

K4169 合金叶轮真空自耗电极凝壳炉离心铸造工艺研究

薛松海^{1, 2}, 龚焱³, 史昆¹, 于波⁴, 王彦鹏¹, 严建强¹, 李重阳¹, 陈晓明¹, 包宪宇¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 机械科学研究总院海西(福建)分院有限公司, 福建三明 365050; 3. 北京航天动力研究所, 北京 100044;

4. 火箭军装备部驻沈阳地区军代表室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 高温合金铸件在航空航天等领域有着广泛和重要的应用, 常用工艺为感应熔炼浇注。该浇注工艺使用氧化物坩埚, 会对原材料纯净度产生影响, 且采用重力浇注, 合金内部易产生疏松、浇不足等缺陷。为提高合金液纯净度, 通过使用真空自耗电极凝壳炉对K4169叶轮进行离心浇注, 针对不同浇注系统及离心转速进行了铸造模拟。结果表明, 铸造缺陷主要集中于铸件轴向中间位置与叶轮小口径外环处; 随着离心转速的提高, 铸件内缺陷的数量及分布显著降低, 当离心转速为200 r/min时, 微观缩孔体积约0.2 cm³; 经质量检测, 铸件表面、内部、化学成分和力学性能均达到相应要求。

关键词: K4169; 真空自耗电极凝壳炉; 离心浇注; 铸造模拟

作者简介:

薛松海(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事合金成形及工艺的研究。电话:13940060269, E-mail:srifxsh@163.com

中图分类号: TG249.4

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2022)04-0458-04

基金项目:

辽宁省科学技术计划(2019JH1/10100004); 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1808030); 辽宁省科学技术计划项目(2018304027), “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项子课题项目(2018ZX04044001)。

收稿日期:

2021-05-06 收到初稿,
2021-12-23 收到修订稿。

K4169合金(国外牌号Inconel718合金)是目前世界上使用量最大的高温合金, 主要用于制作650℃下工作的发动机叶片、机匣及其结构件, 以及航天火箭发动机涡轮泵等相关部件^[1-2]。感应熔炼是高温合金熔炼最常用的熔炼工艺之一, 通常使用Y₂O₃、MgO、Al₂O₃等陶瓷坩埚^[3], 氧化物陶瓷坩埚具有良好的耐火效果, 但部分杂质会对原材料纯净度产生一定影响, 从而影响铸件质量。此外, 感应熔炼只能采用重力浇注, 复杂、薄壁类铸件易产生浇不足、疏松等缺陷^[4]。

K4169叶轮零件如图1所示, 其内均匀分布六处流道, 为不规则曲面结构, 内部叶片平均壁厚4 mm, 部分壁厚小于2 mm。该合金叶轮在超低温液氧环境下使用, 要求中间叶片部位不允许进行补焊操作。采用熔模精密铸造工艺, 使用真空自耗电极电弧凝壳炉离心浇注, 该制备工艺熔炼温度高, 可提高原材料的纯净度。同时, 高转速离心浇注可以保证充型完整, 并在一定程度上降低缺陷产生数量, 提高铸件质量。

本文首先通过ProCast对不同浇注系统在不同离心转速下的熔模铸造过程进行模拟, 研究了不同浇注系统和不同离心转速下铸件内缺陷的形成数量及分布, 选定合适的浇注工艺, 并进行实际生产浇注实验。最后对浇注试样进行表面、内部、化学成分及力学性能质量检测。

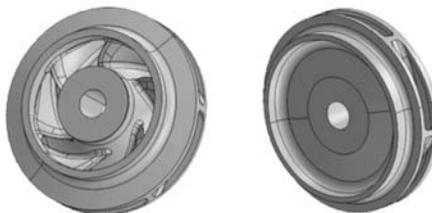


图1 某K4169叶轮

Fig. 1 K4169 impeller

1 试验材料及方法

叶轮所用原材料为K4169二次熔炼合金锭，其化学成分如表1所示。型壳制备材料为锆英粉、铝矾土、硅溶胶、莫来石砂，分面层、背层、封浆层逐层配置涂料涂挂而成。蜡模的制备采用50 t压蜡机压制而成，使用红外脱蜡炉及电阻炉对制备型壳进行脱蜡及焙烧；使用80 kg真空自耗电极凝壳炉进行熔炼浇注。

2 铸造工艺模拟

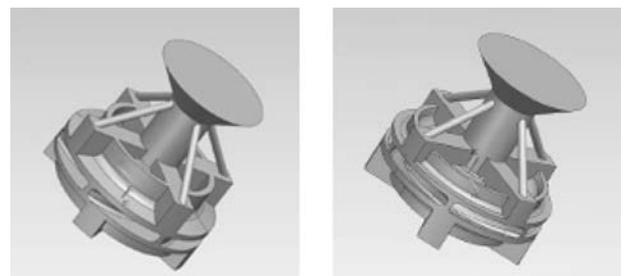
2.1 铸件结构优化及浇注工艺设计

为有利于浇注过程中金属液的充填与补缩，对叶轮中心处的轴心孔进行实体浇注，通过机加工去除该处余量。分别对铸件两侧增设十字形浇道，顶部浇道起引流、补缩作用，底部浇道防止金属液紊流，产生卷气、夹杂等缺陷。叶轮顶部小口径外环与叶片相连，由于该处壁厚较薄、结构复杂，且与周围壁厚差异较大，凝固速度快，易产生缩孔、疏松等缺陷。因此在该小口径外环处增设浇道的同时，增加相应铸造余量，提高外环自身高度进行补缩。两种浇注系统设计工艺如图2所示，区别在于合金叶轮与浇冒系统的相

对位置不同。浇注系统A中，小口径外环直接与直浇道、浇杯相连，这在凝固过程中可对小口径外环起到一定补缩作用；浇注系统B中，小口径外环位于浇注系统底部，凝固速度快，底部浇道及增加的铸造余量能补缩，可降低该处缺陷产生的可能性。对这两种浇注系统设计工艺分别在100 r/min、150 r/min、200 r/min离心转速下进行铸造模拟，型壳预热温度为200 ℃。

2.2 铸造模拟结果分析

图3、图4为浇注系统A和B在不同离心转速下的铸



(a) 浇注系统A (b) 浇注系统B

图2 浇注系统设计方案

Fig. 2 The design schemes of the gating system

表1 K4169合金化学成分
Table 1 Chemical composition of the K4169 alloy

																	w_B /%	
C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	Mn	Pb	Si	S	P	Co	Cu	Ta	Zr	B	Bi	Fe
0.056	18.57	52.63	3.12	0.60	0.94	5.40	0.056	≤0.001	0.06	0.001	0.003	0.14	0.05	≤0.02	0.02	0.002	≤0.000 1	余量

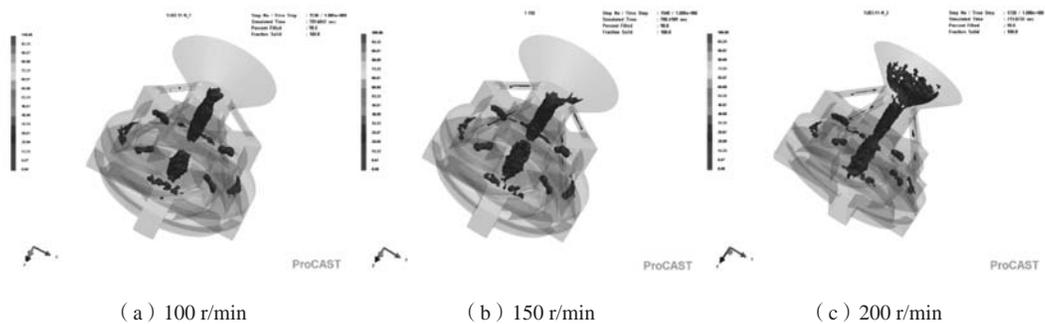


图3 浇注系统A模拟结果

Fig. 3 The simulation results of the gating system A

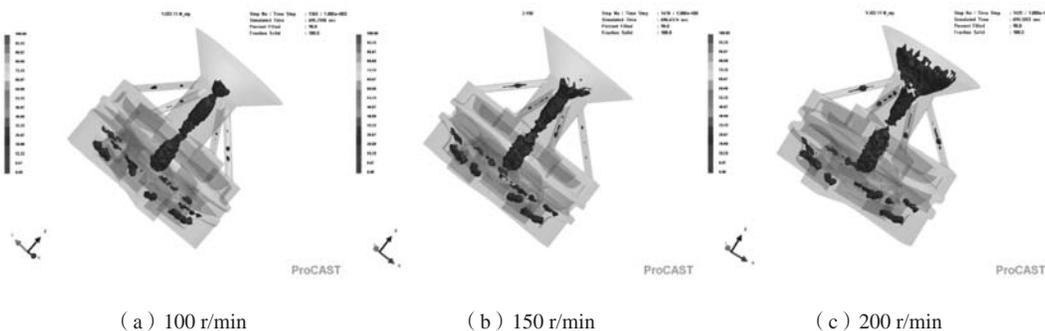


图4 浇注系统B模拟结果

Fig. 4 The simulation results of the gating system B

造模拟结果,可以看出,大量的缺陷主要位于直浇道及叶轮轴心位置,但并未贯穿整个叶轮,该处缺陷结合热等静压及去除铸造余量等操作可完全消除。其余缺陷均匀分布于叶轮与叶片相连的小口径外环一侧,其上增设的铸造余量以及横浇道,起到了良好的补缩作用,铸件叶片位置几乎没有缺陷产生。随着离心转速的提高,缺陷的数量以及单个缺陷的尺寸都逐渐变小,分布更为均匀。

将ProCAST中孔隙率cut off值定为5,即高于0.05

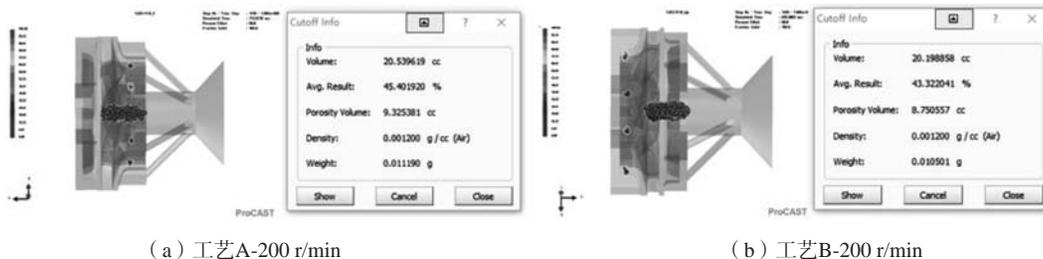


图5 铸件缩孔数量及分布

Fig. 5 Number and distribution of the shrinkage in castings

3 铸件质量检测

以浇注系统B,离心转速200 r/min进行浇注实验,对铸件进行清壳、去冒口、去余量、喷砂等后处理操作后,合金叶轮铸件如图6所示。

叶轮质量分析主要包括铸件表面质量、内部质量以及铸件化学成分及力学性能分析。铸件经过清理打

的体积分数认为是宏观缩松,低于0.05的体积分数是分散的微观缩松。图5为浇注系统A和B在离心转速200 r/min下的浇注缺陷数量及分布示意图。铸件内最小缩孔尺寸约为 0.2 cm^3 ,均匀分布在增设的十字形浇道附近,最大缩孔位于铸件轴心位置。浇注工艺A与浇注工艺B相比较,铸件中总缩孔体积由 9.33 cm^3 减少到 8.75 cm^3 。

磨后,经荧光检查以及X射线探伤检测,结果显示,其表面无裂纹、冷隔,内部无疏松、缩孔等缺陷,可以达到GJB2896A—2007规定I类B级标准,满足铸件要求。叶轮铸件浇注完成后,经过铸件本体取样化验化学成分,结果如表2所示;对随炉试样进行力学性能检测,结果如表3所示。可以看出,合金叶轮熔炼前后化

表2 铸件化学成分

Table 2 Chemical composition of the casting

															$w_B / \%$
C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	Mn	Si	S	P	Co	Cu	Ta	B	Fe
0.034	18.57	52.23	2.95	0.48	1.03	5.24	0.051	0.1	0.001	0.007	0.059	0.021	≤ 0.02	0.002	余量



图6 合金叶轮铸件

Fig. 6 Alloy impeller casting

表3 随炉试棒力学性能

Table 3 Mechanical properties of the furnace test rods

试样编号	R_m / MPa	$R_{p0.2} / \text{MPa}$	$A / \%$	$Z / \%$
1	1 102	889	16	20
2	1 064	867	10.5	20

学成分无明显波动,且力学性能维持在较高水平,均满足铸件交付要求。

4 结论

(1) 离心转速的提高可显著降低叶轮内缺陷的数量及分布情况,当离心转速为200 r/min时,叶轮内单个微观缩孔体积约 0.2 cm^3 ,增设的浇道及铸造余量起到了良好的补缩作用。

(2) 使用真空自耗电极凝壳炉对合金叶轮进行实际浇注,叶轮充型完整,叶片部位无内、外部缺陷,无需进行补焊;铸件表面、内部、化学成分及力学性能质量检测结果均满足交付要求。

参考文献:

- [1] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [2] 李嘉荣, 熊继春, 唐定中. 先进高温结构材料与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [3] 张勇, 李佩桓, 贾崇林, 等. 变形高温合金纯净熔炼设备及工艺研究进展 [J]. 材料导报, 2018, 32 (9): 1496-1506.
- [4] 岑孟江, 陈晓强, 陈超英, 等. K403高温合金复杂薄壁件的铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (8): 964-967.

Study on the Centrifugal Casting Process of K4169 Alloy Impeller Vacuum Consumption Electrode Condenser Furnace

XUE Song-hai^{1,2}, GONG Yi³, SHI Kun¹, YU Bo⁴, WANG Yan-peng¹, YAN Jian-qiang¹, LI Chong-yang¹, CHEN Xiao-ming¹, BAO Xian-yu¹

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Aerospace Power Research Institute, Beijing 100076, China; 3. Haixi (Fujian) Institute, China Academy of Machinery Science & Technology. Co., Ltd., Sanming 365050, Fujian, China; 4. Representative Office of the Rocket Force Equipment Department in Shenyang District Army, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

High-temperature alloy castings have extensive and important applications in aerospace and other fields, and the common process adopts induction melting and pouring. The pouring process uses oxide crucibles, which will affect the purity of raw materials, and gravity pouring is used to easily produce defects such as porosity and misrun in the alloy. In order to improve the purity of the liquid metal, this paper used a vacuum consumable electrode condenser furnace to perform centrifugal casting of the K4169 impeller, and conducted casting simulations for different pouring systems and centrifugal speeds. The results showed that the casting defects were mainly concentrated in the axial middle position of the casting and the small diameter outer ring of the impeller; with the increase of the centrifugal speed, the number and distribution of the defects in the casting are significantly reduced. When the centrifugal speed was 200 r/min, the microscopic shrinkage pore volume was about 0.2 cm³, after quality inspection, the surface, interior, chemical composition and mechanical properties of the casting all met the corresponding requirements.

Key words:

K4169; vacuum consumable electrode condensing furnace; centrifugal pouring; casting simulation