

DOI: 10.7652/xjtuxb201609007

制浆造纸厂富铁污泥性质及其 回用为污泥调理剂研究

戎宇舟¹, 葛强², 李清¹, 吴伏安², 杨树成¹, 齐随涛³

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国轻工业长沙工程有限公司, 410114, 长沙;

3. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安)

摘要: 针对制浆造纸废水芬顿氧化过程产生的富铁污泥含铁量高的优势, 及其易引起混合污泥脱水困难的问题, 提出对富铁污泥进行酸处理溶出其中的 Fe^{3+} , 以用作污泥调理剂的资源化利用新思路。采用元素分析仪、X射线荧光分析仪(XRF)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)等分析富铁污泥的组成, 采用X射线衍射仪(XRD)和X射线光电子能谱仪(XPS)分析富铁污泥中铁元素的存在形式; 以铁的溶出率和酸消耗量为指标优化酸处理富铁污泥的反应条件, 以污泥比阻的降低程度为指标评价制得的污泥调理剂的调理效果, 并与 FeCl_3 进行对比。结果表明: 富铁污泥中铁的质量分数可达 39.32%, 主要以三价的水合氧化铁形式存在; 常温下富铁污泥酸处理的优化条件是硫酸与绝干富铁污泥的质量比为 0.91 g/g, 反应时间为 180 min, 在此条件下铁溶出率可达 57.24%。经酸处理后的富铁污泥制得的调理剂在投加量(以铁质量计)为城市污水处理厂剩余污泥干质量的 3.45% 时, 可将污泥比阻降为其初始值的 17.90%, 与 FeCl_3 的污泥调理效果相当, 这说明该方法是制浆造纸厂富铁污泥资源化利用的一种可行工艺。

关键词: 富铁污泥; 污泥调理; 制浆造纸废水; 污泥比阻

中图分类号: X793; X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)09-0043-06

Study on Properties of Iron-Rich Sludge in Pulp and Paper Industry and Its Recycling as Sludge Conditioning Agent

RONG Yuzhou¹, GE Qiang², LI Qing¹, WU Fu'an², YANG Shucheng¹, QI Suitao³

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China CEC Engineering Corporation, Changsha 410114, China;

3. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Iron-rich sludge produced from the Fenton oxidation process of pulp and paper mill wastewater contains high content of iron, leading to the dewatering difficulty of the mixed sludge. To solve this problem and reuse the iron-rich sludge, an innovative approach, acidifying the iron-rich sludge to leach out Fe^{3+} as a sludge conditioning agent, was proposed in this study. The composition of iron-rich sludge was analyzed by elemental analyzer, X-ray fluorescence spectrometry (XRF), and inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). The chemical phase and valence of iron were determined by X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The acidification conditions were optimized according to the

收稿日期: 2015-12-24。 作者简介: 戎宇舟(1986—), 男, 硕士生; 杨树成(通信作者), 男, 博士, 讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308453); 中国轻工业长沙工程有限公司资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xjj2013078)。

网络出版时间: 2016-06-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160612.1504.006.html>

iron leaching rate and acid consumption. The performance of the chemical conditioning agent obtained by this approach was estimated according to the decrease of sludge specific resistance, and was compared with the conditioning performance of FeCl_3 . The results indicate that the iron content is 39.32% in the iron-rich sludge from a pulp and paper mill, and ferrihydrite is the main form of ferric iron. The optimal condition for acidification at room temperature is that the mass ratio of sulfuric acid to dry sludge is 0.91 g/g and the reaction time is 180 min. Under the optimal condition, 57.24% of the iron in the sludge can be leached into the solution. When the dosage of conditioning agents made from iron-rich sludge reaches 3.45% (by the mass of Fe) of dry sludge, the specific resistance of excess sludge can be reduced to 17.90% of the initial value, which is quite close to the conditioning performance of FeCl_3 at the same dosage. The results show that this proposed method is a feasible process for the recycling of the iron-rich sludge from pulp and paper mills.

Keywords: iron-rich sludge; sludge conditioning; pulp and paper mill wastewater; sludge specific resistance

为满足《制浆造纸工业污染物排放标准》(GB3544—2008)的要求,国内很多制浆造纸厂采用芬顿氧化法作为废水深度处理方法^[1-4],其原理是在强酸性条件下,利用 Fe^{2+} 催化 H_2O_2 产生强氧化性的氢氧自由基($\cdot\text{OH}$),引发和传递自由基链反应,以氧化分解污水中的难降解有机物质^[5-6]。在芬顿氧化及后续的中和过程中,铁催化剂会以污泥形态与处理后的废水分离,这类污泥的含铁量可高达40%^[7],故称为富铁污泥。

富铁污泥产量占制浆造纸厂污泥总量的20%左右。目前,造纸厂一般将富铁污泥与初沉和剩余污泥混合后加药脱水^[1],但由于富铁污泥絮体细小,污泥脱水所用的板框压滤机滤布和滤板孔眼容易被堵塞,污泥调理剂的用量也会增加,导致混合污泥脱水困难,这成为制浆造纸厂污泥处理中的普遍问题。此外,富铁污泥还含有一些重金属元素、卤化物及有机质等,处置不当会造成二次污染^[7]。Qiang 等人系统研究了采用电化学方法还原 Fe^{3+} 为 Fe^{2+} 的条件,目的是将还原后的 Fe^{2+} 重新返回芬顿过程,以减少 Fe^{2+} 的消耗量^[8]。但是,还原后混合液的循环回用会导致污泥中难降解有机物的释放、积累和盐分的积累,从而降低芬顿氧化和后续电化学还原的效率^[9]。

制浆造纸厂的混合污泥和城镇污水处理厂的剩余污泥一般采用聚丙烯酰胺作为污泥脱水的调理剂。美国水环境联合会编制的指南指出,随着浓缩和脱水系统的日益复杂化,虽然聚合物成为普遍使用的污泥调理剂,但 FeCl_3 和石灰等无机化学调理剂仍在转鼓真空过滤和凹板式压滤机中大量使

用^[10]。目前,为达到脱水污泥含水率低于60%的指标,制浆造纸厂通常采用板框压滤机作为污泥脱水机械,因此铁盐作为调理剂具有巨大的应用潜力。此外,在进行污泥调理时,有机聚合物形成的絮体只能稳定几分钟,而采用无机调理剂时,形成的絮体能稳定数小时^[10],从而能够在长达4 h的压滤周期内保证较低的污泥比阻,提高脱水效率。

由于运行成本高,不论是作为预处理还是深度处理手段,生产规模的芬顿氧化案例并不多见^[11],而作为该工艺的副产品,富铁污泥是一种新的污泥类型。本文首先对这种富铁污泥的性质进行了研究,针对富铁污泥含铁量高的优势,及其易引起脱水困难的问题,提出了一种富铁污泥资源化利用的新思路,即将富铁污泥进行酸处理,溶出其中的 Fe^{3+} ,并将其作为一种无机调理剂用于污泥的调理,以提高污泥的脱水性能,降低传统污泥调理剂的投加量,使得富铁污泥变成一种资源,而不是制浆造纸厂的负担。

1 实验材料与方法

1.1 污泥来源与分析

实验所用富铁污泥取自河北省某废纸制浆造纸厂污水处理站的芬顿反应池中,取后于4℃密闭冷藏。污泥样品经4 000 r/min离心处理并在103~105℃下烘干后,采用元素分析仪(Elementar Vario EL cube,德国)分析其中的C、H、O、N、S元素,采用X射线荧光光谱仪(XRF, Bruker S4 PIO-NEER,德国)分析金属元素;精确称取适量样品,用硝酸和盐酸消解后采用电感耦合等离子体发射光谱

仪(ICP-OES, Shimadzu ICPE-9000, 日本)测试含铁量;采用 X 射线衍射仪(XRD, PANalytical X'Pert PRO, 荷兰)分析样品的物相。样品冷冻干燥后采用 X 射线光电子能谱仪(XPS, Kratos AXIS ULTRA DLD, 英国)分析污泥中铁元素的价态, X 射线源为 Al K α 。

1.2 实验方法

将富铁污泥在 4 000 r/min 条件下离心处理 10 min,测得此时污泥含水率(质量分数,下同)为 84.23%。称取 10.0 g 污泥,与一定浓度和体积的硫酸溶液进行反应,采用原子吸收分光光度计测定反应结束后溶液中铁的浓度,并根据污泥总铁含量计算铁的溶出率,以此为主要参数来评价反应时间、硫酸与富铁污泥配比等因素对酸处理富铁污泥效果的影响,优化富铁污泥的酸处理条件。

在优化条件下对富铁污泥进行酸处理,将处理后的混合液用于调理西安市某污水处理厂的剩余污泥,在 35.5 kPa 的真空压力下测定调理后污泥的比阻^[12],分析污泥调理效果,并与 FeCl₃ 和阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)的调理效果进行比较。

实验用水为经过反渗透处理的超纯水,原子吸收分析所用的试剂均为优级纯,其余试剂为分析纯。

2 实验结果与讨论

2.1 富铁污泥的性质

2.1.1 元素组成与铁含量分析 用元素分析仪和 XRF 对富铁污泥的元素组成进行分析,结果见表 1。

表 1 富铁污泥的元素组成

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
C	9.74	Si	0.88
H	2.10	Ca	0.84
O	43.8	Ti	0.60
N	1.14	其他	0.54
S	1.06	合计	100
Fe	39.3		

根据表 1 的结果,富铁污泥中 C、H、O、N 的质量分数分别为 9.74%、2.10%、43.8%和 1.14%,其中 O 含量最高,应该主要是与污泥中的无机元素结合形成了氢氧化物和氧化物。C 一般主要来自有机物,富铁污泥含 C 说明污泥中含有一定量的有机物,而污泥的挥发性物质与总固体质量比的测定结果为 28.66%,也可以证实这一点。富铁污泥中的有机物除了少部分来自芬顿处理后中和絮凝所投加

的 CPAM 外,主要来自废水中未被氧化的有机物,说明虽然芬顿过程产生的 ·OH 的标准氧化还原电位高达 +2.80 V,但仍难以将很多有机物彻底矿化,部分有机物的去除要依赖芬顿氧化过程产生的 Fe³⁺ 的混凝沉淀作用^[13]。

无机物是富铁污泥的主要组成部分,ICP-OES 测试结果表明,富铁污泥中 Fe 的质量分数为 39.32%,与 XRF 测试结果一致。Benatti 等将化学分析实验室的废水进行了芬顿氧化,产生的 2 种富铁污泥中 Fe 的质量分数分别为 40.01% 和 32.42%^[7],与本文的实验结果接近。XRF 测得 Si、Ca 和 Ti 的质量分数分别为 0.88%、0.84% 和 0.60%,这 3 种元素都是常用的纸张填料如碳酸钙、高岭土、钛白粉的组分。此外,本研究采集的富铁污泥样品来源于河北某制浆造纸厂,该厂芬顿氧化工艺中使用的 Fe²⁺ 催化剂为某钛白粉厂的副产品,这也是导致 Ti 含量高的原因。总之,除 Fe 外,其他元素与制浆造纸行业的原料和生产过程密切相关。

2.1.2 物相分析 富铁污泥的 XRD 测试结果如图 1 所示。经过 103~105 ℃烘干的粉末表观呈铁红色,但 XRD 衍射峰不明显,说明其中的化合物主要为无定形态。为分析富铁污泥的物相组成,采用 XRD 分析了分别经 270、350 和 570 ℃干燥的污泥样品,结果见图 1。从图中可以观察到,随着干燥温度的升高,赤铁矿(α -Fe₂O₃)的衍射峰越来越强,在 570 ℃时杂峰已不明显,说明常温条件下富铁污泥中的 Fe 主要以无定形的铁氧化物形式存在,结晶相很少。

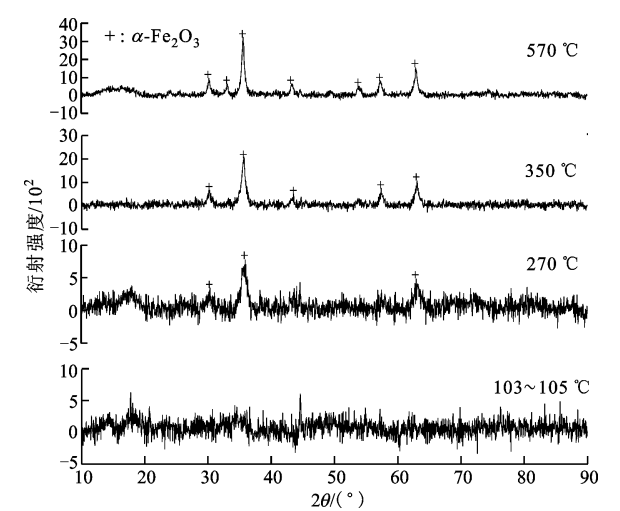


图 1 富铁污泥的 XRD 分析谱图

2.1.3 Fe 元素价态分析 为确定富铁污泥中 Fe 的价态,对富铁污泥进行了 XPS 分析,采用 C 的标

准峰位 248.8 eV 进行荷电校正,全谱扫描和 Fe 2p 精细扫描结果如图 2 所示。

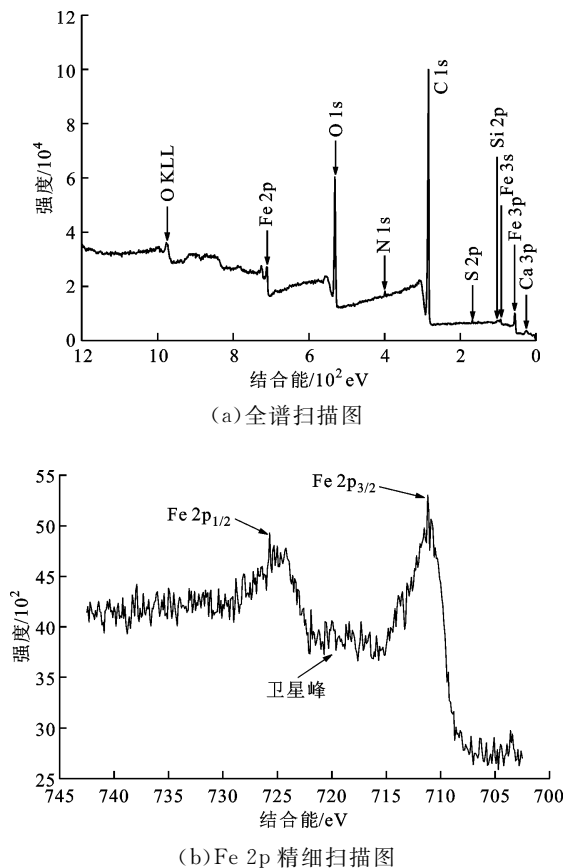


图2 富铁污泥的XPS谱图

由图 2a 可以看出,表 1 中 XRF 分析的主要元素在 XPS 扫描时均有响应。对图 2b 的 Fe 2p 精细扫描谱图用分峰软件进行分峰,参考 XPS 标准手册^[14]及铁氧化物 XPS 的相关研究^[15-19],根据峰型、峰位、峰间距、峰面积以及卫星峰的位置判断,富铁污泥中的 Fe 元素以三价的水合氧化铁和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 形式存在,这说明在芬顿氧化过程中 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} 。

一般认为,芬顿反应后当 pH 需调至 6 以上进行中和时, Fe^{3+} 会转化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,但有研究表明,在某些条件下即使按 OH^- 与 Fe^{3+} 的物质的量比为 3:1 来投加碱,也未必生成化学计量的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,而是可能生成不定型的水合氧化铁^[20]。温度升高、pH 接近水合氧化铁等电点的值以及少量 Fe^{2+} 存在都会促进水合氧化铁转化为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ^[20]。本研究实测的富铁污泥的 pH 为 6.64, Zeta 电位为 -9.42 mV,接近等电点,因此可能会促进生成少量的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。

对富铁污泥性质的研究表明,Fe 在富铁污泥中

以三价形态存在,其质量分数为 39.32%,以 Fe_2O_3 计达 56.17%,属含铁富矿,因此富铁污泥完全可以作为一种资源。

2.2 富铁污泥的酸处理

2.2.1 反应时间的影响 在常温条件下,采用 0.075 和 0.15 mol/L 两种浓度的硫酸 2 L 分别在不同反应时间下与 10.0 g 富铁污泥(含水率为 84.23%)进行反应,此时硫酸与绝干污泥的质量比分别为 9.3 和 18.6 g/g,实验结果如图 3 所示。

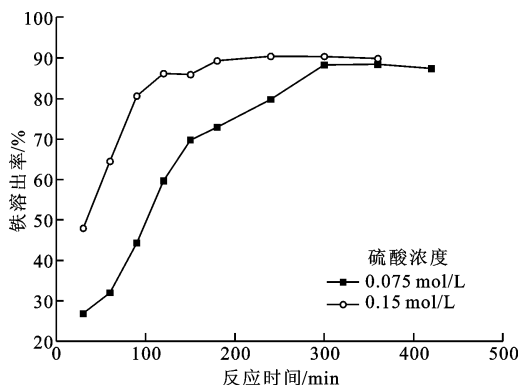


图3 反应时间对铁溶出率的影响

由图 3 可以看出,随着反应时间的增加,富铁污泥中铁元素的溶出率呈现明显的上升趋势。采用浓度为 0.075 mol/L 的硫酸处理时,当反应时间超过 150 min 后曲线斜率降低,铁溶出率的升高趋势变缓,当反应时间达到 300 min 后,富铁污泥中铁元素的溶出率趋于稳定,达 88.33%;增加硫酸的浓度至 0.15 mol/L 时,反应速率明显加快,当反应时间超过 120 min 后,富铁污泥中铁元素的溶出率已趋于稳定,达 90.49%。

根据图 3,确定酸处理富铁污泥的较佳反应时间为 150~180 min。后续的实验均选择 180 min 作为酸处理富铁污泥的反应时间。

2.2.2 硫酸与污泥配比的影响 在常温条件下,取富铁污泥的质量为 10.0 g(含水率 84.23%),分别用浓度为 0.028、0.046、0.074、0.092、0.18、0.28、0.37 和 0.75 mol/L 的硫酸溶液 200 mL 与富铁污泥进行反应,反应时间为 180 min,并计算出硫酸与绝干污泥的质量比(以下简称酸泥质量比)。实验结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出:随着酸泥质量比的增加(即硫酸浓度增加),富铁污泥中铁元素的溶出率呈现明显的上升趋势;当酸泥质量比上升到 0.91 g/g 时,富铁污泥中铁元素的溶出率为 57.24%;继续提高酸泥质量比,虽然铁溶出率仍会增加,但上升趋势明显

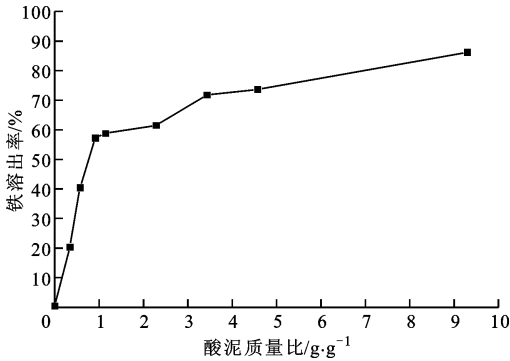


图 4 酸泥质量比对富铁污泥铁溶出率的影响

变缓。因此,确定较佳的酸泥质量比为 0.91 g/g。

富铁污泥酸处理实验表明,常温下采用硫酸处理富铁污泥的较佳条件为:酸泥质量比 0.91 g/g,反应时间 180 min。在该条件下铁元素的溶出率可达 57.24%。

2.3 富铁污泥酸处理后的污泥调理效果

采用上述酸处理条件制备富铁污泥调理剂,按照调理剂中铁元素质量与剩余污泥干质量之比(以下简称铁泥质量比)分别为 0.60%、1.10%、1.70%、2.25%、2.85%和 3.45%的投加量,对城镇污水处理厂的剩余污泥进行调理,同时采用相同投加量的分析纯 FeCl₃ 对剩余污泥进行调理,以验证本文方法制得的污泥调理剂的效果。实验结果如图 5 所示。

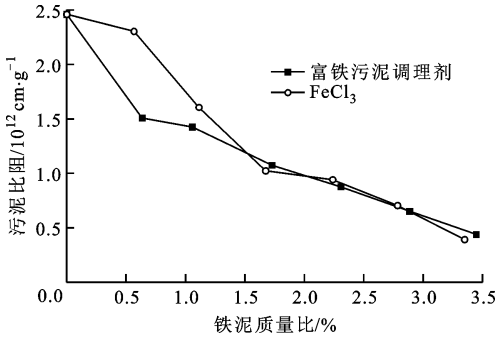


图 5 铁泥质量比与污泥比阻的关系

由图 5 可以看出:由本文方法制得的富铁污泥调理剂与 FeCl₃ 对剩余污泥比阻的影响趋势一致,随投加量增大,剩余污泥的比阻降低;当铁泥质量比同为 3.45%时,富铁污泥调理剂和 FeCl₃ 分别可使剩余污泥的比阻降低为初始值的 17.90%和 15.93%,调理效果接近,说明采用酸处理富铁污泥的方法可以高效率地利用溶出 Fe³⁺ 的调理性能,大幅度降低剩余污泥的比阻,提高其脱水性能。

考虑到目前制浆造纸厂和城镇污水处理厂主要采用 CPAM 作为污泥脱水的调理剂,本文通过实验

进一步研究了 CPAM 投加量对剩余污泥调理效果的影响,实验结果见图 6。

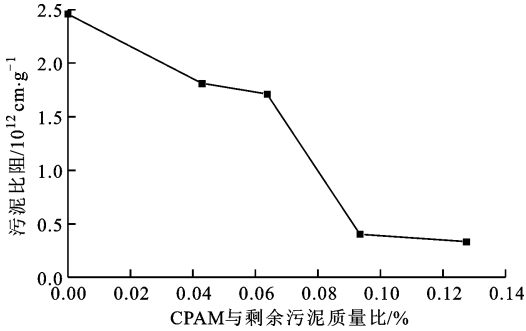


图 6 CPAM 投加量与剩余污泥比阻的关系

由图 6 可以看出,当 CPAM 与剩余污泥的质量比达到 0.093 6%时,污泥比阻即降到初始值的 16.40%,说明在达到相近的调理效果时,CPAM 的投加量低于本文方法制成的调理剂和 FeCl₃ 的投加量,但由于 CPAM 价格昂贵,所以采用本文方法制成的调理剂仍能显著节约成本。另外,根据《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》^[21],仅采用有机高分子调理剂时板框压滤一般只能达到 65%~75%的含水率,难以稳定降到 60%以下。

3 结 论

(1)制浆造纸厂富铁污泥中铁的质量分数可达 39.32%,以 Fe₂O₃ 计为 56.17%,属含铁富矿,具有很高的资源化潜力。富铁污泥中的铁元素主要以三价形式存在,不定型的水合氧化铁是其主要物相。

(2)常温下优化富铁污泥硫酸溶出条件的实验表明,较佳的硫酸与绝干富铁污泥质量比为 0.91 g/g,反应时间为 180 min,在此条件下富铁污泥的铁溶出率可达 57.24%。

(3)酸处理富铁污泥制得的富铁污泥调理剂在投加量(以铁计)为剩余污泥干质量的 3.45%时,可将剩余污泥的比阻降为其初始值的 17.90%,与 FeCl₃ 的调理效果相当,说明将富铁污泥回用为污泥调理剂是制浆造纸厂富铁污泥资源化利用的一种可行工艺。

参考文献:

[1] 葛强,姚文峰,雷平,等. IC-氧化沟-Fenton 法处理废纸造纸废水工程实例 [J]. 中国造纸, 2014, 33(11): 50-53.
GE Qiang, YAO Wenfeng, LEI Ping, et al. Treatment of recycled paper mill wastewater by using IC-oxidation ditch-Fenton reactor tower process [J]. Chi-

- na Pulp & Paper, 2014, 33(11): 50-53.
- [2] 孙娟, 张维勇, 张晓琴, 等. 芬顿试剂深度处理 APMP 制浆废水的中试结果 [J]. 中华纸业, 2013, 34(12): 42-44.
SUN Juan, ZHANG Weiyong, ZHANG Xiaoqin, et al. Trial test project for advanced treatment of APMP pulping effluent with Fenton reagent [J]. China Pulp & Paper Industry, 2013, 34(12): 42-44.
- [3] 万金泉. 当代制浆造纸废水深度处理技术与实践 [J]. 中华纸业, 2011, 32(3): 18-23.
WAN Jinquan. Recent advanced treatment technology and application for pulp and paper wastewater [J]. China Pulp & Paper Industry, 2011, 32(3): 18-23.
- [4] 时孝磊, 朱琳, 刘晋恺, 等. Fenton/絮凝工艺深度处理制浆造纸废水的工程应用分析 [J]. 环境工程学报, 2013, 7(9): 3415-3420.
SHI Xiaolei, ZHU Lin, LIU Jinkai, et al. Application analysis of Fenton/flocculation process for advanced treatment of pulp and papermaking wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(9): 3415-3420.
- [5] WALLING C. Fenton's reagent revisited [J]. Journal of the American Chemical Society, 1975, 97(2): 363-367.
- [6] NEYENS E, BAEYENS J. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 98(1/2/3): 33-50.
- [7] BENATTI C T, COSTA A C S, TAVARES C R G. Characterization of solids originating from the Fenton's process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163(2/3): 1246-1253.
- [8] QIANG Z M, CHANG J H, HUANG C P. Electrochemical regeneration of Fe^{2+} in Fenton oxidation processes [J]. Water Research, 2003, 37(6): 1308-1319.
- [9] LI C W, CHEN Y M, CHIOU Y C, et al. Dye wastewater treated by Fenton process with ferrous ions electrolytically generated from iron-containing sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(1/2): 570-576.
- [10] 美国水环境联合会. 城镇污水处理厂运行管理手册: 第3卷 固体处理工艺 [M]. 6版. 谢丽, 何小娟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 205, 256-257.
- [11] PLIEGO G, ZAZO J A, GARCIA-MUÑOZ P, et al. Trends in the intensification of the Fenton process for wastewater treatment: an overview [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, 45(24): 2611-2692.
- [12] 王云海, 杨树成, 梁继东, 等. 水污染控制工程实验 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011: 84-90.
- [13] CANIZARES P, PAZ R, SAEZ C. Costs of the electrochemical oxidation of wastewaters: a comparison with ozonation and Fenton oxidation processes [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(1): 410-420.
- [14] MOULDER J F, STICKLE W F, SOBOLE P E, et al. Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy [M]. Eden Prairie, Minnesota, USA: Physical Electronics Inc., 1992: 80-81.
- [15] YAMASHITA T, HAYES P. Analysis of XPS spectra of Fe^{2+} and Fe^{3+} ions in oxide materials [J]. Applied Surface Science, 2008, 254(8): 2441-2449.
- [16] BOUMAIZA H, NAILLE S, RENARD A, et al. Chemical transformation of ferrihydrite coating into green rust followed by Raman and X-ray photoelectron spectroscopies [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(4): 1031-1036.
- [17] BIESINGER M C, PAYNE B P, GROSVENOR A P, et al. Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 2717-2730.
- [18] FRAU F, ADDARI D, ATZEI D, et al. Influence of major anions on As(V) adsorption by synthetic 2-line ferrihydrite: kinetic investigation and XPS study of the competitive effect of bicarbonate [J]. Water Air and Soil Pollution, 2010, 205(1/2/3/4): 25-41.
- [19] MCINTYRE N S, ZETARUK D G. X-ray photoelectron spectroscopic studies of iron oxides [J]. Analytical Chemistry, 1977, 49(11): 1521-1529.
- [20] 郭慧. 氢氧化铁和羟基氧化铁的催化相转化机理研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2006: 3-4.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 23-25.

(编辑 葛赵青)