

电磁自约束定向生长条件下 影响温度场的若干因素^①

沈 军 李金山 李建国 傅恒志

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

曾凡昌 崔正山

(航空工业总公司科技局, 北京 100712)

摘 要 探讨了电磁自约束定向生长条件下, 温度分布对抽拉速度的响应, 以及电磁搅拌引起的对流对温度分布以及固/液界面上温度梯度 G_L 的作用。检测了液柱头高度, 固/液界面位置对温度场以及温度梯度 G_L 的影响。结果提供了几种增高温度梯度 G_L 的有效途径。

关键词 电磁约束 液柱头 温度场 温度梯度

电磁铸造是八十年代在西方发展起来的一项无模铸造技术。运用此技术, 已生产出内部组织致密、细化, 表面光洁度很高的铝合金等产品的连续铸锭^[1, 2], 显示出这种技术的许多优越之处。

此外, 有些研究报道^[3]: 在很高的温度梯度和生长速率下进行定向生长, 可以获得性能非常优越的超细柱状晶组织。当电磁无模铸造选用高的频率进行成型时, 还会对铸锭产生一个非常剧烈的加热作用, 再加上由于没有隔热的模壳存在, 冷却剂直接冲击金属表面而产生非常剧烈的对流换热作用, 冷却效果非常明显。在这种情况下, 要获得很高的温度梯度 G_L 是可以的。

所以, 我们设法结合电磁力的约束作用与高频强冷下产生高梯度的功能, 发展了一种新的电磁自约束定向生长工艺, 主要目的是用来实现无模定向超细晶组织的生长。在这种条件下, 温度的分布以及固/液界面上的温度梯度是影响该过程中定向生长是否可能, 以及电磁约束是否失效的一个非常重要的因素。

本文对影响这方面的若干因素进行了研究, 目的在于为研制一种新型定向凝固技术奠

定基础。

1 实验方法

将 d 0.3 mm 的 NiCr-NiSi 热电偶插入熔化后达到热平衡状态的铝液柱头中的固/液界面, 以此作为起点, 沿着轴向向上每隔 2.5 mm 为一个测量点进行测量, 从而给出了液相内温度分布曲线。在测量未熔化的固相中温度分布时, 将热电偶沿着轴线提前熔铸到要进行测量的 d 18 mm 的铝棒中去, 然后将铝棒沿轴向通过感应圈进行抽拉, 根据热电偶头部的位置与对应的温度求出其温度分布曲线。测量固/液界面位置的方法是在感应圈内圈上钻孔, 从中伸入热电偶, 以实测温度等于熔点温度的位置为固/液界面所在的位置。再配合测量瓷管的插入深度来确定固/液界面位置以及液柱头高度。

2 实验结果及讨论

2.1 温度场对抽拉速度的响应

① 国防科技预研基金(No. 94J12. O. O. HK0354)和航空部专项基金资助项目

收稿日期: 1995-08-09; 修回日期: 1995-12-15 沈 军, 男, 33岁, 副教授, 博士研究生

实验测出不同抽拉速度下,温度场的分布如图1所示。从中可以看到以 $V_1 = 6.3 \text{ mm/min}$ 、 $V_2 = 9.7 \text{ mm/min}$ 、 $V_3 = 26.9 \text{ mm/min}$ 3种相差很大的速度抽拉时,其温度场沿感应圈轴向的分布几乎没有受到影响,说明速度对温度场几乎不造成时间上的滞后,也就是说,热端能被迅速地冷却将所含热量快速排出,冷端能被非常迅速地加热到热平衡状态下的最高温度。即我们的加热冷却系统能满足高熔化速度、高冷却速度的要求,为生长超细柱晶组织打下了基础。还应说明,即使快速连铸,也不会由于温度场的滞后而造成塌漏。出现这种现象的主要原因是:采用了频率高达 400 kHz 的高频电源,以及加热能量密集、匝数集中的快速加热感应圈。同时由于没有模壳隔热且有可以充分调节流速的冷却剂直接冲击金属表面,产生了高强度的对流换热,故在冷却部分散热能力极强,即使抽拉速度很快也可在非常短的时间内进行充分的加热与冷却,使其温度场很接近于静态的热平衡状态。这种换热的“高灵敏度”导致了温度场对时间极快的响应,反应在抽拉速度上,就象温度场不受抽拉速度的影响。

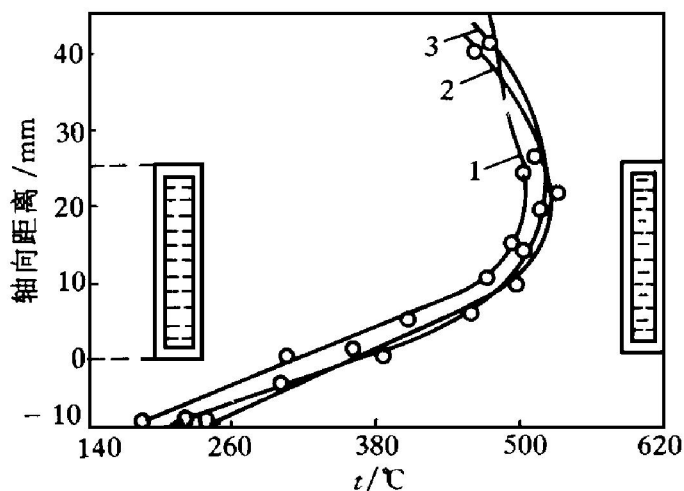


图1 不同抽拉速度下温度沿感应圈轴向的分布

1— 6.3 mm/min ; 2— 9.7 mm/min ; 3— 26.9 mm/min

2.2 有电磁搅拌时温度场的分布特征

电磁搅拌是电磁自约束定向生长中不可避免的,这种电磁搅拌会引起液相内的流动。图2中的两条曲线是感应圈中固相内温度分布曲

线;以及有液相存在时,在液柱头中测量的温度分布曲线,这两条曲线是反映固相、液相中温度分布特征的代表性曲线。从图中我们可以明显看到,固相的温度分布变化相对平缓,在 $10 \sim 20 \text{ mm}$ 的范围内才能达到最大值;在逐渐达到最大值后又开始下降,有一个峰值但不存在平台。而在液相中,固/液界面前沿迅速达到温度的最高值,这个距离只是 5 mm 左右,变化曲线非常陡峭,然后在大多数液柱内近似于一个平台。这个条件对于获得高的界面温度梯度 G_L 以及定向生长柱晶非常有利,从温度分布的角度来看,正是我们所期盼的。产生这种现象的原因是强烈的沿表面下流、中心上流的环状流动(这种流动现象已在实验中观测确定)造成了液柱头内部的温度均匀化。根据传热学原理可知,在固/液界面上的流体不是紊流,而存在一层很薄的层流底层,在这个层中传热只能靠传导来实现。由于该层很薄故温度梯度非常的高。而固相中只能靠传导进行热量的传送,故沿轴向各点都必须存在足够的温度梯度才能完成热量的传输,这就是流体中对流增大温度梯度的原因。

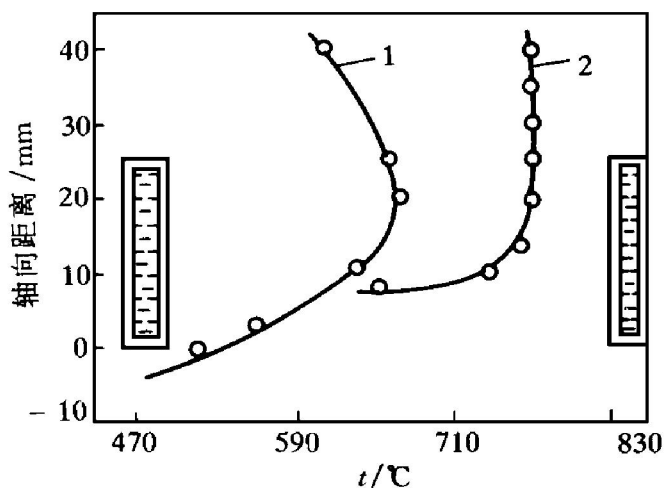


图2 固相及液柱头中沿感应圈轴向的温度分布

1—固相; 2—液相

2.3 液柱头高度对温度场的影响

图3表明了感应圈中的液柱头固/液界面位置相同时,改变其液柱头高度后,其温度场以及固/液界面上温度梯度 G_L 的变化情况。从中我们可以看到,随着液柱头高度的升高,

在液柱的任何一个高度上液柱头高的液柱中有更高的温度, 并且在固/液界面上有更高的温度梯度, 图中数据表明液柱头高度增大对获得高的温度梯度 G_L 效果明显。

在实验中发现, 液柱头高度不同时, 由于改变了电磁约束力与液体静压力的平衡关系, 从而导致液柱头形状发生变化。随着液柱头高度的增加, 其横截面尺寸逐渐增大, 尤其是上部尺寸增大更快。液柱头由原来的台锥形逐渐变成圆柱形, 最后变成葫芦形。在这个变化过程中, 液柱头充分占据了磁力线空间, 吸收了更多的磁力线, 即漏磁更少, 故受到感应圈加热更加充分, 从而液柱温度升高, 引起 G_L 增大。但是当变成葫芦形时, 液柱头产生摆动, 不稳定, 容易塌漏。所以在选择液柱头高度时, 除了考虑温度梯度, 还要考虑其成型是否稳定。

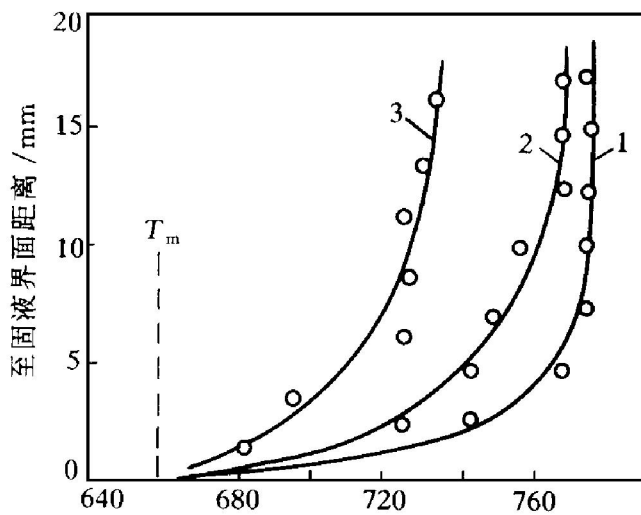


图3 不同液柱头高度 H 下
温度场沿轴向的分布 ($T_m = 653\text{ }^{\circ}\text{C}$)

- 1— $H = 37.5\text{ mm}$, $G_L = 365\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$;
2— $H = 32.6\text{ mm}$, $G_L = 284\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$;
3— $H = 28.7\text{ mm}$, $G_L = 232\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$

2.4 固/液界面位置对 G_L 的影响

从图4中我们可以看到, 在冷却条件和液柱头高度相同的情况下, 通过调整功率使其固/液界面位置在感应圈中发生变化。则其温度梯度发生显著的变化, 固/液界面位置越低, 则温度梯度 G_L 越大。曲线3中, 固/液界面位置在感应圈下端面向上 18.75 mm 时, 温度梯

度 G_L 为 $77\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$ 。这个距离逐渐减小(即固/液界面下移)到 12.5 mm 和 7.5 mm 时, G_L 分别为 $140\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$ 和 $284\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$, 明显的增大, 这说明在电磁约束定向生长条件下要增大 G_L , 则可设法让其固/液界面向感应圈下端移动, 但这只是从提高 G_L 的角度出发。在实验中发现, 当固/液界面脱出感应圈下端时, 由于约束磁场突然发散, 造成约束失效而塌漏。若将进入感应圈下端面的距离控制在 $5\sim 10\text{ mm}$ 之间, 则既可获得较高的温度梯度, 又可保障即使有一定的波动时液柱头仍然不会塌漏。

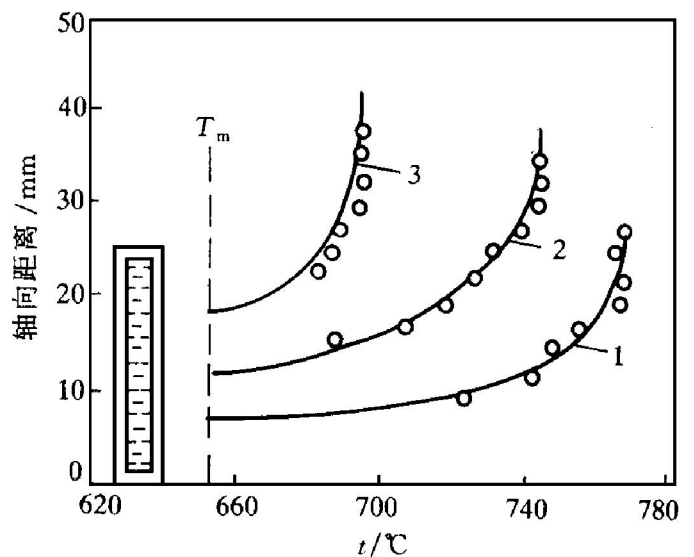


图4 固/液界面位置不同时温度沿轴向的分布
1— $G_L = 284\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$; 2— $G_L = 140\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$; 3— $G_L = 77\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$

很明显, 固/液界面下移使 G_L 增大的原因是: 功率的提供量增大, 使液柱吸收热量更多, 温度升高。为了将液相中增多的热量导出, 则只有固/液界面下移, 这样就缩短了其与冷却液面的距离, 使固相温度梯度 G_S 增大。 G_S 的增大引起了 G_L 的增大, 这样就将增多的热量导出了。

3 结论

(1) 本实验中温度场对时间的响应极快, 从而保证了温度场在感应圈中的稳定分布, 并基本不受抽拉速度的影响。

(2) 电磁搅拌引起的对流, 可使温度场的

分布明显集中在固/液界面上,从而增大温度梯度 G_L 。

(3) 增大液柱头高度 H 可使固液界面温度梯度 G_L 明显增大。当液柱头高度从 $H = 28.78 \text{ mm}$ 增到 $H = 37.5 \text{ mm}$ 时,温度梯度从 $G_L = 232 \text{ }^\circ\text{C/cm}$ 增到 $G_L = 356 \text{ }^\circ\text{C/cm}$ 。

(4) 在保证固/液界面不脱出感应圈约束范围内,其位置越低,温度梯度 G_L 越大。其

位置在进入感应圈下端 18.75 mm 时, G_L 为 $77 \text{ }^\circ\text{C/cm}$,该距离下降到 7.5 mm 时 G_L 可达到 $284 \text{ }^\circ\text{C/cm}$ 。

参考文献

- 1 Pritchett T R. Light Metal Age, 1981, 40(10): 12–16.
- 2 Sautebin R. Light Metal Age, 1985, 43(8): 14–16.
- 3 刘忠元. 材料科学进展, 1992, 6(6): 481–486.

SOME FACTORS AFFECTING TEMPERATURE FIELD IN SELF-CONSTRAINED DIRECTIONAL GROWTH BY ELECTROMAGNETIC FORCE

Shen Jun, Li Jinshan, Li Jianguo, Fu Hengzhi

*State Key Laboratory of Solidification Processing,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*

Zeng Fanchang, Cui Zhenshan

Science and Technology Department of Aviation Industries of China, Beijing 100712

ABSTRACT Under the condition of electromagnetic self constrained directional solidification, the response of temperature distribution to drawing rate and the effects of convection caused by electromagnetic stirring on temperature distribution and temperature gradient G_L on the solid/liquid interface were explored. Influences of meniscus height and solid/liquid interface position on temperature distribution and G_L were detected. Finally several effective ways to increase G_L were obtained from the experimental results.

Key words electromagnetic constrain meniscus temperature field temperature gradient

(编辑 黄劲松)