

高温合金薄壁件铸造工艺优化设计

王树森¹, 邹明科², 王亮², 徐福涛², 韩阳², 张吉², 么丽娜², 王猛²

(1. 中国人民解放军海军装备部驻沈阳地区军事代表局驻鞍山地区军事代表室, 辽宁鞍山 114001;

2. 中国科学院金属研究所师昌绪材料创新中心, 辽宁沈阳 110016)

摘要: 高温合金缘板铸件曲面形状复杂, 壁厚不均匀, 易产生缩孔、显微疏松、气孔等铸造缺陷。本文针对高温合金缘板铸件在研制时遇到的主要问题, 采用华铸CAE铸造分析软件对顶注和侧注两种工艺进行模拟, 发现采用侧注充型工艺可有效防止铸件的显微疏松、气孔、冷隔、浇不足等缺陷。并对模拟优化后的工艺进行了验证, 结果表明, 采用侧注充型方案实现了缘板薄壁结构件的充型完整性和内部无超标冶金缺陷。

关键词: 高温合金薄壁件; 熔模铸造; 铸件缺陷; 工艺优化; 华铸CAE

高温合金导向叶片是航空发动机和燃气轮机高温部件的重要组成部分^[1]。随着发动机涡轮温度的不断提高, 导向叶片材料经历了从等轴晶、柱状晶到单晶的发展历程^[2]。等轴晶叶片的铸造工艺技术较为成熟, 生产成本比单晶高温合金叶片低, 具有一定优势。本研究所设计的高压涡轮导向叶片结构较为复杂, 需要采用分体铸造, 叶身采用定向柱晶材料, 缘板采用等轴晶材料, 再通过焊接组合成导向叶片。其中缘板铸件曲面形状复杂, 是一种薄壁结构铸件, 且壁厚不均匀。由于这一结构特点, 该类铸件生产工艺难度大。因此, 需要对该铸件的铸造工艺进行数值模拟, 以缩短铸件的研发周期和成本。

本文采用华铸CAE软件对缘板铸件的充型凝固过程进行模拟, 根据模拟结果对浇注系统进行改进及优化, 以解决缘板类薄壁结构件的充型问题, 提高生产合格率。

1 工艺设计

1.1 工艺方案

高温合金缘板铸件尺寸精度要求高, 表面光洁度要求高, 需采用熔模精密铸造工艺进行无余量铸造。所用合金材料为K40M钴基高温合金。按该铸件的特点, 初步的工艺设计采用了顶注式浇注方案。首先采用中温蜡压制缘板铸件蜡模, 再按顶注式浇注系统组模, 见图1a。浇注系统设计时考虑了薄壁铸件的充型、厚大部位的补

作者简介:

王树森(1982-), 男, 硕士, 主要从事舰船材料研究工作。E-mail: 446757808@qq.com

通讯作者:

张吉, 男, 硕士, 工程师。E-mail: jizhang@imr.ac.cn

中图分类号: TG245

文献标识码: B

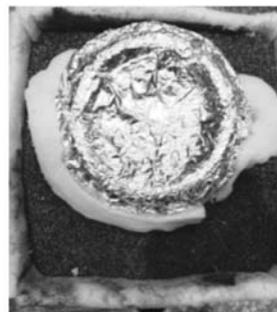
文章编号: 1001-4977(2023)11-1463-04

收稿日期:

2023-05-29 收到初稿,
2023-09-12 收到修订稿。



(a) 组模



(b) 埋砂

图1 工艺方案

Fig. 1 Technological design

缩, 便于制壳、后续的切割等。组好模组后进行型壳制备, 型壳面层涂料为EC95粉+硅溶胶, 型壳涂层数为5层, 型壳干燥后进行脱蜡和焙烧。焙烧后的型壳对冒口进行包棉、埋砂, 见图1b。随后将型壳进行焙烧, 型壳焙烧温度为1 050 ℃。K40M钴基合金采用真空熔炼, K40M钴基高温合金的固相线温度是1 345 ℃, 液相线温度是1 395 ℃^[7], 凝固结晶温度范围达到50 ℃, 在凝固过程中容易出现缩孔、疏松等缺陷, 薄壁位置容易出现冷隔、浇不足等缺陷。结合K40M合金特点, 选定浇注参数如下。浇注温度: 1 460 ℃, 精炼温度: 1 550 ℃。铸件经切割、打磨、抛修后进行化学成分、晶粒度、力学性能、无损检验及尺寸检验。

1.2 工艺方案研制中存在的主要问题

采用上述工艺方案生产的缘板铸件进行检验的

过程中发现铸件上出现不同程度的局部缩孔、疏松问题, 严重影响了铸件的合格率。根据X射线检测结果, 缺陷的位置主要集中在远离浇道处的凸台及叶片接入孔位置, 见图2。对出现显微疏松的位置进行局部解剖, 显微疏松形貌见图3, 可以发现在铸件局部位置形成了几乎连续的内部疏松, 不满足该铸件内部质量要求。

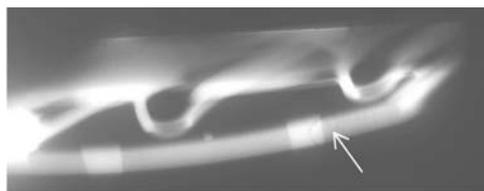
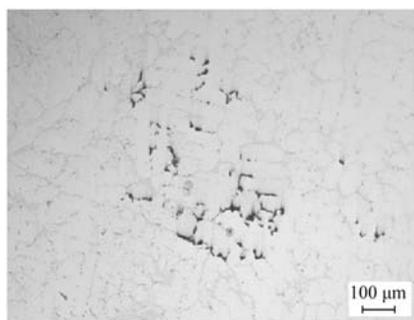
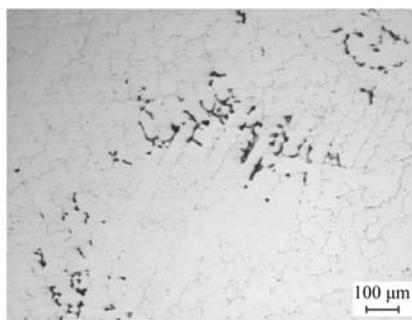


图2 缺陷出现的位置

Fig. 2 The location of the defect on the X-ray film



(a) 视场1



(b) 视场2

图3 铸件显微疏松

Fig. 3 Microporous morphology of castings

2 铸件工艺的模拟及优化

2.1 顶注工艺方案模拟及预测

由于采用初步的工艺方案铸件出现了内部疏松超标的问题, 因此采用华铸CAE铸造分析软件对缘板铸件顶注工艺方案进行充型和凝固过程数值模拟计算。铸件材质为K40M高温合金, 浇注温度为1 460 ℃, 型壳焙烧温度为1 050 ℃, 见图4。

从数值模拟结果可以看出, 顶注的组合方案在远离浇道的位置存在大量的缩松缺陷(图4), 主要原因是远端区域补缩不足造成的。图5为铸件冷却过程中的温度场分布图。从模拟结果可以看出, 缘板的凝固顺序是从凸台一侧开始向另一侧凝固。铸件的整体凝固是按照缘板、冒口、横浇道、浇口杯顺序凝固。

2.2 优化工艺方案

为了对缘板铸件的疏松进行控制, 优化工艺方案, 将原方案调整侧注组合方案, 对易出现疏松的位置增加补缩。同样采用华铸CAE铸造分析软件对缘板

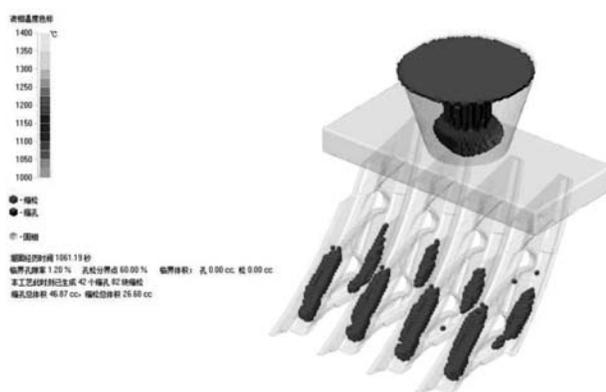


图4 顶注方案缩松预测结果

Fig. 4 Prediction results of shrinkage porosity with the top gating system

铸件侧注工艺方案进行充型和凝固过程数值模拟计算。铸件材质仍选用K40M高温合金, 浇注温度为1 460 ℃, 型壳焙烧温度为1 050 ℃。模拟结果见图6-7。

从图6数值模拟结果可以看出, 侧注组合方案优于顶注的组合方案, 结果显示该组合方案缩松缺陷明

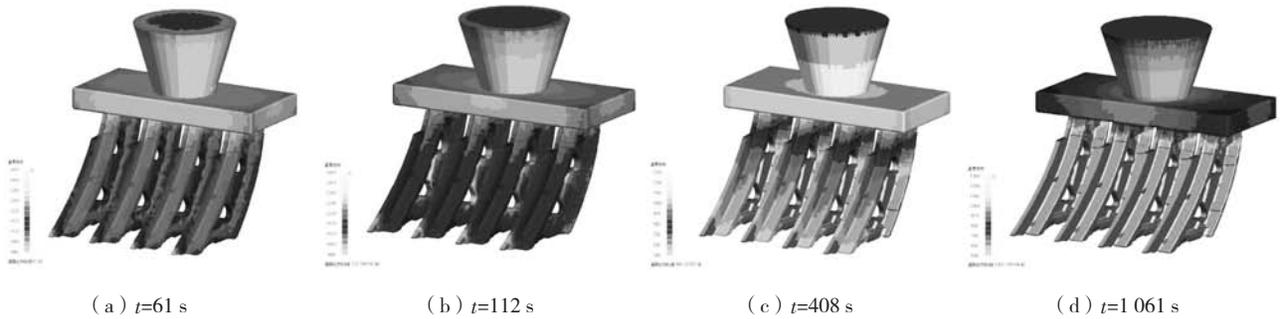


图5 铸件冷却过程中的温度场分布图

Fig. 5 Temperature field distribution diagram during casting cooling process

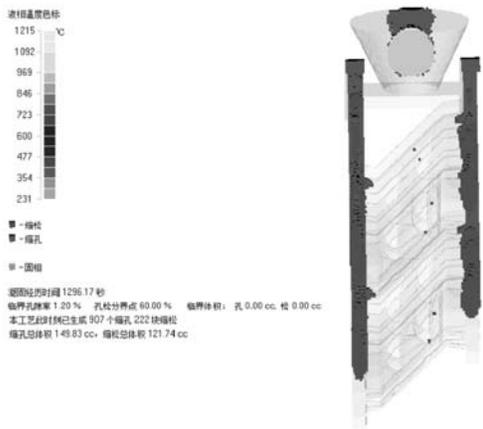


图6 侧注方案缩松预测结果

Fig. 6 Prediction results of shrinkage porosity with the side gating system

显减少，这表明采用侧注两端补缩可有效控制疏松缺陷。从图7温度场模拟结果可以看出，缘板从中间区域开始向凸台两侧凝固冷却，最后凝固的是厚大的两侧。铸件整体按照缘板中部、缘板两端、冒口、横浇道、浇口杯顺序凝固冷却，基本实现了顺序凝固。

根据华铸CAE铸造分析软件对两种方法的模拟结果，可以调整蜡模组合方案，采用优化后的侧注的组合工艺方案进行试制。

3 研制验证及效果

采用华铸CAE铸造分析软件优化设计的工艺方案，试制了8件缘板铸件，铸件外型完整。铸件经X射线检测合格，未见内部缺陷超标，如图8所示。对侧注

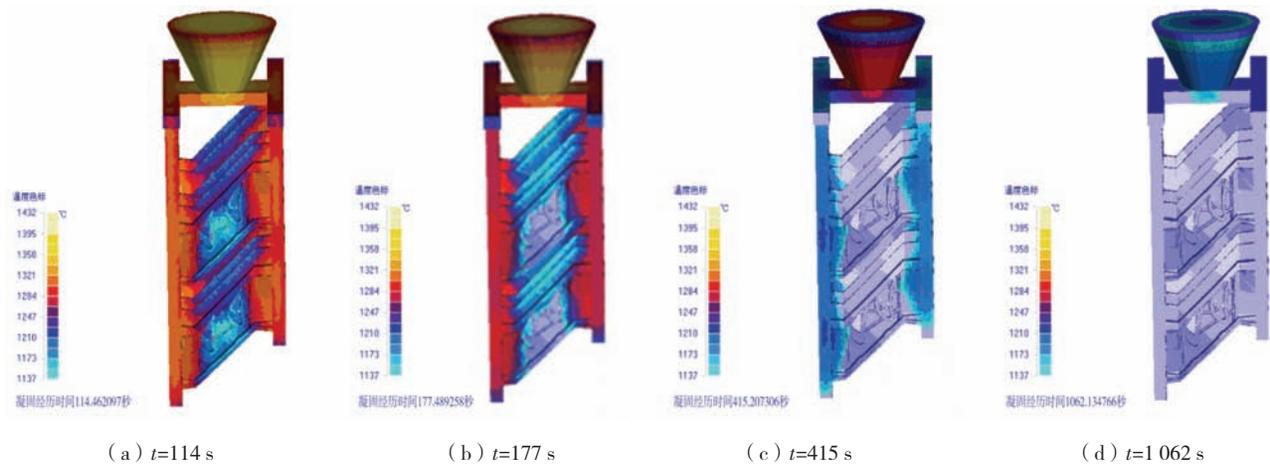


图7 铸件冷却过程中的温度场分布图

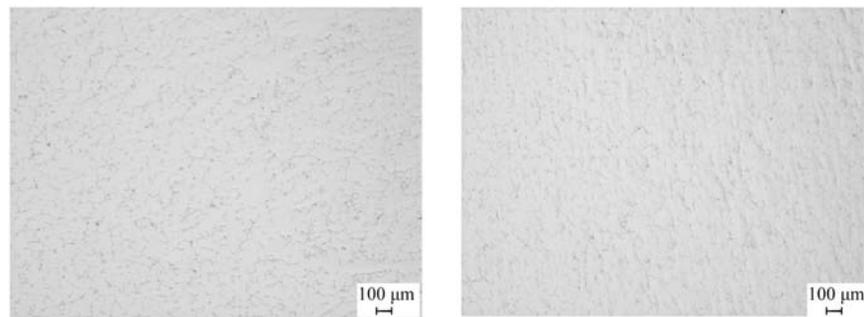
Fig. 7 Temperature field distribution diagram during casting cooling process



图8 X射线检测结果

Fig. 8 The results of X-ray

工艺的铸件进行解剖，观察其显微组织，未发现明显显微疏松，见图9。同时进行了晶粒度检验、荧光检验和尺寸检验，缘板铸件均能满足技术要求，表明该工艺方案可行，可以进行批量试制。



(a) 视场1

(b) 视场2

图9 铸件疏松形貌

Fig. 9 Microporous morphology of castings

4 结束语

采用华铸CAE铸造分析软件对缘板铸件顶注与侧注两种工艺方案进行凝固过程数值模拟,通过对铸件冷却过程中温度场的变化分析以及疏松预测结果,对原铸造工艺进行优化,优化后的侧注方案的充型凝

固过程及缺陷分布情况均优于原顶注方案。并通过试验,验证了侧注方案与浇注参数的可行性,实现了薄壁缘板铸件的充型完整性和内部无超标冶金缺陷,为薄壁结构件的生产研制提供了参考。

参考文献:

- [1] 郭建亭. 高温合金在能源工业领域中的应用现状及发展 [J]. 金属学报, 2010, 46 (5): 513-527.
- [2] SIMS C T, STOLOFF NS, HAGEL W C. Superalloys II [M]. New York: Wiley, 1986: 27-57.
- [3] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册第5卷: 铸造工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021: 473-503.
- [4] 杨世洲, 陈攀. 华铸CAE软件在熔模铸造中的应用 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2010, 29 (7): 75-78.
- [5] 胡汉起. 金属凝固原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 27-41.
- [6] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册 (下卷) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 512-518.

Design and Optimization of Casting System of a Superalloy Thin-Walled

WANG Shu-sen¹, ZOU Ming-ke², WANG Liang², XU Fu-tao², HAN Yang², ZHANG Ji², YAO Li-na², WANG Meng²

(1. Anshan Military Representative Office of Shenyang Military Representative Bureau, Naval Equipment Department of the Chinese People's Liberation Army, Anshan114001, Liaoning, China; 2. Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang110016, Liaoning, China)

Abstract:

The curved surface shape of platform castings is complex, and the wall thickness is uneven, which is prone to casting defects such as shrinkage, micro-porosity, and porosity. This paper mainly focuses on the main problems encountered in the development of superalloy platform castings. Intecast CAE is used to simulate the top gating and the side gating system processes of platform castings. The results show that the side injection process effectively control defects such as micro-porosity, porosity, cold lap, and misrun in the castings. Experimental verification was conducted on the side injection scheme. The results show that the filling integrity of thin-walled structural platform castings has been achieved and there are no internal defects exceeding the standard by adopting a side gating system scheme.

Key words:

superalloy thin-walled; investment casting; casting defects; process optimization; Intecast CAE