

电磁复合场对 Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金 凝固组织的影响*

郑天祥 钟云波[†] 孙宗乾 王江 吴秋芳 冯美龙 任忠鸣

(上海大学, 上海市现代冶金与材料制备重点实验室, 上海 200072)

(2012年6月5日收到; 2012年6月19日收到修改稿)

以 Zn-10 wt%Bi 的过偏晶合金作为研究对象, 在强磁场条件下, 考察了不同电磁体积力对其显微凝固组织与凝固过程的影响. 实验结果表明, 在一定的强静磁场下, 当交变电流增加到某一特定值时 (交变电流频率为 50 Hz), 得到的凝固组织最为均匀, 第二相颗粒直径也达到最小; 在固定交变电流值的条件下 (交变电流频率为 50 Hz), Zn-10 wt%Bi 合金的凝固组织随着磁感应强度的增加, 其偏析程度、弥散程度和第二相 Bi 颗粒的大小都有明显的改善. 实验分析结果表明, 磁场复合交变电流产生的电磁体积力的大小, 对合金凝固组织都有显著影响, 通过控制磁感应强度和交变电流大小, 从而获得较为理想的过偏晶合金凝固组织.

关键词: 强磁场, 偏晶合金, 偏析, 电磁体积力

PACS: 85.25.Am, 07.79.-v, 11.540.Dw, 62.30.+d

1 引言

人们对偏晶合金的研究已有将近半个世纪的历史, 至今已发现 500 余种类型的偏晶合金系. 偏晶合金在国际上统称为难混溶合金, 它是一种由一液相转变为另一液相和固相的偏晶反应 ($L \rightarrow S_1 + L_2$) 的一类合金, 国内常称为偏晶合金^[1]. 该类合金最显著的特点是在其二元相图中存在一个两液相不混溶区 (immiscibility gap), 一般也称其为“难混溶区”.

在该类合金中, 例如 Al-Pb, Cu-Pb 偏晶合金中弥散分布的富 Pb 相具有良好的柔软性和减摩性, 使得它们成为理想的轴瓦材料, 目前已用于汽车、发动机、船舶等的轴承中; Ga-Bi 偏晶合金具有优良的半导体性能; Al-Bi, Al-In 偏晶合金则具有优异的光学和软磁性能^[2-6], Zn-Bi 偏晶合金则是理想的电化学材料. 由于该类合金特殊的冶金

特点, 在传统的地面铸造条件下, 由于 Ostwald 熟化、Brownian 运动、Marangoni 运动、Stokes 运动等凝并方式, 很容易得到偏析很严重甚至两组元完全分层的合金凝固组织, 使这类合金几乎没有任何使用价值, 无法发挥其潜在的优异性能. 这就对科研工作者提出了更高的要求. 如果我们通过某种特殊的手段和方法, 得到第二相弥散分布的偏晶合金, 这类合金所蕴含的各种特殊的电学、力学等性能都能得到最大的发挥^[7].

目前, 粉末冶金法^[8]是获得第二相均匀分布的偏晶合金的较为成熟的工艺方法. 传统的 Cu-Pb 轴瓦合金就是通过粉末冶金的方法所制的. 但由于易起皮、脱落等固有缺点, 使产品的力学性能无法与铸造件相媲美. 其他诸如定向凝固^[9,10]、微重力条件下熔融铸造法^[11-13]、搅拌铸造法^[14-16]、控制铸造法^[17]、快速凝固法^[18]等方法, 由于自身的各种缺陷的限制, 使其无法得到工业化应用. 所以, 如何在常规条件下获得第二相弥散分布的偏晶

* 国家自然科学基金 (批准号: 50974085, 51034010)、上海市人才发展基金 (批准号: 2009046)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2009AA03Z109)、上海市重大科技攻关项目批准号: 09dz1206401, 09dz1206402) 和上海市重大研究创新项目 (批准号: 09zz98) 资助的课题.

[†] E-mail: yunboz@staff.shu.edu.cn

合金,是科研工作者不懈追求的目标.

利用磁场制备新材料近年来受到广泛关注. 科研工作者已在弱磁场 ($B < 1 \text{ T}$) 环境下开展过许多偏晶合金凝固的研究, 结果表明, 磁场具有一定的抑制第二相颗粒运动的作用, 但仍然无法避免组元的分层. 近年来, 随着超导技术的成熟和强磁体技术的进步, 人们可以长时间在 20, 30 T 甚至更高的磁场环境下进行各种实验研究. Yasuda 等^[19] 研究了强磁场对 Cu-Pb 偏晶合金凝固的影响, 发现 10 T 的强磁场对 Pb 的原子百分比在 65%—70% 之间的合金的宏观偏析具有明显的抑制效果. 表明强磁场对富 Cu 相液滴及其碰撞凝并速率都有显著的影响, 提出了第二相粒子在受到外界磁场作用的熔体中运动的受力模型. Zhang 等^[20] 的研究也获得了与 Yasuda 类似的效果. 史俊芳等^[21] 研究发现在某一固定冷却速度下, Cu-90 wt%Pb 合金中的第二相富 Cu 相的抑制作用随着磁场强度的增加而增加, 并在 12 T 的条件下, 由密度差引起的重力偏析得到了完全的抑制. 上述对强磁体下偏晶合金凝固的研究结果表明, 尽管强磁场对偏晶合金凝固中第二相熔滴的运动具有较强的抑制作用, 但对具有较强分层倾向的过偏晶成分合金, 在常规的冷却速率下, 10 T 量级的强磁场仍然无法避免分层现象的产生. 20 世纪 90 年代, Vives^[22] 发明了电磁振荡法, 并首次研究了电磁振荡力 (电磁体积力) 对 A356 铝合金凝固微观组织的影响. 通过在 0.7 T 的磁场环境下同时施加与磁场垂直的交变电流, 从而产生电磁振荡效应. 发现当电磁振荡力较小时, 柱状晶逐渐转变成粗大的等轴晶, 随着电磁振荡力的增加, 凝固组织内的晶粒也随之逐渐细化, 并最终得到晶粒细化的凝固组织. Miwa^[23] 也提出了利用电磁振荡制备细小微结构的金属材料的新方法. 受此启发, 王江、钟云波等^[24,25] 提出在强磁场下复合交变电流产生的强大电磁振荡力来细化偏晶合金凝固中第二相熔滴的粒径, 进而抑制偏晶合金重力偏析的设想. 结果表明对于 Zn-30 wt%Bi 的过偏晶合金, 在 10 T 的强静磁场中, 复合 50 Hz, 8.5 A/cm^3 的交变电流, $25 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的冷却速度, 成功获得了第二相颗粒细化的弥散组织, 提出了一种电磁振荡力对第二相粒子的分离细化机理.

在偏晶合金凝固过程中, 影响其比重偏析的主要因素与两相的密度差、第二相液滴直径、熔体黏度和冷却速度有关, 当施加电磁场时, 还与磁感应强度、电流强度以及电磁体积力等因素有关. 在

王江等^[24] 的研究中, 第二相熔滴的细化, 合金的偏析程度到底取决于磁场强度、电流强度还是电磁体积力, 仍然没有定量的数据. 因此, 本文以 Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金作为研究对象, 在王江等的研究基础之上, 进一步探讨电磁复合场中电磁体积力对偏晶合金的偏析的影响, 分析了电磁体积力 ($F_L = J \times B$) 对合金熔体微观组织中第二相颗粒的细化机理.

2 实验材料及方法

本实验采用工业纯的 Zn (99.8%), Bi (99.8%) 颗粒, 按照 Zn-10 wt%Bi 的比例用电子天秤称取, 放在石墨坩埚中, 采用真空感应加热到 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 10 min, 得到尺寸为 $\Phi 15 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的原始试样. 然后将得到的试样置于内径 16 mm, 外径 22 mm 的石英坩埚中, 两端用直径 16 mm 的不锈钢电极压紧, 用石墨密封处理以防止加热时熔体的泄露. 实验中采用 K 型热电偶配合 ZF-100 控温仪对加热炉进行控温. 实验装置如图 1 所示. 将得到的实验试样放入加热炉中, 置于竖直强磁场的均匀区, 保持强磁场方向与交变电流方向垂直. 实验过程在氩气气氛保护中进行. 开启控温仪, 使加热炉的温度以 $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 的加热速率升温至 $650 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 25 min, 通过不锈钢电极往 Zn-10 wt%Bi 合金熔体通入交变电流, 继续保温 5 min. 然后立即将加热炉向上提拉 (保持试样在磁场中心不动), 使试样在上

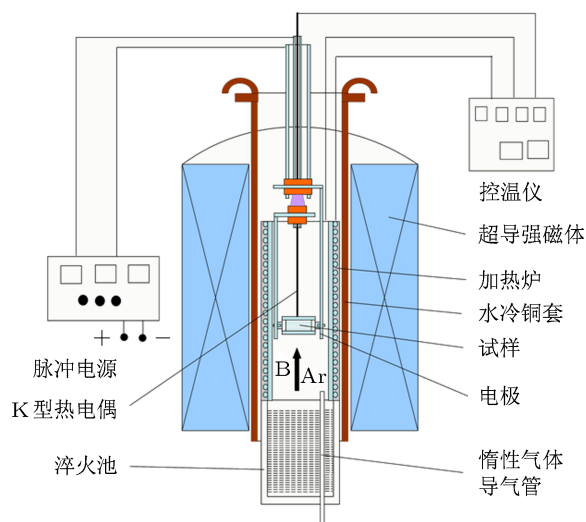


图 1 强磁场复合交变电流实验装置示意图

提的水池中淬火. 淬火过程中仍然保持交变电流通入试样. 1 min 后试样温度降至 70 °C 左右的时候, 停止通入交流电流, 取出试样. 调整磁感应强度和交变电流强度, 重复上述过程. 为了使合金熔体中电磁体积力能保持接近, 在不同磁感应强度下, 交变电流强度的大小进行了适当的调整. 在距试样一端 1/3 处沿横截面切断试样. 用 BUEHLER (Simplimet 1000) 自动镶样机镶样. 经磨样抛光处理后, 采用体视显微镜、莱卡显微镜以及扫描面电

镜对试样的凝固组织进行宏观和微观观察.

3 实验结果

根据前述的实验方法, 得到如图 2 所示的 Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金的宏观组织形貌, 这是在不同磁场、不同交变电流强度 ($f = 50 \text{ Hz}$) 但每一纵列电磁体积力相同、并且采用水淬冷却的条件下得到的结果.

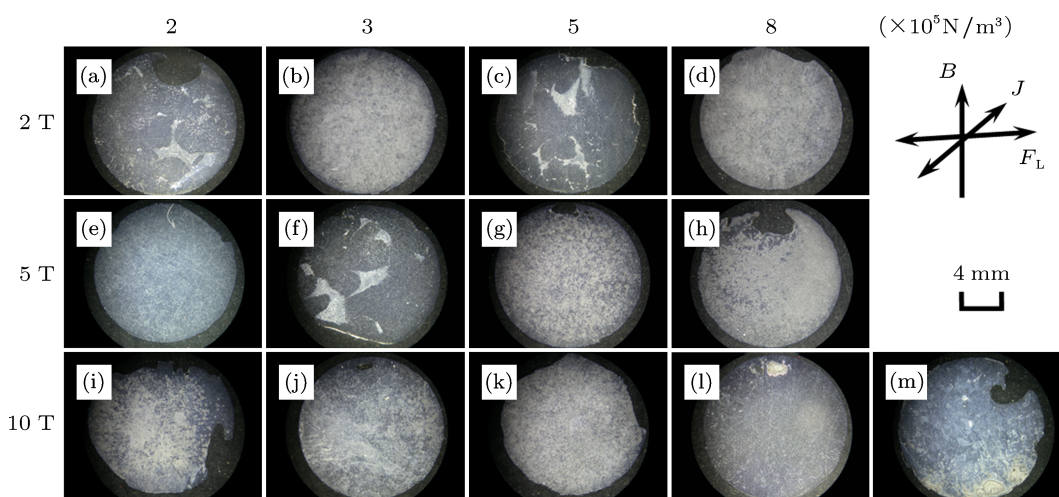


图 2 不同电磁体积力下, Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金的宏观组织形貌

由于第二组元金属铋的成分较少, 仅为 10 wt%. 所以从宏观上所表现出来的现象不是十分明显. 由文献 [19] 知, 强磁场可以抑制偏晶合金中第二相的偏析与分层. 由图 2 可看出, 对于 Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金在 10 T 强磁场、无交变电流的条件下, 富 Zn 相与富 Bi 相仍出现明显的偏析分层现象 (图 2(m)). 而且富 Bi 相在整个试样的下面. 但当施加电磁体积力 F_L 时, 所有条件下的合金, 富 Zn 相与富 Bi 相都较好地混合在一起, 没有出现明显的偏析分层现象. 这说明强磁场复合交变电流条件下, 所产生的电磁体积力对 Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金的宏观偏析有很大的改善作用.

为了更清楚地了解电磁体积力对该成分合金组织的影响, 采用莱卡金相显微镜对其显微组织进行微观观察, 如图 3 所示. 为了更精确地确定每个磁感应强度下的最佳电磁体积力, 采用 Photoshop CS4 与 Image Pro Plus 软件测量了 50 倍下每个磁

感应强度下不同电磁体积力 Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金中第二相铋颗粒直径的尺寸大小, 如图 4 所示.

通过图 4 可知, 在磁感应强度为 2 T 和 10 T 条件下, 电磁体积力大小为 $F_L = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^3$, 得到的 Zn-10 wt%Bi 的宏观组织与微观组织中的第二相粒径为最小 (图 4(a), (c)), 且分布也最为弥散化 (图 3(a), (c)). 当电磁体积力小于 $F_L = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 时分层现象越来越明显, 第二相铋颗粒逐渐富集到锌基体底部. 当电磁体积力大于 $F_L = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 时第二相铋颗粒的粒径出现粗化 (图 4(a), (c)). 但在 2 T 条件下的部分试样, 从宏观图片可看到局部白亮区. 当电磁体积力增加到 $F_L = 8 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 时, 粒径比小电磁体积力条件时大, 但上中下部的粒径分布比较均匀. 在磁感应强度为 5 T 条件下, 电磁体积力为 $F_L = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^3$, 得到的 Zn-10 wt%Bi 的宏观组织与微观组织中的第二相粒径

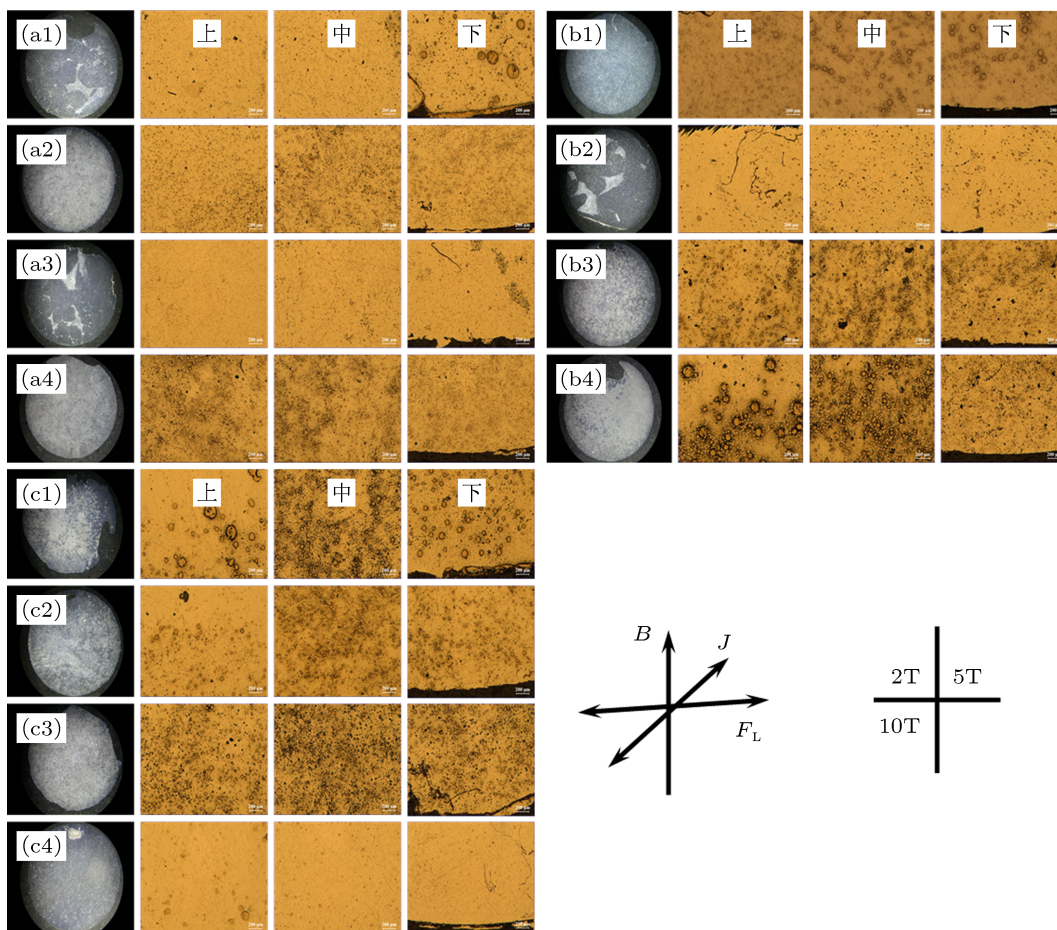


图3 Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金的宏观、微观组织 (a₁)=(b₁)=(c₁)=2×10⁵ N/m³; (a₂)=(b₂)=(c₂)=3×10⁵ N/m³; (a₃)=(b₃)=(c₃)=5×10⁵ N/m³; (a₄)=(b₄)=(c₄)=8×10⁵ N/m³

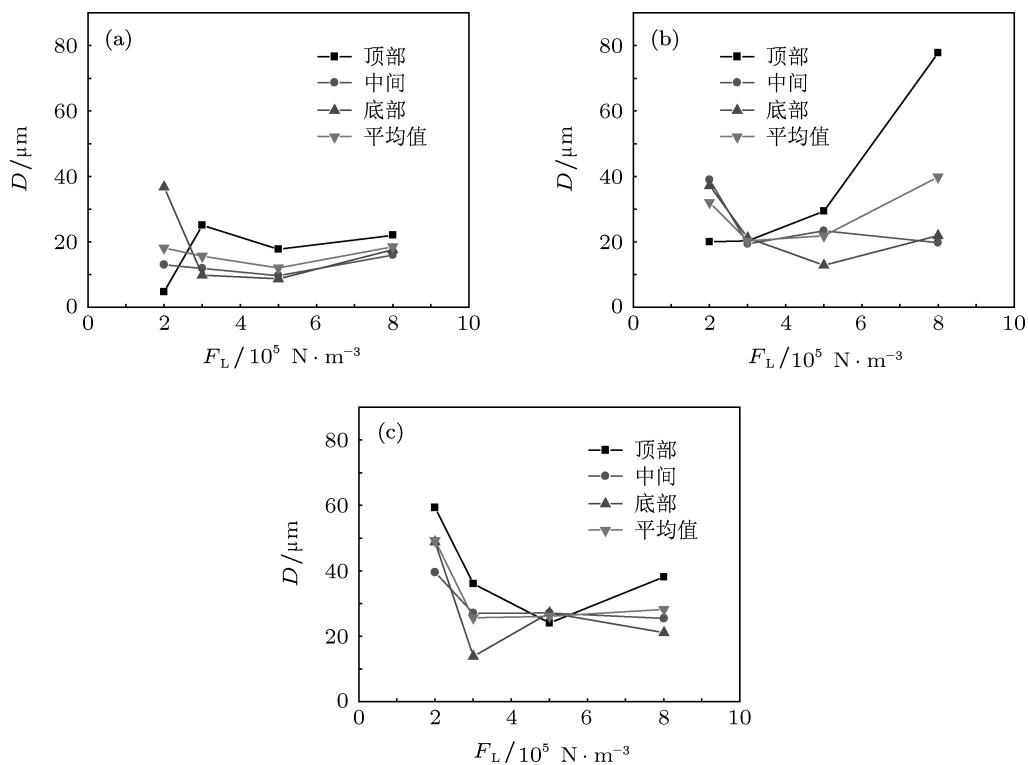


图4 Zn-10 wt%Bi 过偏晶合金 50 倍下微观组织中铋颗粒尺寸与电磁体积力的对应关系 (a) 2 T; (b) 5 T; (c) 10 T

为最小(图 4(b)),且分布也较为弥散化(图 4(b)),但其宏观组织中也出现了局部白亮区.而当电磁体积力小于 $F_L = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 时,分层现象越来越明显,第二相铋颗粒逐渐富集到锌基体底部.当电磁体积力大于 $F_L = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 时第二相铋颗粒的粒径出现粗化(图 4(b)).但在 $F_L = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 时,粒径与 $F_L = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 时的粒径相差不多,且没有出现局部白亮区.结合图 3 与图 4 也可看到,当电磁体积力较小时 ($F_L = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^3$),随着磁感应强度的增加,合金中第二相铋颗粒的偏析分层现象逐渐得到抑制(底部的铋颗粒直径随着磁感应强度的增加减小,逐渐缩小了与中部、上部的铋颗粒粒径差),但得到的凝固组织中的铋颗粒粒径随之增大.在其他的电磁体积力条件下也得到类似的现象.

4 分析讨论

4.1 局部贫铋区的形成

从宏观图片可看到 2 T 及 5 T 条件下的部分试样出现局部白亮区域,经扫描电镜观察知(图 5),该区内富集大量的气孔.白亮色是由于在光学显微镜下观察时,光源照射在气孔边缘发射所致.颜色较其他部位深是由于气孔聚集使该区很容易被腐蚀导致.与其他区域的成分变化如表 1 所示的 EDS 结果.可以看出该区的铋含量(wt%)比其他区域低了 2.11 wt%,即出现了局部偏析.白亮区内的气孔可能是由于电磁振荡中的空化效应导致,也可能是试样与石英坩埚间的气体被卷入熔体聚集所致.

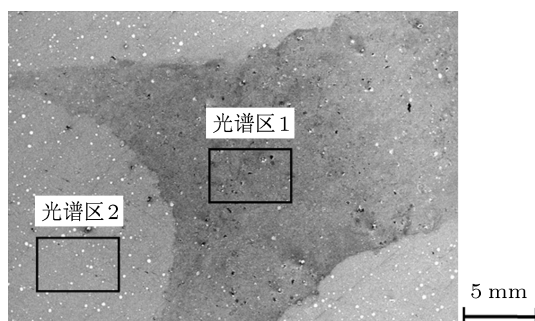


图 5 气孔富集区与无气孔区(放大 40 倍)

表 1 气孔富集区与无气孔区内的 EDS 对比

光谱区	O wt%	Zn wt%	Bi wt%	Total wt%
光谱区 1	4.25	91.37	4.38	100.00
光谱区 2	1.64	91.87	6.49	100.00

4.2 第二相铋颗粒在电磁体积力作用下的运动方式

电磁复合场制备方法的主要作用机理在于导电熔体中通以电流后,在磁场中将受到电磁体积力,即 Lorentz 力的作用.电磁体积力的方向决定于磁场方向和熔体中电流方向,磁场方向竖直向上,交变电流为水平方向,因此熔体中电磁体积力的方向将随着交变电流方向的转换而改变,其改变的频率与交变电流的频率一致.电磁体积力的大小由磁感应强度和电流密度共同决定,由(1)式给出:

$$F_L = J \times B, \quad (1)$$

式中, J 为交变电流密度, B 为磁感应强度.

电磁复合场作用是通过电磁体积力方向的改变,起到对金属熔体施加振荡的效果,从而细化 Bi 液滴、增大液滴运动距离、降低液滴沉降速度,最终减缓偏晶合金的比重偏析.电磁体积力对熔体中第二相铋颗粒的作用如图 7 所示.

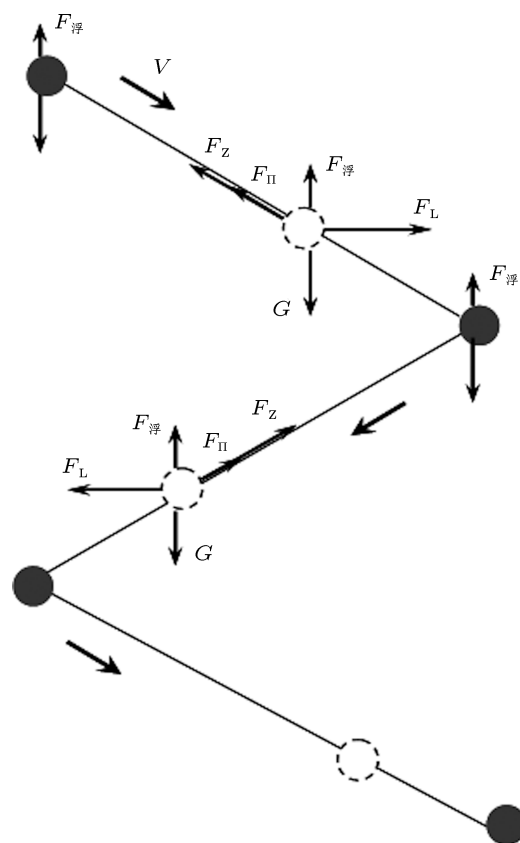


图 6 第二相铋滴的运动路径示意图及其受力示意图

根据流体力学原理,当熔体的雷诺数 $Re \gg 1$ 时,第二相铋滴将受到惯性力的作用,并在惯性力的作用下分离、细化 [24,25].以铋颗粒的平均粒径

为前提,经计算,第二相铋滴在熔体中的运动是一种小雷诺数运动,即 $Re \ll 1$. 这就意味着第二相铋滴在锌熔体中运动的惯性力作用可以被忽略,所以其运动方式可视为空气中的雾滴,其运动是一种匀速运动^[26]. 由图 6 知第二相铋滴在熔体中的合力为

$$F_{\text{合}} = \sqrt{(G - F_{\text{浮}})^2 + F_V^2} - (F_z + F_{\eta})$$

$$= \sqrt{\left[(\rho_{\text{Bi}} - \rho_{\text{Zn}})g \frac{4}{3}\pi r_p^3 \right]^2 + \left(F_L \cdot \frac{4}{3}\pi r_p^3 \right)^2} - (6\pi\kappa r_p v B^2 + 6\pi r_p \eta v) \quad (2)$$

式中 G 为铋滴的重力(N); $F_{\text{浮}}$ 为铋滴在锌基体中所受的浮力(N); F_V 为单个铋滴因电磁体积力所受的力(N); F_L 为铋滴受到的电磁体积力(N/m³); F_z 为铋滴在锌基体中运动时受到的磁滞阻力(N); F_{η} 为铋滴在锌熔体中运动,受到的黏滞阻力(N); r_p 为铋滴的直径(m); v 为铋滴运动的相对速度(m/s); κ 为与 Zn 熔体电导率和晶粒直径有关的系数; η 为锌熔体的动力学黏度(mPa·s); ρ_{Bi} 为铋的密度(kg/m³); ρ_{Zn} 为锌的密度(kg/m³).

根据 Hartmann 数的大小,磁场对黏度的影响存在三种计算方式:

$$\eta_{\text{eff}} = \eta \left(1 + \frac{Ha^2}{15} \right), \quad Ha \ll 1, \quad (3)$$

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\eta}{3} \left/ \left(\frac{\coth(Ha)}{Ha} - \frac{1}{Ha^2} \right) \right., \quad Ha = 1, \quad (4)$$

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\eta}{3} Ha, \quad Ha \gg 1. \quad (5)$$

由于 $Ha \gg 1$, 所以:

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\eta}{3} Ha = \frac{BL\sqrt{\sigma\eta}}{3}$$

$$= \frac{2Br_p\sqrt{\sigma\eta}}{3}, \quad (6)$$

其中 L 为特征长度,本文中取液滴的直径 $2r$ (取 20 μm); σ 为 Zn 熔体的电导率,其值为 2.67×10^6 (Ω·m)⁻¹. η 为 Zn 熔体的动力学黏度,其值为 1.98×10^{-3} Pa·s.

由上述的受力示意图可知,当合力为零时,其运动速度最大,速度为

$$v = \frac{2r_p^2 \sqrt{[(\rho_{\text{Bi}} - \rho_{\text{Zn}})g]^2 + F_L^2}}{9(\eta + \kappa B^2)}. \quad (7)$$

有学者将 $(\eta + \kappa B^2)$ 归结为电磁体积力引起基体动力学黏度 η 的增加,称为有效黏度 η_{eff} , 由 Hartmann 数表示. 通过不同磁感应强度下有效 Hartmann 数的计算(图 7)可以得到对应的有效黏度 η_{eff} 大小.

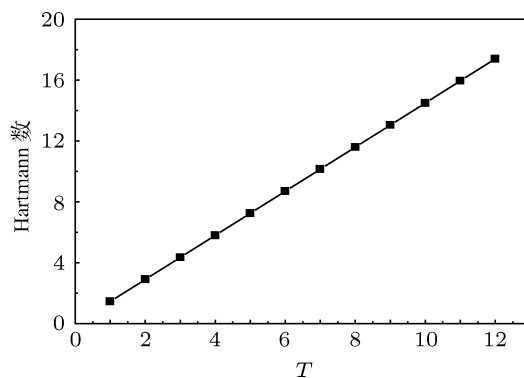


图 7 不同磁感应强度下的 Hartmann 数

结合 (6) 式和 (7) 式可得:

$$v = \frac{r_p \sqrt{[(\rho_{\text{Bi}} - \rho_{\text{Zn}})g]^2 + (J \times B)^2}}{3B\sqrt{\sigma\eta}}. \quad (8)$$

以上讨论了电磁体积力与磁场的作用对 Zn-Bi 偏晶合金在液-液分离过程中第二相铋滴的运动方式的影响. 可见,磁感应强度 B 的大小与电磁体积力 $J \times B$ 的大小对铋滴的运动有着重要的影响,前者与铋滴的相对运动速度成反比,后者与铋滴的相对运动速度成正比. 电磁体积力不变时,铋滴的运动速度随着磁感应强度的增加而减小. 还可看出,尺寸较小的铋液滴,其有效运动速度较小,有利于抑制宏观偏析. 由 (8) 式也可看出,当电磁体积力 $J \times B$ 较小时,液滴的运动速度主要受磁感应强度大小的影响. 而当电磁体积力较大时,液滴的运动速度受电磁体积力的控制作用明显. 最终得到了图 4 的合金凝固组织. 由于磁场对导电颗粒、液滴在导电熔体中的运动有抑制作用. 李传军^[27] 经过差热分析,发现磁场对抗磁性纯铋的形核有促进作用. 当施加相同的电磁体积力时,随着磁感应强度的增加,对铋滴的 Maragoni 对流、Stokes 对流等的抑制作用越显著,使第二相铋滴越接近于原位稳态形核. Zener^[28] 发现在有物质对流的系统中,液滴的生长速度与 Stokes 运动速度 U_S 和 Maragoni 运动速度 U_M 的矢量和 $U^{1/2}$ 成正比. 所以,当 U 逐渐被抑制时,则液滴越接近按照纯扩散方式长大,导致产生磁感应强度越大,第二相铋颗粒粒径也越大的现象. 至于凝固后的铋颗粒的直径大小则受电磁体积力的大小及交变电流的频率的控制. 在最终的凝固组织中同样看到同一磁感应强度条件下,液滴的运动速度越大越容易出现第二相的粗化、偏析,这是因为电磁体积力的增加,导致在同一频率(时间)下,同一液滴所经过的路程增加. 并且大液滴更容易赶上小液滴,增加液滴间的横向碰撞概率,因而

导致液滴反而更容易粗化. 但液滴速度的影响应该考虑对颗粒剪切的综合作用: 液滴速度越大, 越易受到流体的剪切导致颗粒细化, 使细化后的液滴运动速度降低. 但速度增加的同时又能促进聚合, 因此, 第二相铋滴的运动速度存在某个最佳值或最佳范围.

4.3 第二相铋颗粒的电磁分离细化机理

如前所述, 首先, 第二相铋滴在 Zn 熔体中运动时, 是一种小雷诺数运动, 这样就可以忽略其受到的惯性力作用. 其次, 当铋滴在 Zn 熔体中受电磁体体积力作用而运动时, 其本身作为一种熔体, 内部熔体也产生一种相对对流, 该对流是由于周围的锌熔体与铋滴接触面之间的内力所致. 这种内力相当于一种拉力, 将铋滴表面的熔体向铋滴运动的反方向上拉动, 导致铋滴内部的熔体对流方向与铋滴的运动方向一致. 取图 6 中铋滴运动过程中某一瞬间的运动状态, 运动速度 v 即为上述中的某一最佳值或最佳范围. 由于受到周围锌熔体的作用, 其内部对流方式如图 8 所示.

根据图 8, 铋滴运动速度 v 的不同分量与磁场的相互作用可产生不同的感应电流, 进而产生不同方式的力. 其感应电流与受力方式如图 9 所示.

将铋颗粒沿着前后不同的两个部位截断, 沿着运动方向观察, 我们得到图 8 中的 v_2 分量的方向如图 9 所示. v_2 与磁感应强度分量 B_1 感生的电流为 I_1, I_2 . I_1, I_2 与 B_1 的作用, 产生向外张的力 F_{I_1, B_1} (尾部) 和向内收缩的力 F_{I_2, B_1} (前部). 同时, I_1 与 I_2 在铋滴运动方向上的分量与 B_2 作用产

生的洛伦兹力 F_{I_1, B_2} (尾部) 和 F_{I_2, B_2} (前部). 其方向如图 8 所示, 前尾两部分的受力方向刚好相反, 并且在同一截面上, 其受力成对称分布, 但方向也相反. 另外, 需要注意的是, 沿着周向的 F_{I_1, B_2} (尾部) 和 F_{I_2, B_2} (前部) 大小分布并不均匀, 在 F_{I_1, B_2} (尾部) 和 F_{I_2, B_2} (前部) 最大值处向两侧成递减分布, 但也成对称状态. 由于以上力的作用, 就使 F_{I_2, B_1} (前部) 与 F_{I_2, B_2} (前部) 产生水平方向上的合力 F_1 . 同时, F_{I_1, B_1} (尾部) 与 F_{I_1, B_2} (尾部) 产生水平方向上的合力 F_2 . F_1 与 F_2 就相当于一种切应力作用在铋熔体上 (如图 10 所示), 这种切应力将尺寸粗大的铋滴细化成尺寸更细小的液态铋滴. 若细化后的尺寸依然粗大, 可通过相同的作用得到进一步的细化.

经以上分析可知, 磁场可以抑制第二相铋的偏析, 但较弱的磁感应强度无法完全抑制宏观偏析分层. 当施加交变电流时, 在由磁场复合交变电流产生的电磁体体积力的作用下, 可以在较低的磁感应强度条件下得到第二相弥散分布的匀质过偏晶合金. 但并非在各个磁感应强度下, 相同的电磁体体积力可以获得近乎一样的凝固组织. 唯有在合适的磁感应强度下, 施加合适的交变电流, 产生合适的电磁体体积力才能获得较为理想的过偏晶凝固组织. 电磁复合场施加后产生的电磁体体积力改变了第二相在基体中的运动速度, 进而使铋滴内部熔体的流动速度发生变化. 在上述铋滴的最佳运动速度值或范围的前提下, 铋滴内部前后流体运动速度与相应地外加磁感应强度大小感生的 Lorentz 力 (F_1, F_2) 增加到某一合适值, 使铋滴按图 10 的方式进行分离、细化.

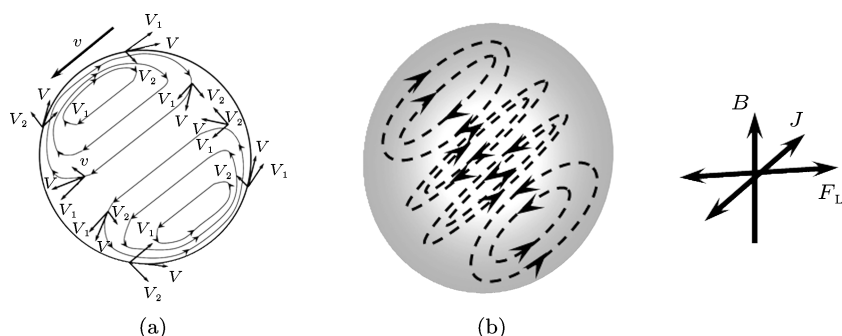


图 8 铋液滴内部受锌流体作用而产生的相对对流示意图 (a) 二维; (b) 三维

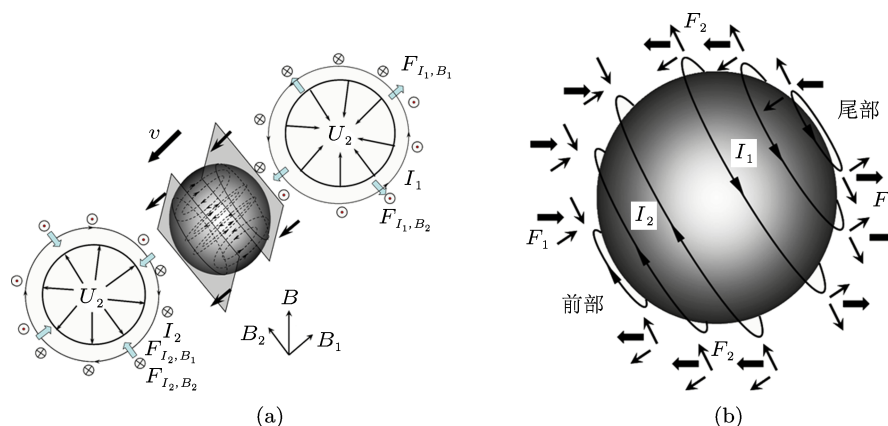


图9 第二相铋滴运动中电磁分离细化受力示意图 (a) 铋滴内部熔体与外界磁场的耦合作用示意图; (b) 感生电流三维示意图

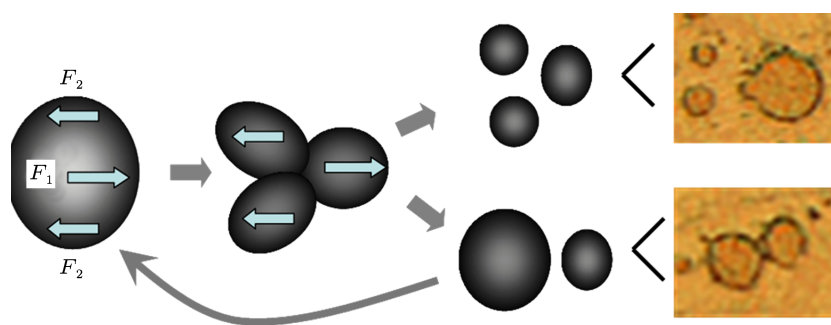


图10 第二相铋滴的电磁分离、细化示意图

5 结论

对于偏晶合金, 影响其偏析分层的因素主要分为三个阶段. 第一阶段受形核控制; 第二阶段受扩散长大、Ostwald 熟化、Marangoni 凝并和布朗凝并的影响; 第三阶段主要受 Stokes 沉降和 Marangoni 凝并的影响. 当施加磁场时, 由于较低磁感应强度下, 两相的密度差作用引起偏析的主导作用和较高磁感应强度对合金熔体的制动作用, 使得当两液相分离时, 在低磁感应强度下以 Stokes 沉降聚合为主, 而在较高磁感应强度下以 Ostwald 熟化、Marangoni 对流为主. 当施加交变电流时, 驱动 Zn 熔体中第二相 Bi 滴运动的力为电磁体积力和两液相的密度引起的浮力的合力, 使其做“Z”字

形运动. 所以, 可以得到如下结论:

1) 对于 Zn-10 wt%Bi 的过偏晶合金, 当磁感应强度分别为 2, 5 和 10 T 时, 电磁体积力为 $F_L = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ 的条件下, 所得到的合金组织比较接近, 粒径较小, 分布也更为弥散化. 10 T 条件下的组织最为理想. 但在 2 T 条件下, 出现了局部的气孔富集区, 即局部贫铋区.

2) 同一电磁体积力条件下, 随着磁感应强度的增加反而促进了第二相铋颗粒的形核长大. 但纵向的偏析、分层得到了显著的抑制.

3) 小雷诺数下 ($Re \ll 1$), 在两相不混溶区内, 第二相铋滴在内部熔体的运动与相应地外加磁感应强度所感生出的 Lorentz 力的作用下产生分离细化现象.

[1] Jia J, Zhao J Z, Guo J J, Liu Y 2002 *Immiscible Alloy and Its Processing Method* (Harbin: Harbin Institute of Technology Press) pp1-2 (in Chinese) [贾均, 赵九洲, 郭景杰, 刘源 2002 难混溶合金及其制备技术 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社) 第 1—2 页]

[2] Song T, Wang T M, Zhao J Z, Xue G X, Li T J 2007 *Foundry* **56** 1025 (in Chinese) [宋涛, 王同敏, 赵九洲, 薛冠霞, 李廷举 2007 铸造 **56** 1025]

[3] Inoue A, Yano N J 1987 *Mater. Sci.* **22** 123

- [4] Otto G H, Ratke L 1974 *Proceedings of the Third Space Processing Symposium-Skylab Results* Marshall Space Flight Center, Alabama, April 30–May 1, 1974, p1031
- [5] Wecker J, Helmolt R V, Schultz L, Samwer K 1993 *Appl. Phys. Lett.* **52** 1985
- [6] Uenishi K, Kawaguchi H, Kobayashi K F 1994 *J. Mater. Sci.* **29** 4860
- [7] Walter H U 1986 *Binary systems with miscibility gap in the liquid state In: Materials Science in Space*, edited by Feuerbacher B, Hamacher H, Naumann R J Heidelberg Newyork: Sprinverlag Press pp343–378
- [8] Mackay M L 1977 *Met. Pro.* **111** 32
- [9] Cahn J W 1979 *Metall. Trans.* **10A** 119
- [10] Derby B, Favier J J 1983 *Acta Metal.* **31** 1123
- [11] Carlberg T, Fredriksson H 1980 *Melellurgical Transaction A* **11** 10
- [12] Lacy L L, Otto G 1974 *AIAA/ASME Paper*. Boston **74**
- [13] Oramov P V, Semin S I, Sorkin M Z, Chashechkina D Y 1980 *Phys. Chem. Mater. Process* **1** 47
- [14] Pathak J P, Tiwari S N, Malhotra S L 1979 *Metals Tech.* **11** 442
- [15] Lee J C 1984 *The Formation of Liquid-Liquid Dispersion-Chemical and Engineering Aspects* (London: Chameleon Press Ltd.) p1
- [16] Ashok S T, Rajan T V 1996 *Wear* **197** 105
- [17] Xian A P, Zhang X M, Li Z Y 1996 *Acta Mater.* **12** 345 (in Chinese) [洗爱平, 张修睦, 李忠玉 1996 金属学报 **12** 345]
- [18] Duwez P, Willens R H, klement W 1960 *J. Appl. Phys.* **31** 1136
- [19] Hideyuki Yasuda, Itsudo Ohnaka, Osamu Kawakani, Kazuyuki Veno, Kohji Kishio 2003 *ISTJ International* **43** 942
- [20] Zhang L, Wang E G, Zuo X W, He J C 2008 *Acta Mater.* **2** 165 (in Chinese) [张林, 王恩刚, 左小伟, 赫冀成 2008 金属学报 **2** 165]
- [21] Shi J F, Zhong Y B, Ren Z M, Deng K, Xu K D 2006 *Shanghai Metals* **28** 22 (in Chinese) [史俊芳, 钟云波, 任忠鸣, 邓康, 徐匡迪 2006 上海金属 **28** 22]
- [22] Vives C 1996 *Journal of Crystal Growth* **158** 118
- [23] Miwa K 2001 *AIST Today Intl. Ed.* **29**
- [24] Wang J, Zhong Y B, Ren W L, Lei Z S, Ren Z M, Xu K D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 893 (in Chinese) [王江, 钟云波, 任维丽, 雷作胜, 任忠鸣, 徐匡迪 2009 物理学报 **58** 893]
- [25] Wang J, Zhong Y B, Wang C, Wang Z Q, Ren Z M, Xu K D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 076101 (in Chinese) [王江, 钟云波, 汪超, 王志强, 任忠鸣, 徐匡迪 2011 物理学报 **60** 076101]
- [26] Zhuang L X, Yi X Y, Ma H Y 1991 *Fluid dynamics* (1st eds.) (Anhui: University of Science and Technology of China) pp163–168 (in Chinese) [庄礼贤, 尹协远, 马晖扬 1991 流体力学 (第一版) (安徽: 中国科学技术大学) 第 163—168 页]
- [27] Li C J 2010 *Ph.D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai University) (in Chinese) [李传军 2010 博士学位论文 (上海: 上海大学)]
- [28] Zener C 1949 *J. Appl. Phys.* **20** 950

The effect of electromagnetic compound field on the solidified microstructure of Zn-10 wt% Bi hyper-monotectic alloy*

Zheng Tian-Xiang Zhong Yun-Bo[†] Sun Zong-Qian Wang Jiang Wu Qiu-Fang
Feng Mei-Long Ren Zhong-Ming

(Shanghai Key Laboratory of Modern Metallurgy & Material Process, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(Received 5 June 2012; revised manuscript received 19 June 2012)

Abstract

The effects of different electro-magnetic body forces on the microstructure and solidifying process of Zn-10 wt%Bi hyper-monotectic alloy under the condition of high magnetic field are investigated in this paper. The result indicate, on the one hand, that the solidified structure is wanted most and the diameter of the second phase particle is minimum when the alternative current (50 Hz) increases to a certain value. On the other hand, the degree of segregation, dispersion and size of the second Bi phase particles in solidified structure of Zn-10 wt%Bi hyper-monotectic alloy are refined significantly with the increase of magnetic induction intensity under a fixed alternative current (50 Hz) value. The analysis result indicates that both the magnetic induction intensity and alternative current intensity have a significant effect on solidified structure so that we can obtain a more competitive solidified structure of monotectic alloy by controlling the intensity of magnetic induction and alternative current.

Keywords: high magnetic field, monotectic alloy, segregation, electro-magnetic body force

PACS: 85.25.Am, 07.79.-v, 11.540.Dw, 62.30.+d

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50974085, 51034010), Development Foundation for Talents in Shanghai, China (Grant No. 2009046), National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA03Z109), Key Research and Innovation Program from Shanghai Municipal Education Commission, China (Grant No. 09zz98), and Key Project from Science and Technology Commission of Shanghai Municipality, China (Grant Nos. 09dz1206401, 09dz1206402).

[†] E-mail: yunboz@staff.shu.edu.cn