

抽拉速度对单晶叶片定向凝固过程的影响

张海华¹, 张 鸿², 张 玲³, 刘永娜²

(1. 海装沈阳局, 辽宁沈阳 110043; 2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043;
3. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 以DD6高温合金作为单晶叶片试件合金材料, 对固定抽拉速度、简单阶梯抽拉速度和多级阶梯抽拉速度下单晶叶片试件温度场、糊状区和凝固组织生长情况进行了数值模拟, 并进行了定向凝固验证试验。结果表明: 采用低速固定抽拉和多级阶梯抽拉速度能获得单晶完整性好的叶片试件; 高速固定抽拉和简单阶梯抽拉速度下单晶叶片试件在缘板产生杂晶; 凝固组织数值模拟结果与定向凝固试验结果基本吻合。

关键词: 单晶叶片; 定向凝固; 抽拉速度; 数值模拟; 杂晶

随着飞机发动机推重比越来越高, 对发动机涡轮叶片承温能力要求不断提高。单晶高温合金叶片消除了晶界, 能够在高温下保持优异的综合力学性能、组织稳定性, 满足高推比发动机的设计要求, 其制造技术成为制备先进发动机的核心技术。高速凝固法(HRS)是目前单晶高温合金叶片定向凝固技术中应用最为广泛的方法, 该方法利用机械抽拉系统使铸型从炉子的加热区穿过辐射挡板到达低温区, 实现对定向凝固过程温度梯度和抽拉速度的控制。高速凝固法铸造设备结构简单, 温度梯度及凝固冷却速率较高, 工艺稳定可靠, 特别适合航空发动机叶片等精密部件的生产^[1-6]。

高速凝固法可以通过调整抽拉速度控制凝固组织生长, 抽拉速度是高速凝固法的一项重要参数, 它直接影响凝固过程的温度场分布及组织形成。合理的抽拉速度有利于提高工艺稳定性, 避免杂晶缺陷产生^[7-9]。目前, 工业实践中大多采用基于经验的固定抽拉速度或简单阶梯抽拉速度工艺。作者研究了固定抽拉速度和简单阶梯抽拉速度下单晶叶片试件温度场、糊状区和组织生长变化情况, 分析了缘板杂晶缺陷成因。在此基础上, 通过数值模拟分析调整多级抽拉速度, 获得连续变化的抽拉速度曲线, 解决了缘板杂晶问题。

1 试验方法

为了研究单晶叶片抽拉速度对凝固过程的影响规律, 本试验对实际单晶叶片进行合理的结构简化, 简化的单晶叶片试件如图1所示。单晶高温合金叶片金属材料选用DD6单晶高温合金, 采用TecCast数值模拟软件计算不同抽拉速度下叶片定向凝固过程, 研究温度场、糊状区及凝固组织变化, 过程参数设计如表1所示。同时制备单晶叶片试件型壳, 进行定向凝固和测温试验。叶片试件组树方式为每组3片, 试件蜡模、型壳及测温点位置如图2所示。

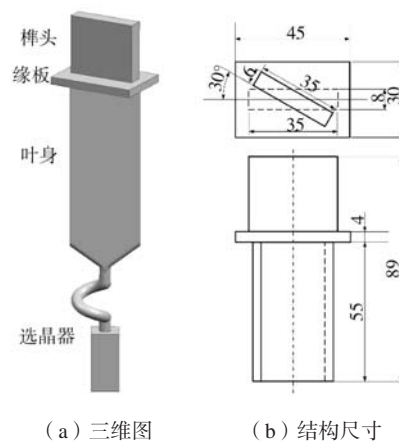


图1 单晶叶片简化结构及尺寸

Fig.1 Simplified structure of the single crystal blade and its dimensions

作者简介:

张海华(1985-), 男, 硕士, 主要研究方向为航空动力。
E-mail: zjlworkmail@163.com

中图分类号: TG111.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)02-0130-05

收稿日期:

2022-09-28 收到初稿,
2022-11-30 收到修订稿。

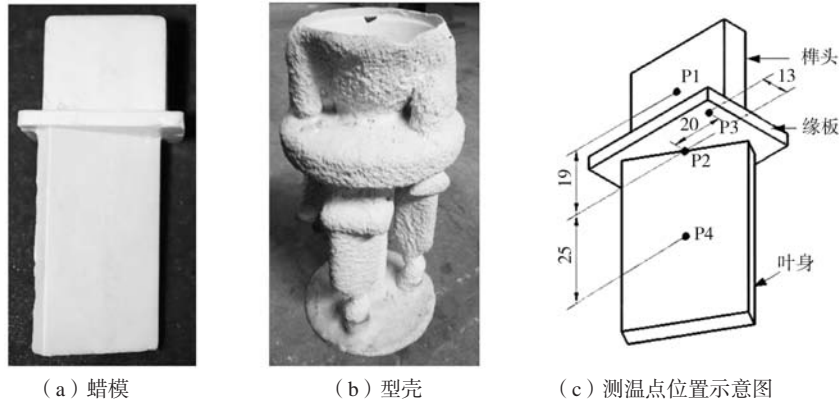


图2 单晶叶片试件

Fig. 2 Single crystal blade specimen

表1 抽拉速度工艺
Table 1 Withdrawal rates processes

组别	抽拉速度 (mm/min ⁻¹)	拉速特点	凝固时间/min
G1	7.0	固定拉速	30.0
G2	4.5	固定拉速	43.0
G3	0~20 min: 7.0 20~38.0 min: 3.5	阶梯拉速	38.0

2 结果与分析

2.1 固定拉速数值模拟和试验结果

对单晶叶片试件固定拉速条件下的定向凝固过程进行计算。固定拉速工艺条件下的温度场分布与凝固组织生长的数值模拟结果如图3所示，其中图3a、c、e分别显示了G1组温度场分布、糊状区分布和凝固组织数值模拟结果；图3b、d、f分别显示了G2组温度场分布、糊状区分布和凝固组织数值模拟结果。糊状区分布显示了G1组缘板处的过冷度要大于G2缘板处的过冷度，杂晶生成倾向更高。图3e中，由于温度场分布不均，造成了G1组凝固组织数值模拟结果出现了明显的

缘板杂晶。G1组定向凝固试验结果显示，3片叶片均有杂晶，杂晶主要形成于远离叶身的缘板两个端部位置，如图4a所示，并出现多个杂晶晶核，与数值模拟结果显示的杂晶出现的位置和分布基本一致。G2组定向凝固试验结果显示3片叶片无杂晶，与数值模拟结果一致。

进一步对G1和G2组抽拉速度条件下设置点的冷却曲线进行数值模拟和定向凝固测温，计算和试验结果见如图5所示。数值模拟预测的凝固过程设置点的冷却曲线与测温试验结果基本吻合，G1和G2两组各点数值模拟平均误差均小于3%。根据各点位置不同，其先后冷却顺序不同。G1组3个测温点经历了温度先快速减小、然后缓慢减小、再快速减小的温度变化过程。G2组各点温度经历先缓慢减小、再快速减小的变化过程。两组工艺温度变化过程不同，主要因为抽拉速度与糊状区移动速度差异造成。在两组工艺中，P2和P3点处于缘板同高度位置，凝固曲线非常接近。在冷却曲线温度范围1 342~1 399 ℃内，G1和G2组的P3点温度值均小于P2点，表明金属所具有的高热导率仍然无法

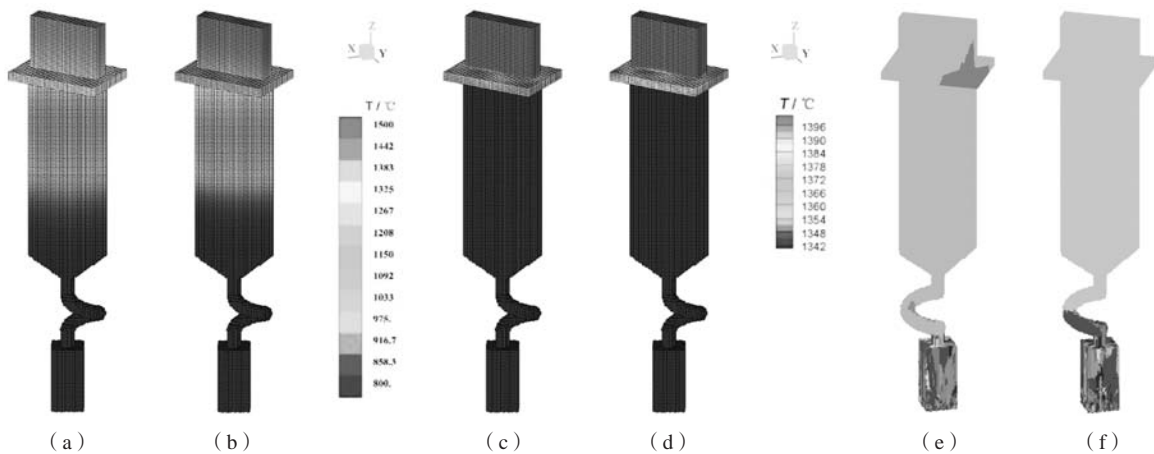
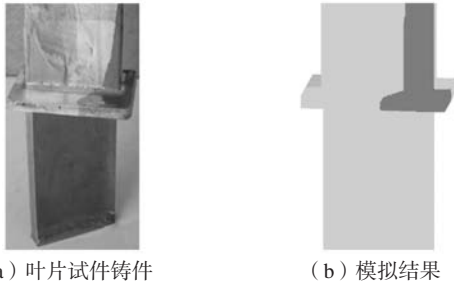


图3 G1和G2组数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of the G1 and G2 groups



(a) 叶片试件铸件 (b) 模拟结果

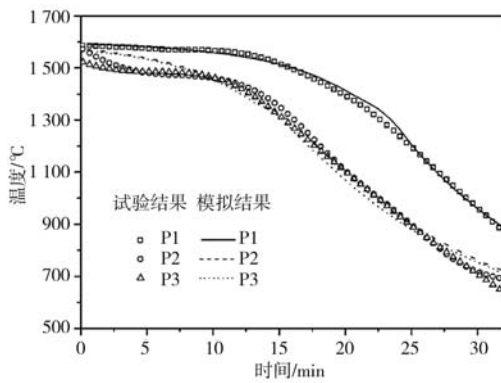
图4 G1组定向凝固试验和数值模拟结果

Fig. 4 Directional solidification test and numerical simulation results of the G1 group

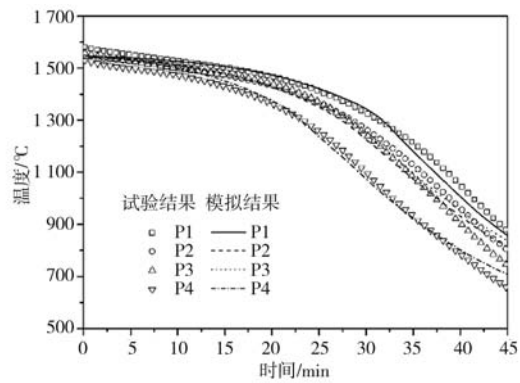
消除铸件不同位置的横向温度梯度，因此造成实际定向凝固过程的等温面出现倾斜、弯曲等特征，这也是导致杂晶形核与生长的原因之一。

2.2 简单阶梯拉速数值模拟和试验结果

G1组杂晶缺陷主要存在于叶片试件的缘板位置，结合G2组数值模拟结果，优化固定拉速工艺为变速阶梯抽拉工艺，即当糊状区在叶片试件缘板附近时，适当减小抽拉速度，并且在其他位置同样保持高速抽拉，可以提高生产效率，同时减小温度过



(a) G1组



(b) G2组

图5 G1和G2组冷却曲线

Fig. 5 Cooling curves of the G1 and G2 groups

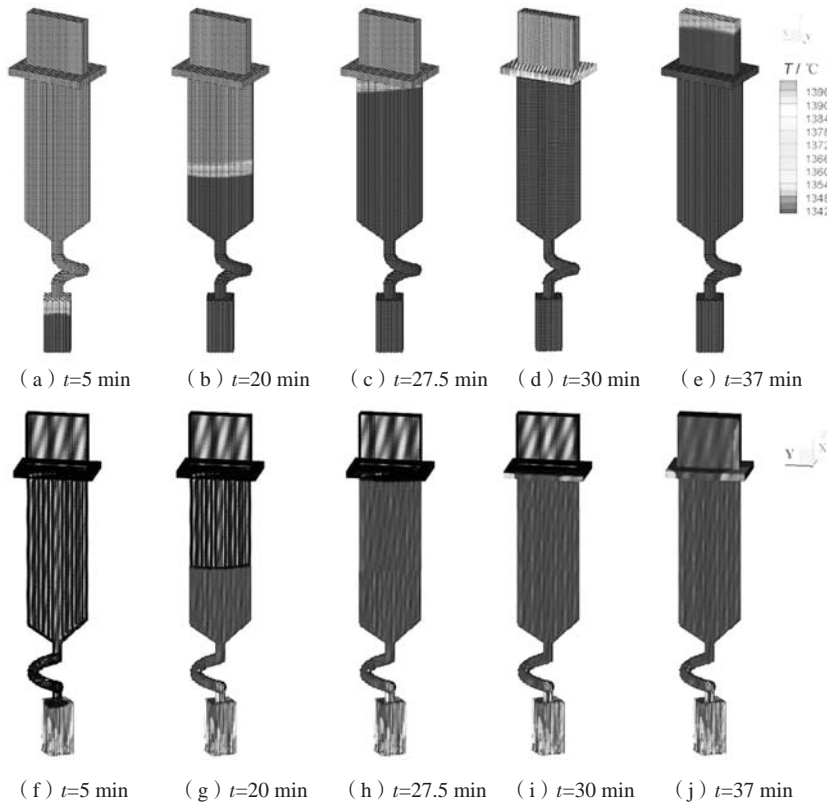


图6 G3组数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of the G3 group

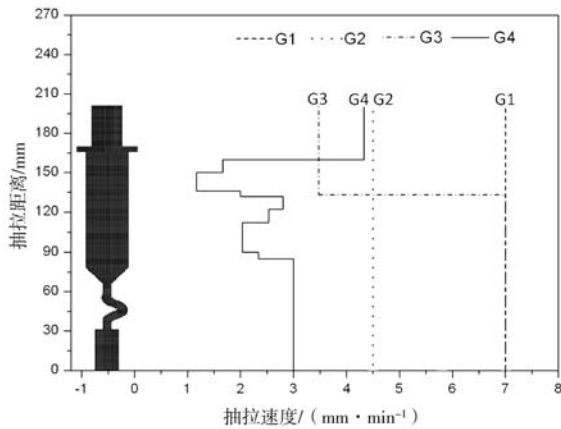


图7 不同抽拉速度对比图

Fig. 7 Comparison of different withdrawal rates

冷孤立域（简称UIZ区），有效避免杂晶缺陷产生，试验采用的阶梯拉速工艺见表1中的G3。

G3组数值模拟结果如图6所示，图6a~e显示了不同凝固时间糊状区分布，可以看出，当凝固过程中固液界面到达缘板位置时，出现了缘板各处温度分布不均，可能造成杂晶缺陷产生。图6f~j显示了不同时间凝固组织生长情况，生长过程初期，选晶器凝固并成功选择出单晶组织，该单晶继续生长进入叶身位置，此时组织生长界面基本保持水平。但是当单晶组织生长进入缘板位置时，在缘板端部两处出现了杂晶缺陷，其中一个缘板杂晶继续生长进入榫头位置。G3组定向凝固试验结果表明，3片叶片中1片试件无杂晶、2片试件仍有杂晶，需要对工艺进一步优化。

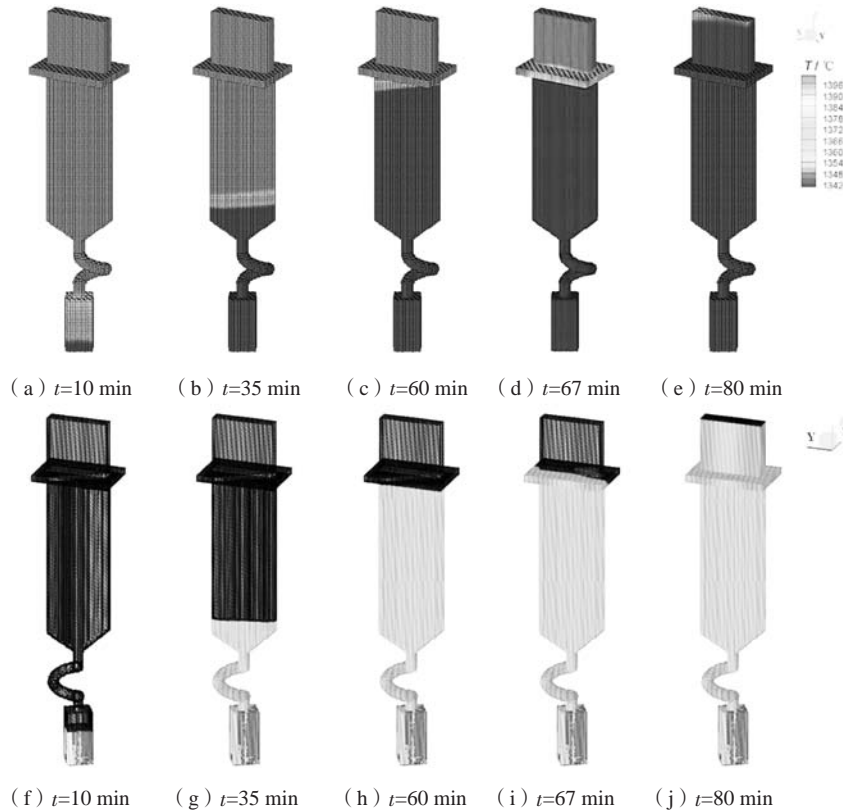


图8 G4组数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of the G4 group

2.3 多级阶梯拉速数值模拟和试验结果

基于上述数值模拟和定向凝固试验结果，对简单阶梯拉速进一步优化，进行多级拉速度计算与试验，具体拉速见图7中的G4。G4组数值模拟结果如图8所示，图8a~e显示了不同时间凝固糊状区分布、优化后的定向凝固温度场均匀和等温面呈水平分布。凝固开始时，糊状区宽度较大，但等温面基本保持水平分布。凝固中后期，叶身及缘板位置的糊状区水平度较好，有利于定向凝固过程。图8f~j显示了不同时间凝固

组织生长情况，叶片铸件顺序完成引晶段、叶身、缘板及榫头的定向凝固，晶体快速生长占据缘板端部位置，未出现杂晶的形核与生长。按G4组工艺进行定向凝固浇注，3片叶片无杂晶，单晶完整性好，与数值模拟结果一致。

3 结论

(1) 固定拉速下，采用高速拉晶工艺G1获得的叶

片试件均存在杂晶缺陷, 缺陷主要位于叶片试件的缘板位置; 采用低速拉晶工艺G2能获得单晶完整性较好的叶片试件。固定拉速凝固组织数值模拟结果与定向凝固试验结果一致。

(2) G1和G2组抽拉速度条件下, 定向凝固过程设置点的冷却曲线数值模拟和测温试验结果基本吻

合, P3点温度值均小于P2点, 易导致杂晶产生。

(3) 简单阶梯拉速条件下, 叶片试件缘板仍有杂晶产生; 采用多级阶梯拉速能获得均匀的温度场, 有效抑制了试件缘板杂晶, 获得了单晶完整性好的叶片铸件。

参考文献:

- [1] 张龙飞, 燕平, 赵京晨, 等. 凝固方向对单晶高温合金枝晶组织的影响 [J]. 材料工程, 2011 (6): 67-76.
- [2] 张健, 王莉, 王栋, 等. 镍基单晶高温合金的研发进展 [J]. 金属学报, 2019 (9): 1077-1094.
- [3] 许庆彦. 熔模铸造过程数值模拟研究进展 [J]. 铸造, 2022 (7): 803-813.
- [4] 刘世忠, 李嘉荣, 唐定忠, 等. 单晶高温合金定向凝固过程数值模拟 [J]. 材料工程, 1999 (7): 40-42.
- [5] 卜昆, 李永毅, 董一巍, 等. 单晶叶片铸造过程中界面换热系数的确定 [J]. 铸造, 2009 (3): 225-228.
- [6] 杨振宇, 陈昊, 胡松松, 等. 单晶高温合金铸件结构对定向凝固过程中温度场的影响 [J]. 铸造, 2021 (3): 334-339.
- [7] 金涛, 李金国, 赵乃仁, 等. 抽拉速率对一种镍基单晶高温合金凝固参数和凝固组织的影响 [J]. 材料工程, 2002 (3): 36-39.
- [8] 史振学, 刘世忠, 李嘉荣. 抽拉速率对DD15单晶高温合金组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2020 (8): 803-807.
- [9] LIU G, LIU L, AI C, et al. Influence of withdrawal rate on the microstructure of Ni-base single-crystal superalloys containing Re and Ru [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509 (19): 5866-5872.

Effect of Withdrawal Rate on Solidification Process of Single Crystal Blades

ZHANG Hai-hua¹, ZHANG Hong², ZHANG Ling³, LIU Yong-na²

(1. Military Representative Bureau of Naval in Shenyang, Shenyang 110043, Liaoning, China; 2. Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China; 3. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd. CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

Taking the DD6 superalloy as the alloy material of single crystal blade specimen, the numerical simulation of the temperature fields, the mushy zones and the solidification microstructure growth of the single crystal blade specimens under the conditions of fixed, simple-step and multi-step withdrawal rates, and the directional solidification experiments were carried out. The results showed that the blades with good single crystal integrity were obtained by using of fixed low-rate withdrawal and multi-step withdrawal rates. The stray grains on the platforms of the blades were produced under the conditions of high-rate withdrawal and simple-step withdrawal rates. The results of numerical simulation of the solidification microstructure were basically in agreement with those of the directional solidification tests.

Key words:

single crystal blade; directional solidification; withdrawal rate; numerical simulation; stray grain