

Fe⁰/H₂O₂ 类芬顿法提高污泥脱水性能及机理分析

王丽苹^{1,3,4}, 李平^{1,2,3,4*}, 木合塔尔·吐尔洪², 冯涛^{1,3,4}, 吴静^{1,3,4}, 吴锦华^{1,3,4}

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广东 广州 510006;

2. 喀什大学新疆生物类固废资源化工程技术研究中心, 新疆 喀什 844000;

3. 华南理工大学污染控制与生态修复广东省普通高等学校重点实验室, 广东 广州 510006;

4. 华南理工大学固体废物处理与资源化广东省环境保护重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要:以污泥比阻降低率和泥饼含水率为评价指标, 采用 Fe⁰/H₂O₂ 类芬顿法提高污泥脱水性能, 研究初始 pH、Fe⁰ 投加量、H₂O₂ 投加量对污泥脱水性能的影响, 并探究其调理机理。结果表明, 当初始 pH 为 2.5, Fe⁰、H₂O₂ 投加量分别为 750、20 mg/g TS 时, 污泥比阻降低率为 93.7%, 泥饼含水率为 73%, 零价铁回收率为 98.3%。Fe⁰ 重复利用 10 次后, 比阻降低率仍能保持在 90% 以上。类芬顿法能够有效降解污泥胞外聚合物, 破坏其絮体结构, 导致污泥粒径减小, 并释放部分结合水, 从而有效改善污泥脱水性能。

关键词: 零价铁; 过氧化氢; 类芬顿; 污泥; 脱水性能

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)12-0119-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.12.026

Improving dewaterability of waste activated sludge by Fe⁰/H₂O₂ Fenton-like process and its mechanism

WANG Li-ping^{1,3,4}, LI Ping^{1,2,3,4*}, TUERHONG Muhetaer², FENG Tao^{1,3,4},

WU Jing^{1,3,4}, WU Jin-hua^{1,3,4}

(1. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters of the Ministry of Education, School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Xinjiang Engineering Research Center for Utilization of Biomass Solid Wastes, Kashi University, Kashi 844000, China; 3. Key Laboratory of Pollution Control and Ecological Restoration of Guangdong Higher Education Institutes, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 4. Guangdong Environmental Protection Key

Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A Fenton-like method based on combining zero-valent iron (ZVI) and hydrogen peroxide (HP) is applied to improve the dewaterability of waste activated sludge (WAS). The effects of initial pH, the dosages of Fe⁰ and H₂O₂ on the dewatering performance and mechanism of sludge are investigated through using specific resistance to filtration (SRF) reduction rate and water content of sludge cake as evaluation indexes. The results show that the optimal values for H₂O₂, Fe⁰ and initial pH are 20 mg·g⁻¹ TS, 750 mg·g⁻¹ TS and 2.5 respectively. Under optimal conditions, SRF reduction rate achieves 93.7%, water content in sludge cake is 73% and the recovery rate of zero-valent iron achieves 98.3%. Furthermore, SRF reduction rate of sludge remains more than 90% after 10 times reuse of Fe⁰. Fenton-like Fe⁰/H₂O₂ process can degrade effectively extracellular polymeric substances (EPS) of sludge and destroy sludge flocs, so that sludge particle sizes become smaller and bound water is released from sludge aggregates, which thereby improving effectively the dewaterability of sludge.

Key words: zero-valent iron; hydrogen peroxide; Fenton-like; sludge; dewaterability

活性污泥法广泛应用于城市污水处理, 同时大量的剩余污泥也随之产生。根据住房和城乡建设部公布的数据, 截止到 2016 年 9 月底, 我国污泥年产量超过 4 000 万 t, 并以每年 10% 的速度增长, 预计

2020—2050 年间, 我国污泥年产量将突破 6 000 万 t (以含水率 80% 计)^[1]。污水处理厂污泥含水率在 99% 以上, 经过浓缩或机械脱水后, 含水率仍在 80% 以上, 高含水率伴随着污泥体积庞大、运输成本高、

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-10-14

基金项目: 广东省科技发展专项资金项目(2017B020247025); 广东省应用型科技研发专项资金项目(2016B020240005)

作者简介: 王丽苹(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制, 3311068350@qq.com; 李平(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为环境生物技术, 通讯联系人, pli@scut.edu.cn。

占用处理场地大以及处理处置困难等问题。因此,提高污泥脱水效率已成为污水处理乃至环境科学技术领域的重要课题。

胞外聚合物(EPS)通过高度水合作用将大量水分束缚在絮体结构中是导致污泥脱水困难的重要因素^[2-4]。目前污泥调理技术有生物沥浸^[5]、热处理^[5]、超声法^[7]、酸碱调理^[8]、氧化法^[9]等。其中以 Fe^{2+} 为催化剂的传统芬顿法能够有效破坏污泥絮体结构进而改善污泥脱水性能^[10]。但是传统芬顿法具有铁盐投加大、不能重复利用等不足,导致其应用受到限制^[11-12]。相比 Fe^{2+} , Fe^0 具有稳定性好、来源广泛、成本低、回收方便、环境友好等优点,能够代替 Fe^{2+} 发生类芬顿反应^[13-14]。Xu等^[15]首次证明 Fe^0 联合 H_2O_2 可以有效提高污泥脱水性能,最大毛细吸水时间降低率为50%,相比传统芬顿法, $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ 法处理成本可节省60%。Wang等^[16]采用 Fe^0 联合 H_2O_2 调理厌氧消化污泥,在最佳调理条件下,毛细吸水时间降低率为90%。 $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ 类芬顿法应用于改善污泥脱水的报道很少,而且研究结果差异性较大,催化剂 Fe^0 的重复利用尚未见报道。因此,笔者采用 $\text{Fe}^0/\text{H}_2\text{O}_2$ 类芬顿法调理污泥,以污泥比阻和泥饼含水率为指标,探究pH、 Fe^0 投加量、 H_2O_2 投加量对污泥脱水性能的影响,研究铁离子溶出情况和零价铁回收效率,考察零价铁重复利用处理效果,并结合EPS含量变化、结合水含量、平均粒径等指标探讨脱水机理,为类芬顿法的实际应用奠

定基础。

1 材料与方法

1.1 供试污泥与试剂

实验污泥取自广州市沥滘污水处理厂浓缩池污泥,用10目筛网过筛,置于4℃冰箱内保存,污泥基本性质如表1所示;100目 Fe^0 、30%浓硫酸(H_2SO_4)、30%过氧化氢(H_2O_2)等试剂均为分析纯。

表1 污泥基本性质

含水率/ %	pH	SRF/ ($\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TS/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	TSS/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	VSS/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
96.6	6.4	19.7×10^{12}	34.2	33.4	14.8

1.2 实验方法

取200 mL污泥置于烧杯中,调节污泥pH,依次加入 Fe^0 、 H_2O_2 ,快速搅拌,置于水浴恒温振荡器上以140 r/min的速度振荡,反应温度为30℃,反应60 min,反应结束后用磁铁将铁粉与污泥分离,测定各项指标。将分离出来的铁粉用蒸馏水快速冲洗干净,按照上述方法进行零价铁重复利用实验。

1.3 分析方法与主要仪器

采用布氏漏斗法测定污泥比阻^[17];采用示差扫描量热仪(STA449F3型,德国生产)测定污泥结合水的含量^[18];粒径分布采用激光粒径分析仪(LA-960S型,日本生产)进行测定;pH使用pH计(雷磁pHS-3C,中国生产)测定;EPS提取采用改进的热

(上接第118页)

- [13] 韩子旭,安立宝,张鹏.通电降低碳纳米管接触电阻的正交试验研究[J].化工新型材料,2015,(11):126-128.
- [14] 张会平,叶李艺,杨立春.化学活化法制备活性炭的正交试验分析[J].化工科技,2004,12(2):36-39.
- [15] 孔双祥,胥光申,巨孔亮,等.基于多指标正交试验设计的SLS快速成型工艺参数优化[J].轻工机械,2017,35(1):30-35.
- [16] Yi M J,Byun S H,Ha C S,et al.Copolymerization of cyclohexene oxide with carbon dioxide over nano-sized multi-metal cyanide catalysts[J].Solid State Ionics,2004,172(1):139-144.
- [17] Guerin W,Diallo A K,Kirilov E,et al.Enantiopure isotactic PCHC synthesized by ring-opening polymerization of cyclohexene carbonate[J].Macromolecules,2014,47(13):4230-4235.
- [18] Comin E,Souza R F D,Bernardo-Gusmão K.Effect of imidazolium ionic liquids anions on copolymerization of CO_2 with cyclohexene oxide by Cr^{III} (Salen)Cl[J].Catalysis Today,2017,289:115-120.
- [19] Kitamura T,Inoue Y,Maeda T,et al.Convenient synthesis of ethylene carbonates from carbon dioxide and 1,2-diols at atmos-

pheric pressure of carbon dioxide[J].Cheminform,2016,47(19):39-45.

- [20] Lukaszczyk J,Jaszcz K.Studies on copolymerization of succinic anhydride and allyl glycidyl ether[J].Reactive & Functional Polymers,2000,43(1):25-32.
- [21] Motaung T E,Luyt A S,Saladino M L,et al.Study of morphology, mechanical properties, and thermal degradation of polycarbonate-titanium nanocomposites as function of titania crystalline phase and content[J].Polymer Composites,2013,34(2):164-172.
- [22] Abdl Reheem A M,Atta A,Abdel Maksoud M I A.Low energy ion beam induced changes in structural and thermal properties of polycarbonate[J].Radiation Physics & Chemistry,2016,127:269-275.
- [23] Kumar V,Sonkawade R G,Dhaliwal A S.High electronic excitation induced modifications by 100 MeV O^{7+} and 150 MeV Ni^{11+} ions in Makrofol KG polycarbonate film[J].Nuclear Instruments & Methods in Physics Research,2012,287(3):4-9.
- [24] 张春梅,樊国栋,杨海燕,等.IPDI/PEG-800扩链改性PLA的性能表征[J].塑料科技,2010,38(10):45-49.■

提取法进行测定^[19];蛋白质采用考马斯亮蓝法进行测定;多糖采用硫酸-蒽酮法进行测定。铁离子浓度采用邻菲罗啉分光光度法测定^[20];TS、TSS、TVS、含水率采用国家标准进行测定^[21]。

1.4 数据分析方法

污泥比阻降低率计算式为^[22]:

$$\text{比阻降低率} = [(SRF_0 - SRF) / SRF_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中:SRF₀为未处理污泥比阻,m/kg;SRF为处理后污泥比阻,m/kg。

铁回收率的计算式为^[15]:

$$ZVI_R = [(Iron_0 + ZVI_0 - Iron_e) / ZVI_0] \times 100\% \quad (2)$$

式中:ZVI_R为零价铁回收率,%;Iron₀为原污泥铁离子质量浓度,mg/L;ZVI₀为Fe⁰质量浓度,mg/L;Iron_e为Fe⁰分离后污泥铁离子质量浓度,mg/L。

2 结果与分析

2.1 不同处理体系脱水性能比较

经多次预实验后,在初始pH为2.5,Fe⁰、H₂O₂投加量分别为750、20 mg/g TS条件下,考察酸处理、H⁺/Fe⁰、H⁺/H₂O₂、H⁺/Fe⁰/H₂O₂ 4种处理体系对污泥脱水性能的影响,结果如图1所示。由图1可以看出,酸处理、H⁺/Fe⁰、H⁺/H₂O₂、H⁺/Fe⁰/H₂O₂ 4种体系的污泥比阻降低率分别为50.3%、32.1%、74.8%、93.7%。酸处理可以改善污泥脱水性能。H⁺/Fe⁰处理后污泥脱水性能改善程度低于单独酸处理,导致这种现象出现的原因是零价铁的加入会消耗一部分的H⁺。在酸性条件下,H₂O₂具有强氧化性,对污泥脱水性能有一定的提高。H⁺/Fe⁰/H₂O₂体系的脱水效果明显优于其他体系,污泥比阻降低率达到93.1%,泥饼含水率从原污泥的91.6%降低到73%,说明Fe⁰/H₂O₂类芬顿体系可以有效改善污泥脱水性能。

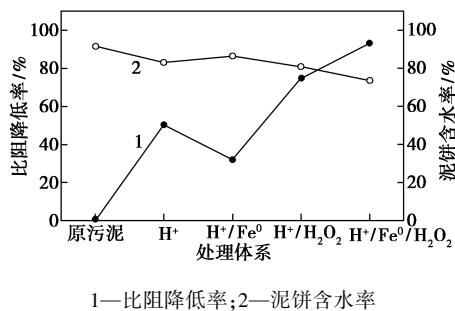
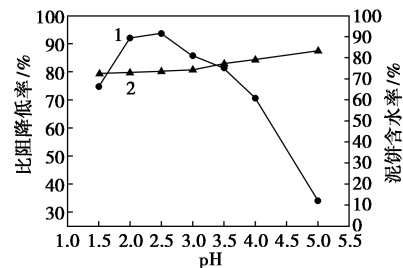


图1 不同处理体系对污泥脱水性能的影响

2.2 初始pH对污泥脱水性能的影响

pH是影响类芬顿反应的重要因素。在H₂O₂投加量为20 mg/g TS、Fe⁰投加量为750 mg/g TS条

件下,考察不同初始pH对污泥脱水性能的影响,结果如图2所示。由图2可以看出,污泥比阻降低率随pH的降低呈先增后减的趋势,当pH从5.0降到2.5,比阻降低率从34%升高到93.7%;当pH继续降低,比阻降低率逐渐减小至74.7%,说明pH为2.0~2.5更有利于改善污泥脱水性能。当pH较高时,Fe⁰不能顺利转化成Fe²⁺,且H₂O₂会分解生成O₂和H₂O,降低了H₂O₂生成·OH的效率^[23]。pH较低时,过量的H⁺与H₂O₂反应形成H₃O₂⁺,降低了H₂O₂的有效利用率,从而降低了整个体系的氧化能力^[24]。当pH从5.0降低到1.5,泥饼含水率由83.3%降低到72.4%,但当pH小于3.0时,pH对泥饼含水率的影响并不明显。考虑处理成本及比阻降低程度,初始pH确定为2.5。

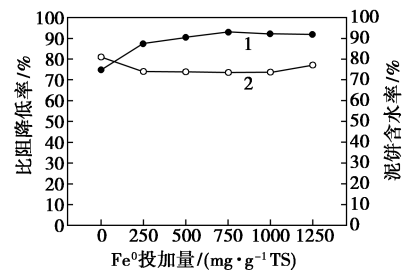


1—比阻降低率;2—泥饼含水率

图2 初始pH对污泥脱水性能的影响

2.3 Fe⁰投加量对污泥脱水性能的影响

根据类芬顿法反应机理,Fe⁰不断与酸反应生成Fe²⁺,而Fe²⁺对于·OH的产生具有重要影响,因此考察在H₂O₂投加量为20 mg/g TS、pH为2.5条件下,Fe⁰投加量对污泥脱水性能的影响,结果如图3所示。由图3可以看出,污泥比阻降低率随着投加量的增加呈现先增加后降低的趋势,Fe⁰由0 mg/g TS增加到750 mg/g TS,比阻降低率由74.8%升高到93.7%,Fe⁰投加量继续增加,比阻降低率略有降低。Fe⁰不足时,增加其投加量,即增加了Fe²⁺浓度和羟基自由基的产生量,有利于胞外聚合物的氧化;



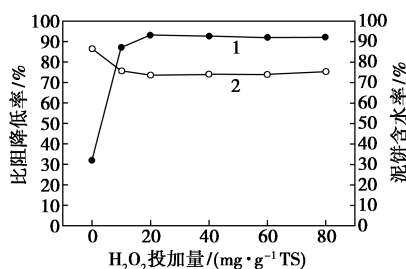
1—比阻降低率;2—泥饼含水率

图3 Fe⁰投加量对污泥脱水性能的影响

随着 Fe⁰ 投加量的继续增加, Fe⁰ 溶出大量的 Fe²⁺, 过量的 Fe²⁺ 会与 ·OH 反应, 消耗 ·OH, 导致氧化能力下降^[25]。零价铁投加量对泥饼含水率的影响并不明显, 基本维持在 73% 左右。因此, Fe⁰ 最佳投加量为 750 mg/g TS, 此时污泥脱水性能达到最佳。

2.4 H₂O₂ 投加量对污泥脱水性能的影响

H₂O₂ 是羟基自由基的主要来源, 是影响类芬顿反应效率的重要因素, 在 Fe⁰ 投加量为 750 mg/g TS、初始 pH 为 2.5 条件下, 考察了 H₂O₂ 投加量对污泥脱水性能的影响, 结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, H₂O₂ 投加量从 0 mg/g TS 增加到 20 mg/g TS 时, 比阻降低率从 32.1% 快速升高到 93.7%; 当 H₂O₂ 投加量大于 20 mg/g TS 时, 比阻降低率略有降低。原因是: 当 H₂O₂ 不足时, 随着 H₂O₂ 投加量增加, H₂O₂ 与 Fe²⁺ 接触几率增加, 能产生更多的 ·OH, 提高体系氧化能力, 从而提高污泥脱水性能; 当 H₂O₂ 过量时, 多余的 H₂O₂ 会捕获 ·OH 生成 O₂, 降低 H₂O₂ 的有效利用率, 结果表现为氧化能力下降^[26]。从图 4 中也可以看出, H₂O₂ 的存在能够降低泥饼含水率, 含水率从 H₂O₂ 投加量为 0 mg/g TS 时的 86.5% 降低到 H₂O₂ 投加量为 20 mg/g TS 时的 73%, 继续增大 H₂O₂ 投加量对泥饼含水率的影响并不明显。因此, H₂O₂ 的最佳投加量为 20 mg/g TS。



1—比阻降低率; 2—泥饼含水率

图 4 H₂O₂ 投加量对污泥脱水性能的影响

2.5 铁离子的溶出与零价铁重复利用

在初始 pH 为 2.5 和 Fe⁰、H₂O₂ 投加量分别为 750、20 mg/g TS 条件下, 探究了总铁离子质量浓度和 Fe²⁺ 质量浓度随反应时间的变化情况, 结果如图 5 所示。总铁离子和 Fe²⁺ 质量浓度随着反应时间的增加而逐渐增加, 反应 60 min 后, 滤液总铁离子质量浓度为 449 mg/L, 其中 Fe²⁺ 质量浓度为 403.5 mg/L, 零价铁回收率为 98.3%, 说明在类芬顿法处理过程中始终存在高浓度的 Fe²⁺, 有利于催化 H₂O₂ 生成羟基自由基。

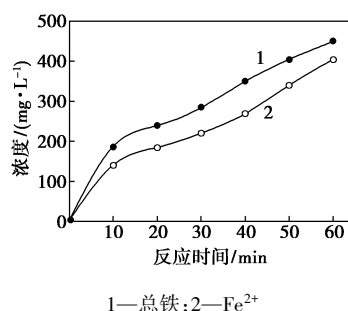


图 5 铁离子与 Fe²⁺ 质量浓度随时间的变化情况

Fe⁰ 的重复利用直接影响类芬顿法的处理成本。在最佳处理条件下, 考察了 Fe⁰ 重复利用次数对污泥比阻降低率的影响, 结果如表 2 所示。由表 2 可以看出, 在经过 10 次重复利用后, 污泥的比阻降低率略有降低, 从第 1 次的 93.7% 降低到 91.1%, 在每次重复使用时, 新加入的 H⁺ 一方面能够增强剩余 Fe⁰ 生成 Fe²⁺ 的能力; 另一方面也可以溶解 Fe⁰ 表面的氧化膜, 所以即使 Fe⁰ 的总量在减小, 但仍能够稳定生成足够的 Fe²⁺, 维持其催化能力。由此可以看出, Fe⁰ 能够多次重复使用, 重复使用次数可以不止 10 次。

表 2 Fe⁰ 重复使用对 SRF 和泥饼含水率的影响

使用次数	1	2	4	6	8	10
污泥比阻/(10 ¹² m·kg ⁻¹)	1.35	1.35	1.37	1.42	1.56	1.75
比阻降低率/%	93.7	93.2	93.1	92.8	92.1	91.1

2.6 类芬顿法改善污泥脱水性能的机理分析

溶解性 EPS(S-EPS)、松散型 EPS(LB-EPS)、紧密型 EPS(TB-EPS) 对污泥脱水性能均有重要影响^[19]。3 种 EPS 在不同处理体系中多糖和蛋白质浓度变化情况如表 3 所示。由表 3 可以看出, 相比原污泥, 经过类芬顿处理后, S-EPS 蛋白质和多糖质量浓度分别从 28.1、37.2 mg/L 升高到 82.6、157.7 mg/L。LB-EPS 中蛋白质和多糖的质量浓度分别从 18.5、30.8 mg/L 降低到 11.5、16.3 mg/L, TB-EPS 中蛋白质和多糖质量浓度分别从 88.72、181.8 mg/L 降低到 41.4、76.1 mg/L。污泥的结合水含量、平均粒径变化情况如表 4 所示。由表 4 可以看出, 经类芬顿处理后, 结合水质量分数从 1.79 g/g TS 降低到 1.08 g/g TS, 降低了 40%, 平均粒径从 33.8 μm 降低到 25.6 μm。因此, 类芬顿法可以有效降解 EPS, 释放出蛋白质和多糖等物质, 促使固相 EPS 转化为液相 EPS, 破坏污泥絮体结构, 使污泥粒径减小, 结合水转化为自由水, 从而改善污

泥脱水性能。

表3 类芬顿处理对污泥不同EPS含量的影响

处理体系	$\rho(S-EPS)/$ (mg·L ⁻¹)		$\rho(LB-EPS)/$ (mg·L ⁻¹)		$\rho(TB-EPS)/$ (mg·L ⁻¹)	
	蛋白质	多糖	蛋白质	多糖	蛋白质	多糖
原污泥	28.1	37.2	18.5	30.8	88.7	181.8
H ⁺	57.6	96.6	14.6	22.8	71.0	159.7
H ⁺ /Fe ⁰	49.0	78.0	15.9	24.3	79.0	173.1
H ⁺ /H ₂ O ₂	76.0	124.2	12.5	19.9	55.3	103.2
H ⁺ /Fe ⁰ /H ₂ O ₂	82.6	157.7	11.5	16.3	41.4	76.1

表4 不同处理体系污泥的结合水、平均粒径

	原污泥	H ⁺	H ⁺ /Fe ⁰	H ⁺ /H ₂ O ₂	H ⁺ /Fe ⁰ /H ₂ O ₂
结合水质量分数/ [g·g ⁻¹ (TS)]	1.79	1.43	1.57	1.31	1.08
平均粒径/μm	33.8	27.8	27.8	25.4	25.6

3 结论

(1) Fe⁰/H₂O₂类芬顿法可以有效改善污泥脱水性能,最佳处理条件是:Fe⁰投加量为750 mg/g TS, H₂O₂投加量为20 mg/g TS,初始pH为2.5。与原污泥相比,污泥比阻降低了93.7%,泥饼含水率从原污泥的91.6%降低到73%。

(2) 在最佳处理条件下,Fe⁰的回收率为98.3%,重复利用10次后,污泥比阻降低率仍在90%以上。

(3) Fe⁰/H₂O₂类芬顿法处理能够降解污泥EPS,破坏污泥絮体结构,导致污泥粒径减小,并释放部分结合水,使结合水转化为自由水,从而改善污泥脱水性能。

参考文献

- [1] 戴晓虎. 城镇污水处理厂污泥稳定化处理的必要性和迫切性的思考[J]. 给水排水, 2017, (12): 1-5.
- [2] Sheng G, Yu H, Li X. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 882-894.
- [3] 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.
- [4] Neyens E, Baeyens J, Dewil R, et al. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 106(2-3): 83-92.
- [5] 宋兴伟, 周立祥. 生物沥浸处理对城市污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2008, (10): 2012-2017.
- [6] Neyens E, Baeyens J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 98(1): 51-67.
- [7] Feng X, Deng J, Lei H, et al. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1074-1081.
- [8] Mahmood T, Elliott A. Use of acid preconditioning for enhanced dewatering of wastewater treatment sludges from the pulp and paper industry[J]. Water Environment Research, 2007, 79(2): 168-176.
- [9] Kwon J H, Ryu S H, Park K Y, et al. Enhancement of sludge dewaterability by ozone treatment[J]. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 2001, 32(6): 555-558.
- [10] 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, (6): 615-622.
- [11] Molina C B, Casas J A, Zazo J A, et al. A comparison of Al-Fe and Zr-Fe pillared clays for catalytic wet peroxide oxidation[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 118(1-2): 29-35.
- [12] Deng Y, Englehardt J D. Treatment of landfill leachate by the Fenton process[J]. Water Research, 2006, 40(20): 3683-3694.
- [13] Bergendahl J A, Thies T P. Fenton's oxidation of MTBE with zero-valent iron[J]. Water Research, 2004, 38(2): 327-334.
- [14] Bremner D H, Burgess A E, Houllmare D, et al. Phenol degradation using hydroxyl radicals generated from zero-valent iron and hydrogen peroxide[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2006, 63(1): 15-19.
- [15] Zhou X, Wang Q, Jiang G, et al. Improving dewaterability of waste activated sludge by combined conditioning with zero-valent iron and hydrogen peroxide[J]. Bioresource Technology, 2014, 174(Supplement C): 103-107.
- [16] Wang Q, Sun J, Song K, et al. Combined zero valent iron and hydrogen peroxide conditioning significantly enhances the dewaterability of anaerobic digestate[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 67: 378-386.
- [17] 王海攀, 周兴求, 伍健东, 等. Fenton-like试剂联合PFS对污泥脱水性能影响的过程研究[J]. 环境工程, 2017, (3): 141-146.
- [18] Erdinciler A, Vesilind P A. Effect of sludge water distribution on the liquid-solid separation of a biological sludge[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2003, 10(38): 2391-2400.
- [19] 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.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 368-370.
- [21] 中华人民共和国建设部. 城市污水处理厂污泥检验方法[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2005: 1-2.
- [22] Lu M C, Lin C J, Liao C H, et al. Influence of pH on the dewatering of activated sludge by Fenton's reagent[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(10): 327-332.
- [23] Zha S, Cheng Y, Gao Y, et al. Nanoscale zero-valent iron as a catalyst for heterogeneous Fenton oxidation of amoxicillin[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 255: 141-148.
- [24] Chamorro E, Marco A, Esplugas S. Use of Fenton reagent to improve organic chemical biodegradability[J]. Water Research, 2001, 35(4): 1047-1051.
- [25] 林光辉, 吴锦华, 李平, 等. 零价铁与双氧水异相Fenton降解活性艳橙X-GN[J]. 环境工程学报, 2013, (3): 913-917.
- [26] Lei P X, Chen C C, Yang J, et al. Degradation of dye pollutants by immobilized polyoxometalate with H₂O₂ under visible-light irradiation[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(21): 8466-8474. ■