

电磁搅拌制备大尺寸 Cu-6Ag 铸锭凝固特性研究

段建旭^{1,2} 杨 斌^{1,2} 邓安元^{1,2} 王恩刚^{1,2} 张 林^{1,2}

(1.东北大学材料电磁过程研究教育重点实验室; 2.东北大学冶金学院)

摘 要 建立了铸坯凝固传热过程的数学模型,分析了 $\phi 40\sim\phi 160$ mm 铸锭凝固过程中的温度场变化。结果表明,大尺寸铸锭温度梯度较大,偏析较强。虽然电磁搅拌可以较好地控制合金液的凝固过程,但对于 $\phi 40$ mm 小截面铸锭,施加电磁搅拌并不能很好地解决偏析现象。对于 $\phi 160$ mm 的大尺寸铸锭来说,施加线性搅拌产生的效果要优于旋转搅拌,并且在电流为 100 A,频率在 8~10 Hz 这个范围内搅拌效果最佳。

关键词 Cu-6Ag 合金;凝固;电磁搅拌;偏析

中图分类号 TG391;TG146.1⁺1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Solidification Characteristics of Large-scale Cu-6Ag Ingot by
Electromagnetic Stirring

Duan Jianxu^{1,2}, Yang Bin^{1,2}, Deng Anyuan^{1,2}, Wang Engang^{1,2}, Zhang Lin^{1,2}

(1.Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education,
Northeastern University; 2.School of Metallurgy, Northeastern University)

Abstract: A mathematical model of heat transfer was established, and the changes of the temperature field during the solidification process of ingots with $\phi 40$ mm~ $\phi 160$ mm were analyzed. The results indicate that the larger-scale ingot has a larger temperature gradient and stronger segregation tends to occur. Although electromagnetic stirring can well control the solidification process of the alloy, electromagnetic stirring is not a good solution for ingots with small cross-section of $\phi 40$ mm. For larger-scale ingot with $\phi 160$ mm, linear stirring is more effective than rotary stirring, of which the effect is desirable at the current of 100 A and the frequency of 8 Hz to 10 Hz.

Key Words: Cu-6Ag Alloy, Solidification, Electromagnetic Stirring, Segregation

随着技术的发展,对材料的需求也越来越高。20 世纪 70 年代,BEVK J 等^[1]对 Cu-Nb 合金进行了研究,发现铸态合金进行大变形处理后提高了其强度。SAKAI Y 等^[2]指出由于 Cu 和 Nb 的熔点相差较大,不利于制备大型 Cu-Nb 合金铸锭。通过对铜合金各项性能进行综合比较后发现,Cu-Ag 合金性能更加优异,可以替代 Cu-Nb 合金,因此 Cu-6Ag 合金^[3~9]在生活和工业中得到大量应用,如高速列车专用线材、强磁场磁体系统、大规模集成电路引线框架等^[10]。BENGHALEM A 等^[11]研究了不同 Ag 含量的 Cu-Ag 合金铸态组织和性能后发现,随着 Ag 含量增加,组织中也将会出现 Ag 相,性能随之逐渐增强。HONG S I 等^[12]认为进行中间热处理后合金在继续冷加工的过程中,可以从更为细

密的组织开始变形,使得加工硬化能力进一步增强。SAKAI Y 等^[13]指出铸态初生 α 枝晶尺寸并不会随着 Ag 含量的改变而变化,而主要取决于合金的凝固条件以及浇注冷却速度。冷却速度越快, α 枝晶的尺寸就越小,得到的铸态组织更加细密。GRUNBERGER W 等^[14,15]认为,由于较高的 Ag 含量提高了共晶体的体积分数,降低了两个 Cu 晶粒直接相连的可能,使得 Cu 晶粒中大角度晶界减少,减少了不连续析出相的形核位置,此种不连续析出相大多出现在低 Ag 含量的合金中。由于 Cu-6Ag 合金有着较为优异的导电性能和强度,随着现代化工业的不断进步,制备大尺寸 Cu-6Ag 合金成为当务之急。本课题通过分析各种尺寸 Cu-6Ag 的凝固特点,得出大尺寸铸锭凝固过程中容易出现

收稿日期:2021-03-30;修改稿收到日期:2021-04-14
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFE0107900);国家自然科学基金资助项目(51474065);高等学校学科创新引智计划资助项目 2.0 (BP0719037)
第一作者简介:段建旭,男,1994 年出生,硕士研究生,沈阳(110004),E-mail:djianxu199418@126.com
通信作者:邓安元,男,1971 年出生,教授,沈阳(110004),E-mail:dengay@epm.neu.edu.cn
引用格式:段建旭,杨斌,邓安元,等. 电磁搅拌制备大尺寸 Cu-6Ag 铸锭凝固特性研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 255-1 260.
DUAN J X, YANG B, DENG A Y, et al. Solidification characteristics of large-scale Cu-6Ag ingot by electromagnetic stirring[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 255-1 260.

陷,提出通过施加电磁搅拌的方式加以改善,进而提高合金铸锭的品质,使其得到更广泛的应用。

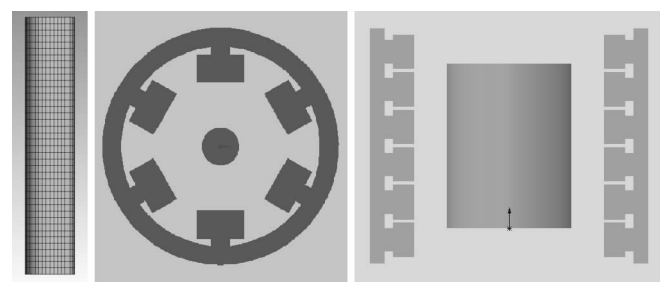
目前对 Cu-6Ag 合金的制备方法有^[16]:连铸连轧法、快速凝固法和定向凝固法。连铸连轧法生产的合金具有高强度、高耐磨性,但是在实际生产过程中对于强化 Cu-Ag 合金固溶时效的问题仍未解决。快速凝固法使得最初的形核过冷度较大,生长速率较快,但对于大尺寸的 Cu-Ag 合金铸锭来说,品质问题并不能得到较好的改善。定向凝固法也是通过调整凝固速度、温度梯度来影响 Cu-Ag 合金的强度以及电导率,但是这种方法并不能较好地调整温度梯度。近年来,Cu-6Ag 合金凝固过程中的数值模拟得到越来越多的重视。凝固过程对于产品品质起着决定性作用,凝固过程并不仅仅只是一个流体流动的过程,在凝固过程中需考虑流动和传热以及传质的工艺条件。本课题将电磁搅拌技术引入大尺寸 Cu-6Ag 合金的制备过程,通过模拟其凝固过程,针对不同尺寸铸坯,得到控制大尺寸 Cu-6Ag 合金铸锭凝固过程的电磁制备方法,以优化铸锭品质,为大尺寸 Cu-Ag 合金的制备提供借鉴。

1 数学模型

由于 Cu-6Ag 合金的凝固过程颇为复杂,为了便于建立数学模型和简化运算,对模型作如下假设:①流体流动为粘性不可压缩定常流动;②研究合金为 Cu-6Ag,合金液体为各向同性。

1.1 几何模型

以 Cu-6Ag 合金大尺寸铸锭的制备为研究对象,图 1 为模拟过程中所用到的模型网格示意图和搅拌模型。采用的电磁搅拌方式为旋转搅拌和线性搅拌,搅拌器布置示意图见图 1b 和图 1c。铸锭直径分别为 40、85、120 和 160 mm,高度为 210 mm。



(a) 网格示意图 (b) 旋转搅拌器模型俯视图 (c) 线性搅拌器模型剖面图

图 1 网格示意图及搅拌器模型

Fig.1 Grid diagram and stirrer model

1.2 电磁场控制方程

在使用 ANSYS 软件对搅拌器求解电磁力时,理论依据为 Maxwell 方程组^[17]:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times H = j \quad (4)$$

式中, B 为磁感应强度,T; E 为电场强度,V/m; H 为磁场强度,A/m; j 为电流密度,A/m²; t 为时间,s。

在耦合计算过程中搅拌力作为动力源项进行插值计算,其表达式为:

$$F = j \times B \quad (5)$$

式中, F 为时均电磁力,N/m³。

1.3 凝固数学模型控制方程

凝固数学模型控制方程采用连续性方程、动量守恒方程以及能量守恒方程。本课题采用 Launder 和 Sharma 等提出的低雷诺数 k - ϵ 模型^[18,19]。

k 方程

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon - D_k + S_k \quad (6)$$

ϵ 方程

$$\frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + c_1 f_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - c_2 f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + E_\epsilon + S_\epsilon \quad (7)$$

式中, k 为湍流动能,m²/s²; ϵ 为湍流动能耗散率,m²/s³。其中, $\mu_t = c_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$, $f_\mu = e^{-3.4/(1+R_T/50)^2}$, $f_2 = 1.0 -$

$$0.3e^{R_T^2}, D_k = 2\mu \frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_j}, R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \epsilon}, E_\epsilon = \frac{2\mu \mu_t}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k}$$

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_k}, \text{源项 } S_k = -\frac{\mu}{K} k, S_\epsilon = -\frac{\mu}{K} \epsilon, K = \frac{\lambda_2^2 (f_l^3 + \delta)}{180(1-f_l)^2}, \text{式中, } f_l \text{ 为液相率; } \lambda_2 \text{ 为二次枝晶臂间距; } \delta \text{ 为一个极小值。其他低雷诺数模型中系数见表 1。}$$

表 1 低雷诺数模型中的系数和经验常数

Tab.1 Coefficients and empirical constants in the

Low Reynolds number model

f_1	c_μ	c_1	c_2	σ_k	σ_ϵ
1.0	0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

1.4 边界条件

壁面为无滑移壁面,水冷铜模,其对流传热系数为 1 500 W/(m²·°C);液面为自由表面,法向速度为 0,其他变量的法线方向导数为 0,只考虑自然对流和热辐射,表面发射率取 0.8,自然对流传热系数取 6 W/(m²·°C),假设环境温度始终保持在 300 K。

1.5 模型求解方法和条件

流场计算中采用 PISO (pressure implicit with splitting of operators) 算法,最后采用 UDF 程序将 ANSYS 计算的电磁力加入动量源项,进行插值计算,计算中 Cu-6Ag 合金密度为 8 076.8 kg/m³,粘度为 0.001 24 Pa·s^[20],热膨胀系数为 1.7×10⁻⁴,液相线温度为 1 328.54 K,固相线温度为 1 220.12 K,浇注温度为 1 353.54 K。采用有限元软件 ANSYS 模拟计算电磁场,在电磁搅拌器的三相绕组施加三相交流电,每对线圈之间的相位角依次是 0°、120°和 240°。

1.6 网格无关性检验

为保证计算精度,首先对网格数量进行了无关性验证,见表 2。分别对网格作不同程度的加密,通过对各种不同加密网格进行合金凝固过程的模拟计算,通过对计算结果进行分析,从计算结果精度以及计算成本出发,本课题选用方案 C 的网格进行研究。

表 2 网格无关性验证

Tab.2 Grid independence validation					
算例	节点数	单元数	温度误差/%	速度误差/%	液相率误差/%
A	8 241	9 240	0.004 067	4.43	0.682
B	9 881	10 920	0.001 903	2.03	0.318
C	11 521	12 600	0.001 001	1.04	0.167
D	16 441	17 640	—	—	—

2 模拟结果分析

2.1 不同截面尺寸铸坯的凝固过程

图 2 为不同截面尺寸合金熔体不施加电磁搅拌时的温度场分布。可以看出,对于小截面铸坯,随着熔体浇注到模具中,形成的熔池较窄,伴随着传热过程,熔体中心处与壁面处温差较小,越容易促进凝固的发生且凝固时间较短;对于大尺寸截面铸坯,随着熔体不断浇注到模具中,形成较深的熔池,使得两相区的区域更宽,导致熔体中心处与壁面处温差较大,不利于凝固发生。

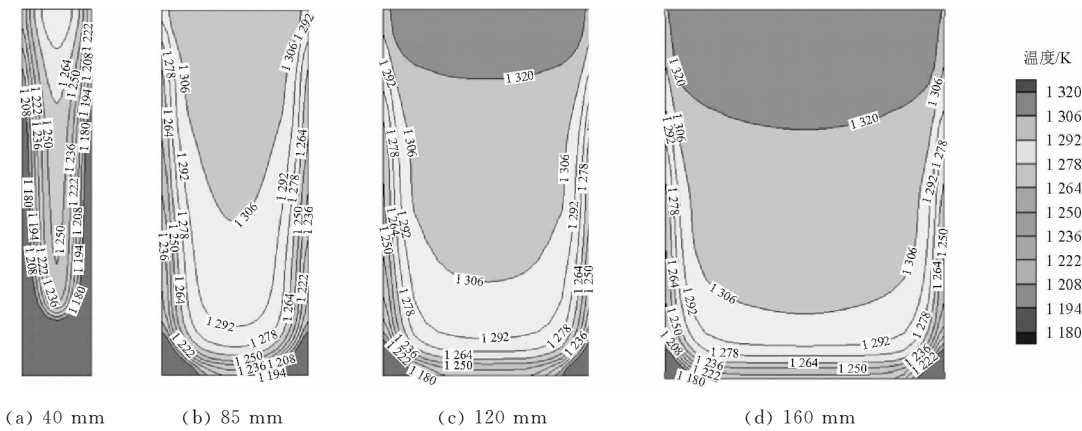


图 2 不同直径合金熔体不施加电磁搅拌时的温度场分布

Fig.2 Distribution of temperature field in alloy melts with different sizes without electromagnetic stirring

对于大尺寸的铸坯来说,在相同的冷却条件下,凝固较慢,容易产生较大的温度梯度,有利于柱状晶的充分发展,不利于等轴晶的生成,而柱状晶的产生不利于凝固组织的细化,对铸坯品质的改善有着不利的影响,且在凝固过程中很容易造成溶质的再分配现象,使得溶质分布并不均匀。可以用“凝固晶桥理论”^[21]来解释,若铸坯内部的柱状晶生长一旦过于发达时,将会导致在铸坯局部传热较不稳定,形成较大的温度梯度,导致柱状晶充分发展且生长不均匀,使铸坯中心在凝固后期形成“搭桥”,铸坯中心液穴末端的形状会形成一个比较尖的“V”字形,这样会使得溶质在尖端不断积累,很容易导致液穴尖端溶质浓度偏高。形成的“搭桥”阻止上部合金熔体对晶桥下熔体凝固收缩的补充,并将液穴的尖端封闭起来,阻断尖端部分与其他液相的相互扩散,在中心线附近呈点状或者线状的中心偏析。偏析现象经常出现在铸锭凝固过程中,影响铸锭的品质。通过对比发

现,大截面铸锭在凝固过程中由于温度梯度较大,不利于等轴晶的形成,铸坯品质较差,这也限制了大尺寸截面 Cu-6Ag 合金的制备。

2.2 电磁搅拌对不同尺寸截面铸坯凝固的影响

2.2.1 直径 40 mm 铸锭有无电磁搅拌的凝固特点

图 3 为 φ40 mm 铸锭凝固末期有无旋转电磁搅拌时铸锭中心截面的温度场和液相率分布。由图 3a 与图 3b 对比可知,施加旋转电磁搅拌后由于流动加强,使得上下熔液温度均匀,而高温区域增大,并且主要集中在中心部位附近,而小截面铸锭凝固较快,这种情况使得在凝固后期合金液可能得不到很好的补缩,极易带来新的凝固缺陷问题。产生这种情况的原因可能为铸锭截面尺寸较小,施加电磁搅拌后传热较快,液态金属迅速转变为固态,阻断了合金液的流动,在铸锭内形成一个高温区域,在中心部位的高温合金液在凝固中不能及时

得到补缩,最后可能形成缩孔、缩松甚至裂纹。

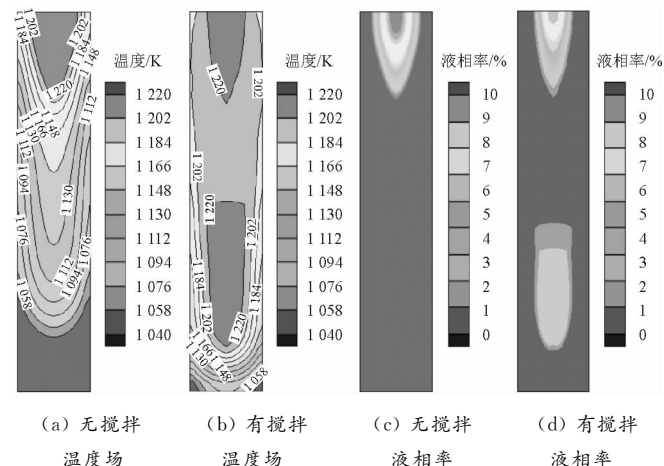


图 3 $\phi 40$ mm 铸锭有无电磁搅拌的温度场云图和液相分率云图
Fig.3 Temperature and liquid fraction distribution nephogram of $\phi 40$ mm ingots with or without electromagnetic stirring

图 4 为同一高度处横截面对应两种时刻的温度梯度变化。可以看出,在最后的凝固过程中,合金熔体在受到电磁搅拌的作用下,使得合金液均匀混合,提高了内部合金熔体的降温速度,从而使得凝固过程中凝固前沿的温度梯度降低,抑制柱状晶的生长,促进等轴晶的形成。但由于铸锭尺寸截面较小,使得高温区停留在中心部位,极易形成缩孔、缩松以及裂纹,所以在对于小截面铸锭的凝固过程中,通过施加旋转电磁搅拌,可以很好地干预合金液的流动,但可能会带来其他问题,因此不建议采用电磁搅拌。

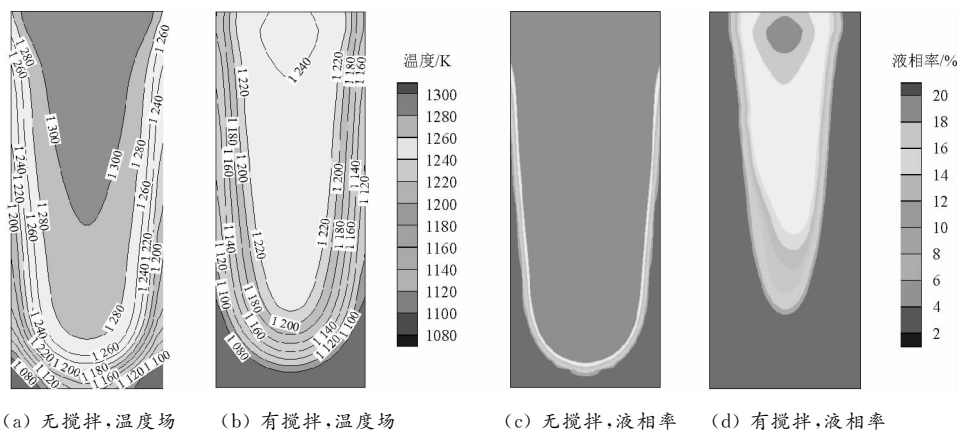


图 5 $\phi 85$ mm 铸锭有无电磁搅拌温度场和液相率云图

Fig.5 Temperature and liquid fraction distribution nephogram of $\phi 85$ mm ingots with or without electromagnetic stirring

不至于形成较大的温度梯度,还可以将形成的柱状晶打断,使其作为重新生成等轴晶的核心^[22]。而且与 $\phi 40$ mm 小尺寸铸锭相比,出现高温区的区域明显减少,高温区和凝固终点位置上移。由此可推知,对于大尺寸铸锭来说,施加电磁搅拌可能在一定程度上改善铸锭凝固品质。

图 6 为 $\phi 85$ mm 铸锭同一高度处横截面上对应两

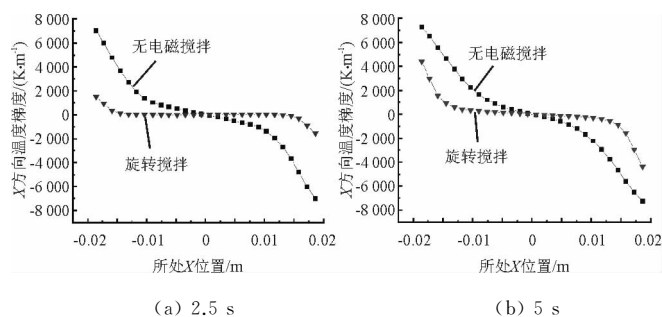


图 4 同一高度处铸锭径向对应两种时刻的温度梯度变化
Fig.4 The temperature gradient variation on cross section corresponding to two moments at the same height

2.2.2 $\phi 85$ mm 铸锭有无电磁搅拌的凝固特点

大尺寸铸锭中较易出现缩孔、缩松、夹杂物和偏析等缺陷,有必要了解缺陷的形成机理以及分布规律,以提出合理的改进措施,进而完善大尺寸铸锭的工艺。

大尺寸铸锭的凝固过程是从下到上从外到里。在起初的凝固阶段,等温线呈“U”型分布,但随着凝固过程进行,逐渐呈“V”字型,这是由模型底部与侧面不同的冷却强度所造成的,最后凝固区域为顶端冒口区域。

图 5 为凝固末期 $\phi 85$ mm 铸锭在有无旋转搅拌时铸锭中心截面的温度场和液相率分布。由图 5a 与图 5b 对比发现,不施加搅拌时,等温线下移,形成更深的熔池,使得两相区变得更宽,有利于柱状晶生长。通过施加电磁搅拌后增强了合金液的流动与传热,使得凝固前沿温度更加均匀,热量在凝固过程中得到补充及时,

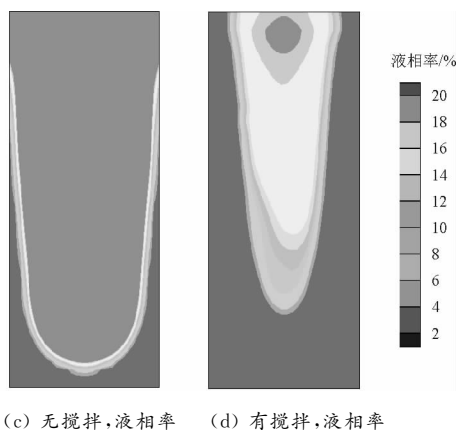


图 5 $\phi 85$ mm 铸锭有无电磁搅拌温度场和液相率云图

种时刻的温度梯度变化。可以看出,对于截面直径为 85 mm 的合金铸锭来说,凝固过程中施加旋转电磁搅拌有效降低了凝固前沿的温度梯度,使得较小温度梯度下的区域增大,这有利于抑制柱状晶的充分发展,细化组织,改善铸锭品质。从凝固时间看,在施加搅拌后至铸锭完全凝固需要 27 s,在不施加电磁搅拌条件下铸锭完全凝固需要 53 s。一般情况下,小截面的铸锭在不施

加电磁搅拌至完全凝固需要 22 s, 所以其凝固品质较好, 由此可知施加电磁搅拌在一定程度内缩短了凝固时间, 有利于铸锭品质的提高。

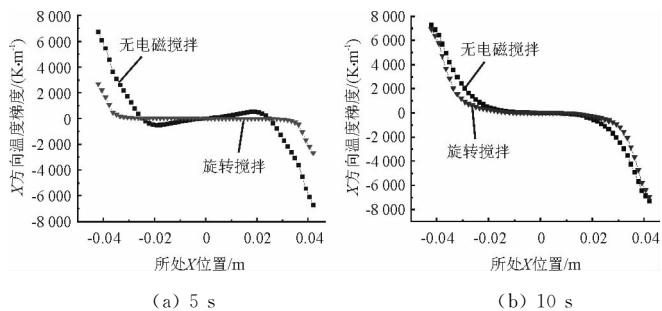


图 6 同一高度处铸锭径向对应两种时刻的温度梯度变化
Fig.6 The temperature gradient variation on cross section corresponding to two moments at the same height

为验证旋转搅拌对 Cu-6Ag 铸锭凝固品质的影响, 针对 $\phi 85$ mm 的铸锭, 进行了浇注试验。对有无电磁搅拌 Cu-6Ag 合金纵截面进行了取样分析, 宏观组织见图 7。由图 7a 可以看出, 在合金液冷却过程中, 随着合金液温度下降至液相与固相两相区时, 开始在模具壁面处形核、生长, 然后逐渐向模具内部的液相区域内生长, 柱状晶生长比较发达; 由图 7b 可以看出, 在凝固过程中施加旋转搅拌, 随着电磁力产生, 驱动合金液的流动加快, 晶粒有所细化, 晶粒的大小分布也更加均匀。试验结果从一定程度上验证了模拟结果的准确性。

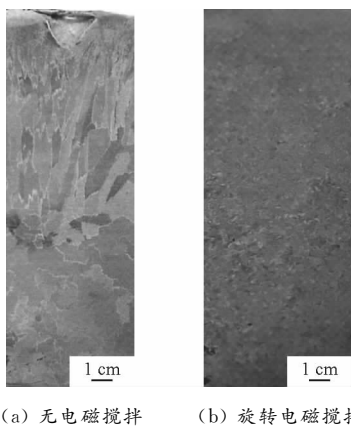
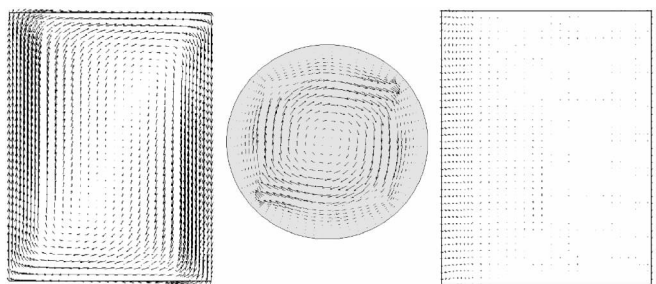


图 7 Cu-6Ag 合金 $\phi 85$ mm 铸锭纵截面的宏观组织
Fig.7 Longitudinal section macrostructure of as-cast Cu-6Ag alloy

2.2.3 搅拌方式对 $\phi 160$ mm 铸锭凝固特点的影响

通过对较大尺寸 $\phi 85$ mm 铸锭凝固过程施加电磁搅拌, 发现能够达到改善铸锭品质的目的。现以 $\phi 160$ mm 铸锭作为模拟研究对象, 探究不同搅拌方式对大尺寸铸锭凝固特点的影响, 两种搅拌过程流场图见图 8。

由图 8a 可以看出, 熔池内形成了一个上下流动的闭环, 加大了合金液的流动程度, 在流动过程中还可以使温度均匀, 温度梯度减小, 抑制柱状晶的生长和长大,



(a) 线性搅拌流场图 (b) 旋转搅拌流场俯视图 (c) 旋转搅拌流场主视图
图 8 两种搅拌下的流场

Fig.8 Flow field with different stirrers

有利于产生等轴晶, 改善铸坯组织。旋转搅拌产生周向的电磁力, 使合金液作圆周流动见图 8b, 起到加大合金液扰动程度的作用, 但是在流动过程中, 熔池上下部的合金温度不能得到较好的混匀, 容易形成较大的温度梯度, 不利于等轴晶的形成。

图 9 同一截面不同搅拌方式下的温度梯度。可以看出, 在同一截面处, 在线性搅拌作用下, 铸锭处在较小的温度梯度下的区域要稍微多于旋转搅拌下的区域, 中心等温区较大。当铸锭从外向内开始逐渐凝固时, 较小的温度梯度有利于等轴晶形成, 利于组织细化。通过模拟施加线性搅拌凝固过程与不施加搅拌凝固过程发现, 施加线性搅拌有利于缩短凝固时间, 使其更快冷却, 与小尺寸铸锭在常规条件凝固过程中产品品质较优不同, 通过施加线性搅拌可以适当改善大尺寸铸锭凝固过程出现的缺陷。

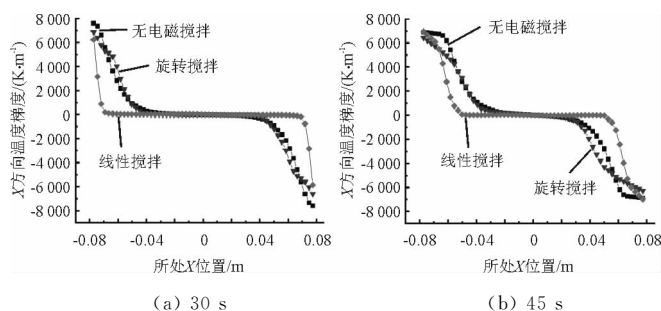


图 9 同一截面不同搅拌方式下的温度梯度

Fig.9 The temperature gradient at the same section under different stirring methods

2.2.4 最佳线性搅拌参数

研究发现线性搅拌的效果优于旋转搅拌, 为了使线性搅拌作用后的铸锭品质能够进一步改善, 对线性搅拌参数进行优化。当搅拌频率为 8 Hz 时, 研究了电流为 80、100、300 和 500 A 下的作用效果; 当电流为 500 A 时, 讨论了频率为 6、8、10 Hz 下的作用效果。

图 10 为不同电流、不同频率对同一截面温度梯度的影响。由图 10a 可见, 熔池内的温度梯度随搅拌电流强度增大呈现先增大后减小的趋势, 即有一个场界搅拌

电流强度。随着电流强度增大,搅拌效果增强,熔池内的合金液温度更加均匀;但当电流施加到 500 A 时,产生的电磁力可能较大,使得合金液扰动过大,温度梯度波动过大,反而不利于等轴晶的生成,所以电流应控制在 100 A 左右为最佳。由图 10b 可见,频率应控制在 8~10 Hz 范围内,温度梯度较小的区域明显增加,可认为等轴晶充分发展区域明显增加,搅拌效果最佳。

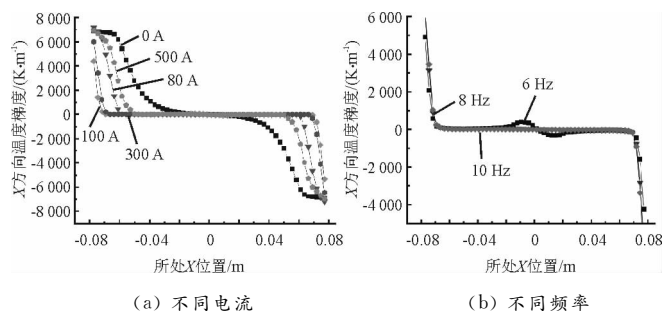


图 10 不同电流、不同频率对同一截面处温度梯度的影响
Fig.10 The influence of different currents and different frequencies on the temperature gradient at the same cross section

3 结 论

(1)铸锭的截面尺寸越大,在相同的冷却条件下,越容易产生较大的温度梯度,不利于等轴晶的生成,易产生较强的偏析现象。

(2)通过施加电磁搅拌,使合金熔体发生均匀混合,减弱凝固前沿的温度梯度,可抑制柱状晶的生长,促进等轴晶的形成。通过施加电磁搅拌能明显缩短其凝固时间,在一定程度上可以改善铸锭品质。

(3)对于大尺寸铸锭,施加不同的搅拌形式可改变合金液所处的温度梯度,线性搅拌效果最佳。

(4)线性搅拌过程中电流强度控制在 100 A 为宜,频率应控制在 8~10 Hz 范围内,使得在任意截面内产生较小的温度梯度,有利于等轴晶的充分形成,提高铸锭品质。

参 考 文 献

- [1] BEVK J, HARBISON J P, BELL J L. Anomalous increase in strength of in situ formed Cu-Nb multifilamentary composites[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(12): 6 031-6 038.
- [2] SAKAI Y, INOUE K, ASANO T, et al. Development of high strength, high conductivity Cu-Ag alloys for high-field pulsed magnet use[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(23): 2 965-2 967.
- [3] 宁远涛, 张晓辉, 吴跃军. 某些因素对 Cu-Ag 合金原位复合材料的结构和性能的影响[J]. 贵金属, 2008, 29(1): 19-25.
- [4] 王梦寒, 孟烈, 危康, 等. Cu-Ag 合金高温流变特性及其改进的本构模型[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(12): 3 733-3 738.
- [5] 张生龙, 尹志民. 高强高导铜合金设计思路及其应用[J]. 材料导报, 2003, 17(11): 26-29.

- [6] 马吉苗, 汪东亚, 郑芸, 等. Cu-Ag 合金的冷加工硬化及再结晶温度[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(9): 1 006-1 008.
- [7] 戚力, 张海峰, 胡壮麒. 分子动力学法对 Cu-Ag 合金熔化及凝固过程的模拟[J]. 金属学报, 2004, 40(7): 736-740.
- [8] 李贵茂. 磁场作用下 Cu-Ag 合金凝固组织与原位形变组织和性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [9] LIU P, KANG B X, CAO X G, et al. Interaction of precipitation and recrystallization in rapidly solidified Cu-Cr-Zr-Mg alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 1999, 12(3): 273-277.
- [10] 吴朋越, 谢水生, 黄国杰. 高速列车用铜合金接触线用材料及其加工工艺[J]. 稀有金属, 2006, 30(2): 203-203.
- [11] BENGHALEM A, MORRIS D G. Microstructure and strength of wire-drawn Cu-Ag filamentary composites [J]. Acta Mater., 1997, 45(1): 397-406.
- [12] HONG S I, HILL M A. Microstructural stability and mechanical response of Cu-Ag microcomposite wires[J]. Acta Mater., 1998, 46(12): 4 111-4 122.
- [13] SAKAI Y, SCHNEIDER-MUNTAU H J. Ultra-high strength high conductivity Cu-Ag alloy wires[J]. Acta Mater., 1997, 45 (3): 1 017-1 023.
- [14] GRUNBERGER W, HEILMAIER M, SCHULTZ L. Microstructure and mechanical properties of Cu-Ag microcomposites for conductor wires in pulsed high-field magnets[J]. Z. Metallkd, 2002, 93(1): 58-65.
- [15] GAGANOV A, FREUDENBERGER J, GRUNBERGER W, et al. Microstructural evolution and its effect on the mechanical properties of Cu-Ag microcomposites[J]. Z. Metallkd, 2004, 95 (6): 425-432.
- [16] 沈月, 付作鑫, 张国全, 等. 高强高导铜银合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2012, 26(13): 109-113.
- [17] 张静. 连铸电磁搅拌结晶器内钢液流动的数值模拟与实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [18] 黄军涛, 赫冀成. 方坯结晶器内钢液凝固及电磁制动的数值模拟[J]. 金属学报, 2001, 37(3): 281-286.
- [19] JONES W P, LAUNDER B E. The calculation of low-reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1973, 16(6): 1 119-1 130.
- [20] 平居正純. 溶融合金的粘度推定式[J]. 鐵と鋼, 1992, 78(3): 399-406.
- [21] 安航航. 高碳钢大方坯凝固机理与宏观偏析关键控制技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [22] 何庆文, 王宝, 王福明, 等. 大方坯轴承钢中心偏析的成因及预防措施[J]. 钢铁, 2009, 44(8): 39-41.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com