

# 氯化法钛白副产物资源化利用研究

董林辉<sup>1</sup>, 喻经纶<sup>1</sup>, 范浩<sup>1</sup>, 朱文渊<sup>1</sup>, 李风亭<sup>2</sup>, 伏振宇<sup>1\*</sup>

(1. 深圳市长隆科技有限公司, 广东 深圳 518116; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:**以氯化法钛白粉生产过程中的副产物废盐酸和氯化尾气吸收液、工业氢氧化铝和七水硫酸亚铁为原料, 在双氧水催化氧化条件下, 制备得到一系列新型无机高分子混凝剂聚合氯化硫酸铝铁 (PAFCS), 其外观为红褐色透明液体, 体积密度 1.39 ~ 1.43 g/cm<sup>3</sup>, 全铁与三氧化二铝 (TFe+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 总含量 ≥ 10.5%, 可以用作水处理用混凝剂。与市售混凝剂相比, 制备所得聚合氯化硫酸铝铁对高化学需氧量 (COD) 的垃圾渗滤液生化尾水有较好的处理效果, COD 去除率达到 68.51%, 优于传统混凝剂聚合硫酸铁。高效聚合氯化硫酸铝铁的制备为我国氯化法钛白粉生产工艺中副产物的资源化利用提供了解决思路和可行方法。

**关键词:**氯化法钛白粉; 废盐酸; 尾气; 资源化利用; 混凝剂; 聚合氯化硫酸铝铁; COD; 去除率

**中图分类号:**TF823.X757 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7638(2021)03-0099-06

**DOI:** 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.03.015

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



与作者互动  
听语音  
聊科研

## Study on resource utilization of by-products of chloride titanium dioxide

Dong Linhui<sup>1</sup>, Yu Jinglun<sup>1</sup>, Fan Hao<sup>1</sup>, Zhu Wenyuan<sup>1</sup>, Li Fengting<sup>2</sup>, Fu Zhenyu<sup>1\*</sup>

(1. Shenzhen Changlong Technology Co., Ltd., Shenzhen 518116, Guangdong, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In this paper, a series of new inorganic polymer coagulants (Polymeric Aluminum Ferric Chloride Sulfate, PAFCS) were prepared by using waste hydrochloric acid and chlorinated tail gas absorbing liquid from by-products of the production of titanium dioxide, in combination with industrial aluminum hydroxide and ferrous sulfate heptahydrate, under the conditions of hydrogen peroxide catalytic oxidation. The appearance of the prepared PAFCS was a reddish-brown transparent liquid with a density of 1.39 to 1.43 g/cm<sup>3</sup>, and the total content of iron and alumina (TFe + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) was ≥ 10.5%, which could be used as coagulant for water treatment. The PAFCS prepared in this paper were used to treat landfill leachate biochemical tail water, in which the removal rate of COD reached 68.51%, which was superior to the traditional coagulant polymeric ferric sulfate (PFS). At the same time, this work provides ideas for solving the problem of resource utilization and clean production of by-products in the production process of titanium dioxide by chlorination method in China.

**Key words:** chlorinated titanium dioxide, waste hydrochloric acid, chlorinated tail gas, resource utilization, coagulant, polymeric aluminum ferric chloride sulfate, COD, removal rate

收稿日期: 2020-08-05

基金项目: 深圳市重大技术攻关项目 (重 20170491)。

作者简介: 董林辉 (1985—), 男, 湖北应城人, 本科, 深圳市高层次人才, 主要从事副产物资源化利用研究, 高效水处理药剂开发、生产工艺优化及应用研究, E-mail: donglinhui@126.com; \* 通讯作者: 伏振宇 (1987—), 男, 博士, 主要从事新型高效水处理药剂和材料研发, E-mail: 13510861290@163.com。

## 0 引言

钛白粉是一种具有卓越光学性质、分散性质和化学稳定性的白色颜料<sup>[1-2]</sup>,广泛应用于生活和工业生产中,主要用途不仅包括颜料、涂料、光伏、传感器、造纸、牙膏和防晒霜,还包括陶瓷、食品、塑料、化纤、医药等方面<sup>[2]</sup>。随着我国经济的快速增长,钛白粉的消费量大幅度提升,特别是高端的金红石型钛白粉,市场潜力和价格优势很大<sup>[3-4]</sup>。工业上,钛白粉的生产方法主要包括硫酸法和氯化法两种。据国家化工行业生产力促进中心钛白分中心统计,2018年我国生产钛白粉295.4万t,其中硫酸法生产钛白粉282万t,氯化法生产钛白粉13.4万t<sup>[4]</sup>。虽然硫酸法生产钛白粉具有原料来源广、生产成本低、工艺流程简单、工艺成熟、质量稳定等优势,但氯化法生产的金红石型钛白粉在白度、有害杂质的含量,特别是半成品的稳定性上都优于硫酸法,另外氯化法经济规模的装置运行稳定,其综合能耗、吨产品万元产值、能耗也会低于硫酸法<sup>[5-6]</sup>。国外企业(如科慕公司)大都采用氯化法生产钛白粉,国内企业也开始陆续引进更先进的、大型化的氯化法钛白生产技术来提升钛白粉生产工艺水平,包括装置能力更大、自动化程度高的沸腾氯化技术以及气相氧化除疤技术等<sup>[7]</sup>。虽然目前现有大型氯化法钛白生产装置的工艺流程都不尽相同,主要设备选型也各具特点,但都是按照同样的基本工艺原理进行的,主要包括氯化、除尘、冷凝、精制、氧化五个工序,如图1所示。在氯化法钛白生产中<sup>[5]</sup>,废渣主要来自沸腾氯化炉反应,混合气体冷却后进入收尘系统的收尘渣和氯化炉为稀释钙镁含量而不定期进行的下排渣;废气主要包括氯化尾气、精制尾气等;废水主要来自废渣制浆之后的过滤水、尾气洗涤产生的废酸以及装置冲洗水。

废水现行的处理方法:氯化法钛白生产废水大部分是酸性废水,常用中和法处理,即在中和池内调节pH值至中性,经中和沉淀、过滤后,作为工业水加以利用,返回对氯化废渣制浆。

废气现行的处理方法:第一步先经湿法净制处理,即用水喷淋洗涤尾气中HCl和TiCl<sub>4</sub>气体,并副产18%~30%的盐酸外售或用于后处理的包膜,然后再用NaOH或Ca(OH)<sub>2</sub>溶液进行碱洗,来吸收尾气中的氯气,最后的尾气达标排放。

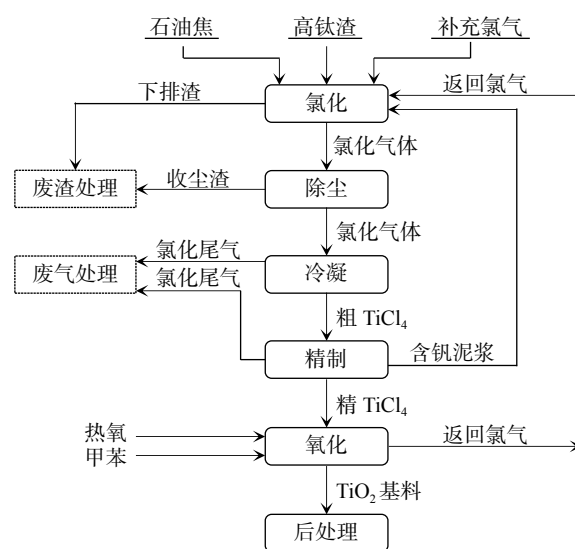


图1 氯化法钛白生产工艺流程

Fig. 1 Process diagram of TiO<sub>2</sub> pigment production by chlorination process

上述废物虽进行相应的处理并最终达标排放,但是还有很多地方需要优化和完善。①氯化装置产生的是酸性废水,结合废渣的回收处理,可以用于氯化废渣制浆液,直接中和后排放,但也加大了后续污水处理站的配套处理能力。②氯化尾气采用多级酸洗加碱洗的处理工艺是有很多优点的,既能洗涤尾气中的酸洗气体副产盐酸,又能通过碱洗来处理尾气中的氯气和SO<sub>2</sub>气体,但是由于尾气组分复杂,生产的盐酸因杂质含量高很难进行外售,更不用说进行后处理包膜,更多的是中和处理。因此氯化法钛白粉生产副产物的综合处理,成为氯化法钛白粉生产企业优先考虑的重要因素<sup>[8]</sup>。

混凝法作为物化法的一种常见方法,是水处理过程中应用最普遍的关键环节之一,它决定着后续流程的运行工况、最终出水质量和成本费用。无机混凝剂的应用历史悠久,时至今日,无机混凝剂已经广泛应用于工业废水、生活污水以及垃圾渗滤液的治理。近年来,随着环境污染治理力度加大,为适应各类水质净化处理要求,复合混凝剂的研制与应用已成为热点。

鉴于此现状,在调研钛白粉行业相关环保问题处理工艺的基础上,笔者采取综合利用氯化尾气、废盐酸等副产物的资源化方案,即利用氯化法钛白废盐酸和吸收氯化尾气后的吸收液为原料,与工业级氢氧化铝粉及七水硫酸亚铁反应,制备了一系列复合混凝剂聚氯化硫酸铝铁,并用制备的混凝剂对垃圾渗滤液生化尾水进行混凝性能评价。该路径不

仅解决了氯化法钛白生产中氯化尾气、废盐酸的治理问题,同时将其转化为可用于废水处理的混凝剂,具有显著的经济效益。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

氯化法钛白副产物(淮安某氯化法钛白企业):废盐酸(氯化氢:26.6%)、氯化尾气吸收液(氯化氢:4.52%,全铁:6.35%);氢氧化铝(氧化铝:64%),工业级,生产厂家为山东中铝;七水硫酸亚铁(85%),工业级,生产厂家为惠云钛白;双氧水(27%),工业级,生产厂家为乳源东阳光;市售混凝剂聚合硫酸铁(P-0),工业级,全铁含量11.32%,盐基度10.18%,厂商为深圳市长隆科技有限公司。

试验水样取自深圳市龙岗区某垃圾填埋场的垃圾渗滤液生化尾水,技术指标为:COD=953.2 mg/L, pH=7.83。

### 1.2 试验仪器

ZR-KF1 可控加热搅拌反应器;ZR4-6 六联混凝试验搅拌器;752 分光光度计;S2-Meter 便携式

pH 计;SHZ-D(Ⅲ)循环水式多用真空泵;XJ-IV 化学需氧量消解装置。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 聚氯化硫酸铝铁(PAFCS)的合成

以废盐酸、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  及氯化尾气吸收液为原料,双氧水为氧化剂制备一系列的聚氯化硫酸铝铁<sup>[9-10]</sup>,详细物料配比和试验制备工艺如表1和图2所示。具体步骤如下:向500 mL 三口烧瓶中加入62~102 g 的废盐酸、8 g 的氢氧化铝粉置于可控加热搅拌反应器中于105 ℃进行加热酸溶反应,待氢氧化铝粉完全酸溶后,再加入16~48 g 氯化尾气吸收液和54~162 g 七水硫酸亚铁,控制温度为60 ℃条件下进行氧化聚合反应,于0.5 h 内完成双氧水的滴加,检测溶液中亚铁离子含量小于0.1%时结束反应,待自然冷却后过滤,即可得到红褐色透明的聚氯化硫酸铝铁(PAFCS)。

将试验制备的  $n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为6:1、4:1、2:1 的聚氯化硫酸铝铁分别命名为P-1、P-2、P-3,市售聚合硫酸铁命名为P-0。

表1 不同类型 PAFCS 的物料组成  
Table 1 Material compositions of different types of PAFCS

编号	$n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$	配比/g				
		废盐酸	氢氧化铝	氯化尾气吸收液	七水硫酸亚铁	双氧水
P-1	6 : 1	102	8	48	162	62
P-2	4 : 1	82	8	32	108	41
P-3	2 : 1	62	8	16	54	20

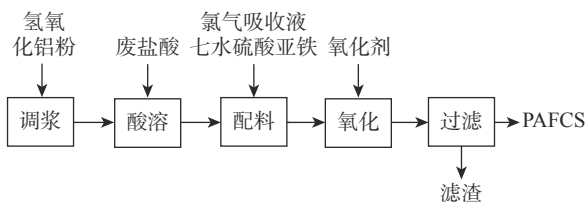


图2 PAFCS 制备工艺流程  
Fig. 2 Process diagram of PAFCS preparation

#### 1.3.2 混凝性能评价

取垃圾渗滤液生化尾水进行混凝试验。混凝试验在六联搅拌器上进行,取1 L 原水于烧杯中,加入PAFCS 并以250 r/min 快速搅拌30 s,使PAFCS 在水中迅速混合均匀;再以100 r/min 中速搅拌5 min,使水体中的胶体污染物发生絮凝作用,沉淀30 min 后,于取样口取上清液测定COD。

#### 1.3.3 分析方法

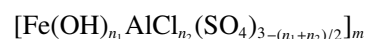
聚合硫酸铁铝产品中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 pH 值的测定,

采用国标《水处理剂 聚氯化铝》(GB/T 22627—2014)中规定的测定方法进行;聚合硫酸铁铝产品中全铁和盐基度的测定,采用国标《水处理剂 聚合硫酸铁》(GB/T 14591—2016)中规定的测定方法进行;水质COD 的分析采用国标方法《水质化学需氧量的测定 重铬酸钾法》(HJ 828—2017)进行测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 产品性能指标

聚氯化硫酸铝铁(PAFCS)是一种新型无机高分子多核混凝剂,即阳离子型聚合物电解质,其分子式可以表达为:



式中,  $n_1+n_2 < 3$ ;  $m=f(n_1+n_2)$ 。

PAFCS 兼具铁盐沉降快、成本低和铝盐矾花

大的优点,可用于工业废水的混凝净化处理。其主要性能指标为:①外观为红褐色粘稠液体;

②  $w(\text{TFe}+\text{Al}_2\text{O}_3)\geq 10.0\%$ ; ③ pH值(1%水溶液): 2~3.5。本试验制备得到的产品各项指标见表2。

表2 不同类型PAFCS的性能参数

Table 2 Performance parameters of the different types of PAFCS

序号	$n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$	全铁含量/%	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量/%	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	盐基度/%	pH值(1%水溶液)
P-1	6 : 1	8.77	1.48	1.43	11.21	2.57
P-2	4 : 1	8.19	2.08	1.42	14.81	2.89
P-3	2 : 1	6.82	3.46	1.39	15.62	3.12

## 2.2 聚氯化硫酸铝铁性能评价

### 2.2.1 不同 $n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 对混凝效果的影响

取上述试验制备得到的混凝剂PAFCS(P-1、P-2、P-3)处理垃圾渗滤液生化尾水,综合评价PAFCS中不同  $n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  比值对垃圾渗滤液生化尾水混凝效果的影响。不同  $n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  的PAFCS在各投加量下,对垃圾渗滤液生化尾水的处理效果如图3所示。

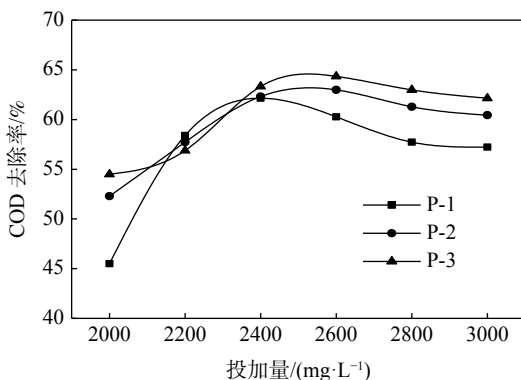


图3 不同  $n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  对混凝效果的影响

Fig. 3 Effect of different  $n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  on coagulation

由图3可知,随着PAFCS投加量的增加垃圾渗滤液生化尾水COD去除率先随之升高后降低,去除率最高可以达到65.03%。随着PAFCS中  $n(\text{Fe}) : n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  的降低,COD去除率也随之增大。在混凝剂投加量为2400~3000 mg/L时,P-3的混凝效果优于P-1和P-2,这与垃圾渗滤液中某些污染物可以与  $\text{Al}^{3+}$  形成难溶的沉淀物而得以去除有关。

由于  $\text{Al}^{3+}$  的水解聚合过程中会产生高电荷的羟基多核络合物,增强PAFCS混凝剂的电中和能力<sup>[11]</sup>;而且Cl<sup>-</sup>的配位能力使其水解聚合得到的多核络合物的分子量增大,从而使PAFCS混凝剂的吸附架桥能力增强,因此随着PAFCS中氧化铝含量的增加,其电中和与吸附架桥的能力就会得到提升,对废水中污染物的去除效果就更显著。

### 2.2.2 pH值对混凝效果的影响

使用分析纯液碱或硫酸调节垃圾渗滤液生化尾水的pH值分别为4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0,取2600 mg/L作为PAFCS最佳投药量,试验混凝剂P-3对不同pH值生化尾水的混凝效果,结果如图4所示。

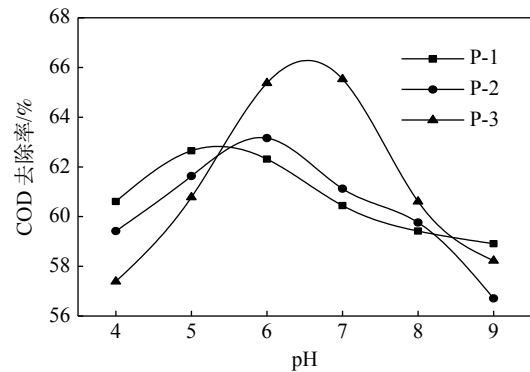


图4 pH值对混凝效果的影响

Fig. 4 Effect of pH on coagulation

由图4可知,PAFCS在pH值为4~9的范围内处理垃圾渗滤液生化尾水的COD处理效果较为稳定,其中在pH值为6~7范围内效果最好。这是因为PAFCS中既有羟基铁,亦有羟基铝,在低pH值(4~7)阶段,羟基铁可以水解产生大量的正电荷中和水体中的胶体污染物的负电荷,同时形成多核的络合物起到吸附架桥的作用,同样可以发挥较好的去除效果<sup>[12]</sup>。而在高pH值(6~9)阶段,虽然羟基铁水解产生的正电荷减弱,但是羟基铝水解完全,补充了一部分的正电荷,同样可以发挥较好的去除效果。在最佳pH值6~7范围时,可以同时发挥羟基铁和羟基铝的处理优势,达到最佳的处理效果。

### 2.2.3 PAFCS对不同类型废水COD去除效果比较

为了进一步考察PAFCS对工业废水的COD去除性能,选取了印染生化尾水(COD=202.5 mg/L)和造纸生化尾水(COD=162.6 mg/L)进行试验,结果见图5、6。

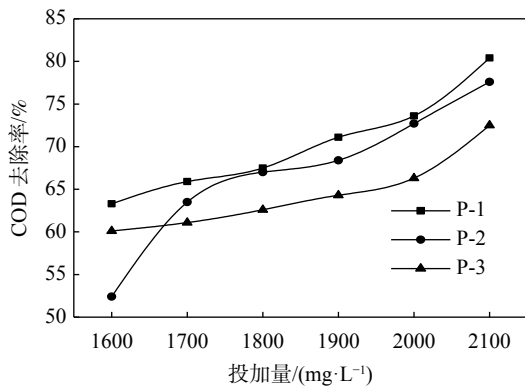


图 5 混凝剂对印染生化尾水的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of coagulant on printing and dyeing biochemical tail water

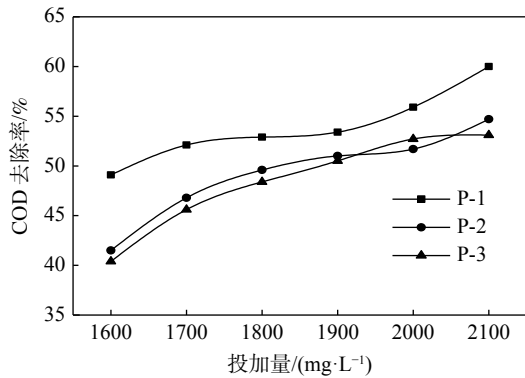


图 6 混凝剂对造纸生化尾水去除效果

Fig. 6 Removal efficiency of coagulant on paper-making biochemical tail water

从图 5 和图 6 可知, 针对不同类型、不同浓度的 COD 废水, 3 种混凝剂均表现出较好的 COD 去除性能, P-1 除 COD 效果最好、P-2 次之、P-3 稍差。

由图 5 可知, 当投加量为 1 850 mg/L 时, P-1 和 P-2 处理后废水 COD 去除率均可达到 65% 以上, 效果显著; 由图 6 可知, 当投加量为 2 000 mg/L 时, 仅 P-1 处理后废水 COD 去除率可达到 55% 以上。在相同投加量下, 同一药剂针对不同废水除 COD 效果有差异的主要原因是废水性质的不同。

P-1 除 COD 效果好于 P-2 和 P-3 的原因, 一方面可能是因为 P-1 中 Fe 的成分多, 其形成的矾花密实, 沉降性能好, 附带吸附卷扫除 COD 的效果好; 另一方面, 印染生化尾水和造纸生化尾水中的某些污染物, 如分散染料、木质素等污染物易与 Fe 结合生成不溶性的沉淀物得以去除, 从而提高了 COD 的去除效果。另外, 铁铝复合混凝剂在溶液中的水解状态主要是高电荷的铁铝多核络离子或金属氧化物凝胶物对脱稳的微粒产生粘结架桥絮凝和卷扫作用而使污染物聚沉。

#### 2.2.4 PAFCS 与市售 PFS 混凝效果比较

对比了自制 P-3 与市售混凝剂聚合硫酸铁对垃圾渗滤液生化尾水中 COD 的去除效果, 该废水外观呈现较浅的乳白色, 带有悬浮物。其中 pH 值为 7.83, COD=953.2 mg/L。取 1 000 mL 的某垃圾渗滤液生化尾水置于 ZR4-6 型混凝试验搅拌器的烧杯中, 加入混凝剂并以 250 r/min 快速搅拌 30 s, 使混凝剂在水体中迅速混合均匀; 再以 100 r/min 中速搅拌 5 min, 使水体中的胶体污染物发生絮凝, 沉淀 30 min 后, 于取样口取上清液测定 COD 值, 测定结果如表 3 所示。

表 3 自制 PAFCS 与市售聚合硫酸铁混凝剂处理垃圾渗滤液的效果试验  
Table 3 Treatment of landfill leachate with PAFCS and commercial polyferric sulfate coagulant

投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	聚氯化硫酸铝铁(P-3)		聚合硫酸铁(P-0)	
	出水COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水COD去除率/ %	出水COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水COD去除率/ %
2 000	469.1	51.83	543.9	43.99
2 200	449.2	53.93	506.5	47.91
2 400	429.2	56.02	467.4	52.01
2 600	310.2	68.51	474.4	51.28
2 800	365.8	62.68	470.0	51.74
3 000	406.6	58.39	491.4	49.19

从表 3 可知, 相同投加量情况下, 自制的 PAFCS (P-3) 比市售混凝剂聚合硫酸铁对垃圾渗滤液生化尾水中 COD 的去除效果更好。在投加量为 2 600 mg/L 时, P-3 对污水的 COD 去除率达到了 68.51%, 比 PFS 的 COD 去除率高 17.23 个百分点。PAFCS 处理效果较传统混凝剂好, 可能与 PAFCS 兼具了铁盐沉降速度快和铝盐矾花大、吸附能力强

的特点有关<sup>[9-10]</sup>。更进一步, Al<sup>3+</sup>进入到 PAFCS 的结构中, 提高了产品电荷密度和分子量, 使其在混凝试验中生成的絮凝体大而致密, 沉降速度快, 因此效果优于传统的聚合硫酸铁混凝剂。

综上, 本方法结合氯化法钛白环保治理最新研究成果, 以废盐酸, 氯化尾气吸收液、氢氧化铝、硫酸亚铁和氧化剂(双氧水)为原料, 生产液体 PAFCS

产品。其特点主要有:

1) PAFCS 生产工艺简单易操作, 生产周期短, 生产效率高, 直接生产液体型产品, 利于下游厂家直接应用;

2) 本方法设备投入少, 建设周期短, 原料利用率高, 技术先进、成熟、可靠, 所得产品质量稳定, 效果好;

3) 本工艺注重环保, 生产环境好, 在密闭环境条件下生产, 无三废污染问题;

4) 产品性能优良, 品质优于目前市售同类产品, 并具有盐基度高, 杂质少, 絮凝好等优点, 各项指标均符合水处理剂产品的相关技术指标, 为氯化法钛白废物再利用开辟了一条新的途径, 值得推广应用。

### 3 结论

以氯化法钛白粉生产过程中的废盐酸、氯化尾

气吸收液、氢氧化铝、硫酸亚铁为原料, 采用低温低压直接催化氧化法制备了一系列的聚氯化硫酸铝铁 (PAFCS), 考查制备的聚氯化硫酸铝铁对垃圾渗滤液生化尾水有较好的混凝效果, 结论如下:

1) 本方法制备得到的聚氯化硫酸铝铁为红褐色透明液体, 体积密度 $\geq 1.39 \text{ g/cm}^3$ , 全铁与三氧化二铝 ( $\text{TFe}+\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 的总含量 $\geq 10.5\%$ , 具有优良的净水效果。

2) 与市售聚合硫酸铁相比, 聚氯化硫酸铝铁更适用于 COD 浓度较高的垃圾渗滤液生化尾水的处理, 其中 COD 的去除率达到 68.51%, 优于传统的聚合硫酸铁。

3) 采用本方法将氯化法钛白粉副产物转变为效果优良的复合混凝剂聚氯化硫酸铝铁, 实现了氯化法钛白粉副产物的资源化利用, 具有显著的经济效益和环境效益。

### 参考文献

- [1] Liu Jun. Development status and future of titanium dioxide[J]. *Jiangsu Salt Science & Technology*, 2019, 46(4): 3-4.  
(刘军. 钛白粉发展现状与未来[J]. *现代盐化工*, 2019, 46(4): 3-4.)
- [2] Gupta S M, Tripathi M. A review of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(16): 1639.
- [3] Liu Guangrong, Zhou Gaoming, Liu Xianghai, *et al.* Current situation and prospect of China's titanium dioxide production in 2018[J]. *Ferro-Alloys*, 2019, 50(4): 45-48.  
(刘光蓉, 周高明, 刘祥海, 等. 2018年我国钛白粉生产现状及展望[J]. *铁合金*, 2019, 50(4): 45-48.)
- [4] Bi Sheng. Status and development of titanium dioxide industry in 2019[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(4): 1-3.  
(毕胜. 2019年中国钛白粉工业状况及发展趋势[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(4): 1-3.)
- [5] Ma Yanping, Liu Hongxing, He Benliu, *et al.* Research on production technology of titanium dioxide by chlorination[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2019, 46(6): 94-95, 98.  
(马艳萍, 刘红星, 和奔流, 等. 氯化法钛白粉的生产工艺探究[J]. *云南化工*, 2019, 46(6): 94-95, 98.)
- [6] Huang Songyi. A preliminary analysis of the comprehensive recycling utilization of the chlorination residue in the production of titanium dioxide by chlorination process[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(8): 180-182.  
(黄宋义. 浅谈氯化法钛白粉生产过程产生的氯化渣资源化综合利用[J]. *机电工程技术*, 2019, 48(8): 180-182.)
- [7] Wu Hongji, Qu Shuling. The current status and prospects of titanium dioxide by chlorination process[J]. *China Paint*, 1996, (6): 28-31.  
(吴鸿基, 屈树岭. 我国氯化法钛白的现状和前景[J]. *中国涂料*, 1996, (6): 28-31.)
- [8] ZQUEZ G M J, BOL VAR J P, GARCIA-TENORIO R, *et al.* A review of the production cycle of titanium dioxide pigment[J]. *Materials Sciences and Applications*, 2014, 5(7): 441-458.
- [9] Dong Linhui, Li Yang, Zhou Xuefang, *et al.* Preparation of poly ferric-aluminous-sulphate(PAFS) and its performance in phosphorous removal[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2019, 51(5): 57-60.  
(董林辉, 李杨, 周雪芳, 等. 聚合硫酸铁铝的制备及除磷性能研究[J]. *无机盐工业*, 2019, 51(5): 57-60.)
- [10] Zhang Zhi, Zhang Chao, Li Miao, *et al.* Preparation and stability mechanism of polyaluminum ferric sulfatochloride[J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2015, 31(3): 260-271.  
(张智, 张超, 李森, 等. 聚合硫酸氯化铝铁合成及稳定性机理研究[J]. *离子交换与吸附*, 2015, 31(3): 260-271.)
- [11] Li Mingyu, Pan Qian, Wang Liyan, *et al.* Removal algae with different coagulants from micro-polluted water in Liuxi River[J]. *China Environmental Science*, 2010, (11): 46-51.  
(李明玉, 潘倩, 王丽燕, 等. 不同混凝剂对溪流河水源水中藻类去除的对比[J]. *中国环境科学*, 2010, (11): 46-51.)
- [12] Zhu G, Zheng H, Chen W, *et al.* Preparation of a composite coagulant: Polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS) for wastewater treatment[J]. *Desalination*, 2012, (285): 315-323.