

SHUIDIANZHAN JISHU GAIZAO JI SHUIJI MOSHI

水电站技术改造及 水机磨蚀

主 编 顾四行 杨天生 闵京声 姚 光
副主编 张维聚 刘洪启 余江成 刘洪文 王晓红



黄河水利出版社

水电站技术改造及水机磨蚀

主 编 顾四行 杨天生 闵京声 姚 光
副主编 张维聚 刘洪启 余江成 刘洪文 王晓红

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书收集了水电站技术改造及水机磨蚀方面的最新文章,内容涉及水电站设计选型,水电站(水轮机)和泵站(水泵)增效扩容技术改造,空化、空蚀、磨损及磨蚀机制研究与分析,水力机械过流部件应用的抗空蚀磨蚀新材料、新技术等。大部分文章的作者是奋战在水电站和泵站第一线的运行及检修人员,他们对所遇到的问题有切身体会,在处理具体问题时有丰富的经验和针对性。

本书专业性、实用性强,可供从事水利水电工程科研、设计、设备制造、安装运行、检修维护的工程技术人员参考,也适宜水利水电、水力机械、水能动力及相关专业的大中专院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水电站技术改造及水机磨蚀/顾四行等主编. —郑州:黄河水利出版社,2012.9

ISBN 978-7-5509-0349-4

I. ①水… II. ①顾… III. ①水力发电站-技术改造-文集②水轮机-磨蚀-文集 IV. ①TV73-53②TK730.8-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第215210号

策划编辑:简群 电话:0371-66026749 E-mail:W_jq001@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:20

字数:487千字

印数:1—1000

版次:2012年9月第1版

印次:2012年9月第1次印刷

定价:55.00元

前 言

《水利发展规划(2011—2015年)》(简称“规划”)是“十二五”国家重点专项规划之一,提出了“十二五”及今后一个时期水利发展的总体思路、目标任务、建设重点和改革管理举措,是指导水利改革发展的重要依据。

根据“规划”提出的目标任务,水电站围绕增效扩容进行的技术改造正在逐步展开。

本书主要内容涉及水电站设计选型,水电站(水轮机)和泵站(水泵)增效扩容技术改造,空化、空蚀、磨损及磨蚀机制研究与分析,水力机械过流部件应用的抗空蚀磨损新材料、新技术等。大部分文章的作者是奋战在水电站和泵站第一线的运行及检修人员,他们对所遇到的问题有切身体会,在处理具体问题时有丰富的经验和针对性。本书实用性强,可供从事水利水电科研、设计、制造、运行、检修和管理部门的工程技术人员与管理参考,尤其适宜水利水电、水力机械、水能动力等专业的大中专院校师生阅读。

在今后的工作中,全国水机磨蚀试验研究中心将深入贯彻落实科学发展观,继续解放思想,坚持改革开放,推动科学发展,继续发扬优良传统,进一步搞好服务,发挥桥梁和纽带作用,做好协调和信息交流工作,大力推广应用新技术、新材料、新工艺,为推动我国水机磨蚀研究持续健康发展,不断提高试验研究与实践水平,作出更大的贡献。

本书文章由中国动力工程学会水轮机专业委员会和全国水机磨蚀试验研究中心共同征集和编撰。

在本书的编撰过程中,得到了有关领导和业内专家的关心与大力支持,在此表示衷心感谢!

编 者

2012年5月10日

目 录

前 言

必须大力加强对过机泥沙的关注	吴培豪	余江成(1)
解决含沙水流中水轮机严重破坏的新途径	吴培豪	余江成(7)
磨损与空蚀属于同一分类的磨损吗? ——对水轮机破坏属性分类的商榷	吴培豪	(14)
水泵水轮机空蚀磨损调查	陈顺义	刘诗琪(20)
三峡水电站水轮机防泥沙磨蚀措施的应用	陈美娟	陈梁年(25)
水轮机防泥沙磨蚀措施的技术特点		陈梁年(31)
碧口水电厂水轮机改造的经验	李世康 韩亚宁 燕 京 王兴民 车服璋	赵春江(37)
自熔合金粉末喷焊密封环制作技术的研究与应用		冯立荣(44)
三峡水电站水轮机抗磨蚀技术措施及磨蚀修复		王旺宁(51)
红山嘴电厂水轮机抗磨课题研究		刘丁桢(58)
红山嘴电厂水轮机综合抗磨蚀工作运用		刘洪文(62)
红山嘴电厂非金属材料抗磨应用	郭维克 刘丁桢 刘洪文	古 勇(67)
利用钢索卷扬机更换旧压力钢管		周文忠(71)
减小泥沙河流电站水轮机导水机构关闭时漏水量的结构措施及选材	王民富 王春雷	姚传贤(81)
卡普卡电站增容改造中的抗磨蚀措施		梁彦松(87)
刚果(金)ZONGOII 水电站水轮机转轮抗磨蚀选型	张维聚	卞东阳(90)
黄河三盛公水电站水轮发电机组及附属设备设计	徐宝兰	杨 旭(96)
万家寨引黄北干线平鲁地下泵站水泵抗泥沙磨蚀设计		杨 旭(100)
三门峡水电站 1 [#] 水轮发电机组改造设计	张维聚 姜立武	王晓红(105)
沙坡头水利枢纽北干电站机组改造方案研究	张维聚	刘 婕(113)
黄河沙坡头水电站主要机电设备选型及招标设计	张维聚	冯士全(119)
新疆塔尕克一级水电站水轮机磨蚀问题及解决办法探析		张维聚(129)
刚果(金)ZONGOII 水电站工程机组大波动稳定性计算及分析	李浩亮 张维聚	卞东阳(134)
刚果(金)ZONGOII 水电站工程水轮发电机组和辅机系统选型设计	张维聚	卞东阳(145)
大唐李仙江戈兰滩水电站机组状态监测分析系统设计	张维聚 刘 婕	王晓红(159)
超低比转速混流式水轮机开发研究	张丽敏	马 果(169)
龙王台水电站贯流式机组转轮油压试验浅析		景国强(196)
浅析双平板橡胶主轴密封改造		景国强(198)
GB1 抗磨蚀堆焊焊条的研制、现场试验和应用		王者昌(200)

小型水轮机过流部件抗磨蚀新技术	胡 江(213)
音萨克水电站引水枢纽工程改造水工模型试验研究	梁彦松(220)
渣浆泵现场磨损速度影响因素综合排序的研究	何希杰 陈 岩 劳学苏(224)
中小型水电站低成本自动化技术研究	尹 刚(230)
新疆小水电开发应重视泥沙问题	顾四行 冯士全(234)
小型水电站技术改造《规范》与《规程》的异同	顾四行 闵京声 姚 光 王晓红(238)
转轮巧加泵叶减轻水封磨蚀	刘洪文(243)
高耐蚀耐磨非晶纳米晶复合涂层在水轮机转轮上的应用	胡 江 刘文举 周 昊(246)
姚河坝电站水轮机运行磨损情况及应对措施	汪世安(249)
纳米塑料合金水泵抗磨密封环的研制	田 震 田蔚冰 张学明 詹树强 伍 璞 张世伟(256)
江口拱坝封拱温度对坝体应力的影响分析	李润伟(261)
龙江高拱坝泄洪消能方案研究	李润伟 王 颖(263)
农村水电站技术改造经验介绍	谭 勇 尹 刚(266)
农村水电站数字监控保护的生命周期研究	韩文生 尹 刚(270)
湖北省小型水电站现状调查	尹 刚(274)
戈兰滩水电站模型验收试验	杨富超 杨 旭 刘 婕(278)
西藏纳金电站机组水轮机技术改造	周泽民(286)
增效扩容电站改造探讨	韦 君 林 玲(290)
岷县刘家浪水电站调速器改造	马金环(293)
龙王台灯泡贯流机组受油器漏油处理	景国强(296)
浅谈小型水电站技术改造	乔俊琪 李 莉(299)
聚氨酯材料在水轮机抗磨蚀中的应用	郭维克 张庆霞 刘 恒(303)

必须大力加强对过机泥沙的关注

吴培豪 余江成

(中国水利水电科学研究院)

【摘要】 讨论了目前工程设计中普遍缺少过机泥沙资料和对过机泥沙不够重视的问题。讨论了对过机泥沙的参数,如泥沙量、粒径、硬度等的表述方式,不能套用河道水库泥沙的习惯,不然有可能会引起一些误解。提出了应从速编制过机泥沙规程的建议。

【关键词】 过机泥沙 含沙量 粒径 硬度 泥沙规程

一、前言

在多泥沙河流上设计水电站,必须要考虑水轮机的磨损,因此必须对修建电站后通过水轮机的泥沙,即过机泥沙的状况进行预测与分析。在水电站投入运行后,为了掌握和分析水轮机的磨损,也需要对过机泥沙的情况加以测定。但目前在有泥沙河流水电站的设计中,似乎对过机泥沙给予应有的重视,因此在绝大多数水电站的设计书中找不到有关过机泥沙的资料及其分析。有的设计中虽然提供了一些过机泥沙的数据,但对泥沙参数的表述,有时只套用河道水库泥沙的习惯,并不完全适合于对过机泥沙的表述与研究。因此,将有关问题阐述如下,供关心研究水轮机磨损的同志参考。

二、现有工程设计中普遍缺乏过机泥沙资料

设计水电站时,如果对修建电站后通过水轮机的泥沙情况不清楚,则对水轮机的选型与参数的合理选择以及是否要选用何种材质,要否加以特殊保护等一系列问题,就难以得到很好的回答。实际的做法大致有两种:一种是认为可以像清水一样对泥沙问题不予考虑,特别是当泥沙数量较少,认为不会有多大危害的情况下,因为这样做就可以节约投资,减少工程的造价,这一情况在一些中小型工程中十分普遍;还有一种情况是把问题估计得很严重,因此把水轮机的参数选得很低并设法加上各种保护措施,从而导致投资的增大,后一种情况相对较少,但也是不合适的。当然大多数设计者都希望有一个恰如其分的评价,但如对过机泥沙的情况不清楚,显然就无法得出合适的结论。因此,在多泥沙河流上设计水电站,对过机泥沙开展预测分析等应该是电站设计中必须开展的一项工作。但十分遗憾的是,如果查阅一下现有的水利水电工程的设计,就可发现在绝大多数的工程设计书中,找不到有关过机泥沙的资料。这不仅在中小型的水利水电工程设计中普遍如此,不少容量高达几十万千瓦的大型水电站,甚至单机容量高达几十万千瓦的特大型水电站,除极少数例外,也普遍缺乏过机泥沙的资料及相应的分析。

是不是我国水利水电工程中的泥沙问题不够突出呢？显然不是这样，我国是一个多泥沙河流的国家，新中国成立后，修建了大量水利水电工程，在泥沙问题上是有过不少惨痛教训的，因此各级领导部门对泥沙问题都是十分重视的。为此从工程的可行性论证阶段起，一直到初步设计、技术设计等各个阶段，都已制定了一系列的规程、规范，明确规定了工程设计各阶段对泥沙问题应该开展的工作，包括资料的收集、计算与分析等。但十分遗憾的是，目前所规定的泥沙工作大多集中在对河流水库的泥沙的预测与分析上，而缺乏对过机泥沙的要求与具体的规定。所以在大多数水利水电工程的设计书中，所看到的水文泥沙资料往往只有修建电站前原有天然河道泥沙的数据，有水库的水电站则有的在设计书中补充了修建电站后进、出库泥沙的数据以及河道水库冲淤变化的预测分析等，唯独缺乏过机泥沙的具体资料及其分析。所以，在很多工程审查中对水轮机的磨损进行评估时，常常出现多种不同的观点，成为争论的焦点。但因缺乏相应的数据与资料，所以争论各方往往相持不下，难以说服对方。其结果常常只好成为原则性的泛泛意见，不了了之，或最后由领导拍板确定。

缺乏过机泥沙资料的原因可能是由于泥沙问题涉及的因素十分众多而复杂，要对它进行详细的计算与预测是有很大难度的，但笔者认为主要原因看来并不在此。因为就整个泥沙问题来看，对河流泥沙问题进行预测与分析的难度更大，这也正是我国过去所修建的不少水利水电工程之遭到惨重教训的重要原因之一，特别是早年修建的一些工程。但也正因如此，迫使各部门在工程的规划设计阶段就不得不对泥沙问题加以高度的重视，规定了必须投入的人力、物力与应该开展的研究工作。通过几十年的努力与经验的积累，到今天为止，对河流水库的泥沙的预测分析工作已获得了巨大的进步。如采用物理模型进行模拟试验与数学模型计算等方法，并制定了一系列的规程、规范。不能说已有的这些经验与所使用的各种试验、计算方法已能对河道水库泥沙做到极高精度的预测和绝对的有把握，但比早年修建的工程对泥沙问题的认知确实是大大提高了一步，至少目前已很少会重覆或重犯过去一些明显的错误。过机泥沙与河流水库泥沙相比相对说来要简单得多。既然能对河道水库泥沙进行预测与分析，则对电站过机泥沙进行预测与分析就不是不可能做到的了。事实上，也已见到在少数一些水电站设计中已给出了过机泥沙的预测计算结果，可惜的是，这样做的目前还极少。所以笔者认为，目前在水利水电工程设计中之所以普遍缺乏过机泥沙的资料，主要原因看来还不是技术上的原因，实际上还是反映了对过机泥沙，或对水轮机磨损问题不够重视。可能认为水轮机发生磨损其影响不如河道水库泥沙那么大，大不了停机检修，实在不行就换，甚至机组报废停止发电，反正不会像河道水库泥沙那样会引起工程报废的危险。因此，就把这一问题留给水电站，等机组投运后，如果发现有问题，再让运行部门去想办法解决吧。

三、对若干过机泥沙参数表述方法的商榷

虽然目前有关过机泥沙的资料及其研究还十分少，但如上所述，还是有少量的设计部门对过机泥沙较为重视，开展了实测与计算预测等工作。此外，还有不少水电站在机组投入后长期坚持开展了过机泥沙的实测。这些努力与所获得的一些资料是十分宝贵的，但可能是由于目前对过机泥沙还缺乏相应的规程、规范，在有些资料中对过机泥沙的表述方法与应用中，有时表述得似乎还不够完全确切，以及存在一些易引起误解与误用等问题。下面就所见到的一些问题进行分析与讨论。

(一) 泥沙的数量

在统计过机泥沙的数量时,大多给出的是含沙量,但也有的资料给出的是过机泥沙的总量,例如年过机泥沙的总沙量有多少吨等,这是不合适的。对河道水库泥沙来说,研究的目的主要是河道水库的淤积和冲刷,这些问题主要与泥沙的总量有关,所以计算河流水库所输送的总沙量是十分重要的。而对水轮机来讲,主要关心的是磨损。磨损则与通过水轮机的每立方米水中所含泥沙的数量,即与含沙量有关,而不取决于通过水轮机泥沙的总量。例如葛洲坝二江水轮机每年每台机过机泥沙总量约为 1 500 万 t(三峡水库蓄水前),而位于引黄灌渠上的七里营水电站,每台水轮机的年过机沙量只有 2 万 t,如按过机泥沙的总量来评价,则葛洲坝水轮机的磨损似乎要比七里营大几百倍(七里营水轮机运行 3 年叶片失重即达原重量的 1/3),因此用过机泥沙的总沙量来评价水轮机的磨损容易造成一种错觉。如果磨损与水轮机过机泥沙的总量成正比,那么在水电站的设计中,只要将大机组改成若干台小机组,把水轮机做得尽量小,每台机通过的泥沙数量就会成倍地减少,磨损问题似乎也就能够顺利地得到解决了,但事实并非如此。如刘家峡装有 1 台小机,其尺寸只有大机的 1/4,但磨损并不因此比大机轻了 4 倍。

但也有例外,如在以下几种情形下也是可以用过机泥沙的总沙量来判断水轮机磨损的严重程度。第一种情形是对同一台水轮机而言,过机泥沙总量大的年份的磨损将大于过机泥沙总量少的年份;第二种情形是同一电站同样型号的机组,过机泥沙总量大的水轮机的磨损必将较重;第三种情况是不同电站装有同样型号、同样大小的水轮机,泥沙与运行条件又相似或相近,则过机泥沙总量多的将比少的磨损要重等。这些情形都属于水轮机(型号)相同,尺寸大小相同的情形。不属于上述情况的,单凭泥沙的总量就有可能起误导作用。

还有一种情形不是为了研究水轮机的磨损。如在分析水库排沙的途径时,要了解有多少泥沙是通过水轮机,有多少是通过溢洪设施下泄。

需要说明的是,我们在这里并不是反对给出过机泥沙的总沙量,但对过机泥沙的研究而言,首先要关心的是过机泥沙的含沙量。如在此基础上,同时给出过机泥沙的总量也是有益的,但不能只给出过机泥沙总量,而不给出含沙量,或者以泥沙总量代替含沙量。那样的话不仅不便于分析和评价水轮机的磨损,反有可能引起误解和起误导作用。

(二) 平均含沙量

河流泥沙是随时间不断变化的,因此常用某一时段的平均值来表示。对含沙量来说,有多年平均、年平均、汛期平均、月平均、日平均以及某一时段的平均值等。目前水电站设计中的水文泥沙资料中所给出的含沙量往往以多年平均和年平均值为多。

必须注意的是,过机泥沙的年平均含沙量与河流水库泥沙的年平均含沙量,两者不仅在数量上是不同的,在统计方法上也是有很大区别的。

(1)河流水库泥沙的年平均值是以全年,即以 8 760 h 统计得出的。而水轮机的过机泥沙的年平均值只能按机组在一年内实际运行时间统计分析得出,即小于 8 760 h。

(2)河流水库的年平均含沙量是以整个河道作为单位进行统计分析的,因此就整个水电枢纽或水电站来说只有一个值,是一个单一的值。而水轮机的年平均过机含沙量由于每台机的运行方式与年运行小时数不同,每台水轮机是不同的。有多少台水轮机,就有多少个年平均含沙量。

(3)即使 2 台机的运行方式与运行时间完全相同,但过机含沙量也可能有差别,甚至差

别较大。这是由于不同机组进水口位置与引水方式等有可能不同,防排沙的设施也可能不同(例如有的机组进水口下设有排沙底孔等),又如位于河流弯道后的不同两岸侧,从而导致进入不同机组泥沙的浓度与颗粒组成也有所不同。如葛洲坝大江的过机泥沙就要比二江粗而多,导致磨损大好几倍^[2-3]。

(4)在考察与分析某台水轮机的磨损时,应取该台机本身的过机泥沙资料来进行分析。但实用上常常因缺乏该台机过机泥沙的资料,需要借用其他机组的过机泥沙资料来加以分析时,就需要注意两者条件的差异。例如设有A、B两台机,机组的引水条件与瞬间过机含沙量完全相同。汛期因水多,2台机都满发运行,但非汛期A机持续运行,年运行小时数达6 000 h;B机因稳定性等原因运行时间少,因此年运行小时数只有4 000 h。我国河流泥沙大多集中在汛期,2台机的磨损主要都发生在汛期,因此2台机的磨损程度应该是差不多的。如计算过机含沙量,则B机的年平均过机含沙量将为A机的1.5倍。如A机缺乏泥沙资料借用B机过机泥沙资料,很容易造成A机的磨损为B机的1.5倍的假象,因此每台机的磨损应该取每台机实测的过机含沙量的平均值来计算。如果缺乏本机的资料需要借用其它机组的过机含沙量时,则需要对得出平均含沙量的条件进行分析,在使用这些数值时加以修正。

由于我国河流泥沙的特点,因此在考察分析水轮机的磨损时,应当主要关注水轮机在汛期运行的情况。在水电站设计阶段,由于缺乏每台机具体的运行资料,不好估算具体的运行小时数,可以以汛期满发来估算。对评估水轮机磨损来说,统计汛期含沙量与汛期运行时数有时比用年平均含沙量能更好地说明问题,因此对有泥沙的水电站,最好能统计计算出汛期的平均含沙量。

(三) 泥沙的代表性粒径

河流中所含的泥沙是由不同粒径组成的,通常用粒径级配表或曲线表示。为了叙述方便又常取粒径曲线上某一百分比成分的粒径来表示,如 d_{50} 、 d_{90} 、 d_m 、 d_{max} 等。为了全面表征泥沙的粒径组成,很多资料往往同时给出其中几个粒径值,但有时也往往仅取中值粒径 d_{50} 一个值作为代表。对于河流水库泥沙这是可以的,但对于过机泥沙仅仅给出中值粒径 d_{50} 一个值有时会造成一些误判。因为从磨损角度来看, d_{50} 有时并不能完全代表泥沙粒径的磨损强度。下面试举例说明:设有3组泥沙,其粒径组成如表1所示,级配曲线见图1。

表1 各种粒径所占百分比表

沙样	0.01 mm	0.01 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.1 mm	0.1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.5 mm	d_{max} (mm)	d_{50} (mm)	d_m (mm)	J/J_A
A	27%	44%	19%	7%	3%	0.40	0.030	0.049	1.00
B	10%	75%	14%	1%	0	0.15	0.030	0.034	0.69
C	32%	44%	17%	7%	0	0.25	0.025	0.036	0.73

3组沙样中A与B的中值粒径 d_{50} 相等,均为0.03 mm,C组沙样的中值粒径 d_{50} 较小,为0.025 mm。那么是否A、B两组泥沙的磨损能力都大于C组呢?由于每组泥沙都是由多种粒径组成的,所以每组砂样的磨损强度 J 应该是所含各种粒径磨损能力的总和。可由下式近似算出:

$$J = K \sum (K_d K S_i)$$

式中, S_i 为 i 组粒径的沙量; K_d 为不同粒径的磨损强度; K 为该组粒径的硬颗粒成分。假设 A 、 B 、 C 三组砂样的所有粒径的硬颗粒比例相同, 系数 K 相同(有大量试验结果表明, 当泥沙颗粒小于 $0.03 \sim 0.04 \text{ mm}$ 时, 粒径的磨损能力近似与粒径的大小成正比)。以 A 组砂样的 J 值为 1, 可得 3 组泥沙磨损强度的相对比值 J/J_A (以 A 为 1), 见表 1。

从 3 组砂样磨损强度的比值可见, $A > C > B$ 。这说明:

(1) A 、 B 两组泥沙的中值粒径 d_{50} 相同, 但 B 组砂样的磨损能力却小于 A , 仅为 A 组砂样的 0.69。

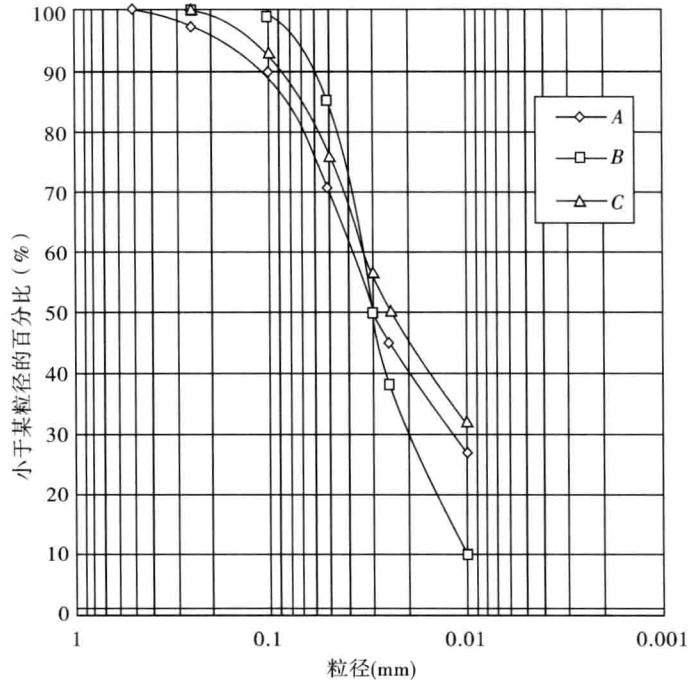


图 1 3 组泥沙粒径级配图

(2) B 组砂样的中值粒径 d_{50} 大于 C 组, 但磨损能力却比 C 组要小。

因此, 不宜简单地认为 d_{50} 值大的磨损强度就一定大, 这是因为中值粒径 d_{50} 主要代表了有 50% 泥沙的粒径比它大, 50% 的粒径比它小。但如在大于 d_{50} 的泥沙中, 粗颗粒相对较多, 则磨损能力将较大。因此, 如要准确评估泥沙的磨损能力, 不仅要看 d_{50} 的大小, 还需要关注整个泥沙的组成, 特别是粗颗粒的占有成分, 所以, 在给出泥沙的粒径时, 最好能给出整组泥沙的粒径级配曲线。如为了叙述方便或简练, 给出一个粒径值, 则除了 d_{50} 外, 最好能再添加另一个泥沙粒径值, 如平均粒径 d_m 或 d_{90} 等。一般来说, 用平均粒径 d_m 比中值粒径 d_{50} 更接近于粒径与磨损的关系(当粒径的磨损强度与粒径的大小大致成正比时)。

(四) 硬度

对水轮机磨损来说, 泥沙的硬颗粒含量是至关重要的数据, 因此必须对泥沙的矿物成分进行测定。对于河道水库泥沙来说, 硬颗粒含量所起的作用可能不像对水轮机磨损影响那么大, 因此在水文泥沙资料中, 泥沙矿物成分的分析数据往往较少, 有时只有一次。从水轮机磨损角度来看, 这样的分析次数显得少了一些。

(1)对泥沙矿物成分与粒径的测定,最好能按汛期与非汛期分别进行测定分析,分析次数应多几次。因为泥沙的矿物成分或硬颗粒含量虽然不像其他水文资料变化那么大,但往往也是有变化的。如果仅测量一次,一旦测量有误,就会对泥沙磨损能力的评价造成很大影响。

(2)有的资料所给出的泥沙矿物成分为平均值,这是不妥的。泥沙的矿物成分或硬颗粒含量应按不同粒径分别测定与给出,因为大小颗粒的硬颗粒含量有可能是不同的,有时差别还很大,从而对水轮机的磨损的评估造成误差。下面举某一电站实测取样分析的结果为例^[1]来说明(见表2)。

表2 修建电站前后粒径变化表

粒径(mm)	<0.01	0.01~0.025	0.025~0.05	>0.05	d_{50}	平均硬度
硬颗粒含量(%)	29.8	40.4	49.3	60.2	—	—
建站前不同粒径含量(%)	30.5	19.2	26.3	24.0	0.025	44
建站后10年平均不同粒径含量(%)	62.2	36.3	1.5	0	0.0079	34

注:泥沙硬度值为2005年从现场悬移质取样分析结果,表中平均硬度是假定修建电站前后粒径与硬度关系不变计算得出的。

从实测分析结果来看,该电站粗细颗粒所含的硬颗粒成分相差较大。粗颗粒所含的硬颗粒成分约为细颗粒的2倍。修建电站后大部分粗颗粒将沉淀在水库中,故过机泥沙的粒径小了许多。如泥沙的硬颗粒成分按原有河流泥沙的平均硬度来估算,则因粗颗粒的减少而将使其结果偏大。当然如各种粒径的泥沙的硬颗粒比例相差不大时,则取平均硬度还是可以的。

四、结 语

水轮机泥沙磨损涉及泥沙和水机两个专业,故应加强各个专业间的相互沟通与了解。

现有泥沙问题的规程、规范十分众多,至少已有十几种以上,有些正在继续编制中。因此呼吁从速补充编制有关过机泥沙专项的规程规范,来指导电站设计与电站投入后对过机泥沙应做的一些工作。

由于笔者不是从事泥沙专业的,对泥沙问题的了解必然是一知半解,所以上述一些看法与论述也可能有误,欢迎予以批评指正。笔者的目的是希望引起有关各方对过机泥沙问题的重视与关注,使水轮机磨损的估计能有更好的依据。

参 考 文 献

- 1 余江成,姚啓鹏.溪洛渡水电站泥沙资料调研及沙样分析报告.2006.
- 2 何筱奎,陈德新.黄河泥沙的物质组成.2005.
- 3 彭君山.葛洲坝电站过机泥沙及对水轮机磨蚀的影响.水机磨蚀,1993.

解决含沙水流中水轮机严重破坏的新途径

吴培豪 余江成

(中国水利水电科学研究院)

【摘要】 分析了很多水力机械之所以遭到严重的破坏,常常因为是在磨蚀联合作用区还缺少良好的防护措施之故。文中以三门峡机组的改造为例,利用计算流体动力学(CFD)方法进行水力设计,消除了水轮机转轮中的空化,就可以采用常规的抗磨措施,有效地减轻了水轮机的破坏。

【关键词】 水力机械 抗磨蚀措施 无空化转轮

一、水轮机在含沙水流中遭到严重破坏的状况

我国河流大多含有泥沙,导致大量的水轮机产生了严重的磨损损害,但经过有关部门多年的努力,目前已开发出了多种具有良好抗磨能力的材料和防护措施。在非金属材料方面主要有:环氧砂浆、聚氨酯、超高分子量聚乙烯和橡胶等;在金属材料方面主要有:各种硬质合金、高硬焊条、喷镀、表面硬化工艺以及金属陶瓷等。上述各种材料和表面防护措施经真机的使用表明,都证实了确实具有良好的抗磨能力,因此已在一系列水轮机上得到了推广使用,并取得了良好的效果。虽然如此,仍有大量水轮机采取上述材料或保护措施后仍遭到了严重的损坏,有的甚至很快报废必须更换。这是什么原因呢?

深入了解一下那些遭到严重破坏的水轮机后就可发现,不是上述已有的一些抗磨材料与抗磨措施没有起到良好的保护作用,而是因为含沙水流中运行的水轮机,不仅存在着磨损,还往往同时存在着空蚀。在磨蚀联合作用区,上述那些具有良好抗磨性能的材料或防护措施,大多数难以同时抵抗住磨损与空蚀的联合作用之故。

以非金属材料为例:如三门峡水轮机,水轮机投入前在通流部件表面都涂敷了一层环氧金刚砂涂层保护。运行表明,在多年平均含沙量高达 38 kg/m^3 的条件下,导水机构与转轮叶片正面等以磨损为主的部位,经多年运行环氧金刚砂涂层仍基本保持完好,如叶片正面等只在边缘区略有脱落(见图1,叶片正面环氧涂层大部分完好,只在头部、外缘边及靠近出水边处有少量脱落)。但在易发生空化的叶片背面,环氧涂层在清水中运行不久就发现有局部脱落,而在浑水中运行不久后,背面95%以上面积都发生了脱落,使母材遭受到了严重的损害(见图2,叶片背面环氧大部分脱落,仅在内缘靠出水边处局部有少量残存。头部迎水面呈锯齿状。叶片表面堆焊的不锈钢出现大面积鱼鳞状深坑,而进水边后有一个三角区以及叶片外缘宽300~400 mm范围内的不锈钢堆焊层已被穿透,最深达25 mm)。转轮室上下环所涂的环氧涂层也基本保持完好,但中环的涂层则全部发生脱落,导致了严重的侵蚀(见图3,转轮室上下环的环氧涂层仍保持完好,中环则全部脱落。露出母材不锈钢出现大

量沟槽和深坑,深 5~8 mm,最深达 15 mm。因大面积补焊,出现了纵向裂缝)。类似情况也发生在其它一些轴流式水轮机上,如青铜峡、葛洲坝等。在这些水轮机上,叶片正面采用环氧金刚砂等涂层也都得到了很好的保护,但背面的环氧涂层则发现有大面积的脱落。采用聚氨酯涂层的结果也与环氧大致相似,不过聚氨酯涂层的破坏主要表现为成片撕脱而非成块脱落。上述失败不仅发生在非金属护面中,在金属护面中,用喷镀方法作为护面的方法在空蚀区往往也发生类似的脱落与破坏。



图 1 叶片正面的破坏



图 2 叶片背面的破坏



图 3 转轮室的破坏

二、各种保护措施失败原因的分析

从上述这些表面防护措施遭到严重破坏的特点可以看出,在既有磨损又有空蚀的部位,各种防护材料或防护措施不仅需要有良好的抗磨能力,还必须具有良好的抗空蚀能力以及和与母材有牢固的结合能力。日本的山田光洋等曾对 3 种金属粉末喷镀方法的使用结果进行过比较试验,见表 1。

表 1

三种喷镀方法比较表

喷镀方法	镀膜材料	黏结力(MPa)	实际电站水轮机使用结果
电弧喷镀	18-8、15Cr、13Cr、铝、青铜等	30~70	抗腐蚀有较好的效果
等离子喷镀	自熔性合金、合金陶瓷	70~140	空蚀区镀膜被剥离,泥沙磨损严重的部位有磨损,但比母材抗磨效果好
重熔喷镀(喷焊)	自熔性合金、Ni-B-Si、Ni-Cr类、Co-Cr-W类等	300~500	抗腐蚀有效;空蚀区有小麻点,能控制空蚀发展;抗磨好,磨损轻微

从山田光洋等的试验可以看出,各种喷镀方法中,电弧喷镀和等离子喷镀都在空蚀区发生脱落,只有喷焊能在空蚀区不发生剥离。这说明了在水轮机的磨蚀区要求各种护面比在以磨损为主的区域有更高结合强度的要求。一般的喷镀方法与母材的结合基本上只能达到机械结合的强度,还不足以满足不被剥离的要求。只有喷焊通过重熔与母材溶为一体,达到了冶金结合的强度。所以在空化和空蚀区,除非本身遭到破坏,但不会发生成块或成层剥离的现象。对各种非金属涂层而言,与母材的结合基本上也都只能达到机械结合的强度,所以在空化与空蚀区就很易剥落了。

是否可以不用表面防护层的办法,直接选用既耐磨损又耐空蚀的材料制作水轮机,不就可以避免磨蚀区护面脱落的问题了吗?这样的材料是有的。让我们对制造水轮机的材料进行一下回顾:早年的水轮机大多采用20SiMn或碳钢制作,它们的耐空蚀、磨损能力都较差(铸铁更差),所以在含沙水流中往往迅速遭到破坏。具有良好的抗空蚀能力的是不锈钢,如1Cr18Ni9Ti(简称18-8)等。但18-8虽有良好的抗空蚀能力,但它属于奥氏体不锈钢,硬度不够高,故当泥沙稍多或磨损强度较大时仍难以很好地抗住磨损。目前水轮机大多采用硬度、强度都相对较高的13Cr系列的马氏体不锈钢制造,从而使大量水轮机的空蚀与破坏都得到了很大的减轻。但在磨损强度较高(如水头较高、泥沙较多、颗粒较粗或速度较高等)的场合,13Cr等马氏体不锈钢也仍不能很好地抗住磨损。如上述的三门峡、葛洲坝、青铜峡等的转轮都曾采用13Cr马氏体不锈钢制造,但仍遭到了严重的磨损。一些高水头水轮机的导水机构,如渔子溪、南桠河等也是如此。这是因为马氏体不锈钢的硬度虽比18-8等奥氏体不锈钢要高,但一般也只能达到300左右,与泥沙中石英的硬度(可达800~1000)相比,两者的差距还是较大的。所以在磨损强度较低(如水头与速度较低,泥沙数量较少、较细等)的场合,13Cr等马氏体不锈钢在抗磨、抗蚀和抗磨蚀等方面常常能表现出良好的能力,但在磨损或磨蚀强度较高的场合,仍不能很好地满足抗磨与抗磨蚀的要求。

那么能否设法选用比13Cr等硬度更高抗磨蚀性能更好的钢种来制作水轮机呢?这样的钢种也有,但不是所有的钢种都是适合于制造水轮机。作为制造水轮机的材料,不仅需要有良好的抗磨和抗蚀性能,作为结构材料,首先还必须满足水轮机所需的各项机械性能与加工制造的要求。一般说来,金属的硬度愈高,抗磨性也愈好,但加工的难度也随之增大,此外硬度高的材料脆性往往增大,韧性降低。除此之外,还要考虑可焊性与价格等,所以综合起来看,目前还没有找到一种能比13Cr等不锈钢更好的更适合于满足以上各种要求的钢种材

料。所以,目前在高强度磨损或磨蚀的场合,所采取的解决办法大多是在母材上涂覆一层表面防护层。但如上所述,对于纯磨损区,各种抗磨性能良好的涂层大多都能有效地抗住磨损,但对于磨蚀联合作用区则目前还没有找到一种既抗磨又抗蚀的有效护面措施。

从结合强度来看,在各种护面措施中,只有堆焊和喷焊能满足与母材高强度结合的要求。那么是否可以在磨蚀区采用喷焊或堆焊的方法来予以保护呢?已有的经验表明,要使堆焊与喷焊层能同时很好地抗磨与抗蚀,则堆焊与喷焊层必须具有很高的硬度,但硬度愈高,则无法打磨,且容易产生裂纹。此外,大面积的堆焊与喷焊将引起叶片的热变形,因此对中小型水轮机来说,不失为一种可以采用的措施,但对于较大尺寸的水轮机是不允许发生大的变形的。在实用中有时常常被迫采用硬度相对较低的焊条或合金粉末来做堆焊或喷焊层,但这样一来,又将降低护面层的抗磨蚀能力。

因此到目前为止,对含沙水流中水轮机的防护之所以困难,不是纯磨损区或纯空蚀区的防护问题,而是对磨蚀联合作用区尚缺乏一种良好的防护方法或措施。

三、问题的转机

磨蚀区的难以防护是因为该区不但存在着磨损,同时存在着空蚀之故。水轮机的空化与空蚀多年来一直被认为是水力机械的癌症,是无法避免的难题,但随着流体计算技术的发展,加上经验的积累,使水轮机的水力设计产生了极大的变化。大致 20 世纪 90 年代以来,由于计算流体动力学(CFD)方法的发展,在水轮机流道与叶型的设计方面产生了一个质的飞跃。

目前在设计吸出高度下,基本上已能做到流道内不产生空化,没有了空化,也就不会发生空蚀以及磨蚀联合作用的危害了。这样过去认为易于产生空化与空蚀的磨蚀部位,就变成以磨损为主的部位了,从而就可以与其他以磨损为主的部位一样,只要采用具有良好抗磨能力的保护措施就能得到有效的保护了。下面举三门峡 1[#]机改造的实例来加以说明。

三门峡是国内泥沙最多的水电站,共装有 5 台 ZZ010-LJ-600 轴流转桨式水轮机。1973 年第 1 台机开始投入运行。机组在浑水中运行后,破坏得十分严重,每年每台机效率下降 6%~10% 以上,停机大修时间长达 4~6 个月,检修所用的焊条达 7~8 t 以上。曾试用过多种抗磨焊条和聚氨酯、尼龙等多种非金属材料保护,但在叶片背面与转轮室中环等磨蚀区始终尚未找到一种良好的防护办法。为此从 1980 年起,汛期停止发电。1989—1994 年开展了躲开七下八上泥沙高峰期部分汛期发电的试验,通过大量抗磨蚀防护材料的试验,筛选出 SPHG 合金粉末喷焊和 GB1 焊条对叶片背面外缘区进行防护,虽然破坏仍很严重,但基本上可以满足三年一大修的要求。

1997 年对三门峡 1[#]机进行了改造。改造后的水轮机直径从 6.0 m 增大至 6.1 m,机组出力从 50 MW 增大至 60 MW,转轮室由半球形改为全球形,叶片背面外缘设置了裙边,转轮室间隙控制在 4 mm 之内。水轮机转轮及转轮室都喷镀了碳化钨镀层保护。该水轮机在水科院实验室进行了模型验收试验。试验表明,新转轮的水力设计有了极大的改善,在全部运行范围内未发现叶型空化,只有在少量工况下,叶片外缘靠出口约 1/3 长度范围内有少量间隙空化出现,但从模型观察,空化涡不是很多。

1[#]机于 2000 年底开始投入运行。经汛期浑水运行后检查,转轮叶片正背面喷镀的碳化

钨涂层保持完好,只有裙边和叶片头部外缘有少量冲刷破坏。转轮室也基本完好,但上环进口有一圈似受冲刷,以及接缝处发现有局部冲刷破坏。进行修补后,从2001—2005年汛期(躲开大沙期,汛期平均运行1305h)过机平均含沙量为 $21.5 \sim 37.7 \text{ kg/m}^3$ 的条件下,每年只需对少量的局部破坏进行修补。运行至今已近10年,除定期检查、及时小修外可不需吊出转轮进行大修。

改造后的三门峡1#机的破坏之所以比以前得到大大减轻,主要是解决了长期以来叶片背面等磨蚀区遭到严重破坏的问题。其原因是新设计的转轮叶片成功地消除了叶型空化,转轮室的空化也得到了有效的控制与减轻,从而大大减轻了防护的困难。因此,在多泥沙河流上修建水电站,必须利用流体计算技术,设计无空化转轮,这样就可以大大减轻水轮机的磨蚀。

四、轴流式水轮机的空化类型与改进措施

为了使水轮机达到无空化的要求,首先要对各类水轮机中可能产生哪些空化进行分析,针对空化产生的原因,采取相应的措施,就能达到消除这些空化或使之达到最轻的目的。

下面对轴流式水轮机的空化与空蚀进行一些简要的分析与回顾。

(一)叶型空化

这类空化与空蚀通常发生在叶片背面靠出水边处,也有发生在叶片中部的,产生空化的原因主要与叶型的设计有关,因此必须通过改进流道与叶片的设计来加以解决。为了确保所选用的水轮机确实能做到无空化,应通过模型验收试验来检验。

(二)叶片进口边空化

与叶片头部的形状及工况有关。当水轮机运行的水头范围及负荷变化过大时,往往就难以避免出现进口边空化。进口边空化又可分成两种,即正面进水边空化(易在低水头时出现)与背面进口边空化(易在高水头时出现)。已有的经验表明,正面进口边空化的危害往往不如背面进口边的大;叶片靠外缘区的进口边空化往往又最为严重,这是因为该处的流速较高之故;因此,特别要对背面进口的空化加以注意,应设法加以避免。

(三)间隙空化

主要由叶片与转轮室以及叶片与轮毂体之间的间隙所引起。空化的类型主要属于旋涡型空化。叶片外缘间隙的空化涡将造成叶片外缘端面与转轮室中环的空蚀,转轮室中环的空蚀又主要发生在中环叶片轴线和轴线以下处;此外从间隙流出的空化涡还将造成叶片背面外缘区的空蚀。

叶片内缘与轮毂体之间的间隙空化将造成叶片内缘端面及轮毂体的空蚀。轮毂体上的空蚀通常发生在叶片出水边之后。经验表明,危害较大的是叶片外缘的间隙空化,而叶片内缘的间隙的空化和空蚀一般不太严重,这可能是该处流速较低之故。

间隙空化的强度与通过间隙的流速有关,因此,除要设计合理的叶型减少间隙两侧的压差外,在浑水中运行的水轮机的间隙应比清水有更严格的要求,间隙应尽量小。为了防止间隙中流出的空化涡打击到叶片背面外缘,可在叶片的外缘设置裙边。

(四)局部空化

发生的部位不固定。主要由水力或结构设计、加工以及材质缺陷等造成,常见的如叶片