

# 改性膨润土及其复合材料去除水中染料的研究进展

王阳

(重庆工商大学 环境与资源学院 重庆 400067)

**摘要:** 简述了膨润土的基本特性,阐述了膨润土的改性方法,综合评述了各种改性膨润土及其复合材料去除水和废水中染料的吸附性能,并提出了对基于膨润土的吸附剂的未来展望。

**关键词:** 膨润土; 改性; 吸附; 染料

中图分类号: TQ 031.2; X 703.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3206(2019)10-2480-05

DOI:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20190729.016

## Research progress of modified bentonite and its composite materials for removing dyes from water

WANG Yang

(College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** The basic characteristics of bentonite are briefly introduced. The modification methods of bentonite are described. The adsorption properties of various modified bentonite and its composite materials to remove dyes from water and wastewater are comprehensively reviewed. A number of future prospects for the bentonites based adsorbents are proposed.

**Key words:** bentonite; modification; adsorption; dye

染料是能使其他材料附着上各种颜色的有机化合物。数据显示,2016年,中国染料生产量超过了世界上大多数国家,已提升至 $9.28 \times 10^5$ t。染料广泛用于服装、油墨、印刷、食品技术、制药、农业等产业,在工业生产、销售、使用过程中有多种途径进入到环境水体中,会对环境构成威胁。染料在水中有较高的溶解度,会降低光合作用,从而影响共生过程。此外,大多数染料通过产生致突变、致癌作用和功能障碍对水生生态系统和人类生命产生毒害作用<sup>[1]</sup>。然而,含有染料的废水通常很难处理,因此,迫切需要有效的技术,以便在排放前从废水中去除染料。吸附是用于纯化流出物介质的重要工业分离方法<sup>[2]</sup>。相较于其他方法,通过吸附这一分离技术去除污染水域的染料具有简单(在操作方面)、低成本和高效率等优点<sup>[3-5]</sup>。

### 1 膨润土的基本特性

具体来说,吸附可用于纺织、皮革、染色、化妆品、塑料、食品和造纸工业,在应用中,水回收是非常重要的。为了可以有效地回收所需水质,寻找廉价,

有效的吸附剂就成为利用吸附去除水中污染物的关键。膨润土因在自然界中储量较大,分布广泛,容易处理使用,可进行多种改性,吸附水中杂质能力强,络合能力强等优势受到各行各业的重视,尤其在去除染料废水的应用得到了广泛的研究。

膨润土是一种传统的低成本天然硅酸盐矿物,由两层硅氧四面体和一层铝氧八面体构成,通式是: $Na_x(H_2O)_4\{(Al_{2-x}Mg_{0.33})[Si_4O_{10}](OH)_2\}$ 。膨润土具有较大的表面积,独特的夹层结构,较高的阳离子交换容量和负表面电荷,还具有优良的化学活性和机械强度。这些出色的物理、化学特性有助于其特殊的吸附性能。然而,天然膨润土表层的亲水性膜使其在吸附非亲水性污染物时吸附动力慢,吸附效果不佳,在投入使用时,往往达不到相关要求,使其应用范围较窄。为使膨润土有更好的吸附性能,扩大其使用范围,通常要经各种改性方法对天然膨润土作处理。

### 2 天然膨润土的改性

现已用于膨润土改性的方法不计其数,研究较

收稿日期: 2019-02-18 修改稿日期: 2019-03-13

基金项目: 重庆市科委基金(cstc2014yykfA20003)

作者简介: 王阳(1994-),女,四川绵竹人,在读硕士研究生,师从钟成华教授,从事水处理方面的研究。电话: 18875019510, E-mail: 1303224650@qq.com

多的包括活化法及添加改性剂法。通过这些方法, 改性膨润土的组成和分子结构可以被模拟。用已报道方法制备的不同类型的改性膨润土应用于生物医学、电子、光学、机械、环境科学等各方面。

## 2.1 活化法

2.1.1 热活化法 利用高温条件使膨润土表层、层间水分及结构孔道存在的部分杂质脱离, 以增加内部水性薄膜及杂质对污染物的传质效率, 促进各离子之间的有效反应, 使其表面能吸附更多的污染物, 从而改善膨润土处理污染物的能力。Sameer 等<sup>[6]</sup>在 850 °C 条件下对膨润土进行物理处理, 并用此高温改性材料处理含苯酚的污染废水, 实验发现, 热活化膨润土吸附水中苯酚的能力相较于改性前大大提升。

2.1.2 酸活化法 用酸溶液对膨润土进行改性, 把  $H^+$  引入中间层, 可使内部的  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等分离出, 减弱层间键能, 打开层间晶格, 提高层间距和比表面积, 有利于污染物分子进入, 吸附性能得以提高。Benguella 等<sup>[7]</sup>在酸性介质中活化膨润土原土, 制备的改性材料结构得到优化, 在处理含酸性染料的废液时, 改性膨润土能固定更多的染料。

2.1.3 微波活化 在特定条件下, 利用微波对膨润土进行辐射处理, 此处理方法加热均匀, 能进行选择性的加热, 且无滞后效应, 能促使特殊反应的产生, 且能使内部效应速度加快, 使分子在短时间内获得较高的能量利用率, 因其内部构造繁杂, 各组分的极性存在较大差异, 易被微波辐射诱导产生结构重组现象, 达到改性效果。Mishra 等<sup>[8]</sup>在 180 °C 对  $TiO_2$ -膨润土粘土复合材料进行微波处理, 并用系列表征方法对改性材料进行表征, 发现微波活化膨润土复合材料的比表面积和孔体积比市面上商业  $TiO_2$  材料的更优。

## 2.2 添加改性剂法

2.2.1 有机改性法 使各种不同的有机季铵盐型阳离子占据膨润土夹层, 撑大了层间空隙的同时疏水性也得到了改善, 使得有机改性膨润土能吸附更多的疏水性有机污染物。Sun 等<sup>[9]</sup>用有机螯合剂对天然膨润土进行改性, 制备新的吸附剂, 用于去除混合污染物 ( $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  及苯酚), 实验过程中发现改性后的吸附剂对  $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  和苯酚具有高吸附亲和力。

2.2.2 无机改性法 把无机金属阳离子聚合物引入膨润土结构层之间的空隙, 使层间空间扩大, 制备出来的新型膨润土内部结构得到优化, 吸附污染物的容量相应提升。商丹红等<sup>[10]</sup>利用自制的铝交联剂, 对膨润土进行改性处理, 证实了改性后的膨润土

吸附量是处理前的 4 倍。

2.2.3 无机-有机复合改性法 利用无机、有机材料的共同作用, 先使无机材料进入膨润土层间, 扩大层间距离, 然后引进有机材料, 让膨润土具有强大的吸附架桥作用, 能有效地让污染物附着。罗阳春等<sup>[11]</sup>利用这一方法, 把羟基铁和 CTAB 联合用于改性膨润土, 并用于处理废水, 相较于单一材料, 复合材料改性后的膨润土显示出更好的吸附效果。

## 3 改性膨润土及其复合材料处理染料废水的应用

### 3.1 酸活化膨润土

Espantaleona 等<sup>[12]</sup>研究发现, 酸活化膨润土对酸性黄 194 的吸附能力大约是原土的 3 倍, 而其二者对酸性红 342 的吸附能力分别是原土: 29.1 mg/g、酸活化膨润土: 85.2 mg/g。此外, HCl 活化粘土的渗透系数  $k$  值比原始粘土小很多 (2~3 倍)。Tahir 等<sup>[13]</sup>报道了酸处理改性膨润土 (MBC) 去除纺织染料反应性红 223 (RR 223) 的研究。发现使用 0.9 g 改性膨润土, 接触 20 min 的实验条件下, RR 223 染料的最大去除率能达到 95.15%。该吸附过程符合 Langmuir 模型。Özcan 等<sup>[14]</sup>评估了酸活化膨润土材料处理含酸性红 (AR57) 和酸性蓝 (AB294) 染料的废水这一过程, 从而得知酸活化膨润土对 AR57 (416.3 mg/g) 和 AB294 (119.1 mg/g) 的吸附能力非常高。

### 3.2 热活化膨润土

Ruilian<sup>[15]</sup>研究了通过引入碳和焙烧方法活化改性膨润土, 并用改性后的膨润土从废水中去除活性黑染料。他优化了染料的吸附条件: 焙烧时间为 3.5 h, 夹带的活性炭为 3%, 焙烧温度为 550 °C。实验还发现, 改性膨润土对活性黑染料废水中两种污染指标: 化学需氧量和色度均有优良的去作用。Manjot Toor 等<sup>[16]</sup>通过使用热活化 (TA)、酸活化 (AA) 和组合的酸和热活化 (ATA) 膨润土, 去除了红豆红。最佳条件下 (污染物浓度 100 mg/L, 膨润土用量为 1 g/L, 温度 100 °C, 接触时间 1.4 h), ATA 的表面积增加了 70%, AA 和 TA 分别增加了 65% 和 20%。改性膨润土的吸附能力为:  $ATA > AA > TA$ 。

### 3.3 微波改性膨润土

Banat F 等<sup>[17]</sup>采用微波及硫酸协同对膨润土粘土进行处理, 并进行了去除实际废水中染料的实验, 发现微波能量和酸性介质对膨润土吸附容量的改善有很大贡献。吴光峰等<sup>[18]</sup>利用微波作用制备 Al- $TiO_2$  改性膨润土, 用以吸附废水中的碱性染料。实验发现, 在以下辐射条件: 功率 260 W, 反应

8 min,得到的微波活化膨润土性能最佳,耐热性能提高,层间距及比表面积均增大,对污染物的饱和吸附量也增加了 25.4 g/100 g。Queiroga 等<sup>[19]</sup>在短时间(5 min),50 °C微波辐射下,用氨基丙基三甲氧基硅烷,非极性溶剂二亚乙基二醇进行甲硅烷基化制备膨润土甲硅烷基化样品,并用于去除一种阴离子染料活性紫 5R,在 pH = 2 时,甲硅烷基化样品中活性紫 5R 的最大吸附量为 107.4 mg/g。

### 3.4 有机改性膨润土

邵红等<sup>[20]</sup>通过使用有机材料邻羟基氮(杂)萘改性的膨润土处理蓝绿色和酸橙红色染料。研究显示,在最适条件下:pH = 3.5,改性膨润土投加量 7 g/L,以 125 r/min 搅拌 20 min,离心 70 min,蓝绿色染料废水的色度去除率超过 90%;酸橙红色超过 70%。吸附过程符合准二阶速率方程。Yue 等<sup>[21]</sup>研究了聚邻二甲苯基二甲胺/膨润土吸附 4 种分散染料:分散黄棕色 S-2RFL(DYB S-2RFL)、分散红 S-R(DR S-R)、分散蓝 SBL(DB SBL)和分散黄(DY SE-6GFL)。实验发现在 pH = 1.2,反应 60 min 时 4 种染料去除率最大。对于 4 种体系,吸附动力学符合具有动力学速率常数( $k_1$  和  $k_2$ )的两步一级动力学速率方程和具有扩散速率常数的颗粒内扩散模型( $k_{int1}$  和  $k_{int2}$ )。Koswojo 等<sup>[22]</sup>报道了用有机膨润土从废水中去除酸性绿 25 的研究。通过使用 0.01 g 吸附剂与 150 mL(浓度分别是 600, 800, 1 000 mg/L)的酸性绿 25 溶液在不同的时间间隔和温度(30, 40, 50 °C)下混合反应 2 h,进行动力学研究。发现 Langmuir 方程比 Freundlich 方程更符合 4 个吸附反应,在 30 °C 下达到最大吸附容量为 2.983 mmol/g。

### 3.5 无机改性膨润土

任建敏等<sup>[23]</sup>制得无机改性 Na-膨润土,并发现了 25 °C, pH = 10,反应 60 min 时,Na-膨润土吸附亚甲基蓝染料的量达到 198.71 mg/g,吸附过程契合 Langmuir 方程和二阶动力学模型。李风起<sup>[24]</sup>把 18 g/L 无机改性膨润土加入到 100 mg/L 的实验室自配染料废水中,在 20 °C、pH = 7、振荡速率 200 r/min 的实验条件下混合反应 35 min,经实验发现,模拟染料废水中染料被吸附了 85.26%。Jinxu 等<sup>[25]</sup>通过使用  $Al_2(SO_4)_3$  改性膨润土从化学工业废水中除去苯酚。确定了最佳吸附剂的量、pH 和反应时长。吸附实验结果表明,苯酚可被吸附 78.5%,改性膨润土对另外两种污染物 COD 及油类的处理量也可达到 75.2% 和 94.2%。李瑞静等<sup>[26]</sup>利用铝镍无机改性膨润土材料,对模拟酸性大红染料废水进行处理,最佳反应条件是:pH = 6,振荡时间为 50 min,改性土用量为

0.6 g/50 mL。反应后测得染料废水的吸光度仅为最初的 29.04%。

### 3.6 其他改性膨润土

张黎<sup>[27]</sup>利用超声波对质量欠佳的 Ca-膨润土进行钠化改性和有机改性。改性后的膨润土性能符合相关评价标准,耐热能力强。Yang 等<sup>[28]</sup>通过超声波预处理的水热途径合成了  $TiO_2-WO_3$ -膨润土复合材料对亚甲基蓝(MB)染料进行吸附。观察到 MB 的最大吸附容量增加到 70.9 mg/g。 $TiO_2-WO_3$ -膨润土对 MB 的吸附能力在 pH 为 3~5 范围里增强,在 pH 为 5~9 的范围内大致保持恒定,在 pH = 11 时进一步提高。彭振华等<sup>[29]</sup>合成阳离子铵盐新型改性膨润土材料,并结合聚合氯化铝的优良絮凝作用,共同用于吸附染料。可以从中看出反应性亮蓝 X-BR、反应性亮红 X-3B 和酸红 GR 的去除率分别为 99.4%、84.8% 和 96.1%。用它来处理染料废水处理厂中废水,出水的 COD 可由 121.3 mg/L 减少到 65.4 mg/L,色度可由 32 次减少到 8 次以下。

### 3.7 复合改性膨润土

崔冰莹等<sup>[30]</sup>将表面活性剂负载到经无机铁材料处理过的膨润土内部,得到结构优化的改性吸附剂(ZVI-OB),并吸附选定的染料(Orange II)。发现染料去除过程更接近 Langmuir 模型,准二阶动力学方程式。在 60 min 内,ZVI-OB 对 Orange II 的去除率就高于 97%;此改性膨润土尤其在强酸、强碱性条件下作用最佳;使用后的 ZVI-OB 经进一步催化氧化处理,还可以再生利用。宋安康等<sup>[31]</sup>使用 Ca-膨润土作为原材料,在实验条件下,经超声的协同作用对其进行有机改性,发现得到的每克新型材料最多能吸附 197.63 mg 的甲基橙染料。Jiming Hua<sup>[32]</sup>也合成了无机-有机复合改性的膨润土,发现复合组分对改性后的膨润土材料性能提升有显著影响。

## 4 膨润土复合材料处理染料废水的应用

复合材料在保持原材料性能的同时,还表现出一些不可多得的特殊性能<sup>[33]</sup>,所以复合材料的研究成为 21 世纪材料研究和应用的热点。Kun-hong 等<sup>[34]</sup>通过煅烧沉积在  $H_2$  中的膨润土上的  $MoS_3$  合成  $MoS_2$ /膨润土吸附剂。结果表明,纳米  $MoS_2$  颗粒分布在膨润土的表面,形成层间距约为 0.64 nm 的层状结构。在 150 mL 20 mg/L 的甲基橙废水里,将复合材料投加量增加至 0.1 g 时,70 min 内的去除染料的效率达到了较高水平(约 88%)。近年来,研究者们还发现了一些对水溶液中染料具有较好吸附效果的膨润土复合材料,研究结果见表 1。

表 1 膨润土复合材料吸附染料的实例  
Table 1 Examples of adsorption dyes of bentonite composites

复合材料	染料	吸附剂量/(g · L <sup>-1</sup> )	反应时间/min	吸附量/(mg · g <sup>-1</sup> )	等温线方程
交联壳聚糖/膨润土 <sup>[35]</sup>	酰胺黑 10B	0.05 g	60	323.6	Langmuir
氢氧化镁/膨润土 <sup>[36]</sup>	亮蓝 R(RB)	2	180	87.8	Langmuir
聚甲基丙烯酸-g-壳聚糖/膨润土 <sup>[37]</sup>	结晶紫(CV)	15	170	151.74	Langmuir
聚甲基丙烯酸-g-壳聚糖/膨润土 <sup>[37]</sup>	亚甲基蓝(MB)	20	100	341.2	Langmuir
聚甲基丙烯酸-g-壳聚糖/膨润土 <sup>[37]</sup>	孔雀石绿(MG)	20	120	122.6	Langmuir
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /膨润土 <sup>[38]</sup>	亚甲基蓝(MB)	1	150	1 666.7	Langmuir

## 5 结论与展望

综述简要总结了各种改性膨润土吸附剂在一定实验条件下去除水和废水中染料的吸附能力。发现,通过掺入不同的聚合物和纳米粒子来改性膨润土将增强天然膨润土对染料的吸附能力。在大多数研究中,二阶动力学模型、Langmuir 模型能较好地描述各膨润土基材料对染料的吸附过程。在后续研究中,需要通过改性改变膨润土粘土的机械模型来提高染料吸附能力,也需要探索将膨润土与水分离的改良技术和新方法,以提高对染料的去除率。应该更详细地研究吸附质与吸附剂间的协同或抑制机理,以确定染料吸附过程中各官能团的关系和作用。同时,还需探索更多此类低成本、无毒的环境友好型吸附剂,开发成本效益可行的再生方法,以便大规模地应用。

### 参考文献:

- [1] 陈文华,李刚,许方程,等.染料废水污染现状及处理方法研究进展[J].浙江农业科学,2014(2):264-269.
- [2] Abd El-Latif M M, El-Kady M F, Ibrahim A M, et al. Alginate/polyvinyl alcohol-kaolin composite for removal of methylene blue from aqueous solution in a batch stirred tank reactor[J]. American Science, 2010(6):280-292.
- [3] Nigam P, Banat I M, Singh D, et al. Microbial process for the decolorization of textile effluent containing azo, diazo and reactive dyes [J]. Process Biochemistry, 1996, 31(5):435-442.
- [4] Annadurai G, Juang R S, Lee D J. Use of cellulose-based waste for adsorption of dyes from aqueous solutions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 92(3):263-274.
- [5] 聂锦旭,余鹏钧,刘立凡.微波有机改性膨润土处理活性染料废水研究[J].金属矿山,2010(12):155-157.
- [6] Al-Asheh S, Banat F, Abu-Aitah L. Adsorption of phenol using different types of activated bentonites [J]. Separation and Purification Technology, 2003, 33(1):1-10.
- [7] Benguella B, Yacouta-Nour A. Adsorption of bezanyl red and nylomine green from aqueous solutions by natural and acid-activated bentonite [J]. Desalination, 2009, 235(1/2/3):276-292.
- [8] Amit Mishra, Manisha Sharma, Akansha Mehta, et al. Microwave treated bentonite clay based TiO<sub>2</sub> composites: An efficient photocatalyst for rapid degradation of methylene blue [J]. Nanosci and Nanotechnol, 2017, 17(2):1149-1155.
- [9] Sun Y X, Ren Z L, Li Y Q. Preparation of organic chelating agents modified bentonite for mixed contaminant removal from aqueous solutions, Geomatics for integrated water resources management (GIWRM) [D]//In: School of Chemical and Biological Engineering Lanzhou Jiaotong University ed. International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resource Management. Lanzhou, China: IEEE, 2012:1-4.
- [10] 商丹红,张志生,龚晓娣.铝交联改性膨润土处理低浓度含磷废水的研究[J].净水技术,2009,28(2):72-74.
- [11] 罗阳春,宋春刚,戴娟.有机-无机复合膨润土吸附-催化处理水中染料金橙 II 的研究[J].安徽农业科学,2012,40(4):2230-2232.
- [12] Espantaleona A G, Nietoa J A, Fernandezb M, et al. Use of activated clays in the removal of dyes and surfactants from tannery wastewater [J]. Applied Clay Science, 2003, 24(1/2):105-110.
- [13] Tahir H, Sultan M, Qadir Z. Physicochemical modification and characterization of bentonite clay and its application for the removal of reactive dyes [J]. International Journal of Chemistry, 2013, 5(3):19-32.
- [14] Özcan A S, Özcan A. Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto acid-activated bentonite [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 276(1):39-46.
- [15] 于瑞莲.加碳焙烧膨润土处理活性黑染料废水[J].非金属矿,2008(1):56-58.
- [16] Toor M, Jin B, Dai S, et al. Activating natural bentonite as a cost-effective adsorbent for removal of Congo-red in wastewater [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21(25):653-661.
- [17] Banat F, Al-Asheh S, Al-Anbar S, et al. Microwave- and acid-treated bentonite as adsorbents of methylene blue from a simulated dye wastewater [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2007, 66(1):53-58.

- [18] 吴光锋, 聂锦旭, 陈仕稳, 等. 微波强化掺 Al-TiO<sub>2</sub> 改性膨润土的制备及其结构表征 [J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 769-775.
- [19] Queiroga L N F, Pereira M B B, Silva L S, et al. Microwave bentonite silylation for dye removal: Influence of the solvent [J]. Applied Clay Science 2019(168): 478-487.
- [20] 邵红, 肖宏康, 王雷. 8-羟基喹啉改性膨润土处理印染废水研究 [J]. 印染助剂, 2010(10): 26-28, 31.
- [21] Yue Q Y, Li Q, Gao B Y, et al. Kinetics of adsorption of disperse dyes by polyepichlorohydrin-dimethylamine cationic polymer/bentonite [J]. Separation and Purification Technology 2007(54): 279-290.
- [22] Koswojo R, Utomo R P, Ju Y H, et al. Acid Green 25 removal from wastewater by organo-bentonite from Pacitan [J]. Applied Clay Science 2010, 48(1/2): 81-86.
- [23] 任建敏, 张永民, 吴四维, 等. 钠基膨润土吸附亚甲基蓝的热力学与动力学研究 [J]. 离子交换与吸附, 2010, 26(2): 179-186.
- [24] 李风起. 改性膨润土对染料废水中甲基橙的吸附性能研究 [J]. 皮革与化工, 2016, 33(4): 6-7.
- [25] 聂锦旭, 肖贤明, 刘立凡. 改性膨润土处理含酚废水的试验研究 [J]. 非金属矿, 2005(2): 40-41, 50.
- [26] 李瑞静, 温泉. 铝镍改性膨润土的制备及在处理染料废水中的应用 [J]. 技术应用, 2014(8): 102-103.
- [27] 张黎, 常晓峰, 张洁. 超声波改性有机膨润土的制备及性能研究 [J]. 非金属矿, 2016, 39(4): 76-79.
- [28] Yang C, Zhu Y, Wang J, et al. Hydrothermal synthesis of TiO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub>-bentonite composites: Conventional versus ultrasonic pretreatments and their adsorption of methylene blue [J]. Applied Clay Science 2015(105/106): 243-251.
- [29] 彭振华, 徐灏龙. 新型有机膨润土用于印染废水处理
- 的实验研究 [J]. 广州化工, 2010, 38(9): 70-73.
- [30] 崔冰莹, 马建锋, 戴娟. 零价铁复合有机膨润土处理染料废水的研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 436-439.
- [31] 宋安康, 孙志明, 宋欣. 朝阳某钙基膨润土有机改性及吸附性能研究 [J]. 非金属矿, 2017(6): 1-4.
- [32] Hua M. Synthesis and characterization of bentonite based inorgano-organo-composites and their performances for removing arsenic from water [J]. Applied Clay Science, 2015(114): 239-246.
- [33] 刘桂萍, 王明杰, 刘长风. 壳聚糖/膨润土复合絮凝剂处理染料废水的研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2479-2483.
- [34] Kun H, Zhao D F, Liu J S. Synthesis of nano MoS<sub>2</sub>/bentonite composite and its application for removal of organic dye [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(10): 2484-2490.
- [35] Liu Q, Yang B, Zhang L, et al. Adsorption of an anionic azo dye by cross-linked chitosan/bentonite composite [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015(72): 1129-1135.
- [36] Chinoune K, Bentaleb K, Bouberka Z, et al. Adsorption of reactive dyes from aqueous solution by dirty bentonite [J]. Applied Clay Science 2016(123): 64-75.
- [37] 杨武, 姚文双, 郭昊, 等. 聚甲基丙烯酸-g-壳聚糖/膨润土复合材料的制备及其对阳离子染料的吸附性能 [J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2015, 51(3): 65-70.
- [38] Hashem F S. Adsorption of methylene blue from aqueous solutions using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/bentonite nanocomposite [J]. Hydrology Current Research 2012(3): 2-6.

(上接第 2479 页)

- [36] Yuan N N, Li S J, Li G Q. Sodium alginate coated mesoporous silica for dual bio-responsive controlled drug delivery [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2018, 46: 348-353.
- [37] Wang Y, Cui Y, Zhao Y, et al. Fluorescent carbon dot-gated multifunctional mesoporous silica nanocarriers for redox/enzyme dual-responsive targeted and controlled drug delivery and real-time bioimaging [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics 2017, 117: 105-115.
- [38] Tian Z, Yu X, Ruan Z, et al. Magnetic mesoporous silica nanoparticles coated with thermo-responsive copolymer for potential chemo- and magnetic hyperthermia therapy [J]. Microporous and Mesoporous Materials 2018, 256: 1-9.