

晶体生长方向对亚快速凝固 结晶形貌的影响

蒋成保 胡汉起 王佩君

(北京科技大学铸造教研室,北京,100083)

李建国

(西北工业大学铸造教研室,西安,710072)

THE INFLUENCE OF THE CRYSTAL GROWTH ORIENTATION ON THE MICROSTRUCTURE IN HYPORAPID SOLIDIFICATION

Jiang Chengbao, Hu Hanqi, Wang Peijun

(Cast Faculty, Beijing University of Science and Technology, Beijing, 100083)

Li Jianguo

(Cast Faculty, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

摘要 采用区域熔化定向凝固装置,对冷却速度在 $13 \sim 130 \text{ K/s}$ 范围内 Ni - 5%Cu 合金的结晶形貌研究表明:在温度梯度 $G_L 300 \text{ K/cm}$ 条件下,晶体生长速度为 $500 \mu\text{m/s}$ 时,不同结晶取向的晶粒其结晶形貌不同。以 $\langle 100 \rangle$ 方向生长的晶粒为树枝晶组织;以 $\langle 120 \rangle$ 方向生长的晶粒为细胞晶组织。当为 $800 \mu\text{m/s}$ 时,不同结晶取向的细胞晶间距不同。以 $\langle 100 \rangle$ 方向生长的细胞晶间距是 $28 \mu\text{m}$;以 $\langle 21\bar{1} \rangle$ 方向生长的细胞晶间距是 $16.5 \mu\text{m}$ 。相同凝固条件下,同一晶粒内不同取向的分枝,结晶形貌不同。亚快速凝固条件下,树枝晶生长的生长方向已不完全按 $\langle 100 \rangle$ 方向择优取向,细胞晶生长的择优取向性被抑制。

关键词 晶体生长,方位,冷却,速度,晶粒,结晶,形状

中图分类号 V250.1, O783

Abstract The solidified microstructure of Ni - 5wt% Cu alloy is researched at the cooling velocity range of $13 \sim 130 \text{ K/s}$ with zone melting unidirectional solidification apparatus. It indicates that the crystals with different crystal growth orientations have different solidified microstructures in the condition of $G_L = 1300 \text{ K/cm}$, $v = 500 \mu\text{m/s}$: the crystal with solidified orientation $\langle 100 \rangle$ is dendrite; the crystal with solidified orientation $\langle 120 \rangle$ is superfine cell. The crystals have different superfine cellular spacing due to the crystal growth orientation with $G_L = 1300 \text{ K/cm}$, $v = 800 \mu\text{m/s}$: superfine cellular spacing of the crystal with solidified orientation $\langle 100 \rangle$ is $28 \mu\text{m}$, and that of the crystal with solidified orientation $\langle 21\bar{1} \rangle$ is $16.5 \mu\text{m}$. In a grain, two parts have different microstructures due to the different orientations under the same solidification parameters. In hyporapid solidification, dendritic solidified orientation isn't the preferential direction $\langle 100 \rangle$; the preferential orientation is disposed in the superfine cellular growth process.

1993年5月24日收到,1994年4月13日收到修改稿

国家教委博士点基金资助课题

Key words crystal growth , bearing ,cooling ,velocity , crystallites , crystallization , shapes

通过亚快速定向凝固工艺开发新型超细柱晶永磁材料,其矫顽力高,性能优越。如果得到晶体生长方向和易磁化轴方向一致的磁性功能材料,不仅工艺上将大大简化,磁性能也将发生质的飞跃。研究亚快速凝固条件下,晶体的结晶取向规律,以及晶体生长方向和结晶形貌的关系,进一步认识亚快速凝固过程中的凝固行为,为研制结晶取向和易磁化轴方向一致的优质磁性功能材料提供理论基础。

1 实验方法

经真空感应炉熔炼的 Ni - 5 %Cu 合金,在氩气保护下铸成直径 6.4mm 的试棒,在区域熔化定向凝固炉上,定向凝固成直径 7.0mm 的试样。定向凝固的晶体生长速度在 100 ~ 1 200 $\mu\text{m/s}$ 范围内连续可调,温度梯度保持在 1 300 K/cm 基本不变。取样部位距定向凝固初始端 5cm 处。用 JF1 型 x 射线晶体分析仪测出晶体生长方向。

2 实验结果

图 1 是晶体生长速度为 500 $\mu\text{m/s}$ 试样的金相照片。图中所示的两个晶粒中,左边晶粒以细胞晶方式生长,右边晶粒以树枝晶方式生长。实测得细胞晶生长的结晶取向是 $\langle 120 \rangle$ 方向,树枝晶生长的结晶取向是 $\langle 100 \rangle$ 方向。

图 2 是晶体生长速度为 800 $\mu\text{m/s}$ 试样的金相照片。图中所示两个晶粒由于取向不同,细胞晶间距不同,左边部分细胞晶以 $\langle 100 \rangle$ 方向生长,细胞晶间距是 28 μm ,右边部分晶粒以 $\langle 211 \rangle$ 方向生长,细胞晶间距是 16.5 μm 。

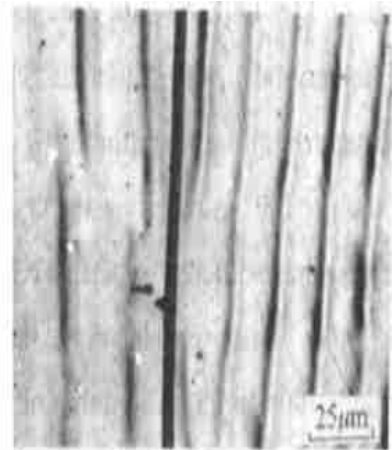


图 1 $v = 500\mu\text{m/s}$ 试样中两个晶粒枝胞共存 图 2 $v = 800\mu\text{m/s}$, 试样中两个晶粒胞间距不同

图 3 是 $v = 500\mu\text{m/s}$ 试样的金相照片。一个晶粒中,以 $\langle 210 \rangle$ 方向生长的分枝,其树枝晶二次臂高度萎缩,以 $\langle 100 \rangle$ 方向生长的分枝,其树枝晶二次臂较发达。由此可见:在亚快速凝固条件下,枝胞转变点附近的树枝晶生长,不完全按照晶体学优先生长方向长大,说

明冷却速度增加,影响树枝晶生长的择优取向性。

图 4 是晶体生长速度 $v = 700\mu\text{m/s}$ 试样的金相照片。试样中一个晶粒内,细胞晶改变生长方向后,形态转变为树枝晶组织,此时晶体生长速度是枝胞转变的上限临界速度^[1],树枝晶的二次臂不发达。

从图 3 中可知,细胞晶分别以 $\langle 120 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 21\bar{1} \rangle$ 方向生长,说明细胞生长时,晶体学择优取向的趋势被抑制,表现出细胞晶生长各向同性的特征。

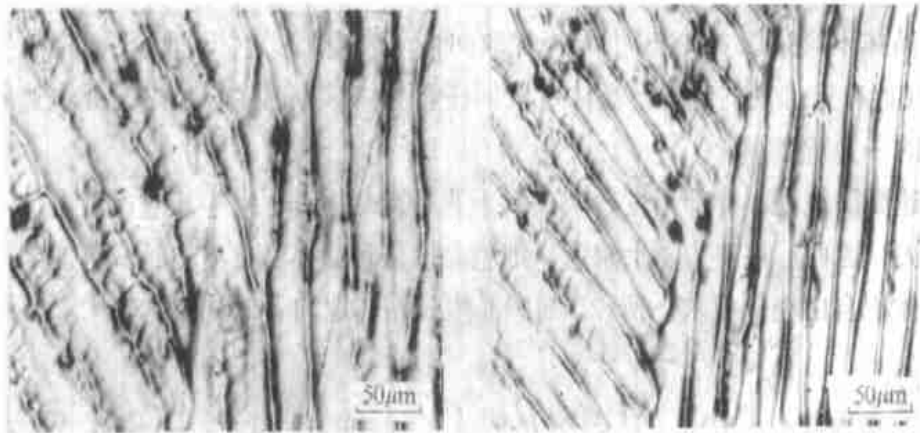


图 3 $v = 500\mu\text{m/s}$ 试样中树枝晶生长 图 4 $v = 700\mu\text{m/s}$ 试样中枝胞共存

3 结果分析及讨论

3.1 晶体生长方向和细胞晶间距的关系

当晶体生长方向为 $\langle 100 \rangle$ 方向时,以 $\langle 111 \rangle$ 面所包覆^[2],其比界面能最低。当晶体以 $\langle 21\bar{1} \rangle$ 方向生长时,其比界面能较 $\langle 100 \rangle$ 方向为高。图 2 示出不同晶向细胞晶间距的差别。现有的实验条件不能确定固液界面的溶质扩散场和具体的界面形貌,目前难以从理论上定量推算。正是由于亚快速凝固界面能效应的突出作用,使得不同取向晶粒的胞间距不同。

3.2 晶体生长方向和结晶形貌的关系

晶体以 $\langle 100 \rangle$ 方向生长时,其固液界面的比界面能最低,以 $\langle 120 \rangle$ 方向生长时,其比界面能也较 $\langle 100 \rangle$ 方向为高。二次臂的形成与发展遵循界面稳定性动力学理论。界面稳定性动力学理论的判别式为^[3]

$$S(\theta) = -T_m \left[\frac{2}{3} - \frac{1}{2}(g_s + g_l) + mG_c \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{r}{D} \right) \right] \right] \left/ \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{r}{D} \right) (1 - K_0) \right] \right. \quad (1)$$

式中

$$\frac{1}{H}, g_s = \left[\frac{-s}{H} \right] G_s, g_l = \left[\frac{-L}{H} \right] G_L, \frac{1}{2} = \frac{1}{2}(s + L)$$

其中, s 为固体的导热系数; L 为液体的导热系数; T_m 为纯金属在固液界面为平面时的熔点; ω 为平面挠度频率; ω^* 为液相中沿固-液界面熔质的波动频率; m 为相图中液相线斜率; D 为溶质扩散系数; K_0 为溶质平衡分配系数,以 $\langle 120 \rangle$ 方向生产的比界面能 σ_1 大于以

$\langle 100 \rangle$ 方向生长的比界面能 σ_2 , 所以 $S(\langle 100 \rangle) < S(\langle 120 \rangle)$ 。结果是晶体以 $\langle 120 \rangle$ 方向生长时, 界面稳定, 二次臂被抑制, 以细胞晶方式生长; 晶体以 $\langle 100 \rangle$ 方向生长, 界面失稳, 出现了二次臂, 按树枝晶方式生长。如图 1 所示。

亚快速凝固条件下, 晶体生长速度较快, 干扰波频率高, 式(1)中表面能作用项会因结晶取向不同, 差别较大, 突出地表现了亚快速凝固条件下, 界面能是影响结晶形貌决定性的因素之一; 晶体生长方向对结晶形态选择影响显著。

3.3 细胞晶生长结晶取向各向同性

实验中测得细胞晶以 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 120 \rangle$ 和 $\langle 21\bar{1} \rangle$ 方向生长。可以判定, 亚快速凝固条件下, 晶体不只是以 $\langle 100 \rangle$ 方向择优取向性, 表现出低生长速度下树枝晶生长的择优取向性, 在此有被抑制的趋势, 晶体可以朝任意晶体学方向生长, 这是亚快速凝固条件下晶体生长的一大特点。

亚快速凝固过程, 冷却速度较快, 属于非平衡凝固过程, 生长过冷度大, 液固体积自由能差较大。因而, 从热力学上来看, 细胞晶以任意晶体学方向生长, 都能满足晶体长大所需要的体积自由能的要求。所以, 细胞晶生长结晶取向各向同性, 热力学上是完全可能的。

4 结 论

(1) 亚快速凝固条件下, 晶体生长方向对凝固形态选择影响显著。 $G_L = 1300 \text{ K/cm}$ 、 $v = 500 \mu\text{m/s}$ 时, 以 $\langle 100 \rangle$ 方向生长的晶粒, 为树枝晶形貌; 以 $\langle 120 \rangle$ 方向生长的晶粒, 为细胞晶形貌。 $v = 800 \mu\text{m/s}$ 时, 以 $\langle 100 \rangle$ 方向生长的细胞晶间距是 $28 \mu\text{m}$; 以 $\langle 21\bar{1} \rangle$ 方向生长的细胞晶间距是 $16.5 \mu\text{m}$ 。

(2) 亚快速凝固条件下, 树枝晶不完全按 $\langle 100 \rangle$ 方向择优取向。当凝固参数相同时, 以低指数方向生长(如 $\langle 100 \rangle$ 方向)二次臂发达; 以高指数方向生长(如 $\langle 210 \rangle$ 方向)二次臂萎缩。

(3) 细胞晶生长时, 生长方向具有各向同性的特点, 晶体学优先生长的趋势完全被抑制。

参 考 文 献

- 1 蒋成保. 亚快速凝固结晶形貌的研究. 北京科技大学硕士学位论文, 1993
- 2 胡汉起主编. 金属凝固原理. 北京: 机械工业出版社, 1991: 84 - 86
- 3 Mullins W W, Sekerka R F. Stability of a planar interface during solidification of a dilute binary Alloy. J Appl Phys, 1964; 35: 444 - 451