

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.014

承压式浊环水处理系统的设计与性能研究

陈志斌¹, 袁华洁², 王哲晓², 肖波², 黄光华², 杨治清²,
杨佳奇³

(1. 金华市市政设计院有限公司, 浙江 金华 321000; 2. 中建环能科技股份有限公司,
四川 成都 610045; 3. 成都西柚子科技有限公司, 四川 成都 610045)

摘要: 针对钢铁企业平流沉淀池、化学除油器等传统浊环水处理系统存在的水质不达标、提升环节多、排泥不顺畅、药剂投加量高等问题,设计了一种用于钢铁企业的承压式浊环水处理系统。通过螺旋中心筒等结构提高混合效果,促进原水中钢渣颗粒物絮团的快速形成;利用负压喷射结构,使污泥无动力循环,增大絮团粒径,提高沉淀效率;利用封闭承压的运行环境,减少提升环节,提高排泥顺畅度,同时保持周边环境的整洁度;借助CFD流体力学分析软件模拟系统结构内部的流态变化,结合工程试验验证真实水源的处理效果。结果表明,承压式浊环水处理设备的实际运行效果达到了预期目标。

关键词: 承压式; 浊环水; 涡流; 计算流体力学; 污泥循环

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0084-06

Design of Pressurized Turbid Circulating Water Treatment System and Its Performance

CHEN Zhi-bin¹, YUAN Hua-jie², WANG Zhe-xiao², XIAO Bo², HUANG Guang-hua²,
YANG Zhi-qing², YANG Jia-qi³

(1. Jinhua Municipal Design Institute Co. Ltd., Jinhua 321000, China; 2. CSEEC SCIMEE Sci. & Tech. Co. Ltd., Chengdu 610045, China; 3. Seayou Sci & Tech, Chengdu 610045, China)

Abstract: There are many problems in traditional turbid circulating water treatment system (such as horizontal sedimentation tank and chemical oil removal device) in steel enterprises, such as water quality not up to discharge standard, too much lifting, inconvenience of sludge discharge and high dosage of chemicals. A pressurized turbid circulating water treatment system was thus designed to solve these problems. Spiral center cylinder was applied to enhance the mixing and accelerate the formation of steel slag particle flocs in raw water. The negative pressure jet structure realized the sludge circulation without energy input, increased the particle size of the floc and improved the precipitation efficiency. The close pressurized operating environment was applied to reduce the lifting links, improve the efficiency of sludge discharge, and maintain the cleanliness of the surrounding environment. Computational fluid dynamics (CFD) software was employed to simulate the flow regime change inside the system, and the treatment performance of real water sources was verified by engineering tests, which indicated that the actual operation of the system reached the expected goal.

Key words: pressurized system; turbid circulating water; vortex; computational fluid dynamics; sludge circulation

钢铁企业轧钢生产过程中常会使用大量冷却水对轧件及设备表面进行冲洗、降温等操作,从而产生含有大量氧化铁皮、机械设备油污及其他悬浮杂质的浊环水,由于使用水量大,浊环水需要经过处理达标后循环利用。常见的钢铁企业浊环水处理工艺有平流沉淀池、化学除油器等,其中平流沉淀池主要依靠重力沉降作用,存在停留时间长、沉淀效率低、占地面积大等问题。化学除油器与平流沉淀池的区别在于,增加了斜管/板,配合混、絮凝药剂的化学作用,去除油污及悬浮物,相对于平流沉淀池,其占地面积及停留时间有所改善,但存在药剂消耗量和污泥量较大等问题^[1]。上述工艺均为开放式的矩形池体,普遍存在工艺流程长、占地面积大、出水水质不稳定等问题,通常需要配套独立的过滤或除油设施,同时重力出水后端需多级提升,能耗高,且还存在排泥不畅的问题^[2-3]。针对上述传统浊环水处理技术现状,笔者设计了承压式浊环水处理系统,其在常规沉淀技术的基础上,利用特殊流体结构与封闭承压相结合的方式,促进絮团颗粒的快速形成,从而提高沉淀效率。

1 承压式浊环水处理系统设计

1.1 承压式浊环水处理系统组成介绍

静态混合器:静态混合器的主要作用在于将水处理药剂与待处理原水进行预混合,使药剂与原水在管内其他混合单元的作用下,增强流动的速度梯度,从而形成紊流。同时在静态混合器断面方向产生剧烈的涡流,形成很强的剪切力,促使药剂与原水充分混合。

水力混合装置:水力混合装置属于混凝药剂的反应场所,内部集成有混合填料和特殊结构的混合流道,其主要作用在于设置一定的停留时间,确保混凝过程药剂与原水能够充分反应,同时起到预沉淀的作用,可去除较大粒径或质量的杂质颗粒,减轻后续沉淀单元的处理负荷。

浊环水净化装置:浊环水净化装置是本系统的关键组成部分,属于助凝剂的反应场所,内部集成有斜管、双螺旋中心筒、污泥循环装置等流体结构。其技术核心在于利用双螺旋中心筒,在助凝剂的作

水下实现絮体群的快速聚集成团,同时,在无动力污泥循环装置的作用下,以高浓度的优质絮团污泥作为沉淀载体,提高絮团污泥的沉淀性能,从而使水质得到净化。浊环水净化装置结构如图1所示。

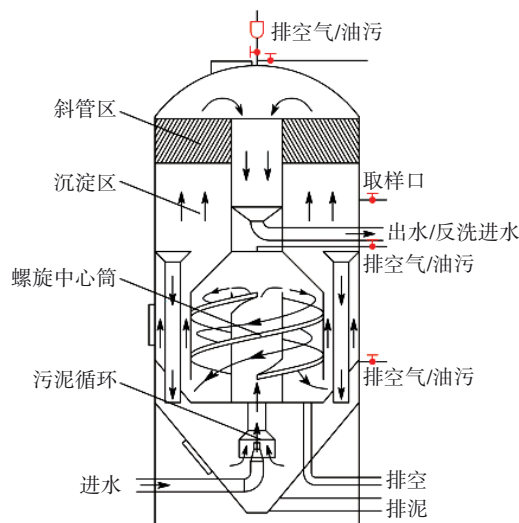


图1 浊环水净化装置结构示意

Fig.1 Structure diagram of turbid circulating water purification device

1.2 工艺原理

承压式浊环水处理系统的工艺流程如图2所示。在一级提升泵及静态混合器作用下,原水先切向进入水力混合装置内部的旋流腔体,通过离心力及重力作用,先分离出较大粒径的颗粒物,同时起到预混合的作用,使剩余细微颗粒物与混凝药剂充分反应,粒径逐渐增大,受重力影响,沉降至水力混合装置底部,达到初次沉淀的效果。剩余粒径较小的絮体随原水压力输送至浊水净化装置。絮体在浊水净化装置内部通过螺旋中心筒等流体混合结构与絮凝药剂产生吸附架桥作用连接成团,在重力作用下,絮团上升速度逐渐减小形成悬浮层,阻碍后续絮团上升,产生网捕作用。当悬浮层累积到一定厚度后,由于整体重力大于浮力而下降,形成沉淀。而上清液在斜管的作用下,去除了多余的细微颗粒,保证了出水水质。同时以原水压力为动力的负压喷射结构形成负压,带动设备底部已沉淀的絮团污泥不断循环回流,以高浓度的优质絮团污泥作

为载体,提高了沉淀效率,减少了药剂投加量^[4],剩余污泥则由设备底部排泥口排出。处理过程中的浮油在设备顶部不断累积,并通过排油管外排。

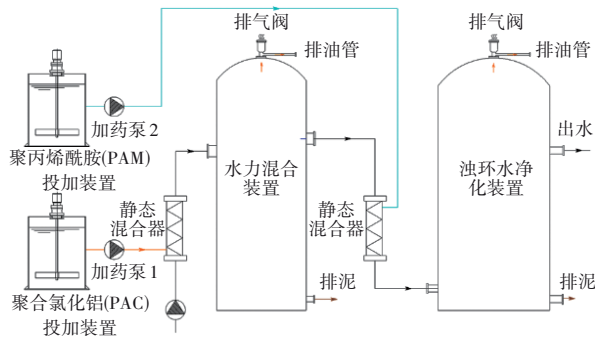


图2 承压式浊环水处理系统工艺流程

Fig.2 Flow chart of pressurized turbid circulating water treatment system

相比传统开放式处理工艺,该工艺的优势在于整个运行过程只需要一级提升泵提供动能,系统出水利用余压进入冷却塔或者过滤器,无需调节池、二次提升泵等设备,工艺流程短、节约能源、减少占地,同时集成了除油功能,且处理过程对系统的环境不会造成影响,技术优势较明显。

2 CFD 流态仿真

2.1 网格划分和边界条件

采用数值分析法研究浊环水净化装置内部流场的运动规律。对该模型进行四面体网格划分,全域控制尺寸,并对叶片和格栅部分进行了网格局部加密,总模型网格数量为5 080 544,生成的网格如图3所示。



图3 计算网格

Fig.3 Computational mesh

计算域中设计速度入口和压力出口的边界条件,其中水流速度入口为1.69 m/s,湍流强度为1%,当量直径为0.25 m,压力出口设置为大气压出口。在流体流动过程中遵循的定律有质量守恒定律、能量守恒定律、动量守恒定律。考虑到水在装置中的流动为湍流,模拟时采用工程中使用最广泛的 $k-\varepsilon$

三维湍流模型,其具有稳定性、经济性和较高的计算精度,符合计算要求。

2.2 数学模型的建立

连续性方程见式(1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³;t为时间,s; u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度,m/s。

动量方程见式(2)。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot v)}{\partial y} + \\ & \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot w)}{\partial z} = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \cdot 2 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - \right. \\ & \left. \frac{2}{3} \cdot \Delta \cdot v \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot u)}{\partial x} + \\ & \frac{\partial(\rho \cdot v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot w)}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: μ 为流体的黏度,Pa·s; F_x 为 x 轴方向的质量力,N; Δ 为拉普拉斯算子。

$k-\varepsilon$ 微分模型包括湍动能 k 方程和湍动能耗散率 ε 方程,分别见式(3)和式(4)。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] - \rho \varepsilon + \mu_t P_c \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad } \varepsilon \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + \mu_t C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_c \quad (4)$$

式中: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_1, C_2$ 分别取0.09、1.00、1.30、1.44、1.92; \bar{U} 为流体的流速,m/s; P_c 为湍动能生成项,按式(5)计算。

$$P_c = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (5)$$

2.3 仿真结果分析

经过CFD流态模拟以后,两种中心筒纵剖面的速度矢量如图4所示。可以看出,普通的中心筒内

水体在筒中的流速分布较均匀,约为0.1~0.15 m/s,而外筒中的流速则呈现明显的速度差异,沿外筒壁面处流速最高达到0.1 m/s左右,在内外筒之间的中心区域流速最低仅约为0.000 2 m/s,流动速度过慢,且筒体之间的流动轨迹方向主要分布于垂直方向,颗粒间的碰撞几率较小。螺旋中心筒内筒中水体流速分布与普通中心筒近似,而外筒由于增加了螺旋叶片,使流体沿着流道向下做螺旋运动,产生了涡流,不仅在垂直方向具有速度矢量,在水平方向也增加了速度矢量。同时,相同区域,流速由0.000 2 m/s增加至0.09 m/s左右。综上所述,通过设置螺旋叶片可以增大中心筒内部的局部流速,改变流体的运动轨迹及方向,形成涡流,增大流体中颗粒的碰撞几率,有利于絮团的成型与增大。

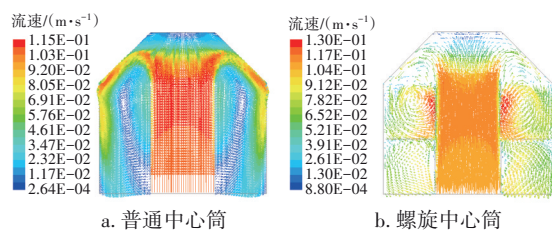


图4 两种中心筒纵剖面的速度矢量

Fig.4 Longitudinal section velocity vector of the two center cylinders

图5为其他结构纵剖面的速度矢量。

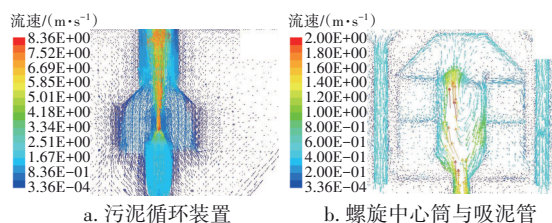


图5 其他结构纵剖面的速度矢量

Fig.5 Longitudinal section velocity vector of the other structures

从图5(a)可以看出,流体经过污泥循环装置的高速射流后,流速最高达到了8 m/s左右,高速的射流作用使得内腔体形成负压,带动了周边流体随射流沿垂直方向朝上运动,流速达到了0.8 m/s,起到了无动力内循环回流的作用,同时在此过程中同样增加了流体的混合效率。从图5(b)可以看出,在污泥循环装置作用下,整个泥斗腔体同样形成负压环境,使得吸泥管插入泥斗处形成压力降,管道内部的流体由上往下运动,促使沉淀区的悬浮污泥顺利到达泥斗,再次参与下一次的循环回流。综上,絮

体颗粒在多方面的综合作用下,配合絮凝药剂的作用,形成体积较大的絮团,沉降性能得以提升。

3 工程试验

结合数值仿真结果,对设备结构进行优化设计,形成工程样机,选择具有代表性水质的钢铁企业,开展承压式浊环水处理系统工程试验,从而验证该系统的实际处理性能是否可满足《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 1345—2012)和《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)相关指标要求;探究在一定水量、药量及连续不间断运行的条件下系统出水水质的稳定性,以及极限运行条件下抗冲击负荷的能力。同时,在保证出水水质的前提下,掌握排泥规律。

3.1 试验总体思路

工程试验的总体思路主要分为指标性验证和稳定性验证两方面,具体如图6所示。

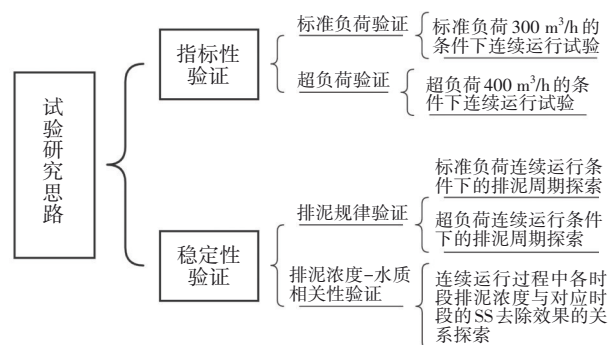


图6 研究思路

Fig.6 Research mentality

3.2 试验方法

结合该钢厂循环水作业区实际情况,以原1780热轧板带生产线浊环水处理系统进水管路作为承压式浊环水处理系统取水点,通过设置增压泵,将原水提升至一体化系统内部进行处理,经过处理后随出水管路排放至原系统后端的调节池,整个工程试验设计处理水量为300 m³/h。

综合钢铁企业的指标要求,考虑到数据的准确性,分析指标确定为浊度与悬浮物(SS)。浊度采用哈希快速测定仪检测,SS按照《水质 悬浮物的测定重量法》(GB/T 11901—1989)检测。

3.3 试验设备及药剂

试验设备包括水力混合装置、浊环水净化装置、聚合氯化铝(PAC)投加装置、聚丙烯酰胺(PAM)投加装置、DN400管道混合器、PLC电气控制柜、电

磁流量计、涡轮法兰蝶阀、电动法兰蝶阀、双口排气阀、单级双吸离心泵。药剂主要包括PAC(有效含量>30%)和PAM(分子质量为12 000 ku)。

3.4 试验条件

以西南地区某钢厂循环水作业区1780热轧板带生产线浊环水为试验原水,其中SS的正常波动范围为100~500 mg/L,水温为40~60℃。试验在露天环境下进行,平均气温在37℃以上。

4 结果与分析

4.1 性能试验

4.1.1 处理量为300 m³/h时的连续运行性能

在24 h不间断运行条件下,探究系统的稳定性,期间保持一定的药剂投加量,观察出水浊度和SS的变化趋势。程峰等人^[5]对化学除油器的研究结果表明,PAM的投加量宜控制在0.3~0.5 mg/L,大于0.5 mg/L时,会因PAM水解不完全产生后絮凝现象,从而对后续工艺段造成影响。参考传统化学除油器的药剂投量,在处理量为300 m³/h条件下,将药剂投加量控制在PAC:PAM=8 mg/L:0.4 mg/L,连续24 h不停机运行,系统运行期间不排泥,直至出水水质变差或者排泥不畅时停止试验,探寻设备的极限运行负荷,结果如图7所示。

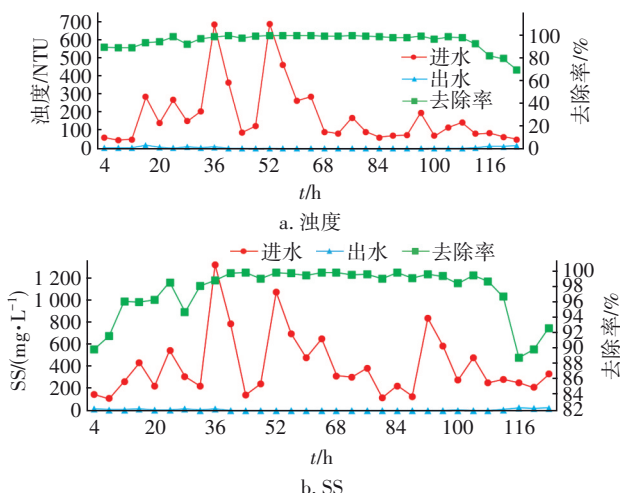


图7 系统连续运行处理量为300 m³/h时的出水水质

Fig.7 Water quality of continuous running system when treatment capacity was 300 m³/h

由图7可知,连续运行期间,系统整体进水水质波动较大,浊度最高为686 NTU(对应SS为1 329 mg/L),最低为49 NTU(对应SS为109 mg/L),平均值为182 NTU(SS平均值为409 mg/L)。不难看出,进出水浊度与SS在一定程度上呈正相关关系。进

步分析可以得出,在药剂投加量不变的前提下,系统连续运行0~40 h期间,浊度及SS去除率整体呈上升趋势,40 h对应的出水浊度为2.05 NTU,SS为1 mg/L,二者去除率均接近100%。40~108 h期间,无论进水水质如何波动,出水浊度始终维持在5 NTU以下,SS也维持在5 mg/L以内,同时存在多组出水SS未检出的情况,说明高浓度的循环污泥对提高出水水质具有促进作用,使系统具备较强的耐冲击负荷能力,能适应较大的水质波动。运行108 h后出现拐点,浊度和SS去除率骤降,出水水质突然变差,说明在不排泥条件下,此时系统已达到极限运行的临界点,系统内部循环污泥的浓度过高,需及时排泥来降低循环污泥浓度。也就是说,当处理量为300 m³/h时,系统连续运行的极限排泥周期在108 h左右。

4.1.2 处理量为400 m³/h时的连续运行性能

将系统处理量调节至400 m³/h,药剂投加量仍控制在PAC:PAM=8 mg/L:0.4 mg/L,连续24 h运行,期间系统不排泥,出水浊度和SS的变化见图8。

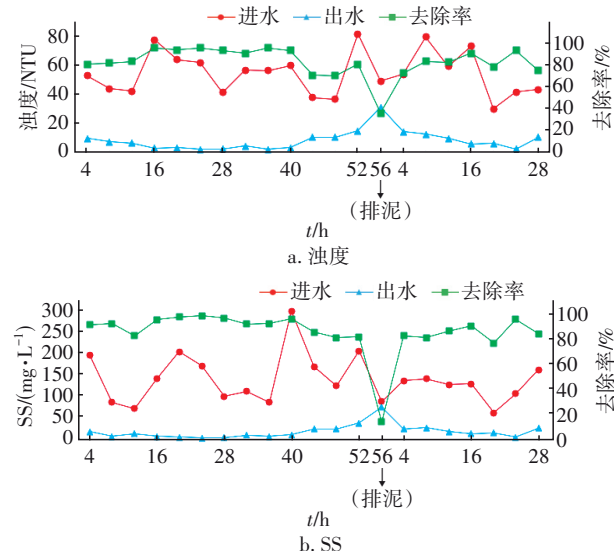


图8 系统连续运行处理量为400 m³/h时的出水水质

Fig.8 Water quality of continuous running system when treatment capacity was 400 m³/h

由图8可知,0~16 h,出水浊度及SS去除率整体呈上升趋势;16~40 h,出水浊度及SS去除率维持在91%以上,其中出水浊度最低为2.43 NTU,SS最低为2 mg/L。40~56 h期间,出水水质开始骤降,56 h对应的进、出水水质差距较小,说明系统内部的循环污泥浓度已达极限,需排泥降低污泥浓度。为证实上述现象是由于污泥浓度过高导致的,在第56小

时采取排泥措施,系统出水水质迅速好转,去除率逐渐回升至90%以上,充分证明了排泥对系统出水水质的影响起关键作用。可见,在处理量为400 m³/h条件下,系统连续运行的极限排泥周期约为56 h。

4.2 循环污泥浓度

当系统内部的循环污泥累积到一定程度后,即达到系统的污泥浓度负荷极限,出水水质将会变差。为探究系统循环污泥浓度与去除率之间的关系,以300 m³/h连续运行试验为基础,监测运行时间分别为36、48、60、72、84、96、108、120 h对应的污泥浓度,结果如图9所示。

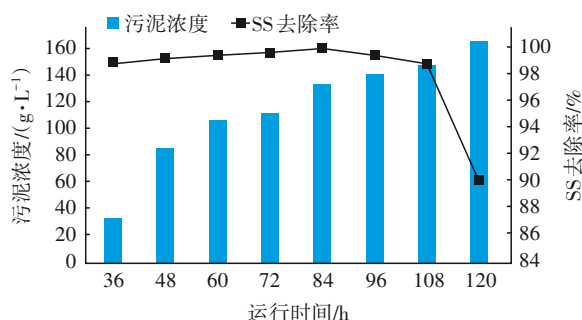


图9 污泥浓度与SS去除率的变化

Fig.9 Change of sludge concentration and SS removal rate

由图9可以看出,当反应时间为36~84 h时,系统内部的循环污泥浓度由31.72 g/L逐渐上升至132.18 g/L,SS去除率由98.95%逐步接近100%,此时段内存在出水SS未检出的情况,说明系统理想的循环污泥浓度约在85~130 g/L之间。随着系统的持续运行,污泥浓度继续增高,84~108 h时污泥浓度由132.18 g/L逐渐增加至145.88 g/L,SS去除率逐渐下降至98.81%,说明此刻系统内部的污泥浓度已达极限负荷。继续运行至120 h,对应的污泥浓度为165.25 g/L,此时SS去除率骤降至90.00%,超过了系统的耐受极限,出水水质受到严重影响,需及时排泥以降低系统内部循环污泥负荷。

5 结论

承压式浊环水处理系统在处理量为300 m³/h条件下连续运行40~108 h时,出水SS≤10 mg/L,去除率可稳定在98%以上,极限排泥周期在108 h左右,超过该时间水质将迅速变差;系统在处理量为400 m³/h(超负荷)、连续运行16~40 h时,出水SS≤10 mg/L,去除率维持在91%以上,排泥周期大幅缩短,约为

40 h;系统中污泥浓度与运行时间呈正相关,在一定范围内,SS去除率随排泥浓度的增加而增大,极限排泥浓度在130 g/L左右,相应SS去除率接近100%,超过该污泥浓度则出水水质急剧下降。

参考文献:

- [1] 王莉. 新型磁化斜板澄清器在钢铁工业浊环水中的研究[J]. 科技视界, 2014(7):323-324.
WANG Li. The research of a new magnetization inclined plate clarifier using in the steel industry turbid water [J]. Science & Technology Vision, 2014(7):323-324 (in Chinese).
- [2] 李洪. 连铸水处理站化学除油器运行问题分析及改造[J]. 冶金动力, 2013(10):51-52.
LI Hong. Analysis of operative problems and upgrading of the chemical degreasers at CC water treatment station [J]. Metallurgical Power, 2013 (10): 51-52 (in Chinese).
- [3] 李杰, 杨兰. 斜管(板)沉淀用于钢铁企业的问题分析及对策[J]. 工业水处理, 2015, 35(10):105-108.
LI Jie, YANG Lan. Problem analysis and countermeasures of inclined tube (inclined plate) sedimentation in the water treatment process in iron and steel enterprises[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(10):105-108(in Chinese).
- [4] 张玉婷. 沉淀池污泥回流强化低浊水处理实验研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.
ZHANG Yuting. The Research on the Enhancement of Low Turbidity Water Treatment by Process of Sludge Recirculation of the Sedimentation Tank [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014(in Chinese).
- [5] 程峰, 何华仁. 酒钢连铸连轧净化浊环水处理工艺优化[J]. 冶金动力, 2018(12):49-52.
CHENG Feng, HE Huaren. Optimization of the turbid circulating water treatment process for continuous caster [J]. Metallurgical Power, 2018 (12): 49-52 (in Chinese).

作者简介:陈志斌(1974—),男,浙江义乌人,本科,高级工程师,主要从事市政给排水设计工作。

E-mail:308520909@qq.com

收稿日期:2020-11-20

修回日期:2021-02-20

(编辑:任莹莹)