DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.017

带冠整体叶盘精密铸造工艺研究

薛　鑫,谢秋峰,吴亚夫,李天楠,李　维
(北京钢研高纳科技股份有限公司,北京 100081)

摘　要:整体叶盘可以有效地提高航空发动机的性能和使用寿命,因此整体叶盘的精密铸造技术受到了广泛重视。主要针对某发动机整体叶盘的精铸过程中产生的冶金缺陷,并结合计算机模拟分析,对该叶盘的铸造工艺进行优化改进。结果表明,有效地控制了叶片欠铸、疏松等冶金缺陷,提高了产品合格率。

关键词:整体叶盘;精密铸造;浇注系统

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)12-1170-03

Study on the Investment Casting Process of Turbine Blisk with Whole Integral Shroud

XUE Xin, XIE Qiufeng, WU Yafu, LI Tiannan, LI Wei
(Gaona Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Turbine blisk with whole integral shroud can effectively improve the performance and service life of aero-engine, as a result, the investment casting technology of the turbine blisk had been paid much attention. The metallurgical defects of a turbine blisk with whole integral shroud of the investment casting process were mainly aimed at, and the investment casting process was optimized and improved with the combination of computer simulation analysis. The results show that the metallurgical defects such as misrun and porosity are effectively controlled, and the qualified rate of the product is improved.

Key words: turbine blisk; investment casting; gating system

整体叶盘是为了满足高性能航空发动机而设计的新型结构件,其将发动机转子叶片和轮盘形成一体,省去了传统连接中的榫头、榫槽及锁紧装置等,减少结构重量及零件数量,避免榫头气流损失,提高气动效率,使发动机结构大为简化,推重比和可靠性明显提高[1,2]。整体叶盘结构复杂,精铸难度大,本文所研究的带冠整体叶盘,在生产过程中更加容易在叶根位置产生疏松,叶片欠铸等冶金缺陷,产品废品率较高。因此,本文作者通过对该叶盘的结构进行分析,并结合计算机模拟结果,设计优化其浇注系统,在很大程度上改善了冶金质量,从而提高产品合格率。

1　合金材料与试验方法

整体叶盘选用K417G合金,该合金具有密度小,塑性好,中温强度好,组织稳定性好等优点,且具有较好的铸造性能,适用于制作950 ℃以下长期工作的燃气涡轮叶片、导向叶片和其他高温用零件[3]。

试验合金采用ZG0.5真空感应炉熔炼,成分如表1[3]。采用ZLZ20压蜡机压制零件蜡模。蜡模与浇注系统组合后进行涂料、撒砂、脱蜡、焙烧等工序,完成型壳制备。采用ZG0.025真空感应炉重熔合金并浇注。铸件经切割、打磨、热矫形后进行目视、荧光、X射线探伤及尺寸检验。

2　精铸工艺讨论

2.1　熔模制备

根据该整体叶盘的结构特点,熔模制备采用分体压制,叶片压制成型后利用工装辅助拼接成整体。图1分别示意表示了轮盘和叶片的蜡模,组装体和拼装工装。

2.2　浇注系统设计及工艺方案制定

如图2所示为铸件剖面图,根据铸件结构,设计浇注系统的主体思路为:铸件轮盘厚大且存在明显的变截面,由于散热条件差极易产生热节,从而导致疏松和缩孔缺陷,因此,轮盘厚大位置需设置浇口从而使其得到充分补缩;其次,该铸件叶片较薄,尤其尾缘半径只有R0.5 mm,此外叶身各截面形状变化较大,导致钢液在此位置的充型能力较差,极易造成

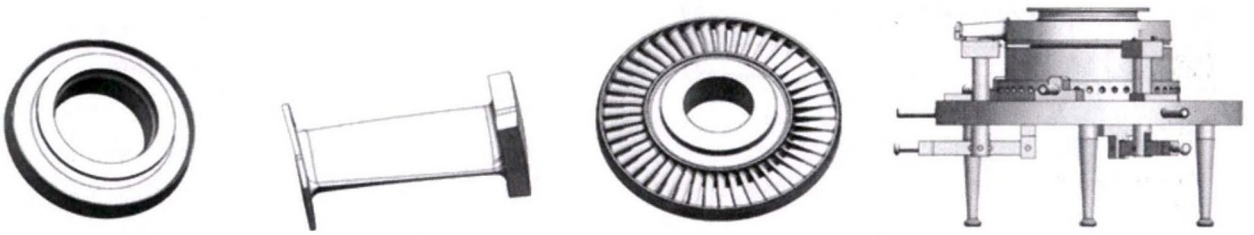
收稿日期:2020-09-28

作者简介:薛　鑫(1986-),山西晋中人,硕士,工程师.主要从事高温合金精密铸造方面的工作.电话:010-62443393,E-mail:xuetiger@126.com

表1 K417G主要成分 w(%)

Tab.1 Main chemical compositions of K417G alloy

C	Cr	Co	Mo	Al	Ti	V	Ni	Fe
0.13~0.22	8.5~9.5	9~11	2.5~3.5	4.8~5.7	4.1~4.7	0.6~0.9	余	≤1.0



(a)铸件内环蜡模示意图　(b)分体叶片蜡模示意图　(c)铸件整体蜡模示意图　(d)蜡模拼装示意图

图 1 蜡模零件,组装体和拼装工装示意图

Fig.1 Schematic wax pattern parts, wax assembly and assembling tooling

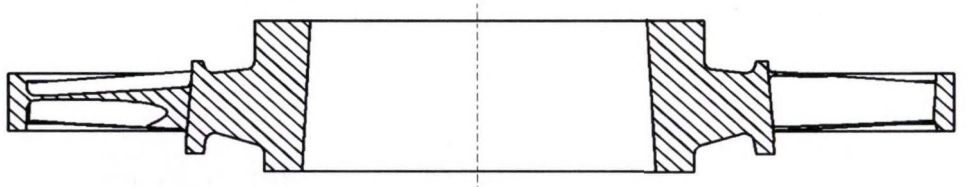


图 2 铸件结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of casting structure

欠铸缺陷,因此,设计浇注系统时需考虑钢液充型能力;另外,在铸件叶冠部分相对叶片部分较为厚大,不利于铸件顺序凝固,可能导致叶冠与叶身倒角位置出现疏松缺陷。

根据上述分析,初步设计浇注方案 1,如图 3。该方案中,在轮盘端面设置 4 个竖浇道,竖浇道通过 ϕ70 mm×20 mm 的圆盘连接, 圆盘上使用 ϕ50 mm×20 mm 的圆柱与浇口杯相连,圆柱主要能够对钢液起到束流作用,提高钢液充型压力,对于铸件叶冠厚大部分则均布放置 6 个暗冒口对其进行补缩,暗冒口截面形状为图 3 的六边形,高度基本与叶冠高度相当。设置浇注温度 1 440 ℃,型壳温度 1 000 ℃。

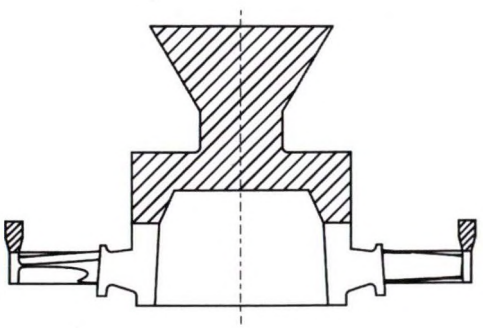


图 3 最初的浇冒口系统示意图

Fig.3 Initial schematic diagram of gating and feeding system

2.3 浇注结果讨论

实际浇注结果表明,叶盘的部分叶片在排气边最薄处存在一定的欠铸,如图 4。此外,在与暗冒口

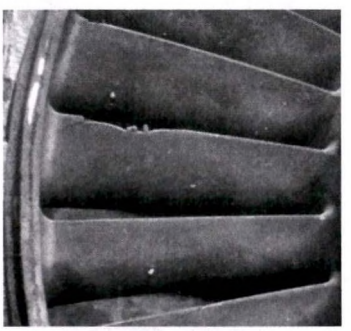


图 4 铸件缺陷照片

Fig.4 Picture of casting defects

对应的叶冠与叶片过渡区域以及叶冠上表面出现了一定程度的疏松和缩孔。造成缺陷可能的原因主要包括:①钢液充型时钢液需全部由圆盘浇道进入铸件,之后钢液又需要通过叶片流向叶冠外环,因此该区域持续受到流动钢液的加热,最终导致过热,形成热节;②叶盘外环靠近外部,散热较其他部分更快,而外环的暗冒口热量有限,也不能持续起到补缩作用,从而导致叶片与叶冠过渡区域形成疏松。

2.4 浇注系统优化

根据以上分析,针对铸件出现的问题,对浇注系统进行了部分改进,如图 5。在之前的暗冒口上增设浇道与冒口连接, 浇注过程中部分钢液由横浇道进入外环浇口, 使外环的浇口有足够的热量对叶冠进行补缩;此外,将叶盘内环的浇道改为图 5 所示的结构,以改善钢液浇注过程中的充型能力。

对修改后的浇注系统方案进行 Procast 模拟计算,结果如图 6 所示。

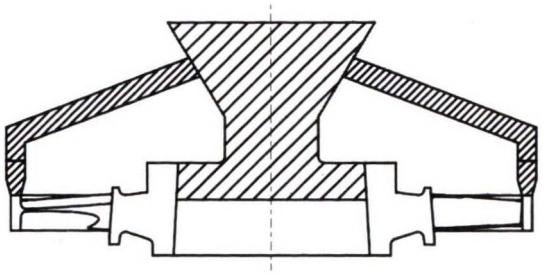


图 5 修改后浇注系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of optimized gating system

通过模拟结果对比分析，可以看出：方案 1 的浇注过程，钢液由浇口杯进入圆盘，钢液横向流动由竖浇道到达铸件底部，再横向流动向叶片和叶冠进行充型，整个浇注过程中钢液充型有两次的横向转变，钢液充型速度损失较大，修改后的方案在充型过程，钢液只需要一次转变流动方向，便可对叶片进行充型，钢液流速损失较小，因此对叶片充型更加有利，进而有效改善叶片欠铸的情况。此外，从凝固过程的模拟结果看，方案 1 中的暗冒口在凝固过程中，由于没有持续不断的热量对其进行补缩，导致最后凝固区基本在铸件与冒口的连接区域，模拟结果基本与实际浇注结果一致，实际浇注后在去除叶冠暗冒口后，疏松及缩孔均暴露在浇口端面。而增加横浇道使暗冒口与主浇道联通后，有效的提高了叶冠处浇口的补缩能力，使最后凝固区上移至浇口端面以上，从而使叶冠区域得到致密的组织。修改优化后的浇注系统实际浇注结果也基本与模拟结果吻合。

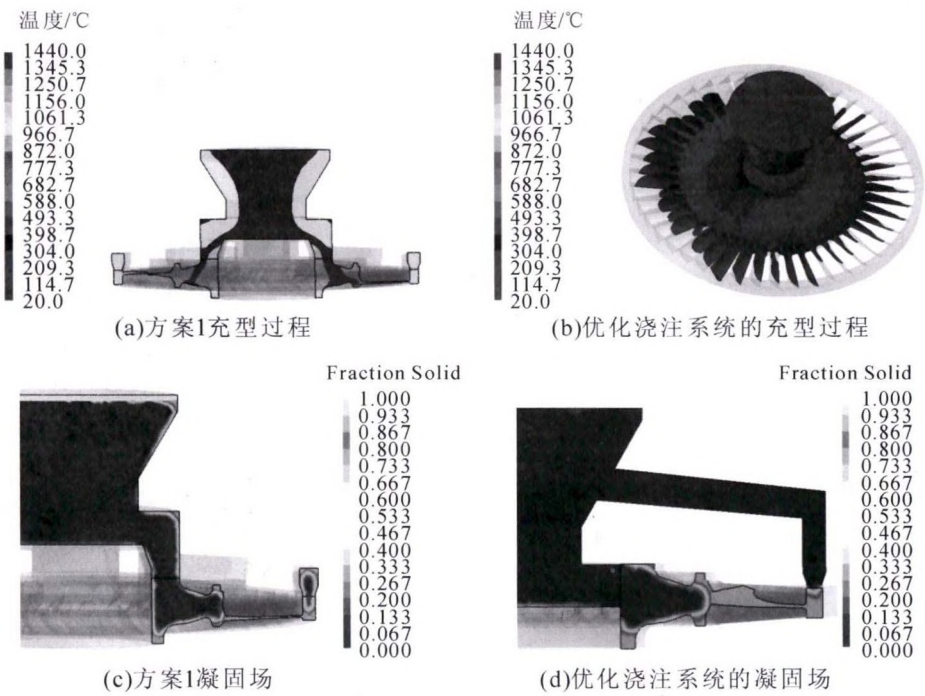


图 6 Procast 模拟结果

Fig.6 Computer simulation results

3 结论

（1）整体叶盘浇注过程中，为保证叶片充型，应尽量减少钢液在浇注过程中的速度损失，使钢液能够以较大的速度对叶片直接充型。

（2）暗冒口蓄热能力有限，补缩区域相对较小，在暗冒口对铸件厚大区域补缩不足的情况下，可以使其与主浇道连接，增加冒口热量来源和蓄热能力，进而改善铸件疏松缺陷。

参考文献：

[1] 王增强. 高性能航空发动机制造技术及其发展趋势 [J]. 航空制造技术，2007(1): 52-53.

[2] 史耀耀，段继豪，张军锋，等. 整体叶盘制造工艺技术综述[J]. 航空制造技术，2012(3): 26-31.

[3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册：第二卷 [M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社，2002.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2021 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：25 元/本　海外定价：25 美元/本