

# 中水腐蚀特性试验与分析

Experiment and analysis on the corrosion characteristics in reclaimed water

徐庆东, 张海燕

XU Qing-dong, ZHANG Hai-yan

(华电国际邹县发电厂, 山东 邹城 273522)

(Zouxian Power Plant, Huadian Power International Corporation Limited, Zoucheng 273522, China)

**摘要:**通过循环水动态试验和有关金属材料腐蚀速度的测量、分析,介绍了以电厂污水、废水和城市二级排放污水为水源,混合并经过深度处理后的中水作为循环水补充水时可达到稳定的最大浓缩倍率,以及对系统中金属材料的腐蚀特性,为循环水系统的安全稳定运行提供了依据。

**关键词:**循环水动态试验;中水再利用;浓缩倍率;金属腐蚀;水质检测

中图分类号:X 703.1 文献标识码:B 文章编号:1674-1951(2008)03-0029-04

**Abstract:**The secondary municipal effluent mixed with sewage water and waste water discharged from power plant itself has been used as the water source of circulating supplement water after deep treatment by lime. According to the dynamic test for the circulation cooling water and the corrosion speed measurement of related metallic materials, the maximum stable concentration ratio which can be achieved was introduced, and the characteristics of metal corrosion was described. The conclusions have been approved by applied in the circulation water system for safe and stable operation.

**Key words:**circulation cooling water dynamic test; reclaimed water reuse; concentration ratio; metal corrosion; water quality detection

## 0 引言

华电国际邹县发电厂2×1000 MW机组中水深度处理以城市二级排放污水、电厂污水、废水为水源,经深度处理后作为循环水系统补充水。

依据邹城市污水处理厂二级污水经过深度处理后的预测水质,电厂确定凝汽器管管材选用TP317L不锈钢管。

由于中水深度处理后回用的不确定因素很多,在循环冷却水系统中,除了要考虑常规生产所引起的结垢、腐蚀和杀菌问题,还要关注凝汽器、辅机材料的材质问题。本文进行了中水深度处理后循环水系统的腐蚀试验,对循环水动态模拟试验的情况进行总结。

## 1 中水深度处理后的循环水动态试验

### 1.1 试验目的

城市二级污水、厂内污水、废水混合经过石灰处

理→加酸调pH→过滤→杀菌深度处理后,再加入低剂量复合阻垢缓蚀剂,循环水运行时可达到稳定的最大浓缩倍率。

### 1.2 试验用水

试验用水为深度处理后的中水,其水质分析结果见表1。

表1 深度处理后水质分析结果

项目	数值	项目	数值
pH值	8.21	电导率/( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	958.0
酚酞碱度/( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0	浊度/NTU	1.2
全碱度/( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	1.0	余氯/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.25
全硬/( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	3.70	COD <sub>Cr</sub> /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	33.6
钙硬/( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	2.10	总P/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0
活性SiO <sub>2</sub> /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	10.8	NH <sub>3</sub> -N/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	3.3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	263.0	油/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0
Cl <sup>-</sup> /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	154.0		

### 1.3 试验结果

图1~图4分别是混合水源经石灰处理→加酸

调 pH→过滤→杀菌深度处理后作补充水,以及在补充水中加 SD-2316A 产品 6 mg/L(通过小型试验确定)循环水试验运行的曲线。

### 1.3.1 试验操作

循环水浓缩过程中,定时检测循环水质和凝汽器污垢热阻,在保持循环水氯根浓缩倍率与总硬或钙硬浓缩倍率之差,即  $\Delta B$  值  $\leq 0.2$  的情况下,监测污垢热阻,在保持不出现结垢现象的前提下持续浓缩;当多次出现  $\Delta B$  值  $> 0.2$ ,且模拟凝汽器污垢热阻值呈持续增加趋势时,说明浓缩倍率过高,循环水已出现结垢现象。此时,通过调整循环水排污量,使循环水浓缩倍率适当降低,并保持在稳定水质下运行,然后继续关小排污水量并调整合适排污量,维持此浓缩倍率稳定运行(如图 1 所示)。

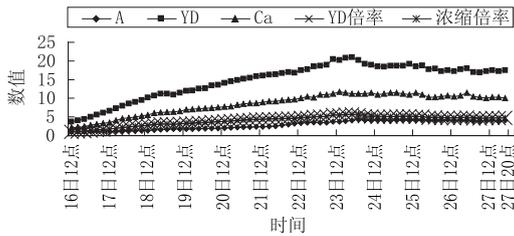


图 1 浓度处理后中水(2316A 6 mg/L)循环水运行曲线

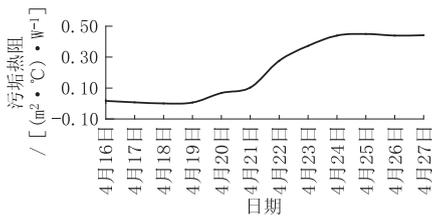


图 2 污垢热阻日平均值

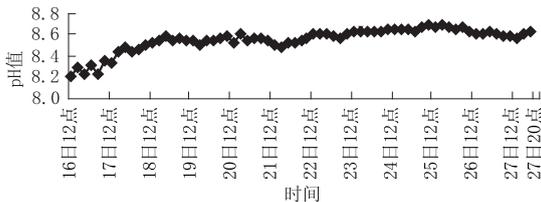


图 3 深度处理后中水(2316A 6 mg/L)循环水 pH 曲线

### 1.3.2 试验结果

循环水浓缩阶段试验至 5.5 倍时,由水质分析

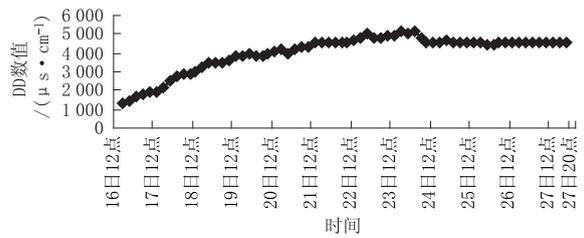


图 4 深度处理后中水(2316A 6 mg/L)循环水 DD 曲线

和模拟凝汽器的污垢热阻监测分析发现,开始出现模拟凝汽器管结垢情况;此时通过调整排污降低循环水浓缩倍率至 5.1 倍以下时,保持氯根浓缩倍率与硬度浓缩倍率的差值小于 0.2,模拟凝汽器的污垢热阻数值无增长,两方面都达到技术规范要求,循环水水质稳定。由此可知,在 5.0 倍浓缩倍率稳定运行阶段,模拟凝汽器传热面上无垢物继续附着。

试验后期浓缩倍率控制在 4.8~5.1,循环水水质及冷凝管内情况见表 2、表 3。在此补充水质和循环水处理工艺下,浓缩倍率最大只能维持在 5.0 倍,浓缩倍率再有增大,有出现结垢的危险性。

表 2 (中水加 2316A 6 mg/L 时)循环水试验后凝汽器管附着物情况

试验前质量/g	194.59
试验后质量/g	195.31
单位面积沉积物质量 / (g·m <sup>-2</sup> )	16.76
外观检查情况	管内表面出口处少量灰白色附着物,易擦去;金属表面光亮如新,光洁、光滑
(试验运行后)年污垢热阻值 / [(m <sup>2</sup> ·°C)·W <sup>-1</sup> ]	0.58 × 10 <sup>-4</sup>

## 2 水动态试验时各金属材料的腐蚀测量

### 2.1 动态模拟试验中各种金属材料腐蚀速率测量

试验分别在循环水池中和回路中挂入试片,通过测量试片的失重和面积,测得试验水质条件和试验温度下的腐蚀速率,试验结果见表 4。

### 2.2 电化学腐蚀测量

循环水动态模拟试验后取水样,对各种金属材

表 3 (试验浓缩倍率稳定运行时)循环水水质

碱度 / (mmol·L <sup>-1</sup> )	硬度 / (mmol·L <sup>-1</sup> )	钙硬 / (mmol·L <sup>-1</sup> )	氯根 / (mg·L <sup>-1</sup> )	pH 值	DD / (μs·cm <sup>-1</sup> )
3.95~4.20	17.0~18.8	10.5~11.5	749~792	8.55~8.70	4550~4600

表4 (2316A 6 mg/L) 循环水动态试验时金属腐蚀速率

材质	腐蚀速率(1) /[g · (m <sup>2</sup> · h) <sup>-1</sup> ]	腐蚀速率(2) /(mm · a <sup>-1</sup> )	腐蚀速率(2)平均值 /(mm · a <sup>-1</sup> )	外观检查
317L	0	0	0	光亮如初
	0	0		
316L	0	0	0	光亮如初
	0	0		
1Cr18Ni9Ti	0	0	0	光亮如初
	0	0		
铸铁	0.158	0.177	0.186	棕黑色腐蚀产物,金属表面全面腐蚀
	0.174	0.195		
#20 钢	0.261	0.293	0.281	棕黑色腐蚀产物,金属表面全面腐蚀
	0.240	0.269		
B30 管	0.006 6	0.006 5	0.006 0	光亮如初
	0.005 5	0.005 4		

料进行电化学腐蚀试验测量。试验采用极化曲线测量,得到电极的腐蚀电流密度,从而得出金属的腐蚀速率。试验温度 45 ℃,试验前将电极打磨至光洁度符合要求,清洗干净,并在测量水质下浸泡 2 h 以上至电极电位稳定。电化学测量结果见表 5。

表5 金属腐蚀电化学测量结果

材质	腐蚀电流密度 /(A · cm <sup>-2</sup> )	腐蚀速率 /(mm · a <sup>-1</sup> )
317L	$2.71 \times 10^{-8}$	0
316L	$7.92 \times 10^{-8}$	0
1Cr18Ni9Ti	$1.12 \times 10^{-7}$	0
铸铁	$1.91 \times 10^{-5}$	0.224
#20 钢	$2.11 \times 10^{-5}$	0.248
B30	$2.51 \times 10^{-7}$	0.003

### 2.3 金属在循环水中腐蚀情况综合分析

综合表 4 和表 5 中腐蚀速率试验情况,中水经深度处理后作循环补充水时,循环水中的 317L、316L、1Cr18Ni9Ti 不锈钢金属几乎不发生腐蚀或点蚀。作为结构性或构筑性材料使用的#20 钢的腐蚀速率在 0.2 ~ 0.3 mm/a,铸铁的腐蚀速率在 0.2 mm/a 左右。在这种水质条件下,#20 钢或铸铁仍然可以作为结构性材料或设备来使用,但应作好金属表面的防腐处理,否则会影响设备使用寿命。

## 3 不锈钢在循环水中的耐蚀性能

### 3.1 试验目的

在前述的循环水动态模拟试验中,对 317L、316L 及 1Cr18Ni9Ti 不锈钢材质的腐蚀试验,测试结

果显示其腐蚀速度为零,即基本不发生腐蚀。但各种不锈钢材质在循环水中的耐蚀性是有差别的,特别在经过多年长期生产运行使用过程后,其耐腐蚀尤其是耐点蚀的情况必然会有所不同。电化学测试可以很好地对各种不锈钢在循环水质和使用条件下的耐局部腐蚀性能进行分析和比较。

对于不锈钢等钝态金属,可以用电化学阳极极化的方法研究其钝态或耐局部腐蚀的能力。当对不锈钢在一定溶液中进行动电位阳极极化时,电位达到一特定值时就开始活化,这时电流密度也开始增大,这一电位即为膜的击穿电位(用  $E_b$  表示),此时不锈钢表面钝化膜部分被击穿破坏,开始发生点蚀而使阳极电流密度显著增加。当达到一定电流密度后反向扫描时,会测得电流密度恢复到钝态电流密度时的电位称为再钝化电位或保护电位  $E_p$ ,达到此电位时,击穿的钝化膜已经恢复,小孔腐蚀停止发展。

由此可知,击穿电位  $E_b$ (又称点蚀电位)和保护电位  $E_p$ (又称再钝化电位)是表征不锈钢等金属耐点蚀和缝隙腐蚀倾向的特征电位。 $E_b$  反映了钝化膜破坏的难易程度,用来评价保护膜的保护性和稳定性, $E_b$  越正,越不易发生点蚀,膜的保护性越好。 $E_p$  表征了蚀孔重新钝化的难易程度,用于评价钝化膜部分破坏后修复能力的强弱, $E_p$  越正,则修复能力强,即再钝化能力越大。

为更好地探讨 317L、316L、1Cr18Ni9Ti 不锈钢耐点蚀或局部腐蚀的能力,利用电化学测试仪进行了循环极化测量。

### 3.2 试验准备及条件

金属材料经过电极制样、封样、抛光、清洗处理, 试验溶液采用动态试验的循环水, 温度为 45 ℃, 动电位扫描速度 0.5 mV/s, 门槛电流 0.005 A/cm<sup>2</sup>。

### 3.3 试验结果

通过电化学测试, 得到 317L、316L、1Cr18Ni9Ti 不锈钢在循环水水质条件下的点蚀击穿电位  $E_b$  和保护电位  $E_p$ , 具体见表 6。

表 6 各不锈钢材质在试验的循环水条件下的点蚀电位测量结果及各类不锈钢适应的水质

材质	击穿电位 $E_b$ (vs,SCE)/mV	保护电位 $E_p$ (vs,SCE)/mV	各类不锈钢适应的水质/( $\times 10^{-6}$ )
317L	540	152	$C1^- < 5000$
316L	456	131	$C1^- < 1000$
1Cr18Ni9Ti	400	55	$C1^- < 200$

表 7 中水(加酸调 pH=8.2)作补充水、A 阻垢剂加药 6 mg/L, 循环水稳定水质

碱度 /(mmol · L <sup>-1</sup> )	硬度 /(mmol · L <sup>-1</sup> )	钙硬 /(mmol · L <sup>-1</sup> )	氯根 /(mg · L <sup>-1</sup> )	pH 值	DD /( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
3.95 ~ 4.20	17.0 ~ 18.8	10.5 ~ 11.5	749 ~ 792	8.55 ~ 8.70	4550 ~ 4600

(2) 深度处理后的中水作循环水时, 317L、316L、1Cr18Ni9Ti 不锈钢材质未发生腐蚀或点蚀。但此时循环水系统中的碳钢和铸铁设备会发生一定程度的腐蚀, 当循环水中氨氮含量较高时, 由于氨氮硝化反应使循环水的 pH 值有所降低, 使得此循环水的腐蚀性增加, 应对普通碳钢或铸铁设备进行防腐涂料处理或采取其他有效防腐措施, 以保证设备的安全使用。依据 GB50335 - 2002《污水再生利用工程设计规范》中再生水用作冷却水的水质控制标准, 建议在今后循环水运行时, 水中氨氮含量以不超过 10 mg/L 为宜(循环冷却系统为不锈钢换热器)。

(3) 电化学循环极化测量可更好的探讨 317L、316L、1Cr18Ni9Ti 不锈钢耐点蚀或局部腐蚀的性能。由试验结果知, 317L、316L 不锈钢的耐点蚀能力要

由试验结果知, 317L、316L 不锈钢的耐点蚀能力要强于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 这与各类不锈钢适应的水质特性相吻合; 且 317L、316L 不锈钢再钝化能力或点蚀后的修复能力要好于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。其中, 317L 不锈钢的耐局部腐蚀或耐点蚀的能力及再钝化修复能力最强。

## 4 试验结论及建议

(1) 深度处理后中水(石灰处理→加酸调 pH 约为 8.2→过滤→杀菌)作补充水, 并加入少量阻垢剂(2316A 产品, 计 6 mg/L), 循环水极限浓缩倍率为 5.5 倍, 稳定运行时最大浓缩倍率为 5.0 倍。此条件下循环水质稳定, 无结垢现象, 凝汽器管内水侧无硬垢, 此时模拟凝汽器污垢热阻为  $0.58 \times 10^{-4}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{℃}$ )/W, 循环水水质见表 7。

强于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 且 317L、316L 不锈钢再钝化能力或点蚀后的修复能力要好于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。其中, 317L 不锈钢的耐局部腐蚀或耐点蚀的能力及再钝化修复能力最强。

(4) 中水作循环补充水使用时, 循环水中包括 317L、316L、1Cr18Ni9Ti 不锈钢和 B30 白铜管在内的金属, 几乎不发生腐蚀或点蚀。

(编辑: 白银雷)

### 作者简介:

徐庆东(1970 -), 男, 山东邹城人, 华电国际邹县发电厂工程师, 从事发电厂化学检验方面的工作。

张海燕(1977 -), 女, 山东邹城人, 华电国际邹县发电厂工程师, 从事节能环保方面的工作。

## 广 告 索 引

国电南京自动化股份有限公司 ..... (封面)  
华电工程物料输送分公司 ..... (封二)  
华电工程新能源技术开发公司 ..... (封三)  
华电工程水处理分公司 ..... (封底)

华电工程物料输送分公司 ..... (前插 1)  
丹东建安建工机械有限公司 ..... (前插 2)  
中国长江航运集团电机厂 ..... (前插 3)