基于MAGMAsoft数值模拟的水轮机导叶铸造工艺研究

吴彦军，李鹏

【摘要】系统研究了某电站具有长瓣体结构的水轮机活动导叶的铸造工艺。利用数值模拟技术对铸件的温度场和应力场等进行模拟，验证并优化导叶的铸造工艺方案。实际生产证明，采用该工艺方案批量生产的导叶内外部质量优良，长轴变形量可控。

1. 概述

活动导叶是水轮机导水机构中最重要的过流部件，如图1所示。活动导叶长期工作在泥沙和水流的冲击环境下，要求耐泥砂磨损、耐腐蚀、耐空蚀以及良好的力学性能，因此多采用低碳马氏体不锈钢进行铸造。

由于活动导叶的结构特点，瓣体在长短轴之间且小于长短轴的壁厚，整体铸造后其内部质量往往不稳定，易于产生缩松、缩孔、冲砂等铸造缺陷。以往在导叶铸件的生产中，有卧式和立式两种铸造工艺方法，卧式工艺方法由于出品率低，长轴变形严重需要矫形或补焊，以及易产生砂眼、气孔等缺陷而很少采用。立式铸造工艺（见图2）因其造型简单，不易产生变形，以及铸造缺陷少等优点成为主流的铸造工艺方法。然而这种工艺方法加工余量大，且对于高水头电站的长瓣体，短长轴的导叶结构，采用立式铸造工艺无法在长短轴和瓣体之间形成良好的补缩通道，瓣体和轴连接处的铸造质量难以保证，在实际生产中经常出现轴线缩松、缩孔，严重时可导致铸件报废（见图3），工艺适用性差。因此对于长瓣体结构导叶，仍需采用卧式铸造工艺方法。

本文针对具有长瓣体结构的国内某大型水电站活动导叶（导叶总长3810mm，瓣体长2270mm，净重3460kg）设计了卧式铸造工艺方法，并利用铸造模拟软件MAGMAsoft对其充型及凝固过程中的流场、温度场、应力场进行数值模拟，验证优化铸造工艺，解决长瓣体结构导叶在以往制造中的铸造质量问题。

2. 导叶铸造工艺方案设计

利用三维造型软件对导叶铸件进行实体造型，然后采用模数法对铸件各部位模数进行计算，设计铸件的冒口、浇注系统、冷铁，以及集砂排砂通道数量和尺寸，具体方案如图4所示。

（1）利用两个明冒口补缩瓣体及其与长短轴的过渡区，保证这些部位内部质量。

（2）在长轴上布置随形外冷铁，短轴上布置端部外冷铁，保证壁厚较大的长短轴形成合理的温度梯度，同时有利于控制长轴在各方向上翘曲变形。

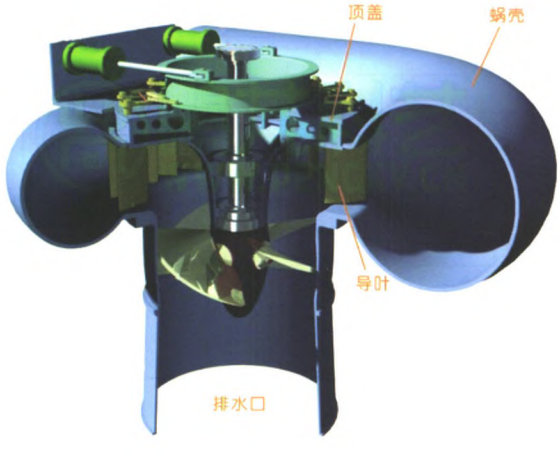


图1 轴流式水轮机结构

（3）针对长短轴易产生砂眼、夹渣等缺陷，在铸件长短轴及瓣体上设置集渣槽及出气孔。

（4）采用开放式底返浇注系统，直浇道、横浇道、内浇道总截面积比为1:2:4，有利于铸件平稳充型，利于排渣、排气。

3. 导叶数值模拟结果分析

将上述编制的铸造工艺实体文件在MAGMAsoft软件中进行建模，设定初始条件，如浇注温度、浇注时间等，定义材料属性如铸件材质、型砂、冷铁以及边界条件等，然后对导叶铸件充型与凝固过程的流场、温度场及应力场进行数值计算，结果分析如下。

（1）凝固过程的温度场模拟结果分析　导叶铸件凝固过程的温度场模拟结果如图5a～图5d所示。从图5a可以看出，在钢液充型刚结束后，铸件的大部分温度在1540~1547℃，比浇注温度（1560℃）低13~20℃，这是由于钢液充型过程中和铸型发生了热传导，造成了热量损失。长轴处温度较低，在（1490±10）℃，说明冷铁起到了良好的激冷作用。图5b、图5c、图5d分别为铸件凝固30%、70%、100%时的温度分布，从图中可以看出，随着凝固时间的延长，铸件温度呈现中心向四周递减的趋势，形成了良好的温度梯度，冒口处最后凝固，温度约为1408℃，长短轴两端温度最低，温度在852~944℃，符合顺序凝固的温度分布规律。

（2）凝固后缩孔、缩松缺陷的模拟结果分析　利用MAGMAsoft的后处理程序显示的导叶铸件缩孔、缩松模拟结果如图6所示。从图中铸件各部位孔隙率的显示结果中可以看出，铸件除冒口外，本体上无缩孔、缩松缺陷产生，冒口收缩区距离本体有一定的安全距离，工艺设计符合预期的效果。经过对实际生产的导叶铸件粗加工后进行无损检测，导叶各部位UT、PT检测结果分别符合《CCH 70-3水力机械铸钢件检验规范》标准2级要求，验证了工艺措施和数值模拟预测的科学性。

（3）凝固后应力场的模拟结果分析　图7是导叶铸件凝固后各方向应力场模拟。从图7a～图7c可以看出，铸件凝固后其整体应力分布较为均匀，但在长轴端部的应力要明显高于其他部位，*Y*、*Z*方向上的应力分别达到了



图3　立式铸造导叶轴线缩松区

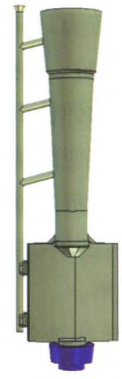


图2　导叶立式铸造工艺

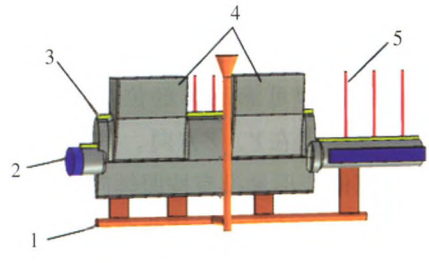
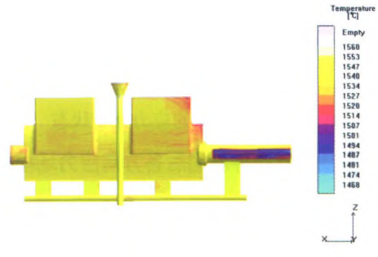
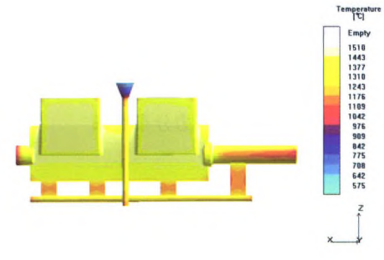


图4　导叶铸造工艺方案示意

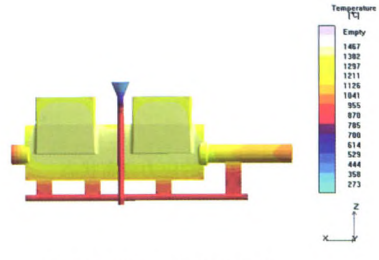
1. 浇注系统　2. 冷铁　3. 集渣槽
4. 冒口　5. 出气孔



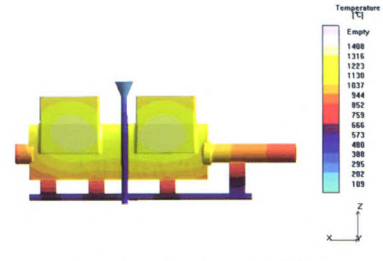
(a) 凝固10%时的温度分布



(b) 凝固30%时的温度分布



(c) 凝固70%时的温度分布



(d) 凝固100%时的温度分布

图5　导叶铸件凝固过程的温度场模拟

209MPa、284MPa。当铸件凝固时，在温度变化的情况下弹性体如果受到外在约束，以及周围相邻各单元体之间的相互牵制作用，导致形变不能自由发生，于是便产生了应力，即所谓的温度应力（热应力）。这个温度应力将由于物体的弹性引起附加的变形。因此，在变温情况下应力越大，铸件的变形量就越大，这说明导叶铸件在其长轴端部最容易发生翘曲变形。

图8是导叶铸件凝固后各方向变形量模拟。从图8a可以看出，铸件凝固后其*X*方向上变形量分布很均匀，沿*X*轴由两端向铸件中心收缩，只需设定合理的缩尺即可满足各部位加工量均匀。但在*Y*、*Z*方向，其长轴端部的变形量没有按照轴向规律收缩，而是发生了翘曲变形，其中*Y*方向的变形量为-6~-8mm，*Z*方向的变形量为5~8mm，这与应力场的模拟结果相吻合。这说明工艺预留的长轴加工余量13mm是合理的，不用预留反变形量即可以保证铸件后续的加工要求。在后续的铸件实际生产中，一台份24件导叶铸件的划线结果与模拟预测结果基本吻合，验证了工艺措施和数值模拟的科学性。

4. 结语

（1）针对长瓣体结构水轮机活动导叶在以往生产中存在的质量问题，设计了卧式铸造工艺，并合理设置工艺参数，经过实际生产验证，此工艺方案可有效降低卧式铸造工艺中经常出现的变形、砂眼、气孔等缺陷。

（2）通过利用MAGMAsoft模拟软件对铸件温度场、应力场分析，准确地预测了铸件内部质量及长轴的变形量，与实际情况相符，验证并优化了铸造工艺。

（3）按照此工艺方案生产的导叶铸件内外部质量优良，质量符合设计要求，说明此工艺方案的先进性，为生产类似长瓣体结构导叶铸件提供了参考方法。

手机扫描二维码，详细了解MAGMAsoft模拟软件应用

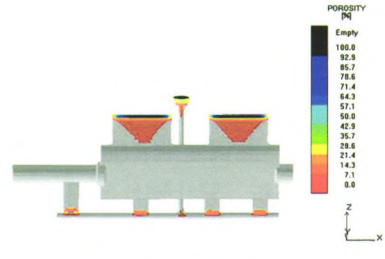
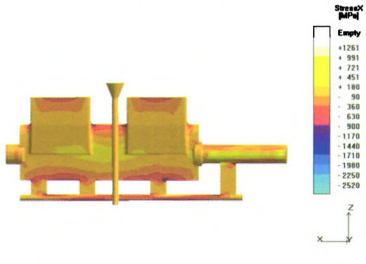
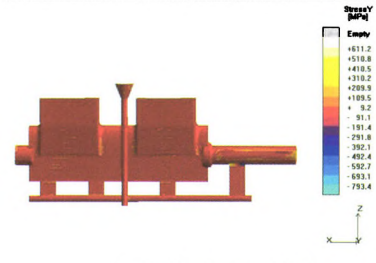


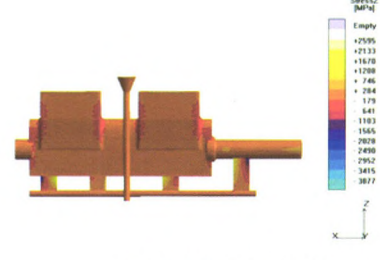
图6 导叶铸件缩孔、缩松缺陷的模拟结果



(a) *X*方向的应力分布状态

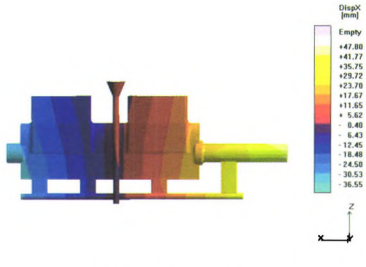


(b) *Y*方向的应力分布状态

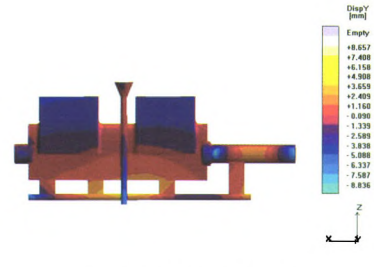


(c) *Z*方向的应力分布状态

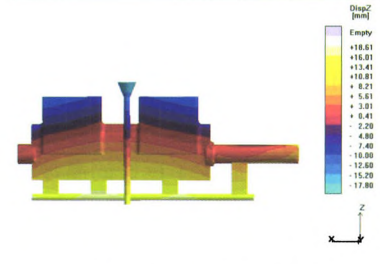
图7 导叶铸件凝固后各方向应力场模拟



(a) *X*方向的应力分布状态



(b) *Y*方向的应力分布状态



(c) *Z*方向的应力分布状态

图8 导叶铸件凝固后各方向变形量模拟

作者简介：吴彦军、李鹏，哈尔滨电机厂有限责任公司大电机研究所金属材料研究室，主要从事金属材料热加工工艺方面研究。

MW 20140820