

挤压铸件不同部位和壁厚的组织及溶质分布

张永冰¹ 吉泽升¹ 汪 胜¹ 胡茂良¹ 姜 博¹ 宋伟生²

(1.哈尔滨理工大学材料科学与工程学院; 2.哈尔滨吉星机械工程有限公司)

摘 要 研究了挤压铸造零件不同部位的微观组织和 Cu 含量,并讨论了壁厚对试样微观组织和 Cu 含量的影响,利用光学显微镜和直读光谱仪,观察和测量了零件各部位微观组织变化和溶质含量变化。结果表明,随着试样距内浇口距离(158、201、245、284 mm)依次增大,试样的晶粒变得粗大,晶粒尺寸由 18.35 μm 变为 39.85 μm。Cu 含量由表面的 1.73%~1.77% 增加到心部的 1.81%~1.87%,硬度(HV)由表面的 102.5~106 减小到心部的 96~99;壁厚越大(6、17、27.5 mm),心部的硬度(HV)越小,最小值为 96,晶粒变得粗大,尺寸为 45.22 μm,心部 Cu 含量增加;从试样表面至心部,Cu 含量呈增加趋势,由表面的 1.73%~1.75% 变为心部的 1.83%~1.85%,硬度呈减小趋势。

关键词 挤压铸造;不同部位;壁厚;Cu 含量;硬度

中图分类号 TG249.2;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure of Squeeze Castings at Different Position with Wall Thickness and Solute Distribution

Zhang Yongbing¹, Ji Zesheng¹, Wang Sheng¹, Hu Maoliang¹, Jiang Bo¹, Song Weisheng²

(1.School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology;

2.Harbin Jixing Mechanical Engineering Co., Ltd.)

Abstract: The microstructure and Cu content of the squeezing casting components in different positions and the influence of wall thickness on the microstructure of the specimen and Cu content was analyzed by optical microscope and spectrometer to observe and measure microstructure and solute content changes in the various parts. The results reveal that the grain size becomes coarse with the increase of distance of ingate distance (158, 201, 245 and 284 mm) which is changed from 18.35 μm to 39.85 μm. The content of Cu is increased from 1.73%~1.77% in the surface to 1.81%~1.87% at the center, and the hardness(HV) is decreased from 102.5~106 at the surface into 96~99 at the center. With increasing in wall thickness (6, 17, 27.5 mm), the central hardness value is decreased to 96 HV, and the grains become coarse to 45.22 μm accompanied with the increasing Cu content. From the surface to the center, the copper content is increased by 1.73%~1.75 to 1.83%~1.85%, and the hardness is decreased.

Key Words: Squeeze Casting, Different Position, Wall Thickness, Cu Content, Hardness

挤压铸件具有优异的力学性能、更细的晶粒尺寸和更均匀的显微组织^[1~3]。在挤压铸造过程中,固-液相区在挤压力作用下,发生强制补缩,从而消除铸件内部缩孔、缩松、气孔类铸造缺陷,并且增加了金属液的过冷度以及与模具接触界面的传热系数,以获得细小致密的铸件组织^[4~7],从而提高铸件品质和力学性能。由于金属液在充型过程中受到模具壁的激冷,在模具表面先凝固,形成一层薄的激冷层,在金属液充型过程中,激冷层

受到挤压力的作用而产生塑性变形,导致从内浇口处开始,挤压力逐渐减小。挤压力的变化和零件不同部位壁厚的不同,导致零件不同部位组织和溶质分布存在差异。目前关于挤压铸造工艺参数对零件的组织和溶质分布影响的研究报道很多^[8~12],但关于同一零件上不同部位和壁厚对铸件组织、溶质分布和性能的影响报道较少,因此研究挤压铸造承力件不同位置和壁厚的组织及溶质分布对其成分设计、性能评价,旨在为其应用提

收稿日期:2020-12-05;修改稿收到日期:2020-12-30
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB2006500)
第一作者简介:张永冰,男,1990 年出生,硕士研究生,哈尔滨(150040),E-mail:457859156@qq.com
通信作者:吉泽升,男,1962 年出生,教授,哈尔滨(150040),E-mail:jizesheng@hrbust.edu.cn
引用格式:张永冰,吉泽升,汪胜,等. 挤压铸件不同部位和壁厚的组织及溶质分布[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(6): 755-759.
ZHANG Y B, JI Z S, WANG S, et al. Microstructure of squeeze castings at different position with wall thickness and solute distribution[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6): 755-759.

供参考。

1 试验材料及方法

试验材料选用 ADC12 铝合金,在 KGPS160/500 中频感应炉中进行熔炼,熔炼温度为 $750\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $680\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下浇注,利用 SCH-350 挤压铸造机进行挤压铸造,用 M5000 直读光谱仪测试其化学成分,见表 1。挤压铸造零件见图 1。选择部位 1~6 作为组织和溶质分布的研究对象,其距内浇口的距离见表 2。选择壁厚为 17 mm 的部位 2、壁厚为 6 mm 的部位 5 和壁厚为 27.5 mm 部位 6 作为壁厚对组织和溶质分布影响的研究对象。

表 1 ADC12 合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of ADC12 alloy							%
ω_B							
Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Pb	Al
10.98	1.80	0.66	0.11	0.23	0.22	0.01	余量

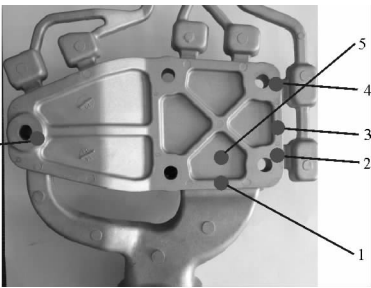


图 1 挤压铸件及取样部位示意图

Fig.1 Schematic digaram of squeezing casting parts and sampling locations

表 2 取样部位距内浇口距离

Tab.2 The distance between sample location and the ingate		
位置	壁厚/mm	距内浇口距离/mm
1	17.0	158
2	17.0	201
3	17.0	245
4	17.0	284
5	6.0	201
6	27.5	201

根据图 2,将试样平行于表面剖切,在每个试样上选 5 个区域,距试样定模表面距离为 $r=0、0.25L、0.5$

$L、0.75L、1L$,其中 L 为试样平均厚度,对试样进行抛光和磨光,采用体积分数为 1.5% 的 HF 腐蚀 10 s,利用 OLYMPUS-GX71-6230A 金相显微镜观察试样的微观组织,并采用 M5000 直读光谱议对合金成分进行分析,测定各试样由心部到表面 Cu 含量的分布,并绘制不同部位和不同壁厚的 Cu 含量曲线图,然后利用 HVS-50 维氏硬度计测定各试样由心部到表面的硬度变化,测定 5 点取平均值,并绘制不同部位和不同壁厚的硬度曲线。

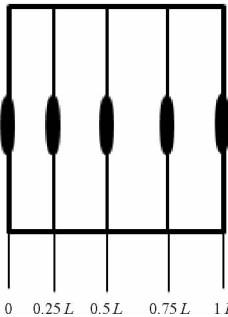


图 2 金相及成分试样制备方法示意图

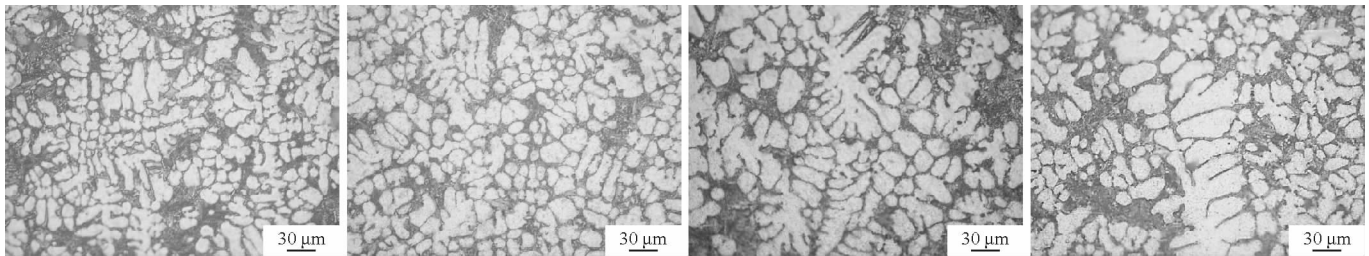
Fig.2 Schematic diagram of metallographic and composition specimen preparation

2 试验结果与分析

2.1 不同部位的微观组织和 Cu 含量

2.1.1 不同部位的微观组织

图 3 为不同部位试样心部的微观组织。可以看出,其组织由白色的 α -Al 相,黑色的共晶 Si 相组成。随着距内浇口距离增大,试样的晶粒粗化。金属液在充满型腔后在压力作用下凝固结晶,由于与本模具先接触部位过冷度较大,首先完成凝固,但压力仍作用在铸件上,与直接挤压铸造不同,此时零件表面只发生微量塑性变形。由于先凝固组织阻碍了压力的传递导致挤压力损失,即零件每个部位上的挤压力大小不同,且随着到内浇口距离的增大,挤压力逐渐减小。由图 1 可以看出,试样 1 离浇口最近,所以作用在试样 1 上的挤压力最大,其晶粒大小的分布规律由小到大依次是试样 1、试



(a) 试样 1 (b) 试样 2 (c) 试样 3 (d) 试样 4

图 3 不同部位心部的微观组织

Fig.3 Central microstructures at the different positions of the squeezing castings

样 2、试样 3、试样 4,晶粒尺寸由 18.35 μm 增大至 39.85 μm 。

对各点模具温度采用红外温度测温仪测量,其结果见表 3。结果表明,各点温度基本一致,因此可以假设金属液在同一外界条件下凝固。

表 3 各取样位置模具温度

Tab.3 Mould temperature at sampling position	
取样点	温度/℃
1	255
2	253
3	256
4	255

研究表明,改变合金上的挤压力,将引起其平衡结晶温度的变化^[12,13],并且有如下关系式:

$$\frac{dT_f}{dP} = \frac{T_f(V_S - V_L)}{\Delta H} \quad (1)$$

可以近似写成:

$$\Delta T = \frac{T_f(V_S - V_L)}{\Delta H} \Delta P \quad (2)$$

式中, P 为挤压力; V_S 、 V_L 为单位质量液相和固相的体积; T_f 为 $P = 1.1 \text{ MPa}$ 时的平衡温度; ΔT 为过冷度; ΔH 为凝固时焓变。

金属液凝固时的临界晶核半径 r_k 和临界形核功 ΔG^0 为^[14]:

$$r_k = \frac{2\sigma T_f}{L_m \Delta T} \quad (3)$$

$$\Delta G^0 = 32\sigma^3 \left[\frac{dT}{\sigma \Delta T (V_S - V_L) dP} \right]^2 \quad (4)$$

式中, L_m 为熔化潜热; ρ 为密度; σ 为表面张力。

ADC12 合金凝固时体积收缩,也就是 $V_S - V_L < 0$,由式(2)可知,当距离内浇口距离减小时,挤压力随之增大,使合金的平衡温度升高。在挤压铸造下,由于挤压力的作用,使合金的液相线温度升高,增加了合金的过冷度。由式(3)和式(4)可知,提高过冷度可以减小临界晶核半径和临界形核功,从而引起结晶核心数量的增加,结晶核心数目越多,则晶粒越细小。

2.1.2 不同部位 Cu 含量

图 4 为不同部位试样由表面到心部 Cu 含量的变化。可以看出,从铸件表面到心部,Cu 含量呈增加趋势,由表面的 1.73%~1.77% 增加到心部的 1.81%~1.87%。这是因为 ADC12 合金为近共晶型合金,其结晶温度范围窄,凝固平衡分配系数 $k_0 < 1$,凝固方式表现为层状凝固。在挤压铸造过程中,金属液由外到内凝固结晶形成枝晶骨架, Al_2Cu 相凝固点低于共晶相和 α 相的凝固点,铸件外侧先凝固的固相区在挤压力的作用下发生微量塑性变形, Al_2Cu 相由枝晶间的金属液沿着

枝晶通道被强行挤向铸件内侧。

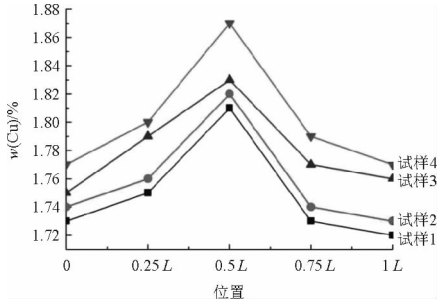


图 4 由表面到心部 Cu 含量

Fig.4 Copper content in the sample from the surface to the center

胡汉超^[12]研究表明,铸件表面枝晶内溶质分布的公式为:

$$C_s^* = k_0 C_0 (1 - f_s)^{\frac{k_0 - 1}{q}} \quad (5)$$

式中, C_s^* 为固相溶质浓度; k_0 为平衡分配系数; C_0 为初始溶质浓度; f_s 为固相率; $q = (1 - \beta)(1 - \frac{\gamma}{u})$; $u = \frac{\epsilon}{T}$; β 为合金的凝固收缩率; u 为凝固速度; γ 为金属液流动速度; ϵ 为冷却速度; T 为温度梯度。

因此,对于某个区域内的溶质平均浓度可表示为:

$$\bar{C}_s = \int_0^1 C_s^* df_s = \int_0^1 k_0 C_0 (1 - f_s)^{\frac{k_0 - 1}{q}} df_s = k_0 C_0 \frac{q}{k_0 - 1 + q} \quad (6)$$

简化式(6)为:

$$\bar{C}_s = k_0 C_0 \left(1 + \frac{1 - k_0}{k_0 - 1 + q} \right) \quad (7)$$

在某一局部区域内,根据加权公式有:

$$w(S) \bar{C}_s + w(L) \bar{C}_L = C_0 \quad (8)$$

式中, $w(S)$ 是固相质量分数; $w(L)$ 为液相质量分数,根据式(8)可以求出固态周围液相中溶质元素的含量为:

$$\bar{C}_L = \frac{C_0 - w(S) \bar{C}_s}{w(L)} \quad (9)$$

由式(5)可以看出,区域内溶质元素的含量是由 q 决定的,ADC12 铝合金的平衡分配系数 $k_0 < 1$,因此随着 q 值增大, $\bar{C}_s$ 随之减小。模具表面温度低,导致冷却速度 ϵ 增大,从而 q 增大, $\bar{C}_s$ 减小。由式(7)可以看出, $\bar{C}_s$ 减小, $\bar{C}_L$ 增大,也就是液相中溶质含量比固相中高,所以沿着枝晶通道被挤向心部的金属液溶质含量高,从而导致心部 Cu 含量高,表面 Cu 含量低^[15]。

图 4 为 ADC 铝合金挤压件由表面到心部的 Cu 含量。可以看出,试样 1 到试样 4 随着距内浇口距离增大,心部 Cu 含量逐渐由 1.87% 降低到 1.81%。在零件

充型凝固过程中,由于金属液由外向内凝固结晶形成枝晶骨架,铸件外侧先凝固的固相区在挤压力的作用下发生塑性变形,这导致在充型的过程中挤压力有损失,即零件每个部位上的挤压力大小不同,且随着到内浇口距离增大,挤压力逐渐减小。根据 Darcy 定律^[16,17],枝晶间液体金属的流动速度(v)与压力梯度呈线性关系,关系式为:

$$v = \frac{K}{\eta f_L} [\nabla (P + \rho_L g)] \quad (10)$$

式中, K 为渗透系数, $K = a f_L^2$,其取决于枝晶间隙大小,其中 a 为与枝晶间隙和结构有关的常数; f_L 为液相的体积分数; η 为液相的粘度; P 为三维空间中的压力梯度; g 为重力加速度; ρ_L 为液体的密度。

当考虑到一维流动及液体的均质性,式(10)变为:

$$v_x = -\frac{K}{\eta f_L} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{v f_L}{\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad (11)$$

显然金属流动速度和动力粘度、液相体积分数和压力梯度有关,在挤压铸造过程中挤压力 P 远大于凝固收缩造成的负压,由式(11)可以看出,外加压力愈大,则枝晶间液体流动速度越快,铸件心部的 Cu 含量增大。

2.1.3 不同部位的硬度值

图 5 为不同部位试样由表面到心部的硬度。可以看出,从试样表面到心部,硬度呈减小的趋势,硬度(HV)由表面的102.5~106变为心部的96~99。由于

铸件表面与模具壁接触,冷却速度增大,结晶完成所需要的时间短,溶质再分配起到的作用很小,提高了合金的硬度,而心部形成的树枝晶较为粗大,所以心部硬度较低。

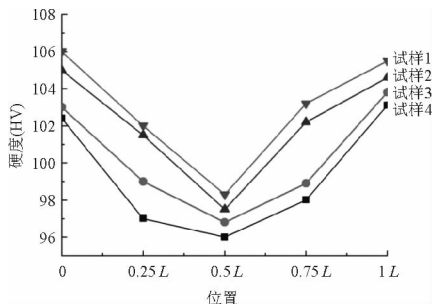


图 5 试样不同位置的硬度值

Fig.5 Hardness of samples at different position

从图 5 还可以看出,试样 1 到试样 4 随着到内浇口距离的增加,硬度值呈下降趋势。由于到内浇口距离增大,挤压力减小,金属液的过冷度也减小,从而导致金属液的冷却速度减小,导致在金属液凝固时中心部形成的缩松缺陷增多,因此合金的心部硬度减小。

2.2 壁厚对组织和 Cu 含量的影响

2.2.1 壁厚对微观组织的影响

图 6 为不同壁厚试样心部的显微组织。可以看出,试样 5 的晶粒最细小,试样 6 的晶粒比较粗大。经测算得出,随着壁厚增加,晶粒尺寸分别为18.25、27.38和

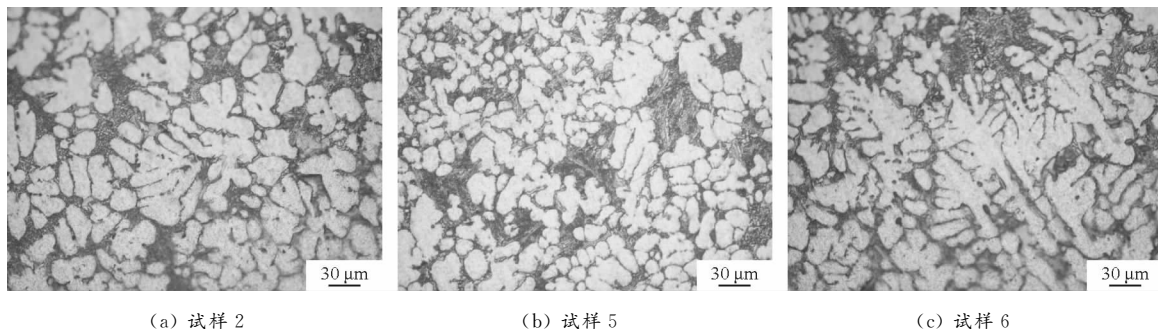


图 6 不同壁厚试样显微组织

Fig.6 Microstructures of the squeezing castings with different wall thickness

45.22 μm 。试样 2、试样 5 和试样 6 离浇道的距离都为 201 mm,所以在充型过程中,到达这 3 个位置的挤压力相同,但壁厚依次是 27.5 mm(试样 6)、17 mm(试样 2)、6 mm(试样 5),壁薄的试样在凝固过程中冷却速度快,导致过冷度增大。根据式(3)和式(4)的分析,提高过冷度可以减小临界晶核半径和临界形核功,从而带来结晶核心数量的增加。结晶核心数目越多,则晶粒越细小,所以试样 5 的晶粒最细小。

2.2.2 壁厚对 Cu 含量的影响

图 7 为不同壁厚试样表面到心部的 Cu 含量。可

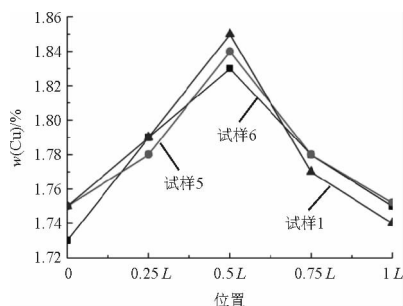


图 7 不同壁厚试样不同位置 Cu 含量

Fig.7 Copper content in the sample with different wall thickness at different positions

以看出,随着壁厚增加,试样的心部 Cu 含量也随之增加。壁厚的大小决定着合金液的冷却速度,壁薄的试样冷却速度快,根据渗透系数关系可知,冷却速度快,枝晶间隙小,因此渗透系数小,金属液的流动速度降低,从而富 Cu 金属液流到心部的较少,所以壁厚的试样心部 Cu 含量高。

2.2.3 壁厚对试样硬度的影响

图 8 为试样不同位置的硬度变化。可以看出,随着壁厚增加,试样的硬度降低,其中试样 6 硬度(HV)最低,为 97。这是因为试样壁薄,金属液的冷却速度快,其固液界面前方合金液中的温度梯度较大,ADC12 合金在相图上液相线和固相线间隔较小,导致其凝固方式为层状凝固特征。在凝固过程中,铸件断面上的凝固区域很窄,靠近凝固前沿的合金液温度低,首先在其上凝固。已凝固的晶体中溶质摩尔分数比平均含量低,多余的溶质原子被排斥在周围的液相中,使这部分液相的凝固点降低,晶粒生长暂时停止。液相的温度降低,靠近固相的合金液又在前沿结晶,凝固继续进行。凝固区域越窄,发展为柱状晶的趋势越大。层状凝固时其凝固前沿直接与合金液接触,当合金液凝固而发生体积收缩时,可以不断得到合金液的补充,所以产生分散性缩孔的倾向小,壁薄的试样硬度高。

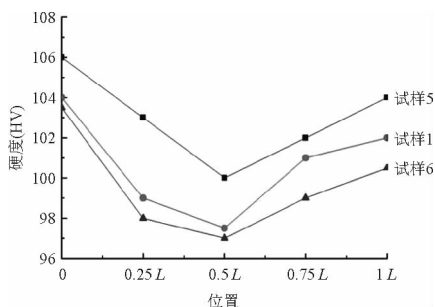


图 8 试样不同位置的硬度

Fig.8 Hardness of the sample at different positions

3 结 论

(1)ADC12 合金挤压力随距内浇口距离的增大而减小,过冷度减小,晶粒粗大,晶粒尺寸由近内浇口位置的 $18.35 \mu\text{m}$ 增加至远内浇口位置的 $39.85 \mu\text{m}$ 。

(2)挤压 ADC12 合金铸件,随着到内浇口距离增大,挤压力减小,试样心部的 Cu 含量减小,由表面的 $1.73\% \sim 1.77\%$ 转变为心部的 $1.81\% \sim 1.87\%$ 。

(3)挤压 ADC12 合金铸件,由于 Al_2Cu 相通道偏析的作用,随着距试样表面距离增大,试样的 Cu 含量增大,而硬度值减小。试样 4 心部最大 Cu 含量为 1.87% ,硬度(HV)为 96。

(4)挤压 ADC12 合金铸件,随着壁厚增大,试样冷

却速度减小,试样晶粒尺寸由 $18.25 \mu\text{m}$ 增加为 $45.22 \mu\text{m}$,心部 Cu 含量随之增大,而心部硬度值减小,其中最厚处最低,硬度(HV)为 97。

参 考 文 献

- [1] 齐丕骧. 挤压铸造合金材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2004, 23(12): 63-66.
- [2] BARRESI J, CHEN Z, DAVIDSON C J. Casting of aluminium alloy components[J]. Mater. Sci. Forum, 1996(20): 53-70.
- [3] BALAN P, PILLAI K R, SATYANARAYANA M G. Structure and properties of squeeze-cast eutectic Al-Si plates[J]. Int. Cast Metals Res., 1993, 6(3): 131-136.
- [4] 李元元, 郭国文, 张卫文, 等. 合金元素对 Al-Cu 合金热裂倾向的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 791-795.
- [5] DAO V L, ZHAO S D, LIN W J, et al. Effect of process parameters on microstructure and mechanical properties in AlSi9Mg connecting-rod fabricated by semi-solid squeeze casting[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A 558: 95-102.
- [6] GALLERNEAUL T M, DURRANT G, CANTORB A. The squeeze casting of hypoeutectic binary Al-Cu[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, A27(12): 4 121-4 132.
- [7] 石锦翌, 姚辉, 陈名海, 等. Mg 含量对 ADC12 铝合金组织和性能的影响[J]. 热处理学报, 2011, 26(4): 48-54.
- [8] 刘俊明. 层状共晶定向凝固[J]. 物理学报, 1992, 41(5): 862-870.
- [9] ZEREN M, KARAKULAK E, GUMUS S C. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-Cu alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(4): 1 698-1 702.
- [10] 甘耀强, 张大童, 张卫文, 等. 基于田口方法的挤压铸造 Al5Cu 0.4 Mn 合金的宏观偏析[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3 387-3 397.
- [11] 宋鸿斌, 包春玲, 于宝义, 等. Al-Cu 合金压铸工艺研究[J]. 铸造技术, 2006, 26(1): 15-20.
- [12] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [13] 李玉胜, 瞿虎, 闫卫平, 等. ZL205A 合金壳体铸件线性偏析缺陷形成机理研究[J]. 铸造, 2006, 55(1): 170-173.
- [14] 张克武, 赵海东, 欧阳晓贤, 等. 不同挤压力下凝固的 Al-Si-Cu-T4 的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(4): 625-632.
- [15] 张会. Al-Si 合金挤压铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(12): 1 121-1 124.
- [16] SUN Z Z, HU H, NIU X P. Determination of heat transfer coefficients by extrapolation and numerical inverse methods in squeeze casting of magnesium alloy AM60[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 1 432-1 440.
- [17] GOH C S, SOH K S, OON P H, et al. Effect of squeeze casting parameters on the mechanical properties of AZ91-Ca Mg alloys[J]. Materials & Design, 2010, 31: 50-53.

(编辑: 张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com