

电解浮选用于活性污泥固液分离及其动力学研究

陈金奎 万 晶 施汉昌

(清华大学环境科学与工程系, 环境污染与模拟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。考察了水力停留时间对浮选效果的影响, 研究了电解产生的微气泡对悬浮物浮选的动力学。研究表明, 电解浮选是高效的固液分离单元, 悬浮物的去除遵循一级动力学模型。

关键词 电解浮选 固液分离 SS 去除率 动力学

Electro-flotation in solid-liquid separation and its kinetics study Chen Jinluan, Wan Jing, Shi Hanchang. (ES PC State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The separation of suspended solids from an activated sludge process was carried out in an electro-flotation cell that 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 hydraulic retention time (HRT) on the performance of the electro-flotation system was examined. The kinetics of flotation of suspended solids by electrolytically generated micro-bubbles was also studied and found to follow first order rate expression. Electro-flotation cell can accomplish high performance in solid-liquid separation application of this type.

Keywords: Electro-flotation Solid-liquid separation Removal of SS Kinetics

随着废水排放标准的日益严格, 城市污水和工业废水生物处理的费用不断提高。为此, 人们在寻找处理费用低、效率高的方法。从科研方面加强了物质传递和生物降解过程动力学的研究, 研制新型的高效废水生物处理反应器。为了能充分利用提高反应效率的新型反应器, 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]。电解浮选法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]。1904 年 ELMORE 首次提出用电解浮选法从矿石中浮选贵重矿物^[3]。在水和废水处理中, 浮选是分离油和低密度 SS 的最有效工艺。电解浮选已有效应用于棕榈油制造厂污水^[4]、含油废水和含油乳化液^[5-8]、可乐生产废水、采矿废水^[9]、地下水^[10]、洗衣房废水^[11]、含脂肪废水、宾馆废水^[12]、食品工业污水、牛奶厂废水、城市污水^[13]、矿井水、胶状颗粒^[14]201-208 和含重金属废水等的处理, 并从氰化物废水中回收金和银。利用电解浮选进行活性污泥固液分离的报道几乎未见, 文献[12, 13, 15]报道成功地使用电解浮选进行 SS 的分离。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 Fe、Al 和不锈钢较为廉价易得, 也能同时完成电凝聚和电解浮选的功能,

但是这些阳极是可溶解的。在部分溶解的粗糙电极表面产生的气泡往往具有较大的尺寸^[14]205-206, 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。笔者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, 考察了水力停留时间 (HRT) 对浮选效果的影响, 研究了电解产生的微气泡对 SS 浮选的动力学。

1 试验装置和方法

1.1 试验装置

图 1 为电解浮选用于活性污泥固液分离的试验流程示意图。

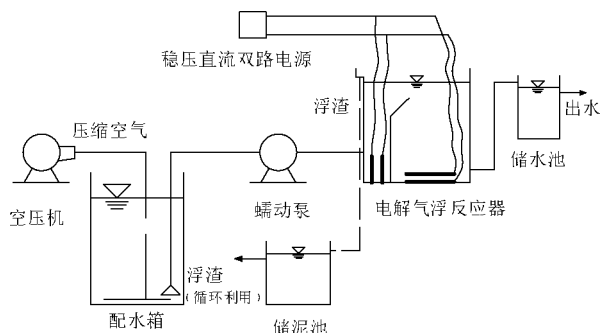


图 1 试验流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

第一作者: 陈金奎, 男, 1981 年生, 博士研究生, 研究方向为水污染控制。

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 4 000 mm ×150 mm ×4 200 mm,有效容积 24 L。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 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为网状结构。阴极和阳极预先在电解液中极化 6 h 后进行试验。

阳极: Ti/ RuO₂- IrO₂- TiO₂ 电极。接触室: 100 mm ×100 mm ×1.2 mm 细网 2 片;分离区: 200 mm ×100 mm ×1.2 mm 细网 1 片。

阴极: Ti 电极。接触室: 100 mm ×100 mm ×1.4 mm 细网 2 片;分离区: 200 mm ×100 mm ×1.2 mm 细网 1 片。

极板面积^[16]均为 400 cm²,阳极和阴极的面积比为 1 1。

1.1.3 电源

WYK-3010 直流稳压电源和 WYK-303B2 直流稳压电源各 1 台。

1.2 试验水质及分析方法

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,试验用水由取至清河污水处理厂二沉池回流污泥(模拟高效反应器出口的污泥浓度)稀释配制而成。

SS 采用标准方法测定^[17]。

2 结果与讨论

选取接触室电流密度为 5 mA/cm²,分离区电流密度为 2.5 mA/cm²,分离区中极板距出水口 2.5 cm,极板离反应器底部高为 0 cm,接触室和分离区极板间距均为 5 mm,初始 SS 为 1 765 mg/L,进行电解浮选连续试验。

2.1 HRT 的影响

设置 HRT 为 30、25、20、15、10 min(相应的流量为 48.0、57.6、72.0、96.0、144.0 L/h),每隔 10 min 取样约 500 mL,测量电解浮选过程中出水 SS 的变化,见图 2。试验中 HRT 对 SS 去除效果的影响见图 3。

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 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 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 ~ 30 min。当反应器中有大量絮粒时,其 HRT 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。为了尽量减少能耗,选取 HRT = 20 min。

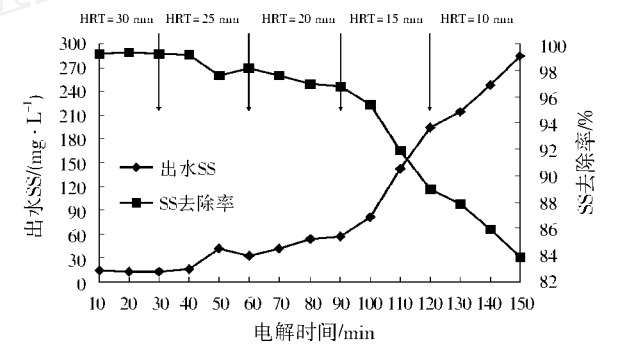


图 2 电解浮选过程中 SS 的变化
Fig.2 Variation of SS in the duration of electro-flotation

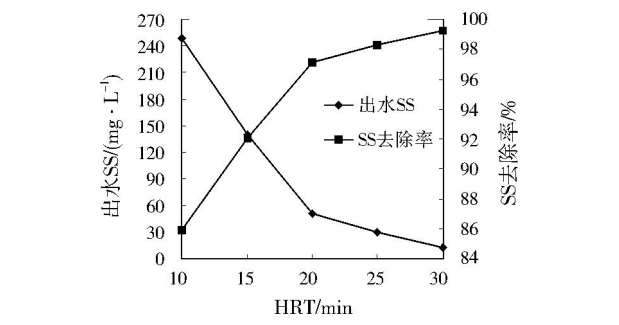


图 3 HRT 对 SS 去除效果的影响
Fig.3 Effect of HRT on removal of SS

2.2 动力学研究

SS 去除率可以用下列已建立的动力学模型^{[15][73][18][19]}进行拟合。

$$R = R^* (1 - e^{-kt}) \tag{1}$$

$$R = R^* \left(\frac{kt}{1 + kt} \right) \tag{2}$$

$$R = R^{*2} \left(\frac{kt}{1 + R^* kt} \right) \tag{3}$$

$$R = R^* \left[1 - \frac{\ln(1 + kt)}{kt} \right] \tag{4}$$

式中: R 为时刻 t 的去除率, %; R^* 为最终去除率, %; k 为速率常数, min^{-1} 。把上述动力学模型进行整理,再根据试验数据,可拟合求得各模型的速率

常数 k ,最后进行浮选动力学模型的拟合,见图 4。

从图 4 的结果可以看出,试验结果拟合最好的是式(1)所代表的一级模型。从 $\ln C_0/C_t$ 与电解浮选时间的良好线性关系 ($R^2 = 0.9921$) 也进一步证明了 SS 的去除遵循一级动力学模型。速率常数 $k = 0.1685 \text{ min}^{-1}$ 。

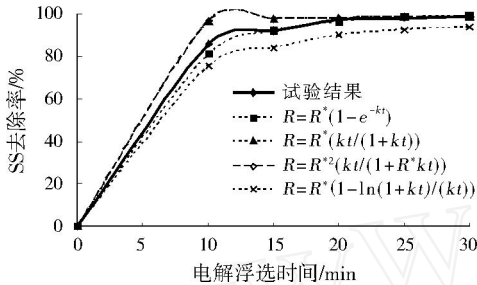


图 4 浮选动力学模型的拟合

Fig. 4 Flotation kinetics model fitting

假设电解产生的微气泡数量和 SS 浓度都会影响去除效果,动力学必须遵循二级速率方程。但是相比于 SS 浓度,电解从电极表面释放的微气泡的数量更多,因此微气泡的影响可以忽略。DE BRUYN 等^[20]的研究发现,如果纸浆中的固含率低于 5.2 % (质量分数),细颗粒 ($< 65 \mu\text{m}$) 的浮选符合一级速率方程。TOMLINSON 等^[21]的研究也发现,当纸浆中固体浓度较小时(浮选不受抑制),浮选为一级速率过程,当固体浓度很高时为零级过程。MURUGANANTHAN^[15]^[73] 对制革废水中的 SS 采用溶解性阳极进行电解浮选发现,SS 的去除很好地满足一级动力学模型。本研究的结果表明,采用惰性阳极进行电解浮选时,SS 的去除也很好地遵循一级动力学模型。

3 结 论

将不溶性阳极的电解浮选工艺用于活性污泥固液分离,研究发现电解浮选能高效地进行固液分离。SS 的去除率随着 HRT 的增加而迅速增大, HRT = 20 min 时能获得 97 % 的去除率;对 SS 的浮选动力学模型进行了拟合,发现 SS 的去除遵循一级动力学模型,速率常数 $k = 0.1685 \text{ min}^{-1}$ 。

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 GB, KHANGAONKAR P R. Electroflotation—a critical review[J]. Trans. Indian Inst. Met., 1984, 37(1): 59-66.
[3] ELMORE F E. A process for separating certain constituents of

subdivided ores and like substances, and apparatus therefore [J]. Br. Patent, 1905, 13: 578.
[4] 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.
[5] 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.
[6] HOSNY A Y. Separation oil from oil-water emulsions by electroflotation technique[J]. Separation Technology, 1996, 6(1): 9-17.
[7] IBRAHIM M Y, MOSTAFA S R, FAHMY M F M, et al. Utilization of electroflotation in remediation of oily wastewater[J]. Sep. Sci. Technol., 2001, 36(16): 3749-3762.
[8] 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.
[9] ALEXANDROVA L, NEDIALKOVA T, NISHKOV I. Electroflotation of metal ions in waste water [J]. Int. J. Miner. Process, 1994, 41(3/4): 285-294.
[10] POON C P C. Electroflotation for groundwater decontamination[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 55(2): 159-170.
[11] GE Jiantuan, QU Jiuhui, LEI Pengju, et al. New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2004, 36(1): 33-39.
[12] CHEN Guohua, CHEN Xueming, YUE P L. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater[J]. J. Environ. Eng., 2000, 126(9): 858-863.
[13] VLYSSIDES A G, KARLIS P K, RORIN, et al. Electrochemical treatment in relation of pH of domestic using Ti/Pt electrode[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 95(1/2): 215-226.
[14] FUKUI Y, YU S. Removal of colloidal particles in electroflotation[J]. AIChE J., 1985, 31(2).
[15] MURUGANANTHAN M, RAJU G B, PRABHAKAR S. Separation of pollutants from tannery effluents by electroflotation[J]. Separation and Purification Technology, 2004, 40(1).
[16] ALEXEYEV V. Quantitative analysis[M]. Moscow: Mir Publisher, 1969: 477-478.
[17] 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 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
[18] EK C, MAVROS P, MATIS K A. Innovations in flotation technology, proceedings of the NATO science series [M]. Greece: Kluwer Academic Publishers, 1991.
[19] MAYER W C, KLIMPEL R R. Rate limitations in Froth Flotation[J]. Trans. AIME, 1984, 274: 1852-1858.
[20] DE BRUYN P L, MODI H J. Particle size and flotation rate of quartz[J]. Trans. AIME, 1956, 205: 415-419.
[21] TOMLINSON H S, FLEMING M G. Flotation rate studies [M]. Oxford: Pergamon Press, 1963: 563-579.

责任编辑: 赵 多 (修改稿收到日期: 2006-08-09)