

# 浇铸过程底吹氩流量对金属液温度与凝固的影响

耿云飞, 钟良才\*, 杨晓猛, 杨仕存, 张 岭, 贺龙龙

(多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:**采用低熔点  $Pb_{18}Sn_{12}In_2Bi_9$  (质量分数) 合金, 在不锈钢的锭模中进行浇铸过程底吹氩试验。利用热电偶测定模内不同位置的温度, 并采用扫描电镜 (SEM) 对凝固试样进行铸态相组织观察, 研究了浇铸过程底吹氩对合金液温度与合金凝固相组织的影响。试验结果表明, 浇铸过程无底吹时, 水平方向中心测温点的温度下降很缓慢, 浇铸结束后该点的温度骤降到凝固等温平台温度。当浇铸过程底吹氩时, 中心点温度以较快的温降速率降低到凝固温度。无底吹氩时, 在竖直方向, 合金液从下自上依次开始凝固, 而底吹氩时, 各监测点几乎同时开始凝固。在相同的冷却条件下, 浇铸过程底吹氩显著延迟模型下部的开始凝固时间。无底吹氩时检测截面上富 Sn 相平均直径在  $2.58 \mu m$ , 当进行底吹氩时, 可以有效改善凝固相组织粒径分布, 细化合金铸态相组织, 截面上富 Sn 相平均直径约为  $1.89 \sim 2.20 \mu m$ , 较无底吹时降低了  $26.7\% \sim 14.7\%$ 。

**关键词:** 模铸; 底吹氩; 低熔点合金; 温度; 凝固相组织

中图分类号: TF76, TG146

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)02-0133-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.02.020

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Effect of bottom blowing argon flow on temperature and solidification of molten metal during casting

Gen Yunfei, Zhong Liangcai\*, Yang Xiaomeng, Yang Shicun, Zhang Ling, He Longlong

(Key Laboratory of Ecological Metallurgy of Polymetallic Ore of Ministry of Education, School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China)

**Abstract:** The low melting point  $Pb_{18}Sn_{12}In_2Bi_9$  alloy (mass fraction) in a stainless steel ingot mold during casting with bottom argon blowing was used to investigate the effects of bottom argon blowing on the temperature of the molten alloy and the microstructure of the solidified phase during casting by measuring the temperature at different positions in the mold by thermocouples and observing the microstructure of the solidified phase by scanning electron microscope (SEM). The experimental results showed that the temperature of the central temperature measurement point in the horizontal direction decreased slowly in the casting process without bottom blowing, and the temperature dropped sharply to the isothermal platform temperature after casting. The central point temperature decreased to solidification at a faster drop rate in the casting process with bottom argon blowing. When there was no bottom blowing argon during casting, the liquid alloy was solidified from bottom to top in the vertical direction,

收稿日期: 2021-04-07

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金资助 (N2125018); 科技部国家重点研发计划资助项目 (2017YFB0304100); 国家自然科学基金项目 (51574069)。

作者简介: 耿云飞 (1995—), 男, 河北邢台人, 汉, 硕士研究生, 主要从事钢铁冶金相关工作, E-mail: 2067256547@qq.com;

\*通讯作者: 钟良才 (1958—), 教授, E-mail: zhonglc@smm.neu.edu.cn。

while with the bottom argon blowing, the solidification began at all monitoring points almost simultaneously. Under the same cooling conditions, bottom argon blowing noteworthy delayed the solidification start time at the lower part of the model during the casting process. The average diameter of the Sn-rich phase on the detection cross-section was  $2.58\ \mu\text{m}$  without bottom argon blowing. In contrast, with bottom argon blowing, the particle size distribution of solidified phase can be effectively improved, the microstructure of as-cast alloy can be refined, and the average diameter of the Sn-rich phase on the cross-section was about  $1.89\sim 2.20\ \mu\text{m}$ , which was reduced by  $26.7\%\sim 14.7\%$  compared with that without bottom blowing.

**Key words:** mold casting, bottom argon bubbling, low melting point alloys, temperature, solidification phase microstructure

## 0 引言

模铸工艺是钢液凝固成形的传统工艺,在大钢锭生产中占有重要地位<sup>[1]</sup>。模铸大钢锭在浇铸凝固过程中由于流动性较差、模内温度分布不均,容易产生宏观偏析、缩孔、疏松、气孔等缺陷,大量的研究表明上述凝固缺陷都与铸锭凝固组织有直接关系。因此,改善铸锭凝固传热条件,促进铸锭同时凝固,获得均匀、细小的凝固组织是改善铸锭质量的有效方法。在下注法模铸浇铸凝固过程中运用底吹氩搅拌钢液,引起液相的流动,可以加强钢液的传热与传质,同时也会导致枝晶的折断,起到细化晶粒的效果<sup>[2]</sup>。许多研究者采用  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液模拟了钢液的定向凝固过程<sup>[3-6]</sup>,但在浇铸过程下吹氩条件对金属液凝固的影响研究较为少见。

铋基低熔点合金常被用来模拟钢液的搅拌和流场分布以及不同条件下的金属凝固温度变化、凝固组织细化和改善铸坯质量等凝固模拟试验<sup>[7-12]</sup>。笔者在实验室采用  $\text{Pb}_{18}\text{Sn}_{12}\text{In}_{21}\text{Bi}_{49}$  低熔点合金模拟钢液在铸模底部通过弥散型透气砖吹入细小气泡进行底吹氩的浇铸和凝固过程,在铸模内横向和纵向不同位置设置热电偶测定浇铸过程吹氩和不吹氩的金属液的温度变化,研究不同底吹氩流量对铸锭浇铸和凝固过程中温度变化及凝固组织的影响。该研究对于了解浇铸过程铸模底吹氩产生的金属液的温度变化及其凝固过程和凝固组织有参考价值。

## 1 试验方法

$\text{Pb}_{18}\text{Sn}_{12}\text{In}_{21}\text{Bi}_{49}$ (质量分数)四元合金的熔点为  $59.73\ \text{℃}$ ,由 Sn-(Bi、In) 固溶体相、 $\text{PbBi}$  化合物相以及  $\text{InBi}$  化合物相组成。本研究采用的铸模模型与 30 t 钢锭模的几何相似比为 1:15,模型尺寸如表 1 所示,采用不锈钢加工,模型四个侧壁面为不锈

钢的冷却壁。由于浇铸系统和铸锭较小,比表面积大,系统散热快,为保证低熔点合金液通过下注法从模型的底部浇铸入模内,将低熔点合金液加热到  $120\ \text{℃}$ ,浇注高度为模型内 210 mm 处,浇铸的锭重为 12 kg。为了缩短凝固时间,将  $25\ \text{℃}$  恒温水通过恒温槽泵入冷却壁,循环冷却壁面。采用直径为 1 mm 的铠装热电偶和温度巡检仪通过计算机记录模型内水平方向和竖直方向不同位置的温度变化。试验装置如图 1 所示。以底注中心为原点,  $x$  轴表示水平方向、 $y$  轴表示竖直方向。采用两个弥散型透气砖进行底吹氩,透气砖距中心位置  $L$  为 30 mm,吹氩时间 150 s,浇铸流量  $12\ \text{cm}^3/\text{s}$ ,总底吹氩流量分别是 120、200、300 mL/min。

表 1 铸模模型的尺寸  
Table 1 Main size of casting mold mm

高度	上部长边	上部短边	底部长边	底部短边	合金液入口直径
230	154	94	114	54	4

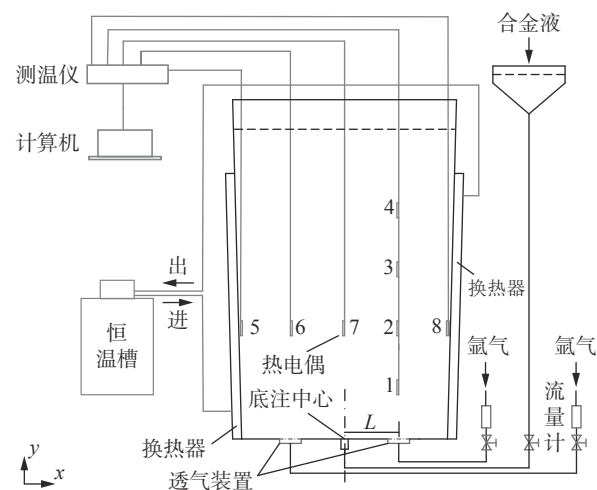


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

试验结束后的取样方案如图 2 所示,首先取距铸锭底部 60 mm 高度处横截面为研究面,用线切割

从此截面向上取出厚 5 mm 的矩形块体,然后在水平截面中心、距中心负 50.5 mm 处、正 50.5 mm 处取出 15 mm×15 mm×5 mm 金相试样,依次使用 800<sup>#</sup>、1 000<sup>#</sup>、1 500<sup>#</sup>、2 000<sup>#</sup>、4 000<sup>#</sup>砂纸磨样,然后清水抛光。采用扫描电镜(SEM)对样品进行铸态组

织观察。并对每个试样在×1 000 视场下采集 12 张合金铸态的背散射电子图像,然后采用图像处理软件 IPP 对合金试样富 Sn 相尺寸进行定量统计,分析不同吹氩条件对合金凝固相组织的影响。

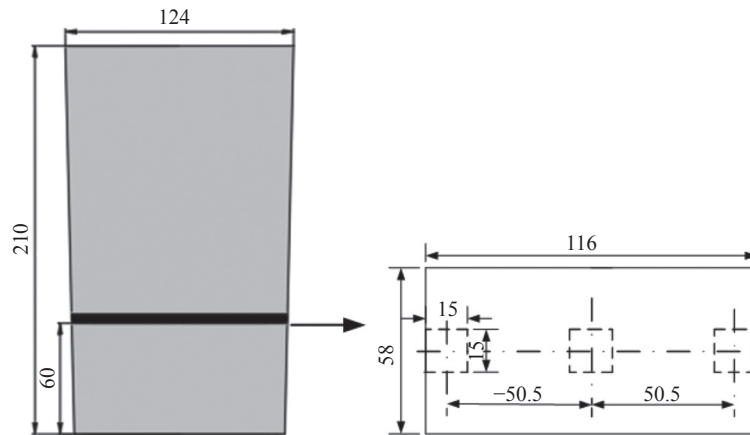


图2 铸锭取样方案(单位:mm)

Fig. 2 Sampling scheme from cast ingot

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同流量对凝固温度的变化

图3为不同底吹流量下浇铸过程水平方向温度随时间的变化曲线。由图3可以看出在合金液进入模型接触到测温偶头时,监测点的温度随之升高,在浇铸过程中靠近模壁的监测点5、8处的温度首先依次降至合金熔点以下,并未产生其它温度监测点因凝固形成的等温平台,这是由于模壁激冷作用和冷却水的冷却作用导致壁面附近金属液热量快速向外传递造成的。同时发现监测点5要比监测点8的温度降得更快,这是因为循环冷却水由模型左侧的冷却壁下部泵入,再由模型右侧的冷却壁上泵出,由于在流动过程中冷却水吸收了热量,使得左侧冷却壁和右侧冷却壁的温度不同,导致左侧冷却壁的冷却作用要大于右侧冷却壁的冷却作用。当模内中心区域的金属液温度降至熔点时,开始释放潜热,产生等温平台,可以看到水平方向上监测点6、2、7处几乎同时开始凝固,在中心点两侧的监测点6、2依次凝固结束后,中心监测点7最后凝固结束。

由图3可以看到,无底吹时在浇铸结束前有一段时间(从80 s到125 s之间)中心监测点7处的温度下降很缓慢,表明在这段时间里,中心处的热损失与从底部浇入的高温金属液带入的热量相近;但浇铸结束后(约134 s)该监测点出现温度从72℃骤

降到62℃的现象,这是由于浇铸完成后,再没有新的高温合金液进入模型,模内液体热量向两侧和底部大量散热引起的。而当浇铸过程底吹氩时,因为氩气泡的搅拌有利于传热,使得监测点7处的热量很快向四周传递,所以浇铸过程底吹氩后,中心监测点未出现温降变缓及温度陡降现象,而是以较快的温降速率降低到凝固温度。对比图3(a)(b)(c)(d)可以看出,图3(b)中监测点5、8温降过程较为一致,说明当总底吹氩气量为120 mL/min时浇铸均匀了监测点5和8的温降。当总底吹氩流量达到300 mL/min时,尽管模型左右两侧的冷却强度不一致,但监测点6和2的温度非常接近了。

图4为不同底吹氩流量下模内垂直方向的温度变化,由图4看到,浇铸过程不吹氩时,在垂直方向上监测点1、2、3、4处的温度逐渐降低,各点的温度差较大,且依次从下向上开始凝固;而底吹氩时,在垂直方向上,随底吹氩流量增加各监测点的温度差减小,甚至有的温度监测点如2点的温度在合金液凝固前出现明显的升高现象,各监测点的凝固时间几乎一致。表明底吹氩后在垂直方向上温度更均匀,并且可以发现底吹氩明显延迟了底部开始凝固的时间。因此,浇铸过程底吹氩后,可以强化浇铸过程模内的传热,使得模内温度均匀,可以改善凝固组织。

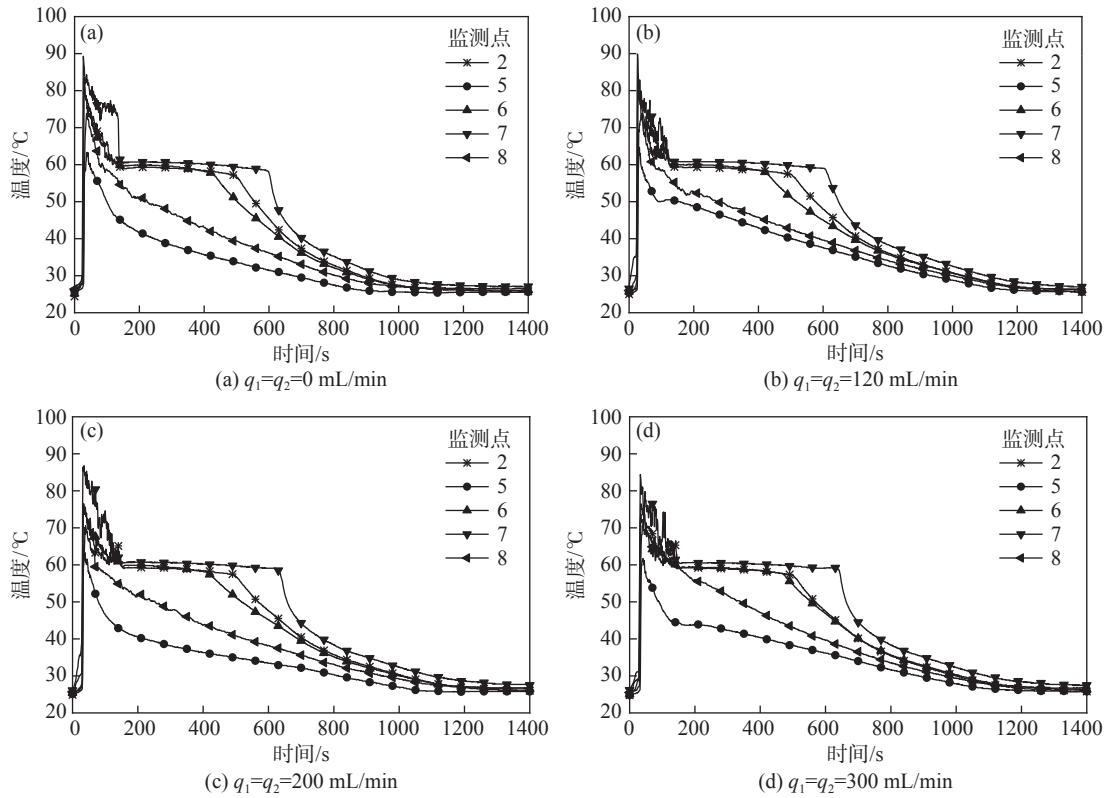


图3 不同底吹流量下水平方向上的温度变化

Fig. 3 Variations of temperature at the horizontal direction with different bottom argon flow rates

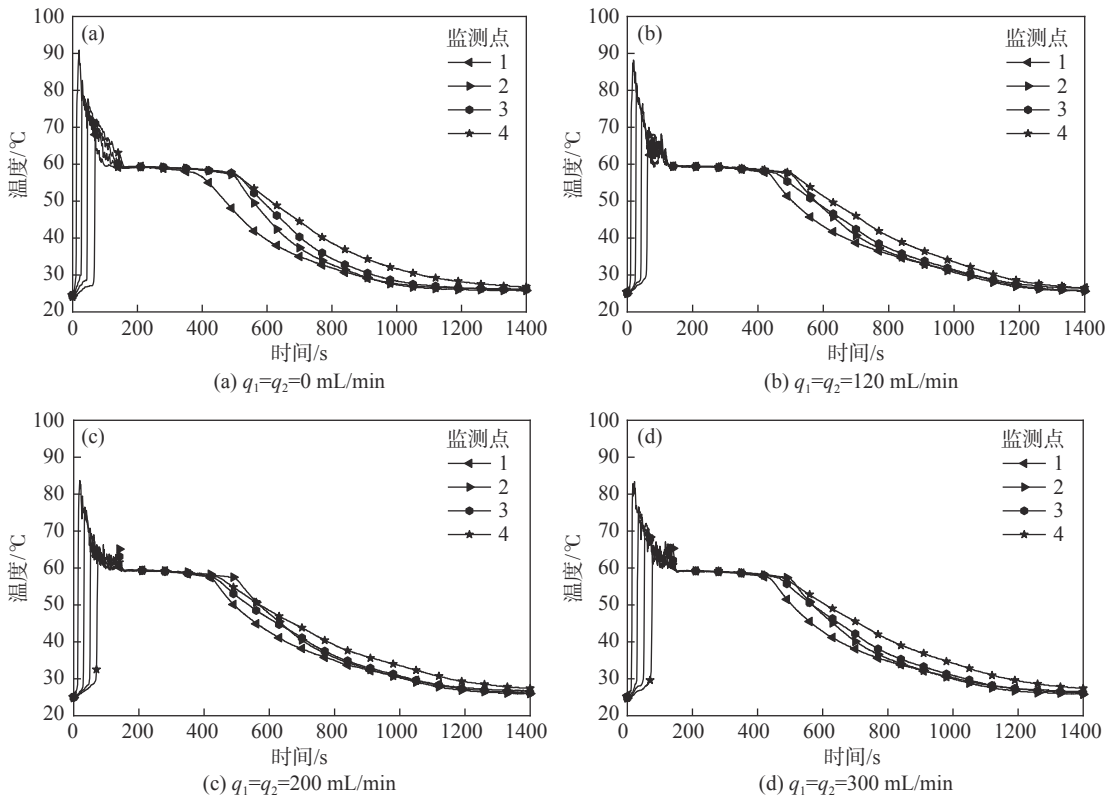


图4 不同底吹流量下竖直方向上温度的变化

Fig. 4 Variations of temperature at the vertical direction with different bottom argon flow rates

由于不同试验在浇铸速率存在差异, 使得竖直方向上各监测点的开始上升的温度对应的时间不同, 造成了不同试验的开始凝固时间存在 20 s 的差异。

当底吹流量增大到 200 mL/min 后, 浇铸过程中各监测点的最高温度与无底吹相比较都有所下降, 其中监测点 7(水平方向中心处)、监测点 1(竖直方向模型底部区域)的最高温度比不吹氩的这两点温度降低最多, 约为 5 °C。

## 2.2 不同流量对开始凝固时间的影响

将温度监测点从开始接触高温合金液至检测出开始凝固的时间定义为开始凝固时间, 该时间反映了高温合金液进入模型监测点后到开始凝固所需要的时间长短。图 5 为 1、2、3、4、6、7 监测点的开始凝固时间, 由图 5 可知, 在相同的冷却条件下, 无底吹氩时, 在模型下部温度监测点 1 的凝固时间只有 80 s, 而浇铸过程底吹氩时, 开始凝固时间增加到 110 s 以上。说明浇铸过程底吹氩显著增大了监测点 1 处的开始凝固时间, 即延迟了模型下部合金液的开始凝固时间。浇铸过程无底吹时, 竖直方向上的监测点 2、3、4 的开始凝固时间均明显高于底吹氩时相对应点的开始凝固时间; 在水平方向, 不进行底吹氩时由于模型左右两侧的冷却条件不同, 造成左右对称的两个温度监测点 2 和 6 处的开始凝固时间存在较大的差别, 靠近冷却水入口的监测点 6 的开始凝固时间 120 s, 而靠近冷却液出口的监测点 2 处的开始凝固时间为 130 s; 浇铸过程进行底吹氩后, 尽管左右两侧的冷却条件存在差异, 但对称监测点 2 和 6 处的开始凝固时间很接近, 并且与中心监测点 7 处的开始凝固时间也很接近, 相差在 1 s 左右。所以浇铸过程底吹氩搅拌, 使温度场均匀, 可以推迟模型下部合金液的开始凝固时间, 同时在水平方向上也可以缩短模型内除下部以外的其它区域的开始凝固时间。

对比了监测点 1、3、6、7 在不同的两个浇铸时段的平均温降速率, 发现, 底吹氩显著降低了监测点 1、3 处在浇铸时间 80 s 到 130 s 内的温降速率, 大体上看, 底吹流量越大, 温降速率越低。底吹氩提高了监测点 7 在浇铸时间 30 s 到 130 s 内的温降速率, 即底吹氩提高了模内中心区域的温降速率, 这与监测点 1 浇铸时间 80 s 到 130 s 内的温降趋势相反, 即底吹氩降低了底部区域的温降速率, 而且监测点 6 处在浇铸时间 30 s 到 130 s 内的温降速率也略有

下降, 说明底吹氩的搅拌作用促进了模内中心液体向四周的传热。

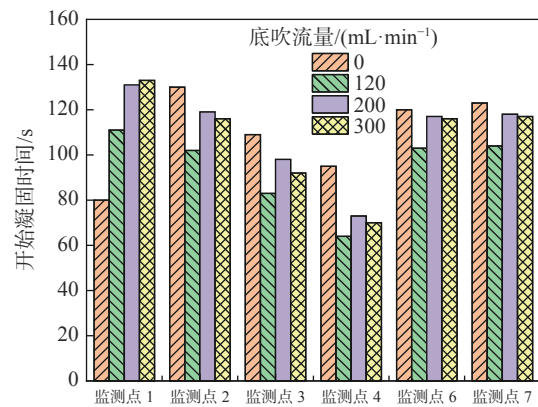


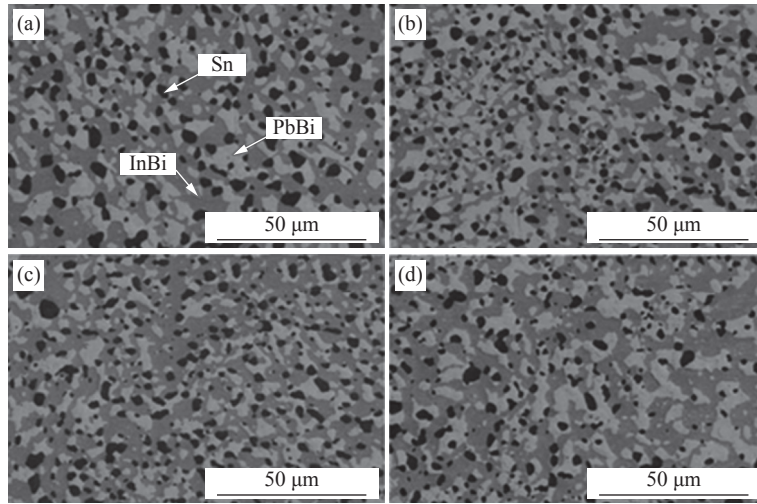
图 5 模型内各监测点的开始凝固时间对比

Fig. 5 Comparison of solidification start time at each monitoring point

## 2.3 不同流量对凝固组织的影响

图 6 为铸态低熔点合金  $\text{Bi}_{49}\text{In}_{21}\text{Pb}_{18}\text{Sn}_{12}$  的微观相组织形貌, 其中(a)(b)(c)(d)分别对应总底吹氩流量为  $q=0, 120, 200, 300$  mL/min 时在  $\times 1000$  视场下的扫描电镜背散射图像, 其中图中的黑色相为富 Sn 相, 深灰色区域为 InBi 相, 白色区域为 PbBi 相。从图 6 可以看出, 富 Sn 相与 InBi 相呈不规则岛状结构, 均匀地分布在合金中。与无底吹氩相比, 底吹氩条件下的铸态合金相组织更加均匀、细小。

不同底吹流量下富 Sn 相粒径变化最具代表性, 可以直观反映出底吹氩流量对金属微观组织的影响。图 7 为不同底吹流量下富 Sn 相的粒径分布与平均直径统计。由图 7 可知, 当底吹氩浇铸时, 粒径大于  $4 \mu\text{m}$  的富 Sn 相逐渐减少甚至消失, 粒径小于  $2 \mu\text{m}$  的富 Sn 相明显增多, 富 Sn 相的粒径分布主要在  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。由图 7(d)可知, 在无底吹流量下不同位置试样富 Sn 相的平均直径在  $2.58 \mu\text{m}$  左右, 分布均匀。当进行底吹氩时, 富 Sn 相平均直径随底吹流量的增大先降低后增大, 但总体来说底吹氩时得到的富 Sn 相的平均直径比无底吹氩的小, 同时发现底吹氩对降低距检测截面中心  $50.5 \text{ mm}$  位置处富 Sn 相平均直径的效果较差, 这是左右壁面存在一定冷却强度差所致。在所研究的底吹氩流量范围, 水平截面不同位置处试样富 Sn 相平均直径均小于无底吹氩的富 Sn 相平均直径, 约为  $1.89 \sim 2.20 \mu\text{m}$ , 较无底吹时降低了  $26.7\% \sim 14.7\%$ 。说明在浇铸过程中进行底吹氩能有效改善凝固相组织粒径分布, 降低富 Sn 相直径, 使凝固相组织更加细小、均匀。



图中的黑色相为富 Sn 相, 深灰色区域为 InBi 相, 白色区域为 PbBi 相

(a)  $q=0$  mL/min; (b)  $q=120$  mL/min; (c)  $q=200$  mL/min; (d)  $q=300$  mL/min

图 6 不同底吹流量下载面中心处的  $\text{Bi}_{49}\text{In}_{21}\text{Pb}_{18}\text{Sn}_{12}$  低熔点合金的背散射图像

Fig. 6 SEM backscattered electron images of  $\text{Bi}_{49}\text{In}_{21}\text{Pb}_{18}\text{Sn}_{12}$  low-melting-point alloy at the center of the cross section and bottom gas flow rates

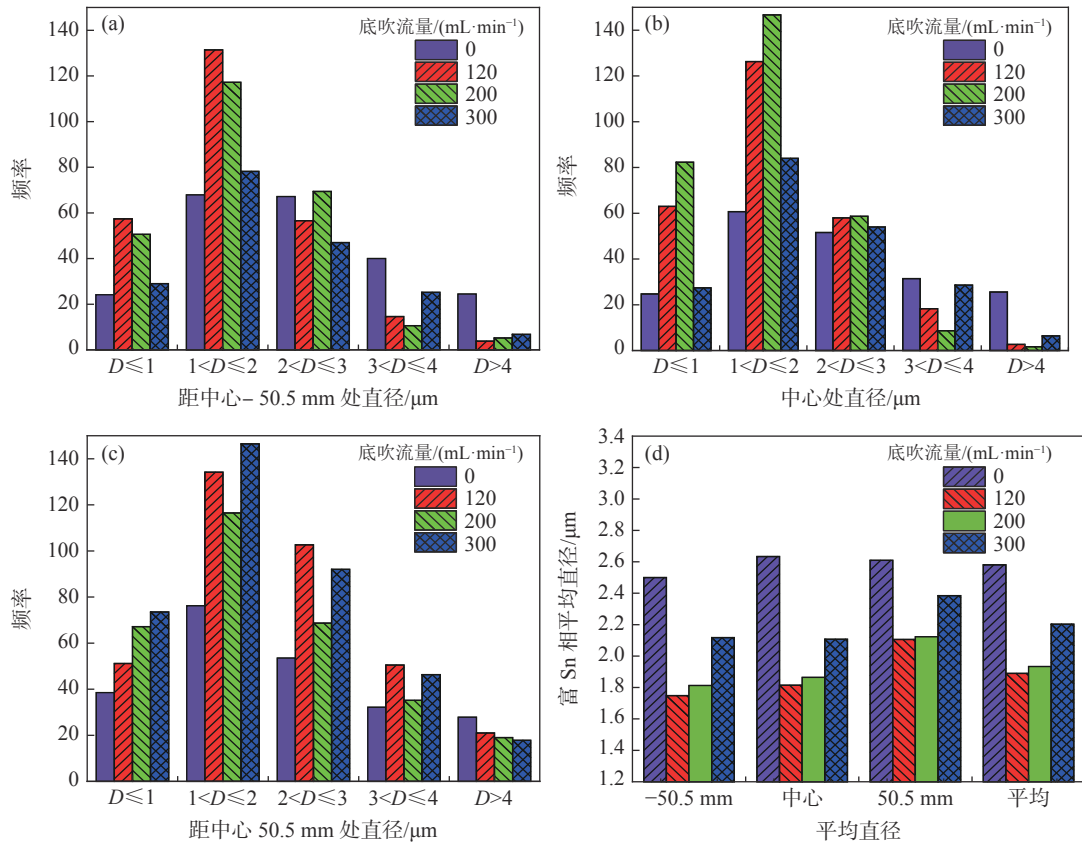


图 7 不同底吹流量下富 Sn 相的粒径分布与平均直径

Fig. 7 Particle size distribution and average diameter of Sn-rich phase with different bottom gas flow rates

### 3 结论

1) 在试验冷却条件下, 无底吹时, 浇铸过程中水

平中心测温点的温度下降很缓慢, 浇铸结束后中心点的温度骤降到凝固等温平台温度。当浇铸过程底吹氩时, 中心处以较快的温降速率降低到凝固温度。

2)浇铸过程底吹氩时,高度方向各监测点的温度差随底吹氩流量增加而减小,甚至在合金液凝固前出现明显的升高现象,各监测点几乎同时凝固。

3)在相同的冷却条件下,浇铸过程底吹氩显著延迟模型下部的开始凝固时间。

4)底吹氩可显著降低模型底部浇铸后期的温降速率,同时提高浇铸过程中心处的温降速率,促进模型合金液同时凝固。

5)在本试验条件下,无底吹氩时检测截面上富

Sn相平均直径在2.58  $\mu\text{m}$ 左右,当进行底吹氩时,可以有效改善凝固相组织粒径分布,细化合金铸态组织,截面上富Sn相平均直径约为1.89~2.20  $\mu\text{m}$ ,较无底吹时降低了26.7%~14.7%。

#### 致谢

本研究得到了中央高校基本科研业务专项资金资助(N2125018)、科技部国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304100)和国家自然科学基金项目(51574069)资助,在此表示衷心感谢。

#### 参考文献

- [1] Du Yawei, Wen Guanghua, Tang Ping. Molded in large steel and special steel production in terms of comparative advantage[J]. *Metal World*, 2009, (5): 48-52.  
(杜亚伟,文光华,唐萍.模铸在大钢锭及特殊钢生产方面的比较优势[J].*金属世界*,2009,(5):48-52.)
- [2] Ma Youping, Xu Yunhua. Metal solidification principle and technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.  
(马幼平,许云华.金属凝固原理与技术[M].北京:冶金工业出版社,2008.)
- [3] Zhang Guozhi, Feng Yanhui, Zhang Xinxin, et al. Ammonium chloride aqueous solution of heat transfer in the directional solidification experiment analysis[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2007, 6(2): 113-118.  
(张国志,冯妍卉,张欣欣,等.氯化铵水溶液定向凝固实验的传热分析[J].*热科学与技术*,2007,6(2):113-118.)
- [4] Tan F L. An experimental study on channels formation during solidification of aqueous ammonium chloride[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 2169-2192.
- [5] Bianchi M V A, Viskanta R. The effect of air bubbles on the diffusion-controlled solidification of water and aqueous solutions of ammonium chloride[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42(6): 1097-1110.
- [6] Shi Yufeng, Xu Qingyan, Gong Ming, et al.  $\text{NH}_4\text{Cl} - \text{H}_2\text{O}$  in the process of directional solidification dendrite growth numerical simulation[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, (5): 620-627.  
(石玉峰,许庆彦,龚铭,等.定向凝固过程中 $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ 枝晶生长的数值模拟[J].*金属学报*,2011,(5):620-627.)
- [7] Zhang Xidong, Fan Yangyi. Wood's metal simulation of liquid steel bottom blowing research[J]. *Journal of Shanghai Metal*, 1994, (2): 20-24.  
(张奚东,樊养颐.伍德合金模拟钢液的底吹研究[J].*上海金属*,1994,(2):20-24.)
- [8] Zhang Jing. Electromagnetic stirring continuous casting crystallizer flow of molten steel in the numerical simulation and experimental research[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.  
(张静.连铸电磁搅拌结晶器内钢液流动的数值模拟与实验研究[D].沈阳:东北大学,2011.)
- [9] Chen Lin, Zong Yanbing, Cang Daqiang, et al. Ultrasonic treatment on wood's metal refining and the effect of porosity generated[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2008, 26(3): 339-341.  
(陈琳,宗燕兵,苍大强,等.超声处理对伍德合金细化及气孔生成的影响[J].*材料科学与工程学报*,2008,26(3):339-341.)
- [10] Hua Junshan, Zhang Yongjie, Wang Engang, et al. The electromagnetic properties under the pulse magnetic field research: solidification experiment[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(2): 258-261.  
(华骏山,张永杰,王恩刚,等.脉冲磁场下电磁力特性研究:凝固实验[J].*东北大学学报(自然科学版)*,2011,32(2):258-261.)
- [11] Li Hang, Li Jie, Xia Yunjin, et al. Pulse electric field inoculation effect on wood's metal solidification organization[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2016, 33(1): 10-13.  
(李航,李杰,夏云进,等.脉冲电场孕育处理对伍德合金凝固组织的影响[J].*安徽工业大学学报(自然科学版)*,2016,33(1):10-13.)
- [12] Wang Lijun. Water-cooled mould casting slab ingot solidification process and the numerical simulation of the process parameters to explore[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.  
(王利君.水冷模铸扁锭凝固过程及工艺参数探究的数值模拟[D].沈阳:东北大学,2013.)

实习编辑 梁光芬

编辑 杨冬梅