

水轮机转轮体铸钢件研制

徐恩献^{1, 2}, 张凯强^{1, 2}, 王雪莲^{1, 2}, 杨继红^{1, 2}, 胡中华^{1, 2}, 田磊^{1, 2}

(1. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南洛阳 471003; 2. 中信重工机械股份有限公司, 河南洛阳 471003)

摘要: 转轮体是大型水电机组的重要组成部件, 其工作环境复杂, 转轮体的质量直接影响机组运行的安全和工作效率, 其质量要求非常高。根据转轮体的结构特点, 运用MAGMA数值模拟软件进行铸造工艺方案设计和优化, 优化后的工艺方案设计合理并得到生产验证, 通过采取工艺控制措施, 转轮体整体质量满足标准要求。

关键词: 转轮体; 数值模拟; 工艺优化

转轮体作为大型轴流式、贯流式水电机组能量转换的重要组成部件, 因其结构和在机组运行过程中承受载荷的复杂性, 它的刚强度在机组安全运行中起着决定性作用, 因此对水轮机转轮体的材料选择、设计结构、制造标准、质量和性能指标等方面均有较高要求^[1-3]。

根据转轮体结构特点, 运用MAGMA软件进行转轮体铸造工艺数值模拟分析, 结合基于Niyama判据法的Feeding模块, 有效预测铸件中可能产生缩孔、缩松缺陷的区域, 并完成转轮体铸造工艺优化。同时在各生产工序采取工艺控制措施, 保证产品满足性能和探伤的质量要求。

1 转轮体结构特点和技术要求

转轮体最大直径3 400 mm, 高度2 830 mm, 最大壁厚460 mm, 最小壁厚110 mm, 壁厚差较大, 共有5个叶片轴孔, 具体结构如图1所示, 属于设计工艺性不良的结构形式的转轮体, 结构复杂是转轮体铸造工艺性和机械加工性较差的主要原因^[4]。

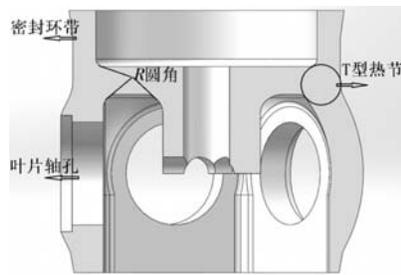


图1 转轮体结构图

Fig. 1 Structure of the runner body

1.1 化学成分

转轮体材质为ZG20Mn, 化学成分要求见表1。

表1 转轮体化学成分要求

Table 1 Requirements for the chemical composition of the runner body

C	Si	Mn	P	S	Ni	$w_B/\%$
0.17~0.23	≤0.80	1.00~1.30	≤0.030	≤0.030	≤0.80	

1.2 力学性能

转轮体力学性能按照JB/T 6402—2018《大型低合金钢铸件 技术条件》执行, 并增加弯曲试验和0℃V型冲击试验且冲击功≥20.8 J的要求, 弯曲试验按照JB/T 6405—2018《大型不锈钢铸件 技术条件》执行。弯曲试验和V型冲击试验已超出JB/T 6402—2018标准中的性能要求, 力学性能指标要求高, 具体见表2。

作者简介:

徐恩献(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事大型铸锻件工艺技术研究及生产管理工作。E-mail: xuex@citic-hic.com.cn

通讯作者:

张凯强, 男, 工程师。E-mail: zhangkq949964116@163.com

中图分类号: TG24

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)09-1189-03

基金项目:

河南省重大科技专项(221100230200)。

收稿日期:

2023-05-30 收到初稿,

2023-07-06 收到修订稿。

1.3 无损探伤检验

转轮体按照CCH70-3: 1996《水力机械铸钢件检验规范》进行100%无损探伤检验。超声波探伤按照3级验收, 高应力密封环带区按照2级验收, 磁粉探伤按照2级验收。

2 转轮体铸造工艺设计

根据转轮体结构特点, 采用热节圆比例法、模数法设计并校核冒口, 以验证冒口补缩能力是否满足要求, 设置补贴、冷铁实现铸件顺序凝固和增强冒口补缩效果^[5]。

采用密封环带朝上的工艺方案时, 外球面轴孔间设置工艺补贴后, 数值模拟结果见图2。设置补贴后的球面与大平面形成的“T”型交接热节远大于环带壁厚, 该热节区域因存在孤立液相而产生缩孔、缩松缺陷显示, 温度场显示铸件无法实现顺序凝固的效果, 采用分散冒口或整圈冒口均无法消除交接热节区域产生缩孔的不利影响; 环带为转轮体高应力区域, 交接热节的产生导致环带处补贴进一步增厚, 降低心部组织致密度, 易产生疏松缺陷^[4]。传统工艺方案无法满足转轮体质量要求。

采用密封环带朝下的工艺方案后, 通过外球面轴

表2 转轮体力学性能要求

Table 2 Mechanical properties requirements of the runner body

R_{eH}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	A_{KU2}/J	$0^\circ\text{C}A_{KV2}/\text{J}$	HB	90°弯曲试验
≥ 285	≥ 495	≥ 18	≥ 30	≥ 39	≥ 20.8	≥ 145	无裂纹

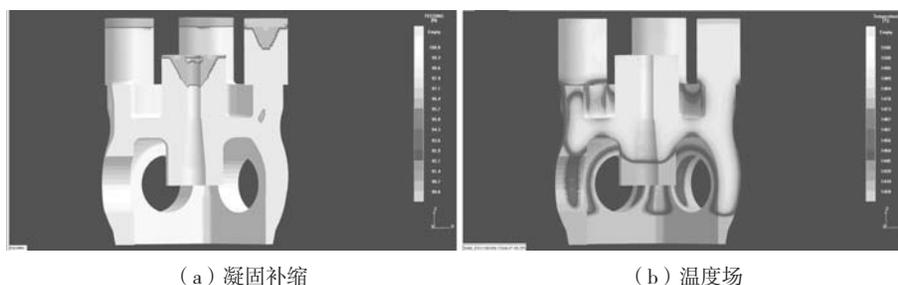


图2 传统工艺数值模拟结果

Fig. 2 Numerical simulation results of traditional process

孔间设置分散补贴、分散冒口和环带外冷铁, 利用浇注过程钢液的重力作用提高环带补缩效果, 有效延长冒口末端区和补缩距离, 消除“T”型交接热节的影响; 内腔设置的独立冒口有利于实现铸件分区补缩和提高冒口补缩效果; 圆角区域设置专用外冷铁, 以进一步提高砂型蓄热能力, 可有效预防凝固过程产生热裂纹。由图3可知, 工艺优化后的转轮体整体实现了顺序凝固的效果, 铸件内部无缩孔、缩松显示, 温度场和凝固模拟结果均优于传统工艺, 优化后的工艺方案可指导实际生产。

3 转轮体生产过程关键控制点

3.1 熔炼工序

采用EBT电弧炉初炼+LF精炼工艺。熔炼过程应充分造渣和脱氧, 严格控制P、S含量, 吹氩过程严格控制压力和时间, 及时关注渣面波动情况, 降低钢液夹杂物含量, 提高钢液纯净度和浇注过程的流动性; 可加入适量的微合金元素, 利用其细晶强化作用避免转轮体热处理过程产生粗晶风险, 进一步提高材料强韧性; 严格控制精炼出钢温度和浇注温度, 降低钢液过热度对铸件凝固过程产生缺陷的影响^[5]。

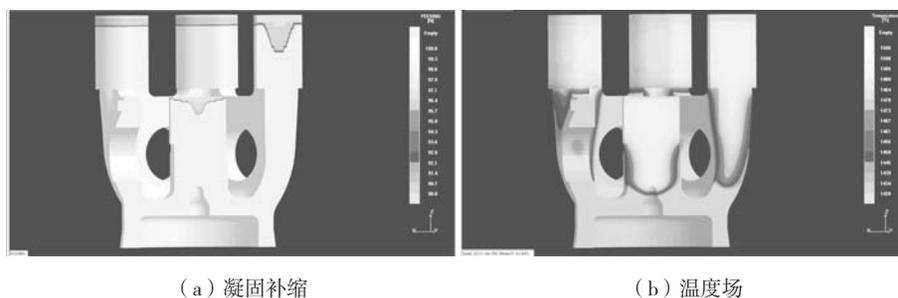


图3 优化工艺数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of the optimization process

3.2 铸造工序

转轮体内腔砂芯结构复杂，下芯过程应做好支撑，避免“漂芯”导致铸件报废的风险，同时，浇注过程内腔热量集中，应合理选择型砂种类，以确保砂芯强度和溃散性，避免产生夹砂缺陷，降低清砂难度并改善内腔表面质量；整体壁厚尺寸大，铸件液态收缩和凝固收缩量较大，同时根据内腔非加工面尺寸公差要求合理放置补正量，避免精加工后壁厚尺寸超差，并作为清理工序打磨余量，进一步提高表面质量；圆角区域表面包覆铬铁矿砂以提升砂型蓄热能力，避免圆角热裂纹缺陷产生；生产条件允许时，可采用型腔吹氩+氩气保护浇注，减轻浇注过程钢液的二次氧化，减少夹渣缺陷，提高钢液流动能力；采用本体底部、补贴中部和上部设置三层内浇道的阶梯式浇注系统，确保钢液充型平稳，有利于减轻夹渣、夹砂缺陷，并实现顺序凝固的效果，提高铸件组织致密度^[5]。

3.3 热处理工序

转轮体在装炉时应确保支垫平稳，减轻热处理过程变形和避免产生裂纹缺陷的风险；转轮体的装炉位置应避开火口位置，防止局部过热或过烧缺陷；根据转轮体铸件材质和性能要求，采用正火+回火的热处理工艺，合理控制升降温速度，有利于提高转轮体温度、组织和性能的均匀性；切割冒口后的转轮体应及时进炉，避免应力引起开裂的风险。

参考文献：

- [1] 童自谦, 唐庆伟, 周黎明. 不锈钢水轮机转轮体铸造工艺研究 [J]. 铸造技术, 2019 (10): 1081-1085.
- [2] 郑小波, 罗兴铸, 郭鹏程, 等. 基于有限元的轴流式水轮机转轮体刚度分析 [J]. 机械工程学报, 2006 (10): 215-218.
- [3] 林雪健, 黄宏军, 王浩磊, 等. 水轮机转轮体铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2018 (1): 41-44.
- [4] 施世葵. 转轮体铸造工艺的优化设计 [J]. 大型铸锻件, 1994 (4): 24-27.
- [5] 李晨希. 铸造工艺设计及铸件缺陷控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

4 生产验证

采用优化后的铸造工艺方案进行转轮体的实际生产(图4), 化学成分和力学性能均满足标准要求。转轮体加工后的尺寸检测合格, 经过磁粉探伤和超声波探伤, 转轮体内外质量较好, 符合无损探伤检验标准中的要求, 数值模拟结果的可靠性和工艺方案的合理性得到有效验证。

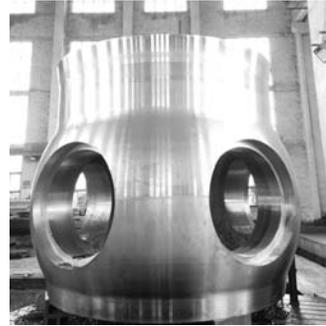


图4 实际生产的转轮体

Fig. 4 The actual production runner body

5 结束语

运用MAGMA软件进行转轮体铸造工艺数值模拟分析和方案优化, 采用密封环带朝下的铸造工艺方案, 通过严格控制熔炼等关键工序, 研制出的转轮体的理化性能和无损检测结果均符合标准要求, 优化后的工艺参数和方案设计合理, 可应用于实际生产过程。

Development of Steel Casting for Turbine Runner Body

XU En-xian^{1,2}, ZHANG Kai-qiang^{1,2}, WANG Xue-lian^{1,2}, YANG Ji-hong^{1,2}, HU Zhong-hua^{1,2}, TIAN Lei^{1,2}

(1. Luoyang CITIC HIC Casting and Forging Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China; 2. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China)

Abstract:

The runner body is an important component of a large-scale hydroelectric unit, and its working environment is complex. The quality of the runner body directly affects the operation safety and work efficiency of the unit, and its quality requirements are very high. According to the structural characteristics of the runner body, this paper used the MAGMA numerical simulation software to design and optimize the casting process plan. The optimized process plan design was reasonable and has been verified by production. By taking process control measures, the overall quality of the runner body met the standard requirements.

Key words:

runner body; numerical simulation; process optimization