

抽拉速率对 DD5 合金大尺寸单晶叶片定向凝固组织演变的影响

李丰文, 吴生沪, 李传军, 张振强, 任兴孚, 玄伟东, 任忠鸣

(上海大学 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444)

摘要: 研究了高速定向凝固条件下抽拉速率对F级燃气轮机用DD5合金大尺寸单晶叶片凝固组织的影响。结果表明: 一次枝晶间距随抽拉速率的增加而减小; 凝固位置越高, 一次枝晶间距越大。在相同高度位置, 元素偏析程度随抽拉速率增加呈增大的趋势; γ' 相平均尺寸随抽拉速率增大而减小。在相同抽拉速率下, 凝固位置越高, γ' 相平均尺寸越大; 碳化物和 γ/γ' 共晶平均尺寸随抽拉速率增加呈减小趋势; γ/γ' 共晶含量、碳化物含量随抽拉速率增大而增加。进一步分析了抽拉速率及凝固高度位置对微观组织及元素偏析的影响机制。

关键词: 单晶叶片; 抽拉速率; 微观组织; 微观偏析

大尺寸单晶涡轮叶片是燃气轮机的关键部件之一。单晶叶片具有优异的高温力学性能, 可在极恶劣的环境下长期服役^[1-3]。随着“双碳目标”上升为国家战略, 社会经济发展对燃气轮机的燃油效率、碳排放等提出了更为苛刻的要求。提高进气温度成为提升燃油效率的重要方式之一, 也因此对单晶涡轮叶片的承温能力及性能提出了更高的要求。燃气轮机所用单晶叶片因尺寸大、生产工艺要求高、成品率低已成为制约我国燃气轮机技术发展的瓶颈之一。因此, 研究大尺寸单晶叶片定向凝固制备工艺具有重要的意义。

自20世纪中期以来, 凝固理论及凝固技术的发展显著提升了单晶涡轮叶片制造水平及性能。研究发现, 抽拉速率对单晶高温合金组织有明显影响^[4]。传统研究认为, 随抽拉速率的增加, 一次枝晶间距减小, γ' 相和 γ/γ' 共晶相尺寸减小, 合金元素微观偏析程度降低^[5-7]。此外, 大尺寸叶片形状及气冷通道复杂, 叶片不同位置及型壳壁厚不同, 导致温度梯度不同, 显微组织存在差异, 增加了杂晶与小角度晶界的出现概率^[8-10]。DD5合金是国产第二代单晶高温合金, 与第一代单晶高温合金相比, DD5合金多出C、B等晶界强化元素^[11], 合金元素种类更多, 凝固行为更加复杂。以前工作研究了 DD5合金单晶棒的凝固组织及元素偏析, 确定了DD5合金中元素偏析规律, 如: Re、W属于负偏析元素, Al、Ta属于正偏析元素^[12-14]。由于元素分布不均匀, TCP相主要形成于枝晶干, 在枝晶间和晶界则较难形成^[15]。梁向峰等^[16-17]研究了DD5小尺寸单晶空心叶片凝固组织演变, 发现Re元素抑制其他元素的扩散, 阻止 γ' 相增长, 细化 γ' 相尺寸。Wan等^[18]研究发现, DD5单晶叶片中 γ' 相在前缘和后缘的尺寸更小, 具有立方几何形状, 且叶身处 γ' 相尺寸小于榫头处的 γ' 相。

由此可见, 虽然已有大量工作聚焦于高速凝固条件下小尺寸叶片及试棒的研究, 但仍然缺乏对大尺寸单晶叶片定向凝固制备工艺的研究。为此, 作者研究了高速凝固条件下抽拉速率对F级燃气轮机用DD5高温合金大尺寸 (≥ 350 mm) 单晶叶片凝固组织 (枝晶间距、微观偏析、 γ/γ' 共晶及碳化物) 的影响规律。

1 试验材料与方法

试验所用母合金为DD5镍基高温合金, 名义成分如表1所示。采用螺旋选晶法制

作者简介:

李丰文(1997-), 男, 硕士, 研究方向为镍基单晶高温合金叶片的凝固组织及缺陷。E-mail: 2304790797@qq.com

通讯作者:

李传军, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: cjli21@shu.edu.cn

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)11-1341-08

基金项目:

航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究项目(2017-VII-0008-0102)。

收稿日期:

2022-02-24 收到初稿,

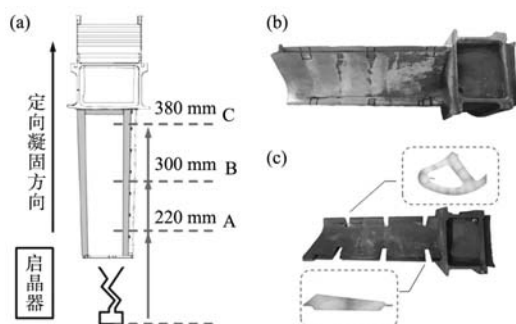
2022-03-31 收到修订稿。

备单晶叶片，单晶叶片长350 mm。螺旋选晶器启晶段高35 mm，直径20 mm，选晶段螺旋直径5 mm，螺旋角度45°。母合金采用真空感应加热熔炼至1 530 ℃熔化，浇注到预热温度为1 530 ℃的型壳中，在1 530 ℃下保温30 min。然后以不同速率定向凝固，抽拉速度分别为3、4和6 mm/min。

表1 DD5高温合金化学成分
Table 1 Chemical composition of the DD5 superalloy

Co	Cr	Mo	W	Al	Ta	Hf	Re	Ni	$w_B / \%$
7.5	7	1.5	5	6.2	6.5	0.15	3	余量	

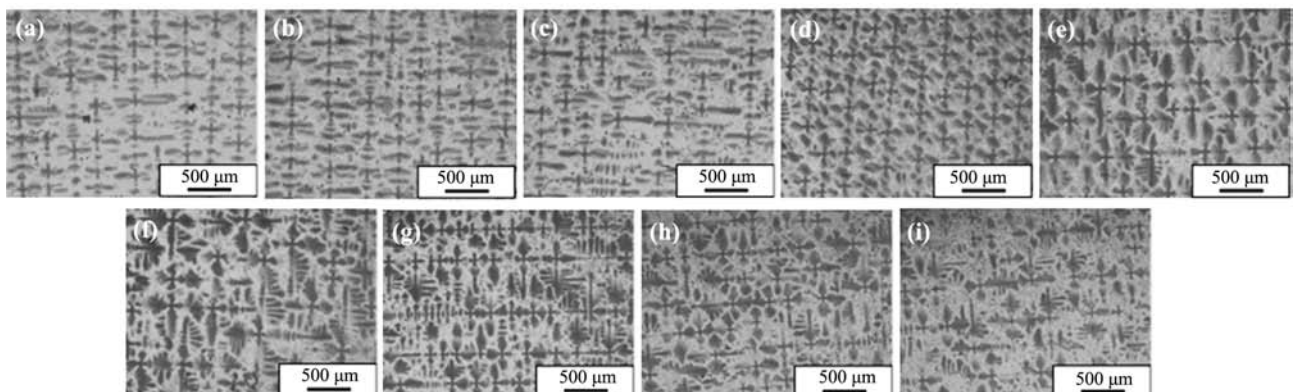
从大尺寸单晶叶片（图1b）不同区域切取试验样品。为了确保样品切取位置准确，将单晶叶片放置于工装夹具上，标记垂直于主应力轴方向的位置，在标记位置采用线切割切取试样。在距离激冷盘220 mm（位置A）、300 mm（位置B）、380 mm（位置C）处单晶叶片两侧分别切取长度10 mm、厚度5~20 mm的样



(a) 单晶叶片定向凝固方向及取样位置；
(b) 单晶叶片实物图；(c) 取样后及试样形貌

图1 单晶叶片示意图及实物图

Fig. 1 Schematic diagram and physical picture of single crystal blade



(a) 3 mm/min, A; (b) 4 mm/min, A; (c) 6 mm/min, A; (d) 3 mm/min, B; (e) 4 mm/min, B;
(f) 6 mm/min, B; (g) 3 mm/min, C; (h) 4 mm/min, C; (i) 6 mm/min, C

图2 不同抽拉速率以及单晶叶片不同高度位置下DD5单晶叶片横截面枝晶组织形貌

Fig. 2 Morphologies of dendrites in the DD5 superalloy under different withdrawal rates and different height positions

品，如图1a所示。由于叶片形状复杂，不同位置样品形状存在明显差异，如图1c所示。

将试样打磨抛光后，使用 FeCl_3 (8 g) + HCl (24 mL) + H_2O (21 mL) 腐蚀液进行腐蚀，使用DM 6000金相显微镜观察枝晶组织，采用扫描电子显微镜观察微观组织，采用EDAX-Octance plus能谱仪（EDS）进行成分分析。对于一次枝晶间距测量，每个样品取三个区域，采用光学显微镜拍摄3 000 $\mu\text{m} \times 2$ 200 μm 视场内枝晶组织，统计一次枝晶数量，采用单位面积法计算一次枝晶间距，取一次枝晶间距的平均值。单位面积法计算公式见式（1）。

$$\lambda_1 = K (A/N)^{0.5} \quad (1)$$

其中： K 为常数，约为1； A 为选取截面的面积； N 为所选截面上树枝晶的数量。

依据式（1），可获得不同凝固条件下一次枝晶间距。

对于其他微观组织（如：碳化物、 γ' 相、 γ/γ' 共晶组织）的测量，采用扫描电镜在样品不同区域取3~5个视场。拍摄 γ' 相所采用20 $\mu\text{m} \times 15$ μm 视场，拍摄碳化物及 γ/γ' 共晶组织所采用170 $\mu\text{m} \times 120$ μm 视场。采用ImageJ软件对其尺寸及数量进行分析统计，取平均值作为相应的数值。

2 试验结果与讨论

2.1 凝固位置以及抽拉速率对一次枝晶间距的影响

DD5大尺寸单晶叶片不同位置、不同抽拉速率下的横截面枝晶组织形貌如图2所示。可以看出，不同位置处横截面凝固组织均为典型的“十”字状枝晶形貌。在相同高度位置，抽拉速率对枝晶形貌影响不明显。相同抽拉速率下，距离激冷盘越远，二次枝晶越粗大，三次枝晶生长趋势越明显。

一次枝晶间距统计结果如图3所示,从图中可见,在相同位置时,随着抽拉速率增大,一次枝晶间距逐渐降低。抽拉速率相同时,凝固位置越高,一次枝晶间距越大。

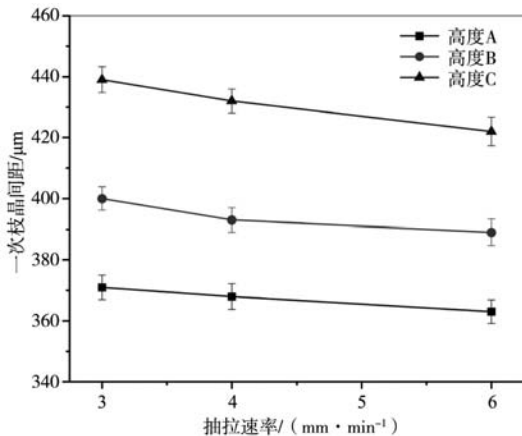


图3 不同抽拉速率及不同高度位置下DD5单晶叶片一次枝晶间距
Fig. 3 Primary dendrite arm spacing of directionally solidified superalloy DD5 at different withdrawal rates and different height positions

对于大尺寸单晶叶片,由于外形及气冷通道具有复杂性,不同位置壁厚不同。因此,横向和纵向的传热速率存在显著差异,导致定向凝固过程中枝晶生长条件不同。

根据Hunt理论模型^[19],一次枝晶间距、温度梯度和凝固速率满足以下关系:

$$\lambda_1 = (64\sigma DK \Delta T_0 / \Delta S)^{1/4} G^{-1/2} V^{-1/4} \quad (2)$$

$$\Delta T_0 = mC_0 (K-1) / K \quad (3)$$

式中: σ 为固液界面能; D 为液相扩散系数; m 为液相线斜率; K 为常数; ΔS 为平衡溶质分配系数; C_0 为合金元素的浓度; G 为固-液界面前沿液相中的温度梯度; V 为抽拉速率。

根据式(2)可知,对于给定的合金体系,一次枝晶间距 λ_1 与温度梯度 $G^{-1/2}$ 和抽拉速率 $V^{-1/4}$ 呈线性相关。当固-液前沿温度梯度不变时,一次枝晶间距取决于抽拉速率。随着抽拉速率的增加,一次枝晶间距减小。当抽拉速率相同时,一次枝晶间距取决于温度梯度。研究表明,当凝固位置较低,固-液界面与激冷盘距离较近时,散热效果较好,纵向温度梯度大;当凝固位置较高,与激冷盘距离远时,纵向温度梯度降低^[20-22]。因此,当凝固位置低时,一次枝晶间距较小。当凝固位置较高时,一次枝晶间距增大。例如:在3 mm/min抽拉速率下,一次枝晶间距由高度A处的371 μm 增加到高度C处的439 μm 。图3是枝晶间距随抽拉速率及不同高度位置变化趋势。由图可知,在同一抽拉速率条件下,高度位置对枝晶间距影响显著。

2.2 凝固位置及抽拉速率对元素偏析的影响

枝晶凝固过程中伴随微观偏析。偏析程度可用元素偏析系数进行表征。元素偏析系数定义为 $k' = C_{DC} / C_{ID}$,其中, C_{DC} 和 C_{ID} 分别为枝晶干与枝晶间元素浓度^[23]。当 $k' < 1$ 时,为正偏析元素,偏析于枝晶间;当 $k' > 1$ 时,为负偏析元素,偏析于枝晶干;当 $k' = 1$ 时,则不存在偏析。

图4显示了元素偏析系数随叶片高度及抽拉速率的变化规律。可以看出,偏析系数大于1的元素有Co、W、Re,说明这些元素偏析于枝晶干,为负偏析元素。Al、Cr和Ta元素偏析系数小于1,偏析于枝晶间,为正偏析元素。这与以前的研究结果相一致^[24-25]。由于Co和Cr属于弱偏析元素,变化趋势不明显。因此,以下仅分析W、Re、Al、Ta的偏析行为。由图可知,随抽拉速率增加,W和Re偏析系数随抽拉速率增加而增大;而Al和Ta则随抽拉速率增大而减小。但是,由于W和Re属于负偏析元素,Al和Ta属于正偏析元素,因此,四种元素的偏析程度随抽拉速率增加而增大,变化趋势不受叶片高度位置影响。这与传统观点存在差异。Kuleshova^[24]等对MarM200合金进行定向凝固实验发现,在抽拉速率在0.4~20 mm/min范围内,偏析程度随抽拉速率增大呈现先增大后减小的趋势。张卫国和闵志先^[26-27]等也得到相似结果。可见,在一定范围内,元素偏析程度存在随抽拉速率增大而增大现象。

高温合金在定向凝固过程中,溶质在液-固两相中溶解度差异导致溶质再分配。当溶质元素在固相中的溶解度小于其在液相中的溶解度时,固相向液相中排出溶质;反之,溶质由液相向固相中扩散,从而形成微观偏析^[26]。考虑固相扩散的溶质再分配关系可用式(4)表示^[27]。

$$\delta_i = \Delta C_i / \Delta C_0 = \exp(-4\pi^2 D_s t / d^2) \quad (4)$$

其中: δ_i 为枝晶内溶质元素均匀化程度; ΔC_0 和 ΔC_i 分别为铸态及经过时间 t 均匀化处理后枝晶间与枝晶轴溶质浓度之差; D_s 为溶质元素固态扩散系数; t 为局部凝固时间; d 为枝晶间距。

由式(4)可知,元素偏析程度主要取决于元素扩散系数、扩散距离(枝晶间距)以及局部凝固时间。当抽拉速率较低时(3 mm/min),局部凝固时间增加,元素扩散时间延长,成分分布相对均匀,偏析程度降低。当抽拉速率增加时,一方面,局部凝固时间缩短,溶质扩散时间减小,偏析程度增大。另一方面,提高抽拉速率导致一次枝晶间距减小,元素扩散距离减小,元素偏析程度降低。可见抽拉速率对合金元素偏析程度的影响存在双重性。而在本研究的尺度范围内,与扩散距离相比,扩散时间对偏析程度的影响起主导作用。因此,随抽拉速率增加,合金元素的偏析程度增大。

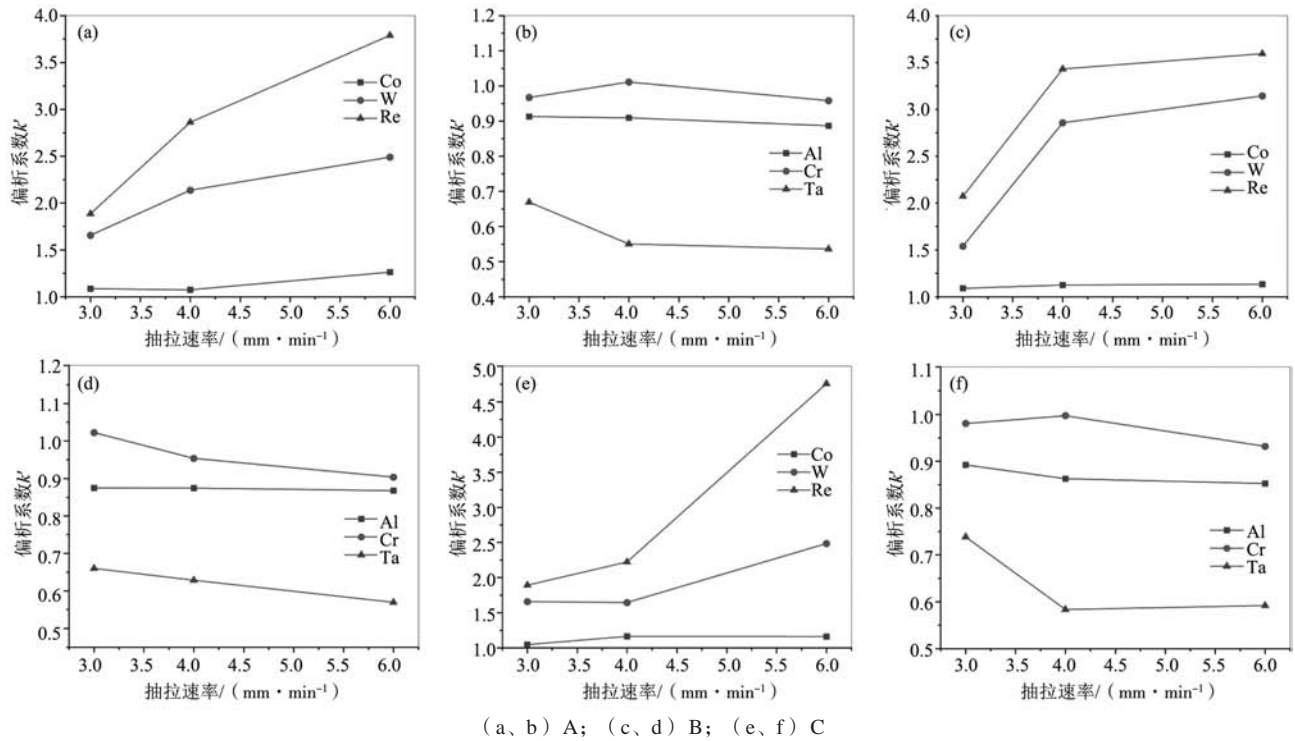


图4 元素偏析系数随叶片高度位置及抽拉速率变化

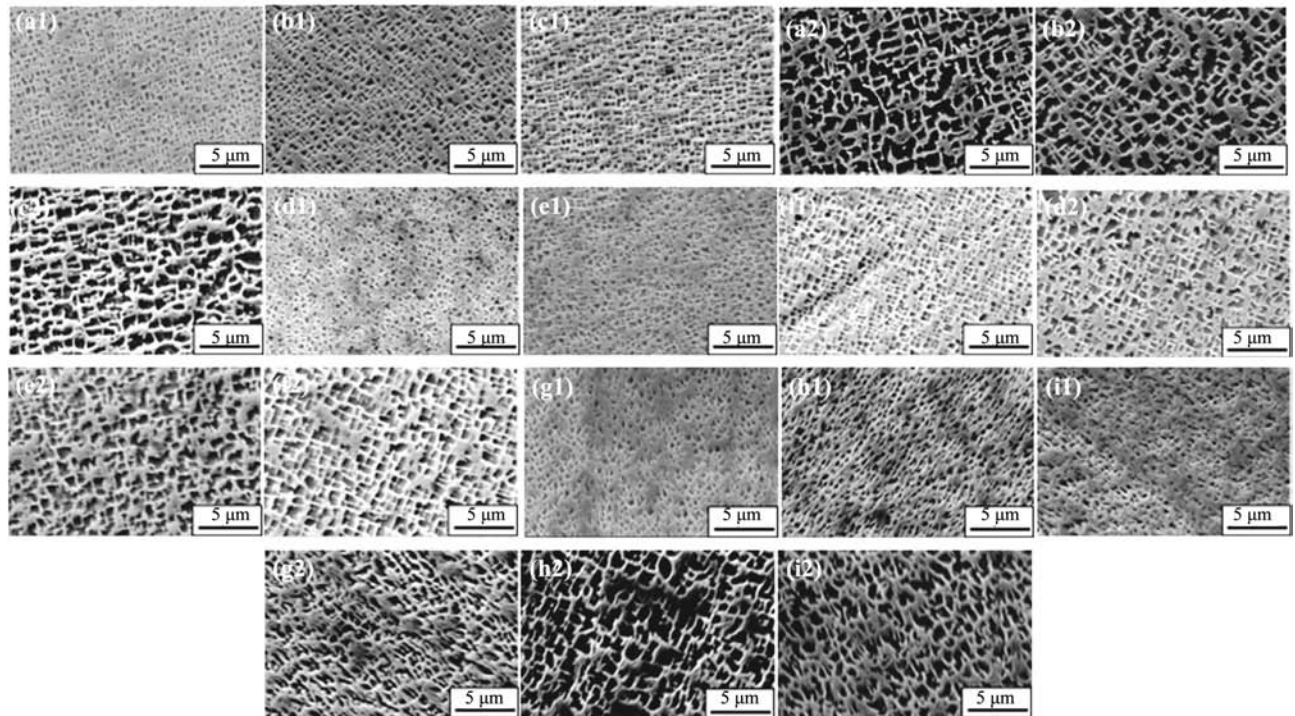
Fig. 4 Variations of segregation coefficient with the height positions and the withdrawal rates

2.3 凝固位置及抽拉速率对 γ' 相形貌的影响

图5是不同抽拉速率下单晶叶片不同高度位置枝

晶干和枝晶间 γ' 相形貌。从形貌看，无论枝晶间还是

枝晶干， γ' 相均呈现立方形或准立方形。在相同拉速



(a) 3 mm/min, A; (b) 3 mm/min, B; (c) 3 mm/min, C; (d) 4 mm/min, A; (e) 4 mm/min, B; (f) 4 mm/min, C; (g) 6 mm/min, A; (h) 6 mm/min, B; (i) 6 mm/min, C

图5 不同抽拉速率下单晶叶片不同高度位置枝晶干和枝晶间 γ' 相形貌: 1—枝晶干; 2—枝晶间

Fig. 5 Morphologies of γ' phases in the dendrite cores and interdendritic regions of the single crystal blade at different withdrawal rates:

1-dendrite core; 2-interdendritic

下，同一高度位置处枝晶干 γ' 相平均尺寸明显小于枝晶间尺寸。进一步统计 γ' 相粒子平均尺寸，如图6所示。在相同抽拉速度时，凝固位置越高， γ' 相平均尺寸呈现增大的趋势；在同一高度位置时，随抽拉速率增加，枝晶间 γ' 相平均尺寸呈现减小的趋势。

γ' 相尺寸和形貌主要受过冷度和生长时间的影响^[28]。当抽拉速率较低时，过冷度较小， γ 固溶体中 γ' 相的形核速率低，单位体积内 γ' 相数密度低。同时由于凝固时间较长， γ' 相生长时间较长，因此，低抽拉速率下 γ' 相平均尺寸较大。当抽拉速率增大时，由于过冷度增加，生长时间缩短，导致单位体积内 γ' 相数密度增大， γ' 相尺寸减小。当抽拉速率为6 mm/min时， γ' 相生长时间最短，平均尺寸最小。

2.4 凝固位置及抽拉速率对 γ/γ' 共晶组织及碳化物的影响

单晶叶片不同高度位置及不同抽拉速率下碳化物形貌如图7所示。从图中可以看出，在相同高度位置，随着抽拉速率增大，单晶叶片中碳化物形貌由短棒状向长条状转变，且碳化物数量增多。在相同抽拉速率下，凝固位置越高，碳化物数量减少。镍基高温合金中碳化物类型主要有MC、 M_6C 和 $M_{23}C_6$ 。铸态合金中通常析出MC型碳化物^[29]，且MC型碳化物主要为TiC、TaC等化合物^[30]。EDS测试结果显示，碳化物含有大量的Ta元素，因此，本工作中碳化物种类主要为TaC碳化物。MC型碳化物生长初期主要为八面体状结构，之后逐渐长出枝臂与片体，因此，碳化物的生长受生长空

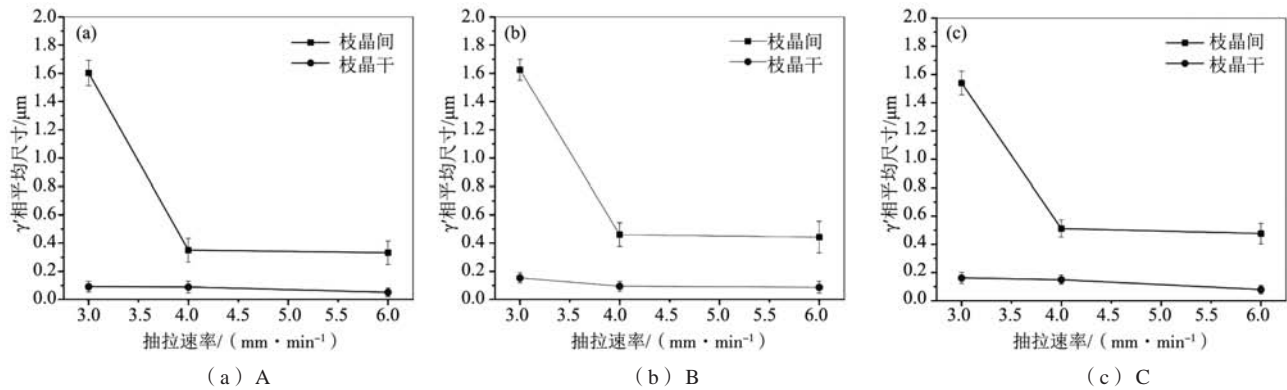
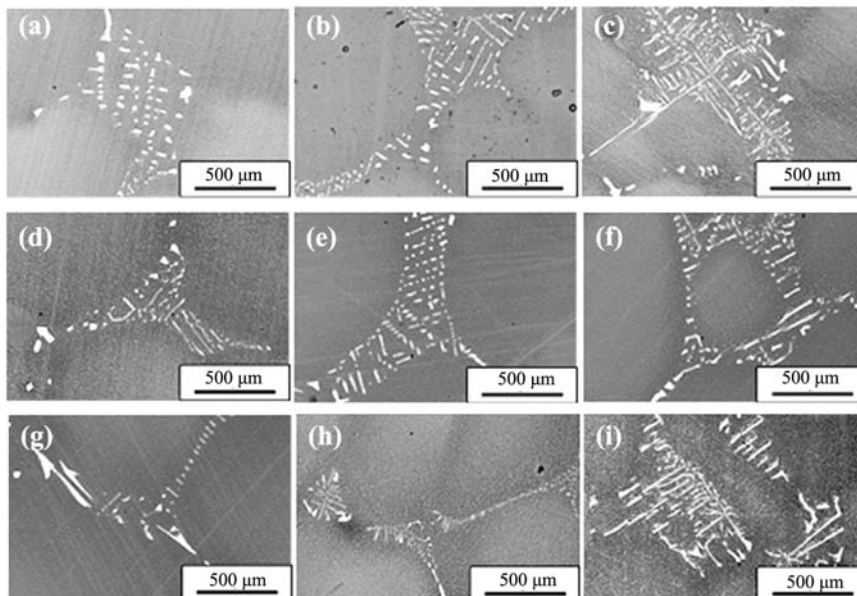


图6 γ' 相平均尺寸随抽拉速率及不同高度位置变化

Fig. 6 Size of γ' phase at different withdrawal rates and different height positions A, B and C



(a) 3 mm/min, A; (b) 4 mm/min, A; (c) 6 mm/min, A; (d) B、3 mm/min; (e) 4 mm/min, B; (f) 6 mm/min, B; (g) 3 mm/min, C; (h) 4 mm/min, C; (i) 6 mm/min, C

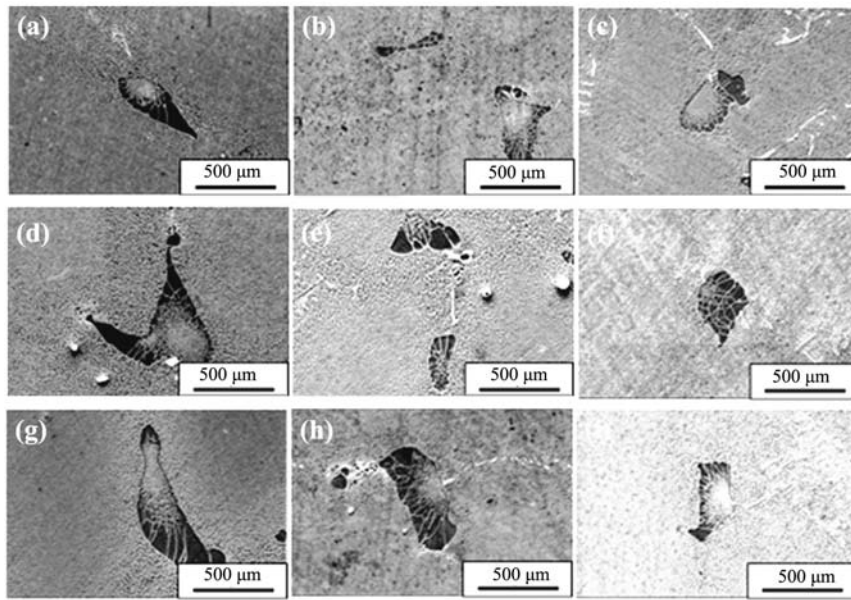
图7 不同抽拉速率及不同凝固位置下碳化物形貌

Fig. 7 Carbides in solidified superalloy DD5 at different withdrawal rates and different height positions

间的影响。合适的生长空间可以使碳化物生长充分，形貌倾向于汉字体或网络状结构^[31]。当抽拉速率较低时，一次枝晶间距较大，碳化物生长空间充分，易形成粗大的短棒状碳化物。但由图4可知，低拉速下，DD5合金偏析程度较低，残余液相中偏析元素含量较低，导致碳化物数量减少；随着抽拉速率增加，枝晶细化，一次枝晶间距减小，生长空间受限，则碳化物形貌逐渐向长条状转变，且元素偏析程度随抽拉速率提高，碳化物形成元素增多，碳化物形核率增大，则碳化物数量增多。在相同抽拉速率下，凝固位置越高，温度梯度减小，一次枝晶间距增大，同时元素偏

析程度降低，导致碳化物数量减少。

图8是不同抽拉速率及单晶叶片不同高度位置下 γ/γ' 共晶相形貌，从图中可以看出，在相同凝固高度位置，随着抽拉速率的增大，岛状共晶平均尺寸降低。图9是 γ/γ' 共晶含量随拉速及位置变化规律。可以看出，共晶相体积分数随抽拉速率的增加，呈现升高的趋势。在相同抽拉速率下，凝固位置越高，岛状共晶相平均尺寸增大，同时体积分数降低。高温合金在定向凝固过程中，首先形成单相 γ 固溶体枝晶， γ' 形成元素Ta、Al等偏析于枝晶间残余液相中。当残余液相继续凝固时，合金成分达到共晶成分而发生共晶反



(a) 3 mm/min, A; (b) 4 mm/min, A; (c) 6 mm/min, A; (d) 3 mm/min, B; (e) 4 mm/min, B; (f) 6 mm/min, B; (g) 3 mm/min, C; (h) 4 mm/min, C; (i) 6 mm/min, C

图8 不同抽拉速率及不同高度位置下 γ/γ' 共晶组织形貌

Fig. 8 Morphologies of γ/γ' eutectics at different withdrawal rates and different height positions

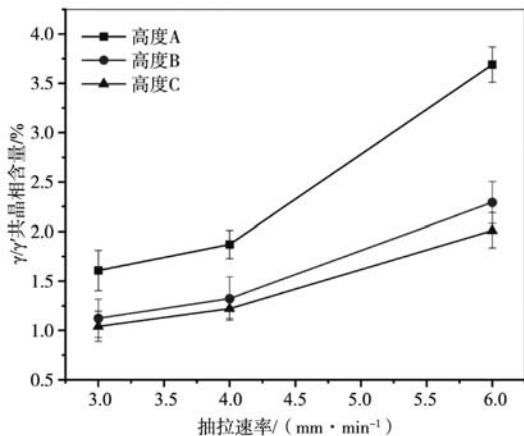


图9 不同抽拉速率及不同高度位置(A、B、C)下 γ/γ' 共晶分数的关系

Fig. 9 Relationship between volume fraction of γ/γ' eutectics at different withdrawal rates and height positions A, B and C

应，形成 γ/γ' 共晶。随着抽拉速率的增加，枝晶生长速度加快，枝晶间的富集偏析元素量增多，残余液相更容易发生共晶反应，导致共晶含量变多。但由于一次枝晶间距减少，共晶相生长空间受限，导致共晶相平均尺寸减少。此外，由于Ta元素同时为碳化物以及 γ' 相形成元素，凝固开始时，Ta与C元素结合形成碳化物，则碳化物的形成会消耗掉部分Ta元素。而共晶相的形成也需要Ta等 γ' 相形成元素，因此，碳化物生成对于共晶相的形成有一定弱化作用。

3 结论

(1) 在单晶叶片相同的高度，随着抽拉速率增大，一次枝晶间距降低， γ' 相平均尺寸减小， γ/γ' 共晶相含量和碳化物数量增多；抽拉速率相同时，凝固

位置越高,一次枝晶间距增大, γ' 相平均尺寸增大, γ/γ' 共晶相含量和碳化物数量减少。

(2) Al和Ta为正偏析元素,W和Re为负偏析元

素。随着抽拉速率增加,主要合金元素偏析程度呈增大趋势。这是因为随抽拉速率增加,扩散时间减小,偏析程度增加。

参考文献:

- [1] POLLOCK T M, TIN S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22 (2): 361-374.
- [2] REED R C. The superalloys fundamentals and applications [M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [3] WANG R, JIANG K, JING F, et al. Thermomechanical fatigue failure investigation on a single crystal nickel superalloy turbine blade [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 284-295.
- [4] LIU L, HUANG T W, ZHANG J, et al. Microstructure and stress rupture properties of single crystal superalloy CMSX-2 under high thermal gradient directional solidification [J]. Materials Letters, 2007, 61 (1): 227-230.
- [5] GAO S, LIU L, XU Y, et al. Influences of processing parameters on microstructure during investment casting of nickel-base single crystal superalloy DD3 [J]. China Foundry, 2012, 9 (2): 159-164.
- [6] 高成薇, 于金江, 孙长波, 等. 抽拉速率对DZ951合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2012, 61 (3): 246-250.
- [7] 赵乃仁, 金涛, 孙晓峰, 等. 抽拉速率对SRR99单晶高温合金组织和性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2008, 22 (1): 46-52.
- [8] CARTER P, COX D C, GANDIN C A, et al. Process modelling of grain selection during the solidification of single crystal superalloy castings [J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2000, 280 (2): 233-246.
- [9] 玄伟东, 任忠鸣, 任维丽, 等. 籽晶取向对镍基高温合金定向凝固过程中杂晶的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23 (S2): 369-372.
- [10] YANG X L, DONG H B, WANG W, et al. Microscale simulation of stray grain formation in investment cast turbine blades [J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2004, 386 (1-2): 129-139.
- [11] CUI R J, HUANG Z H. Microstructural evolution and stability of second generation single crystal nickel-based superalloy DD5 [J]. 中国有色金属学报(英文版), 2016, 26 (8): 2079-2085.
- [12] 张强, 杨泽南, 王祯, 等. DD5镍基单晶高温合金凝固过程元素偏析的相场模拟 [J]. 航空制造技术, 2017 (Z2): 48-53.
- [13] 崔仁杰, 黄朝晖, 管凯, 等. 热处理工艺对第二代镍基单晶高温合金DD5组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2019, 6: 45-51.
- [14] LIU K, WANG J, WANG B, et al. Quantifying the influences of carbides and porosities on the fatigue crack evolution of a Ni-based single-crystal superalloy using x-ray tomography [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35: 133-145.
- [15] LIU G, ZHANG X, WANG X, et al. Precipitation behavior of the topologically close-packed phase in the DD5 superalloy during long-term aging [J]. Scanning, 2020, 20: 1-6.
- [16] LIANG Xiangfeng, TAO Yu. Preparation and tensile properties of DD5 single crystal castings [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2016, 23 (6): 683-690.
- [17] LIANG X, ZHAO Y, JIA Z, et al. Recrystallization behavior of single-crystal hollow blade tenon [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47 (11): 3309-3315.
- [18] WANG H. Quantitative characterization of the γ' phase distribution in the large-scale area of the second-generation nickel-based single crystal blade DD5 [J]. Crystals, 2021, 11: 1-13.
- [19] GUO H E, MAO X, XI A. Models for primary dendrite spacing and its verification in single crystal superalloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1993, 7 (6): 467-472.
- [20] 谢光, 张少华, 郑伟, 等. 大尺寸单晶叶片中小角度晶界的形成与演化 [J]. 金属学报, 2019, 55 (12): 1527-1537.
- [21] 李海松, 杨啊涛, 张琼元, 等. 重型燃机大尺寸叶片定向凝固组织模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (9): 980-984.
- [22] ZHANG X, XIN T, YUE S, et al. Statistical study of the primary-dendrite spacings in single-crystal superalloys [J]. Materiali in Tehnologije, 2021, 55 (1): 149-153.
- [23] DUHL D N, SULLIVAN C P. Some effects of hafnium additions on the mechanical properties of a columnar-grained nickel-base superalloy [J]. JOM, 2015, 23 (7): 38-40.
- [24] KULESHOVA E A, LOGUNOV E. Dendritic segregation in heat-resistant nickel alloys [J]. Metal Science&Heat Treatment, 1981, 23 (6): 292-296.
- [25] CALDWELL E C, FELA F J, FUCHS G E. The segregation of elements in high-refractory-content single-crystal nickel-based superalloys [J]. JOM, 2004, 56 (9): 44-48.

- [26] 张卫国. 高温度梯度定向凝固DZ125合金组织及性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2009, 35-57.
- [27] 闵志先. 传输过程对定向凝固DZ125合金组织偏析的影响 [D]. 西安: 西北工业大学, 2011, 42-138.
- [28] JIN T, LI J G, ZHAO N R, et al. Effects of withdrawal rate on solidification parameters and microstructure of a nickel-base single crystal superalloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2002, 3: 36-39, 48.
- [29] 王华明. 凝固速度对单晶高温合金凝固组织与溶质再分配的影响 [J]. 航空材料学报, 1991, 11 (1): 12-18.
- [30] SHENG L Y, GUO J T, TIAN Y X, et al. Microstructure and mechanical properties of rapidly solidified NiAl-Cr (Mo) eutectic alloy doped with trace Dy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 475 (1-2): 730-734.
- [31] 刘丽荣, 金涛, 孙晓峰, 等. 单晶高温合金中的碳化物演化及其作用的研究 [J]. 航空材料学报, 2007, 27 (5): 12-16.
- [32] 余竹焕, 郭浩, 屈联莹, 等. C对镍基单晶高温合金DD90凝固组织的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46 (7): 1862-1868.
- [33] 肖旋, 高慈, 秦学智, 等. 抽拉速率对定向凝固DZ483合金的微观组织及力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23 (10): 2808-2816.

Effects of Withdrawal Rate on Solidification Microstructures of Large Size Single Crystal Blade of DD5 Superalloy

LI Feng-wen, WU Sheng-hu, LI Chuan-jun, ZHANG Zheng-qiang, REN Xing-fu, XUAN Wei-dong, REN Zhong-ming

(State Key Laboratory of Advanced Special Steel & Shanghai Key Laboratory of Advanced Ferrometallurgy & School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract:

The effect of withdrawal rates on the solidification microstructures of large-size single crystal blades of the DD5 alloy for F class gas turbine was studied under high speed directional solidification condition. The results showed that the primary dendrite spacing decreased with the increase of the withdrawal rate. The primary dendrite spacing increased with the rise of the solidification location. The degree of element segregation increased with the increase of the withdrawal rate at the same height. The average size of γ' phase decreased with the increase of the withdrawal rate. At the same withdrawal rate, the average size of γ' phase increased with the increase of solidification position. The average size of carbide and γ/γ' eutectic decreased with the increase of the withdrawal rate. The γ/γ' eutectic content and the carbide content both increased with the increase of the withdrawal rate. The mechanism of the effect of the withdrawal rate and the solidification location on microstructures and microsegregation was discussed.

Key words:

single crystal blade; withdrawal rate; microstructure; microsegregation