

Al-Bi 偏晶合金的控制铸造技术探索 *

张宏闻 洗爱平

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110015)

摘要 采用控制铸造技术, 改变主要工艺参数, 制备了不同尺寸的 Al-Bi 偏晶合金铸锭. 利用扫描电镜, 电子探针等技术研究了浇注速度、预冷却和铸锭冷却强度对 Al-Bi 偏晶合金铸锭的微观结构的影响. 结果表明: 用该技术制备的 Al-Bi 偏晶合金能够有效地抑制 Bi 相宏观偏析, 获得组织均匀的铸锭.

关键词 铸造, Marangoni 对流, 偏析, 显微组织, Al 合金, 铋

中图分类号 TG292, TG146.2 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(1999)11-1187-04

STUDY OF Al-Bi IMMISCIBLE ALLOY CONTROL-CASTING TECHNIQUE

ZHANG Hongwen, XIAN Aiping

Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Science, Shenyang 110015

Correspondent: XIAN Aiping, Tel: (024)23843531-55522, Fax: (024)23841390, E-mail: ap.xian@imr.ac.cn

Manuscript received 1999-03-18, in revised form 1999-06-04

ABSTRACT Using a new control-casting technique, Al-Bi immiscible alloy ingots with different size have been produced by changing the main technical parameters. The effects of pouring-speed, pre-cooling and cooling-strength on the microstructure of Al-Bi ingots have also been studied. And the microstructure of the alloy was studied by SEM and EDAX. The result shows macro-segregation Bi in Al-Bi immiscible alloys produced by this technique has been restrained effectively and the microstructure of ingots is uniform.

KEY WORDS cast, Marangoni convection, segregation, microstructure, Al alloy, bismuth

Al 系偏晶合金是一种 Al 与 Pb, Bi 形成的二元或多元偏晶合金, 由于基体中第二相的柔顺性和减摩性^[1,2] 而成一种优良的轴瓦合金材料, 是目前国外轿车工业中的主导轴瓦合金^[3]. 在 Al-Pb 或 Al-Bi 二元相图中^[4,5], 存在一个液相不混溶区, 铸造过程中当高温熔体冷却进入不混溶区时, 由于液相 Al 与 Bi 或 Pb 相不相溶, 在地面重力场下, 液相将迅速分离, 使比重较大的 Pb 和 Bi 沉淀于铸锭的底部, 所以常规铸造技术难以制备出均匀的偏晶合金.

目前工业实际应用于制备 Al-Pb 偏晶合金的方法主要是粉末冶金工艺^[6], 由于铸造工艺具有生产成本低, 组织致密性好且疲劳强度较高等一系列优点, 一直具有很强的工业竞争力, 而后的关键是解决铸造偏析问题. 空间科学的发展, 人们重新认识了液相中由温度梯度诱发的第二相液滴的 Marangoni 运动^[7]. 控制铸造技术等新工艺^[8-10] 就是设想利用与重力方向相反的温度梯度来诱发一个 Marangoni

力^[13] 去平衡或至少部分平衡地面重力对偏晶合金中第二相的分离作用^[12], 以达到制备均质偏晶合金的目的. 本文是采用这一技术制备了 Al 基偏晶合金的一个尝试.

1 实验方法

Al-Bi 偏晶合金的二元相图显示熔体进入单相区的最高温度, 对于 Al-10Bi(质量分数, %) 合金这个温度大约在 800 °C 左右. 为了保证合金能形成单一的高温熔体, 本实验中合金互溶加热温度选择在 1000 °C, 保温 10 min 后立即浇注. 在控制铸造实验中^[8], 主要控制的工艺参数有浇注速度, 预冷却方式和凝固速度等. 其铸模中的凝固模型如图 1 所示.

本实验中采用两种浇注速度分别为 1.70 和 3.10 cm³/s. 两种预冷却方式, 其中预冷却方式 II 中的冷却效果强于预冷却方式 I, 这种预冷却方式是借助于一种专利技术进行的, 其详细描述已由文献 [8] 给出. 采用两种铸锭冷却方式, 其中冷却方式二的冷却速度低于冷却方式一. 在固液界面前沿保持一个高温梯度^[11] 是控制铸造技术中技术关键之一. 它可以建立一个足以向上浮动的 Marangoni 力, 以平衡第二

* 国家自然科学基金资助项目 59571043

收到初稿日期: 1999-03-18, 收到修改稿日期: 1999-06-04

作者简介: 张宏闻, 男, 1974 年生, 博士生

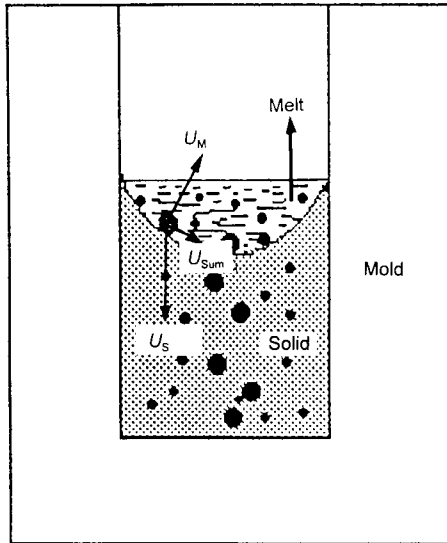


图1 显示熔池中第二相液滴的 Marangoni 运动和 Stokes 运动的凝固模型示意图

Fig.1 A model of solidification, the Marangoni movement (U_M) and Stokes movement (U_S) of the secondary phase droplets in the molten bath

相液滴在重力作用下的下沉运动(见图2)。表1为这种工艺参数的组合情况。

用石墨坩埚熔化,用 SRTX-8-13 型箱式 SiC 棒炉加热,最高使用温度 1600 K。浇注过程的主要步骤为:待炉温升至 1280 K,先将 Al 放入炉中,在其完全熔化后再将 Bi 加入,保温 10 min,待混合均匀后进行浇注。浇注时改变其主要工艺参数制备不同的样品。样品中 Al, Bi 重量配比为 1:9。对于直径 10 mm 铸锭分别在底部、顶部,及中部沿横

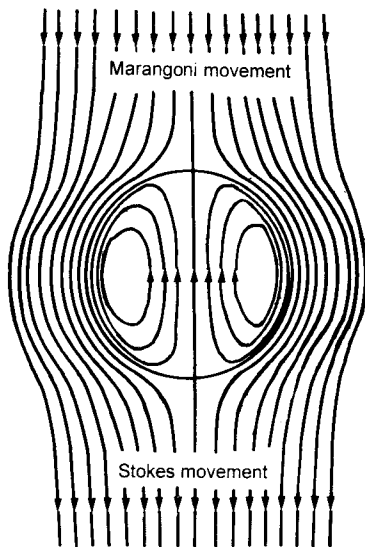


图2 在一个重力场和一个反向温度梯度场中第二相液滴的 Stokes 运动和 Marangoni 运动

Fig.2 Secondary phase droplet upward Marangoni movement by a temperature gradient field and a down Stokes movement by a gravitational field

表1 控制铸造的实验条件

Table 1 The test condition of the control casting

No.	Pouring rate, cm ³ /s	Pre-cooling	Ingot cooling	Ingot diameter mm
1	1.70	I	I	10
2	1.70	I	II	20
3	3.10	II	I	10
4	3.10	II	II	20

截面切开磨平、抛光;对于直径 20 mm 铸锭纵向剖开,磨平、抛光。样品未经腐蚀,用光学显微镜,及扫描电子显微镜 (SEM) 进行观察,并用电子探针对成分进行了测定。

2 实验结果与讨论

按照表 1 中 No.1—4 工艺参数组合浇注若干合金铸锭样品。所获得的铸锭样品外观光滑,无明显缺陷。

对于采用表 1 中 No.1 工艺参数制备的 Al-10Bi 合金中, Bi 粒子在基体中存在两种尺寸,一部分粒子的半径要比另一部分粒子大得多,其中一部分细小粒子弥散分布在晶界上;同时在基体上可见到大量弥散分布的小粒子,它们看上去要比较大的白粒要细小得多。显然金相组织中显示的较大的第二相粒子是在两液相共存时时析出和长大的,而弥散分布在晶界及基体的细小第二相粒子则是在凝固过程中进一步析出的。晶界处的 Bi 粒子偏析与凝固过程中的显微偏析有关。除在样品底部发现少量较大的 Bi 粒子外,总体来说上、中、下三部分中细小的 Bi 粒分布比较均匀,相应粒子的粒径相差不大。大粒子半径范围大约在 5 μm(上部)至 15 μm(底部)之间;小粒子半径则远小于 5 μm。其扫描电子显微镜的背散射像如图 3a 和 b 所示;其化学成分如表 2 所示。另外,在样品下端还发现一些如大粒子大小的圆型空洞,这可能是金相制备过程中,大粒子脱落后剩下的。

采用表 1 中 No.2 工艺参数制备的 Al-10%Bi 合金的显微组织如图 3c 和 d 所示, Al 基体中同样弥散着两种大小相差比较明显的粒子,大粒子尺寸约在 5—20 μm 左右,小粒子的尺寸远小于 5 μm。小粒子弥散于整个基体,与 No.1 铸锭相比, No.2 铸锭没有发现晶界处 Bi 相的偏析。值得注意的是在 No.2 样品上,位于底部的较大白色的 Bi 粒子反要比位于顶部的相应粒子小一些,它暗示在样品的凝固过程中存在一个浮升的作用力。

对于表 1 中 No.3 工艺参数制备的 Al-10Bi 合金的显微组织如图 3e 和 f 所示,在 Al 基体中也存在着两种尺寸不同的粒子。与 No.1 样品相似,在铸锭的底部有少数较大的白色 Bi 粒子存在,小粒子则在基体上分布均匀。同时在铸锭的顶部可以清楚发现有一部分偏析线。这一点 No.1 铸出的 10 mm 铸锭的组织形貌相似。样品中存在一些粒子脱去后遗留下的空洞。通过对样品各个部分的成分测定, Bi 在整个样品中基本呈均匀分布。

表 1 中 No.4 工艺参数制备的 Al-10Bi 合金的显微组织如图 3g 和 h 所示。在 Al 基体中弥散着两种尺寸相差较

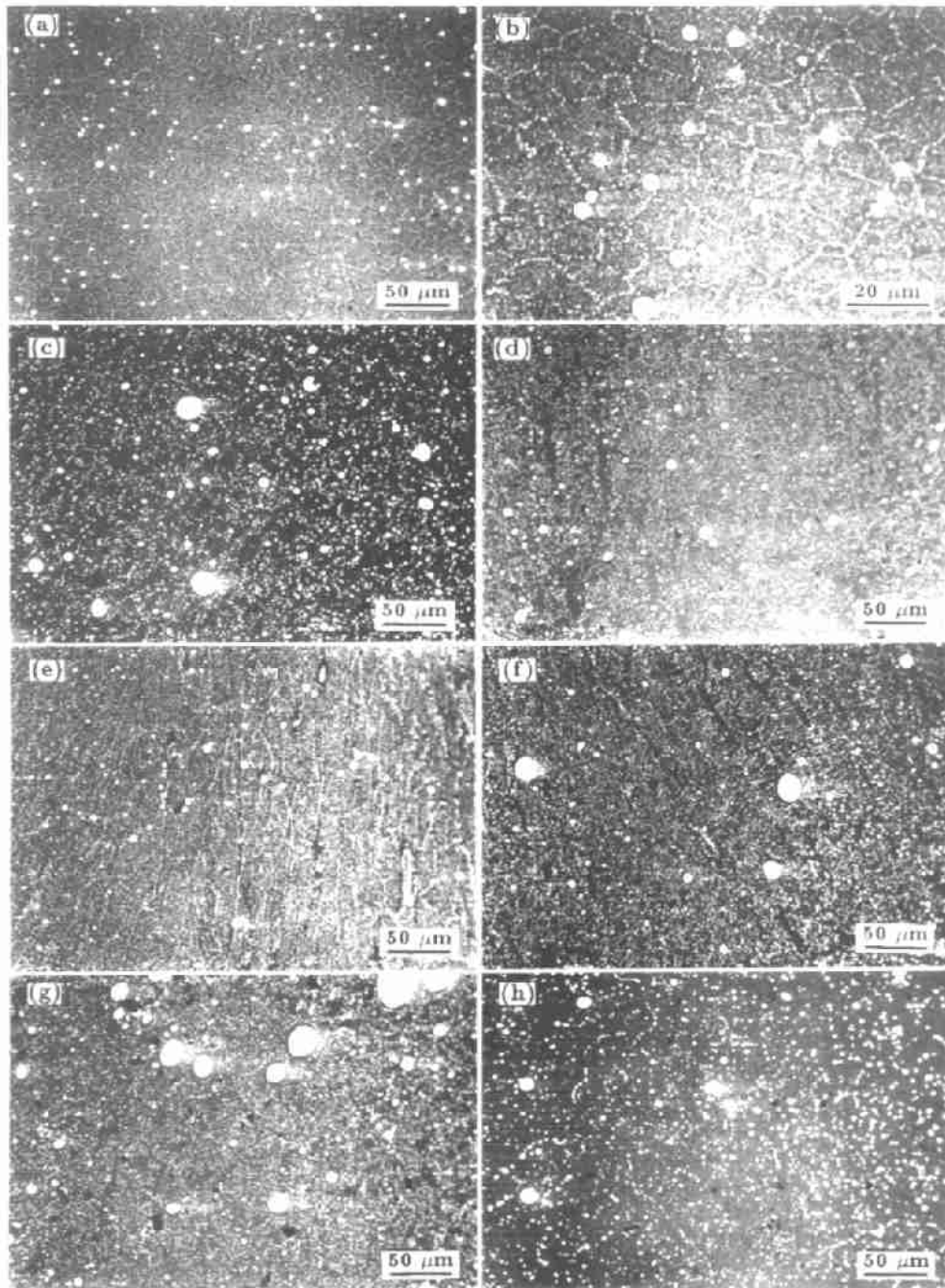


图 3 Al-10Bi 偏晶合金铸锭中 Bi 粒子的分布

Fig.3 Distribution of Bi phase particles at the top position (a, c, e, g) and bottom position (b, d, f, h) of the cast Al-10Bi immiscible alloy ingot

(a, b) sample No.1 (c, d) sample No.2 (e, f) sample No.3 (g, h) sample No.4

表 2 铸锭的电子探针成分测定

Table 2 The chemical composition of the samples by EDXA

Element	(mass fraction,%)							
	Top position				Bottom position			
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1	No.2	No.3	No.4
Al	93.55	91.88	93.45	91.34	93.36	92.11	92.77	90.43
Bi	6.45	8.12	6.55	8.66	6.64	7.89	7.23	9.57

大的粒子. 与 No.2 样品相似, 在铸锭的上部存在尺寸约在 20—40 μm 的大粒子; 而在底部相应大粒子的尺寸反而较小, 约 10 μm 左右. 小粒子均匀弥散于基体中, 相应这些细小的 Bi 粒子分布在基体中分布比较均匀.

对于不同条件下 Al 基偏晶合金的凝固过程来看, 由于两相的凝固点^[5] 差别较大, 铸锭的凝固过程将分两步进行. 首先是过热熔体通过动态预冷却减少了一部分过热, 使熔体从高温单一相区进入不混溶区, 液相 Bi 开始形核, 随后不断长大, 最终在基体凝固时被捕获. 过热熔体通过不混溶区的时间应该尽可能的短, 这样才能保证铸锭中的 Bi 相不能充分长大, 后者可导致严重的比重偏析, 熔体预冷却^[6] 的设计正是基于这一想法. 当合金浇入铸模, 并快速冷却, 温度降至偏晶点时, 高熔点的 Al 相发生偏晶反应, 凝固析出固态 Al 并排出多余的 Bi, 此时形成的二次富 Bi 液相被已凝固的基体包围, 而不能充分长大, 所以形成许多细小的 Bi 相颗粒. 在晶界处由于凝固最后完成, 因此凝固排出的 Bi 在此处相对富集, 最终在晶界处形成许多细小的 Bi 粒子. 本实验中采用的 4 种不同工艺条件进行浇注时, 所获得冷却速度不同程度的抑制第二相 Bi 滴的沉淀, 故获得了接近均匀的凝固组织.

当浇注速度和预冷却方式不变时, 改变铸锭的冷却强度可减轻或基本消除了铸锭中 Bi 相的晶界富集现象, 在其它条件不变的情况下, 铸锭冷却强度加大, 可使熔体获得较大的过冷度, 由此提高过冷液体中的形核率, 而抑制了第二相的生长. 同时由于冷却强度加大, 在铸锭顶部动态熔池中温度梯度也增加了, 后者导致一个较大的 Marangoni 力, 迫使第二相 Bi 液滴向温度较高的熔池顶部浮升, 这是在 No.2 样品中在反在顶部发现一些大粒子的主要原因. 作为对比, No.1 样品较大 Bi 粒出现在铸锭的底部, 它表明熔池中相应的温度梯度较小, 这时液滴的 Stokes 运动占居优势.

当铸锭冷却强度不变, 而提高浇注速度后, No.3 样品中底部大粒子半径显然要比 No.1 样品中的相应粒子半径大, 这可能是由于浇注速度已大于实际凝固速度, 致使达不到液态熔池实现动态平衡的要求, 后者可导致在通过不混溶区时生成的 Bi 相粒子得以继续长大. 与 No.3 样品相比, 当其它的条件不变, 而铸锭过冷度加大时, 与 No.2 样品相似, 尺寸较大的 Bi 粒又出现在铸锭的顶部, 这说明铸锭的凝固速度已小于浇注速度, 在一个高的温度梯度作用下, 由熔池中 Marangoni 对流引起的浮力大于重力, 又迫使第二相液滴向

上浮升. 从这些结果可以发现, 在控制铸造工艺中, 铸锭顶部小熔池中的温度场控制对最终凝固组织是十分重要的, 当 Marangoni 力小于重力时, 液相中析出的 Bi 滴将作下沉运动, 反之, 当作用在 Bi 滴上的 Marangoni 力大于重力时, 第二相 Bi 粒子将上浮. 若控制一个合适的温度场, 使 Marangoni 力与重力大致平衡, 就可最终获得组织均匀的铸锭.

3 结论

(1) 利用一个与重力方向相反的温度场可部分平衡第二相液滴在重力下的沉积作用, 同时也对液滴的长大有明显的抑制作用.

(2) 控制铸造条件, Al-Bi 合金铸锭中第二相粒子的尺寸可以得到有效控制. 铸锭中大部分第二相粒子的尺寸都在 20 μm 以下, 其中大量小 Bi 粒子均匀分布于基体中. 上下端的 Bi 相含量也相差不大. 改变控制铸造条件, 可分别导致第二相 Bi 在重力作用下沉淀或在 Marangoni 力作用下浮升.

参考文献

- [1] Sharma A, Rajan T V. *Wear*, 1996; 197: 105
- [2] Prinz B, Romero A. *Low G*, 1994; 5(4): 5
- [3] Pratt G C. *Int Met Rev*, 1973; 18: 62
- [4] McAlister A J. *Bull Alloy Phase Diagrams*, 1984; 15(3): 247
- [5] McAlister A J. *Bull Alloy Phase Diagrams*, 1984; 15(1): 69
- [6] Walter H U. *Microgravity News Esa*, 1994; 7: 2
- [7] Predel B, Ratke L, Fredriksson H. In: Water H U ed, *Fluid Science and Materials Science in Space*, Berlin: Springer, 1978: 517
- [8] Xian A P, Zhang X M, Li Z Y, Liu Q Q, Chen J Z, Li Y Y. *Appl China Pat No.94112581.5*, 1994
(洗爱平, 张修睦, 李忠玉, 刘清泉, 陈继志, 李依依. 中国专利申请 No.94112581.5, 1994)
- [9] Prinz B, Romero A. In: Ratke L ed, *Immiscible Liquid Metals and Organics*, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, Germany, 1993: 281
- [10] Berrenberg T. In: Ratke L ed, *Immiscible Liquid Metals and Organics*, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, Germany, 1993: 299
- [11] Xian A P, Zhang X M, Li Z Y, Liu Q Q, Chen J Z, Li Y Y. *Acta Metall Sin*, 1996; 32(2): 113
(洗爱平, 张修睦, 李忠玉, 刘清泉, 陈继志, 李依依. 金属学报, 1996; 32(2): 113)
- [12] Young N O, Goldstein J S, Block M J. *J Fluid Mech*, 1959; 6: 350
- [13] Cahn J W, Hilliard J E. *J Chem Phys*, 1958; 28: 258