

# 水轮机过流部件材料的冲蚀磨损腐蚀及其交互作用

鲍崇高, 高义民, 邢建东

(西安交通大学材料科学与工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 通过对含沙水域水电站水轮机过流部件的4种典型材料(55钢、20SiMn、1Cr18Ni9Ti和0Cr13Ni5Mo)在冲蚀磨损过程中的电化学腐蚀及冲蚀磨损性能研究, 区分出纯磨损、纯腐蚀、磨损对腐蚀的促进分量及腐蚀对磨损的促进分量在材料失效过程中各自所占的比例, 考查了试验材料的冲蚀磨损特性以及磨损与腐蚀间的交互作用, 分析了失效机制. 结果表明: 材料的冲蚀磨损质量损失率随冲蚀速度和浆料含沙量的增加而增大; 冲蚀角在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围内变化时, 冲蚀磨损质量损失率随冲蚀角增大而增大, 当冲蚀角超过 $45^{\circ}$ 后, 质量损失率随冲蚀角增大而减小; 在多泥沙冲蚀磨损条件下, 材料纯磨损的质量损失占总质量损失的62%~92%, 是材料破坏的主要方式, 腐蚀是次要的; 磨损对腐蚀的促进作用随冲蚀强度的增大而加强, 其对材料流失的作用不可忽视.

**关键词:** 水轮机; 冲蚀磨损; 腐蚀; 交互作用

**中图分类号:** TG174.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0066-05

## Interaction Between Erosive-Wear and Corrosion of Alloy Materials for Hydroturbine in Hydroelectric Station

BAO Chonggao, GAO Yimin, XING Jiandong

(School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Four conventional types of steels, i. e. 55, 20SiMn, 1Gr18Ni9Ti, and 0Cr13Ni5Mo, used in slurry water regions were systematically investigated under different serving conditions to discover the erosion material loss process. And the interaction between corrosion and abrasion was quantitatively analyzed with advanced electro-chemical measurement apparatus. The results show that the erosion rates of the tested materials increase with the increasing sand amount in water or with the increasing erosion speed. In high mud and slurry content circumstances, net abrasion amount accounts about 62%-92% of total weight loss. And the abrasion is the main wear mode, while corrosion is minor. The corrosion enhancement due to abrasion increases with the increasing erosion intensity, and such enhancement on the material loss cannot be neglected.

**Keywords:** hydroturbine; erosion-wear; corrosion; synergistic effect

含沙水域水电站的过流部件既承受较强烈的冲蚀磨损和腐蚀, 又承受空蚀破坏, 更有彼此间的交互作用<sup>[1-3]</sup>, 以及冲刷、腐蚀的双重促进作用<sup>[4-6]</sup>, 这些都加速了材料的破坏, 从而造成大量的损耗. 我国是水轮机泥沙磨损最突出和最严重的国家. 统计数据表明: 黄河泥沙含量居世界之冠, 年平均输沙量16亿t, 汛期河水最大含沙量高达 $941\text{ kg/m}^3$ , 过机含沙量

达 $40\sim 50\text{ kg/m}^3$ , 且夹带较多的粗颗粒泥沙(粒径大于 $0.05\text{ mm}$ 的泥沙约占泥沙总质量的25%)<sup>[7]</sup>; 全国大型水电站出现中等以上磨损程度危害的机组容量占大型水电站总容量的29.7%, 运行效率下降约1.5%~6%; 中小型水电站水轮机因受磨损腐蚀, 效率下降达3%~10%; 黄河干流大中型水电站水轮机以磨损为主的装机容量占总容量的63.8%<sup>[8-9]</sup>.

在高含沙水域中运行的水电站水轮机种类主要有混流式、轴流转浆式、灯泡贯流式、轴伸贯流式、双向灯泡贯流式、冲击水斗式等,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,且不同水域、不同机型、不同部位的破坏程度不一样. 由于长期以来缺少对含沙水域水轮机过流部件冲蚀磨损机理及抗磨蚀材料的系统性研究,以致于上述诸多过流部件的选材不合理,使用寿命缩短,造成了巨大的直接和间接经济损失<sup>[10-11]</sup>. 对于泥沙磨损方面的研究工作,国内主要还是针对某一材料在某一特定条件下进行性能研究,无统一的研究设备和测试标准,或者侧重于现场失效分析,材料选择经常以应用效果为指导思想,没有对典型的应用材料作系统性的试验研究和失效机理分析,材料的筛选缺乏依据,至今水轮机过流部件材料仍难以满足含沙水域水轮机过流部件的使用要求<sup>[12-13]</sup>. 为此,针对含沙水域水电站过流部件选用的合金材料,定量研究并区分磨损、腐蚀及其相互促进作用(交互作用)在材料冲蚀磨损失效过程中各占的比例,对于材料的优化设计具有重要的理论意义和工程应用价值.

本研究工作针对我国长江、黄河流域水电站出现的材料失效问题,选择水轮机用的典型应用材料碳素钢、低合金钢、不锈钢等进行模拟工况下的抗冲蚀磨损、电化学腐蚀等性能研究,探索一定试验条件下的材料失效特征,区分出试验材料在失效过程中纯磨损、纯腐蚀、磨损对腐蚀的促进分量、腐蚀对磨损的促进分量在材料失效过程中各占的比例,以确

定不同的试验材料在冲蚀磨损过程中是以磨损失效为主还是以腐蚀失效为主,从而为高含沙水流条件下的材料选择提供理论依据.

1 试验材料

从 1960 年代初至今,我国不同水域使用的具有代表性的水轮机过流部件材料有普通碳素钢(如 35 钢、45 钢、55 钢)、低合金钢(如 20SiMn、Cr5Cu)、奥氏体不锈钢(如 0Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9Ti)和马氏体不锈钢(如 0Cr13Ni4Mo、0Cr13Ni5Mo、0Cr13 - Ni6Mo)<sup>[14-17]</sup> 等. 本试验选用 55 钢、20SiMn、1Cr18Ni9Ti 和 0Cr13Ni5Mo 作为试验材料,其化学成分及性能见表 1 和表 2.

2 电化学腐蚀试验与极化曲线

电化学腐蚀是金属腐蚀的主要破坏形式. 在电化学腐蚀过程中,金属与电解质溶液(大多数为水溶液)之间发生电化学反应,并伴有电流产生,电流越大腐蚀越严重,金属作为阳极释放电子与溶液中氧化剂获得电子的过程在同一金属表面上进行. 极化曲线是揭示金属材料腐蚀机理和探讨控制腐蚀措施的基本方法. 塔费尔(Tafel)外延斜率法(也称为直线外推法或塔费尔法)是通过极化曲线上线性关系较好的直线外推与腐蚀电位的交点,从而求得腐蚀电流密度,适用于动态电化学极化测量,腐蚀率  $\Delta W_c$  可通过下式<sup>[18]</sup>计算

$$\Delta W_c = 0.373 \frac{A}{n} i_{corr}$$

(1)

表 1 试验材料的化学成分

| 材料         | $w/\%$ |      |      |      |      |       |      |      |      |      |
|------------|--------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
|            | C      | Si   | Mn   | P    | S    | Cr    | Ni   | Ti   | Mo   | Cu   |
| 55 钢       | 0.53   | 0.32 | 0.65 | 0.03 | 0.12 | —     | —    | —    | —    | —    |
| 20SiMn     | 0.21   | 0.60 | 0.81 | 0.02 | 0.10 | —     | —    | —    | —    | 1.10 |
| 1Cr18Ni9Ti | 0.07   | 0.54 | 1.36 | 0.02 | 0.01 | 17.50 | 9.84 | 0.74 | —    | —    |
| 0Cr13Ni5Mo | 0.03   | 0.28 | 0.53 | 0.03 | 0.01 | 13.10 | 5.20 | —    | 0.70 | —    |

表 2 试验材料的力学性能

| 材料         | $\sigma_s/\text{MPa}$ | $\sigma_b/\text{MPa}$ | $a_K/\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ | 硬度 HB | 显微组织 |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------|------|
| 55 钢       | 380                   | 645                   | 60                                  | 210   | F+P  |
| 20SiMn     | 295                   | 510                   | 50                                  | 156   | F+P  |
| 1Cr18Ni9Ti | 210                   | 530                   | 100                                 | 149   | A    |
| 0Cr13Ni5Mo | 1 110                 | 922                   | 82                                  | 363   | M    |

式中: $\Delta W_c$  为腐蚀率( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ); $i_{\text{corr}}$  为腐蚀电流密度( $10^{-3} \text{A}/\text{cm}^2$ ); $A$  为金属的相对原子质量; $n$  为离子价数.

电化学测试装置主要由腐蚀介质、三电极(工作电极、参比电极和辅助电极)、PS-168 型电化学微机控制测量系统、计算机和打印机组成<sup>[18]</sup>. 工作电极(试样电极)由铜柱、弹簧、导线、铜套和碳刷引出;参比电极经 6 个均布的鲁金毛细管盐桥由导线引出. 试样盘一次可装 4 个平行试样,每次可测试其中 1 个试样的电化学行为. 将三电极接到 PS-168 型电化学微机控制测量系统和计算机上,实现对试样静、动态电化学行为的自动测试、数据采集和处理. 试验采用恒电位法测试材料的电化学行为. 静态电化学腐蚀测试的参数选择为:扫描电压  $-900 \sim 900 \text{ mV}$ ;扫描速度  $1.0 \text{ mV/s}$ ;A/D 采样周期  $2\,000 \text{ ms}$ . 参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为试样.

图 1 是 4 种试验材料在中性水介质中的电化学极化曲线,可见在中性介质中,试验材料的阳极极化曲线都没有出现钝化区,但是 55 钢和 20SiMn 的阳极极化区极化电流明显高于 1Cr18Ni9Ti 和 0Cr13Ni5Mo 的极化电流(极化电流与纯腐蚀量成正比). 图 2 是试验材料在强酸溶液( $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ )中

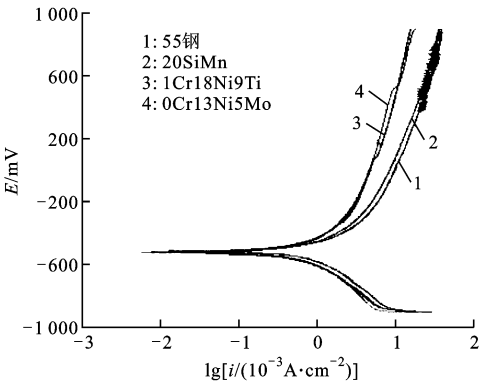


图 1 试验材料在中性水介质中的电化学腐蚀极化曲线

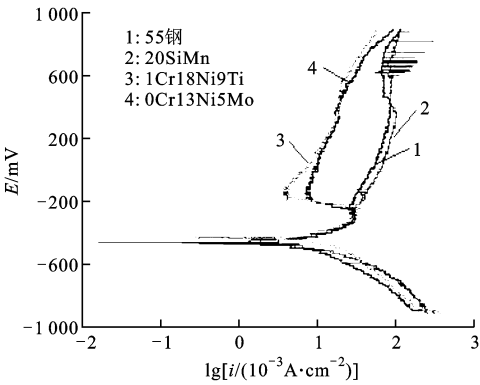


图 2 试验材料在 HCl 溶液中的电化学腐蚀极化曲线

的电化学极化曲线,其中 1Cr18Ni9Ti 和 0Cr13Ni5Mo 的阳极极化曲线有明显的钝化区,这主要是因为材料含有较多的 Cr、Ni、Mo 等合金,在材料表面形成了  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NiO}$  等致密且抗蚀性好的氧化膜所致,而 55 钢和 20SiMn 因表面无致密的氧化膜保护,其阳极极化区的极化电流明显大于不锈钢的,因此抗腐蚀性差.

3 冲刷腐蚀磨损试验及各分量的获取

试验所用浆料为自来水+黄河沙,黄河沙的颗粒级配及矿物质组成如表 3、表 4 所示. 试样为  $\varnothing(14.5 \pm 0.05) \text{ mm} \times (14 \pm 0.05) \text{ mm}$  的圆柱,侧面有 6 mm 宽的长方形加工面(磨光至表面粗糙度为  $0.6 \mu\text{m}$ )作为试验时的冲刷磨损面. 试验过程中试样用  $0.1 \text{ mg}$  的感量光电分析天平称量.

表 3 黄河天然沙颗粒级配

| 最大粒径/<br>mm | 0.005 | 0.010 | 0.026 | 0.032 | 0.050 | 0.062 | 0.100 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 体积分数/<br>%  | 5     | 9     | 47    | 61    | 84    | 92    | 100   |

表 4 黄河天然沙的矿物质组成

| 粒径/mm              | 体积分数/% |    |    |
|--------------------|--------|----|----|
|                    | 石英     | 长石 | 其他 |
| $< 0.053$          | 63     | 20 | 17 |
| $0.053 \sim 0.076$ | 58     | 23 | 19 |
| $0.076 \sim 0.105$ | 50     | 26 | 24 |
| $> 0.105$          | 55     | 25 | 20 |

用冲蚀磨损前的质量减去冲蚀磨损后的质量,可计算出材料总的冲蚀磨损质量损失(简称总冲蚀磨损率). 试验材料的总冲蚀磨损率  $\Delta W_t$  可定量表示为

$$\Delta W_t = \Delta W'_e + \Delta W'_c =$$
$$(\Delta W_e + \Delta W_{ec}) + (\Delta W_c + \Delta W_{ce}) \quad (2)$$

式中: $\Delta W'_e$  为与磨损有关的质量损失率; $\Delta W'_c$  为与腐蚀有关的质量损失率; $\Delta W_e$  为纯磨损导致的质量损失率(简称磨损率); $\Delta W_{ec}$  为腐蚀对磨损的促进分量; $\Delta W_c$  为纯腐蚀导致的质量损失率(简称腐蚀率); $\Delta W_{ce}$  为磨损对腐蚀的促进分量.  $\Delta W_t$  可以通过质量损失法(俗称失重法)测得; $\Delta W_c$  可以通过质量损失法测得,或通过静态电化学测试系统测量出腐

蚀电流后计算得到; $\Delta W'_e$  可通过动态 PS-168 型电化学微机控制测量系统测量出腐蚀电流,再通过塔费尔外延斜率法换算得到; $\Delta W_e$  可以在电化学阴极保护下用质量损失法测得. PS-168 型电化学微机控制测量系统与 MMG-200 冲刷腐蚀磨损试验机相连,试验装置见文献[19]. 根据式(2)可以求出 2 个促进分量

$$\Delta W_{ec} = \Delta W'_e - \Delta W_e =$$
$$(\Delta W_t - \Delta W'_e) - \Delta W_e \quad (3)$$
$$\Delta W_{ee} = \Delta W'_e - \Delta W_c \quad (4)$$

试验测得 1Cr18Ni9Ti 的电极电位为  $-800$  mV, 0Cr13Ni5Mo 的电极电位为  $-700$  mV, 当实际电位高于上述电极电位时,材料的腐蚀磨损率几乎不随电位变化,表明阴极保护已完全控制了腐蚀过程,材料的流失量是单纯机械磨损的贡献,故分别取  $-800$  mV 和  $-700$  mV 下的质量损失率为这 2 种不锈钢材料单纯由机械磨损引起的材料流失量.

试验机的冲蚀磨损摩擦学系统的工作原理如图 3 所示,当试样盘以图示方向高速旋转(转速为  $n$ )时,位于试样盘侧面的试样冲蚀磨损面(简称磨损面)同时以一定的线速度  $v$  作圆周运动, $n$  与  $v$  的关系为

$$v = n(2\pi R/60) \quad (5)$$

式中: $R$  表示试样磨损面至试样盘中心的距离,对于本次试验, $R=90$  mm. 选择试样线速度  $v$  为  $10$  m/s,由式(5)计算得  $n=942$  r/min.

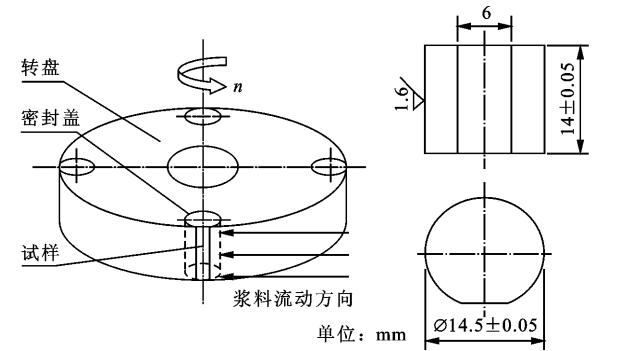


图 3 冲蚀磨损摩擦学系统原理示意图及试样尺寸

4 试验结果及分析

在浆料含沙量为  $60\text{ kg/m}^3$ 、冲蚀角度分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  的试验条件下,进行了不同冲蚀速度下的冲刷腐蚀磨损试验,本文在此仅讨论冲蚀角度为  $0^\circ$  时的情况. 试验材料的磨损率与冲蚀速度的双对数关系曲线如图 4 所示. 由图可知:

①试验材料的磨损率与冲蚀速度的关系为指数关系,且由于消除了腐蚀因素,线性更加明显,反映了冲蚀速度对材料冲蚀磨损率的影响程度;②奥氏体型不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的磨损率最大,55 碳素钢和 20SiMn 低合金钢(显微组织为珠光体+铁素体)的磨损率相近,且低于 1Cr18Ni9Ti 的磨损率,而马氏体不锈钢 0Cr13Ni5Mo 的磨损率最低,反映了材料硬度对抵抗冲蚀磨损的重要性.

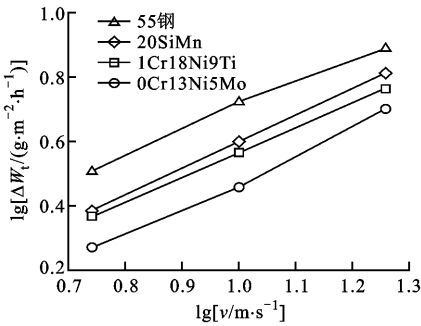


图 4 试验材料磨损率与冲蚀速度的关系曲线

图 5 是试验材料的总冲蚀磨损率及各分量所占比例的示意图. 试验材料的总冲蚀磨损率及其各分量如图 6 所示,表明在不同冲蚀速度下,各种材料的总冲蚀磨损率中:①除表示纯腐蚀的静态腐蚀试验值外,其他量都随冲蚀速度的增加而增加,原因是随冲蚀速度增加,材料表面的冲击能量增加,促使材料流失速度加快;②磨损是主要的,腐蚀是次要的,即与磨损有关的质量损失是材料流失的主要方式,其中纯磨损量所占的比例最大,占总质量损失的  $62\% \sim 92\%$ ,主要原因是含沙中性水的腐蚀性较小,以机械力作用使材料流失(冲刷磨损)为主;③磨损与腐蚀的交互作用不容忽视,55 钢和 20SiMn 的腐蚀严重,腐蚀与磨损的交互作用在各冲蚀速度下均最大,1Cr18Ni9Ti 虽然耐蚀性好,但在各冲蚀速度下的纯磨损量最大,15 m/s 时占材料总损失的  $90\%$  以上,因此这 3 种材料对于多泥沙环境中的水电工程机械

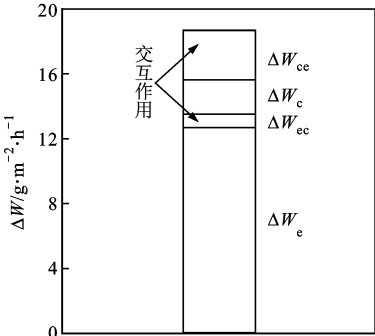


图 5 试验材料总冲蚀磨损率各分量的关系示意图

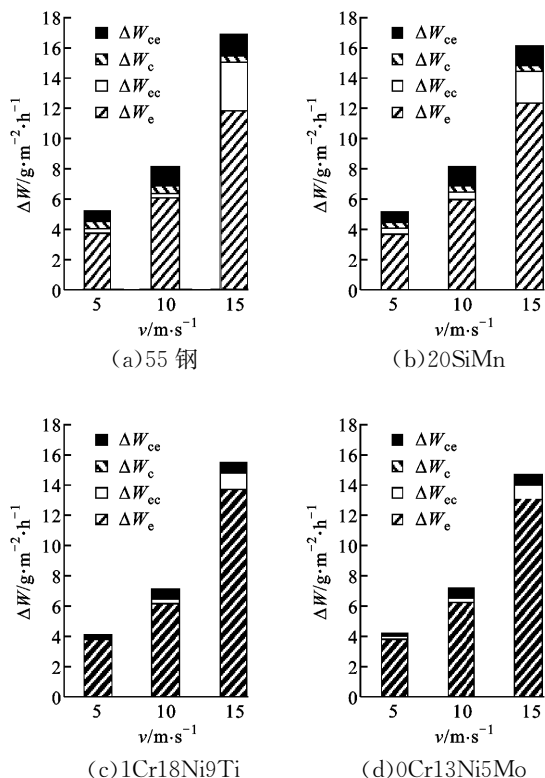


图6 不同冲蚀速度下试验材料总冲蚀

磨损率及各分量的比较

都有应用的局限性;④马氏体型不锈钢0Cr13Ni5Mo由于硬度高,且材料表面在冲蚀磨损过程中能不断形成致密的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NiO}$ 膜,因此抗腐蚀与抗冲蚀磨损性能最优。

## 5 结论

通过研究含沙水域水电站典型应用材料(55钢、20SiMn、1Cr18Ni9Ti和0Cr13Ni5Mo)在冲蚀磨损过程中的电化学腐蚀及冲蚀磨损性能,区分出纯磨损、纯腐蚀、磨损对腐蚀的促进分量及腐蚀对磨损的促进分量等各自所占的比例,考查了试验材料的冲蚀磨损特性及磨损与腐蚀间的交互作用,并对其失效机制进行了分析,得到以下结论:

(1)试验材料的磨损率与冲蚀速度的关系为指数关系,奥氏体型不锈钢1Cr18Ni9Ti的纯磨损率最大,55碳素钢和20SiMn低合金钢的磨损率相近,且低于1Cr18Ni9Ti不锈钢的磨损率,马氏体型不锈钢0Cr13Ni5Mo的磨损率最小,反映了材料硬度对于抵抗冲蚀磨损的重要性;

(2)55钢和20SiMn的纯磨损量较小,但腐蚀及磨损与腐蚀的交互作用导致的材料损失量大,而1Cr18Ni9Ti的纯腐蚀量虽然小,但纯磨损量大,因而都有应用的局限性;

(3)导致含沙水域水轮机过流部件材料失效的原因中,磨损是主要的,腐蚀是次要的,即由磨损引起的材料质量损失 $\Delta W'_e(\Delta W_e + \Delta W_{ce})$ 是材料流失的主要方式,因此在选择材料时首先应当考虑抗磨损性能,同时磨损与腐蚀的交互作用也不容忽视。

## 参考文献:

- [1] NESIC S, POSTLETHWAITE J. Predictive model for localized erosion-corrosion [J]. Corrosion, 1991, 47(8): 582-589.
- [2] SYRETT B C, WING S S. Corrosion of copper-nickel alloys 706 and 715 in flowing sea water [J]. Corrosion, 1976, 34(9): 289-301.
- [3] HEITCZ E. Chemo-mechanical effect of flow on corrosion [J]. Wear, 1991, 47(2): 135-145.
- [4] OKA Y, OHKUBO M. Mechanism of inhibitory effect on cavitation erosion-corrosion for iron in a 3% sodium chloride solution [J]. Corrosion, 1990, 46(8): 687-695.
- [5] 冈则良,山肋正昭,松本昌信. エロージョンとコロージョンの相乗効果量の粒子衝突角度依存性 [J]. 防食技術, 1986, 35(5): 270-275.
- [6] 郑玉贵,姚治铭. 泥浆型冲蚀中冲刷和腐蚀的交互作用 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 1993, 13(4): 390-395.  
ZHENG Yugui, YAO Zhiming. Synergistic interaction between erosion and corrosion of metals used in slurry water [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1993, 13(4): 390-395.
- [7] 顾四行. 我国水轮机泥沙磨损问题回顾[C]//顾四行. 水机磨蚀论文集. 北京:中国水利水电出版社, 2001: 20-30.
- [8] 陆楚勋,李晃,袁淑玲,等. 发展中的中国水力发电设备制造业[C]//顾四行. 水机磨蚀论文集. 北京:中国水利水电出版社, 2000: 23-39.
- [9] 王建忠,涂阳文,王茂海. 葛洲坝电厂水轮机过流部件磨蚀与防护回顾(1)[J]. 中国三峡建设, 2004(6): 1-8.  
WANG Jianzhong, TU Yangwen, WANG Maohai. Back worn and protective of the turbines parts in Gezhouba power plant (1) [J]. China Three Gorges Construction, 2004(6): 1-8.
- [10] 严秉丁,姚启鹏,余江成. 三种材料的抗磨蚀特性对比试验及试验结果讨论[C]//顾四行. 水机磨蚀论文集. 北京:中国水利水电出版社, 1998: 80-85.
- [11] 汤永明. 浅谈多泥沙电站水轮机抗磨蚀的措施[J]. 机电技术, 2006, 29(3): 28-31.  
TANG Yongming. The measures of erosion resistant of hydroelectric station turbines used in slurry water [J]. Mechanical and Electrical Technology, 2006, 29(3): 28-31.

[12] 庞佑霞,郭源君,刘厚才. 水轮机过流部件的磨蚀机理的研究[J]. 润滑与密封,2004,44(1):29-32.  
PANG Youxia, GUO Yuanjun, LIU Houcai. Study on the erosion mechanism of the turbine flowed parts [J]. Lubrication and Seal, 2004, 44(1):29-32.

[13] 李国梁. 水轮机泥沙磨损防护的技术进展 [C]//顾四行. 水机磨蚀论文集. 北京:中国水利水电出版社, 2001:8-15.

[14] 李健. 水轮机过流部件的磨损问题[J]. 材料保护, 2004,37(21):36-39.  
LI Jian. Study on wear of hydraulic turbine transition parts [J]. Materials Protection, 2004,37(21):36-39.

[15] 李翠林,任红旗. 高性能抗磨材料试验研究 [C]//顾四行. 水机磨蚀论文集. 北京:中国水利水电出版社, 1996:104-109.

[16] 何筱奎. 三门峡水轮机抗磨蚀材料优选实验研究 [C]//顾四行. 水机磨蚀论文集. 北京:中国水利水电出版社,1995: 38-48.

[17] 闵京声,姚光. 引黄水泵口杯防护材料对比试验研究 [C]//顾四行. 水机磨蚀论文集. 北京:中国水利水电出版社,1998:25-29.

[18] CHRISTOV S G, IKONOPIS S S. Field dependence of Tafel slopes for formation of anodic oxide films [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1969, 116(1): 56-65.

[19] 张安峰. 新型试验机的研制与铬系白口铸铁相间腐蚀的基础研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院, 2000.

(编辑 葛赵青)