

定向导向器叶片熔模铸造工艺研究

杨武¹, 林时波², 钟倩²

(1. 中国航发燃气轮机有限公司, 辽宁沈阳 110015; 2. 中国航发沈阳黎明公司, 辽宁沈阳 110043)

摘要: 通过对导向器叶片的陶瓷型芯制造工艺、型壳制造工艺、铸件的熔注工艺等进行了系统研究, 确定了定向凝固技术在复杂结构、空心、无余量导向器叶片上应用的工艺规范, 消除了导向器叶片定向凝固过程中截面突变区裂纹及大缘板疏松缺陷, 解决了复杂内腔结构叶片偏、漏、断芯问题。

关键词: 定向凝固; 无余量叶片; 陶瓷型芯; 裂纹; 疏松

叶片制造技术是航空发动机制造的核心技术, 其制造水平直接关系到发动机的性能, 目前我国叶片制造技术水平低、研制基础薄弱, 特别是在高可靠性、长寿命叶片制造工艺等方面我们与国外存在很大差距, 叶片制造已经严重影响到新型发动机的研制进度, 叶片制造已经成为发动机研制和生产的瓶颈。本文就定向凝固技术铸造导向器叶片进行了工艺研究, 对研制中出现的定向晶生长问题、超大缘板疏松问题、截面突变区的裂纹问题和偏、漏、断芯问题进行了系统的攻关, 解决了定向晶导向器叶片铸造的核心问题, 所确定的技术方案, 目前在同类叶片研制和生产中得到推广应用。

1 铸件结构及工艺难点

某发动机低压涡轮导向器叶片是采用IC10合金定向铸造的空心无余量叶片, 叶身较长、宽弦、超大缘板, 结构复杂, 内腔分为前后两腔, 前腔为光板结构, 后腔带有四排扰流柱、十九个排气缝(图1)。IC10合金作为Ni3Al系合金中的成员, 具有高熔点、低密度、抗氧化性好和热导率高等优点, 可用于工作温度在1 100 ℃涡轮导向叶片的制造。成分如表1所示, 同时IC10合金自身具有一定的热裂倾向, 叶片叶身与缘板转接R处, 是该叶片应力集中区, 容易出现裂纹, 由于该叶片结构复杂, 引晶段不易设置, 定向晶生长方向不易控制, 在结构复杂部位和截面突变区晶粒方向易产生偏离, 由于温度梯度的不均衡易出现大晶粒、杂晶、等轴晶等缺陷。

2 精铸工艺

2.1 材料选用

型壳采用陶瓷型芯粉料、F28-44B蜡料、硅溶胶、刚玉砂、刚玉粉、铁丸等, 母合金为IC10。

2.2 型芯制造工艺

该叶片为两腔结构, 19个只有0.5 mm厚的排气缝(图1), 采用定向铸造工艺, 要求型芯需具备较好的高温强度、高温挠度和优良的化学稳定性, 故试验选取氧化锆为矿化剂的硅基陶瓷型芯, 按定向叶片的型芯制造工艺进行配料和烧结。同时, 针对试验前期型芯烧结合格率低、低温强度和高温强度差等问题作了如下试验:

- 调整型芯烧结曲线(图2), 摸索终烧温度;
- 箱式炉与大、小钟罩炉对比试验;

作者简介:

杨武(1981-), 男, 工程师, 主要从事高温合金熔模铸造的工艺研究及质量控制工作。E-mail: 47070809@qq.com

中图分类号: TG149.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)07-0752-04

收稿日期:

2020-04-21 收到初稿,
2020-05-18 收到修订稿。

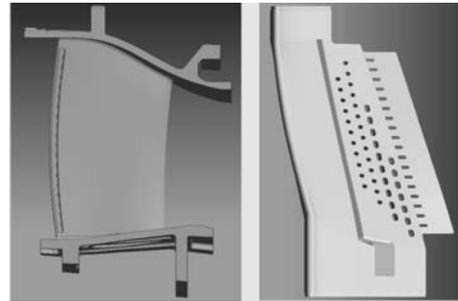
(c) 调整粉料粒度级配试验;

(d) 采用莫来石做矿化剂和氧化锆的工艺方案进行对比试验。

最终确定陶瓷型芯制造工艺如下: 料浆温度为 $90 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$, 压注压力为 $0.20 \sim 0.40 \text{ MPa}$, 保压时间为 $15 \sim 20 \text{ s}$ 。

2.3 蜡模制造工艺

对于空心叶片的蜡模, 受其上下缘板和空心结构特点的影响, 蜡模制造难度较大, 特别是尺寸控制难度大, 精度要求高, 而且操作工艺和操作要求严格,



(a) 铸件 (b) 内腔型芯结构

图1 铸件及内腔型芯结构

Fig. 1 3D models of blade and inner cavity core structure

表1 IC10合金的化学成分
Table 1 Chemical Composition of IC10 alloy

C	Cr	Co	W	Al	Ta	Mo	Hf	B	Ni	$w_B / \%$		
0.06 ~ 0.12	6.5 ~ 7.5	11.5 ~ 12.5	4.7 ~ 5.2	5.6 ~ 6.5	6.5 ~ 7.5	1.0 ~ 2.0	1.0 ~ 2.0	0.01 ~ 0.02	余量			
Si	S	Zr	P	Fe	Sb	Mn	Bi	Pb	As	Sn	N	O
≤ 0.2	≤ 0.01	≤ 0.1	≤ 0.015	≤ 0.3	≤ 0.001	≤ 0.2	≤ 0.0001	≤ 0.0005	≤ 0.005	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.001

其主要难点在于: ①保证型芯合理位置, 以便确保叶片壁厚; ②选择合适的注蜡压蜡工艺, 保证蜡料进入①缓稳定, 不损伤型芯; ③选择合适的蜡料, 特别是高温下收缩小、流动性好的蜡料, 是保证蜡模质量和避免型芯损伤的有力保证; ④操作流程合理。为此, 在蜡模压制工艺研究过程中做了大量工作, 主要包括: ①型芯排气缝处压制前刷蜡、粘芯撑提高强度并且避免偏芯; ②蜡模压制时蜡料采用F28-44B蜡料, 高温压制, 模具和型芯均进行压前预热; ③规范起模方法。

上述工作经过几次的修模及工艺调整试验, 最终解决了蜡模压制问题。蜡模制造工艺如下: 压前型芯和模具预热 $35 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$, 采用F28-44B蜡料, 模料温度为 $75 \text{ }^\circ\text{C}$; 压注压力为 0.8 MPa ; 保压时间为 $50 \sim 60 \text{ s}$ 。

2.4 蜡模修整工艺

该叶片的特殊结构导致在叶片凝固过程中叶身和缘板转接处铸造应力集中, 易出现裂纹, 特别是进气边与叶身转接R处裂纹严重。针对裂纹问题, 加大了进气边与叶身转接R的尺寸(图3), 提高该处的强度, 在蜡模修整中, 修理至合格尺寸。

该叶片内腔分为前后两腔, 前腔为光板结构, 后腔带有四排扰流柱、十九个排气缝, 排气缝最小厚度只有 0.5 mm , 模组在高温下长时间工作, 叶片偏、漏、断芯问题严重。针对该问题采取如下措施:

(1) 创新型芯的定位方法, 由平面定位改为点定位的柔性定位方式, 使型芯与型壳具备更好的相容性(图4), 同时, 使型芯高温相变具有一定的变形空间。这样即保证了尺寸, 又避免了型芯受阻过大而断裂。

(2) 通过控制型芯定位端、自由端达到型芯和

型壳的合理匹配, 避免了型芯受合金液浮力上浮发生位置变化, 同时, 使型芯高温相变时提供一定收缩空间, 从而解决了铸件偏、漏芯的问题。经过试验, 自由端涂制在各个方向上的厚度确定为: 叶片厚度方向上每侧控制在 0.1 mm ; 宽度方向上控制在 0.3 mm ; 叶片长度方向上控制在 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}$ 。

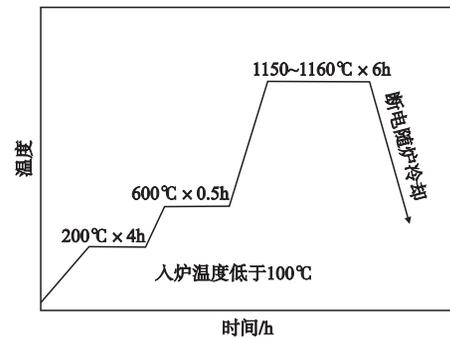


图2 型芯烧结曲线

Fig. 2 Curve of sintering temperature of core



图3 进气边与叶身转接R

Fig. 3 Transition R between inlet edge and blade body

2.5 铸件组合方案的确定

根据定向凝固的特点,结合导向器叶片的结构制定采用定向真空炉试验R150结晶底盘,组合为放射和叶背正对着加热器两种方案。试验结果显示:放射组合铸件晶粒长成了柱状晶组织,但局部山峰晶和斜晶现象较重。采用叶背正对着加热器组合方案,铸件柱状晶沿叶身纵向生长较好。叶片存在山峰晶和斜晶现象与整个温度场分布的不均匀性以及温度梯度不足均有关。叶背正对着加热器组合方案确保了温度场的均衡和叶片各个部位温度的均衡,特别是拉晶后期温度场较放射组合平稳,为此确定叶背正对着加热器组合方案。

由于该叶片具有超大缘板、宽弦结构、空心结构,研制初期出现大缘板疏松问题。定向凝固是一个顺序凝固过程,上游金属液对正凝固的区域进行补缩,确保形成致密的组织,但是由于导向叶片缘板悬臂处缺乏连续的结构,无法实现有效补缩,同时由于该处截面较大,受温度梯度的影响难以形成平直的凝固界面,后凝固区形成疏松,或显微疏松相对较重。

针对大缘板疏松问题,首次研究采用了中柱管引入补缩冒口的工艺方法(图5),克服了通常暗冒口补缩能力差的问题,疏松问题得到彻底解决。

2.6 型壳制造工艺

该叶片用硅溶胶为粘结剂,电熔刚玉加矿化剂制壳。在研制初期,型壳出现开裂、跑火问题,观察跑火位置,主要位于叶片排气边处。分析原因为叶片排气边较薄,有尖角,涂料涂挂性不好,挂砂难,致使型壳在该处最薄,强度低,承受不住高温合金液的压力,造成开裂。根据这种情况,一方面对蜡模排气边修整进行改进,防止出现尖边、尖角;另一方面通过试验调整配料参数。最终解决了浇注跑火问题。

2.7 浇注工艺参数的选取

该叶片研制初期出现大晶粒、山峰晶和斜晶等问题,针对上述问题调整了拉晶速度和浇注工艺。定向工艺一个重要的工艺参数就是铸型移动速率,控制铸型移出速率实际上就是控制凝固界面的推进速率,以使凝固界面稳定在底部挡板附近。铸型移动速率太慢,晶粒细碎,且易出现晶粒中途消失,移动速率太快,结晶时释放的热量不能沿纵向充分传导出去,而相当一部分热量则通过型壁沿横向导出,而造成凝固界面严重凹陷,柱状晶生长出现倾斜现象,同时由于移出速度太快,促使柱晶生长极不稳定,柱晶之间的竞争与淘汰,使具有优势的晶粒淘汰其余晶粒,往往出现整个零件底部柱晶晶粒比较细,而上部柱晶数量少而且发散,甚至由于横向热流占了优势,往往导致等轴晶的出现。快速凝固法(HRS)的温度梯度低是

由其原理所决定的,实际工程应用中,受铸件结构、设备、组合方案等因素的影响,实际获得的温度梯度较理论可达到的温度梯度低得多,而且同一截面不同位置不均衡,为此在拉晶过程中上下缘板处采取了变速拉晶,同时随着拉晶距离的增加,拉晶速度也适当调整,在截面平稳区固液界面控制如图6中B,截面突变区固液界面控制如图6中A,尽量避免固液界面如图6中C。在变速拉区域之前设置变速区,使拉晶速度缓慢过度(图7)。

采用上述方案解决了铸件宽晶、斜晶、断晶等问题,晶粒度合格率由初期30%提高到100%。

最终确定工艺参数如下:型壳保温温度为 $1\ 520\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$,保温时间为15 min;精炼温度为 $1\ 570\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$,精炼时间为1~2 min;浇注温度为 $1\ 520\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$;拉晶速度为变速。

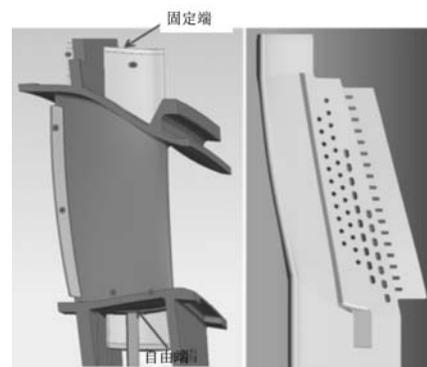


图4 型芯定位端及自由端

Fig. 4 Positioning end and free end of core

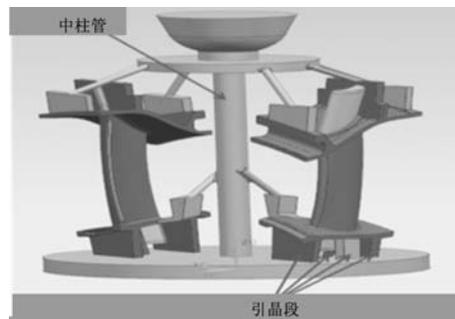


图5 中柱管引入补缩的工艺方法

Fig. 5 Process method for introducing feeding into central column pipe

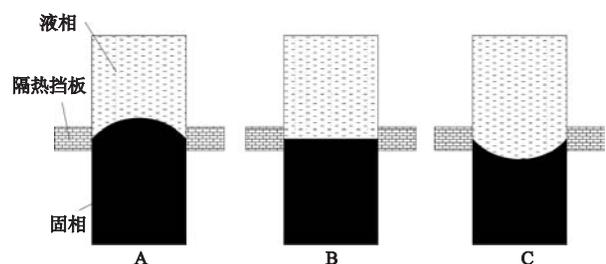


图6 固液界面

Fig. 6 Solid liquid interface

2.8 铸件的尺寸检测

为保证铸件最终尺寸, 满足设计图和加工要求, 在铸件试制初期, 就开始了尺寸检测工作, 采用划线、三坐标、蓝光扫描等方法, 对陶瓷型芯、铸件进行全尺寸检测, 并通过解剖铸件对内腔尺寸进行检测, 通过试加工完成铸件加工余量的保证, 对发现的问题及时调整型芯、型壳工艺方案及修理模具。

3 生产结果

按照此工艺方案生产了5批铸件, 整个铸造生产过程稳定, 合格率稳定在70%左右, 铸件冶金质量、尺寸、后续加工均满足技术要求, 铸件实物如图8。

4 结论

(1) 采用点定位的型芯定位方法及自由端三方向厚度控制工艺解决了铸件偏、漏芯问题, 得到了合格壁厚的铸件。

(2) 采用了中柱管引入补缩冒口的组合方案, 加强了暗冒口补缩能力, 解决了铸件大缘板疏松问题。

(3) 采用变速拉晶改善了凝固过程中固液界面状态, 解决了定向叶片大晶粒、山峰晶和斜晶等晶粒度超差问题。

参考文献:

- [1] 姜不居. 熔模铸造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 顾国红, 曹腊梅. 熔模铸造空心叶片用陶瓷型芯的发展 [J]. 铸造技术, 2020, 23(2): 80-83.
- [3] 陈荣章. 航空铸造涡轮叶片合金和工艺发展的回顾与展望 [J]. 航空制造技术, 2020(2): 19-23.
- [4] 马世岩, 尤宏德, 王雷, 等. IC10材料在涡轮冷却叶片上的应用研究 [C]// 第十一次全国热处理大会, 2015.
- [5] 韩大平, 王丽萍, 张松胜. 一种无余量叶片定向凝固工艺的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014(1): 74-76.

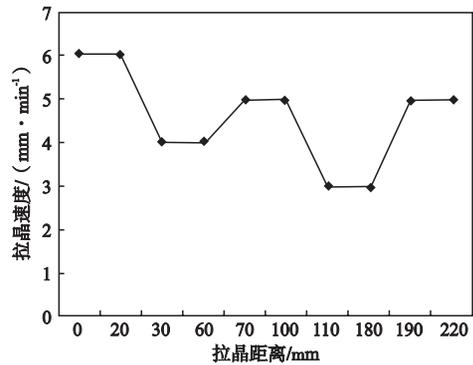


图7 拉晶速度曲线

Fig. 7 Crystal pulling speed curve

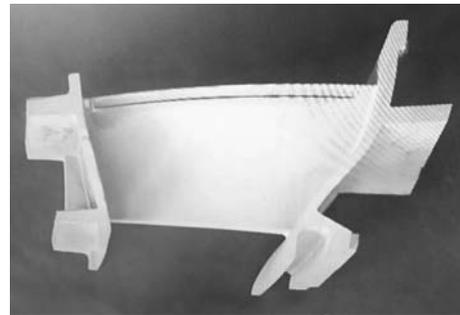


图8 导向器叶片铸件

Fig. 8 Guide blade casting

Study on Investment Casting Process of Directional Guide Blade

YANG Wu¹, LIN Shi-bo², ZHONG Qian²

(1. China Aviation Gas Turbine Company Limited, Shenyang 110015, Liaoning, China; 2. China Airline Shenyang Liming Company, Shenyang 110043, Liaoning, China)

Abstract:

Through systematic study on the ceramic core manufacturing process, shell manufacturing process and investment casting process of the guide blades, the technical specifications of directional solidification technology applied to guide blades with complex structure, hollow and no allowance were determined. The crack in section abrupt change region and porosity in large flange plate were eliminated, and the problems of blade deviation, leakage and core breakage in complex inner cavity structure during directional solidification of guide blades were also solved.

Key words:

directional solidification; blades without allowance; ceramic cores; cracks; porosity