

冷却速度对复杂铝合金铸件组织的影响

康永飞, 李 浩, 白朴存, 崔晓明

(内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要: 研究了复杂铝合金铸件壁厚和局部放置冷铁对铸件冷却速度的影响, 以及冷铁的放置对铸件中 α -Al二次枝晶、共晶硅和富铁相的影响。结果表明, 放置冷铁可以明显提高冷却速度, 壁厚越小, 效果越好; 冷铁的放置使合金 α -Al二次枝晶细小, 粗大的片层状共晶硅变为较小的椭圆状; Mn元素与冷铁共同作用促使形成形态较小的树枝状 α -Fe相。若冷却速度过大, 富铁相为细小的针状 β -Fe相。

关键词: 冷却速度; α -Al二次枝晶; 共晶硅; 富铁相

作者简介:

康永飞(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为高铁大型复杂铝合金结构制备与产业化。电话:

18548114573, E-mail:

1039924715@qq.com

通讯作者:

白朴存, 男, 教授, 博士生导师。电话: 0471-6577053, E-mail: pcbai@imut.edu.cn

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

01-0040-06

基金项目:

内蒙古自治区科技重大专项(RZ1800008226);

内蒙古科技计划项目(RZ1800008229)。

收稿日期:

2019-07-08 收到初稿,

2019-09-08 收到修订稿。

铝合金作为一种轻量化材料在各个领域都有应用, 其中以ZL101为代表的Al-Si系合金如今被越来越多地应用于汽车、高速铁路机车等加工制造领域, 例如机车发动机缸体、刹车片和其他关键部件^[1-3]。在铝硅合金中, α -Al二次枝晶的大小、(α -Al+Si)共晶组织的形态以及富铁相的形态对铸件性能都有不同程度的影响^[4]。在铝合金铸造过程中, 为了改变其组织形态, 通常通过添加P、Sr、Ti、Na和RE等元素来进行变质, 这种方法虽然可以起到较好的效果, 但是对于企业生产来说成本较高^[5]。铸造过程中铸件的冷却速度对于各个组织的影响尤为明显, 冷却速度越大, 组织越细小, 第二相的形态也细小。Mn元素是作为一种中和剂来改善富铁相的形态。有研究表明, 中和剂对富铁相的作用除了添加量和种类的影响, 与铸件的冷却速度也有密切的联系^[6-8]。而Mn元素作为ZL101合金中的元素, 改善富铁相几乎不需要什么成本, 只通过调控冷却速度就可以改善ZL101合金中的富铁相。

本研究针对复杂ZL101合金铸件, 通过在铸件中放置冷铁来控制其冷却速度, 从而改善组织, 提高性能, 为实际生产提供指导。

1 试样制备与方法

本试验铸件所采用原材料是ZL101铝合金。用石墨坩埚在电阻炉中进行ZL101铝锭熔炼, 熔炼温度为740℃, 待铝锭完全熔化后加入Al-10%Sr中间合金进行变质处理, 变质温度740℃, 变质时间30 min。变质完成后进行吹氮精炼, 待温度降到700℃后静置2 min, 搅拌撇渣后浇入砂型型腔。浇注后的合金主要成分(实测值)见表1。

铸件模型如图1所示, 该铸件尺寸大致为180 mm×160 mm×260 mm, 质量约为3.8 kg。铸造完成后选取铸件关键部位切取10 mm×10 mm的试样进行组织观察, 试样机械抛光后, 选择Keller试剂进行腐蚀, 借助S-3400N型扫描电镜观察分析其组织形貌。

为了更好地掌握铸件凝固冷却过程对铸件的影响, 本试验进行浇注的同时采用铸造模拟软件Pro Cast对图中A、B、C、D区域壁厚中间位置在凝固冷却过程的冷却速度进行模拟, 模拟使用的铝合金主要参数如表2所示。其中A、C为放置冷铁部位, B、D为正常凝固冷却部位。A和C部位放置的冷铁尺寸如图2所示, A、B、C、D四处的壁厚分别为10 mm、16 mm、29 mm和29 mm。

2 结果与讨论

2.1 冷却凝固曲线

铸件在冷却凝固过程中, A、B、C、D区域的凝固冷却曲线如图3所示。从图中可以看出, 冷却曲线大致分为三个阶段: 液相区、糊状区和固相区。浇注初期, 由于金属液与砂型温差较大, 液相区温度出现急剧下降, 此时冷却速度最大; 在糊状区, 随着温度的下降, 金属液凝固释放结晶潜热, 抵消了散热, 温度下降较慢, 冷却速度也随之降低; 进入固相区后, 可以看到凝固冷却曲线出现台阶, 某些位置还有不同程度的温度升高, 这是由于砂型散热较慢, 随着砂型温度的升高, 结晶潜热不能有效释放, 温度上升; 当温度进一步下降, 相变结束, 金属液完全凝固, 此时无结晶潜热释放, 铸件与砂型温度缓慢降低, 且冷却速度基本不变, 趋于平稳^[9]。

A、B、C、D四区域在凝固过程中三个阶段的平均冷却速度, 如图4所示。从图4中可以看出, 合金液在液相区冷却速度较大, 其中A部位冷却速度最大, 达到了15.0 °C/s左右, 而D部位冷却速度最小为5.7 °C/s左右。由于A部位壁厚只有10 mm, 金属液散热较快, 急冷效果较大, 冷铁的放置进一步增大了急冷效果, 所以此时合金液冷却速度最大; C和D部位的壁厚都为29 mm, C部位放置有冷铁, 相较于D部位冷却速度增大了2 °C/s左右。随着温度的降低, 合金液与砂型的温差减小, 且合金液释放结晶潜热使冷却速度降低, 糊状区A部位由于壁厚较小且有冷铁的置入, 相较于B、

C、D三个部位冷却速度较大, 为2 °C/s, D部位最小为0.45 °C/s, B和C部位的冷却速度此时与D较为接近。C部位虽然也有冷铁, 但是壁厚较厚, 对合金冷却的效果开始减小。温度进一步降低, 合金液在固相区完全凝固, 砂型与合金的温度此时几乎一样, 随空气缓慢降低, A、B、C、D四区域的冷却速度此时最低, 且几乎一致, 为0.1 °C/s左右。总之, 冷铁和壁厚的同时作用, 能够使冷却速度有较为明显的增大, 能够进一步使合金的组织得到改善。

表1 合金化学成分
Table 1 Chemical composition of alloy $w_B/\%$

Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Sr	Al
6.36	0.21	0.29	0.16	0.11	0.024	0.02	余量

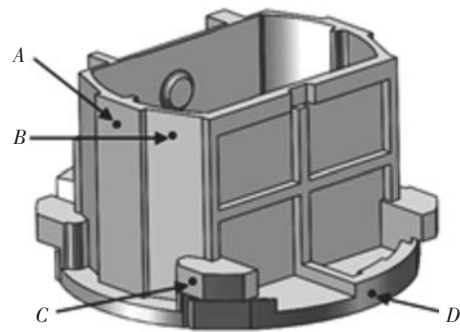
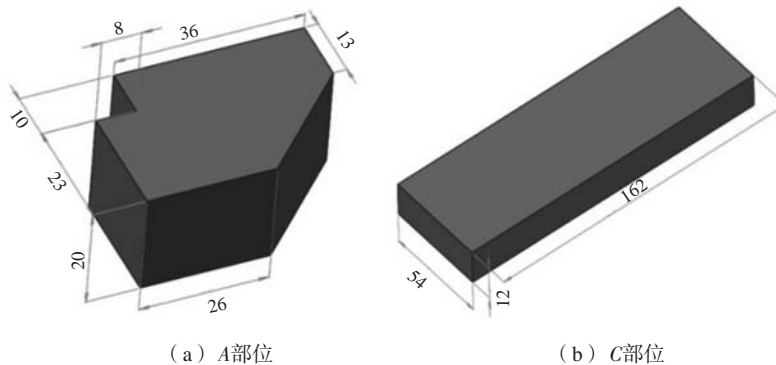


图1 铸件模型
Fig. 1 Casting model

表2 模拟用ZL101铝合金主要物性参数
Table 2 Main physical properties of ZL101 aluminum alloy used for simulation

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	胚料温度/K	模具温度/K	热容/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	潜热/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	液相线温度/°C	固相线温度/°C
2 588	973	273	0.96	174	413	616	556



(a) A部位 (b) C部位

图2 A、C部位冷铁尺寸

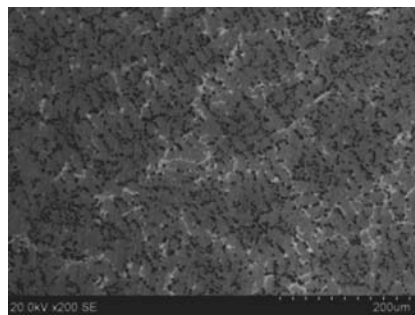
Fig. 2 Size of chills at both local areas of A and C

2.2 凝固组织

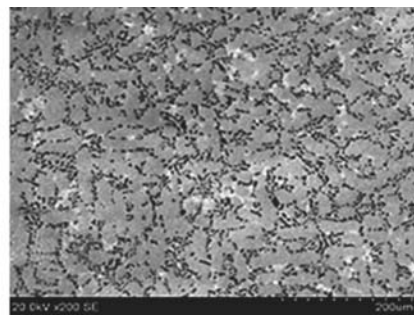
铝合金凝固时,枝晶经历了形成、生长和粗化的过程。当铝合金液温度降低到液相线温度时,铝合金发生了形核、铝枝晶生长,且铝枝晶向着温度梯度的方向择优生长。在温度梯度较小时,铝枝晶发生随机生长,之后铝枝晶会逐渐生长粗化。当温度到达固相线温度后,铝枝晶逐渐停止生长^[10-11]。可以看出,铝枝晶的生长主要在凝固阶段形成,因此,冷却速度作为合金凝固过程中的一个重要参数,对凝固组织的形成极其重要。随着冷却速度的提高,金属液可以获得较大的过冷度。根据形核理论,过冷度越大形核率越高,从而可以极大地细化合金组织。在ZL101中,凝固组织主要由 α -Al、(α -Al+Si)共晶、富铁相及少量的 Mg_2Si 相组成。

2.2.1 α -Al二次枝晶

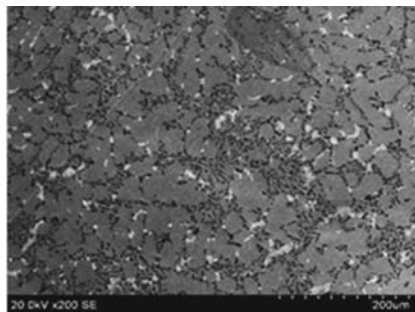
铸件A、B、C、D区域的SEM照片如图5所示。由图5可以看出,四个部位组织致密,无缩松、缩孔等较大的缺陷出现,壁厚较大且置入冷铁的部位冷却速度较大,过冷度也较大,初生 α -Al的二次枝晶间距较小。表3是通过截线法计算的铸件壁厚与 α -Al的二次枝晶间距关系。从图中可以看出,壁厚增加, α -Al的二次枝晶间距随之增大,有冷铁部位比无冷铁部位 α -Al的二次枝晶间距要大。在壁厚都为29 mm的部位,冷铁的置入使 α -Al的二次枝晶间距由33 μm 增加到97 μm ,细化效果明显。壁厚较小时,冷铁的置入对于 α -Al的二次枝晶间距细化效果较弱。



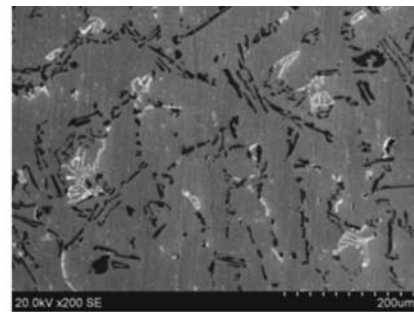
(a) A区域



(b) B区域



(c) C区域



(d) D区域

图5 铸件A、B、C、D四个区域的SEM照片

Fig. 5 SEM images of castings at four local areas of A, B, C and D

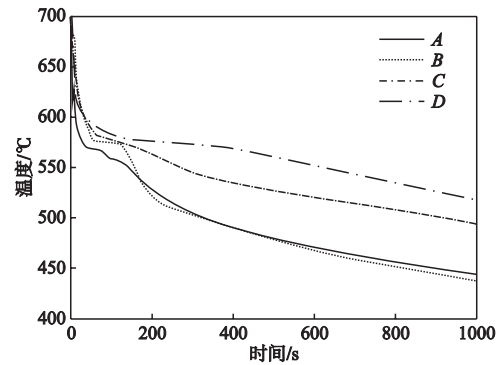


图3 铸件A、B、C、D区域凝固冷却曲线

Fig. 3 Solidification cooling curves of castings at four local areas of A, B, C and D

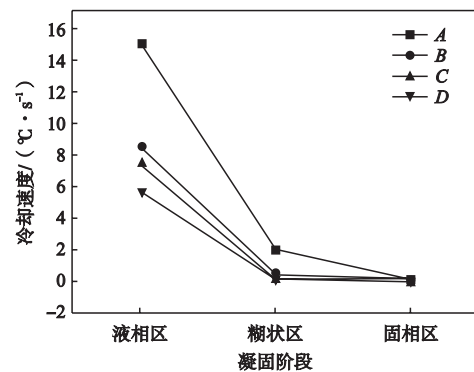


图4 铸件四区域凝固冷却过程中的冷却速度

Fig. 4 Cooling rate of four local areas during solidification process of casting

2.2.2 共晶硅

冷却速度的提高能够显著降低初生 α -Al的二次枝晶间距,而(α -Al+Si)共晶形成于初生 α -Al枝晶间,所以提高冷却速度也能抑制(α -Al+Si)共晶的生长,进而对共晶硅的尺寸、形貌有一定的影响^[12-13]。

铸件A、B、C、D四个区域的共晶硅显微组织见图6。从图中可以看出,A、B、C部位大部分组织为较细的短棒状和球状组织,且在B、C部位细小的短棒状组织比A部位相比较多,A部位共晶硅组织多为较小的椭圆状组织,D部位合金中的共晶硅尺寸最大,为厚大的片层状组织。A部位共晶硅分布较为均匀,几乎没有发生聚集现象,B、C、D部位共晶硅发生了聚集且分布不均匀。铸件中共晶硅组织产生这种差异的原因是:随着冷却速度的增加,合金凝固时间减小,液相中的硅原子扩散速度减慢,硅原子来不及向共晶硅有利的形核位置扩散,导致共晶硅形成较粗大的组织^[3];此外在凝固结束后, α -Al中过饱和的硅原子随着过冷度的降低发生扩散,但扩散速度较小,从而在晶界处产生聚集的现象。随着冷却速度的提高, α -Al中过饱和的硅原子在较大的过冷度下聚集受到抑制,从而导致共晶硅形成细小的组织。所以,在铸件关键部位放置冷铁提高冷却速度可以较好地细化共晶硅,从而提高铸件

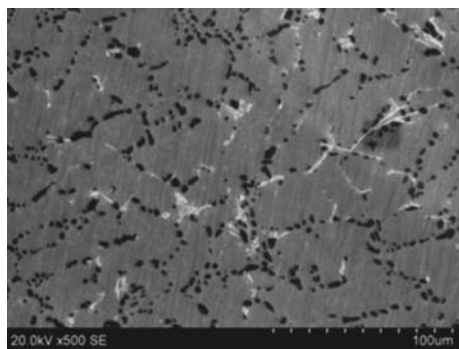
表3 铸件A、B、C、D点的 α -Al二次枝晶间距
Table 3 α -Al secondary dendrite spacing of castings at points A, B, C and D

铸件部位	壁厚/mm	枝晶间距/ μm
A	10	19
B	16	30
C	29	33
D	29	97

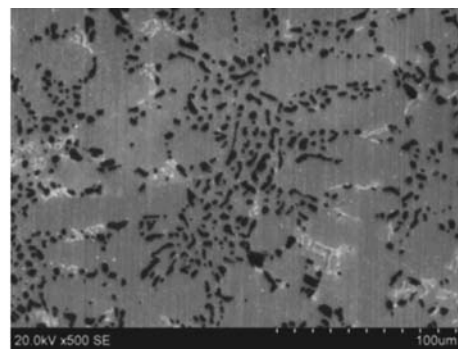
的性能。

2.2.3 富铁相

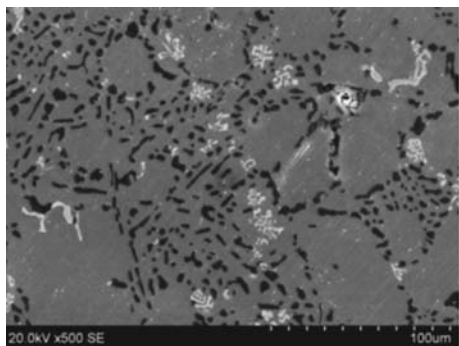
Fe元素是铝合金中最为常见的杂质元素,通常情况下在铝合金中以第二相的形式存在,与Mn、Cu等元素形成多元富铁化合物,富铁化合物的形态大致分为两类,即 α -Fe相和 β -Fe相。其中 α -Fe相形态丰富,有汉字状、树枝状和 π 状等,基本对基体无不利影响,通常作为基体的强化相出现, β -Fe相以针状分布在晶界中,对基体产生割裂作用,对合金的力学性能不利^[14-15]。而影响铝合金中富铁相形态的因素很多,其中Mn等具有中合作用的元素对富铁相的形态影响极为重要,但是加入Mn元素的铝合金中富铁相在不同冷却速度下形态也不相同。



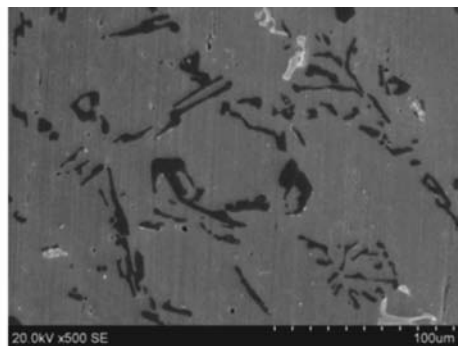
(a) A区域



(b) B区域



(c) C区域



(d) D区域

图6 铸件A、B、C、D区域的共晶组织

Fig. 6 Eutectic structure of castings at four local areas of A, B, C and D

铸件A、B、C、D区域的富铁相SEM照片如图7所示。从图中可以看出A、B、C、D四个部位中富铁相在合金晶界上分布，且分布不均匀。其中A部位富铁相为细小的针状 β -Fe相，并且出现了少量的块状 α -Fe相，D部位富铁相为粗大的不规则汉字状 α -Fe相，B、C部位富铁相也为 α -Fe相，呈相对细小的树枝状。呈现这种情况的原因是，杂质Mn元素置换了Fe元素，降低了 β -Fe相的生长优势，从而促进了粗大 α -Fe相的形

成。虽然Mn元素改变了铸件大部分的富铁相形态，但是由于冷却速度的不同，针状 β -Fe相也不能完全转变为 α -Fe相，冷却速度越快，Mn元素对于改善富铁相形态的作用就越小^[12]。虽然Mn元素能够改变富铁相的形态，但是粗大的富铁相会降低铸件的塑性。在B、C两部位， α -Fe相尺寸较小，这是冷却速度较快的结果，C部位壁厚较厚，冷铁的置入可以很明显地细化铸件中的富铁相。

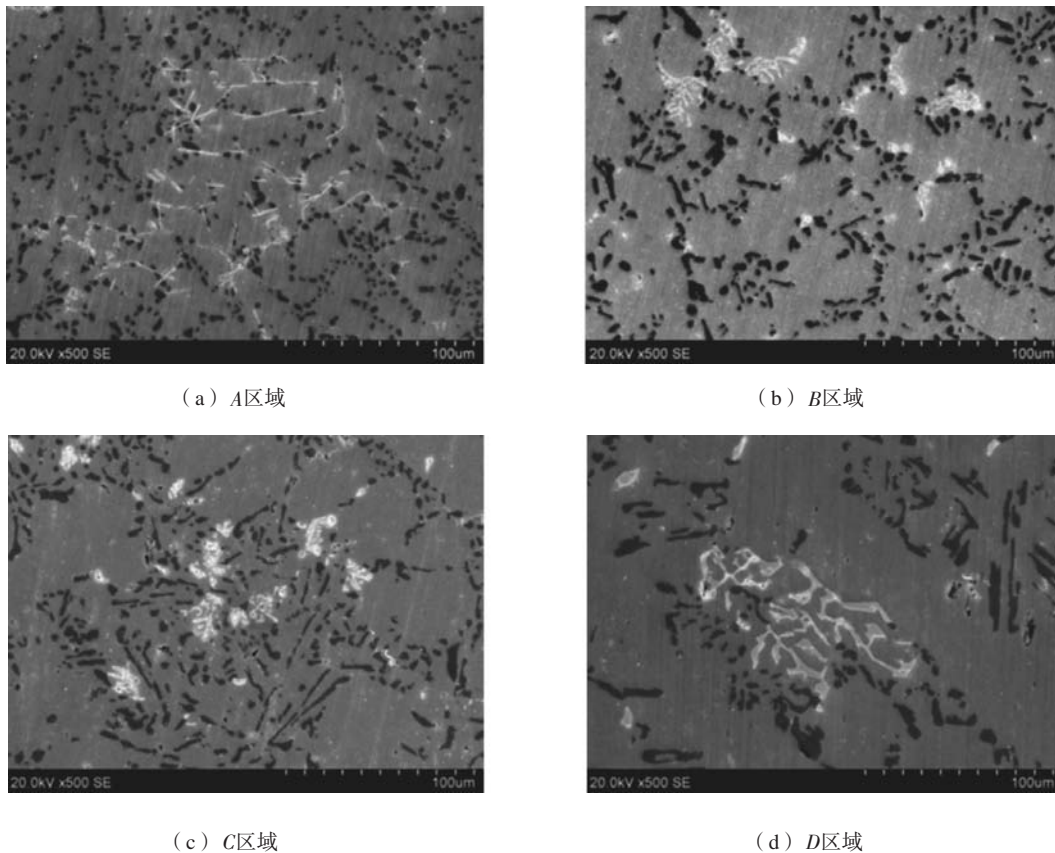


图7 铸件A、B、C、D四个区域的富铁相形貌
Fig. 7 Morphology of iron-rich phase in castings at four local areas of A, B, C and D

3 结论

(1) 在ZL101合金铸造中，放置冷铁能够获得较大的冷却速度，且铸件壁厚越小，效果越好。

(2) 放置冷铁，在提高冷却速度的同时，可以改善铸件微观组织。壁厚较大时，冷铁的置入能够明显

地细化 α -Al二次枝晶，共晶硅形貌由粗大的片层状转变为短棒状，最终变为较小的椭圆状。

(3) Mn元素改变了合金中富铁相的形态，且冷铁的置入，促进形成尺寸较小的 α -Fe相。若冷却速度太大，形成的富铁相几乎全为细小的针状 β -Fe相。

参考文献:

- [1] 王锋, 迟长志, 台立民, 等. 铝硅合金变质处理研究现状 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (11): 9-10.
- [2] 张洪峰, 田光辉, 熊运昌, 等. 铝硅合金铸造新工艺的研究与应用 [J]. 铸造, 2008 (9): 892-894.
- [3] 郑亚虹, 王自东. 复杂薄壁精密铝合金铸件铸造技术进展 [J]. 铸造, 2010, 59 (8): 796-799.
- [4] 张佳虹, 邢书明. Al-Si合金变质元素及其交互作用 [J]. 材料导报, 2018, 32 (11): 1870-1877.
- [5] 江峻, 黄诗鑫, 王连登, 等. 冷却速率对Al-20%Si合金Si相形貌及性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2019, 33 (4): 291-298.
- [6] 曾渝. 微量Mn及均匀化工艺对Al-Mg-Si合金铸锭微观组织的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (5): 18-21.
- [7] 李泽, 刘景顺, 林晓旭, 等. Al-2%Fe合金凝固冷却曲线监测及其微观组织研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (3): 87-89.
- [8] 樊振中, 宋长福, 厉沙沙, 等. ZL114A基座铸件铸造工艺设计与力学性能研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (1): 1-5.
- [9] LI J H, ZARIF M Z, ALBU M, et al. Nucleation kinetics of entrained eutectic Si in Al-5Si alloys [J]. Acta Materialia, 2014, 72 (3): 80-98.
- [10] 李悦, 叶兵, 蒋海燕, 等. 过共晶铝硅合金中初生相细化的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2017, 41 (10): 1-6.
- [11] 周鹏飞. Al-Si合金共晶形核与生长机制研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (23): 94-97.
- [12] 刘杰. 铝硅合金细化处理的研究进展 [J]. 矿冶工程, 2011, 31 (2): 114-116.
- [13] ESHAGHI A, GHASEMI H M, RASSIZADEHGHANI J. Effect of heat treatment on microstructure and wear behavior of Al-Si alloys with various iron contents [J]. Materials & Design, 2011, 32 (3): 1520-1525.
- [14] CHIKOVA O A, FINKEL' SHTAIN A B, SHEFER A A. Structure and nanomechanical properties of the Al-Si-Fe alloy produced by blowing the melt with oxygen [J]. Physics of Metals and Metallography, 2018, 119 (7): 685-690.
- [15] 梅静, 李林鑫. Mn、P与冷却速度联合作用对高铁过共晶铝硅合金组织和硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (1): 79-81.

Effect of Cooling Rate on Microstructure of Complex Aluminum Alloy Castings

KANG Yong-fei, LI Hao, BAI Pu-cun, CUI Xiao-ming

(Inner Mongol University of Technology, Materials Science and Engineering College, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract:

The study investigated the effects of wall thickness of complex aluminum alloy castings and metal chill placed at local areas on the cooling rate of castings, and the effect of chill on α -Al secondary dendrites, eutectic silicon and iron-rich phases in aluminum castings. The results show that the metal chill placed at local areas can significantly increase the cooling rate of castings, and the smaller wall thickness is, the more obvious the cooling effect will be. The use of metal chill can make α -Al secondary dendrites in the cast aluminum alloy finer, and the coarse lamellar eutectic silicon phase becomes smaller elliptical particle. Since the impurity Mn element interacts with the metal chill, a dendritic α -Fe phase with a small size was formed. If the cooling rate is rapid, the iron-rich phase will become a fine needle-like β -Fe phase.

Key words:

cooling rate; α -Al secondary dendrite; eutectic silicon; iron-rich phase