

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.01.010

基于微生物法处理循环冷却水的试验研究

Experimental study on circulating cooling water treatment
by microbiological method

孙振宇^{1,2}, 沈明忠¹
SUN Zhenyu^{1,2}, SHEN Mingzhong¹

(1. 中国华电科工集团有限公司, 北京 100070; 2. 华电水务科技股份有限公司, 北京 100070)
(1. China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China; 2. Huadian
Water Technology Company Limited, Beijing 100070, China)

摘要:为更好地节约工业用循环冷却水,模拟电厂循环冷却水(以下简称循环水)系统运行工况,开展了循环水动态模拟试验,监测投加复合微生物菌剂后污垢热阻、腐蚀速率的变化情况。通过测试循环水中电导率、pH 值等指标证明,投加了菌剂的试验 II 组的污垢热阻和腐蚀率变化速度均小于不投加菌剂的 I 组,说明复合微生物菌剂起到了阻垢缓蚀的作用。处理循环水时,微生物菌剂比化学药剂更加绿色、高效、环保,可实现高浓缩倍率循环水下机组稳定运行,有良好的经济性。

关键词:循环冷却水;微生物菌剂;缓蚀阻垢;环保;经济效益;污垢热阻

中图分类号:X 52 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)01-0050-04

Abstract: In order to further save industrial circulating cooling water, circulating cooling water simulation test was carried out under working condition of the circulating cooling water system in a power plant. The variations of fouling thermal resistance and corrosion rate after adding composite microbial agent were monitored. Testing the conductivity and pH of the circulating water, it is proved that the variation rates of fouling thermal resistance and corrosion rate in the group II that added composite microbial agent were lower than that of group I without agent. It is indicated that the composite microbial agent works well in scale and corrosion inhibition. In the process of circulating cooling water treatment, composite microbial agent is greener, more efficient and more environmental than chemical doses. It can operate stably under high concentration ratio, which is of favorable economical benefits.

Keywords: circulating cooling water; composite microbial agents; corrosion and scale inhibition; environmental protection; economic benefits; fouling thermal resistance

0 引言

在钢铁、电力、石油、化工、纺织等行业的工厂中,大量的热量通过冷却塔散发到大气中,不仅浪费能量,而且浪费了大量水资源。2015 年颁布的《水污染防治行动计划》(简称水十条)明确指出要提高用水效率,建立水资源评估体系,将完成节约水资源目标任务纳入地方政府绩效评估。过去 20 年,工业用水总量呈先上升后下降的趋势,2015 年工业用水占总用水量的 21.9%,生活用水占 13.0%,农业用水占 63.1%。在工业用水中,循环冷却水的用水量最大(一般占工业用水总量的 60.0% 以上):在化学工业中

循环冷却水约占 65.0%;在石油工业中约占 80.0%;在电力行业中约占 70.0%~80.0%。因此,循环冷却水是节约工业用水时的首要目标。

针对循环冷却水(以下简称循环水)系统存在腐蚀、结垢以及微生物滋生等问题,最为常见的处理方法是向系统中添加化学药剂^[1-2]。此方法适用水质范围广泛、技术成熟,但处理成本高且水中的溶解性固体易对水环境产生二次污染^[3]。而微生物法具有高效、经济、环保的优点,可弥补传统化学药剂的缺陷,是未来循环水处理的发展方向^[4-8]。

1 循环水模拟试验

本文对某电厂循环水开展了 15 d 的模拟试验,对比采用和未采用微生物法的循环水水质。采用微

收稿日期:2019-08-10;修回日期:2019-09-27

生物法处理循环水时,要求实验室内的水质条件与原系统循环水的水质一致,形成在实验室条件下微生物能够生长繁殖的局部环境并避免实验室条件与现场实际情况出现较大偏差^[9]。

1.1 菌种

根据循环水的水质特征以及微生物特点筛选微生物、配制复合菌剂。本试验的复合微生物菌剂主要由酵母菌、乳酸菌、光合细菌、芽孢杆菌组成,比例为 3: 3: 1: 2,菌液浓度大于 109 CFU/ml,菌液体积分数为保有水量的 1%^[10-14]。

1.2 试验装置

根据试验的技术要求,选定电厂循环冷却水动态模拟实验装置为本试验的主要设备(如图 1 所示)。该装置可以同时做 2 组平行试验,对比性强。由电脑和现场电控柜双向控制,并配接在线酸度计、电导仪、腐蚀仪、浊度仪、污垢热阻仪等测量仪器。装置可连续工作,具有自动补水功能,可全面检测循环水各项指标。装置通过循环水电导率来控制排污电磁阀的开关,实现自动排污功能。试验中试管、挂片选用的材质是 316L 不锈钢。



图 1 循环冷却水动态模拟试验装置

Fig.1 Circulating cooling water dynamic simulation test device

2 测试指标

2.1 常规水质指标

循环水水质在线监测指标有电导率(EC)、pH 值、温度。

2.2 其他监测指标

试验中,换热效率会随着试管水侧污垢的沉积而逐渐降低,反映在模拟换热器上,为出、入口水温温差减小。若控制进水口水温恒定、流量恒定、蒸汽温度恒定,则可用以下公式计算其瞬时污垢热阻和腐蚀速率^[14]。

$$R = \frac{\pi DL}{2GC_p} \left(\frac{2t - t_{out} - t_{in}}{t_{out} - t_{in}} - \frac{2t - t_{out}' - t_{in}'}{t_{out}' - t_{in}'} \right),$$

$$W = \int_{t_2}^{t_1} R,$$

式中: R 为瞬时污垢热阻, $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C / kJ$; t_{out}, t_{in} 为瞬时循环水出、入口水温, $^\circ C$; t_{out}', t_{in}' 为清洁管时循环水出、入口水度, $^\circ C$; G 为循环水量, kg/h ; D 为换热管内径, m ; C_p 为循环水定压比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; t 为换热器蒸汽平均温度, $^\circ C$; L 为换热管有效长度, m ; W 为污垢热阻, $m^2 \cdot ^\circ C / kW$; t_1, t_2 分别为试验开始和结束时刻。

腐蚀速率

$$F = \frac{C\Delta W}{At\rho},$$

式中: F 为腐蚀速率, mm/a ; ΔW 为试件的质量损失, g ; A 为试件的腐蚀表面积, cm^2 ; t 为试验时间, h ; ρ 为试件的密度, kg/m^3 ; C 为计算常数。

3 试验结果的研究分析

试验分为 2 组, I 组作为对照组, 不加菌剂, II 组作为试验组, 投加复合微生物菌剂。通过对比多个指标评价微生物菌剂对循环水系统阻垢、防腐蚀效果。

3.1 污垢热阻

瞬时污垢热阻经过累积成为污垢热阻, 它表示换热设备传热面上因沉积物而导致传热效率下降的程度。污垢热阻越大, 换热器传热系数越小, 使换热器的传热性能越差。在 2 组试验中, 污垢热阻均随着时间的推移而增加, I 组污垢热阻明显高于 II 组(如图 2 所示)。

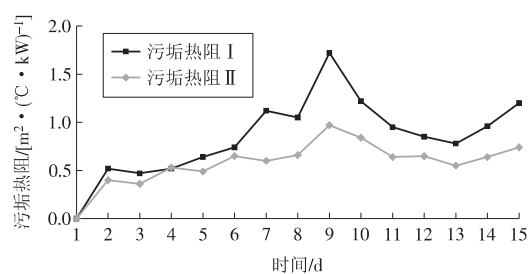


图 2 污垢热阻变化情况

Fig.2 Change of the dirt thermal resistance

3.2 腐蚀速率

腐蚀速率又称腐蚀率, 通常表示单位时间内的腐蚀程度。在 2 组试验中, II 组的腐蚀率显著低于 I 组(如图 3 所示)。GB 50050—2017《工业循环冷却水处理设计规范》中规定: 不锈钢设备传热面水侧腐蚀速率应小于 0.005 mm/a, 从试验结果看, 使用菌剂的 II 组可以达到这一要求。

3.3 浓缩倍率

在试验期间, 循环水不断浓缩, 电导率从 1 700 $\mu S/cm$ 增长到 8 650 $\mu S/cm$ 。2 组的电导率皆呈现

线性增长且走势相同(如图 3—4 所示),说明复合微生物菌剂对于减少循环水中的无机离子并无显著作用,对应的浓缩倍率变化如图 5 所示。

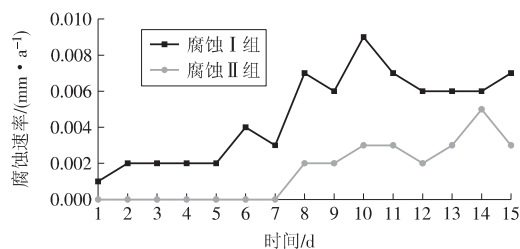


图 3 腐蚀速率变化情况

Fig. 3 Change of the corrosion rate

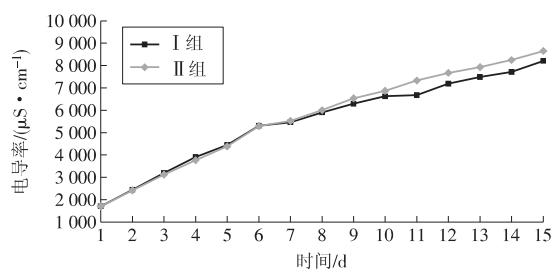


图 4 电导率变化情况

Fig. 4 Change of conductivity

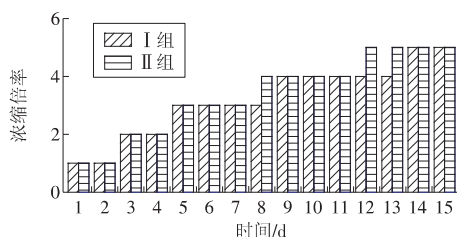


图 5 浓缩倍率变化情况

Fig. 5 Change of concentration ratio

试验中循环水 pH 值在 8.0~8.8 之间变化,呈上升趋势,II 组的 pH 值整体低于 I 组,由图 6 还可以看出复合微生物菌剂具有调节循环水酸碱的作用。

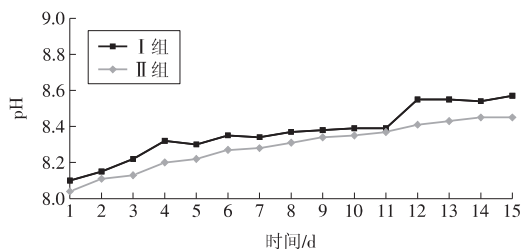


图 6 pH 值的变化情况

Fig. 6 Change of pH

3.4 阻止结垢

试验结束后,对挂片、腐蚀仪探头进行拍照对比(如图 7—8 所示):I 组的结垢量明显多于 II 组;I 组结垢较硬,呈现块状、粒状、片状;II 组结垢软而有黏性、有湿润感。这说明复合微生物菌剂起到了阻止结垢的作用。

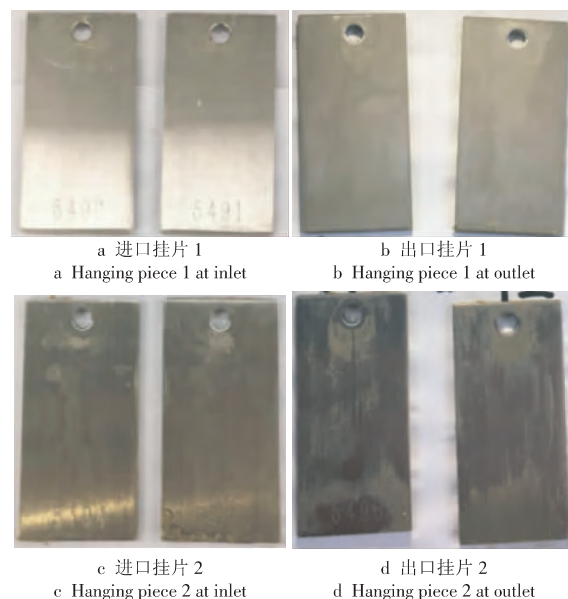


图 7 挂片对比

Fig. 7 Comparison of hanging pieces



图 8 腐蚀仪探头的对比

Fig. 8 Comparison of corrosion tester probes

在对比试验中,循环水的浓缩倍数从 1.0 升至 5.0 组和 I 组和 II 组的污垢热阻、腐蚀率均增大,但 II 组的增长速率明显低于 I 组的,同时从 2 组试验的照片可以清晰地看出结垢量的差别。

4 效益

4.1 环境效益

微生物菌剂成分均绿色、安全、无毒害,不会对环境产生二次污染。同时微生物具有自适应的能力,可使循环水水质相对稳定。相比主流化学处理法,微生物处理法的排污水中氮、磷含量低,避免了由于水体富营养化对水生生物造成的不良影响。

4.2 药剂成本

与其他水处理方法相比,复合微生物菌剂具有

显著的优势,可实现高浓缩倍率下低结垢、低腐蚀的目标,从而提高运行循环水的浓缩倍数,节约水资源、降低运行成本。由于复合菌剂集缓蚀、阻垢、抑制菌藻的功能为一体,投加系统简单,减低了循环水的处理成本。另外,微生物可自我繁殖,需投加的菌剂剂量远远低于化学类药剂。

4.3 节水效益

目前,大多数火电厂循环水的浓缩倍率都控制在 3.0 左右,装机容量越大浓缩倍数越高,节水量就越大。假定循环水系统蒸发损失为 1.5%,风吹泄漏损失为 0.1%,浓缩倍率分别为 3.0 和 5.0,计算出不同装机容量的机组的补充水量见表 1。假设电厂年发电小时数为 4 000,水按 2 元/t 计费,则不同装机容量对应的节水量和节水费如图 9 所示。以装机容量 600 MW 机组为例,1 台机组 1 年节水量达 100 万 t,即节约费用 200 万元。

表 1 不同装机容量不同浓缩倍数下补充水对比

Tab.1 Comparison of supplementary water under different concentration ratios of different installed capacity

单机容量/ MW	补充水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		节水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
	浓缩倍数 3.0	浓缩倍数 5.0	
200	562.5	468.8	93.8
300	720.0	600.0	120.0
600	1 491.8	1 243.1	248.6
1 000	2 295.0	1 912.5	382.5

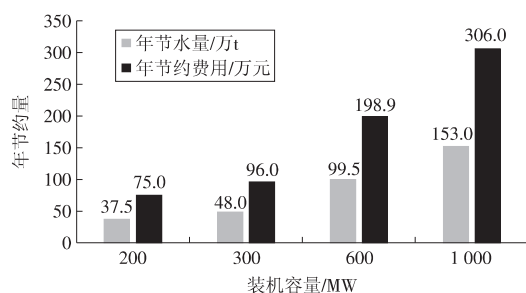


图 9 节水量和费用

Fig. 9 Water saving amount and cost

5 结论

根据循环水水质特征和微生物特点,选取微生物配制复合菌剂进行水处理,主菌剂要由酵母菌、乳酸菌、光合细菌、芽孢杆菌等组成。对比不加菌剂的 I 组与投加菌剂的 II 组的各项指标均,2 组试验中的污垢热阻和腐蚀率均随循环水的浓缩倍率增加而变大,但 II 组的变化速度小于 I 组,从而说明复合微生物菌剂起到了阻垢缓蚀的作用,而且可以保证系统在高浓缩倍率下的绿色、高效、环保、稳定运行。

参考文献:

- [1] 鲍其鼎. 我国循环冷却水处理 30 年 [J]. 工业水处理, 2010, 30(12): 1-11.
BAO Qinai. Circulating cooling water treatment over the last thirty years in China [J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(12): 1-11.
- [2] 潘丽娜. 工业循环冷却水添加阻垢缓蚀剂的试验研究 [J]. 华电技术, 2017, 39(02): 31-34, 37, 77.
PAN Lina. Experimental study on adding scale and corrosion inhibitor to industrial circulating cooling water [J]. Huadian Technology, 2017, 39(2): 31-34.
- [3] 谭明德. 循环冷却水加药处理及分析 [J]. 华电技术, 2011, 33(12): 46-47.
TAN Mingde. Treatment and analysis of circulating cooling water by adding chemicals [J]. Huadian technology, 2011, 33(12): 46-47.
- [4] 杨涵晟, 陈晨, 王占生, 等. 循环冷却水处理方法研究进展 [J]. 电力科技与环保, 2019, 35(3): 36-37.
YANG Hansheng, CHEN Chen, WANG Zhansheng, et al. Research status of the circulation cooling water treatment technology [J]. Electric Power Environmental Protection, 2019, 35(3): 36-37.
- [5] 马双忱, 马岚, 刘畅, 等. 电厂循环冷却水处理技术研究与应用进展 [J]. 化学工业与工程, 2019, 36(1): 38-47.
MA Shuangchen, MA Lan, LIU Chang, et al. Progress in research and application of circulating cooling water treatment technologies in power plants [J]. Chemical Industry and Engineering, 2019, 36(1): 38-47.
- [6] 韩勇. 工业循环冷却水处理的机理与方法的相关研究 [J]. 化工管理, 2018(27): 51.
HAN Yong. Relevant research on the mechanism and method of industrial circulating cooling water treatment [J]. Chemical Enterprise Management, 2018(27): 51.
- [7] 刘媛. 去除循环冷却水中有有机磷的实验研究 [D]. 河北大学, 2018.
- [8] 税钿. 电厂循环冷却水中异养菌的检测分析 [J]. 化学工程与装备, 2018(5): 299-300.
SHUI Dian. Detection and analysis of heterotroph in circulating cooling water of power plant [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018(5): 299-300.
- [9] 王小菊, 何春平, 王震, 等. 高效硝化细菌的筛选及特性研究 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 286-292.
WANG Xiaojie, HE Chunping, WANG Zhen. Screening and characteristics of an efficient nitrobacterium [J]. China Environmental Science, 2013, 33(2): 286-292.
- [10] 任延丽, 靖元孝. 反硝化细菌在污水处理作用中的研究 [J]. 微生物学杂志, 2005, 25(2): 88-92.
REN Yanli, JING Yuanxiao. The role of denitrification bacteria in wastewater treatment [J]. Journal of Microbiology, 2005, 25(2): 88-92.

(下转第 57 页)

3 结论

ACMD 是一种自适应的信号分解法,所需的先验信息较少,更加适用于实际工程问题。将其应用于滚动轴承内圈故障试验,结果表明该方法能够自适应分解得到信号的各个分量,结合包络谱分析能够有效提取故障特征信息判定故障类型。ACMD 在非平稳信号的分析处理及故障诊断领域有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王晓峰,夏静,韩捷,等. 基于隐马尔可夫模型的汽轮机故障诊断方法研究[J]. 中国工程机械学报,2016,14(6): 541-544.
WANG Xiaofeng, XIA Jing, HAN Jie, et al. Fault diagnosis on turbine generators via hidden Markov model[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2016, 14(6): 541-544.
- [2] 陈佳楠,夏飞,张浩,等. 基于 SA-PSO 的小波神经网络汽轮机故障诊断[J]. 测控技术,2016,35(5): 124-128.
CHEN Jianan, XIA Fei, ZHANG Hao, et al. Fault diagnosis of turbine generator based on SA-PSO wavelet neural network[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 14(6): 541-544.
- [3] 万书亭,詹长庚,豆龙江. 滚动轴承故障特征提取的 EMD-频谱自相关方法[J]. 振动. 测试与诊断,2016,36(6): 1161-1167.
WAN Shuting, ZHAN Changgeng, DOU Longjia. EMD-Spectrum autocorrelation method for rolling bearing fault feature extraction[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2016, 36(6): 1161-1167.
- [4] 肖茂华,张存义,傅秀清,等. 基于 ICEEMDAN 和小波阈值的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 南京农业大学学报,2018,41(4): 767-774.
- XIAO Maohua, ZHANG Cunyi, FU Xiuqing, et al. Fault feature extraction of rolling bearing based on ICEEMDAN and wavelet threshold[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018, 41(4): 767-774.
- [5] 冯博,李辉,郑海起. 基于经验小波变换的轴承故障诊断研究[J]. 轴承,2015(12): 53-58.
FENG Bo, LI Hui, ZHENG Haiqi. Study on fault diagnosis for bearings based on empirical wavelet transform[J]. Bearing, 2015(12): 53-58.
- [6] 许凡,方彦军,张荣,等. 基于 LMD 基本尺度熵的 AP 聚类滚动轴承故障诊断[J]. 计算机应用研究,2017,34(6): 1732-1736.
XU Fan, FANG Yanjun, ZHANG Rong. Roller bearings faults diagnosis method based on LMD, base-scale entropy and AP clustering[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(6): 1732-1736.
- [7] 任学平,李攀,王朝阁. 基于 VMD 和快速谱峭度的滚动轴承早期故障诊断[J]. 轴承,2017(12): 39-43.
REN Xueping, LI Pan, WANG Chao, et al. Rolling bearing early fault diagnosis based on VMD and FSK[J]. Bearing, 2017(12): 39-43.
- [8] CHEN S, YANG Y, PENG Z, et al. Detection of rub-impact fault for rotor-stator systems: A novel method based on adaptive chirp mode decomposition[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 440: 83-99.
- [9] SMITH W A, RANDALL R B. Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64: 100-131.

(本文责编: 陆华)

作者简介:

黄绍伟(1991—),男,福建福州人,助理工程师,从事发电厂集控方面的工作(E-mail: 603170501@qq.com)。

CAO Shengxian, LI Sibao, LIU Xuebing, et al. Fouling and corrosion predictive model of heat exchanger based on water quality monitoring[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014(2): 324-328.

(本文责编: 陆华)

作者简介:

孙振宇(1987—),女,江苏东海人,工程师,工学博士,从事工业水处理等方面的研究(E-mail: sunzy@chec.com.cn)。

沈明忠(1968—),男,浙江桐乡人,正高级工程师,硕士,主要从事电力环保和水处理工程相关技术(E-mail: shen-mz@chec.com.cn)。

(上接第 53 页)

- [11] 潘玉兰. 三种微生物在循环水养殖生物滤池优化中的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学,2015.
- [12] 朱健. 组合生物修复技术在黑臭河流污染治理工程上的应用研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学,2009.
- [13] 邹文娟,许晓慧,王国武,等. 光合细菌和枯草芽孢杆菌在污水处理中的应用[J]. 广东农业科学,2010,37(9): 199-201.
ZOU Wenjuan, XU Xiaohui, WANG Guowu, et al. Application in sewage treatment of photosynthetic bacteria and Bacillus subtilis[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(9): 199-201.
- [14] 曹生现,李思博,刘学冰,等. 基于水质监测的换热器结垢、腐蚀预测模型[J]. 工程热物理学报,2014(2): 324-328.