

超高速定向凝固钴基合金的结晶组织¹

储双杰 李建国 刘忠元 史正兴 傅恒志

(西北工业大学)

摘 要

介绍了最新研制的超高梯度定向凝固装置的原理, 并利用此装置研究了钴基高温合金K10在超高速定向凝固条件下凝固组织的变化规律, 探讨了一、二次枝晶间距与冷却速率的关系。结果表明, 超高速定向凝固组织的一、二次枝晶间距仅为HRS法定向凝固时的1/5和1/8, 而且随着冷却速率的增大, 一、二次枝晶间距减小, 并分别遵循 $\lambda_1 = 1.428 \times 10^3 (G \cdot v)^{-1}$; $\lambda_2 = 0.312 \times 10^3 (G \cdot v)^{-1}$ 。

关键词: 超高速定向凝固 Co基高温合金 枝晶间距

高温合金被广泛应用于航天、航空工业, 是制造现代航空发动机、航天器、液体燃料火箭发动机和各种燃气轮机的重要材料。但用普通制造工艺生产的各种涡轮叶片的持久强度、抗蠕变能力和机械疲劳性能均比较差, 而美国于六十年代初开发的高温合金定向凝固技术, 能在一定程度上提高高温合金的蠕变及高温疲劳性能。

定向凝固技术自六十年代出现以来, 经历了PD法、HRS法和LMC法三个主要发展阶段。表1描述了以上三种方法的主要冶金参数。可见, 定向凝固技术的发展在于追求高的温度梯度, 从而增大冷却速率, 改善定向凝固组织。然而传统的三代定向凝固方法所获得的枝晶组织粗大, 侧向分枝发达, 微观偏析严重, 限制了高温合金性能的进一步改善。研究表明^[1-3], 细化枝晶组织有利于改善合金的高温持久性能和塑性, 而增大定向凝固的冷却速率则可使枝晶细化, 减小偏析。然而, 由于受到实验条件的限制, 目前人们对定向凝固技术

的研究普遍局限于温度梯度较低, 冷却速率较小的条件^[4]。本文在利用最新研制的超高梯度定向凝固装置基础上, 将冷却速率从传统的1 K/s以下提高到30 K/s以上, 研究钴基高温合金K10在超高速定向凝固条件下枝晶组织的变化规律, 为改善定向凝固高温合金的力学性能寻求新的途径。

表1 三种定向凝固方法的冶金工艺参数值

凝固参数	PD法	HRS法	LMC法
温度梯度 / $K \cdot cm^{-1}$	7~11	26~30	73~103
凝固速率 $v / cm \cdot h^{-1}$	18~12	23~27	53~61
冷却速率 $\delta / k \cdot h^{-1}$	90	700	4700

1 超高梯度定向凝固装置

图1是ZMLMC定向凝固装置的原理图。该装置将高频感应区域熔化与液态金属冷却相结合, 可使凝固速率(v)在0.006~10 mm/s范围内连续调节。液固界面前沿的温度梯度, 冷却速率 δ 分别达到1300 K/cm及30 K/s以上。

¹本课题属国家自然科学基金资助项目, 本文于1992年4月1日收到

2 实验

所用 K10 钴基高温合金的成分(wt.-%)为

C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	Fe	Co
0.15	0.69	0.23	27.6	4.1	0.26	4.7	2.3	余量

从 K10 合金的差热分析曲线可知其结晶温度间隔很宽(70 K)^[5]。在一般铸态下,枝晶发达,只有在较高的温度梯度下才能获得挺直的柱状晶组织。

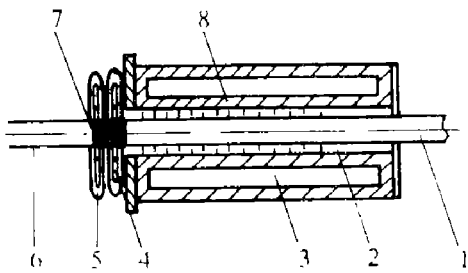


图1 ZMLMC 定向凝固装置原理图

1—试样; 2—感应圈; 3—屏蔽板; 4—冷却水;
5—冷却合金; 6—拉杆; 7—坩埚; 8—熔区

母合金经真空熔炼浇铸成 $d 8 \times 100 \text{ mm}$ 的试棒,在 ZMLMC 定向凝固装置上进行不同速率定向凝固。在光学显微镜上观察显微组织,并在 IBS-1 型图象分析仪上测量一、二次枝晶间距,为保证测量精度,每种枝晶间距都是测取了 100 根以上得到的平均值。

液固界面前沿的温度梯度由双铂铑热电偶配合 3056 型垂直台式划线记录仪测得。

3 结果与讨论

3.1 微观组织特征

图 2 表示不同凝固速率下获得的 K10 合金定向凝固组织,其主要特征有

- (1) 一次枝干挺直平行;
- (2) 侧向分枝退化,无高次分枝,且随冷却速率增大,侧向分枝长度趋于缩短;
- (3) 当凝固速率大于 $700 \mu\text{m/s}$ 时,二次

分枝无明显的粗化;

(4) 枝晶组织超细化(具体数据见表 2)。经与该合金在 HRS 定向凝固时组织尺度的典型数据^[5]($\lambda_1 \geq 120 \mu\text{m}$, $\lambda_2 \geq 40 \mu\text{m}$)比较,其一、二次枝晶分别细化 5 倍和 8 倍以上。

钴基高温 K10 定向凝固组织的这种变化与 Miroxhnicenko I S 的凝固组织形态十分相似^[6],可归于高的温度梯度和快的定向凝固速率。从 ZMLMC 定向凝固装置的原理图可看出,感应强制加热的结果,使凝固界面在整个过程中都恒定于冷却合金液的上表面稍高处,保证了液固界面处热流方向与抽拉方向相一致;加之高的温度梯度,有利于获得挺直的柱晶组织。在本实验中,其定向凝固冷却速率比传统的大 100 倍以上,使枝晶组织高度细化,同时由于侧向分枝的发展和粗化均需要时间和空间,快的定向凝固速率使区域凝固时间缩短,糊状区长度变小^[7],从而限制了侧向分枝的发展,使粗化过程无足够的时间进行。

3.2 一、二次枝晶间距的变化规律

超高速定向凝固范围枝晶间距的测量结果如表 2 所示,随定向凝固过程冷却速率的增大,一、二次枝晶间距减小(图 3),并分别遵循下列关系:

$$\lambda_1 = 1.428 \times 10^3 (G \cdot v)^{-1} \quad (1)$$

$$\lambda_2 = 0.312 \times 10^3 (G \cdot v)^{-1} \quad (2)$$

式中 λ_1 、 λ_2 分别表示一、二次枝晶间距;

$G \cdot v$ 分别代表温度梯度和凝固速率

表 2 不同凝固速率条件下, G 、 λ_1 、 λ_2 及 R/G 测量值

$v / \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	365	558	629	870	930	1087
$G / \text{K} \cdot \text{cm}^{-1}$	1111.4	806.5	763.1	699.1	495.2	349.6
$\lambda_1 / \mu\text{m}$	34.5	32.4	30.0	23.7	32.0	37.2
$\lambda_2 / \mu\text{m}$	7.7	7.0	6.4	5.0	6.8	8.1
$R/G / \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	40.57	45.00	47.97	60.82	46.05	38.00

一、二次枝晶间距对凝固速率的这种依存关系是由合金本身特性和凝固参数综合决定的。在本实验条件下,由于温度梯度高,一、二次枝晶间距的初始值小,随凝固速率的增大,枝晶粗化过程充分进行。一、二次枝晶间距的大小取决于其初始扰动波长。因此,随定向凝固冷却速率从 30 K/s 增加到 60 K/s ,

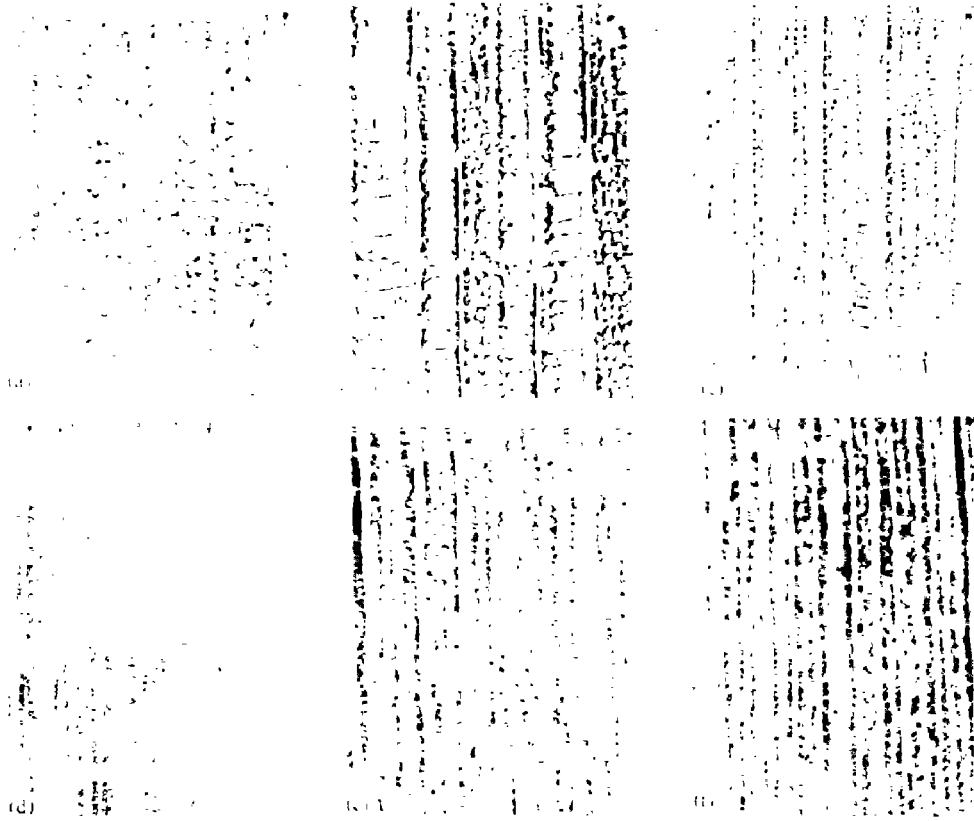


图2 不同凝固速率 v 条件下 K10 合金的定向凝固组织 ($\times 160$)

(a)— $v=365 \mu\text{m/s}$; (b)— $v=455 \mu\text{m/s}$; (c)— $v=629 \mu\text{m/s}$;
 (d)— $v=800 \mu\text{m/s}$; (e)— $v=917 \mu\text{m/s}$; (f)— $v=1\,030 \mu\text{m/s}$

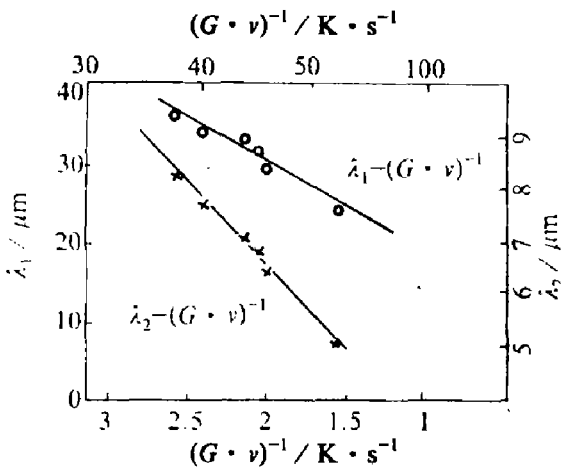


图3 一、二次枝晶间距 λ_1 、 λ_2 与冷却速率 v 的关系

一、二次枝晶间距分别由 $37 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$ 减小到 $24 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 。

4 结论

(1) 钴基高温合金 K10 经超高速定向凝固

后, 其一、二次枝晶间距分别减小为 HRS 法的 $1/5$ 和 $1/8$ 。枝晶组织高度细化, 侧向分枝退化, 且不存在明显的粗化过程;

(2) 随定向凝固冷却速率增大, 一、二次枝晶间距减小并分别遵循如下关系:

$$\lambda_1 = 1.428 \times 10^3 (G \cdot v)^{-1}$$

$$\lambda_2 = 0.312 \times 10^3 (G \cdot v)^{-1}$$

参考文献

- 1 李建平. 硕士学位论文, 西北工业大学, 1985, 3.
- 2 冯 风. 硕士学位论文, 西北工业大学, 1989, 3.
- 3 林栋梁等. 金属学报, 1979, 15(2): 177.
- 4 黄颂惠. 材料导报, 1984, (8): 11.
- 5 刘家钧等. 第六届铸造高温合金论文集, 1986, 16.
- 6 Miroshnichenko I S. Journal of Crystal Growth, 1979, 11: 344.
- 7 李建国等. 金属学报. 1990, 26(4): 309.