

①30-32

电流密度对定向凝固组织中柱状晶间距的影响*

常国威¹⁾ 袁军平²⁾ 王自东³⁾ 吴春京³⁾ 王新华¹⁾ 胡汉起³⁾

1) 北京科技大学冶金学院, 北京 100083
2) 广州有色金属研究院, 广州 510651
3) 北京科技大学材料学院, 北京 100083

TF141.6

摘要 以 M-S 理论为基础, 导出了在定向凝固过程中电流通过固液界面的情况下, 电流密度与柱状晶间距的理论关系式, 并对其进行了实验研究. 结果表明, 电流密度增加时, 其柱状晶间距近似呈直线下降的趋势. 理论计算与实验结果基本吻合.

关键词 定向凝固, 柱状晶间距, 电流作用

电流作用

电流作用

中图法分类号 TG244.3, TF141.6

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)01-0030-03

EFFECT OF ELECTRIC CURRENT DENSITY ON COLUMNAR CRYSTAL SPACING DURING CONTINUOUS UNIDIRECTIONAL SOLIDIFICATION

CHANG Guowei¹⁾, YUAN Junping²⁾, WANG Zidong³⁾, WU Chunjing³⁾, WANG Xinhua¹⁾, HU Hanqi³⁾

1) School of Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

2) Guangzhou Nonferrous Metal Institute, Guangzhou 510651

3) School of Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Correspondent: CHANG Guowei, associate professor, Tel: (010)62332522

Manuscript received 1999-08-12, in revised form 1999-10-12

ABSTRACT Theoretical relationship equation between electric current density at the solid-liquid interface and columnar crystal spacing during continuous unidirectional solidification has been derived on the basis of M-S theory. The results show that columnar crystal spacing decreases with increase of electric current density, and the conclusions of theoretical calculation are in agreement with our experimental results semiquantitatively.

KEY WORDS unidirectional solidification, columnar crystal spacing, electric current effect

崔柱等人^[1]在研究电渣重熔的凝固组织时, 定性给出了电流细化凝固组织的结果, 这一结果预示着在凝固过程中, 凝固组织与电流密度之间存在着一个确定的定量关系; 顾根大等人^[2]以及 Wheeler 等人^[3-5]较详细地研究了凝固过程中电流的作用; 本文作者也曾给出了电流细化凝固组织的结果, 并且为进一步认识电流在凝固过程中的作用, 对电流细化凝固组织的机理进行了初步探讨^[6]. 但是, 这些报道都未能给出凝固组织与电流密度之间的定量关系式. 本文以电流密度对定向凝固中固液界面形态稳定性的影响为基础, 建立了电流密度与其柱状晶间距的定量关系式, 并用实验结果进行了验证.

1 电流密度与定向凝固中柱状晶间距的理论关系式的建立

有电流通过固液界面时, 界面上扰动振幅随时间的变化率为^[6]

$$\frac{d\delta}{dt} = \left\{ v \left(\omega_c - \frac{v}{D_1} p \right) [2m\omega G_c (\omega_c - \frac{v}{D_1}) / (\omega_c - \frac{v}{D_1} p) - 2\omega^3 T_m \Gamma - (g_s + g_l)\omega + (S_s^0 - S_l^0) / \bar{\lambda}] \right\} \delta / [2m\omega G_c + (g_s - g_l)(\omega_c - \frac{v}{D_1} p)] \quad (1)$$

式中, δ 为扰动振幅; t 为时间; v 为凝固速度; $p = (k_0 - 1)$, k_0 为平衡分配系数; m 为合金液相线斜率; ω 为扰动波数; G_c 为固液界面上液相内溶质浓度梯度; $\omega_c = [v / (2D_1)] + \sqrt{[v / (2D_1)]^2 + \omega^2}$; D_1 为溶质的扩散系数; T_m 为纯金属的熔点; $\Gamma = \sigma / L$; σ 为固液界面比界面能, L 为结晶潜热; $g_s = \lambda_s G_s^0 / \bar{\lambda}$, $g_l = \lambda_l G_l^0 / \bar{\lambda}$, $\bar{\lambda} = (\lambda_s + \lambda_l) / 2$, G_l^0 和 G_s^0 分别为固液界面为平面时固液界面

* 原冶金工业部应用基础研究资助项目 BJ96-02-11

收到初稿日期: 1999-08-12, 收到修改稿日期: 1999-10-12

作者简介: 常国威, 男, 1960 年生, 副教授, 博士后

上液相与固相内的温度梯度, λ_s 和 λ_l 分别为固相与液相的导热系数; S_e^s, S_e^l 分别为固相与液相中金属单位体积、单位时间的发热量, $S_e^s = J^2/\kappa_e^s$ [7], $S_e^l = J^2/\kappa_e^l$ [7], 其中, J 为电流密度, κ_e^s 和 κ_e^l 分别为固相与液相的电导率.

凝固过程达到稳定状态时 $d\delta/dt=0$, 由式 (1) 得

$$2m\omega G_c(\omega_c - \frac{v}{D_1})/(\omega_c - \frac{v}{D_1}p) - 2\omega^3 T_m \Gamma - (g_s + g_l)\omega - (S_e^l - S_e^s)/\bar{\lambda} = 0 \quad (2)$$

按照 M-S [8] 的处理方法, 式 (2) 可简化为

$$\omega^3 - \frac{g_s + g_l}{2mG_c D_1^2/k_0 v^2 - 2T_m \Gamma} \omega - \frac{S_e^l - S_e^s}{\bar{\lambda}(2mG_c D_1^2/k_0 v^2 - 2T_m \Gamma)} = 0 \quad (3)$$

令

$$p' = (g_s + g_l)/(2mG_c D_1^2/k_0 v^2 - 2T_m \Gamma)$$

$$q' = (S_e^l - S_e^s)/[\bar{\lambda}(2mG_c D_1^2/k_0 v^2 - 2T_m \Gamma)]$$

解方程式 (3), 可得扰动波数为

$$\omega = 2(-p'/3)^{1/2} \cos \theta \quad (4)$$

式中, $\theta = (1/3)\arccos(-q'/(-p'/3)^{3/2})$.

Langer 等人 [9] 假设胞晶或枝晶尖端部位的曲率半径 R 等于扰动的波长 λ_c , 则由式 (4) 可得

$$\lambda_c = R = \frac{\pi}{\cos \theta} (-p'/3)^{-1/2} \quad (5)$$

Kurz 与 Fisher [10] 将枝晶尖端 + 枝晶主轴的断面假设为半椭圆形, 利用其几何关系得到了一次枝晶间距 d_1 与尖端部位的曲率半径 R 的关系, 并将式 (5) 代入后得

$$d_1 = (3\Delta T')^{1/2} G_l^{-1/2} (\pi/\cos \theta)^{1/2} (-p'/3)^{-1/4} \quad (6)$$

式中, $\Delta T'$ 为固相尖端温度与非平衡固相线间的温度差.

式 (6) 即为定向凝固过程中一次枝晶间距与电流密度的理论关系式, 电流密度的影响主要隐含在 Γ 与 G_c 之中.

固液界面能系数 Γ 与电流密度 J 之间的关系式为 [2]

$$\Gamma = (\sigma_0 + WJ^2)/L \quad (7)$$

式中, σ_0 为无电流时固液界面的比界面能; W 为与溶质浓度、固相及液相的电参数有关的系数.

在有对流的情况下, 固液界面上液相中溶质浓度梯度 G_c 为 [11]

$$G_c = -\frac{v}{D_1} (w^* - w_0) (1 - e^{-(v/D_1)\delta_c})^{-1} \quad (8)$$

式中, w_0 为合金的溶质质量分数; w^* 为固液界面上液相的溶质浓度; δ_c 为溶质浓度边界层厚度.

电流密度引起液态金属流动速度 v_f 为

$$v_f = a' J^2 \quad (9)$$

式中, $a' = [\rho_l \beta g (2a)^4]/(144\mu\lambda_l \kappa_e^l)$. 其中, ρ_l 为液态金属的密度; β 为膨胀系数; g 为重力加速度; a 为试样的直径; μ 为粘度系数.

电流通过固液界面时, 固液界面上液相的溶质浓度变化规律可由下式表示

$$w^* - w_0 = (w_0^* - w_0) e^{-J/B} \quad (10)$$

式中, w_0^* 是电流为 0, 合金原始成分为 w_0 时固液界面上液相的溶质浓度; B 为与合金种类有关的系数, 对于 Cu-Al 合金, B 约为 525.

利用文献 [12] 所给出的浓度边界层厚度与流动边界层厚度的关系, 连同式 (9), (10) 一起代入式 (8), 得

$$G_c = -(w_0^* - w_0) (v/D_1) (1 - e^{-5\sqrt{a'/a'} \gamma^{1/6} v / (JD_1^{2/3})})^{-1} e^{-J/B} \quad (11)$$

式中, γ 为运动粘度系数.

2 实验研究

2.1 实验方法与结果

用本文作者研制的电渣感应连续定向凝固实验装置 [13], 以 Cu-Al 合金为原材料, 做定向凝固实验, 试样直径为 10 mm. 该装置可确保电流通过固液界面, 并在一定范围内随意调整电流密度的大小.

实验中, 凝固速度 $v=0.024$ cm/s, 电流密度 J 分别为 0, 191, 382, 573, 764 A/cm². 观察不同电流密度下凝固组织的变化情况, 考察电流密度对柱状晶间距的影响. 用铸型中的热电偶监测凝固过程中固液界面两侧的温度梯度 [13].

凝固过程中不同电流密度时的凝固组织已经在文献 [13] 中给出. 不同电流密度时柱状晶间距的实验结果如图 1 所示. 图中结果表明, 在该实验条件下, 随着电流密度 J 的增加, 柱状晶间距 d_1 近似呈直线下降. 当电流密度分别为 0, 382 和 764 A/cm² 时, 固液界面前沿沿金属熔体内的平均温度梯度分别为 73, 82 和 107 K/cm.

2.2 不同电流密度时柱状晶间距的理论计算

为计算方便, 假设 $G_s = G_l, \lambda_s = \lambda_l$, 固液界面前沿的温度梯度取实验值, 将实验条件以及 Cu-Al 合金的物性参数代入式 (6), 其计算结果如图 1 所示. 结果表明, 计算结果与实验结果的变化趋势一致, 数据相近. 由此可以得出, 计算结果与实验结果基本吻合.

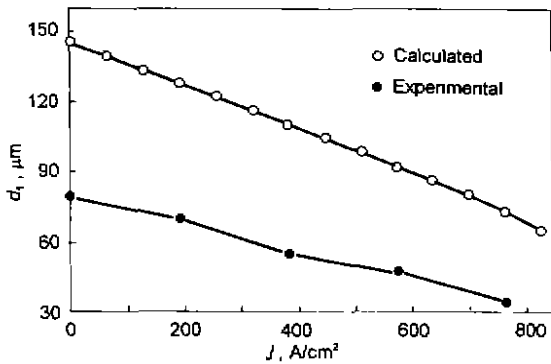


图1 电流密度 J 与柱状晶间距 d_1 的关系

Fig.1 The effect of electric current density J on the columnar crystals spacing d_1

3 讨论

3.1 电流密度与柱状晶间距的关系

式(6)比较全面地反映了电流密度与柱状晶间距的函数关系。然而,由于该公式比较复杂,从该式中很难看出电流密度变化时柱状晶间距的变化规律,只有通过计算才能表现出来,造成了式(6)使用时不太方便。为此,对计算结果进行了回归处理,得

$$d_1 = a - bJ - cJ^2 \quad (12)$$

式中, a , b 和 c 为系数,对于 Cu-Al 合金,它们分别为 144.8, 0.0853 和 1.25×10^{-5} 。式(12)清楚地表现了电流密度与柱状晶间距的关系。这样,以此为依据进行理论分析时就十分方便,其变化规律也一目了然。式(12)所反映的是电流密度与柱状晶间距的一般规律,条件不同时,只是其中 a , b , c 数值不同。

3.2 计算结果与实验结果存在差异的分析

首先,式(6)是基于 M-S 理论而建立起来的关系式。M-S 理论的适用条件为:稳定的凝固过程,很小的扰动振幅。如前所述的实验条件可知,其凝固过程是稳定的,其冷却速度约 3 K/s,属于亚快速凝固范围^[14],基本满足 M-S 理论的要求。但是,3 K/s 的冷却速度是亚快速凝固范围的下限,故上述的实验条件略微偏离 M-S 理论的适用条件也是可能的,由此也就可能造成计算结果与实验结果之间的差异。其次,在计算时,假设 $G_s = G_1$, $\lambda_s = \lambda_1$, 温度梯度取实验值,并且是取固液界面前沿的平均值,计算过程中物性参数的选择与估算等,这些因素都会使计算结果产生偏差。再次,式(6)的建立利用了以下两个假设:其一为 Langer 等人^[9]假设胞晶或枝晶尖端部位的曲率半径 R 等于扰动的波长 λ_i ;其二为 Kurz 等人^[10]假设枝晶尖端 + 枝晶主轴

的断面为半椭圆形。前者显然与实际情况存在一定差异^[15],后者在凝固过程中固液两相区很窄时,其几何关系也发生了变化,所以式(6)本身也存在一定的误差。上述诸因素的综合,产生了计算结果与实验结果之间的差异。

4 结论

(1) 在定向凝固中,电流通过固液界面时,其柱状晶间距与电流密度的理论关系式为

$$d_1 = (3\Delta T')^{1/2} G_1^{-1/2} (\pi/\cos \theta)^{1/2} (-p'/3)^{-1/4}$$

(2) 电流密度增加时,柱状晶间距近似呈直线下降,其计算结果与实验结果基本吻合。

参考文献

- [1] Chol J, Yoda R, Suh S H. *Tetsu Hagané*, 1986; 72: 1316 (崔 柱, 依田连平, 徐相熙. 铁与钢, 1986; 72: 1316)
- [2] Gu G D, Xu Y Y, An G Y, Li Q C *Chin J Mech Eng*, 1991; 27(5): 37 (顾根大, 徐雁允, 安阁英, 李庆春. 机械工程学报, 1991; 27(5): 37)
- [3] Wheeler A A, Coriell S R, McFadden G B, Hurler D T J. *J Cryst Growth*, 1988; 88: 1
- [4] Coriell S R, McFadden G B, Wheeler A A, Hurler D T J. *J Cryst Growth*, 1989; 94: 334
- [5] Wheeler A A, McFadden G B, Coriell S R, Hurler D T J. *J Cryst Growth*, 1990; 100: 78
- [6] Chang G W, Yuan J P, Wang Z D, Xue Q G, Hu H Q. *J Univ Sci Technol Beijing*, 1999; 21: 175 (常国威, 袁军平, 王自东, 薛庆国, 胡汉起. 北京科技大学学报 1999; 21: 175)
- [7] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Translated by Yuan Y, Rong S X, Shi Y F. *Transfer Phenomenon*. Beijing: Chemical Industry Press, 1990: 305 (Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N 著, 袁 一, 戎顺熙, 石炎福译. 传递现象 北京: 化学工业出版社, 1990: 305)
- [8] Mullins W W, Sekerka R F. *J Appl Phys*, 1964; 35: 444
- [9] Langer J S, Müller-Krumbhaar H. *J Cryst Growth*, 1977; 42: 11
- [10] Kurz W, Fisher D J. *Acta Metall*, 1981; 29(1): 11
- [11] Hu H Q. *Solidification Principle of Metals*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 75 (胡汉起. 金属凝固. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 75)
- [12] Welty J R, Wicks C E, Wilson R E. Translated by Li W Z. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. Beijing: National Defence Industry Press, 1984: 123 (Welty J R, Wicks C E, Wilson R E 著, 李为正译. 动量热量质量传递原理. 北京: 国防工业出版社, 1984: 123)
- [13] Chang G W, Yuan J P, Wang Z D, Wu C J, Hu H Q. *Trans Nonferrous Met Soc Chin*, 1999; 9: 493
- [14] Kurz W, Giovanola B, Trivedi R. *Acta Metall*, 1986; 34: 823
- [15] Wang Z D, Hu H Q. *Sci Chin*, 1997; 27E: 102 (王自东, 胡汉起. 中国科学, 1997: 27E: 102)