

黄皓, 熊顺华, 汪勇, 等. 微砂加载絮凝工艺深度除磷试验[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 101–108, 167.

HUANG H, XIONG S H, WANG Y, et al. Experiment of advanced phosphorus removal by microsand loaded flocculation process[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 101–108, 167.

微砂加载絮凝工艺深度除磷试验

黄皓¹, 熊顺华¹, 汪勇^{1,*}, 赵泉发², 武海霞^{3,*}

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010; 2. 中建八局文旅博览投资发展有限公司, 江苏南京 211100; 3. 南京工业大学城市建设学院, 江苏南京 211816)

摘要 【目的】为减少混凝除磷过程中混凝剂和助凝剂的投加量,进而减少混凝污泥产生量,进行了微砂加载絮凝深度除磷试验研究。【方法】探讨不同混凝剂的种类和浓度、阴离子型聚丙烯酰胺(PAM)、微砂粒径、微砂投加量和沉淀时间对去除总磷(TP)的影响,通过正交试验来判断不同因素对TP去除的影响程度。【结果】在相同的混凝剂浓度下,聚合硫酸铁(PFS)对TP的去除效果高于聚合氯化铝(PAC)和三氯化铁(FeCl_3),PFS的浓度越大TP的去除率越高。TP的去除率随着PAM浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势。投加微砂的粒径越小,TP的去除率越高。当沉淀时间小于40 min时,TP的去除率随着沉淀时间的增加而增加。PFS质量浓度为40 mg/L, PAM质量浓度为1.5 mg/L,微砂粒径为50 μm ,微砂投加量为4.0 g/L,沉淀时间为40 min时,TP的去除率可达81.46%,TP质量浓度从0.5 mg/L降至0.093 mg/L。正交试验结果显示,各因素对TP去除的影响程度由高到低为:PFS浓度>微砂投加量>PAM浓度>沉淀时间。以PFS为混凝剂和PAM为絮凝剂形成的絮体粒径较小,在絮凝体系中加入微砂可以形成更有利于沉降的大粒径絮体,提高了TP的去除率。【结论】相比于传统的混凝除磷工艺,微砂的加入减少了混凝剂的投加量并有效提高TP的处理效率,能降低经济成本,为工程应用提供理论基础。

关键词 聚合硫酸铁 微砂 总磷 正交试验 絮体粒径

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0101-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.013

Experiment of Advanced Phosphorus Removal by Microsand Loaded Flocculation Process

HUANG Hao¹, XIONG Shunhua¹, WANG Yong^{1,*}, ZHAO Quanfa², WU Haixia^{3,*}

(1. Central and Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. China Construction Eighth Bureau Cultural Tourism Expo Investment Development Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

3. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract [Objective] To reduce the dosage of coagulants and coagulants in coagulation, thereby reducing the production of coagulation sludge, a microsand loading flocculation experiment was conducted. [Methods] Based on the research findings from multiple studies, the effects of coagulant types and concentrations, anionic polyacrylamide (PAM), microsand particle size, microsand dosage, and sedimentation time on Total Phosphorus (TP) removal are systematically analyzed below, along with orthogonal test result evaluating the influence hierarchy of these factors. [Results] Under the same coagulant concentration, the removal effect of polymeric ferric sulfate (PFS) on TP was due to polymeric aluminum chloride (PAC) and ferric trichloride (FeCl_3); the higher the concentration of PFS, the higher the removal rate of TP. The removal of TP showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of PAM concentration. The smaller the particle size of the added microsand, the higher the removal of TP. When the precipitation time was less than 40 minutes, the removal of TP increased with the increase in precipitation time. When PFS was 40 mg/L, PAM was 1.5 mg/L, the particle size of microsand was 50 μm , the amount of microsand dosage was 4.0 g/L, and the

[收稿日期] 2024-09-11

[基金项目] 中国市政工程中南设计研究总院有限公司科研项目: 含光伏废水的污水处理厂执行地表准三标准的工艺路线研究

[作者简介] 黄皓(1983—),男,高级工程师,研究方向为市政工程设计及运行,E-mail: 675814405@qq.com。

[通信作者] 汪勇(1979—),男,正高级工程师,研究方向为市政工程设计及运行,E-mail: 65942637@qq.com。

武海霞(1980—),女,研究方向为水处理高级氧化技术、工业废水深度处理,E-mail: vividhaixia@163.com。

sedimentation time was 40 min, the removal of TP could reach 81.46%, and the TP concentration decreased from 0.5 mg/L to 0.093 mg/L. From the result of orthogonal experiments, the influence of each experimental factor on TP removal from high to low was PFS concentration, microsand dosage, PAM concentration, and sedimentation time. The flocs formed by PFS and PAM as coagulants had smaller particle sizes than the flocs adding micro sands, larger flocs were more conducive to sedimentation and could improve the removal of TP. [**Conclusion**] The study reduces the dosage of coagulant by adding microsand, effectively improves the TP treatment efficiency and reduces the economic cost, which provides a theoretical basis for engineering application.

Keywords polymeric ferrous sulfate (PFS) microsand total phosphorus (TP) orthogonal experiment floc particle size

随着人口增长和城市化进程加速,大量含磷污水被排放到自然水体中^[1]。生活污水中的磷主要来源于洗涤剂、肥皂、洗发水、洗衣粉等生活用品^[2],此外,人类粪便和尿液也是生活污水中磷的来源之一^[3]。磷的过量排放会产生富营养化现象,对水环境和生态系统造成严重影响^[4-6]。因此,寻找高效可行的技术来去除生活污水中的磷是当前亟待解决的环境问题之一。

工程上常用的除磷方法有生物法^[7]、吸附法^[8]和混凝法^[9]。生物除磷工艺是城市污水处理厂中应用最广泛的技术^[10],尽管生物除磷经济有效,但处理效果易受水质、水温等条件的影响。吸附法利用吸附剂的多孔结构和大比表面积来除磷^[11],具有成本较低、工艺简单、适用范围广等优点,但吸附容量有限并易受 pH 的影响,存在活性炭回收和再生的工业应用问题^[12-13]。混凝法是向废水中投加铝盐、铁盐和钙盐等絮凝剂,使金属离子与磷酸根离子络合生成不溶于水的金属磷酸盐,然后通过沉淀来除磷^[14]。混凝除磷工艺是常用的深度除磷方法,流程简单可靠、去除效率高。混凝法需要投加化学品,除增加运营成本外,污泥可能存在二次污染风险^[15-17],可考虑与其他技术结合使用。

加载絮凝技术是一种快速絮凝沉淀工艺,在混凝过程中通过加载核(如石英砂、磁铁矿砂、无烟煤、再生玻璃等)加快絮凝体的形成,并增加了絮凝体密度使得絮体快速沉降^[18]。微砂加载絮凝以微砂作为载体介质^[19],絮凝过程中可以促进更大尺寸的絮凝体形成,能有效地增强絮体的沉降性能;此外,微砂的表面电荷密度较低,不会破坏混凝剂/絮凝剂与胶体颗粒之间的相互作用^[20-21]。微砂加载絮凝具有占地面积小、混凝剂和絮凝剂投加量少、沉降速率高等优点。

本研究采用微砂加载混凝技术对污水进行深度除磷,探讨不同混凝剂的种类、混凝剂浓度、阴离子

型聚丙烯酰胺(PAM)、微砂粒径、微砂投加量和沉淀时间对去除总磷(TP)的影响。最后通过正交试验来判断不同因素对 TP 去除的影响程度,为污水处理厂的实际应用提供理论参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验试剂

聚合硫酸铁(PFS)、聚合氯化铝(PAC)、三氯化铁(FeCl_3)、邻苯二甲酸氢钾和酒石酸锑氧钾均购自国药集团化学试剂有限公司;阴离子型 PAM、钼酸铵、抗坏血酸、氢氧化钠和微砂(石英砂)均购自上海麦克林生化科技股份有限公司;硫酸购自上海凌峰化学试剂有限公司。所有化学品均为分析纯以上。

试验用水来自人工配制的模拟生活污水,原水 TP 质量浓度为 0.5 mg/L, pH 值为 6.5~7.5,水温为 18~20 °C。

1.2 试验仪器

主要试验仪器包括:紫外可见分光光度计(UV-5500,上海元析仪器有限公司)、磁力搅拌器(EMS-4A,上海汗诺仪器有限公司)、电子分析天平(AX224ZH,奥豪斯仪器有限公司)和 pH 计(pHS-3C,上海雷磁创益仪器仪表有限公司)等。

1.3 试验及分析方法

1.3.1 单因素试验

取 200 mL 水样放入烧杯中,将配制好的 PAC、PFS 和 FeCl_3 溶液分别以不同浓度梯度投加到烧杯中。烧杯置于磁力搅拌器上,以 300 r/min 的转速快速搅拌 2 min,期间加入不同浓度的 PAM,然后以 170 r/min 的转速中速搅拌 3 min,最后以 100 r/min 的转速慢速搅拌 5 min。反应后静置沉淀 30 min,取上清液面下 2 cm 处的水样检测 TP 浓度。通过调整不同絮凝剂浓度、PAM 浓度、微砂粒径、微砂投加量和沉淀时间等条件,采取控制变量法研究不同反应条件对废水 TP 去除效果的影响。

1.3.2 正交试验

本试验在单因素静态试验条件下,以 TP 去除率为评价指标,按 L_9 做正交试验,选取混凝剂浓度、微砂浓度、PAM 浓度以及沉淀时间 4 个因素,每个因素选取 3 个水平值,如表 1 所示。

表 1 加砂混凝正交试验因素水平
Tab. 1 Factor Level of Orthogonal Experiment by Sand Addition Coagulation

水平	PFS 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	PAM 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	微砂投加量/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	沉淀时 间/min
1	20	1.0	2	30
2	40	1.5	3	40
3	60	2.0	4	50

取 9 组 200 mL 水样分别置于烧杯中,先投加混凝剂进行反应,反应参数同单因素试验,静置沉淀不同时间后,取上清液面下 2 cm 处的水样检测 TP 浓度,以 TP 去除率进行正交分析,得出 4 个因素对 TP 去除效果的影响。

1.3.3 分析方法

TP 浓度根据《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)测得。TP 的去除率计算如式(1)。

$$\eta = \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

其中: η ——TP 去除率;

C_0 ——TP 的初始质量浓度,mg/L;

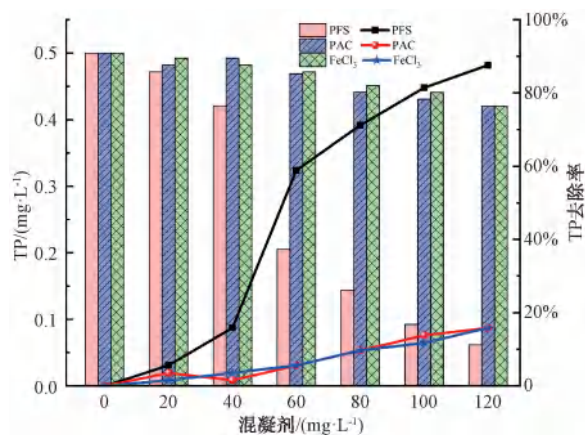
C ——混凝沉淀结束后溶液中 TP 的质量浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 不同混凝剂对 TP 去除效果的影响

不同的混凝剂所包含的有效成分不同,对 TP 的去除效果也不尽相同。本试验对比了 PFS、PAC 和 FeCl_3 的除磷效果,投加质量浓度分别为 20、40、60、80、100、120 mg/L,试验结果如图 1 所示。由图 1 可知,随着 PFS、PAC 和 FeCl_3 的浓度增加,溶液中 TP 的浓度逐渐降低。混凝剂投加量为 20~120 mg/L 时,PFS 对 TP 的去除效果较好,而 PAC 和 FeCl_3 对 TP 的去除效果较差;当 PFS、PAC 和 FeCl_3 的质量浓度都为 120 mg/L 时,TP 的去除率分别为 87.61%、15.89%和 15.89%。从 TP 去除率的增长趋势来看,PFS 的增长最快,且 PFS 仅需要 40 mg/L

的投加量便能达到 PAC 和 FeCl_3 的 120 mg/L 时同样的除磷效果。



注:沉淀时间=30 min。

图 1 不同混凝剂种类及浓度对 TP 去除的影响
Fig. 1 Effect of Different Coagulant Types and Concentrations on TP Removal

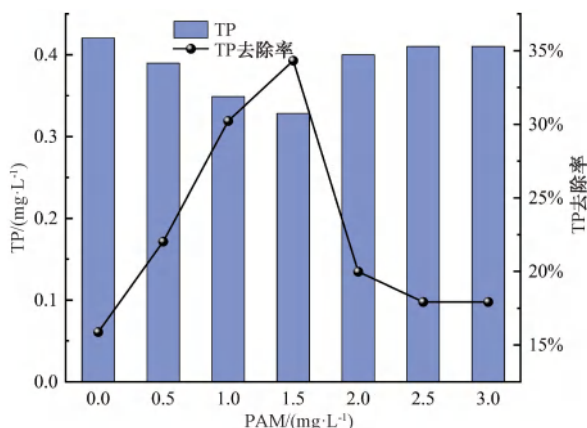
PAC 中的 Al^{3+} 是其有效成分,能够与带负电荷的胶体颗粒电中和,导致胶体脱稳并生成絮体;PAC 也可以在溶液中进行水解反应生成具有架桥作用的氧化物,吸附溶液中的胶体形成大絮体团并沉淀,从而去除废水中磷等污染物^[22-23]。 FeCl_3 中的 Fe^{3+} 会与磷酸盐反应生成难溶的磷酸盐沉淀,且 Fe^{3+} 还会发生水解反应生成复杂的羟基氧化铁,通过吸附电中和除磷。但本试验中投加 PAC 和 FeCl_3 对 TP 的去除作用较低,可能是无机盐离子降低了胶体颗粒的表面活性,导致胶体失稳,同时使胶体的吸附架桥能力减弱不利于絮凝沉淀。

PFS 是一种无机高分子絮凝剂,具有长分子链和丰富的阳离子官能团,可以为吸附磷酸根提供足够的吸附位点。PFS 通过络合反应和吸附电中和反应,形成密度大且沉降性能好的矾花来除磷^[24], Fe^{3+} 与磷酸根发生反应生成磷酸铁沉淀^[1,25]。此外,PFS 水解产生大量高电荷、高聚合度的铁多核络合离子或金属氧化物凝胶,可通过吸附、桥接和网捕卷扫作用,进一步提高 TP 的处理效果^[11]。PFS 的投加量越大,TP 的去除效果越好,但会产生较大的色度影响出水感官,为了减少后续出水的色度,本研究选用 40 mg/L 的 PFS 作为后续试验混凝剂的投加量,并通过投加微砂来提高 TP 的去除率。

2.2 PAM 对 TP 去除效果的影响

絮凝剂主要是对加载物质和预絮体进行吸附—

架桥作用,从而沉降能力更好的絮体。本试验选用 PAM 作为絮凝剂,投加量为 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mg/L 和 3.0 mg/L,探究其对 TP 去除效果的影响,试验结果如图 2 所示。TP 的去除率随着 PAM 浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势,PAM 质量浓度为 1.5 mg/L 时 TP 的去除率最高,达到 34.33%。



注:沉淀时间=30 min,PFS 质量浓度=40 mg/L。

图 2 不同 PAM 浓度对 TP 去除的影响

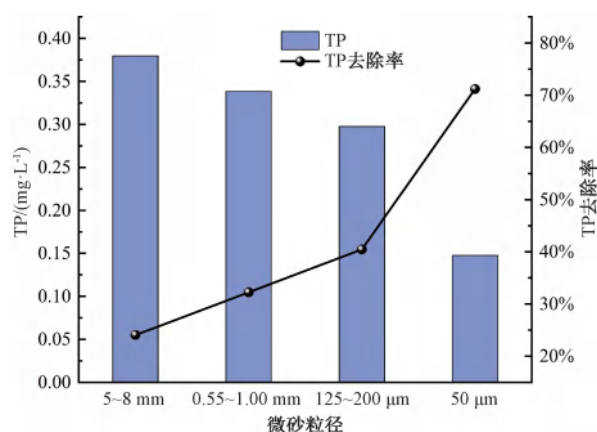
Fig. 2 Effect of Different PAM Concentrations on TP Removal

PAM 作为一种高分子絮凝剂,主要通过吸附架桥和吸附电中和作用来去除溶液中的悬浮物。当 PAM 质量浓度为 0.5 mg/L 时,TP 的去除率仅为 22.03%,说明 PAM 的浓度较低时,无法与溶液中的絮体充分接触导致吸附架桥作用减弱。当 PAM 的浓度进一步加大,会使高分子絮凝剂的长链结构以及官能团的数量增加,加强了吸附架桥和电中和作用,使得产生的絮体密度更大、沉降性能更好^[1]。当 PAM 质量浓度超过 1.5 mg/L 时,TP 的去除率开始下降,这可能是胶体表面覆盖了过多的 PAM,造成胶体受到排斥作用不能形成大絮体^[26]。此外,过量的 PAM 会使胶体重新分散,使得磷酸盐重新释放到废水中,因此 TP 去除率下降。综上所述,PAM 的质量浓度选择 1.5 mg/L。

2.3 微砂粒径对 TP 去除效果的影响

微砂粒径的大小能够影响絮体的形成,对絮凝效果产生影响。本试验选取了 5~8、0.55~1.00 mm 和 125~200、50 μm 4 种不同粒径的微砂,探究其对 TP 去除率的影响,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,投加微砂的粒径越小,TP 的去除



注:沉淀时间=30 min,PFS 质量浓度=40 mg/L,PAM 质量浓度=1.5 mg/L,微砂投加量=3 g/L。

图 3 不同微砂粒径对 TP 去除的影响

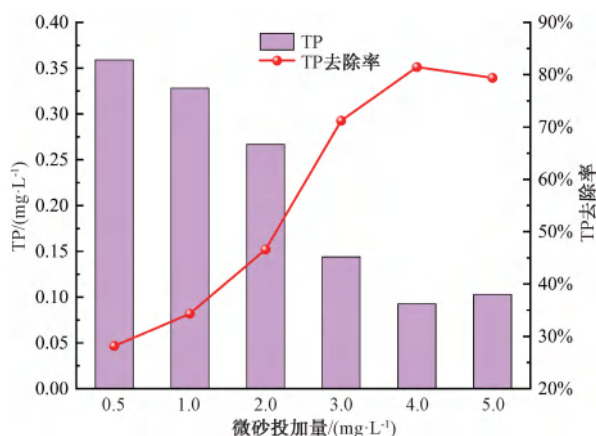
Fig. 3 Effect of Different Microsand Particle Sizes on TP Removal

率越高。当微砂的粒径为 5~8 mm 时,反应后 TP 的质量浓度和去除率分别为 0.38 mg/L 和 24.08%;当微砂的粒径为 50 μm 时,TP 的质量浓度和去除率分别为 0.15 mg/L 和 71.23%。这是因为微砂的粒径越大,其比表面积越大,对水中胶粒的吸附作用减弱,且微砂的粒径越大导致其重量越大,沉降速度也越快,当处在慢速搅拌时,较大粒径的微砂还未能和 PAM 及小絮体作用就先沉到底部,不利于絮体形成^[27]。此外,较大粒径的微砂无法充当晶核使絮体不能包裹微砂容易导致絮体解体。相反地,微砂的粒径越小其比表面积越大,同样重量的微砂所含的微粒数目越多,微砂和絮体间的有效碰撞次数增加,有利于絮体的形成^[27]。研究^[28]表明,当微砂的粒径过小产生的惯性剪切力越大容易打碎絮体使去除效果降低。综上所述,微砂的粒径选择 50 μm 较合适。由图 2 和图 3 可知,最佳条件下,投加微砂后 TP 去除率比未投加(最高去除率为 34.33%)时提高了 36.9%,说明投加微砂会使絮凝体颗粒粒径增大、絮体密度增加,去除效果更好。将加砂和未加砂的溶液混凝反应后置于量筒中沉淀,测量沉淀物与溶液液面的距离。沉淀 10 min 时,加砂和未加砂的沉淀物分别下降了 5 cm 和 3 cm;沉淀 20 min 时,则分别下降了 4.8 cm 和 1.6 cm;沉淀 30 min 时,则分别下降了 1.7 cm 和 1.4 cm。可以看出,微砂的投加加快了絮体的沉降速率。

2.4 微砂投加量对 TP 去除效果的影响

不同微砂投加量对 TP 去除效果的影响如图 4

所示。由图 4 可知,TP 的去除率随着微砂投加量的增加呈现出先升高后降低的趋势,说明微砂的投加量存在一个适宜的区间,并非越多越好。当微砂投加量为 4.0 g/L 时,TP 的去除率最高达到 81.46%,此时 TP 质量浓度为 0.093 mg/L。投加的微砂可作为絮凝反应的晶核来强化絮体的形成,通过吸附架桥作用使微砂和絮体聚合,增加絮体的体积利于沉降^[29]。当微砂的投加量较少时,形成的载体数量较少不能形成较大体积的絮体,微砂强化絮凝的作用被削弱,所以当微砂的投加量为 0.5 g/L 时,TP 的去除率仅有 21.18%。进一步增加微砂的投加量,载体数量也随之增加,产生更为密集的矾花并形成较大体积的絮体,增加了沉淀速度从而使得 TP 的去除率增加。当微砂投加过量时,会与絮体发生碰撞或剪切作用将其打碎成微小的絮体影响处理效果^[26]。综上所述,本研究微砂的适宜投加量为 4.0 g/L。



注:沉淀时间=30 min,PFS 质量浓度=40 mg/L,PAM 质量浓度=1.5 mg/L,微砂粒径=50 μm。

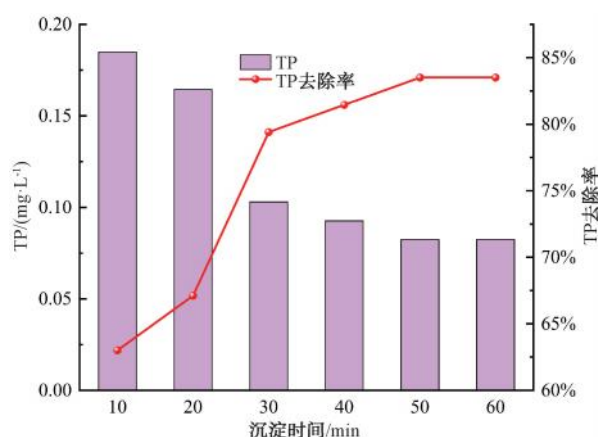
图 4 不同微砂投加量对 TP 去除的影响

Fig. 4 Effect of Different Microsand Dosages on TP Removal

2.5 沉淀时间对 TP 去除效果的影响

沉淀时间对 TP 去除效果的影响如图 5 所示。由图 5 可知,当沉淀时间小于 40 min 时,TP 的去除率随着沉淀时间的增加而增加;当沉淀时间大于 40 min 时,TP 的去除率随着沉淀时间的增加而趋于平缓。40 min 时 TP 的去除率为 81.46%,TP 质量浓度为 0.093 mg/L;继续增加沉淀时间至 50 min,去除率为 83.51%,仅比前者增加了 2.05%,结合经济因素考虑,选择沉淀时间为 40 min。

沉淀时间过短,不利于混凝剂与磷酸盐混合反



注:PFS 质量浓度=40 mg/L,PAM 质量浓度=1.5 mg/L,微砂粒径=50 μm,微砂投加量=4.0 g/L。

图 5 不同沉淀时间对 TP 去除的影响

Fig. 5 Effect of Different Sedimentation Time on TP Removal

应后微小絮体的生长聚集。此外,絮体克服重力沉降的过程需要一定时间,时间太短,絮体颗粒无法完全完成沉降过程,造成去除效果不明显。一定程度上延长沉淀时间,有利于微絮体之间的碰撞聚集,生长成大的絮体颗粒,提高处理效果。但沉淀时间过长时,不仅不能提高去除效果,还可能导致已经沉淀的絮体颗粒由于絮体之间的相互作用又重新进入溶液中,造成处理效果变差。因此,需要选择合适的沉淀时间,防止过长的沉淀时间不仅没有提高去除效果,还增加了运行成本。

2.6 正交试验

为进一步确定 PFS 浓度、微砂浓度、PAM 浓度以及沉淀时间 4 个因素的影响,将每个因素选取 3 个水平值做 L₉ 正交试验表,结果如表 2 所示。

由正交表的结果可知,PFS 浓度、PAM 浓度、微砂投加量和沉淀时间的极差(R)分别为 20.49、14.34、19.81 和 2.73。由此可知,各试验因素对 TP 去除的影响程度:PFS 浓度>微砂投加量>PAM 浓度>沉淀时间。当 PFS 质量浓度为 60 mg/L,PAM 质量浓度为 1 mg/L,微砂投加量为 4 g/L,沉淀时间为 40 min 时,TP 去除率最好,达到 83.51%。

2.7 絮体粒径分析

为了探究在絮凝体系中加入微砂的作用,对絮凝和微砂加载絮凝产生的絮体粒径进行分析。如图 6(a)所示,以 PFS 为混凝剂和 PAM 为絮凝剂形成的絮体粒径较小,10~60 μm 的絮体粒径占总体积

表 2 正交试验结果
Tab. 2 Results of Orthogonal Experiments

项目	PFS 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	PAM 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	微砂投加量/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	沉淀时间/min	TP 去除率
1	20	1	2	30	40.48%
2	40	1.5	2	40	58.92%
3	60	2	2	50	77.36%
4	60	1.5	3	30	81.46%
5	20	2	3	40	69.17%
6	40	1	3	50	60.97%
7	40	2	4	30	81.46%
8	60	1	4	40	83.51%
9	20	1.5	4	50	71.22%
均值 1	60.29	61.65	58.92	67.80	—
均值 2	67.12	69.17	70.53	70.53	—
均值 3	80.78	76.00	78.73	69.85	—
R	20.49	14.34	19.81	2.73	—

密度的 64.05%,形成的絮体粒径为 $21\text{ }\mu\text{m}$ 时的体积密度占总体积密度的 6.61%,体积分布中 50% 所对应粒度 $[D_{V(50)}]$ 为 $16.75\text{ }\mu\text{m}$ 。由图 6(b) 可知,在 PFS 和 PAM 形成的絮凝体系中加入微砂后产生的絮体粒径较大。 $30\sim 450\text{ }\mu\text{m}$ 的絮体粒径占总体积密度的 60.41%,形成的絮体粒径为 $110\text{ }\mu\text{m}$ 时的体积密度占总体积密度的 4.18%, $D_{V(50)}$ 为 $163.14\text{ }\mu\text{m}$ 。

在含磷废水中加入 PFS,在搅拌的作用下会快速混合并发生脱稳形成胶体颗粒。在絮凝体系中加入的微砂除了可以吸附水中的悬浮颗粒和微小颗粒

外,还为脱稳的胶体颗粒提供附着点和结合点而充当晶核或骨架作用,絮体向微砂聚集和生长,进而聚集形成较大体积的絮体。混合速率快时,微砂通过撞击脱稳后的微絮体并进入絮体内,混合速率慢时,这些絮体会继续聚集^[30]。总体而言,加砂混凝能形成大颗粒絮体,并且絮体比重增加,更有利于沉降,微砂强化混凝除磷的机理如图 7 所示。因此在絮凝体系中加入微砂可以形成大粒径的絮体并提高 TP 的去除率。在实际工程应用中,含有微砂的沉淀污泥可通过砂水分离(如水力旋流器)后将微砂重复使用^[31]。

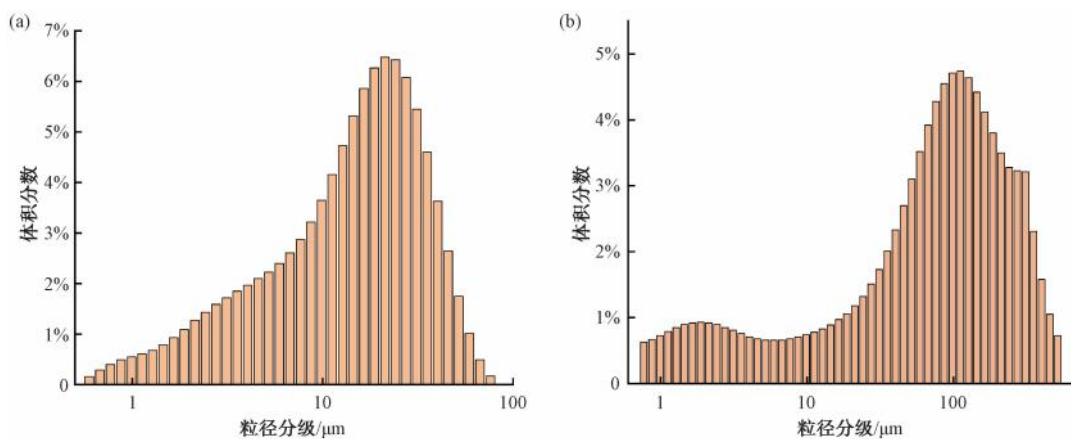


图 6 (a) 混凝沉淀; (b) 加砂混凝沉淀形成的絮体粒径

Fig. 6 (a) Coagulation and Sedimentation; (b) Particle Sizes of Floes Formed by Sand Addition Coagulation Sedimentation

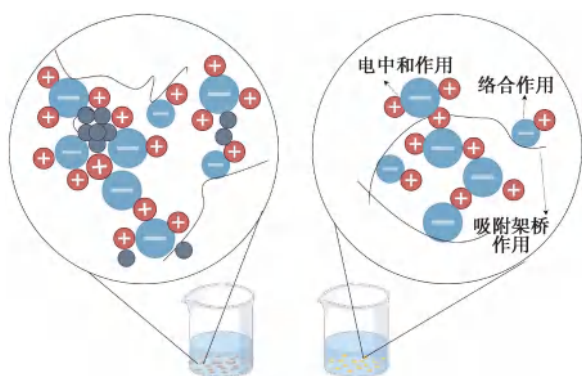


图 7 微砂强化混凝除磷机理

Fig. 7 Mechanism of Phosphorus Removal by Microsand Enhanced Coagulation

3 结论

本研究采用微砂加载絮凝工艺对生活污水中的 TP 进行深度去除,首先对 PFS、PAC 和 FeCl_3 3 种混凝剂进行比选,并探究了不同的试验条件对 TP 去除效果的影响并得到如下结论。

(1) 混凝剂的浓度越大对 TP 的去除率越高,在相同的投加量下,PFS 对 TP 的去除率远高于 PAC 和 FeCl_3 的去除率。当 PFS 的质量浓度为 120 mg/L,TP 的质量浓度可以降到 0.1 mg/L 以下,为了避免 PFS 浓度过大引起的色度问题,选择 PFS 的质量浓度为 40 mg/L。

(2) 当絮凝剂 PAM 质量浓度为 1.5 mg/L 时可以有效提高 TP 的去除率。微砂的粒径过大和过小都不利于 TP 的去除,较大粒径的微砂无法充当晶核使絮体不能包裹微砂容易导致絮体解体。当微砂的粒径过小产生的惯性剪切力越大容易打碎絮体使去除效果降低,微砂的粒径选择 50 μm 较合适。TP 的去除率随着微砂投加量的增加先升高后降低,过量的微砂会与絮体发生碰撞或剪切作用将其打碎成微小的絮体影响处理效果,当微砂投加量为 4 g/L 对 TP 有较好的去除率。从 TP 的去除效果和经济因素考虑沉淀时间选择 40 min 较合适。

(3) 通过正交试验得出当 PFS 质量浓度为 60 mg/L,PAM 质量浓度为 1 mg/L,微砂投加量为 4 g/L,沉淀时间为 40 min 时,TP 有较好的去除率,达到 83.51%。

(4) 通过对形成的絮体粒径进行分析发现加入微砂可以形成粒径较大的絮体,其 $D_{V(50)}$ 为 163.14 μm 。

参考文献

- [1] 蔡吉祥, 翟露露, 薛江鹏, 等. 聚合硫酸铁对某纺织服装城废水除磷效果的影响[J]. 轻纺工业与技术, 2020, 49(7): 17-18, 30.
CAI J X, ZHAO L L, XUE J P, et al. Influence of polymerized ferric sulfate on phosphorus removal effect of wastewater in a textile and garment city [J]. Light Textile Industry and Technology, 2020, 49(7): 17-18, 30.
- [2] KOBAYASHI M, OMWENE P I, SARABI S M, et al. Phosphorous removal from anaerobically digested municipal sludge centrate by an electrocoagulation reactor using metal (Al, Fe and Al-Fe) scrap anodes[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 152: 188-200. DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.003.
- [3] XIA W J, XU L Z J, YU L Q, et al. Conversion of municipal wastewater-derived waste to an adsorbent for phosphorus recovery from secondary effluent[J]. Science of the Total Environment, 2020, 705: 135959. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135959.
- [4] HASHIM K S, AL KHADDAR R, JASIM N, et al. Electrocoagulation as a green technology for phosphate removal from river water[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 210: 135-144. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.07.056.
- [5] CAPUA D, SARIO S D, FERRARO A, et al. Phosphorous removal and recovery from urban wastewater: Current practices and new directions[J]. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153750.
- [6] HUSER B J, FUTTER M, LEE J T, et al. In-lake measures for phosphorus control: The most feasible and cost-effective solution for long-term management of water quality in urban lakes[J]. Water Research, 2016, 97: 142-152. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.036.
- [7] 张婷瑜, 武瑞平, 赵雪芹. 腐殖土序批式反应器强化生物除磷及微生物群落响应的研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(7): 64-68, 74.
ZHANG T Y, WU R P, ZHAO X Q. Enhanced biological phosphorus removal and microbial community response in humus sequencing batch reactor[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(7): 64-68, 74.
- [8] 唐朝春, 刘名, 陈惠民, 等. 吸附除磷技术的研究进展[J]. 水处理技术, 2014, 40(9): 1-7, 12.
TANG C C, LIU M, CHEN H M, et al. Research progress of phosphorus removal from wastewater by adsorption technology [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(9): 1-7, 12.
- [9] 谭心, 邹晓凤, 苏强, 等. 污水处理厂尾水深度除磷技术综述[J]. 山东化工, 2021, 50(16): 277-279.
TAN X, ZOU X F, SU Q, et al. A review advanced phosphorus

- removal technology in the tail water of sewage treatment plant [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(16): 277-279.
- [10] LI Y, RAHMAN S M, LI G, et al. The composition and implications of polyphosphate-metal in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(3): 1536-1544.
- [11] CAO S P, CHEN L, ZHAO M Y, et al. Advanced treatment of phosphorus pesticide wastewater using an integrated process of coagulation and ozone catalytic oxidation [J]. Catalysts, 2022, 12(1): 103. DOI: 10.3390/catal12010103.
- [12] RAMYA K, VASUDEVAN N. Performance evaluation of ETP from pesticide manufacturing industry by using WWQI and multivariate statistical analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(20): 20595-20609.
- [13] RAMÓN F, LULL C. Legal measures to prevent and manage soil contamination and to increase food safety for consumer health; The case of Spain [J]. Environmental Pollution, 2019, 250: 883-891. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.04.074.
- [14] 宋晓乔, 周涛, 任天龙, 等. 我国城镇生活污水厂除磷技术研究进展 [J]. 山东化工, 2020, 49(8): 295-296.
- SONG X Q, ZHOU T, REN T L, et al. Progress of phosphorus removal technology in China's urban sewage plants [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(8): 295-296.
- [15] MUISA N, NHAPI I, RUZIWA W, et al. Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater; A review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 35: 101187. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101187.
- [16] ZHOU Q, SUN H, JIA L, et al. Simultaneous biological removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent of wastewater treatment plants by advanced treatment; A review [J]. Chemosphere, 2022, 296: 134054. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134054.
- [17] HU Q L, HE L R, LAN R, et al. Recent advances in phosphate removal from municipal wastewater by electrocoagulation process; A review [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 308: 122944. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122944.
- [18] CUI H, HUANG X, YU Z, et al. Application progress of enhanced coagulation in water treatment [J]. RSC Advances, 2020, 10(34): 20231-20244.
- [19] 郭建东, 王智超. 加载絮凝在水处理中的应用进展 [J]. 能源环境保护, 2011, 25(5): 40-43.
- GUO J D, WANG Z C. Application of ballasted flocculation technology in water treatment [J]. Energy Environmental Protection, 2011, 25(5): 40-43.
- [20] 陈威, 范跃华, 张顺. 微砂絮凝新工艺优化试验研究 [J]. 水处理技术, 2008, 34(5): 67-69, 73.
- CHEN W, FAN Y H, ZHAN S. Experimental study of novel micro sands flocculation technology [J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(5): 67-69, 73.
- [21] SIELIECHI J, LARTIGES B, SKALI-LAMI S, et al. Floc compaction during ballasted aggregation [J]. Water Research, 2016, 105: 361-369. DOI: 10.1016/j.watres.2016.09.015.
- [22] 杜轶. 新工艺制备高效聚合氯化铝絮凝剂的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2003.
- DU Y. Study on the preparation of high efficiency polymerized aluminum chloride flocculant by new process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2003.
- [23] 杨敏鸽, 李红, 王俊勃, 等. 两种方法制备的聚合氯化铝铁除磷降浊度性能比较 [J]. 应用化工, 2020, 49(6): 1430-1433.
- YANG M G, LI H, WANG J B, et al. Comparison of turbidity reduction properties and phosphorus removal of PAFC prepared by two methods [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(6): 1430-1433.
- [24] 彭五庆, 李彭, 蔡浩东, 等. 污水厂生化尾水深度化学除磷效果优化及其对颗粒态磷粒径分布的影响 [J]. 净水技术, 2022, 41(2): 68-74.
- PENG W Q, LI P, CAI H D, et al. Optimization of advanced chemical phosphorus removal of biochemical tail water in WWTP and influence on particle size distribution of particulate phosphorus [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 68-74.
- [25] 王琦, 王余, 金爽, 等. 混凝技术深度除磷的应用研究 [J]. 环境科学导刊, 2023, 42(3): 38-43.
- WANG Q, WANG Y, JIN S, et al. Study on the application of deep phosphorus removal by coagulation technology [J]. Journal of Environmental Science, 2023, 42(3): 38-43.
- [26] 郭超. 加载混凝法处理受污染景观水的试验研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- GUO C. Experimental research on ballasted coagulation for treatment of polluted landscape water [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [27] 董京洲. 微粒加载强化混凝技术去除污水厂低温出水中磷的研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- DONG J Z. Study on removal of phosphorus from effluent of wastewater treatment plant in low temperature by coagulation with fine particle loading [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018.
- [28] 林雅逢. 磁加载混凝应急饮用水处理试验研究及设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- LIN Y F. Study and design on emergency drinking water by magnetic flocculation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

(下转第 167 页)

- 计——以贵阳龙洞堡再生水厂为例[J]. 净水技术, 2021, 40(7): 133-140.
- HOU F, GAO J W, HAN L, et al. Integrated design of underground WWTP——Case study of Longdongbao WWTP in Guiyang[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 133-140.
- [5] 胡翔. 大型城市污水处理厂全地下式改建思路与方案[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 182-190.
- HU X. Ideas and schemes for fully underground reconstruction of large-scale urban WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 182-190.
- [6] 杭州之江城市建设投资集团有限公司. 之江净水厂工程环境影响报告书[EB/OL]. (2022-03-23) [2025-02-07]. <https://www.doc88.com/p-48939679152714.html>.
- Hangzhou Zhijiang City Construction Investment Group Co., Ltd. Announcement of environmental impact assessment information for zhijiang water treatment plant project[EB/OL]. (2022-03-23) [2025-02-07]. http://sthjt.zj.gov.cn/art/2022/3/23/art_1229731954_21383.html.
- [7] 杭州之江城市建设投资集团有限公司. 之江生态湿地及中水利用工程环境影响报告表[EB/OL]. (2022-11-29) [2025-02-07]. <https://www.doc88.com/p-90629777604404.html>.
- Hangzhou Zhijiang City Construction Investment Group Co., Ltd. Environmental impact assessment report for Zhijiang ecological wetland and reclaimed water utilization project[EB/OL]. (2022-11-29) [2025-02-07]. http://sthjt.zj.gov.cn/art/2022/11/29/art_1229735941_12211.html.
- [8] 常云红, 刘然, 周榆程. 地下式污水处理厂 3AMBR 工艺运行特征分析[J]. 给水排水, 2017, 43(8): 60-62.
- CHANG Y H, LIU R, ZHOU Y C. Analysis on operation characteristics of 3AMBR process in underground sewage treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(8): 60-62.
- [9] 谢晓旺, 李露泽. AAO-MBR 工艺在某城镇污水处理厂中的应用[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 23-27.
- XIE X W, LI L Z. Application of AAO-MBR process in a urban wastewater treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 23-27.
- [10] 应林荣, 党勇杰, 姚云波, 等. 污水厂 AAO-MBR 处理工艺沿程运行效果分析[J]. 净水技术, 2021, 40(7): 71-74, 153.
- YING L R, DANG Y J, YAO Y B, et al. Analysis of effectiveness along the operation process of AAO-MBR in WWTP[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 71-74, 153.
- [11] 张超, 刘成军, 陈力子, 等. 西安某地下式污水处理厂的设计特点与应用[J]. 净水技术, 2024, 43(4): 161-168.
- ZHANG C, LIU C J, CHEN L Z, et al. Design characteristics and application of an underground WWTP in Xi'an[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 161-168.
- [12] 陈旺源, 杨炯男, 张一倩. 生物滤池工艺应用于地下式污水厂的优缺点[J]. 城市道桥与防洪, 2024(6): 172-177.
- CHEN W Y, YANG J N, ZHANG Y Q. Advantages and disadvantages of biological aerated filter in the underground wastewater treatment plant[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2024(6): 172-177.
- [13] 高术波. 多级 AO+MBR 工艺在污水厂提标改造中的应用——以北京某污水厂为例[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 28-31.
- GAO S B. Application of multilevel AO+MBR process in upgrading and reconstruction project——Case study of a WWTP in Beijing[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 28-31.

(上接第 108 页)

- [29] DESJARDINS C, KOUDJONOU B, DESJARDINS R. Laboratory study of ballasted flocculation[J]. Water Research, 2002, 36(3): 744-754.
- [30] GHANEM A V, YOUNG J C, EDWARDS F G. Mechanisms of ballasted floc formation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2007, 133(3): 271-277.
- [31] 夏莉, 彭建国, 刘文彬. ACTIFLO 高密度沉淀池应用于污水厂升级改造[J]. 水处理技术, 2021, 47(2): 137-140.
- XIA L, PENG J G, LIU W B. Application of ACTIFLO high-density sedimentation tank in upgrading of sewage treatment plant[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(2): 137-140.