

DOI: 10.19666/j.rlfed.202408197

# 直接空冷凝汽器加药防腐实验研究

王园园<sup>1</sup>, 胡振华<sup>2</sup>, 李俊苑<sup>2</sup>, 姬定西<sup>1</sup>, 李健博<sup>2</sup>, 刘 焕<sup>1</sup>

(1.西安益通热工技术服务有限责任公司, 陕西 西安 710054;

2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 为了解决直接空冷凝汽器腐蚀问题, 通过自主研发的动态腐蚀模拟实验装置模拟初凝液实际运行工况, 选取汽液分配系数低的碱化剂和氧化剂对碳钢进行流动加速腐蚀实验研究。结果表明: 碱化剂和氧化剂均能有效抑制直接空冷凝汽器流动加速腐蚀; 水流方向的急剧改变对流动加速腐蚀速率影响较小; 同等条件下, 碳钢在氧化剂环境中的流动加速腐蚀速率远低于碱化剂环境中的流动加速腐蚀速率; 向直接空冷凝汽器中加入氧化剂进行防腐时, 单台机组每年可节约生产成本 52.37 万元。

**[关键词]** 直接空冷凝汽器; 碱化剂; 氧化剂; 初凝液; 流动加速腐蚀

[引用本文格式] 王园园, 胡振华, 李俊苑, 等. 直接空冷凝汽器加药防腐实验研究[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 179-185.  
WANG Yuanyuan, HU Zhenhua, LI Junwan, et al. Experimental study on dosing and anticorrosion of direct air cooled condenser[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 179-185.

## Experimental study on dosing and anticorrosion of direct air cooled condenser

WANG Yuanyuan<sup>1</sup>, HU Zhenhua<sup>2</sup>, LI Junwan<sup>2</sup>, JI Dingxi<sup>1</sup>, LI Jianbo<sup>2</sup>, LIU Huan<sup>1</sup>

(1.Xi'an Yitong Thermal Power Technical Service Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to solve the corrosion problem of direct air cooling condensers, the independently developed dynamic corrosion simulation test device is used to simulate the actual operating conditions of the initial condensate, and the alkalizing agent and oxidant with low vapor-liquid distribution coefficient are selected for the flow accelerated corrosion test of carbon steel. The results show that, both alkalizing agent and oxidant can effectively inhibit the accelerated corrosion of direct air-cooled condenser. The rapid change of water flow direction has little effect on the accelerated corrosion rate of flow. Under the same conditions, the flow accelerated corrosion rate of carbon steel in oxidant environment is much lower than that in alkalizer environment. When oxidant is added to the direct air-cooled condenser for anticorrosion, the production cost of a single unit can be saved by 523 700 yuan per year.

**Key words:** direct air cooled condenser; alkalizing agent; oxidizer; initial condensate liquid; flow accelerated corrosion

根据我国华北和西北地区富煤缺水的特点, 建立了比水冷机组节水 70% 以上的直接空冷系统的机组, 使我国直接空冷机组单机容量、总装机容量远高于国外<sup>[1-2]</sup>。空冷凝汽器的材质主要是碳钢, 耐腐蚀性较差<sup>[3]</sup>, 低压缸排汽流速快, 蒸汽最大流速可达 80 m/s, 且“乏汽”在排汽管中发生冷凝, 形成汽液两相流, 氨和氧在汽液两相流中再分配, 液相的初

凝液 pH 值较低, 且接近无氧<sup>[2]</sup>。初凝液接触的碳钢表面发生流动加速腐蚀 (flow accelerated corrosion, FAC), 使得凝结水的含铁量通常是湿冷机组的 3~5 倍<sup>[4]</sup>。直接空冷凝汽器的运行腐蚀产物及溶出杂质已成为空冷机组凝结水的主要污染源, 对机组存在直接或间接的危害, 如造成凝汽器碳钢构件上杂质沉积、污染精处理混床树脂等。

收稿日期: 2024-08-08 网络首发日期: 2025-01-20

基金项目: 西安热工研究院有限公司众创/研究开发基金项目 (TK23TYK02)

Supported by: Crowdfunding/Research and Development Fund Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TK23TYK02)

第一作者简介: 王园园 (1988), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电厂设备防腐及水处理, wangyuanyuan@tpri.com.cn。

通信作者简介: 胡振华 (1987), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为热力设备腐蚀与防护, huzhenhua@tpri.com.cn。

国内外抑制直接空冷凝汽器流动加速腐蚀的方法主要是加氨提高给水 pH 值,但会显著缩短精处理混床的运行周期,并且增加水汽系统所有节流部位沉积堵塞的风险<sup>[5]</sup>。向直接空冷凝汽器加入少量汽液分配系数低的有机胺可提高初凝液 pH 值<sup>[6-7]</sup>,且不会导致精处理混床的运行周期严重缩短。国内已有电厂从低压缸入口加入有机胺提高初凝液 pH 值<sup>[8]</sup>,达到了直接空冷凝汽器防腐的目的。目前,未有文献报道使用氧化剂对直接空冷凝汽器防腐,本文结合初凝液 pH 值的理论计算,使用自主研发的动态腐蚀模拟实验装置模拟初凝液的实际运行工况,研究碳钢在汽液分配系数低的碱化剂和氧化剂环境下的流动加速腐蚀速率,并对其经济性进行分析,为直接空冷凝汽器防腐提供实验依据。

## 1 初凝液 pH 值理论计算

锅炉给水采用加氨处理对水汽系统进行腐蚀控制,而氨在汽液两相中的分配系数很高,即相对挥发度高(60 °C,标准大气压下,相对挥发度为 18.25)。

根据拉乌尔定律和道尔顿分压定律,可得:

$$\alpha = \frac{y_{\text{NH}_3}}{x_{\text{NH}_3}} \quad (1)$$

$$y_{\text{NH}_3} = \frac{P_{\text{NH}_3}}{p} = \frac{P_{0,\text{NH}_3} x_{\text{NH}_3}}{p} \quad (2)$$

由公式(1)和公式(2)可知:

$$p = \frac{P_{0,\text{NH}_3} x_{\text{NH}_3}}{y_{\text{NH}_3}} = \frac{P_{0,\text{NH}_3}}{\alpha} \quad (3)$$

式中:  $p$  为总压力, kPa;  $p_{0,\text{NH}_3}$  为 60 °C 纯组分氨的饱和蒸气压, kPa;  $p_{\text{NH}_3}$  为 60 °C 氨的分压, kPa;  $x_{\text{NH}_3}$  为液相中氨的摩尔分数;  $y_{\text{NH}_3}$  为气相中氨的摩尔分数;  $\alpha$  为氨的相对挥发度。

由式(3)可得,总压力与相对挥发度成反比:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (4)$$

式中:  $p_1$  为标准大气压取 100 kPa;  $p_2$  为空冷岛压力,本文取 34 kPa;  $\alpha_1$  为压力为  $p_1$ 、温度 60 °C 时,氨的相对挥发度,本文取 18.25;  $\alpha_2$  为压力为  $p_2$ 、温度 60 °C 时,氨的相对挥发度。

根据公式(4)计算,空冷凝汽器压力为 34 kPa、排汽温度 60 °C 下氨的相对挥发度为 53.68。

由于蒸汽分配管湿蒸汽的平均湿度为 5%<sup>[3]</sup>,初

凝液与蒸汽的体积比为 1:19,初凝液的氨质量浓度计算公式如下:

$$v = v_g + v_l = 20v_l \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{y_{\text{NH}_3}}{x_{\text{NH}_3}} = \frac{c_g}{c_l} \quad (6)$$

$$n = n_g + n_l = c_l v_l + c_g v_g = \frac{(19\alpha_2 + 1)c_l v}{20} \quad (7)$$

$$c = \frac{n}{v} = \frac{(19\alpha_2 + 1)v_l c_l}{20v_l} = \frac{(19\alpha_2 + 1)c_l}{20} \quad (8)$$

式中:  $v_g$  为汽相体积, L;  $v_l$  为液相(初凝液)体积, L;  $v$  液相与汽相的总体积, L;  $c_g$  为汽相氨质量浓度, mg/L;  $c_l$  为液相(初凝液)氨质量浓度, mg/L;  $c$  为给水中氨质量浓度, mg/L;  $n$  为给水中氨的物质的量, mmol/L;  $n_l$  为初凝液中氨的物质的量, mmol/L;  $n_g$  为汽相中氨的物质的量, mmol/L。

根据公式(8)可知,不同锅炉给水 pH 值下对应的直接空冷凝汽器初凝液中氨质量浓度和 pH 值计算结果见表 1。由表 1 可知,即使给水加氨量大幅增加,初凝液氨质量浓度和 pH 值均处于较低水平,与实测结果基本一致<sup>[2]</sup>。

表 1 初凝液氨质量浓度和 pH 值

Tab.1 The ammonia mass concentrations and pH values of initial condensate

给水 pH 值 (25 °C)	给水氨质量 浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	初凝液氨质量 浓度/(μg·L <sup>-1</sup> )	初凝液 pH 值 (25 °C)
9.00	0.27	5.20	7.48
9.20	0.51	10.00	7.76
9.40	1.04	20.30	8.05
9.60	2.21	43.30	8.35

## 2 实验装置及实验方法

### 2.1 实验条件

根据《火电厂汽水化学导则第 1 部分:锅炉给水加氧处理导则》(DL/T 805.1—2021)规定,直流锅炉采用给水加氧处理时,省煤器入口 pH 值控制在 9.00~9.30。根据理论计算,省煤器入口 pH 值为 9.00 时,初凝液 pH 值最低为 7.48,为了验证药剂的防腐效果,实验以 pH 值 7.48 作为基底 pH 值。

因直接空冷凝汽器初凝液具有低 pH 值和接近无氧的特点<sup>[9]</sup>:一方面可加入汽液分配系数低的有机胺类碱化剂提高初凝液 pH 值,乙醇胺具有汽液分配系数低,能提高初凝液 pH 值的特点,在直接空冷凝汽器防腐中已有应用<sup>[8]</sup>;另一方面加入汽液

分配系数低的氧化剂提高初凝液氧化还原电位，过氧化氢具有汽液分配系数低的特点，可提高初凝液氧化还原电位，完全分解后为水和氧气，少量未分解的过氧化氢对精处理树脂和水汽系统均无影响<sup>[10-14]</sup>。因此，实验选择乙醇胺作为碱化剂，过氧化氢作为氧化剂。根据直接空冷凝汽器负压环境，初凝液中基本无氧，因此控制实验台溶氧小于 5 μg/L。

某 660 MW 机组空冷凝汽器运行温度 40~60 °C，由于温度越高腐蚀速率越高<sup>[1]</sup>，为了验证药剂在最极端条件下的防腐效果，选择最高温度 60 °C 为实验温度。该机组蒸汽流速为 80 m/s，蒸汽流速与初凝液流速具有一定相关性<sup>[15-17]</sup>，通常初凝液流速会达

到 10~20 m/s，初凝液流速越大，腐蚀速率越高<sup>[18]</sup>，为了验证药剂的在高流速下防腐效果，选择初凝液流速 20 m/s 作为实验流速。

### 2.2 实验装置

空冷凝汽器初凝液流动加速腐蚀实验在自制的动态腐蚀模拟实验装置上进行，动态腐蚀模拟实验装置如图 1 所示。实验装置由动态循环模块、加药模块、加热冷却模块、监测模块、电控模块组成，最大流速为 22 m/s，溶解氧可维持 ≤5 μg/L，药剂质量浓度 0~2 000 μg/L，且连续可调，pH 值和温度可控，按照水流方向分为 180°试样管和 90°试样管，并安装至对应的流通池中。

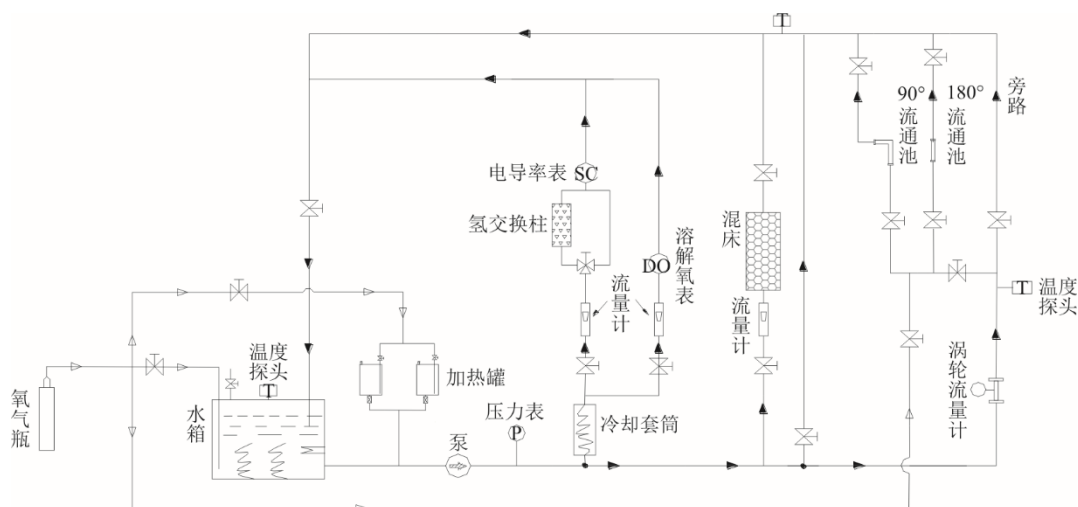


图 1 动态腐蚀模拟实验装置  
Fig.1 Schematic diagram of the dynamic corrosion simulating test device

实验开始前，向水箱加入 120 L 高纯水后关闭水箱进水口，持续向水箱中充入氮气(纯度为 99.99%)，通过混床持续净化系统至水电导率小于 0.10 μS/cm 后，关闭混床进出口阀门，水流通过旁路回至水箱，打开水箱加热，至试样管出口温度稳定至 60 °C，溶解氧小于 5 μg/L，调节氨水加药量，使系统溶液 pH 值至基底 pH 值，通过加药罐加入所需碱化剂或氧化剂，打开充满氮气的 180°流通池管路或 90°流通池管路，调节阀门使流通池试样管表面流速为 20 m/s。

### 2.3 实验方法

试样管材质为 Q235 碳钢，测试方法为质量损失法，180°流通池试样管与 90°流通池试样管的结构如图 2 所示。180°流通池串联 3 个圆柱体试样管，180°试样管内径 10 mm，壁厚 4 mm，高度 33 mm，试样管间通过不锈钢夹板进行固定，不锈钢夹板内部设计凹槽，聚四氟乙烯垫片放置于凹槽内，试样管与不锈钢夹板采用断面密封，180°试样管内的流

速为 20 m/s，水流方向不发生改变。

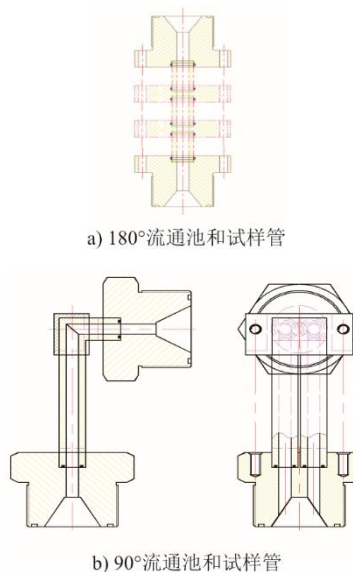


图 2 流通池和试样管结构  
Fig.2 Structural diagram of flow cell and sample tube tested

90°流通池并联2个外方内圆的直管,内径7 mm,壁厚3 mm,进垂直管长101 mm,出垂直管长35 mm。试样管通过90°不锈钢夹板固定,螺纹板槽内部设计双凹槽,试样管断面设计小凹槽,凹槽内有O型圈,与螺纹板槽采用断面密封,90°试样管内流速为20 m/s,水流方向发生90°改变。

用无水乙醇浸泡擦洗试样管,吹干放置于干燥器中称重,称重后将试样管安装于流通池中,根据条件设置动态模拟腐蚀实验装置,每组试样管实验时间为72 h。实验过程中用除湿器对实验室进行除湿,保证流通池附近空气湿度小于50%。实验结束后,取出流通池中的试样管,用电化学方法去除试样管内壁腐蚀产物<sup>[19]</sup>,并吹干放置于干燥器中称重。

根据质量损失法计算流动加速腐蚀速率<sup>[20]</sup>:

$$v = \frac{87\ 600 \times \Delta m}{A \times T \times D} \quad (9)$$

式中:  $v$  为流动加速腐蚀速率, mm/a;  $\Delta m$  为腐蚀实验中试样管的质量损失, g;  $A$  为试样管内表面积, 180°试样管内表面积为 10.36 cm<sup>2</sup>, 90°试样管内表面积为 26.59 cm<sup>2</sup>;  $T$  为实验时间, h;  $D$  为试样管材质密度, 碳钢取 7.8 g/cm<sup>3</sup>。

乙醇胺质量浓度采用 DIONEX-2000 离子色谱进行测定<sup>[21]</sup>, 过氧化氢质量浓度采用日立 U2900 分光光度计进行测定<sup>[22]</sup>。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 碱化剂质量浓度对流动加速腐蚀速率的影响

控制流通池出口水温 60 °C, 溶解氧 < 5 μg/L, 用氨水调节 pH 值至基底 pH 值, 调节流通池试样管的流速为 20 m/s, 向系统中加入碱化剂, 使溶液中含碱化剂质量浓度分别为 0、0.32、0.60、1.00、1.33 mg/L, 对应 pH 值如图 3 所示, 对 180°试样管和 90°试样管进行流动加速腐蚀速率监测, 实验结果如图 4 所示。

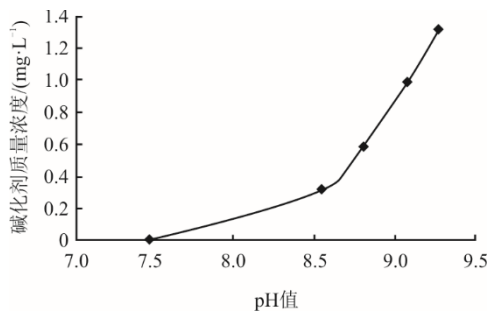


图 3 碱化剂质量浓度与初凝液 pH 值关系

Fig.3 The relationship between the mass concentration of alkalinizing agent and the pH value of initial coagulant

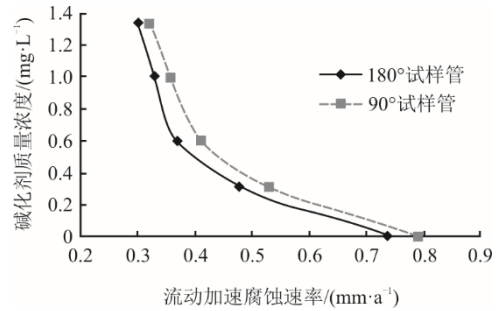


图 4 试样管流动加速腐蚀速率随碱化剂质量浓度变化趋势  
Fig.4 Change trends of the flow accelerated corrosion rate of sample tubes with mass concentration of alkalinizing agent

由图 3 和图 4 可知,随着碱化剂质量浓度增大, pH 值升高, 180°试样管和 90°试样管流动加速腐蚀速率均呈下降趋势, 90°试样管比 180°试样管的流动加速腐蚀速率略高。这表明碱化剂可提高初凝液 pH 值, 水流方向的急剧改变对流动加速腐蚀影响较小。

在 pH 值和溶解氧较低的环境中, 铁在水中的溶解度较高, 金属基体本身的腐蚀速率较大, 磁性氧化铁保护层也会加速溶解<sup>[23]</sup>。但若溶液中含碱化剂质量浓度为 1.0 mg/L, 溶液 pH 值升高至 9.0 以上, 流动加速腐蚀速率就会大幅度下降, 初凝液 pH 值升高对碳钢的腐蚀速率具有较大的抑制作用<sup>[24]</sup>。在水流速度方向发生较大改变时, 磁性氧化铁保护层被破坏, 但与溶液 pH 值的影响比较, 水流方向对腐蚀速率的影响较小。直接空冷凝汽器发生腐蚀的根本原因是液相的 pH 值偏低, 且接近无氧。因此, 提高液相 pH 值可抑制空冷凝汽器腐蚀。

#### 3.2 氧化剂质量浓度对流动加速腐蚀速率的影响

控制流通池水温 60 °C, 溶解氧小于 5 μg/L, 用氨水调节 pH 值至基底 pH 值, 调节流通池试样管的流速为 20 m/s, 向系统中加入氧化剂, 使溶液氧化剂质量浓度为 0、0.1、0.3、0.6、1.3 mg/L, 对 180°试样管和 90°试样管进行流动加速腐蚀速率监测, 实验结果见表 2。

表 2 氧化剂质量浓度对试样管流动加速腐蚀速率的影响  
Tab.2 Effect of oxidizer mass concentration on flow accelerated corrosion rate of sample tube

氧化剂质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	180°试样管流动加速腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )	90°试样管流动加速腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )
0	0.7400	0.7900
0.1	0.0266	0.0314
0.3	0.0196	0.0211
0.6	0.0125	0.0135
1.3	0.0040	0.0044

由表 2 可知：pH 值不变，随着氧化剂质量浓度的增加，流动加速腐蚀速率降低；且溶液中含有少量氧化剂时，流动加速腐蚀速率急剧降低；水流方向的较大改变对腐蚀速率的影响较小。这表明加入少量氧化剂便可抑制直接空冷凝汽器腐蚀。

在低温（60℃）水环境中，当水溶液呈中性且接近无氧时，铁在负极失去电子生成 Fe<sup>2+</sup>，再被氧化剂分解的氧原子氧化为 Fe<sup>3+</sup> 的氢氧化物，再发生一系列的还原和脱水反应，最终在金属表面生成一层致密的钝化膜<sup>[25]</sup>。

### 3.3 不同药剂对流动加速腐蚀速率的影响

控制流通池水温 60℃，溶解氧小于 5 μg/L，用氨水调节 pH 值至基底 pH 值，调节流通池试样管的流速为 20 m/s，溶液中分别含有相同质量浓度碱化剂和氧化剂时，用质量损失法对 180°和 90°试样管流动加速腐蚀速率进行监测，实验结果如图 5 所示。

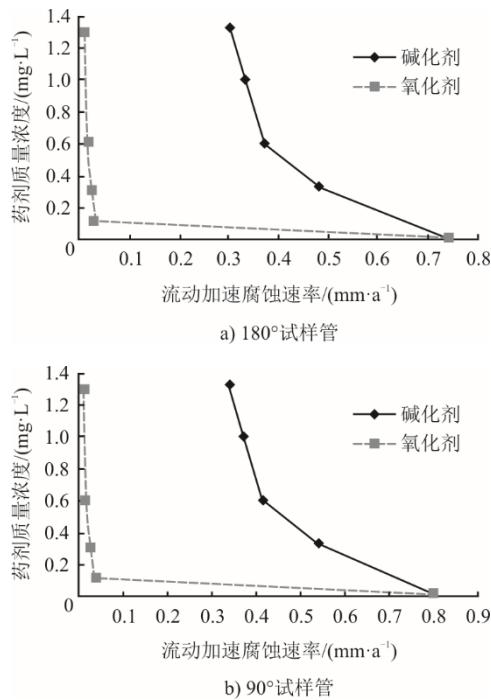


图 5 不同药剂对试样管流动加速腐蚀速率的影响

Fig.5 The effects of different chemicals on flow accelerated corrosion rate of the sample tubes

由图 5 可知，试样管在氧化剂环境中的流动加速腐蚀速率低于碱化剂环境中的流动加速腐蚀速率。溶液中含少量氧化剂时，试样管的流动加速腐蚀速率出现大幅度下降，随着氧化剂质量浓度的升高，试样管的流动加速腐蚀速率基本平稳。当溶液中氧化剂质量浓度是碱化剂质量浓度的 10% 时，试样管的流动加速腐蚀速率远低于加入碱化剂的试样管流

动加速腐蚀速率。这表明，氧化剂和碱化剂均能对直接空冷凝汽器进行有效防腐，但氧化剂比碱化剂抑制直接空冷凝汽器流动加速腐蚀效果更好，初凝液中含少量氧化剂便可使防腐效果达到最优。

## 4 经济效益分析

以北方某 660 MW 机组为例，单台机组年利用小时数以 4 000 h 计。该机组给水采用 3 种工况：1) 现阶段为 AVT(O) 工况（加氨工况），给水 pH 值控制 9.4~9.8（pH 值取中间值 9.6 进行经济成本计算），以提高直接空冷凝汽器初凝液 pH 值，抑制其腐蚀；2) 通过降低给水加氨量（pH 值为 9.0），向直接空冷凝汽器中加入 1 mg/L 碱化剂（加碱化剂工况），提高初凝液 pH 值；3) 通过降低给水加氨量（pH 值为 9.0），向直接空冷凝汽器中加入 0.1 mg/L 氧化剂（加氧化剂工况），提高初凝液氧化还原电位，抑制直接空冷凝汽器腐蚀。根据这 3 种工况的加药成本和精处理再生所需成本进行经济性分析，结果见表 3。

表 3 某 660 MW 直接空冷机组 3 种工况经济成本对比  
单位：万元/a

Tab.3 Comparison of economic cost of a 660 MW direct air cooling unit under three working conditions

成本	加氨工况	加碱化剂工况	加氧化剂工况	备注
加氨费用	5.95	0.81	0.81	加氨工况，pH 值 9.6；加碱化剂工况和加氧化剂工况，给水 pH 值 9.0
再生用酸费用	5.30	1.63	0.73	加氨工况混床理论再生 65 次，加碱化剂工况混床理论再生 20 次，加氧化剂工况理论再生 9 次
再生用碱费用	23.63	7.27	3.27	
再生用除盐水费用	23.40	7.20	3.24	
平均每年酸洗费用	6.67	3.33	3.33	加氨工况按 3 年酸洗 1 次，加碱化剂工况和加氧化剂工况按 6 年酸洗 1 次
其他药剂用		0.53	1.20	其他药剂费用为碱化剂或氧化剂费用
总费用	64.95	20.77	12.58	
节省费用		44.18	52.37	

由表 3 可知，某 660 MW 机组直接空冷凝汽器现阶段采用加氨工况，每年精处理再生和药剂总费用为 64.95 万元，采用加碱化剂工况，每年可节省费用 44.18 万元，采用加氧化剂工况，每年可节省 52.37 万元，如果算上再生时的电费、压缩空气费

用、人力成本以及再生废液处理成本等,节约的费用将更多。这表明,采用加碱化剂或加氧化剂不仅能够有效抑制直接空冷凝汽器腐蚀,而且节省的经济效益非常显著,采用加氧化剂节省的费用更多。

## 5 结 论

为了解决直接空冷凝汽器腐蚀问题,本文通过自主研发的动态腐蚀模拟实验装置模拟初凝液实际运行工况,选取汽液分配系数低的碱化剂和氧化剂对碳钢进行流动加速腐蚀实验研究,得出以下结论。

1) 汽液分配系数低的碱化剂与氧化剂均能有效抑制直接空冷凝汽器液相流动加速腐蚀。

2) 水流方向的急剧改变对流动加速腐蚀影响较小。

3) 同等条件下,碳钢在氧化剂环境中的流动加速腐蚀速率远低于碱化剂环境中的流动加速腐蚀速率。

4) 直接空冷凝汽器加入碱化剂时,单台机组每年可节省费用 44.18 万元。直接空冷凝汽器加入氧化剂时,单台机组每年可节省费用 52.37 万元,经济效益显著。

5) 为有效抑制直接空冷凝汽器液相流动加速腐蚀,不仅需选择合适的防腐药剂,加药点的位置同等重要,这将是下一步研究的重点。

### [参 考 文 献]

[1] 孟龙,杨静,孙本达,等.直接空冷凝汽器流动加速腐蚀的影响因素[J].热力发电,2014,43(12):118-122.  
MENG Long, YANG Jing, SUN Benda, et al. Factors influencing flow accelerated corrosion in air cooling condensers[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(12): 118-122.

[2] 邓宇强,李海平,张祥金,等.直接空冷凝汽器运行腐蚀原因分析及控制策略[J].中国电力,2015,48(5):12-16.  
DENG Yuqiang, LI Haiping, ZHANG Xiangjin, et al. Corrosion and protection of air-cooled condensers in thermal power plant[J]. Electric Power, 2015, 48(5): 12-16.

[3] 李志刚,田泽中,黄万启.直接空冷300 MW机组凝汽器流动加速腐蚀研究[J].热力发电,2011,40(12):34-37.  
LI Zhigang, TIAN Zezhong, HUANG Wanqi. Study on flow-accelerated corrosion of condenser for direct-air-cooled 300 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(12): 34-37.

[4] 倪瑞涛.直接空冷机组流动加速腐蚀的防护研究[D].西安:西安科技大学,2017:5.  
NI Ruitao. Study of flow accelerated corrosion inhibition for direct air cooling unit[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017: 5.

[5] 肖剑峰,朱志平,乔越,等.直接空冷凝汽器20#钢与3004铝合金管材的模拟腐蚀实验研究[J].腐蚀科学与

防护技术,2018,30(1):41-48.  
XIAO Jianfeng, ZHU Zhiping, QIAO Yue, et al. Corrosion characteristics of 20# steel and al-alloy 3004 under simulated conditions for air-cooled condenser tubes[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(1): 41-48.

[6] 游兆金,沈亚芳,卢叶艇.核电厂二回路系统有机胺应用研究[J].热力发电,2024,53(3):74-80.  
YOU Zhaojin, SHEN Yafang, LU Yeting. Organic amines application research in secondary cycle of nuclear power plant[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 74-80.

[7] 朱志平,杨磊,乔越,等.乙醇胺汽液分配系数及高温分解特性的试验研究[J].中国电力,2018,51(5):128-132.  
ZHU Zhiping, YANG Lei, QIAO Yue, et al. Experimental study on gas-liquid partition coefficient and thermal decomposition characteristics of ethanolamine in high-temperature aqueous systems[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 128-132.

[8] 胡振华,黄万启,田泽中.火电厂直接空冷系统腐蚀与防护的研究[J].腐蚀科学与防护技术,2014,26(6):564-566.  
HU Zhenhua, HUANG Wanqi, TIAN Zezhong. Study on corrosion and protection of direct air cooling system in thermal power plant[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(6): 564-566.

[9] 黄万启,田泽中,胡振华,等.直接空冷系统金属部件的腐蚀与防护[J].热力发电,2014,43(9):113-123.  
HUANG Wanqi, TIAN Zezhong, HU Zhenhua, et al. Metal corrosion and protection technology for direct air cooling systems[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(9): 113-123.

[10] 王犇,陈萌萌,张帆.过氧化氢提纯净化技术研究进展[J].无机盐工业,2019,51(6):1-4.  
WANG Ben, CHEN Mengmeng, ZHANG Fan. Research progress on purification technology of hydrogen peroxide[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019, 51(6): 1-4.

[11] ZHANG F, CHEN M, JIA X, et al. Research on the effect of resin on the thermal stability of hydrogen peroxide[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 126(6): 1-6.

[12] 陈军安.树脂吸附纯化工业过氧化氢的研究[J].福建化工,2005(1):25-29.  
CHEN Jun'an. Purifying technology grade hydrogen peroxide by using resin[J]. Fujian Chemical industry. 2005(1): 25-29.

[13] 马敬环,唐娜,赵永宏.树脂法净化过氧化氢溶液的安全性能研究[J].精细化工,2006(9):878-881.  
MA Jinghuan, TANG Na, ZHAO Yonghong. Safety study of resin method for purify hydrogen peroxide solution[J]. Fine Chemicals, 2006(9): 878-881.

[14] 朱志平,周瑜,赵永福,等.强酸阳树脂在过氧化氢中的氧化分解特性研究[J].工业水处理,2012,32(9):59-61.  
ZHU Zhiping, ZHOU Yu, ZHAO Yongfu, et al. Characteristics of oxidation and decomposition of strong acidic cation exchange resin in hydrogen peroxide[J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32(9): 59-61.

[15] 李琼涛.气流对水平管外降膜流动和传热的影响[D].西安:西安建筑科技大学,2023:5.  
LI Qiongtao. Influence of gas stream on falling flow and heat transfer of horizontal tube[D]. Xi'an University of

- Architecture and Technology, 2023: 5.
- [16] 苗玉祥. 管内凝结液膜厚度动态特性的激光干涉测量及数值研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023: 5.  
MIAO Yuxiang. Laser interferometry and numerical study on the dynamic characteristics of condensed liquid film thickness in tubes[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023: 5.
- [17] 邓慧, 白焰, 李欣欣, 等. 交界面剪切力对倾斜扁平管内蒸汽凝结影响的 CFD 模拟[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1215-1224.  
DENG Hui, BAI Yan, LI Xinxin, et al. CFD simulation on effect of interfacial shear force on water vapor condensation in inclined flat tube[J]. CIESC Journal, 2016, 67(4): 1215-1224.
- [18] 潘代龙, 司晓东, 吕金洪. 流速对碳钢弯管段流动加速腐蚀速率的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(5): 1064-1070.  
PAN Dailong, SI Xiaodong, LYU Jinhong. Effect of flow velocity on flow accelerated corrosion rate of carbon steel elbow[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(5): 1064-1070.
- [19] 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除: GB/T 16545—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1.  
Corrosion of metals and alloys. Removal of corrosion products from corrosion test specimens: GB/T 16545—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015: 1.
- [20] 王力, 罗坤杰, 方可伟, 等. 在不同碱化剂溶液中 TU48C 钢的均匀腐蚀及流动加速腐蚀速率[J]. 机械工程材料, 2017, 41(8): 80-83.  
WANG Li, LUO Kunjie, FANG Kewei, et al. Uniform corrosion and flow accelerated corrosion rates of tu48c steel in different alkalizer solutions[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(8): 80-83.
- [21] 发电厂水汽中乙醇胺浓度的测定 离子色谱法: DL/T 1479—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 5.  
Analytical method for ethanolamine in steam and water in power plant ion chromatography: DL/T 1479—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 5.
- [22] 食品中过氧化氢残留量的测定: GB 5009.226—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 8.  
Determination of hydrogen peroxide residues in foods: GB 5009.226—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 8.
- [23] 孟龙, 黄万启, 孙本达, 等. 空冷凝汽器流动加速腐蚀的影响因素[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(1): 65-68.  
MENG Long, HUANG Wanqi, SUN Benda, et al. Factors influencing flow accelerated corrosion of air cooling condenser[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(1): 65-68.
- [24] 朱志平, 肖剑峰, 乔越, 等. 直接空冷凝汽器 3 种可选材质的腐蚀性能[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(1): 84-91.  
ZHU Zhiping, XIAO Jianfeng, QIAO Yue, et al. Electrochemical study of three adaptive materials for air-cooled condensers duct[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 14(1): 84-91.
- [25] 杨圣超, 白春会. 过氧化氢钝化电化学机理及应用[J]. 山东电力技术, 2012(6): 74-76.  
YANG Shengchao, BAI Chunhui. Hydrogen peroxide passivation electrochemical mechanism and application[J]. Shandong Electric Power, 2012(6): 74-76.

(责任编辑 杨嘉蕾)

## 广告目次

《热力发电》 .....	封三
南京常荣声学股份有限公司 .....	后彩插 1
西安热工研究院有限公司 .....	后彩插 2—27
恩德斯豪斯(中国)自动化有限公司 (E+H) .....	后彩插 28