

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.003

电解耦合 Fe^{2+} 活化过硫酸盐强化污泥脱水及其机理

何妙琳, 张彦平, 李一兵

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300400)

摘要: 采用电解(EC)耦合 Fe^{2+} /过二硫酸盐(PDS)预处理剩余污泥,考察了电解时间、电压、PDS投加量和 Fe^{2+} :PDS(物质的量之比)对污泥脱水性能的影响,并通过测定胞外聚合物(EPS)、三维荧光光谱(EEM)和扫描电镜(SEM)观察等探讨其机理。结果表明,EC/ Fe^{2+} /PDS可有效提高污泥脱水性能。当电压为25 V、PDS投加量为2 g/L、 Fe^{2+} :PDS=0.4、电解时间为30 min时,毛细吸水时间(CST)降低58.3%,泥饼含水率降为74.2%,上清液的SCOD达到367.8 mg/L。EC/ Fe^{2+} /PDS体系可有效促进 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 的转化,提高 Fe^{2+} 和PDS的利用率,减少药剂用量;并且,可有效破解污泥絮体及EPS结构,将紧密结合型EPS(TB-EPS)中的蛋白质、多糖和类腐殖酸等物质降解和转移。相关性分析表明,CST与EPS总量相关性较强,污泥脱水性能最佳时EPS理论值为320 mg/L。

关键词: 污泥脱水; 电解; 过二硫酸盐; 二价铁; 胞外聚合物(EPS)

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0015-08

Enhancement and Mechanism of Electrolysis Coupled Fe^{2+} -activated Persulfate Oxidation for Excess Sludge Dewatering

HE Miao-lin, ZHANG Yan-ping, LI Yi-bing

(School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China)

Abstract: Electrolysis (EC) coupled Fe^{2+} /peroxydisulfate (PDS) was employed to pretreat excess sludge. The effects of electrolysis time, voltage, PDS dosage and Fe^{2+} to PDS molar ratio on sludge dewatering performance were investigated, and the mechanism was analyzed by means such as measuring extracellular polymeric substances (EPS), three-dimensional fluorescence spectrum (EEM) and scanning electron microscopy (SEM). EC/ Fe^{2+} /PDS effectively improved the sludge dewatering performance. When the voltage was 25 V, the dosage of PDS was 2 g/L, the Fe^{2+} to PDS molar ratio was 0.4 and the electrolysis time was 30 min, the capillary suction time (CST) was reduced by 58.3%, the moisture content of sludge cake was decreased to 74.2%, and the SCOD of supernatant reached 367.8 mg/L. The EC/ Fe^{2+} /PDS system effectively promoted the conversion of Fe^{3+} to Fe^{2+} , improved the utilization rate of Fe^{2+} and PDS, and reduced the dosage of reagent. In addition, it effectively cracked the structure of sludge floc and EPS, and degraded and transferred proteins, polysaccharides and humic acids in tightly bound EPS (TB-EPS). The correlation analysis showed that CST had a strong correlation with total EPS, and the theoretical value of EPS was 320 mg/L when the dewatering performance was the best.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608166)

通信作者: 张彦平 E-mail: zyphit@163.com

Key words: sludge dewatering; electrolysis; peroxydisulfate; ferrous iron; extracellular polymeric substances (EPS)

活性污泥法是目前城市污(废)水处理的主要方法,处理过程中会产生大量剩余污泥。剩余污泥的含水率很高(>99%),需要在运输和最终处置之前进行脱水减量。然而,剩余污泥较强的亲水性和复杂的生物凝胶结构是降低其含水率的最大阻碍。这主要是由于污泥中存在大量具有黏性的亲水性物质——胞外聚合物(EPS),它是污泥中除细胞和水分之外的第3大类组成物质^[1]。已有大量研究表明,EPS的存在对污泥脱水有不利影响^[2-3],使得传统的絮凝处理脱水效果难以进一步提高。近期研究表明^[4-5],预氧化技术可以有效剥离、破解EPS,被认为是提高污泥脱水性能的有效途径。

近年来,过硫酸盐高级氧化技术因具有较高的氧化还原电位(2.5~3.1 V),前驱体成本低、稳定、方便运输,副产物(SO_4^{2-})无毒无害等优势,使得其在污泥脱水方面受到广泛关注^[6-7]。目前通常采用热^[8]、光^[9]、过渡金属^[10]、活性炭^[11]等方式活化过一硫酸盐(PMS)或过二硫酸盐(PDS)来产生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 。在众多活化方法中, Fe^{2+} 作为过渡金属离子,不仅价格便宜、操作简便,而且反应效率高、产物无毒无害,在污水、污泥处理中研究应用得较多^[12]。然而 Fe^{2+} 活化过硫酸盐的研究表明^[13-14], Fe^{2+} 在反应过程中消耗速率过快,往往需要过量投加,而过量 Fe^{2+} 会淬灭 $\text{SO}_4^{\cdot-}$,导致过硫酸盐的利用率下降,且药剂的过量投加也会对污泥的后续处置产生二次污染等问题。因此,提高 Fe^{2+} 活化过硫酸盐过程中药剂的利用率、减少药剂投加量,是目前亟需解决的技术关键。

电化学氧化技术是一种绿色环保的污染物降解方法,具有清洁高效、操作简单、反应条件温和、经济节能等优点,近年来有研究者开始将其应用于污泥处理领域。曾丽等^[15]研究表明,电解可以破坏污泥中的菌胶团、释放结合水,从而有效提高污泥脱水性能;Ye等^[16]、Xu等^[17]的研究表明,在污泥预处理达到相同效果时,电解法较热解、超声、微波等方法所需要的能耗更少;Cai等^[18]采用电化学联合Fenton预处理污泥,发现电解体系能够有效促进Fenton反应产生 $\cdot\text{OH}$,进一步破解污泥EPS而释放结合水,同时还可以在阴极促进 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,

进而更新体系活化剂,降低 Fe^{2+} 的初始投加量。目前,由于电解技术在污泥脱水减量方面的研究刚刚起步,关于电解耦合 Fe^{2+} /PDS调理污泥脱水的机理尚不清晰。因此,笔者采用电解耦合 Fe^{2+} /PDS预处理剩余污泥,从改善污泥脱水效果、促进预氧化作用机制及 Fe^{2+} / Fe^{3+} 转化方面进行了详细研究。

1 材料与方法

1.1 实验原料

取天津市某污水厂沉淀池的剩余污泥,经重力浓缩后作为实验污泥,性质如下:毛细吸水时间(CST)为 (35 ± 5) s、总固体(TS)含量为 $(12\ 000\pm 10\ 000)$ mg/L、含水率为 $(98.4\pm 0.2)\%$ 、SCOD为 (122.6 ± 20) mg/L、pH为 6.87 ± 0.3 、抽滤后泥饼含水率为 $(85.1\pm 0.6)\%$ 。

实验用试剂包括:过硫酸钠、七水合硫酸亚铁、考马斯亮蓝G250、苯酚、碘化钾等,均为分析纯。

1.2 实验方法

实验用电解装置如图1所示,电极阳极为Ti/RuO₂网状电极,阴极为纯钛网状电极板,电极尺寸均为10 cm×10 cm,极板间距为3 cm。实验时,将800 mL剩余污泥装入1 L电解槽内,同时开启恒温磁力搅拌器,以150 r/min的速度连续搅拌,控制电压为0~35 V(电压梯度增量为5 V),随后向污泥样品中加入PDS(0~3 g/L)和 Fe^{2+} (0~470 mg/L),反应过程中每10 min取一次样,测定CST、泥饼含水率和上清液SCOD浓度,反应周期为50 min。对于每次测试,只改变一个反应因素。为保证实验的准确性,上述所有指标平行测试3次,最后取平均值。

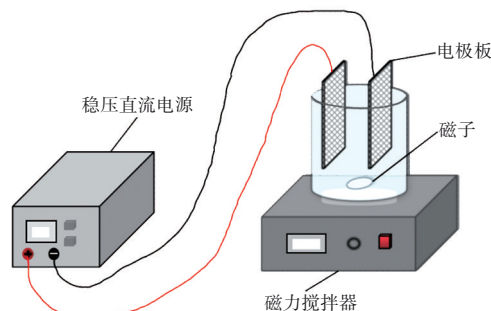


图1 电解耦合 Fe^{2+} /PDS反应装置

Fig.1 Electrolysis coupled Fe^{2+} /PDS reaction device

1.3 分析方法

SCOD采用5B-1(V8)型COD测定仪测定;CST采用DFC-10A型CST测定仪测定;泥饼含水率采用重量法测定;溶解性铁采用邻菲罗啉法测定;过硫酸盐采用改进碘量法测定;污泥EPS采用热提取法提取;三维荧光光谱(EEM)采用G9800A型三维荧光光谱仪测定;泥饼微观结构采用Nova Nano SEM 450型场发射电子显微镜(SEM)观察。

2 结果与讨论

2.1 电解时间对污泥脱水性能的影响

采用CST和泥饼含水率表征污泥脱水性能、SCOD表征污泥的溶胞效果,在电压为25 V、PDS投加量为2 g/L、 Fe^{2+} :PDS=0.4(物质的量之比)的条件下,考察了电解时间对EC/ Fe^{2+} /PDS调理污泥脱水性能的影响,结果见图2。可以看出,电解时间为30 min时污泥脱水效果最佳,此时CST和泥饼含水率均达到最小值,分别为16.6 s和74.2%,与原泥相比分别下降了58.3%和13.2%。而上清液SCOD随着电解时间的延长不断增加,在50 min时达到最大值523 mg/L。该结果表明,初始阶段随着反应时间的增加,体系中产生的自由基浓度逐渐升高,污泥絮体及细胞结构被破坏,胞内物质溶出,导致SCOD持续增加;与此同时,胞内结合水得以释放,使得污泥脱水性能提高;但当反应时间过长时,污泥絮体遭到过度破坏,污泥粒径减小,同时EPS含量增加,体系黏性增大,导致脱水性能恶化。因此,后续实验的电解时间均选择30 min。

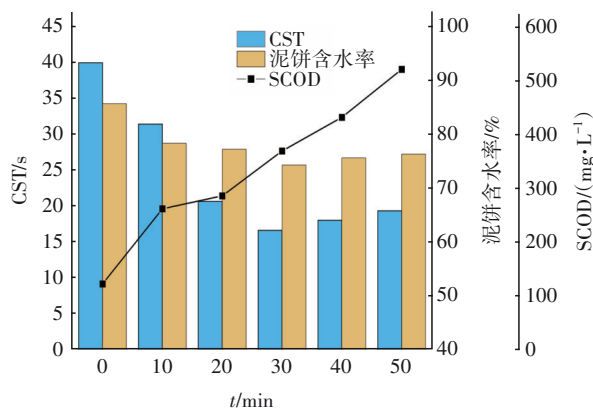


图2 电解时间对污泥脱水性能的影响

Fig.2 Effect of electrolysis time on sludge dewaterability

2.2 电解电压对污泥脱水性能的影响

在PDS投加量为2 g/L、 Fe^{2+} :PDS=0.4、电解时

间为30 min的条件下,考察电解电压对EC/ Fe^{2+} /PDS调理污泥脱水性能的影响,结果见图3。可知,在低电压条件下(≤ 10 V),污泥脱水性能和SCOD的变化均不明显,此时只产生少量自由基用于破解污泥细胞。随着电压的增大,污泥脱水性能显著提高,在电压为25 V时污泥的CST和泥饼含水率分别从原泥的33.8 s和85.4%降到13.4 s和74.2%,SCOD升至423 mg/L,表明污泥絮体被一定程度破坏,脱水性能达到最佳。随着电压的进一步增大,SCOD继续大量溶出,但脱水性能恶化。这可能是由于,一方面较高的电压会提高阳极直接氧化的能力,从而破坏污泥细胞结构^[19];另一方面,电场强度的增加会加快电子传递速率,增强体系的间接氧化作用,并且有利于 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 之间的转化,进一步促进 Fe^{2+} 对PDS的活化,产生更多 $\text{SO}_4^{\cdot-}$,最终在多种作用协同下,污泥细胞被有效破解,使得胞内物质和结合水释放,提高了污泥脱水性能。随着电压继续增大,体系的氧化能力进一步增强,在电压为35 V时SCOD达到了777.1 mg/L,但絮体结构的过度破解会产生过量细小颗粒,反而不利于其脱水^[1]。因此选择最佳电解电压为25 V。

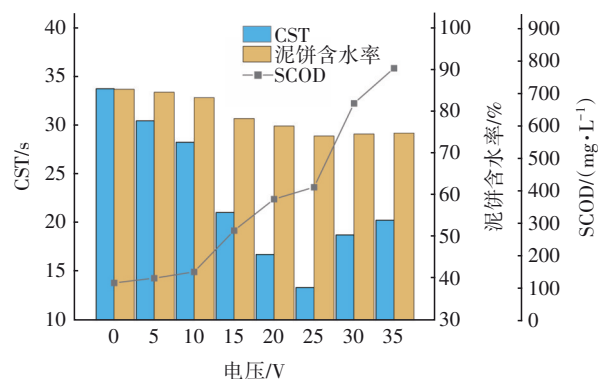


图3 电解电压对污泥脱水性能的影响

Fig.3 Effect of electrolysis voltage on sludge dewaterability

2.3 PDS投加量和 Fe^{2+} :PDS对污泥脱水的影响

在电压为25 V、电解时间为30 min、 Fe^{2+} :PDS=0.4的条件下,考察了PDS投加量对EC/ Fe^{2+} /PDS调理污泥脱水性能的影响;并在PDS投加量为2 g/L的条件下,进一步考察了 Fe^{2+} :PDS对污泥脱水性能的影响,结果见图4。由图4(a)可知,当PDS投加量为2 g/L时,污泥脱水性能最佳,此时CST和泥饼含水率分别降到9.2 s和73.2%,SCOD增至668 mg/L。

继续增大PDS投加量,污泥脱水性能变化不明显。这与Zhang等^[20]的研究结果一致,这是由于过量的PDS可能会发生自我淬灭反应而降低 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的浓度,从而减弱对污泥的氧化作用。

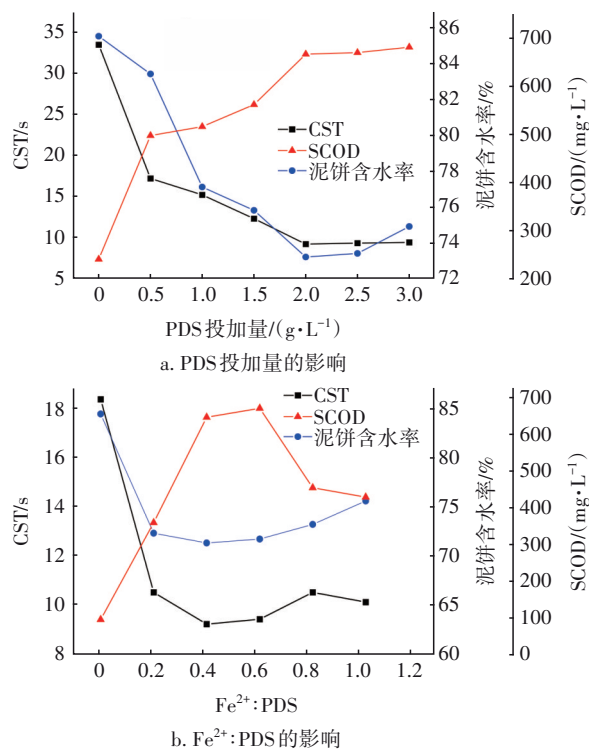


图4 PDS投加量和Fe²⁺:PDS对污泥脱水性能的影响

Fig.4 Effect of PDS dosage and molar ratio of Fe²⁺ to PDS on sludge dewaterability

图4(b)显示,随着Fe²⁺:PDS值的增加,污泥CST和泥饼含水率迅速下降,SCOD迅速升高,在Fe²⁺:PDS=0.4时,污泥脱水性能最佳,此时CST和泥饼含水率分别降至9.2 s和71.3%,SCOD为644.3 mg/L。随着Fe²⁺:PDS值的进一步增加,CST和泥饼含水率略有升高,而SCOD迅速下降。这是由于随着Fe²⁺:PDS值的增加,体系中Fe²⁺含量增加,而过量Fe²⁺对 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 有淬灭作用,导致活性物质被消耗,体系氧化能力降低,宏观表现为SCOD值降低,污泥脱水性能变差。该反应体系中,最佳Fe²⁺:PDS值为0.4,远低于理论值1。而Wei等^[21]和Zhen等^[3]的研究得出,在采用Fe²⁺/PDS调理剩余污泥时最佳物质的量之比分别为1.1和1.25,表明采用电解耦合Fe²⁺活化PDS可以有效降低Fe²⁺的投加量。

2.4 电解过程中铁离子的循环与PDS的消耗

为了研究EC/Fe²⁺/PDS体系中Fe²⁺的转化与循环利用特性,测定了电解过程中溶解性总铁、Fe²⁺及

PDS的消耗情况,并与Fe²⁺/PDS体系进行了对比,结果见图5所示。

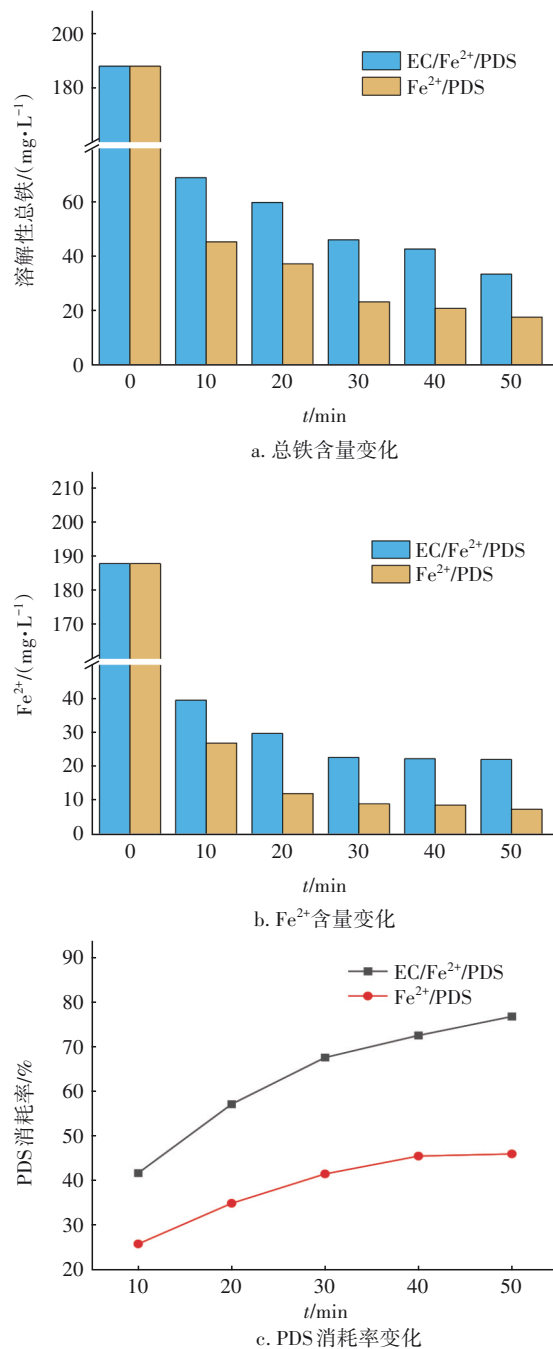


图5 EC/Fe²⁺/PDS体系中溶解性铁与PDS的消耗

Fig.5 Consumption of dissolved iron and PDS in EC/Fe²⁺/PDS system

从图5(a)和(b)可以看出,反应10 min后,两种体系中的溶解性总铁及Fe²⁺含量均迅速降低,其中在EC/Fe²⁺/PDS体系中分别降为69.2和39.2 mg/L,而在Fe²⁺/PDS体系中下降更为明显,分别达到45.5和26.9 mg/L。这主要是因为,反应开始时部分Fe²⁺

迅速用于活化PDS,同时产生 Fe^{3+} ,随后 Fe^{3+} 以羟基铁、铁氧化物或氢氧化物形式沉淀,转移到固相中,从而导致总铁及 Fe^{2+} 含量降低。此外,通过对比图5(c)可知,反应10 min后,两种体系中 Fe^{2+} 较初始值的降低率(EC/ Fe^{2+} /PDS:79%, Fe^{2+} /PDS:86%)均远大于PDS的消耗率(EC/ Fe^{2+} /PDS:41.72%, Fe^{2+} /PDS:25.94%),表明反应过程中存在部分 Fe^{2+} 的损失。这主要是因为,反应开始时体系pH呈中性,部分 Fe^{2+} 在溶液中迅速被氧化形成 Fe^{3+} ,进而转移至固相。此后,随着反应时间的延长,总铁及 Fe^{2+} 含量缓慢降低,反应30 min后,两个体系中 Fe^{2+} 含量均达到相对稳定状态,其中EC/ Fe^{2+} /PDS体系中的 Fe^{2+} 含量是 Fe^{2+} /PDS体系中 Fe^{2+} 含量的2.5倍。该结果表明,反应过程中,在外电场作用下产生的电子可以传递给 Fe^{3+} ,并将其还原为 Fe^{2+} ,从而促进了 Fe^{2+} 的循环利用^[18]。同时,图5(c)结果显示,反应30 min时EC/ Fe^{2+} /PDS体系中PDS的消耗率(67.42%)远大于 Fe^{2+} /PDS体系中PDS的消耗率(41.50%),表明EC/ Fe^{2+} /PDS中产生的 Fe^{2+} 可持续参与催化PDS并产生活性物种,大大提高了PDS和 Fe^{2+} 的利用效率和体系的氧化能力。

2.5 EPS的变化

EPS主要成分是蛋白质和多糖,包括紧密结合型EPS(TB-EPS)、松散结合型EPS(LB-EPS)和溶解性EPS(S-EPS)三部分,各组分的含量对污泥脱水性能有很大影响。采用EC/ Fe^{2+} /PDS调理污泥时,各EPS组分中蛋白质和多糖含量随反应时间的变化见图6。可以看出,原污泥中蛋白质和多糖主要分布在TB-EPS中,S-EPS中的含量次之,LB-EPS中含量最少。经过调理后,TB-EPS和S-EPS中的蛋白质含量均呈下降趋势,而LB-EPS中的蛋白质含量变化趋势不明显,蛋白质总量随时间呈下降趋势。这主要由于在电解和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 氧化的共同作用下,蛋白质类物质被氧化分解为小分子物质或直接被矿化^[2]。经EC/ Fe^{2+} /PDS调理30 min后,TB-EPS中的蛋白质含量由初始的114.45 mg/L降到79.91 mg/L,此时污泥脱水性能得到明显改善,表明TB-EPS中的蛋白质不利于污泥脱水。与蛋白质的变化相反,多糖总量随反应时间逐渐上升,其中S-EPS中的多糖含量上升明显,而TB-EPS中的多糖含量缓慢下降,LB-EPS中的多糖含量总体呈增加趋势。该结果表明,反应过程中内层TB-EPS中的多糖被释放

并转移至LB-EPS和S-EPS。蛋白质和多糖的变化规律在热活化过硫酸盐氧化体系^[22]与二价铁活化PMS体系^[23]中也出现了类似的结果。

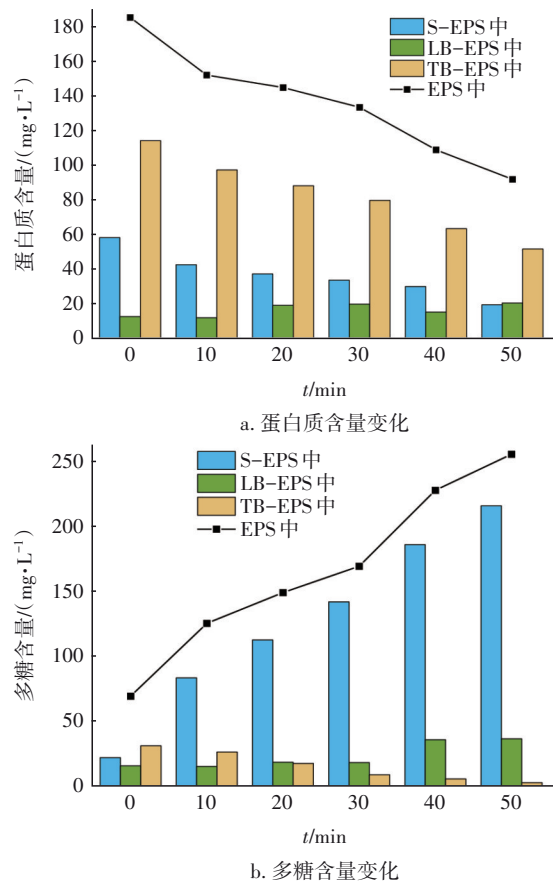


图6 污泥EPS不同组分中蛋白质和多糖含量随电解时间的变化

Fig.6 Change of protein and polysaccharide contents in different components of sludge EPS with electrolysis time

以上研究表明,EPS从污泥表面剥离、溶出有利于释放污泥中的结合水,提高污泥脱水性能,但当EPS过量增加时,由于EPS的高度亲水和黏性,会增加体系黏度,反而会导致污泥脱水性能恶化。因此,进一步采用多项式对EPS及其各组分与CST下降率之间进行相关性分析,结果见图7。由图7(a)可知,EPS和CST下降率之间的相关性较显著($R^2=0.96$),CST下降率随着EPS的增加先升高后下降,在EPS含量为320 mg/L时,污泥理论脱水性能最佳。因此,在调理污泥过程中,应控制EPS溶出量不超过该理论值。图7(b)的结果显示,S-EPS和TB-EPS与CST下降率具有较好的线性相关性,对应的 R^2 值分别为0.73和0.85。其中,TB-EPS与CST下降率呈负相关性,S-EPS与CST下降率呈正相关性。该

结果表明, TB-EPS的破解会使有机质释放到上清液中, 增加污泥的S-EPS含量, 这种转化减缓了泥饼堵塞, 促进了水分去除^[24]。

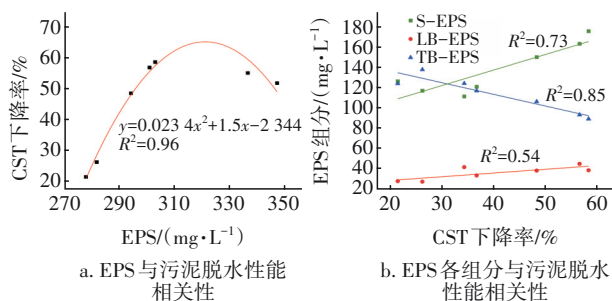


图7 污泥EPS及其各组分含量与污泥脱水性能相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between EPS and its components content and sludge dewaterability

2.6 EPS的三维荧光光谱分析

三维荧光光谱技术可以用来检测污泥EPS中化合物的荧光特性, 用以探讨污泥脱水机理。污泥调理前后S-EPS、LB-EPS和TB-EPS的荧光光谱如图8所示。可知, 原污泥的S-EPS中主要识别出3个峰, 其激发波长/发射波长($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$)分别为227~230 nm/355~357 nm(A峰)、340~350 nm/420~450 nm(C峰)、240 nm/480 nm(D峰), 原污泥的LB-EPS中主要识别出A峰和C峰, TB-EPS中可以识别出A峰、B峰($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$ 为280 nm/352~360 nm)、C峰和D峰。其中A峰主要与类蛋白质物质有关, 与原污泥中存在大量蛋白质类物质的结果一致; B峰主要与可溶性微生物代谢产物(SMP)有关; C峰和D峰主要与类腐殖酸和类黄腐酸物质有关^[25]。

经过EC/Fe²⁺/PDS调理后, EPS各组分中均识别出4个荧光强度较低的峰, $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$ 分别为223~228 nm/307~320 nm(A峰)、279~282 nm/352~356 nm(B峰)、346~350 nm/443~450 nm(C峰)、270~275 nm/446~450 nm(D峰)。其中, TB-EPS中的4个峰值强度均降低, 而与原污泥相比, S-EPS中增加了B峰, LB-EPS中增加了B峰和D峰, 表明TB-EPS中的SMP、类腐殖酸和类黄腐酸物质被氧化并转移至外层EPS中。各组分EPS的A峰和TB-EPS中的B峰出现了不同程度的蓝移, 表明荧光团中羟基、羰基、烷氧基、氨基和羧基官能团在SO₄²⁻的氧化作用下被部分消除, 使聚合物骨架上的连接断裂, 破坏了EPS及细胞的结构, 从而释放结合水、提高污泥脱水性能^[26]。此外, 经调理后污泥各组分中的A峰强度都

明显降低, TB-EPS中A峰强度由166降为80.9、LB-EPS中A峰强度由93.8降为53.2、S-EPS中A峰强度由56降为10.7, 这是EPS中荧光物质被氧化的表现^[26], 说明EC/Fe²⁺/PDS体系的电解作用及产生的SO₄²⁻能有效降解上清液中的类蛋白质物质, 进而使污泥脱水性能提高。

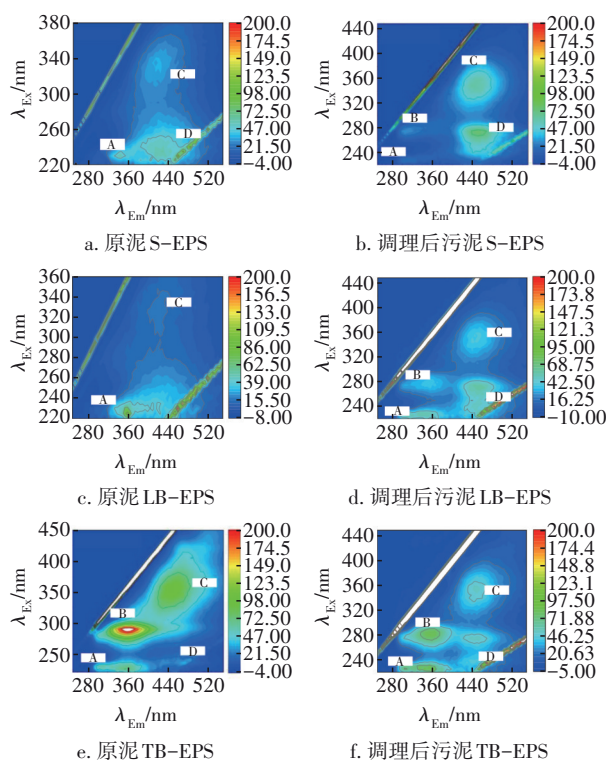


图8 原泥和经EC/Fe²⁺/PDS调理后污泥S-EPS、LB-EPS和TB-EPS的三维荧光光谱

Fig.8 EEM of S-EPS, LB-EPS and TB-EPS of raw sludge and sludge conditioned by EC/Fe²⁺/PDS

2.7 污泥微观形貌的变化

分别对原污泥和经EC/Fe²⁺/PDS调理30 min后的污泥进行SEM分析(放大5 000倍), 结果见图9。

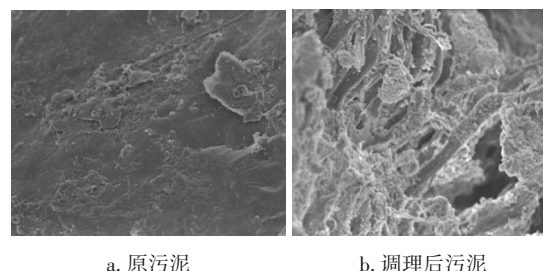


图9 EC/Fe²⁺/PDS调理前后污泥的SEM图像

Fig.9 SEM images of sludge before and after EC/Fe²⁺/PDS conditioning

从图9(a)可以看出,原始污泥的表面圆润光滑,质地紧密,这样的结构中存在较多团状菌胶团,不利于污泥絮体中结合水的释放,脱水性能较差。图9(b)显示,经预处理后,污泥表面被刻蚀,出现塌陷孔洞和裂隙,原本结构紧致的絮体被破坏为松散状,这种结构有利于结合水的释放和排水,从而提高污泥脱水性能。

3 结论

① 电解耦合 Fe^{2+} /PDS调理污泥可显著提高污泥的脱水性能,在电解电压为25 V、电解时间为30 min、PDS投加量为2 g/L、 Fe^{2+} :PDS=0.4的条件下,污泥CST和泥饼含水率分别比原污泥下降了58.3%和13.2%。该体系中 Fe^{2+} :PDS值远低于理论值,大大减少了药剂投加量。

② 在外加电场的作用下,EC/ Fe^{2+} /PDS耦合体系可以促进 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 的循环,提高了 Fe^{2+} 的利用率,同时也提高了PDS的利用率。

③ EC/ Fe^{2+} /PDS体系可有效破解污泥絮体结构和EPS,降低TB-EPS中的蛋白质含量,并促进多糖类物质从TB-EPS向S-EPS转移。CST下降率与TB-EPS呈负相关性,与S-EPS呈正相关性,且随着EPS总量的增加先升高后降低,在EPS含量为320 mg/L时,理论脱水性能最佳。EEM分析结果表明,TB-EPS中的蛋白质类物质、SMP、类腐殖酸等物质可以被氧化并转移至LB-EPS和S-EPS中。

参考文献:

- [1] 于晓艳,王润娟,支苏丽,等.胞外聚合物对生物污泥电渗透脱水特性的影响[J].中国给水排水,2012,28(15):1-5.
YU Xiaoyan, WANG Runjuan, ZHI Suli, *et al.* Influence of extracellular polymeric substance on electroosmotic dewatering behavior of biological sludge [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(15): 1-5 (in Chinese).
- [2] 薛茂. $\text{Fe}(\text{II})$ -过硫酸盐调理污泥过程中EPS亲疏水组成的影响与调控[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
XUE Mao. Effect and Regulation of Hydrophobic/Hydrophilic Composition of EPS in the Process of Fe^{2+} Activated Persulfate Conditioning Sludge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).
- [3] ZHEN G, LU X, SU L, *et al.* Unraveling the catalyzing behaviors of different iron species (Fe^{2+} vs. Fe^0) in activating persulfate-based oxidation process with implications to waste activated sludge dewaterability [J]. Water Research, 2018, 134: 101-114.
- [4] 郭绍东,李晨曦,黄兴虎,等.次氯酸钠与亚铁对污泥破解及脱水效果的影响[J].环境科学学报,2021,41(8):3130-3137.
GUO Shaocong, LI Chenxi, HUANG Xinghu, *et al.* Effects of sodium hypochlorite and ferrous iron on sludge disintegration and dewatering [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(8): 3130-3137 (in Chinese).
- [5] LAN B B, JIN R F, LIU G F, *et al.* Improving waste activated sludge dewaterability with sodium periodate pre-oxidation on extracellular polymeric substances [J]. Water Environment Research, 2021, 93(9): 1680-1689.
- [6] LIU C G, WU B, CHEN X E. Sulfate radical-based oxidation for sludge treatment: a review [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 335: 865-875.
- [7] WANG G J, GE D D, BAI L, *et al.* Insight into the roles of electrolysis-activated persulfate oxidation in the waste activated sludge dewaterability: effects and mechanism [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 297: 113342.
- [8] 曾晓岚,汤红亮,张玉,等.热活化过硫酸钠氧化甲基紫的研究[J].环境工程,2018,36(5):54-57.
ZENG Xiaolan, TANG Hongliang, ZHANG Yu, *et al.* Study on oxidizing methyl violet by heat activated sodium persulfate [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(5): 54-57 (in Chinese).
- [9] NORZAE S, BAZRAFASHAN E, DJAHED B, *et al.* UV activation of persulfate for removal of penicillin G antibiotics in aqueous solution [J]. The Scientific World Journal, 2017, 2017: 1-6.
- [10] MATZEK L W, CARTER K E. Activated persulfate for organic chemical degradation: a review [J]. Chemosphere, 2016, 151: 178-188.
- [11] 刘子乐,曾泽泉,杨洁杨,等.表面改性活性炭活化过硫酸盐降解苯酚[J].高等学校化学学报,2017,38(7):1241-1248.
LIU Zile, ZENG Zequan, YANG Jieyang, *et al.* Degradation of phenol with persulfate activated by surface modified activated carbon [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2017, 38(7): 1241-1248 (in Chinese).
- [12] FAN X, WANG Y, ZHANG D, *et al.* Effects of acid,

- acid-ZVI/PMS, Fe(II)/PMS and ZVI/PMS conditioning on the wastewater activated sludge (WAS) dewaterability and extracellular polymeric substances (EPS) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 91(5): 73–84.
- [13] 占鹏, 孙微, 廖小龙, 等. Fe⁰活化氧化体系处理垃圾渗滤液实验研究[J]. *水处理技术*, 2019, 45(12): 37–41.
- ZHAN Peng, SUN Wei, LIAO Xiaolong, *et al.* Experimental study on landfill leachate treatment by Fe⁰ activated oxidation system [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(12): 37–41 (in Chinese).
- [14] LIU L Y, YAN H, YANG C, *et al.* Dewatering of drilling sludge by ultrasound assisted Fe(II)-activated persulfate oxidation [J]. *RSC Advances*, 2018, 8: 29756–29766.
- [15] 曾丽, 杨波, 蒋超金, 等. 采用Ti/PbO₂阳极氧化进行污泥预处理的研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1382–1387.
- ZENG Li, YANG Bo, JIANG Chaojin, *et al.* Study on the pretreatment of municipal sludge by the electrooxidation with Ti/PbO₂ anode [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1382–1387 (in Chinese).
- [16] YE C H, YUAN H P, DAI X H, *et al.* Electrochemical pretreatment of waste activated sludge: effect of process conditions on sludge disintegration degree and methane production [J]. *Environmental Technology*, 2016, 37(22): 2935–2944.
- [17] XU J B, YUAN H P, LIN J X, *et al.* Evaluation of thermal, thermal-alkaline, alkaline and electrochemical pretreatments on sludge to enhance anaerobic biogas production [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(5): 2531–2536.
- [18] CAI M Q, WANG Q, WELLS G, *et al.* Improving dewaterability and filterability of waste activated sludge by electrochemical Fenton pretreatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 525–536.
- [19] SHA L, YU X Y, ZHANG Y X, *et al.* Investigation on the variations of sludge water holding capacity of electro-dewatering process [J]. *Environmental Research*, 2020, 190: 110011.
- [20] ZHANG Y P, LI T T, TIAN J Y, *et al.* Enhanced dewaterability of waste activated sludge by UV assisted ZVI-PDS oxidation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 113: 152–164.
- [21] WEI L L, XIA X H, ZHU F Y, *et al.* Dewatering efficiency of sewage sludge during Fe²⁺-activated persulfate oxidation: effect of hydrophobic/hydrophilic properties of sludge EPS [J]. *Water Research*, 2020, 181: 115903.
- [22] KIM M S, LEE K M, KIM H E, *et al.* Disintegration of waste activated sludge by thermally-activated persulfates for enhanced dewaterability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(13): 7106–7115.
- [23] LIU C G. Enhancement of dewaterability and heavy metals solubilization of waste activated sludge conditioned by natural vanadium-titanium magnetite-activated peroxymonosulfate oxidation with rice husk [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359: 217–224.
- [24] 李洁. 电解强化剩余污泥脱水及机理研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- LI Jie. The Study on Improving Excess Sludge Dewaterability by Eletrolysis [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018 (in Chinese).
- [25] ZHEN G Y, LU X Q, WANG B Y, *et al.* Synergetic pretreatment of waste activated sludge by Fe(II)-activated persulfate oxidation under mild temperature for enhanced dewaterability [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 124: 29–36.
- [26] LIU J, YANG Q, WANG D B, *et al.* Enhanced dewaterability of waste activated sludge by Fe(II)-activated peroxymonosulfate oxidation [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 206: 134–140.

作者简介: 何妙琳(1996–), 女, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 研究方向为污泥脱水减量处理。

E-mail: 1585822714@qq.com

收稿日期: 2021-12-10

修回日期: 2022-03-05

(编辑: 刘贵春)