• 工艺技术 Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.010

# 大型不锈钢导流壳的铸造工艺研究及实践

张吉雁[1],张 彬[1],刘仲礼[2]
(1.烟台台海玛努尔核电设备股份有限公司,山东 烟台 264003;2.烟台大学 核装备与核工程学院,山东 烟台 264003)

**摘 要**:大型不锈钢导流壳铸件结构复杂,易产生变形、裂纹和夹渣等缺陷。通过对产品结构、质量要求、材料及使用状况进行分析,提出了缺陷解决方案。结果表明,模具精度、组芯精度和合箱过程控制是保证大型导流壳尺寸精度的关键,能够生产出合格产品;在大尺寸薄壁结构部位增加冒口有防止缩松和均匀应力作用;环形肋有利于防止环形结构变形。

**关键词**:导流壳;不锈钢;铸造工艺
**中图分类号**:TG269 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)07-0637-04

## Casting Method Study and Practice for Heavy Stainless Steel Diversion Shell

ZHANG Jiyan[1], ZHANG Bin[1], LIU Zhongli[2]
(1. Yantai Taihaimanuer Nuclear Equipment Co., Ltd., Yantai 264003,China; 2. School of Nuclear Equipment and Nuclear Engineering, Yantai 264003, China)

**Abstract**: The heavy stainless steel discharge bowl for seawater circulation system, used in conventional island of nuclear power plant, is easy to generate some defects, such as distortion, crack, slag inclusion and so on when make the casting. In this paper, based on the analysis of the product shape, quality requirement, material and working environment, corresponding solutions were proposed, finally, the qualified pilot casting was made. The results show that, firstly, mold precision, core assembly precision and control of sand boxes closing are the key points to guarantee the dimensional precision of discharge bowl; secondly, the risers should be placed at the thin wall position to prevent shrinkage porosity and make the stress even; thirdly, circular ribs avail distortion avoidance.

**Key words**: diversion shell; stainless steel; casting method

核电站常规岛循环冷却水系统要求大流量低扬程,泵体设计结构尺寸较大。三代 AP1000 核电站采用立式混流泵结构,海水从叶轮的轴向侧进入,水平侧流出,进入导流壳,在导流壳内改变方向,从轴向侧流出,进入垂直管路。作为连接叶轮与泵出口之间的通道,导流壳在降低能量损耗和稳定出口液流状态起到重要作用,是除叶轮之外对水泵性能影响最大的一个部件。三代核电站用导流壳产品外形尺寸大,结构复杂,尺寸精度要求高,表面和内在质量要求严格,三门一期和海阳一期核电站产品均采用了进口产品。随着中国核电建设的发展,作为重要的设备零部件,导流壳产品急需国产化。

## 1 导流壳的产品结构和技术要求

导流壳采用奥氏体不锈钢 JIS G5121 SCS13,其化学成分见表 1。该导流壳外形结构尺寸大,8 片叶片,形状复杂(见图 1),属于典型薄壁大型结构产品。成品重约 30 t,最大外形尺寸约 $\phi$4 230 mm×2 840 mm,流道壁厚 35~45 mm(CT14),叶片壁厚 35~45 mm(CT14)。泵体要求全表面打磨,流道整体粗糙度不超过 $Ra$6.3,全表面 PT 检验,整体尺寸按 CT13 级验收,同时做重量 MT13 级验收,铸件成品需做水压试验。

表1 SCS13化学成分 $w$(%)
Tab.1 Chemical component of SCS13

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Ferrite |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ≤0.06 | ≤2.00 | ≤2.00 | ≤0.04 | ≤0.04 | 18.00~21.00 | 8.00~11.00 | 10~15 |



图 1 导流壳
Fig.1 Diversion shell

收稿日期:2020-04-21
作者简介:张吉雁(1973-),山东烟台人,高级工程师.主要从事铸造工艺设计研究方面的工作.电话:0535-3726552,E-mail:zhangjiyan08@163.com

## 2　导流壳产品的制造难点分析

### 2.1　产品尺寸精度高，生产控制难度大

导流壳的流道形态及尺寸要求严，不易保证；图纸壁厚要求CT14级，但同时又有重量控制要求，实际控制的壁厚公差不能超过CT13级；导流壳属于薄壁产品，流道采用大型组合芯结构，每片芯重达6 t，最大尺寸达到3.3 m，砂芯易变形且组芯操作难度大，精度不易控制，导致叶片壁厚公差不易保证；铸件模型尺寸大，活块数量多，常规木制模型的整体精度低，也会影响产品的尺寸公差；大型薄壁且结构复杂，在铸造和热处理过程中均会引起较大的形变，引起流道形态改变和尺寸超标。

### 2.2　产品表面和内在质量的要求高，不易保证

产品要求全表面打磨处理，毛坯表面面积超过150 $m^2$，不锈钢材料易氧化，铸件易出现大面积的夹渣等表面缺陷，增加清理难度，并且较大缺陷处理易导致流道表面波浪度超差和壁厚不足；铸件的法兰面虽不进行内部质量检测，但最后要进行大量的通孔和螺纹孔加工，加工面进行PT检测，如果内部存在缩松、夹渣和气孔缺陷，会在PT检测时显示，严重影响后续处理工作；导流壳设计寿命长达60年，工作中承载一定压力，如果内部存在较大的夹渣类及缩松类缺陷，会加大使用风险，故从使用角度上，必须保证内部无大的缺陷。

### 2.3　产品易产生形变和裂纹缺陷

SCS13材料属于高合金的不锈钢，铸造性能差，铸态时有脆性相析出，引起铸态材料脆性，铸造过程中易产生裂纹缺陷；外形尺寸 $\phi$4 230 mm × 2 840 mm，但壁厚只有40 mm，最大叶片间距1.5 m，铸造时收缩应力大，易引起形变和裂纹缺陷。

## 3　工艺设计分析及采取措施

铸造工艺简图见图2。

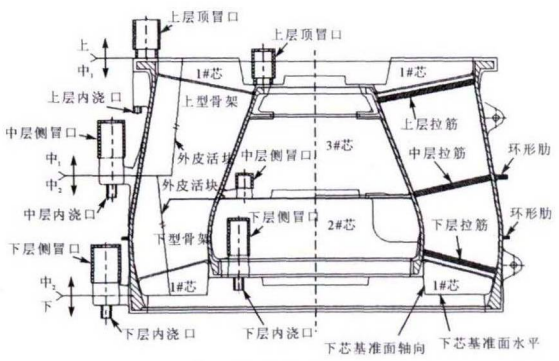



图2　铸造工艺简图

Fig.2　Schematic drawing of casting process

### 3.1　分型分模方式的选择

由于导流壳高度达2.8 m，壁厚只有40 mm，下芯合箱过程中易产生碰撞，为保证下芯合箱过程可以观察并测量，采用4层砂箱结构。模型尺寸太大，整体起模不易，故采用外皮活块结构，中心结构体保证模型强度和精度，外皮活块分块起模。分型分模结构见铸造工艺图2。

### 3.2　尺寸精度控制

#### 3.2.1　模具精度设计

模具骨架和外皮活块均采用数控加工方式，保证活块装配精度和装配后的整体尺寸精度。模具外形活皮装配后尺寸控制在直径方向±1.5 mm(常规木制1级模型尺寸精度±2.5 mm)，轴向±0.5 mm (数控整体加工成型)。模具采用多层板木质材料，水平交叉叠垛，保证材料在不同的湿度下，模型直径方向的尺寸误差最小。

#### 3.2.2　组芯和下芯精度

组芯精度控制：流道形态由1#芯形成，由8块单个流道芯组合而成，其尺寸精度是决定产品性能的关键。为此，采用特制的组芯工装，对上、下芯头做精准定位，保证叶片的形态和8片叶片在圆周方向的均分度。组芯工装见图3。

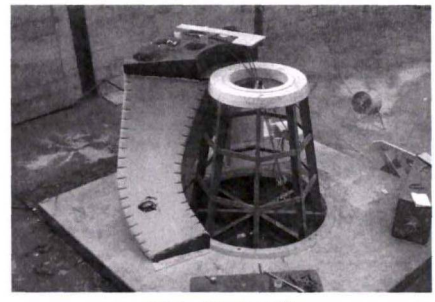


图3　组芯工装

Fig.3　Tooling for core assembling

下芯精度控制：砂芯分块见工艺图2。下芯的顺序依次为2#，3#，再下整体组合1#芯。由于1#组合芯由8块砂芯组对而成，芯头间隙会较大，芯头定位配合精度不高，又由于砂芯高度超过3 m，当砂芯垂直度微小偏差就会造成内外壁厚的严重不均。为此，采用统一基准的办法，加强过程控制，保证每块芯的下芯精度。具体过程描述：以下箱的砂胎面为下芯基准面(水平和轴向)，见工艺图2，先下2#芯，以下芯基准面为基准，用卡板检测2#芯的位置精度；再下3#芯，同样以下芯基准面为基准，用卡板检测3#芯精度；再下1#芯，直接以下芯基准面为定位配合面固定1#芯。这样，3块芯就以同一基准保证的轴向垂直度和径向偏移量，同时控制了壁厚精度。

### 3.3 补缩系统设计

#### 3.3.1 法兰冒口设计

在各法兰处设置冒口,保证法兰内部质量。见工艺图 2 中的上层顶冒口和下层侧冒口。

#### 3.3.2 中层冒口和补贴设计

叶片和流道壁的交汇点为热节点,易产生缩松和裂纹缺陷。铸件高度大,交汇线长约为 2.6 m,无法通过上下层冒口进行补缩。因此,在铸件的中间增加一层冒口,并设置补贴,延长补缩距离。中间层冒口和补贴的设计,见工艺图 2。另外,导流壳高度达 2.8 m,上下法兰厚大,中间流道壁薄,增加中间层冒口,铸造时可以均衡冷却环境,减轻应力产生并分散应力分布。

### 3.4 浇注系统设计

导流壳属于大型薄壁结构,浇注重量大,浇注过程易产生紊流和局部过热, 不锈钢材料也易氧化,易产生夹渣、冷隔等缺陷。因此,浇注系统要保证快速平稳充型,减少夹渣类缺陷产生。设计上采用以下措施。浇注系统见图 4。

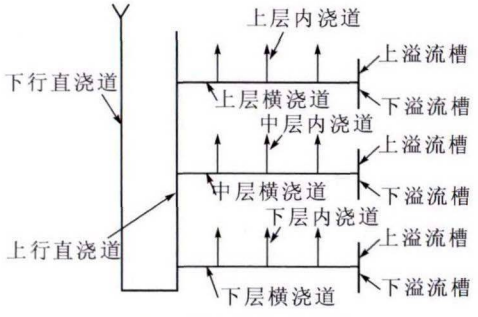



图 4 浇注系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of pouring system

#### 3.4.1 多层浇道设置

铸件本体加冒口高度达 3.5 m, 浇浇注时间超过 180 s,为此采用 3 层浇注系统,防止局部长时间浇注过热和冲砂现象。

#### 3.4.2 多内浇道均衡布置

导流壳产品为壁厚只有 40 mm,钢液充型较为困难。为此,每层设计内浇道 16 个,钢液通过冒口降低流速后进入型腔,这样,既可以降低钢液在型腔内的流动距离,也可以减轻钢液在型腔内的氧化。

#### 3.4.3 上行直浇道设计

由于铸件高度高,直浇道压头大,横浇道长,造成各内浇道分配的压头不相同,流量不均衡;浇注速度快,浇道内钢液对铸管砖冲涮严重;内浇道钢液的紊流大, 钢液表面氧化物形成夹渣且难以上浮。因此,采用两条下行直浇道,3 条上行直浇道,每条上行直浇道分配两个横浇道,每个横浇道分配 3 个内浇道（离下行直浇道远的上行直浇道分配 4 只内浇道),每层内浇道总数量 6+6+4=16 个。这样,内浇道流速主要与上行直浇道压头有关, 各内浇道的压头分布相对均衡,流量稳定。

#### 3.4.4 杂质钢液的溢流设计

由于设置了上行直浇道,横浇道钢液压头小,横浇道较长时间处于开放,钢液氧化严重,因此。在横浇道的末端, 设置较大容量的污染钢液溢流和收集槽,避免液流前端的杂质钢液进入型腔,见图 4 中的溢流槽设计。

### 3.5 防变形和裂纹设计

#### 3.5.1 均匀应力措施

大型薄壁结构铸件生产过程中产生的应力很难避免,但应力如果不集中,则不会产生较大的危害。在导流壳工艺设计中,配合均布的 8 片叶片,均匀布置冒口、拉筋和浇道,防止出现局部应力过大,降低裂纹风险。

#### 3.5.2 消除裂纹源工艺

导流壳铸件应力主要发生在叶片与壁的交接处,由于交汇线长度太长 2.6 m,为此,采用冒口加补贴形式,保证内部致密性,消除裂纹源。

#### 3.5.3 防变形拉筋措施

由于叶片间距大,在铸造和热处理过程,内外环壁与叶片交接部位内凹,两叶片的中间外凸,造成内外壁环形圆度不圆现象。在流道外侧壁设置两条环形肋板,流道内侧壁设置一条环形肋板,并在在每一流道内部设置上中下 3 层支撑拉筋,见工艺图 2。

#### 3.5.4 低温开箱减少热应力

导流壳铸件虽为薄壁结构,但法兰较厚大,在砂型中冷却过程温度分布不均匀;砂型尺寸太大,开箱过程较长,操作过程中,暴露于空气中的部分与仍埋在砂子中的部分形成较大的温度差。因此采用低温开箱方案,铸件在砂型内冷却到 300 ℃以下再开箱,减少热应力的影响。

## 4 实际生产情况

按此工艺方案,生产了 4 件导流壳铸件,生产出的铸件尺寸达到 CT12 级,壁厚控制在 36~ 42 mm,重量符合要求,夹渣缺陷很小,表面质量良好,见图5。

## 5 结论

(1)大型导流壳铸件要从模型精度、组芯精度和下芯操作要求方面控制最终产品尺寸精度, 精度控制应选用同一基准。



图 5 导流壳实际产品

Fig.5 The actual product of diversion shell

(2)大型薄壁结构可通过增加冒口方法，有防止缩松和均匀应力作用。

(3)对大型薄壁不锈钢铸件，易采用分层浇注系统并控制各内浇道流量均衡，实现大流量快速平稳充型，防止冷隔、减少夹渣。

(4)不锈钢材料宜采用底注式浇注系统，既有利于钢液的平稳充型，同时也要保证钢液液面稳定的上升速度。

(5)薄壁环形结构可以采用环形肋板防止变形。

**参考文献：**


[1] 黄志光. 铸件内在缺陷分析与防止[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

[2] 陈国桢. 铸造缺陷和对策手册[M]. 北京：机械工业出版社，1996.

[3] 徐智渊. AP1000 核电主给水泵系统设计与改进 [J]. 电站辅机，2013，34(1)：16-18.

[4] Peter Beeley. Foundry Technology[M]. England: Reed Educational and Professional Publishing Ltd. Second edition 2001.

[5] 王君卿，朱文高，魏兵，等. 铸造手册第 5 卷铸造工艺[M]. 北京：机械工业出版社，2010.



招贤纳士

## 襄阳聚力新材料科技有限公司

**一、招聘销售工程师**

任职要求：

1. 本科及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟悉二维、三维绘图软件者优先考虑。
2. 2 年以上铸造行业耐火材料销售或铸造涂料销售经验者。
3. 2 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 2 年以上铸造行业铁合金生产或销售经验者。
5. 2 年以上耐火材料技术研发或产品应用经验者。
6. 2 年以上铸造涂料技术研发或产品应用经验者。
7. 2 年以上有在铸造厂工作经验，对中频炉熔炼或造型工艺熟悉者。
8. 在压铸厂或铝厂工作 2 年以上，对有色金属铜铝熔炼工艺流程熟悉者。

**二、招聘销售经理**

任职要求：

1. 大专及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟练掌握办公软件，懂产品市场宣传，营销策划者优先考虑。
2. 5 年以上铸造行业耐火材料销售、铸造涂料或类似工业品销售经验者。
3. 5 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
5. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
6. 善于多部门或多层次沟通协调。

**三、销售助理**

任职要求：

1. 男性，30 岁以下，本科学历，身体健康，适合经常出差。
2. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
3. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
4. 善于多部门或多层次沟通协调。

有意向者请将简历发送至邮箱 wuhaiyan@xyjllc.com