压力(250、300、

350、400、450 kPa)进行真空差压铸造铝合金试样, 真空差压铸造工艺参数如表 1 所列。

为了测量二次枝晶间距的大小, 在真空差压铸造试样上的相同部位分别取样, 利用 XQ-1 型金相镶嵌机对各试样进行镶嵌, 然后经过粗磨、精磨、抛光, 最后再进行腐蚀处理。腐蚀液为 0.5%HF 质量分数, 腐蚀的时间为 15~20 s。利用 XJP-6A 型金相显微镜对腐蚀后试样进行显微组织观察并拍取金相照片, 按照壁厚、结晶压力大小依次标号为样品 1~20, 并采用截线法和 Image-Pro Plus 金相分析软件对二次枝晶间距进行测量, 截线法如图 2 所示。

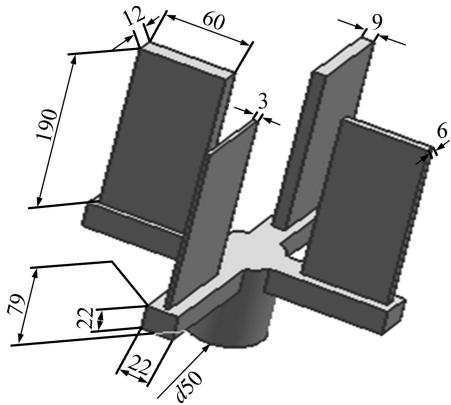


图 1 试样三维示意图
Fig. 1 Three-dimensional sketch map of sample (Unit: mm)

表 1 真空差压铸造工艺参数
Table 1 Technological parameters of vacuum counter-pressure casting

Sample No.	Vacuum degree/ kPa	Pressure difference/ kPa	Crystallization pressure/ kPa	Time of holding pressure/s
1	20	35	250	250
2	20	35	300	250
3	20	35	350	250
4	20	35	400	250
5	20	35	450	250

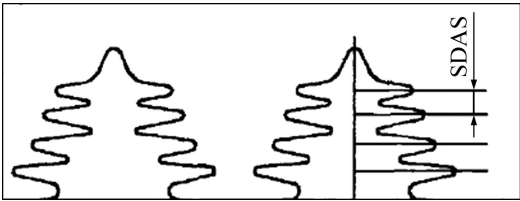


图 2 二次枝晶间距截线法
Fig. 2 Linear intercept method of secondary dendrite arm spacing

2 结果与分析

2.1 结晶压力对铝合金二次枝晶间距的影响

不同壁厚时, 真空差压铸造 ZL114A 合金试样的二次枝晶间距随结晶压力变化曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 对于相同壁厚的试样, 随着结晶压力的增大, 真空差压铸造铝合金二次枝晶间距减小。在结晶压力小于 350 kPa 时, 二次枝晶间距减小的趋势较平稳, 当结晶压力大于 350 kPa, 二次枝晶间距减小趋势明显。

真空差压铸造工艺采用真空条件下低压充型、高压下结晶凝固, 其特点之一是高压场一直贯穿于结晶凝固的全过程^[13-14]。压力使金属液通过凝固枝晶间的狭窄通道向补缩区流动的驱动作用, 称为挤滤渗流作用, 其示意图如图 4 所示。

真空差压铸造挤滤渗流能力可按式(1)计算^[12]:

$$\Delta G = \frac{K(p_c + \frac{2\sigma}{r} - p_s - p_g)}{\mu \Delta L} F \Delta \tau \quad (1)$$

式中: ΔG 为挤滤渗流的金属容量, m^3 ; p_c 为结晶压力, Pa; p_s 为金属液作用于挤滤渗流面上的静压力, Pa; p_g 为挤滤渗流层中枝晶间析出气体的压力, Pa; μ 为金属液的动力黏度, Pa·s; ΔL 为挤滤渗流深度, m; F 为挤滤渗流面积, m^2 ; $\Delta \tau$ 为挤滤渗流时间, s; K 为渗透系数, m^2 。

从式(1)可以看出, 真空差压铸造结晶压力 p_c 和液

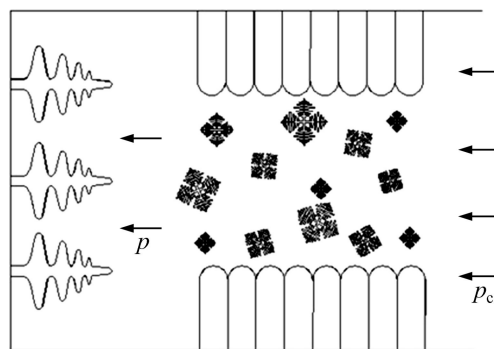


图 4 真空差压铸造液态金属在枝晶间挤滤渗流示意图

Fig. 4 Sketch figure of extrusion and infiltration between dendrites during vacuum counter-pressure casting molten metal

态金属在凝固时的表面张力引起的毛细压力是挤滤渗流作用的主要动力, 而金属液的静压力 p_s 和枝晶间析出气体的压力 p_g 是阻碍挤滤渗流作用的力。因此, 在真空差压铸造过程中, 当毛细压力、金属液的静压力 p_s 和枝晶间析出气体的压力 p_g 相同的情况下, 挤滤渗流作用的大小主要取决于结晶压力 p_c , 结晶压力 p_c 越大, 挤滤渗流作用就越强, 金属液就能够更顺利地通过凝固枝晶间的狭窄通道向补缩区流动。而且, 在挤滤渗流过程中, 即使枝晶连成骨架, 只要其强度低于挤滤渗流的压力, 枝晶就会发生塑性变形甚至会被液相冲刷^[15], 使游离晶粒增多, 枝晶细小。因此, 随着结晶压力的增大, 真空差压铸造铝合金二次枝晶间距减小。为了获得细小致密组织, 可以适当提高真空差压铸造结晶压力大小。

2.2 壁厚对铝合金二次枝晶间距的影响

在同一结晶压力下, 不同壁厚时差压铸造 ZL114A 合金的真空二次枝晶间距随壁厚的变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 在同一结晶压力下, 随着壁厚的减小, 铝合金二次枝晶间距减小, 当铸件壁厚小于 6 mm 时, 随着壁厚减小, 二次枝晶间距减小趋势明显, 而当壁厚大于 6 mm 时, 随着壁厚减小, 二次枝晶间距较小趋势趋于平稳。

根据 KIRKWOOD^[16]提出的枝晶粗化模型, 对二次枝晶间距与凝固时间的关系做了定量的数学分析, 如式(2)所示:

$$\lambda_2 = \beta t^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中: λ_2 为二次枝晶间距; t 为枝晶凝固时间; β 为常数。

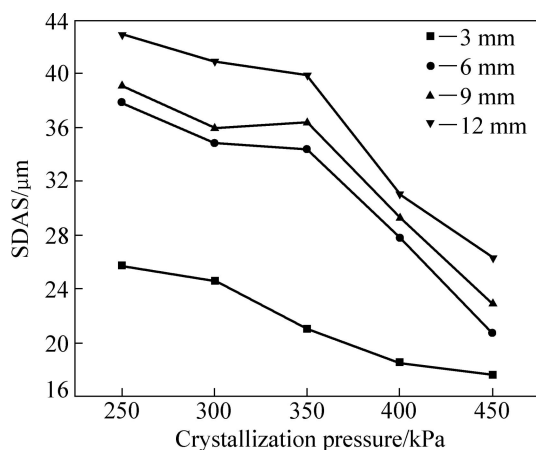


图 3 不同壁厚时差压铸造 AL114A 合金的真空二次枝晶间距随结晶压力变化曲线

Fig. 3 Changing curves of SADS with crystallization pressure for vacuum counter-pressure casting ZL114A alloys under different wall thickness

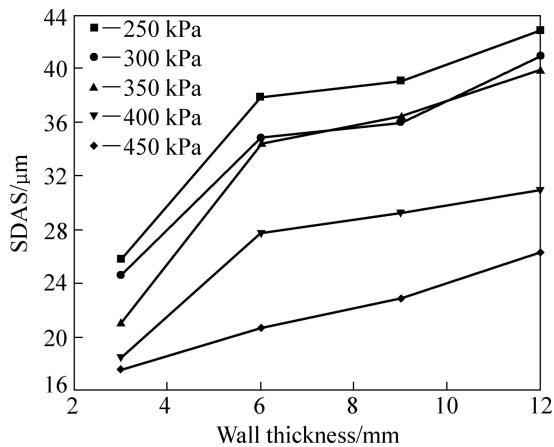


图5 不同结晶压力时差压铸造 ZL114A 合金的真空二次枝晶间距随壁厚变化曲线

Fig. 5 Changing curves of SADS with wall thickness for vacuum counter-pressure casting ZL114A alloys under different pressures

从式(2)可知, 二次枝晶间距直接依赖于合金的冷却速度或局部凝固时间。冷却速度越慢或局部凝固时间越短, 二次枝晶间距就越小。根据凝固过程的平方根定律:

$$d = K\sqrt{t} \quad (3)$$

式中: d 为壁厚大小; K 为凝固系数。

将式(3)代入式(2)可以得出:

$$\lambda_2 = \beta \left(\frac{d}{K} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

根据流体力学原理, 液态金属在枝晶间流动过程中都会存在沿程的压力损失。因此, 真空差压铸造液态金属在不同晶间处结晶压力是不同的。如图4所示的真空差压铸造液态金属在枝晶间挤滤渗流过程, 液态金属的沿程压力损失 Σp 为^[17]

$$\Sigma p = p_c - p_{(x)} = \frac{8v\mu x}{\delta^2} \quad (5)$$

$$p_{(x)} = p_c - \frac{8v\mu x}{\delta^2} \quad (6)$$

式中: $p_{(x)}$ 为晶间 x 处液相的压力, Pa; v 为液态金属流动速度, m/s; δ 为补缩通道大小, m。

液态金属流动速度 v 可表示为^[18]

$$v = \frac{\beta}{1-\beta} R \quad (7)$$

式中: R 为凝固速度, m/s。

根据凝固过程的平方根定律式(3), 可以得出凝固

速度为

$$R = \frac{1}{2} \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(6), 得到晶间 x 处的结晶压力为

$$p_{(x)} = p_c - \frac{8\beta\mu x}{(1-\beta)\delta^2} \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 晶间 x 处的结晶压力主要与真空差压铸造结晶压力 p_c 、凝固时间 t 等有关。在同一结晶压力 p_c 下, 对于同一晶间位置的结晶压力大小取决于凝固时间 t , 凝固时间 t 越短, 晶间 x 处的结晶压力就越大, 枝晶间的挤滤渗流作用就越强, 二次枝晶间距就越小。

因此, 从式(4)和(9)可以看出, 在同一结晶压力下, 壁厚越小, 铸件的冷却速度越快, 枝晶凝固时间越短, 同一晶间位置的结晶压力也越大, 二次枝晶间距也就越小。

2.3 二次枝晶间距与结晶压力和壁厚的关系

根据真空差压铸造 ZL114A 铝合金试样的二次枝晶间距的测试结果, 采用曲面拟合法, 拟合曲面如图6所示, 可以得出真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 与结晶压力 p_c 、壁厚 d 之间的关系, 如式(10)所示:

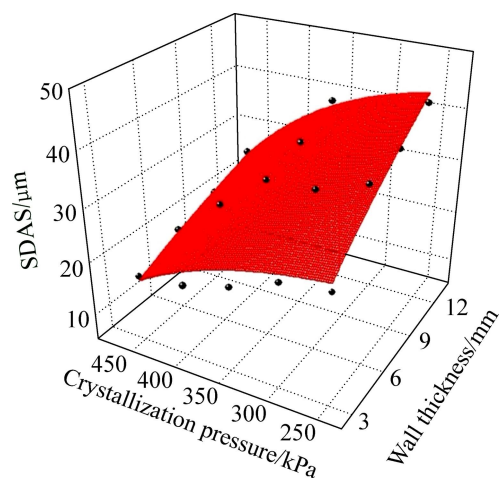


图6 真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 与结晶压力 p_c 和壁厚 d 的关系拟合图

Fig. 6 Fitting relationship among secondary dendrite arm spacing and crystallization pressure and wall thickness for vacuum counter-pressure casting ZL114A aluminum alloy

$$\lambda_2 = 16.4242 + 5.72555d^{\frac{2}{3}} - 1.35146 \times 10^{-10} p_c^4 - 6.97832 \times 10^{-11} d^{\frac{2}{3}} p_c^4 \quad (10)$$

从式(10)和图 6 可以看出,真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 与结晶压力 p_c 和壁厚 d 都有一定的关系,结晶压力 p_c 和壁厚 d 共同影响二次枝晶间距 λ_2 大小,当结晶压力越大、壁厚越小时,真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 越小;当结晶压力越小、壁厚越大时,真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 越大。当结晶压力一定时,真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 随着壁厚 d 的减小而减小;当壁厚一定时,真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 随着结晶压力 p_c 的增大而增大。当结晶压力小于 350 kPa 时,壁厚对真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距影响较大;当结晶压力大于 350 kPa 时,结晶压力对真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距影响较大。

3 结论

1) 在真空差压铸造工艺下,结晶压力对铝合金二次枝晶间距影响明显。对于相同壁厚的试样,随着结晶压力的增大,铝合金二次枝晶间距减小。在结晶压力小于 350 kPa 时,二次枝晶间距减小的趋势较平稳,当结晶压力大于 350 kPa,二次枝晶间距减小趋势明显。

2) 在同一结晶压力下,随着壁厚的减小,铝合金二次枝晶间距减小。当铸件壁厚小于 6 mm 时,随着壁厚减小,二次枝晶间距减小趋势明显,而当壁厚大于 6 mm 时,随着壁厚减小,二次枝晶间距较小趋势趋于平稳。

3) 建立了真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 与结晶压力 p_c 、壁厚 d 之间的关系为

$$\lambda_2 = 16.4242 + 5.72555d^{\frac{2}{3}} - 1.35146 \times 10^{-10} p_c^4 - 6.97832 \times 10^{-11} d^{\frac{2}{3}} p_c^4$$

真空差压铸造 ZL114A 铝合金二次枝晶间距 λ_2 与结晶压力 p_c 和壁厚 d 都有一定的关系,结晶压力 p_c 和壁厚 d 共同影响二次枝晶间距 λ_2 大小。当结晶压力小于 350 kPa 时,壁厚对二次枝晶间距影响较大;当结晶压力大于 350 kPa 时,结晶压力对二次枝晶间距影响较大。

REFERENCES

- [1] GRIFFITHS W D, KAWAI K. The effect of increased pressure on interfacial heat transfer in the aluminum gravity die casting process[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(9): 2330-2339.
- [2] 蒋文明, 樊自田, 刘德均. 真空低压消失模壳型铸造和消失模铸造铝合金组织和性能对比[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(1): 22-28.
JIANG Wen-ming, FAN Zi-tian, LIU De-jun. Comparison of microstructures and properties of aluminum alloy between expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure and lost foam casting[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(1): 22-28.
- [3] OTARAWANNA S, GOURLA C M, LAUKLI H I, DAHLE A K. Microstructure formation in AlSi4MgMn and AlMg5Si2Mn high-pressure die castings[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40: 1645-1659.
- [4] CBATSHJEB. 金属和合金在压力下结晶[M]. 张锦升, 罗守靖, 译. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987.
CBATSHJEB. Crystallization of metal and alloy under pressure[M]. ZHANG Jin-sheng, LUO Shou-jing, transl. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1987.
- [5] MOMCHILOV E. Influence of some technological parameters of counter pressure casting on the structural homogeneity and mechanical characteristics of aluminum alloy castings[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 1994, 2(4): 3-12.
- [6] 薛寒松, 李华基, 王勇勤. 薄壁件差压铸造的充型特点及影响因素[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2002, 25(10): 20-22.
XUE Han-song, LI Hua-ji, WANG Yong-qin. Characteristics of filling process and factors of differential-pressure cast for thin-wall castings[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2002, 25(10): 20-22.
- [7] KATZAROV I H, ARSOV Y B. Counter-pressure casting system eases aluminum pouring for high integrity components[J]. *Modern Casting*, 2004, 94(1): 56.
- [8] AKAD A T. Counter-pressure casting: The processes which occur during casting and crystallization[J]. *Foundry Trade Journal*, 1989, 18(10): 744-750.
- [9] 董秀琦, 王冬. 低压及差压铸造理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
DONG Xiu-qi, WANG Dong. Theory and practice of low pressure casting and counter-pressure casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [10] 严青松, 余欢, 魏伯康, 徐志峰, 蔡长春. 真空差压铸造工艺的凝固补缩特性与模型[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(6): 1051-1057.
YAN Qing-song, YU Huan, WEI Bo-kang, XU Zhi-feng, CAI Chang-chun. Solidification feeding behavior and model of

- vacuum counter-pressure casting technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(6): 1051–1057.
- [11] 严青松. 智能控制的薄壁铝合金铸件真空差压铸造工艺与理论[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- YAN Qing-song. Process and theory of vacuum counter-pressure casting thin-wall aluminum alloy castings based on intelligent control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [12] YAN Qing-song, YU Huan, XU Zhi-feng, XIONG Bo-wen, CAI Chang-chun. Effect of holding pressure on the microstructure of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 501: 352–357.
- [13] 董选普, 黄乃瑜, 樊自田. 真空差压铸造法工艺参数的研究[J]. 热加工工艺, 2003(5): 15–17.
- DONG Xuan-pu, HUANG Nai-yu, FAN Zi-tian. Study on filling mold of metallic liquid in vacuum differential pressure casting[J]. Hot Working Technology, 2003(5): 15–17.
- [14] YAN Qing-song, CAI Qi-zhou, WEI Bo-kang, YU Huan, YU Zi-rang. Simulation of fuzzy control systems for nonferrous alloy vacuum counter-pressure casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(4): 873–877.
- [15] KOVACHEVA R, BACHVAROV G, DAFINOVA R. Influence of the counter pressure casting conditions on the microstructural characteristics of AlSi7Mg castings[J]. Journal of Materials Science and Technology, 1996, 12(1): 42–56.
- [16] KIRKWOOD D H. Three-dimensional growth morphologies in diffusion-controlled channel growth[J]. Physical Review E, 1997(6): 7789–7792.
- [17] KUBO K, PEHLKE R. Mathematical modeling of porosity formation in solidification[J]. Metallurgical Transactions B, 1985, 16: 359–363.
- [18] LEE Y W. Modeling of feeding behavior of solidifying Al-7Si-0.3Mg alloy plate casting[J]. Metallurgical Transactions B, 1990, 21: 715–722.

(编辑 龙怀中)