

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.02.005

剩余污泥自絮凝特性及关键影响因素作用分析

赫俊国¹, 庞鹤亮¹, 张立洲¹, 郑砚石¹, 刘甜甜¹, 张 杰^{1,2}

(1.哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨)

摘 要:为解决污泥减量化处理过程中药耗或能耗过高、污泥量增加等问题,提出利用污泥自身胞外聚合物(EPS)产生的自絮凝调理来促进其脱水性能,通过正交实验和单因素实验考察污泥质量浓度、搅拌强度和搅拌时间对污泥自絮凝特性的影响,分析污泥毛细吸水时间(t_{CST})、污泥容积指数(SVI)、污泥粒径和 Zeta 电位的变化规律.结果表明,自絮凝可增大污泥粒径,提高污泥疏水性,减少絮体表面 Zeta 电位的影响,从而改善污泥脱水性能和沉降性能.在最佳参数(污泥质量浓度 $18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、搅拌强度 200 r/min 、搅拌时间 3.5 min)条件下,自絮凝后污泥体积平均粒径增加 11.4% ,Zeta 电位升高 19.0% , t_{CST} 降低 17.1% ,SVI 降低 8.1% ,效果显著.所考察的因素对自絮凝作用的影响程度依次为:污泥质量浓度>搅拌时间>搅拌强度.较高的污泥质量浓度、搅拌强度和搅拌时间均有利于提高自絮凝效果,而当污泥质量浓度、搅拌强度或搅拌时间大于最佳参数时,自絮凝效果则逐渐减弱.研究成果提供了利用污泥自身特性进行调理的新思路,可为优化污泥调理方式、降低调理药耗和减少污泥产量提供技术支持.

关键词: 剩余污泥; 自絮凝; 脱水性能; 沉降性能; 粒径; Zeta 电位

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)02-0027-06

Analysis of characteristics and key factors of excess sludge self-flocculation

HE Junguo¹, PANG Heliang¹, ZHANG Lizhou¹, ZHENG Yanshi¹, LIU Tiantian¹, ZHANG Jie^{1,2}

(1.School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2.State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment(Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China)

Abstract: To solve the existing problems, such as sludge volume increasing, high consumption of chemical reagent and energy during the sludge treatment and disposal, a sludge conditioning method, called self-flocculation, was proposed. This approach enhanced the dewatering efficiency of sludge via the utilization of the self-flocculation function of the extracellular polymeric substance (EPS). By orthogonal and single factor experiments, the impacts of sludge concentration, stirring intensity and stirring time on the sludge self-flocculation were investigated. Meanwhile, the corresponding variation of the capillary suction time (t_{CST}), sludge volume index (SVI), particle size and Zeta potential were also analyzed. Experimental results indicated that self-flocculation could enlarge the particle size of sludge and decrease the effect of flocs Zeta potential. Therefore, hydrophobicity, dewaterability and settleability of sludge were improved. Under the optimal self-flocculation conditions (sludge concentration, 18 g/L , stirring intensity, 200 r/min , stirring time, 3.5 min), the particle size and Zeta potential of the sludge increased 11.4% and 19% , respectively, while the t_{CST} and SVI could be respectively reduced by 17.1% and 8.1% . In addition, the significant effects of operational parameters on self-flocculation showed a decreased trend of sludge concentration > stirring intensity > stirring time. A higher sludge concentration, stirring intensity and stirring time was beneficial to the sludge self-flocculation. However, once each of the three parameters was higher than that at the optimal condition, sludge self-flocculation would weaken gradually. This study provided a new approach for sludge conditioning by using the sludge self-characteristics.

Keywords: excess sludge; self-flocculation; dewaterability; settleability; particle size; Zeta potential

收稿日期: 2015-09-16.

基金项目: 国家自然科学基金(51278143);

国家重大科技专项(2014ZX07202-011).

作者简介: 赫俊国(1970—),男,教授,博士生导师;

张 杰(1938—),男,博士生导师,中国工程院院士.

通信作者: 赫俊国, jungguohc@263.net.

剩余污泥是活性污泥法处理污水的副产物,具有组分复杂、性质易变、处理处置困难等特点,极易造成二次污染^[1-2].脱水减容是剩余污泥处理处置的关键步骤,然而剩余污泥受“粘胶相区”的影响,高效脱水困难^[3].研究表明,对剩余污泥调理后再进行

脱水能够提高脱水效率^[4-5].目前常用的调理方法主要有化学调理和物理调理^[6-8].Lee 等^[9-11]分别采用高分子聚合电解质、微波辐射和冻融方法调理污泥,发现污泥脱水性能均明显改善;Shi 等^[12]考察了 Fe²⁺和过硫酸盐对污泥的调理效果,发现两者的协同作用可以通过改善絮体骨架结构从而提高污泥脱水性能;Yuan 等^[13]则发现电化学与表面活性剂联用对污泥的调理效果优于单独调理.化学调理是目前普遍采用的调理方法,但其存在药耗高、污泥产量增大等弊端^[14].传统的物理调理则存在能耗高、成本昂贵、对设备和操作要求高等弊端,目前难以大范围推广.因此,如何降低污泥调理药耗和能耗,并最大限度减少污泥增量是目前污泥调理所面临的重要问题.

近年来,有研究学者提取污泥中微生物分泌的胞外物质进行培养、富集,制成生物絮凝剂对污泥进行调理,取得了良好的效果,但成本高昂^[15-16].而直接利用污泥自身胞外聚合物(EPS)在调理过程中发挥生物絮凝作用的自絮凝现象的研究未见相关报

道^[17].在前期研究工作中发现,通过对污泥搅拌能够促进污泥发挥自絮凝作用,在一定程度上改善污泥脱水性能,该过程的机理、控制、优化均有待深入研究.本研究以剩余污泥为研究对象,探究污泥质量浓度、搅拌强度和搅拌时间对污泥自絮凝特性的影响,考察自絮凝过程中污泥脱水性能和絮体理化性质的变化规律,确定自絮凝主要影响因素及最佳参数,分析污泥自絮凝作用机理,以期提出一种低成本、环境友好的新型污泥调理方法,为减少污泥调理药耗和能耗,降低污泥处理处置成本,实现污泥高效调理和脱水提供技术支持.

1 实 验

1.1 实验污泥

原始污泥取自哈尔滨市文昌污水厂二沉池剩余污泥.污泥取回后储存在冰箱(4 ℃)中保存,使用前在室温下静沉 8 h,去除部分上清液后作为实验污泥待用.原始污泥基本指标如表 1 所示.

表 1 原始污泥基本指标

含水率/ %	MLSS/ (g·L ⁻¹)	t _{CST} / s	SVI/ (mL·g ⁻¹)	pH	Zeta 电位/ mV	黏度/ (Pa·s)	体积平均 粒径/μm
98.97~99.12	8.59~9.34	20.2~22.3	81.7~83.0	6.92~6.95	-13.1~-14.0	0.072~0.078	72.84~76.01

1.2 检测指标及分析方法

污泥含水率和 MLSS 采用重量法测定^[18];污泥容积指数 SVI(sludge volume index)采用标准方法测定^[18];污泥毛细吸水时间 t_{CST}(capillary suction time)采用 CST 测定仪(Triton 304M,英国)测定,漏斗采用 18 mm 圆槽漏斗,滤纸采用 Whatman17# 层析滤纸^[19];污泥 Zeta 电位采用 Zeta 电位测定仪(Malvern Zetasizer Nano ZS90,英国)测定;污泥粒径以体积平均粒径表征,采用激光粒度分析仪(Malvern Mastersizer 2000,英国)测定.

以 t_{CST}表征污泥脱水性能^[20],以 SVI 表征污泥沉降性能,以污泥粒径和 Zeta 电位分析污泥絮体理化性质^[21-24].全部指标均在取样后 10 min 内进行测定.各指标均测 3 组平行样,取平均值为最终结果.

1.3 实验方法

通过正交实验和单因素实验的方法考察剩余污泥自絮凝特性.全部实验采用烧杯搅拌实验进行,通过六联搅拌机(MY3000-6M,武汉梅宇仪器设备有限公司)完成.

1.3.1 正交实验

污泥自絮凝特性的影响因素主要包括污泥性质和搅拌参数.在前期预实验中发现,污泥质量浓度对

自絮凝效果具有显著影响,而搅拌参数主要包括搅拌强度和搅拌时间.因此,在控制 pH 等其他污泥性质不变的情况下,以 t_{CST}变化率为评价指标,选择污泥质量浓度、搅拌强度和搅拌时间 3 个因素,每个因素选取 5 个水平,采用正交设计表 L₂₅(5⁶)设计实验^[25].各因素设计水平如表 2 所示,实验计划如表 3 所示.

表 2 正交实验因素水平表

水平	ρ(污泥)/ (g·L ⁻¹)	搅拌强度/ (r·min ⁻¹)	搅拌时间/ min
1	12	100	1
2	16	250	4
3	20	400	7
4	24	550	10
5	28	700	13

取 1 L 不同质量浓度的实验污泥置于 1 L 的圆形烧杯中,按表 3 中实验计划进行搅拌.搅拌后从同一高度的取样口处取 10 mL 污泥样品,测定污泥 t_{CST},计算 t_{CST}变化率,即自絮凝后与自絮凝前 t_{CST}差值与自絮凝前 t_{CST}的比值,并对结果进行均值分析和极差分析,确定最佳自絮凝参数范围,分析各因素对 t_{CST}影响的显著程度.

1.3.2 单因素实验

在正交实验的基础上,通过单因素实验考察各因素对污泥自絮凝效果的影响.在控制其余因素为正交实验确定的最佳参数的条件下,分别考察污泥质量浓度、搅拌强度和搅拌时间中单一因素变化时,自絮凝后污泥脱水性能、沉降性能和理化性质指标的变化规律,分析作用机理,并确定实验条件下的自絮凝最佳参数.

取 1 L 实验污泥置于 1 L 的圆形烧杯中,按相应的实验计划进行搅拌.搅拌后从同一高度的取样口处取 3 组 10 mL 污泥样品,测定污泥 t_{CST} 、粒径和 Zeta 电位,取一组 250 mL 污泥样品,测定污泥 SVI.

2 结果与分析

2.1 自絮凝影响因素分析及最佳参数范围确定

根据设计的正交实验,考察不同参数下自絮凝后污泥 t_{CST} 变化率,并将实验数据进行直观分析,计算各因素均值(即各因素同一水平的结果之和的平均值),以及极差(即各因素最大均值与最小均值之差)^[25],结果如表 3 所示.

表 3 正交实验设计参数及直观分析结果				
实验	ρ (污泥)/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	搅拌强度/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	搅拌时间/ min	t_{CST} 变化 率/%
1	12	100	1	1.3
2	12	250	4	-8.0
3	12	400	7	-7.5
4	12	550	10	5.9
5	12	700	13	14.0
6	16	100	4	-6.5
7	16	250	7	-10.3
8	16	400	10	5.9
9	16	550	13	3.7
10	16	700	1	1.3
11	20	100	7	0.0
12	20	250	10	-13.1
13	20	400	13	-3.9
14	20	550	1	-9.2
15	20	700	4	-17.0
16	24	100	10	4.8
17	24	250	13	3.3
18	24	400	1	0.0
19	24	550	4	11.6
20	24	700	7	13.3
21	28	100	13	12.3
22	28	250	1	2.2
23	28	400	4	-3.0
24	28	550	7	11.5
25	28	700	10	-5.9
均值 1	0.011	0.024	-0.009	
均值 2	-0.012	-0.052	-0.046	
均值 3	-0.086	-0.017	0.014	
均值 4	0.066	0.047	-0.005	
均值 5	0.034	0.011	0.059	
极差	0.152	0.099	0.105	

由表 3 可以看出,不同参数条件下,自絮凝后污泥 t_{CST} 变化率在-17%~14%内变化. t_{CST} 变化率为负值时表明自絮凝后 t_{CST} 降低,污泥脱水性能改善,且其越低,脱水性能改善程度越大;而 t_{CST} 变化率为正值时表明自絮凝后 t_{CST} 升高,污泥脱水性能恶化.分析可知,污泥在搅拌过程中发生了自絮凝作用,使 t_{CST} 降低,脱水性能改善^[16].然而,在一定参数条件下,自絮凝也可能导致污泥 t_{CST} 升高,脱水性能恶化.因此,选择合适的参数是实现自絮凝良好效果的关键.

由表 3 中极差分析知,各因素对自絮凝影响的显著程度依次为:污泥质量浓度>搅拌时间>搅拌强度,其中污泥质量浓度对自絮凝效果的影响最大,搅拌时间和搅拌强度次之,且显著程度相近.由表 3 中均值分析知,正交实验确定的最佳参数组合:污泥质量浓度 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、搅拌强度 250 r/min 、搅拌时间 4 min ,说明自絮凝最佳参数在该参数附近,需通过单因素实验进一步确定.

2.2 污泥质量浓度对自絮凝效果的影响

为研究污泥质量浓度对自絮凝效果的影响,在正交实验确定的最佳污泥质量浓度 $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 附近选取 16、18、20、22、24 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 5 个污泥质量浓度进行分析,考察在搅拌强度 250 r/min 和搅拌时间 4 min 的条件下,不同质量浓度污泥经自絮凝后 t_{CST} 、SVI、粒径、Zeta 电位的变化,结果如图 1 所示.

由图 1 可以看出,不同质量浓度的污泥经自絮凝后 t_{CST} 和 SVI 均降低,脱水性能和沉降性能改善,污泥粒径和 Zeta 电位则不同程度升高.研究表明,一般情况下,污泥粒径增大有利于脱水性能改善^[26].根据 DLVO 理论,Zeta 电位的升高能够减弱污泥絮体与水的极性作用,增强污泥疏水性,使絮体内的部分结合水转化为自由水,从而改善污泥脱水性能^[22].因此,污泥粒径和 Zeta 电位升高表明污泥絮体性质改善,有利于脱水性能的提高.分析可知,自絮凝对污泥絮体具有絮凝聚集作用,能够增大污泥粒径,并在此过程中打破原有污泥稳定体系,使污泥 Zeta 电位升高,改善絮体理化性质和水分分布,提高污泥疏水性,从而改善污泥脱水性能和沉降性能^[17, 27].

随着污泥质量浓度增大,自絮凝后污泥 t_{CST} 降低率、SVI 降低率和 Zeta 电位升高率均呈先升高后波动降低趋势,污泥粒径增大率则始终呈不断增大趋势.当污泥质量浓度为 $18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,自絮凝后污泥 t_{CST} 降低率最高为 14%,SVI 降低率最高为 6.8%,Zeta 电位升高率最高为 18.8%.当污泥质量浓度为 $24\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,污泥粒径增大率最高为 8%.分析可知,当污泥质量浓度小于 $18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,较大的污泥质量浓度能够促进自絮凝发挥作用,有利于污泥絮体间的絮凝聚集,增大污泥

粒径和 Zeta 电位,改善污泥脱水性能和沉降性能;当污泥质量浓度大于 $18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,过高的污泥质量浓度仍有利于絮体间絮凝聚集和粒径增大,但形成的絮体结构松散,理化性质逐渐恶化,导致脱水性能和沉降性能改善程度逐渐降低.因此,实验条件下自絮凝最佳

污泥质量浓度为 $18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.
对图 1 中数据进行分析可知,自絮凝过程中,污泥质量浓度对 t_{CST} 和 Zeta 电位影响较大,两者变化率在 $5.1\%\sim 18.8\%$ 内;对 SVI 和粒径的影响较小,两者变化率在 $-2\%\sim 8\%$ 内.

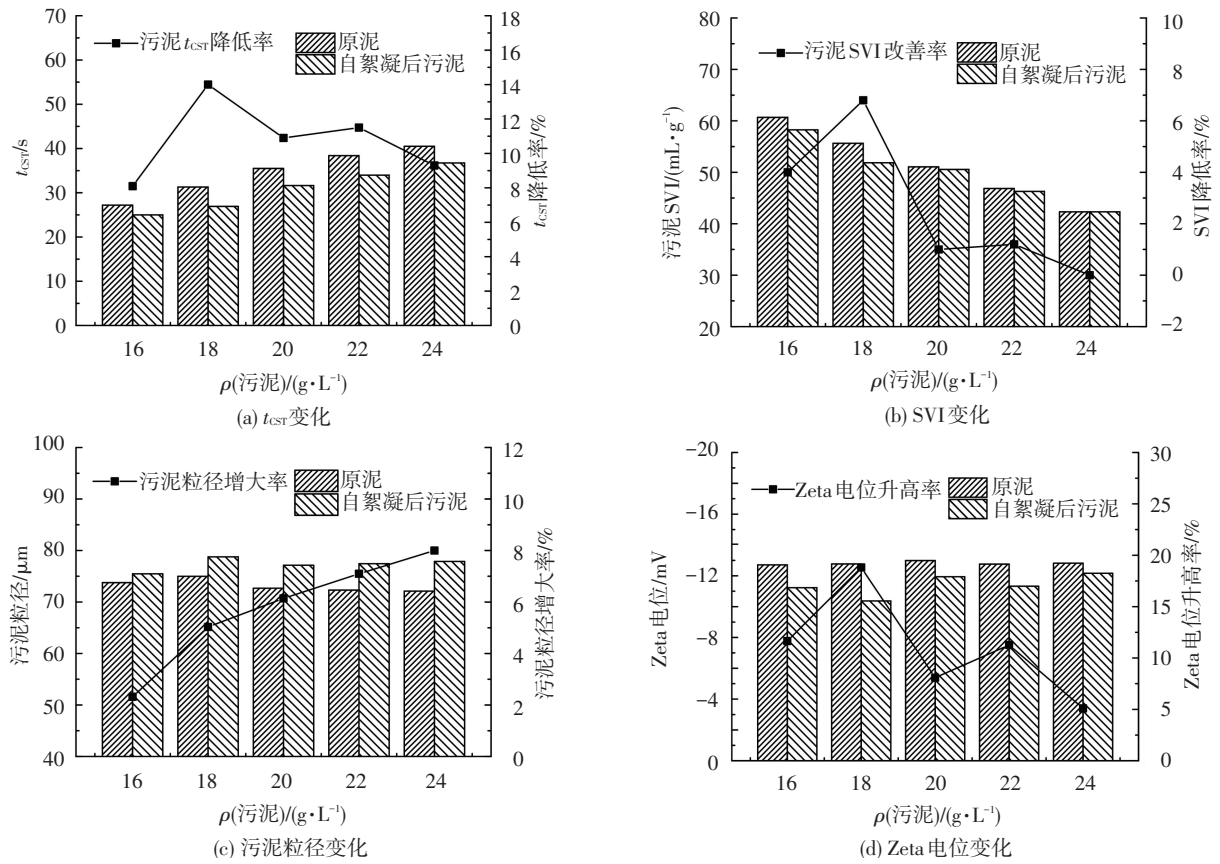


图 1 不同质量浓度污泥经自絮凝后各指标的变化

2.3 搅拌参数对自絮凝效果的影响

为研究搅拌参数对污泥自絮凝效果的影响,选择搅拌时间和搅拌强度为分析目标,考察污泥经不同搅拌时间和不同搅拌强度的自絮凝后 t_{CST} 、SVI、粒径、Zeta 电位的变化.在污泥质量浓度 $18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和搅拌强度 $250\text{ r}/\text{min}$ 的条件下,在正交实验确定的最佳搅拌时间 4 min 附近选取 3 、 3.5 、 4 、 4.5 、 5 、 5.5 min 6 个搅拌时间进行分析,结果如图 2 所示.在污泥质量浓度 $18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和搅拌时间 4 min 的条件下,在正交实验确定的最佳搅拌强度 $250\text{ r}/\text{min}$ 附近选取 100 、 150 、 200 、 250 、 300 、 $350\text{ r}/\text{min}$ 6 个搅拌强度进行分析,结果如图 3 所示.

由图 2 可以看出,污泥经自絮凝后 t_{CST} 由原泥 31.6 s 降至 $26.3\sim 28.8\text{ s}$,降低率为 $8.7\%\sim 16.6\%$;SVI 由原泥 $55.15\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 降至 $50.92\sim 52.17\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,降低率为 $5.4\%\sim 7.7\%$;污泥粒径由原泥 $78.56\text{ }\mu\text{m}$ 变至 $77.51\sim 86.43\text{ }\mu\text{m}$,增大率为 $-1.3\%\sim 10\%$,其中搅拌时间大于 5 min 时,自絮凝后污泥粒径小于原泥粒径;Zeta 电位由原泥 -13.4 mV 升高至 $-11.8\sim$

-10.9 mV ,升高率为 $12.2\%\sim 18.9\%$.

如图 3 所示,污泥经自絮凝后 t_{CST} 由原泥 32.5 s 降至 $26.9\sim 29.8\text{ s}$,降低率为 $8.2\%\sim 17.1\%$;SVI 由原泥 $57.26\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 降至 $52.62\sim 53.93\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,降低率为 $5.8\%\sim 8.1\%$;污泥粒径由原泥 $75.15\text{ }\mu\text{m}$ 增大至 $77.6\sim 83.7\text{ }\mu\text{m}$,增大率为 $3.3\%\sim 11.4\%$;Zeta 电位由原泥 -13.1 mV 升高至 $-11.7\sim -10.6\text{ mV}$,升高率为 $10.6\%\sim 19\%$.

由图 2 和图 3 分析可知,自絮凝能够增大污泥粒径,改善絮体理化性质,进而改善污泥脱水性能和沉降性能,说明自絮凝确实对污泥絮体具有絮凝聚集作用.该结果验证了 2.2 中的分析结论.随着搅拌时间延长和搅拌强度增大,自絮凝后污泥 t_{CST} 、SVI 呈先降低后升高的趋势,Zeta 电位和污泥粒径呈先升高后降低的趋势,各指标均在搅拌时间为 3.5 min 和搅拌强度为 $200\text{ r}/\text{min}$ 处出现转折.分析可知,当搅拌时间小于 3.5 min 或搅拌强度小于 $200\text{ r}/\text{min}$ 时,污泥自絮凝效果随搅拌时间延长或搅拌强度增大而提高,较长的搅拌时间和较大的搅拌强度均有

利于自絮凝发挥作用,促进污泥絮体间的絮凝聚集,改善污泥脱水性能和沉降性能;而当搅拌时间大于 3.5 min 或搅拌强度大于 200 r/min 时,自絮凝效果随搅拌时间延长或搅拌强度增大而逐渐减弱,过长的搅拌时间和过大的搅拌强度均会使通过自絮凝形成的絮体被打散,导致污泥粒径逐渐减小,絮体结构遭到破坏,理化性质和水分分布逐渐恶化,进而导致

污泥脱水性能和沉降性能改善程度逐渐降低^[10, 28]。因此,剩余污泥自絮凝最佳参数为:污泥质量浓度 18 g·L⁻¹,搅拌强度 200 r/min,搅拌时间 3.5 min。

同时,对图 2 和图 3 中各指标数据进行分析可知,污泥自絮凝过程中,搅拌时间和搅拌强度均对 t_{CST} 和 Zeta 电位影响较大,对 SVI 和污泥粒径的影响则较小。

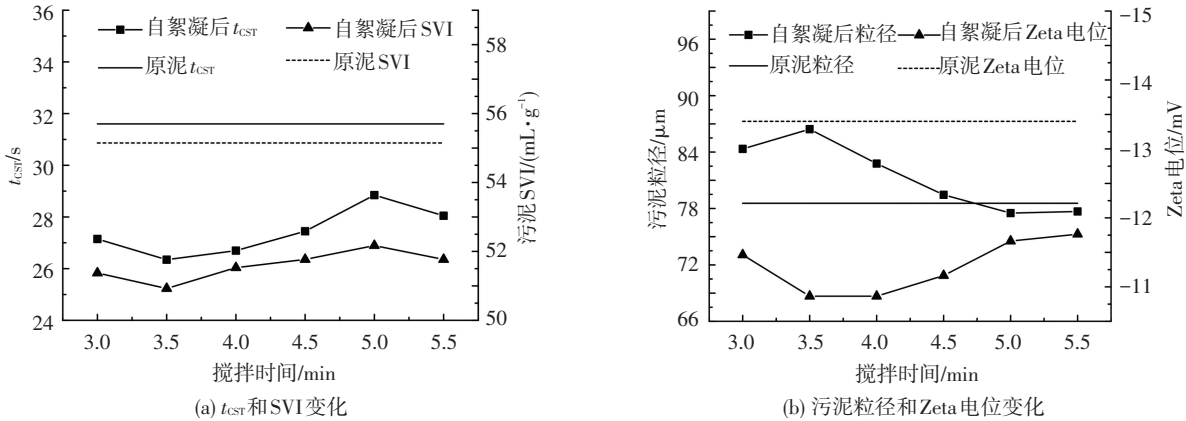


图 2 不同搅拌时间下污泥自絮凝后各指标的变化

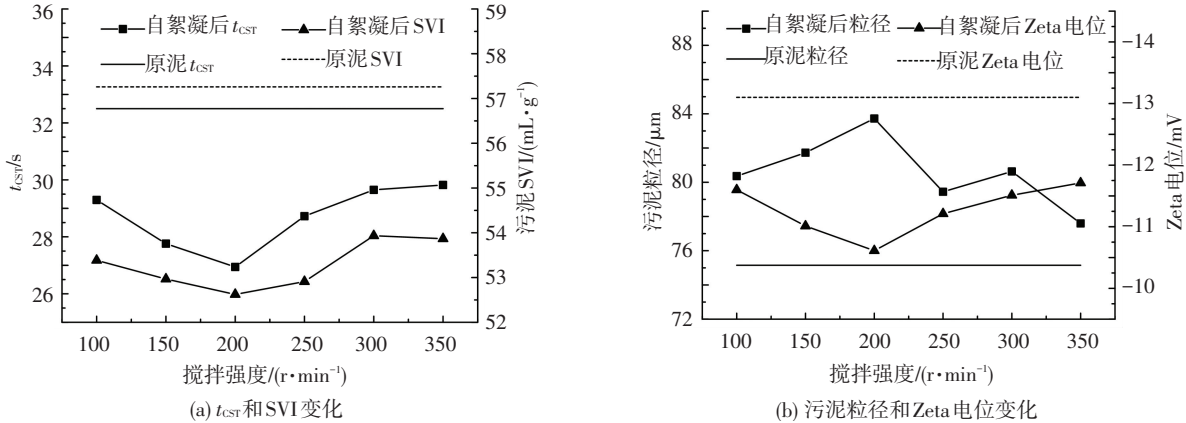


图 3 不同搅拌强度下污泥自絮凝后各指标的变化

2.4 经济性分析

含水率为 98% 浓缩后污泥的 t_{CST} 一般为 30 ~ 34 s, 一般认为, t_{CST} 低于 20 s 时即为易脱水污泥^[14, 29], 因此, 在污泥处理过程中需通过调理将 t_{CST} 降低约 40%。由本文实验结果可知, 在最佳自絮凝参数条件下, 自絮凝后污泥 t_{CST} 降低率可达 17.1%。理论计算可知, 对自絮凝后的污泥进行化学调理, 可降低投药量约 42%, 若以 $FeCl_3$ (投药量以 0.07~0.1 g/g 干污泥计) 和生石灰 (投药量以 0.2~0.25 g/g 干污泥计) 调理为例^[14], 含水率为 80% 的污泥产量以 4 000 万 t/a 计, 可降低 $FeCl_3$ 药耗 23.2~33.6 万 t/a, 降低生石灰投药耗 67.2~84 万 t/a, 减少污泥产量 453.6~588 万 t/a (含水率以 80% 计), 经济效益和社会效益显著。

3 结 论

1) 剩余污泥可以通过自絮凝进行调理, 实验条

件下确定的自絮凝最佳参数为: 污泥质量浓度 18 g·L⁻¹、搅拌强度 200 r/min、搅拌时间 3.5 min, t_{CST} 降低率可达 17.1%, SVI 降低率可达 8.1%, 脱水性能和沉降性能均有所改善。

2) 污泥质量浓度、搅拌强度和搅拌时间均可影响自絮凝效果, 各因素对自絮凝效果影响的显著程度依次为: 污泥质量浓度>搅拌时间>搅拌强度, 其中搅拌强度和搅拌时间的显著程度相近。

3) 较高的污泥质量浓度、搅拌强度和搅拌时间均有利于提高污泥自絮凝效果, 但当污泥质量浓度大于 18 g·L⁻¹、搅拌时间大于 3.5 min 或搅拌强度大于 200 r/min 时, 自絮凝效果逐渐减弱。

4) 自絮凝对污泥絮体具有絮凝聚集作用, 可增大污泥粒径, 改善污泥 Zeta 电位, 进而打破原有污泥稳定体系, 改善絮体内部水分分布和污泥疏水性, 从而提高污泥脱水性能和沉降性能。

参考文献

- [1] 尹军, 谭学军, 廖国盘, 等. 我国城市污水污泥的特性与处置现状 [J]. 中国给水排水, 2003, 19(增 1): 21-24.
- [2] 傅涛. 中国污泥处理处置市场分析报告 (2014 版) [R]. 北京: E2O 研究院, 2014.
- [3] YE Fenxia, PENG Ge, LI Ying. Influences of influent carbon source on extracellular polymeric substances (EPS) and physicochemical properties of activated sludge [J]. Chemosphere, 2011, 84(9): 1250-1255.
- [4] FENG Xin, DENG Jinchuan, LEI Hengyi, et al. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1074-1081.
- [5] YUAN Haiping, ZHU Nanwen, SONG Fanyong. Dewaterability characteristics of sludge conditioned with surfactants pretreatment by electrolysis [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2308-2315.
- [6] SUBRAMANIAN S B, YAN S, TYAGI R D, et al. Extracellular polymeric substances (EPS) producing bacterial strains of municipal wastewater sludge: isolation, molecular identification, EPS characterization and performance for sludge settling and dewatering [J]. Water Research, 2010, 44(7): 2253-2266.
- [7] ZHAI Linfeng, SUN Min, SONG Wei, et al. An integrated approach to optimize the conditioning chemicals for enhanced sludge conditioning in a pilot-scale sludge dewatering process [J]. Bioresource Technology, 2012, 121(10): 161-168.
- [8] YUAN Haiping, ZHU Nanwen, SONG Lijie. Conditioning of sewage sludge with electrolysis: effectiveness and optimizing study to improve dewaterability [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4285-4290.
- [9] LEE C H, LIU J C. Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning [J]. Water Research, 2000, 34(18): 4430-4436.
- [10] WOJCIECHOWSKA E. Application of microwaves for sewage sludge conditioning [J]. Water Research, 2005, 39(19): 4749-4754.
- [11] HU Kai, JIANG Junqiu, ZHAO Qingliang, et al. Conditioning of wastewater sludge using freezing and thawing: role of curing [J]. Water Research, 2011, 45(18): 5969-5976.
- [12] SHI Yafei, YANG Jiakuan, YU Wenbo, et al. Synergetic conditioning of sewage sludge via Fe^{2+} /persulfate and skeleton builder: effect on sludge characteristics and dewaterability [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 270: 572-581.
- [13] YUAN Haiping, CHENG Xiaobo, CHEN Shanping, et al. New sludge pretreatment method to improve dewaterability of waste activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 5659-5664.
- [14] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册: 第 5 册 城镇排水 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 552-556.
- [15] ZHANG Zhiqiang, XIA Siqing, ZHANG Jiao. Enhanced dewatering of waste sludge with microbial flocculant TJ-F1 as a novel conditioner [J]. Water Research, 2010, 44(10): 3087-3092.
- [16] ZHANG Xiuhong, SUN Jie, LIU Xiuxiu, et al. Production and flocculating performance of sludge bioflocculant from biological sludge [J]. Bioresource Technology, 2013, 146(10): 51-56.
- [17] YU Guanghui, HE Pinjing, SHAO Liming. Characteristics of extracellular polymeric substances (EPS) fractions from excess sludges and their effects on bioflocculability [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13): 3193-3198.
- [18] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 105-108.
- [19] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Baltimore: United Book Press, Inc, 1998.
- [20] SCHOLZ M. Review of recent trends in capillary suction time (CST) dewaterability testing research [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(22): 8157-8163.
- [21] SHAO Liming, HE Peipei, YU Guanghui, et al. Effect of proteins, polysaccharides, and particle sizes on sludge dewaterability [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(1): 83-88.
- [22] ELAKNESWARAN Y, NAWA T, KURUMISAWA K. Zeta potential study of paste blends with slag [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(1): 72-76.
- [23] CHEN Yinguang, CHEN Yinsheng, GU Guowei. Influence of pretreating activated sludge with acid and surfactant prior to conventional conditioning on filtration dewatering [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 99(2): 137-143.
- [24] ZHEN Guangyin, LU Xueqin, ZHAO Youcai, et al. Enhanced dewaterability of sewage sludge in the presence of $\text{Fe}(\text{II})$ -activated persulfate oxidation [J]. Bioresource Technology, 2012, 116(4): 259-265.
- [25] 方开泰. 正交与均匀实验设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [26] NIU Meiqing, ZHANG Weijun, WANG Dongsheng, et al. Correlation of physicochemical properties and sludge dewaterability under chemical conditioning using inorganic coagulants [J]. Bioresource Technology, 2013, 144(6): 337-343.
- [27] 冯晶, 王毅力, 杨梦龙. 絮凝调理对消化污泥的脱水性能及絮体理化特性的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1421-1430.
- [28] DENTEL S K, DURSUN D. Shear sensitivity of digested sludge: comparison of methods and application in conditioning and dewatering [J]. Water Research, 2009, 43(18): 4617-4625.
- [29] NEYENS E, BAEYENS J, CREEMERS C. Alkaline thermal sludge hydrolysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 97(1/2/3): 295-314.