

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.020



# 壳聚糖与硅藻土调理市政污泥

李澜<sup>a</sup>, 谷晋川<sup>b</sup>, 张德航<sup>a</sup>, 杨红梅<sup>a</sup>, 徐驰<sup>a</sup>, 肖迎旭<sup>a</sup>, 陈怡<sup>a</sup>

(西华大学 a. 土木建筑与环境工程学院; b. 食品与生物工程学院, 成都 610039)

**摘要:**以污泥比阻为评价指标,综合考虑脱水率、泥饼含水率及过滤时间因素,研究使用壳聚糖与硅藻土对污泥单独调理的最佳条件及联合调理改善污泥脱水性能的效果,并与聚丙烯酰胺调理污泥的效果进行了对比。结果表明,先投加 0.5 g/g 硅藻土调理污泥,再投加 5 mg/g 壳聚糖以 30 r/min 搅拌反应 150 s,污泥比阻下降了 95.43%,脱水率上升至 91.02%,泥饼含水率降至 83.13%,过滤时间降至 29.5 s。壳聚糖与硅藻土联合调理的效果明显优于壳聚糖或硅藻土单独调理的效果,且其联合调理改善污泥脱水综合性能的效果优于聚丙烯酰胺调理污泥的效果。

**关键词:**污泥调理;壳聚糖;硅藻土;联合调理;污泥比阻

中图分类号: TU992.3 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2017)01-0140-07

## Performante of chitosan and diatomite recuperate municipal sludge

Li Lan<sup>a</sup>, Gu Jinchuan<sup>b</sup>, Zhang Dehang<sup>a</sup>, Yang Hongmei<sup>a</sup>, Xu Chi<sup>a</sup>, Xiao Yingxu<sup>a</sup>, Chen Yi<sup>a</sup>

(a. Civil Architecture and Environmental Engineering;

b. Biological Engineering Institute of Food, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China)

**Abstract:** Based on sludge specific resistance as the evaluation index, considering the sludge dehydration rate, filter cake moisture content and filtration time. To investigate the optimum condition of sludge conditioning with chitosan and diatomite, and the effect of improving sludge dewatering performance, and compared with the effect of polyacrylamide sludge conditioning. Results showed that first dose 0.5 g/g of diatomite recuperate sludge, add the 5 mg/g of chitosan with 30 r/min stirring speed to reaction in 150 s, sludge specific resistance decreased by 95.43%, dehydration rate rose to 91.02%, moisture content of sludge cake down to 83.13%, the filtering time dropped to 29.5 s. The effect of chitosan combined with diatomite recuperate sludge was significantly superior to that of independently conditioning by chitosan or diatomite, and the effect of combined conditioning improving overall performance of sludge dewatering was superior to that of polyacrylamide.

**Keywords:** sludge conditioning; chitosan; diatomite; combined conditioning; sludge specific resistance

收稿日期: 2016-07-20

基金项目: 西华大学研究生创新基金(ycej2016175)

作者简介: 李澜(1992-), 男, 主要从事研究方向为污染控制理论与技术研究, (E-mail) lilanup@163.com.

谷晋川(通信作者), 男, 教授, 硕士生导师, (E-mail) gjc6471@163.com.

Received: 2016-07-20

Foundation item: Graduate School of Xihua University Innovation Fund Project(ycej2016175)

Author brief: Li Lan(1992-), main research interests: direction for pollution control theory and technology, (E-mail) lilanup@163.com.

Gu Jinchuan(corresponding author), professor, master supervisor, (E-mail) gjc6471@163.com.

随着社会经济和城市化的发展,水处理领域的生产量在不断的增长。截止 2015 年 9 月,中国污泥总量已经突破 3 000 万 t/年,处理率仅 56%<sup>[1]</sup>。污泥中水分含量达到 95%~99%,脱水缩小体积才便于进一步处置<sup>[2]</sup>。但污泥的成分、结构复杂<sup>[3]</sup>,污泥直接进行脱水处理往往达不到预期的处理效果,因此,一般在脱水前需对污泥进行调理(也称为污泥的预处理)<sup>[4]</sup>,以改善其脱水性能、过滤性能、沉淀性能等<sup>[5]</sup>,从而实现经济有效的处置污泥。因此,污泥调理技术成为污泥脱水处置的减量化、稳定化、无害化、资源化的关键前置条件<sup>[6]</sup>。

污泥调理技术可按作用介质分类为物理法、化学法、生物法。物理法的应用局限性相对较为明显,生物法的研究起源较晚,化学法是目前污水处理厂中应用最为广泛的污泥调理技术<sup>[7]</sup>。随着污泥处理规模的扩大,为了追求更理想的调理效果,研究者们逐渐开始尝试多种调理试剂的联合使用,以得到更好的调理污泥的效果<sup>[8]</sup>。关于联合调理试剂的研究,目前研究者主要围绕着聚丙烯酰胺(PAM)、聚合氯化铝等传统调理剂开展研究较多,如 Huang Peng 等<sup>[9]</sup>研究 PAM 联合蒙脱土、Li Xiaoxiao 等<sup>[10]</sup>

研究 PAC 联合聚二甲基二烯丙基氯化铵进行污泥调理。但有机合成高分子调理剂大多具有生物毒性,且难以被生物降解,因此,天然、无毒、易生物降解的壳聚糖(CTS)替代有机合成高分子调理剂的研究已得到人们较多的关注<sup>[11]</sup>。壳聚糖又名脱乙酰甲壳质、甲壳胺、可溶性甲壳质,是甲壳素脱乙酰基的产物,在天然高分子多糖中是唯一的碱性氨基物质<sup>[12]</sup>。目前,壳聚糖调理污泥的研究大多集中在单独调理方面,很少有关于其联合调理污泥的研究报道。通过使用壳聚糖与硅藻土(DE)联合调理市政污泥进行了研究,分析了其综合脱水性能,探究了不同因素对调理效果的影响。

## 1 试验方法与材料

### 1.1 试验材料

试验污泥取样自成都市高新西区污水处理厂排泥池剩余污泥,未经浓缩且储存不超过 1 h,取样当天分析污泥基本性质后,于恒定 4 ℃ 冰箱中保存,每批次样泥保存时间不超过 5 d,试验使用前,将污泥置于 20±2 ℃ 气浴 30 min。污泥性质见表 1。

表 1 污泥基本性质

Table 1 Basic properties of sludge

MC/%	SRF/(10 <sup>10</sup> m · kg <sup>-1</sup> )	pH	DR/%	FCM/%	TTF/s
99.03±0.09	1.76±0.22	6.81±0.11	82.96±2.89	94.36±1.13	135.3±15.7

注:MC 为污泥含水率;SRF 为污泥比阻;pH 为污泥体系 pH 值;DR 为脱水率(试验抽滤参数非实际生产);FCM 为泥饼含水率(试验抽滤参数非实际生产);TTF 为污泥抽滤一定体积(试验取 50 mL)所需时间。

供试壳聚糖购于成都市科龙化工试剂厂,该壳聚糖为白色粉末状,等级为生化试剂,脱乙酰度≥85.0%。使用前将壳聚糖溶解于冰乙酸溶液配制成 1 g/L 浓度,当天配置当天使用,放置时间不超过 24 h。

硅藻土是一种生物成因的硅质沉积岩,它主要由古代硅藻的遗骸所组成,具有特殊多孔性构造。其化学成分主要由无定形的 SiO<sub>2</sub> 组成,可用 SiO<sub>2</sub> · nH<sub>2</sub>O 表示,矿物成分为蛋白石及其变种。试验所用硅藻土为化学纯,购于天津市科密欧化学试剂有限公司,成份含量见表 2。

试验使用的冰乙酸(色谱纯),购自成都市科龙化工试剂厂;聚丙烯酰胺(工业试剂),分子量级为 1 000 万,阳离子度为 40%,购自成都佳骏科技有限公司。

表 2 供试硅藻土成份含量

Table 2 The selected diatomite content

成份指标	含量/%
SiO <sub>2</sub>	≥98.945
Fe	≤0.03
氯化物	≤0.01
硫酸盐	≤0.01
重金属(以 Pb 计)	≤0.005
盐酸可溶物	≤0.5
其他	≤0.5

### 1.2 试验仪器

试验用到的主要仪器设备见表 3。另有实验室自制布氏抽滤装置一套。

表 3 主要仪器设备  
Table 3 The main equipment

名称	型号	生产厂商
电子分析天平	BS124S	北京赛多利斯仪器系统有限公司
六连同步电动搅拌机	JJ-4	江苏省金坛市医疗仪器厂
试验室超纯水器	UPT-II-20	成都优越实业有限公司
pH 计	PHS-3CW	上海般特仪器制造有限公司
旋转黏度仪	NDJ-5S	上海精析仪器制造有限公司
旋片真空泵	2XZ-1	浙江黄岩黎明实业有限公司
气浴恒温振荡器	THZ-82B	江苏省金坛市医疗仪器厂
精密鼓风干燥箱	BPG-9070A	上海一恒科学仪器有限公司
冰箱	BCD-649WE	青岛海尔股份有限公司

### 1.3 试验方法

1.3.1 污泥调理 量取 100 mL 污泥于 200 mL 烧杯中加入调理试剂,在室温条件下,置于搅拌机下以恒定的转速搅拌以混合均匀,充分反应后进行布氏抽滤脱水实验。单因素试验条件见表 4、5。

表 4 壳聚糖调理污泥试验条件

Table 4 Chitosan regulate sludge test conditions

用量(干污泥质量比)/(mg·g <sup>-1</sup> )	搅拌强度(转速)/(r·min <sup>-1</sup> )	反应时间/s
1	30	30
2.5	60	60
5	120	150
6.5	150	240
10		300

表 5 硅藻土调理污泥试验条件

Table 5 Diatomite regulate sludge test conditions

用量(干污泥质量比)/(g·g <sup>-1</sup> )	搅拌强度(转速)/(r·min <sup>-1</sup> )	反应时间/s
0.1	60	30
0.25	90	90
0.5	120	150
0.75	150	240
1.0		300

1.3.2 分析方法 采用指标分析法,污泥脱水性能的表征指标种类繁多,根据方静雨等<sup>[13]</sup>综合分析研究,污泥比阻与毛细吸水时间(CST)呈正相关,没必要同时测定,因此,试验主要分析污泥比阻下降率(相对原污泥),再衡量脱水率、泥饼含水率、过滤时间等指标,综合考虑污泥的脱水性能。

1)污泥比阻测定 采用布氏抽滤法测定,根据过滤基本原理 Carman 公式推导得到比阻计算公式

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu\omega} \text{ (m/kg)} \quad (1)$$

式中: $P$  为过滤压力, mPa;  $A$  为过滤面积, m<sup>2</sup>;  $\mu$  为滤液的动力粘滞度, mPa·s;  $\omega$  为滤过单位体积的滤液在过滤介质上截流的固体重量, kg/m<sup>3</sup>;  $b$  为 Carman 公式中  $t/V \sim V$  的直线斜率;  $t$  为过滤时间, s;  $V$  为滤液体积, m<sup>3</sup>。

2)泥饼含水率测定 采用重量法测定:取部分污泥置于蒸发皿中,于烘箱内 105 ℃ 恒温烘干至恒重,放入干燥器中冷却后称重,根据式(2)计算结果。

$$MC = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_2} \quad (2)$$

式中: $m_1$  为空蒸发皿质量, g;  $m_2$  为湿泥及蒸发皿质量, g;  $m_3$  为干泥及蒸发皿质量, g。

3)脱水率测定 采用式(3)计算<sup>[14]</sup>。

$$DR = \frac{m_F - m_w}{m_s - m_{DS}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $m_F$  为滤液质量, kg;  $m_w$  为添加调理试剂所含水分质量, kg;  $m_s$  为污泥总质量, kg;  $m_{DS}$  为干污泥质量, kg。

4)过滤时间测定 污泥抽滤一定体积所需时间,试验根据单次抽滤污泥量(100 mL)取 50 mL。

## 2 结果与讨论

### 2.1 壳聚糖单独调理污泥

壳聚糖作为弱阳离子天然高分子聚合物絮凝剂,影响其作用效果的因素有很多,通过单因素试验来初步确定各影响因素的作用条件,考察试剂用量、反应时间、搅拌强度 3 个因素对污泥脱水性能的影响。

2.1.1 试剂用量的影响 采用浓度为 1 g/L 的壳聚糖溶液,投加用量按表 4 选取,对供试污泥进行调理,搅拌强度选取 150 r/min,反应 5 min。观察污泥体系表象,随着壳聚糖在污泥中混匀,悬浮的污泥逐渐絮凝,最后整个体系中都存在细小的絮体矾花。污泥比阻随壳聚糖投加量的变化情况如图 1 所示。

由图 1 可知,整体来看,随着壳聚糖用量的加

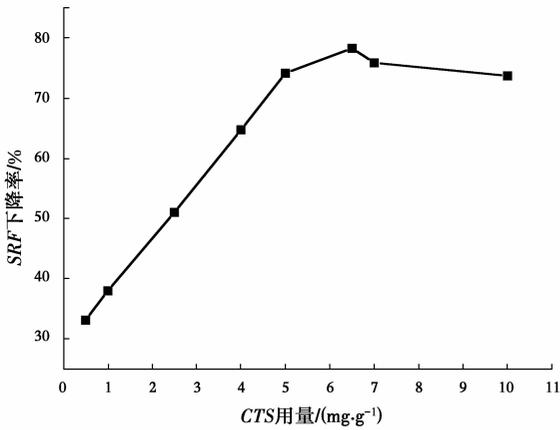


图 1 CTS 用量对 SRF 的影响

Fig. 1 The influence of dosage of CTS on SRF

大,污泥比阻不断减小,在 0~5 mg/g 的范围内急剧下降,5~6.5 mg/g 范围内下降的比率趋于平缓,6.5 mg/g 之后再加大壳聚糖用量,污泥比阻有所回升。为了分析出现拐点的原因,试验进一步探究壳聚糖用量对泥饼含水率和过滤时间的影响,其变化规律如图 2 所示。

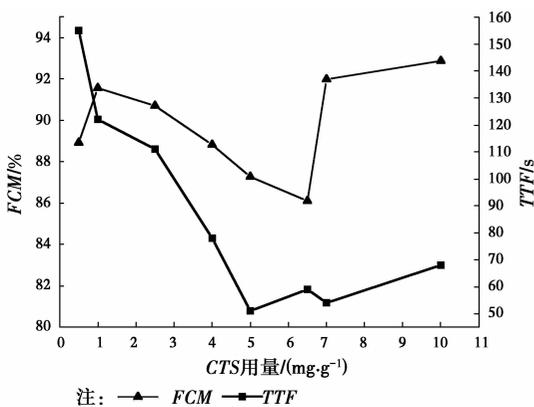


图 2 CTS 用量对 FCM 及 TTF 的影响

Fig. 2 The influence of dosage of CTS on FCM and TTF

由图 2 可知,当壳聚糖用量超过 5 mg/g 后,泥饼含水率开始回升,说明此时过滤液所截流的干物质量开始减少;用量超过 6.5 mg/g 后,过滤时间也出现反弹。分析污泥比阻公式可知,比阻值与过滤液所截流的干物质量反相关,与过滤时间正相关,因而壳聚糖用量过高时污泥比阻下降率出现回升。通过本研究可确定壳聚糖最佳用量为 5 mg/g。

2.1.2 反应时间的影响 投加浓度为 1 g/L 的壳聚糖溶液 5 mL,搅拌强度稳定在 150 r/min,对供试污泥进行调理,观察污泥体系表象,不同反应时间下,都存在细小絮体矾花,但矾花团规模有一定差

别。污泥脱水性能随反应时间的变化情况如图 3 所示。

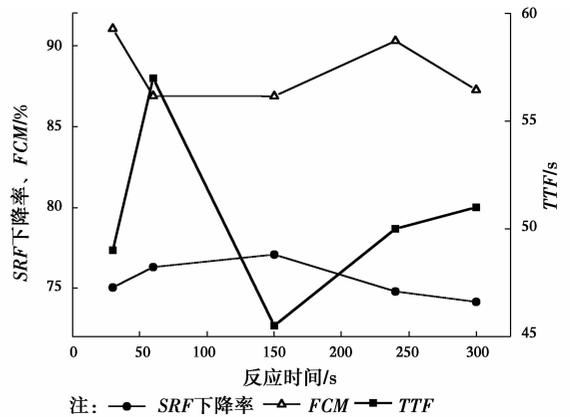


图 3 反应时间对 SRF、FCM、TTF 的影响

Fig. 3 The influence of reaction time on SRF, FCM and TTF

由图 3 可以看出,改变反应时间对污泥比阻的影响比较小,反应时间为 150 s 时污泥比阻下降率相对最优为 77.07%;泥饼含水率和过滤时间的变化波动比较大,当反应时间为 60 s 与 150 s 时,泥饼含水率接近 85%,而从过滤时间来看反应 150 s 时污泥脱水性能有绝对优势。因此,壳聚糖调理污泥最佳反应时间为 150 s。

2.1.3 搅拌强度的影响 投加浓度为 1 g/L 的壳聚糖溶液 5 mL,固定反应时间 150 s,对供试污泥进行调理,调理之后抽滤之前,观察到污泥体系中的絮体矾花形状大小有所不同,总体表现为强度越大矾花越小,图 4 是污泥比阻随搅拌强度的变化情况。

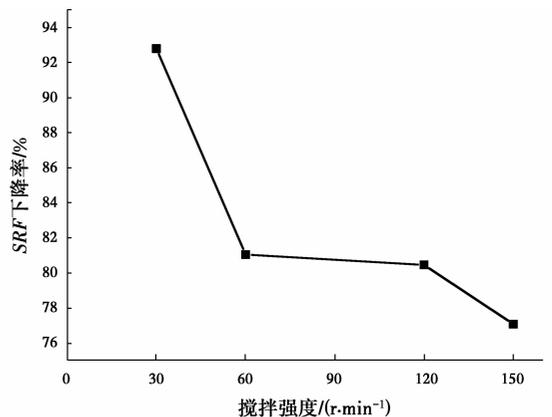


图 4 搅拌强度对 SRF 的影响

Fig. 4 The influence of mixing intensity of SRF

分析搅拌强度改善污泥脱水效果的规律,可以看到污泥比阻随着搅拌强度的提升,呈现出明显的下降趋势。因此,本研究确定壳聚糖调理污泥最佳搅拌强度为 30 r/min。

2.1.4 壳聚糖调理污泥机理分析 壳聚糖改善污泥脱水性能的能力,主要与自身带有羟基和氨基活性基团的长链结构有关<sup>[15]</sup>。壳聚糖的弱阳离子性与负电位的原污泥体系静电中和使得污泥颗粒脱稳,释放水分子,其吸附架桥作用使污泥凝聚成更大的絮体,从而使抽滤脱水变得更容易。同样的壳聚糖用量下,需要一定的反应时间让絮体凝聚,同时限于壳聚糖作为弱阳离子调理剂,与污泥形成的絮体强度不高,因此高强度搅拌会打散絮体矾花,使得污泥脱水性能变差。

由此,本研究确定壳聚糖调理污泥的最佳条件是投加 5 mg/g 在 30 r/min 的转速下搅拌反应 150 s,污泥比阻下降率为 92.80%。

## 2.2 硅藻土单独调理污泥

2.2.1 硅藻土用量对污泥脱水性能的影响 在探究硅藻土调理污泥的影响因素过程中,发现反应时间及搅拌强度几乎无影响,主要作用变量是投加剂量,图 5 是污泥脱水性能随硅藻土投加量(干污泥质量比)的变化情况。

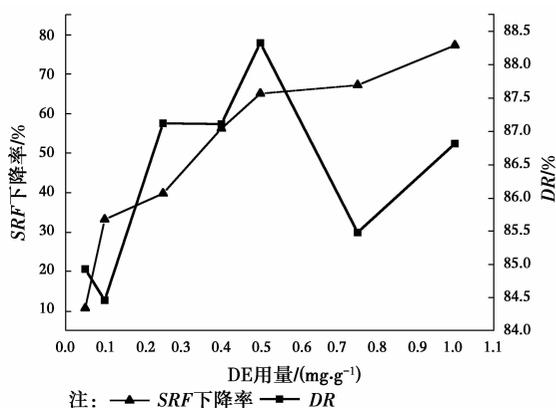


图 5 DE 用量对 SRF 及 DR 的影响

Fig. 5 The influence of DE dosage of SRF and DR

从图 5 中可以看出,随着硅藻土用量不断增加,污泥比阻不断下降,而下降的速度在 0.5 g/g 前后有明显的差距,如果考虑经济因素应用到实际生产,应采用 0.5 g/g 的硅藻土用量。同时有研究认为,污泥比阻不适用于有大量的调理剂投加到污泥中的情况,此时污泥固体浓度产生了较大影响<sup>[16]</sup>。若仅用比阻来评价污泥脱水性能的改善程度会存在偏差,因此本研究还采用脱水率来评价污泥的过滤脱水性能。脱水率的变化整体表现为先上升后下降,其峰值出现在 0.5 g/g。因此,综合考虑,硅藻土用量相对干污泥质量比最佳条件应为 0.5 g/g。

2.2.2 硅藻土调理污泥机理分析 由于硅藻土自

身无定形的 SiO<sub>2</sub> 特殊多孔结构,具有巨大的比表面积<sup>[17]</sup>,在污泥调理中以吸附作用为主,吸附需要一定时间但并不对过滤产生关键性影响,且在调理过程中并不产生如壳聚糖调理时的絮体矾花,这与试验观察表象保持一致,搅拌并不会阻碍吸附作用,因而反应时间及搅拌强度对硅藻土调理污泥几乎没有影响。

硅藻土对污泥的吸附作用,对原污泥体系难脱水的稳定性是一种破坏,因此加大其用量可以降低污泥比阻,但当过量的硅藻土进入污泥后,会吸附更多水分,因此造成脱水率的反弹。

## 2.3 壳聚糖与硅藻土联合调理污泥

2.3.1 联合调理污泥投加顺序的影响 联合使用调理试剂,除了考虑单独试剂本身最佳作用条件外,由于不同的调理剂存在不同的结构和作用方式,联合使用时,不同的试剂投加顺序可能会导致不同的调理结果。因此,考察了壳聚糖与硅藻土联合调理时,投加顺序的影响。两者联合使用,存在 3 种不同的工序:a)先投加壳聚糖搅拌混匀后再投加硅藻土搅拌混匀;b)先投加硅藻土搅拌混匀再投加壳聚糖搅拌混匀;c)壳聚糖和硅藻土同时投加到污泥中再进行搅拌混匀。

污泥采用 5 mg/g 壳聚糖与 0.5 g/g 硅藻土联合调理后,3 种投加方式所得的调理结果见表 6。

表 6 联合调理不同工序下的污泥脱水性能

Table 6 Joint control of sludge dewatering performance under the different processes

工序	SRF/(10 <sup>9</sup> m·kg <sup>-1</sup> )	DR/%	FCM/%	TTF/s
a	1.11	89.47	85.29	31.58
b	0.85	91.02	83.13	29.44
c	0.91	90.66	83.64	36.99

从表 6 可以看出,先投加硅藻土比先投加壳聚糖的污泥比阻下降了 23.77%,比一起投加下降了 6.89%,脱水率、泥饼含水率及过滤时间皆有不同程度的改善,因此壳聚糖与硅藻土联合调理最佳的投加顺序应是先投加硅藻土再投加壳聚糖,这与陈畅亚的研究<sup>[16]</sup>相符合。分析其原因,硅藻土是拥有巨大比表面积的吸附剂,先投加到污泥体系,可以降低体系的稳定性,这种改变更有利于发挥壳聚糖的弱阳离子电位差絮凝效应,同时硅藻土在壳聚糖形成的大污泥絮体中相当于“骨架”作用,上述的两者协同作用使污泥结构和性质朝有利于脱水的方向变化,整个过程可以看作是对污泥体系的“打乱一重

建”的历程。

2.3.2 两种试剂联合与聚丙烯酰胺的调理效能比较 从调理试验表象观察,投加聚丙烯酰胺比联合投加调理污泥所形成的絮体矾花体积更大,且在搅拌强度 150 r/min 下反应 5 min 并不会被打散,调理后污泥体系上清液也更澄清。聚丙烯酰胺调理污泥时,污泥比阻的变化规律如图 6 所示。

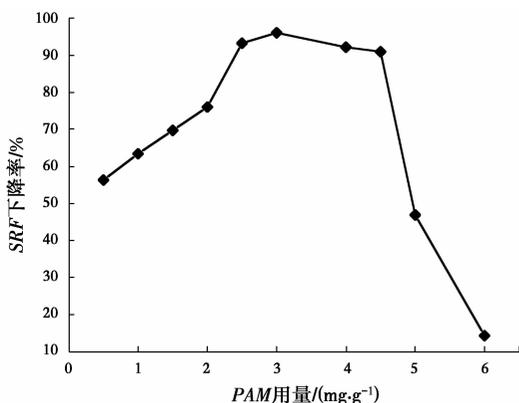


图 6 PAM 用量对 SRF 的影响

Fig. 6 The influence of PAM dosage of SRF

由图 6 可知,随着聚丙烯酰胺投加量的增加,污泥比阻急剧下降,其最佳效果是投加量为 3 mg/g 时,污泥比阻的下降比为 96.02%。与之前研究所得的壳聚糖与硅藻土联合调理的相对最佳效果相比(见表 7),当先投加 0.5 g/g 硅藻土再添加 5 mg/g 壳聚糖反应时,污泥比阻的下降比为 95.43%,两者的效果十分接近。而比较脱水率及泥饼含水率,聚比稀酰胺的调理效果不占优势。

表 7 联合试剂与聚丙烯酰胺调理污泥综合性能比较

Table. 7 Combined reagent compared with polyacrylamide regulate sludge comprehensive performance

调理试剂	SRF 下降率/%	DR/%	FCM/%	TTF/s
PAM	96.02	88.26	89.72	19
CTS+DE	95.43	91.62	82.30	29.5

### 3 结论

1)壳聚糖单独调理污泥的最佳条件为 5 mg/g 用量、150 s 反应时间、30 r/min 搅拌强度,污泥比阻下降率可达到 92.80%。

2)硅藻土单独调理污泥的最佳用量为 0.5 g/g 用量,污泥比阻下降率可达到 65.08%,脱水率可增加至 88.33%。

3)壳聚糖与硅藻土联合调理污泥的最佳工序为先投加硅藻土再投加壳聚糖,对污泥脱水性能的改善明显优于壳聚糖或硅藻土单独调理。

4)联合调理与聚丙烯酰胺调理污泥的效果相比,降低污泥比阻的能力十分接近,改善脱水率及泥饼含水率的能力明显更优。

### 参考文献:

- [1] 何强,吉芳英,李家杰. 污泥处理处置及资源化途径与新技术[J]. 给水排水,2016,42(2):1-3.  
HE Q,JI F Y,LI J J. Sludge disposal and utilization ways and new technology [J]. Water Supply and Drainage, 2016 (2) : 1-3. (in Chinese)
- [2] ZHANG W J, XIAO P, LIU Y Y, et al. Understanding the impact of chemical conditioning with inorganic polymer flocculants on soluble extracellular polymeric substances in relation to the sludge dewaterability [J]. Separation and Purification Technology, 2014,132:430-437.
- [3] MARIA C R, MONICA E B, MARIA C B. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge [J]. Water Research,2016,103:245-255.
- [4] NEYENS E,BAEYENS J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 98 : 51-67.
- [5] CANO R, PÉREZ-ELVIRA S I, FDZ-POLANCO F. Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review[J]. Applied Energy, 2015,149:176-185.
- [6] 王雅婷. 城市污水厂污泥的处理处置与综合利用[J]. 环境科学与管理,2011,36(1):90-94.  
WANG Y T. Comprehensive utilization of urban sewage treatment and disposal of sludge [J]. Journal of Environmental Science and Management, 2011, 4 (1) : 90-94. (in Chinese)
- [7] MUZAMMIL A, NAIEF H A, BARAKAT M A. Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods [J]. Process Safety and Environmental Protection,2016,102:615-632.
- [8] 闫路兵,卢朝亮,刘永德. 污泥脱水技术研究进展[J]. 中国资源综合利用,2014,32(12):39-40.  
YAN L B, LU C L, LIU Y D. Sludge dewatering technology research progress [J]. Journal of Comprehensive Utilization of Resources in China, 2014, 32 (12) : 39-40. (in Chinese)
- [9] HUANG P, ZHAO X W, YE L. Intercalation behavior and enhanced dewaterability of waste sludge of cationic polyacrylamide/montmorillonite composite synthesized

- via in situ intercalation polymerization [J]. *Composites Part B-Engineering*, 2015, 83 (15) : 134-141.
- [10] LI X X, ZHANG Y J, ZHAO X L, et al. The characteristics of sludge from enhanced coagulation processes using PAC/PDMDAAC composite coagulants in treatment of micro-polluted raw water [J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 147 (16): 125-131.
- [11] 林霞亮,周兴求,伍健东,等. 无机混凝剂与壳聚糖联合调理对污泥脱水的影响[J]. *工业水处理*, 2015, 35(10): 38-41.  
LIN X L, ZHOU X Q, WU J D, et al. Inorganic coagulants with chitosan regulate impact on sludge dewatering [J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35 (10) : 38-41. (in Chinese)
- [12] 陈诗琪,张贤明. 天然高分子壳聚糖的特性及其应用[J]. *应用化工*, 2016, 45(1):152-155.  
CHEN S Q, ZHANG X M. The characteristics of the natural polymer chitosan and its application [J]. *Journal of Applied Chemical Industry*, 2016, (1) : 152-155. (in Chinese)
- [13] 方静雨,马增益,严建华,等. 污泥脱水性能指标的比较分析[J]. *能源与环境*, 2011, 4:51-53,62.  
FANG J Y, MA Z Y, YAN J H, et al. Comparison of sludge dewatering performance analysis [J]. *Energy and the Environment*, 2011, 4:51-53,62. (in Chinese)
- [14] QI Y, THAPA K B, HOADLEY A F A. Benefit of lignite as a filter aid for dewatering of digested sewage sludge demonstrated in pilot scale trials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 166(2):504-510.
- [15] 李晶,胡文容. 壳聚糖絮凝剂对污泥脱水性能影响的研究[D]. 济南:山东大学, 2008.  
LI J, HU W R. Chitosan research on the effects of flocculant on the sludge dewatering performance [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- [16] 陈畅亚,张盼月,曾光明. 壳聚糖-改性粉煤灰联合调理改善污泥脱水性能及机理初探[D]. 长沙:湖南大学, 2012.  
CHEN C Y, ZHANG P Y, ZENG G M. Chitosan modified fly ash joint control and improve sludge dewatering performance and mechanism of a preliminary study [D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)
- [17] 李敏,杨云龙. 改性藻土对污泥脱水性能的研究[D]. 太原:太原理工大学, 2014.  
LI M, YANG Y L. Modified algae soil study of sludge dewatering performance [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. (in Chinese)

(编辑 胡玲)