

喷涂技术在水轮机导叶抗磨蚀破坏中的应用

李翠林¹ 朱 云¹ 高云涛²

(1.西北电业职工大学培训处 陕西 西安 710054 ;2.刘家峡水电厂 ,甘肃 兰州 731600)

摘要 对水轮机导叶磨蚀破坏的程度和磨蚀区域进行综合分析 ,设计出合理的高速火焰喷涂方案 ,确定喷涂工艺 ,对水轮机导叶进行抗磨蚀喷涂应用。在刘家峡水电厂和葛洲坝水电站水轮机组导叶中的应用表明 ,高速火焰喷涂技术对水轮机的磨蚀破坏防护作用显著。

关键词 喷涂 ;水轮机 ;导叶 ;磨蚀 ;空蚀

中图分类号 :TK730.3+13 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-764X(2008)S1-0133-04

我国是一个多泥沙河流国家 ,年平均输沙量在 1000 万 t 以上的河流有 115 条^[1]。长江年平均输沙量达 5.14 亿 t ,黄河的含沙量更大 ,据统计黄河三门峡河段年平均含沙量达 37.6 kg/m³ ,黄河上游刘家峡水电厂每年进入水轮机转轮的平均含沙量也在 20 kg/m³ 左右^[2]。黄河及其支流、长江及其支流的众多水电厂都存在或将面临水轮机磨蚀问题 ,水轮机过流部件受到泥沙磨损与空蚀联合破坏作用十分严重。据粗略估计 ,在全国已建成发电的装机容量为 1.1 亿 kW 的水轮机中 ,约有 1/3 过流部件存在不同程度的磨蚀破坏^[3]。作为水电站的核心部件 ,水轮机对水电站的整体性能起着决定性的作用。水轮机磨蚀破坏问题是一项复杂的系统工程 ,50 多年来我国对这一问题的研究从未间断 ,经过几代人的探索研究 ,也取得了一些经验和成果。高速火焰喷涂技术自 1998 年引入我国 ,先后在 50 余台水轮机上进行了喷涂试验。截至目前 ,经过喷涂的机组最长运行时间已达 30 000 多 h ,实践表明高速火焰喷涂技术对水轮机过流部件的保护作用非常显著^[4]。

1 水轮机过流部件磨蚀破坏程度与磨蚀区域

由于水轮机内部的流场是非常复杂的三维非定常黏性流场 ,应力和应变率十分复杂 ,不同方向上有不同的压力梯度 ,同时还有旋转和表面曲率等作用 ,还伴有二次流、间隙流、尾迹及流道中的叶道涡和卡门涡 ,流动具有强烈的漩涡性。不同型号的水轮机在不同工况条件下所通过的水沙两相流的流动特性十分复杂 ,水轮机过流部件的磨蚀破坏程度及磨蚀

发生区域也不尽相同。因此 ,通过对水轮机过流部件的耦合流场进行综合分析及数值模拟 ,探讨水沙两相流体在水轮机过流部件中的流动机理 ,预测水轮机过流部件的磨损、空蚀部位及破坏程度 ,进而对不同型号的水轮机的不同过流部件进行有针对性的喷涂工艺设计及喷涂材料甄选 ,能有效地提高水轮机的抗磨蚀性能。随着水轮机内部流动数值模拟技术的发展 ,采用 N-S 方程进行数值计算已成为水力机械内部三维黏性流场分析的主要方法。该方法基于 N-S 方程对水轮机内部流动进行数值计算 ,输送清水介质时采用标准 $\kappa \sim \epsilon$ 湍流模型 ,输送含有固体颗粒的水沙两相介质时采用 $\kappa \sim \epsilon \sim A_p$ 模型、笛卡儿坐标、混合四面体非结构网格和 SIMPLE 算法进行计算。在 Eulerian 坐标系下建立固液两相流运动方程 ,并建立液相动量方程及固相动量方程。

液相连续方程
$$\frac{\partial \Phi_L}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\Phi_L U_i) = 0 \quad (1)$$

固相连续方程
$$\frac{\partial \Phi_S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\Phi_S V_i) = 0 \quad (2)$$

式中 : Φ 为流量 ; U_i 和 V_i 分别为液相和固相的速度分量 ; x_i 为坐标分量 ,脚标 L 和 S 分别表示液相和固相 ; i 为张量坐标。

运用式(1)和式(2) ,以水轮机导叶为例进行模拟计算 ,对比输送清水和含沙水的模拟结果可得出如下结论 :固体颗粒对水轮机引水、导水部件的内部场有较大影响^[2] ,由于两相介质流体在流场与导叶头部和边壁的作用大于清水介质中的作用 ,故导致脱流、漩涡现象的明显发生 ,在导叶外侧和内侧 ,颗

粒碰撞角均在导叶头部较大,随后逐渐减小,直至尾部,故导叶头部和边壁区域磨损、空蚀加剧;由于两相介质流动使导叶出口速度增大,即动能增大压力能减小,因而易发生空化现象,引起局部水流的扰动,同时空化现象引起的空蚀会对部件壁面造成破坏,使得固体颗粒冲击壁面引起的损失更大,即空蚀和磨损的联合作用对部件造成的损失超过它们单独作用造成的损失之和;此外,流速和加速度均大的部位磨损更易发生^[5-6]。

图1为某电厂1号水轮机导叶运行1个汛期(约4000h)后的磨损情况。磨蚀的主要区域为导叶头部80mm范围、导叶上下端面(愈靠近头部愈严重)。导叶破坏区域出现鱼鳞状波纹磨蚀破坏,导叶轴径周围有明显鱼鳞状波纹磨蚀(图2),而且越来越宽,瓣体部位最大磨蚀厚度为8mm,轴颈处最深被磨蚀出25mm深的沟槽。由图1和图2可知,导叶实际破坏的区域和破坏程度与以上计算分析结果相吻合。



图1 运行4000h后导叶磨蚀情况



图2 导叶轴径周围的磨蚀情况

2 高速火焰喷涂技术及其工艺性能

高速火焰喷涂技术是通过燃烧一种氧气-燃气混合物,在达到3000℃时将抗磨损的粉末材料送入高速火焰喷枪枪体,燃气与氧气在喷枪前部的虹吸系统内充分混合后从喷嘴中射出并在枪体外被点燃形成高速火焰。该环形火焰包围并均匀地加热离开枪体的粉状喷涂材料,从而将喷涂材料推向工件表

面。由于高速火焰喷涂工艺能够有效地使用可控制的高热能输出,产生的致密和低孔隙度涂层显示出结合强度高(有的超过85MPa)、氧化程度低、喷涂后光洁度高以及涂层内部的残余应力低等特点。利用不同的抗磨材料对工件表面进行喷涂,可达到耐磨或耐腐蚀、抗滑动磨损、抗剥蚀、拉毛或黏附磨损、抗空蚀、抗化学物质腐蚀等效果。20世纪90年代后该技术开始在我国水电站水轮机过流部件中进行应用。

在实际应用中,为了保证喷涂层具有较高的强度和韧性,在基体上附着弥散分布均匀的强化相组织,并具有较高的晶界强度,使喷涂层既具有很高的抗磨损能力又具有较高的抗空蚀能力,产生良好的抗磨蚀效果。使用该技术要求针对不同水轮机的工况条件及机组性能进行喷涂工艺试验以及抗磨蚀材料的遴选配比试验。目前适用于水轮机过流表面抗泥沙磨损的喷涂专用材料主要为碳化钨专用材料,这种专用材料较之其他通用的碳化钨粉如钴-碳化钨类材料,其最主要的特点是对湿环境尤其是水下恶劣环境适应性、抗磨蚀能力强,适用于水电站的水轮机喷涂。

2.1 材料的工艺性能

a. 硬度。足够的硬度是保证喷涂面不被外来硬质点压伤的基本条件。通过显微硬度计对喷涂试块进行测试,荷载2.942N(0.3kgf),每个喷涂试块测量5点,取3点相近值作为测试基准,计算算术平均值,喷涂材料的表面硬度大于1200Hv。

b. 黏结强度。黏结强度表明涂层和基材之间的黏结能力。足够的黏结强度才能保证涂层不被剥离基材,黏结强度是涂层最重要的指标之一。将5个喷涂试块在标准拉力试验机上进行拉伸试验,计算出黏结强度一般大于70MPa。

c. 松装密度。喷涂材料的松装密度在一定程度上体现了粉末的球形程度和空心粉数量这2项指标。松装密度与喷涂粉末的化学成分、粒度范围、粒度配比密切相关,一般在4.8~6.2g/cm³之间,具体选用值要根据不同水轮机的性能及工况条件进行试验而定。

d. 粉末粒径。喷涂粉末的粒径范围是由喷涂设备和喷涂材料的种类决定的。图3为放大1000倍的球形粉末SEM扫描图,该粉末粒径的变化范围为15~32μm。图4为放大500倍的不规则烧结型粉末,粉末粒径的变化范围为30~55μm。

e. 流动性。流动性反映了每100g干粉通过2.5mm标准孔径的通道所需的时间,与喷涂时粉末通过输粉管道流畅与否有直接影响。一般的热喷涂

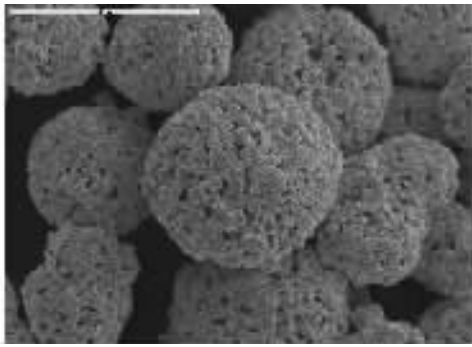


图3 放大 1000 倍的球形粉末

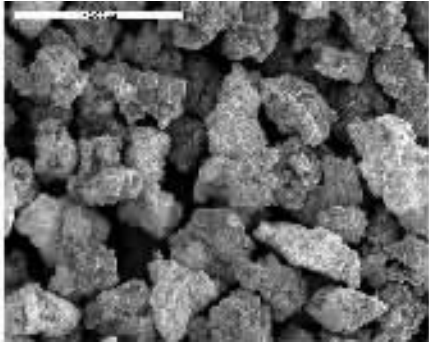


图4 放大 500 倍的不规则烧结型粉末

工艺中,粉末的流动性在 50 s/100 g,而高速火焰喷涂中粉末的流动性在 12 s/100 g 以内。时间越短表明流动性越好。

2.2 喷涂的工艺性能

在喷涂过程中,应根据水轮机的破坏部位、破坏程度进行工艺设计;否则,如果被喷工件受热面积大,工件变形不易控制。科学的工艺设计可保证基材温度不高于 120℃,从而保证喷涂过程中被喷部件不发生变形,金相组织结构不发生改变,原材料的机械性能得以保持。

3 喷涂应用效果分析

3.1 刘家峡水电站

近十年来,利用高速火焰喷涂技术对水轮机过流部件进行磨蚀破坏的防护和修复效果显著。以刘家峡水电站水轮机导叶为例,经过 28 000 多 h 的运行后,1 号机组活动导叶尾部立面密封面、活动导叶正压侧、上下端面等区域磨蚀严重,尾部立面密封磨蚀出锯齿状沟槽及豁口,见图 5(a),豁口深 10 ~ 15 mm,母材表面损失量达 5 ~ 8 mm。叶身正压面磨蚀较负压面严重,叶身正压面从密封压板部位开始宽 200 mm 区域内磨损出沿水流方向的沟槽、深坑,深度达 5 ~ 8 mm,导叶正压侧其余表面呈现鱼鳞状磨损沟槽,导叶负压侧磨损比较轻微。叶身上端面靠近进水边及出水边区域磨蚀出沟槽,深度达 2 ~ 6 mm,上端面其余部位磨损轻微,叶身下端磨蚀出沟槽、深坑,

深 5 ~ 20 mm,且距离出水边越近磨蚀越严重^[4]。



图 5(a) 刘家峡水电站 1 号机组导叶喷涂前磨蚀状况



图 5(b) 刘家峡水电站 1 号机组导叶喷涂后磨蚀状况

图5 刘家峡水电站 1 号机组导叶喷涂前后磨蚀状况

针对刘家峡水电站机组大、泥沙多、水头变幅大、负荷调节范围宽、电站装机空化系数安全裕量较大等特点,设计该机组导叶喷涂方案并进行试验,最终确定采取局部区域喷涂的防护方案,即导叶头部、尾部和正、背面周边 100 mm 范围内利用高速火焰喷涂技术喷涂专用碳化钨材料。2000 年对 1 号机组 24 个导叶进行了喷涂。2007 年该机组运行 30 000 多 h 后检查发现喷涂部位没有任何磨损破坏状况,抗磨蚀效果很好,见图 5(b)。未喷涂部位与喷涂部位的结合部有明显的高差,即未喷涂部位已磨损掉 1 ~ 2 mm。

3.2 葛洲坝水电站

为了减轻叶片外缘的间隙磨蚀,葛洲坝水电站做了多方面的探讨试验。自 1993 年开始利用机组扩修在叶片背面外缘增设了裙边。多年运行实践表明裙边可以有效减轻叶片外缘的磨蚀,但是叶片裙边的磨蚀却非常严重。20 号机组于 1999 年增设裙边,机组运行不到 20 000 h,裙边磨蚀严重,下端由原来的 15 mm 厚变成一条“利刃”(图 6(a)),厚度为 40 mm 的根部局部被蚀穿,不得不对裙边进行修型处理。

2001 年在 18 号机组叶片上应用了高速火焰喷涂技术,即在叶片背面边缘 300 mm 宽范围喷涂碳化钨金属陶瓷粉末。至 2006 年 12 月,18 号机组经过 6 个汛期,运行 30 000 多 h 后检修时发现,叶片边缘及裙边没有明显的磨蚀现象,热喷涂的保护效果十分显著,见图 6(b)。

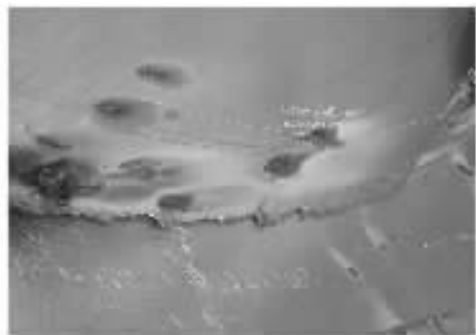


图 6 葛洲坝水电站导叶喷涂前后叶片裙边磨蚀状况



图 6 葛洲坝水电站导叶喷涂前后叶片裙边磨蚀状况

图 6 葛洲坝水电站导叶喷涂前后叶片裙边磨蚀状况

4 结 语

我国多泥沙河流上水轮机过流部件遭受磨蚀破坏,导致机组事故率上升,出力及效率下降,机组检修费用增加,水轮机磨蚀破坏已成为当前水电生产中亟待解决的问题。由于不同流域的泥沙含量、粒径级配、砂粒形状、硬度和过机流速不同,水轮机的材质、设计参数、加工工艺、机械性能、运行工况也不同,导致不同电站水轮机的磨蚀部件和破坏程度也

不尽相同。目前水轮机抗磨蚀破坏采用的主要方法是补焊打磨修型方法,不仅工作量大,检修工期长,花费大量的人力物力,而且很难控制变形,不能保证叶型的精确性,也不能保证过流面的光洁度。在材料研究方面,目前还没有一种可机加工的材料达到既抗空蚀又抗磨损的要求,所以通过过流面增强技术形成抗磨蚀涂层进行抗磨蚀防护很有必要。高速火焰喷涂方法在水轮机抗磨蚀方面应用效果显著。

参考文献:

- [1] 田震. 纳米塑料合金整体浇铸高抗磨蚀水轮机零部件 [C]// 顾四行, 胡金荣. 水轮机抗磨蚀技术研讨会论文集. 北京: 中国文史出版社, 2006: 235-236.
- [2] 李仁年, 李琪飞, 韩伟, 等. 水轮机引水、导水部件内部泥沙两相流动的数值模拟研究 [C]// 顾四行, 胡金荣. 水轮机抗磨蚀技术研讨会论文集. 北京: 中国文史出版社, 2006: 1-10.
- [3] 顾四行. 水轮机磨蚀综述 [C]// 顾四行, 胡金荣. 水轮机抗磨蚀技术研讨会论文集. 北京: 中国文史出版社, 2006: 28-33.
- [4] 高云涛, 朱国海, 付廷勤. 刘家峡水电厂 3 号机组扩容改造前后稳定性能分析 [C]// 胡金荣, 顾四行, 徐洪泉. 水轮发电机组稳定性技术研讨会论文集. 北京: 经济日报出版社, 2007: 83-85.
- [5] 李启章. 对大型机组振动、裂纹问题的看法 [C]// 胡金荣, 顾四行, 徐洪泉. 水轮发电机组稳定性技术研讨会论文集. 北京: 经济日报出版社, 2007: 115-118.
- [6] 侯辉昌. 泥沙对水轮机磨蚀成因与防止分析 [C]// 顾四行. 水机磨蚀论文集. 天津: 《水机磨蚀》编辑部, 2003: 30-53.

(收稿日期 2008-03-03 编辑 骆超)

(上接第 108 页)

4 结 语

a. 金鸡滩水利枢纽工程闸坝建成投产运用已近 3 年, 运行情况正常, 闸后消能充分, 流态稳定。

b. 设置通风采光天井, 使电站副厂房内部实现了自然通风和采光, 改善了运行区室内的工作环境。建筑天井技术简单, 经济可行, 值得推广应用。

c. 船闸采用闸墙长廊道短支孔输水系统, 通过设计创新, 改进其结构及出水孔布置, 改善了船闸窄型闸室单边出流的水力条件。模型试验和实际运行情况表明, 闸室内冲水及放水时水流较平稳, 引航道口门区水流平顺。

d. 坝顶多功能门机变频调速技术、船闸上闸首下沉式工作闸门、闸门液压泵站液压系统比例控制

技术、人字门顶枢及底枢固体自润滑免维护轴承等的应用, 解决了本工程设计及运行维护中的一些技术难题, 工程投产以来运行情况正常。

参考文献:

- [1] 广西大学. 金鸡滩水利枢纽整体水工模型试验研究报告 [R]. 南宁: 广西大学, 2003.
- [2] 广西大学. 广西隆安金鸡滩水利枢纽(技术设计)水工模型试验研究报告 [R]. 南宁: 广西大学, 2004.
- [3] 何善国, 张任芬, 袁国培. 贯流水电站厂房设置通风采光天井初探 [J]. 水利水电技术, 2006(9): 65-68.
- [4] 南京水利科学研究院. 广西右江金鸡滩水利枢纽船闸输水系统模型试验研究报告 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004.

(收稿日期 2008-01-29 编辑 骆超)