

含沙水域水轮机过流部件的材料应用及进展

鲍崇高,高义民,邢建东,张国赏,朱金华

(西安交通大学机械工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:介绍含沙水域过流部件的失效形式、使用材料及性能研究、应用状况等,展望未来在选材、性能研究等方面的主要发展方向。层错能低、弹性好、强度高、组织致密、晶粒细微、耐蚀性好,具有足够韧性的亚稳态奥氏体材料是理想的水轮机过流部件使用材料;用清水试验测定空蚀分量等,是研究磨损与腐蚀间的相互促进效应,腐蚀、磨损及空蚀三者之间相互促进作用的基础试验,也是研究力学与化学间相互促进规律的重要试验。

关键词:水轮机;材料选择;过流部件;冲蚀;空蚀

中图分类号:TK730.5

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)06-0014-03

在含沙水域中运行的水电站,其水轮机转轮、叶片、座环、喷嘴、喷针、水斗等不同部位在运行一段时间后,就会出现鱼鳞坑、针孔、麻点、麻面、波纹、蜂窝状等破坏形式,且不同的水域、不同的机型、不同的部位等破坏程度不一样。

黄河泥沙居世界之冠,年平均输沙量16亿t,汛期最大含沙量高达 941 kg/m^3 ,且夹带较多的粗颗粒泥沙(粒径大于 0.05 mm 的泥沙约占25%),上中游刘家峡、盐锅峡、青铜峡、天桥、三门峡等水电站的水轮机不同程度地遭受泥沙磨蚀危害,特别是距小浪底最近的三门峡水电站水轮机泥沙磨蚀极其严重,1980年起被迫采取汛期停机运行方式^[1]。长江水域的葛洲坝、三峡等水电站机组也存在类似问题。因此,如何解决长江、黄河水域水轮机磨蚀问题,成为水电安全经济运行的关键课题。影响水轮机过流部件失效的原因较多^[2~4],如流体的流速、流态、含沙量等,过流部件的机械设计,材料的选择等。本文主要从材料科学与工程研究角度出发,对过流部件的材料选择、工程应用、性能研究及其发展趋势等方面进行讨论。

1 含沙水域水轮机过流部件的失效方式

对水轮机在含沙水流中遭受严重损害的原因,多年来一直存在着一些不同的看法^[5~7]。通过对大量在含沙水流中工作的水轮机进行实地考察发现,水轮机过流部件流道表面的破坏大致有以下几种

形式:

a. 磨损破坏.破坏表面呈大面积的波纹鱼鳞状以及沟槽,内表光滑的坑、槽等。这类破坏外貌是在清水中运行的水轮机上见不到的。造成磨损破坏失效的主要原因有高速含沙水流中的沙粒对过流部件的冲击、沙粒锐利棱角对过流部件的切削、过流部件(金属)表面产生塑性疲劳薄片(沙颗粒不旋转)和微切削(沙颗粒旋转)等。

b. 空蚀破坏.破坏表面出现针孔、麻点、麻面、海绵、蜂窝状。这类破坏的外貌与清水空蚀相似(说明是空蚀而不是磨损),例如常出现在叶片背面等低压区。产生空蚀的原因大致有由水轮机的固有特性来决定的空蚀(如葛洲坝水轮机的叶片)、泥沙对空化起促进作用产生的空蚀(泥沙对空化的促进或抑制作用,目前还有所争议)、流道表面磨损后所形成的不平整而诱发的空化(空蚀),这种空化(空蚀)常称之为二次或次生空化(空蚀)。

c. 磨损与空蚀的共同破坏.破坏外貌同时兼有以上两种形态,例如在大片的波纹、鱼鳞中夹杂出现密集的针孔、麻点等。这类破坏通常也在压力较低的部位观察到。

d. 腐蚀.即使是常规的天然水,对大多数金属材料也会有腐蚀作用。黄河、长江水域水质接近于中性,对金属材料的腐蚀作用也不容忽视。对水轮机而言,主要腐蚀形式是金属材料在水中的腐蚀,属电化学腐蚀。腐蚀结果是在金属表面产生一层较薄的氧

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59831030);国家重点基础研究专项经费资助项目(G19990650)

作者简介:鲍崇高(1966—),男,江苏姜堰人,讲师,博士研究生,主要从事耐磨蚀材料研究。

化膜,形成氧化膜后,腐蚀速度减慢.在某些情况下,还可能产生钝化而起保护作用.腐蚀的速度主要与水中的含氧量、温度、pH 值等因数有关,水中含有的 CO_2 、镁离子、氧化钙等均能促进腐蚀.碳钢比合金钢易腐蚀,是因为碳钢中含有石墨、硫化物、硅化物等较多,易形成阴极电池之故.钢中加入铬等元素后,可降低腐蚀速度,但只有含铬量达 13% 以上的不锈钢,才能形成较稳固、致密的氧化膜,不过在磨损强度较高场合,不锈钢的氧化膜也将迅速遭到破坏.因此在高强度磨蚀场合,不锈钢的优越性并不明显.

2 含沙水域过流部件的使用材料及性能

2.1 含沙水域过流部件的使用材料及应用状况

抗磨蚀材料从总体上来讲应具备韧性强、硬度高、质量均匀、结晶颗粒细、结构致密、拉力强、疲劳极限高的性能,并具有可加工性和可焊性^[2].国内对含沙水域水轮机过流部件的材料使用及研究大致可分为以下几类:

a. 普通材料,如 30 号、35 号、55 号钢等,基体组织主要为铁素体加珠光体.

b. 合金钢材料,如 20SiMn,0Cr18Ni9Ti,1Cr18Ni9Ti,1Cr13 等,基体组织以奥氏体型居多.

c. 国外消化材料,如 0Cr13Ni4Mo,0Cr13Ni5Mo 及 0Cr13Ni6Mo 系列,0Cr-6Ni-15W-Co(日本试验材料)、高铬铸钢(德国 KSB 公司产品)等,基体组织有奥氏体型、奥氏体加铁素体型或马氏体型.

d. 新型高强韧性材料,如 ZGCr-Mn-N、马氏体型沉淀不锈钢(17-4PH),基体组织有奥氏体型、奥氏体加铁素体型或马氏体型.

e. 表面工程材料,如环氧金刚砂涂层(表面刷涂)、司太林合金(堆焊)、SXH52/54 陶瓷(等离子喷涂)、Diaturb/SXH70 合金陶瓷(西安黄河喷涂中心的 HVOF 喷涂、瑞士 ULZER 水电公司技术).

表 1 和表 2 是具代表性的几种水轮机过流部件材料力学性能和化学成分.

抗磨蚀材料的试验研究与应用,经过探索实践,从追求硬度高的 Cr5Cu、价廉的 20SiMn、35 号钢和考虑抗空蚀疲劳为主的不锈钢 0Cr18Ni9Ti 开始,在三门峡、青铜峡等水电厂水轮机上应用,实践中发现

表 1 含沙水域过流部件几种使用材料的力学性能

材 料	σ_s/MPa	σ_t/MPa	α_K /($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)	硬度 /HBS	组织
55 号钢	380	645	60	210	F+P
20SiMn	295	510	50	156	F+P
1Cr18Ni9Ti	210	530	100	149	A
0Cr13Ni5Mo	1110	922	312	363	M

Cr5Cu 的耐磨蚀性能不如环氧金刚砂涂层,0Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢在浑水条件下耐空蚀和泥沙磨损联合作用效果不好,20SiMn 材料是目前过流部件使用中抗磨蚀性能最差的材料,以后在葛洲坝水电站采用马氏体不锈钢 0Cr13Ni4Mo,0Cr13Ni5Mo 及 0Cr13Ni6Mo 系列,并在刘家峡水电厂 4 号机新转轮及其他水电厂水轮机中使用.这一类高强不锈钢作为水轮机转轮结构材料,国际上 20 世纪 70 年代已广泛使用,至今仍视为适用的转轮结构材料,它不仅 Cr、Ni 含量低于 18-8 奥氏体不锈钢,其抗磨蚀性能亦较优越,但对于多沙河流电站过流部件(如上下抗磨板、止漏环、导叶等),其抗磨蚀性能仍嫌不足,且脆性大,可焊性差.后来新研制的材料如马氏体型沉淀不锈钢(17-4PH)、高铬高强度钢(含 Cr 28% 以上)等作为特殊材料已用于严重磨蚀部位,但由于加工工艺较复杂、成本较高等因素,此类材料的广泛应用还有待进一步的真机运行考察.

2.2 电学腐蚀性能研究

电学腐蚀是金属腐蚀的主要破坏形式,是金属与电解质溶液(大多数为水溶液)之间发生了电化学反应,在反应过程中有电流产生,电流越大,腐蚀越严重.在腐蚀中,金属作为阳极释放电子的过程与溶液中氧化剂获得电子的过程是在同一金属表面上进行的.

前已述及,即使是接近于中性的水质,对金属材料的腐蚀作用也不容忽视.水轮机过流部件的主要腐蚀形式是电学腐蚀,从碳钢、低合金钢向不锈钢过渡,材料的耐蚀性明显提高,但各材料之间耐蚀性的相差程度,每种材料在冲刷腐蚀磨损、空蚀过程中的腐蚀失效机制,腐蚀与磨损、空蚀等之间的相互促进效应等在该工况领域研究的很少.当前电学腐蚀研究在理论方面和测试技术(主要是仪器)方面已有了很大进步,除基本的电学动力学研究以外,今后还将在金属的钝性和钝化膜生成与破坏过程的研究

表 2 含沙水域过流部件几种使用材料的化学成分质量分数

材 料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Mo	Cu
55 号钢	0.552	0.32	0.645	0.027	0.124	—	—	—	—	—
20SiMn	0.20	0.60	0.80	0.03	0.02	—	—	—	—	1.10
1Cr18Ni9Ti	0.032	0.50	0.60	0.03	0.02	17.89	9.03	0.95	—	—
0Cr13Ni5Mo	0.033	0.28	0.57	0.03	0.02	13.03	5.20	—	0.72	—

究、力学因素对腐蚀金属电极电学行为影响的研究与测量等方面开展更多的工作。

2.3 冲蚀磨损性能研究

多相流冲刷腐蚀磨损是由气、液、固等组成的多相流引起的,工业背景较为普遍,因过程极为复杂,对其研究的人员还不多,是研究的难点;双相流冲刷腐蚀磨损是最常见的,尤其是液-固双相流冲刷腐蚀磨损是目前研究的焦点。冲蚀磨损是水轮机过流部件在含沙水流的高速冲击下的主要失效形式之一,影响因素较多,包括:①材料因素,如材料本身的化学成分、组织结构、机械性能(尤其是硬度)、表面粗糙度、物化性能、耐蚀性等;②电化学因素,包括腐蚀介质的浓度、温度、pH值,固相颗粒的粒度、硬度、形状等;③力学因素,过流部件的形状、流体的流速、流态等都有很大影响,因为不同的流速、流态会使流体对材料表面产生不同的力学效果^[8]。上述三方面的因素交织在一起,给冲刷腐蚀磨损问题的研究带来很大困难。

多年来,我国水利水电工作者及材料研究者们在此领域做了许多工作,如中国科学院金属研究所(沈阳)王者昌,中国水利水电科学研究院(北京)吴培豪、姚启鹏,全国水机磨蚀试验中心(天津)顾四行、王志高,水利部黄河水利委员会水利科学研究院(郑州)何筱奎等对该失效形式的产生原因、影响因素等进行了不少研究;目前中科院腐蚀与防护研究所与西安交通大学正在联合针对亚稳材料、高强韧性不锈钢(双相及含 θ 相)、超弹性钢、表面工程材料、耐磨高铬铸铁材料等进行各种变量参数下的抗腐蚀性能、冲蚀磨损性能、腐蚀疲劳性能研究,并从微观上寻找磨损与空蚀、腐蚀之间的相互作用规律。

2.4 空蚀性能试验

水轮机在水流的高速冲击下,叶片背面产生压力不均匀分布,低压区易产生负压空泡,在空泡内外压力差达到一定值时,空泡发生爆炸(有时也称为溃灭),爆炸坑数量的增加和无数次的覆盖,便形成了本文中所描述的形貌特征。清水河流运行下水轮机叶片产生的空蚀最能表现其失效特征,混水水流运行产生的空蚀还伴有磨损、腐蚀三者之间的相互促进作用。

材料的空蚀性能研究设备很重要,全国水机磨蚀试验中心(天津)的试验机是水电站机组运行的小型化,新型材料的探索性试验对指导实际运行材料的更新较有说服力,中国水利水电科学研究院、水利部黄河水利委员会水利科学研究院、西安交通大学等研究

单位的空蚀性能试验机也能较好地反映空蚀形成机理。国外学者在此方面的研究,《水机磨蚀》杂志出版的论文集也介绍了不少。空蚀、磨损和腐蚀间相互促进作用比较复杂,目前发表的研究报告还很少。

3 研究展望

a. 材料选择方面,材料的化学成分、组织结构、机械性能(如硬度、韧性、强度等)、物化性能、耐蚀性等都影响材料在高速水流(清水、混水)冲击下的抗磨蚀、空蚀性能,实际工况运行的检验和试验研究表明,层错能低、弹性好、强度高、组织致密、晶粒细微、耐蚀性好,具有足够韧性的亚稳态奥氏体材料是理想的水轮机过流部件使用材料。

b. 性能研究方面,腐蚀、磨损和空蚀的各自形成机理目前已有初步认识,但普遍存在腐蚀可以不考虑的误区,用较精确的电化学腐蚀测试仪器测定纯腐蚀分量、磨损对腐蚀的促进分量;用阴极保护方法测定冲刷磨损分量;用清水试验测定空蚀分量等,是研究腐蚀与磨损、磨损与空蚀以及三者之间的相互促进作用的基础试验,也是研究力学与化学间相互促进规律的重要试验。通过对不同时间的试验(随着试验时间的增加),借助于SEM、TEM、x-射线衍射技术等先进分析仪器,从微观上探索材料的层错能,变形层内位错密度、微应力、显微硬度以及晶粒碎化程度等材料性能的影响,可以对材料的动态失效过程进行形象地描述,对指导选材和丰富研究机理具有重要意义。

参考文献:

- [1] 霍兵.小浪底水电站水轮发电机组研究综述[J].水机磨蚀,1995(论文集):28~32.
- [2] 姚启鹏.泥沙粒径级配材料磨损影响的试验研究[J].水力发电学报,1997(1):26~27.
- [3] 王志高,顾四行.中国多泥沙河流水利机械的磨蚀和防治[J].水机磨蚀,1998(论文集):5~11.
- [4] 任静,常近时.叶片式水利机械转轮中空化流动分析的新进展[J].水机磨蚀,1995(论文集):1~5.
- [5] 吴培豪.对含沙水流水轮机破坏的看法与对策[J].水机磨蚀,1998(论文集):63~67.
- [6] 王立言.闲话鱼鳞坑[J].水机磨蚀,1998(论文集):106~119.
- [7] 陈希文.黄河沿岸高扬程水泵磨蚀现状及技术改造[J].水机磨蚀,1996(论文集):1~5.
- [8] 郑玉贵,姚治铭,柯伟.冲刷腐蚀研究近况[J].材料科学与工程,1998,10(3):21~26.

(收稿日期:2001-02-19 编辑:熊水斌)