

电磁-机械复合场对合金凝固组织影响的研究*

张 鹏 杜云慧 曾大本

(清华大学机械工程系,北京 100084)

(2001 年 4 月 6 日收到,2001 年 9 月 12 日收到修改稿)

提出了对组分密度差别较大合金进行电磁-机械复合场处理来获得常规铸锭均匀凝固组织的新工艺,研究了电磁-机械复合场处理对 Al-20Sn 合金常规铸锭凝固组织的影响,并进行了理论分析. 研究表明,在固液二相区内,处理温度越低,常规铸锭垂直方向上不同部位凝固组织的差异越小.

关键词:电磁-机械复合场,处理温度,凝固组织

PACC:8130F,4765

1 引 言

组分密度差别较大的合金,如 Al-Pb,Al-Sn 等合金,在常规铸造过程中,通过包括液相的复相区时,含有重金属相对较多的相,在重力作用下,可能相应下沉,直接造成铸锭凝固组织沿垂直方向上的差异,使得合金的性能受到极大的影响.

目前,能够较为有效地解决这种组分密度差别较大合金凝固组织不均匀问题的方法主要有液态搅拌急冷铸造方法和固态粉末烧结方法. 液态搅拌急冷铸造方法的基本思想为^[1-3]:在液态温度下,通过对合金液进行强烈的搅拌(可施加超声波),使得组分均匀,随后进行急冷铸造,以最快的冷却速度来阻止重金属的下沉和聚集,从而最大限度地保持液态下的组织;固态粉末烧结方法的基本思想为^[4,5]:首先采用混合均匀的粉末(可进行机械合金化处理)进行压制,然后再进行烧结,形成合金材料. 虽然上述方法工艺复杂、实施难度大,但由于其制品的组织较为均匀,所以得到了广泛的应用.

本文将半固态研究方法引入到组分密度差别较大合金的研究,从工艺简单、操作方便角度出发,研制了电磁-机械复合场处理装置,并通过实验对不同温度下电磁-机械复合场处理的组分密度差别较大合金的常规铸锭的凝固组织进行了研究,取得了极好的效果.

2 实验材料与方法

实验材料为工业纯 Al 和 Sn. Al 和 Sn 固态几乎不互溶,本实验配制的组分密度差别较大合金为 Al-20Sn 合金(wt%),之所以选择 Al-20Sn 合金为研究对象,是由于该合金是目前应用最为广泛的轴瓦铝合金之一,研究成果可以直接进行推广.

半固态研究的基本思想为:对凝固过程中的金属熔体进行强烈搅拌,充分打碎初生枝晶,得到球形或椭圆形初生固相均匀悬浮在液相中的、具有一定固相率(初生固相在整个金属熔体中所占的比例)的非枝晶半固态浆料,然后再对半固态浆料进行加工^[6]. 本实验研究的基本思路为首先利用电磁-机械复合场处理装置对 Al-20Sn 合金液在不同温度下进行电磁-机械复合场处理,制成半固态浆料,然后进行常规铸造,形成铸锭,最后开展微观组织分析.

电磁-机械复合场处理装置如图 1 所示,主要包括电磁处理系统、机械处理器、石墨坩埚等三部分,其中电磁处理系统由均匀分布在石墨坩埚周围的三对电磁极构成,功率为 10kW,其主要作用是利用旋转磁场产生的搅拌作用来打碎凝固过程中形成的枝晶,机械处理器为自行设计装置(正在申请专利),由电机控制,可上下移动,其主要作用是利用其特殊形状和运动在整个坩埚范围内改变半固态浆料的规则周向流动,从而消除重金属 Sn 因重力和离心运动造成的沉淀和偏析,促进其均匀分布;石墨坩埚为温度

* 国家博士后科学基金及清华-中大博士后科学基金资助的课题.

可控坩埚,其壁内放置加热管和冷却管,其作用是对

半固态浆料的温度进行控制。

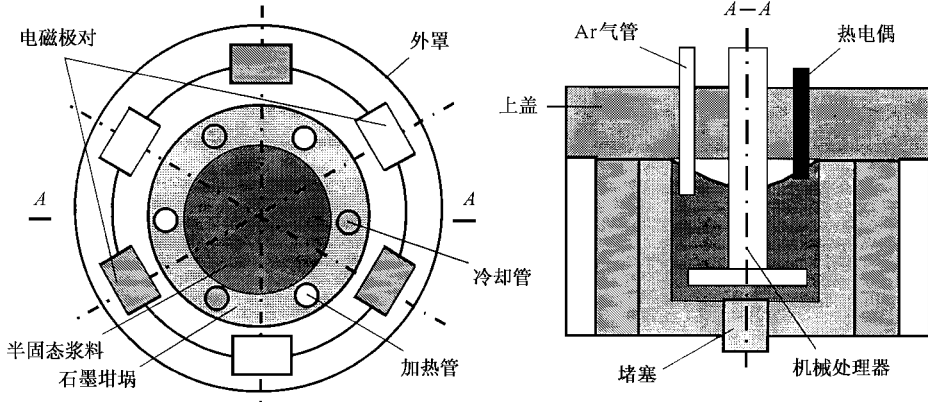


图 1 电磁-机械复合场处理装置

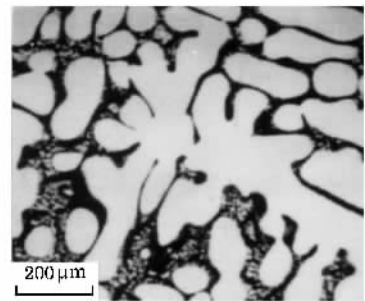
电磁-机械复合场对 Al-20Sn 合金液进行处理的过程为:接通加热管将坩埚预热至 500℃,倒入按质量百分比配制好的、经过除气处理的、700℃的 Al-20Sn 合金液,盖上上盖,吹入 Ar 气以防氧化,接通机械处理器和电磁处理系统,通入冷却液将合金液降至所需温度,关闭冷却液并接通加热管使温度保持不变(精度为 ±0.5℃),恒温处理时间为 20min。

在常规铸造中,铸锭为 φ100mm × 200mm 的圆柱铸锭,冷速为 200℃/min。常规铸锭凝固组织的扫描电子显微镜试样分别在靠近铸锭的顶部、中部和底部制取。

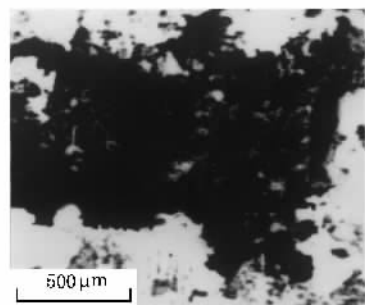
3 实验结果

图 2 为处理温度为 665℃(完全没有初生固相生成)的常规铸锭的凝固组织,靠近顶部(a)的组织与工业纯 Al 的常规铸造组织相似,主要由粗大的枝晶构成,只有枝晶间界上存在少量以 Sn 为主的共晶组织;而靠近底部(b)的组织中则含有大量的以 Sn 为主的共晶组织,图中黑色部分即为沉淀造成的共晶组织,可见在液态温度下对 Al-20Sn 合金液进行电磁-机械复合场处理并不能改变常规铸锭的凝固组织。

图 3 为处理温度为 590℃的铸锭的凝固组织,黑色部分为共晶组织,白色呈球形或椭球形的部分为初生 Al 固相晶粒,其他为后生固相,其中主要为共晶组织,还存在少量的在共晶温度以上析出的先共晶 Al。可见常规铸锭靠近顶部、中部和底部的凝固组织中的共晶组织和初生 Al 固相晶粒的分布相当均匀,亦即电磁-机械复合场的处理确保了整个常



(a) 靠近顶部

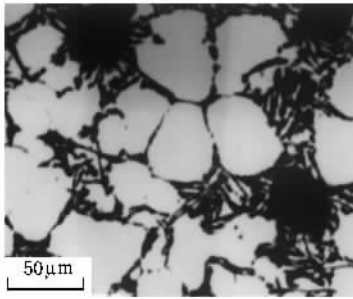


(b) 靠近底部

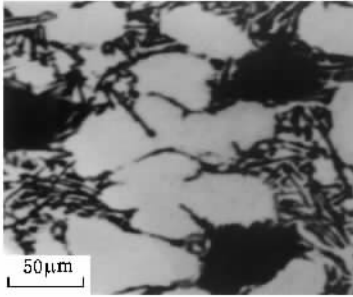
图 2 处理温度为 665℃铸锭的凝固组织

规铸锭凝固组织的均匀一致。

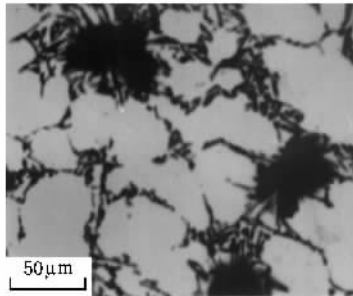
图 4 为电磁-机械复合场处理温度与常规铸锭扫描电子显微镜试样凝固组织中共晶组织尺寸之间的关系图。可见,随着对 Al-20Sn 合金液处理温度的降低,常规铸锭靠近顶部、中部和底部凝固组织中的共晶组织尺寸的差异逐渐减小,并且当处理温度低于 590℃时,铸锭靠近顶部、中部和底部凝固组织中的共晶组织尺寸的差异得以消除,即可获得均匀的凝固组织。



(a) 靠近顶部



(b) 靠近中部



(c) 靠近底部

图3 处理温度为 590℃ 铸锭的凝固组织

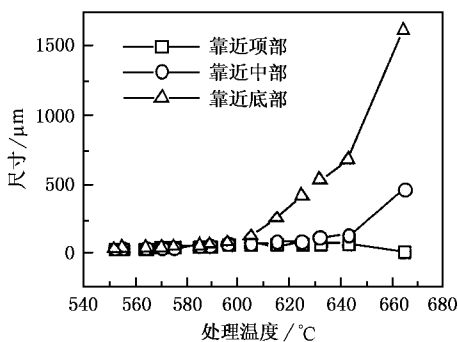


图4 处理温度与共晶组织尺寸

4 分析与讨论

对于电磁处理系统,均匀分布在石墨坩埚外面的三对电磁极线圈分别与三相交流电的一相相连,每对线圈中的电流回绕方向一致,共同产生一个单相磁场,其方向沿着线圈的轴线.这样,当把三相交流电通入三对线圈时,便会在坩埚中心点产生幅值 B_0 相同、相位彼此差 $2\pi/3$ 、数值交变的磁场 B_1 、 B_2 和 B_3 ,将其合成便得到一个幅值为 $3B_0/2$ 、大小不变、转速为交流电角频率(50r/s)的旋转磁场 B .根据法拉第电磁感应定律,在这个旋转磁场作用下,坩埚中的熔体内将相应地产生一个涡流 J ,而 J 与 B 之间的相互作用将产生洛伦兹力 F

$$F = J \times B. \quad (1)$$

根据麦克斯韦方程

$$\nabla \times B = \mu J, \quad (2)$$

得

$$F = -\frac{1}{2\mu} \nabla(B \cdot B) + \frac{1}{\mu} (B \cdot \nabla) B, \quad (3)$$

式中等号右边第一项为电磁压力,第二项为电磁搅拌力.在电磁处理过程中,这种电磁搅拌力将迫使坩埚内的熔体产生周向运动,由于运动的液体对固液界面前沿生长着的固相具有剪切作用^[7],因此凝固过程中处于生长中的枝晶不断被折断、打碎,形成球形或椭球形固相.但是,对于 Al-20Sn 这种典型的组分密度差别较大的合金,尤其在处理功率较大的情况下,由于熔体规则的周向运动,将迫使含重金属 Sn 多的液相产生离心运动,造成 Sn 的离心偏聚,因此将导致熔体从芯部向外侧的迅速凝固,图 5 即为进行电磁处理时迅速凝固部分的组织,可见组织中主要有初生固相和后生固相.因此必须改变电磁处理过程中熔体的规则周向运动,这可能就是组分密

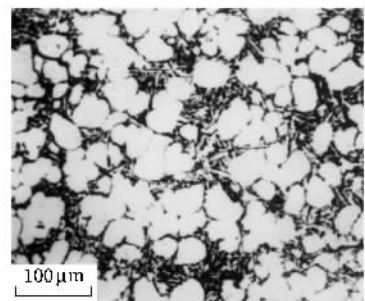


图5 迅速凝固部分的组织

度差别较大合金的半固态研究没有开展起来的根本原因。作者针对这一关键问题,研制了可以在整个熔体范围内改变熔体周向运动的机械处理器,该装置可以不断地将顶部和底部、芯部和外围的熔体进行转移,因此有效地阻止了熔体中重金属 Sn 的偏聚与沉淀,并且实现了初生 Al 固相在液相中的快速弥散,通常仅需进行 15min 电磁-机械复合场处理,便可得到初生 Al 固相和重金属 Sn 均匀分布的 Al-20Sn 半固态浆料。

对于 Al-20Sn 合金,在 665℃ 液态下进行电磁-机械复合场处理后,由于该合金在这种状态下处于单相液态,外场处理不发生实质性影响,初生 Al 和共晶组织沿垂直方向的分布与常规铸造相同,产生显著偏析。但当处理温度处于固液二相区时,熔体中将产生一定数量的初生 Al 固相,由于半固态浆料中均匀分布的初生 Al 固相在一定程度上阻碍了液相的沉淀运动,因此随着处理温度的降低,半固态浆料中均匀分布的初生 Al 固相不断增多,对液相沉淀运动

的阻碍程度也不断增大,所以常规铸锭中不同部位处共晶组织尺寸的差异逐渐减小,因此在固液二相区进行电磁-机械复合场处理,处理温度越低,常规铸锭的凝固组织越均匀。

5 结 论

1. 在固液二相区内对组分密度差别较大合金进行电磁-机械复合场处理、制成半固态浆料后再进行常规铸造是一种能够简单方便地获得均匀凝固组织的新工艺。采用该工艺成功地获得了均匀的 Al-20Sn 合金的凝固组织。

2. 经过电磁-机械复合场处理的半固态浆料中均匀分布的初生固相阻碍了重金属的沉淀运动,因此常规铸锭垂直方向上不同部位的凝固组织的差异得以减小,处理温度越低,均匀分布的初生固相越多,凝固组织的差异越小。

- [1] Kim H M and Suryanarayana C 2000 *Mater. Sci. Eng.* **287A** 59
 [2] Akinlade O , Boyo A O and Ijaluola B R 1999 *J. Alloys . Comp.* **191** 290
 [3] Merkwitz M and Hoyer W 1999 *Z. Metallkd.* **90** 363

- [4] Zhu M , Gao Y and Che X Z 2000 *Wear* **242** 47
 [5] Bishop D P and Cahoon J R 1998 *J. Mater. Sci.* **33** 3927
 [6] Brown S B and Flemings M C 1993 *Advan. Mater. Proc.* **1** 36
 [7] Vives C 1996 *Metall. Mater. Trans.* **27B** 445

Effect of electromagnetic-mechanical field on solidified structure of alloys*

Zhang Peng Du Yun-Hui Zeng Da-Ben

(Department of Mechanical Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

(Received 6 April 2001 ; revised manuscript received 12 September 2001)

Abstract

A new technology for homogeneous solidified structure of conventional casting ingot of different-density alloys treated with an electromagnetic-mechanical field was presented. The effect of electromagnetic-mechanical field on solidified structure of conventional casting ingot of Al-20Sn alloy was studied, and the theoretical analysis was conducted. The results showed that: at the semi-solid range, the lower the treating temperature, the smaller the difference of solidified structure at different positions of the conventional casting ingot.

Keywords : electromagnetic-mechanical field , treating temperature , solidified structure

PACC : 8130F , 4765

* Project supported by the Science Foundation for Post Doctorate of China, and the Tsinghua-Zhongda Science Foundation of China.