

DZ22B 合金定向叶片凝固过程数值模拟及试验验证

吴波¹, 牟昊², 罗勇³, 高雪峰², 伍晶晶⁴,
么丽娜², 孟杰², 储昭颢², 李金国²

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南株洲 412002; 2. 中国科学院金属研究所, 辽宁沈阳 110801;
3. 四川鸿舰重型机械制造有限公司, 四川攀枝花 617063;
4. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043)

摘要: 采用数值模拟与试验验证相结合的方法, 研究了DZ22B合金定向叶片凝固过程缺陷形成的原因及控制方法。结果表明, 晶粒生长路径增加及固液界面前沿温度梯度不足导致取向偏离; 叶片薄壁位置凝固应力和应变集中导致再结晶缺陷和尺寸超差问题。在此基础上提出了提高浇注温度及炉体加热温度、增加浇道缩颈结构、改变叶片排布方式的工艺优化方案。通过试验验证, 优化后的工艺方案可以改善叶片铸件的晶粒组织, 降低铸件尺寸变形、开裂及再结晶风险。最终使用该工艺方法生产出了质量合格的叶片铸件。

关键词: 镍基高温合金; 定向叶片; 数值模拟; 工艺优化; DZ22B合金; 凝固缺陷; 涡轮叶片

中图分类号: TG245; TG146.1⁺5; TG249.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0476-05

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0064

Numerical Simulation and Experimental Verification of the Directional Solidification Process of DZ22B Alloy Turbine Blade

WU Bo¹, MU Hao², LUO Yong³, GAO Xue-feng², WU Jing-jing⁴, YAO Li-na²,
MENG Jie², CHU Zhao-kuang², LI Jin-guo²

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, Hunan, China; 2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110801, Liaoning, China; 3. Sichuan Hongjian Heavy Machinery Manufacturing Co., Ltd., Panzhihua 617063, Sichuan, China; 4. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China)

Abstract: Combining numerical simulation with experimental verification, the causes and control methods of defects during the directional solidification process of DZ22B alloy turbine blade were investigated. The results show that the increase in grain growth paths and insufficient temperature gradient ahead of the solid-liquid interface led to orientation deviation; the concentration of solidification stress and strain at the thin-walled position of the blade resulted in recrystallization defects and dimensional deviations. Based on these findings, a process optimization scheme was proposed, including increasing the pouring temperature and furnace heating temperature, adding a sprue neck structure, and changing the blade arrangement. Experimental verification showed that the optimized process scheme could improve the grain structure of the blade castings, reduce dimensional deformation, cracking, or recrystallization risks. Finally, qualified blade castings were produced using this process method.

Key words: Ni-base single crystal superalloy; directionally solidified blade; numerical simulation; process optimization; DZ22B alloy; solidification defect; turbine blade

高温合金涡轮叶片是航空发动机中最关键的热端部件之一, 其制备能力及可靠性是一个国家精密制造业发展状况和综合国力的综合体现^[1-2]。在高温合金叶片的铸件毛坯制备过程中, 可以通过定向凝固技术消

除垂直于叶片主应力方向的横向晶界, 从而大大延缓叶片在后续服役过程中的裂纹形成^[3-5]。

DZ22B镍基高温合金由于具备较强的高温抗氧化、抗腐蚀性以及良好的铸造性能, 被广泛用于高温

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U2341267)。

收稿日期: 2026-03-03 收到初稿, 2026-04-02 收到修订稿。

作者简介: 吴波 (1986-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为航空发动机涡轮。E-mail: tllwb.forever@163.com

通信作者: 牟昊, 男, 助理工程师, 硕士, 电话: 024-23971758, E-mail: hmu@imr.ac.cn; 储昭颢, 男, 副研究员, 博士, 电话: 024-23971758, E-mail: zkchu@imr.ac.cn

引用格式: 吴波, 牟昊, 罗勇, 等. DZ22B 合金定向叶片凝固过程数值模拟及试验验证 [J]. 铸造, 2026, 75 (5): 476-480.

WU Bo, MU Hao, LUO Yong, et al. Numerical simulation and experimental verification of the directional solidification process of DZ22B alloy turbine blade [J]. Foundry, 2026, 75 (5): 476-480.

合金涡轮叶片的制备^[6]。然而,在定向叶片的制备过程中,可能出现晶粒组织缺陷、取向偏离度超差、应力集中导致铸件开裂或再结晶,以及应变量大导致铸件扭曲变形等缺陷^[7-10],在传统流程下进行工艺试验和优化,需要耗费大量时间及成本。随着近年来制造业的数字化转型升级,在叶片研制过程中使用数值模拟技术,通过量化且可视化的模拟结果调整铸造工艺,可以实现技术快速迭代,大幅度降本增效^[11-14]。因此,本研究通过数值模拟和试验验证相结合的方法,揭示了DZ22B合金燃气涡轮工作叶片的定向凝固过程缺陷形成机理,通过工艺优化,解决叶片柱状晶数量少、取向偏差大、应力应变过大的问题,实现了铸件的高质量制备。

1 数值模拟方法

1.1 模型建立

本研究以DZ22B合金定向燃气涡轮工作叶片为对象。铸件整体长度50 mm,其中叶身长度约25 mm,叶身内局部为空腔结构。要求柱状晶生长方向与主应力轴偏离角度不超过15°,叶身中部横截面上至少有5个柱状晶,单个晶粒宽度不得超出中弦的40%。研究初期设计了一种蜡模组合方案,如图1所示。模组底盘直径为150 mm,每组均匀分布6列叶片,每列2件首尾相连,叶尖向下,叶背朝外,叶盆朝内。每列下端连接一段10 mm×15 mm×25 mm的长方体引晶段,作为晶粒生长起始端。

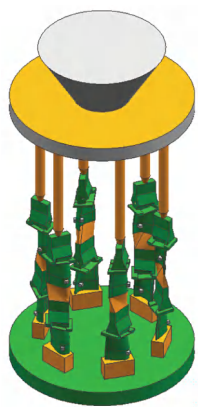


图1 蜡模组合原始方案

Fig. 1 Original scheme of wax patterns assembly

1.2 网格划分

将原始方案模型导入模拟软件,由于模组结构对称,为提高计算效率,模拟时使用1/3模组。在前处理模块对铸件、浇注系统及铸件内腔的陶瓷型芯分别进

行面网格划分、体网格划分,并在模组外部设置陶瓷型壳。模型前处理情况如图2所示。



(a) 模组网格划分 (b) 型壳生成 (c) 炉体导入

图2 有限元模型前处理

Fig. 2 Preprocessing of finite element models

1.3 边界条件

完成材料属性、定向凝固工艺等热物性参数和边界条件设置,合金材料DZ22B的化学成分如表1所示。上加热区温度设定为1 400 °C,下加热区温度设定为1 450 °C,合金浇注温度及型壳加热后的初始温度均为1 450 °C,浇注时长20 s,充型结束后静置60 s,然后开始抽拉。抽拉速率为4 mm/min。完成设置后进行模拟计算。

表1 DZ22B合金名义成分

Tab. 1 Nominal compositions of DZ22B alloy $w_B/\%$

Cr	Co	W	Al	Ti	Nb	B	C	Hf	Ni
9.0	10.0	12.0	5.25	2.0	1.0	0.015	0.14	0.95	余量

2 结果与讨论

2.1 铸造缺陷的形成机理

晶粒生长计算结果表明,在长方体引晶段上柱状晶较为致密,但取向偏离角度较大的晶粒未得到有效筛选。晶粒向上生长进入下部叶片,在该叶片中出现了晶粒夹角偏大、晶粒尺寸明显不均匀的现象。晶粒继续生长进入上部叶片,晶粒的尺寸和取向问题被进一步放大。如图3所示。

使用模拟软件,进一步对铸件定向凝固过程中的应力场分布情况进行模拟计算,结果如图4所示。可以看出在凝固收缩过程中,单列铸件由于整体长度方向

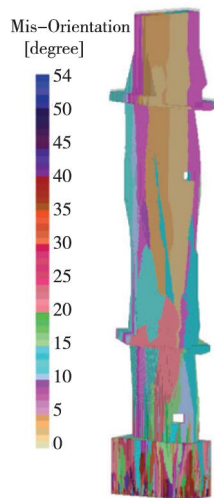


图3 原始工艺晶粒生长模拟结果

Fig. 3 Simulation result of grain growth for original process

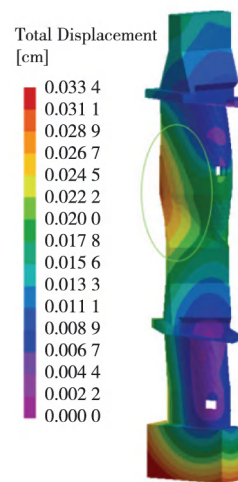


图5 原始工艺应变模拟结果

Fig. 5 Simulation result of strain distribution for original process

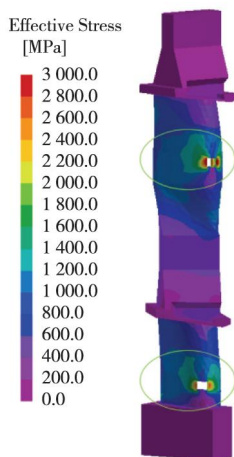


图4 原始工艺应力场模拟结果

Fig. 4 Simulation result of stress distribution for original process

收缩趋势大、2件叶片之间存在横截面尺寸变化、铸件及陶瓷型壳的收缩率不同等综合因素，导致铸件内部产生较大应力。该应力集中体现在每件叶片的最薄弱部位，即叶身中部型芯窗口附近，如图中标记位置所示。该现象可能导致铸件局部变形、开裂，也可能导致铸件热处理后应力得到释放，产生再结晶缺陷^[15]。

对铸件定向凝固过程中的应变分布情况进行模拟计算，结果如图5所示。可以看出，在单串两件叶片凝固收缩变形过程中，上部叶片出现了较大的应变，尤其是图中标记位置的上部叶片排气边由于尺寸较薄，叶片铸件在该位置极易出现扭曲变形，导致尺寸超差。

为对比验证数值模拟的可靠性，进行铸件毛坯试制。根据原始方案进行蜡模组合，使用耐火材料进行型壳涂制，型壳干燥并经过高温焙烧后放入定向凝固

设备，按照原始方案的工艺进行定向凝固。铸件冷却后进行脱壳、脱芯、热处理，得到铸件毛坯。

经检验，铸件毛坯的主要问题为晶粒尺寸大、晶粒偏离角度大。每列下部叶片晶粒相对致密，尺寸较小，但由于不同晶粒间偏离角度大导致分布不均匀，造成晶粒生长至上部叶片时，偏离现象被进一步放大，导致叶片铸件报废，如图6所示。此结果比较符合数值模拟的晶粒生长结果。此外，每列上部叶片铸件均存在不同程度的扭转现象，导致尺寸出现超差，也与应变模拟结果相符。说明数值模拟在此算例中具有一定的准确性和可靠性。



图6 铸件晶粒显示

Fig. 6 Morphologies of casting grains

2.2 试验验证及缺陷控制

结合原始方案算例的数值模拟过程及理论分析，晶粒偏离角度问题的诱发原因之一是凝固前沿的温度梯度不足，导致晶粒沿温度梯度的方向生长时出现取向偏移；原因之二是每列2件叶片首尾相连，生长距离过长，且柱状晶的向上生长通道尺寸复杂多变，易放大晶粒取向偏移现象，导致上部叶片晶粒状况相对更差^[3]。同时，每列2件叶片的结构也导致了应变量过

大，加剧了应力集中现象。

基于以上分析，将浇注温度及炉体下区加热温度提高为1 500 ℃，炉体上区加热温度提高为1 450 ℃，以提高纵向温度梯度，同时将蜡模组合方案更改为每列1件叶片。为保持生产出品率，将每组6列更改为每组12列，排气边朝外。为保证叶片之间的最小距离，将长方体引晶段的高度15 mm更改为15 mm/30 mm两种高度错位排列。同时，引晶段的适当增高也有利于晶体取向得到更充分的筛选^[16]。此外，将叶片榫头与其上方浇注系统的连接处调整为缩颈结构，从而分散部分应力。如图7所示。

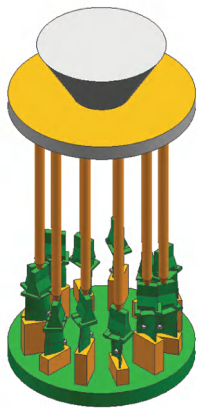


图7 蜡模组合优化方案

Fig. 7 Optimization scheme for wax patterns assembly

对优化后的铸造工艺进行数值模拟，相邻两件叶片的晶粒生长结果如图8所示。对比图3可以看出，优化后的柱状晶相比原始方案晶粒生长方向更加垂直，晶粒分布也相对更加均匀，说明晶粒情况得到有效改善。

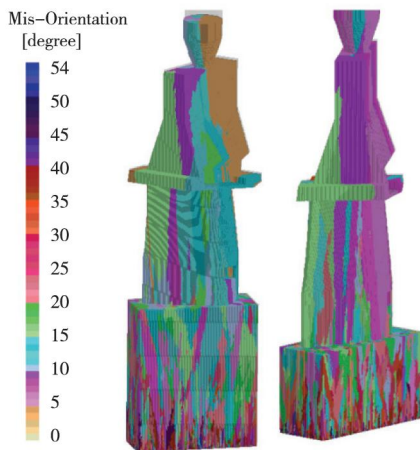


图8 工艺优化后晶粒生长模拟结果

Fig. 8 Simulation result of grain growth after optimizing process

对优化后的工艺方案进行应力场数值模拟，相邻两件叶片的应力分布结果如图9所示。对比图4可以看出，优化后的铸件整体应力水平大幅降低，且在榫头与浇道连接的缩颈位置存在明显的应力集中，说明铸件凝固的应力被部分转移至了尺寸余量位置，如图9中的标记位置所示，通过优化工艺显著降低了叶片型芯窗口位置的应力集中，避免该位置再结晶缺陷形成。

对优化后的工艺方案进行应变场数值模拟，相邻两件叶片的应变场计算结果如图10所示。对比图5可以看出，优化后的铸件整体应变量大幅降低，说明优化后的工艺可以提高铸件尺寸精度。

按照优化工艺熔铸铸件，热处理后的铸件晶粒显示如图11所示。可以看出，铸件的晶粒组织得到明显优化。

检验筛选出晶粒组织合格的铸件后，经过荧光渗透检验、X射线探伤检验、尺寸检验等，即可得到合格铸件。该铸件在后续检验中无表面或内部缺陷，无再

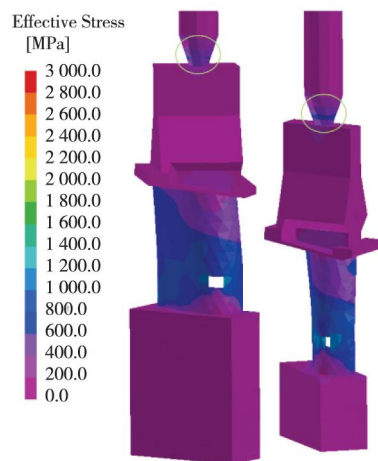


图9 工艺优化后应力场模拟结果

Fig. 9 Simulation result of stress field after optimizing process

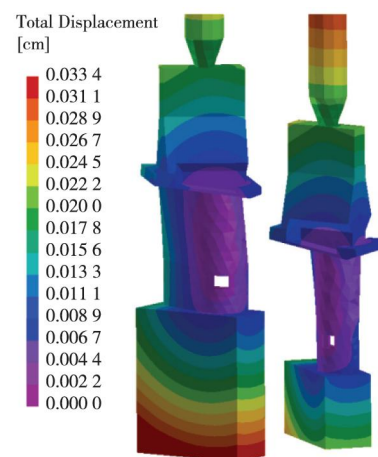


图10 工艺优化后应变场模拟结果

Fig. 10 Simulation result of strain distribution after optimizing process

结晶现象，且尺寸良好，可正常生产出质量合格的叶片毛坯。



图11 工艺优化后铸件晶粒显示

Fig. 11 Morphologies of casting grains after optimizing process

参考文献:

- [1] 胡壮麒, 刘丽荣, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金的发展 [J]. 航空发动机, 2005, 31 (3): 1-7.
- [2] 刘维伟. 航空发动机叶片关键制造技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2016, 59 (21): 50-56.
- [3] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [4] VERSNYDER F L, BARLOW B R, SINK W L, et al. Directional solidification in the precision casting of gas-turbine part [J]. Modern Casting, 1967, 52: 68-75.
- [5] 张迈, 王尧, 吴雨萌, 等. 基于显微组织特征的定向凝固高温合金涡轮叶片服役温度评价方法 [J]. 铸造, 2025, 74 (7): 915-923.
- [6] 李振锋, 胡兵, 钟文惠, 等. DZ22B高温合金定向凝固叶片铸造缺陷的形成激励研究 [J]. 航空制造技术, 2020, 63 (16): 45-49.
- [7] 洪耀武, 孙长波, 康进武, 等. 定向凝固简化空心叶片热应力数值模拟 [J]. 铸造, 2011, 60 (8): 759-764.
- [8] POLLOCK T M, MURPHY W H, GOLDMAN E H, et al. Grain defect formation during directional solidification of nickel base single crystals [C]// Superalloys, 1992: 125-134.
- [9] ZHOU Y Z. Formation of stray grains during directional solidification of a nickel-based superalloy [J]. Scripta Materialia, 2011, 65 (4): 281-284.
- [10] WERNER F, SCHOLZ F, GIT P, et al. Effects of single crystal growth techniques on dendritic microstructures and small angle orientation defects in Ni-based superalloys [R]. Bamberg, Bavaria: DGM, 2022.
- [11] 陈煌. 计算机模拟辅助技术在铸造工艺设计中的应用 [J]. 铸造, 2023, 72 (10): 1387.
- [12] 马慧文, 苗辉. 涡轮温度场仿真技术发展方向研究 [J]. 仿真, 2021 (1): 48-51.
- [13] 李澳奇, 孙逊, 荆高扬, 等. 基于元胞自动机法的高温合金凝固组织数值模拟研究进展 [J]. 铸造, 2025, 74 (5): 578-587.
- [14] 任能, 杨绿伟, 李军, 等. 高温合金定向凝固数值模拟研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (10): 1336-1350.
- [15] 熊炜. 镍基单晶高温合金定向凝固变形的数值模拟及其再结晶的实验研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [16] 马德新, 李侣, 孙洪元, 等. 选晶器起始段尺寸对高温合金单晶铸件晶向的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (9): 1193-1198.

3 结束语

本研究针对一种DZ22B合金定向晶燃气涡轮工作叶片，将数值模拟与工艺试验相结合，进行了缺陷形成分析及工艺优化，进一步保证了铸件质量。

(1) 通过提高温度梯度、每列2件叶片减少为1件，优化了叶片晶粒组织。

(2) 结合榫头与浇道连接处的缩颈结构处理，优化了应力集中和应变量大现象，避免了铸件尺寸变形、开裂或再结晶现象。

(3) 通过改变叶片排布方法，保证了铸件生产的出品率。

(4) 使用优化的工艺方法生产出质量合格的叶片毛坯，证明了优化后工艺的可行性。