

某核电厂循环水泵叶轮失效原因分析及防护措施

胡明磊¹, 徐科¹, 刘洪群², 张维¹

(1.中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314300;

2.苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘要:目的 提高核电厂海水循环水泵(以下简称“循泵”)叶轮的耐磨性能。方法 采用表面工程技术,在叶轮表面涂刷熔融环氧粉末涂层、WC 涂层和耐磨陶瓷涂层,以提高叶轮的耐磨性。通过对比材料本身的硬度和断裂韧性,分别评价两种新材料在海水中的耐磨性能,并通过实践验证对三种涂层的耐磨可行性进行了详细分析。结果 分析结果表明,该双相不锈钢叶轮的损坏为典型的磨损腐蚀,同时伴随着微弱的电化学腐蚀。经过实践验证,厚度为 0.8~1 mm 的熔融环氧粉末涂层由于与金属基材间的结合力较差,使用一周期后存在大面积的脱落现象,起不到保护叶轮的作用。厚度为 0.5 mm 的 WC 涂层在运行后检查发现涂层存在一定程度的减薄,部分区域仍存在微弱的冲蚀现象,而且其价格较昂贵,使用效果与经济性不成比例。耐磨陶瓷涂层整体达到了牺牲涂层从而保护母材的目的。结论 实践表明仅靠选材无法彻底根除磨损腐蚀,结合表面工程技术,综合使用效果和性价比,最终确定耐磨陶瓷涂层为循泵叶轮表面防护的最佳涂层。

关键词:循环水泵;耐磨性能;双相不锈钢;磨损腐蚀;表面工程技术;涂层

中图分类号: TG17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0214-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.032

The Reason Analysis and Solution of Failure on Circulating Seawater Pump for Nuclear Power Plant

HU Ming-lei¹, XU Ke¹, LIU Hong-qun², ZHANG Wei¹

(1.CNNC Nuclear Power Operations Management Co., Ltd, Haiyan 314300, China;

2.Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the wear-resisting property of circulating seawater pump. **Methods** The surface engineering technology that included SEBF coating, WC coating and wear-resisting ceramic coating were introduced to solve the problem. By comparing the hardness and toughness, the wear-resisting property of the three materials was evaluated and the feasibility was analyzed. **Results** The damage of duplex stainless steel impeller was typical erosion corrosion, which was accompanied with faint electrochemical corrosion. Practice proved that the 0.8~1 mm SEBF-2 coating had poor binding force with metal and it would bring about coating large area to fall off over time, which made the impeller out of protection. The 0.5 mm WC coating

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-05-15

Received: 2016-03-10; Revised: 2016-05-15

作者简介: 胡明磊(1982—),男,硕士,工程师,主要从事核电厂腐蚀与防护工作。

Biography: HU Ming-lei(1982—), Male, Master, Engineer, Research focus: material corrosion and protection.

通讯作者: 刘洪群(1983—),男,硕士,工程师,主要从事核电厂腐蚀与防护工作。

Corresponding author: LIU Hong-qun(1983—), Male, Master, Engineer, Research focus: material corrosion and protection.

was thinner and the washout appeared after running. Its price was expensive and the cost performance was extremely low. The wear-resisting ceramic coating protected the base material perfectly. **Conclusion** The erosion corrosion cannot be removed completely only by new materials. By considering the using effect and economical efficiency and combined with the surface engineering technology, the wear-resisting ceramic is proved to be the best protective coating for impeller of circulating seawater pump.

KEY WORDS: circulating seawater pump; wear-resisting property; duplex stainless steel; erosion corrosion; surface engineering technology; coating

某核电厂海水循环水泵（以下简称“循泵”）的叶轮材料为 MAS/6001 25/5 双相不锈钢，其功能是将海水送往凝汽器和辅助冷却水系统，冷却蒸汽和设备。而该核电厂所处海岸潮差大，经过该循泵的海水夹沙能力强，虽然双相不锈钢具有较强的耐腐蚀性能，但海水具有较强的腐蚀性，其中存在大量硬度较大的泥沙颗粒，在长期磨损和电化学的共同作用下，对循泵叶轮破坏尤为严重^[1-2]。

目前，对于循泵叶轮的维护，通常从选材和表面处理两方面出发来延长其使用寿命。因此，本文结合现场工程实践，对提出的选材和表面处理方案

进行适用性分析。

1 失效机理

在叶片的入水侧、导流部分、出水侧和叶轮下口环均存在不同程度的磨损损坏。在运行过程中，叶轮长期受到海水的冲刷，在其表面存在较多的鱼鳞状花纹，在其正表面可以发现明显的犁沟状纹路，其方向与水流方向一致，局部区域材料流失严重，在叶轮入水侧根部已贯穿，如图 1 所示。

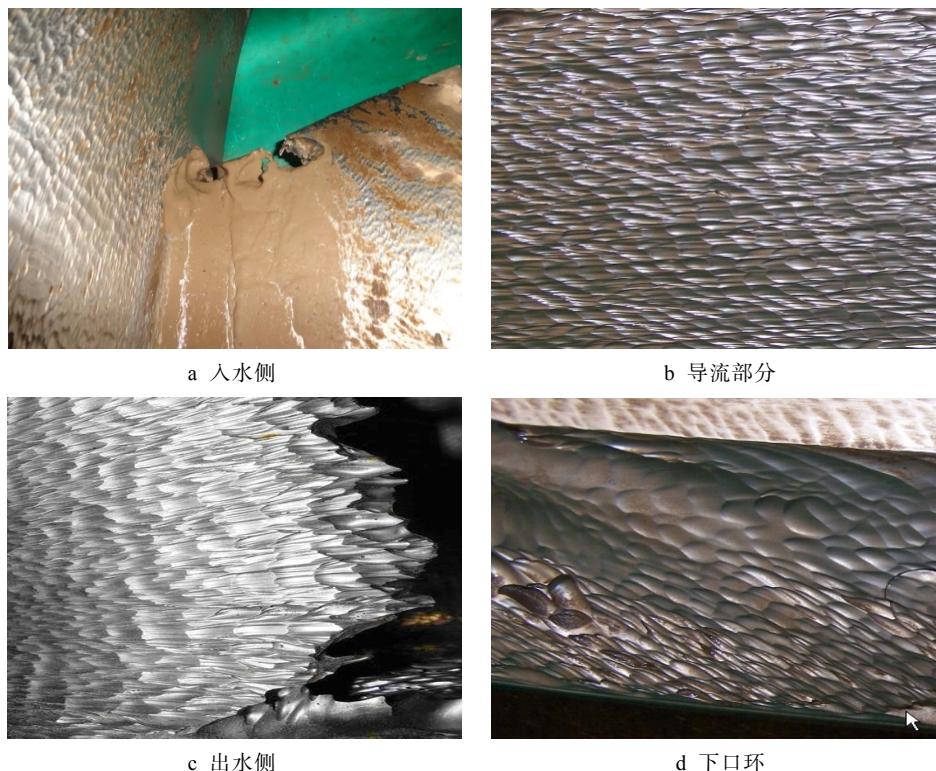


图 1 循泵的破损情况

Fig.1 The failure of circulating seawater pump: a) import side, b) diversion side, c) outlet side, d) wear-ring

1.1 磨损腐蚀

通过对叶轮破损部位的宏观分析，初步确定为

泥沙机械冲刷、磨损和海水腐蚀共同作用下的磨损腐蚀失效，且泥沙机械冲刷、磨损损坏的速率远大于其腐蚀速率。该电厂位置的海水平均含沙量为

2.5 kg/m³, 沙型以石英和正长石为主、直径小于 0.1 mm 的细颗粒粉沙, 硬度为 HV950~HV1200, 形状多为棱片状^[3-4]。循泵叶轮材质为 MAS/6001 25/5 双相不锈钢, 硬度为 HV374, 远低于海水细沙颗粒的硬度, 导致其耐磨性能较差。加之海水中的 Cl⁻ 质量浓度为 5677.87 mg/L, DO (溶解氧) 质量浓度为 8.9 mg/L, 所以该处的海水为含有大量硬度较大的细沙颗粒和腐蚀介质的固液两相流, 循泵运行中在受到流动粒子冲击作用的同时, 伴随着电化学腐蚀^[5-7]。

磨损腐蚀造成的材料损失不是简单的纯冲刷失重和纯电化学腐蚀损失质量之和, 而是两者相互促进产生协同作用所致。磨损腐蚀失重分量可以分为冲刷损失质量 m_e' 和电化学腐蚀损失质量 m_c' , 则磨损腐蚀总损失质量 m_t 可表示为:

$$m_t = m_e' + m_c' \quad (1)$$

磨损腐蚀总损失质量 m_t 可表示为纯冲刷损失质量 m_e 、纯电化学腐蚀损失质量 m_c 两者交互作用损失质量 m_s 三者之和, 即:

$$m_t = m_e + m_c + m_s \quad (2)$$

联立两式可得:

$$m_s = (m_e' - m_e) + (m_c' - m_c) = \Delta m_e + \Delta m_c \quad (3)$$

m_s 即为沙粒冲刷和电化学腐蚀相互促进的部分, 其中 Δm_e 反映了电化学腐蚀对沙粒机械冲刷腐蚀的促进作用, Δm_c 反映了冲刷腐蚀对材料电化学腐蚀的促进作用。

1.2 失效机理分析

在检查时发现循泵叶轮的入水侧和出水侧的磨损程度远大于导流侧, 这是由于在入水侧和出水侧存在汽蚀现象, 且仔细观察这两个部位可以发现明显的汽蚀凹坑。循泵在运行时, 叶轮入水侧与水流形成正面冲击, 由于汽蚀的存在, 气泡溃灭时将势能传递给沙粒导致沙粒加速, 增大了沙粒的破坏作用。这种大角度的高频高强度的撞击导致入水侧表面形成了疲劳裂纹, 随着时间的推移, 裂纹不断扩展, 形成了早期的汽蚀坑。随着时间的延长, 沙粒的这种往复破坏将早期的汽蚀坑不断扩大并合并, 由大角度的显微切削形成的汽蚀坑在宏观上表现较为光滑^[8]。在叶轮导流侧, 由于水流方向和叶轮表面平行, 沙粒撞击叶轮表面的角度较小且无汽蚀存在, 所以导流侧的磨损腐蚀程度相对较轻, 且凹坑的方向与水流方向一致。在叶轮出水侧局部

区域会形成负压并伴有较多的气泡产生, 该区域负压一旦降低, 气泡将会破灭并将能量传递给沙粒使其加速。沙粒的撞击角度和导流侧相似为小角度撞击, 这种模式的撞击使出水侧表面形成汽蚀凹坑, 并不断扩大合并, 在凹坑交汇处顶端形成了刀刃状结构。叶轮各部位磨损腐蚀情况如图 2 所示。

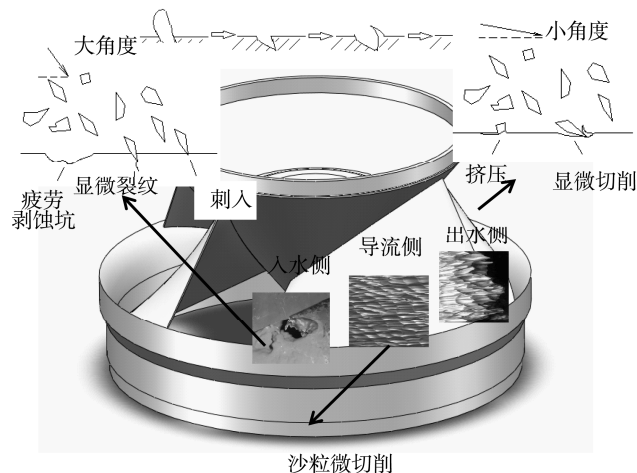


图 2 叶轮入水侧、导流侧和出水侧磨损腐蚀示意
Fig.2 The diagram of erosion corrosion on inlet side, diversion side and outlet side

因此, 叶片入水侧和出水侧的表面结构被破坏, 尤其是入水侧叶片上的穿孔, 都是由汽蚀加速的泥沙颗粒机械冲击作用所致。

2 防护措施

该循泵叶轮的失效机制为海水泥沙的磨损腐蚀, 同时伴随着微弱的电化学腐蚀。结合国内外经验, 目前延长叶轮使用寿命主要有以下两种方法^[9]: 1) 选择耐磨性能更加优异的金属的材料来替换目前的双相不锈钢; 2) 采用经济性较好的材料, 通过表面工程技术, 在叶轮表面形成保护层, 保证叶轮在使用一段时间后能以较小的代价进行维修。

2.1 合理选材

对于一种材料的耐磨损腐蚀性能来说, 主要有硬度和断裂韧性两个指标。硬度是材料耐磨性能的一个重要标准, 硬度越高, 材料的耐磨性能越好, 但它并不是材料耐磨性能的唯一标准。当存在冲击载荷和交变表面应力时, 合金抗断裂能力即断裂韧性对其耐磨性就显得非常重要。

2.1.1 合理选材

综合考虑材料的硬度和断裂韧性, 超低碳马氏体不锈钢 00Cr13Ni5Mo 和马氏体沉淀硬化不锈钢 17-4PH 是较合适的材料。两者的硬度 (00Cr13Ni5Mo 为 HB285, 17-4PH 为 HB321) 均高于原叶轮 MAS/6001 25/5 双相不锈钢的硬度 (HB230~260), 但仍远低于石英沙的硬度。据文献[10]表明, 上述两种材料在黄河花园口原型沙 (HV950~HV1200), 含沙量为 50 kg/m^3 , 速度为 $13.24\sim 14.45 \text{ m/s}$ 的试验介质中冲刷 4 h, 00Cr13Ni5Mo 的磨损速度为 $1.12 \text{ mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$, 17-4PH 的磨损速度为 $4.35 \text{ mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$ 。

17-4PH 经时效处理后, 材料的强度和硬度显著提高, 但材料的韧性变差, 抗汽蚀能力变差。00Cr13Ni5Mo 固溶处理后, 采用高温回火热处理, 且部分马氏体逆转变成为奥氏体, 使材料的韧性升高。热处理后, 17-4PH 组织中的马氏体合金固溶度低于 00Cr13Ni5Mo, 后者马氏体硬度高于前者, 且后者析出的硬质相直径大于 ε 相^[11-12], 所以 00Cr13Ni5Mo 的耐微粒切削磨损性能优于 17-4PH。

2.1.2 现场工程实践

该厂之前试用过沉淀硬化不锈钢 17-4PH 叶轮, 其材料硬度高于原叶轮 MAS/6001 25/5 双相不锈钢。在运行 4 个月后, 解体检查发现其耐磨损腐蚀性能有所提高, 基本保留了水力部件的完整性, 但在叶轮边缘, 口环处仍有明显的破损坑和犁沟、鱼鳞纹, 总体使用效果不能满足现场的实际要求, 其抗磨损腐蚀有待改善。目前, 还没有很好的方法解决循环泵水力部件的磨损腐蚀失效问题, 单纯地通过改变叶轮的材质不能从根本上解决问题。理论上, 超低碳马氏体不锈钢 00Cr13Ni5Mo 的耐微粒切削磨损性能优于 17-4PH, 但具体的工程应用有待实践验证。

2.2 表面工程技术

目前, 国内外针对海水腐蚀问题的表面工程技术应用十分广泛, 其中涂层可以分为三大类: 高分子涂层、金属涂层和陶瓷涂层^[13-15]。金属涂层主要有不锈钢材料和合金粉末, 不锈钢材料可以通过堆焊等技术实现涂覆, 合金粉末一般通过热喷涂方法涂覆到设备表面。高分子涂层主要有聚氨酯涂层、环氧树脂涂层和复合尼龙涂层, 前两者在核电

厂中应用较为广泛。陶瓷涂层主要有各种氧化物和复合氧化物、碳化物、硅酸盐系, 此外, 还有金属陶瓷, 相比于前两类涂层, 陶瓷涂层施工技术要求相对较低, 性价比较高, 但陶瓷涂层与个别基体间的结合力一直是一个难以攻克的难题。

该厂在发现循泵损坏严重后, 先后采用了高温热喷涂熔融结合的黑色环氧粉末、热喷涂 WC 涂层和刷涂耐磨陶瓷进行抗磨损腐蚀, 并对其使用效果进行对比。

2.2.1 熔融环氧粉末

在叶轮流道表面均匀喷涂熔融结合的环氧粉末, 平均厚度 $800\sim 1000 \mu\text{m}$, 该涂层为单组分热固性的熔融结合改性环氧粉末涂层。目前该涂层已广泛应用于各种设备的表面防腐上, 其优点是表面光滑, 粗糙度低, 工艺简单, 适合大面积磨损部件的涂覆, 且其抗磨性能高, 并具有良好的机械性能。

运行 4 个月后, 发现涂层与母材存在大面积脱落现象。在叶片根部涂层脱落区域汽蚀损坏现象严重, 涂层未脱落部分未发现损坏情况。该熔融结合的环氧粉末具有较高的强度和硬度, 但其抗汽蚀能力不强, 且涂层与叶片流道的结合强度不够, 无法全方位保护叶轮。

2.2.2 WC 涂层

采用高速热喷涂的 WC 涂层 (厚 0.5 mm), 运行 1 年后, 解体检查发现, 叶轮碳化钨涂层的整体情况良好, 局部区域存在磨损及坑、孔。叶片入水侧根部有明显的磨损痕迹, 出水侧背面尾部存在较深的犁沟槽, 最深处达 6 mm , 如图 3 所示。

从总体效果来看, 该方法达到了牺牲涂层保护母材的目的。但是由于 WC 涂层厚度较薄, 局部区域磨损较严重, 且目前进口的 WC 涂层价格较为昂贵, 如果加厚涂层, 使用效果与经济性不成比例。综合使用效果和经济性两方面因素, 建议选择国内的 WC 涂层技术, 同时增加涂层厚度, 延长循泵使用寿命, 但目前国内 WC 涂层与母材之间的结合力有待实践验证。

2.2.3 耐磨陶瓷

采用耐磨陶瓷涂层, 在叶片入水侧等磨蚀较重及有较深坑、孔洞处, 先刷涂大颗粒耐磨防护剂填补平整, 半固化后, 刷涂小颗粒耐磨防护剂填补小空隙, 然后用超金属修补剂做平整、填充微孔及平滑过渡, 最后刷涂白色刷涂陶瓷粉末和灰色刷涂陶瓷粉末。涂层总厚度约为 3.5 mm , 在涂刷大颗粒

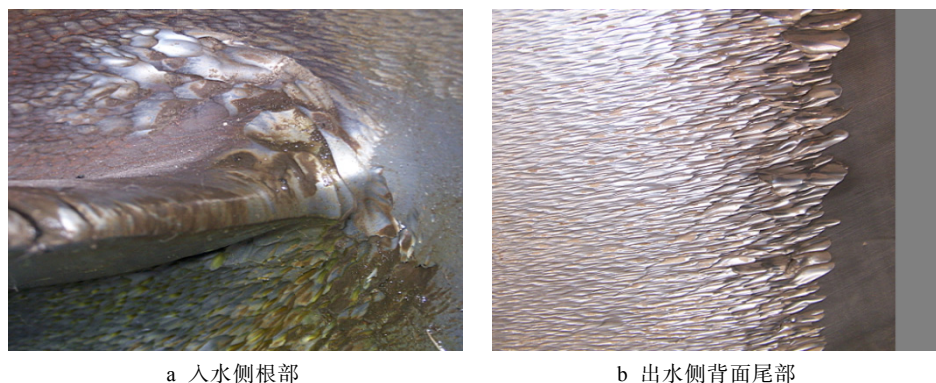


图3 WC处理后叶轮的磨损情况

Fig.3 The degree of erosion corrosion with WC coating: a) root of import side, b) root of outlet side

耐磨防护剂区域的厚度达到 5 mm。运行 1 年后，发现叶片入水侧根部附近有小面积剥落，出水侧涂层露出陶瓷粉末，未见母材露出，下口环由于外径

原因先前未涂刷大颗粒耐磨防护剂，磨损较严重，其余部位涂层的整体性保持完好，未见明显的坑、孔洞，如图 4 所示。

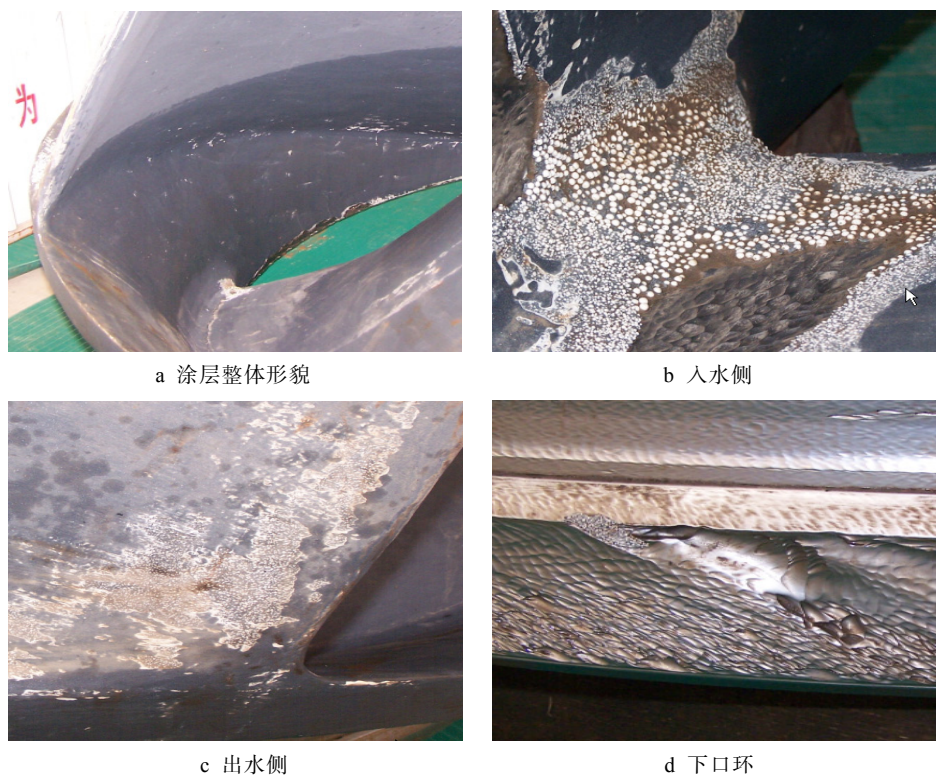


图4 耐磨陶瓷处理后叶轮的磨损情况

Fig.4 The degree of erosion corrosion with wear-resisting ceramic coating: a) coating morphology, b) inlet side, c) outlet side, d) wear-ring

整体来看，耐磨陶瓷涂层达到了牺牲涂层保护叶轮的目的，尤其是叶片流道部分和出水侧基本没有较大的磨损，叶片入水侧也未见明显的汽蚀坑、孔。针对下口环的磨损问题，可以在下口环出厂时减小外径，预留空隙涂刷大颗粒耐磨防护剂或者使用较为昂贵的进口 WC 涂层进行保护。相比于环氧粉末涂层和 WC 涂层，耐磨陶瓷涂层综合了使用效

果和经济性，费用远低于进口 WC 涂层，且可在现场施工，缩短了设备的维修时间。

3 结论

针对循环水泵叶轮的磨损进行了失效分析，确定了该叶轮失效主要是由海水中的沙粒机械冲刷

和磨损腐蚀所致。针对这一问题, 本文主要从合理选材和表面工程技术两方面来对循环泵进行耐磨损和抗汽蚀处理。选材上, 综合考虑材料的硬度和断裂韧性, 尝试用沉淀硬化不锈钢 17-4PH 代替原先的双相不锈钢。实践表明, 仅靠选材无法彻底根除磨损腐蚀, 结合表面工程技术, 选取不同类型的表面涂层, 对比其抗磨损腐蚀性能, 并综合使用效果和性价比, 确定耐磨陶瓷涂层为循环泵表面处理的最佳涂层。

参考文献

- [1] 田永奎. 金属腐蚀与防护[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
TIAN Yong-kui. Corrosion and Protection of Metals[M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [2] NILSSON J O. Super Duplex Stainless Steels[J]. Mater Sci Technol, 1992, 8: 685.
- [3] 陈吉余, 陈沈良. 长江口南汇咀近岸水域泥沙输移途径[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(2): 166—172.
CHEN Ji-yu, CHEN Shen-liang. Sediment Transport Along the Nanhui Submerged Spit of the Yangtze Estuary [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2001, 10(2): 166—172.
- [4] 车越, 何清. 高浊度河口颗粒态重金属对泥沙运动的指示作用[J]. 水利学报, 2003, 1(1): 57—61.
CHE Yue, HE Qing. The Distributions of Particulate Heavy Metals and Its Indication to the Transfer of Sediment in High Turbidity Estuaries[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 1(1): 57—61.
- [5] 肖政渝. 含沙海水对电站水泵的影响及耐蚀处理措施[J]. 水泵技术, 2009(1): 21.
XIAO Zheng-yu. The Corrosion Solution and Influence of Sand Concentration Sea Water to Water Pump[J]. Pump Technology, 2009(1): 21.
- [6] 陈旭俊. 金属腐蚀与保护基本教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [7] CHEN Xu-jun. Metal Corrosion and Protection of Basic Tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
邓舜扬. 金属防腐蚀对话[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
DENG Shun-yang. Metal Anti-corrosion Dialogue[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987.
- [8] 向先保, 沙承卓. 海水循环泵双相不锈钢叶轮失效机理分析[J]. 水泵技术, 2012(5): 38—42.
XIANG Xian-bao, SHA Cheng-zhuo. The Reason Analysis of Failure on Circulating Seawater Pump[J]. Pump Technology, 2012(5): 38—42.
- [9] 孙延泉. 超临界火电厂海水循环水泵的防腐蚀方案[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(2): 137—139.
SUN Yan-quan. Corrosion Protection Project of Circulating Seawater Pump in Super-Critical Thermal Power Plants[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(2): 137—139.
- [10] 陆世英, 张廷凯. 不锈钢[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
LU Shi-ying, ZHANG Ting-kai. Stainless Steel[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1995.
- [11] KIM B K, LEE J S. Sintering of W-Cu Contact Materials with Ni and Co Dopants[J]. Powder Metall Int, 1977, 9: 23—8.
- [12] LEE J S, KAYSER W A. Microstructural Changes in W-Cu and W-Ni-Cu Compacts during Heating up for Liquid Sintering[J]. Mod Develop Powder Metall, 1985, 15: 489—495.
- [13] 杨忠须. 热喷涂 Mo 及 Mo 基复合涂层研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 20—30.
YANG Zhong-xu. Research Progress of Mo and Mo-based Coating Prepared by Thermal Spraying[J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 20—30.
- [14] MA Y T. The Effect of β -FeOOH on the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel Exposed in Tropic Marine Environment[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 112(3): 844—850.
- [15] ZHANG Q C. Corrosion Behavior of Weathering Steel in Marine Atmosphere[J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 77(2): 603—611.