DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.014

不锈钢水轮机转轮体铸造工艺研究

童自谦,唐庆伟,周黎明
(杭州汽轮铸锻有限公司,浙江 杭州 311106)

摘　要:介绍了一种材质为 SCS1 转轮体的铸造工艺方案,针对该材料易沿晶界析出 δ 铁素体的凝固特性,优化成分组合,设计合理 Cr/Ni 当量比,有效地避免铸件的裂缝、铸件脆性等缺陷。生产的铸件经力学性能及无损探伤检测,各项指标均达到东芝公司技术标准要求。

关键词:SCS1 材质;铸造工艺;成分设计;热处理

中图分类号:TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1081-05

Research on Casting of Stainless Steel Turbine Runner Hub

TONG Ziqin, TANG Qingwei, ZHOU Liming
(Hangzhou Turbine Casting and Forging Co., Ltd., Hangzhou 311106, China)

Abstract: A casting process of SCS1 runner hub is introduced. In view of the solidification character that δ ferrite easily precipitate along grain boundary, this process optimizes the composition and designs a reasonable equivalence ratio of Cr/Ni, which effectively avoids the defects such as cracks and brittleness of castings. Through mechanical property test and nondestructive testing, all the indexes produced by this casting process meet the technical standards of Toshiba.

Key words: SCSI material; casting process; optimal composition; hest treatment

水轮机是把水流的能量转化为旋转机械能的动力机械,主要依靠转轮的旋转实现能量的转换与传递,因此对水轮机转轮体的设计、材质选择、制造标准、质量及性能等方面均有较高要求[1-4]。常规转轮体铸件材质采用 ZG20SiMn, 此次生产的转轮体铸件材质为 SCS1-T1 (增加 0 ℃冲击性能要求),铸件按东芝公司技术标准组织生产和验收。此标准要求:除中间调整支柱其余部位均全壁厚 100%超声波探伤检查,按 TSB-SC1 一级验收,所有表面均需磁粉和渗透探伤,内腔毛坯尺寸公差±3 mm,铸件的技术要求及检查规范高于国内同类产品。因此在工艺方案设计、冶炼和热处理方案上需采取必要措施,保证铸件的各项指标满足标准要求。

1　转轮体结构及成分冶金特点

转轮体重约 17.5 T 的马氏体不锈钢铸件,化学成分和机械性能指标如表 1 所示。

转轮体结构、主要尺寸如图 1 所示,结构设计工艺性合理,有利于铸件顺序凝固与补缩,但几处孤立热节需采取相应的工艺措施进行保证。

SCS1 与 ZG15Cr13、ZG15Cr13Ni1(工程结构用中、高强度不锈钢铸件—GB/T 6967) 材质相似,ZG15Cr13 材质在水轮机部件里广泛使用,其未对冲击性能做要求,ZG15Cr13Ni1 要求冲击功 $Ak_v \geq$ 20 J。制造前对多组 ZG15Cr13 试样进行冲击试验,冲击值在 15~25 J 范围内,不能满足标准要求,试样的金相组织为回火索氏体 + 铁素体, 铁素体含量在 15%~20%。

SCS1 的基体为板条状马氏体,沿晶界分布一定数量的 δ 铁素体,δ 铁素体的析出显著降低材料的韧塑性和强度,且影响其大截面性能。但 δ 铁素体低于 10%时,其对延伸率、端面收缩率和冲击功影响不明显。为了抑制 δ 铁素体的数量增加,要对 Cr/Ni 当量比进行控制, 内控成分要求设计时尽量避免 δ 铁素体的形成。图 2 为舍夫勒组织图, 是舍夫勒(sehaeffler)根据不锈钢手工电弧焊的焊缝组织实测统计绘成的组织图(1949 年),此图也适用不锈钢铸件的组织预测,它给出了马氏体不锈钢组织与 Cr/Ni 当量的关系; 图 3 给出马氏体不锈钢 Cr/Ni 当量比与 δ 铁素体含量的关系[9]。从图 2、图 3 看到,Cr、Ni 成分的变化,对组织影响很大,需严格控制材料的化学成分[4],同时 S、P 也应控制在最低水平上。具体内

收稿日期:2019-08-14

作者简介:童自谦(1962-),浙江杭州人,助工.主要从事铸造工艺设计及铸铁冶炼方面的工作.电话:13505712070,E-mail:tong@htc.cn

通讯作者:唐庆伟(1971-),浙江杭州人,技师.主要从事铸钢工艺技术及现场质量管理方面的工作.
电话:13067853586,E-mail:tqw1971@163.com

表1 化学成分w(%)和力学性能指标SCS1-T1(采用标准JIS G5121)
Tab.1 Chemical compositions and mechanical property of SCS1-T1 in JIS G5121

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
≤0.15	1.00	1.50	0.040	0.040	11.5～14.00	1	2
$R_{P0.2}$/MPa	R_m/MPa	A(%)	Z(%)	Ak_v(J)	HB 试样	HB 铸件本体	
≥345	≥540	≥18	≥40	25(0 ℃)	163～229	163～255	

注释:①Ni 最大含量 1.00%;②Mo 最大含量 0.50%。

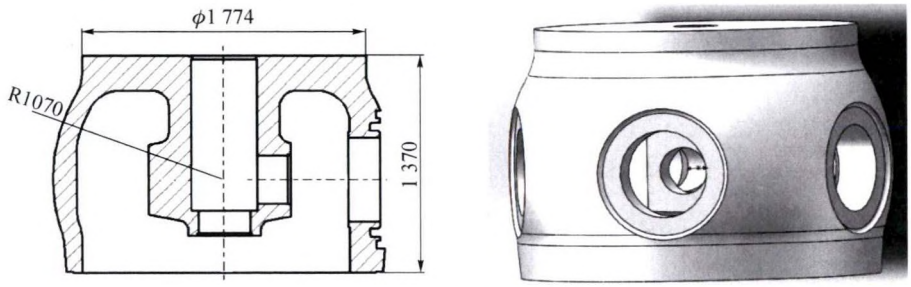

图 1 转轮体结构
Fig.1 The structure of runner hub

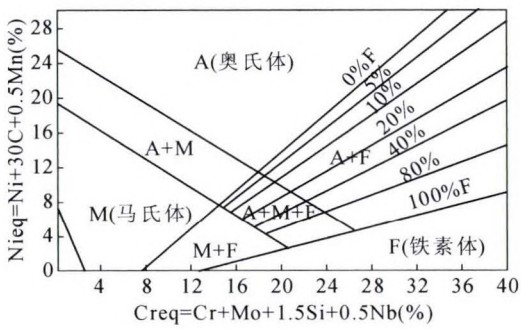

图 2 舍夫勒组织图
Fig.2 Schaeffler's diagram

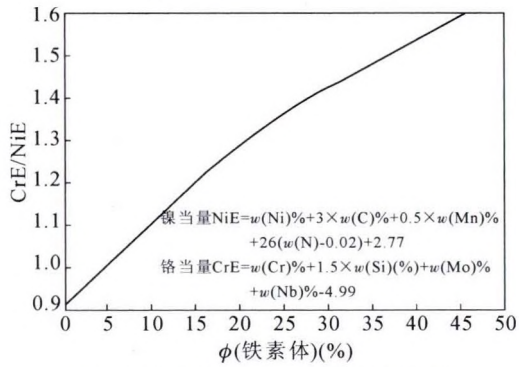

图 3 不锈钢的 CrE/NiE(成分当量)图
Fig.3 Composition equivalent diagram of Ni and Cr in stainless steel

控成分、目标值及 Cr/Ni 当量值见表 2,预测铁素体含量在 10%以下。

在转轮体生产钢液冶炼时按点目标的要求进行现场控制,能有效抑制 δ 铁素体的数量。

该材料含有 13%左右的铬,在浇注温度下,铬元素与氧元素的亲和力大于铁元素,铬优先于铁与氧或水蒸气发生氧化反应,其反应式为:

$$4[Cr]+3O_2=2(Cr_2O_3)$$

$$4[Cr]+6H_2O(气)=2(Cr_2O_3)+12[H]$$

生成大量 Cr_2O_3 渣,并使钢液吸氢,铬氧化渣粘度大,钢液流动性变差,浇注过程容易造成冷隔、夹渣等铸造缺陷,钢液含氢量增大易使铸件产生皮下气孔,因此,铸件浇注时需用氩气保护,以减少材料氧化。

2 铸造工艺方案

铸件冒口是工艺参数确定中较重要的部分,正确设计冒口可获得致密的优质铸钢件,节约钢液,也是保证超声波探伤合格的先决条件。根据转轮体的结构特点,采用单个冒口进行补缩,转轮体外侧轴孔间设置补贴,冒口下方通过冒口脚的合理设计建立补缩通道,补贴的大小根据原热节尺寸来确定。轴孔下方和调整立柱下部采用外冷铁,这样就保证了整个铸件的顺序凝固及凝固起始点,确保铸件的内部质量(工艺方案见图 4)。

表 2 内控成分、目标值、Cr/Ni 当量
Tab.2 Internal control composition, Standard Value and Equivalent of Ni and Cr

	化学成份								图 2		图 3		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cr eq	Ni eq	CrE	NiE	CrE/NiE
标准范围	≤0.15	≤1.50	≤1.00	≤0.040	≤0.040	11.5～14.0	(≤0.50)	(≤1.00)					
下限	0.08	0.20	0.70			11.5	0.30	0.80	12.10	3.55	7.11	6.32	1.125
上限	0.12	0.40	0.90	≤0.025	≤0.020	12.5	0.50	1.00	12.60	5.05	8.61	7.82	1.101
目标值	0.10	0.35	0.80			12.0	0.35	0.90	12.18	4.30	7.89	7.07	1.115

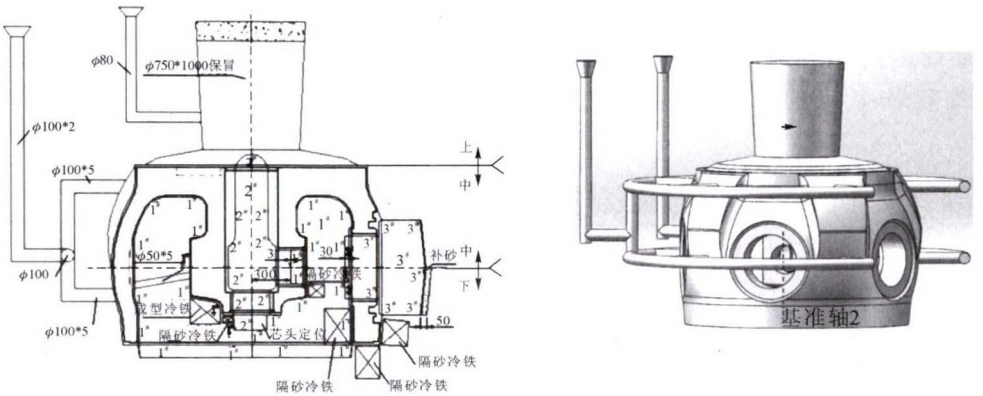

图 4 转轮体工艺方案

Fig.4 The process?plan of runner hub

2.1 冒口设计

目前应用比较普遍的计算方法有模数法、补缩液量法和比例法。本工艺冒口的计算采用模数法，冒口的模数 $M_{冒}$ 与铸件补缩部位的几何模数 $M_{件}$ 要满足如下关系：$M_{冒} \geqslant 1.2\,M_{件}$，并用液态补缩量进行验算；通过补贴、冷铁的布置建立铸件的顺序凝固剂凝固起始点；冒口采用双层保温冒口，并接点浇浇道，提高冒口补缩效率[5,6]。根据模数计算基本公式：

$$M=V/S \tag{1}$$

$$M=S/C \tag{2}$$

$$M=D/2 \tag{3}$$

式中，M 模数；V 体积；S 散热表面积；C 散热面周长(不包括非散热面)；D 壁厚有两边为非散热边。

液态补缩量验算公式：

$$V_{cmax}=(\eta-\varepsilon)\div\varepsilon\times V_R \tag{4}$$

式中，V_{cmax} 可被冒口补缩的铸件最大体积；ε 金属液的体收缩率(%)，一般取 4.5%~7.0%，根据浇注温度和成分进行计算；η 冒口补缩效率，一般由试验得出，根据保温冒口的情况选 25%；V_R 冒口的初始体积。

计算转轮体上部模数，并验算液态补缩量，确定冒口尺寸，通过补贴和冷铁保证铸件顺序凝固，得到充分的凝固梯度，使铸件内部组织致密；最终的工艺方案为：铸件重 17 500 kg，钢液总重 25 000 kg，工艺出品率为 70%。

2.2 浇注系统设计及浇注温度确定

采用低温快浇的原则进行浇注温度的确定及浇注系统的设计，铸件的浇注温度确定为：1 550~1 570 ℃。

在浇注过程中应使钢液平稳快速的充满铸型，防止充型紊流；本工艺采用完全开放式的缓冲阶梯式浇注系统，保证大流量快速充型，并分层注入形成合理的温度分布，为保证中间调整立柱与外侧在同一水平线上上升钢液，通过外侧与调整立柱连同内浇口，内浇口向上倾斜接入调整立柱；采用单包双注口浇注，注口 ϕ65 mm×2，直浇道 ϕ100 mm×2，内浇道 ϕ100 mm×5，铸件本体浇注时间在 110 s 左右，该浇注系统可以保证钢液快速平稳的充满铸型，浇注到明冒口 300 mm 以上，用点浇浇道缓慢浇满冒口，提高冒口补缩效率。

2.3 铸造模拟

将铸件三维模型转化成 STL 格式，导入模拟软件，进行网格划分，确保没有造成失真，然后对模拟过程的热物性参数进行设置，进行凝固模拟(未采用保温冒口、冷铁)，对铸件凝固过程所产生缩孔、缩松缺陷进行分析预测，判断铸造方案的合理性及是否可优化，模拟结果如图 5 所示。凝固模拟结果显示，

未设置保温套、冷铁模拟结果

图 5 转轮体凝固模拟

Fig.5 Solidification simulating for runner hub

工艺方案设计是合理的，冷铁的设置可消除缩松缺陷，采用双层保温套、点浇冒口及足量的冒口覆盖剂可保证的补缩效果，后期的结果验证了工艺的可行性。

3 冶炼及浇注

根据设备情况采用电弧炉冶炼，采用返回吹氧法进行冶炼，化学成分设置内控范围、目标值，冶炼按点目标的要求进行现场控制。为保证获得高质量的钢水，尽可能减少钢水中的有害元素，首先严格控制各种原材料的质量，用清洁、干燥、块度适中的废钢，采用结构件的边角料，控制废钢的硫、磷含量；其次严格控制操作过程，吹氧脱碳应在钢水温度大于 1 600 ℃时进行，缩短还原期时间(保证在 40 min 以内，力求 30 min)，防止熔钢温度过高，降低钢水中的氢含量。

砂型应用热风机烘烤 16 h 以上，浇注前 40 min 关闭热源采用冷风吹型，浇注前型腔充氩保护，避免钢液氧化，钢包充分烘烤，放钢过程钢包吹氩精炼，钢水在钢包内充分镇静，快速浇注。

4 铸件清理及热处理

由于 SCS1 材质的特点是导热性差，马氏体转变时的相变应力，铸件本身温差大，冷却时容易产生裂纹，因此在砂型内保温 12 天以上，铸件在 200 ℃以下打箱，铸件打箱后利用铸件余热切割浇道、披缝，切割距离距铸件本体 50 mm 以上；切割冒口、补贴在软化退火后进行，切割后及时进行性能热处理；

由于该转轮体有较高的强度和韧塑性要求，其金相组织为回火索氏体和一定量的铁素体，正火、回火的温度选择及正火的冷却速度是关键[7,8]。根据相关试验研究资料，15Cr13 系列马氏体不锈钢组织 δ 铁素体在 1 000 ℃以上会急剧增加。SCS1 材料 Ms 为 317 ℃，Mf 为 102 ℃。因此选择 SCS1 材质转轮体的正火温度 980 ℃，回火温度 730 ℃，焊后除应力温度 700 ℃。铸件出炉后需在 1 h 内冷却至 Ms 以下。

根据工厂实际情况，铸件热处理在 3 m×5 m 热处理炉内进行，放置在热处理炉有效加热区内，铸件采用 3 根本体热电偶进行测温，进行温度管理；冷却方式采用多台大型风机向铸件进行吹风强制冷却，确保铸件冷却时空气对流快，带走热量，保证铸件冷却速度；使铸件温度在 1 h 内降至 Ms 以下，停风正常冷却，实现过冷奥氏体向马氏体组织转变，铸件温度在 80 ℃以下进炉回火。热处理方案见图 6。

实际证明，这样的热处理方案及冷却方式，可使铸件达到所需的效果，转轮体性能全面达到标准要求。

5 铸件检验结果

根据采购规范要求，对生产的转轮体进行全面的理化性能、无损探伤和尺寸及表面质量检查，均达到标准要求。转轮体铸件如图 7 所示。

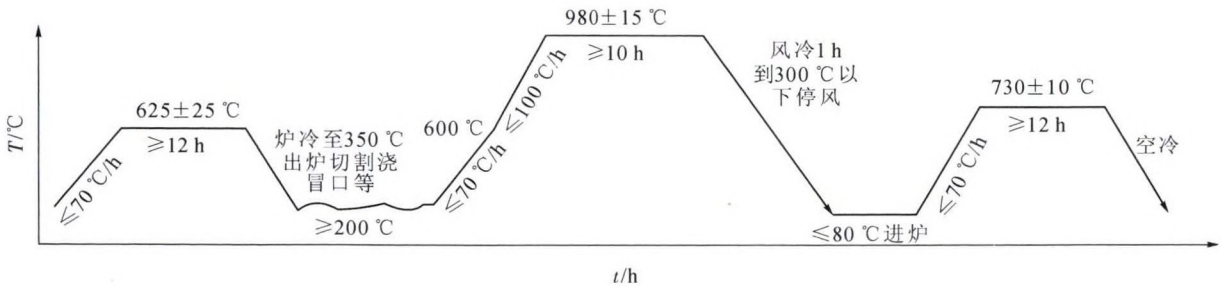

图 6 转轮体热处理方案
Fig.6 The heat treatment process of runner hub

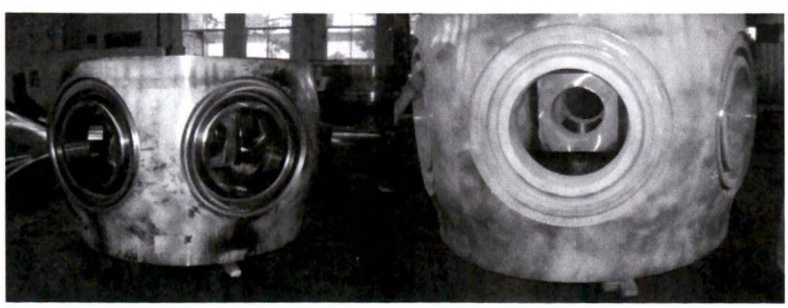

图 7 转轮体铸件
Fig.7 The casting of runner hub

表 3 转轮体化学成分 w(%)、力学性能

Tab.3 Composition equivalent diagram of Ni and Cr in stainless steel

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0.108	0.78	0.31	0.024	0.015	12.20	0.86	0.36
屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率(%)	端面收缩率(%)	Ak_v(0 ℃ J)		HB(试样)	HB(铸件本体)
520	695	25.5	22.5	59/56/54		192	171~216

转轮体铸件化学成分、性能见表 3。

6 结束语

介绍了材质为 SCS1 转轮体的工艺设计、冶炼及浇注和热处理等工艺方案，针对该材料易沿晶界析出 δ 铁素体的凝固特性，优化成分组合，设计了合理 Cr/Ni 当量比，有效地避免了铸件的裂缝、铸件脆性等缺陷。材质为 SCS1 转轮体铸造工艺总结如下：

(1)Cr/Ni 当量比为 1.011~1.125，沿晶界分布的 δ 铁素体数量明显减少。

(2)水轮机转轮体铸件选取完全开放式的缓冲阶梯式浇注系统，控制浇注时间，可保证钢液充型平稳，利于浮渣，利于温度梯度的形成。

(3)采用砂型烘干，型腔充氩保护是减少不锈钢铸件皮下气孔的重要措施。

参考文献：

[1] 唐钟雪，苏志东. 大型抽水蓄能水轮机转子铸造技术研发[J]. 中国铸造装备与技术，2019(2): 44-47.

[2] 陶承闯，赵海涛. 奥氏体不锈钢蜗壳铸造工艺设计与优化[J]. 铸造，2019(2): 192-197.

[3] 张晓光，韩文. 基于 ProCAD 的支架铸件浇注系统优化设计[J]. 热加工工艺，2019，48(1): 95-97.

[4] 孙霞，刘春明. 铸造低碳马氏体不锈钢的现状与发展趋势. 铸造，2007(1)：2-3.

[5] 边敦亭、王自远. 轧机机架大型铸钢件缺陷成因分析及预防措施. 铸造，2018,67(2):182-184.

[6] 杨慧英、高宏伟. 视觉浇注系统钢水目标定位方法研究[J]. 科学技术创新，2018,0(15):50-51.

[7] 王文宝. 大型汽轮机铸件防变形技术的研究和应用. 铸造工程，2017(4):48-51.

[8] 中国机械工程学会铸造分会编.铸造手册：铸钢[M]. 第 2 版.北京：机械工业出版社，2002.

《铸造技术》杂志优秀企业、先进人物专访通告

《铸造技术》杂志开展专访活动，旨在通过专访这一内涵深邃、读者喜闻乐见、欣赏韵味独特的交流方式，深度挖掘铸造界人文财富，倾心打造行业精深资讯，进而从独有的精神与文化之角度施力，推动中国铸造业的科学振兴和健康发展。

《铸造技术》基于“榜样的力量是无穷的”以及“益言可以兴邦”的基本理念和初衷，《铸造技术》杂志社记者与业界企业家、专家学者、工程技术人员等先进人物近距离接触、多层面无障碍恳谈，从而接地气地见识与领略中国铸造业界深邃浩瀚的人文资源、鲜活生动的真人与实事，在第一时间得到启迪与感悟，进而把这发自心灵的收获通过专访报道奉献给读者朋友。

《铸造技术》专访笃信“唯有真情可以感人”。能感动人的专访报道，必然是被访者真实生活的经历、体验和独特感受，高尚人格的彰显。专访报道中的所有感人之处，无不源于被访者独有的生活经历加上独到的见解。不可复制的人生阅历之润养、对生活的挚爱、对事业的全身心投入，是每一位被访者能够超越现实与自我而永葆充沛生命力的秘诀。从自己挚爱的事业那里领悟人生的真谛，激发爱与美相交融的情感。被这真实的情感所感染，使人情不自禁地用看似清淡的笔墨，仰仗倾情产出令人心颤的专访报道。

《铸造技术》专访对“说理”情有独钟。信奉“唯有讲理可以服人”。因“至”即无限趋近高端，故“至理”系高度符合科学规律的道理。“科学”乃说理的学问，科学是迄今全人类生产及社会实践的顶级智慧结晶，科学是全人类的共同财富，科学是人类从必然王国走向自由王国的桥梁。唯科学之理能使人们正确认识世间万物、尤其包括认识者自己。《铸造技术》专访已延续多年，读者不难发现，所有被访者的感人之处无不根源于其自觉或不自觉地遵循了科学的思维与行为的准绳。

《铸造技术》专访所追求的是，以优秀传统文化底蕴为基石，以高尚道德操守与精神境界为标杆，倾力打造铸造专访的精到内涵和独特风格，倾心为读者朋友打造理性思考的空间，竭力实现被访者—读者的理性与情感的惊人共鸣。