

文章编号: 1004-0609(2003)05-1184-08

电磁振荡法半连铸 7075 合金的 微观组织及溶质元素分布^①

张 勤, 崔建忠, 路贵民, 班春燕

(东北大学 材料电磁过程教育部重点实验室, 沈阳 110006)

摘 要: 研究了电磁振荡对 7075 铝合金半连续铸锭微观组织及溶质元素宏观和微观分布的作用规律。研究结果表明: 存在一个最佳电磁场频率范围 10~30 Hz, 在此范围内, 随着交变磁场感应线圈电流增大, 铸锭中近球形组织增多, 蔷薇形组织减少, 晶粒尺寸变得更加细小和均匀; 同时, 溶质元素晶内含量显著增加, 宏观偏析现象在很大程度上得到了抑制和消除; 此外, 电磁振荡使得液穴内部结晶核心增加, 温度场和含量场更趋均匀, 初凝壳高度和液穴深度降低, 溶质元素分配系数增大和结晶区间变小, 对枝晶生长的抑制作用加强, 从而促进了电磁振荡法半连续铸锭中非枝晶组织的形成和溶质元素的强制固溶, 并且抑制了宏观偏析。

关键词: 电磁振荡; 半连铸; 铝合金; 微观组织; 固溶; 宏观偏析

中图分类号: TG 249.7; TG 111.4

文献标识码: A

常规铝合金半连续铸造过程中, 残存熔体中溶质富集, 此时因凝固过程引发体积收缩, 使得晶间富集溶质的熔体在压力作用下, 沿枝晶间隙向铸锭表面流动, 导致溶质元素在铸锭横截面大尺度范围内分布不均匀; 此外, 结晶器内部的初凝壳部分常常离开结晶器壁, 使得表面散热减少, 在液穴高温熔体作用下, 产生再熔化逆偏析, 形成富含溶质的表面偏析瘤, 它大大降低了合金的成材率和力学性能。而 7075 合金作为超高强度 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的代表, 要求其有足够的溶质元素晶内固溶度, 较少的晶间非平衡化合物和更为均匀的溶质元素宏观分布。因此, 生产具有等轴细晶组织的铝合金铸锭, 强化溶质元素固溶, 以及减小溶质元素在整个截面尺度范围内的宏观偏析, 张北江等对此进行了研究^[1-3], 作者通过考察电磁振荡对 7075 合金半连续铸锭微观组织及溶质元素分布的影响规律, 试图对电磁振荡法的非枝晶组织形成及强制固溶和宏观偏析抑制作用进行解释和说明。

1 实验

1.1 工作原理

在半连铸结晶器外同时施加与重力矢量方向平

行的稳恒磁场和低频周期性交变磁场, 它们分别由通以直流电和频率为 f 的交流电的 2 个感应线圈产生; 同时, 交变磁场又在熔体内部诱发形成相同频率的感应电流密度。根据磁流体力学理论, 其运动可被看作是 3 种运动的叠加^[4-8]: 1) 稳恒磁场与感应电流密度交互作用, 在熔体内部产生频率为 f 的电磁振荡力, 促使熔体进行受迫振荡(如图 1 所示); 2) 交变磁场与感应电流密度交互作用, 产生可分解为一个时间独立分量和一个频率为 $2f$ 的振荡分量的洛伦兹力, 促使熔体进行强制对流和频率为 $2f$ 的电磁振荡运动; 3) 稳恒磁场的电磁制动作用。电磁振荡法半连铸装置见图 2。

1.2 实验方法与结果

实验所用材料为 7075 铝合金, 化学成分(质量分数, %) 为: 1. 67Cu, 2. 22Mg, 5. 95Zn, 0. 30Mn, 0. 35Fe, 0. 20Si, 余量为 Al。稳恒磁场和交变磁场由置于结晶器顶部及中部, 分别通以直流电和交流电的 2 个感应线圈所产生。线圈中空, 内通冷却水, 匝数分别为 100 和 50, 强度变化范围分别为: 稳恒磁场 0~20 000 A·turn; 交变磁场 0~10 000 A·turn, 0~100 Hz。

在铸造温度为 720 ℃, 铸造速度为 40 mm/min, 试验铸造直径为 200 mm 的铝合金铸锭时稳恒磁场

① 基金项目: 国家重大基础发展规划项目(G199906490501)

收稿日期: 2002-11-11; 修订日期: 2003-03-08

作者简介: 张 勤(1970-), 男, 博士。

通讯联系人: 张 勤, 东北大学材料冶金学院; 电话: 024-86857412; E-mail: zhangqin-001@vip.sina.com.cn

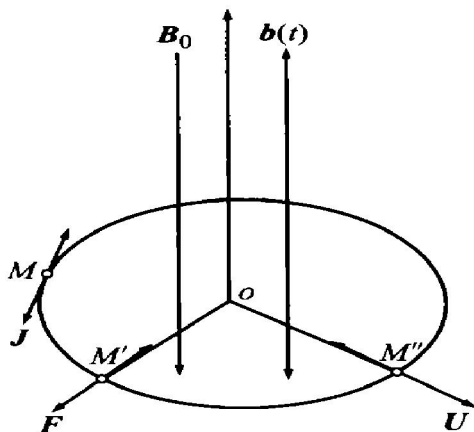


图 1 电磁振荡原理

Fig. 1 Principle of electromagnetic vibration

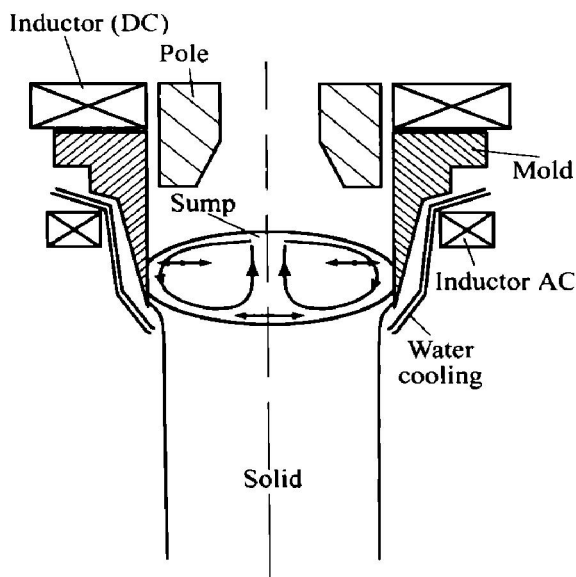
 B_0 —DC constant magnetic induction; b —AC magnetic induction; J —Induced electric current density; M, M', M''_0 —Mutual inductance; F —Magnetomotive force; U —Magnetic potential difference

图 2 电磁振荡法半连铸铝合金设备安置简图

Fig. 2 Schematic diagram of semi-continuous

casting of aluminum alloy using
electromagnetic vibration method

强度和交变感应线圈电流频率对铝合金微观组织的影响。通过光学显微镜分析相应条件下距铸锭外表面 25 mm 处的微观组织, 结果分别如图 3, 4 所示。

实验证明: 存在一个最佳电磁场频率范围 10~30 Hz, 在此范围内, 随着交变磁场感应线圈电流强度增加, 铸坯中近球形组织增多, 蔷薇形组织减少, 晶粒整体尺寸变得更加细小和均匀; 与此同时, 溶质元素的晶界含量减少, 晶内含量显著增

加, 固溶程度提高, 宏观偏析现象在很大程度上得到抑制和消除。

2 分析与讨论

2.1 非枝晶微观组织形成

合金组织的细化和非枝晶化, 可归结为熔体中结晶核心的增加和枝晶生长条件的消除。电磁振荡之所以能增加形核核心, 是由于此法所具有的电磁搅拌作用使得晶粒从结晶器壁游离数量增多, 以及电磁振荡力的反复拉伸与压缩作用, 增加了熔体对高温固相化合物及准固相原子团簇的润湿, 减少了以它们为基底的异质形核临界自由能^[9], 在高的过冷度下, 大量晶核依附其上, 异质瞬态形核而生。此外, 振荡有着与搅拌相同的作用, 使熔体产生相当大的扰动, 起着弥散合金元素、均匀温度场、加大熔体整体过冷度、增加并弥散形核核心、抑制枝晶生长的作用。这样就使得结晶过程能够围绕着分布于整个液穴范围内的大量形核核心同时进行, 几个因素综合作用的结果, 使得晶粒尺寸减小, 组织细化^[10]。

2.2 强制固溶机制

电磁振荡提高溶质元素在基体中固溶的因素主要可归结为以下几个方面。

2.2.1 交变电磁场对溶质平衡分配系数的影响

为了研究电磁场对溶质平衡分配系数的影响规律, 通过改进的双电桥电阻测量相变方法, 测得在电磁场作用下, 7075 铝合金凝固过程中电阻的变化, 并绘制 $R-t$ 曲线, 根据熔点处电阻值急剧变化的特点, 来判断合金凝固起始点和終了点的位置, 并据此来研究电磁场对 7075 合金凝固过程中液相线和固相线的影响。实验结果如图 5 所示。可以看出, 在交变电磁场作用下, 7075 合金的液相线温度和固相线温度均升高, 且固相线温度升高幅度大, 结晶温度间隔变小。其原因可归结为电磁场作用下的熔体强制对流均匀了结晶前沿的温度场和含量场, 减小了结晶前沿的温度梯度和成分过冷现象, 促进了过热的释放和溶质元素的扩散, 并且随着磁场强度增大和磁场频率减小, 变化趋势更为明显。液固相线提升幅度不一致, 导致合金中各溶质元素平衡分配系数改变, 为简化起见, 假设在相图中, 液固相线均为直线, 则在某一固定温度 t , 变

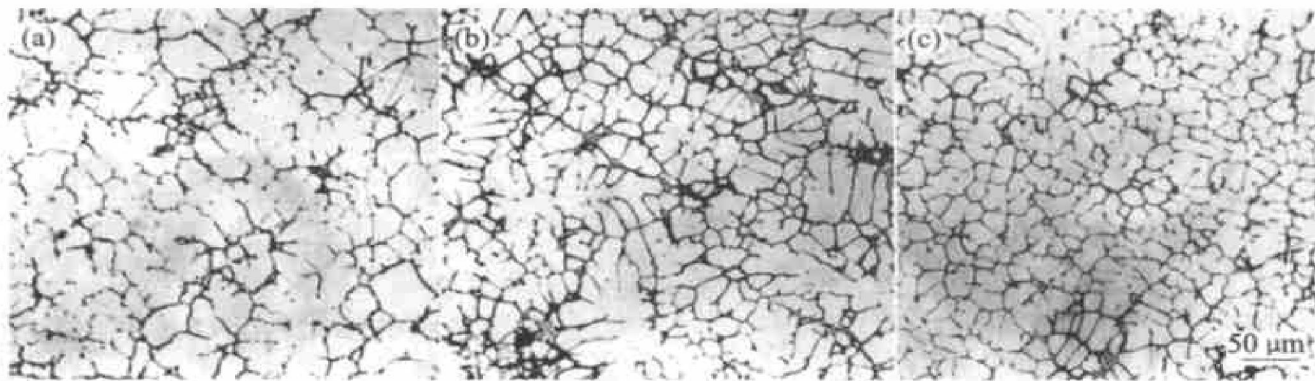


图 3 电磁振荡强度对半连铸 7075 铝合金微观组织的影响

Fig. 3 Effects of electromagnetic vibration strength on microstructure of 7075 alloy
(Stationary electromagnetic field strength: 10 000 A·turn; Frequency of electromagnetic vibration: 20 Hz)
(a) -5 000 A·turn; (b) -7 500 A·turn; (c) -10 000 A·turn

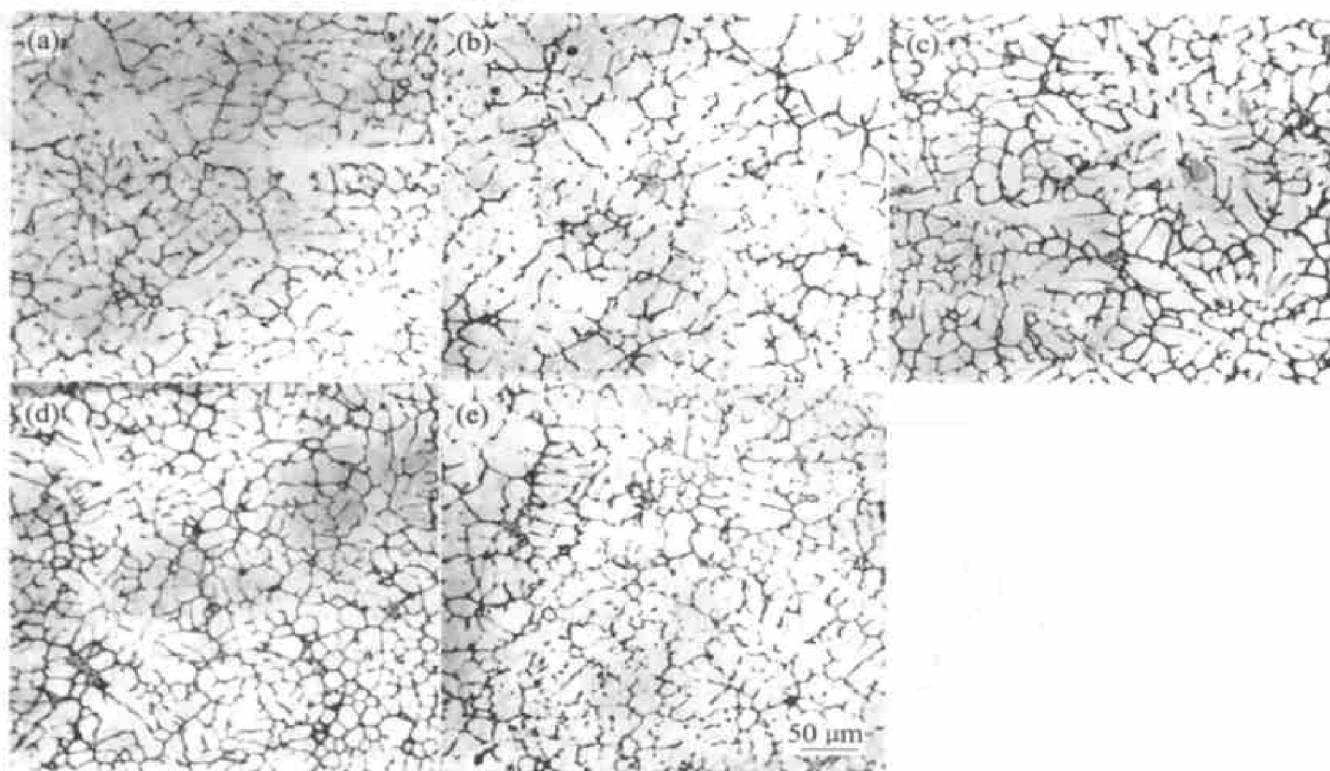


图 4 电磁振荡频率对半连铸 7075 铝合金微观组织的影响

Fig. 4 Effects of electromagnetic vibration frequency on microstructure of 7075 alloy
(Stationary electromagnetic field strength: 10 000 A·turn; Electromagnetic vibration strength: 10 000 A·turn); (a) -50 Hz; (b) -40 Hz; (c) -30 Hz; (d) -20 Hz; (e) -10 Hz

初始时:

$$k_0 = \frac{w_S}{w_L} \quad (0 < w_S < w_L)$$

变化后

$$k'_0 = \frac{w_S + \Delta w_S}{w_L + \Delta w_L} \quad (\Delta w_S > \Delta w_L > 0)$$

$$k'_0 - k_0 = \frac{w_S + \Delta w_S}{w_L + \Delta w_L} - \frac{w_S}{w_L} = \frac{\Delta w_S w_L - \Delta w_L w_S}{(w_L + \Delta w_L) w_L} > \frac{\Delta w_S (w_L - w_S)}{(w_L - \Delta w_L) w_L} > 0$$

即: $k'_0 > k_0$, 则由 $k'_0 w_0 > k_0 w_0$ 可知在电磁场作用下凝固相中溶质元素的含量提高。此外由于 $k_0 > 1$, 所以随着 k'_0 的增大, 液固两相中溶质元素含量上的差异 $\frac{k'_0 w_0}{w_0 / k'_0} = k_0'^2$ 减小, 微观偏析程度降低。

2.2.2 交变电磁场对结晶区间间隔的影响

实验测得不同电磁场条件下, 7075 铝合金的结晶温度间隔如图 7 所示。可以看出, 随着磁感应强度增大和频率减小, 结晶区间变小。从而缩短了合金元素在液固两相区的停留时间, 减少了溶质元

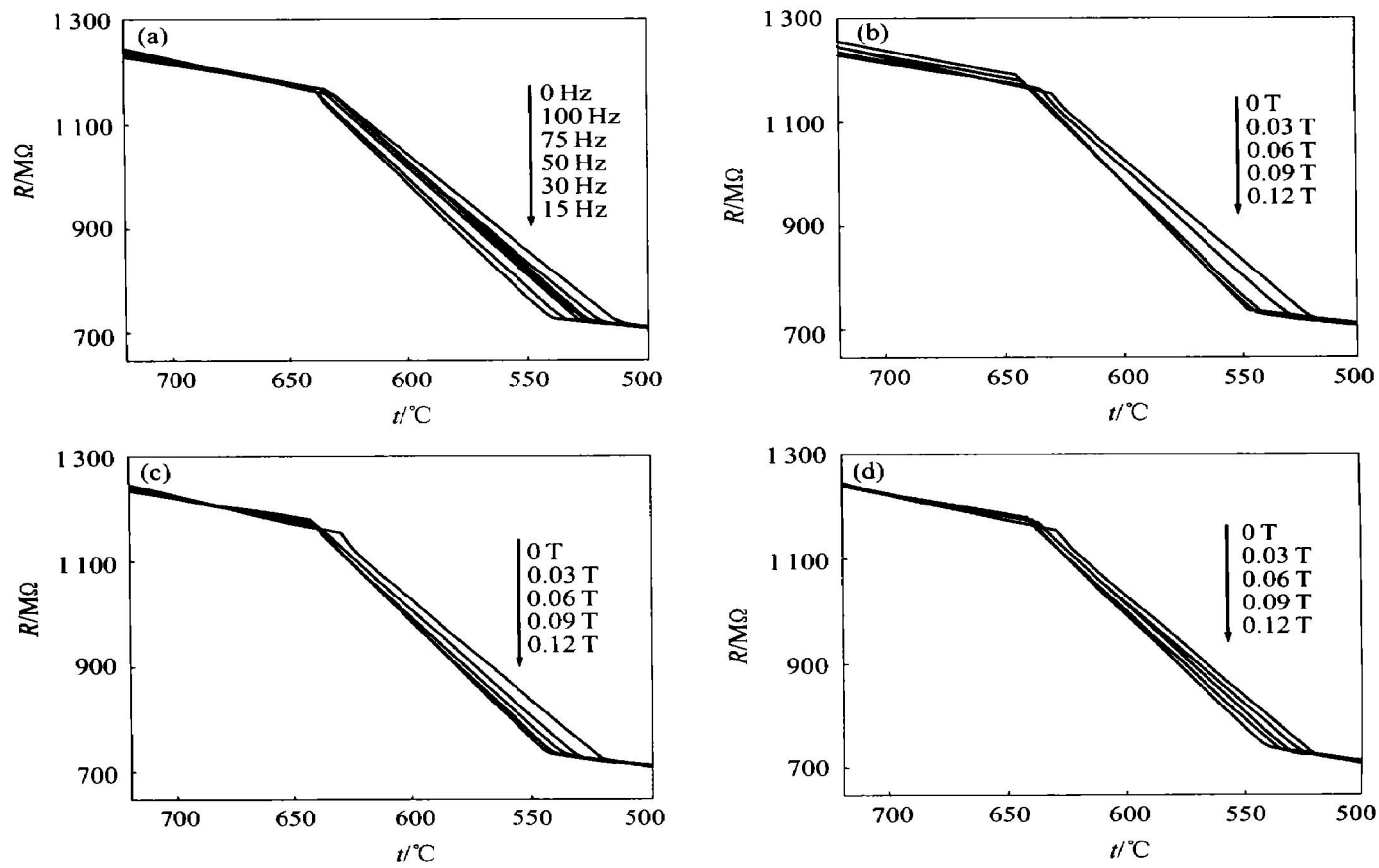


图 5 磁感应强度和磁场频率对 7075 合金液、固相转变温度的影响

Fig. 5 Effects of electromagnetic induction and frequency on liquid and solid temperature for 7075 alloy

(a) $-B=0.06\text{ T}$; (b) $-f=15\text{ Hz}$; (c) $-f=30\text{ Hz}$; (d) $-f=50\text{ Hz}$

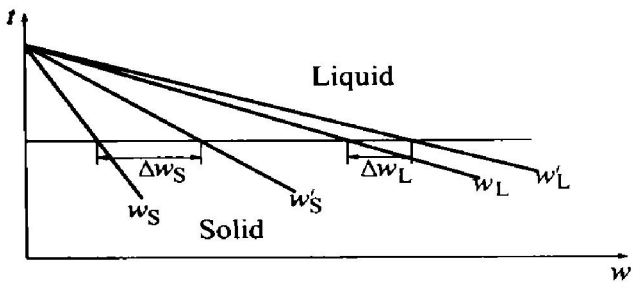


图 6 电磁场作用下液固相线位置变化对溶质分配系数的影响

Fig. 6 Effects of position of liquidus and solidus on k_0

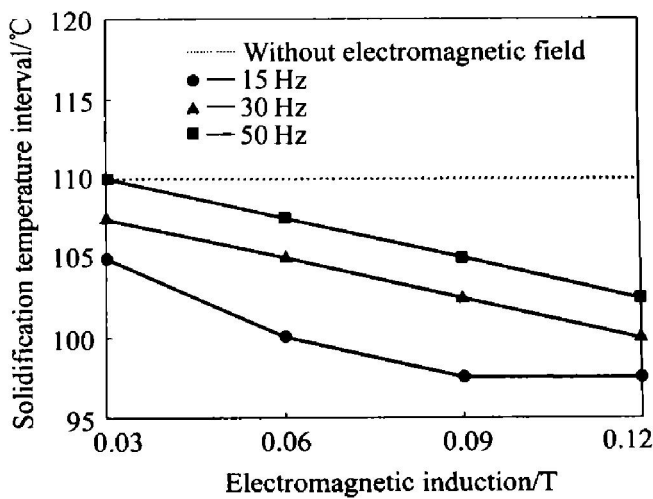


图 7 磁感应强度对 7075 铝合金结晶温度间隔的影响

Fig. 7 Effects of electromagnetic induction on solidification temperature interval of 7075 alloy

素与杂质形成粗大的金属间化合物和晶界非平衡变化前后液固相线的位置如图 6 所示。

合物的数量,起到了提高合金元素晶内含量的作用。

2.2.3 交变电磁场改变液穴内部温度场和流动场对促进溶质元素固溶的影响

交变磁场所引发的一次冷却强度降低和熔体强制对流,大大地均匀了液穴内部的温度场和含量

场,减小了结晶前沿的温度梯度和含量梯度,使得凝固过程表现为液穴内大量晶核在相似环境条件下所进行的各向同性长大,抑制了枝晶的形成,等轴晶组织铸锭各晶粒间成分相近并且具有相对均匀的微区成分和较少的粗大第二相以及晶间化合物。溶

质元素能够较为均匀地分布在晶粒内部,抑制了溶质元素在整个截面尺度范围内的微观和宏观偏析,提高了溶质元素的晶内含量。

2.2.4 电磁场作用下非枝晶组织的形成对溶质元素固溶的影响

电磁振荡法中合金的晶核以等轴方式生长,避免了常规铸造过程中,枝晶臂彼此接触“搭桥”,在晶间及二次枝晶臂根部富集溶质元素而有利于溶质元素均衡分布,以及在凝固过程结束后的降温过程中,由于溶质元素在粗大枝晶各个部位的扩散路径长短不同,影响溶质元素在凝固组织中的最终分布等因素,从而有利于提高溶质元素的晶内含量。

采用 CAMEBAX-MICRO 型电子探针对电磁振荡的溶质元素晶内含量进行测定,结果如图 8 所示。

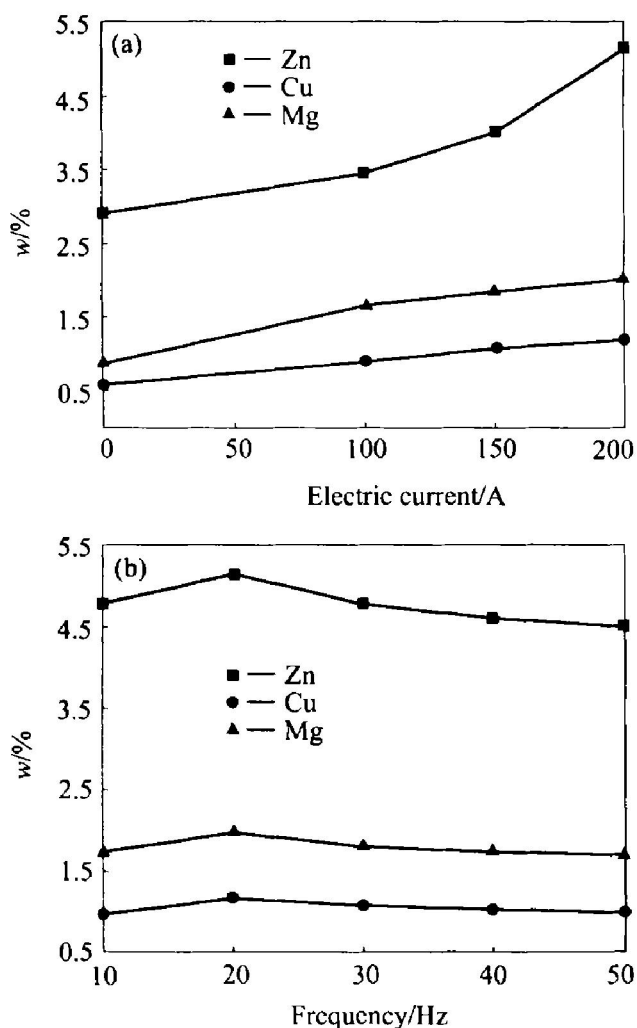


图 8 电磁振荡法晶内平均溶质含量与电流(a)及频率(b)的关系

Fig. 8 Relations of evolution of solute content inside crystal with electric current(a) and electromagnetic frequency(b)

2.3 宏观偏析的抑制作用

电磁振荡可抑制溶质元素的宏观偏析,可归结为以下几个方面:

1) 初凝壳高度因素。熔体形成凸起的弯液面,与结晶器壁间的接触高度和接触压力变小,一次冷却强度降低。此外,洛仑兹力的搅拌作用,强化了晶粒从结晶器壁的游离,因而初凝壳高度减小,形成位置点降低,消除了这部分以结晶器壁为基底的晶粒在长大过程中因颈缩和“搭桥”,而封闭富集溶质的熔体以及发生再熔化逆偏析,避免形成表面偏析瘤而造成溶质元素在铸锭表面含量偏高的现象,抑制了宏观偏析。

2) 液穴因素。液穴深度变浅,降低了各溶质元素因密度不同而在液穴内部分布不均匀造成的密度偏析,有利于溶质元素在截面尺度范围内的均衡分布和扩散,降低了宏观偏析的程度。

3) 温度场和含量场因素。有效地均匀了液穴中温度场和含量场,抑制了枝晶的生长,从而避免了枝晶臂彼此接触“搭桥”,阻止在晶间及二次枝晶臂根部封闭充盈富集溶质元素的熔体,减少了溶质宏观偏析。此外,近球形及蔷薇型的等轴细晶组织,一次与二次枝晶间距较小,溶质的渗透系数增大^[10],熔体产生晶间流动的阻力大大增加,抑制了熔体在两相区内的远程流动,因此,宏观偏析程度也减小。

4) 溶质元素分配系数因素。在交变电磁场作用下,7075 合金的液相线温度和固相线温度均升高,且固相线温度升高幅度大,结晶温度区间变小。液固相线提升幅度不一致,导致合金中各溶质元素平衡分配系数 k_0 增大^[11],若此时液穴中某一溶质元素含量为 w_0 ,则凝固相中该种溶质元素的含量 $k_0 w_0$ 随之提高;液固两相中溶质元素含量上的差异 $\frac{k_0 w_0}{w_0/k_0} = k_0^2$ 相应减小 ($k_0 < 1$),反偏析程度降低。并且,随着磁场强度增大和频率的减小(10 ~ 30 Hz 之间),溶质元素平衡分配系数 k_0 增加幅度提高,抑制反偏析、强制溶质元素固溶的作用增强,客观上减小了宏观偏析的程度。

5) 结晶温度区间因素。结晶温度区间减小,在一定程度上相当于强化了二次冷却,加快了凝固速度,缩短了凝固时间,使得溶质元素在较短时间内难以析出,起到了弥散合金元素和强制固溶的效果。促进了固溶,同时抑制了富含溶质熔体的远程流动,弱化了反偏析程度。

综上所述,几种因素的综合作用,使得采用电

磁振荡法减小了溶质元素的宏观偏析。

随交变线圈电流增加, 电磁力水平分量对熔体的约束作用增强, 熔体与结晶器接触高度和接触压力减小, 液穴变浅, 初生凝固壳形成位置点下移, 渗出效应减弱, 铸锭表面质量提高。与此同时, 电磁振荡力强度增加, 搅拌作用加强, 液穴中形核数量增多, 温度场和含量场更趋均匀, 结晶前沿的温度和成分过冷进一步消除, 对枝晶生长方式的抑制作用加强, 液固相线位置提升幅度的不一致性加大, 结晶温度区间变小, 溶质平衡分配系数增大, 溶质元素在基体中固溶度增加, 宏观偏析程度减小, 微观组织的非枝晶化程度提高。

实验及数值模拟结果证实: 存在一个最佳交变磁场频率范围(10~30 Hz), 在此范围之外, 随着交变磁场频率的降低, 磁场强度相同的条件下, 电磁力的透入深度加深, 电磁振荡力及电磁力的回旋部分逐渐增加, 强迫对流加强; 但是, 当交变电磁场频率进一步降低时, 熔体内部的磁感应强度矢量趋于均匀, 强迫对流作用减弱, 反而不利于微观组织的非枝晶化和溶质元素的强制固溶。频率在 10~30 Hz 之间的电磁振荡力更接近于熔体惯性响应频率, 对克服自然对流, 减小晶粒凝固前沿的温度和含量

梯度作用更加明显, 因而对抑制枝晶的过分长大, 改善溶质元素分布, 消除宏观和微观偏析^[12~14], 促进固溶的效果更为明显。

图 9, 10 所示分别为不同磁场频率和强度条件下, 电磁振荡法各溶质元素在横截面上的分布图, 大致呈现出表面及邻近芯部区域溶质元素含量偏高, 芯部及内侧临近表面区域溶质元素偏低的情形。这是因为溶质元素在表面富集的同时贫化了内侧邻近区域, 因此该处溶质含量有所下降。至于芯部区域溶质元素含量偏低的原因, 则有可能是早期形成的初生等轴晶在长大到一定程度以后, 电磁力不足以再驱使其运动, 由于密度差, 在重力作用下, 发生沉积或者是表面氧化物及非金属夹杂随熔体的流动输运至液穴底部不易上浮所致^[15, 16]。

3 结论

1) 电磁振荡法的搅拌作用使得晶粒从结晶器壁游离数量增多; 电磁振荡力的反复拉伸与压缩作用, 增加了熔体对高温固相化合物及准固相原子团簇的润湿, 减少了以它们为基底的异质形核临界自由能, 增加了形核核心的数量。此外, 振荡有着与

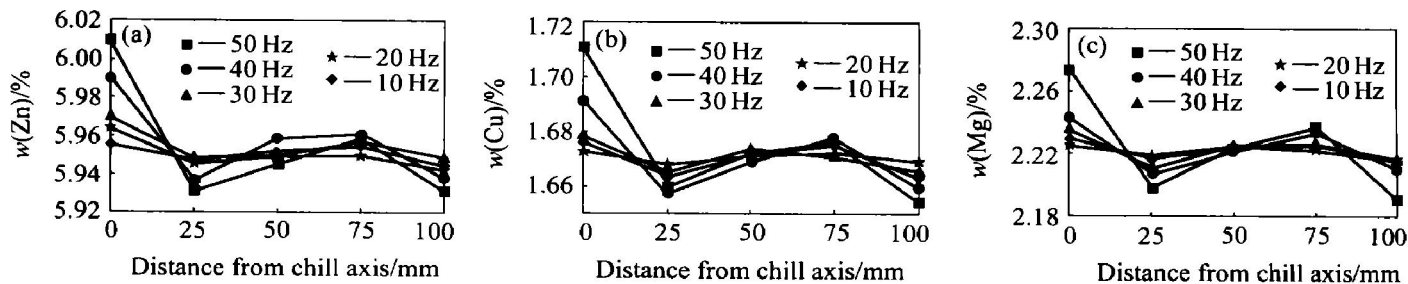


图 9 不同交变磁场频率下溶质元素沿铸锭半径的分布

Fig. 9 Solute distributions in radius direction under different frequencies of electromagnetic field

(DC electromagnetic field strength: 10 000 A·turn; AC electromagnetic field strength: 10 000 A·turn)

(a) —Zn; (b) —Cu; (c) —Mg

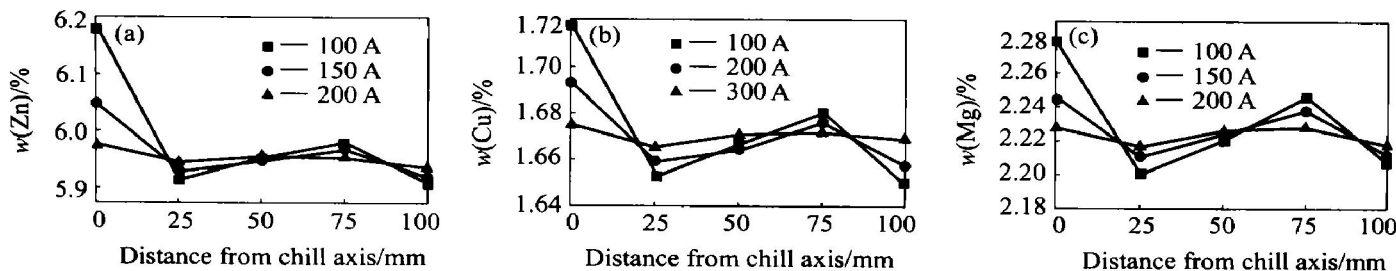


图 10 不同交变电磁场强度下溶质元素沿铸锭半径的分布

Fig. 10 Solute distribution in radius direction under different strength of electromagnetic field

(DC electromagnetic field strength: 10 000 A·turn; AC electromagnetic field: 20 Hz; 10 000 A·turn)

(a) —Zn; (b) —Cu; (c) —Mg

搅拌相同的作用,使熔体产生相当大的扰动,起着弥散合金元素、均匀温度场、加大熔体整体过冷度、增加并弥散形核核心、抑制枝晶生长的作用。

2) 电磁振荡使得液穴内部结晶核心增加,温度场和含量场更趋均匀,初凝壳高度和液穴深度降低,溶质元素分配系数增大和结晶温度区间变小,枝晶生长的抑制作用加强,是电磁振荡法非枝晶组织形成,溶质元素强制固溶及宏观偏析抑制作用的根本原因。

3) 存在一个最佳电磁场频率: 10~30 Hz。在此范围内,随着交变磁场感应线圈电流强度增加,铸坯中近球形组织增多,蔷薇型组织减少,晶粒整体尺寸变得更加细小和均匀,与此同时,溶质元素的晶界含量减少,晶内含量显著增加,固溶程度提高,宏观偏析现象在很大程度上得到抑制和消除。

REFERENCES

- [1] 张北江, 崔建忠, 路贵民, 等. 电磁场频率对电磁铸造 7075 铝合金微观组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(2): 215-218.
ZHANG Bei-jiang, CUI Jian-zhong, LU Gu-min, et al. Effect of electromagnetic frequency on microstructures of continuous casting 7075 aluminum alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(2): 215-218.
- [2] ZHANG Bei-jiang, CUI Jian-zhong, LU Gu-min, et al. Effect of electromagnetic field on macrosegregation of continuous casting 7075 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2002, 12(4): 545-548.
- [3] BAN Cun-yan, CUI Jian-zhong, BA Qi-xian, et al. The influence of pulsed magnetic field on microstructures and macrosegregation in 2124 Al alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 15(4): 380-384.
- [4] Vives C. Effects of electromagnetic vibration on the microstructure of continuously cast of aluminium[J]. Materials Science and Engineering A, 1993, 173: 169-172.
- [5] Vives C. Effects of forced electromagnetic vibration during the solidification of aluminum alloys[J]. Metall Trans B, 1996, 27: 445-455.
- [6] Alireza R, Kenji M. An investigation of the effects caused by electromagnetic vibration in a hypereutectic Al-Si alloy melt[J]. Metall Trans A, 1998, 29: 1477-1483.
- [7] Alireza R, Kenji M. Effects of the intensity and frequency of electromagnetic vibration on the microstructural refinement of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Metall Trans A, 1999, 31: 755-762.
- [8] 徐游. 电磁学[M]. 南京: 科学技术出版社, 1987. 246-257.
XU You. Electromagnetism[M]. Nanjing: Science and Technology Press, 1987. 246-257.
- [9] 周尧和. 凝固技术[M]. 北京: 机械出版社, 1998. 194-203.
ZHOU Yao-he, HU Zhuang-qi, JIE Wan-qi. Solidification Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. 194-203.
- [10] 张勤, 路贵民, 崔建忠, 等. CREM 法半连铸 Al 合金非枝晶组织的形成机制[J]. 金属学报, 2001, 37(8): 873-876.
ZHANG Qin, LU Gu-min, CUI Jian-zhong, et al. Formation mechanism of non-dendritic structure of aluminum alloy produced by semi-continuous casting of CREM process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(8): 873-876.
- [11] Ridder S P, Kou S, Mehrabian R. Effect of fluid flow on macrosegregation in axisymmetric ingots[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1987, 12: 435-447.
- [12] Boettinger W J, Coriell S R, Greer A, et al. Solidification microstructures: recent developments, future directions[J]. Acta mater, 2000, 48(1): 43-70.
- [13] Walker J S. Bridgman crystal growth with a strong, low-frequency, rotating magnetic field[J]. J Crystal Growth, 1998, 192(2): 318-327.
- [14] Tewari S N, Shah R. Macrosegregation during dendritic arrayed growth of hypoeutectic Pb-Sn alloys: influence of primary arm spacing and mushy zone length[J]. Metall Trans A, 1996, 27: 1353-1362.
- [15] Schneider M C, Beckermann C. A numerical study of the combined effects of microsegregation, mushy zone permeability and flow, caused by volume contraction and thermosolutal convection, on macrosegregation and eutectic formation in binary alloy solidification[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(18): 3455-3473.
- [16] Vreeman C J, Krane M J M, Incropera F P. The effect of free-floating dendrites and convection on macrosegregation in direct chill cast aluminum alloys Part II: model development[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(4): 677-686.

Microstructure and solute distribution of 7075 alloy produced by semi-continuous casting under electromagnetic vibration

ZHANG Qin, CUI Jian-zhong, LU Gu-min, BAN Chun-yan

(Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The microstructure as well as solute distribution both in microscopic and macroscopic view for 7075 alloy by semi-continuous casting under the electromagnetic vibration were investigated. The results show that there is an optimum frequency range of 10~30 Hz, in which, with the increasing of electromagnetic intensity, the quantity of spheroid-shaped grains increases; the quantity of rosette-shaped grains decreases, the microstructure of the ingot becomes more fine and uniform. At the mean time, alloying elements' solubility increases and the macro-segregation is diminished in a great degree. The electromagnetic vibration makes the grain nuclei in sump increase, temperature and solute distribution of sump become uniform, primary solidified shell and sump height decrease, solute equilibrium partition coefficient increase and solidification temperature interval decrease, the effect of restraining crystal particles growing into dendrite strengthen, which promote alloying elements' solution inside crystal and suppress macro-segregation.

Key words: electromagnetic vibration; semi-continuous casting; aluminum alloy; microstructure; solute distribution; macro-segregation

(编辑 陈爱华)