

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.09.005

城市再生水作为电厂锅炉补给水水源的污垢特性

张占梅^{1,2}, 付 婷¹

(1.重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074;2.重庆远达水务有限公司,重庆 400060)

摘要:采用城市再生水作为电厂锅炉补给水系统水源,冬季工况下,锅炉补给水预脱盐系统出现严重污垢现象。为考察预脱盐系统污垢成因开展试验研究,对城市再生水进行水质分析检测,对系统内部污垢物进行分析检测。结果表明,系统内部黏泥以有机物为主,且城市再生水中 COD、BOD、NH₃-N 等出现不同程度的超标,进而导致微生物滋生,造成系统污垢。可采用以 BAF 或 MBR 工艺为主的再生水深度处理系统提升水源水质,确保锅炉补给水处理系统高效、稳定运行。

关键词:电厂;城市再生水;预处理;水质分析;结垢

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)09-040-07

Fouling characteristics of the municipal reclaimed water as boiler make-up water

ZHANG Zhanmei^{1,2}, FU Ting¹

(1.Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China;
2. Chongqing Yuanda Water Service CO., LTD., Chongqing, 400060, P.R.China)

Abstract: Municipal reclaimed water is used as supply water for boiler make-up water system in power plant, whereas the pre-desalination system has serious pollution and plugging in winter. The municipal reclaimed water quality, along with the fouling composition of pre-desalination system, were analyzed so as to figure out what leads to the fouling. The obtained results show that the system fouling is mainly microorganism breeding, which is caused by the municipal reclaimed water comprising several excessive components, such as COD, BOD and NH₃-N. In order to ensure high efficiency and stable of the boiler make-up water treatment system, the process of BAF (biological aetated fiter) or MBR (membrane bio-reactor) can be used to construct the advanced treatment system, which could improve the water quality.

Keywords: power plant; municipal reclaimed water; pretreatment; water quality analysis; scale formation

城市再生水是指经城镇污水处理厂处理后再经深度处理的出水,一般作为电厂循环冷却水系统的补水^[1-2],近年来随着水资源短缺问题日益突出,城市再生水作为电厂锅炉补给水水源已成为趋势^[3-5]。由于锅炉补给水系统对原水水质要求较高,往往城市再生水不能满足其要求,导致锅炉补给水系统难以稳定运行,

收稿日期:2017-03-06

基金项目:重庆市研究生教育教学改革项目(YJG15301);重庆交通大学研究生教育创新基金项目(20150110、20140105)。

Supported by the project on postgraduate education reform of Chongqing City (YJG15301), Graduate Education Innovation Fund project of Chongqing Jiaotong University (20150110, 20140105).

作者简介:张占梅(1979—),女,博士,副教授,主要从事水污染控制技术研究,(E-mail)Zhanmei2003@126.com。

甚至造成系统的瘫痪^[6-8]。

新疆某热电厂(以下简称热电厂)锅炉补给水处理系统包括预脱盐+离子交换系统,其中预脱盐系统采用卧式双介质过滤器—保安过滤器—超滤—精密过滤器—反渗透工艺^[9-10],由当地某再生水厂向其提供再生水作为锅炉补给水系统的水源。运行结果表明,夏季采用再生水时系统运行较为稳定,而进入冬季后,锅炉补给水预脱盐系统出现严重污堵现象。其中,超滤系统原设计清洗周期为 3 个月,而实际运行仅 15 天。双介质过滤器和精密过滤器均出现了严重的污堵现象,造成双介质过滤器和超滤系统清洗频繁、精密过滤器滤芯使用周期短,给电厂的安全生产带来极大的潜在风险,运行成本也大大提升。多年运行情况都反复证实了一个事实,即夏季采用再生水作水源时,系统能够稳定运行;一旦进入 11 月份,气温稍微降低后,预处理系统便出现严重的污堵问题。

为考察再生水作为电厂锅炉补给水系统水源的可行性,首先,对再生水水质进行分析和评估^[11-12],然后,结合运行工况对系统内污堵物进行成分分析,找出造成预脱盐系统污堵的原因,确保再生水作为水源时,锅炉补给水处理系统能够稳定、可靠地运行。

1 材料与方法

1.1 试验系统概述

锅炉补给水处理系统设计出力为 300 t/h,其工艺流程如图 1 所示。其中,预脱盐系统包括:2 台卧式双介质过滤器(4 室)+保安过滤器+8 套超滤装置(产水量 75 t/h·套)+精密过滤器+4 套反渗透装置(产水量 100 t/h·套);离子交换系统包括 3 套阳床+3 套阴床+3 套混床。试验于 12 月在热电厂内进行,周期为 13 天。

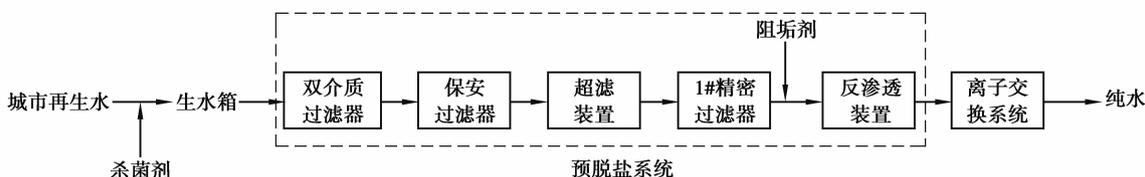


图 1 锅炉补给水处理系统工艺流程图

Fig.1 Flow chart of boiler make-up water treatment system

1.2 试验方法

1.2.1 水质分析

试验期间,系统 100%出力运行,冬季试验满足系统安全运行要求的同时,采集试验数据。

1)再生水水质检测分析:对再生水厂出水进行水质全分析检测并与设计水质进行对比,分析再生水水质状况。

2)系统水质监测分析:取各单元出水进行水质分析检测。统计监测数据及水质指标的变化情况,分析再生水运行期间对预脱盐系统的影响。

1.2.2 污堵物成分分析

取双介质过滤器粘泥、超滤加强反洗水、精密过滤器滤芯污堵物进行灼烧减重试验,并进行电镜扫描及 X-射线能谱分析。试验取样点及分析项目如表 1 所示。

表 1 再生水水质检测点及分析项目

Table 1 Quality monitoring sites and analysis index of reclaimed water

序号	检测水样	取样点	分析项目
1	再生水厂出水	再生水厂出水口	●
2	再生水	电厂原水进水口	○

续表 1

序号	检测水样	取样点	分析项目
3	生水箱出水	双介质过滤器进水口	○
4	双介质过滤器出水	双介质过滤器出水口	○
5	超滤装置出水	1#超滤出水口	○
6	超滤水箱出水	清水泵出水母管	○
7	精密过滤器出水	1#反渗透装置进水	●

注：“●”为水质全分析，“○”为水质单项分析(检测指标含温度、浊度、COD、氨氮、总磷、余氯)

2 结果与讨论

2.1 再生水检测结果分析

2.1.1 再生水水质与设计水质对比分析

冬季试验期间,对再生水厂出水进行多次取样分析,再生水水质与设计进水水质对比如表 2 所示。

表 2 再生水水质与设计进水水质对比表

Table 2 Comparison of quality for reclaimed water and design inlet water

项目	单位	设计水质指标	再生水实测 指标(最大值)	再生水实测 指标(平均值)
pH	—	7.0~8.5	7.26	7.18
悬浮物	mg/L	≤ 10	21.60	15.63
浊度	NTU	≤ 5	7.00	5.67
BOD ₅	mg/L	≤ 5	10.40	9.90
COD _{Cr}	mg/L	≤ 30	76.70	55.30
Cl ⁻	mg/L	≤ 200	214.72	214.72
硬度	mg/L	≤ 350	460.40	435.35
NH ₃ -N	mg/L	≤ 5	30.90	16.54
总磷	mg/L	< 1	3.50	0.73
余氯	mg/L	0.1~0.2
细菌总数	cfu/mL	≤ 1000	71.67	71.67

由表 2 可知,再生水厂的出水与设计水质相比,其中悬浮物、浊度、Cl⁻、硬度指标有少量超标,BOD、COD_{Cr}、NH₃-N 指标严重超标,由上述水质可判断:

1)造成再生水水质超标的主要原因可能是冬季气温低,再生水厂生化系统处理效果不好,造成系统有机物及氨氮均超标^[13]。

2)虽然出水细菌总数不超标,但出水余氯未检出,再生水经过约 20 km 的管道输送到电厂进入锅炉补给水系统车间后,由于冬季室内保温温度较高,再加之有机物和氨氮等营养物质丰富,给细菌等微生物滋生提供了条件^[14-15],从而对锅炉补给水预处理系统运行效果产生一定影响。

2.1.2 再生水出水结垢性分析

取城北再生水厂出水,结合水质检测结果分析,其中硬度指标有少量超标,故可能引起膜系统结垢的难

溶盐有 CaCO_3 、 CaSO_4 。其中 CaCO_3 垢可用朗格利尔饱和指数(LSI)进行评价, CaSO_4 难溶盐结垢用 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 的离子浓度积($S[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$)与 25 °C CaSO_4 的溶度积(K_{sp})比较,计算结果见表 3。

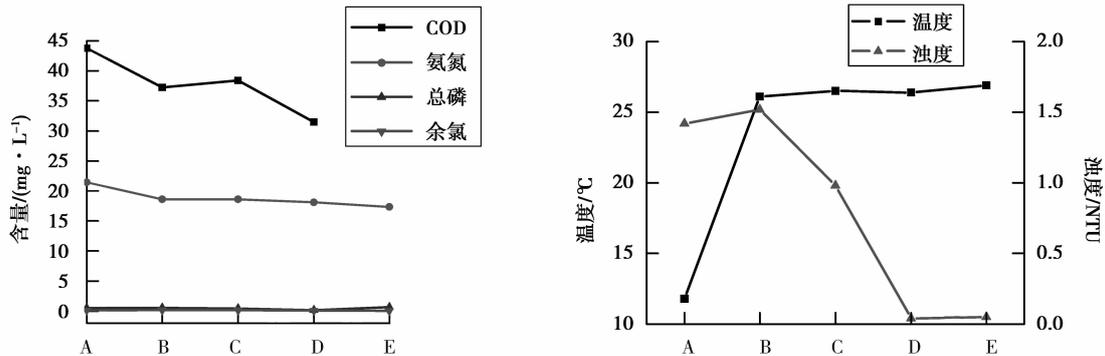
表 3 再生水出水结垢性分析表
Table 3 Scaling analysis of reclaimed water

项目	1# 水样	2# 水样	3# 水样
pH	7.140	7.060	7.250
pHs	6.984	7.105	7.121
LSI 指数	0.156	-0.045	0.129
Ca^{2+} (mmol/L)	7.000	6.800	6.200
SO_4^{2-} (mmol/L)	7.840	7.200	7.440
$S[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$	13.6×10^{-6}	12.2×10^{-6}	11.5×10^{-6}
K_{sp}	9.12×10^{-6}	9.12×10^{-6}	9.12×10^{-6}

由表 3 可知, $\text{LSI} > 0$ 时碳酸钙处于过饱和状态,有结垢的趋势。 $\text{LSI} < 0$ 时碳酸钙处于未饱和状态,有腐蚀的趋势。但总体数值较小,说明水质比较稳定,产生 CaCO_3 垢的趋势不明显; CaSO_4 难溶盐结垢检测结果显示 $S[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$ 略大于 K_{sp} ,说明再生水厂出水有产生 CaSO_4 垢的趋势,但不明显,运行中可投加一定量专用阻垢剂,防止无机盐结垢。总体而言,再生水出水结垢性对后续预脱盐系统污堵现象无明显影响。

2.2 系统运行水质特性变化分析

再生水运行试验现场测定水质经统计后取平均值,各工段变化趋势见图 2。



注:A:再生水 B:生水箱出水 C:双介质过滤器出水 D:超滤出水 E:精密过滤器出水

图 2 系统运行水质分析图

Fig.2 Water quality analysis of system operation

由图 2 分析得:

1) 再生水水温受冬季温度影响一直维持在 12 °C 左右,经锅炉补给水系统的生水加热器加热后进入生水,到后续设备,水温稳定在 26 ± 2 °C 左右,水温的升高给后续设备中微生物的繁殖提供了条件。

2) 进水的浊度值基本在 2 NTU 以下,此后呈明显下降趋势,超滤装置出水时浊度已基本接近 0 NTU,悬浮颗粒物基本可以被超滤等设备截留。

3) 电厂进水的 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 相对设计值较高,之后呈逐渐下降趋势,表明大部分的 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 经预脱盐系统去除,但截留的 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 易造成微生物滋生而引起二次污染,进而造成双介质过滤器、超滤等设备的污堵。

2.3 污堵物检测及分析

2.3.1 双介质过滤器粘泥分析

粘泥外观为黄褐色絮状物,在 105 ℃ 烘干后形态为黄褐色颗粒,具有臭味。对粘泥进行初步灼烧减量后分析粘泥中有机物含量,挥发性固体占 35%~37%。取部分粘泥进行电镜扫描及能谱分析,结果见图 3。

能谱分析结果表明,双介质过滤器粘泥中 C、O 元素平均重量占 66%,其次为 Si、Ca、Fe 元素,双介质过滤器中含有无烟煤和石英砂,无烟煤的主要成分为 C,石英砂的主要成分为 SiO₂,在试验分析中并未将其完全分离出来,导致 C、Si 元素含量略微增加。排除无烟煤和石英砂的影响,双介质过滤器滋生的粘泥主要由有机质、Ca、Fe 离子形成的化合物组成,如胶体铁等物质。

2.3.2 超滤加强反洗水成分分析

取超滤加强反洗后的水样进行过滤,水样中含有橙黄色透明絮状物。水样在 105 ℃ 脱水后的颗粒物,呈黄褐色,有臭味。将污堵物分离并进行了灼烧减量分析,有机物占比 39%~42%。取部分粘泥进行电镜扫描及能谱分析,结果见图 4。

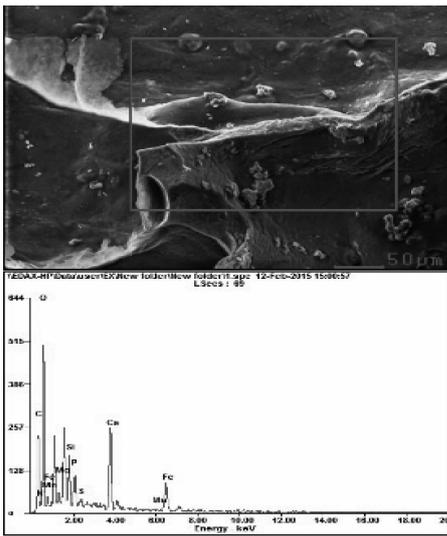


图 3 扫描电镜图及能谱图

Fig.3 Scanning electron microscope and energy spectrum

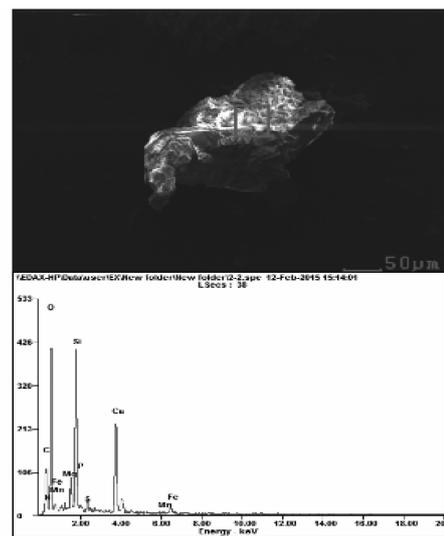


图 4 扫描电镜图及能谱图

Fig.4 Scanning electron microscope and energy spectrum

能谱分析结果表明,超滤加强反洗下来的污堵物中有 C、O 元素平均重量占到 70%,其次为 Ca、Fe 元素,表明双介质过滤器滋生的污堵物主要由有机质组成。

2.3.3 精密过滤器滤芯污堵物分析

精密过滤器运行达到最大压差之后,取下滤芯后进行检测,观察到污堵物外观有黄褐色斑痕、细条线性物及黑色块状物,表面有粘性。经检测污堵物中含有大量的细菌,达到 1.58×10^{11} 个/g 污泥。样品经灼烧减重后的结果表明,样品的主要成分为有机质,占到了总质量的 89.93%。取部分滤芯污堵物进行电镜扫描及能谱分析,结果见图 5。

能谱分析结果表明,污堵物中,C、N、O、P、S 元素重量百分比占总重量 90% 以上,其中 C 元素占到 46%,说明样品中大部分为有机物,造成膜污堵的原因主要为有机质污堵。

3 再生水深度处理改造方案

针对再生水中未达标的水质进行深度处理,确保满足设计水质要求,建议电厂内建设深度处理设施来提高进水水质。

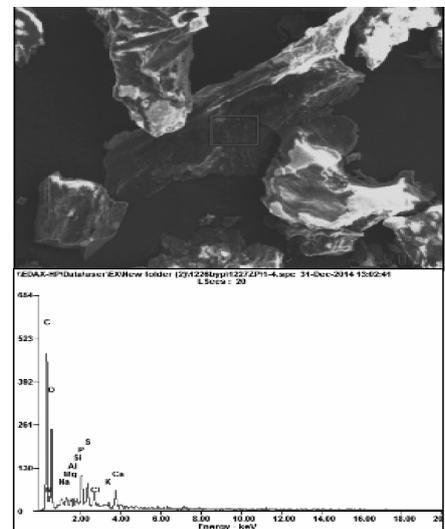


图 5 扫描电镜图及能谱图

Fig.5 Scanning electron microscope and energy spectrum

3.1 曝气生物滤池(BAF)

曝气生物滤池(BAF)工艺是集生物降解、固液分离于一体的污水处理设备,即可通过生物和物理的处理方式,将水中的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、SS 等超标指标去除,满足热电厂锅炉补给水系统的进水水质要求。工艺流程如图 6 所示。



图 6 曝气生物滤池工艺流程图

Fig.6 Flow chart of BAF

再生水经生水水箱后进入曝气生物滤池进行处理,通过滤料层时,水体所含悬浮物及胶体被滤料层截留,并被滤料上附着的生物降解转化,可同时完成对有机物的去除以及对悬浮物的截留,使 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、SS 等指标达到锅炉补给水系统进水要求。

3.2 膜生物反应器(MBR)

膜生物反应器(MBR)是一种膜分离单元与生物处理单元相结合的水处理技术,工艺既可起到生物降解有机物的作用,又可起到过滤悬浮物的作用,保证出水 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、SS 等指标达到锅炉补给水系统进水要求。工艺流程如图 7 所示。

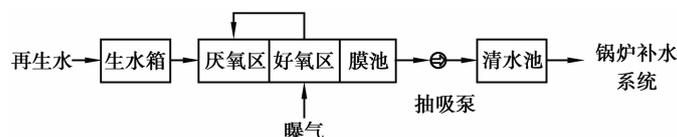


图 7 复合式 MBR 工艺流程图

Fig.7 Flow chart of Composite MBR

再生水经生水水箱后可较好的改善生物处理效果。然后,进入膜生物反应器,通过 MBR 中的好氧池和厌氧池达到去除 COD 和氨氮的作用,水中的悬浮物、胶体及细菌病毒等物质则通过膜过滤而截留,从而获得较好的出水水质。

4 结 论

1) 冬季再生水水质与设计水质相比,再生水中 COD、BOD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、SS、硬度和浊度均出现了不同程度的超标,由此导致的微生物滋生和生物粘泥是造成预脱盐系统污堵的主要原因,这主要是由于冬季气温低,再生水厂生化效果不好,导致出水水质超标。

2) 对双介质过滤器、超滤、精密过滤器中的污堵物检测的结果也表明,其主要成分是有有机质,也间接证实了细菌滋生、生物粘泥是造成锅炉补给水预处理设备污堵的主要原因。

3) 为确保锅炉补给水处理系统能安全、稳定、经济运行,建议热电厂内自建再生水深度处理系统。根据试验结果,提出了 BAF 和 MBR 两种深度处理方案以提升再生水水质。

参考文献:

[1] 吴怡卫. 以城市再生水为水源的电厂零排水设计[J]. 电力建设. 2013, 34(3): 68-71.

WU Yiwei. Design of zero water emissions in power plant using municipal reclaimed water [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(3): 68-71. (in Chinese)

[2] Choudhury M R, Siddik M A Z, Salam M Z E I. Use of shitalakhya river water as makeup water in power plant cooling

- system[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2015; 1-10.
- [3] 郭宇杰, 王学超, 周振民. 我国城市污水处理回用调查研究[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 3881-3884.
GUO Yujie, WANG Xuechao, ZHOU Zhenmin. National survey of urban sewage reuse in china[J]. Environmental Science, 2012, 33(12): 3881-3884. (in Chinese)
- [4] Yil L, Jiao W T, Chen X N, et al. An overview of reclaimed water reuse in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(10): 1585-1593.
- [5] Bixio D, Thoeve C, Koning J D, et al. Wastewater reuse in Europe[J]. Desalination, 2006, 187: 89-101.
- [6] 池勇志, 崔维花, 苑宏英, 等. 不同源水和回用途径的再生水处理工艺的选择[J]. 中国给水排水, 2012, 28(18): 22-26.
CHI Yongzhi, CUI Weihua, YUAN Hongying, et al. Selection of reclaimed water treatment processes under different source water qualities and reuse approaches[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(18): 22-26. (in Chinese)
- [7] 李昆, 魏源送, 王健行, 等. 再生水回用的标准比较与技术经济分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(7): 1035-1053.
LI Kun, WEI Yuansong, WANG Jianxing, et al. Water reclamation: standards comparison and cost analysis[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2014, 34(7): 1035-1053. (in Chinese)
- [8] Wang J, Dong W, Hou D. Hydroxyl carboxylate based non-phosphorus corrosion inhibition process for reclaimed water pipeline and downstream recirculating cooling water system[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 39(1): 13-21.
- [9] Krueger R. Efficient pre-treatment: ultrafiltration in russian power plants[J]. Filtration & Separation, 2009, 46(2): 18-20.
- [10] 李晨, 杨禹, 高鑫, 等. 反渗透膜生物污染的影响因素及控制方法的研究进展[J]. 水处理技术, 2014, 41(2): 1-16.
LI Chen, YANG Yu, GAO Xin, et al. Current research progress on the affecting factors and control methods of the biofouling of reverse osmosis membrane[J]. Technology of water treatment, 2014, 41(2): 1-16. (in Chinese)
- [11] Walker M E, Theregowd A R B, Safari I, et al. Utilization of municipal wastewater for cooling in thermoelectric power plants: Evaluation of the combined cost of makeup water treatment and increased condenser fouling[J]. Energy, 2013, 60(4): 139-147.
- [12] 张庆康, 郝瑞霞, 刘峰, 等. 不同再生水处理工艺出水水质回用途径适应性分析[J]. 环境工程学报, 2013, 7(1): 91-96.
ZHANG Qingkang, HAO Ruixia, LIU Feng, et al. Analysis about reuse approach adaptability for effluent quality from different reclaimed water treatment processes [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2013, 7(1): 91-96.
- [13] 申战辉. 城市污水生化处理出水回用于循环冷却水系统缓蚀阻垢实验研究[D]. 南京: 南京大学 2013.
SHEN Zhanhui. Control of mineral scale deposition and metal corrosion of cooling water systems using secondary-treated municipal wastewater[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. (in Chinese)
- [14] Meesters K P, VAN Groenestign J W, Gerritse J. Biofouling reduction in recirculating cooling systems through biofiltration of process water.[J]. Water Research, 2003, 37(3): 525-532.
- [15] Xu P, Wang J, Zhang Y J, et al. Foulant characteristics comparison in recycling cooling water system makeup by municipal reclaimed water and surface water in power plant[J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2015, 2015: 1-8.

(编辑 陈移峰)