

固体废物处理与处置

氧化-铁盐絮凝联合对调理改善污泥脱水性能的影响

骆丽宁^{1,2}, 王丽娟^{1,*}, 杨敏^{2,3}, 李锴², 刘锐平², 肖亚楠⁴

1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401

2. 中国科学院生态环境研究中心, 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 通辽市自来水公司, 通辽 028000

摘要 实验对比考察了活性氯预氧化与铁盐(Fe(II)与Fe(III))絮凝改善市政污泥脱水性能。结果表明:预氧化可改善污泥脱水效果,氯投量为 $200\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时污泥比阻(specific resistance to filtration, SRF)由 $5.3\times 10^9\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $2.0\times 10^9\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$,进一步增加氯投量,SRF反而升高;单独三价铁盐可明显改善污泥脱水性能,但二价铁效果有限;预氧化之后再投加Fe(III)与Fe(II),SRF较单独铁盐条件下分别降低40.3%和78.3%。进一步研究证实,预氧化可破坏污泥的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS),并导致胞内蛋白质和多糖的释放,且蛋白质和多糖含量与污泥脱水性能呈明显正相关性。活性氯预氧化与铁盐絮凝联合调理可明显改善污泥脱水性能,且氧化与絮凝的协同作用是其主要机制。

关键词 二价铁;三价铁;氯化剂;污泥比阻;脱水性能

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2018)02-0630-08 DOI 10.12030/j.cjee.201708105

Combined effects of oxidation and iron coagulation on sludge co-conditioning and dehydration performance

LUO Lining^{1,2}, WANG Lijuan^{1,*}, YANG Min^{2,3}, LI Kun², LIU Ruiping², XIAO Yanan⁴

1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Tongliao Water Supply Corporation, Tongliao 028000, China

Abstract This study investigated the combined effects of chlorination with subsequent coagulation by Fe(II) and Fe(III) on the co-conditioning and dewatering of concentrated municipal sludge. Results indicate that pre-oxidation by chlorine may improve sludge dewatering, and chlorine at $200\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ contributed to the decrease of the specific resistance to filtration (SRF) from $5.3\times 10^9\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $2.0\times 10^9\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$. Fe(III) at $30\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ may significantly decrease the SRF from $3.5\times 10^9\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $1.6\times 10^9\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$, whereas Fe(II) shows little effect on sludge dewatering. The introduction of chlorine prior to Fe(III) and Fe(II) may further improve their positive effects, and SRF are respectively decreased by 40.3% and 78.3% as compared to that without prechlorination. Chlorination of sludge damages its extracellular polymeric substances (EPS) and the release of protein and polysaccharide in the sludge occurs thereafter, and the content of released protein and polysaccharide is observed to be positively correlated with the dewatering efficiency. The combined co-conditioning by chlorine and iron salts may improve the dewatering efficiency, and the synergistic effects between oxidation and coagulation are the main mechanisms.

Key words ferrous salt; ferric salt; chlorination; specific resistance to filtration; dewatering performance

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51422813)

收稿日期:2017-08-16;录用日期:2017-10-21

第一作者:骆丽宁(1992—),女,硕士研究生,研究方向:水处理技术与理论。E-mail:luoliningmail@163.com

* 通信作者 E-mail:wlj@hebut.edu.cn

废水处理过程中会产生大量的污泥,污泥中通常含有 90% 以上的水。污泥管理占污水处理过程成本的很大一部分,面临着巨大的技术挑战。为了降低运输和处理成本,污泥处理最重要的部分是通过固水分离来减少污泥体积^[1-4]。污泥脱水过程是废水处理中成本昂贵和最不被了解的过程之一^[5]。细胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)是生物聚合物,在污泥絮凝、生物絮凝沉淀和脱水性能等方面发挥着重要作用^[6]。在最近的实验研究中发现 EPS 具有双层,包括松散结合的 EPS (loosely bound EPS, LB-EPS) 和紧密结合的 EPS (tightly bound EPS, TB-EPS),进一步的研究表明, LB-EPS 含量与污泥絮凝行为和脱水能力密切相关,而 TB-EPS 含量和污泥特性之间没有相关性^[7-8]。污泥脱水性能主要与可溶性 EPS 的蛋白质及多糖含量和比例有关。因此,可以通过分析可溶性 EPS 的有机组成来评估和预测脱水性能^[9]。

化学絮凝剂已被用于改善污泥的脱水性,它们可以帮助污泥颗粒絮凝成更大的颗粒或絮凝物,这些颗粒或絮凝物通过机械方法易于进行固水分离^[10-11]。水和废水处理中最常见的无机凝结剂是铝盐和铁盐。预氧化可有效改善污泥脱水性能。芬顿试剂与铁盐等骨架结构调理污泥,其脱水性能明显改善,含水率可降低 49.5%^[12];其中,芬顿氧化对破坏污泥 EPS 结构具有重要贡献^[12-14]。高锰酸钾调理可明显改善污泥脱水性能,投加 $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 高锰酸钾时,污泥比阻(specific resistance to filtration, SRF)降低 90.8%;高锰酸钾可破坏 EPS 结构,促使污泥中部分结合水释放,且将大分子物质氧化成更易调理的小分子物质^[15]。但是,芬顿试剂的成本较高,高锰酸钾具有较强的腐蚀性,这些限制它们在工程中规模化应用。次氯酸钠作为强氧化剂,成本偏低,易于储存,并可改善污泥的脱水性能。然而,在以前的文献中并没有指出次氯酸钠与无机化学调理剂在污泥脱水中所起的协同作用。

本研究的目的在于探讨预氧化与无机铁盐絮凝剂联合调理对污泥脱水性能的影响,并将 EPS 中蛋白质和多糖含量与污泥的脱水性能进行相关联,从而为开发新的污泥脱水技术提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

实验用污泥为浙江金华某污水厂浓缩池排泥,污泥密度为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, pH 为 7.3,含水率为 97.3%;原始污泥比阻(specific resistance to filtration, SRF)为 $5.3 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采用的 FeSO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 均为分析纯,次氯酸钠溶液为化学纯(有效氯含量为 58.0%)。

1.2 实验方法

实验中氯、铁盐等投量均以单位干污泥投量计。调理过程:取 300 mL 污泥于 500 mL 烧杯中,投加药剂后在六联搅拌器中反应,程序如下:1) $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 快搅 2 min; 2) $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 慢搅拌 15 min; 3) 静置 30 min。取 300 mL 调理后污泥置于污泥比阻测试装置上进行 SRF 测试;随后将剩余的污泥离心后取上清液,测定 EPS 中蛋白质和多糖含量。

倪丙杰等^[16]研究表明, EPS 对污泥脱水性能有重要影响,关于 EPS 与污泥脱水性指标,污泥质、污泥处理方法、污泥 EPS 提取方法不同均可能影响实验结果。本实验根据前人的研究结果^[8]以及 EPS 的分层概念,即按照有机物与细胞相的结合程度,将污泥的 EPS 分为黏液层或溶液 EPS (slime or soluble EPS)、松散附着 EPS (LB-EPS) 和紧密黏附 EPS (tightly bound EPS, TB-EPS),细胞相 (pellet) 本身。本实验采用离心-超声法提取 EPS。污泥 EPS 提取过程见图 1。

1.3 分析方法

污泥比阻 (SRF) 采取真空过滤装置; pH 测定采用 pH 测定仪 (720, Thermo Orion, USA); 混凝同步进行时采用六联搅拌器 (MY3000-6, China); 实验中 EPS 的蛋白质采用 Folin-Lowry 法测定,以牛血清蛋白为标准物质,采用紫外分光光度计在 750 nm 进行比色;多糖采用蒽酮-硫酸法,以葡萄糖为标准物质,采用紫外分光光度计在 625 nm 进行比色^[17]。

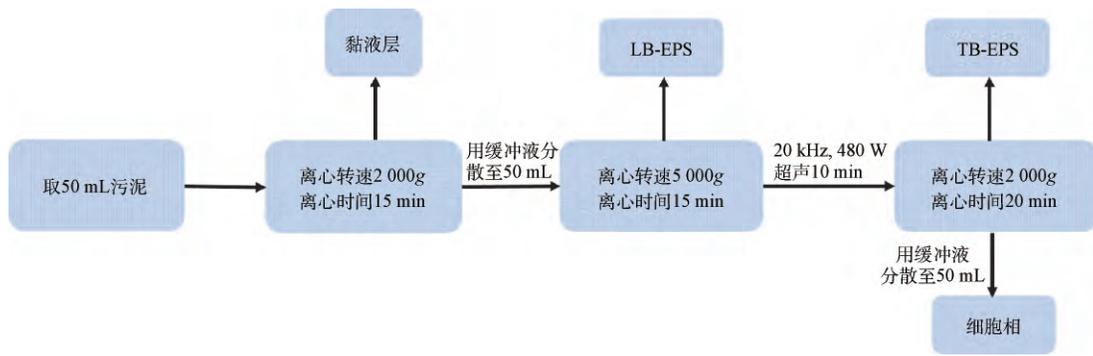


图 1 污泥 EPS 提取过程

Fig. 1 Sludge EPS extraction process

2 结果与讨论

2.1 氧化剂投加对污泥脱水的影响

不同次氯酸钠投加量下,污泥比阻的变化见图 2。通过图 2 可以看出,随着氧化剂投量的不断增加,污泥比阻呈先下降后上升趋势,当次氯酸钠投量小于 $200 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,投加量越大,脱水性能越好,污泥比阻由 $3.08 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降至 $2.00 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。氧化剂可氧化和破解 EPS,减弱污泥絮体表面的亲水性,使其中的结合水转变成易被机械脱除的自由水,污泥脱水性能得到大幅提高^[17]。当氧化剂投量高于 $200 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,污泥比阻随着氧化剂投加量的增加,污泥脱水性能变差,污泥比阻由 $2.00 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $4.78 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明随着氧化反应的进行,污泥氧化分解程度及可释放的结合水含量降低^[18]。当投加量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,污泥比阻达到最小,为 $2.00 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,其污泥脱水性能达到最佳,表明适量的氧化剂能使污泥及 EPS 破解,有助于污泥的脱水性能。由于投量在 $100 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时污泥比阻为 $2.5 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,与最佳的比阻 $2.00 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相差不大,从投药量经济性出发,后续预氧化次氯酸钠的投量采用 $100 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.2 不同铁条件下污泥比阻的对比

不同调理方法下,污泥比阻的变化见图 3。由图 3 看出,在不添加氧化剂的情况下,随着二价铁投量的增加,污泥比阻呈现先增大后减小的趋势,但相较于初始污泥比阻 $5.3 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,其最低的污泥比阻为 $5.2 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,下降了仅仅 1.89%,表明二价铁的投加没有明显改善污泥的脱水性能,反而抑制污泥脱水性;然而,在三价铁调理污泥脱水过程中,我们发现,当三价铁投量低于 $30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,随着投加量的增加,污泥比阻呈明显下降趋势,由 $3.5 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减少到 $1.6 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,污泥的脱水性能得到明显改善;当高于 $30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,随着三价铁投量的增加,污泥比阻由 $1.2 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 变化为 $1.1 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,污泥脱水性能呈现平缓改善的趋势。与二价铁相比较,三价铁在调理污泥脱水过程中有明显的促进作用。

预氧化能提高污泥的脱水性能^[19]。在相同铁投量的情况下,预氧化极大改善了污泥的脱水性能。与直接投加二价铁相比,在投加氧化剂为 $100 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,二价铁为 $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,污泥比阻减少了 78.3%;而在相同的条件下,三价铁的污泥比阻下降了 40.3%,明显改善了污泥的脱水性能。从图 3 看出,预氧化后

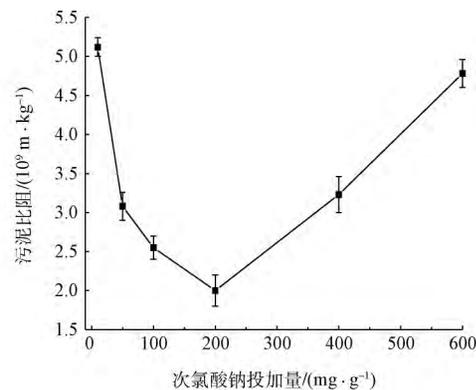


图 2 次氯酸钠对污泥比阻的影响

Fig. 2 Effect of sodium hypochlorite dosage on SRF content

加入二价铁调理的污泥脱水性能普遍较好,污泥比阻由 $1.61 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 平稳变化到 $0.99 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同时污泥比阻也好于单独投加氧化剂的污泥比阻。这是因为预氧化对污泥和 EPS 造成了一定程度的破坏,同时二价铁在氧化剂的存在下会原位生成三价铁,二者协同促进污泥脱水;因此,效果明显优于单独二价铁和单独氧化剂的调理。氧化剂在预氧化破坏 EPS 后,二价铁与三价铁等絮凝剂在污泥脱水过程中充当骨架结构的作用,更有利于污泥脱水^[20]。

由图 3 也可以看出,在预氧化条件下,随着三价铁投加量的增加,污泥比阻由 $1.3 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 先下降到 $0.54 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,随后趋于平稳状态,其污泥脱水效果明显优于只投加三价铁的脱水效果。另外,在投加氧化剂的情况下,三价铁比二价铁的污泥脱水效果好,主要是由于污泥中的还原质与氧化剂发生反应,从而消耗了部分氧化剂,所以二价铁并没有完全原位生成三价铁;此外,也可能由于污泥的脱水性能受到 EPS 成分和絮体尺寸等因素的影响^[21],添加氧化剂有可能对污泥过滤脱水产生正效应或负效应^[22]。在预氧化条件下,污泥最佳脱水效果较原始污泥比阻分别降低了 78.5% 和 89.6%,明显改善了污泥脱水性能,可见氧化剂和絮凝剂协同调理污泥效果更明显。

2.3 不同调理下污泥中有机物质的含量对比

研究表明,污泥脱水性能与胞外聚合物(EPS)中蛋白质和多糖的含量有关^[23-24]。蛋白质和多糖的含量越高,污泥的沉降性能越好,从而污泥脱水效果就会越佳^[25-26]。

加入次氯酸钠调理后,污泥 EPS 中蛋白质和多糖含量见图 4。可以看出,在加入氧化剂次氯酸钠调理

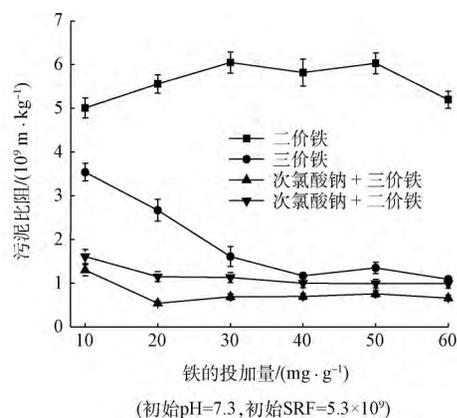


图 3 不同调理方法对污泥的比阻的影响

Fig. 3 Effect of different kind of conditioner dosage on SRF content

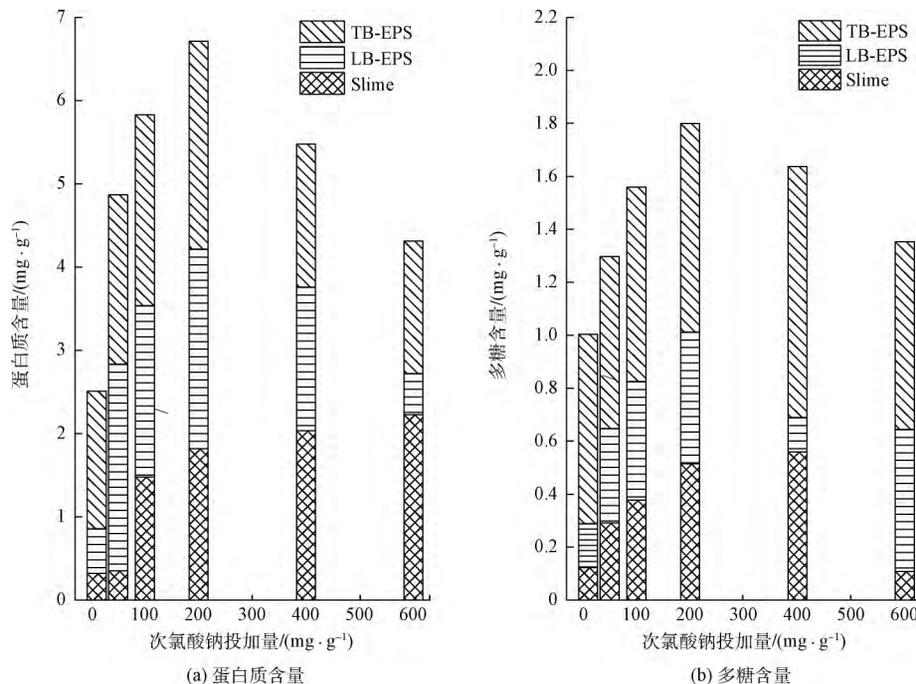


图 4 次氯酸钠对污泥 EPS 中蛋白质含量和多糖含量的影响

Fig. 4 Effect of sodium hypochlorite dosage on protein and polysaccharide content of sludge EPS

后,污泥中蛋白质和多糖的含量都呈现先增大后减少的趋势,说明污泥被氧化破解,污泥中微生物细胞受到破坏释放出有机物^[18]。也有研究表明,氧化试剂能破坏污泥絮体,从而导致上清液中蛋白质和多糖增加^[27]。倪丙杰等^[16]研究表明,污泥中 EPS 蛋白质含量增加,污泥脱水性能变好。蛋白质在不同 EPS 层中的变化规律与氧化剂处理污泥的脱水效果基本吻合,在氧化剂投量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时蛋白质和多糖的含量最高。

在不同调理剂下,污泥的脱水效果依次为:二价铁 < 三价铁 < 氧化剂 + 二价铁 < 氧化剂 + 三价铁。在以上 4 种调理剂作用下,污泥中蛋白质和多糖的含量见图 5 和图 6。从图 5 和图 6 可以看出,调理剂投加量的不同,调理剂对 EPS 的破坏程度也不一样。由图 5(a) 和 (b) 可见,随着二价铁和三价铁投量的增加,黏液层中的多糖含量呈现出一个明显上升的趋势,但是在氧化剂投加之后,黏液层中的多糖含量则随着二价铁和三价铁投量的增加而表现出先升高后降低趋势(图 5(c) 和 (d)),尤其是当三价铁的投量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,黏液层中的多糖含量达到最大。另外,图 6 指出黏液层中蛋白质的变化趋势跟多糖的变化趋势几乎一致。从图 5 和图 6 中也可以看出,脱水效果好的调理剂对应的蛋白质和多糖含量都较高,说明污泥脱水效果与污泥中蛋白质和多糖含量呈正相关,与之前的研究结果^[25] 基本吻合,进而从侧面证明了不同调理剂对污泥脱水有着重要的影响。

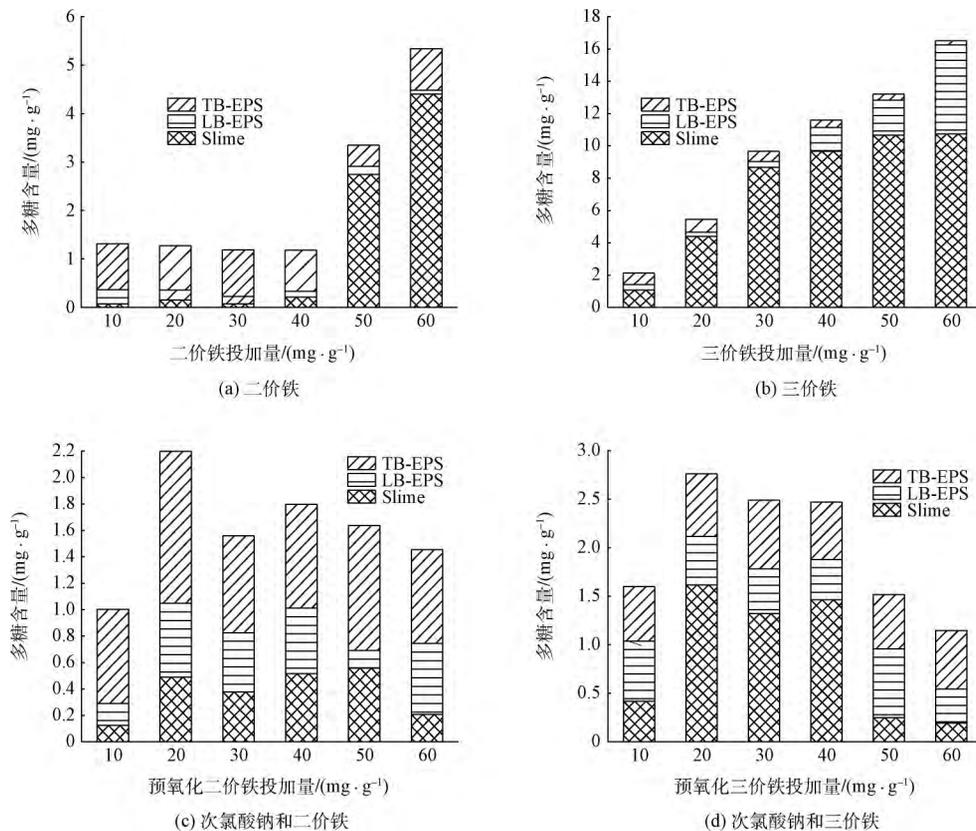


图 5 4 种调理剂对污泥 EPS 中多糖含量的影响

Fig. 5 Effect of four conditioners on polysaccharide concentrations in sludge

EPS 是影响污泥脱水的重要因素之一^[28]。通过以上的分析可知,预氧化与铁盐絮凝对污泥的联合调理作用表现为破解污泥中微生物细胞释放有机物,氧化分解 EPS 等有机物,促进污泥中结合水和微生物细胞内部水的释放,从而提高污泥的脱水性能。

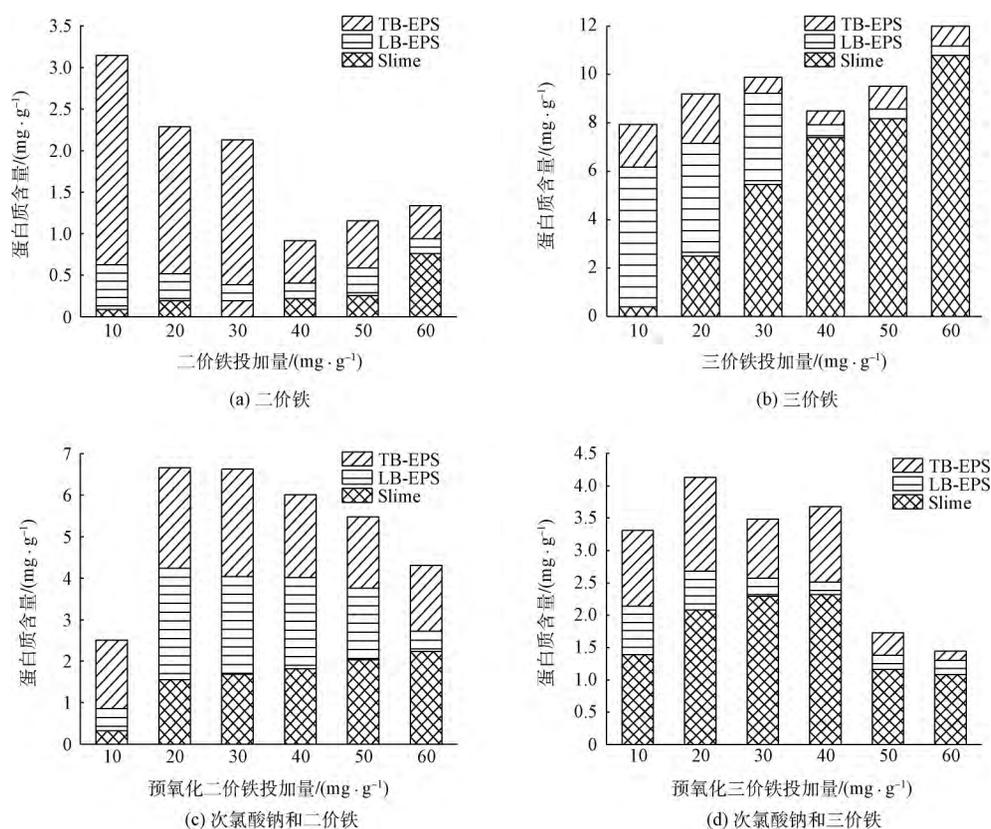


图 6 4 种调理剂对污泥 EPS 中蛋白质含量的影响

Fig. 6 Effect of four conditioners on protein concentrations in sludge

3 结论

- 1) 在不投加氧化剂的情况下, 二价铁对污泥脱水性能没有明显作用。
- 2) 随着三价铁投量的增加, 污泥的脱水性能得到显著提高。
- 3) 投入氧化剂后, 污泥脱水性能有所改善。随着氧化剂投量的增加, 污泥的脱水性能呈现先上升后下降趋势, 并在次氯酸钠投量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 污泥比阻达到最优值 $2.0 \times 10^9 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。
- 4) 氧化剂分别与二价铁和三价铁协同作用时, 污泥的脱水效果有了很好的改善; 但氧化剂与三价铁协同调理后, 污泥的脱水效果要优越于氧化剂与二价铁协同调理的效果。脱水效果好的调理剂对应的蛋白质和多糖含量都较高。
- 5) 本研究结论只针对于次氯酸钠这种氧化剂, 预氧化对污泥脱水性能的影响以及减少预氧化成本等相关内容需要进一步入探讨。

参考文献

- [1] 汤连生, 罗珍贵, 张龙舰, 等. 污泥脱水研究现状与新认识[J]. 水处理技术 2016 42(6): 12-17
- [2] 王丹凤. 阳离子改性壳聚糖-纤维素合成污泥脱水絮凝剂[D]. 长春: 吉林大学, 2016
- [3] 刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 等. 污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究[J]. 环境科学 2015 36(10): 3794-3800

- [4] QI Y , THAPA K B , HOADLEY A F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties: A review [J]. *Chemical Engineering Journal* 2011 ,171(2) : 373-384
- [5] BRUUS J H , NIELSEN P H , KEIDING K. On the stability of activated sludge flocs with implications to dewatering [J]. *Water Research* ,1992 26(12) : 1597-1604
- [6] LASPIDOU C S , RITTMANN B E. A unified theory for extracellular polymeric substances , soluble microbial products , and active and inert biomass [J]. *Water Research* 2002 36(11) : 2711-2720
- [7] LI X Y , YANG S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation , sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. *Water Research* 2007 41(5) : 1022-1030
- [8] YANG S , LI X. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions [J]. *Process Biochemistry* 2009 44(1) : 91-96
- [9] SHENG G P , YU H Q. Characterization of extracellular polymeric substances of aerobic and anaerobic sludge using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Water Research* 2006 40(6) : 1233-1239
- [10] ZHAI L F , SUN M , SONG W , 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: 161-168
- [11] ZHAO Y Q. Enhancement of alum sludge dewatering capacity by using gypsum as skeleton builder [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2002 211(2) : 205-212
- [12] ZHAO H , YANG J , YU W , et al. Mechanism of red mud combined with Fenton's reagent in sewage sludge conditioning [J]. *Water Research* 2014 59: 239-347
- [13] 李娟,张盼月,曾光明,等. Fenton 氧化破解剩余污泥中的胞外聚合物 [J]. *环境科学* 2009 30(2) : 475-479
- [14] 马俊伟,刘杰伟,曹芮,等. Fenton 试剂与 CPAM 联合调理对污泥脱水效果的影响研究 [J]. *环境科学* 2013 34(9) : 3538-3543
- [15] 莫汝松,戴文灿,孙水裕,等. 氧化剂对氯化铁与石灰联合调理污泥脱水性能的影响 [J]. *环境科学与技术* 2015 38(9) : 147-151
- [16] 倪丙杰,徐得潜,刘绍根. 污泥性质的重要影响物质-胞外聚合物(EPS) [J]. *环境科学与技术* 2006 29(3) : 108-110-121
- [17] 袁卓雅. IBR 内不同工况的 EPS 特性与污泥性状分析研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011
- [18] 洪晨,邢奕,司艳晓,等. 芬顿试剂氧化对污泥脱水性能的影响 [J]. *环境科学研究* 2014 27(6) : 615-622
- [19] NEYENS E , BAEVENS J , DEWIL R. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2004 106(2) : 83-92
- [20] 于文华,濮文虹,时亚飞,等. 阳离子表面活性剂与石灰联合调理对污泥脱水性能的影响 [J]. *环境化学* 2013 32(9) : 1785-1791

- [21] LI H , WEN Y , CAO A , et al. The influence of additives (Ca^{2+} , Al^{3+} , and Fe^{3+}) on the interaction energy and loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) of activated sludge and their flocculation mechanisms [J]. *Bioresource Technology* 2012 ,114: 188-194
- [22] PARK K Y , AHN K H , MAENG S K , et al. Feasibility of sludge ozonation for stabilization and conditioning [J]. *Ozone: Science & Engineering* 2003 25(1) : 73-80
- [23] 鹿雯. 阳离子表面活性剂对污泥脱水性能的改善和作用机理研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学 , 2007
- [24] 刘玉学 , 吴伟祥 , 朱荫涓 等. 胞外聚合物对污泥脱水性能的影响及其提取方法研究 [J]. *科技通报* 2008 24(4) : 565-569
- [25] GOODWIN J A S , FORSTER C F. A further examination into the composition of activated sludge surfaces in relation to their settlement characteristics [J]. *Water Research* ,1985 ,19(4) : 527-533
- [26] 李欣. 阳离子调理剂与阳离子聚电解质联合作用于活性污泥脱水及其机理研究 [D]. 上海: 上海交通大学 2009
- [27] LIU H , YANG J , ZHU N , et al. A comprehensive insight into the combined effects of Fenton' s reagent and skeleton builders on sludge deep dewatering performance [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2013 258: 144-150
- [28] YANG S F , LI X Y. Influences of extracellular polymeric substances(EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions [J]. *Process Biochemistry* 2009 44(1) : 91-96

(责任编辑: 郑晓梅)