● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.07.014

整体喷嘴环的熔模铸造技术及机械加工工艺研究

丁月钢[1],闫 晓[1],侯婷婷[1],丁月玲[2]
(1.大同北方天力增压技术有限公司,山西 大同 037036;2. 山西柴油机工业有限公司,山西 大同 037036)

摘 要:由于整体喷嘴环熔模铸造后整体脱模困难,采用三维计算机软件 CAD/CAM 设计出整体喷嘴环分体式模具,开发了悬臂薄叶片喷嘴环 K213 高温合金整体浇注成型技术,并研究了高温合金难加工材料的加工方法。结果表明,经分体式模具制备的喷嘴环铸件无明显铸造缺陷,合格率达到 70%;对喷嘴环的切削参数以及刀具进行合理选择,保证了表面加工质量和尺寸精度,提高了生产效率,降低了成本。

关键词:涡轮增压器;整体喷嘴环;分体式蜡模;机械加工
中图分类号:TG249 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)07-0609-04

Study on Investment Casting Technology and Machining Process of Integral Nozzle Ring

DING Yuegang[1], YAN Xiao[1], HOU Tingting[1], DING Yueling[2]
(1. Datong North Tianli Turbocharging Technology Co., Ltd., Datong 037036, China; 2. Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037036, China)

Abstract: Due to the difficulty of integral demoulding after integral nozzle annular investment casting, a split mold of the integral nozzle ring was designed by CAD/CAM, the integral casting technology of the cantilever thin blade nozzle ring K213 superalloy was developed, and the processing method of the refractory materials of the superalloy was studied. The results show that there are no obvious casting defects in the nozzle ring castings prepared by the split die, and the qualified rate reaches 70%. Reasonable selection of cutting parameters and cutting tools of nozzle ring can ensure surface machining quality and dimensional accuracy, improve production efficiency and reduce cost.

Key words: turbocharger; integral nozzle ring; split wax mold; machining

涡轮增压器作为发动机上的重要部件,主要是将发动机排放的废气作为能量,通过控制喷嘴环叶片的开合程度来增加进气量以提高燃油的燃烧率,从而达到节省燃油和减少汽车尾气的排放量的目的[1]。在能源危机、环境保护等诸因素的影响下,涡轮增压器的应用得以飞速的发展。对于内河航运、拖网渔船及柴油机等行业,由于发动机长时间以中低速运行,会造成排气能量不足,涡轮转速和增压压力下降,燃烧过程冒黑烟,排气温度升高,扭矩特性变差等缺陷。为使发动机在低速高负荷的工况下具有良好的扭矩特性,这就要求与之匹配的涡轮增压器能在发动机中低速时给予较高的增压压力,进一步提高发动机的经济效益。固定式整体喷嘴环作为涡轮增压器上的重要组件,通过固定式叶片改变发动机废气进入涡轮的方向,使涡轮增压器在发动机中低速时获得较高的转速,有效的提高了涡轮增压器的压力;但由于涡轮增压器在高温、高压的恶劣工作环境下工作会产生热变形等机械故障,因而这种将喷嘴环喷嘴叶片与涡轮进气罩铸在一起的设计无法实现熔模铸造工艺中蜡模的整体成型[2-4],给蜡模的出模带来了很大的困难,因此,整体喷嘴环分体式蜡模的提出是解决以上问题的优良选择。涡轮增压器的喷嘴环具有叶片长、环盘薄、工作环境恶劣的特点,叶片通常采用高温强度、热稳定性及耐腐蚀性能优异的镍基高温合金[5-6],但这种材料强度高,切削加工困难,容易变形;此外,喷嘴环与涡轮配合的圆弧面及中孔、与涡轮箱配合的外圆精度要求较高,车削加工难度大,加工精度和表面质量不易保证;喷嘴环法兰上的通孔、台阶孔等钻削加工难度大,普通高速钢钻头无法加工[7-10],因此,掌握高温合金难加工材料的机械加工工艺,保证表面加工质量和尺寸精度,提高生产效率也是本文的目标。

收稿日期:2021-03-16

作者简介:丁月钢(1982—),山西太原人,学士,副研究员.主要从事熔模铸造、低压铸造工艺及模具设计方面的工作.电话:13734205204,Email:13734205204@163.com

1 整体喷嘴环的熔模铸造技术

1.1 蜡模及模具三维结构设计

整体式喷嘴环在结构上通常采取悬臂薄叶片、

涡轮进气罩与叶片一体化的设计方案，蜡模无法直接整体成型。为解决整体式喷嘴环的蜡模成型问题，采用分体式蜡模组合成整体蜡模的思路。首先，利用三维计算机软件 CAD/CAM 对喷嘴环的模具进行了结构设计。将蜡模分成可单独成型的两部分：压注喷嘴环顶环的模具（见图 1a）和压注喷嘴叶片的模具（见图 1b），压注成型后再组合焊接，通过修补组合部位接缝，组成整体蜡模（见图 1c，d）。

1.2　制模工艺

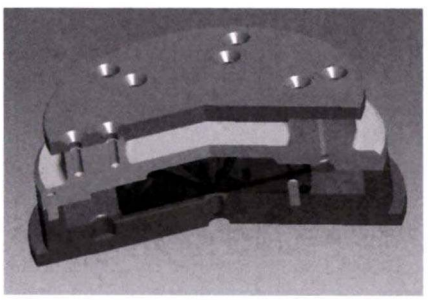
该整体喷嘴环使用材料为 K213 高温合金，流动充型性能较差，且喷嘴环的叶片最薄厚度为 1 mm，高度 40 mm，周向均布，难以完整浇注充型。为解决整体喷嘴环薄叶片的浇注充型问题，通过合理设计浇注系统、增加型壳保温措施保证了叶片的完整充型。

1.2.1　浇注系统的设计

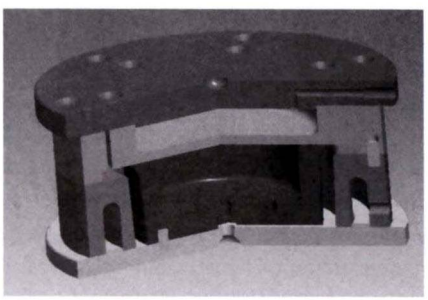
喷嘴环是壁厚不均匀的铸件，叶片部分将首先凝固而得到较细的晶粒。通过加厚环形直浇道铸件叶盘能得到充分的补缩。在重力的作用下，液体金属能对流，较冷的金属生成的晶核下沉，底部冷却较快，使缩松、缩孔集中在可加工的自由表面上。据此，在浇注喷嘴环时采用无冒口方案。这可有效提高生产效率，减少加工量，节约原材料并降低生产成本。

1.2.2　型壳保温措施的优化

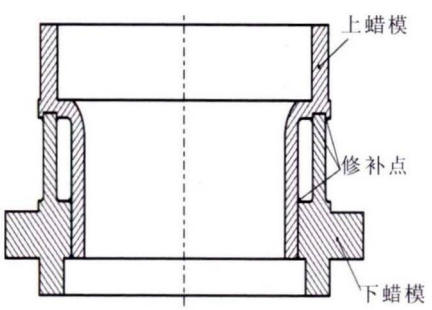
型壳保温工艺优化即型壳焙烧前，根据整体喷嘴环的结构及铸造工艺特点，在型壳内外制作以石棉布、石棉毯或耐火泥为材料的保温层，需保持均匀，且型壳保温温度约为 1 040 ±10 ℃，如图 2 所示。型壳保温措施的增加不仅可以延长保温部位液态金属的凝固时间，打通或拓宽浇口对较远处热节



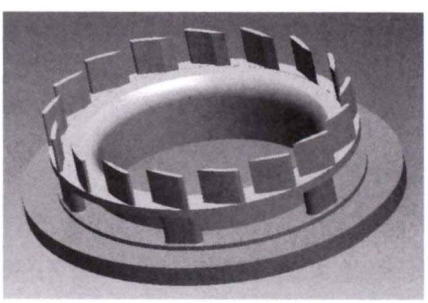
(a)压注喷嘴环顶环模具



(b)压注喷嘴叶片模具



(c)分体式蜡模组合二维图



(d)分体式蜡模组合三维图

图 1 整体喷嘴环分体式蜡模示意图

Fig.1 Schematic diagram of integral nozzle ring split wax pattern

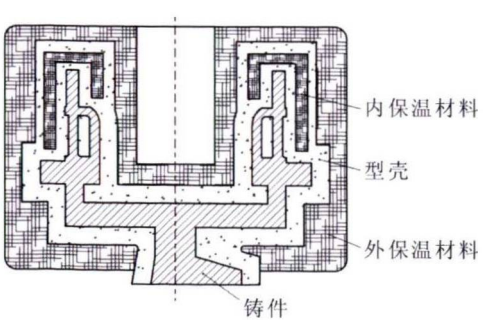


图 2 型壳保温工艺示意图

Fig.2 Schematic diagram of shell insulation process

的补缩通道，使热节部位组织致密，在一定程度上解决了铸件组织出现的缩孔、缩松等缺陷；而且可以提高铸件工艺出品率，减少合金消耗，应用灵活方便，具有可操作性。

1.3　整体喷嘴环的铸造工艺

整体喷嘴环作为固定件，需要具备耐高温、抗腐蚀、高强度及高韧性等特点[11-12]，其作用是调节和控制涡轮进气的流速，主要采用真空熔炼浇注工艺。

基本工艺路线如下：打开真空感应熔炼炉（型号：ZG-0.025）炉门→坩埚内装料（10±0.03 kg）→焙烧炉内取出模壳→放入炉内保温箱→清理模壳内部灰尘及落砂→合炉门抽真空（≤5 Pa）→送功熔化

(60 kW)→去氧化膜精炼（精炼温度 1 580±5 ℃)→降温浇注（浇注温度 1 450±5 ℃)→炉内冷却(≥3 min)→开炉取出模组放入专用保温箱内保温(≥4 h)。

图 3 为真空熔炼浇注工艺曲线。

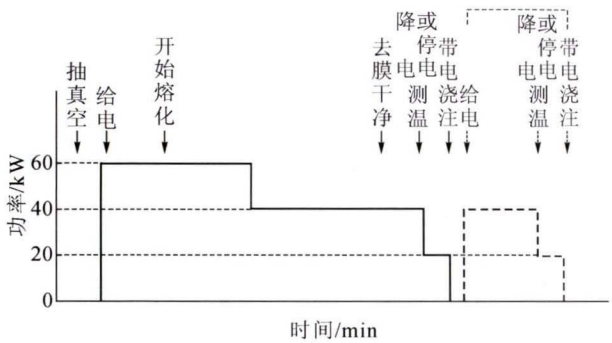


图 3 真空熔炼浇注工艺曲线

Fig.3 Vacuum melting casting process curve

通过多次试验，喷嘴环铸件经 X 射线探伤检查未发现明显的缩孔等缺陷，满足设计要求，合格率达到 70%。

2 整体喷嘴环的机械加工工艺

整体喷嘴环由于是整体加工，叶片扭曲度大，叶片间通道深而窄，加工约束多且尺寸较大，叶片数量多，导致工件在加工过程中的切除率增大，因此在保证喷嘴环质量的前提下，提高加工效率也成为其加工难点。整体喷嘴环的加工工艺为：毛坯→锻造→粗车→粗铣→热处理→修复基准→半精车→半精铣→精车→精铣→打孔→车工艺边→最终检验。在喷嘴环整个制造过程中，车削是金属切削的第一道工序，主要是对内外缘板回转面的加工，一方面为后续工序提供加工基准，另一方面可以去除大量余量。数控加工是整体喷嘴环叶片形面保证质量和提高加工效率的关键技术。数控加工主要包括粗加工和精加工两部分。粗加工以提高加工效率、去掉大余量为目的，精加工则以保证形面质量为目的，即达到叶形公差和较小的表面粗糙度，为后续抛光工序减少工作量。这种型号的整体喷嘴环采用 K213 高温合金制作，叶片的壁厚较薄，在加工过程中发现切削加工难度很大，主要表现在几个方面：加工硬化现象十分严重；切削力大；切削温度高；刀具磨损剧烈，耐用度明显下降；加工相对较大的孔时，由于工件壁薄受力大会产生变形。因此对于加工方法、切削参数以及刀具的选择尤为重要。

整体喷嘴环的粗加工采用插铣法，这种方法的切削力相对稳定，刀具的振动幅度较小，适用于镍基高温合金这种难加工材料。此外，这种方法在普通数控机床上就可以实现，由于喷嘴环叶片形状的约束，在加工时会受到前后叶片的干扰，加工不稳定会导致刀具崩刃，而插铣法的应用会彻底解决叶形划伤的问题，同时也提高了加工效率。喷嘴环的精加工包括外圆、内孔、端面、叶片，采用五轴加工中心。由于叶片的弯曲程度较大，使粗加工后的余量不均匀，因此，在余量较大的地方增加了半精加工工序，使其余量保持均匀，防止刀具崩刃以及工件啃伤的情况出现。

经过切削试验研究，表 1、表 2、表 3 分别为这种喷嘴环的车削刀具、钻高速钢超硬麻花钻头、高温合金直槽丝锥、高钴钻铣刀，以及切削用量、切削液的合理选择，即保证了表面加工质量和尺寸精度，又提高了生产效率。

图 4 为精车工序示意图。

经过调查发现，该类型整体式喷嘴环的外购价格单件在 3 000 元以上，通过自主的工艺开发，成本可控制在 1 000 元左右，降低了 60%以上。

表1 车削加工刀具和车削用量

Tab.1 Turning tools and turning parameters

加工方式	刀具牌号	切削深度	进给量 /(mm/r)	切削速度 /(m/min)	切削液
普通车床粗车外圆、端面、叶片	YD15	1mm	0.13	20	乳化液
数控车床半精车外圆、内孔、端面、叶片	外圆车刀 CNMG120408-NMS WSM20 内孔车刀 CNMG120408-NM4 WSM20 端面车刀 CNMG120408-NM4 WSM10	0.4	0.10	35	
数控车床精车外圆、内孔、端面、叶片	外圆车刀 CCMT120404-PM5 WSM10 内孔车刀 CCMT120404-PF4 WSM10	0.2	0.05	45	

表 2 钻削加工钻头和钻削用量
Tab.2 Drilling bit and drilling consumption

加工方式	刀具牌号	钻头直径	进给量 /(mm/r)	切削速度 /(m/min)	切削液
钻孔	钴高速钢超硬麻花钻头	ϕ8.5 ϕ9 ϕ11	0.4	8	乳化液
锪钻台阶孔	高钴钻铣刀	ϕ15		3	乳化液

表 3 攻制螺纹的丝锥和切削用量
Tab.3 Tap and cutting parameters for tapping thread

加工方式	刀具牌号	螺纹规格	切削速度	切削液
攻制螺纹	高温合金直槽丝锥	M8-6H	1.5 m/min	乳化液

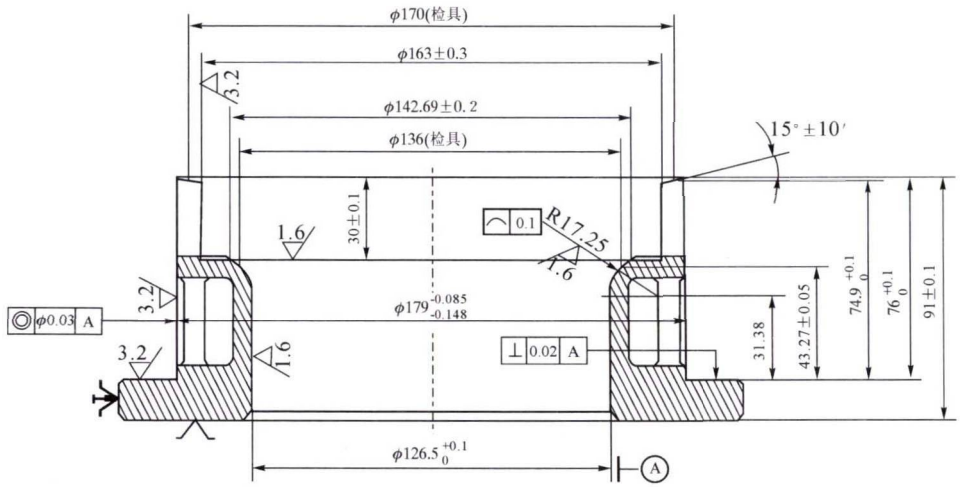


图 4 精车工序示意图
Fig.4 Schematic diagram of finishing process

3 结语

通过对此课题的研究，对整体喷嘴环的熔模铸造技术及机械加工工艺有了更系统化的了解，包括整体喷嘴环分体式模具的设计、这类零件的机械加工方法以及该类材料数控切削参数的选择，此次研制加工的成功，解决了整体喷嘴环在制作过程中生产效率低，成本高的难点，也为其它型号喷嘴环的制作提供了良好的工艺基础。

参考文献：

[1] 孙茜. 涡轮增压器喷嘴环叶片专用磨床的精度分析及改进设计[D]. 武汉：武汉理工大学, 2014, 5.
[2] 韩彩云. 290 增压器喷嘴环整体精铸 [J]. 特种铸造及有色合金, 1993, 1: 28-29.
[3] 魏自良, 张清惠, 韩采云, 等. 增压器喷嘴环的整体精密铸造[J]. 机车车辆工艺, 1980(2): 1-5.
[4] 包玉秋, 鲁蕊, 张大伟, 等. 熔模精密铸造型壳局部保温工艺探讨[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(8): 759-762.
[5] 张智秋, 贾峰. 航空发动机喷嘴关键工序加工及装备[J]. 用户之声, 2016 (2): 92-94.
[6] 郭长辉. 制造涡轮叶片的新方法 [J]. 中国新技术新产品, 2018, 3: 48-49.
[7] 陈艳芳, 黄袖清, 黄强飞, 等. 精密喷嘴的精密加工[J]. 科技传播, 2014, 7: 195-196.
[8] 朱丹. 汽轮机高压喷嘴组加工[J]. 机械制造, 2014, 43(1): 67-69.
[9] 张春华, 程卫祥, 陈亚莉, 等. 大型薄壁整体环形火焰筒加工工艺的研究[J]. 中国新技术新产品, 2012, 17: 12-13.
[10] 蔺小军, 史耀耀, 任军学. 整体喷嘴环高效数控加工技术[J]. 中国机械工程, 2010, 21(22): 2705-2709.
[11] 魏剑辉, 匡宇. 大型复杂薄壁整体熔模精密铸件的陶瓷型壳技术研究[J]. 铸造技术, 2016, 3(37): 488-491.
[12] 邓宏运, 王春景. 风电电机端盖低温球墨铸铁件消失模铸造技术[J]. 铸造技术, 2019, 1(40): 75-78.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。



地址：杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址：长兴县林城镇午山岗开发区
联系人：丁为兵
电话：15088362822
传真：0572-6087688
邮箱：dwb150@163.com