

混流式水轮机转轮简化模型焊接应力场的数值模拟

姬书得, 方洪渊, 刘雪松, 孟庆国

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 在确定混流式水轮机转轮简化模型、解决分段焊焊接热源加载问题及解决各独立实体间接触边界节点不重合的热传导问题的基础上, 对转轮模型焊接过程的应力场进行了数值模拟。得到了焊接过程中纵向应力的演变规律与焊后应力场的分布情况。结果表明, 焊后应力的峰值出现在叶片与上冠或叶片与下环接触面的附近的叶片上。这个结果可以较好地解释水轮机转轮叶片疲劳裂纹的产生和扩展的失效行为。

关键词: 转轮; 叶片; 模拟; 应力场; 焊接

中图分类号: TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)04-107-04



姬书得

0 序 言

水轮机是一种把水流的机械能转变为旋转机械能的动力机械, 它以水流为动力带动其它机械工作。而转轮是水轮机最关键的部件之一, 它的质量直接影响水轮机机组的效率和使用寿命。目前电站中所采用的混流式水轮机的转轮包括叶片、上冠与下环三部分, 其多为组焊件, 型号多样, 结构庞大^[1]。

在发电站的实际运行过程中, 几乎所有的水轮机在不同程度上都存在短期内叶片断裂情况, 并且破坏部位基本一致, 这种断裂是非预期的、是在设计寿命之内发生的, 启裂位置离叶片与上冠、下环连接焊缝熔合线大约 20~30 mm 的叶片上^[2,3]。水轮机转轮出现裂纹后, 会带来许多问题^[4,5]。首先, 随着裂纹的不断扩展, 可能发生叶片断裂而损坏水轮发电机组的灾难性事故。叶片裂纹问题严重威胁电站的安全运行, 一些电站被迫几个月停机并处理裂纹, 大大降低了电站的经济效益。其次, 当裂纹扩展到一定长度后, 叶片会有较大改变, 严重时会发生“错边”, 致使水力不平衡, 效率降低, 造成巨大损失。在混流式水轮机的工作运行中, 转轮叶片的应力来源主要有工作应力和内应力两种。工作应力主要与水轮机的工作环境有关; 内应力则主要来源于焊接残余应力, 它是在转轮结构制造过程中产生的。焊接残余应力是焊接结构内局部区域发生不可逆的塑性变形所致的自平衡应力, 其拉应力与压应力同时产生而又相互平衡。而在导致转轮产生裂纹的诸因素中, 焊接残余应力起加速应力腐蚀过程的作用, 残

余拉应力更大大降低了转轮的抗疲劳强度^[6]。因此, 分析了解转轮焊接过程中的应力变化情况以及转轮的焊后残余应力的分布情况, 对在转轮制造过程中采取合理的工艺措施来缓解焊接残余应力有着重要的理论意义和实际工程意义。

由于混流式水轮机转轮的实际结构非常复杂, 作者在对转轮结构进行简化的基础上, 主要是利用非线性有限元软件 MSC.MARC/MENTAT 对混流式水轮机简化模型焊接过程的应力场进行数值模拟。

1 转轮的有限元分析模型

1.1 转轮简化模型的建立

由于转轮实体结构过于复杂, 因此考虑对其进行简化。简化的出发点是只考虑其焊接应力的分布规律, 不考虑水轮机实际的工作应力。简化结构如下: 叶片数量为三片, 叶片与叶片间二面角为 120°; 对叶片形状进行简化, 上冠和下环也做了相应的简化, 如图 1 所示。上冠半径为 175 mm, 下环半径为 200 mm, 上冠与下环厚 20 mm; 叶片厚 10 mm, 高 160 mm; 内孔半径 10 mm。其中假设与 x 轴平行的叶片称为叶片 1, 叶片 2、叶片 3 与叶片 1 分别成 120°和 240°的二面角。

1.2 转轮材料及焊接规范的确定

叶片、上冠、下环以及焊接过程中所采用的焊丝材料皆为 0Cr13Ni5Mo。焊接方法为熔化极气体保护焊 (GMAW), 电弧电压为 25 V, 焊接电流为 210 A, 焊接速度为 5 mm/s。

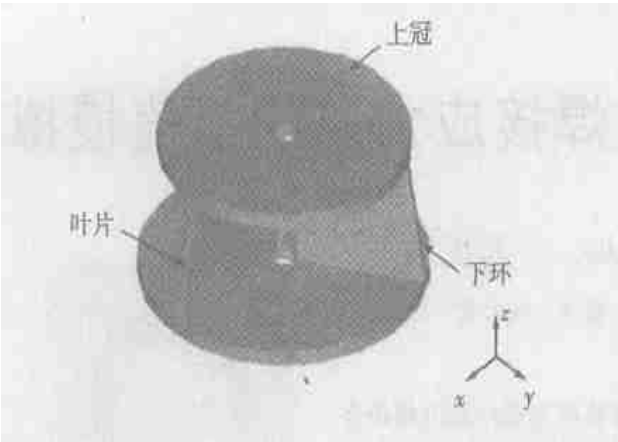


图 1 转轮简化模型示意图
Fig. 1 Simplified model of runner

1.3 转轮简化模型有限元网格的划分

图 2 是转轮简化模型有限元网格的划分情况, 单元选用 10 节点四面体单元, 转轮整体共 24 330 个单元, 6 932 个节点。

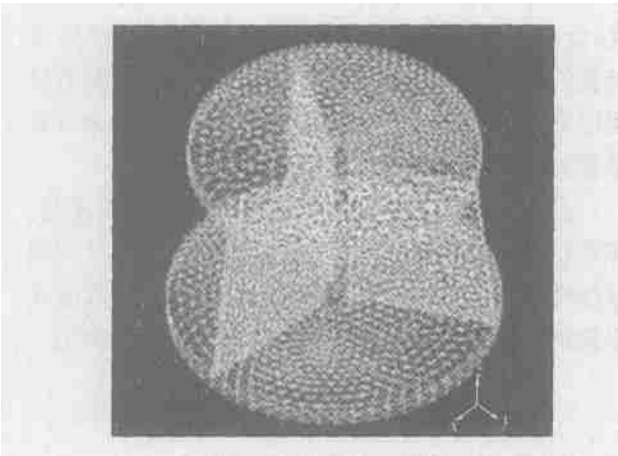


图 2 转轮的有限元模型
Fig. 2 Finite element model of runner

1.4 边界条件的确定

1.4.1 初始条件

0Cr13Ni5Mo 是一种马氏体不锈钢, 它在室温下的屈服强度为 900 MPa 左右。对于马氏体不锈钢的焊接, 一般都要在焊前预热。这里的初始温度选择为 100 ℃。

1.4.2 能量边界条件

由于水轮机转轮叶片与上冠或叶片与下环通过焊接方式连接, 所以焊接热源的加载是数值模拟过程中的一个重要问题。由于焊接方法为熔化极气体保护焊, 故所选用的热源模型为双椭球热源, 其表达式如下。

前半部分椭球内热源分布为

$$q(x,y,z,t)=\frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi a_1bc\sqrt{\pi}}e^{-3x^2/a_1^2}e^{-3y^2/b^2}e^{-3(z+v(\vartheta-t))^2/c^2},$$

后半部分椭球内热源分布为

$$q(x,y,z,t)=\frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi a_2bc\sqrt{\pi}}e^{-3x^2/a_2^2}e^{-3y^2/b^2}e^{-3(z+v(\vartheta-t))^2/c^2},$$

式中: v 为焊接速度; Q 为热输入率; ϑ 为电源位置的滞后时间; f_1, f_2, a_1, a_2, b 与 c 为参数, 其值分别为 1.4 mm、0.6 mm、3.00 mm、12.00 mm、6.84 mm 与 3.04 mm。在 MSC.MARC 中通过调入 Fortran 6.0 编写的子程序, 实现了分段焊接过程的热源加载。

1.5 接触体条件的确定

在对转轮整体进行网格划分时, 由于上冠、下环与叶片为独自的实体, 所以只能对其分别进行划分, 这样就不能保证各接触边界上的节点重合。而在这种情况下下的热传导不能正常进行。作者通过定义上冠、下环与叶片为耦合场中可变形的接触体, 其接触方式为胶合的方法成功解决了边界节点不重合的热传导问题。

2 转轮焊接应力场的数值分析

分段焊接过程中, 六道焊缝分别焊接, 顺序为叶片 1 下焊缝, 叶片 1 上焊缝, 叶片 2 下焊缝, 叶片 2 上焊缝, 叶片 3 下焊缝, 叶片 3 上焊缝, 并且每道焊缝都是从里向外焊。

2.1 转轮纵向应力场的数值分析

由于转轮整体共有三个叶片, 且呈规律性分布, 因此下面主要讨论叶片 1 的应力在焊接过程中的变化情况以及焊后残余应力的分布情况。

图 3 给出的是 $t=5\text{ s}$ 、 $t=18\text{ s}$ (电弧焊到接近中截面下焊缝时刻)和 $t=38\text{ s}$ (第一道焊缝成形后)时的应力分布规律。其中的中截面是指过叶片 1 沿 x 轴方向中点且垂直 $x-y$ 平面的截面, d 表示点到叶片 1 上端部的距离。由图中可以看出, 在焊接刚开始时, 中截面处的应力值比较小, 这是因为电弧还没有到达中截面, 对此处还没有太大的影响(曲线 1); 当电弧到达中截面下端附近时, 此处附近的金属由于体积膨胀, 受到周围金属的压缩而产生变形, 应力骤然升高, 表现为压应力(曲线 2); 而当热源远离中截面, 即第一道焊缝焊接完成时, 中截面下端的变形由压缩变形改变为拉伸变形, 这是由于焊缝成形后, 液态金属凝固后冷却收缩产生的拉应力所致(曲线 3)。

图 4 给出了叶片 1 焊后($t=71\text{ s}$)由于焊接热循环而导致的纵向应力沿焊缝纵向不同横截面的分布情况。由图可知, 在焊缝及其附近区域的纵向应力为拉应力, 且出现峰值, 其值在焊缝中截面区域与

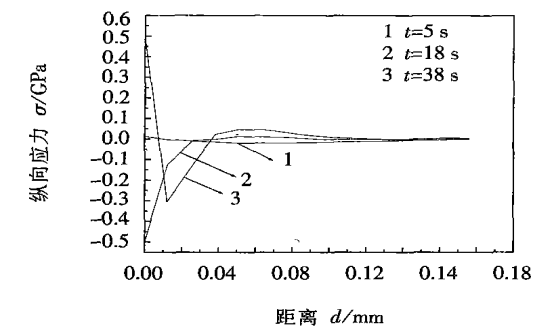


图 3 叶片 1 中截面上不同时刻的纵向应力分布图
Fig. 3 Longitudinal stress of different time on middle section of blade one

接近熄弧处最大;在上下两段焊缝之间则为压应力区;在起弧处的纵向应力则相对较小。

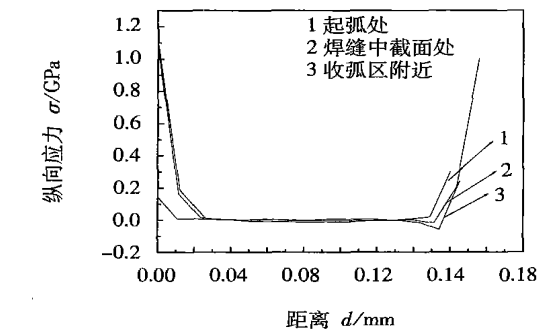


图 4 叶片 1 上不同截面上的纵向应力分布图
Fig. 4 Longitudinal stress of different time on middle section of blade one

图 5 给出的是 $t=142\text{ s}$ (叶片 2 焊接完毕后), $t=213\text{ s}$ (叶片 3 焊接完毕后), $t=500\text{ s}$ (转轮冷却 287 s 后) 时的纵向应力分布规律。可以看出, 在后续的焊接及冷却过程中, 叶片 1 上的应力始终保持上升趋势, 并且在室温时中截面上的纵向应力最大。

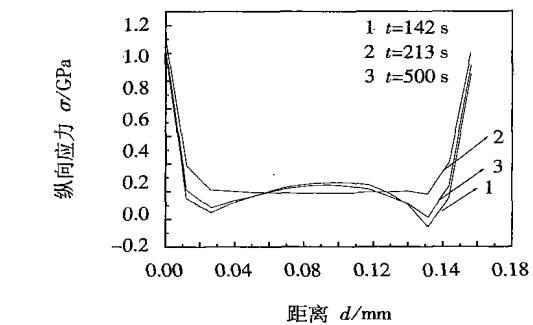


图 5 叶片 1 在不同时刻中截面的纵向应力分布图
Fig. 5 Longitudinal stress of different time on blade one

2. 2 转轮横向应力的数值分析

由于转轮横向应力的演变过程与纵向应力类似, 这里就不再多述, 下面主要讨论叶片 1 上焊后 ($t=213\text{ s}$) 横向应力的分布情况, 如图 6 所示。由图中可以看出横向应力的峰值出现在焊缝附近, 同时最大值出现在焊缝边缘的熄弧区。结合上述叶片 1 上的纵向应力分布情况以及实际转轮的结构可得出的结论是, 转轮的最薄弱环节是在叶片上焊缝的熄弧处附近, 这一结果与事实相符^[7]。

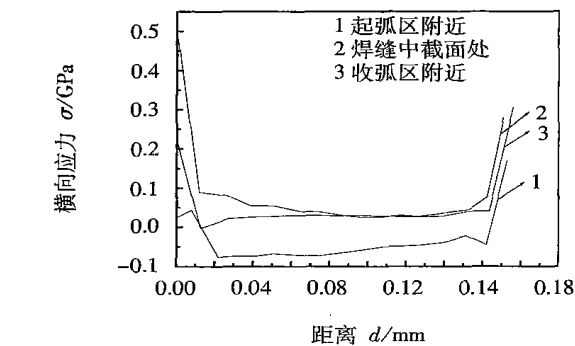


图 6 叶片 1 上不同截面的横向应力分布图
Fig. 6 Transverse stress of different sections on blade one

2. 3 转轮 Von Mises 等效应力的数值分析

Von Mises 等效应力是判断材料处于弹性阶段还是塑性阶段的准则。当材料的等效应力小于屈服强度时, 材料处于弹性状态; 当材料的应力达到屈服强度时, 便可认为材料进入塑性状态。因此研究 Von Mises 等效应力在水轮机转轮简化模型中的分布情况对于了解叶片裂纹的产生原因以及缓解转轮叶片的开裂具有一定的意义。

图 7 给出了混流式水轮机转轮简化模型冷却后等效应力的分布情况, 为了直观起见, 图中将上冠去掉。从图中可以看出等效应力的极值主要分布在焊



图 7 转轮的 Von Mises 等效应力分布图
Fig. 7 Equivalent Von Mises stress of runner

缝处。冷却后等效应力的值略小于材料的屈服强度,与实际情况相符,这也间接验证了混流式水轮机转轮简化模型的合理性。

3 结 论

(1) 建立了混流式水轮机转轮的简化模型,提出了将模型各部分定义成接触体来解决针对复杂三维实体各接触边界节点不重合的热传导问题的方法。

(2) 利用 Fortran 子程序实现了焊接热源沿空间曲线移动以及焊接热源的分段加载问题。

(3) 得到了简化模型的焊接残余应力场与 Von Mises 等效应力场分布情况以及叶片中截面纵向应力的演变过程。结果表明,残余拉应力出现在叶片与上冠或叶片与下环接触面附近的叶片上,并且在此区域出现焊接应力的峰值。这个结果可以较好地解释水轮机转轮叶片疲劳裂纹的产生和扩展失效行为。

参考文献:

[1] 程良骏. 水轮机[M] . 北京: 机械工业出版社 1982.

[2] 王远江. 岩滩与李家峡水电站水轮机转轮裂纹的原因和处理[J] . 水力发电, 1999, 15(5): 43—45.

[3] Courteau D. Performance and technical particulars of the double runner francis turbines. [A] . Waterpower- Proceedings of the International conference on hydropower[C] . 1995. 1491—1499.

[4] Baetz J P. The repair welding of ARSWIN Runne[J] . Journal of Hydraulic Research, 1986. 24(3): 45—50.

[5] Sotnikov A A. A russian turbine experience[J] . Water Power of Dam Construction, 1998, 50(5): 45—48.

[6] 樊世英. 混流式水轮机转轮裂纹原因分析及预防措施[J] . 水力发电, 2002, 18(5): 38—41.

[7] 孙鸿秉. 岩滩水轮机转轮叶片裂纹原因探析[J] . 红水河, 1995, 15(3): 32—37.

作者简介: 姬书得, 男, 1977 年 4 月出生, 博士研究生。主要从事水轮机转轮失效方面的研究, 发表论文 5 篇。

Email: superjsd@hit.edu.cn