

电解浮选用于活性污泥固液分离的研究

陈金奎, 万晶, 施汉昌*

(清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 在装有 $\text{Ti}/\text{RuO}_2\text{-IrO}_2\text{-TiO}_2$ 阳极、Ti 阴极的电解浮选槽中进行了活性污泥固液分离的研究。考察了影响电解浮选性能的操作参数, 这些参数包括水力停留时间、电流密度、进水 SS 浓度和进水 pH 值。研究表明, 电解浮选是高效的固液分离单元, 水力停留时间和电流密度是主要的影响因素。SS 的去除率随着水力停留时间和电流密度的增加而增大; 污泥负荷增加, SS 的去除率下降; pH 值影响电解产生微气泡的尺寸和污泥性质, 但对 SS 的去除影响不大, 实际应用中可以不调节 pH 值。进水 SS 约 1 000 mg/L 时, 当水力停留时间为 20 min, 接触室电流密度为 5 mA/cm², 分离区电流密度为 2.5 mA/cm², SS 的去除率可达 97% 以上, 此时的能耗为 0.4 ~ 0.5 (kW·h)/m³ 废水。电解浮选产生的浮渣含水率为 95.9%, 低于溶气气浮和二沉池的污泥含水率, 对污泥减量化及其最终处置有较大的意义。

关键词: 电解浮选; 固液分离; 单因素优化试验; SS 去除率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)11-2333-06

Electro-Flotation Using in Solid-Liquid Separation of Activated Sludge

CHEN Jin-luan, WAN Jing, SHI Han-chang

(ESPC State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The separation of suspended solids (SS) from activated sludge was carried out in an electro-flotation cell which has two sets of electrodes, three $\text{Ti}/\text{RuO}_2\text{-IrO}_2\text{-TiO}_2$ anodes and three Ti screen cathodes. The effect of operating parameters on the performance of the electro-flotation system was examined. The parameters investigated were hydraulic retention time (HRT), current density, initial SS concentration and initial pH. The results show that electro-flotation cell is a unit of high performance in solid-liquid separation. HRT and current density are the main affecting factors. The removal ratio of SS increases with increment of HRT and current density; and it decreases with the increment of sludge loading. The pH value affects the size of tiny bubbles generated from water electrolysis and the character of sludge, but it has little effect on the removal of SS. The pH value is not need to be adjusted during the electro-flotation. Under the conditions with initial SS about 1 000 mg/L, HRT 20 min, a current density 5 mA/cm² in contacting zone, a current density 2.5 mA/cm² in separating zone, the removal ratio of SS can reach up to 97%, at this point, the electrolysis energy consumption is 0.4 ~ 0.5 (kW·h)/m³ wastewater. The water content of the sludge from electro-flotation is much lower than that from dissolved air flotation and secondary sedimentation tank, which has significant in the decrement and final disposal of the sludge.

Key words: electro-flotation; solid-liquid separation; single factor optimize experiment; removal ratio of SS

为了能充分利用提高反应效率的新型水处理生物反应器, 必须改善迄今占优势的沉淀法活性污泥固液分离的传统方法^[1]。电解浮选为活性污泥固液分离提供了一种改善和优化的方法。

电解浮选法是使污染物粘附在电解水所产生的微小氢气和氧气气泡而浮选到水体表面的简单过程^[2]。电解浮选由 Elmore 于 1904 年首次提出用于从矿石中浮选贵重矿物^[3]。电解浮选具有许多独特的优点: 产生的气泡平均直径微小^[4], 浮载能力高^[5~7]; 单元小且紧凑, 比其他浮选单元需要更少的维护和运行费用^[7]; 一般不需添加化学试剂, 可望避免产生二次废物; 设备相对较为简单, 易于自动控制^[8]; 阳极过程中对有机污染物有一定的氧化作用^[9]。

电解浮选有效地应用于下列水处理: 棕榈油制造厂污水^[10], 含油废水和含油乳化液^[6,7,11,12], 采矿废水^[13], 地下水^[14], 洗衣房废水^[15], 宾馆废水^[16], 城市污水^[17], 胶状颗粒^[18]等。但使用电解浮选进行活性污泥固液分离的文献报道几乎没有, 有些文献报道成功地使用电解浮选进行悬浮物的分离^[16,17,19]。大部分的研究是利用溶解性阳极如 Fe 或 Al 和不锈钢阴极进行浮选。虽然铁、铝和不锈钢较为廉价易得, 同时也能完成电凝聚和电解浮选的功能, 但是这些阳极是可溶解的。更糟糕的是, 在部分溶解的粗糙电极表面产生的气泡往往具有较大的

收稿日期: 2005-12-19; 修订日期: 2006-03-21

作者简介: 陈金奎 (1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制。

* 通讯联系人, E-mail: hanchang @tsinghua.edu.cn

尺寸^[18],降低了电流效率和浮选效率.为了减少电极材料的消耗和控制电流效率,需要进一步研究电解浮选用于固液分离的性能.本研究采用不溶性电极进行电解浮选用于活性污泥固液分离的研究,考察水力停留时间、电流密度、初始 SS 浓度、初始 pH 值等操作条件的影响,通过单因素优化试验,获得电解浮选用于固液分离的主要影响因素和优化的工艺参数.

1 材料与方法

1.1 试验装置

图 1 是电解浮选用于活性污泥固液分离的试验流程图.

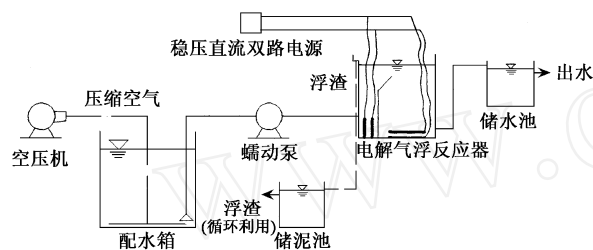


图 1 试验流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

电解浮选反应器主要由反应槽、电极板和直流电源 3 部分组成.

1.1.1 电解浮选反应槽

电解浮选在自制的有机玻璃电解槽中进行.电解槽的尺寸为 400mm × 150mm × 420mm,有效容积 24L.反应器由接触室和分离区构成,两段式的电解浮选将保证细分散颗粒的去除,进一步保证出水水质.

1.1.2 电极板

电极是电解浮选反应器的核心部件.接触室和分离区中共安置 6 块电极板,作为电解的阴阳极.

实验中使用的电极板由北京市化工机械厂加工,网状结构.

阳极: Ti/ RuO₂- IrO₂- TiO₂ 电极,接触室: 100mm × 100mm × 1.2mm (厚度) 细网 2 片;分离区: 200mm × 100mm × 1.2mm 细网 1 片.

阴极: Ti 电极,接触室: 100mm × 100 mm × 1.4mm (厚度) 细网 2 片;分离区: 200mm × 100mm × 1.2mm 细网 1 片.

极板面积^[20](以下不加说明时均指阳极极板面积)都为 400cm²,阳极和阴极的面积比为 1:1.

阴极和阳极预先在电解液中极化 6h 后进行

试验.

1.1.3 电源

WYK-3010 直流稳压电源(扬州东方集团有限公司)及 WYK-303B₂ 直流稳压电源(东方集团扬州金通电子有限公司)各 1 台.

1.2 试验水质

为了保证试验用水中的 SS 与实际活性污泥中的 SS 性质相似,试验用水由取自清河污水处理厂二沉池回流污泥稀释配制而成(模拟高效生物反应器出水的污泥浓度).

1.3 试验监测项目及分析方法

SS 采用标准方法^[21]进行测定.

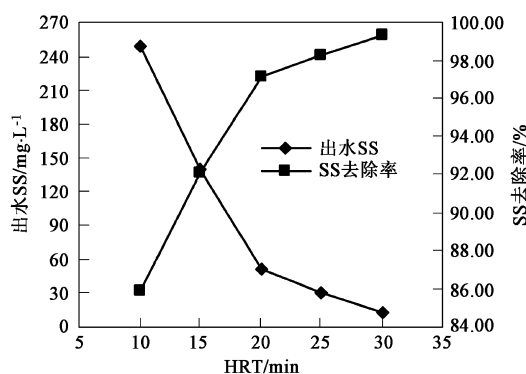
1.4 试验方法

采用单因素优化试验考察水力停留时间(HRT)、接触室电流密度 i_1 、分离区电流密度 i_2 、进水 pH 值、进水 SS 浓度等因素对 SS 去除的影响,找出影响电解浮选用于活性污泥固液分离的优化操作工艺参数.

2 结果与讨论

2.1 HRT 对 SS 去除的影响

选取接触室电流密度 $i_1 = 5 \text{ mA/cm}^2$,分离区电流密度 $i_2 = 2.5 \text{ mA/cm}^2$,进行电解浮选连续流试验.分离区中极板距出水口 $l = 25 \text{ mm}$,距反应器底部 $h = 0$.选取水力停留时间(HRT)为 30、25、20、15、10min (相对应的流量为 48、57.6、72、96、144 L/h),每隔 10min 取样约 500mL,测量电解浮选过程中出水 SS 的变化.试验中 HRT 对 SS 去除效果的影响如图 2 所示.



初始 SS = 1765mg/L, $i_1 = 5 \text{ mA/cm}^2$, $i_2 = 2.5 \text{ mA/cm}^2$,
 $d_1 = 5 \text{ mm}$, $d_2 = 5 \text{ mm}$, $l = 25 \text{ mm}$, $h = 0$

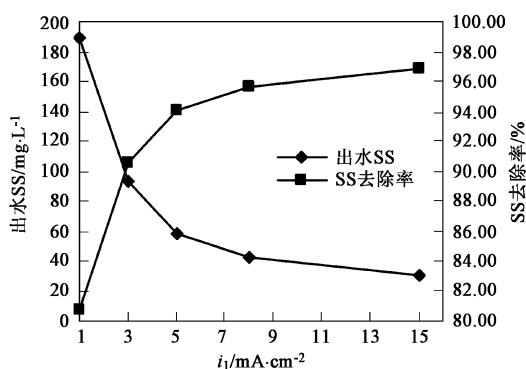
图 2 HRT 对 SS 去除的影响

Fig. 2 Effect of HRT on the removal of SS

可以看出,电解浮选对活性污泥中的 SS 有很好的去除效果,即使在 $HRT = 10\text{min}$ 的情况下,SS 的去除率仍可高达 84%。出水 SS 随着 HRT 的减小而增大,当 $HRT < 20\text{min}$ 时,出水 SS 迅速增大,说明 HRT 太短时反应器中水流速度过快,影响了整个气浮反应器的流态,进而对泥水分离产生影响。一般电解气浮的 HRT 可以控制在 $20 \sim 30\text{min}$ 。当反应器中有大量絮粒时,其停留时间需适当延长,这是由于带气絮粒的存在产生了拥挤上浮,致使分离速度变慢。为了减少能耗,以下试验中选取 $HRT = 20\text{min}$ 进行优化。

2.2 接触室电流密度 i_1 的影响

根据法拉第定律,一定极板面积,采用较大的电流密度能产生更多的微气泡,进而提高 SS 的去除率。但是电流密度太大时,一些微气泡会粘附结合成没用的大气泡,这不仅降低了小气泡的有效性,大气泡还会冲击浮渣层,使部分浮渣返回水体中,从而降低浮选效率。另外,除了电极的表面条件会影响气泡的尺寸,电流密度也在一定程度上影响气泡尺寸的大小。随着电流密度的增加,气泡尺寸减小^[22]。但只有在较小的电流密度下,气泡尺寸才随着电流密度的增加而减小,当电流密度超过 200 A/m^2 时,气泡尺寸变化没有明显的趋势^[4]。图 3 是接触室电流密度 i_1 对 SS 去除效果影响的试验结果。



初始 $SS = 981.5\text{ mg/L}$, $HRT = 20\text{min}$, $i_2 = 2.5\text{ mA/cm}^2$,
 $d_1 = 5\text{mm}$, $d_2 = 5\text{mm}$, $l = 25\text{mm}$, $h = 0$

图3 接触室电流密度 i_1 对 SS 去除的影响

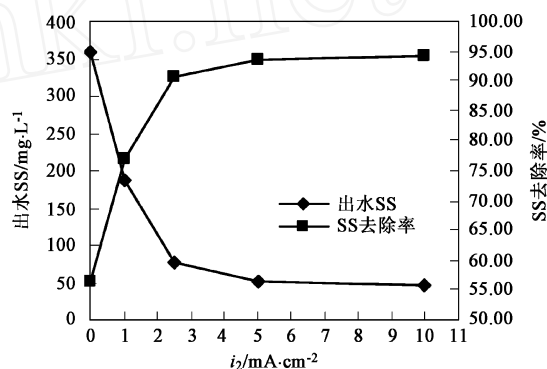
Fig. 3 Effect of i_1 in the contacting zone on the removal of SS

从图 3 可以看出,出水 SS 随着电流密度 i_1 的增大而减小,刚开始随着 i_1 的增大,SS 的去除率迅速上升,当 $i_1 > 5\text{ mA/cm}^2$ 时,SS 去除率增加的幅度变小。基本上出水 SS 浓度与电流密度 i_1 呈一级递减的指数关系。当电流密度 i_1 从 5 mA/cm^2 增大到 8

mA/cm^2 (增大 0.6 倍),SS 的去除仅增加 0.35 倍,因此从减少能耗的角度考虑,采取 $i_1 = 5\text{ mA/cm}^2$ 进行下阶段的试验。

2.3 分离区电流密度 i_2 的影响

从图 4 可以看出,出水 SS 随着分离区电流密度 i_2 的增大而减小,刚开始随着 i_2 的增大,SS 的去除率迅速上升,当 $i_2 > 2.5\text{ mA/cm}^2$ 时,SS 去除率增加的幅度变小。基本上出水 SS 浓度与电流密度 i_2 呈一级递减的指数关系。而当分离区不设极板时(即 $i_2 = 0$),出水 SS 迅速下降,SS 去除率约为 55%。当电流密度 i_2 从 2.5 mA/cm^2 增大到 5 mA/cm^2 (增大 1 倍),SS 的去除仅增加 0.46 倍,因此从减少能耗的角度考虑,采取 $i_2 = 2.5\text{ mA/cm}^2$ 进行下阶段的试验。



初始 $SS = 821.5\text{ mg/L}$, $HRT = 20\text{min}$, $i_1 = 5\text{ mA/cm}^2$,
 $d_1 = 5\text{mm}$, $d_2 = 5\text{mm}$, $l = 25\text{mm}$, $h = 50\text{mm}$

图4 分离区电流密度 i_2 对 SS 去除的影响

Fig. 4 Effect of i_2 in separating zone on the removal of SS

2.4 进水 SS 浓度的影响

进水 SS 浓度从 $400 \sim 4\,000\text{ mg/L}$ 的范围内选取 5 个浓度梯度水平进行电解气浮试验,试验结果如图 5 所示。

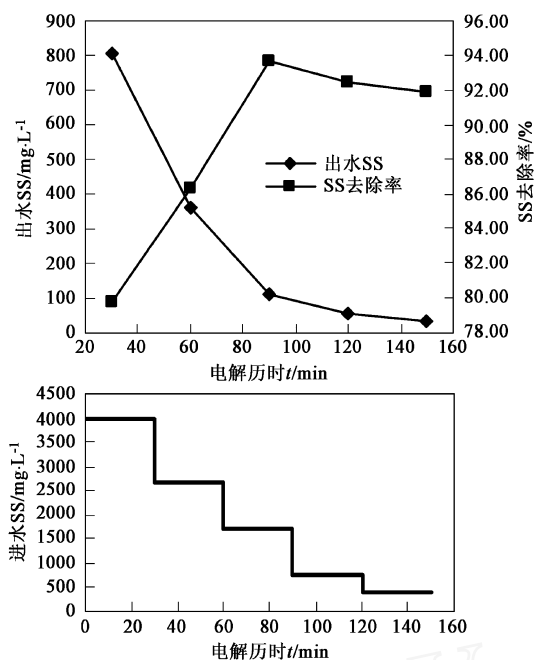
由图 5 可以看出,随着进水 SS 浓度的减小(即污泥负荷的降低),出水 SS 也越来越小。

2.5 进水 pH 的影响

pH 值对电解废水产生的微气泡尺寸和污泥絮体的性质将产生影响,而电解产生微气泡大小和污泥性质是影响气浮效果的 2 个因素。

电解气浮产生的微气泡尺寸受废水 pH 值和电极材料的影响,如表 1 所示。氢气泡在中性 pH 值下最小,氧气泡随着 pH 值的增大而增大。

污水生物处理产生的剩余活性污泥的 pH 值为中性,此时大多数污泥絮体的颗粒大小位于胶体的



HRT = 20 min, $i_1 = 5 \text{ mA/cm}^2$, $i_2 = 2.5 \text{ mA/cm}^2$,
 $d_1 = 5 \text{ mm}$, $d_2 = 5 \text{ mm}$, $l = 25 \text{ mm}$, $h = 50 \text{ mm}$

图5 进水SS浓度对SS去除的影响

Fig. 5 Effect of the initial SS concentration on the removal of SS

范围内. 由于生物絮体表面带有负电荷, 同性相斥的作用阻碍了絮体间的进一步聚集; 此外, 由于生物絮体的极性基团对水分子的强烈吸附而形成较厚的水化膜, 也阻碍了絮体间的进一步聚集. 在中性条件下的污泥絮体, 具有胶体稳定性和高结合水含量^[23].

表1 不同pH值和电极材料下气泡尺寸^[22]

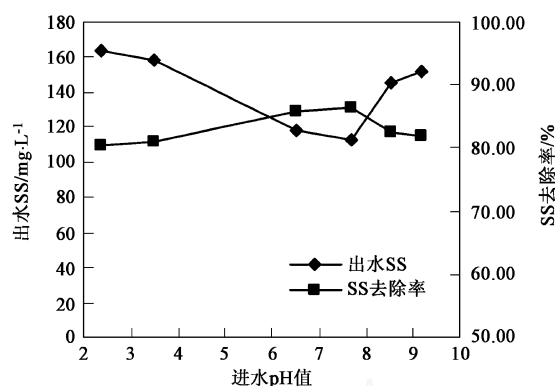
Table 1 Range of gas bubbles at different pH and electrode materials^[22]

pH	氢气/ μm			氧气/ μm
	Pt	Fe	C	Pt
2	45 ~ 90	20 ~ 80	18 ~ 60	15 ~ 30
7	5 ~ 30	5 ~ 45	5 ~ 80	17 ~ 50
12	17 ~ 45	17 ~ 60	17 ~ 60	30 ~ 70

文献[23]报道加酸来改善污泥的脱水性能. 加酸的作用机理是: H^+ 与污泥的结合改变了污泥的表面电荷性质, 促进污泥絮体间的进一步絮凝; 降低了絮体对水的亲和力. 所以, 加酸之后, 必将改变污泥絮体的性质、形态, 由于促进了絮体间的进一步絮凝, 导致污泥下沉, 因而上浮更加困难, 增加了固液分离难度, 在酸性条件下出水效果较差.

由此可以推测, 酸性条件下有利于产生较小的微气泡, 但是污泥絮体的絮凝性好, 上浮较困难; 中性条件下产生的微气泡和污泥絮体性能对气浮浮选

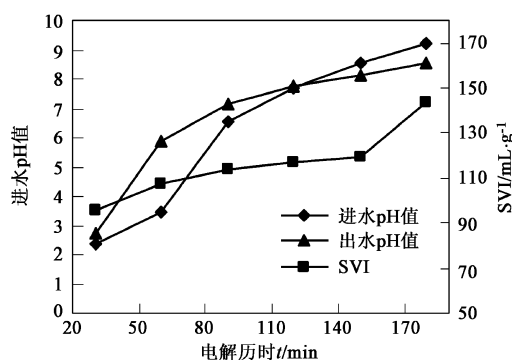
有利; 碱性条件下产生较大的微气泡, 不利于浮选, 但是污泥絮体较为松散. 需要通过试验确定较佳的pH值. 图6是调节反应器进水pH值的试验结果.



初始 SS = 837 mg/L, HRT = 20 min, $i_1 = 5 \text{ mA/cm}^2$, $i_2 = 5 \text{ mA/cm}^2$,
 $d_1 = 5 \text{ mm}$, $d_2 = 5 \text{ mm}$, $l = 10 \text{ mm}$, $h = 50 \text{ mm}$

图6 进水pH值对SS去除的影响

Fig. 6 Effect of influent pH value on the removal of SS



初始 SS = 837 mg/L, HRT = 20 min, $i_1 = 5 \text{ mA/cm}^2$, $i_2 = 5 \text{ mA/cm}^2$,
 $d_1 = 5 \text{ mm}$, $d_2 = 5 \text{ mm}$, $l = 10 \text{ mm}$, $h = 50 \text{ mm}$

图7 进水pH值对SVI的影响

Fig. 7 Relation of influent pH and SVI

由图6看出在pH值偏碱性条件下出水效果较好, SS去除率较高. 并且在中性条件下出水效果较之弱碱性条件相差不大, 所以综合考虑, 可以对水样不进行pH调节. 从图7可以看出, 进水pH < 7时, 电解处理后出水pH值有所上升, 而进水pH > 7时, 处理出水的pH值有所下降. 随着pH值的上升, SVI值也上升, 有利于浮选.

2.6 浮渣含水率

当废水经过电解浮选系统后, 大多数污染物质以浮渣的形式从废水中分离和漂浮上来. 浮渣含水率与其在反应器顶部的停留时间有关, 取停留时间10 ~ 15 min后取样测含水率. 实验中测得浮渣的平

均含水率为 95.9%, 这比溶气气浮和二沉池污泥的含水率低, 实现了污泥减量化, 也减少后续处理的费用。

3 能耗

电解浮选的能耗可以通过式(1)计算:

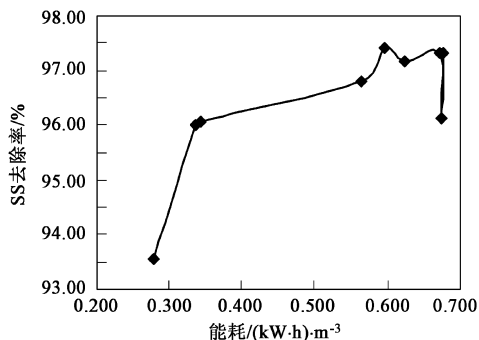
$$E = \frac{(n-1)U_1I_1 + U_2I_2}{1000Q} \quad (1)$$

式中 E 为能耗 $[(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3]$; n 为接触室中的极板数; U_1 为接触室中相邻极板间的电解电压(V); I_1 为接触室中的电解电流(A); U_2 为分离区中相邻极板间的电解电压(V); I_2 为分离区中的电解电流(A); Q 为污水流量 (m^3/h) . 相邻极板间的电解电压^[16]为理论分解电压、阳极过电位、阴极过电位和溶液的欧姆降之和。

$$U = E_{\text{eq}} + \eta_a + |\eta_c| + \frac{d}{\kappa}i \quad (2)$$

式(2)中 E_{eq} 为理论分解电压(V); η_a 为阳极过电位(V); η_c 为阴极过电位(V); d 为相邻极板间距(m); κ 为处理水电导率 (S/m) ; i 为电流密度 (A/m^2) .

HRT 对 SS 去除的影响试验中, 电解浮选的能耗与 SS 去除率的关系如图 8 所示. 当 $E < 0.4 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 时, SS 去除率随着能耗的增加而迅速上升, 当 $E > 0.4 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 废水时, SS 去除率的增加随着能耗的增加变缓. E 为 $0.4 \sim 0.45 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 废水时能获得较高的 SS 去除率。



初始 SS = 1 765 mg/L, $i_1 = 5 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $i_2 = 2.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$,
 $d_1 = 5 \text{ mm}$, $d_2 = 5 \text{ mm}$, $l = 25 \text{ mm}$, $h = 0$

图 8 能耗对 SS 去除的影响

Fig. 8 Effect of energy consumption on the removal of SS

4 结论

(1) 采用不溶性阳极的电解浮选工艺能高效地

实现活性污泥的固液分离。

(2) 水力停留时间、电流密度是最主要的影响因素. SS 的去除率随着水力停留时间的增加而迅速增大, HRT = 20 min 时能获得 97 % 的去除率 (初始 SS = 1 765 mg/L); 随着电流密度的增大, SS 的去除率增大. $0.4 \sim 0.5 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 废水的能耗下就能获得较高的 SS 去除率。

(3) 污泥负荷增大, SS 的去除率下降。

(4) pH 值影响电解产生微气泡的尺寸和污泥性质, 在中性和弱碱性条件下能获得较高的 SS 去除率, 实际应用中可以不调节 pH 值。

(5) 浮渣的平均含水率为 95.9 %, 低于溶气气浮和二沉池的污泥含水率, 对污泥减量化及其最终处置有较大的意义。

参考文献:

- [1] 田建民. 废水中营养物质和污泥体积指数对浮选法活性污泥固液分离的影响[J]. 太原重型机械学院学报, 1998, 19(4): 357 ~ 364.
- [2] Raju G B, Khangaonkar P R. Electroflotation — A Critical Review[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 1984, 37(1): 59 ~ 66.
- [3] Elmore F E. A process for separating certain constituents of subdivided ores and like substances, and apparatus therefore [P]. British, GB190413578, 1905-07-15.
- [4] Burns S E, Yoacoumi S, Tsouris C. Microbubble generation for environmental and industrial [J]. Separation and Purification Technology, 1997, 11(3): 221 ~ 232.
- [5] 张自杰. 排水工程下册[M]. (第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 523.
- [6] 张登庆, 任连锁, 裴峻峰, 等. 电气浮技术在油田采出水处理中的应用研究[J]. 石油矿场机械, 2002, 31(2): 11 ~ 14.
- [7] Hosny A Y. Separation oil from oil-water emulsions by electroflotation technique [J]. Separation Technology, 1996, 6(1): 9 ~ 17.
- [8] 吴辉煌. 水中有机污染物电化学清除的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2000, 22(4): 39 ~ 42.
- [9] 陈繁忠, 李穗中. 电气浮法技术进展[J]. 广东化工, 1997, (4): 60 ~ 61.
- [10] Ho C C, Chan C Y. The application of lead dioxide-coated titanium anode in the electroflotation of palm oil mill effluent [J]. Water Research, 1986, 20(12): 1523 ~ 1527.
- [11] Ibrahim M Y, Mostafa S R, Fahmy M F M, et al. Utilization of electroflotation in remediation of oily wastewater [J]. Separation Science and Technology, 2001, 36(16): 3749 ~ 3762.
- [12] Mostefa N M, Tir M. Coupling flocculation with electroflotation for waste oil/water emulsion treatment. Optimization of the operating conditions [J]. Desalination, 2004, 161(2): 115 ~ 121.

- [13] Alexandrova L, Nedialkova T, Nishkov I. Electroflotation of metal ions in waste water[J]. International Journal of Mineral Processing, 1994, **41**(3-4): 285 ~ 294.
- [14] Poon C P C. Electroflotaion for groundwater decontamination [J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, **55**(2): 159 ~ 170.
- [15] Ge J, Qu J, Lei P, *et al.* New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2004, **36**(1): 33 ~ 39.
- [16] Chen G, Chen X, Yue P. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater [J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, **126**(9): 858 ~ 863.
- [17] Vlyssides A G, Karlis P K, Rori N, *et al.* Electrochemical treatment in relation of pH of domestic using Ti/ Pt electrodes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, **95**(1-2): 215 ~ 226.
- [18] Fukui Y, Yuu S. Removal of colloidal particles in electroflotation[J]. American Institute of Chemical Engineers, 1985, **31**(2): 201 ~ 208.
- [19] Muruganathan M, Raju G B, Prabhakar S. Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation [J]. Separation and Purification Technology, 2004, **40**(1): 69 ~ 75.
- [20] Alexeyev V. Quantitative analysis [M]. Moscow: Mir Publisher, 1969. 477 ~ 478.
- [21] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 107 ~ 108.
- [22] Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2004, **38**(1): 11 ~ 41.
- [23] 袁元, 杨海真. 表面活性剂及酸处理对污泥脱水性能影响的研究[J]. 四川环境, 2003, **22**(5): 1 ~ 8.

www.cnki.net