

DD8 高温合金平界面区及胞晶界面区的晶粒竞争生长^①

刘志义

(石油大学(华东)机械系, 东营 257062)

傅恒志

(西北工业大学国家凝固技术重点实验室, 西安 710072)

摘要 研究了 DD8 高温合金在平界面及胞晶区的晶粒竞争生长。结果表明: 在同一试样上进行的从平界面区到胞晶区以及枝晶区的双晶粒耦合竞争生长过程中 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ (前一方向与热流方向平行, 后一方向垂直两半园柱籽晶界面) 晶粒逐渐淘汰 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒, 在相反的抽拉过程中, $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒逐渐淘汰 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒。在平界面区及胞晶界面区的晶粒竞争生长中, 两籽晶界面处液相原子与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的固相原子形成的结合键多, 而与 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的固相原子形成的结合键少, 造成了 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒淘汰了 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒, 由于相同的原因 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒淘汰了 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒。

关键词 高温合金 定向凝固 晶粒竞争生长

单晶燃气涡轮叶片具有较高的抗高温蠕变强度和高温疲劳强度^[1], 单晶叶片的研制促进了燃气涡轮的发展。而研制单晶叶片需要弄清不同晶体取向晶粒的竞争生长规律, 目前有关晶粒竞争生长的报道很少, 尤其是对平界面区、胞晶区的晶粒竞争生长的报道几乎没有。人们较多地关注晶体取向对凝固组织形态的影响^[2-6]。因此, 研究平界面区、胞晶区的晶粒竞争生长无论对单晶制备还是为丰富定向凝固理论都具有重要的意义。为此, 作者设计了两个实验: (1) $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒从平界面区到胞晶界面区以至枝晶界面区的耦合竞争生长; (2) $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒从枝晶区到胞晶界面区以至平界面区的耦合竞争生长。以便研究平界面区、胞晶区的晶粒竞争生长规律。

1 实验材料及步骤

实验用材料为耐蚀镍基高温合金 DD8, 化

学成分为: 16% Cr, 8.5% Co, 6.0% W, 3.9% Al, 3.8% Ti, 1.0% Ta, < 0.01% C, 余量 Ni。将 DD8 镍基高温合金加工成 $d 6.5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 棒以做试验母合金。将采用选晶法制备的大块 DD8 单晶经 X 射线衍射仪测定晶体取向后, 用线切割法将其切割成 3 组不同晶体取向、尺寸为 $d 6.9 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的半园柱体以做籽晶。3 组半园柱体籽晶的晶体取向如表 1 所示。分别将第 1 组与第 3 组; 第 2 组与第 3 组合成一个籽晶(如图 1 所示), 与母合金棒一起装入 $d 7 \text{ mm}$ 的刚玉管中, 在自制的高温梯度 LMC 真空定向凝固装置上加热至 $1548 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 15 min, 在 $G = 25 \text{ kK/m}$ 的条件下, 图 1(a) 试样的抽拉过程是由 $0.90 \sim 2.22 \text{ } \mu\text{m/s}$ 依次增速进行定向凝固, 每个速度区间的抽拉距离分别为 7 mm , 而图 1(b) 试样的抽拉过程是由 $2.22 \sim 0.90 \text{ } \mu\text{m/s}$ 依次减速进行定向凝固, 每个速度区间的抽拉距离分别为 7 mm 。抽拉速度由单板机控制。以垂直两籽晶界面为基准, 切取抽拉试样纵截面, 在光学显微

① 收稿日期: 1995-11-06; 修回日期: 1996-01-03 刘志义, 男, 32 岁, 副教授, 博士

镜上观察晶粒竞争生长结果。

表 1 3 组半园柱体籽晶的晶体取向

组号	轴向	矩面法向
1	$\langle 100 \rangle$	$\langle 110 \rangle$
2	$\langle 100 \rangle$	$\langle 100 \rangle$
3	$\langle 110 \rangle$	$\langle 110 \rangle$

2 实验结果

金相显微观察表明, 在 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的耦合竞争生长中, $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒逐渐被淘汰, 如图 2(a) 及图 3 所示; 而在 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的耦合竞争生长中, 后者成为被淘汰者, 如图 2(b) 和图 4 所示。

3 分析与讨论

从实验 1 和实验 2 中可以看出 DD8 镍基高温合金在平界面区及胞晶界面区存在晶粒

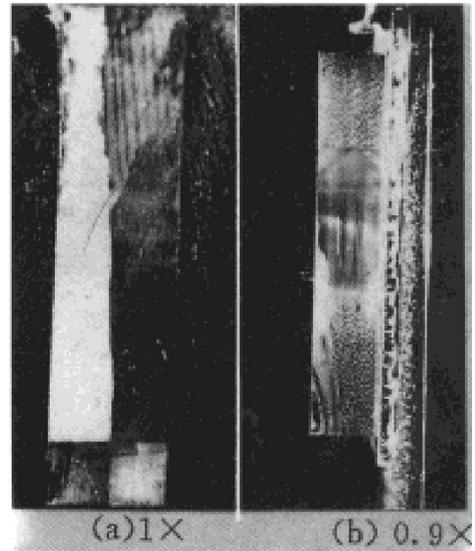


图 2 宏观试样 ($G = 25 \text{ kK/m}$)

- (a) $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒(左)与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒(右) ($v = 0.90 \sim 2.22 \mu\text{m/s}$);
- (b) $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒(右)与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒(左) ($v = 2.22 \sim 0.90 \mu\text{m/s}$)

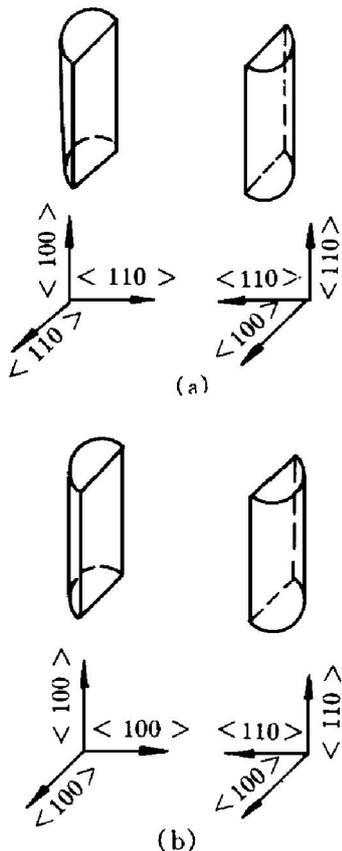


图 1 抽拉时的籽晶搭配

竞争生长。认识这一现象应该从液相原子与具有不同晶体取向晶粒的固相原子形成结合键的角度来考虑。我们知道, 凝固过程的液固界面上有两种情况的原子迁移: 固态原子迁移到液态中和液态原子迁移到固态中。后者的速度大于前者就将实现凝固过程。在实验 1 中所进行的是 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒在定向凝固中液固界面固相一侧原子位置分布如图 5(a)、(b) 所示。考虑到本文所研究的镍基单晶高温合金 DD8 在粗糙的凝固液固界面, 存在有几个原子层厚度的过渡层, 在过渡层中只有大约 50% 的位置为固相原子所占据^[7]。因此, 液相原子迁移至如图 5(a) 所示的 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的晶界处虽然能形成 5 个原子键, 即下层原子面 2 个键, 同层原子面 3 个键, 但同层原子面只有一半的固相原子, 所以在同层原子面只能形成 1.5 个原子键, 共形成 3.5 个原子键; 而液相原子迁移至如图 5(b) 所示的 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的晶界处共形成 4 个原子键, 即下层原子面 3 个键, 同层原子面 1 个键, 考虑同层原子面只有一半固相原子, 能形

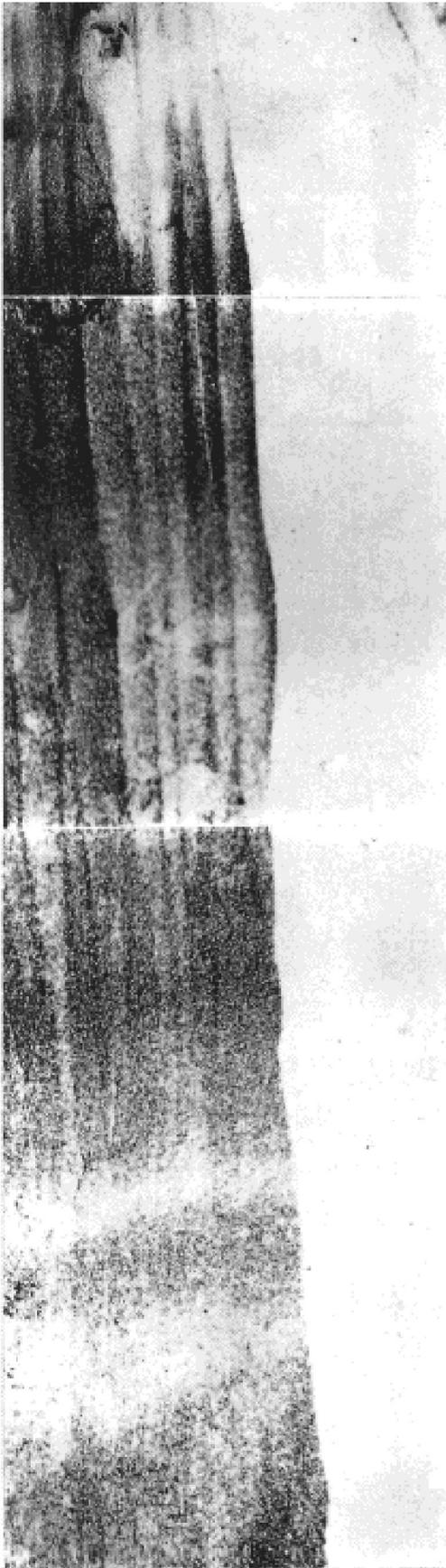


图3 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ (左)与
 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ (右)的耦合竞争生长(32 \times)
($G = 25 \text{ kK/m}$, $v = 0.90 \sim 2.22 \mu\text{m/s}$)

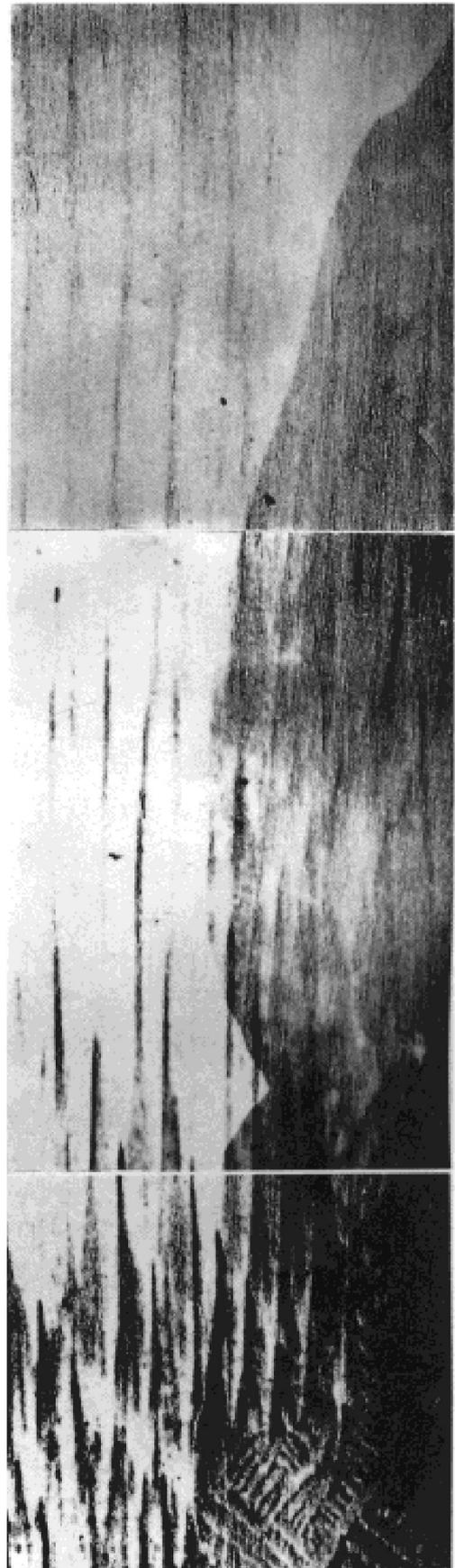


图4 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ (左)与
 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ (右)的耦合竞争生长(32 \times)
($G = 25 \text{ kK/m}$, $v = 2.22 \sim 0.90 \mu\text{m/s}$)

成 0.5 个原子键,也是 3.5 个原子键,与液相原子迁移 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的晶界处形成的原子键相同。尽管如此,由于液相原子与下层固相原子形成的原子键更可靠,而与同层原子形成的原子键具有随机性而变得不稳定,影响了形成原子键的有效性,从而影响液相原子迁移的倾向性。考虑到液相原子与 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的同层原子形成了 1.5 个原子键而与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的同层原子只形成 0.5 个原子键,在原子键总数相同的情况下,后者形成的原子键更可靠,使得液相原子倾向于迁移至 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的晶界处,随着凝固进行而造成晶界面向 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒一侧推移,形成晶粒竞争生长,这就是图 2(a) 和图 3 中所见到的。而在 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒在平界面区与胞晶区的竞争生长中,液相原子迁移至 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒的晶界处能形成 4 个原子键;而迁移至 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的晶界处只能形成 3.5 个原子键,如图 5(c)、(d) 所示。液相原子迁移至 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒的晶界处比迁移至 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒处多 0.5 个原子键。从系统能量角度考虑,液相原子迁移至 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒的晶界处比迁移至 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的晶界处具有更低的能量状态,也即更稳定。从液固相界面上原子迁移过程的动力学角度来考虑,液相原子迁移至 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒的晶界处比迁移至 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒的晶界处需要的激活能 (ΔG_F) 低。这样,液相原子倾向迁移至 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒的晶界处而造成晶界向 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒一侧推移,并进而淘汰 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒,这就是如图 2(b) 和图 4 中所见到的。比较图 2、3 和 4 还可以看出:图 2(a) 和图 3 中的晶粒界面推移比较稳定,而图 2(b) 和图 4 中的晶粒界面推移时快时慢,这可能与抽拉速度不稳所带来的冲击有关。

从以上的分析和比较可以看出,平界面区和胞晶区存在晶粒竞争生长的原因是液相原子迁移至两晶粒界面处与两晶粒的固相原子形成的原子键数目不同,造成系统自由能的降低不

同,从而引起了液相原子迁移的倾向性。

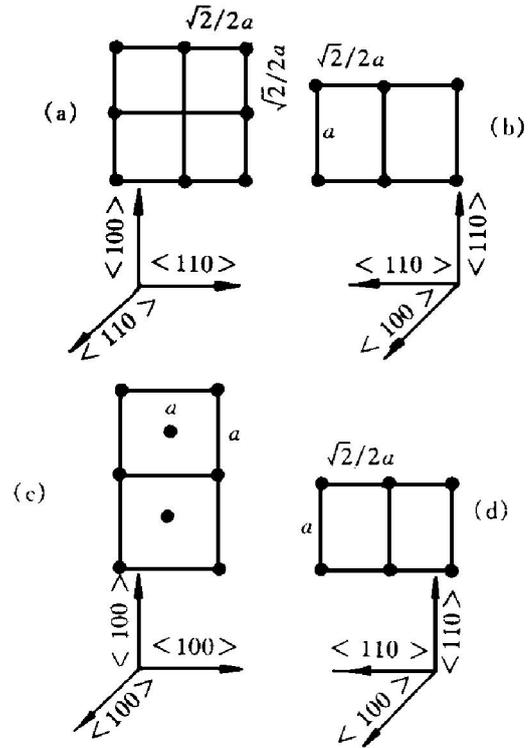


图 5 原子位置分布

4 结论

平界面区及胞晶区存在晶粒竞争生长。液相原子迁移至晶界处,与 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒及 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒固相原子形成的原子键,分别比 $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒及 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒多而使 $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ 晶粒和 $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ 晶粒分别取得晶粒竞争生长优势。

参考文献

- 1 荣科,殷克勤. 见:刘志中等编. 铸造高温合金论文集,北京:中国科学技术出版社,1993:1.
- 2 Gell M, Dull D N. In: Allen S ed, Advanced High Temperature Alloys, 1985, Ohio: ASM Metals park, 1986: 41.
- 3 Dull D N, In: Tien J K and Cauffield T ed. Superalloys, Supercomposites and Superceramics, Academic Press Inc. Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 1989: 149.
- 4 Harris K, In: Betz W ed, High Temperature Alloys for Gas Turbines and Other Applications, 1986, Liege, 3300A. Dordrecht, Holland: Reidel D Publishing Company, 1986: 709.

- 5 Beckers J L, Metall Trans, 1988, 19A: 2333. Company, 1986: 745.
- 6 Beckers J L, Lamberigts M. In: Betz W ed High Temperature Alloys for Gas Turbines and Other Application, 1986, Liege, 3300AA, Dordrecht, Holland: Reidel D publishing
- 7 胡赓祥, 钱苗根. 金属学. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 137.
- 8 何 国. 博士学位论文西北工业大学, 1993.

COMPETITIVE GRAIN GROWTH OF DD8 HIGH TEMPERATURE ALLOY IN PLANAR AND CELLULAR INTERFACE REGION

Liu Zhiyi

Mechanical Department, University Petroleum (East China), Dongying 257062

Fu Hengzhi

*National Key Laborotry of Solidification Processing,
Northwestern University Technology, Xi' an 710072*

ABSTRACT The competitive grain growth of DD8 high temperature alloy in planar and cellular interface region has been investigated. The results showed that $\langle 100 \rangle \times \langle 110 \rangle$ (the formers' crystal direction is parallel to the axial direction of the sead, the laters is normal to the linked surface of two semicylinder seeds.) grain was eliminated gradually by $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ grain, and $\langle 110 \rangle \times \langle 110 \rangle$ grain was gradually eliminated by $\langle 100 \rangle \times \langle 100 \rangle$ grain. Mechanism analyses indicated that who was the winner depanding more or less on the number of the formed link bond between its liquid atoms and solid atoms on both sides of the grain boundary, in contrast, competitive grain growth in dendrite region depanded on the growth of dendrite at grain boundary and the capability of restraining the development of the opposite side.

Key words high temperature alloy directional solidification competitive grain growth

(编辑 黄劲松)