

综述与专论

# 改性硅藻土在污废水中应用现状及发展趋势

孙彦良<sup>1</sup> 吴雪茜<sup>2</sup> 李文学<sup>1</sup> 郑彭生<sup>2</sup> 李昌杰<sup>1</sup> 孙宁湖<sup>1</sup>

(1.兖州煤业股份有限公司,山东 邹城 273500 ;

2.煤科集团杭州环保研究院,浙江 杭州 311201)

**摘要:**为了更好地探索改性硅藻土在水处理领域的应用,介绍了硅藻土三类改性方式(无机改性、有机改性、活化处理)与基本原理,总结了国内外应用改性硅藻土处理生活污水、含重金属离子废水、造纸废水与印染废水的研究现状,讨论了改性硅藻土作为一种新型吸附材料在水处理领域的发展趋势与挑战。

**关键词:**硅藻土;改性;吸附;生活污水;工业废水

中图分类号:X703

文献标识码:B

文章编号:1006-8759(2017)04-0015-05

## REVIEW ON THE APPLICATIONS AND DEVELOPMENT TRENDS OF MODIFIED DIATOMITE IN THE TREATMENT OF SEWAGE AND WASTEWATER

SUN Yan-liang<sup>1</sup>, WU Xue-qian<sup>2</sup>, LI Wen-xue<sup>1</sup>, ZHENG Peng-sheng<sup>2</sup>,  
LI Chang-jie<sup>1</sup>, SUN Ning-hu<sup>1</sup>

(1.Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng 273500, China; 2.CCTEG Hangzhou  
Environmental Research Institute, Hangzhou 311201, China)

**Abstract:**To explore the application of modified diatomite in water treatment, three modification approaches of diatomite (inorganic modification, organic modification and activation treatment) and their adsorption mechanisms are introduced. The application of modified diatomite in domestic sewage, heavy metal ions-containing wastewater, papermaking wastewater and dyeing wastewater are reviewed. Besides, the development trends and challenges of modified diatomite as a promising adsorption material in water treatment field are discussed.

**Key words:** diatomite; modification; adsorption; domestic sewage; industrial wastewater.

硅藻土是由硅藻及其它微生物的硅质遗骸组成的生物硅质岩<sup>[1]</sup>,成分为无定形二氧化硅(SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O)与少量硅氧化物、氧化铝<sup>[2]</sup>,硅藻土表面具有特殊的微孔结构,其比表面积的大小直接影响吸附性能,且比表面积与吸附量呈正比<sup>[3]</sup>。硅藻土表面分布的大量硅羟基和氢键在水溶液中解离出H<sup>+</sup>,使硅藻土表现出一定的电负性,且电位绝对值很大,因此硅藻土对正电荷污染物吸附能力较大<sup>[4]</sup>。中国探明硅藻土储量居世界第二和亚洲

首位<sup>[5]</sup>,具有性能稳定、耐酸、孔容大、孔径大、比表面积大、吸附性强的特点,已应用在污水处理多个领域用作吸附剂、载体制备、污泥脱水剂等。

硅藻土原土表面微孔一部分被杂质覆盖,吸附点位被占据,溶液中的离子进入硅藻土孔道受到阻碍,这些都在一定程度上限制了硅藻土的吸附能力<sup>[6]</sup>。因此,需要对硅藻土进行改性以提高其吸附能力。通过控制使用不同物质与硅藻土表面活性羟基进行成键或反应,可以改变硅藻土的表面吸附特性,以达到吸附不同物质的目的<sup>[7]</sup>。

我国对水处理硅藻土的研究多在于对改性方法、改性效果的实验室阶段,实际工程上应用不多,工程应用上多把硅藻土技术配合现有工艺进行深度处理,但针对具体水质特征而设计的较为完整的硅藻土配套工艺较少。

## 1 硅藻土改性方式与机理

常用硅藻土的改性方法有如下几种:①用铝、铁等带正电荷的离子或者絮凝剂进行无机改性<sup>[8]</sup>;②用大分子有机物(如表面活性剂)进行有机改性<sup>[9,10]</sup>;③对其进行酸化、焙烧等方法进行活化处理<sup>[11-15]</sup>。

### 1.1 无机改性

硅藻土无机改性原理是添加的无机改性剂均匀分散于硅藻土孔道间,形成柱层状缔合结构并疏通或拓展硅藻土孔道,并在缔合颗粒之间形成较大的空间,增加了吸附能力<sup>[6]</sup>。朱健等<sup>[16]</sup>分别用 NaCl 和 BaCl<sub>2</sub> 对硅藻土进行无机改性,发现 NaCl 可以增强硅藻土表面负电性以提高其吸附容量,对硅藻土孔隙结构无重大影响;而 BaCl<sub>2</sub> 是通过沉积的其晶体擦除杂质,改善硅藻土的孔隙结构,同时孔道内的钡盐起到支撑作用,有利于吸附作用的进行。冯呈义<sup>[17]</sup>用 PAM 改性硅藻土,改性后硅藻土表面电性由负变为正,对钛白废水中悬浮物、COD 的吸附率分别为原土的 1.34 倍和 1.47 倍。

### 1.2 有机改性

有机改性一般以有机物大分子覆盖包裹硅藻土,或是通过离子进入硅藻土孔间的方式,使其表面由亲水环境改变为疏水环境,从而提高吸附能力<sup>[18]</sup>。李门楼<sup>[19]</sup>采用 10% 的溴化十六烷基三甲铵对硅藻土进行了有机改性,经改性后硅藻土对 Zn<sup>2+</sup> 吸附量由原来的 39.3 mg/g 提高到 61.1 mg/g,提高了 35.68%。李增新<sup>[20]</sup>等用壳聚糖对硅藻土进行改性并处理实验室有机废液,改性后的硅藻土较原土而言对 COD 去除率从 31.8% 提高到 71%。李哲等<sup>[21]</sup>以阳离子表面活性剂十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)为改性剂,改性后硅藻土的亲油疏水性增强,对苯酚的饱和吸附量由改性前的 12.15 mg/g 增加到改性后的 26.10 mg/g。

### 1.3 活化处理

活化处理包含焙烧、酸浸等方式。原理主要是通过去除原土表面及孔道内壁附着的杂质,进而提高

其吸附能力。刘频等<sup>[22]</sup>研究发现,经过 500 °C 高温焙烧 3 h 后,硅藻土对水溶液中 Pb<sup>2+</sup> 的吸附量由原来的 3.71 mg/g 提高到 6.42 mg/g,吸附率由原来的 55.7% 提高到 96.3%。林俊雄等<sup>[23]</sup>研究了焙烧对硅藻土吸附性能的影响,450 °C 后硅藻土表面有机物质大部分被烧除,孔径变大,此时吸附性能最好,980 °C 后微孔融化堵塞。廖经慧<sup>[24]</sup>通过酸浸法提纯改性硅藻土,SiO<sub>2</sub> 含量从 86% 提升到 96%,比表面积从 10.01 m<sup>2</sup>/g 增大到 17.47 m<sup>2</sup>/g。

## 2 改性硅藻土在生活污水处理中的应用

生活污水中的大部分胶体颗粒为负电荷,向硅藻土中适当添加阳离子混凝剂制成改性硅藻土,可实现对污水中正电荷和负电荷胶体颗粒的脱稳,从而增强对污染物的吸附作用<sup>[25]</sup>。近年来,有越来越多的研究尝试将改性硅藻土作为深度处理手段,应用到生活污水处理过程中,取得了比较理想的处理效果<sup>[26]</sup>。

使用铝盐、铁盐混凝剂对硅藻土进行改性是处理生活污水最常用的改性方法。Jinlu wu<sup>[27]</sup>等对比研究了将硅藻土原土与 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 粉末、石灰粉以 6:1:3 的比例混合后过 100 目筛,450 °C 条件下烘干 2 h 后制得改性硅藻土用于城市污水处理,改性后硅藻土在添加量为 150 mg/L 时对氨氮和总磷的去除率较原土提高了 20%~50%。贺明和<sup>[28]</sup>研究了 AlCl<sub>3</sub>、FeSO<sub>4</sub>、PAM 与硅藻土复配混凝剂的最佳配比与最佳条件,并将之用于处理生活污水。中性和弱酸性条件下,最佳配比为 m(AlCl<sub>3</sub>):m(硅藻土)=1:11、m(FeSO<sub>4</sub>):m(硅藻土)=1:11、m(PAM):m(硅藻土)=1:9,改性后的硅藻土对 COD、SS、氨氮去除率分别在 64%、88.9% 和 41% 以上。且三种改性方式中,FeSO<sub>4</sub> 与硅藻土复配剂处理效果最好。Wenhui Xiong<sup>[29-31]</sup>等在 NaOH 环境中用 FeCl<sub>2</sub> 对硅藻土进行改性并将其应用于生活污水除磷试验。NaOH 溶液中部分溶解的 Si 与 Fe<sup>2+</sup> 形成稳定化合物吸附硅藻土的表面孔隙中,改性后的硅藻土表面积由 24.77 m<sup>2</sup>/g 增加至 211.1 m<sup>2</sup>/g 且表面价态也发生了改变。在 pH 为 4 和 pH 为 8 时,对磷的最大吸附量分别由 10.2 mg/g 和 1.7 mg/g 提高到 37.3 mg/g 和 13.6 mg/g。蒋小红等<sup>[32]</sup>用 PAC、FeCl<sub>3</sub> 和 AlCl<sub>3</sub> 三种外加混凝剂,考察了复配法和表面涂层法两种硅藻土改性方法对城市生活污水处理性能。试验采用改性硅藻土预处理+后续悬浮

生物膜反应器的组合工艺。结果发现对氨氮、TP、COD 的处理效果,表面涂层改性法均优于复配法。

工程应用方面,李尔等<sup>[33]</sup>将酸化改性硅藻土用于一体化反应器中处理城市污水厂尾水,硅藻土对 SS、COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 等污染物的去除能力均明显高于 PAC 及硫酸铝,出水达到 GB 18918-2002 一级 A 标准,而 BOD 与 TN 还是需要依赖生化过程才能达标,并计算改性硅藻土成本仅为 580 元/t,低于 PAC(1400 元/t)与硫酸铝(850 元/t)。梁太雷等<sup>[34]</sup>将生活污水经调节池后投加改性硅藻土,出水水质均达到 GB18918-2002 一级 A 标准,并总结硅藻土应用在工程中具有投资费用低(10 000 m<sup>3</sup>/d 规模工程项目较生化法投资减少 30%-40%)、运行费用低(处理 1m<sup>3</sup> 生活污水成本仅为 0.45 元)等优点。

从研究成果来看,改性硅藻土对生活污水中 SS、COD、总磷去除效果已得到初步验证,但脱除总氮效果不佳,基础研究与工程应用成果不平衡。在实际工程中,需要将改性硅藻土处理单元与生物处理单元相结合,以实现生活污水污染物全面去除。

### 3 改性硅藻土在工业废水处理中的应用

#### 3.1 改性硅藻土处理含重金属离子废水

电镀、制陶、玻璃、采矿及电池工业产生的废水中常含较多的重金属离子。近年来,国内外对改性硅藻土在含重金属离子废水处理方面的应用开展了基础性研究,但相关工程应用很少。

无机改性硅藻土常用于含重金属离子废水的处理,其中经锰氧化物改性后硅藻土表现出色。易伟林等<sup>[35]</sup>研究了强酸、中酸和中性环境下的原土与 7 种改性土对 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 三种重金属离子溶液的吸附效果。强酸环境下,8 种硅藻土对重金属吸附效果大部分较差,普遍低于 10 mg/g,只有经锰氧化物、PAM 和 Mg(OH)<sub>2</sub> 改性后的硅藻土对 Pb<sup>2+</sup> 吸附量达到了 20mg/g 以上,中性环境下,吸附效果最好的是锰氧化物、Mg(OH)<sub>2</sub> 改性后硅藻土,对 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 三种金属离子的吸附率均达到 80% 以上。郭晓芳等<sup>[36]</sup>也通过研究发现了锰氧化物改性后的硅藻土对废水中 Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 具有良好的吸附效果。在 25℃,弱酸性条件下,改性硅藻土添加量为 5 g/L 时,对 Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 的吸附率分别可

以达到 94.42% 和 86.3%。

国外,Y Al-Degs 等<sup>[37]</sup>研究比较了锰氧化物改性硅藻土和硅藻原土对废水中 Pb<sup>2+</sup> 的吸附动力学,经锰氧化物改性后的硅藻土表面积从 33 m<sup>2</sup>/g 增加到 80 m<sup>2</sup>/g,对 Pb<sup>2+</sup> 的吸附速率从 1.53 ml/m<sup>2</sup>·s 增加到 68.57ml/m<sup>2</sup>·s。MAM Khraisheh 等<sup>[38]</sup>用锰氧化物改性硅藻土对废水中的 Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 进行吸附,发现重金属离子的吸附顺序为 Pb<sup>2+</sup>>Cu<sup>2+</sup>>Cd<sup>2+</sup>,同时研究了改性硅藻土中 Mn<sup>2+</sup> 随时间的解吸量,22 h 后有 0.04ppm 的 Mn<sup>2+</sup> 发生解吸作用。

杨文等<sup>[39-41]</sup>用 PAM 包裹硅藻土处理高浓度 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 模拟废水,发现 PAM 以分子层的形式吸附在硅藻土的表面及孔隙内,改性硅藻土对 Cd<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 的吸附规律不同。PAM 改性浓度对去除 Pb<sup>2+</sup> 吸附影响最大,其次是 pH 和初始浓度;而 pH 对 Cd<sup>2+</sup> 吸附影响最大,其次是 PAM 浓度和水样初始浓度。最佳条件下,改性硅藻土对 Cd<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 的吸附容量分别是原土的 2.75 倍和 1.25 倍。

李文强等<sup>[42]</sup>通过酸洗和超声波两种方式对硅藻土进行复合改性处理皮革废水中的重金属污染物。结果表明,改性后硅藻土表面杂质明显减少,晶体结构更加整洁有序。投加量为 8 g/L,吸附时间为 60 min 时,对 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 的去除率分别为 52.95% 和 89.37%,比原土去除效果分别高出 19.24% 和 34.37%。

硅藻土吸附重金属离子的理论研究还不完善,仅限于几种常见的金属离子的单一组分,在以后的研究中应更注重机理研究,并结合实际进行多组分的系统性试验,得出吸附规律及影响因素,便于加强其处理不同类型废水的能力,推进其工业化应用的进程。

#### 3.2 改性硅藻土处理造纸废水

造纸废水成分复杂,可生化性差,COD、BOD、SS 含量高,利用硅藻土的良好吸附性,在现有废水处理工艺上增加改性硅藻土吸附单元,强化对造纸废水中 COD、BOD、色度及细小纤维的吸附以增加处理效果是目前研究的方向之一。

改性硅藻土用于处理造纸废水工程应用实例较多。尚尉等<sup>[43]</sup>用阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)对硅藻土进行改性,并用于处理造纸厂的二沉池废水,结果发现改性硅藻土用量 350 mg/l 时,经 2h 吸附,废水中 COD、浊度、色度的去除率分别达到了

80%、95%、100%。刘建伟等<sup>[44]</sup>在制浆造纸原废水处理工艺中二沉池后增加投加无机絮凝剂改性硅藻土的曝气澄清池单元,改造后原不达标的COD、BOD、SS和色度等指标均达到《制浆造纸工业水污染物排放标准》。丁来保等<sup>[45]</sup>用硅藻土和多种絮凝剂合成了一种复合处理剂,并代替Fenton工艺对某二次纤维造纸厂废水生化出水进行深度处理,出水COD达标且处理成本小于2.65元/m<sup>3</sup>废水。

国内现有对造纸废水的深度处理技术主要为Fenton工艺,使用硅藻土技术替代Fenton工艺或对深度处理工程进行提标改造,可以缩减处理成本,提高处理效果,对制浆造纸废水深度处理提供了新的选择。

### 3.3 改性硅藻土处理印染废水

印染废水出水量大、成分复杂、COD高、色度大、毒性强,常用物化法与生化法处理<sup>[46]</sup>。近年来,研究人员针对物化法中的吸附法,利用硅藻土的理化性质处理污水,可有效吸附水中的无机和有机污染物。

Zhan Shulin等<sup>[47]</sup>采用原位沉淀法,由MgCl<sub>2</sub>及NaOH制备出Mg(OH)<sub>2</sub>改性硅藻土,并对阴离子染料进行吸附研究。结果表明,改性硅藻土对染料的吸附能力优于原硅藻土及Mg(OH)<sub>2</sub>。严刚等<sup>[48]</sup>用MnCl<sub>2</sub>改性硅藻土,并配合PAM对酸性印染废水进行脱色和去除COD的研究,发现Mn-硅藻土投加量在0.8g/L, PAM投加量2.0mg/L, pH为9.5~10下,印染废水出水色度和COD均能达到国家GB4287-2012一级标准。马万征等<sup>[49]</sup>用300~600℃焙烧1h后的改性硅藻土对印染废水进行处理,结果表明500℃、pH=2、投加量为0.06g/ml、反应温度50℃、反应时间10min时处理效果最好,脱色率为53.3%, COD去除率为62.1%。Zhang<sup>[50]</sup>等用壳聚糖改性硅藻土处理含阴离子印染废水,改性后的硅藻土对活性艳红M-8B和双胺绿B的吸附容量分别为94.46mg/g和137.0mg/g。

工程应用方面,吴晓翔等<sup>[51]</sup>将南京某印染厂废水经生化处理(COD=140~210mg/L)后增设改性硅藻土净水设备,出水COD去除率达到40~66.6%,且脱色效果好,运行费用低,大小水量均使用。

因印染污水浓度高,采用先投加硅藻土的方式成本昂贵,单一硅藻土处理技术一般不宜作印染废水处理主工艺。需与生化处理有机结合,且针对生化处理后COD<200mg/L进行深度处理最为合适。

## 4 发展趋势

由于硅藻土特殊的结构性、稳定性和经济性,世界各国都在研究如何更全面、更有效地使用硅藻土以扩大其在水处理中的应用范围。鉴于目前对硅藻土的研究水平和应用效果,今后应考虑以下方面的研究:(1)有关改性后硅藻土对不同污染物吸附机制的研究;(2)不同类型改性方法的配合使用,以达到最大程度上改善硅藻土的吸附性能;(3)研究如何将改性硅藻土与现有水处理工艺匹配优化,开发组合工艺与设备,在改性硅藻土的工程应用上做出进一步探索。

## 参考文献

- [1] Akin S, Schembre J M, Bhat S K, et al. Spontaneous imbibition characteristics of diatomite[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2000, 25(3-4):149-165.
- [2] Hu R, Wang X, Dai S, et al. Application of graphitic carbon nitride for the removal of Pb (II) and aniline from aqueous solutions[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 260(3):469-477.
- [3] 詹树林, 林俊雄, 方明晖, 等. 硅藻土在工业污水处理中的应用研究进展[J]. 工业水处理, 2006, 26(9):10-13.
- [4] 杨宇翔, 吴介达, 黄忠良, 等. 几种硅藻土的表面电化性质的研究[J]. 无机化学学报, 1997, 13(1):11-15.
- [5] 郑水林, 孙志明, 胡志波, 等. 中国硅藻土资源及加工利用现状与发展趋势[J]. 地学前缘, 2014, 21(5):274-280.
- [6] 朱健, 王平, 雷明婧, 等. 硅藻土理化特性及改性研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(12):61-66.
- [7] 刘洁, 赵东风. 硅藻土的研究现状及进展 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34(5): 104-106.
- [8] Al-Degs Y S, Tutunju M F, Shawabkeh R A. The feasibility of using diatomite and Mn-diatomite for remediation of Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, and Cd<sup>2+</sup> from water [J]. Separation Science and Technology, 2000, 35(14): 2299-2310.
- [9] 罗道成, 刘俊峰. 改性硅藻土对废水中Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>吸附性能的研究[J]. 中国矿业, 2005, 14(7):69-71.
- [10] 凌静. 硅藻土对废水中Cd<sup>2+</sup>和Pb<sup>2+</sup>的吸附性能研究[D]. 南开大学, 2013.
- [11] 杨志军, 韦彩慧, 葛云, 等. 粤西徐闻九亩硅藻土热处理前后结构的变化及对Zn<sup>2+</sup>吸附性能的影响 [J]. 中山大学学报自然科学版, 2007, 46(3):107-111.
- [12] 刘自莲, 李鹏, 施永生, 等. 硅藻土改性及其在废水处理中的

- 应用研究现状[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(4): 5-8.
- [13] 郑水林, 王利剑, 舒锋, 等. 酸浸和焙烧对硅藻土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(11):1382-1386.
- [14] 王泽民, 马小凡. 酸法提纯硅藻土及废酸综合利用研究[J]. 非金属矿, 1995(1):16-19.
- [15] Tsai W T, Lai C W, Hsien K J. Characterization and adsorption properties of diatomaceous earth modified by hydrofluoric acid etching[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2006, 297 (2):749-754.
- [16] 朱健, 王平, 雷明婧, 等. 硅藻土常规物化改性机制及存在问题研究 [C]// 2013 中国环境科学学会学术年会论文集 (第八卷), 2013.
- [17] 冯成义. PAM 改性硅藻土处理钛白废水的实验研究 [D]. 昆明理工大学, 2012.
- [18] 矫娜, 王东升, 段晋明, 等. 改性硅藻土对三种有机染料的吸附作用研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6):1364-1369.
- [19] 李门楼. 改性硅藻土处理含锌电镀废水的研究[J]. 湖南科技大学学报自然科学版, 2004, 19(3):81-84.
- [20] 李增新, 王国明, 孟韵, 等. 壳聚糖改性硅藻土处理实验室有机废液[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(8):23-25.
- [21] 李哲, 王百年. 改性硅藻土对苯酚废水的吸附性能研究[J]. 无机盐工业, 2015, 47(12):56-59.
- [22] 刘频, 赵黔榕, 袁朗白, 等. 改性硅藻土对 Pb ( ) 的吸附作用[J]. 云南化工, 2003, 30(5): 11-13.
- [23] 林俊雄, 詹树林, 方明晖, 等. 三种吸附剂的改性与染料吸附特性比较研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2006, 40 (12):2031-2036.
- [24] 廖经慧. 硅藻土吸附剂的制备及其对重金属离子吸附性能的研究[D]. 中国地质大学(北京), 2012.
- [25] 蒋小红, 曹达文, 周恭明. 改性硅藻土处理城市污水技术的可行性研究[J]. 上海环境科学, 2003, 30(12):983-986.
- [26] 黄晓薇, 杨雄, 王平, 等. 应用硅藻土处理废水研究概述[J]. 中国农学通报, 2016, 32(17):85-90.
- [27] Wu J, Yang Y S, Lin J. Advanced tertiary treatment of municipal wastewater using raw and modified diatomite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 127(1-3):196-203.
- [28] 贺明和, 吴纯德, 金伟, 等. 硅藻土与混凝剂复配处理城镇生活污水的研究[J]. 工业水处理, 2005, 25(5):25-27.
- [29] Xiong W, Peng J, Hu Y. Chemical analysis for optimal synthesis of ferrihydrite-modified diatomite using soft X-ray absorption near-edge structure spectroscopy [J]. Physics and Chemistry of Minerals, 2009, 36(10): 557-566.
- [30] Xiong W, Peng J. Development and characterization of ferrihydrite-modified diatomite as a phosphorus adsorbent [J]. Water Research, 2008, 42(19): 4869-4877.
- [31] Xiong W, Peng J. Laboratory-scale investigation of ferrihydrite-modified diatomite as a phosphorus co-precipitant [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 215(1-4): 645-654.
- [32] 蒋小红, 周恭明. 改性硅藻土处理城市污水技术研究 [J]. 给水排水, 2006(1):116-116.
- [33] 李尔, 曾祥英, 陈莉, 等. 一体化活化硅藻土反应器应用于污水深度处理的中试研究[J]. 环境工程, 2011, 29(1):1-4.
- [34] 梁太雷. 改性硅藻土处理城市生活污水的研究 [J]. 广州化工, 2014(12):162-163.
- [35] 易伟林, 王欣, 马炯. 7 种改性硅藻土对 Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> 的吸附性能对比[J]. 环境工程学报, 2015 (6): 2857-2863.
- [36] 郭晓芳, 刘云国, 樊霆, 等. 改性新型 M-硅藻土吸附电镀废水中铅的研究[J]. 非金属矿, 2006, 29(6): 42-45.
- [37] Al-Degs Y, Khraisheh M A, Tutunji M F. Sorption of lead ions on diatomite and manganese oxides modified diatomite. [J]. Water Research, 2001, 35(15):3724-3728.
- [38] Khraisheh M A M, Al-degs Y S, Meminn W A M. Remediation of wastewater containing heavy metals using raw and modified diatomite[J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 99(2): 177-184.
- [39] 杨文, 王平, 王韬远, 等. PAM 包覆改性硅藻土吸附模拟废水中的 Cd<sup>2+</sup>[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(7):130-135.
- [40] 杨文, 王平, 朱健, 等. PAM 表面改性硅藻土吸附废水中 Pb<sup>2+</sup>[J]. 非金属矿, 2011, 34(2): 54-58.
- [41] Yang W, Wang P, Luo W L, et al. The Diatomite Modified by PAM and Applied to Adsorb Pb (II) in the Simulated Wastewater[J]. Advanced Materials Research, 2011, 233-235:382-389.
- [42] 李文强, 可成友, 可欣, 等. 改性硅藻土对重金属离子 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>的吸附研究[J]. 皮革与化工, 2016, 33(2):1-7.
- [43] 尚尉, 钱学仁, 孟晓敏, 等. 聚丙烯酰胺改性硅藻土在废水处理中的应用研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(4):1245-1248.
- [44] 刘建伟. 改性硅藻土新工艺使制浆造纸废水达到新排放标准的应用研究[J]. 化学工程与装备, 2009(7):173-175.
- [45] 丁来保, 韩善明, 盘爱享, 等. 新型深度处理剂 PFDAC 在造纸废水处理中的应用[C]// 2013 江苏省造纸学会学术年会. 2013.
- [46] 薛懂, 李长波, 张洪林, 等. 絮凝-Fenton 试剂氧化处理印染废水[J]. 环境工程学报, 2014 (9): 3601-3606.
- [47] Zhan S, Lin J, Fang M, et al. Adsorption of Anionic Dye by Magnesium Hydroxide-Modified Diatomite [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2008, 37(3):644-647.
- [48] 严刚, 程鑫鑫. 改性 Mn-硅藻土处理水溶性酸性媒介印染废水[J]. 非金属矿, 2012, 35(5):76-78.
- [49] 马万征, 徐俊仪, 赵凤, 等. 改性硅藻土处理印染废水的研究 [J]. 应用化工, 2013, 42(5):825-827.
- [50] ZHANG, Ge-shan, Hong-hai, et al. Adsorption of Anionic Dyes onto Chitosan-modified Diatomite [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2011, 27(6):1035-1040.
- [51] 吴晓翔. 硅藻精土新技术在印染废水深度处理中的应用[C]// 全国纺织印染废水深度处理及回用和污水达标排放学术研讨会. 2005.