

螺旋磁场对 Pb-Sn 合金成分偏析的影响

张楠¹, 赵倩¹, 房灿峰¹, 韩彦博¹, 郭建设¹, 侯晓光², 邢清源¹, 张兴国¹

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024;

2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 测试分析新型电磁搅拌器内螺旋磁场和旋转磁场的磁感应强度、分布和作用规律, 研究螺旋磁场对 Pb-80%Sn 过共晶合金凝固组织影响的作用机理, 并与无磁场和旋转磁场条件下合金凝固组织的形貌特征及成分分布进行对比分析。结果表明: 螺旋磁场相比于旋转磁场可以在铸锭内部更大区域内形成均匀搅拌, 更易于破碎和细化枝晶组织, 既能促进椭球或球状晶的生成, 又能更好地改善宏观偏析; 在频率一定的情况下, 初生相晶粒尺寸随着励磁电流的增大而减小; 当励磁电流为 125 A 时, 旋转磁场和螺旋磁场细化晶粒的效果最好; 继续增大电流, 晶粒产生粗化; 螺旋磁场可基本消除成分偏析, 并在较小励磁电流(100 A)下达到采用旋转磁场(125 A)时的最佳搅拌效果。

关键词: Pb-80%Sn 过共晶合金; 成分偏析; 螺旋磁场; 旋转磁场

中图分类号: TM135; TG111.5

文献标志码: A

Effects of spiral magnetic field on composition segregation of Pb-Sn alloy

ZHANG Nan¹, ZHAO Qian¹, FANG Can-feng¹, HAN Yan-bo¹, GUO Jian-she¹,
HOU Xiao-guang², XING Qing-yuan¹, ZHANG Xing-guo¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Baoshan Iron and Steel Company Limited, Shanghai 201900, China)

Abstract: A new type of electromagnetic stirrer was measured to investigate the spiral and rotating magnetic field with their distributions of magnetic induction and mechanism of action, and the effect of spiral magnetic field on solidification structure of Pb-80%Sn hypereutectic alloy was also studied, with comparison of alloys solidified and component distribution in the conventional condition and rotating magnetic field. The results show that, compared with rotating magnetic field, the spiral magnetic field can lead to a more uniform stirring in a larger zone of the ingot, which is more beneficial to breaking and refining the dendrites structure, thus promoting the formation of ellipsoidal or equiaxed grains and reducing macrosegregation. At a fixed frequency, the grains sizes of the primary phase increase with the excitation current and, an optimal effect can be achieved when the current reaches 125 A for both spiral and rotating magnetic field, while higher excitation current will lead to the growth of grains. The macrosegregation can be substantially eliminated by spiral magnetic field and a lower current (100 A) is effective to obtain the same optimal stirring effect (125 A) of rotating magnetic field.

Key words: Pb-80%Sn hypereutectic alloy; composition segregation; spiral magnetic field; rotating magnetic field

电磁搅拌技术的研究历史可以追溯到 20 世纪二三十年代, 人们尝试利用磁场对液态金属进行搅拌以

改善冶金组织^[1-3]。经过多年的发展, 电磁搅拌技术的理论研究取得了很大进步, 如 WILLERS 等^[4-5]研究了

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875031); 宝钢高新技术项目(10K029ECES)

收稿日期: 2011-07-05; 修订日期: 2011-11-10

通信作者: 张兴国, 教授, 博士; 电话: 0411-84706183; E-mail: zxgwj@dlut.edu.cn

旋转磁场对 Pb-Sn 合金凝固组织的影响,发现旋转磁场下的强迫对流可以促进柱状晶向等轴晶的转变,主要是由于旋转磁场的施加改变了凝固前沿的温度场和浓度场。CHEN 等^[6]研究了旋转磁场对 Sn-Bi 合金微观结构的影响,结果发现,旋转磁场能够改善宏观偏析、碎断枝晶和细化凝固组织,而宏观偏析的改善是由于初生相同时受到重力、浮力和 Lorentz 力综合作用的结果。METAN 等^[7]研究行波磁场条件下 Al-Si 合金凝固组织形貌特征,发现行波磁场促使整个试样内部形成均匀细小的晶粒分布,但同时扩大偏析区域。电磁搅拌技术在连铸生产过程中也得到成功应用,电磁场驱动液态钢水流动,起到对凝固组织的形态、传热和传质条件进行控制的作用,从而达到改善铸坯凝固组织、减少中心偏析、缩孔及疏松等缺陷的目的^[8-9]。时至今日,电磁搅拌器已成为国际先进钢铁企业生产附加值产品必不可少的特殊冶金装备,电磁搅拌技术也仍是国内外各大钢铁企业和材料电磁加工(Electromagnetic processing of materials, EPM)学术研究的重点内容^[10-12]。

螺旋磁场由于自身特殊的作用特点而显示出较高的应用价值,但以往由于受到设备复杂等因素的限制,使得有关其冶金效果和应用的报道很少。20 世纪 90 年代,邢文彬等^[13]采用金属 Sn 作为钢的模拟物,模拟研究螺旋磁场电磁搅拌的冶金效果,发现螺旋磁场可以减轻铸坯的白亮带,提高等轴晶率,减少中心缺陷,改善宏观偏析和夹杂物分布并有助于去除夹杂物。近期也有研究表明,相同搅拌参数下螺旋磁场相比于旋转磁场在改善宏观偏析方面显示出更好的效果^[14]。但是,螺旋磁场的搅拌效果和作用机理仍处于探索阶段,因此有必要加强这方面的研究,为今后螺旋磁场的工业化应用提供必要的实验依据。

本文作者选取常规条件下偏析严重的 Pb-80%Sn 过共晶合金为研究对象,分析不同励磁电流下螺旋磁场对合金凝固组织、微观枝晶偏析和铸锭宏观成分偏析的影响,并与无磁场及相同工艺参数下旋转磁场的搅拌效果相对比,进一步拓展螺旋磁场改善金属凝固组织和性能方面的研究。

1 实验

实验使用的新型多功能电磁搅拌器型号为 DJGR- ϕ 20W,内径为 200 mm,电磁搅拌变频电源控制柜型号为 DJKX-270KVA。搅拌器工作原理是三相两极式直线电动机和三相两极式旋转电动机的合成,

由外壳、铁芯和线圈 3 部分组成。铁芯类似于电机定子铁芯,由安装环和 6 个齿组成。其中 6 个线圈套在齿上,采用 Y 型连接,形成旋转磁场;另外 6 个线圈通过楔板固定在铁芯的齿槽内,形成行波磁场;当两组线圈同时通电时两种磁场叠加形成螺旋磁场。为对搅拌器内部螺旋磁场分布特点有更直观的认识,采用 TM-601 型特斯拉计对搅拌器磁场分布进行测量。

铸型选用对磁场无影响的不锈钢材料,铸锭尺寸为: $h=100\text{ mm}$, $d=100\text{ mm}$ 。采用 SG-5-10 型坩埚电阻炉按比例配制好的纯 Pb(99.95%,质量分数)和 Sn(99.9%,质量分数)在 350 °C 熔化后保温 10 min,铸型预热至 150 °C,合金熔体冷却到 250 °C 时进行浇注,采用 KSY-50 型单相自动温控器控温。浇注后将盛有合金熔体的铸型放入搅拌器内。实验分为如下 3 部分: 1) 无磁场条件下合金自然冷却凝固; 2) 合金凝固过程中,施加不同励磁电流的螺旋磁场对熔体进行搅拌; 3) 在上述相同的实验方法下,施加不同励磁电流的旋转磁场对熔体进行搅拌。将不同实验条件下制备的铸锭纵向剖开,沿中心轴每隔 15 mm 依次取 3 个样,取样位置如图 1 所示,经打磨、抛光腐蚀(腐蚀剂选用浓度 2%~3%(体积分数)的硝酸酒精)制样。采用 MFF-3 型金相显微镜进行显微组织分析, CSS-2205 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行成分分析。

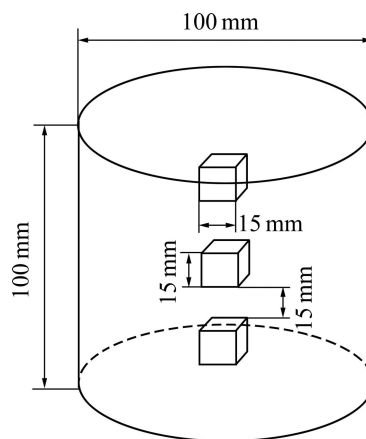


图 1 Pb-80%Sn 过共晶合金取样位置

Fig. 1 Sampling positions of Pb-80%Sn alloy

2 结果与分析

2.1 磁场分布与电磁力分析

研究表明,在搅拌器内壁处磁感应强度相等的情况下,螺旋磁场沿径向衰减的幅度较小,可以在整个断面区域内形成搅拌,而旋转磁场的作用区域相对较

窄^[13]。图2所示为空载时距搅拌器内中心轴30 mm处在不同励磁电流下旋转磁场和螺旋磁场磁感应强度沿搅拌器轴向分布, $H=0$ mm为搅拌器线圈中心位置。可以看出: 1) 两种磁场磁感应强度均随励磁电流的增大而增大, 搅拌器中心位置的感应强度大于上、下端部位置; 2) 相比于旋转磁场, 螺旋磁场感应强度沿纵向衰减幅度较小, 分布更加平稳, 磁场覆盖范围更大。由于受测量工具的限制, 图2(b)所示仅为实际螺旋磁场磁感应强度的分量值, 实际的需三维叠加而成, 因此会更高些。

不同磁场下初生相受力分析如图3所示。旋转磁场搅拌下, 见图3(a), 初生相晶粒除了受浮力 f 及自身重力 G 外, 在水平面内还会受到电磁力 F 的作用, 分为径向分力 F_r 和切向分力 F_θ ^[15], 纵向合力 $F' = f - G$, 初生相所受合力 $F'' = F' + F$ 。螺旋磁场是旋转磁场和行波磁场的叠加, 因此, 螺旋磁场下,

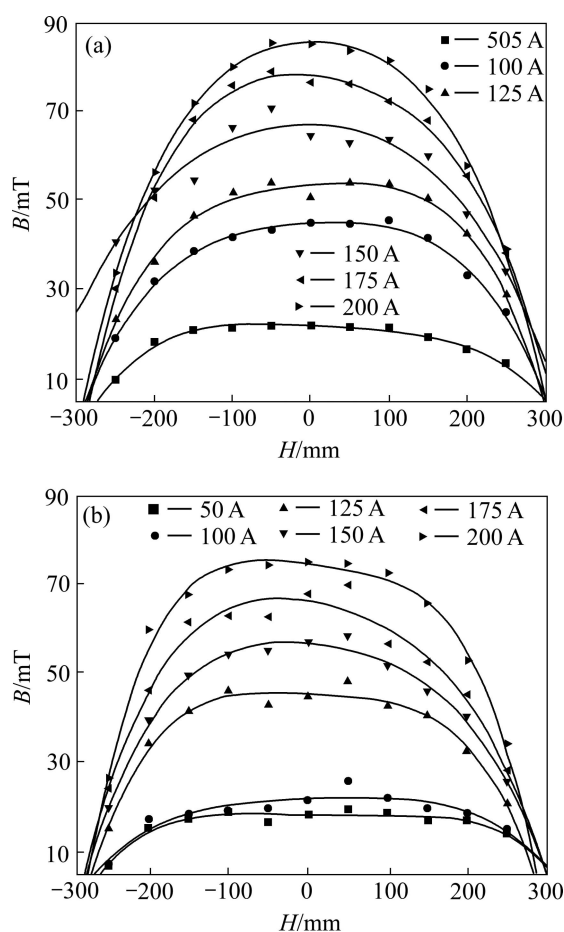


图2 不同磁场方式下 $r=30$ mm 处磁感应强度沿搅拌器轴向分布

Fig. 2 Distributions of rotating magnetic induction (a) and spiral magnetic induction (b) along stirrer length way direction with different currents at radius of 30 mm in different magnetic ways

初生相的受力情况发生改变。螺旋磁场 B 可分解为径向分量 B_r , 切向分量 B_θ 及轴向分量 B_z ; 电流 I 也可分解为径向分量 I_r , 切向分量 I_θ 及轴向分量 I_z 。故可得初生相受到的 Lorentz 力 F 的径向分量 $F_r = I_z B_\theta + I_\theta B_z$, 切向分量 $F_\theta = I_z B_r + I_r B_z$ 以及轴向分量 $F_z = I_r B_\theta + I_\theta B_r$ 。由此可见, 螺旋磁场下初生相除受径向和切向分力外, 又新增加一个轴向分力 F_z 。当 $f > G + F_z$ 时, 初生相受力情况见图3(b); 当 $f < G + F_z$ 时, 受力情况见图3(c)。可以看出, 旋转磁场和行波磁场的复合, 使合金熔体不仅可以在水平面内进行旋转运动, 轴向分力 F_z 使轴向上也能够形成强烈的主动环流。

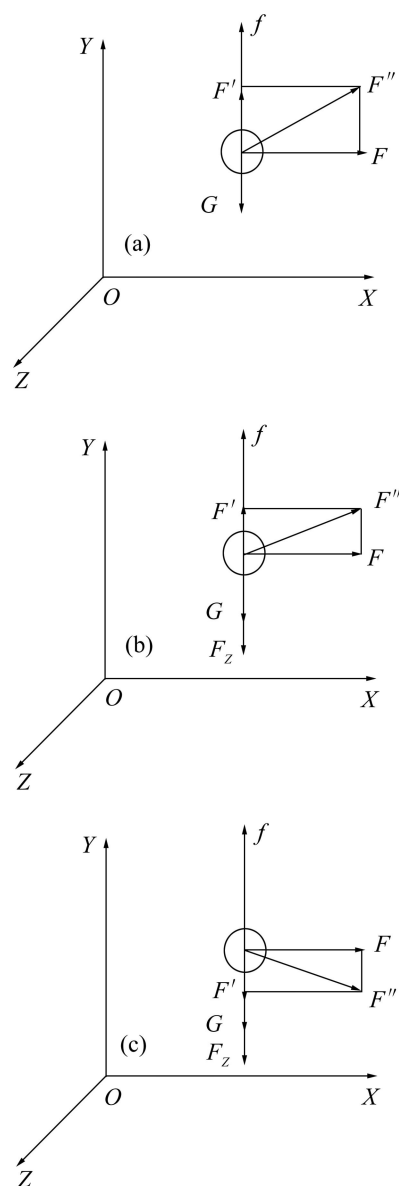


图3 不同磁场下初生相受力分析图

Fig. 3 Force analysis of primary phase under different magnetic fields: (a) Rotating magnetic field; (b), (c) Spiral magnetic field

2.2 不同磁场对合金凝固组织的影响

Pb-80%Sn 过共晶合金在不同凝固条件下铸锭心部组织形貌如图 4 所示, 图中灰色基底为 Pb-Sn 层片状共晶组织, 白色部分是先析出的 α 相(Sn)。从图 4(a) 可以看出, α 相以枝晶方式交错生长, 一次枝晶臂粗大, 二次枝晶臂发达, 平均晶粒长度可达 296.5 μm 左右。图 4(b)和(c)分别为当励磁电流为 100 A 时, 施加旋转磁场和螺旋磁场搅拌后 Pb-80%Sn 过共晶合金的凝固组织形貌。可以看出, 两种磁场作用下 α 相均发生了枝晶 $\rightarrow$ 等轴晶的转变, 且相比于旋转磁场, 螺旋磁场作用下晶粒细化效果更好, 基本消除了粗大枝晶, 初生相晶粒多呈花瓣状或边界圆整的椭球或球状。

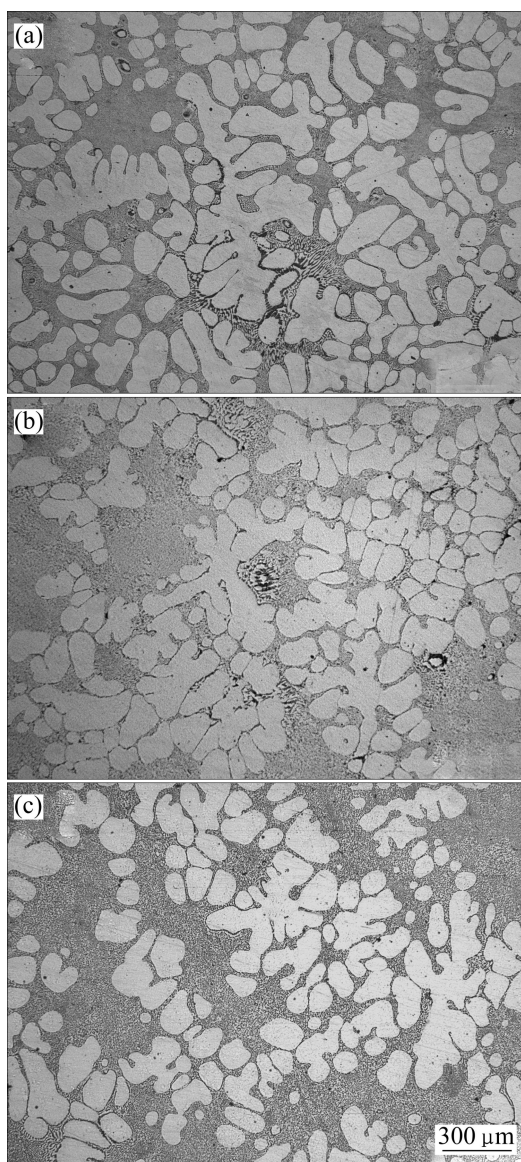


图 4 不同凝固条件下 Pb-80%Sn 过共晶合金凝固组织形貌
Fig. 4 Microstructures of Pb-80%Sn alloy under different solidified conditions: (a) Conventional condition; (b) Rotating magnetic field; (c) Spiral magnetic field

施加电磁搅拌, 熔体内部会产生感应电势 $\varepsilon = d\phi/dt$, 从而产生感应电流 $I = K\sigma\varepsilon$, 其中 K 为常数, σ 为熔体电导率, 感应电流与磁场相互作用会使熔体受到 Lorentz 力^[16]。电磁场的施加使合金熔体处于强烈的三维对流状态, 加快了熔体的传热与传质过程。当熔体单元间存在的剪切力达到一定值, 即初生枝晶所受的切向应变达到致使其碎断的临界值时, 就可有效地抑制或碎断沿径向生长的枝晶, 同时也可以破坏熔体中原子团的有序排列, 抑制原子团聚, 使熔体内部形成更多的形核质心^[17]。从能量的角度来看, 施加电磁搅拌所产生的 Lorentz 力对熔体做正功, 可以降低原子团簇由液相向固相迁移所需克服的势垒, 使临界形核功减小, 从而使具有一定尺寸的原子团簇数量增多, 金属熔体温度稍微降低, 便可能以这些团簇为中心形核, 形核率的增加不但细化晶粒, 还可以阻碍枝晶的生长。因此, 本实验中两种磁场的施加均可以提高等轴晶数量。

从图 3 不同磁场下初生相的受力分析可知, 螺旋磁场由于轴向分力 F_z 的存在, 促使整个铸锭轴向环流加剧, 相比于旋转磁场, 轴向分力和水平分力的共同作用使初生相在三维方向上受到更加复杂与剧烈的冲刷, 减小晶核周围各向温度梯度, 凝固界面前沿富集的溶质被快速流动的熔体及时带走, 使固液界面浓度梯度也大大减小, 所以在这种环境中长大的晶粒的择优生长倾向减弱, 晶粒各方向近似为均匀长大, 生长为更多的椭球或球状晶。

2.3 励磁电流对合金凝固组织的影响

为进一步探讨励磁电流对 Pb-80%Sn 过共晶合金凝固组织的影响规律, 本文作者进行 3 组电流参数的实验。图 5 和 6 所示分别为当励磁电流为 75、125 和 150 A 时旋转磁场和螺旋磁场搅拌下 Pb-80%Sn 过共晶合金铸锭心部凝固组织形貌。结合图 5(b)和(c)可看出, 两种磁场作用下, 初生相晶粒破碎和细化程度均随励磁电流的增大而加强, 当电流为 125 A 时, 凝固组织的细化效果达到最好, α 相呈椭球或球状均匀分布在基底内, 而当励磁电流增大至 150 A 时, 晶粒尺寸开始有一定程度的长大。采用直线法对晶粒尺寸与励磁电流的关系进行定量分析, 结果如图 7 所示, 螺旋磁场在任一相同励磁电流下细化晶粒的效果均好于旋转磁场。

励磁电流与电磁力存在以下关系^[18]:

$$F \propto I^2 \varphi(f) \quad (1)$$

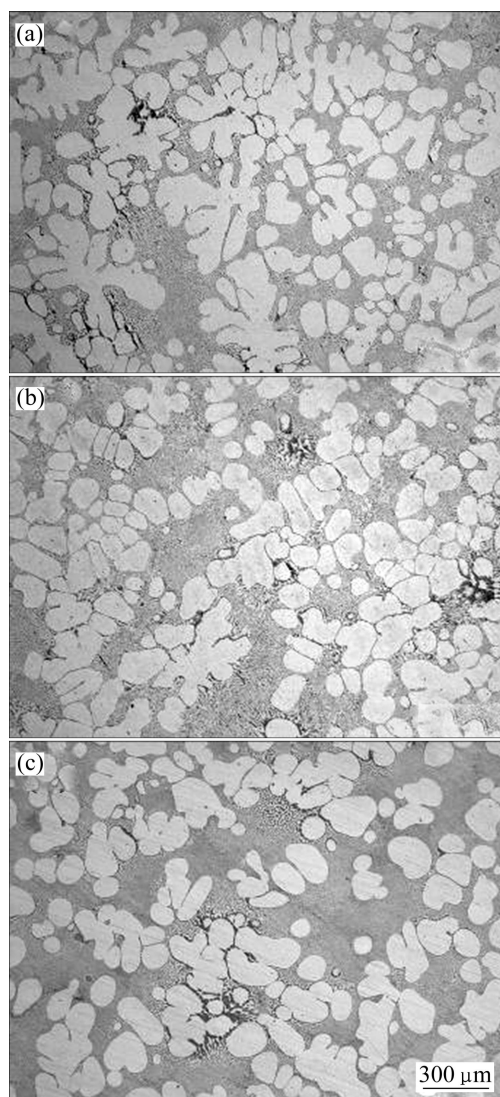


图 5 旋转磁场不同励磁电流下 Pb-80%Sn 过共晶合金凝固组织形貌

Fig. 5 Microstructures of Pb-80%Sn alloy under rotating magnetic field with different excitation currents: (a) $I=75$ A; (b) $I=125$ A; (c) $I=150$ A

式中: F 为金属熔体所受 Lorentz 力; I 为励磁电流; $\varphi(f)$ 是频率 f 的函数, 在频率不变的情况下, 熔体受力大小与励磁电流大小成正比。励磁电流越大, 搅拌越剧烈, 使得旋转磁场和螺旋细化凝固组织的能力增强, 当电流为 125 A 时, 细化晶粒的效果达到最好, 说明此时各因素作用效果达到最优匹配。继续增大励磁电流晶粒开始长大的原因为一是更加强烈的搅拌作用提高了晶粒之间摩擦与碰撞的机会, 晶粒聚集的程度变大, 使聚集体尺寸变大^[19]; 二是考虑到当励磁电流较大时, 磁场向熔体注入了大量附加能量, 在一定程度上延长了熔体凝固时间, 使晶粒有继续长大的机

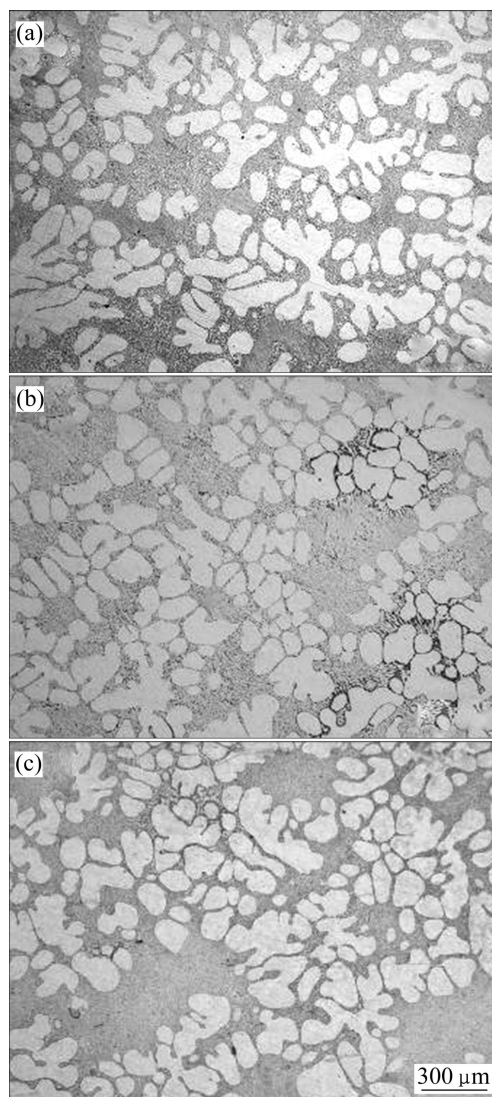


图 6 螺旋磁场不同励磁电流下 Pb-80%Sn 过共晶合金凝固组织形貌

Fig. 6 Microstructures of Pb-80%Sn alloy under spiral magnetic field with different excitation currents: (a) $I=75$ A; (b) $I=125$ A; (c) $I=150$ A

会。可见, 两种磁场下励磁电流在细化晶粒方面存在最佳值。

2.4 不同磁场对宏观成分偏析的影响

不同励磁电流的旋转磁场和螺旋磁场搅拌下 Pb-80%Sn 过共晶合金铸锭上、下部位成分差($w_u(\text{Sn})$ 、 $w_l(\text{Sn})$)($\Delta w(\text{Sn})=w_u(\text{Sn})-w_l(\text{Sn})$)分布情况如图 8 所示。常规条件下, 铸锭上、下部位 Sn 含量差可达 9.46%(质量分数), 从图 8 可以看出, 旋转磁场改善成分偏析的作用规律不明显, 当励磁电流为 125 A 时, 改善偏析的效果达到最好, 此时 Sn 含量差为 1.95%(质量分数)。

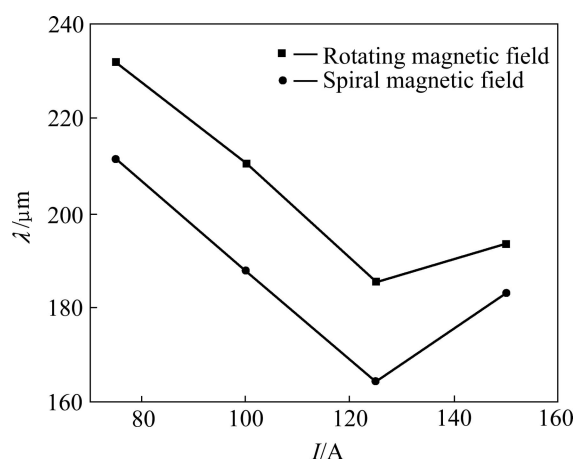


图7 不同凝固条件下晶粒尺寸与励磁电流关系

Fig. 7 Relationship between grains size and excitation current under different solidified conditions

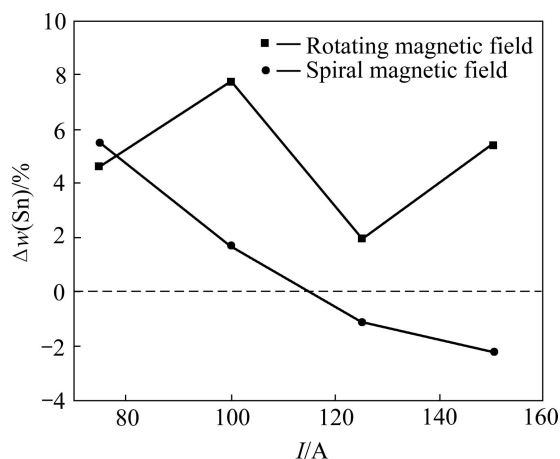


图8 不同励磁电流下 Pb-80%Sn 过共晶合金的成分分布

Fig. 8 Component distribution of Pb-80%Sn alloy under different currents

而施加螺旋磁场搅拌时,随着励磁电流的增大,Sn 含量差逐渐减小,当电流为 100 A 时可基本达到与旋转磁场最佳电流 125 A 时相当的搅拌效果,可见螺旋磁场在能耗方面显示出一定优势。当电流增大到 115 A 时,Sn 含量差基本为零,继续增大电流,出现铸锭下部 Sn 含量多于上部的反重力偏析现象。

分析图 3(a)可知,旋转磁场虽然在一定程度上减缓了初生相上浮的趋势,但不能从根本上抵消初生相在纵向上的受力差,因此无法彻底消除宏观偏析。而螺旋磁场由于 F_z 的存在能较好地解决这个问题,可以在更大程度上阻止晶粒上升。另外,螺旋磁场作用下熔体对流也更加剧烈,即使纵向上晶粒所受合力向上,部分上升到铸锭上部的初生相也会因强烈的对流被卷入液芯中。当励磁电流超过 115 A 时,螺旋磁场下初

生相所受纵向合力方向向下,即初生相向铸锭下部回落,故造成了类似于重力偏析现象的反重力偏析。可见,轴向搅拌力对凝固组织有较大影响,更有利于消除宏观偏析。因此,螺旋磁场可以基本消除铸锭宏观成分偏差,且在整体上改善偏析的能力好于旋转磁场。

3 结论

1) 螺旋磁场是旋转和行波磁场的叠加,合金熔体受螺旋磁场 Lorentz 力的驱使,产生强烈的三维流动,且可以产生比旋转磁场更大的纵向搅拌力,因此,更易于破碎和细化枝晶组织,减小晶核周围各向温度梯度和固液界面的浓度梯度,使得晶粒的择优生长倾向减弱,既能促进椭球或球状晶的生成,又能更好地改善宏观偏析。

2) 在频率一定的情况下,初生相晶粒尺寸随着励磁电流的增大而减小;当励磁电流为 125 A 时,旋转磁场和螺旋磁场细化晶粒的效果最好,继续增大电流,晶粒反而粗化。

3) 螺旋磁场可以基本消除 Pb-80%Sn 过共晶合金的成分偏析,在较小励磁电流(100 A)下便达到与旋转磁场在最佳搅拌电流(125 A)时相当的搅拌效果,表明螺旋磁场在能耗方面也具有优势。

REFERENCES

- [1] VIVES C. Solidification of tin in the presence of electric and magnetic field[J]. Journal of Crystal Growth, 1986, 76(1): 170-184.
- [2] 毛大恒, 严宏志. 电磁搅拌对铝及其合金凝固和铸态组织的影响[J]. 轻合金加工技术, 1991, 19(4): 10-16.
MAO Da-heng, YAN Hong-zhi. Effects of electromagnetic stirring on as-cast structure of Al and its alloys[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1991, 19(4): 10-16.
- [3] GARNIER M. Electromagnetic processing of liquid materials in Europe[J]. ISIJ International, 1990, 30(1): 1-7.
- [4] WILLERS B, ECKERT S, MICHEL U, HAASE I, ZOUHAR G. The columnar-to-equiaxed transition in Pb-Sn alloys affected by electromagnetically driven convection[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402(1/2): 55-65.
- [5] ECKERT S, WILLERS B, NIKITYUK P A, ECKERT K, MICHEL U. Application of a rotating magnetic field during directional solidification of Pb-Sn alloys: Consequences on CET[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 413/414:

- 211-216.
- [6] CHEN Zhao, WEN Xiao-li, CHEN Chang-le. Fluid flow and microstructure formation in a rotating magnetic field during the directional solidification process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 491: 395-401.
- [7] METAN V, EIGENFELD K, RABIGER D, LENOHARDT M, ECKERT S. Grain size control in Al-Si alloy by grain refinement and electromagnetic stirring[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 487(1/2): 163-172.
- [8] ZHOU Shu-cai, BAI Chen-guang, LEI Ya, REN Zheng-de, CAO Peng-jun, YANG Zhi-li. Effect of low-frequency rotary electromagnetic-field on solidification structure of continuous casting austenitic stainless steel[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(3): 360-364.
- [9] 张琦, 金俊泽, 王同敏, 李廷举, 郭庆涛. 金属液在旋转电磁搅拌器作用下的流动分析[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(1): 98-104.
- ZHANG Qi, JUN Jun-ze, WANG Tong-min, LI Ting-ju, GUO Qing-tao. Analysis of molten metal flow in rotating magnetic field[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(1): 98-104.
- [10] 吴存有, 周月明, 侯晓光. 电磁搅拌技术的发展[J]. *世界钢铁*, 2010(2): 36-41.
- WU Cun-you, ZHOU Yue-ming, HOU Xiao-guang. Application and development of EMS technology[J]. *World Iron & Steel*, 2010(2): 36-41.
- [11] 王宝峰, 李建超. 电磁搅拌技术在连铸生产中的应用[J]. *鞍钢技术*, 2009(1): 1-5.
- WANG Bao-feng, LI Jian-chao. Application of electromagnetic stirring technology in continuous casting[J]. *Angang Technology*, 2009(1): 1-5.
- [12] YASUDA H, TOH T, IWAI K, MORITA K. Recent progress of EPM in steelmaking, casting, and solidification processing[J]. *ISIJ International*, 2007, 47(4): 619-626.
- [13] 邢文彬, 许诚信, 房彩刚, 毛斌, 王世郁. 新型螺旋磁场电磁搅拌的冶金效果[J]. *北京科技大学学报*, 1991, 13(2): 110-115.
- XING Wen-bin, XU Cheng-xin, FANG Cai-gang, MAO Bin, WANG Shi-yu. An investigation on the metallurgical effects of EMS by a new type of helical magnetic field[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 1991, 13(2): 110-115.
- [14] 赵倩, 房灿峰, 侯晓光, 韩彦博, 张楠, 张兴国. 螺旋磁场对金属凝固过程中成分偏析的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31(6): 495-500.
- ZHAO Qian, FANG Can-feng, HOU Xiao-guang, HAN Yan-bo, ZHANG Nan, ZHANG Xing-guo. Effects of spiral magnetic field on composition segregation in the metal during solidification process[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2011, 31(6): 495-500.
- [15] 王红霞, 许春香, 徐林, 梁伟, 韩富银. 旋转磁场对Pb-Sn-Sb合金组织及性能的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2009, 17(1): 70-74.
- WANG Hong-xia, XU Chun-xiang, XUN Lin, LIANG Wei, HAN Fu-yin. Effects of rotating magnetic field on microstructure and properties of Pb-Sn-Sb ternary alloys[J]. *Materials Science & Technology*, 2009, 17(1): 70-74.
- [16] DONG Jie, CUI Jian-zhong, DING Wen-jiang. Theoretical discussion of the effect of a low-frequency electromagnetic vibrating field on the as-cast microstructures of DC Al-Zn-Mg-Cu-Zr ingots[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, 295(2): 179-187.
- [17] XU Guang-ji, WANG Zhi-hua, YIN Jian-jun, DING Yun-tian, KOU Sheng-zhong. Effect of rectangle wave pulse current on solidification structure of ZA27 alloy[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science*, 2006, 21(1): 81-83.
- [18] 周亮, 唐萍, 李永祥. 小方坯结晶器电磁搅拌磁场测试与分析[J]. *钢铁钒钛*, 2006, 27(4): 10-13.
- ZHOU Liang, TANG Ping, LI Yong-xiang. Test and analysis on magnetic field in M-EMS for billet caster[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2006, 27(4): 10-13.
- [19] 谢辉, 丁雨田, 郭学峰, 许广济. 电磁搅拌对Al-5wt%Cu初生相形貌的影响[J]. *热加工工艺*, 2000(6): 5-7.
- XIE Hui, DING Yu-tian, GUO Xue-feng, XU Guang-ji. Effect of electromagnetic stirring on the formation of primary phase of Al-5wt%Cu[J]. *Hot Working Technology*, 2000(6): 5-7.

(编辑 李艳红)