

K403 高温合金复杂薄壁件的铸造工艺研究

岑孟江¹, 陈晓强¹, 陈超英¹, 王大为¹, 李 凯¹, 崔晓淼²

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川成都 610091; 2. 大连远东美连精工有限公司, 辽宁大连 116000)

摘要: 对K403复杂薄壁铸件进行了铸造工艺研究, 包括铸件结构分析、浇注系统设计、工艺参数确定等。铸件在试制过程中出现了浇不足缺陷, 为此设计了正交试验对浇注工艺进行优化, 数值模拟和极差分析, 结果发现, 对充型影响的排序为浇注温度>浇注系统>型壳温度, 并且不同浇注方案下的流量分配有较大差异。选取最优的一个方案进行了试验验证, 铸件充型完整, 且表面质量良好。

关键词: K403高温合金; 薄壁; 浇注工艺

K403是广泛应用的镍基高温合金, 它由多种金属元素综合强化(表1^[1]), 具有优良的高温力学性能。该合金的铸造性能良好, 可铸出形状复杂的精铸件, 适于制作1 000 ℃以下工作的燃气涡轮导向叶片和900 ℃以下工作的涡轮转子叶片等各种高温环境下使用的零件^[2]。本项目生产的K403高温合金薄壁铸件结构复杂, 主要外形尺寸为200 mm×300 mm×70 mm, 典型壁厚仅为1 mm(图1)。

1 铸件结构分析

从Ni-Cr二元相图^[3]可知, 该合金在Cr含量范围内两相区宽度较小, 因此材料本身铸造性能较好, 但是该铸件结构复杂(密集小隔框)、壁薄, 为典型的薄壁、复杂结构铸件, 铸造难度较大, 在铸造工艺设计中应解决好以下问题。

(1) 铸件完整充型。该铸件有较多隔框, 最小壁厚仅为1 mm, 金属液充型过程中阻力较大, 容易造成浇不足、冷隔、夹渣等铸造缺陷。

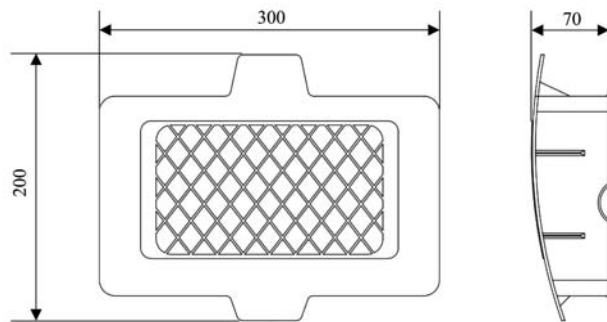


图1 K403高温合金薄壁铸件结构图

Fig. 1 Sketch of K403 superalloy thin wall casting

表1 K403合金化学成分要求
Table 1 Chemical composition of K403 superalloy

| | | | | | | | w_B /% |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|------|----------|
| Cr | Co | W | Mo | Al | Ti | Fe | Ni |
| 10.0~12.0 | 4.5~6.0 | 4.8~5.5 | 3.8~4.5 | 5.3~5.9 | 2.3~2.9 | ≤2.0 | 余量 |

作者简介:

岑孟江(1993-), 男, 助理工程师, 主要从事铸造工艺技术工作。E-mail: 1274217858@qq.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)

08-0964-04

收稿日期:

2020-10-22 收到初稿,

2020-11-26 收到修订稿。

(2) 充型过程中流量均匀分配。正确的充型方式应该为从铸件中心向边缘均匀充填, 如果流量分配不均, 一方面会造成温度场不均匀, 容易导致裂纹缺陷; 另一方面部分金属液流程较长, 导致温度降低较多, 最后充填的部位容易出现浇不足缺陷。

因此, 在铸件浇注过程中如何解决金属液快速、平稳地完成充型是该铸件铸造工艺设计的关键。

2 铸件试制

2.1 熔铸工艺的确定

针对铸件的结构、尺寸要求, 并结合K403高温合金的熔铸工艺特点, 选择真空熔模精密铸造工艺进行铸件的研制, 真空度 ≥ 0.1 Pa。真空熔炼、真空浇注凝固可以避免浇注过程中的卷气^[4]。

2.2 浇注系统设计

设计浇注系统时应根据铸件的结构特点、技术条件、合金种类, 选择浇注系统结构类型、确定金属液引入位置、计算截面尺寸等。浇注系统设计应遵循的原则如下^[5]。

(1) 引导金属液平稳、连续地充型, 因此选择开放式浇注系统;

(2) 充型过程中金属液流动的方向和速度可以控制, 保证铸件轮廓清晰、完整;

(3) 在合适的时间内充满型腔, 避免形成夹砂、冷隔、皱皮、浇不足等缺陷;

(4) 调节铸型内的温度分布, 有利于强化铸件补缩, 减少铸造应力, 防止铸件出现变形、裂纹等缺陷。因此使用顶注雨淋式浇注系统, 内浇道均匀分布在格栅及铸件边缘, 使温度场分布均匀, 同时充型平稳。

阻流面积 $S_{阻}$ 根据下式计算^[6]:

$$S_{阻} = \frac{G}{\rho \mu t \sqrt{2gH_p}} \quad (1)$$

式中: μ 为流量系数, H_p 为平均静压头 (cm), G 为金属液流经内浇道进入型腔的总重量 (kg), ρ 为金属液密度 (kg/cm^3), t 为浇注时间 (s)。

计算得到 $S_{阻}=2\ 826\ \text{mm}^2$, 内浇道数量为43个, 均匀分布在格栅上, 浇口比为 $\sum F_{直} : \sum F_{横} : \sum F_{内} = 1 : 0.95 : 1.21$, 浇注温度为 $(1\ 550 \pm 10)\ ^\circ\text{C}$ 。

此外, 制壳材料选用 Al_2O_3 +硅溶胶, 型壳温度为 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$, 型壳厚度为20~25 mm。

2.3 试制结果

试制件如图2所示, 可见铸件边缘存在局部浇不足缺陷, 没有达到预期目标。从缺陷出现的位置和范围

来看, 缺陷处为金属液最后充填的部位。因此判断出现浇不足的原因为充填速度过慢且流量分配不均, 部分金属液到达铸件边缘时温度较低, 流动性较差, 从而导致了这些部位出现浇不足。

3 浇注工艺优化及验证

3.1 浇注工艺优化

为了解决试制件出现的浇不足缺陷, 需要对浇注工艺进行优化。理论设计与数值模拟验证相结合是进行铸件工艺设计的有效途径^[7], 因此本文也应用该方法优化浇注工艺。影响铸件充填效果的因素有浇注温度、型壳温度和浇口比, 为了综合考虑这些因素对铸件充填的影响, 设计了一个三因子和三水平的正交试验, 并使用铸造仿真软件JSCAST模拟了充填效果 (四面体网格, 网格数量为25万), 结果如表2所示。

通过对模拟试验结果的极差分析, 得到它们对充填影响的排序为浇注温度>浇注系统>型壳温度。几种浇注方案中 (图3), 方案7效果最好, 因为充型时间最短, 并且充型过程中的流量分配最均匀, 因此选择方案7进行浇注验证。

3.2 试验结果

使用方案7进行了浇注验证。铸件毛坯如图4所示, 可见铸件没有出现浇不足缺陷, 外观质量良好, 达到了预期目标。

3.3 分析讨论

从正交试验分析得到了浇注温度、浇注系统和型壳温度对充型的影响大小为浇注温度>浇注系统>型壳温度。浇注前加热型壳的目的是为了防止充型过程中型壳在金属液的激热作用下开裂, 同时也有利于维持金属液的流动性。根据大野笃美的理论^[8], 在充型初期

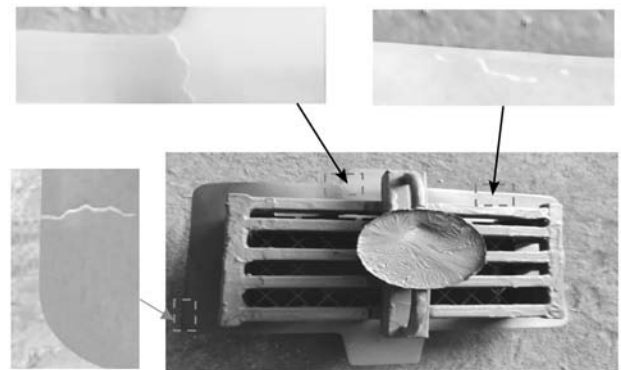
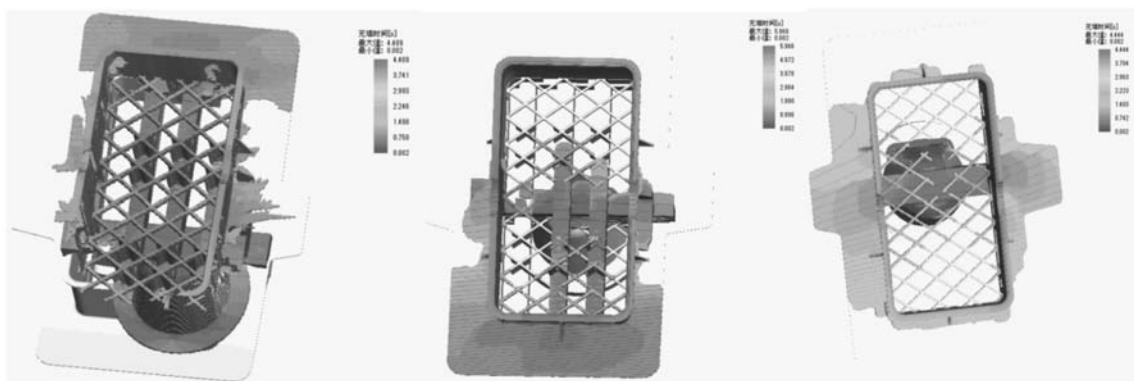


图2 试制铸件及浇不足缺陷

Fig. 2 Trial-produced casting and misrun defects

表2 不同方案的充型效果比较
Table 2 Comparison of mold filling effects under different casting processes

| 方案 | 浇口比 | 浇注温度/℃ | 型壳温度/℃ | 充型时间/s | 充型效果 (充满2/浇不足1/未充满0) |
|----|-----------------|-----------|-----------|--------|----------------------|
| 1 | 1:0.95:2 (1) | 1 550 (1) | 1 050 (1) | 4.634 | 2 |
| 2 | 1:0.95:2 (1) | 1 450 (2) | 900 (3) | 4.593 | 2 |
| 3 | 1:0.95:2 (1) | 1 400 (3) | 950 (2) | 5.694 | 2 |
| 4 | 1:0.95:1.34 (2) | 1 550 (1) | 900 (3) | 4.578 | 2 |
| 5 | 1:0.95:1.34 (2) | 1 450 (2) | 950 (2) | 5.966 | 2 |
| 6 | 1:0.95:1.34 (2) | 1 400 (3) | 1 050 (1) | 5.966 | 2 |
| 7 | 1:0.95:1.21 (3) | 1 550 (1) | 950 (2) | 4.44 | 2 |
| 8 | 1:0.95:1.21 (3) | 1 450 (2) | 1 050 (1) | 5.107 | 2 |
| 9 | 1:0.95:1.21 (3) | 1 400 (3) | 900 (3) | 7.95 | 1 |
| 极差 | 0.265 | 0.826 | 0.069 | | |
| 排序 | 2 | 1 | 3 | | |



(a) 方案3

(b) 方案5

(c) 方案7

图3 三种不同浇口比条件下的流量分配模拟结果

Fig. 3 Mold filling simulation results under different casting processes with three gating ratios

金属液与型壳的润湿性较差，金属液/型壳界面的导热性较差，因此型壳温度对金属液流动性的影响不大。浇注系统的作用在于合理分配流量、调节温度分布和减少充型阻力。而金属液的温度是维持金属液具备牛顿流体特性的一个关键因素，因此相较于浇注系统、型壳温度而言，浇注温度对金属液充型的影响力最大。

从模拟结果可以看出，不同方案下的流量分配有较大差别，如果方案选择不合理，容易出现流量分配不均，这也验证了我们对铸件试制过程中出现浇不足的解释。优化浇注工艺后，采用方案7可使金属液充填过程中流量均匀分配，从铸件中心向四周充填，避免了出现浇不足缺陷，得到了充型完好的铸件。

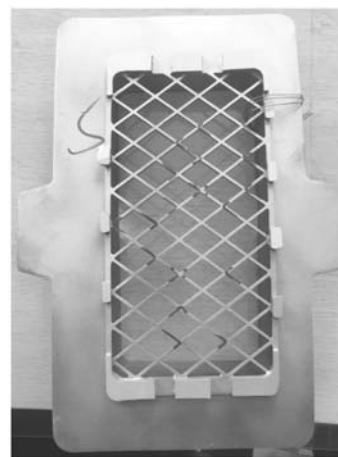


图4 清理后的铸件

Fig. 4 Casting produced using optimized system (scheme 7 in Table 2)

4 结论

(1) 理论设计与数值模拟验证相结合是进行K403高温合金复杂薄壁铸件工艺设计的有效途径。

(2) 对该铸件充型影响的排序为浇注温度>浇注

系统>型壳温度。

(3) 采用优化的方案可使金属液充填过程中流量均匀分配,从铸件中心向四周充填,避免出现浇不足缺陷,得到充型完好的铸件。

参考文献:

- [1] 崔晓森,孙琨,周明雪,等.脱氧对精密铸造K403镍基合金铸件的影响[J].特种铸造及有色合金,2020(4):401-403.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册[M].第2卷.北京:中国标准出版社,2002:555-565.
- [3] 戴永年.二元合金相图集[M].北京:科学出版社,2009:378.
- [4] 戴永年,杨斌.有色金属材料的真空冶金[M].北京:冶金工业出版社,2008:360-361.
- [5] 中国机械工程学会铸造分会.铸造手册[M].第5卷.北京:机械工业出版社,2003:184-199.
- [6] 李魁胜.铸造工艺设计基础[M].北京:机械工业出版社,1980:93.
- [7] 陈超英,张梦娟.大型铸钢薄壁型架底座的铸造工艺[J].铸造,2019(7):769-772.
- [8] 大野笃美.金属凝固学[M].贵阳:广西人民出版社,1980.

Study on Casting Process of K403 Complex Thin Wall Parts

CEN Meng-jiang¹, CHEN Xiao-qiang¹, CHEN Chao-ying¹, WANG Da-wei¹, LI Kai¹, CUI Xiao-miao²

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, Sichuan, China; 2. Dalian Yuandong Meilian Seiko Co., Ltd., Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract:

The casting process of K403 complex thin wall parts was studied, including casting structure analysis, pouring system design, technological parameters determination, etc. The misrun defects appeared in the trial production process of parts, so the orthogonal experiment was carried out to optimize the pouring system. The numerical simulation and range analysis results show that the sequence affecting the mold filling is pouring temperature>pouring system>shell mold temperature, and the mold filling effect under different casting processes has great difference. The castings produced using the optimized pouring system had complete mold filling and good surface quality.

Key words:

K403; thin wall; pouring technology