

粉煤灰制备聚硅酸复合聚合硫酸铁及性能研究

张爱丽, 王殿宇*, 周集体, 邓晴雯

(大连理工大学环境与生命学院, 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 大连 116023)

摘要: 以大连某热电厂的固体废弃物粉煤灰为原料, 研究了利用粉煤灰制备聚硅酸复合聚合硫酸铁及其絮凝性能. 采用 NaOH 溶液浸渍粉煤灰, 通过考察温度、NaOH 浓度和反应时间对硅溶出的影响, 确定了硅溶出的最佳反应条件. 用 NaOH 浸渍液制备聚硅酸后再与聚合硫酸铁(PFS)复合得到复合絮凝剂(F-PFS), 通过考察铁硅摩尔比和熟化时间对 F-PFS 的除浊性能的影响, 确定了 F-PFS 的最佳复合条件. 在 F-PFS 的最佳复合条件下, 以 Na_2SiO_3 为原料制备同样硅浓度的聚硅酸再复合 PFS 得到聚硅酸复合聚合硫酸铁(N-PFS), 作为 F-PFS 的对照. 通过最佳 F-PFS 与 N-PFS 和 PFS 的絮凝率对比评价了最佳 F-PFS 的絮凝性能. 结果表明在 120°C 下, 用 $4\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 浸渍粉煤灰 4 h 后得到硅的最大溶出量 $0.2079\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$. 在铁硅摩尔比为 1:0.2, 熟化 2 h 的条件下, F-PFS 的除浊性能最佳. 同时 F-PFS 的除浊能力与 N-PFS 相同, 但是沉降性和稳定性优于 N-PFS 和 PFS, 对实际废水的絮凝能力优于 N-PFS 和 PFS.

关键词: 粉煤灰; 聚合硫酸铁; 絮凝剂; 絮凝率; 复合

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)07-2179-06

Utilizing Fly Ash to Prepare Polysilicon Acid and Compounded PFS and the Study of Its Properties

ZHANG Ai-li, WANG Dian-yu, ZHOU Ji-ti, DENG Qing-wen

(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, Ministry of Education, School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Fly ash which is a kind of solid waste of power station in Dalian was prepared as polysilicon acid and compound polymerized ferric sulphate and its properties was studied. Fly ash was dipped in NaOH solution. The effects of temperature, concentration of NaOH solution and reactive time were examined respectively on the conversion efficiencies of silicon. Then the solution which was rich in silicon was used to compound polymerized ferric sulfate(PFS) and got compounded polymerized ferric sulphate(F-PFS), and evaluated the effects of slaking time and Fe^{3+}/Si molar ratio on conversion efficiencies of silicon. Then used Na_2SiO_3 to prepare polysilicon acid compounded polymerized ferric sulphate(N-PFS) with the same silicon concentration at the best condition. The best ratio of dissolved silicon $0.2079\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ was attained at the condition of $4\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH solution, 120°C for 4 h. The coagulant was attained at the condition of Fe^{3+}/Si molar ratio of 1:0.2 and slaking time of 2 h. The reducing turbidity by F-PFS is the same as N-PFS, but F-PFS is better than N-PFS and PFS is in the stabilization, sedimentation, and the property of treating with urban sewage.

Key words: fly ash; polymerized ferric sulphate; coagulant; coagulation rate; compounded

废水处理中铁盐和铝盐絮凝剂是近年来应用广泛, 发展迅速的两类无机盐絮凝剂, 由于铝盐对生物体可能存在的毒性, 铁盐絮凝剂大有取代铝盐絮凝剂的趋势^[1-3]. 其中聚合硫酸铁(PFS)是铁盐絮凝剂中一个重要代表^[4-6]. PFS 具有处理效果好, 形成的泥浆脱水性好等特点, 但是 PFS 并不是对所有水样都能达到理想的处理效果. 粉煤灰(fly ash)是燃煤电厂燃烧过程中排放出的一种固体污染物, 每年排放的大量粉煤灰, 仅仅 20% 左右得到了利用, 主要用于制造建筑材料^[7-9]. 其余的则堆积或直接排放, 不仅占用大量土地, 而且严重污染环境^[10].

近年来, 对粉煤灰利用的研究已经逐渐成为热点. 目前的研究主要是利用粉煤灰制备吸附剂和催化剂^[11-17]. 其次是利用粉煤灰中的硅、铁和铝等成

分制备絮凝剂^[18,19]. 但是利用粉煤灰制备聚硅酸再复合聚合硫酸铁却少有报道. 本研究目的是利用粉煤灰中的活性硅成分强化 PFS 的絮凝性能, 以期为开发粉煤灰碱提取液复合 PFS 这种复合絮凝剂(F-PFS)提供科学依据, 同时也为粉煤灰的利用开辟新的途径.

1 材料与方法

1.1 实验材料

(1) 实验用粉煤灰取自大连某热电厂(流化床工艺), 其化学组成经该厂分析见表 1^[20].

收稿日期: 2008-08-06; 修订日期: 2008-10-16

作者简介: 张爱丽(1958~), 女, 副教授, 主要研究方向为水处理技术, E-mail: zal58@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangwangdianyu@163.com

表 1 粉煤灰的主要化学组成
Table 1 Chemical component of fly ash

化学成分	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	烧失量	碱含量
质量分数/%	72.16	4.33	14.68	0.79	1.69	2.86	0.13	0.43	0.65

(2)聚合硫酸铁(大连某化学试剂厂):黄色粉末状固体,全铁含量 21.92%;二价铁含量 0.03%;还原性物质 0.02%;盐基度 11.06%。

(3)高岭土浊度水:在塑料水桶中加入 10 L 自来水和 5 g 高岭土(CP,汕头市陇西化工厂),搅拌 5 min,静置沉降 3 h,取样.为防止取样时水桶底部沉淀物的返混,采用位置固定的虹吸管取样,以保证稳定的原水浊度(170 NTU).取好的水样马上作为絮凝实验用水使用。

(4)实际废水.取自大连某污水处理厂的二级出水,其水质指标见表 2。

表 2 实验用实际废水水质

Table 2 Characterization of wastewater for jar tests

指标	COD/mg·L ⁻¹	浊度/NTU	pH	水温/℃
数值	60~65	56~60	7 左右	18~20

1.2 实验仪器

六联搅拌机(MY3000-6;潜江梅宇仪器有限公司);高压反应釜(100 mL,巩义予华仪器有限责任公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 NaOH 浸渍粉煤灰

高压反应釜内加入 50 mL NaOH 溶液和 5 g 粉煤灰,浸渍反应后将 NaOH 溶液离心,得到 NaOH 提取液.考察 NaOH 浓度,反应温度和反应时间对硅溶出量的影响,确定最佳反应条件。

1.3.2 复合絮凝剂的制备

(1)聚硅酸的制备 将最佳条件下得到的 NaOH 提取液在烧杯中匀速搅拌.用移液管缓慢滴加 20% 稀硫酸,调节至一定的 pH,暂时停止滴加和搅拌约 10 s 后,溶液明显呈淡蓝色,证明有聚硅酸生成,并具备一定的聚合度,此时继续搅拌,并用移液管向其中迅速滴加一定量的 20% 稀硫酸,调至 pH 为 2 左右.静置活化 2 h 后立即使用。

(2)复合絮凝剂的制备 取 28 mL 质量分数为 2% 的 PFS,加入上述制备的一定体积的聚硅酸,室温下搅拌熟化一定时间即得到 F-PFS.考察铁硅比和熟化时间对 F-PFS 除浊性能的影响.采用高岭土浊度水,通过絮凝实验,以絮凝率评价 F-PFS 的除浊性能,确定 F-PFS 的最佳复合条件,制备最佳 F-PFS。

1.3.3 F-PFS 的性能评价

采用六联搅拌机进行絮凝实验,考察 F-PFS 的絮凝性能.首先以 240 r·min⁻¹ 的速度快速搅拌 10 s,使水样搅拌均匀.加入絮凝剂后,在 240 r·min⁻¹ 的速度下快速搅拌 30 s,使药剂与水样充分混合;以 100 r·min⁻¹ 的速度中速搅拌 5 min.再以 40 r·min⁻¹ 的速度慢速搅拌 5 min^[21].静置沉淀 1.5 h 后取样分析(除沉降性能实验).但是沉降性能实验中直到浊度稳定再取样测定浊度。

考察 NaOH 提取液中微量成分对 F-PFS 的影响及 F-PFS 的沉降性,稳定性和处理实际废水能力。

(1)微量成分的影响 由于粉煤灰中含有铁、铝、硅、钙和镁等氧化物以及未燃碳和其他有机物^[22],因此在 NaOH 提取液中除含有大量硅之外,可能含有其他微量成分,从而可能对 F-PFS 的絮凝性能产生影响.因此,以 Na₂SiO₃ 为原料制备同样硅浓度的聚硅酸再复合 PFS,得到聚硅酸复合 PFS(N-PFS)这种絮凝剂,作为 F-PFS 的对照,验证其他微量成分的影响。

(2)沉降性能对比 分别在 1 L 量筒中加入 1 000 mL 高岭土浊度水,然后分别加入 Fe³⁺ 浓度相同的最佳 F-PFS、最佳 N-PFS 和 PFS,快速搅拌 30 s,慢速搅拌 2 min,当 3 种絮凝剂形成矾花时停止搅拌、静置沉降并开始计时,直至水样的浊度不再发生变化为止^[23].考察稳定时的浊度和对应的沉降时间。

(3)稳定性能对比 采用高岭土浊度水,考察最佳 F-PFS、最佳 N-PFS 和 PFS 存放一定时间后的除浊性能。

(4)对实际废水的处理能力对比 采用实际废水,考察最佳 F-PFS、最佳 N-PFS 和 PFS 去除 COD 和除浊能力。

1.4 分析及评价指标

硅的测定采用硅钼蓝比色法^[24].COD 的测定采用微波快速消解法^[25].浊度由浊度仪(LP2000-11,意大利哈瑞)测定.总 Fe、Al³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的浓度通过原子吸收光谱仪测定。

絮凝率的计算:

絮凝率 = (A_i - B_i)/A_i (1)

式中, A_t 为不加絮凝剂 t 时刻水样的浊度; B_t 为加絮凝剂后 t 时刻水样的浊度.

由于 NaOH 浸渍粉煤灰提取的主要组分是硅, 所以采用单位质量粉煤灰中硅的溶出质量($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)评价 NaOH 的浸渍提取效果.

2 结果与分析

2.1 粉煤灰中硅溶出最佳条件

(1) NaOH 溶液浓度对硅溶出的影响 分别用 1、2、3、4、5 和 6 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液浸渍粉煤灰. 在 100°C 的条件下, 恒温反应 1 h. 硅的溶出量随 NaOH 溶液浓度变化见图 1. 从中可知, 硅的溶出量随 NaOH 溶液浓度变化的趋势为 NaOH 溶液浓度 $< 4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 硅的溶出量随 NaOH 浓度增加而增加, $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以后, 硅的溶出量趋于平衡, 说明 NaOH 溶液浓度 $> 4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以后对硅的溶出基本无影响. 所以 $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为硅溶出的最佳 NaOH 浓度.

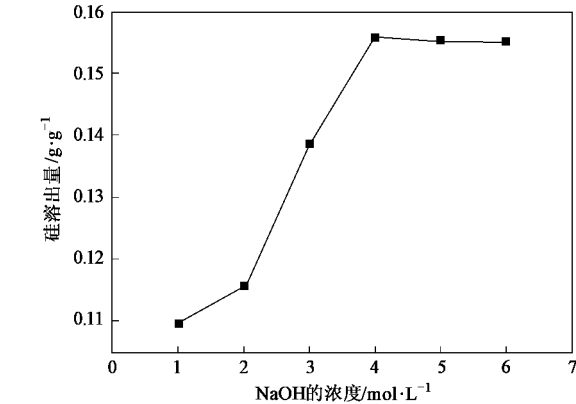


图1 NaOH 浓度对硅溶出的影响曲线

Fig.1 Effect of concentration of NaOH solution on the dissolving rate of silicon

(2) 反应时间对硅溶出的影响 用 $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液浸渍粉煤灰, 恒温 100°C 反应不同时间: 1、2、3、4、5、6、8 和 10 h. 硅的溶出量随时间变化如图 2 所示. 从中可以看到 4 h 前硅的溶出量随反应时间增加而增加, 4 h 以后硅的溶出量趋于平衡, 说明反应时间 $> 4 \text{ h}$ 后对硅溶出量的影响变化不大. 所以 4 h 为硅溶出的最佳浸渍反应时间.

(3) 温度对硅溶出的影响 用 $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 浸渍粉煤灰 4 h, 在 90、100、110、120 和 125°C 这 5 个温度下粉煤灰中硅的溶出量情况如图 3 所示. 结果表明硅溶出量随温度的升高而增大, 然而增加的量之间相差不大. 在 120°C 和 125°C 下, 硅的溶出量接近, 所以实验选择 120°C 作为硅溶出的最佳反应

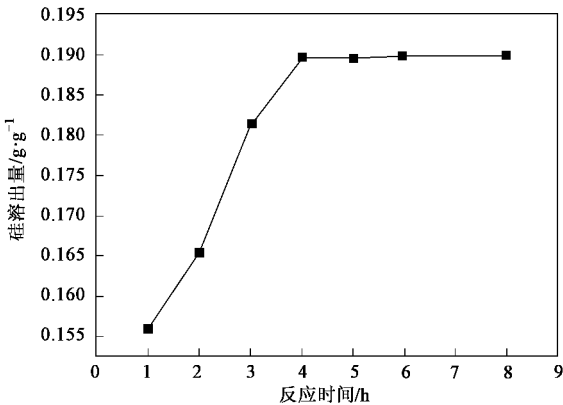


图2 反应时间对硅溶出的影响曲线

Fig.2 Effect of reactive time on the dissolving rate of silicon

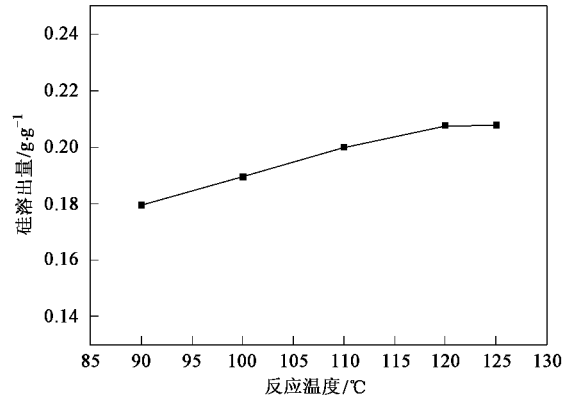


图3 反应温度对硅溶出的影响曲线

Fig.3 Effect of temperature on the dissolving rate of silicon

温度.

通过上述对 NaOH 溶液浓度、反应时间和温度的考察, 确定粉煤灰中硅溶出的最佳条件为 $4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH、4 h 和 120°C , 此条件下硅的溶出量为 $0.2079 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$. 经过原子吸收光谱仪测定 NaOH 提取液中总 Fe 和 Al^{3+} 的浓度分别为 $1.6359 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.0032 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其他金属离子未检测出.

2.2 F-PFS 的最佳复合条件

2.2.1 铁硅比对 F-PFS 除浊性能的影响

分别按铁硅(摩尔)比为 1:0.1、1:0.2、1:0.33、1:1、1:2、1:3 和 1:5 制备了 F-PFS, 絮凝实验中各不同铁硅比的 F-PFS 在不同投加量下(以 Fe^{3+} 浓度表示)的除浊性能见表 3. 从中可知在一定铁硅比的条件下, 絮凝率随着 Fe^{3+} 浓度的变化而变化. 铁硅摩尔比为 1:0.1、1:0.2、1:0.33、1:1、1:2、1:3 和 1:5 的时候, 它们的最佳絮凝率分别为 96.1%、98.0%、97.5%、96.2%、97.9%、89.4% 和 96.3%, 其中铁硅比在 1:0.2 的条件下絮凝率的最佳值最大. 因此

表 3 铁硅比及 Fe³⁺ 投加量对 F-PFS 絮凝率的影响/%

Table 3 Effect Fe ³⁺ /Si molar ratio and dose of Fe ³⁺ on the coagulation rate of F-PFS/%							
Fe ³⁺ 的投加量 × 10 ⁻⁴ /mol	铁和硅的摩尔比/mol·mol ⁻¹						
	1:0.1	1:0.2	1:0.33	1:1	1:2	1:3	1:5
0.902	94.9	86.7	87.5	89.6	80.7	80.7	82.0
1.804	96.1	97.6	96.4	90.6	86.4	85.7	89.6
2.706	93.9	98.0	96.9	93.7	88.5	88.5	96.0
3.608	91.6	96.8	97.5	96.0	93.7	89.4	96.3
4.51	90.2	93.5	95.0	96.2	97.9	87.9	93.9

确定铁硅比 1:0.2 是 F-PFS 的最佳复合条件.

2.2.2 熟化时间对 F-PFS 除浊性能的影响

熟化时间为 0、0.5、1、2、3 和 4 h 条件下制备的 F-PFS 的絮凝性能见表 4. 从中可知, 在一定的熟化时间条件下, 絮凝率随着熟化时间的变化而变化.

表 4 熟化时间对 F-PFS 絮凝率的影响/%

Table 4 Effect of the slaking time on the coagulation rate of F-PFS/%						
Fe ³⁺ 的投加量 × 10 ⁻⁴ /mol	熟化时间/h					
	0	0.5	1	2	3	4
0.902	87.4	90.0	90.6	86.7	88.1	89.7
1.804	88.9	90.5	91.4	97.6	91.5	89.8
2.706	93.4	95.4	97.0	98.2	96.8	96.8
3.608	89.7	91.3	93.2	96.7	93.3	94.8
4.51	88.4	91.0	90.4	93.9	90.4	91.9

2.3 最佳 F-PFS 絮凝性能

2.3.1 最佳 F-PFS 中微量成分对除浊性能的影响

按 F-PFS 最佳复合条件, 以 Na₂SiO₃ 为原料制备聚硅酸后与 PFS 复合得到的 N-PFS 的除浊性能见表

5. 由表 5 与表 3 对比可知, F-PFS 的絮凝率和 N-PFS 相比, 几乎没有发生变化. 说明 NaOH 提取液中除了硅以外的其他成分几乎对 F-PFS 除浊性能不产生影响.

表 5 铁硅比及 Fe³⁺ 投加量对 N-PFS 絮凝率的影响/%

Table 5 Effect Fe ³⁺ /Si ⁺ molar ratio and dose of Fe ³⁺ on the coagulation rate of N-PFS/%							
Fe ³⁺ 的投加量 × 10 ⁻⁴ /mol	铁和硅的摩尔比/mol·mol ⁻¹						
	1:0.1	1:0.2	1:0.33	1:1	1:2	1:3	1:5
0.902	94.8	87.0	87.6	88.7	81.7	80.6	82.0
1.804	96.0	97.8	96.3	90.0	86.4	85.6	89.4
2.706	93.9	98.3	96.9	93.6	88.1	88.6	96.0
3.608	90.6	96.7	97.6	95.9	93.7	89.4	96.2
4.51	90.1	93.1	95.1	96.2	97.9	87.8	93.6

2.3.2 最佳 F-PFS 的沉降性

对比了 F-PFS、N-PFS 和 PFS 的沉降性实验结果见图 4. 此时对应时刻的浊度分别为 1.73、1.75 和 3.44 NTU. 从图 4 可知 F-PFS 的沉降性优于 N-PFS 和 PFS 的沉降性.

2.3.3 最佳 F-PFS 的稳定性

将 F-PFS、N-PFS 和 PFS 存放一定时间以后, 进行高岭土浊度水的絮凝实验. 三者的絮凝性能如表 6 所示. 从中可知, 存放一段时间后, 三者的絮凝性能都有所下降, 但是 F-PFS 的絮凝率最佳值仍然大

于其他两者的最佳值, 说明 F-PFS 的稳定性好于 N-PFS 和 PFS 的稳定性. 尤其是 PFS, 存放 5 d 容器底部出现大量的沉淀, 大大影响了其絮凝性能.

2.3.4 最佳 F-PFS 对实际废水的絮凝能力

以城市污水处理厂的二级出水为实验用废水水样. 考察最佳条件复合的 F-PFS、N-PFS 和 PFS 的作为絮凝剂的处理效果, 并加以比较. 结果见图 5. 可以看出, 在 Fe³⁺ 的浓度相同的情况下, F-PFS 无论是对浊度的去除率还是对 COD 的去除率都略好于 N-PFS, 大大优于 PFS 的处理情况.

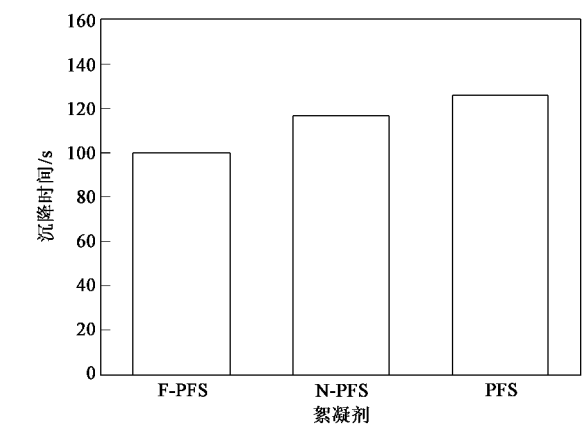


图 4 3 种絮凝剂沉降时间
Fig.4 Sedimentation time of three coagulants

3 F-PFS 絮凝机制探讨

利用 NaOH 溶液溶解出粉煤灰中的主要硅成分,并在 PFS 中引入活性硅成分制备成 F-PFS,此时 F-PFS 既具有金属的电中和作用又具有聚硅酸强烈的吸附架桥和卷扫网捕的性能^[26],因此提高了絮凝性能.同时 NaOH 提取液中含有微量的 Fe³⁺, Al³⁺ 离子都是能起到絮凝作用的活性组分,不仅提高了 F-PFS 的电中和作用,还可能形成聚硅硫酸铝铁这种絮凝剂.这就是 F-PFS 的絮凝性能优于 PFS 的原因.同时金属离子的存在会和聚硅酸中的氧形成配位键阻止了聚硅酸的进一步聚合,延长了聚硅酸的胶凝时间,同时增大了 F-PFS 的分子量,也就解释了 F-

表 6 一段时间后 F-PFS、N-PFS 和 PFS 絮凝率比较/%

Fe ³⁺ 的投加量 × 10 ⁻⁴ /mol	F-PFS				N-PFS				PFS	
	0 d	5 d	10 d	15 d	0 d	5 d	10 d	15 d	0 d	5 d
0.902	86.7	84.3	65.0	64.5	87.0	81.0	66.1	65.3	85.2	63.3
1.804	97.6	92.4	75.6	73.3	97.8	88.0	74.7	73.0	87.9	66.2
2.706	98.2	95.7	77.6	76.0	98.3	90.3	76.6	76.2	88.4	67.7
3.608	96.7	93.5	69.7	67.0	96.7	93.8	68.5	66.0	90.7	68.4
4.51	93.9	92.0	67.0	64.3	93.1	89.5	67.2	64.0	93.8	69.0

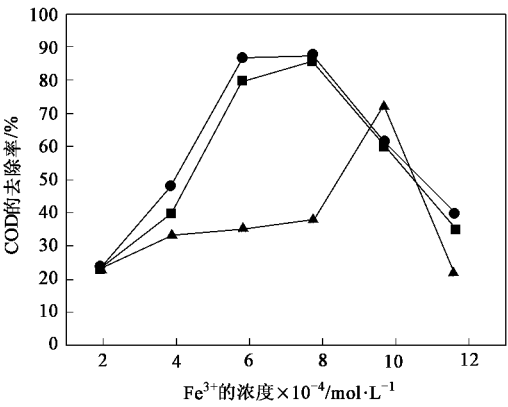
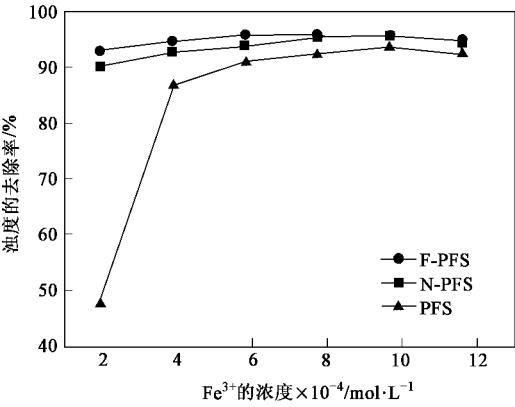


图 5 F-PFS、N-PFS 和 PFS 浊度及 COD 去除曲线
Fig.5 Curve of removal of turbidity and COD by F-PFS, N-PFS and PFS

PFS 的稳定性和沉降性优于 PFS 的原因。
本研究用 NaOH 溶液浸渍后的粉煤灰作为吸附剂^[27,28],达到了变废为宝的目的。
4 结论
(1) NaOH 溶液浸渍粉煤灰中硅的最佳条件为: 4 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液在120℃下浸渍反应 4 h。
(2) 合成 F-PFS 的条件确定为: 熟化时间为 2 h, 铁硅(摩尔)比为 1:0.2。

(3) 当利用结论(1)和(2)中最佳条件下得到的 F-PFS 处理高岭土浊度水, 絮凝率最高达到了 98.2%, 实验中用絮凝率来对 F-PFS 的絮凝性能进行评价, 消除了高岭土自身沉降的影响。
(4) F-PFS 的沉降性和稳定性优于 PFS。
(5) 当利用最佳条件下复合得到 F-PFS 处理城市污水处理厂的二级出水时, COD 去除率和浊度去除率分别达到了 93.3% 和 96.07%。F-PFS 与 PFS 和 N-PFS 相比, 当水样中 Fe³⁺ 的浓度相同时, F-PFS 效

果要远好于 PFS,略好于 N-PFS.

参考文献:

- [1] 汤鸿霄.无机高分子絮凝理论与絮凝剂[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.182-209.
- [2] 栾兆坤,汤鸿霄.我国无机高分子絮凝剂产业发展现状与规划[J].工业水处理,2002,20(11):1-6.
- [3] 王东升,刘海龙,晏明全,等.强化混凝与优化混凝:必要性、研究进展和发展方向[J].环境科学学报,2006,26(4):544-551.
- [4] Zouboulis A I, Moussas P A. Polyferric silicate sulphate (PFSiS): Preparation, characterisation and coagulation behaviour [J]. Desalination, 2008, 224(1-3):307-316.
- [5] Zouboulis A I, Moussas P A, Vasilakou F. Polyferric sulphate: Preparation, characterisation and application in coagulation experiment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 155(3):459-468.
- [6] Fu Y, Yu S L. Characterization and coagulation performance of solid poly-silicic-ferric (PSF) coagulant [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2007, 353(22-23):2206-2213.
- [7] 郭晓燕,刘召春,史萍华,等.粉煤灰在建筑工程中的应用[J].包钢科技,2001,27(2):67-68.
- [8] 艾红梅.大掺量粉煤灰混凝土配合比设计与性能研究[D].大连:大连理工大学,2005.2-8.
- [9] 赵鸣,吴广芬.粉煤灰资源多元化利用的探讨[J].北方环境,2003,28(3):64-66.
- [10] 吕瑶姣,张季爽.粉煤灰表面改性的研究[J].环境科学,1992,13(4):45-47,66.
- [11] 胡涛,马喜军,景怡,等.改性粉煤灰处理废水的应用研究[J].洁净煤技术,2002,12(4):70-72.
- [12] Lin J X, Zhan S L, Fang M H, *et al.* Adsorption of basic dye from aqueous solution onto fly ash [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 87(1):193-200.
- [13] Hsu T C. Adsorption of an acid dye onto coal fly ash [J]. FUEL, 2008, 87(13-14):3040-3045.
- [14] Luna Y, Otal E, Vilches L F, *et al.* Use of zeolitised coal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study [J]. Waste Management, 2007, 27(12):1877-1883.
- [15] Walek T T, Saito F, Zhang Q, *et al.* The effect of low solid/liquid ratio on hydrothermal synthesis of zeolites from fly ash [J]. Fuel, 2008, 87(15-16):3194-3199.
- [16] Wang S B, Ma Q, Zhu Z H. Characteristics of coal fly ash and adsorption application [J]. Fuel, 2008, 87(15-16):3469-3473.
- [17] Rastogi K, Sahu J N, Meikap B C, *et al.* Removal of methylene blue from wastewater using fly ash as an adsorbent by hydrocyclone [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 158(2-3):531-540.
- [18] Fan M, Brown R C, Wheelock T D, *et al.* Production of a complex coagulant from fly ash [J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 106(1):269-277.
- [19] 李亚强,胡凯,赵庆良,等.酸浸粉煤灰制备复合絮凝剂及其处理生活污水的效果研究[J].环境科学,2007,28(11):2507-2514.
- [20] JC/T874-2000.水泥用硅质原料化学分析方法[S].
- [21] 孙剑辉,夏四清,孙瑞霞.絮凝剂 PFCS 的制备及其性能研究 [J]. 环境科学, 1996, 17(4):59-61.
- [22] 陈旭红,苏慕珍,殷大众,等.粉煤灰分类与结构及活性特点 [J]. 水泥, 2007, 6(1):9-12.
- [23] 石太宏,王靖文,郭蔼仪,等.新型絮凝剂 PPFS 的制备及其絮凝性能研究 [J]. 中国环境科学, 2001, 21(2):161-164.
- [24] GB 9742-88.化学试剂硅酸盐测定通用方法[S].
- [25] GB 11914-89.水质化学需氧量的测定重铬酸钾法[S].
- [26] 刘红,邵俊,梁晶,等.提高聚硅酸稳定性的研究[J].工业水处理,2005,25(10):29-31.
- [27] 贾毅竹.粉煤灰处理印染废水 [J]. 内蒙古环境保护, 2000, 12(1):32-34.
- [28] 相会强,杨宏,巩有奎,等.改性粉煤灰去除磷酸盐的试验研究及机理分析 [J]. 环境科学与技术, 2005, 28(5):18-20.