● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.03.007

熔模铸造工艺对 K418B 涡轮导向器充型性能与晶粒组织的影响

李 飞[1],侯正乾[2],赵彦杰[1],郝 新[2],李振锋[2],周 坚[2]
(1. 上海交通大学 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室,上海 200240; 2. 中国航发南方工业有限公司,株洲 412000)

摘 要:研究了熔模铸造浇注系统、浇注温度、型壳预热温度对 K418B 涡轮导向器在重力铸造条件下充型性能与晶粒组织的影响。结果表明,在调整浇注工艺的基础上,将排气边一侧的型壳外部加厚的方式,改变了型腔的温度场分布,使导向器叶片的排气边冷却速度降低;一方面保证了排气边的充型完整性,另一方面降低了排气边与叶身厚大部位的温度梯度,使整个叶片的晶粒组织由大尺寸柱状晶转变成较细小的等轴晶,提升了导向器的综合力学性能。

关键词:镍基高温合金;涡轮导向器;陶瓷型壳;充型性能;晶粒组织

中图分类号:TG249.5;TG291 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)03-0260-04

Effect of Investment Casting Process on Filling Performance and Grain Structure of K418B Turbine Guide

LI Fei[1], HOU Zhengqian[2], ZHAO Yanjie[1], HAO Xin[2], LI Zhenfeng[2], ZHOU Jian[2]
(1. Shanghai Key Laboratory for High Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. National South Aviation Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The effects of investment casting pouring system, pouring temperature and shell preheating temperature on filling performance and grain structure of K418B turbine guide under gravity casting were studied. The results show that on the basis of adjusting the casting process, the temperature field distribution of the cavity is changed by thickening the outer shell of the exhaust side to reduce the cooling speed of the exhaust side of the guide vanes. On the one hand, the filling integrity of the exhaust edge is guaranteed, and on the other hand, the temperature gradient between the exhaust edge and the bulk of the blade thickness is reduced. The grain structure of the whole blade is changed from large size columnar crystal to smaller equiaxed crystal, which improves the comprehensive mechanical properties of the guide.

Key words: Nickel-based superalloy; turbine guide; ceramic shell; filling performance; grain structure

K418B 高温合金在 900 ℃以下具有良好的蠕变强度、热疲劳性能和抗氧化性能,因此适用于铸造在 900 ℃以下工作的涡轮转子叶片、导向叶片和涡轮导向器以及其他高温零件[1-3]。某型号中小航空发动机用 K418B 高温合金涡轮导向器铸件由外环、内环、法兰、实心叶片组成,结构复杂,壁厚差大,叶片排气边厚度仅为 0.35 mm,在重力铸造条件下极易产生浇不足的缺陷。同时,由于实心叶片的排气边与叶身的壁厚差大,凝固过程中存在温度梯度,因此排气边往往先形成较细的等轴晶,朝着厚大的叶身方向又发展成为粗大的柱状晶,致使导向器的低周疲劳性能大幅度降低,无法满足发动机在恶劣工况条件下的使用要求。

本文根据设计部门和主机厂提出的要求,以某发动机中使用的 K418B 高温合金涡轮导向器作为应用研究对象,研究了铸造工艺对于铸件充型性能与晶粒组织的影响,从而为该涡轮导向器铸件成品率的提高提供了技术指导。

1 试验材料与方法

试验所用的 K418B 镍基高温合金采用真空感应炉熔炼,母合金成分及力学性能满足技术条件,合金的化学成分见表 1。采用的蜡料是美国 Kindt-Collins 公司的型蜡 KC4017B,其主要技术指标为:环球软化点为 64.4 ℃,填充物约为 32%,灰分

收稿日期:2018-07-30
基金项目:"十三五"装备预研共用技术项目(41423040206,41423040203);"十三五"两机重大专项(2017-VII-0008);上海市产学研合作年度计划项目(沪 CXY-2016-004)
作者简介:李 飞(1974-),辽宁盘锦人,博士,副研究员.研究方向:熔模铸造技术研究.电话:13916423250,E-mail:lifei74@sjtu.edu.cn

表1 K418B合金主要化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of K418B alloy

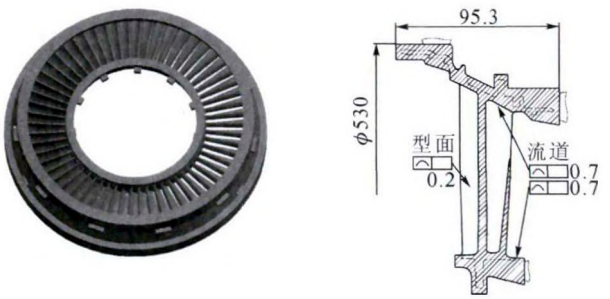
C	Cr	Mo	Ti	Al	Zr	B	Ni
0.042~0.049	12.30~12.42	4.36~4.38	0.790~0.795	5.81~5.85	0.055~0.065	0.010~0.011	Bal.

含量小于 0.015%,72 ℃时体积膨胀率约为 6.7%。采用合模力为 100 T 的 MPI 压蜡机整体压型,然后进行浇冒系统的组合拼装。陶瓷型壳以硅溶胶为粘结剂,以锆英粉为面层耐火材料,烧结莫来石为背层耐火材料;型壳的面层型砂为 80~120 目的锆英砂,背层型砂为 30~60 目(过渡层)和 10~30 目(加固层);选用一种含有针状石油焦的熔融石英陶瓷粉体作为型壳隔热层浇注料[4]。将组合好的蜡模进行浆料涂挂、撒砂,制备型壳,型壳涂挂层数为 10 层,其中第一层为面层,第二层为过渡层,最后一层为封浆层。将型壳在高温蒸汽脱蜡釜中进行脱蜡,之后在 850 ℃下于空气中预焙烧 2 h,待浇注。将型壳进行预热后,采用真空重力浇注炉进行铸件的浇注。浇注完毕后,进行型壳清除、切割浇冒口、打磨、热处理,之后进行目视和晶粒度腐蚀检验。

2　试验结果与分析

2.1　浇注系统对铸件冶金质量的影响

试验的整体涡轮导向器由外环、内环、实心叶片以及上下法兰五位一体构成,结构复杂,获得高的尺寸精度和优良的综合力学性能的精密铸造难度很大。导向器的最大轮廓直径为 530 mm,高度 100 mm,叶片数量 58 片,叶片排气边长达 100 mm,排气边最薄壁厚 0.35 mm,流道公差±0.35,叶型公差±0.1,安装角±0.5°,均布要求 0.6。图 1(a)和(b)分别给出的是涡轮导向器的三维和二维示意图。



(a)三维结构示意图　　(b)二维结构示意图

图 1 涡轮导向器的结构示意图
Fig.1 Schematic diagrams of structure of turbine guide

在导向器铸件检验标准中,要求每个导向器叶片不能存在欠铸,且疏松不得多于 2 处,尺寸小于 2 mm,且间隔要大于 16 mm,铸件其余表面疏松尺寸要小于 3.8 mm[5]。K418B 涡轮导向器铸件结构复杂,叶片壁厚不均匀,截面变化较大,金属液在充型过程中的流向、铸件的补缩与凝固直接受到浇注系统的影响,因此浇注系统设计的合理程度决定了铸件的冶金质量和力学性能[6]。

在初始方案中,采用了顶注式的浇注系统,如图 2 所示。为了实现铸件的有效补缩,在铸件的内、外上法兰位置安装了内浇道。浇注用陶瓷型壳的厚度为 10 层,预热温度为 1 050 ℃,合金浇注温度为 1 600 ℃,浇注液重 85 kg。铸件出现的问题主要包括两个方面:其一是因为排气边型壳散热快而导致金属液充型不满,造成了排气边的部分欠铸,其二是垂直于排气边的叶身出现大量的粗大柱状晶,易引起导向器低周疲劳性能降低,如图 3 所示。

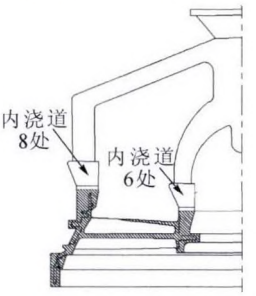


图 2 导向器浇注系统组合示意图
Fig.2 Combination schematic diagrams of pouring system of guide device

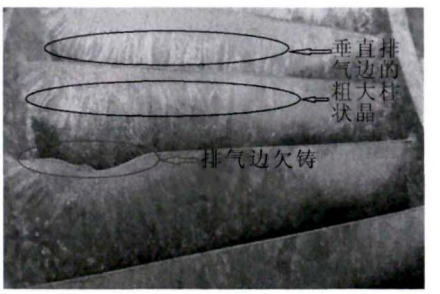
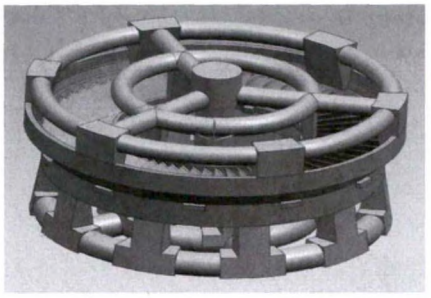
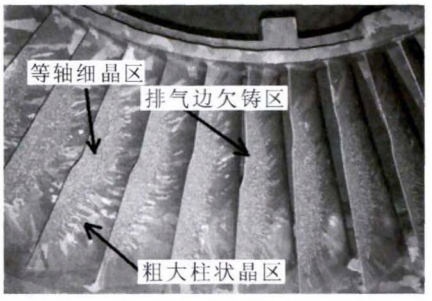


图 3 涡轮导向器叶片上的欠铸缺陷与柱状晶形貌
Fig.3 Morphology of undercasting defects and columnar crystal on turbine guide vane

经对导向器铸件的结构进行分析,设计了一种底注式的浇冒系统,如图 4(a)所示。其设计思路是:通过底注式浇道来增加金属液的行程,达到顺序凝固的效果,同时将排气边置于上方,使其远离冒口部位,达到叶片同步冷却的目的。在保持型壳预热温度、金属液浇注温度不变的情况下,进行了实际浇注,浇注工艺同顶注式,结果表明,与顶注式浇注系统应用效果相比,叶片上的等轴晶区域面积有所扩大,欠铸程度有所减轻,但还是未能完全解决上述两种缺陷,如图 4(b)所示。



(a)底注式浇注系统



(b)导向器铸件照片

图 4 涡轮导向器的浇注系统和导向器铸件
Fig.4 Pouring system of turbine guide vane and casting

从两次重力浇注的结果来看，无论采用顶注式还是底注式浇注系统，均未能有效解决柱状晶和欠铸的问题。这是因为：导向器铸件的叶片排气边厚度小，边缘尖锐，金属液不易充填，同时该处型壳涂挂的厚度也较其它部位薄，散热快，金属液先发生凝固冷却，并形成从排气边到叶身的温度梯度，引起粗大柱状晶的形成。

2.2 型壳温度场的调控对铸件冶金质量的影响

涡轮导向器铸件的叶片排气边欠铸以及柱状晶的产生，主要受到铸件充型凝固时流场和温度场的影响，改变浇注系统对于流场的影响较大，对于温度场的影响较小。本文中观察到的欠铸和粗大柱状晶缺陷主要是由温度场的不合理分布造成的。如果通过提高导向器铸件的叶片排气边型壳厚度，即可降低该位置的散热速度，有望减少甚至消除叶片排气边与叶身厚大部位的温度梯度，从而消除柱状晶，使整个叶片由等轴晶构成。同时，降低排气边的散热速度也有利于金属液在该位置的完整充型。基于这一考虑，本文以硅溶胶作为粘结剂，以氯化铵作为固化剂，以一种混有针状石油焦的熔融石英粉作为自固化浆料的原料，在制备好的导向器型壳的叶片排气边位置进行了自固化浆料的填充，即在该位置为型壳增加了厚度约 10 mm 的保温层。浆料固化之后，将型壳预焙烧，即可进行浇注。

在前期研究中，与顶注式相比，底注式浇注系统并未对铸件冶金质量的提高带来明显的改善，因此在后期研究中，仍采用结构相对简单的顶注式浇注系统来进行试浇注。图 5 给出了未填充和填充了浆料的顶注式导向器型壳照片。从图 5(a)可见，经多次沾浆淋砂后，导向器叶片蜡模之间已经被型壳材料完全填满，但仍可看到叶片排气边的轮廓。经浆料填充后，排气边的型壳被完全覆盖。为了提高金属液的充型性能，将型壳的焙烧温度从 1 050 ℃提高到了 1 150 ℃，但考虑到浇注后的铸件散热速度慢，易造成严重的疏松缺陷，因此将金属液的浇注温度由 1 600 ℃降低到了 1 560 ℃，其余浇注工艺不变。

(a)未覆盖

(b)覆盖

图 5 导向器铸造用型壳
Fig.5 Shells mold of turbine guide

图 6(a)和(b)分别给出了采用在排气边位置未覆盖和已覆盖保温层的陶瓷型壳浇注出来的导向器铸件照片。从图 6(a)可见，尽管金属液浇注温度降低了 40 ℃，但由于型壳预热温度提高了 100 ℃，导向器铸件的叶片排气边实现了完整的充型[7]，其完整程度达到了 100%。然而，叶片排气边位置的等轴晶区域面积大幅度降低，粗大的柱状晶依然存在。从图 6(b)可见，在同样的浇注工艺条件下，带有熔融石英保温层的陶瓷型壳经浇注后，所得铸件的叶片排气边实现了 100%的充型。同时叶身主要由较为细小的等轴晶构成，仅在靠近内、外法兰的位置还有少量的柱状晶。以上试验结果表明，通

(a)未覆盖

(b)覆盖

图 6 导向器铸件
Fig.6 Turbine guides casting

（下转第 275 页）

生产前模具要预热,避免合金液激冷过快,突然增大模具温度梯度而降低铸件质量和过早损坏模具,要按工艺规程对模具关键部分的温度进行检查和调节,控制好生产节奏与合金液的浇注流量,以及喷涂的调整。

4.3 高压点冷机

高压点冷机是针对压铸模具的局部温度进行控制。其主要功能是在铸造过程中将模具局部进行循环冷却及对超细型芯内部进行高压点冷却，使模具整体实现均匀冷却，以消除型腔或型芯局部过热造成的铸件热缩或提前龟裂缺陷。通过本设备对模具局部温度的控制，提高铸件整体质量和降低产品因为局部过热产生缩松而导致试压泄露的几率。同时大幅延长模具和型芯的使用寿命，降低模具维护频率,提高压铸生产效率。

5 结论

影响压铸件质量以及生产效率的因素不仅局限于量产阶段对压铸机工艺参数的控制，无论铸件开发前期或者后期的量产阶段，产品质量以及生产效率的提升都是一个持续改善的过程。每一个阶段的持续改善,都需要我们对铸件结构,浇铸方式等进行收集大量的分析数据作为依据,进行有条理的,针对性的改进,从而达到我们预期的效果。

参考文献:

[1] 姜银方,顾卫星,朱元右,等. 压铸模具工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[2] 吴春苗. 压铸技术手册[M]. 广州:广东科技出版社,2007.

[3] 刘付国宇. 探讨压铸模具的创新设计 [OL]. 百度文库:https://wenku.baidu.com/view/8fba181f182e453610661ed9ad51f01dc281578b.html,2017.

[4] 刘付国宇. 局部厚壁件全密封真空压铸模具设计 [OL]. 百度文库:https://wenku.baidu.com/view/8fba181f182e453610661ed9ad51f01dc281578b.html,2017.

[5] 金重阳,张素香,孙铁,等. 真空压铸技术对铝合金压铸件的外观质量和力学性能的影响[J]. 铸造,2016,65(6):524-526.

[6] 万里,赵芸芸,潘欢,等. 铝合金高真空压铸技术的开发及应用[J]. 特种铸造及有色合金,2008,28(11):858-861.

[7] 王晓梅，程晓宇. 压铸铝合金工艺与性能研究 [J]. 铸造技术,2012,33(4):449-451.

[8] 薄冰,潘冶,陆韬,等. 工艺参数对 ADC12 铝合金压铸件微孔缺陷与力学性能的影响[J]. 铸造,2017,66(2):127-130.

(上接第 262 页)

过在涡轮导向器的叶片排气边加强保温，可以解决重力浇注条件下的叶片欠铸与粗大柱状晶的缺陷问题。

3 结论

(1)涡轮导向器的叶片排气边厚度薄,在铸造过程中易形成欠铸缺陷,且由于叶片排气边与叶身存在温度梯度,导致粗大柱状晶缺陷的产生。

(2)调整浇注工艺参数,并通过在涡轮导向器型壳的叶片排气边位置覆盖保温层,可以降低叶片排气边型壳的散热速度,减小或消除叶片排气边与叶身的温度梯度，实现叶片排气边的完整充型,使粗大的柱状晶转变为较细小的等轴晶,提高了导向器的冶金质量。

参考文献:

[1] 于保正，汤鑫，刘发信. 细晶铸造 K418B 合金热处理工艺研究[J]. 航空材料学报,2002,22(3): 13-21.

[2] 袁文明,刘发信,汤鑫. 铸型搅动法细晶铸造对 K418B 合金整体涡轮组织和力学性能的影响 [J]. 航空材料学报,1998,18(4):19-25.

[3] 于保正,汤鑫,刘发信. 细晶铸造 K418B 合金热等静压工艺研究[J]. 机械工程材料,2003,27(3):24-26.

[4] Fei Wang, Fei Li, Bo He, et al. Gel-casting of fused silica based core packing for investment casting using silica sol as a binder [J]. Journal of European Ce ramic Society, 2013, 33 (13-14): 2745-2749.

[5] 尹庆玲. K403 合金涡轮导向器的精密铸造工艺 [J]. 铸造技术,2014,35(3):602-603.

[6] 周志华,李维,吴剑涛,等. K414 导向器精铸工艺研究[J]. 钢铁研究学报,2011,23(增 2):438-441.

[7] 黄艳松,马俊文,文柏衡,等. 某发动机涡轮导向器精密整体叶盘铸造工艺研究[J]. 新技术新工艺,2012,(5):64-68.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2019 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64　国外发行号:M855　国内定价:18 元/本　海外定价:18 美元/本