

火电厂循环冷却水应用中水的试验研究

李传统¹, 卫荣章²

(1 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042 2 上海大屯能源股份有限公司发电厂, 江苏 徐州 221618)

[摘要] 生活污水处理以后, 仍具有含氮量、微生物、悬浮物均较高的特点, 如果直接用作火电厂循环冷却水, 将会因藻类滋生增加冷凝器水侧热阻, 降低机组运行的热经济性。对中水作为火电厂循环冷却水的合理处理方法与工艺流程进行了研究, 对影响中水作为火电厂循环冷却水的因素进行了分析和优化, 使中水在 2 台 12 MW 的燃煤机组上进行了工业性试验研究。经过 2 年多的连续运行表明, 在每周投胶球 1 次的情况下, 冷凝器端差常年保持小于 5℃, 在环境温度 38℃时, 仍能使排汽温度不超过 45℃。运行结果表明, 生活污水经过合理的处理和工艺优化以后, 完全能够满足火电厂循环冷却水的要求, 不仅降低了火电厂循环冷却水的取水费用, 而且减少了生活污水对环境的污染。

[关键词] 生活污水, 火电厂, 循环冷却水, 水处理, 优化

[中图分类号] TK 16 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1672-1292(2007) 03-0030-05

Experimental Study on Use of Treated Domestic Sewage as Circulating Cooling Water in Power Plant

Li Chuantong¹, Wei Rongzhang²

(1 School of Power Engineering Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China

2 Datun Coal & Electricity Company, Xu Zhou 221618, China)

Abstract After routine physical treatment the domestic sewage still contains ammonia, microbes and suspended matters. If used directly as the circulating cooling water in power plant, it will result in the corrosion of heat exchange surface in condenser, and the heat resistance will increase on water side due to algae growth so as to influence the thermal economy of the units. In this paper, studied are the reasonable treatment method and process of the domestic sewage as circulation cooling water, and the influence factors are analyzed and optimized. The industrial experiment on use of domestic sewage as circulating cooling water is conducted in the two 12 MW coal-fired fluidized-bed units, and the two year continuous operation indicates that this technology features environmental protection and high economy. By using the rubber balls cleaning once a week, the ends temperature difference of condenser is kept less than 5℃, and even at the environmental temperature of 38℃, the temperature of exhaust steam never exceeds 45℃. The experimental results show that the domestic sewage can meet the demands of circulating cooling water after reasonable treatment and process optimization, and it not only reduces the water fees but also contributes to the improvement of China's environmental protection.

Key words domestic sewage, power plant, circulating cooling water, water treatment, optimization

0 引言

我国是一个水资源贫乏的国家, 但我国工业水的重复利用率与发达国家相比还有较大的差距。美国的水循环利用率已经超过 85%, 我国目前的工业水循环利用率约为 50%左右。美国、英国、日本、俄罗斯等国家应用城市污水作为发电厂等的冷却水的试验研究已有近 40 年的历史, 并且取得了成功的经验。处理后的生活污水作为火电厂的循环冷却水, 解决应用过程中出现的技术问题, 对节省水资源和减少对环境的污

收稿日期: 2006-12-06

基金项目: 南京师范大学人才引进科研基金 (2002DLYXGQ2B07) 资助项目

作者简介: 李传统 (1954-), 教授, 主要从事新能源与可再生能源的教学与研究。E-mail: lic2003@hotmail.com

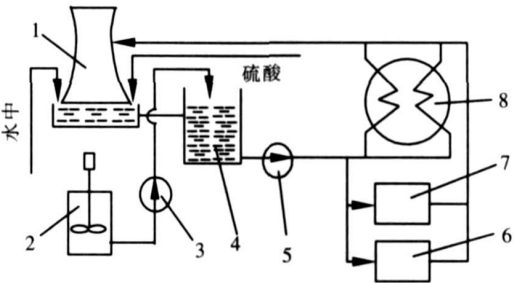
染排放具有实际工程意义和推广价值.

大屯煤电公司矸石热电厂是大屯煤电公司自备热电厂. 现有 2 台 75 t/h 循环流化床锅炉配 2 台 12 MW 抽汽凝汽式汽轮发电机组, 年发电量约 $1.5 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 汽机抽汽主要用于大屯煤电公司冬季的供暖, 抽汽量约为 70 t/h. 电厂燃料为大屯煤电公司洗煤的洗次煤和煤矸石, 锅炉补给水处理工艺采用深井水经反渗透和阴阳离子交换处理工艺. 机组循环冷却水主要采用大屯煤电公司处理过的生活污水, 厂区所有的污水又全部排入污水厂进行处理, 锅炉排烟采用电除尘器除尘, 灰渣综合利用. 厂区周围地下水源贫乏, 用地下水作为电厂的循环冷却水对当地水资源的保护不利. 大屯煤电公司污水处理厂每天处理的生活污水排放量达 $6\,000 \text{ m}^3$ 以上, 如果处理后的生活污水能满足电厂循环冷却水水质的要求, 其数量完全能够满足该电厂循环冷却水的需求量. 基于对环境保护的考虑, 并经过投资方案的经济性分析比较, 决定将进行处理后的生活污水作为该电厂的循环冷却水的工业试验, 并对实际运行工况进行跟踪研究, 不断完善生活污水作为电厂循环冷却水的工艺, 使处理后的生活污水能满足电厂循环冷却水的要求, 使该电厂成为一座实现环境保护和资源综合利用的燃煤电厂.

1 处理后的生活污水作为循环冷却水的工艺流程

处理后的生活污水作为电厂循环冷却水的工艺流程如图 1 所示.

如图 1 所示, 中水通过管道送入冷却塔 (1) 底部, 同时在冷却塔的底部根据水质分析的结果不定期加入工业硫酸溶液, 在药液罐 (2) 内搅拌器搅拌均匀的药液, 经过计量泵 (3) 与来自冷却塔的水在水井 (4) 中混合, 再经循环泵 (5) 分别送入冷凝器 (8), 空冷器 (7) 和辅助冷却装置 (6), 然后汇合后经回水管道送入冷却塔进行冷却后再进行循环.



1、冷却塔;2、药液罐;3、计量泵;4、水井;5、循环泵;
6、辅助冷却装置;7、空冷器;8、冷凝器

2 处理后的生活污水作为循环冷却水的可行性

火电厂的循环冷却水, 主要用于以下几个方面: (1) 汽轮机凝汽器的循环冷却水; (2) 发电机空气冷却器和汽轮发电机油系统中的冷油器冷却水; (3) 辅机轴承的冷却水; (4) 降尘和冲洗用的工业水.

鉴于电厂循环冷却水的上述用途, 循环水的水质调节不应只对单一用途采取相对孤立的措施, 而是要考虑到影响运行的所有因素. 循环水冷却水的处理必须满足下列条件: (1) 保证传热面不结垢; (2) 避免引起换热面大面积腐蚀, 特别要注意防止点状腐蚀; (3) 避免循环系统中微生物聚积、细菌和藻类生长; (4) 循环水处理系统应尽可能简单; (5) 循环水处理系统运行费用低; (6) 循环水处理系统可靠, 能防止水质变化, 经过长期监测能保证符合规范要求.

大屯煤电公司污水厂在对生活污水处理后, 中水的水质全分析结果如表 1 所示.

表 1 中水水质

Table 1 Parameters of domestic sewage after treatment

项目	mg/L	mmol/L	项目	mg/L	mmol/L
K ⁺ + Na ⁺	138.03	6.001	非碳酸盐硬度		0.865
Ca ²⁺	113.52	5.665	碳酸盐硬度		8.373
Mg ²⁺	43.44	3.573	甲基橙碱度		8.373
Fe ³⁺	0.10	0.005	酚酞碱度		/
Al ³⁺	0.41	0.046	PH 值		7.8
NH ₄ ⁺	18.00	1.00	游离二氧化碳		
Cl ⁻	142.72	4.025	硫化物	/	
SO ₄ ²⁻	207.81	4.327	耗氧量 (O ₂)	16.88	
NO ₃ ⁻	/	/	可溶性硅	10.00	
NO ₂ ⁻	/	/	溶解固型物	1010	

续表					
项目	mg/L	mmol/L	项目	mg/L	mmol/L
HCO ₃ ⁻	510.91	8.373	全固型物	1020	
CO ₃ ²⁻	/	/	悬浮物	10	
F ⁻	1.00	0.0526	灼烧碱量	398	
硬度		9.238	灼烧残量	612	

根据国内外电厂长期运行所积累的经验,为了保证机组运行的可靠性和经济性,参考我国循环冷却水的水质标准 (GB 50050- 1995),电厂循环冷却水水质应满足该标准中的有关指标要求,相应的指标如表 2 所示:

比较表 1 和表 2 中水的有关指标, 处理后的生活污水除 NH₄⁺ 明显超标外, 基本能够满足火电厂的循环冷却水的水质要求. 在循环冷却水系统中, 由于水不断蒸发, 水中所含的各种无机物和有机物逐渐浓缩, 同时由于光合作用, 使水中的细菌、微生物、藻类等滋生繁殖, 加上风吹、雨淋和灰尘等因素的影响, 循环冷却水将导致结垢、腐蚀和有机附着物, 影响机组运行的可靠性和经济性. 因此, 在使用水质较差的中水作为火电厂的循环冷却水时, 要特别注意对循环冷却水进行可靠的再处理, 并对循环冷却水进行系统和工艺优化, 以确保机组安全和稳定的运行.

3 循环水系统的优化运行措施

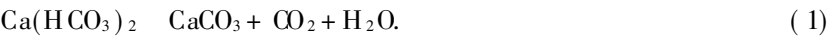
3.1 解决氨根离子含量超标的方法

当火电厂循环冷却水中的 NH₄⁺ 含量过高时, 会引起冷凝器换热面铜管的快速腐蚀, 换热面腐蚀的特征为在铜管表面形成沟槽, 换热器铜管管壁变薄导致换热器铜管泄漏. 为了防止换热器铜管穿漏, 将冷凝器换热面原采用的海军黄铜管 (HSn70- 1A) 更换为白铜管 (B30), 白铜主要成分为 30% 左右的镍和 70% 左右的铜, 具有较强的抗氨腐蚀能力, 有助于抑制氨根离子含量超标引起的换热器管壁腐蚀. 白铜材料腐蚀速率挂片实验试样的尺寸为 50 mm × 25 mm × 2 mm, 挂孔 φ= 4 mm, 试样表面积 28 cm², 将其悬挂于循环水回水管道中, 每 3 个月测试一次, 测试结果如表 3 所示.

表 3 的数据表明, 不同月份测得的平均腐蚀速率均小于规范 (GB50050- 95) 中对腐蚀速度的规定 0.005 mm/a

3.2 防止形成水垢的措施

中水的重碳酸盐含量比较高, 它是引起循环冷却水结垢的主要原因. 循环冷却水在循环冷却过程中不断蒸发, 水中 Ca(HCO₃)₂ 浓度越来越高, 而游离 CO₂ 却因散失而减少, 这两个因素都会促使 Ca(HCO₃)₂ 分解成 CaCO₃ 析出, 其反应方程式为:



火电厂循环冷却水处理遵循的原则是不要求严格地去除水中的杂质, 以不析出 CaCO₃ 为目的. 通常所采用的方法是向水中加入药剂, 使水质趋于稳定. 该机组在循环水处理过程中所加入的药剂为有机磷酸盐阻垢剂 - ATMP (氨基三甲叉磷酸), 其分子式为:

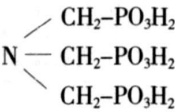


表 2 火电厂循环冷却水参考指标

Table 2 Requirement of parameters for cooling water of power plant

项目	单位	要求和使用条件	允许值
悬浮物	mg/L	根据生产工艺确定	≤ 20
pH 值		根据药剂配方确定	7.0~9.2
甲基橙碱度	mg/L	根据药剂配方及工况确定	≤ 500
Ca ²⁺	mg/L	根据药剂配方及工况确定	30~200
Fe ²⁺	mg/L		≤ 0.5
Cl ⁻	mg/l		≤ 1000
SO ₄ ²⁻	mg/L	[SO ₄ ²⁻] 与 [Cl ⁻] 之和	≤ 1500
NH ₄ ⁺	mg/L		≤ 1.0
硅酸	mg/L		≤ 175
游离氯	mg/L	在回水总管处	≤ 0.5~1.0
石油类	mg/L		≤ 5

表 3 腐蚀速率测试结果

Table 3 Results of corrosion in tube of condenser in the power plant

时间 / 月	实验前重 /g	实验后重 /g	失重 /g	平均腐蚀速 率 / (mm/a)
1~ 3	21.358 10	21.333 68	0.024 43	0.004 1
1~ 6	21.487 73	21.443 64	0.044 09	0.003 7
1~ 9	21.401 08	21.338 52	0.062 56	0.003 5
1~ 12	21.271 80	21.181 24	0.090 57	0.003 8

该阻垢剂的阻垢原理为: 磷酸盐对碳酸钙晶体的生长起了干扰作用, 使晶体结构发生明显畸变, 即晶格被扭曲, 不能继续增长, 从而抑制了水垢的形成. 在该电厂进行的试验运行过程中, 根据该厂实际运行经验, 限定的循环水的有关指标如下:

(1) 极限浓缩倍率: $K = N_{a_k} / N_{a_{lu}} < 1.8$

其中, N_{a_k} 为循环冷却水系统中循环冷却水的钠离子含量, mg/L; $N_{a_{lu}}$ 为补充水的钠离子含量, mg/L.

(2) 采用极限碳酸盐硬度法控制硬度: $\Delta A = N_{a_k} / N_{a_{lu}} - (YD t)_x / (YD t)_{lu} \geq 0.2$

其中, $(YD t)_x$ 为循环冷却水的碳酸盐硬度; $(YD t)_l$ 为补充水的碳酸盐硬度.

(3) 循环冷却水中总的 PO_4^{3-} 浓度维持在 2~ 3 mg/L 之间.

在试验运行过程中, 通过监视和控制以上 3 个指标, 可以防止循环冷却水的结垢. 循环水加入阻垢 - ATMP 的方式为: 人工定量将该药剂加到电动搅拌溶液箱内, 配成 3% ~ 5% 的阻垢剂水溶液, 然后再由隔膜式计量泵将该水溶液经 $\Phi 32 \times 3$ 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管道送到循环冷却水的汲水井中.

在循环冷却水运行过程中, 要注意控制其极限浓缩倍率, 经常将补充水加入循环冷却水系统中, 以防止 $CaCO_3$ 的析出.

3.3 抑制有机附着物的方法

循环冷却水中细菌、微生物、藻类的生长是循环冷却水系统生成有机附着物的主要原因. 在微生物的生长和繁殖过程中, 会放出粘液, 能将水中的粘性泥和植物残骸等物质粘附在冷却水通道中, 形成有机附着物. 有机附着物不仅增加了循环冷却水侧的流动阻力, 而且增加了循环冷却水侧的热阻, 影响了传热效果, 降低了机组的热经济性. 为了防止循环冷却水系统中产生有机附着物, 采用的主要方法是加入杀菌剂浓硫酸, 以杀死细菌、微生物和藻类, 使其丧失附着管壁的能力. 在试验过程中, 根据循环冷却水系统的保有水量, 周期性投药, 配制成浓度为 50~ 100 ppm 硫酸溶液, 采用冲击式投加方式将该溶液加入循环水汲水井入口. 试验结果表明, 加入适当浓度的硫酸溶液, 可以有效地杀死循环冷却水中的细菌、微生物和藻类, 防止有机附着物的产生. 为了防止细菌、微生物和藻类产生抗药性, 杀菌剂应定期交换使用.

3.4 换热器铜管结垢的防止

在机组运行过程中, 汽轮机冷凝器处于封闭状态, 循环冷却水虽然经过上述处理工艺达到了循环冷却水的水质要求, 但有时会出现水质不稳定的情况, 且死亡的细菌、微生物和藻类, 易附着在铜管的表面, 从而增加水垢等物质在铜管表面的附着力, 导致结垢的几率加大. 在结垢初期, 水垢层比较松软, 易于清除. 水垢经过一段时间的堆积, 水垢层变得坚硬, 难以清除. 因此, 应在水垢出现初期及时采用有效的清除措施加以清除, 避免换热面出现严重的水垢层. 利用该机组配置的胶球清洗装置, 通过定期和不定期投用胶球对冷凝器铜管进行清洗, 有效地控制冷凝器的传热端差, 保证了机组运行的热经济性.

4 试验结果分析

用处理后的生活污水作为火电厂的循环冷却水的试验系统, 自 2000 年 9 月投入运行以来, 该系统一直正常稳定运行, 循环冷却水质指标控制在合理的范围之内, 如表 4 所示.

表 4 循环水各段出水水质化验结果
Table 4 Analytic results of cooling water in the power plant

项目		水样					国家凝结水处理标准
		热网回水	除铁装置出口	精密过滤器出口	高速混合离子交换器出口	产水水质	
电导率	$\mu s/cm$	11.5	10	10	1.0	产水水质	0.2
Na+	$\mu g/L$	8	7	6	5		5
硬度	$\mu mol/L$	43	31	30	0		0
SD2	$\mu g/L$	89	280	210	12.8		15
Fe	$\mu g/L$	510	25.6	21	5		8

在正常加药的情况下, 每星期分别对两台机组的冷凝器各投用胶球清洗一次, 一般都能保证冷凝器的传热端差小于 5℃, 实际的运行结果如图 2 所示.

在夏季最高环境温度达 38℃ 时, 循环冷却水出水温度不超过 45℃. 汽轮机的冷油器、发电机的空气冷却器铜管仅在机组每次小修 (机组小修周期为 6 个月) 进行清洗, 机组小修清洗时没有发现换热面明显的

结垢现象, 保证机组运行的发电机冷却风温和润滑系统的油温均处于正常状态. 该系统在保证冷凝器传热端差的同时, 也保证了发电机的正常冷却风温和机组润滑系统的正常冷却油温. 在机组检修过程中, 发现循环冷却水受热面没有出现明显的水垢和腐蚀现象, 运行表明该系统完全能满足火电厂循环冷却水的要求. 该厂使用生活污水不需付费, 而取地下水的费用为 0.26 元 /m³, 该厂循环冷却水补水量为 3 000 m³ / 天, 按机组年平均运行 300 天计算, 每年可节约水资源费用为 23.4 万元. 该厂产生的浓缩水送回污水厂进行再处理后加以循环利用, 实现了火电厂污水的零排放, 具有良好的环保效果.

5 结论

实际运行结果表明, 中水作为火电厂的循环冷却水, 在处理工艺合理、运行措施得当的情况下, 完全可以满足火电厂循环冷却水的水质要求, 在保证机组运行的可靠性和经济性的同时, 实现生活污水的循环再利用和火电厂污水的零排放, 不仅提高了水资源的利用率和降低了污染排放, 而且产生了显著的社会效益, 是具有在火电厂中推广应用价值的环保技术.

[参考文献] (References)

[1] 周卫青, 李进, 刘灵琴. 火电厂循环冷却水对铜合金的点蚀 [J]. 材料保护, 2006, 39(3): 55-58
Zhou Wei qing Li Jin Liu Ling qin Influence factors on pitting corrosion of H Sn701- B copper alloy in circulating cooling water of power plant [J]. Materials Protection, 2006, 39(3): 55-58 (in Chinese)
[2] 邵青, 米晓. 适合于电厂循环冷却水系统的抗菌藻涂料试验研究 [J]. 华北电力技术, 2006(2): 4-6
Shao Qing Mi Xiao Test and research on antiseptic algicide coating used to cooling water system in power plant [J]. North China Electric Power 2006(2): 4-6 (in Chinese)
[3] 辛德玺, 姜自忠. 循环冷却水化学处理的研究 [J]. 黑龙江电力, 2006, 28(1): 20-24
Xin Dexi Jiang Zizhong Research on chemical treatment of circulating cooling water [J]. Heilongjiang Electric Power 2006 28(1): 20-24 (in Chinese)
[4] 陈应新. 几种用于工业循环冷却水处理的新型设备 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2006, 23(1): 44-47
Chen Yingxin New equipment for cooling water treatment [J]. Corrosion and Protection in Petrochemical Industry, 2006 23(1): 44-47. (in Chinese)
[5] 孙心利, 刘建明, 李刚. 火力发电厂工业冷却水系统工艺分析 [J]. 山西电力, 2006, 131(2): 28-29
Sun Xinli Liu Jianming Li Gang Analyzing of techniques of industry cooling water system using stainless steel tube in condenser in power plant [J]. Shanxi Electric Power 2006, 131(2): 28-29 (in Chinese)
[6] 贾丰春, 李自托, 董泉玉. 工业循环冷却水阻垢剂研究现状与发展 [J]. 工业水处理, 2006, 26(4): 12-14
Jia Fengchun Li Zituo Dong Quanyu Present situation and development of scale inhibitor for industrial circulating cooling water [J]. Industrial Water Treatment 2006, 26(4): 12-14 (in Chinese)
[7] 吴剑恒. 凝汽器冷却水管防垢与强化换热技术的应用 [J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2006, 2(2): 119-123
Wu Jianheng Application for the technology of prevent fouling and improving heat-transfer in water-cooled condenser tube [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering Natural Science Edition 2006 2(2): 119-123 (in Chinese)
[8] 张小霓, 廖冬梅, 陈明静. 城市中水回用于循环冷却水中氨氮的去除试验研究 [J]. 华中电力, 2006, 19(4): 43-45
Zhang Xiaoni Liao Dongmei Chen Mingjing The removal experiment of ammonia-nitrogen in the reuse of municipal wastewater for circulation cooling water [J]. Central China Electric Power 2006, 19(4): 43-45 (in Chinese)
[9] 李本高, 汪燮卿. 污水回用技术进展与发展趋势 [J]. 工业用水与废水, 2006, 37(4): 1-6
Li Bengao Wang Xieqing Improvement and development trends of wastewater reuse technology [J]. Industrial Water and Wastewater 2006 37(4): 1-6 (in Chinese)

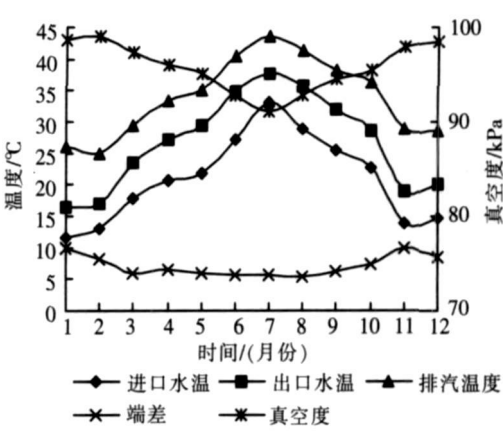


图 2 冷凝器实际运行结果
Fig.2 Operation results of condenser in the coal power plant

[责任编辑: 刘 健]