

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.04.014



## 混凝法去除水中 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒

徐楠<sup>a</sup>, 孙文全<sup>a,b</sup>, 孙永军<sup>a,b</sup>, 唐梦丹<sup>a</sup>, 马根朝<sup>a</sup>

(南京工业大学 a. 城市建设学院; b. 环境科学与工程学院, 南京 211800)

**摘要:**为了探讨混凝法去除水中纳米颗粒的可行性及最佳条件,研究了无机混凝剂(PAC、PFS、PAFC)和有机絮凝剂(CPAM、APAM、NPAM)对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的去除效果,并考察了投加量、pH、沉淀时间、水力条件及有机无机复配对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除效率的影响。单独投加 PAC、PFS 和 PAFC 时,三者对应的最高去除率分别为 92.51%、84.43%、95.66%。单独投加 CPAM、APAM、NPAM 时三者对应的去除率仅为 61.72%、29.06%、55.37%。复配最佳混凝条件为:投加 40 mg/LPAC 和 3 mg/LCPAM, pH 值为 9, G 值 143.5/s, 沉淀时间 15 min, 此时, TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率为 99.6%。

**关键词:** 混凝; 混凝剂; 絮凝剂; 纳米颗粒; 沉淀时间

**中图分类号:** X703.5; TU991.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)04-0089-06

## Removal of TiO<sub>2</sub> nanoparticles from water by coagulation

Xu Nan<sup>a,b</sup>, Sun Wenquan<sup>a,b</sup>, Sun Yongjun<sup>a,b</sup>, Tang Mengdan<sup>a</sup>, Ma Genchao<sup>a</sup>

(a. College of Urban Construction; b. College of Environmental Science and Engineering,  
Nanjing Tech University, Nanjing 211800, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the feasibility of removing the nanoparticles (NPs) from water by coagulation, the effects of inorganic coagulants (PAC, PFS, PAFC) and organic flocculants (CPAM, APAM, NPAM) on the removal efficiency of TiO<sub>2</sub> NPs were evaluated. The effects of dosage, pH, sedimentation time, hydraulic conditions and compound flocculants were also investigated. The highest removal rates of PAC, PFS and PAFC were 92.51%, 84.43% and 95.66% while the removal rates of CPAM, APAM and NPAM were only 61.72%, 29.06% and 55.37% respectively. The optimum coagulation dosage were 40 mg/L PAC and 3 mg/L CPAM, while the pH was 9, G value was 143.5/s and the sedimentation time was 15min, and the corresponding removal efficiency of TiO<sub>2</sub> NPs was 99.6%.

**Keywords:** coagulation; coagulant; flocculants; nanoparticles; sedimentation time

**收稿日期:** 2016-11-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(51508268); 江苏省自然科学基金(BK20150951); 中国博士后科学基金(2016M591835)

**作者简介:** 徐楠(1992-), 女, 主要从事絮凝剂研究, (E-mail) xunan9283@163.com.

孙文全(通信作者), 男, 副教授, (E-mail) coneflower@163.com.

**Received:** 2016-11-28

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51508268); Natural Science Foundation of Jiangsu Province in China (No. BK20150951); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2016M591835)

**Author brief:** Xu Nan (1992-), main research interest: research and application of flocculants, (E-mail) xunan9283@163.com.

Sun Wenquan (Corresponding author), associated professor, (E-mail) coneflower@163.com.

随着工业化的发展,工程纳米材料的应用日益增多,水中经常会出现一定量的纳米颗粒,且浓度越来越大<sup>[1]</sup>。据报道,在亚利桑那州污水处理厂的污水中,浓度高达 181~1 233  $\mu\text{g}/\text{L}$ <sup>[2]</sup>。由于钛具有广泛的应用前景,高浓度的  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒可能存在于地表水中,并对生态系统和人类健康造成一定的威胁和伤害<sup>[3-5]</sup>,含纳米颗粒的工业废弃物及工业废水的意外泄露和排放极易导致纳米污染<sup>[6]</sup>,因此,去除水中纳米颗粒方法的研究势在必行。

一些研究已经证实了从水中除去纳米颗粒的可能性<sup>[7-8]</sup>。Wang 等<sup>[9]</sup>研究了离子强度、碱度及天然有机物对纳米颗粒的去除效率。Qian 等<sup>[10]</sup>用  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{FeCl}_3$ 、PAC、PFS 等 4 种混凝剂对 Ag 纳米颗粒进行了混凝去除。但这些方法还存在去除效率不高、去除效果不稳定等不足。混凝法是一种简单高效、易操作、成本低廉的水处理方法。与混凝法去除一般胶体颗粒类似,混凝去除纳米颗粒受混凝剂的种类和投加量、水样 pH 值、原水水质如天然有机物、无机离子、其他颗粒物等因素的影响。混凝法在处理含有大量微纳米级难以依靠自身重力沉降的工业废水时也有至关重要的作用。冀世锋等<sup>[11]</sup>利用混凝法对光伏硅电池有机废水进行预处理,去除水中硅粉及碳化硅粉等悬浮物。煤制气废水中难降解有机物多呈胶体或悬浮状态,且对后续水处理工艺产生严重影响,可能导致膜污染、膜堵塞等问题,因此,对水中的微纳米颗粒进行深度处理是处理煤制气废水的关键所在。高亚楼等<sup>[11]</sup>研究了多种药剂组合及投加量等因素对造气废水的处理效果,结果表明单独使用 SX-P 时,混凝效果优于 PAC 与助凝剂联用。

为此,探究混凝法去除水中的  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒,同时寻找去除  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的最佳混凝条件具有极其重要的意义。论文比较了 3 种类型无机混凝剂的性能,包括 PFS、PAC、PAFC,及其与 CPAM 复配对  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒混凝去除效果。此外,研究了投加量、水样 pH 值、沉淀时间、水力条件对  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒去除效率的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料与仪器

纳米  $\text{TiO}_2$  (金红石型, 40 nm, 纯度 99.8%, 亲水)、聚合硫酸铁 (PFS, 含铁 21.3%)、聚合氯化铝

(PAC, 含铝 29%)、聚合氯化铝铁 (PAFC, 含铁和铝 27%)、阳离子聚丙烯酰胺 (CPAM, 分子量 1 000 万, 阳离子度 21.21%)、阴离子聚丙烯酰胺 (APAM, 分子量 1 000 万, 阴离子度 14.25%)、非离子聚丙烯酰胺 (NPAM, 分子量 1 000 万)。

ZR4-6 型混凝实验搅拌机 (深圳中润水工业技术发展有限公司)、HACH2100Q 型浊度仪、SX721 便携式 pH 计、超声波清洗器 (张家港科净超声洗净设备有限公司)、磁力搅拌器。

### 1.2 实验方法

在 500 mL 的去离子水中加入 15 mg  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒制成 30 mg/L 的  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒悬浮液。虽然,在这项研究中使用的  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的浓度远高于城市污水中的纳米颗粒浓度<sup>[3]</sup>,但符合工业废水中纳米颗粒的浓度。试验中无机混凝剂和有机絮凝剂的投加量均以固体干重计。在快搅之前加入混凝剂,然后,进行 3 min 的快速搅拌和 10 min 的缓慢搅拌,混凝之后静置 15 min,于液面下 2 cm 处取样测定浊度。

由于  $\text{TiO}_2$  溶解性较低,通过测量上清液的浊度对  $\text{TiO}_2$  的浓度进行监测。经过超声后的  $\text{TiO}_2$  颗粒分散性能良好,粒度分布均匀<sup>[12]</sup>。有研究表明<sup>[13]</sup>,悬浮液中  $\text{TiO}_2$  浓度的和其浊度有良好的相关性。因此,确定浊度和  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒浓度的关系式,通过测定浊度来确定上清液中  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的剩余浓度。

$$C = 0.15587 \times T - 1.4133, R^2 = 0.99073 \quad (1)$$

式中:  $C$  为  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的浓度, mg/L;  $T$  为上清液的浊度, NTU。

混凝剂对  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的去除率计算式为

$$R(\text{去除率, \%}) = (1 - C_s/C_i) \times 100 \quad (2)$$

式中:  $C_i$  和  $C_s$  是  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒在悬浮液中的初始浓度和上清液浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 投加量对 $\text{TiO}_2$ 纳米颗粒去除的影响

由图 1 可知, 3 种无机混凝剂对去除  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒均有一定的效果,随着投加量的增加,  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的去除率均是先上升后下降。PAC、PFS、PAFC 的最佳投加量分别为 40、80、60 mg/L 时,三者对应的最佳去除率为 92.51%、85.43%、

95.66%。Wang 等<sup>[9]</sup>的研究中,FeCl<sub>3</sub> 和 PFS 对纳米 TiO<sub>2</sub> 去除率分别为 57% 和 77%,而 PAC 和 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 对其的去除率仅为 40% 左右。虽然,无机混凝剂对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的去除率超过 85%,但烧杯中仍然存在大量矾花,沉降速度较慢。当混凝剂浓度较低时,颗粒之间排斥力较强,颗粒不易团聚及絮凝;随着混凝剂浓度的增加,颗粒间的排斥力减小,出现弱絮凝;继续增加混凝剂的浓度,粒子脱稳而絮凝,此时的去除效果最佳,若浓度继续加大,混凝剂会在颗粒表面形成吸附层,造成位阻效应,阻碍了凝聚。

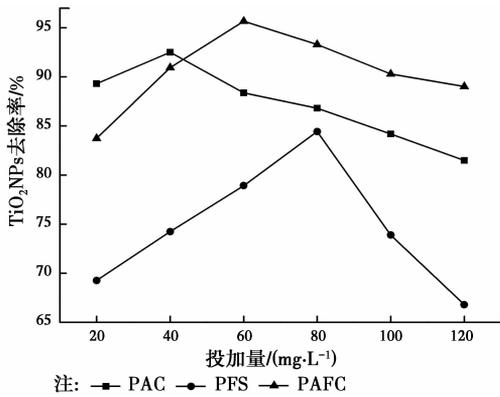


图1 无机混凝剂投加量对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率的影响  
Fig. 1 Effect of inorganic coagulants dosage on the removal of TiO<sub>2</sub> nanoparticles

由图 2 可知,投加 CPAM、APAM、NPAM 三种有机絮凝剂,达到最佳投加量后 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的去除率逐渐降低,且三者去除率的差异较大,其中,CPAM 效果最好,NPAM 效果微弱。CPAM、APAM、NPAM 的最佳投加量分别为 2、3、2 mg/L,对应的最佳去除率为 61.72%、29.06%、55.37%。随着絮凝剂投加量的增加,线性高分子的桥键作用增强,絮体的粒度和沉降速度也随之变大,絮团逐渐变大、牢固稳定,浊度减小,界面变得清晰,说明适当的絮凝剂对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒有很好的包裹、絮凝效果。但当投加量超过最佳投加量后,絮团颗粒虽仍在增大,但絮团粒径继续增大,絮凝速度减小,形成大而松散的结构,体系脱稳,絮凝效果变差,浊度也因此有所增加,过量的絮凝剂吸附在粒子表面,产生的空间位阻使粒子分散,导致絮团的稳定性变差<sup>[14]</sup>。由于 CPAM 具有带正电荷的基团,与带负电荷的 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒发生电荷中和作用,因此,去除效果较好,相反 APAM 具有带负电荷的基团,与

TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒具有一定的静电斥力作用,故混凝效果较差,不易沉降。

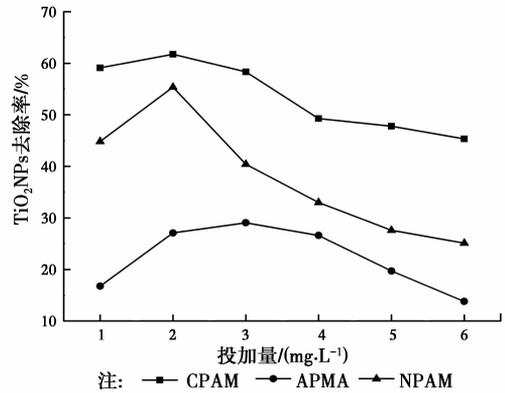


图2 有机絮凝剂投加量对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率的影响  
Fig. 2 Effect of organic flocculants dosage on the removal of TiO<sub>2</sub> nanoparticles

## 2.2 pH 值对絮凝剂去除 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的影响

在 3 种无机混凝剂的最佳投加量下,pH 对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率的影响如图 3 所示,整体来说,pH 值变化对 PAC 去除 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的影响不是很大,对 PFS 和 PAFC 的影响比较明显。此时 PAC、PFS、PAFC 去除纳米颗粒的最佳 pH 条件分别为 7、9、9。王秀衡等<sup>[15]</sup>通过投加 3 mg/L 的 PAC 去除 2 mg/L 的 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒,最佳 pH 为 7,去除率接近 50%。在 pH 为 7 时,TiO<sub>2</sub> 表面带负电<sup>[16]</sup>,PAC 在水中会电离出阳离子,中和了 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的表面负电荷,纳米颗粒更易于团聚成大的絮体颗粒而从水中去除。pH 升高,纳米颗粒表面负电荷增加,颗粒间的斥力作用增加,导致在相同的投加量下,TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒不易被去除;另一方面,Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 在碱性条件下发生水解生成氢氧化物,吸附水中的纳米颗粒,发生凝聚,实现脱稳,去除率在两者共同作用下有微弱下降趋势。

由图 4 可知,不同 pH 条件下,CPAM、APAM、NPAM 三种有机絮凝剂对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的去除效果差异很大,三者对应的最佳 pH 分别为 10、7、10,对应的去除率分别为 94.81%、32.51%、89.41%。由于 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒表面负电荷随着 pH 的增加而增加,在高碱性条件下,CPAM 也带负电<sup>[17]</sup>,故溶液中粒子排斥力占主导,难以絮凝。随着 pH 减小,TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的电位降低,使得溶液中粒子得以相互碰撞,发生絮凝,更易被去除。

单独投加无机混凝剂时,TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒具有较

好的脱稳效果,但由于其小尺寸效应导致其形成的絮体微小,不易沉降,效果较差<sup>[18]</sup>;另一方面,有机絮凝剂具有较好的吸附架桥作用<sup>[19]</sup>。因此,将无机和有机絮凝剂复配能够充分发挥其协同作用,提高混凝效果<sup>[20]</sup>,更好地去除水中的  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒。所以,选择絮凝效果最好的 CPAM 和无机混凝剂进行复配。

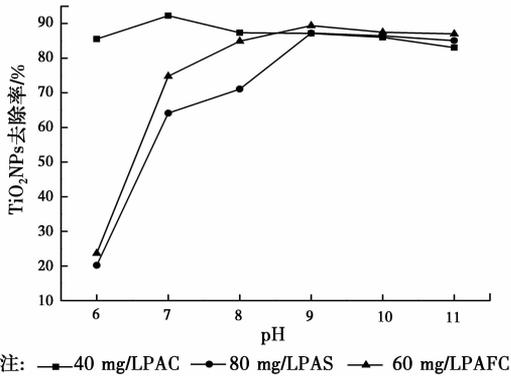


图 3 pH 对无机混凝剂去除  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的影响

Fig. 3 Effect of pH on the removal of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles by inorganic coagulants

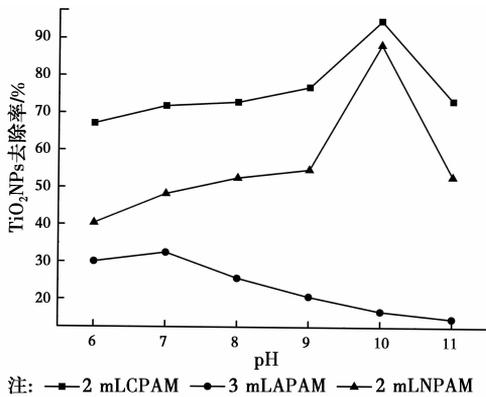


图 4 pH 对有机絮凝剂  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒去除率的影响

Fig. 4 Effect of pH on the removal of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles by organic flocculants

### 2.3 CPAM 投加量对絮凝剂复配去除 $\text{TiO}_2$ 纳米颗粒的影响

由图 5 可知,将 40 mg/L PAC、80 mg/L PFS、60 mg/L PAFC 与 CPAM 进行复配,发现 3 种无机混凝剂和 CPAM 复配对  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的去除率均较高,相对应的 CPAM 的最佳投加量分别为 3、3、4 mg/L,最高去除率分别为 99.49%、99.39%、99.53%。在  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒悬浊液中,纳米  $\text{TiO}_2$  相对分散,粒径很小,很难沉降。自身的电位使得粒子之间存在排斥力,加入无机混凝剂后,降低了其表

面电位,粒子脱稳,并相互靠近发生团聚作用,形成微小絮体。其后,加入 CPAM,通过吸附架桥和表面吸附作用形成较大的絮状物,同时,加速絮凝物的沉降速度,起到澄清水样的作用<sup>[21]</sup>。

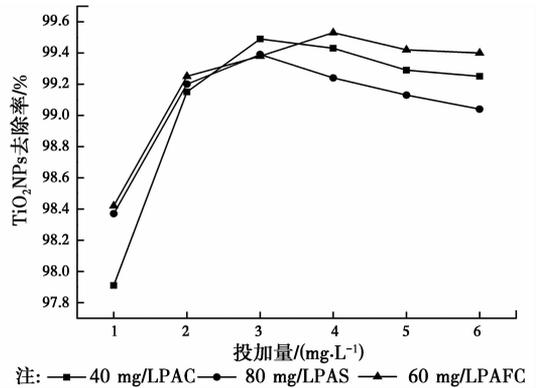


图 5 CPAM 投加量对  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒去除率的影响

Fig. 5 Effect of CPAM dosage on the removal rate of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles

### 2.4 pH 对絮凝剂复配去除 $\text{TiO}_2$ 纳米颗粒的影响

由图 6 可知,无机混凝剂和有机絮凝剂复配之后, $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的去除率有了很大的提升,均能达到 90% 以上,其中,PAC、PAFC 和 CPAM 复配,对  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的去除率高达 99% 以上。当水样为中性或碱性条件时, $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的去除率随着 pH 的增大先增加后减小,但是,变化的范围不大,三者对应的最佳 pH 条件分别为 9、10、9。碱性条件更利于无机混凝剂的水解,因此,去除效果也更佳。

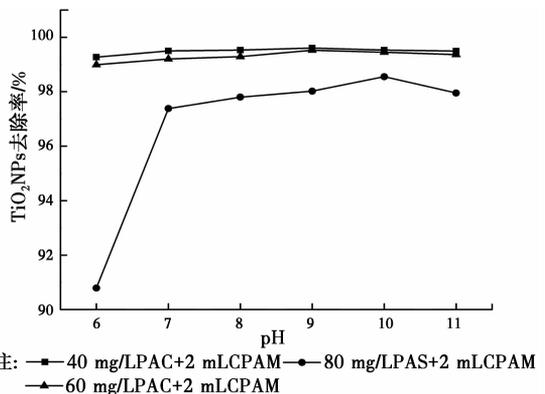


图 6 pH 对絮凝剂复配去除  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的影响

Fig. 6 Effect of pH on the removal of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles by compound flocculants

### 2.5 沉淀时间对去除 $\text{TiO}_2$ 纳米颗粒的影响

图 7 为在各自的最佳 pH 条件(PAC 的 pH 为 9, PFS 的 pH 为 10, PAFC 的 pH 为 9)、最佳投加量

(40 mg/L PAC+3 mg/L CPAM, 80 mg/L PFS+3 mg/L CPAM, 60 mg/L PAFC+4 mg/L CPAM) 下, TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率与沉淀时间之间变化趋势图。由图 7 可知, 不同浓度的 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的去除率与沉淀时间之间的变化趋势有相同的规律。投加不同絮凝剂的水样中, TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的去除率均随着时间的增加而增加, 当沉淀时间大于 15 min 时, 去除率几乎不再增加。王秀衡等<sup>[15]</sup> 用 PAC 去除不同浓度的 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒时, 最佳沉淀时间为 20 min。在水力搅拌的过程中, 加入 CPAM 之后, 水中细小分散的絮体逐渐形成大而密实的絮体, 絮团密实稳定, 停止搅拌之后迅速沉降, 絮凝之后上清液浊度很低, 近乎澄清。较短的沉淀时间不利于大的絮体颗粒的相互作用及沉淀过程。因此, 达不到很好的混凝效果; 但是, 沉淀时间过长, 水体中仍然存在的细小絮体颗粒仍不足以絮凝成大颗粒物沉降下来<sup>[17]</sup>。综上, 最佳的沉淀时间为 15 min。

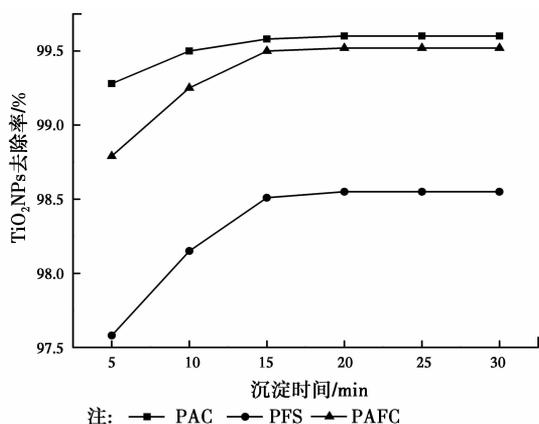


图 7 不同沉淀时间对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率的影响  
Fig. 7 Effect of different sedimentation time on the removal rate of TiO<sub>2</sub> nanoparticles

## 2.6 水力条件对去除 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的影响

在快速搅拌 3 min, 慢速 150 r/min 搅拌 10 min 的水力条件下, 考察快速混合阶段的 G 值对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率的影响。由图 8 可知, TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的去除率随着 G 值的增大先增大后减小, 且三者的变化规律相似, 均在 G 值为 143.5/s 时效果最佳, 相对应的最佳去除率分别为 99.24%、99.16%、99.20%。快速混合时转速过低不能为水环境中的胶体颗粒及大的悬浮物碰撞提供有利的机会, 而较大的 G 值又不利于形成絮体, 可能会造成混凝剂的浪费及较差的混凝效果。

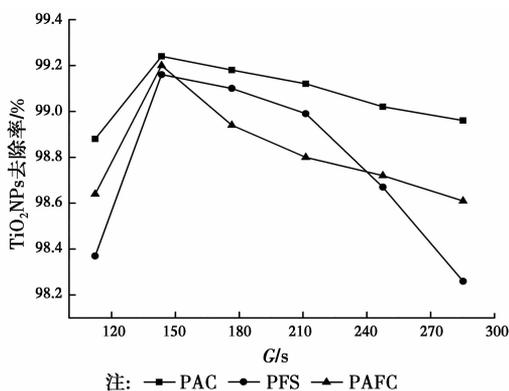


图 8 水力条件对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率的影响  
Fig. 8 Effect of hydraulic conditions on the removal rate of TiO<sub>2</sub> nanoparticles

## 3 结论

对比了不同种类无机混凝剂、有机絮凝剂及其投加量、pH 值、沉淀时间及水力条件对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒去除率的影响。结果表明: 单独投加混凝剂或絮凝剂对 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的去除效果一般, 絮体沉降速度较慢。将 3 种无机混凝剂和 CPAM 进行复配, 去除效果与絮团的密实度和稳定性均有所改善, 去除率大大提高, 其最佳混凝条件为: pH 为 9 的条件下, 向 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒溶液中加入 40 mg/L PAC 和 3 mg/L CPAM 进行水力搅拌, 最优水力条件的 G 值为 143.5/s, 最佳沉淀时间为 15 min, 此时的去除率为 99.6%。

## 参考文献:

- [1] KELLER A A, MCFERRAN S, LAZAREVA A, et al. Global life cycle releases of engineered nanomaterials [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2013, 15(6):1-17.
- [2] WESTERHOFF P, SONG G, HRISTOVSKI K, et al. Occurrence and removal of titanium at full scale wastewater treatment plants: implications for TiO<sub>2</sub> nanomaterials [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2011, 13(5): 1195-1203.
- [3] MILLER R J, BENNETT S, KELLER A A, et al. TiO<sub>2</sub> nanoparticles are phototoxic to marine phytoplankton [J]. Plos One, 2012, 7(1):e30321.
- [4] JOHNSON A C, BOWES M J, CROSSLEY A, et al. An assessment of the fate, behaviour and environmental risk associated with sunscreen TiO<sub>2</sub> nanoparticles in UK field scenarios [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(13):2503-2510.

- [5] MENARD A, DROBNE D, JEMEC A. Ecotoxicity of nanosized  $\text{TiO}_2$ . Review of in vivo data [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(3):677-684.
- [6] SCOWN T M, VAN A R, TYLER C R. Review: do engineered nanoparticles pose a significant threat to the aquatic environment [J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2010, 40(7):653-670.
- [7] CHANG M R, LEE D J, LAI J Y. Nanoparticles in wastewater from a science-based industrial park-Coagulation using polyaluminum chloride [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(4):1009-1014.
- [8] LIU Y, TOURBIN M, LACHAIZE S, et al. Silica nanoparticle separation from water by aggregation with  $\text{AlCl}_3$  [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 51(4):1853-1863.
- [9] WANG H T, YE Y Y, QI J, et al. Removal of titanium dioxide nanoparticles by coagulation: effects of coagulants, typical ions, alkalinity and natural organic matters [J]. *Water Science & Technology*, 2013, 68(5):1137-43.
- [10] QIAN S, YAN L, TANG T, et al. Removal of silver nanoparticles by coagulation processes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261C(20):414-420.
- [11] 冀世锋, 邢云青, 高春梅, 等. MBR 用于光伏硅电池有机废水处理及回用 [J]. *中国给水排水*, 2013, 29(4):75-79.
- JI S F, XING Y Q, GAO C M, et al. Application of MBR to treatment and reuse of organic wastewater from photovoltaic cell industry [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4):75-79. (in Chinese)
- [12] 牟晓英, 崔福义, 杨晓楠. 水环境里纳米二氧化钛的表征及其零电位点的研究 [J]. *纳米科技*, 2011(1):43-45.
- MU X Y, CUN F Y, YANG X N. Characterization of aqueous nano-sized titanium dioxide and research on their isoelectric points [J]. *Nanoscience & Nanotechnology*, 2011(1):43-45. (in Chinese)
- [13] WANG H, QI J, KELLER A A, et al. Effects of pH, ionic strength and humic acid on the removal of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles from aqueous phase by coagulation [J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2014, 450(19):161-165.
- [14] QI J, YE Y Y, WU J J, et al. Dispersion and stability of titanium dioxide nanoparticles in aqueous suspension: effects of ultrasonication and concentration [J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(1):147-51.
- [15] 王秀蕻, 龚小娟, 尤世界. 水环境中不同浓度  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒混凝工艺去除效果 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(2):38-43.
- WANG X H, GONG X J, YOU S J. Removal of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles in water environment by coagulation process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(2):38-43. (in Chinese)
- [16] 吴其圣, 杨琛, 胡秀敏, 等. 环境因素对纳米二氧化钛颗粒在水体中沉降性能的影响 [J]. *环境科学学报*, 2012, 32(7):1596-1603.
- WU Q S, YANG C, HU X M, et al. Influences of environmental factors on aggregation of titanium dioxide nanoparticles [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(7):1596-1603. (in Chinese)
- [17] 王芬, 吴敏, 秦艳涛, 等.  $\text{TiO}_2$  纳米酶絮凝动力学 [J]. *化学学报*, 2012, 70(21):2226-2231.
- WANG F, WU M, QIN Y T, et al. Flocculation kinetics of  $\text{TiO}_2$ -enzyme microflocules [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2012, 70(21):2226-2231. (in Chinese)
- [18] ZHENG H, SUN Y, ZHU C, et al. UV-initiated polymerization of hydrophobically associating cationic flocculants: Synthesis, characterization, and dewatering properties [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 234(11):318-326.
- [19] 潘世英, 万吉昌, 高宝玉, 等. 混凝实验条件下混凝剂最佳投加量的选择方法研究 [J]. *工业水处理*, 2011, 31(10):25-27.
- PAN S Y, WAN J C, GAO B Y, et al. Studies on the determination of optimum dosage of coagulant under different coagulation experimental conditions [J]. *Industrial Water Treatment*, 2011, 31(10):25-27. (in Chinese)
- [20] 朱艳彬, 马放, 杨基先, 等. 絮凝剂复配与复合型絮凝剂研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(8):1254-1258.
- ZHU Y B, FANG M A, YANG J X, et al. Combination effect of flocculants for water treatment and development of compound flocculants [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(8):1254-1258. (in Chinese)
- [21] 孙永军, 任梦娇, 徐炎华, 等. 光聚合壳聚糖基絮凝剂及其絮凝性能 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(3):58-64.
- SUN Y J, REN M J, XU Y H, et al. UV induced synthesis of chitosan flocculants and its flocculation Performance [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(3):58-64. (in Chinese)