

火电厂再生水深度处理系统诊断分析与应用

慕时荣¹, 周 宇², 叶治安¹, 王绍曾², 康少鑫¹, 徐兆郢¹, 王炎飞³

(1. 西安西热水务环保有限公司, 陕西西安 710054; 2. 中国华能集团有限公司, 北京 100031;

3. 北方联合电力包头第三热电厂, 内蒙古包头 014017)

[摘要] 为了解决火电厂再生水深度处理系统出力不足、水质不达标等问题, 将“自动排泥+污泥均质”污泥预处理方法、主动外循环定量活性污泥供给方法、带回流及双馈调节“湿法”石灰投加方法有效结合, 对再生水深度处理系统进行技术改进。并在北方某电厂工程应用, 恢复了系统设计出力。运行结果表明, 出水浊度为 0.71 NTU, 暂硬为 0.65 mmol/L, 总硬度为 4.11 mmol/L, 暂硬去除率为 84%, 总硬去除率为 32%, 出水水质优于回用要求, 自来水取水量每年节约 288 万 t。恢复后再生水深度处理系统能够大幅减少新鲜水的取用量, 提高再生水重复利用率, 达到节水减排的目的, 保障火电厂的供水安全。

[关键词] 再生水; 机械加速澄清池; 污泥浓度; 自动排泥; 石灰加药

[中图分类号] X773 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0168-07

Diagnostic analysis and application of advanced treatment system for reclaimed water in thermal power plant

MU Shirong¹, ZHOU Yu², YE Zhian¹, WANG Shaozeng², KANG Shaoxin¹, XU Zhaoying¹, WANG Yanfei³

(1. Xi'an TPRI Water-Management & Environmental Protection Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China;

3. North United Power Baotou Third Thermal Power Plant, Baotou 014017, China)

Abstract: To solve the problems of insufficient output and substandard water quality in the advanced treatment system of reclaimed water in thermal power plant, this paper puts forward the technical improvement of the advanced treatment system of reclaimed water based on the effective combination of “automatic sludge discharge plus sludge homogenization” sludge pretreatment method, active external circulation quantitative activated sludge supply method and “wet” lime dosing method with reflux and double-feed regulation. The system design output is restored after application in a power plant project in north China. The operation results show that turbidity is 0.71 NTU, temporary hardness is 0.65 mmol/L, total hardness is 4.11 mmol/L, temporary hardness removal rate is 84%, and the total hardness removal rate is 32%. The effluent water quality is better than the reuse requirements, saving 2.88 million tons of tap water every year. The advanced treatment system of reclaimed water can greatly reduce the consumption of fresh water, improve the reuse rate of reclaimed water, achieve the purpose of saving water and reducing emissions, and ensure the safety of water supply in thermal power plants.

Key words: reclaimed water; mechanical accelerated clarifier; sludge concentration; automatic sludge discharge; lime dosing

随着社会经济的飞速发展和城镇化率的不断提高, 水资源短缺问题日趋严重。国家“水十条”中明确提出“三条红线”、“四项制度”等核心内容。为实现用水总量控制、提高水资源利用率和分级分质利用的目标, 要求各行业节约用水、逐步实现

废水资源化利用。据调查, 在全国发电企业中, 循环冷却水系统用水量占总用水量的 70% 以上^[1-3], 污废水回用是节水减排的主要途径之一。因此, 开展循环水深度节水工作是火电厂亟待解决的问题。

1 再生水深度处理系统概述

近年来由于地表水、地下水、水库水等新鲜水取水指标不断受到限制,火电厂循环冷却水系统逐步采用再生水作为补充水使用。再生水中成垢离子碱度、硬度偏高,进入循环水系统浓缩后易产生CaCO₃结垢;COD、BOD₅、NH₃-N含量较高导致循环水富营养化,易产生黏泥及微生物腐蚀^[4]。火电厂再生水深度处理系统多采用“曝气生物滤池-机械加速澄清池-变孔隙滤池”工艺去除水中的污染物质,使出水水质达到《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)标准要求,工艺流程见图1。

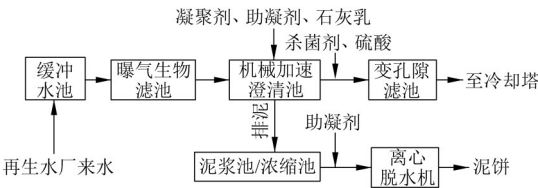


图1 再生水深度处理系统工艺流程
Fig. 1 Process flow of advanced treatment system of reclaimed water

2 北方某电厂再生水深度处理系统诊断分析

调研发现,国内多数火电厂再生水深度处理系统运行效果不佳,达不到最初设计出力及出水水质。笔者以北方某电厂为例,总结归纳了系统主要存在的问题。

北方某电厂敞开式循环冷却水系统的补充水水源采用自来水与城市再生水,其掺混体积比约1:1.2,自来水来水水质满足《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)标准要求,直补冷却

塔。再生水水源采用北郊污水厂处理的出水,出水水质由执行2000年的三级标准变为2016年提标后的一级A标准。

2.1 设计水量水质及工艺流程

北方某电厂再生水深度处理系统采用“曝气生物滤池+机械加速澄清池(石灰软化)+变孔隙滤池”工艺,系统设计出力2×800 m³/h,出水水质满足《工业循环冷却水处理设计规范》(DL/T 50050—2017)中的相关标准,设计进出水水质见表1。

表1 设计进出水水质		
Table 1 Design inlet and outlet water quality		
项目	设计进水水质	设计出水
pH	7.23(7.54)	7~8.5
浊度/NTU	3.63(4.14)	≤5
COD/(mg·L ⁻¹)	18(45)	≤30
BOD/(mg·L ⁻¹)	5(24)	≤10
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.72(27)	≤10
暂时硬度/(mmol·L ⁻¹)	3.73(4.62)	≤1.3

注:括号内为原设计进水水质。

再生水深度处理系统总占地约7 000 m²,系统设置8座曝气生物滤池,单座设计出力230 m³/h,尺寸12 m×8 m×7 m;设置2座机械加速澄清池,单座设计出力800 m³/h,尺寸D 24 m×7.5 m;设置6座变孔隙滤池,单座设计出力320 m³/h,尺寸6 m×4.5 m×5 m;设置1座斜管沉淀池,设计出力100 m³/h,尺寸7 m×5 m×7.2 m;设置1座泥浆池,尺寸7 m×7 m×3.2 m;设置1座污泥浓缩池,设计出力40 m³/h,尺寸D 7 m×5 m;设置2台离心脱水机,单台设计出力40 m³/h,系统配套反洗水池、反洗水收集池等,工艺流程见图2。

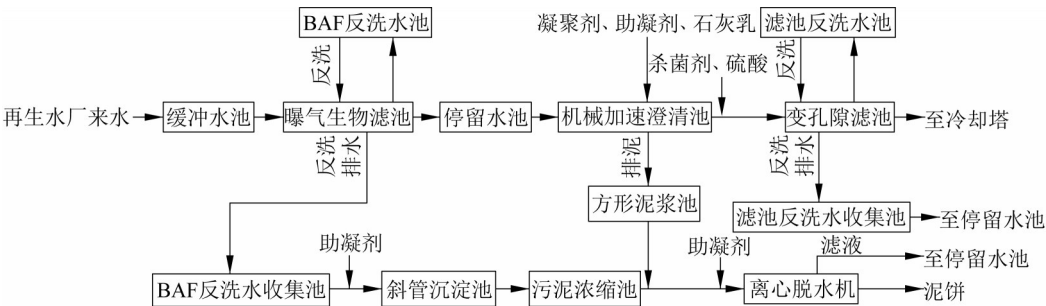


图2 工艺流程
Fig. 2 Process flow

2.2 系统现状诊断分析

北方某电厂再生水深度处理系统自2007年建成以来因存在诸多问题,运行仅处于少量过水状态,水质、水量均达不到设计要求。

(1)设计原水水质变化大,工艺流程结构不合理。由于现阶段国内城市污水处理厂陆续提标改造^[5],再生水来水携带的有机物、悬浮物等污染物质大大降低,B/C、C/N值偏小,可生化性变差,曝气生物滤池必须外加营养剂才能满足处理效果;且曝气生物滤池系统存在配套流程长、故障率高、处理成本大等问题。北方某电厂曝气生物滤池实际运行存在上述问题外,还存在出水携带磨损滤料、脱落微生物膜等杂质,造成出水水质比进水水质差的问题。同时,该电厂机械加速澄清池进水浊度低于原设计,使澄清池上升流速大于处理低浊水时允许的上升流速^[6],运行形成的絮体密度小、松散、不易沉降,出水絮体上浮频发,原池体结构难以保证在水质软化的同时除浊,致使出水水质及稳定性变差。

(2)澄清池泥渣层不受控,出水水质波动大。再生水深度处理系统的机械加速澄清池属于泥渣循环分离型澄清池^[7],其运行稳定性、抗冲击能力、出水水质受活性泥渣层影响较大,一反区保持悬浮态的、浓度稳定且均匀分布的活性泥渣层是关键所在。实际运行时,进水量需随机组运行情况不断调整,澄清池靠搅拌器内循环提升的悬浮泥渣量往往因来水水量、池底泥位不断变化,活性泥渣层浓度不受控等影响,难以同步形成稳态的活性泥渣层。较大浓度的活性泥渣层易造成泥渣内循环路径堵塞,泥渣回流不畅;过小浓度的活性泥渣层易形成较轻絮体,沉降效果差,甚至引发“翻池”现象。

(3)系统排泥浓度变化大,脱水设备运行效果差。北方某电厂再生水深度处理的排泥系统采用人工经验“排泥—泥浆池—污泥浓缩池”的方式。人工经验排泥随意性大,容易使污泥浓度的不确定性增加;且由于石灰污泥易沉淀,更加容易造成从泥浆池所抽污泥的浓度变化过快或幅度过大;污泥浓缩池可将污泥含水率由97%~98%浓缩至94%~95%,浓缩后的污泥浓度无法满足脱水设备进料的要求。石灰污泥的流动性差和现有排泥系统的配置使排泥时机、排泥量、排泥浓度均难以控制,易造成所排污泥

浓度变化较大、变化过快,引发脱水设备扭矩过大或频繁跳机,导致脱水设备无法稳定运转。

(4)加药系统易堵塞,加药位置不合理。北方某电厂基建时再生水处理石灰加药系统采用“干法”投加方式^[8]。由于干法投加石灰受水气的影响易返潮板结、下粉口易形成反拱断料、配药浓度不精确、设备选型不当、管路设计不合理、管路冲洗不彻底等原因导致系统无法可靠连续运行,基本处于瘫痪状态;同时,基建时澄清池混凝剂、助凝剂、石灰加药点位于反应区表面,与原水混合不均匀,反应不充分,难以满足混凝、软化反应所必需的条件,致使混凝、软化反应效果不佳。

3 系统技术改进研究

(1)优化结构设计,缩短工艺流程。对原系统结构设计进行优化:机械加速澄清池二反区下部外喇叭在原有基础上加长裙边,清水区设置斜板。加长裙边能够增加脱稳絮体矾花水力流程;设置斜板增加了沉淀面积,提高悬浮颗粒去除率和表面水力负荷,以适应低浊水的处理。同时增加曝气生物滤池超越管路和废弃斜板沉淀池及配套系统缩短了工艺流程以适应改变后的水质。废弃泥浆池、污泥浓缩池及配套系统,重设污泥预处理系统;废弃“干法”石灰加药系统,重设“湿法”石灰制备投加系统,有效提高了系统运行的可靠率,降低了运行维护的检修量。

(2)调整泥渣形成机理,提供稳态吸附环境。将内循环机械提升形成泥渣层的方式改进为外循环机械强制量供给活性泥渣的方式,自主控制提供必要的混凝反应环境。采用自动排泥系统实现外循环强制供给活性泥渣功能,如图3所示。正常回流模式运行时,污泥泵的频率跟随澄清池进水流量的变化而变化,使回流活性泥渣量为进水流量的5%,使进入澄清池反应区的活性泥渣密度保持稳定。澄清池进水累计量达到预设值时,自动切换排泥模式,按照修正后的排泥时间及时排除累积的老化污泥。排泥结束后,自动切换至回流模式。

(3)重构排泥方式,均质污泥浓度。针对系统排泥浓度变化大,脱水设备运行效果差的问题,首先设计了带污泥回流的混凝沉淀反应器自动排泥系统^[9]。该系统通过设定澄清池进水累积量及排泥基

础时间实现间断排泥,并根据监测的污泥密度值修正排泥基础时间控制澄清池泥位恒定;石灰软化产生污泥的主要成分为 CaCO_3 ,按式(1)的修正系数 $k^{[10]}$ 调节排泥量进而保证澄清池污泥密度在较窄范围内。

$$k=0.5+12.5\times(k_0-1.07)\quad(1.07\leq k_0\leq 1.15)\quad(1)$$

同时在自动排泥系统后串联污泥缓冲调质系统^[11]。系统包含缓冲调制器、污泥搅拌泵、调质稀释模块和自动冲洗模块;缓冲调制器采用圆桶锥底结构,有效解决污泥沉积设备壁及底的问题;污泥搅拌泵能够避免罐内污泥沉淀并实现污泥均质;调质稀释模块解决污泥浓度偏高的问题;自动冲洗模块防止管路污泥沉积的现象。采用“自动排泥+污泥均质”方法实现污泥浓度的精细化调节,能够确保脱水设备安全稳定运行。自动排泥-污泥均质系统如图3所示。

(4)改进制备重设加药,实现药品精准投加。采用水处理熟石灰投加方式改进石灰制备投加系统^[12-13],石灰制备投加系统如图4所示。采用防堵型扰动式粉状物料计量输送装置配制固定浓度的石灰乳溶液(2%~5%)^[14]。石灰投加采用大流量循环

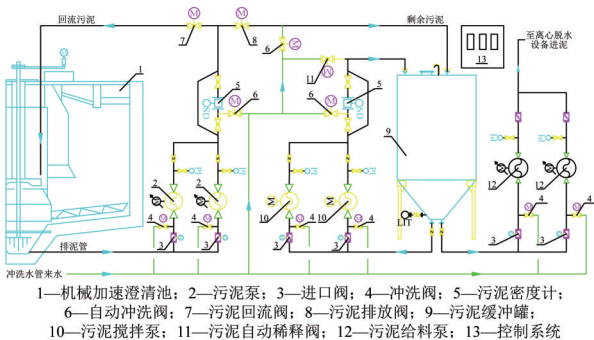


图3 自动排泥-污泥均质系统

Fig. 3 Automatic desilting-sludge homogenization system diagram

管路和石灰调节阀方法,通过澄清池二反区pH及进水量双回路反馈闭环调节石灰调节阀开度^[8],使二反区pH稳定在10~10.3之间^[15];加药泵的进口设置透明管及冲洗系统用来判断管路堵塞情况和控制冲洗效果。本工程将助凝剂、凝聚剂加药方式改为混合器投加,混合器设于澄清池内进水管上,实现水力预混凝,延长混凝反应时间,石灰加药点设于澄清池一反区内进水口,借助搅拌器搅拌与预混凝原水、回流泥渣及时发生共沉淀。通过调整药品投加位置能够实现精准加药。

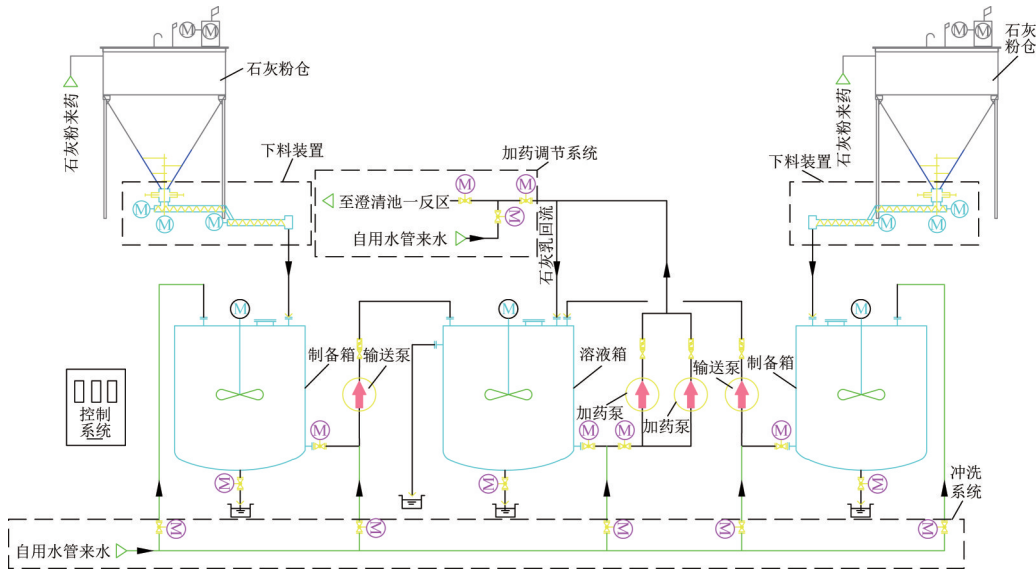


图4 石灰制备投加系统

Fig. 4 Lime preparation dosing system

4 研究成果应用与调试结果分析

4.1 研究成果应用

结合北方某电厂再生水深度处理系统现状,提出改进方案:

- (1)增设曝气生物滤池旁通管路,曝气生物滤池旁路运行。
- (2)将澄清池一反区桶底与伞型罩连接处圆盘由D 1 700 mm封堵为D 500 mm;搅拌器改进为可变

速双螺旋桨叶式搅拌器,转速 20~200 r/min;设置从污泥泵出口至一反区进水口中心位置的强制外循环泥渣回流供给管路,通过跟踪澄清池进水流量的 5% 来调节污泥泵频率,保证在一反区形成浓度稳定的活性泥渣层。

(3)澄清池二反区下部外喇叭状的分隔板在原有 60°倾角裙边的基础上加长 500 mm,清水区水面下 1.5 m 处增加 60°倾角的斜板,水力停留时间由原来的 1.45 h 延长至 1.6 h。

(4)澄清池排泥采用自动排泥,设置 3 台污泥泵,流量为 40 m³/h,扬程为 30 m,变频,进口与澄清池排泥管连接,出口回流管路设置污泥密度计,通过澄清池进水累积量、污泥密度、设定排泥时间等计算控制排泥时机及排泥量。

(5)污泥均质系统设 60 m³ 的立式污泥缓冲罐,直筒段下部连接 60°锥底,设置 2 台污泥搅拌机,流量为 30 m³/h,扬程为 20 m,从锥底抽吸污泥回流至罐顶,均质污泥浓度,确保离心脱水机进料浓度维持在 2%~4%。

(6)石灰系统采用“湿法”制备投加方式,设置 2 套制备能力为 2 000 kg/h 的石灰制备装置,配套 2 台 8 m³ 制备箱,1 台 10 m³ 溶液箱,2 台石灰乳输送泵、2 台石灰乳加药泵;石灰乳制备质量分数为 2%~5%,石灰乳加药泵出口设置大流量循环管路(DN65),通过澄清池一反区设置的调节陶瓷阀(DN25)控制石灰乳投加量,剩余石灰乳回流至溶液箱;石灰乳输送泵、石灰乳加药泵进口管路设置透明管及冲洗管路,在每次配制石灰乳结束时冲洗 30 s。

(7)在澄清池进水管处设置助凝剂、凝聚剂加药管道混合器,采用水力混合方式预混凝;在澄清池一反区桶内进水口中心位置设置 DN25 石灰加药管,并设自动冲洗管路。

技术改进后的再生水深度处理系统工艺流程如图 5 所示。

4.2 调试结果分析

北方某电厂再生水深度处理系统进行上述技术改进。根据机组负荷需要,单列处理水量约 750~950 m³/h,经优化加药调试,各类药剂投加量分别

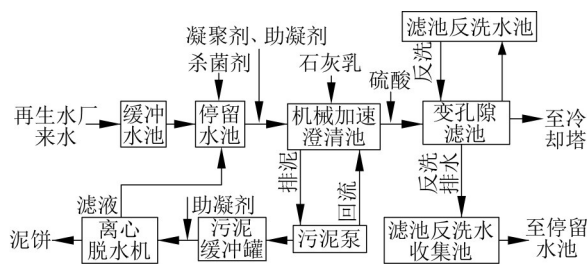


图5 改进的工艺流程

Fig. 5 Improved process flow

为:凝聚剂(聚合硫酸铁)12 mg/L,助凝剂(聚丙烯酰胺)(离心脱水机助凝剂加药量)150 mg/L,软化剂(氢氧化钙)150 mg/L,中和剂(浓硫酸)50 mg/L,杀菌剂(次氯酸钠)3 mg/L。

澄清池二反区 pH 控制在 10.1~10.3 范围内,系统出水浊度、暂时硬度、总硬度分别如图 6、图 7 所示。

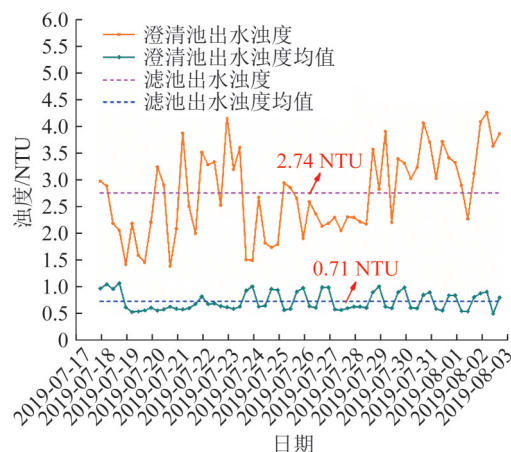


图6 系统出水浊度变化

Fig. 6 Turbidity change diagram of effluent water of the system

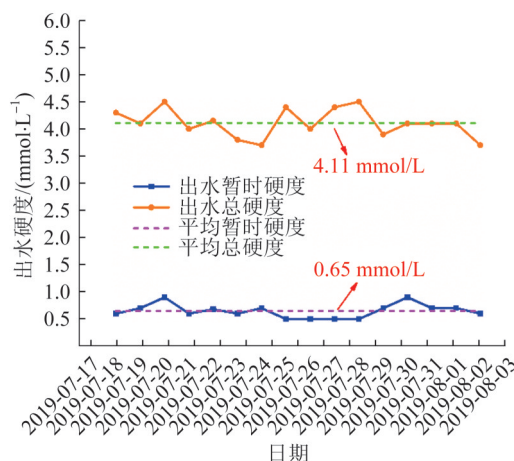


图7 系统出水硬度变化

Fig. 7 Change diagram of system effluent hardness

由图6、图7可知,系统出水浊度为0.71 NTU,暂时硬度为0.65 mmol/L,总硬度为4.11 mmol/L,暂硬去除率为84%,总硬去除率为32%。澄清池排泥经计算控制每累积进水3 000 m³自动排泥1次,排泥量为20 m³,排泥时间为30 min,并根据污泥密度值修正排泥时间,澄清池污泥密度显示值变化见图8。

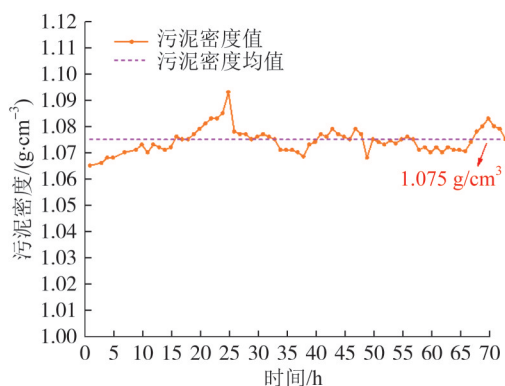


图8 澄清池污泥密度显示值变化

Fig. 8 Change diagram of sludge density display value of clarifier

由图8可知,实际运行污泥密度基本稳定在1.075 g/cm³,澄清池二反区絮体矾花密实繁多且均匀,离心脱水机运行扭矩基本维持在30%左右,泥饼含水率接近75%,滤液清。经技术改进后,恢复系统出力,出水水质优于回用标准,系统运行稳定可靠,自动化程度提高。

4.3 技术改进效益分析

根据2016年—2018年机组负荷情况,北方某电厂循环水补充水量约980 m³/h,再生水深度处理系统改造前,自来水补充水量约450 m³/h,再生水补充水量约530 m³/h。系统改进后,恢复加药、脱泥系统,循环冷却用水水源采用再生水,补水980 m³/h,自来水作为备用水源。系统运行成本主要考虑药剂费、电费、泥饼处置费,经济效益主要体现在水源更换后节约的取水费。经测算,工程投运后电厂单位用水成本由4.01元降至2.21元,吨水运行成本为0.71元,节约取水费1 497.6万元,每年节约用水成本1 130万元,每年减少自来水取水量及再生水排放量288万t,经济、环境效益显著,达到节水减排的目的,效益分析见表2。

5 结论

(1)针对火电厂再生水深度处理系统存在的问

表2 效益分析

Table 2 Benefit analysis

项目	改造前	改造后
药剂费/万元	26.5	320.6
电费/万元	52.7	30.2
泥饼处置费/万元	—	96
取水费/万元	2 438.4	940.8
吨水成本/元	4.01	2.21

注:年运行时间按6 400 h计,电费0.255元/(kW·h),自来水取水费6.7元/m³(含水资源费1.5元/m³),再生水取水费1.50元/m³,泥饼处置费120元/t。药剂费、电费根据实际运行方式计算。

题,提出针对性的改进方案,并在北方某电厂实际应用,调试后恢复系统出力,出水浊度为0.71 NTU,暂硬为0.65 mmol/L,总硬度为4.11 mmol/L,浊度去除率为80%,暂硬去除率为84%,总硬去除率为32%,澄清池污泥密度基本稳定在1.075 g/cm³,脱水机运行扭矩维持在30%左右,泥饼含水率接近75%,系统运行稳定,出水水质指标符合设计要求,自动化程度高。

(2)采用基于“自动排泥+污泥均质”污泥预处理方法、主动外循环定量活性污泥供给方法和带回流及双馈调节“湿法”石灰投加方法等技术改进方法在再生水深度处理工程实际中的运用效果良好,表明该改进方法是合理、可行、可实施的,对相关企业发展再生水深度处理技术的改进工作具有借鉴意义。

(3)火电厂再生水深度处理系统恢复运行,可大幅减少新鲜水用量,符合国家发展战略总体要求,具有良好的经济、环境效益。

参考文献

- [1] 高枫,张宝军,王永宏,等.城市再生水回用于火电厂循环冷却水的应用研究[J].给水排水,2020,56(S1):768-770.
GAO Feng, ZHANG Baojun, WANG Yonghong, et al. The application of urban reclaimed water for circulating cooling water in thermal power plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(S1): 768-770.
- [2] 李海燕,刘晓奎,彭芳,等. ABFT工艺在火电厂循环水排污水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 269-272.
LI Haiyan, LIU Xiaokui, PENG Fang, et al. Application of ABFT process in the treatment of circulating water drainage in a thermal power plant [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41 (6) : 269-272.
- [3] 胡大龙,许臻,杨永,等. 火电厂循环水排污水回用处理工艺研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(1): 33-36.

- HU Dalong, XU Zhen, YANG Yong, et al. Research on the reuse treatment process for the wastewater from circulating water in a thermal power plant [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(1): 33-36.
- [4] 田芳, 张积轩. 中水作为循环水补充水的优化运行试验研究[J]. 东北电力技术, 2019, 40(9): 40-43.
- TIAN Fang, ZHANG Jixuan. Research on optimized operation test of supplement water as circulating water in secondary water [J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(9): 40-43.
- [5] 王洪臣. 城镇污水厂提效改造及技术对策[J]. 建设科技, 2010(21): 40.
- WANG Hongchen. Efficiency improvement and technical countermeasures of urban sewage plant [J]. Construction Science and Technology, 2010(21): 40.
- [6] 朱学兵, 毛进, 张江涛, 等. 上都发电厂预处理系统改造[J]. 热力发电, 2010, 39(6): 62-64.
- ZHU Xuebing, MAO Jin, ZHANG Jiangtao, et al. Retrofit of pretreatment system in Shangdu power plant [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(6): 62-64.
- [7] 李亚敏, 袁浩, 王贺. 火电厂机械搅拌加速澄清池的优化改造[J]. 工业用水与废水, 2019, 50(1): 65-68.
- LI Yamin, YUAN Hao, WANG He. Optimization and modification of mechanical stirring clarification setting pond in thermal power plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2019, 50(1): 65-68.
- [8] 霍书浩, 郑学晶, 陶逢春, 等. 全自动石灰计量系统在火电厂城市中水处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2010, 26(24): 55-58.
- HUO Shuhao, ZHENG Xuejing, TAO Fengchun, et al. Application of automatic lime metering system in treatment of municipal reclaimed water from fossil-fueled power plant [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(24): 55-58.
- [9] 李小军, 杨杰利, 姜国策, 等. 一种带污泥回流的混凝沉淀反应器自动排泥系统: CN 206767733U [P]. 2017-12-19.
- LI Xiaojun, YANG Jieli, JIANG Guoce, et al. An automatic sludge discharge system of coagulation sedimentation reactor with sludge reflux: CN 206767733U [P]. 2017-12-19.
- [10] 叶治安, 慕时荣, 常建军, 等. 石灰混凝工艺自动排泥控制方式的研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(10): 109-112.
- YE Zhian, MU Shirong, CHANG Jianjun, et al. Research on the automatic control method of sludge discharge by lime coagulation process [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(10): 109-112.
- [11] 李小军, 刘勇, 叶茂. 一种石灰污泥缓冲调质系统: CN 105084688A [P]. 2015-11-25.
- LI Xiaojun, LIU Yong, YE Mao. A lime sludge buffer conditioning system: CN 105084688A [P]. 2015-11-25.
- [12] 杨杰利, 陈玉强, 李小军, 等. 一种粉状药剂溶液间歇配制连续投加系统: CN 213854298U [P]. 2021-08-03.
- YANG Jieli, CHEN Yuqiang, LI Xiaojun, et al. A continuous dosing system for intermittent preparation of powdered reagent solution: CN 213854298U [P]. 2021-08-03.
- [13] 叶治安, 张江涛, 王冬梅, 等. 一种水处理系统中熟石灰投加系统: CN 204778995U [P]. 2015-11-18.
- YE Zhian, ZHANG Jiangtao, WANG Dongmei, et al. A hydrated lime dosing system in water treatment system: CN 204778995U [P]. 2015-11-18.
- [14] 张江涛, 王正江, 郭鹏飞, 等. 一种防堵型扰动式粉状物料计量输送装置: CN 207956645U [P]. 2018-10-12.
- ZHANG Jiangtao, WANG Zhengjiang, GUO Pengfei, et al. An anti-blocking disturbance type powder material metering and conveying device: CN 207956645U [P]. 2018-10-12.
- [15] 李春华. 石灰软化工艺中若干问题的探讨[J]. 水处理技术, 1993, 19(5): 53-57.
- LI Chunhua. Discussion on the lime softening process [J]. Technology of Water Treatment, 1993, 19(5): 53-57.
- [作者简介] 慕时荣(1990—), 硕士, 工程师。电话: 13468652351, E-mail: 1053221132@qq.com。
- [收稿日期] 2022-11-02(修改稿)