

强磁场复合交变电流作用下 Zn-30wt% Bi 偏晶合金的凝固*

王 江 钟云波† 任维丽 雷作胜 任忠鸣 徐匡迪

(上海大学上海市现代冶金与材料制备重点实验室, 上海 200072)

(2008 年 6 月 2 日收到, 2008 年 6 月 24 日收到修改稿)

研究了强磁场复合不同强度和不同频率交变电流对 Zn-30wt% Bi 合金凝固组织的影响规律. 结果表明: 在 25°C/min 的冷却速率下, 只施加交变电流无法抑制该合金的分层比重偏析, 而单独施加纵向强磁场对合金的偏析有一定的改善作用. 如果同时施加纵向强磁场和工频交变电流, 在产生的交变洛伦兹力的作用下, 合金的分层比重偏析基本得到抑制. 增加电流密度、磁场强度和交流电流频率均有利于合金凝固组织的改善. 但对上述三个参数而言, 均存在一个最佳值, 偏离该最佳值时, 均难以获得均质的偏晶合金组织. 从电磁场动力学角度探讨了复合场影响偏晶合金比重偏析的机理. 采用上述的复合场, 有望在常规重力背景以及较低的凝固速度下, 制备出均质的偏晶合金材料.

关键词: 强磁场, 偏晶合金, 重力偏析, 低冷却速度

PACC: 4110F, 6125M, 6475, 2843B

1. 引 言

偏晶合金以其广泛的用途和独特的性能吸引了众多材料及冶金科学工作者的关注. 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^[1-5]. Zn-Bi 偏晶合金则是理想的电化学材料. 然而, 在常规的凝固条件和重力水平下, 由于此类合金在凝固中出现液液不混溶区, 极易出现重力偏析, 严重时甚至出现明显的分层现象, 以致无法展现其优异的性能.

为获得第二相均匀分布的偏晶合金, 冶金及材料工作者开发出快速凝固法^[6-9], 微重力制备法^[10-13], 定向凝固制备法^[14-16], 粉末冶金法^[17, 18], Marangoni 逆效应法^[19, 20]等多种抑制比重偏析的手段. 然而, 这些方法都在某种程度上存在着不足: 快速凝固工艺仅限于较小尺寸的试样; 地面上采用落管^[9]时只能获得几秒钟的模拟微重力状态, 而采用

飞行器或空间站^[21]虽可获得较长时间的微重力条件, 但成本太高, 周期太长, 不适合工业应用的推广, 而且, 即使在微重力条件下, 由于 Marangoni 效应无法消除, 仍然会出现严重的偏析; 定向凝固法^[14]则需在较高的温度梯度下制备出第二相呈纤维状分布的偏晶合金, 但凝固组织不具有各向同性, 而在实际应用中, 偏晶合金往往希望得到等轴状的组织. 粉末冶金法^[17, 18]是目前比较成熟的制备均质偏晶合金的方法. 很多轴瓦材料如 Cu-Pb 轴瓦合金等即广泛采用此法生产. 然而由于粉末冶金产品固有的缺陷, 这种方法制备的偏晶合金材料仍然无法与铸造法制备的材料相媲美. 如制成轴瓦材料容易起皮、脱落等, 制粉时不可避免引入的氧化物也将显著影响材料的力学性能. 因此, 如何在较低的凝固速度和常规的重力条件下制备出均质的偏晶合金材料, 仍是值得探讨的前沿领域之一.

众所周知, 磁场对导电流体中的粒子的运动行为具有显著的抑制作用, 因此众多研究者曾探讨了 1 T 以下的恒定磁场对偏晶合金凝固中的比重偏析的影响. 然而由于磁场强度较低, 偏析的抑制效果并不理想. 近年来, 随着超导技术的日益成熟, 利用超

* 教育部全国百篇优秀博士论文作者基金(批准号: 200235)和长江学者和创新团队发展计划(批准号: JRT0739)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yunboz@mail.shu.edu.cn

导技术产生强磁场的装置已经商业化,人们可以长时间获得 10 T 甚至 20 T 以上的稳恒强磁场,这为人们开展强磁场下材料制备的研究提供了可能。日本 Yasuda 等^[21]的研究结果表明,在 10 T 的纵向强磁场(磁场方向与第二相粒子运动方向平行)中,10 T 强磁场对 Cu-Pb 偏晶合金凝固中的富 Cu 相颗粒的上浮产生了显著的抑制作用,凝固组织中第二相粒子尺寸更加细小,分布更加弥散,但对于过偏晶成分的合金,10 T 强磁场仍然不能抑制其比重偏析。王恩刚等^[22]的研究也表明,10 T 量级强磁场对 Cu-Pb 偏晶合金的偏析有很强的抑制作用,且强磁场下获得第二相颗粒呈球形形貌,而颗粒内部则为复杂的相包围结构。钟云波等^[23]的研究表明,当合金冷却速度为 30℃/min 时,随着磁感应强度的增加,Cu-90wt% Pb 合金的比重偏析逐渐降低,12 T 时该合金的比重偏析得到完全的抑制。上述结果表明,强磁场对偏晶合金凝固中的比重偏析有良好的抑制效果,然而对过偏晶合金而言,在常规的低冷却速度下,10 T 量级强磁场仍然无法抑制其比重偏析。

考虑到偏晶合金凝固中比重偏析的严重程度主要取决于第二相粒子的上浮或下沉速度,根据 Stokes 公式可知,熔体中粒子上浮或下沉速度取决于粒子与熔体的密度差、熔体的黏度和粒子直径,而对某一特定的合金体系,前两个因素往往已经固定,因此,要降低比重偏析,比较可行的方法是降低第二相粒子的直径。而且,由于粒子的 Stokes 上浮或下沉速率与粒子直径的平方成反比,因此降低第二相粒子的直径将显著降低其迁移速率,有望更有效地抑制其比重偏析。为此,本文借鉴 Yasuda 等的思路,提出利用强磁场显著抑制第二相粒子运动的同时,在合金熔体中施加交变电流,在熔体中产生很强的电磁振荡力^[24],将析出的第二相粒子(液相粒子)打碎,减小第二相粒子的直径,显著降低其沉降速率,从而有望在常规的冷却速度下制备出无偏析的偏晶合金。本文以 Zn-30wt% Bi 过偏晶合金作为研究对象,探讨了强磁场复合交变电流作用下 Zn-Bi 偏晶合金凝固组织的变化规律,并对复合场的影响机理进行了分析和讨论。

2. 实验方法

本实验采用分析纯的 Bi 粒和纯 Zn 为原料,在高纯氩气保护下,将 Zn-30wt% Bi 的合金原料在石

墨坩锅中熔化,制成直径约 15 mm,长度 20 mm 的合金棒,熔化温度为 700℃,保温时间为 1 h。Zn-Bi 合金相图如图 1 所示。考虑到即使是分布均匀的合金,在再次重熔时仍然存在分层,因此本处只要求制备出形状规则、总成分合格的 Zn-30wt% Bi 合金棒即可。本文所用强磁场由英国牛津仪器公司生产的 Oxford-14 T 超导强磁体提供,该磁体采用液氮液氦冷却超导线圈,其室温口径为 98 mm,中心磁感应强度最高可达 14 T (2.2 K)。4.2 K 时可长时间提供 12 T 左右的强磁场。距磁场中心上下 20 mm 范围内磁感应强度最大偏差不超过 1%;实验用交流电源为 0—50 V/50 A 可调自动稳流稳频电源;交流电

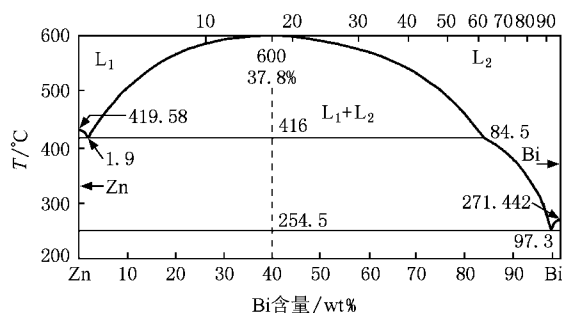


图 1 Zn-Bi 合金相图

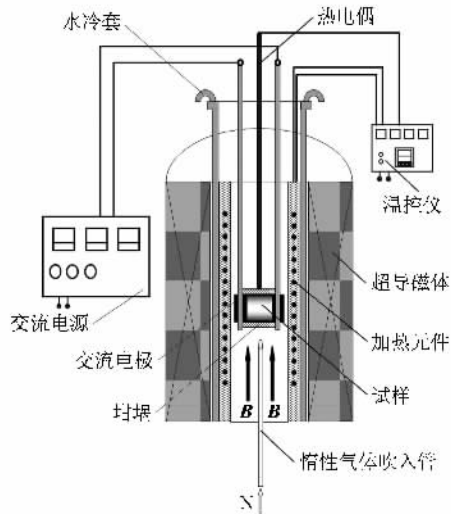


图 2 实验装置示意图

电极采用不锈钢电极;容纳金属熔体的坩锅为直径 15 mm 长 35 mm 的氧化铝管;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 2 所示。实验时将预制好的合金试样棒放置于氧化铝坩锅中,合金试样须位于强磁场中的磁场均匀区,装

好交流电电极,然后开启控温装置,对合金试样进行加热,最终将温度控制在 700°C ,保温 2 h 以确保合金液充分混匀,在降温开始时刻,往偏晶合金熔体中输入交变电流,由于试样始终处于强磁场环境下,且电流和磁场方向垂直,因此可在熔体中产生交变的电磁振荡力;与此同时,控制合适的惰性气体流量,使合金试样以 $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度降温,直至合金温度降至 200°C 时,停止通电,待合金试样继续冷却至 100°C 以下时取出试样,将试样沿重力方向,截取垂直电流方向和平行电流方向的截面,采用体式显微镜对试样的宏观分布情况进行观察,采用莱卡金相显微镜观察合金凝固金相组织。

3. 实验结果与讨论

3.1. 电流密度对 Zn-30wt% Bi 合金金相组织的影响

图 3 是在 10 T 强磁场中和 $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的冷却速度下,不同交变电流密度($f = 50\text{ Hz}$)与磁场复合作用下 Zn-30wt% Bi 合金试样的横截面宏观凝固金相组织形貌。

从图 3 可以看出,无外场施加时(图 3(a)),Zn-30wt% Bi 合金凝固组织出现了严重的重力偏析现象,富 Zn 相和富 Bi 相基本分为上下两层,这一组织是过偏晶合金在低冷速下获得的典型凝固组织,施加 10 T 纵向强磁场时(图 3(b)),分层现象仍然无法避免,但是相比常规凝固条件(图 3(a))时,上层富 Zn 相中已出现了较多的富 Bi 相,显然,施加强磁场能局部抑制第二相粒子的沉降,图 3(c)~(f)则是在同时施加纵向强磁场和交变电流后的金相组织,可以看出,上述条件下,合金的分层组织已经消失,两相合金基本交错分布,只是富 Zn 相的组织较粗大,

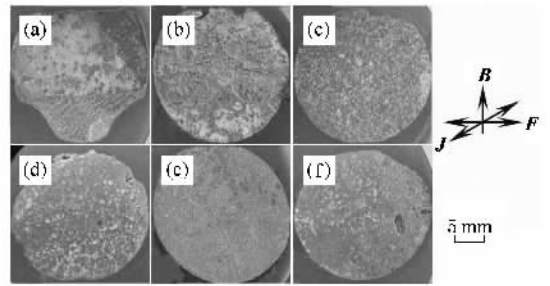


图 3 不同交变电流密度($f = 50\text{ Hz}$)下 Zn-30wt% Bi 合金凝固试样的宏观金相组织 (a) $B = 0, J = 0\text{ A}/\text{cm}^2$; (b) $B = 10\text{ T}, J = 0\text{ A}/\text{cm}^2$; (c) $B = 10\text{ T}, J = 5.7\text{ A}/\text{cm}^2$; (d) $B = 10\text{ T}, J = 7.9\text{ A}/\text{cm}^2$; (e) $B = 10\text{ T}, J = 8.5\text{ A}/\text{cm}^2$; (f) $B = 10\text{ T}, J = 9.1\text{ A}/\text{cm}^2$

说明局部存在第二相凝并现象,随着电流密度的增加,凝固组织更加均匀,当电流密度达到 $8.5\text{ A}/\text{cm}^2$ 时,宏观照片已基本看不到偏聚的相组织(图 3(e)).然而,当电流密度进一步增加时(图 3(f)),凝固组织中又可以观察到粗大的凝并相,这说明为获得均匀的凝固组织,并非电流密度越大越好.图 3 的结果表明,即使在较低的冷却速度下($25^{\circ}\text{C}/\text{min}$),通过施加 10 T 强磁场和合适强度的交变电流,可以在常规重力条件下获得均质分布的过偏晶合金.这是一个非常有意义的实验结果,因为迄今为止,尚未有方法在常规重力背景和常规冷却速度下,获得均质的偏晶合金凝固组织。

图 4 是图 3 的实验条件下获得的凝固试样的显微金相组织照片.从图 4 可以看出,无外场施加、施加 10 T 磁场下以及 10 T 磁场复合较低交变电流密度的情况下(图 4(a)~(c)),Zn-30wt% Bi 合金的分层或凝并偏聚现象显著,但 10 T 磁场下当交变电流密度达到 $7.9\text{ A}/\text{cm}^2$ 时,试样的上、中、下区域中的金相组织均表明,第二相粒子已开始细化,但局部仍有

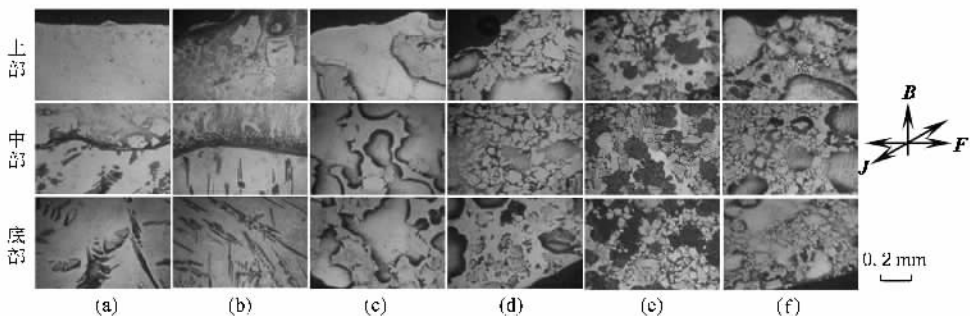


图 4 不同交变电流密度($f = 50\text{ Hz}$)下 Zn-30wt% Bi 合金凝固试样的显微金相组织 (a) $B = 0, J = 0\text{ A}/\text{cm}^2$; (b) $B = 10\text{ T}, J = 0\text{ A}/\text{cm}^2$; (c) $B = 10\text{ T}, J = 5.7\text{ A}/\text{cm}^2$; (d) $B = 10\text{ T}, J = 7.9\text{ A}/\text{cm}^2$; (e) $B = 10\text{ T}, J = 8.5\text{ A}/\text{cm}^2$; (f) $B = 10\text{ T}, J = 9.1\text{ A}/\text{cm}^2$

较大的第二相粒子;当交变电流密度达到 8.5 A/cm^2 时,试样的上、中、下区域中的金相组织趋于均匀,且两相呈现共生的形态,第二相粒子显著细化,呈多角状.这一组织与传统的采用快速凝固等方法获得的组织完全不同.在快速凝固过程中,液液分离时形成的液相粒子在表面张力作用下,往往呈球状,最终的凝固组织也大多为球形的第二相粒子分布于主体金属中,而在本实验条件下,获得的凝固组织形貌呈相互共生的多角状,这说明在液液分离过程中以及最后的凝固过程中,液相粒子的轮廓形貌已不能保持球形,否则难以得到多角状的凝固组织.随着电流密度的增加,凝固组织中又重新出现粗大的凝并粒子.

3.2. 磁感应强度对 Zn-30wt%Bi 合金金相组织的影响

图 5 为工频交变电流密度恒定为 8.5 A/cm^2 时,不同的磁感应强度下,合金凝固组织的宏观分布情况以及相应的金相组织照片.从图 5 的宏观和显微照片中可以看出,当磁感应强度为 2 T 时,合金仍然出现显著的分层现象,有部分第二相粒子分布在上部的富锌相中;当磁感应强度达到 6 T 时,分层组织开始被破坏,富铋相开始在上半部区域出现,而当磁感应强度增加到 8 T 和 10 T 时,合金中分层现象几乎完全消失,微观照片中也反映出第二相粒子均匀分布在另一相中,富锌相也破碎成细小的粒子.从组织均匀程度来看,磁感应强度为 10 T 时可以获得非常理想的均匀偏晶合金组织,两相甚至形成类似共生的组织.然而当磁感应强度增至 12 T 时,凝固组织的均匀程度反而有所下降,虽然没有出现明显

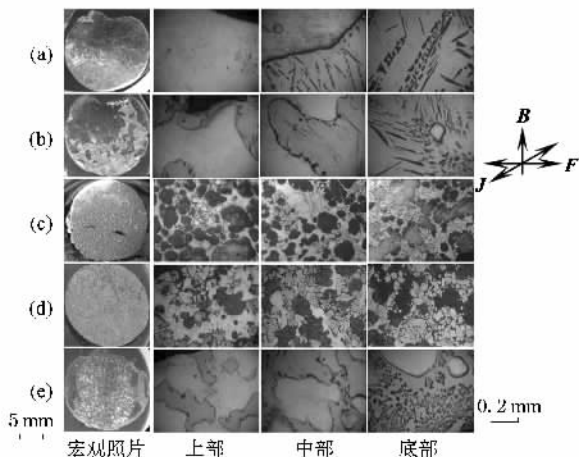


图 5 磁感应强度对 Zn-30wt%Bi 合金凝固组织(宏观和显微组织)的影响 $J = 8.5 \text{ A/cm}^2$, $f = 50 \text{ Hz}$, 冷却速度为 25°C/min . (a) $B = 2 \text{ T}$, (b) $B = 6 \text{ T}$, (c) $B = 8 \text{ T}$, (d) $B = 10 \text{ T}$, (e) $B = 12 \text{ T}$

的分层,但显微组织中重新出现粗大的凝并颗粒,说明在该磁场强度下,析出的液相粒子开始重新凝并聚合长大.由此可见,在恒定的交变电流密度下,磁感应强度大小也存在一个最佳范围:当磁感应强度为 $8\text{--}10 \text{ T}$ 时,可以获得较为均匀的偏晶合金组织,而低于或高于上述范围,偏晶合金凝固过程中将出现明显的偏析.这也表明,磁感应强度也存在一个最佳值,无论是高于还是低于这个值都无法得到最为理想的无偏析偏晶合金材料.宏观截面照片与相对应的金相照片所反映出的规律完全相符合.

3.3. 交流电流频率对 Zn-30wt%Bi 合金金相组织的影响

图 6 是在磁感应强度为 10 T 和电流密度为 8.5 A/cm^2 时,改变交变电流频率时偏晶合金凝固组织的金相照片.

从图 6 可以看出, 10 T 强磁场下当交变电流频率为 50 Hz 以下时, Zn-30wt%Bi 合金的凝固组织相对均匀,从 10 Hz 到 50 Hz ,随频率增加,凝固组织愈趋均匀,当频率为 50 Hz 时,凝固组织分布最为均匀.然而,随着频率进一步增加到 100 Hz 和 500 Hz 时,凝固组织重新分层.这说明交变频率不宜过高,否则同样无法抑制比重偏析的产生.

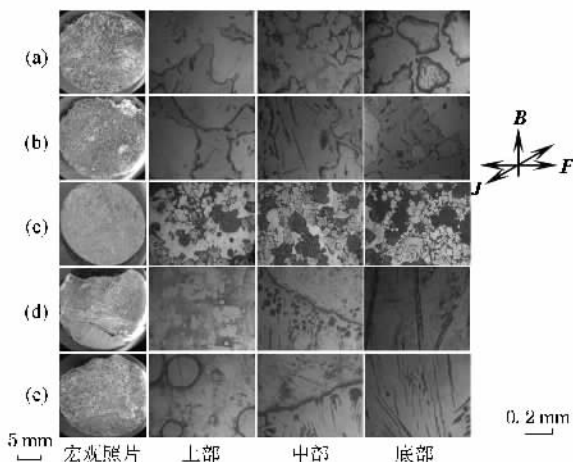


图 6 不同交变电流频率下 Zn-30wt%Bi 合金的凝固组织 $B = 10 \text{ T}$, $J = 8.5 \text{ A/cm}^2$, 冷却速度为 25°C/min . (a) $f = 10 \text{ Hz}$, (b) $f = 20 \text{ Hz}$, (c) $f = 50 \text{ Hz}$, (d) $f = 100 \text{ Hz}$, (e) $f = 500 \text{ Hz}$

4. 讨 论

4.1. 强磁场对金属熔体黏度的影响

恒定强磁场对导电熔体以及颗粒运动的阻碍作用,首先体现在强磁场可以增大导电熔体的黏度,而

恒定磁场对导电熔体黏度的影响可用 Hartmann 准数来判定^[21]:

$$Ha = BL\sqrt{\sigma/\eta}, \quad (1)$$

式中 Ha 为 Hartmann 准数; B 为磁感应强度(T); L 为特征长度(m),本处取第二相粒子的直径; σ 为熔体的电导率($\Omega \cdot m$)⁻¹; η 为合金熔体的动力学黏度(Pa·s).

根据 Hartmann 准数的大小,熔体的有效黏度 η_{eff} ^[23]为

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

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\eta_{\text{basic}}}{3} \left(\coth\left(\frac{Ha}{3}\right) - \frac{1}{Ha} \right) (Ha \approx 1), \quad (3)$$

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\eta_{\text{basic}}}{3} Ha (Ha \gg 1). \quad (4)$$

式中 η_{basic} 为无磁场时合金熔体的黏度, η_{eff} 为合金熔体的有效黏度.从图 7 可以看出,第二相粒子的直径约为 $50 \mu\text{m}$,当磁场强度为 10 T 时所对应的 Ha 准数为 5.33.此时 η_{basic} 为 $1.68 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, σ 为 $1.91 \times 10^5 (\Omega \cdot m)^{-1}$,在这样的 Ha 准数的情况下运用(4)式我们可以知道金属熔体的有效黏度是导电金属熔体基准黏度的 1.78 倍左右.根据 Stokes 公式

$$v_p = \frac{\Delta\rho g d_d^2}{18\eta}, \quad (5)$$

可以算出,10 T 时仅由于强磁场对于 Ha 准数的影响导致导电熔体黏度增大,就将颗粒运动速度减小了 43.7% 左右.对直径为 $100 \mu\text{m}$ 以及 $200 \mu\text{m}$ 的第二相粒子进行计算得出,当磁场强度为 10 T 时对于颗粒速度的减缓作用分别为 78.8% 和 85.9%,即接近于将粒子的沉降速度降低一个数量级,从而使重力偏析得到显著缓解.

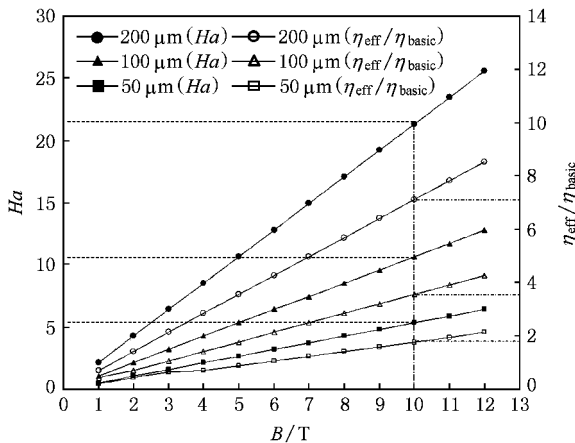


图 7 Hartmann 准数以及 $\eta_{\text{eff}}/\eta_{\text{basic}}$ 与磁感应强度的关系

4.2. 纵向强磁场阻碍颗粒运动的机理

Yasuda 等提出了纵向强磁场对偏晶合金凝固中第二相粒子产生抑制作用的电磁场动力学模型^[21].如图 8 所示,颗粒上浮过程中将周围流体推开,流体作切割磁力线的运动,因此在颗粒上浮的前沿将产生如图所示的顺时针环形电流.在磁场作用下,颗粒上方流体受到指向环形电流中心的洛伦兹力,相当于将颗粒上方的流体紧紧压住,从而抑制颗粒的上浮.同理,颗粒上浮时,颗粒下方的流体将向颗粒下方填充,也将切割磁力线,产生逆时针环形电流.此时颗粒下方的流体将受到从环形电流中心指向外部的洛伦兹力,这一洛伦兹力阻碍了周围流体向颗粒下方输送熔体,这种效应也将对颗粒产生一种拖曳效应,进一步抑制颗粒的上浮.纵向强磁场的这一机制也将抑制偏晶合金的比重偏析.然而,从文献[21—23]报道的结果来看,即使在 10 T 纵向强磁场下,尽管强磁场存在增加黏度和上述的阻力效应,仍然不能完全抑制过偏晶合金的比重偏析.

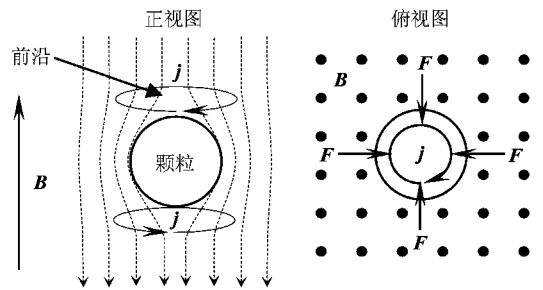


图 8 强磁场对颗粒运动阻碍作用示意图

4.3. 强磁场与交流电产生的交变电磁力对颗粒运动的影响

当纵向强磁场与水平方向上的交变电流相互作用时,将在水平方向产生与磁场和电流正交的交变电磁力,从而熔体、熔体中的颗粒将受到交替变化的电磁力的作用.根据电磁场动力学理论,这种振动作用将对熔体中的颗粒聚合、沉浮运动产生以下作用:第一,当合金经历液液分离区时,电磁力所导致的振动可能将析出的第二相颗粒破碎成更小的粒子(见图 9(a));第二,先析出的液相熔滴颗粒相互聚合时,由于振荡电磁力的作用,熔滴颗粒的聚合将遇到更大的阻力,甚至无法聚合,即使已经局部溶合的熔滴,在振动电磁力作用下又将重新分离(见图 9(b)).上述这两种效应的结果使熔体中析出的第二

相粒子更加细小和弥散分布,由上文中 Stokes 公式可知,粒子的上浮或者下沉速度与其直径的平方成正比,粒子直径降低一半,其下沉速度将降低四倍,由此可见,这种振动电磁力将对偏晶合金凝固中的比重偏析产生显著的抑制作用.第三,周期性变向的

电磁力使得熔滴的运动方向呈周期变化,则粒子将做“Z”型的上浮或下沉运动,这将增加粒子上浮或下沉时的有效“迎风”面积,即增加阻力系数 $C_D^{[25]}$,从而降低粒子的上浮或下沉速率.所受电磁力以及运动方向见图 9(c).

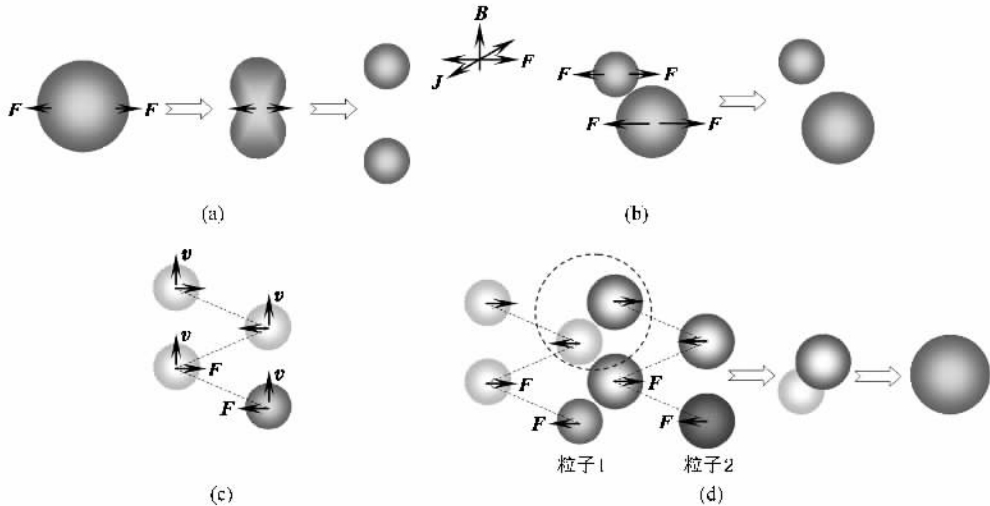


图9 交变电磁力影响第二相粒子聚合长大过程示意图 B 为磁场, J 为电流密度, F 为电磁力, v 为粒子上浮速度. (a) 交变电磁力使粒子破碎 (b) 交变电磁力抑制粒子聚合 (c) 交变电磁力使粒子呈“Z”型运动 (d) 过大交变电磁力加速粒子聚合

此外,从实验结果可以看出,无论是磁场强度恒定时改变电流密度,还是电流密度恒定时改变磁场强度,都存在一个“最佳值”.低于该最佳值时,上述的效应尚不足以抑制偏晶合金的比重偏析,然而,当磁感应强度或电流密度大于最佳值时,似乎抑制偏析效果应该更好,但是实验结果表明偏析情况反而有加重的趋势.这可能是由于随着磁场强度或电流密度的增加,电磁力的振动幅度都将加大,一旦该振动幅度大于某一临界值时,第二相粒子在振动电磁力和惯性力的作用下,其运动的幅度超过两个粒子的平均间距时,第二相粒子之间碰撞概率反而加大,电磁力过大时甚至有可能产生定向的流动,促进了第二相颗粒的聚合,从而加剧偏析的产生,如图 9(d)所示.更深入的机理分析有待今后进一步的研究.当交变电流频率增加时,由于集肤效应导致电流在金属熔体分布明显不均匀,从而导致电磁力在合金熔体分布不均匀,这将导致流动的产生,因此比重偏析同样无法得到抑制.

5. 结 论

本文对纵向强磁场复合工频交变电流作用下

Zn-30wt% Bi 合金的凝固组织进行了初步研究,得到以下结论:

1) 只施加交变电流或 10 T 纵向强磁场,不能完全抑制 Zn-30wt% Bi 合金凝固过程中的分层比重偏析,但施加 10 T 强磁场对该合金凝固中的第二相粒子的运动有一定的抑制作用.

2) 施加恒定 10 T 强磁场和工频交变电流时,随着电流密度增加,第二相分布更趋均匀;当电流密度达到 8.5 A/cm^2 时,在 25°C/min 的较低冷却速度下和常规重力背景下,可以得到第二相基本均匀分布的 Zn-30wt% Bi 偏晶合金组织.

3) 磁场强度与电流密度的配合存在一个最佳值,超过或低于这个值,都得不到最为理想的均质偏晶合金组织.

4) 恒磁场强度(10 T)以及电流密度(8.5 A/cm^2)时,随着电流频率的增加,凝固组织的晶粒得到细化,但当电流频率高于 50 Hz 时,施加交变电磁力对抑制偏晶合金的比重偏析效果变差.

5) 电磁场动力学理论分析表明,强磁场不但增加合金熔体黏度,粒子运动前后端熔体中感生的洛伦兹力也将抑制第二相粒子上浮;而复合交变电流作用下,交变电磁力将破碎第二相熔滴、抑制其聚合

从而降低粒子直径、增加其上浮或下沉阻力等,从而显著降低偏晶合金的比重偏析.然而,过强的交变电磁力有可能促进第二项粒子聚合和引起定向流动,反而无法抑制比重偏析.

本文实验结果表明,利用强磁场和交变电流复合产生的振动电磁力效应,可以在较低的冷却速度

下(25℃/min)和常规重力背景下,制备出均质的过偏晶合金.如果与连铸过程相结合,有望制备出大尺寸的偏晶合金材料,这对于今后在地面上低冷速下制备大尺寸的均质偏晶合金材料提出了一条全新的途径.

- [1] 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、赵九州、薛冠霞、李廷举 2007 铸造 **56** 1025]
- [2] Inoue A ,Yano N 1987 *J. Mater. Sci.* **22** 123
- [3] Otto G H ,Ratke L 1974 *Proceedings of the Third Space Processing Symposium—Skylab Results* 1031
- [4] Wecker J ,Helmolt R V ,Schultz L ,Samwer K 1993 *Appl. Phys. Lett.* **52** 1985
- [5] Uenishi K ,Kawaguchi H ,Kobayashi K F 1994 *J. Mater. Sci.* **29** 4860
- [6] Liu Y ,Guo J J ,Jia J ,Su Y Q 2002 *J. Mater. Sci. Tech.* **18** 241
- [7] Li Y W ,Zhu X X ,Xu Z T 1998 *Chin. J. Rare Metals* **22** 308 (in Chinese) [李永伟、朱学新、徐柱天 1998 稀有金属 **22** 308]
- [8] Cai Y W ,Li J G ,Fu H Z 1994 *Mater. Sci. & Eng.* **12** 51 (in Chinese) [蔡英文、李建国、傅恒志 1994 材料科学与工程 **12** 51]
- [9] Cao C D ,Wei B B 2002 *J. Mater. Sci. Tech.* **18** 73
- [10] Ratke L 1995 *Mater. Sci. Eng. A* **203** 399
- [11] Huang Z ,Zhao D Q ,Chen X C 1990 *Acta Metallurgica Sinica* **26** 405 (in Chinese) [黄 正、赵德乾、陈熙琛 1990 金属学报 **26** 405]
- [12] Dhindaw B K ,Stefanescu D M ,Singh A K ,Curreni P A 1988 *Metall. Trans. A* **19** 2839
- [13] Xu G B ,Jia J 1994 *Mater. Rev.* **4** 29 (in Chinese) [徐贵宝、贾 均 1994 材料导报 **4** 29]
- [14] Yang S ,Liu W J 2001 *J. Mater. Sci.* **36** 52
- [15] Yang S ,Liu W J ,Jia J 2002 *Mater. Sci. & Tech.* **10** 19 (in Chinese) [杨 森、刘文今、贾 均 2002 材料科学与工艺 **10** 19]
- [16] Bergman A ,Fredriksson H ,Shahani H 1988 *J. Mater. Sci.* **23** 1573
- [17] Liu Y H ,Shi Q N 2001 *Journal of Kunming University of Science and Technology* **26** 22 (in Chinese) [刘玉红、史庆南 2001 昆明理工大学学报 **26** 22]
- [18] Yang S ,Huang W D ,Jia J 2000 *Mater. Mech. Engineering* **24** 5 (in Chinese) [杨 森、黄卫东、贾 均 2000 机械工程材料 **24** 5]
- [19] Xian A P ,Zhang X M ,Li Z Y 1996 *Acta Meta. Sin.* **32** 113 (in Chinese) [洗爱萍、张修睦、李忠玉 1996 金属学报 **32** 113]
- [20] Zhang H W ,Xian A P 1999 *Acta Meta. Sin.* **35** 1187 (in Chinese) [张宏闻、洗爱萍 1999 金属学报 **35** 1187]
- [21] Yasuda H ,Ohnaka I ,Kawakami O ,Ueno K ,Kishio K 2003 *ISIJ International* **43** 942
- [22] Zhang L ,Wang E G ,Zhuo X W ,Hao J C 2008 *Acta Meta. Sin.* **44** 165 (in Chinese) [张 林、王恩刚、左小伟、赫冀成 2008 金属学报 **44** 165]
- [23] 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]
- [24] Yu J B ,Ren Z M ,Ren W L ,Li X ,Wang J ,Deng K 2007 *Acta Meta. Sin.* **43** 1201 (in Chinese) [余建波、任忠鸣、任维丽、李 喜、王 俊、邓 康 2007 金属学报 **43** 1201]
- [25] Li T X ,Xu Z M ,Sun B D ,Shu D ,Zhou Y H 2003 *Trans. Nonferr. Metal. Soc. China* **13** 121

Effect of high static magnetic field and AC current on solidification of Zn-30wt% Bi monotectic alloy^{*}

Wang Jiang Zhong Yun-Bo[†] Ren Wei-Li Lei Zuo-Sheng Ren Zhong-Ming Xu Kuang-Di

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

(Received 2 June 2008 ; revised manuscript received 24 June 2008)

Abstract

Effect of high static magnetic field (HSMF) coupled with AC current of different intensities and frequencies on solidification morphology of Zn-30wt% Bi monotectic alloy was studied . The gravity segregation of Zn-30wt% Bi monotectic alloy could not be suppressed thoroughly only by superimposing AC current or 10 T HSMF separately at the cooling rate of 25 °C/min . When the 10 T HSMF and 50 Hz AC current were superimposed simultaneously ,the induced alternate Lorentz force could reduce the gravity segregation remarkably . More homogeneous solidification morphology could be obtained when increasing the AC current density , magnetic flux density or current frequency separately . However ,each of the above-mentioned three parameters has its own optimum value on deviating from which the homogeneous distribution morphology could not be obtained . The mechanism on the coupled fields affecting the gravity segregation of Zn-30wt% Bi monotectic was discussed based on the magneto-hydrodynamic theory . The results reveal that it is possible to manufacture homogeneous monotectic alloy under normal gravity surroundings and at a low cooling rate by superimposing coupled fields in the solidification process .

Keywords : high static magnetic field , monotectic alloy , gravity segregation , low cooling rate

PACC : 4110F , 6125M , 6475 , 2843B

^{*} Project supported by the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 200235) ,and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (Grant No. IRT0739) .

[†] Corresponding author. E-mail :yunboz@mail.shu.edu.cn