

涡轮后机匣支板熔模铸造工艺数值模拟及优化

杨新娣¹ 田智星² 路涵博² 杨建鑫² 张志坤² 谢锦丽^{1,3}

(1.北京钢研高纳科技股份有限公司; 2.河北钢研德凯科技有限公司;
3.钢铁研究总院高温合金新材料北京市重点实验室)

摘 要 针对涡轮后机匣支板熔模铸造工艺,利用 ProCAST 软件对铸件充型过程、型腔内压力演变、铸件缩松、缩孔缺陷等方面进行模拟,分析了缺陷形成原因。采用改进排气通道、调整支板浇注位置与时长、铸件凝固顺序等措施优化工艺,同时进行数值模拟。结果表明,优化工艺的充型过程稳定、型腔内未形成“憋气”现象,支板内无缩松、缩孔缺陷。经浇注验证,铸件质量满足 ASTM E192 标准要求。

关键词 涡轮后机匣支板;熔模铸造;数值模拟

中图分类号 TG249.5;TG27 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation and Optimization of Investment Casting Process of Turbine Rear Frame Strut

Yang Xindi¹, Tian Zhixing², Lu Hanbo², Yang Jianxin², Zhang Zhikun², Xie Jinli^{1,3}

(1.Gaona Aero Material Co., Ltd.; 2.Dekai Intelligent Casting Co., Ltd.; 3.Beijing Key Laboratory of Advanced High Temperature Materials, Central Iron and Steel Research Institute)

Abstract: In view of the investment casting process of turbine rear frame strut, the ProCAST software was adopted to simulate the filling process, cavity pressure evolution, and shrinkage cavity defects and the causes of the defects was analyzed. On this basis, the process was optimized by improving the exhaust passage, adjusting the pouring position, pouring time of the strut, and the solidification sequence of the casting, and the numerical simulation was carried out. The results indicate that the filling process of the optimized process is stable without “suffocation” phenomenon in the cavity and shrinkage and cavity defect in the strut. The actual casting verification demonstrates that the casting quality meets the ASTM E192 standard.

Key Words: Turbine Rear Frame Strut, Investment Casting, Numerical Simulation

涡轮后机匣因承载航空发动机的推力与振动载荷,是发动机承力体系内不可缺少的部件,其与涡轮盘、叶片、涡轮轴称为航空发动机 4 大关键部件^[1,2]。目前,涡轮后机匣结构件逐渐向大型化、复杂化、薄壁化等方向发展,其设计直径超过 1 400 mm,厚度不超过 2 mm 的薄壁面积占整体结构件表面积的 80% 以上,因而很难通过精密铸造工艺制造^[3]。因此,采用“机匣+支板”分体的熔模铸造工艺,同时借助焊接工艺完成大型复杂薄壁涡轮后机匣结构件制造^[4]。关于制备尺寸较小的复杂薄壁机匣已取得一定成果,可为“机匣+支板”分体式铸造过程中的机匣制备提供参考。但是,对于涡轮后机

匣支板的制备则鲜有报道。因此,如何制备冶金质量优异且检验合格的涡轮后机匣支板已成为亟待解决的问题。

针对上述问题,若采用传统的铸造方法,需经“经验试制-缺陷分析-工艺优化”多道流程,方能获得较为合理的工艺,这很难满足高品质和短交货期的市场要求。借助数值模拟技术探究铸造工艺流程,不仅可结合模拟结果中合金液流动过程、铸件凝固顺序、宏微观缺陷等预测信息对工艺进行多轮次迭代优化,进而明确相关技术参数与控制要点,还能大幅度缩短产品的研发周期,降低工程技术成本,提高设备利用率等^[5~8]。因此,本

收稿日期:2021-05-13;修改稿收到日期:2021-06-17
基金项目:国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1708253);国家重点研发计划资助项目(2017YFB0702901)
第一作者简介:杨新娣,女,1975 年出生,工程师,北京(100083),E-mail: yangxindi@cisri-gaona.com.cn
通信作者:谢锦丽,女,1983 年出生,副教授,北京(100083),E-mail: xiejinli@cisri-gaona.com.cn
引用格式:杨新娣,田智星,路涵博,等. 涡轮后机匣支板熔模铸造工艺数值模拟及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 184-1 188.
YANG X D, TIAN Z X, LU H B, et al. Numerical simulation and optimization of investment casting process of turbine rear frame strut[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9): 1 184-1 188.

课题先分析涡轮后机匣支板的结构特性,然后利用 ProCAST 软件对涡轮后机匣支板熔模铸造工艺进行数值模拟,剖析合金液的流动状态、型腔内压力分布演变、铸件形成缺陷位置等模拟信息,并以此结果进行工艺优化,从而制定较为合理的工艺方案,最终获得高品质无冶金缺陷的合格铸件。

1 支板结构特性分析

涡轮后机匣支板材质为 K4169 高温合金,其结构由承重吊耳、浮板及叶片 3 部分组成,轮廓尺寸为 347 mm×286 mm×382 mm,结构三维图见图 1。承重吊耳的厚度为 31 mm,此部位为铸件的最厚区域,需设置合理的冒口或浇口,避免因热节而形成缩松、缩孔缺陷。浮板呈内凹型,最大深度为 64 mm,厚度在 2.5~8.0 mm 之间,此区域需避免浇注时因“憋气”而导致铸件产生浇不足^[9]。

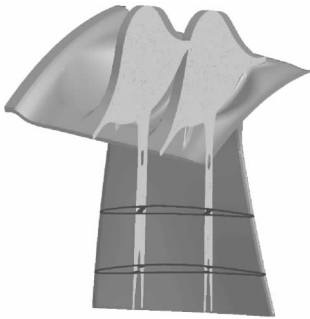


图 1 支板结构三维图

Fig.1 Three-dimensional diagram of strut structure

此外,叶片由不规则曲面组成,厚度为 3 mm,其内部包含两根加强筋,每根加强筋上包含一个 10 mm×10 mm 的通孔,且叶片与浮板所成夹角约为 67°,此部分应考虑与浮板的连通性、合理控制合金液的流入速率,避免叶片底端产生浇不足、缩松或缩孔等缺陷。

2 初始工艺模拟分析

2.1 支板模型建立

基于对支板结构的分析,先利用 ProCAST 软件对支板铸件完成初始浇注系统的绘制,然后建立相对应的有限元模型,其初始浇注系统见图 2。由于铸件与型壳在同一界面存在温度差,为确保模拟结果的准确性与区别界面两端的温度,将铸件与型壳的界面节点进行双重处理。

此外,为了表征铸件充型过程中是否存在“憋气”现象,引入型腔内压力演变的分布状态,故在模拟参数设置中,将一个时间步长内流体的能量方程、压力方程、动

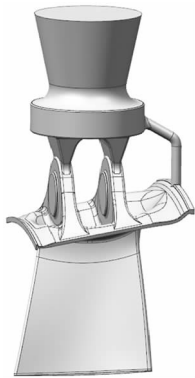


图 2 初始浇注系统

Fig.2 Initial gating system

量方程进行迭代耦合,并选用动量守恒模型对铸件的充型过程进行求解计算。同时,激活气体滞留模块与压力设定值模块,通过计算铸件充型过程所形成的压力值与压力设定值的差值,将两者的绝对压力转化成参考压力,即型腔内的压力演变状态。最后,对支板模拟方案进行模拟参数设置,其结果见表 1。

表 1 主要模拟参数设置

Tab.1 Settings of main simulation parameters

铸件 材质	型壳 材质	冷却 方式	型壳 厚度/ mm	浇注 温度/ ℃	型壳 温度/ ℃	炉膛 尺寸/ m	界面传热系数/ (W·m ⁻² · K ⁻¹)	充型 比例/ %
K4169	莫来 石	真空 冷却	8	1 450	800	φ2×2.4	500	100

2.2 支板充型及型腔压力分析

从充型过程与型腔压力演变对支板初始浇注系统的设计进行分析,这样不仅可有效表征合金液在铸件内的流动状态,减少紊流,还可以避免因型腔压力分布不均或局部区域压力过大,使浇注系统内因“憋气”而引起铸件缺陷的问题。同时,以支板充型过程的流动分析为基础,增加型腔压力演变分布状态分析,既对初始支板浇注系统设计的合理性进行双重评判与补充,又为后续支板浇注系统的优化提供参考,其支板充型过程与型腔压力演变的数值模拟结果分别见图 3 和图 4。

从图 3 和图 4 可以看出,当充型 20%时,合金液沿两个承重挂耳内侧经浮板流入叶片,型腔内的压力仅由叶片左侧窄区域与外部相连,此时合金液尚未到达叶片底部区域,浮板与叶片连接处的大部分区域已被合金液充满,叶片内合金液的平均流速约为 1.6 m/s,型腔内的压力分布正常,其压力值均小于 0.07 MPa。充型 40%时,叶片与承重挂耳 90%以上及浮板 80%以上的区域全部充满,叶片与承重挂耳未充满区域内的型腔压力值较高,其压力值均大于 0.22 MPa,这表明未充满区域已存在较为严重的“憋气”;浮板未充满区域内的型腔压力值约为 0.15 MPa,已显露出“憋气”趋势,且叶片与

浮板连接处附近区域的合金液的平均流速高达 2.2 m/s。

当充型 60% 时, 支板主体部分仅剩浮板处的一块区域尚未完全充型, 且未充满区域内的型腔压力值大于

0.27 MPa, 这表明此区域存在极为严重的“憋气”。虽然充型 80% 时, 合金液充满支板主体区域, 但这是受模拟参数中充型与软件内部计算设置等因素所影响, 其型腔压力值大于 0.22 MPa 区域仍存有因“憋气”而导致

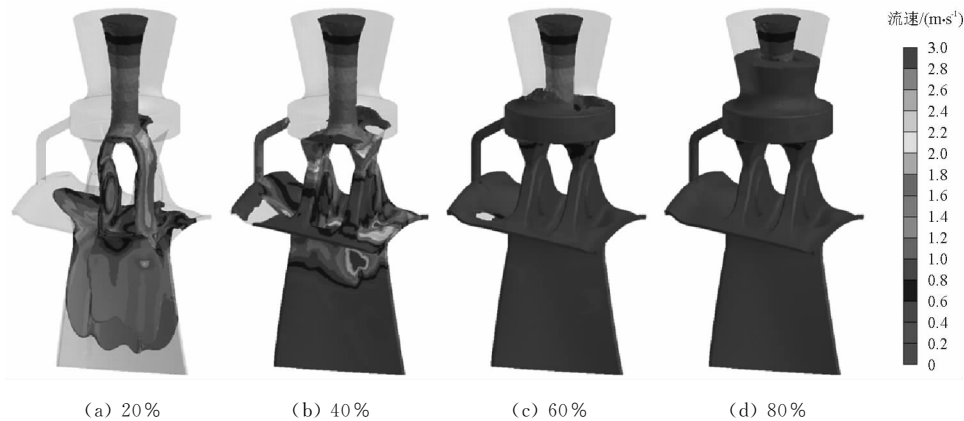


图 3 支板充型过程数值模拟结果
Fig.3 Numerical simulation results of filling process

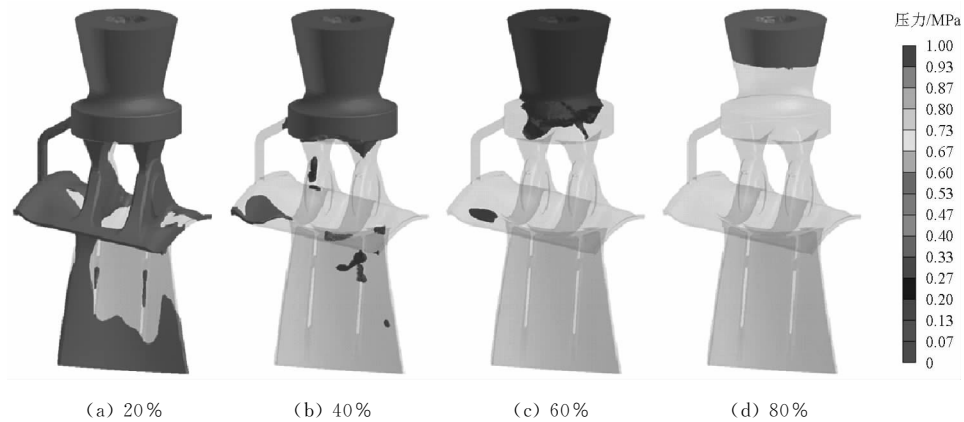


图 4 型腔压力演变数值模拟结果
Fig.4 Numerical simulation results of cavity pressure evolution

的铸件浇不足。

2.3 缺陷分析

图 5 为支板缺陷的数值模拟结果。可以看出, 叶片的边缘、中心、加强筋区域均存在不同程度的缩松、缩孔, 中心区域的缺陷尤为突出。这是因为在充型过程

中, 合金液快速将叶片区域充满, 而边缘与薄壁区域的冷却速率大于中心与加强筋区域, 导致中心与加强筋区域凝固时仅有少量合金液补充, 再结合叶片与浮板连接处附近区域的合金液流速波动较大, 极易形成紊流区域影响叶片内合金液的温度梯度分布、凝固顺序等, 致使叶片产生缩松、缩孔^[10]。

此外, 在浮板区域存在 2 处缩松、缩孔, 这是由于在充型过程中合金液的流速波动较大且分布无规律, 致使浮板因合金液紊流而形成缩松、缩孔。承重挂耳区域由于顶部存在较大的补缩区域, 而未形成缩松、缩孔。

3 优化工艺模拟分析

3.1 优化工艺方案

基于数值模拟结果与分析可知, 初始支板铸造工艺存在较为严重的充型憋气、合金液紊流、铸件缩松、缩孔缺陷问题, 因此对初始铸造工艺进行优化。

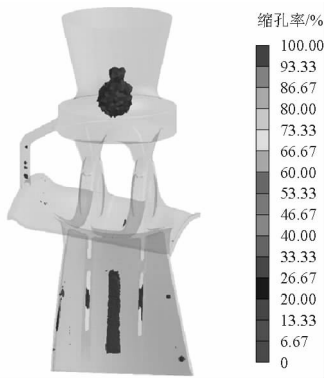


图 5 支板缺陷数值模拟结果
Fig.5 Numerical simulation results of strut defects

首先,将原有浮板区域的 1 处排气通道改造为 3 处,并将浇注时长调整为原初始方案的 1.5 倍;砂箱尺寸为 440 mm×360 mm×600 mm;随后,将支板以 3 处排气通道所成平面的法相方向旋转 15°放置于砂箱内,并在叶片中心与加强筋两侧添加 20 mm 厚铁砂;最后,利用 ProCAST 软件完成上述优化方案的有限元模型建立与模拟参数设置,优化浇注系统见图 6。

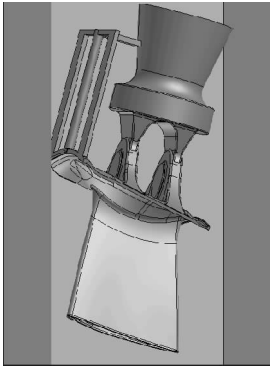


图 6 优化浇注系统
 Fig.6 Optimization of gating system

3.2 模拟结果分析

图 7~图 9 分别为优化后支板充型过程、型腔压力演变及支板缺陷的数值模拟。从图 7 和图 8 分析可知,当充型 20% 时,合金液沿承重挂耳单侧区域经浮板流入叶片,未充型叶片部分与外部相连区域面积远大于初始工艺。此时,型腔内各处压力分布均相同且正常,其值均小于 0.7 MPa;叶片内合金液的平均流速仅为初始工艺的 56%。随着充型达到 40% 时,叶片部分已完成充型,浮板与排气通道相连附近区域及一只承重挂耳未被合金液充满,另一只承重挂耳基本充满,此时型腔内各处的压力值分布仍小于 0.7 MPa,未出现“憋气”现象,且浮板部分的合金液流速分布较为稳定,其平均流速仅为初始工艺的 27%。

当充型 60% 时,支板主体部分已全部充型,仅剩排气通道与补缩浇冒口未被充满。此时,型腔内的压力值均在 0.7~1.3 MPa 内,虽相比于前期充型阶段有所提高,但所处区域为排气通道与补缩冒口,其影响可忽略不计,随后合金液继续平稳充型直至结束。通过图 9 可

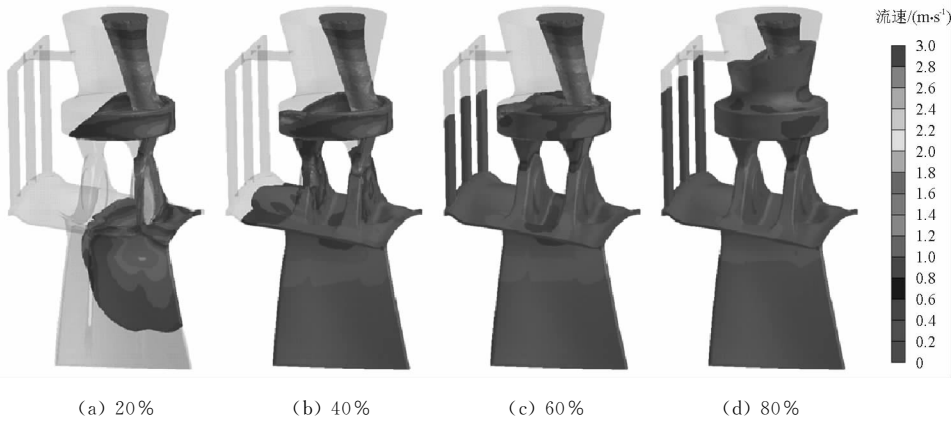


图 7 优化后支板充型过程数值模拟结果
 Fig.7 Numerical simulation results of filling process of optimized strut

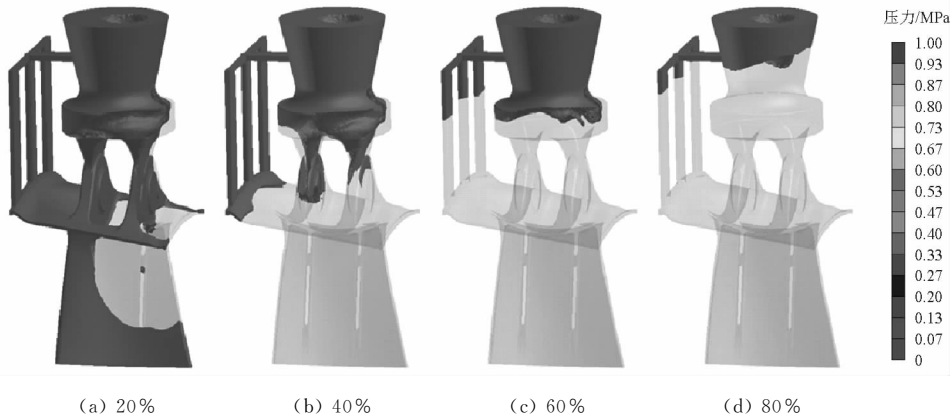


图 8 优化后型腔压力演变数值模拟结果
 Fig.8 Numerical simulation results of cavity pressure evolution after optimization

知,支板整体部分未发现缩松、缩孔,仅在排气通道与补缩区域有缩松、缩孔产生。由此可见,优化后工艺的充

型过程稳定、合金液流速平缓、型腔内未形成“憋气”,解决了支板在初始工艺中的缩松、缩孔缺陷。

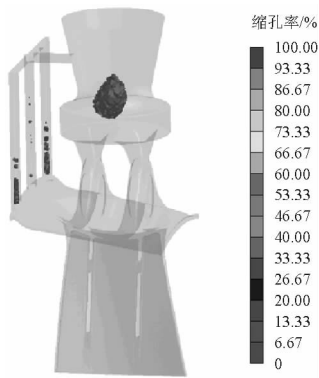
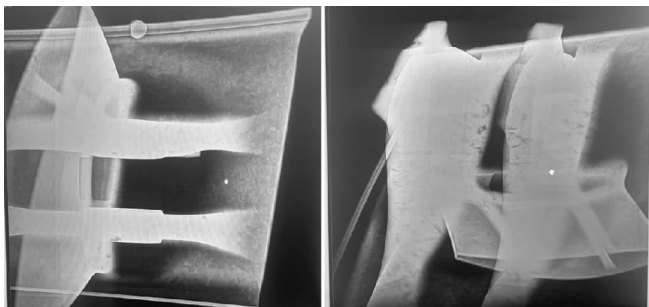


图 9 优化后支板缺陷数值模拟结果

Fig.9 Numerical simulation results of optimized strut defects

4 生产验证

基于数值模拟优化后涡轮后机匣支板的铸造方案，采用熔模铸造生产，完成首批 5 件试件。利用数字实时成像检测技术对全部试制件内部进行探伤检测，其结果均满足 ASTM E192 标准中气孔、夹杂、缩松等要求，见图 10。这表明涡轮后机匣支板铸件检验合格，验证了数值模拟计算与结果分析的准确性。此后，再次采用熔模铸造工艺，小批量制备了 40 件支板，其探伤检测结果均满足标准要求。



(a) 横向

(b) 纵向

图 10 数字实时成像检测系统的成像结果

Fig.10 Images of digital radiographic detection systems

5 结 语

(1)利用 ProCAST 软件对涡轮后机匣支板初始熔模铸造工艺进行数值模拟，通过流动、压力及缺陷等模拟，判断初始工艺存在较为严重的合金液紊流与型腔憋气现象，及支板形成缩松、缩孔缺陷。通过添加砂箱与铁砂、改造排气通道、设置支板摆放位置、调整浇注时长等措施，对初始涡轮后机匣支板熔模铸造工艺进行优化与数值模拟，获得较为合理的熔模铸造工艺。

(3)基于优化后涡轮后机匣支板的熔模铸造工艺，分别进行了首批试制与小批量生产，其探伤结果均满足

ASTM E192 标准要求。

参 考 文 献

- [1] 王旭,王世安,张文平,等.燃气轮机涡轮后机匣温度场及应力分析[J].热能动力工程, 2004, 19(6): 558-561.
- [2] 冯亚辉,刘火星.涡轮后机匣流场性能实验研究[J].工程热物理学报, 2017, 38(5): 941-949.
- [3] 王清,罗鸿飞,佟健,等. 2 m 级大尺寸高温合金机匣精密成形工艺研究[J].精密成形工程, 2021, 13(1): 121-126.
- [4] 熊逸博,周杰,何雄,等.基于数值模拟的机匣锻模堆焊再制造分析[J].热加工工艺, 2017, 46(9): 157-159.
- [5] 胡玥,雷四雄,胡兵,等.轴承机匣熔模精铸过程模拟[J].铸造技术, 2020, 41(7): 672-676.
- [6] 王晋忠,杨国超,杨小建,等.基于 ProCAST 的座圈熔模铸造工艺数值模拟及优化[J].热加工工艺, 2021, 50(3): 64-66.
- [7] DAI H J, DONG H B, SOUZA N D, et al. Grain selection in spiral selectors during investment casting of single-crystal components: Part II. Numerical modeling[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2011, A42: 3 439-3 446.
- [8] NASTAC L. Numerical modeling of solidification morphologies and segregation patterns in cast dendritic alloys[J]. Acta Mater., 1999, 47: 4 253-4 262.
- [9] 韩大平,杨武,彭志江,等.基于 ProCAST 的大型薄壁机匣件整体熔模铸造工艺研究[J].铸造, 2013, 62(10): 979-982.
- [10] 杨小建,张怀章,杨国超,等.喷嘴本体的熔模铸造工艺及模拟计算[J].热加工工艺, 2021, 50(7): 66-68.

(编辑:刘卫)

订正启事

我刊 2021 年第 41 卷第 6 期文章《湿法工艺对二次铝灰无害化脱氮的影响》，作者为贺永东,李颜凌,马斌,孙小涵,何新光,高翔等,其中第 382 页图 6 中两条曲线标记错误,现更正如下。

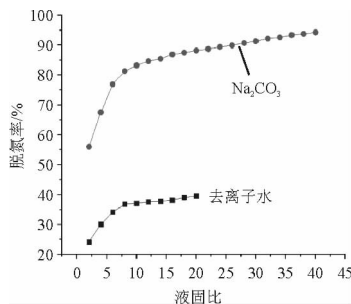


图 6 液固比对二次铝灰脱氮率的影响

Fig.6 Effects of liquid-solid ratio on nitrogen removal rate of secondary aluminum ash

(本刊编辑部)