钛冶炼废水资源化制备复合絮凝剂

李昃霖，徐璐，李超，李元坤，张笑天，杨耀辉，冀成庆

（中国地质科学院矿产综合利用研究所，自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心，四川　成都　610041）

摘要：以熔炼钛渣酸洗提质降杂过程中产生的盐酸、硫酸体系废水为原料，在不同的 pH 值、SiO_2 聚合时间、Fe^{3+}补加量等条件下制备复合絮凝剂。在盐酸体系下，溶液 pH 值为 3.0，常温下 SiO_2 聚合时间 4 h，$FeCl_3·6H_2O$ 加入量 50.0 g/L，$NaClO_3$ 加入量 5.0 g/L 的条件下制备出盐酸体系聚合硅酸铝铁钛絮凝剂 (PSAFTC)，对模拟浊液的平均除浊率为 95.62%。在硫酸体系下，溶液 pH 值为 1.30，$Fe_2(SO_4)_3$ 补加量 50.0 g/L，$NaClO_3$ 加入量 5.0 g/L 的条件下制备出硫酸体系聚合硅酸铝铁钛絮凝剂 (PSAFTS)，对模拟浊液的平均除浊率为 96.99%。PSAFTC 絮凝剂的除浊保质期可高达 90 d，而 PSAFTS 絮凝剂的除浊保质期仅 7 d，但前者的除浊效果略低于后者。利用熔炼钛渣提质降杂产生的废水制备絮凝剂属于废物的循环再利用，具有显著的经济效益和环境效益。

关键词：絮凝剂；熔炼钛渣；聚合硅酸铝铁钛；除浊性能；除杂废水；保质期

doi:10.12476/kczhly.202412280341

中图分类号：TD951　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000-6532（2025）04−0136−07

引用格式：李昃霖, 徐璐, 李超, 等. 钛冶炼废水资源化制备复合絮凝剂[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 136-142.

LI Zelin, XU Lu, LI Chao, et al. Preparation of composite flocculant by resource utilization of titanium smelting wastewater[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 136-142.

絮凝是废水处理过程中常用的技术之一，絮凝剂作为絮凝技术的核心，高效、价廉是其主要发展方向[1]。目前废水处理中最常用的絮凝剂为铝盐类和铁盐类，然而铝盐絮凝效果容易受水温、碱度等影响，铁盐絮凝剂则存在絮体吸附架桥能力较差等问题[2-4]。复合絮凝剂不仅可以发挥铝盐、铁盐等传统絮凝剂的优势，而且可以弥补单一絮凝剂的不足，因此复合絮凝剂已成为废水处理领域的研究热点[5]。

复合絮凝剂在废水处理方面表现出很好的絮凝效果，但制备工艺复杂且原料相对昂贵，生产成本较高[6]。为了降低生产成本同时践行“以废治废”的环保理念，研究人员开始以废水、废渣为原料制备复合絮凝剂[7-8]。姜智超等[9]利用钽铌冶炼铁泥制备出聚硅酸硫酸铁絮凝剂，对高浊度模拟废水浊度去除率达 98.50%。郭庆等[10]以拜耳法生产氧化铝过程中所产生的赤泥为原料，制备的 Fe-Al 基絮凝剂污水去浊率为 81.82%。邱慧琴等[11]以盐酸酸洗废液为主要原料制备聚合氯化铁铝，该絮凝剂对生活污水的去浊率达 70.00% 以上，优于聚合氯化铝和氯化铁絮凝剂。因此，废水、废渣作为絮凝剂制备的原料具有一定的研究基础和应用前景。

钒钛磁铁矿是中国重要的多金属矿产资源，采用非高炉炼铁工艺产生的钛渣需要进行酸洗提质降杂后才能获得商品级高钛渣[12-13]。酸洗废水中含有大量的铝、硅、铁和钛等杂质，并且含量基本符合絮凝剂的制备要求，因此该冶炼废水有望

收稿日期：2024-12-28

基金项目：新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目（ZKKJ202403）；金属矿产资源节约与综合利用调查（DD202302041）

作者简介：李昃霖（1998-），男，研究实习员，主要研究方向为难选矿产综合利用。

通信作者：徐璐（1987-），男，副研究员，主要从事稀有、稀散金属湿法冶金相关研究。

成为制备复合絮凝剂的原料，在对废水进行资源化利用的同时有效减少废水对环境的影响[14]。

以熔炼钛渣提质降杂过程中产生的盐酸、硫酸体系废水为原料，制备出聚合硅酸铝铁钛（PSAFT）系列复合絮凝剂，考查溶液 pH 值、SiO_2 聚合时间、Fe^{3+}补加量等条件对除浊率的影响，获取制备复合絮凝剂较佳工艺参数，以期为钛冶炼废水制备复合絮凝剂提供理论指导和数据支撑。

1　实　验

1.1　材料、试剂与仪器

含钛炉渣取自某冶炼厂非高炉还原熔炼工艺，化学成分见表 1。

表 1　熔炼钛渣化学成分　　单位：%

Table 1　Chemical composition of smelted titanium slags

TiO_2	TFe	V_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	S
58.16	3.29	0.77	11.06	11.43	2.83	6.70	0.99	0.12

试剂盐酸、硫酸、硫酸铁、氢氧化钠、三氯化铁、碳酸钠、氯酸钠均为化学纯，液碱为工业级。

主要设备为 ICP-AES 5300V 型等离子体发射光谱仪、MK Ⅱ M6 型原子吸收分光光度计、ZDS-20 型台式光电浊度仪和 H01-3 型恒温磁力搅拌器，FiveGo F2 型便携式 pH 计。

1.2　熔炼钛渣除杂及浸出液的制备

取 50.0 g 熔炼钛渣，使用不同体积的盐酸或硫酸搅拌浸出 1 h 获得钛渣和除杂废水，常温下探索熔炼钛渣初步除杂的较佳工艺调节条件。图 1 为熔炼钛渣的除杂实验结果。

从图 1 可以看出盐酸和硫酸的用量对 TiO_2、TFe、SiO_2 和 Al_2O_3 的浸出率的影响不大。为提高钛渣品位的同时考虑除杂废水的综合利用效率，50.0 g 熔炼钛渣中盐酸用量选用 42 mL，硫酸用量选用 12 mL，此时盐酸和硫酸浸出获得的钛渣中 TiO_2 含量分别为 78.93% 和 79.31%，符合 YB/T 5285—2011 酸溶性钛渣标准。根据熔炼钛渣最优的除杂条件，除杂废水的主要成分见表 2。

从表 2 中化学成分可看出，SiO_2、Al_2O_3、TFe 均为制取传统絮凝剂的主要成分，而钛渣除杂废水中的钛离子在合成絮凝剂时可以与硅酸形成 Ti-O-Si 键，相比于传统的铝系或铁系絮凝剂，不仅

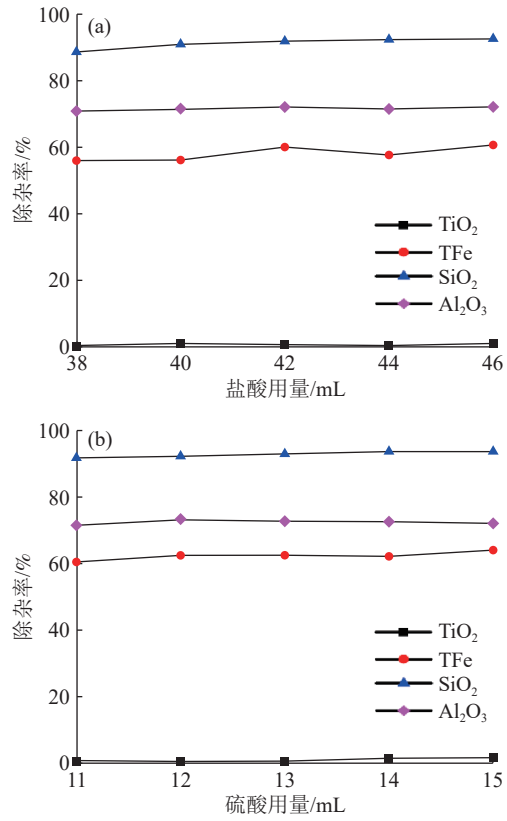

图 1　（a）盐酸和（b）硫酸用量对熔炼钛渣的浸出实验

Fig.1　Leaching test of (a) hydrochloric acid and (b) sulfuric acid dosage on molten titanium slags

表 2　钛渣除杂废水成分　　单位：g/L

Table 2　Titanium slag decontamination wastewater composition

	Ti^{4+}	Fe^{3+}	SiO_3^{2-}	Al^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	pH值
盐酸体系	0.46	2.00	30.91	5.61	1.14	1.01	0.91
硫酸体系	0.63	2.37	31.54	6.03	0.99	1.19	1.20

提高了聚合度，还提高了絮凝剂的稳定性。钛渣除杂废水中 SiO_2、Al_2O_3 的浓度已符合絮凝剂制取的条件（一般为 20～30 g/L），仅需补充 TFe 含量以提高絮凝剂净水性能。因此，利用除杂废水制取新型复合絮凝剂-聚合硅酸铝铁钛（PSAFT），具有良好的环保效益。

1.3　PSAFT 絮凝剂的制备

取一定量的钛渣除杂废水，用碳酸钠调节溶液 pH 值，让溶液中的 SiO_2 聚合一定时间（简称 SiO_2 聚合时间），然后加入经计量的氧化剂（氯酸钠）、高铁盐反应 2 h 后，静置陈化即得 PSAFT。为了防止其他杂质元素的引入，盐酸体系下高铁盐选用 $FeCl_3·6H_2O$ 试剂进行补加，经制

备获得 PSAFTC，硫酸体系下高铁盐选用 $Fe_2(SO_4)_3$ 试剂进行补加，经制备获得 PSAFTS。

1.4　PSAFT 絮凝剂的性能测试

利用泥化铝土矿制取浊度（400±20）NTU 的悬浊液，PSAFT 絮凝剂用量为 3 mL/L，搅拌一定时间后静置 20 min，取液面下 2 cm 处液体检测浊度，以除浊率表征实验产品净水性能。每次检测时均带 1 个空白标样，以研究絮凝剂的真实除浊效果。

2　结果与讨论

2.1　盐酸体系

2.1.1　不同溶液 pH 值下 SiO_2 聚合时间条件实验

聚合硅酸极不稳定，易凝胶化。在 SiO_2 聚合过程中，硅酸的聚合主要受 pH 值和聚合时间等因素的影响[15]。

取 200 mL 的钛渣除杂废水中，在氯酸钠和三氯化铁加入量分别固定为 5.0 g/L 和 35.0 g/L 的条件下，通过碳酸钠调节溶液 pH 值，考查溶液 pH 值和 SiO_2 聚合时间对絮凝剂除浊效果的影响。实验结果见图 2。

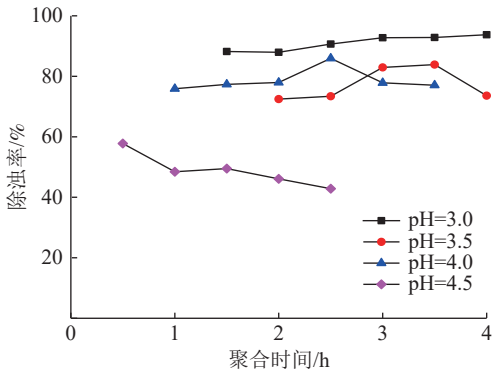

图 2　不同 pH 值下聚合时间对 PSAFTC 除浊率的影响
Fig.2　Effect of polymerization time on the turbidity removal rate of PSAFTC at different pH value

结果显示，溶液 pH 值为 3.0 时，随着 SiO_2 聚合时间的增加，絮凝剂对悬浊液的除浊率呈正比关系增加，当 SiO_2 聚合时间为 4 h 时，絮凝剂除浊率已达 93.75%。溶液 pH 值为 3.5 和 4.0 时，随着 SiO_2 聚合时间的增加，絮凝剂对悬浊液的除浊率先增大后减小。主要原因是当 SiO_2 聚合时间较短时，SiO_2 聚合不完全，活性硅酸量少，降低了有效成分聚合硅酸铝铁钛的生成量，而当 SiO_2 聚合时间过长时，已形成的部分活性硅酸转变为凝胶，不利于聚合硅酸铝铁钛的生成反应，最终导致产品对悬浊液除浊率的降低。因此，当 pH 值为 3.0，SiO_2 聚合时间为 4 h 时，絮凝剂除浊率效果较佳，除浊率高达 93.75%。

2.1.2　三氯化铁补加量条件实验

聚合硅酸铝铁钛是絮凝剂的有效成分，其是通过溶液中带负电的活性聚硅酸与带正电的铝铁钛聚合反应生成，所以铁是主要成分之一。由于钛渣除杂液中铁含量较少，会影响聚合反应的进行，需要补充 TFe。

取 200 mL 的钛渣除杂废水，在溶液 pH 值为 3.0，SiO_2 聚合时间为 4 h，氯酸钠加入量为 5.0 g/L 的条件下，考查三氯化铁加入量对絮凝剂除浊效果的影响。实验结果见图 3。

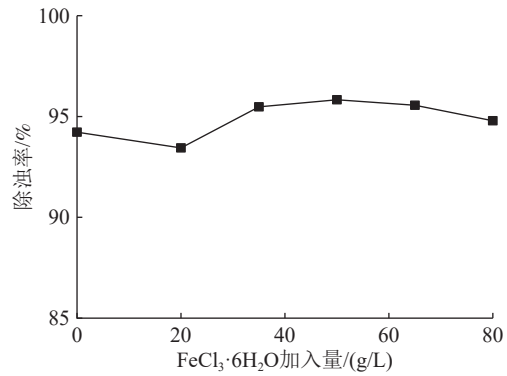

图 3　$FeCl_3·6H_2O$ 补加量对 PSAFTC 除浊率的影响
Fig.3　Effect of $FeCl_3·6H_2O$ supplementation on turbidity removal rate of PSAFTC

从图 3 可以看出，当补加 $FeCl_3·6H_2O$ 后，絮凝剂的除浊率有一定提高，除浊率都保持在 93% 以上，同时可以看出当 $FeCl_3·6H_2O$ 的加入量大于 50.0 g/L 后，除浊率再无显著的增长，甚至出现了下降，因此 $FeCl_3·6H_2O$ 的较佳加入量定为 50.0 g/L，此时较佳除浊率为 95.83%。

2.1.3　氯酸钠加入量条件实验

由于还原熔炼获得的钛渣中残留铁是以二价铁或金属铁的形式存在，酸浸时呈二价铁盐形式进入溶液，而絮凝剂有效成分为三价铁盐，因此，必须加入氧化剂将溶液中的 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+}，才能确保絮凝剂的净水效果。

取 200 mL 的钛渣除杂废水，在溶液 pH 值为 3.0，SiO_2 聚合时间为 4 h，$FeCl_3·6H_2O$ 加入量为 50.0 g/L 的条件下，考查氧化剂 $NaClO_3$ 加入量对絮凝剂除浊效果的影响。实验结果见图 4。

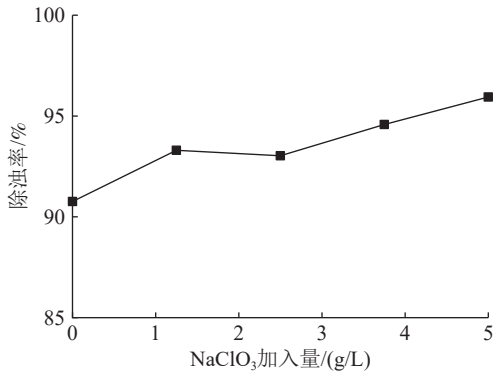

图 4　$NaClO_3$ 加入量对 PSAFTC 除浊率的影响
Fig.4　Effect of $NaClO_3$ addition on turbidity removal rate of PSAFTC

从图 4 中可以看出，絮凝剂的除浊率随着氧化剂用量的增加而不断提高，$NaClO_3$ 氧化剂用量到达 5.0 g/L 时，除浊率效果较佳，为 95.94%，因此，选取氧化剂 $NaClO_3$ 的较佳加入量为 5.0 g/L。

2.2　硫酸体系

2.2.1　不同溶液 pH 值下 SiO_2 聚合时间条件实验

取 200 mL 的钛渣除杂废水，在氯酸钠和硫酸铁分别固定为 5.0、35.0 g/L 时，通过碳酸钠调节溶液 pH 值，考查溶液 pH 和 SiO_2 聚合时间对絮凝剂除浊效果的影响。实验结果见图 5。

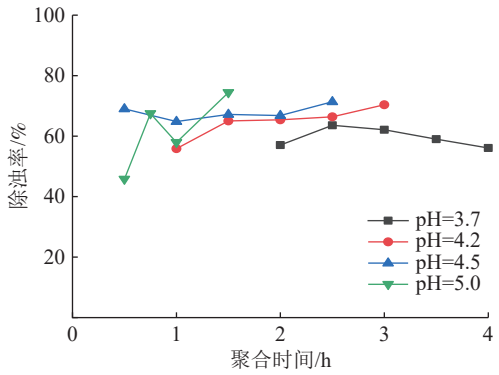

图 5　不同 pH 值下聚合时间对 PSAFTS 除浊率的影响
Fig.5　Effect of polymerization time on turbidity removal rate of PSAFTS at different pH value

从图 5 中可以看出，pH 值为 3.5 时，絮凝剂的除浊率较高为 63.59%；pH 值为 4.0 时，絮凝剂的除浊率较高为 70.38%；pH 值为 4.5 时，絮凝剂的除浊率较高除浊率为 71.35%；pH 值为 5.0 时，絮凝剂的除浊率较高为 74.41%。因此可以发现 pH 值在 3.5～5.0 时，除浊率效果不佳，需要进一步调节 pH 值进行研究。

2.2.2　溶液 pH 值对絮凝剂的影响

由于除杂液 pH 值在 3.5～5.0 时，制取的絮凝剂对悬浊液的除浊效果均不理想。因此，参照前述 PSAFTC 的制取条件，取消了 SiO_2 聚合时间步骤，直接进行在除杂溶液 pH 值低于 3.5 下制取 PSAFTS（硫酸体系聚硅酸铝铁絮凝剂）的溶液 pH 值条件实验。

取 200 mL 的钛渣除杂废水，在氯酸钠和硫酸铁加入量分别固定为 5.0 和 35.0 g/L，SiO_2 聚合时间为 2 h 的条件下，通过碳酸钠调节溶液 pH 值，继续考查溶液 pH 值对絮凝剂除浊效果的影响。实验结果见图 6。

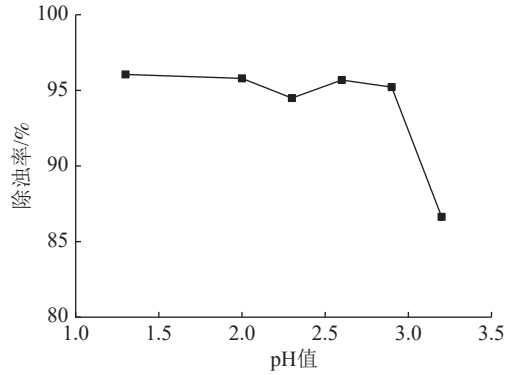

图 6　溶液 pH 值对 PSAFTS 除浊率的影响
Fig.6　Effect of solution pH value on turbidity removal rate of PSAFTS

从图 6 中可以看出，絮凝剂的除浊率基本保持稳定，均大于 85%，除浊效果较好。当 pH 值为 1.3 时，絮凝剂的除浊率高达 96.05%，因此较佳 pH 值定为 1.3。

2.2.3　硫酸铁补加量的影响

取 200 mL 的钛渣除杂废水，在溶液 pH 值为 1.3，氯酸钠加入量为 5.0 g/L 时，考查硫酸铁加入量对絮凝剂除浊效果的影响。实验结果见图 7。

从结果可知，随着 TFe 补加量的增加，除浊率缓慢增加，当 $Fe_2(SO_4)_3$ 的补加量为 50.0 g/L，除浊率达到较大值，为 97.05%。由于 $NaClO_3$ 氧化剂加入量的制取条件与盐酸体系和硫酸体系无关，所以参照盐酸体系聚硅酸铝铁絮凝剂（PSAFTC）的制取条件进行，硫酸体系液选取氧化剂 $NaClO_3$ 的较佳加入量依然为 5.0 g/L。

2.3　应用条件实验

2.3.1　絮凝剂用量

在浊液 pH 值为 7，絮凝剂沉降时间 1 h，絮凝剂现制现用，取 500 mL 悬浊液，考查絮凝剂用量对絮凝剂除浊效果的影响。实验结果见图 8。

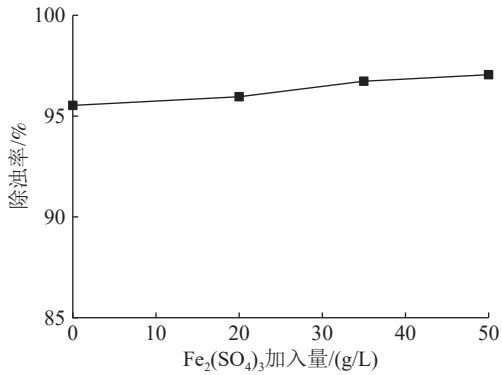

图 7　$Fe_2(SO_4)_3$ 补加量对 PSAFTS 除浊率的影响

Fig.7　Effect of $Fe_2(SO_4)_3$ supplementation on turbidity removal rate of PSAFTS

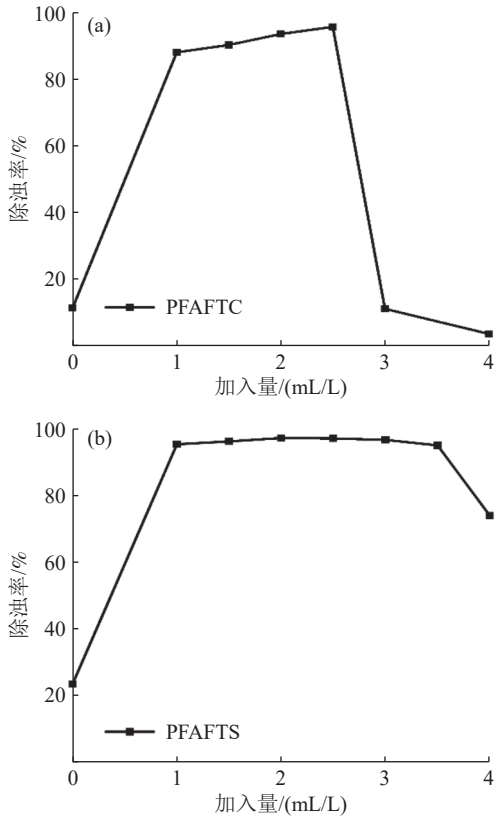

图 8　（a）盐酸和（b）硫酸体系下絮凝剂加入量对除浊率的影响

Fig.8　Effect of flocculant addition on turbidity removal rate in (a) hydrochloric acid and (b) sulfuric acid systems

从图 8 中可以看出，盐酸体系絮凝剂随着用量的增大，除浊率呈现先增大后减小的趋势，当 PSAFTC 的加入量为 2.5 mL/L 时，除浊率达到较大，为 93.13%。再增加用量，除浊率直线下降，说明絮凝剂的加入量不宜超过 2.5 mL/L。硫酸体系絮凝剂随着用量的增大，除浊率也是呈现先增大后减小的趋势。PSAFTS 絮凝剂用量在 1～3.5 mL/L 时，除浊效果稳定，除浊率均能达到 96%，当絮凝剂的加入量超过 3.5 mL/L 时，除浊率下降较多。这是由于 PSAFTC 和 PSAFTS 絮凝剂加入量过多时，形成的絮体结构可能过于致密或过于松散，导致絮体的沉降性能变差，同时过量的絮凝剂也会产生大量的胶体，这些胶体之间可能会发生相互作用，导致已经聚沉的悬浮颗粒重新稳定在水中。因此过多的絮凝剂可能会使絮体颗粒周围带有过多的同种电荷，产生静电斥力，使得絮体难以聚沉，从而导致浊度去除率下降。

因此，PSAFTC 较佳加入量为 2.5 mL/L，除浊率为 95.64%，PSAFTS 较佳加入量为 2.0 mL/L，除浊率达到为 97.12%.

2.3.2　除浊有效期

在絮凝剂加入量为 2.5 mL/L，浊液 pH 值为 7.0，沉降时间为 1.5 h，取 500 mL 悬浊液，考查除浊有效期对絮凝剂除浊效果的影响。实验结果见图 9。

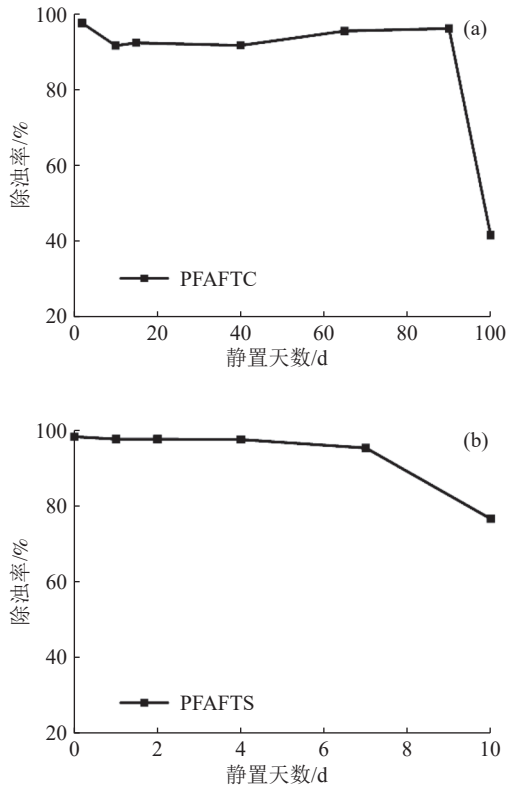

图 9　静置存放天数对除浊率的影响

Fig.9　Effect of days of standing storage on turbidity removal rate

由结果可知，PSAFTC 絮凝剂在 90 d 内，除浊率可保持在 91% 以上，超过 90 d 后，除浊效果锐减。而 PSAFTS 絮凝剂在 7 d 内，除浊率可保持

在 95% 以上，超过 7 d 后，除浊效果变差。这是由于 PSAFTS 在 pH 值为 1.3 制备的，而 PSAFTC 在 pH 值为 3.0 制备，所以 PSAFTS 处于酸度更大的环境中，会影响其保质效果。因此，PSAFTC 絮凝剂可以长时间保存使用，而 PSAFTS 絮凝剂在制备完成后需 7 d 内使用。

2.3.3　综合条件实验

PSAFTC 制取较佳条件步骤为，取 200 mL 钛渣除杂废水，调节溶液 pH 值为 3.0，SiO_2 聚合时间为 4 h，然后加入 10.0 g 的 $FeCl_3·6H_2O$ 和 1.0 g 的 $NaClO_3$ 反应 2 h 后，静置陈化即得 PSAFTC。向浊度为 410.4 的 500 mL 悬浊液中加入 1.25 mL 的 PSAFTC，进行除浊检测，结果见表 3。

表 3　PSAFTC 综合条件实验
Table 3　PSAFTC integrated condition test

除浊率/%	96.84	94.71	95.31
平均除浊率/%		95.62	

PSAFTS 制取较佳条件步骤为，取 200 mL 钛渣除杂废水，调节溶液 pH 值为 1.3，加入 1.0 g 的 $NaClO_3$，10.0 g 的 $Fe_2(SO)_3$ 反应 2 h 后，静置陈化即得 PSAFTC。向浊度为 390.5 的 500 mL 悬浊液中加入 1.0 mL 的 PSAFTS，进行除浊检测，结果见表 4。

表 4　PSAFTS 综合条件实验
Table 4　PSAFTS integrated condition test

除浊率/%	96.58	95.87	98.53
平均除浊率/%		96.99	

从表 3、4 看出，综合条件下制得的 PSAFTC 絮凝剂的平均除浊率为 95.62%，PSAFTS 絮凝剂的平均除浊率为 96.99%，后者好于前者，但都具有良好的应用前景。

3　结　论

（1）采用盐酸和硫酸对熔炼钛渣进行酸洗提质降杂预处理，较佳条件下可获得 TiO_2 含量分别为 78.93% 和 79.31% 的高钛渣和可用于制取复合絮凝剂的盐酸和硫酸体系的除杂废水。

（2）盐酸体系中，在较佳条件下制备出 PSAFTC，用量为 1.25 mL/500 mL 悬浊液，PSAFTC 对模拟浊液的平均除浊率 95.62%。硫酸体系中，在较佳条件下制备出 PSAFTS，用量为 1.0 mL/500 mL 悬浊液，PSAFTS 对模拟浊液的平均除浊率 96.99%。综合研究结果表明，PSAFTS 絮凝剂的除浊效果优于 PSAFTC 絮凝剂，但除浊保质期仅 7 d，而 PSAFTC 絮凝剂的除浊保质期可达 90 d。

（3）本研究有效解决了熔炼钛渣提质降杂过程中废水的回收再利用难题，相比直接利用化工原料制备复合絮凝剂的工艺方法，可有效降低复合絮凝剂的制备成本，为钛冶炼废水制备复合絮凝剂的应用提供了重要的理论基础和数据支撑。

参考文献：

[1] 姜盛基,王刚,严亚萍,等. 絮凝剂对水中污染物去除性能和机理的最新研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(5):1348-1354.
JIANG S J, WANG G, YAN Y P, et al. Recent research progress in the removal performance and mechanism of flocculants for pollutants in water[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(5):1348-1354.
[2] Wang Xiaomeng, Gan Yonghai, Zhang Shujuan. Improved resistance to organic matter load by compositing a cationic flocculant into the titanium xerogel coagulant[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 211:715-722.
[3] Sun Wenquan, Zhou Shengbao, Sun Yongjun, et al. Synthesis and evaluation of cationic flocculant P(DAC-PAPTAC-AM) for flocculation of coal chemical wastewater[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 99(1):239-248.
[4] Huang Xuesong, Zhang Yingjie, Li Xue, et al. Direct preparation of polysilicic acid flocculant by using pickling waste liquor of metal plate[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 36:101267.
[5] 李立辉,从忠奎,陈建设,等. 复合聚硅酸铁混凝剂的制备、性能与混凝机理研究[J]. 金属矿山, 2023(7):268-274.
LI L H, CONG Z K, CHEN J S, et al. Study on preparation, properties and coagulation mechanism of composite polysilicate ferric coagulant[J]. Metal Mine, 2023(7):268-274.
[6] 颜海燕,张贤明,聂煜东,等. 钒钛磁铁矿制备絮凝剂用于有机污水处理的研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(2):190-194.
YAN H Y, ZHANG X M, NIE Y D, et al. Study on preparation of vanadium-titanium magnetite flocculant for organic wastewater treatment[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(2):190-194.
[7] 黄涛,黄自力,肖硕,等. 铁尾矿酸浸液制备聚氯化铁的试验研究[J]. 无机盐工业, 2024, 56(2):121-126.
HUANG T, HUANG Z L, XIAO S, et al. Experimental study on preparation of polyferric chloride from iron tailings acid leaching solution[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(2):121-126.
[8] 姚庭安,田弛,彭德强,等. 煤气化渣的高附加值资源化利

用研究进展[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(11):1583-1586.
YAO T A, TIAN C, PENG D Q, et al. Research progress on resource utilization of high value-added coal gasification slag[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(11):1583-1586.
[9] 姜智超,邓景衡,张浩. 钽铌冶炼铁泥制备聚硅酸硫酸铁絮凝剂及其应用[J]. 环境化学, 2017, 36(1):159-166.
JIANG Z C, DENG J H, ZHANG H. Preparation of poly-ferric silicate sulfate by using iron sludge from Tantalum and Niobium smelting process and its application[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1):159-166.
[10] 郭庆,陈书文,张军红,等. 微波强化赤泥制备 Fe-Al 基絮凝剂工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):117-121+82.
GUO Q, CHEN S W, ZHANG J H, et al. Study on preparation of Fe/Al-base flocculant from red mud by microwave[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):117-121+82.
[11] 邱慧琴,蓝伟,张洁,等. 利用盐酸酸洗废液制备聚合氯化铁铝混凝剂的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(1):64-67.
QIU H Q, LAN W, ZHANG J, et al. Preparation of polyferric aluminum chloride by waste hydrochloric acid pickling liquor[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(1):64-67.
[12] 杨耀辉,惠博,颜世强,等. 全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(4):1-11.
YANG Y H, HUI B, YAN S Q, et al. Overview of global vanadium-titanium magnetite resources and comprehensive utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4):1-11.
[13] 欧杨,孙永升,余建文,等. 钒钛磁铁矿加工利用研究现状及发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(4):267-278.
OU Y, SUN Y S, YU J W, et al. Research status and development prospect of utilization of vanadium-titanium magnetite[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(4):267-278.
[14] 谢思源,蒋伟,汪胜东,等. 含钛高炉渣氯化铵焙烧活化试验[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2024(5):68-75.
XIE S Y, JIANG W, WANG S D, et al. Activation test of titanium-bearing blast furnace slag by roasting with ammonium chloride[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(5):68-75.
[15] 芦贻春,李再耕. pH 值对硅溶胶凝胶化过程的影响[J]. 耐火材料, 1995(6):326-328+335.
LU Y C, LI Z G. pH value influence on the sol's gelling course[J]. Refractories, 1995(6):326-328+335.

Preparation of Composite Flocculant by Resource Utilization of Titanium Smelting Wastewater

LI Zelin, XU Lu, LI Chao, LI Yuankun, ZHANG Xiaotian, YANG Yaohui, JI Chengqing
(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Two kinds of wastewater generated in the decontamination of smelting titanium slag by hydrochloric acid and sulfuric acid washing respectively were utilized as raw materials, and composite flocculants were prepared at different pH values, polymerization durations of SiO_2 and recruitment amounts of Fe^{3+}. The average turbidity removal rate of the polysilicate aluminum ferrite titanium flocculant (PSAFTC) on simulated turbid solution prepared at hydrochloric acid system with solution pH value of 3.0, SiO_2 polymerization time of 4 h at room temperature, $FeCl_3$-$6H_2O$ incorporation of 50.0 g/L and $NaClO_3$ incorporation of 5.0 g/L was 95.62%. The average turbidity removal rate of the polysilicate aluminum ferrite titanium flocculant (PSAFTS) on simulated turbid solution was 96.99% when prepared at the conditions of sulfuric acid system, solution pH value of 1.30, $Fe_2(SO_4)_3$ addition of 50.0 g/L, and $NaClO_3$ addition of 5.0 g/L. The shelf life of the PSAFTC flocculant can reach 90 days, while that of the PSAFTS flocculant is only 7 days. However, the turbidity removal effect of the former is slightly lower than that of the latter. This paper focuses on preparation of flocculant agents from the wastewater generated from the decontamination of smelting titanium slag. The introduced method possesses significant economic and environmental benefits.

Keywords: flocculant; melting titanium slag; polysilicate aluminum ferrite titanium; turbidity removal performance; decontaminated wastewater; shelf life