



生物矿化法制备纳米氧化铁及其对亚甲基蓝的吸附

李倩玮, 王雨竹, 张宇鑫, 陈春茂

(中国石油大学(北京)化学工程与环境学院, 重质油国家重点实验室, 北京 102249)

[摘要] 分别以产脲酶菌株产酸克雷伯菌(*Klebsiella oxytoca*, *K. oxytoca*)和粗糙脉孢菌(*Neurospora crassa*, *N. crassa*)为模板, 利用生物矿化法制备了纳米磁性氧化铁复合材料。采用扫描电镜、X射线能谱、X射线衍射、BET比表面积测试法以及磁滞回归线等对制备的复合材料进行了表征, 并研究了其对亚甲基蓝的吸附特性。结果表明, 制备的材料主要为 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ 复合物, 球状颗粒, 粒径约为 20 nm, 具有良好的顺磁性。对亚甲基蓝的吸附效果: 以 *K. oxytoca* 为模板在 20 mmol/L Fe^{2+} 条件下制备的纳米磁性氧化铁复合材料对亚甲基蓝的吸附效果最好, 吸附率为 69.8%, 2 h 吸附量为 6.98 mg/g; 以 *N. crassa* 为模板在 10 mmol/L Fe^{2+} 条件下制备的纳米磁性氧化铁复合材料对亚甲基蓝的吸附效果较弱, 吸附率为 47.2%, 2 h 吸附量为 4.72 mg/g。

[关键词] 生物矿化; 纳米 Fe_3O_4 ; 吸附; 亚甲基蓝

[中图分类号] X703 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2022)03-0070-06

Preparation of nano ferric oxide by biomineralization and its adsorption to methylene blue

LI Qianwei, WANG Yuzhu, ZHANG Yuxin, CHEN Chunmao

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Using urease-producing strains *Klebsiella oxytoca* (*K. oxytoca*) and *Neurospora crassa* (*N. crassa*) as templates, nano-magnetic iron oxide composites were prepared by biomineralization method. The composites were characterized by scanning electron microscopy, X-ray energy spectrum, X-ray diffraction, BET specific surface area test and magnetic tape regression, and their adsorption properties for methylene blue were studied. The results showed that the prepared materials were mainly $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ complex, spherical particles with a particle size of about 20 nm, and showed good paramagnetic properties. The adsorption ability to methylene blue was as follows: Using *K. oxytoca* as template, the nano-magnetic iron oxide composite containing 20 mmol/L Fe^{2+} had the best adsorption effect on methylene blue, the adsorption rate is 69.8%, and the adsorption amount was 6.98 mg/g within 2 h. Using *N. crassa* as template, the nano-magnetic iron oxide composite containing 10 mmol/L Fe^{2+} had a weak adsorption effect on methylene blue, the adsorption rate was 47.2%, and the adsorption ability was 4.72 mg/g within 2 h.

Key words: biomineralization; Fe_3O_4 nanoparticles; adsorption; methylene blue

随着印染和纺织等行业的迅速发展,染料得到广泛使用。由于染料具有难降解、毒性大、结构复杂等特点,含有染料的废水若不经处理直接排放,会对环境和人类健康造成无法挽回的危害^[1-2]。偶氮染料是应用最为广泛的一类合成染料,约占有机染料总使用量的 80%。亚甲基蓝(MB)是一种典型的偶

氮染料,为芳香杂环化合物,由于苯环的分子构成使其不易被生物降解,结构相对稳定,极易在环境中滞留,会产生更多潜在的危险。因此,寻找低成本、高效、合理地处理染料废水的方法迫在眉睫^[3]。

目前,处理染料废水的方法主要有吸附法、光催化法、膜分离法以及电化学法等^[4-6]。其中,吸附法

[基金项目] 中国石油大学(北京)校级基金项目(2462020YXZZ035)

由于其成本低、处理方法简单、处理效果显著、无二次污染等特点,得到了最广泛的应用。目前,较为常用的吸附剂主要有活性炭、天然蒙脱土、纤维系列、活化煤、活性硅藻土、树脂等^[7]。纳米 Fe_3O_4 是一种常见的磁性吸附剂,对水中多种无机离子及有机物都具有较强的吸附能力,可应用于去除水中的有机污染物或重金属离子^[8]。纳米 Fe_3O_4 的特点是:颗粒粒径较小,比表面积大,能与污染物大面积接触,具有很强的吸附能力,磁性较强有利于回收,重复利用率较高^[9-12]。使用易解吸附且可重复使用的磁性纳米 Fe_3O_4 吸附处理废水中的有机染料已成为目前的研究热点^[13]。纳米 Fe_3O_4 的制备方式主要有:共沉淀法、溶剂热法、微乳液法、热分解法等^[14]。上述方法均可以制备出良好的磁性铁氧化物材料,但其存在各种弊端,因此迫切需要寻求一些新的制备方法。

本研究采用生物矿化法制备纳米磁性 Fe_3O_4 ,其优点在于所需材料简单易得。菌株选取产脲酶菌株产酸克雷伯菌(*Klebsiella oxytoca*, *K. oxytoca*)和真菌粗糙脉孢菌(*Neurospora crassa*, *N. crassa*),通过生物诱导矿化的作用,控制培养基中铁元素的含量来改变微生物的生长环境,从而使铁离子不断沉积到微生物的表面。培养一段时间之后进行水热反应,即可得到纳米 Fe_3O_4 材料。以亚甲基蓝(MB)作为目标污染物,探究了制备的纳米 Fe_3O_4 材料的吸附性能。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

菌种来源:实验选用的细菌为产酸克雷伯菌(*Klebsiella oxytoca*, *K. oxytoca*),采用脲酶筛选培养基从土壤中筛选得到;真菌为粗糙脉孢菌(*Neurospora crassa*, *N. crassa*),购于中国农业微生物菌种保藏管理中心。

培养基:LB(Luria-Bertani)培养基、MEA(Malt extract agar)固体培养基、ME(Malt extract)液体培养基、AP1培养基。

材料:蛋白胨、酵母浸粉、琼脂粉,购于北京奥博星生物技术有限责任公司。麦芽浸膏,购于美仑生物。尿素、硫酸亚铁、硫酸镁、硫酸锰,纯度 $\geq 99.0\%$;硫酸锌,纯度 $\geq 99.5\%$,购于天津市光复科技发展有限公司。氯化钾、氯化钠,纯度 $\geq 99.0\%$;戊二醛,纯度 $\geq 25\%$;氢氧化钠,纯度 $\geq 96.0\%$;葡萄糖,分析纯,

购于天津市福晨化工试剂厂。无水氯化钠、无水乙醇、硫酸铜,分析纯,购于北京化工厂。1,4-哌嗪二乙磺酸,纯度 $\geq 99.0\%$,购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。三氯化铁,分析纯,购于天津市大茂化学试剂厂。实验用水均为超纯水。

仪器:ME104电子分析天平、FiveEasy Plus酸度计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;Arium mini超纯水机,Sartorius;YXQ-LS-50S II立式压力蒸汽灭菌器,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;HZP-250全温振荡培养箱、SHP-250生化培养箱,上海精宏实验设备有限公司;H1850R高速冷冻离心机,湘仪离心机仪器有限公司;DHG-9055A电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;UV-1601紫外可见分光光度计,北京瑞利分析仪器有限公司;FD-1B-50真空冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司;SW-CJ-2FD洁净工作台,苏州安泰空气技术有限公司。

1.2 纳米 Fe_3O_4 的制备

1.2.1 不同菌株的生物矿化培养

将*K. oxytoca*接种于装有3 mL LB液体培养基的试管中,在30℃、125 r/min的摇床内培养12 h。之后按3%(体积分数)接种量接种至AP1培养基中进行扩大培养,AP1培养基的配制方法参考文献^[15]。然后在超净工作台上使用注射器通过0.2 μm 孔径的无菌醋酸纤维素膜过滤器向高压灭菌后的AP1培养基中加入 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液,使 Fe^{2+} 最终浓度分别为10、20 mmol/L。为防止硫酸亚铁溶液久置被空气中的氧气所氧化,应现用现配。然后在30℃、125 r/min的摇床内培养48 h,用于生物矿物的生成。

将*N. crassa*接种到MEA固体培养基中,在25℃下培养2~3 d。待菌丝旺盛,完全覆盖住培养基时,将MEA培养基打孔,分别接种至含有10、20 mmol/L Fe^{2+} 的AP1液体培养基中培养,于25℃下培养72 h,用于生物矿物的生成。

1.2.2 纳米 Fe_3O_4 的制备

培养一定时间后,分别离心(10 000 r/min、5 min、4℃)收集菌体,然后将菌体置于水热釜中,在电热鼓风干燥箱中于160℃下水热反应6 h。收集水热反应后的菌体于通风橱中干燥。待样品完全干燥后,将样品研磨至粒径为0.1~10 μm 的粉末,即得到利用不同菌株在不同浓度 Fe^{2+} 条件下制备的 Fe_3O_4 。

收集水热反应前后的菌体,利用2.5%戊二醛溶液进行固定^[15],用于后续矿物形貌分析。

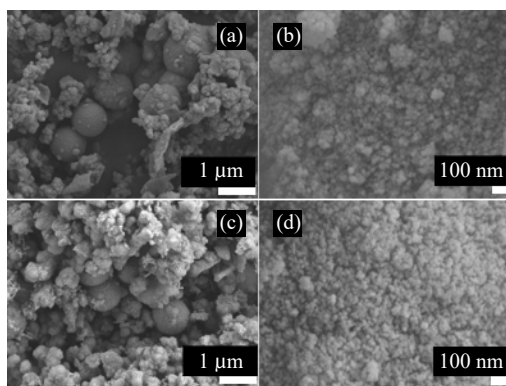
1.3 吸附实验

称取100 mg吸附剂置于250 mL锥形瓶中,向其中加入100 mL配制好的10 mg/L的亚甲基蓝溶液,常温下振荡反应一定的时间。分别在反应时间为0、1、3、5、10、20、30、60、90、120 min时取上清液,采用紫外可见分光光度计在波长664 nm处测其吸光度,通过标准曲线方程得到亚甲基蓝浓度。MB的吸附标准曲线方程为 $y=0.060\ 9+0.197\ 69x$, $R^2=0.992\ 33$, y 为吸光度, x 为染料废水中亚甲基蓝浓度。

2 结果与分析

2.1 扫描电镜(SEM)和X射线能谱(EDX)分析

对以*K. oxytoca*为载体培养得到的水热反应前后的菌体进行SEM表征,结果如图1所示。



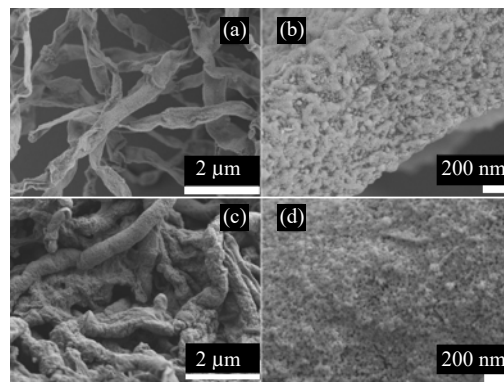
(a)水热前放大10 000倍;(b)水热前放大100 000倍;
(c)水热后放大5 000倍;(d)水热后放大100 000倍

图1 以*K. oxytoca*为载体制备材料的SEM表征结果

Fig. 1 SEM characterization results of materials prepared with *K. oxytoca* as carrier

从图1可知,水热反应前后,球状的菌体表面都富有粗糙、颗粒感的矿化物质,这说明生物矿化的效果较好。对比图1(a)和图1(c)可以看出,水热反应使菌体表面的矿化物发生了结晶,使得菌体表面的矿化物含量变得更多,矿物粒径在20 nm左右。从图1(b)和图1(d)可以看出,水热反应后菌体表面隆起部分更加明显、清晰,表面变得更加糙杂,进一步说明菌体表面矿物质数量增多,这同样是水热反应的结晶作用的表现。

对以*N. crassa*为载体培养得到的水热反应前后的菌体进行SEM表征,结果如图2所示。



(a)水热前放大2 000倍;(b)水热前放大250 000倍;
(c)水热后放大2 000倍;(d)水热后放大50 000倍

图2 以*N. crassa*为载体制备材料的SEM表征结果

Fig. 2 SEM characterization results of materials prepared with *N. crassa* as carrier

由图2可知,真菌菌丝细长,说明其生长状况良好。水热反应前后菌丝表面均呈现不光滑,粗糙复杂程度较高,说明菌丝表面矿化程度高。对比图2(a)和图2(c)可以看出,水热反应使得菌丝表面的矿化结晶数量变得更多,矿物粒径处于20 nm左右。

对水热前后含10 mmol/L Fe^{2+} 的培养基制备得到的2种菌体材料表面进行EDX分析,结果表明,水热前后菌体材料的主要元素为C、O、Fe,其中以*K. oxytoca*为载体培养得到的水热前后菌体表面的C、O、Fe原子数占比分别为45.89%、40.46%、13.65%和22.04%、52.31%、25.65%;以*N. crassa*为载体培养得到的水热前后菌体表面的C、O、Fe原子数占比分别为60.25%、34.12%、5.63%和38.46%、44.12%、17.42%。因为菌体表面均发生了生物矿化反应,使得Fe、O元素附着在菌体表面,而水热反应使菌体表面的Fe、O元素含量增高。

2.2 X射线衍射(XRD)分析

图3为用含10 mmol/L和20 mmol/L Fe^{2+} 的AP1培养基培养*K. oxytoca*制备材料的XRD表征结果。

由图3可知,与 Fe_3O_4 标准吸收峰比对,制备的2种材料在最强吸收峰处均能匹配成功,说明对于*K. oxytoca*而言,无论培养基中的 Fe^{2+} 含量为多少,均可以成功使用生物矿化法制备出 Fe_3O_4 。但其XRD衍射图谱中出现部分弥散峰形,这可能是与生物矿化形成的矿物质粒径较小,且矿物形成过程中有较多菌株胞外分泌物的参与有关,如胞外多糖、蛋白质、氨基酸等^[16]。

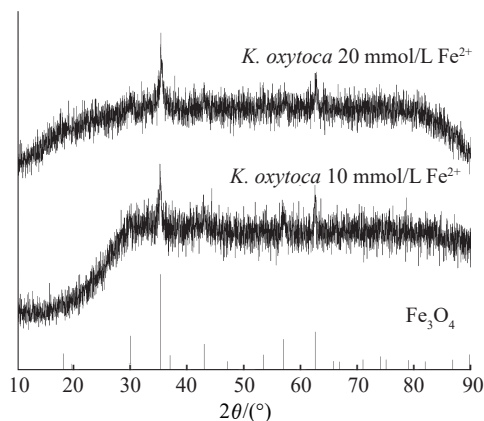
图3 以 *K. oxytoca* 为载体制备材料的XRD表征结果

Fig. 3 XRD characterization results of materials prepared with *K. oxytoca* as carrier

图4为用含10 mmol/L和20 mmol/L Fe^{2+} 的AP1培养基培养 *N. crassa* 制备材料的XRD表征结果。

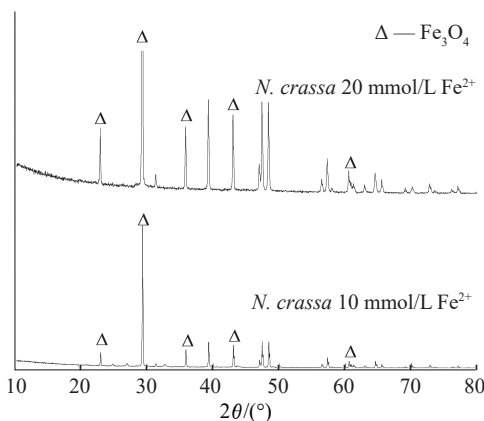
图4 以 *N. crassa* 为载体制备材料的XRD表征结果

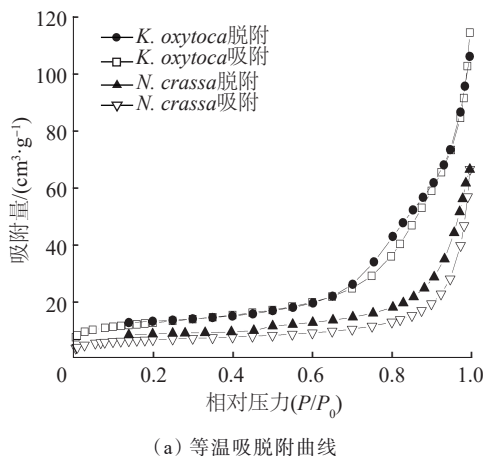
Fig. 4 XRD characterization results of materials prepared with *N. crassa* as carrier

由图4可以看出,制备的2种材料的特征峰均能与 Fe_3O_4 的标准吸收峰相匹配,说明对于 *N. crassa* 而言,无论培养基中的 Fe^{2+} 含量为多少,均可以成功使用生物矿化法制备出 Fe_3O_4 。

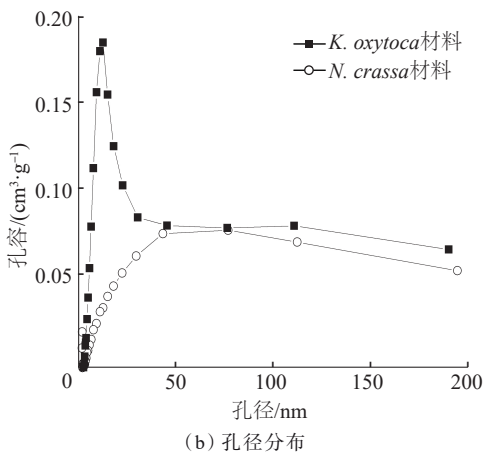
2.3 BET比表面积测试结果及分析

图5为生物矿化法制备的磁性纳米 Fe_3O_4 的氮气吸附-脱附曲线及其孔径分布。制备原料均含10 mmol/L Fe^{2+} 。

由图5(a)可知,利用 *K. oxytoca* 制备的 Fe_3O_4 材料的吸附效果要强于利用 *N. crassa* 制备的 Fe_3O_4 。由图5(b)可知,2种材料主要为中孔和大孔结构。利用 *K. oxytoca* 制备的 Fe_3O_4 的比表面积和总孔容分别



(a) 等温吸脱附曲线



(b) 孔径分布

图5 生物矿化法制备的磁性纳米 Fe_3O_4 的等温吸脱附曲线及孔径分布

Fig. 5 Isothermal desorption curve and pore size distribution of magnetic nano- Fe_3O_4 prepared by biomining method

为 $45.4 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $0.177 \text{ cm}^3/\text{g}$, 微孔孔容为 $0.0066 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。利用 *N. crassa* 制备的 Fe_3O_4 的比表面积和总孔容分别为 $24.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $0.103 \text{ cm}^3/\text{g}$, 微孔孔容为 $0.0055 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。通过比较得出,利用 *K. oxytoca* 制备出的 Fe_3O_4 材料的比表面积和孔容更大。根据材料的比表面积大小和孔容大小可以发现,利用 *K. oxytoca* 和 *N. crassa* 制备得到的 Fe_3O_4 材料都具有良好的吸附能力和分散性能,良好的分散性和稳定性可以减轻纳米颗粒易团聚导致反应活性降低的问题。以这2种方式最终制得的材料与一般化学方法制得的纳米氧化铁相比,都具有粒径更小、分散性更好的特点^[10]。

2.4 磁滞回归线测定结果分析

图6为分别利用 *K. oxytoca* 和 *N. crassa* 制备的 Fe_3O_4 的磁滞曲线。制备原料均含10 mmol/L Fe^{2+} 。

由图6可知,这2条磁滞曲线关于原点对称,且

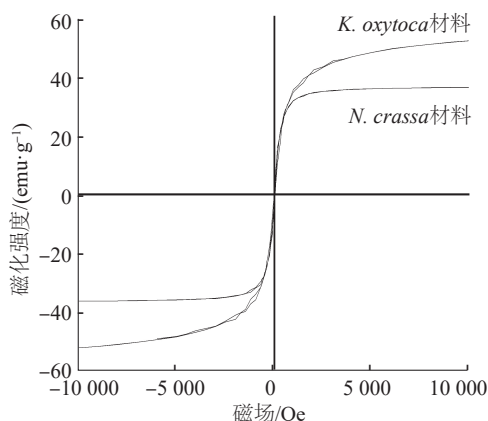


图6 生物矿化法制备的磁性纳米 Fe_3O_4 的磁滞曲线

Fig. 6 Hysteresis curves of magnetic nano- Fe_3O_4 prepared by biomineralization

随着磁场的增加,磁化强度不断增大,最终趋于饱和,这表明制备得到的纳米 Fe_3O_4 材料均具有超顺磁特性^[17]。利用*K. oxytoca*、*N. crassa*制备的 Fe_3O_4 的磁饱和强度分别为52.2、36.4 emu/g。对比可以看出,利用*K. oxytoca*进行生物矿化法制备的纳米磁性 Fe_3O_4 材料具有更高的磁饱和强度,更容易从水中将其分离出来。

2.5 吸附实验结果分析

图7为2种菌株制备的 Fe_3O_4 材料的吸附性能。

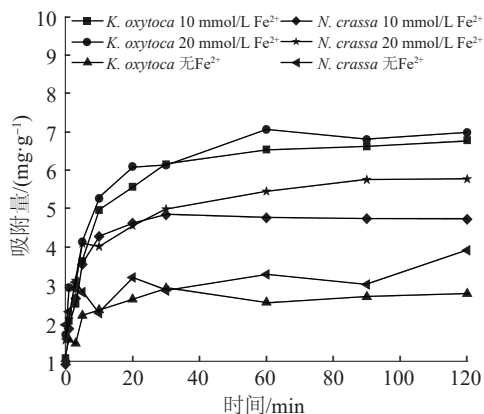


图7 不同条件下制备的磁性纳米 Fe_3O_4 的吸附曲线

Fig. 7 Adsorption curves of magnetic nano- Fe_3O_4 prepared under different conditions

从图7可以看出,随着吸附时间的增加,吸附量增大,当吸附时间为60 min时,基本达到吸附平衡。同时对比图中各条吸附曲线可知,2种不同菌株生物矿化法制备出的 Fe_3O_4 材料的吸附能力强弱:*K. oxytoca* 20 mmol/L Fe^{2+} > *K. oxytoca* 10 mmol/L Fe^{2+} > *N.*

crassa 20 mmol/L Fe^{2+} > *N. crassa* 10 mmol/L Fe^{2+} > *N. crassa* 无 Fe^{2+} > *K. oxytoca* 无 Fe^{2+} 。本实验利用*K. oxytoca*在20 mmol/L Fe^{2+} 条件下制备的 Fe_3O_4 材料在60 min时可以吸附69.8%的亚甲基蓝,达到了较高的吸附去除率,这表明以此制备得到的材料对亚甲基蓝具有较好的吸附性能^[18]。

3 结论

(1)通过生物矿化法成功制备了纳米氧化铁,制备的材料多为球状和多孔结构,且大小均匀,分散性高,顺磁性好,吸附效果好。

(2)制备的材料具有较高的分散性和稳定性,可以减轻纳米铁颗粒易团聚导致反应活性降低的问题,同时磁学性质好也决定了在使用过程中能够很容易将其从水体中分离出来。

(3)制备的 Fe_3O_4 材料对亚甲基蓝具有较强的吸附作用。

(4)以不同菌株作为载体均能制得 Fe_3O_4 材料,但其具有不同的吸附性能。其中,利用*K. oxytoca*在20 mmol/L Fe^{2+} 条件下制备的 Fe_3O_4 材料对亚甲基蓝的吸附效果最好,吸附率为69.8%,2 h吸附量为6.98 mg/g;利用*N. crassa*在10 mmol/L Fe^{2+} 条件下制备的 Fe_3O_4 材料对亚甲基蓝的吸附效果较弱,吸附率为47.2%,2 h吸附量为4.72 mg/g。

参考文献

- [1] 花莉,解井坤,朱超,等.微生物对偶氮染料脱色降解的研究进展[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(10):103-113.
HUA Li, XIE Jingkun, ZHU Chao, et al. Advances in decolorization and degradation of azo dyes by microorganisms [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2015, 43(10):103-113.
- [2] SHARMA V T, HALANUR M M, KAMATH S V, et al. Fe-Al based nanocomposite reinforced hydrothermal carbon: Efficient and robust absorbent for anionic dyes [J]. Chemosphere, 2020, 259: 127421.
- [3] 闫雪倩,裴向军,杜杰,等. $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{CO}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 磁性复合物在环境污染治理领域中的应用[J].化工进展,2021,40(6):3515-3525.
YAN Xueqian, PEI Xiangjun, DU Jie, et al. Application of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{CO}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ magnetic composite in environmental pollution control [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(6): 3515-3525.
- [4] AFKHAMI A, SABER-TEHRANI M, BAGHERI H. Modified ma-

- ghemite nanoparticles as an efficient adsorbent for removing some cationic dyes from aqueous solution[J]. Desalination, 2010, 263(1/2/3): 240-248.
- [5] WANG Zhihong, WU Zekun, ZHI Xujun, et al. $\text{TiO}_2/\text{CTS}/\text{ATP}$ adsorbent modification and its application in adsorption-ultrafiltration process for dye wastewater purification[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 59963-59973.
- [6] KHATAEE A, KARIMI A, AREFI-OSKOU S, et al. Sonochemical synthesis of Pr-doped ZnO nanoparticles for sonocatalytic degradation of Acid Red 17 [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 22: 371-381.
- [7] HASSAN H, SALAMA A, EL-ZIATY A K, et al. New chitosan/silica/zinc oxide nanocomposite as adsorbent for dye removal [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 131: 520-526.
- [8] FAN Honglei, LI Lei, ZHOU Shaofeng, et al. Continuous preparation of Fe_3O_4 nanoparticles combined with surface modification by L-cysteine and their application in heavy metal adsorption [J]. Ceramics International, 2016, 42(3): 4228-4237.
- [9] 徐劫,王琳,陈家斌,等. 磁性 Fe_3O_4 -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1734-1742.
- XU Jie, WANG Lin, CHEN Jiabing, et al. Degradation of AO7 by magnetic Fe_3O_4 -CuO heterogeneous activation of sodium percarbonate[J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1734-1742.
- [10] 叶明,王公正,宿贵梅,等. 功能性磁性纳米复合材料的制备及应用[J]. 环境工程, 2015, 33(10): 66-71.
- YE Ming, WANG Gongzheng, SU Guimei, et al. Preparation and application of functional magnetic nanocomposites [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(10): 66-71.
- [11] 高余良,朱光明,马拖拖. Fe_3O_4 磁性纳米粒子及其生物医学应用研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(3): 973-980.
- GAO Yuliang, ZHU Guangming, MA Tuotuo. Research progress of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles and their biomedical applications[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(3): 973-980.
- [12] 汪婷,高滢,金晓英,等. 纳米四氧化三铁同步去除水中的 $\text{Pb}(\text{II})$ 和 $\text{Cr}(\text{III})$ 离子[J]. 环境工程学报, 2013, 7(9): 3476-3482.
- WANG Ting, GAO Ying, JIN Xiaoying, et al. Simultaneous removal of $\text{Pb}(\text{II})$ and $\text{Cr}(\text{III})$ ions from water by nano ferric oxide[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(9): 3476-3482.
- [13] 龚新怀,辛梅华,李明春,等. 磁性响应茶渣制备及其对水溶液中亚甲基蓝的吸附[J]. 化工进展, 2019, 38(2): 1113-1121.
- GONG Xinhui, XIN Meihua, LI Mingchun, et al. Magnetic response of tea residue preparation and its adsorption of methylene blue in aqueous solution[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(2): 1113-1121.
- [14] 段正洋,刘树丽,徐晓军,等. 磁性 Fe_3O_4 纳米粒子的制备、功能化及在重金属废水中的应用[J]. 化工进展, 2017, 36(5): 1791-1801.
- DUAN Zhengyang, LIU Shuli, XU Xiaojun, et al. Preparation, functionalization and application of magnetic Fe_3O_4 nanoparticles in heavy metal wastewater[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(5): 1791-1801.
- [15] LI Q, CSETENYI L, GADD G M. Biomining of metal carbonates by *Neurospora crassa* [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(24): 14409-14416.
- [16] LI Qianwei, LIU Daoqing, CHEN Chunmao, et al. Experimental and geochemical simulation of nickel carbonate mineral precipitation by carbonate-laden ureolytic fungal culture supernatants[J]. Environmental Science: Nano, 2019, 6(6): 1866-1875.
- [17] 陈恭,王秀玲,刘勇健,等. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CdTe}$ 磁性荧光纳米复合物的逐步杂凝聚法合成及其表征[J]. 材料导报, 2012, 26(10): 49-53.
- CHEN Gong, WANG Xiuling, LIU Yongjian, et al. Synthesis and characterization of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CdTe}$ magnetic fluorescent nanocomposites by progressive heteroagglutination method[J]. Materials Reports, 2012, 26(10): 49-53.
- [18] 姜德彬,余静,叶芝祥,等. 磁性纳米复合物对水中亚甲基蓝的吸附及其机理[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1763-1772.
- JIANG Debin, YU Jing, YE Zhixiang, et al. Adsorption of methylene blue on water by magnetic nanocomposites and its mechanism[J]. China Environmental Science, 2016, 36(6): 1763-1772.
- [作者简介] 李倩玮(1987—), 博士, 副教授, 硕士生导师。
E-mail: qianweili@cup.edu.cn. 通讯作者: 陈春茂, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: c.chen@cup.edu.cn.
- [收稿日期] 2021-12-01(修改稿)