

K4002 合金异型复杂薄壁进气道铸件成形工艺

谢秋峰^{1, 2}, 尹三强^{1, 2}, 吴亚夫^{1, 2}, 吴剑涛^{1, 2}, 李 维^{1, 2}, 李俊涛^{1, 2}

(1. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081; 2. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 071000)

摘要: 某异型复杂薄壁进气道铸件的模具设计和铸造难度大。采用分块组合式金属型芯结构, 设计整体蜡模精铸模具, 解决了模具成形问题, 并降低了模具成本; 采用蜡模校正工装, 对蜡模型面进行定形校正, 获得了满足尺寸要求且表面质量良好的整体蜡模。设计了联合注入框架式的浇注系统, 确定合理的浇注工艺参数, 成功生产出了满足设计和使用要求的完整进气道铸件。

关键词: K4002合金; 进气道铸件; 模具设计; 蜡模; 成形工艺

进气道是超燃冲压发动机的重要部件之一, 该部件的主要功能是捕获足够的空气并进行高效率的压缩, 为燃烧室提供一定压强、温度、速度和流量的空气, 对实现高超声速飞行起着关键作用, 其工作状态和尺寸精度直接影响发动机的推力大小和效率等, 因此对其性能和尺寸精度有很高的要求^[1-2]。目前该进气道铸件正向轻量化、复杂化及整体化方向发展, 越来越多地采用大尺寸复杂异型曲面的薄壁结构, 该类零件结构呈不规则外形, 如多边形或异型曲面。早期的进气道一般采用变形高温合金板材钎焊而成, 常用材料是GH3230和GH5188。随着冲压发动机的不断发展, 提出了长时使用温度超过1 050 ℃、短时使用温度超过1 100 ℃、使役时长超过300 s的要求, 变形高温合金板材焊接件已经不能满足该要求, 因此开始研制承温能力更高、综合性能更好的铸造高温合金进气道结构件。

某异型复杂薄壁进气道是在研某型号超燃冲压发动机的重要部件, 采用K4002铸造高温合金无余量整体熔模铸造而成。该部件在高温高超音速的环境中工作, 其横截面呈近似月牙形, 由进气口壁面、出气口法兰、安装节安装面、侧面蒙皮安装位置以及数个安装圆台、肋筋等组成, 整体尺寸(385 mm×365 mm×125 mm)较大, 壁厚相差悬殊, 流道壁较薄, 大部分壁厚3.0 mm, 承力筋位置壁厚达到16 mm; 内流道面最窄处(喉部)仅20 mm, 通道狭窄; 管道型面复杂, 是由一系列曲面在空间上扫掠而成; 蜡模成形和铸造成形难度均较大。

1 试验材料及方法

该异型复杂薄壁进气道铸件采用K4002合金整体无余量精密铸造而成。K4002合金是一种镍基沉淀硬化型铸造高温合金, 其特点是富含W、Ta、Hf等难熔合金元素, 具有较高的高温和中温持久强度, 组织稳定性、抗氧化性和抗热腐蚀性能好, 是一种优良的航天用结构材料, 其力学性能满足新一代航天发动机关键零部件要求^[3], 工作使用温度可达1 050~1 100 ℃。本研究采用ZG1.5L型真空感应炉熔炼K4002母合金, 其主要化学成分如表1所示, 然后在ZG0.2L型真空感应炉中重熔母合金并浇注铸件。

进气道铸件形状复杂, 本研究针对该部件的结构特点, 利用UG NX软件设计分体模具结构, 以制备出完整的整体蜡模; 设计合理的浇注系统, 优化浇注工艺参数, 以制备出完整的进气道铸件, 并分析蜡模和铸件成形工艺的合理性。

作者简介:

谢秋峰(1985-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为铸造高温合金及其精铸工艺。电话: 13436716391, E-mail: xie_qiufeng@126.com

中图分类号: TG24
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2021)09-1080-04

收稿日期:

2020-06-21 收到初稿,
2021-05-18 收到修订稿。

表1 K4002合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of K4002 alloy

													$w_B/\%$
C	Cr	Co	W	Al	Ti	Ta	Hf	Zr	B	Mo	Fe	Mn	Si
0.14	9.14	10.06	9.71	5.38	1.48	2.36	1.38	0.051	0.013	0.005	0.083	0.002	0.026

2 成形工艺方案及分析

2.1 模具设计方案

图1为异型复杂薄壁进气道铸件的结构示意图，A处区域进气道型腔左窄右宽，B处区域进气道型腔右宽左窄，并且管道型面由一系列曲面扫掠而成；在气流通道方向，中间区域是一喉部，尺寸宽度最小；整体形状复杂，模具成形困难。针对该零件的结构特点，本试验采用了分块组合式金属型芯整体模具结构，这样一套模具就可获得整体蜡模。

管道型腔的形成也是一个难题，因为图1中A、B区域较难成形，需要用型芯来形成熔模内腔。若采用陶瓷芯，体积大的陶瓷芯表面质量会很差，且在铸件成形后需用强酸或强碱溶液将其溶蚀脱除，工艺流程也很长；另外，由于铸件为薄壁结构，浇注后容易产生裂纹缺陷。如果采用可溶性型芯，由于体积较大，其表面质量也会很差，且铸件收缩不易控制。如果直接采用整体的金属抽芯，则无法实现抽芯。本研究经过UG NX运动仿真，将金属抽芯做成分块组合式结构，易于实现抽芯，且抽芯后蜡模型腔表面质量好，因此管道型腔蜡模的成形最终采用了分块组合式金属抽芯结构的模具成形方案，如图2所示。

2.2 蜡模成形方案

按照模具设计方案制作了蜡模整体模具，在MPI 55-50型压蜡机上进行蜡模压制，经过试压验证，可采用的蜡模压制工艺参数如表2所示。为了保证型面轮廓度，压制的蜡模放在校正工装上进行校正，如图3所示，将蜡模放在随形的定型工装上，同时进气口处的流道也用放置型块来定型。

由于进出口法兰处比较厚大，为了防止尺寸收缩过大或局部产生缩陷，影响熔模表面的完整性和光度，在铸件进口法兰和出口法兰处均采用蜡模假芯技

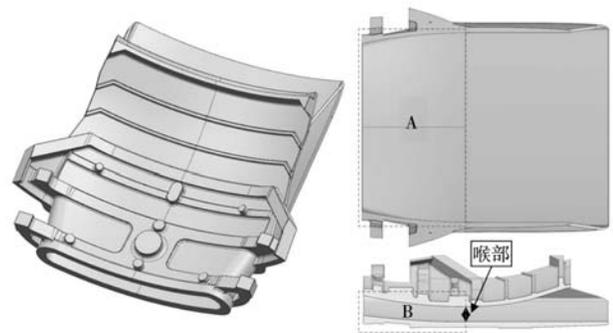
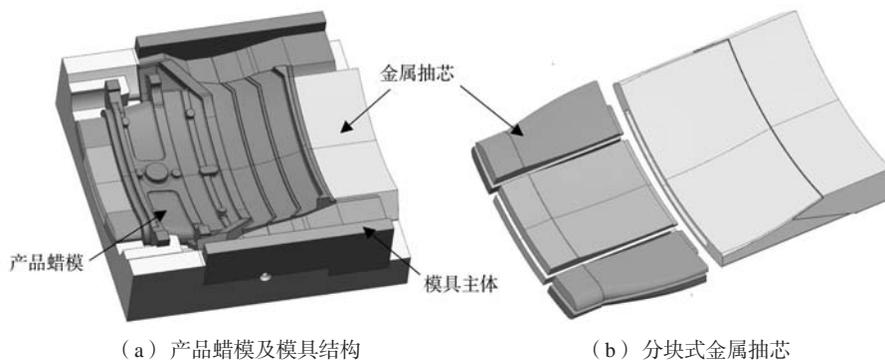


图1 进气道铸件结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of inlet casting



(a) 产品蜡模及模具结构

(b) 分块式金属抽芯

图2 进气道模具及其金属抽芯结构

Fig. 2 Structure of split mould and metal cores for inlet casting

表2 进气道蜡模压制工艺参数
Table 2 Technical parameters of pressing wax pattern for inlet casting

合模压力/MPa	注射压力/MPa	蜡缸温控/℃	蜡管温度/℃	射蜡嘴温度/℃	注射时间/s	保压时间/s
5	3.0	90	62	63	60	60

术,即采用预先压制蜡块来作为蜡模假芯,然后再二次成形出进气道整体蜡模。同时,压型时的注蜡时间和保压时间应足够长,以充分减小进口法兰、出口法兰压制后的尺寸收缩。压制好的整体蜡模如图4a所示,可以看出具有较高的表面质量,表面没有发现缩陷、裂纹、皱皮和鼓包等缺陷。经过蓝光扫描,结果如图4b所示,结果表明进气道流道轮廓度满足尺寸公差要求($\pm 0.5\text{ mm}$)。

2.3 浇注系统设计

K4002合金进气道铸件结构复杂,流道管壁与安装节、安装圆台壁厚差较大,因此合理的浇注系统对铸件的成形及质量起着至关重要的作用。浇注系统设计的总体思路为:首先设立较大的浇口杯,使金属液顺利浇入,迅速建立充型动压头,保证充型良好;在铸件安装节和安装圆台上均布置内浇口;流道管壁厚较薄(3.0 mm),为了保证充型和补缩,在流道管壁上均匀布置内浇口;为了防止浇注过程中铸件的变形,添加框架式的横浇道+竖浇道与内浇口连接。基于以上思路,设计了“顶注+侧注”联合框架式浇注系统。该浇注系统结构简单,方便蜡模组合,有利于铸件的顺序凝固,方便后续清理工序。

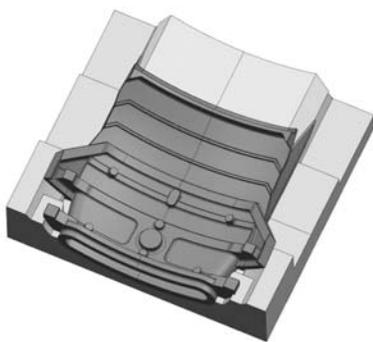


图3 进气道蜡模定型工装

Fig. 3 Shaping tooling of wax pattern for inlet casting

2.4 型壳制备工艺

优质型壳是获得表面光滑、棱角清晰、尺寸正确和质量良好的铸件的先决条件^[4]。本研究采用硅溶胶陶瓷型壳工艺,型壳由面层和加固层组成。为获得高质量的型壳面层,面层材料采用硅溶胶粘结剂+锆英粉,撒砂材料为刚玉砂,并且涂挂两层。加固层可保证型壳具有一定的强度,使型壳在运输、焙烧、浇注过程中不致开裂,采用硅溶胶+煤矸石粉,撒砂材料为煤矸石砂,涂挂6层。

由于进气道管道型腔比较狭窄并且较长,给管道型腔部分的料浆涂挂和型壳干燥都带来很大的困难。工艺试制时,采取延长型壳的干燥时间,清理型腔的表面浮砂等方法,使该处的型壳强度达到浇注要求。

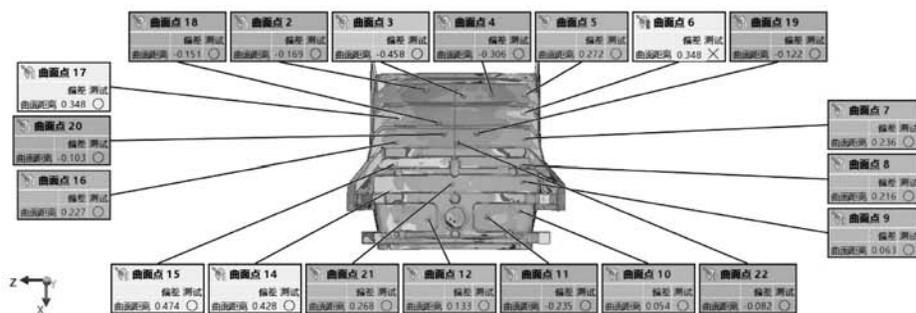
2.5 熔炼浇注工艺

选用K4002合金,采用双真空熔炼浇注工艺,即采用真空熔炼的母合金锭,在真空铸造炉中重熔后浇注零件毛坯。由于采用热型浇注,浇注温度、型壳温度等浇注工艺参数对铸件质量均有影响。研制过程中采用了不同的型壳温度和浇注温度,并对不同温度下的结果进行了比较。结果表明:对于该进气道铸件,当型壳温度和浇注温度较高时,金属液充型能力强,基本不会产生浇不足和冷隔等缺陷,但是型壳温度和浇注温度过高,金属液凝固时间增加,容易产生疏松和热裂缺陷;而较低的型壳温度和浇注温度不利于铸件的补缩,内部疏松增加。经反复试验,并结合以往生产K4002合金精铸件经验,最终确定了进气道铸件的浇注工艺参数:浇注温度 $1\ 480\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、型壳温度 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

通过上述工艺的研究,成功试制出了K4002合金进气道铸件,其实物如图5所示,可见表面质量良好,特别是管壁型腔的表面质量。铸件经荧光渗透检验、X射线探伤和尺寸检验,均达到了技术条件所规定的要求。



(a) 进气道整体蜡模



(b) 进气道整体蜡模的蓝光扫描结果

图4 进气道整体蜡模实物及其尺寸扫描结果

Fig. 4 Integral wax pattern and blue light scanning results of its sizes for inlet casting



图5 进气道铸件实物
Fig. 5 Real inlet casting

3 结论

(1) 分析了进气道铸件的结构特点, 利用UG NX 软件设计出了合理的模具结构, 解决了蜡模的成形问题。

(2) 采用分块组合式金属抽芯结构的整体蜡模成形方案, 再将压制的蜡模通过定形工装进行校正, 制备出表面完整、质量良好且尺寸精度满足要求的进气道铸件用整体蜡模。

(3) 采用硅溶胶制壳工艺, 设计“顶注+侧注”联合注入框架式浇注系统, 确定合理的浇注工艺参数, 最终生产出了满足技术要求的进气道铸件。

参考文献:

- [1] 何至林, 高峰, 金楠楠. 超燃冲压发动机进气道研究概述 [J]. 飞航导弹, 2010 (4): 82-87.
- [2] CHEN B, XU X, CAI G B. A multi-code CFD solver for the efficient simulation of ramjet/scramjet inlet-engine coupled flow fields [C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2007.
- [3] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册 (下卷) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [4] 姜不居. 熔模精密铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

Manufacturing Process of K4002 Alloy Inlet Casting with Thin Wall and Complex Shape

XIE Qiu-feng^{1,2}, YIN San-qiang^{1,2}, WU Ya-fu^{1,2}, WU Jian-tao^{1,2}, LI Wei^{1,2}, LI Jun-tao^{1,2}

(1.Beijing CISRI-GaoNa Materials&Technology Co., Ltd., Beijing100081, China; 2.Dekai Intelligent Casting Co., Ltd., Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract:

The inlet casting has a specially shaped complex thin-walled structure, and it is very hard to design its mould and produce the casting. By adopting the block combined metal core structure, the investment mould was designed to prepare the integral wax pattern of the inlet casting, solving the mould forming problem and reducing the cost of wax pattern. By adopting the shaping tooling of the wax pattern to correct its surface shapes, the integral wax pattern with good dimensional accuracy and excellent surface quality was prepared. By adopting the united-inpouring gating system and the reasonable casting parameters, the inlet casting was successfully manufactured, which completely meets with the demands of design and use.

Key words:

K4002 alloy; inlet casting; mould design; wax pattern; shaping process