DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.08.016

一款复杂窄流道不锈钢导叶的精铸工艺研究

王　辉,蔡宗院,姜　淼
(嘉善鑫海精密铸件有限公司,浙江 嘉善 314105)

摘　要:导叶为泵类产品必不可少的配件,流道窄,分层多。为保证产品质量,采用整体精密铸造工艺,模具分3副模具,3部分进行组合为一件蜡胚产品。制壳时采用特制灌浆工艺,保证导叶流道浇注后不夹铁,方便后道工序清理流道。并通过ProCAST模拟软件,模拟浇注工艺设计的可靠性,从而确保了产品质量。

关键词:蜡胚拼接;多层浇道;灌浆工艺;数值模拟;复杂窄流道
中图分类号:TG249　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)08-0715-04

Study on Investment Casting of Complex Narrow Chanel Stainless Steel Guide Vane

WANG Hui, CAI Zongyuan, JIANG Miao
(Jiashan Xinhai Precision Casting Co., Ltd., Jiashan 314105, China)

Abstract: Guide vane is an essential accessory for pump products. The flow channel is narrow and multi-layered. In order to ensure the product quality, the overall investment casting process is adopted. The mold is divided into 3 sets of molds, and the 3 parts are combined into a wax embryo product. Special grouting process is adopted in shell making to ensure that the guide vane runner will not be filled with iron after pouring, and it is convenient to clean the runner in the following process. And the reliability of pouring process design is simulated by Procast simulation software, so as to ensure the quality of products.

Key words: wax pattern splicing; multilayer runner; grouting process; numerical simulation; complex narrow flow channel

精密铸造窄流道类导叶、叶轮,工艺复杂,从模具开发、制壳及铸造工艺设计,都与一般产品有较大差异。蜡胚尺寸保证,制壳不漏钢夹铁,铸造工艺确保无缩松,清砂难清理等等,在精密铸造领域,一直是各家企业长期存在的技术难题。

本文作者对复杂多层导叶铸件的几何结构特点进行分析,对复杂、多窄流道的内腔结构,模具采用拼模方式完成蜡膜组装,制壳工艺采用化学硬化的灌浆铸造工艺,进行整体铸造。并利用ProCAST模拟软件对铸件的流场、温度场与疏松缺陷进行模拟优化,确保了铸件的表面粗糙度及工艺开发一次性成功。

1　试验材料与方法

1.1　铸件结构特点

铸件单重25 kg,图1为导叶铸件的形状结构,铸件最大壁厚为28 mm,平均壁厚为15 mm,最大轮廓尺寸 ϕ360 mm×76 mm;叶片最小间距8 mm;分别由12个流道交错而成。整体结构较为复杂,流道窄而多,对制壳工序要求极高。且有多处地方容易产生热节,浇注系统设计也极为重要。

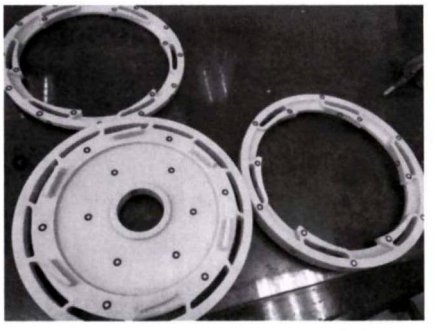


图1 由于生产导叶铸件的3个蜡模
Fig. 1 Three wax patterns for producing guide vane

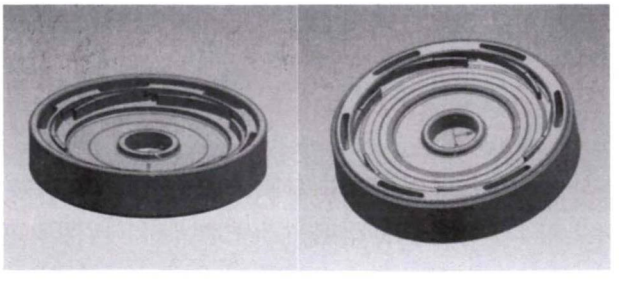


图2 导叶铸件三维结构简图
Fig. 2 Schematic guide vane

收稿日期:2021-05-06
作者简介:王　辉(1978—),四川武胜人,专科,工程师,技术部长.主要从事不锈钢精密铸造工艺方面的工作.
电话:18350330987,Email:huiw06@126.com

由图 2 看出，产品有 12 个双内流道内腔，这种内腔，如果采用常规工艺正常生产，模具无法开设取模；制壳时无法上砂及干燥，后处理也无法清砂。因此将导叶采用分体式分别制作 3 个蜡模然后组装，蜡件模组合完成后，制壳工序采用灌特制浆料，后处理工序采用水力清砂的方案，来解决这一结构难题，分体组合蜡件结构如图 1。

1.2 材料性能计算与模拟边界条件

导叶铸件本产品材质为 ZG07Cr19Ni11Mo2 奥氏体不锈钢，具有抗腐蚀的特性，表 1 为 ZG07Cr19Ni11Mo2 奥氏体不锈钢的化学成分。低碳（C≤0.07%）是为了尽量减少钢中碳化铬（主要是 Cr23C6）的析出，避免产生晶间“贫铬层”，防止铸件发生晶间腐蚀倾向。17%~20% 的 Cr，可以使钢的表面在氧化性介质中迅速形成致密的氧化铬保护膜，阻止氧化性介质的进一步侵入，使铸件具备足够强的抗氧化腐蚀、抗晶间腐蚀和抗应力腐蚀能力；9%~12% 的镍，除了发挥自身优良的抗腐蚀性能之外，其作用是形成足够小的“铬镍比”，扩大奥氏体区，使铸件在固溶处理的状态下，尽量形成单一奥氏体组织，减少或避免残余铁素体和碳化物的析出，使钢的基体保持单一均衡的电极电位，避免发生电化学腐蚀和晶间腐蚀倾向；低的含磷量（P≤0.040%）防止铸件发生冷裂倾向，低的含硫量（S≤0.030%）防止铸件发生热裂倾向。

工艺设计需要考虑流道对产品分割因素，产品为圆形类，故依流道为界线，设计成中心环、中心一周、流道外围的 3 层浇注系统。浇道设计为横浇道。钢液浇注充型后，经浇口杯首先由中心内浇道冲入产品型腔。当中心浇道钢液来不及流转时，再分散到中心周的 4 个内浇道，钢液再回转至最外围产品及内浇道，最终形成底注式浇注工艺。使钢液充型平稳、无紊流。

合理的浇注温度，是由铸件的重量、结构、壁厚、浇注者的操作水平等因素共同决定的。依据 ZG07Cr19Ni11Mo2 材质的成分、熔点、产品壁厚及产品重量，结合精密铸造特点，决定设计模壳焙烧温度为 1 100 ℃，浇注温度设计为 1 580 ℃。

表 1 ZG07Cr19Ni11Mo2 奥氏体不锈钢铸件化学成分 *w*（%）

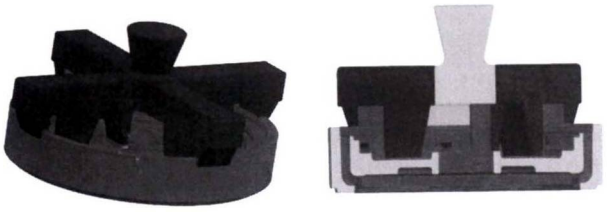
Tab. 1 Chemical composition of ZG07Cr19Ni11Mo2 stainless steel castings

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
≤0.07	≤1.50	≤1.50	≤0.040	≤0.030	17.0~20.0	9.0~12.0	2.0~2.5

2 铸造工艺设计与数值模拟

2.1 浇注系统设计

根据此产品的热节情况，依据亨金公式计算出来的内浇道模数是 1.3，预设浇注温度 1 580 ℃，液相线温度 1 470 ℃，则实际模数应该是 1 580/1 470 × 1.3 = 1.4，也就是说，实际模数应该稍大一些，增大比例为 2.68/1.3 = 2.061。这样计算出的浇注温度和开设的内浇道，给了现场浇注工人一个较大的操作空间，即使现场测温仪有少许误差，或者浇注者经验不足判断有误，也可以浇注出合格铸件。导叶铸件的浇注系统如图 3，铸件内部不允许有缩孔、缩松缺陷，由于流道间极易形成热节，采用顶注式方法进行浇注，在铸件中间设计了 4 个横浇道对其进行补缩，并且对于铸件一周采取了 4 个浇道的补缩设计。



(a)主视图　　(b)半剖视图

图 3 浇注系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gating system

2.2 流场、温度场与凝固缺陷数值模拟分析

图 4 为导叶铸件金属流动充填过程。由图 4 可知，钢液由浇口杯，进入直浇道，分别进入 4 个浇口，分散了钢液冲刷。使钢液充型平稳，避免钢液直冲产生卷气、紊流。8 个内浇道也很好解决了流道及中心盘内的缩孔、缩松。铸件的充型过程较为平稳，金属液受重力作用向下流动，从铸件底部开始填充，由于采用中间 4 个横浇道，形成了底注式浇注方式，铸件整体的充型顺序为自下而上，最后充型部位在铸件上方的横浇道处。由图 5 导叶铸件的凝固过程可以看出，铸件的各个部位凝固顺序可知，铸件底部一周处先开始凝固，自下而上进行凝固，最后凝固的部位为横浇道浇注系统，达到了顺序凝固的目的。在 ProCAST 软件中将孔隙率设为 3，即大于 3% 的缩松缺陷将会显示，由图 6 可知，铸件整体已无缺陷，缺陷集中于浇注系统内。

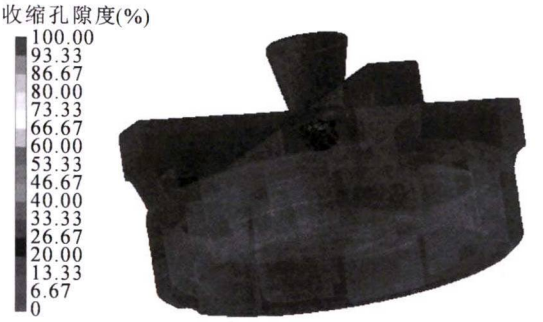


图 4 导叶铸件的金属流动充填过程

Fig. 4 The metal flow filling process of guide vane casting

(a)凝固60%　　(b)凝固90%

图 5 导叶铸件凝固过程

Fig. 5 The solidification process of guide vane casting

图 6 预测的导叶铸件疏松缺陷

Fig. 6 Predicted loose casting defects of guide vane

3　精密铸造制壳灌浆工艺研究

3.1　制壳技术难点

在生产导叶铸件制壳工序时,陶瓷型壳制备时流道内腔涂料及撒砂困难。内外环板之间流道宽度狭窄,典型狭窄深内腔结构。一方面,由于模壳空心内腔窄,沾浆敷砂困难,缝隙小,砂子进入内腔困难,无法再进行涂料及撒砂操作,导致流道内腔出现空腔。另一方面,在脱蜡和焙烧过程中型壳耐高温强度不足,造成芯子脱落或开裂,浇注金属液后出现大量的粘砂、夹铁等缺陷,致使铸件质量难以保证。夹铁会严重影响产品内部组织结构,形成缩松缺陷,同时也会导致铸件清理困难,并增加铸件表面粗糙度,而且由于流道内腔结构受限而操作困难,很难进行后处理修补,严重时会造成铸件报废。

3.2　灌浆工艺研究

针对复杂深内腔、窄流道导叶流道沾浆敷砂困难,需要采用化学硬化的原理,作者提出了硅溶胶陶瓷型灌浆的制壳工艺。

传统陶瓷型壳的逐层制壳工艺有其局限性,即采用单一硅溶胶粘结剂难以形成具有复杂内腔和深孔、深沟槽的铸件型芯,也无法满足其强度要求,造成流道夹铁不良。如果采用硅溶胶陶瓷型腔灌浆操作工艺,通过调整固化剂比例及对固化时间的控制,可以实现窄流道导叶、叶轮内腔型壳具有高耐火强度。而型壳的脱除办法有机械脱除和化学腐蚀法。

硅溶胶陶瓷型浆料能迅速充型和快速硬化,具有良好流动性和合适的胶凝时间,全过程可在20 min左右完成。型壳干燥快,干燥时间通常不超过8 h。经焙烧后的铸型有较好的强度和精度,承受合金液高温下的冲刷不变形、不开裂,完全能够满足铸钢零件浇注的要求。

对型壳浇灌材料预处理要求、配比、制浆等操作

标准参数要通过验验证，尤其是影响浆料附着的湿润剂、固化剂的调配，要优化最佳方案，制定产品验收标准，生产过程设置关键质量监控点，提高生产时合格率。

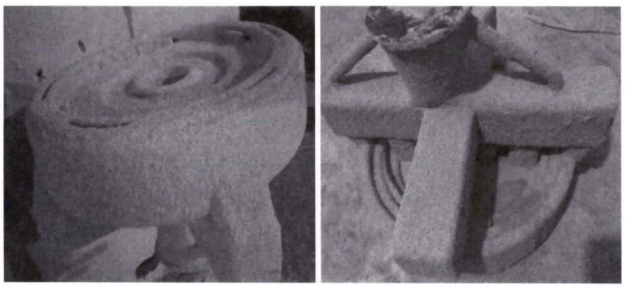
3.3 灌浆工艺配方及实施

原料预处理及制浆配方如下：

原料预处理：氧化镁预先在 850 ℃下焙烧 1 h，磷酸二氢氨采取配制溶液的方法，石英粉料预先在 800 ℃下焙烧 1 h。

制浆配方：液粉比为 1∶0.61、氧化镁加入量为 6.4%、砂/粉比为 1∶1.5、硅溶胶和磷酸二氢氨为胶凝材料，加入量为 26.7%。按照此配方配制的造型材料在流动性、胶凝时间和抗压强度上均能满足灌浆造型工艺的要求。

图 7 为制壳实物相片。



(a)灌浆前型壳　(b)灌浆后型壳

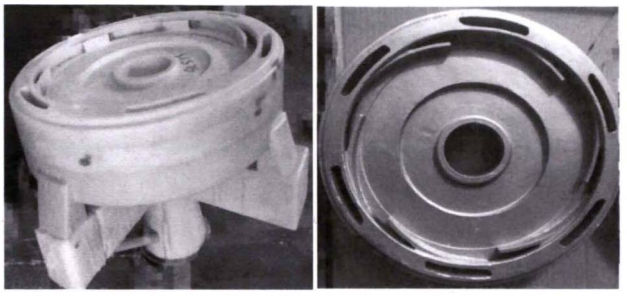
图 7 制备的模壳

Fig. 7 Mold shell

4 实验验证与性能检测

图 8 为熔模铸造生产中的蜡模与最终的导叶铸件，采用三拼式蜡模组合形成完整的铸件蜡模，制壳工序采用灌浆工艺，顶注式浇注系统进行实际生产，铸件采用水力清砂，铸件无缩孔缩松，提高了铸件的生产效率以及生产品质。

本产品材质为 ZG07Cr19Ni11Mo2，此材质铸态组织为奥氏体 + 少量铁素体 + 碳化物。为了使铸件具有最佳的抗腐蚀性能，需要对铸件进行热处理，以便最大限度地形成奥氏体单一组织，和最大限度地消除残余应力。本产品选择的固溶处理工艺为：入炉温度不高于 300 ℃，升温速率 150 ~ 200 ℃/h，温度升至 1 080 ± 10 ℃，保温 3.5 h 出炉。出炉后，在 15 s 内淬水冷却，水温 30 ℃以下，冷却到常温后吊出。热处理后，铸件本体试块抗拉强度 680 MPa，屈服强度 360 MPa，力学性能合格。



(a)蜡模　(b)铸件

图 8 带浇注系统的组合蜡模(左)和所生产的导叶铸件(右)

Fig. 8 Wax pattern with gating system (left) and produced guide vane casting

5 结论

(1)复杂多流道导叶铸件，流道宽度窄，采用模具拆分，蜡胚组合的方式制作蜡胚，实验结果表明，工艺符合铸件技术要求，成功开发复杂多、窄流道导叶。

(2)根据铸件结构特点，设计了多层浇注工艺，再利于 ProCAST 模拟软件对浇注工艺进行模拟，模拟结果与实际生产验证结果相符。为生产类似导叶积累了工艺经验。

(3)制壳工艺采用化学硬化的灌浆工艺，保证了复杂流道内部质量，为生产导叶、叶轮等窄流道类产品，起到了指导作用。

参考文献：

[1] 兰宏志，宿运招. 熔模铸造亨金公式适用性分析[J]. 铸造纵横，2002(7)：30-35.

[2] 郭红星，杨志强. 数值模拟技术在充型凝固过程中的应用[J]. 铸造技术，2016，37(12)：2676-2680.

[3] 郑伦川，刘贯军. 基于 ProCAST 模拟的铸钢件熔模铸造工艺优化[J]. 铸造技术，2016，37(8)：1776-1778.

[4] 蒋硕忠. 灌浆材料与灌浆工艺研究[J]. 水利水电技术，2001，32(9)：55-58.

[5] 吴文钤. 环状截面内浇道的底注式浇注系统：CN101966559 A [P]. 2011.

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