

俞岚, 吕尤, 李晓倩. 强化混凝技术处理二沉池出水的正交试验研究[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(1): 16-21.

YU L, LÜ Y, LI X Q. Orthogonal experiment on enhanced coagulation process for advanced treatment of secondary settling tank effluent[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(1): 16-21.

## 强化混凝技术处理二沉池出水的正交试验研究

俞岚<sup>1</sup>, 吕尤<sup>2</sup>, 李晓倩<sup>3\*</sup>

1. 江苏省(宜兴)环保产业技术研究院, 江苏 宜兴 214200

2. 无锡市政设计研究院有限公司, 江苏 无锡 214072

3. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院, 北京 100012

**摘要** 某城市污水处理厂二沉池出水拟采用强化混凝技术进行深度处理后用作邻近发电厂的冷却用水。为了指导生产运行, 采用正交试验对强化混凝技术的主要影响因素进行了研究。结果表明: 影响因素的主次顺序为助凝剂投加量 > 搅拌转速 > 接触污泥浓度 > 絮凝阶段 pH。强化混凝技术处理该二沉池出水的最佳运行工况: PAM 浓度为 0.3 mg/L, 接触污泥浓度为 2.5 g/L, 搅拌转速为 80 r/min, pH 为 6.0。在最佳运行工况下, 浊度由 10.0 NTU 降至 0.5 NTU 以下, TP 浓度由 1.5 mg/L 左右降至 1.0 mg/L 以下, 最低可达 0.2 mg/L, 优于 GB/T 19923—2005《城市污水再生利用 工业用水水质》的相关要求。

**关键词** 强化混凝; 正交试验; 二沉池出水; 浊度

中图分类号: X703 文章编号: 1674-991X(2016)01-0016-06 doi: 10.3969/j.issn.1674-991X.2016.01.003

## Orthogonal Experiment on Enhanced Coagulation Process for Advanced Treatment of Secondary Settling Tank Effluent

YU Lan<sup>1</sup>, LÜ You<sup>2</sup>, LI Xiaoqian<sup>3</sup>

1. Jiangsu (Yixing) Institute of Environmental Industry, Yixing 214200, China

2. Wuxi Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuxi 214072, China

3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract** The effluent of secondary settling tank of a wastewater treatment plant (WWTP) were suggested to be further treated by enhanced coagulation process, and used as cooling water of a power plant. To guide this operation, the orthogonal experiment was performed to study the main factors of enhanced coagulation process. The results showed that the order of influencing factors was coagulant aid dosage > rotation speed > contact sludge concentration > pH at the stage of flocculation. The optimum parameters of the enhanced coagulation process were 0.3 mg/L coagulant aid (PAM), 2.5 g/L contact sludge, 80 r/min rotation speed for flocculation and pH 6.0. Under the optimum parameters, the turbidity of WWTP effluent was decreased from 10.0 NTU to below 0.5 NTU, and TP concentration was decreased from about 1.5 mg/L to below 1.0 mg/L (the lowest was 0.2 mg/L), which were better than the requirements in *The Reuse of Urban Recycling Water - Water quality standard for industrial uses* (GB/T 19923-2005).

**Key words** enhanced coagulation; orthogonal experiment; secondary settling tank effluent; turbidity

针对我国水资源短缺的现状, 全国各地采取了多种解决措施: 包括优化生产设备, 大力提倡节约用

收稿日期: 2015-09-15

作者简介: 俞岚(1987—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事环境保护产业技术研究, yu.lan@jie.org.cn

\* 责任作者: 李晓倩(1979—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事环境污染机理及防治方法研究, lixiaoqian@eraes.org.cn

水;远距离跨区域调水;将城市污水资源化等<sup>[1]</sup>。其中,城市污水厂出水由于污染物含量低、水量大,并且水质水量稳定,对其进行深度处理后可满足某些特定用户的要求,具有经济可行性高,推广前景好等特点。

常用的污水深度处理技术有强化混凝、膜生物反应器、曝气生物滤池和生物接触氧化法等<sup>[2]</sup>,其中强化混凝技术发展成熟、运行管理费用低,在深度处理中具有广泛的应用前景。目前,工业用水占城市供水总量的 50% ~ 80%,而工业用水中工业冷却水所占比例更高,如电力工业的冷却水占电厂总水量的 85% 以上<sup>[3]</sup>。因此,对二沉池出水进行深度处理,使其达到工业冷却水用水标准,将有效节约水资源。在给水处理中,强化混凝技术已应用多年,运行参数较为完备,但将该技术应用于污水的深度处理,由于处理对象的不同,不能进行简单的套用。故笔者以某城市污水厂二沉池出水为试验用水,采用强化混凝技术对其进行深度处理,以期得到污水厂出

水回用作工业冷却水的最佳工况,为今后的生产运行提供依据。

混凝过程分为混合和絮凝 2 个阶段,在 2 个阶段中影响混凝效果的因素较多,包括混凝剂(助凝剂)的种类、投加量、投加点,各阶段水力停留时间、速度梯度、pH、水温,回流污泥浓度等<sup>[4-5]</sup>。相比于混合阶段,絮凝阶段对于混凝效果影响更大,故以絮凝阶段为重点考察对象。此外,考虑城市污水厂二沉池出水的水温和水质较稳定,因此选取的混凝效果影响因素为助凝剂投加量、接触污泥浓度、絮凝阶段 pH 和速度梯度(即絮凝阶段搅拌器转速,以下简称搅拌转速)。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 试验用水

试验用水为某城市二级污水处理厂二沉池出水,水质稳定,具体试验用水水质如表 1 所示。

表 1 试验用水水质

Table 1 Water characteristics of the experimental sample

浊度/NTU	pH	COD <sub>Cr</sub> /(mg/L)	TP 浓度/(mg/L)	硬度/(mg/L)	碱度/(mg/L)
9.0 ~ 11.0	7.0 ~ 7.5	40 ~ 45	1.0 ~ 1.8	320	150

注:硬度和碱度均以 CaCO<sub>3</sub> 计。

#### 1.1.2 试验用泥

将混凝沉淀过程产生的污泥以适当比例回流至混凝阶段,可以增加原水的颗粒物浓度,提高颗粒的碰撞机率,改善低浊水的混凝效果,从而起到强化混凝的作用。由于试验产生的泥量较少,起不到应有的作用,而城市污水厂二沉池回流污泥的污泥浓度适宜,故以之代替强化混凝试验过程中所需的回流污泥。为了避免混淆,将强化混凝所需回流污泥称为接触污泥。

#### 1.1.3 混凝剂

由于硫酸铝作为混凝剂具有性价比高,使用过程中不易对设备造成腐蚀以及不增加水中色度等优点,故选分析纯硫酸铝作为混凝剂。

#### 1.1.4 试验装置及测试方法

试验装置为深圳中润 ZR4-6 型混凝试验搅拌机。浊度采用美国 HACH 2100N 型激光浊度仪测定;pH 采用美国 Thermo Scientific Orion 3 Star 型便

携式 pH 计测定;总磷浓度采用钼酸盐分光光度法<sup>[6]</sup>测定;碱度采用酸碱指示剂滴定法<sup>[6]</sup>测定;硬度采用 EDTA 滴定法<sup>[6]</sup>测定;污泥浓度采用烘干称重法<sup>[7]</sup>测定。

### 1.2 试验方法

研究<sup>[8-10]</sup>表明,在循环冷却水系统中,浊度对腐蚀作用有重要影响。混凝过程最主要的作用是去除水中的悬浮物,因此,选取浊度去除率作为评价指标。由于影响混凝效果的因素较多,且各因素间相互影响、相互制约,为了得到最佳的处理效果,采用正交试验方法<sup>[11]</sup>进行研究。

重点考察了助凝剂投加量、接触污泥浓度、絮凝阶段 pH 和搅拌转速 4 种影响因素。为了保证试验的效率和经济性,同时又不失反映问题的全面性,每个因素选取 3 个值,依据相关文献<sup>[12-14]</sup>,确定各因素值如表 2 所示;采用的 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 型正交试验如表 3 所示。

表 2 强化混凝试验因素

Table 2 The experimental factor of enhanced coagulation process level table

水平	因素			
	助凝剂投加量(A)/(mg/L)	接触污泥浓度(B)/(g/L)	絮凝阶段 pH(C)	搅拌转速(D)/(r/min)
1	0	0	6.0	20
2	0.1	5.0	6.5	50
3	0.3	2.5	7.0	80

表 3 正交试验  $L_9(3^4)$

Table 3 Orthogonal experiment table  $L_9(3^4)$

试验号	水平			
	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

试验在桨板式六联搅拌机上进行,每组试验取 3 L 试验用水,平均倒入 3 个搅拌烧杯中,进行平行试验。试验分为混合、絮凝和沉淀 3 个阶段。混合阶段投加 10 g/L 的  $Al_2(SO_4)_3$  溶液 1 mL,以 500 r/min 快速搅拌 1 min;絮凝阶段对助凝剂投加量、接触污泥浓度、搅拌转速及 pH 进行调节,絮凝时间为 15 min;沉淀阶段设定静沉时间为 15 min。试验结束后取上清液进行测试。

## 2 结果与讨论

以浊度去除率为评价指标的正交试验结果如图 1 所示。由图 1 可知,当原水浊度为  $(10.0 \pm 1.0)$  NTU 时,利用强化混凝技术对试验用水进行处理,浊度去除率为 85.2% ~ 93.6%,处理后水中剩余浊度为 0.6 ~ 1.6 NTU,平均值为 1.1 NTU,完全满足 GB/T 19923—2005《城市污水再生利用 工业用水水质》中敞开式循环冷却水浊度小于 5.0 NTU 的规定要求。

以浊度去除率为评价指标的正交试验极差结果如表 4 所示。从表 4 可知,在测试范围内,各因素中助凝剂投加量对强化混凝技术的影响最大,其次是搅拌转速和接触污泥浓度,而 pH 的影响最小。

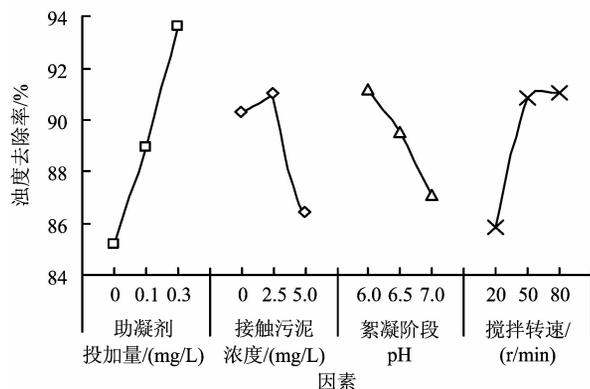


图 1 以浊度去除率为评价指标的正交试验结果

Fig. 1 Orthogonal experiment result of evaluation of turbidity removal rate

表 4 正交试验极差结果

Table 4 Range result of orthogonal experiment

因素	助凝剂投加量	接触污泥浓度	絮凝阶段 pH	搅拌转速
极差	8.5	4.4	4.1	5.2

通过对正交试验评价指标的计算分析,得到强化混凝技术处理该污水厂出水的最佳组合:助凝剂投加量为 0.3 mg/L,接触污泥浓度为 2.5 g/L,絮凝阶段 pH 为 6.0,搅拌转速为 80 r/min。由于所得到的最佳组合并不在正交试验表所列的组合中,故重新取试验用水作为原水对正交试验得到的最佳组合进行 3 次验证试验,原水浊度为 10.0 NTU,结果如表 5 所示。

表 5 验证试验结果

Table 5 Verification test results

验证试验	处理后水浊度/NTU	去除率/%
1	0.4	95.8
2	0.5	95.1
3	0.4	95.6

从表 5 可以看出,按照最佳组合对试验用水进

行强化混凝处理,处理后的出水浊度均小于 0.5 NTU,去除率均高于 95.0%,优于 9 组正交试验的处理效果。

### 2.1 助凝剂的影响分析

试验用水浊度为 9.0 ~ 11.0 NTU,属于低浊水体<sup>[15]</sup>。低浊水中的胶体颗粒细小,颗粒粒径比较均一,具有较强的动力稳定性和凝聚稳定性<sup>[16]</sup>;而且单位体积内的颗粒数量较少,处理过程中大大降低了颗粒碰撞几率。正是由于上述原因,使得低浊水难于处理。

从上述各组试验结果可以看出,投加助凝剂可以提高强化混凝技术对该低浊水的去除率,改善出水水质<sup>[17-18]</sup>。这是因为投加的助凝剂为阳离子型聚合电解质,属于高分子物质,在混凝处理中,通过助凝剂巨大的吸附表面积及优良的架桥能力,加上对胶体颗粒的电性中和,可使胶体颗粒快速脱稳,提高颗粒之间的有效碰撞速率<sup>[19-20]</sup>。而且该种作用对混凝效果的提高要大于增大速度梯度的作用,因为增大速度梯度对于微观的分子热运动影响很小<sup>[21]</sup>,这与正交试验结果一致。

在水中投加助凝剂,使得原本细小、松散的絮体变得粗大、密实,提高了颗粒的沉降性能,增强了混凝剂的混凝效果。这从试验过程中矾花的形成情况也可以看出:没有投加 PAM 的混凝反应,矾花絮凝不好、较为松散,在沉淀过程中,漂浮着不易沉淀;而投加了 PAM 的混凝反应,矾花均一、密实,沉降性能很好。由于试验投加了适量的 PAM,并未出现因 PAM 过量而引起的混凝效果变差的现象发生。

### 2.2 搅拌转速的影响分析

根据桨板式搅拌器的计算方法<sup>[22]</sup>,可知搅拌器提供功率为:

$$N_1 = \frac{C_p \rho \omega^3 z e b R^4 \sin \theta}{408g} \quad (1)$$

式中: $N_1$  为搅拌器提供功率, kW;  $C$  为阻力系数,取 0.4;  $\rho$  为密度, 1 000 kg/m<sup>3</sup>;  $\omega$  为搅拌器旋转角速度, rad/s;  $z$  为搅拌器浆叶数;  $e$  为搅拌器层数;  $b$  为搅拌器浆叶宽度, m;  $R$  为搅拌器半径, m;  $g$  为重力加速度, 9.8 m/s<sup>2</sup>;  $\theta$  为桨板角度, (°)。

搅拌所需功率<sup>[22]</sup>:

$$N_2 = \mu Q t G^2 / 10^3 \quad (2)$$

式中: $N_2$  为搅拌所需功率, kW;  $\mu$  为水的黏度, 10<sup>-3</sup> Pa·s;  $Q$  为流量, m<sup>3</sup>/s;  $t$  为水力停留时间, s;  $G$  为速度梯度, s<sup>-1</sup>。

搅拌过程中,搅拌器提供功率应该与搅拌所需功率相等,即  $N_1 = N_2$ 。通过对六联搅拌机烧杯、搅拌桨等尺寸的测量,以及角速度与搅拌转速之间的转换,得出速度梯度与搅拌转速间的关系:

$$G^2 = 0.0018 \times n^3 \quad (3)$$

式中  $n$  为转速, r/min。

在絮凝阶段,  $GT$  平均值应控制在 10<sup>4</sup> ~ 10<sup>5</sup> 内 ( $T$  为絮凝时间, s)<sup>[16]</sup>。根据式(3)可知,当搅拌转速为 20、50 和 80 r/min 时,对应的  $G$  为 3.8、15 和 30.4 s<sup>-1</sup>。试验设计的絮凝时间为 15 min,所以 3 种搅拌转速在絮凝阶段提供的  $GT$  值分别为 3 420、13 500 和 27 360。可见,搅拌转速为 50 和 80 r/min 均符合要求。但由于试验用水为低浊水,水中颗粒数量较少,之间碰撞几率低,而较大的  $G$  及  $GT$  值则可以提高颗粒之间的有效碰撞几率,改善处理效果。因此,采用 80 r/min 的搅拌转速,可以有效提高混凝技术对低浊度水的处理能力。

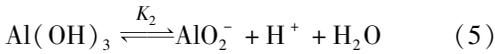
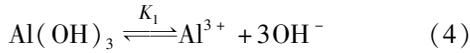
如果混凝过程提供的速度梯度(搅拌转速)很小,污泥自身沉淀吸附的胶体数量便少,对浊度的去除作用将大大降低;如果提供的速度梯度很大,使水体的剪切力很大,则不利于矾花的增大密实<sup>[23]</sup>。所以提供适宜的速度梯度(搅拌转速)不但可以使污泥分散到烧杯的各部位,而且使颗粒间的有效碰撞机率增高,使污泥吸附更多的颗粒物而沉降,大大提高了混凝效果。因此,可以认为污泥投加量对混凝反应的影响很大程度上取决于混凝过程所提供的速度梯度是否适宜,即适宜的速度梯度对混凝效果影响大于投加接触污泥浓度,这与正交试验结果一致。

### 2.3 接触污泥浓度的影响分析

水中颗粒级配越单一,越不利于水中颗粒物脱稳形成大而密实的矾花;如果水中颗粒物大小不一,则其聚集形成的矾花越密实,沉降性能越好。试验用水属于低浊水,其水中胶体颗粒细小且均匀,而向水体中投加的接触污泥与水中胶体颗粒相比,是一些大而密实的颗粒物。不但使得水中颗粒物级配变得丰富,有利于矾花的密实,提高沉降性,而且在自身沉降的过程中,可以吸附水中的胶体颗粒一起沉降。但不是投加污泥的量越多越好,向水中投加接触污泥,在增强混凝效果的同时,也增加了水中的颗粒物浓度,如果水中颗粒物过多,会影响到后续的沉淀过程。这从试验结果中也可以看出,当接触污泥浓度提高到 5 g/L 时,处理效果反而下降。

### 2.4 pH 的影响

由于水体的 pH 不同,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  在水中的溶解度不同, 对混凝反应的作用能力则不同<sup>[24]</sup>。  $\text{Al}(\text{OH})_3$  在水中将同时发生碱式和酸式电离, 反应方程式如下:



当水温为 18 ~ 25 °C 时, 水的电离平衡常数为  $1.0 \times 10^{-14}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  的碱式电离和酸式电离的溶度积常数 ( $K_1$  和  $K_2$ ) 分别为  $1.3 \times 10^{-33}$  和  $1.6 \times 10^{-13}$ 。根据式(4)、(5)可以计算出 pH 为 6.0、6.5 和 7.0 时, 对混凝起有效作用的  $\text{Al}(\text{OH})_3$  占总硫酸铝投加量的比例分别为 99.7%、99.1% 和 97.2%。可见 pH 为 6.0 时, 铝盐水解产物中有效絮凝成分最多, 对絮凝效果的作用最大, 但不同 pH 所引起的  $\text{Al}(\text{OH})_3$  的量变化不大, 所以 pH 对混凝效果影响不大, 故 pH 对本试验的影响最小。

### 2.5 TP 的去除

磷浓度是循环水的另一重要检测指标。磷浓度过高, 不仅会对系统产生腐蚀和结垢的危害<sup>[25]</sup>, 而且还会促进微生物的生长进而导致水质恶化, 加大动力消耗, 形成生物黏泥, 降低缓蚀剂效力等不良影响<sup>[26]</sup>。众所周知, 强化混凝反应对 TP 有较好的去除效果<sup>[27]</sup>。因此, 对上述正交试验的 TP 去除情况进行了考察。9 组正交试验的 TP 去除效果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 强化混凝对水中 TP 的去除效果明显, 最高去除率可达到 90.4%, 出水 TP 浓度最低为 0.19 mg/L。

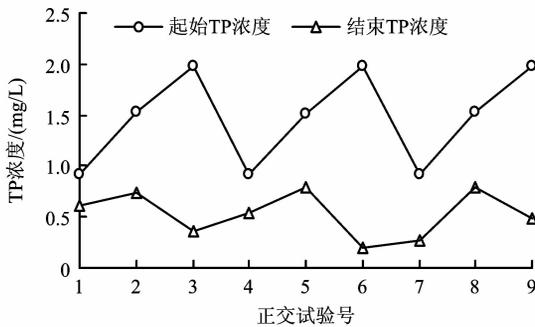


图 2 强化混凝技术对 TP 的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of TP of enhanced coagulation process

以强化混凝试验起始 TP 浓度、结束 TP 浓度,

以及 TP 去除量分别除以起始浊度、结束浊度, 以及浊度去除量, 获得 TP 与浊度的对比如图 3 所示。从图 3 可以看出, 起始 TP 浓度/起始浊度与 TP 去除量/浊度去除量的变化趋势具有一致性, 说明二沉池出水中的 TP 可能主要以悬浮形式存在, 其去除主要通过悬浮物混凝沉淀的方式得以实现。结束 TP 浓度/结束浊度与其他 2 组值相比明显升高, 说明试验出水中剩余 TP 可能主要以溶解形式存在, 如聚磷酸盐等。周波等<sup>[28]</sup>的研究表明, 聚磷酸盐等溶解性磷难以通过混凝沉淀的方式有效去除。因此, 如何稳定高效地去除二沉池出水中的总磷有待进一步研究。

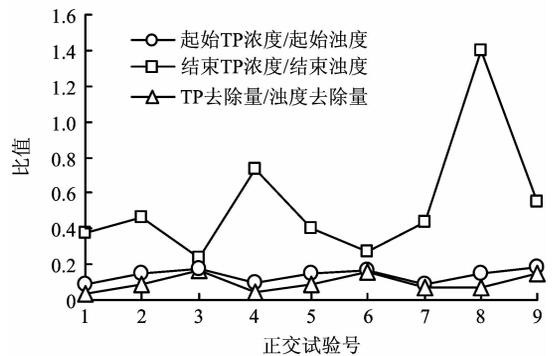


图 3 强化混凝技术 TP 与浊度对比分析

Fig. 3 The contrastive analysis of TP and turbidity of enhanced coagulation process

## 3 结论

(1) 强化混凝技术对于城市污水厂出水中浊度、TP 的去除效果较好。出水浊度由最高值 11.00 NTU 降至 0.45 NTU, TP 浓度最低可达到 0.19 mg/L, 其出水水质完全符合 GB/T 19923—2005《城市污水再生利用 工业用水水质》中敞开式循环冷却水关于浊度的要求。

(2) 当混合阶段及沉淀阶段运行工况确定时, 通过正交试验可知去除城市污水厂出水中浊度的絮凝阶段的最佳运行工况: 助凝剂投加量为 0.3 mg/L、接触污泥浓度为 2.5 g/L、搅拌转速为 80 r/min、pH 为 6.0。强化混凝技术影响因素的主次顺序为助凝剂投加量 > 搅拌转速 > 接触污泥浓度 > 絮凝阶段 pH。

### 参考文献

[1] 刘洪彪, 武伟亚. 城市污水资源化与水资源循环利用研究[J]. 现代城市研究, 2013(1): 117-120.

- LIU H B, WU W Y. Study to urban wastewater reuse and water resources recycling [J]. *Modern Urban Research*, 2013 (1): 117-120.
- [2] 方志珍. 污水处理厂尾水深度处理工艺方案研究[D]. 合肥: 安徽建筑工业学院, 2010: 16-17.
- [3] 黄伟杰. 工业废水回用循环冷却水的可行性研究[J]. *化学工程与装备*, 2013(8): 234-236.
- [4] 赵艳侠. 钛盐混凝剂的混凝行为、作用机制、絮体特性和污泥回用研究[D]. 济南: 山东大学, 2014: 8-19.
- [5] LANGER S J, KLUTE R, HAHN H H. Mechanisms of floc formation in sludge conditioning with polymers [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 30(8): 129-138.
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] 宋成军, 董保成, 赵立欣, 等. 不同预处理剩余污泥的中温厌氧消化试验研究[J]. *可再生能源*, 2013, 31(11): 111-115.
- SONG C J, DONG B C, ZHAO L X, et al. Experimental study on different pretreatment of waste activated sludge in middle temperature anaerobic digestion [J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(11): 111-115.
- [8] 吕勇, 马云峰, 王肇君, 等. 高浊度工业循环冷却水中菌藻的控制[J]. *工业水处理*, 2012, 32(8): 94-96.
- LÜ Y, MING Y F, WANG Z J, et al. Control of bacteria and algae in industrial circulating cooling water in high turbidity condition [J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, 32(8): 94-96.
- [9] 阎建伟, 董朝增. 循环水浊度升高的原因分析与对策[J]. *华电技术*, 2013, 35(5): 58-61.
- YAN J W, DONG C Z. Analysis on reasons of higher turbidity of circulating water and countermeasures [J]. *Huadian Technology*, 2013, 35(5): 58-61.
- [10] 刘学鹏, 乔伟强. 循环水浊度异常升高的原因分析与对策[J]. *广州化工*, 2012, 40(23): 137-138.
- LIU X P, QIAO W Q. Cause analysis and countermeasures of abnormally elevated circulating water turbidity [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, 40(23): 137-138.
- [11] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52-55.
- LIU R J, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52-55.
- [12] 付昆明, 李冬, 朱兆亮, 等. 呼延水厂低温低浊水的絮凝试验研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(11): 39-42.
- FU K M, LI D, ZHU Z L, et al. Experimental study on flocculation of low temperature and low turbidity water in Huyan water treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(11): 39-42.
- [13] 张海洋, 庞金钊, 杨宗政, 等. 用混凝及污泥回流处理二沉池出水的研究[J]. *中国造纸*, 2010, 29(2): 35-38.
- ZHANG H Y, PANG J Z, YANG Z Z, et al. Treatment of effluent from secondary sedimentation pool by coagulation and sludge returning method [J]. *China Pulp & Paper*, 2010, 29(2): 35-38.
- [14] HU C Z, LIU H J, QU J H, et al. Coagulation behavior of aluminum salts in eutrophic water: significance of Al-13 species and pH control [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(1): 325-331.
- [15] 赵松. 低浊度净水厂运行现状分析与建议[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [16] 李圭白, 张杰. 水质工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 48-86.
- [17] GHANEM A V, YOUNG J C, EDWARDS F G. Mechanisms of ballasted floc formation [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, 133(3): 271-277.
- [18] DESJARDINS C, KOUDJONOU B, DESJARDINS R. Laboratory study of ballasted flocculation [J]. *Water Research*, 2002, 36(3): 744-754.
- [19] LETTERMAN R D, IYER D R. Modelling the effects of hydrolyzed aluminum and solution chemistry on flocculation kinetics [J]. *Environmental Science & Technology*, 1985, 19(8): 673-681.
- [20] YU W Z, GREGORY J, CAMPOS L C. Breakage and re-growth of flocs formed by charge neutralization using alum and polyDADMAC [J]. *Water Research*, 2010, 44(13): 3959-3965.
- [21] 田宝义. 微污染源水的强化混凝技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2004: 51.
- [22] 中国市政工程华北设计研究院. 给水排水设计手册: 第3册[M]. 2版. 北京: 中国建筑出版社, 2000: 474-477.
- [23] SERRA T, CASAMITJANA X. Modelling the aggregation and break-up of fractal aggregates in a shear flow [J]. *Applied Scientific Research*, 1998, 59(2/3): 255-268.
- [24] KUAN W H, WANG M K, HUANG P M, et al. Effect of citric acid on aluminum hydrolytic speciation [J]. *Water Research*, 2005, 39(15): 3457-3466.
- [25] 叶晓林, 刘远. 工业循环冷却水系统正磷含量对系统的影响[J]. *科技传播*, 2012(7): 96-98.
- [26] 尹波. 循环冷却水系统存在问题及对策[J]. *河南化工*, 2005, 22(11): 42-43.
- [27] POLANSKA M, HUYSMAN K, VAN K C. Investigation of microbially available phosphorus (MAP) in flemish drinking water [J]. *Water Research*, 2005, 39(11): 2267-2272.
- [28] 周波, 李柏志, 王昊, 等. 微污染水混凝除磷的中试研究[J]. *环境工程*, 2010, 28(增刊): 46-48.
- ZHOU B, LI B Z, WANG H, et al. Pilot-scale study on phosphorus removal of micro-polluted water by coagulation process [J]. *Environmental Engineering*, 2010, 28(Suppl): 46-48. ▽