

聚苯胺包覆膨润土材料对苯类物质和表面活性剂的吸附性能研究

刘永娟^{1,2} 彭龙贵^{3*} 王 媛¹ 卢 希¹ 王毓敏¹ 贾莉莉³

(1.西安科技大学地质与环境学院,西安 710054;

2.陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室,西安 710054;

3.西安科技大学材料学院,西安 710054)

摘 要 选取工业废水中含量较高且比较常见的苯类物质和表面活性剂为吸附对象,研究用最优配方制备的聚苯胺/膨润土吸附材料(PAn/MMT)对苯类物质和表面活性剂的吸附性。当 PAn/MMT 用量为 0.1g,苯酚、对硝基苯酚和邻甲酚的起始浓度均为 10mg/L 时,PAn/MMT 对三者的吸附率分别达到 51.50%、80.56%和 62.93%,远高于同等条件下钠基膨润土的吸附率,说明改性后的膨润土更适合于苯类物质的吸附。对复配表面活性剂的亲水亲油平衡值(HLB)=6、8、10、12、14 的表面活性剂体系,PAn/MMT 的吸附率分别达到 84.11%、74.22%、66.86%、62.88%和 60.34%,且随着表面活性剂 HLB 的增加,最大吸附率和饱和吸附量都减少,说明改性后的膨润土更适合于亲油性表面活性剂的吸附。

关键词 膨润土,聚苯胺,苯类物质,表面活性剂,吸附

Adsorption of benzene homolog and surfactant onto PAn/MMT material

Liu Yongjuan^{1,2} Peng Longgui³ Wang Yuan¹ Lu Xi¹ Wang Yumin¹ Jia Lili³

(1.College of Geology and Environment,Xi'an University of Science and Technology,
Xi'an 710054;2.Shaannxi provincial Geological Security Key Laboratory of Coal Green
Development,Xi'an 710054;3.College of Materials Science and Engineering,
Xi'an University of Science and Technology,Xi'an 710054)

Abstract Benzene homologs and surfactants whose contents are higher and more common in industrial and living waste water, was selected for adsorption object, and its adsorption of the polyaniline/bentonite (PAn/MMT) prepared by the optimal technology was studied. When the dosage of PAn/MMT was 0.1g and the initial concentration of phenol, P-nitrophenol, o-cresol was 10mg/L, their adsorption rates reach to 51.50%, 80.56%, 62.93%, respectively, which were more high than the sodium bentonite under the same conditins. It indicated that the modified bentonite was more suitable for the adsorption of benzene homologs. When the surface activity agent system of HLB=6, 8, 10, 12, 14, its adsorption rate were 84.11%, 74.22%, 66.86%, 62.88%, 60.34%, respectively. Moreover, with the increase of the HLB of surfactant, the maximum adsorption rate and the saturated adsorption amount will be reduced, it shown that the modified bentonite was more suitable for hydrophilic surfactant adsorption.

Key words bentonite, polyaniline, benzene homolog, surfactant, adsorption

工业废水中大量的苯酚、对硝基苯酚、苯胺、甲酚和二甲酚等剧毒苯类物质和生活污水中大量的表面活性剂,在水中很难被生物降解,沉积在土壤与底泥后经食物链积累传递,这些物质对环境危害极大,而且严重危害人类健康,必须经过处理以后才能排放^[1-4]。近年来,人们研究利用酸、无机盐、氧化剂和

有机盐等物质对膨润土进行改性,可明显改善膨润土对废水中有机污染物的吸附性能和离子交换性能^[5-9]。

国内外研究结果表明^[10-19]改性膨润土去除水中有机污染物的能力远高于天然膨润土。这主要是因为:一方面由于有机膨润土可利用自身携带的季铵

基金项目:国家自然科学基金(41807190)

作者简介:刘永娟(1978-),女,硕士,高级工程师,主要从事水气污染处理方面的研究。

联系人:彭龙贵(1975-),男,博士,副教授,主要从事功能材料方面的教学与研究。

离子非极性脂肪链段萃取、溶解有机污染物;另一方面则是通过有机改性膨润土吸附了一定的有机物分子,使膨润土层间距增大,改性膨润土不但可以去除有机废水中的污染物,而且还可以加快去除废水中污染工艺的催化剂。

本研究用最优配方制备的聚苯胺/膨润土吸附材料(PAn/MMT)对苯类物质做吸附动力学分析^[20-21],探讨该种 PAn/MMT 对苯类物质的吸附率;利用膨润土的高吸附性,用聚苯胺插层膨润土扩大层间域,提高膨润土的吸附性来吸附表面活性剂废水,对表面活性剂废水的处理达到一个很好的效果,而且膨润土货源充足,价格便宜,吸附速度快,稳定性好,再生容易,因此具有较好的应用前景,这也是本实验的创新点之一。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

钙基膨润土(200 目),内蒙古赤峰;六偏磷酸钠(分析纯),郑州育才磷酸盐化工厂;无水碳酸钠(分析纯),天津市光复科技发展有限公司;三氯甲烷(分析纯),天津市百世化工有限公司;十二烷基苯磺酸(分析纯),阿拉丁试剂有限公司;六水三氯化铁、苯胺,均为分析纯,天津市天力化学试剂有限公司;盐酸(分析纯),北京化工厂;苯酚(分析纯)、司班 80(Span80,化学纯)、吐温 20(Tween20,化学纯),天津市福晨化学试剂厂;对硝基苯酚(分析纯),上海山浦化工有限公司;邻甲酚(分析纯),成都市科龙化工试剂厂。

傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, WQF-310 型),北京第二光学仪器厂;紫外分光光度计(UV-1600 型),北京瑞利分析仪器有限公司;X 射线衍射仪(XRD, 7000S 型),岛津国际贸易(上海)有限公司;电子天平(FA2104 型),上海良平仪器有限公司;数显恒温水浴锅(HH-1 型),常州荣冠实验分析仪器厂;精密增力电动搅拌器(JJ-1 型),常州市华普达教学仪器有限公司;真空干燥箱(DZF 型),北京科伟永兴仪器有限公司;台式离心机(800 型),上海浦东物理光学仪器厂。

1.2 实验部分

本实验以内蒙古赤峰膨润土为原料,通过系列实验确定最优配方制备聚苯胺/膨润土吸附材料(PAn/MMT),选取废水中富含较多的苯类物质和表面活性剂作为吸附对象,研究 PAn/MMT 的吸附性能,同时以钠基膨润土吸附作为对照,探索 PAn/

MMT 对苯类物质和表面活性剂的去除率。

1.2.1 PAn/MMT 的制备

将 5g 钠化后的膨润土,加入 2.7g 三氯化铁搅拌、离心、洗涤,加入去离子水、三氯甲烷和 4.89g 十二烷基苯磺酸乳化剂,振荡 0.5h,搅拌 20min 后再滴加 46.5g 苯胺,反应 8h 后得到 PAn/MMT 乳浊液,在 200℃ 加热 0.5h,除去其中的苯胺和去离子水,烘干研磨过 200 目筛,即得 PAn/MMT^[21]。

1.2.2 苯类物质的吸附实验

分别配制 20mg/L 苯酚、对硝基苯酚和邻甲酚溶液,然后分别稀释成 1mg/L、5mg/L、10mg/L、15mg/L 的标准溶液,用紫外分光光度计测定吸光度,分别绘制苯酚的标准曲线 $[y = 0.01547x - 0.00353 (R^2 = 0.97258)]$,对硝基苯酚的标准曲线 $[y = 0.04739x + 0.12869 (R^2 = 0.98851)]$ 和邻甲酚的标准曲线 $[y = 0.00992x - 0.00387 (R^2 = 0.99034)]$ 。通过标准曲线,由一系列吸附实验测得的吸光度来计算出相应的吸附后溶液的平衡浓度,并分别用式(1)和式(2)计算其吸附量(Q_L , g/g)和去除率(Q , %)。

$$Q_L = [(C_0 - C_e) \times V] / m \quad (1)$$

$$Q = [(C_0 - C_i) / C_0] \times 100\% \quad (2)$$

式中, C_0 、 C_i 和 C_e 分别为初始、吸附后和吸附平衡时的质量浓度, g/L; V 为溶液体积, L; m 为吸附剂用量, g。

1.2.3 表面活性剂的吸附实验

依据表面活性剂复配公式(3),复配表面活性剂的亲水亲油平衡值(HLB)分别为 6、8、10、12、14 的混合体系,其标准曲线的测定和吸附实验同苯类物质,用紫外分光光度计测定吸光度,绘制 5 条标准曲线,见图 1。吸附量和去除率的计算同苯类物质。

$$HLB = \frac{HLB_S \times W_S + HLB_T \times W_T}{W_S + W_T} \quad (3)$$

式中, HLB_S 为司班 80 的 HLB 值; W_S 为司班 80 的质量分数, %; HLB_T 为吐温 20 的 HLB 值; W_T 为吐温 20 的质量分数, %。

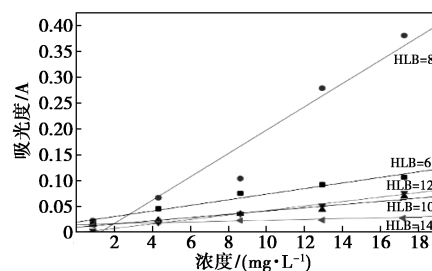


图 1 表面活性剂 $HLB=6, 8, 10, 12, 14$ 的标准曲线图

表面活性剂 $HLB = 6$ 的标准曲线: $Y = 0.00541X + 0.01968 (R^2 = 0.98851)$; 表面活性剂 $HLB = 8$ 的标准曲线: $Y = 0.02256X - 0.02799 (R^2 = 0.96995)$; 表面活性剂 $HLB = 10$ 的标准曲线: $Y = 0.00314X + 0.00982 (R^2 = 0.97741)$; 表面活性剂 $HLB = 12$ 的标准曲线: $Y = 0.00433X - 0.00107 (R^2 = 0.99701)$; 表面活性剂 $HLB = 14$ 的标准曲线: $Y = 0.000828796X + 0.01502 (R^2 = 0.94127)$ 。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

图 2 为钠基膨润土和 PAn/MMT 膨润土的 XRD 谱图。由图可见,膨润土的最大衍射峰出现在 3.1285° ,由布拉格公式计算出膨润土的层间距为 2.823nm ,该组的层间距最大,表示其吸附性能最好,比钠基膨润土的层间距增加了 1.600nm ,表明苯胺在膨润土的层间发生了聚合,增大了膨润土的层间距。

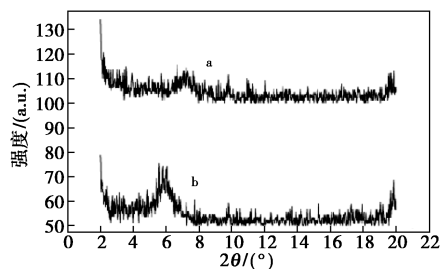


图 2 钠基膨润土(a)和 PAn/MMT 膨润土(b)的 XRD 谱图

2.2 FT-IR 分析

图 3 为钠基膨润土和 PAn/MMT 膨润土的 FT-IR 谱图。由图可见,在 PAn/MMT 的 FT-IR 谱图中, $400 \sim 600\text{cm}^{-1}$ 为硅氧四面体和铝氧八面体的内部振动, $1030 \sim 1090\text{cm}^{-1}$ 范围内的强烈吸收带是 Si-O-Si 的骨架振动, 3447cm^{-1} 为 $-\text{OH}$ 的伸

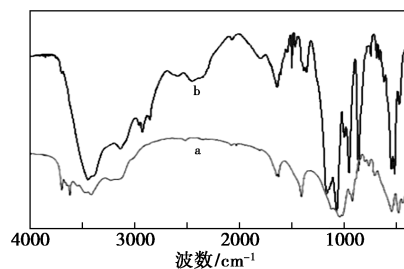


图 3 钠基膨润土(a)和 PAn/MMT 膨润土(b)的 FT-IR 谱图

缩振动峰, 3135cm^{-1} 为苯环上 C-H 的伸缩振动峰, 1018cm^{-1} 为苯环的面内扭曲振动特征吸收谱带, 1158cm^{-1} 为 C-N 键的伸缩振动峰, 1496cm^{-1} 和 1524cm^{-1} 处的吸收峰分别对应聚苯胺链上苯式和醌式结构的特征吸收峰,显然膨润土和聚苯胺的特征峰在聚苯胺/蒙脱土吸附材料样品的 FT-IR 谱图中都有体现,说明确实生成了聚苯胺。

2.3 苯类物质的吸附动力学分析

将 0.1g PAn/MMT 加入到 10mL 、起始浓度为 10mg/L 的苯类物质溶液中,在室温下、 pH 为溶液初始值和 150r/min 的条件下,分别振荡 15min 、 30min 、 45min 、 1h 、 2h 、 4h 、 8h 、 24h ,在 6000r/min 的离心机中离心分离过滤,测定溶液中的苯类物质浓度。同时做钠基膨润土的对照吸附实验。苯酚、对硝基苯酚和邻硝基苯酚吸附率与振荡时间的关系曲线见图 4—图 6。

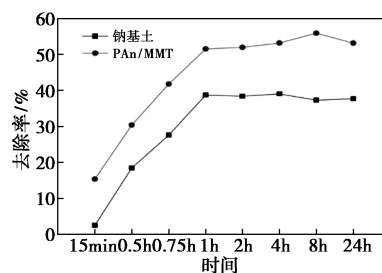


图 4 振荡时间对钠基土和 PAn/MMT 吸附苯酚的影响

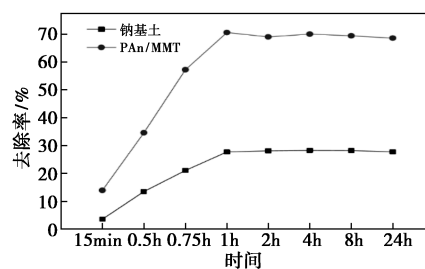


图 5 振荡时间对钠基土和 PAn/MMT 吸附对硝基苯酚的影响

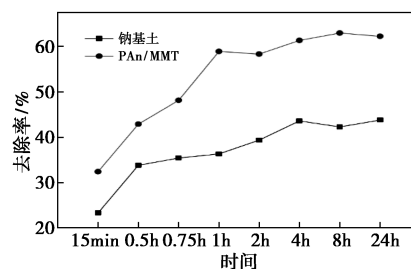


图 6 振荡时间对钠基土和 PAn/MMT 吸附邻甲酚的影响

由图 4 可知,钠基土和 PAn/MMT 对苯酚的吸

附随着时间的增加而增大,在 1h 左右吸附达到平衡,继续增大吸附时间,变化趋于平缓。钠基土的去除率达到 38.70%, PAn/MMT 的去除率达到 51.50%,同比增加了 12.8%,可见改性后的膨润土对苯酚的吸附效果明显提高。

由图 5 可知,随着振荡时间的增加,PAn/MMT 和钠基膨润土对溶液中对硝基苯酚的去除率逐渐增大,吸附在 1h 左右达到平衡,钠基膨润土的去除率达到 37.73%,而 PAn/MMT 的去除率达到 80.56%,继续增大吸附时间,变化趋于平缓,在吸附时间达到 24h 时,钠基膨润土的去除率达到 37.78%,PAn/MMT 的去除率达到 78.60%,即延长吸附时间吸附率变化不大。由吸附率能比较明显地看出用聚苯胺改性的膨润土具有较好的吸附效果,吸附率由钠基膨润土的 37.73% 提高到改性土的 80.56%,由此说明 PAn/MMT 对对硝基苯酚具有较好的吸附性能。

由图 6 可知,随着振荡时间的增加,PAn/MMT 和钠基膨润土对邻甲酚的去除率逐渐增加,PAn/MMT 的吸附在 1h 左右达到平衡,去除率达到 62.93%,钠基膨润土对邻甲酚的吸附在 4h 左右达到吸附平衡,去除率最大为 43.78%,比较两者的最大吸附率可知,PAn/MMT 对邻甲酚具有较好的吸附效果。

比较 PAn/MMT 对于苯类物质的吸附可知,对苯酚、对硝基苯酚和邻甲酚的吸附率分别为 51.50%、80.56% 和 62.93%,与钠土相比分别提高了 12.8%、42.83% 和 19.15%。由此可见,改性后膨润土的吸附性能明显增加,尤其对于对硝基苯酚的吸附,改性后吸附率达到 80.56%,说明改性后的膨润土对对硝基苯酚具有较好的去除率。

2.4 表面活性剂的吸附动力学分析

吸附率与振荡时间的关系研究方法同苯类物质,振荡时间与钠基膨润土和 PAn/MMT 吸附 HLB 分别为 6、8、10、12、14 的表面活性剂的去除率之间的关系如图 7—图 9 所示。

由图 7 可知,钠基膨润土和 PAn/MMT 对表面活性剂的吸附率也是随着时间的增大而增加,在 1h 左右达到吸附平衡,PAn/MMT 的吸附率达到 73.60%,钠基膨润土的吸附率为 39.04%,吸附时间继续增大,吸附率几乎不变,即延长振荡时间吸附率几乎不变,在吸附时间达 24h 时,PAn/MMT 的吸附率达 73.35%,钠基膨润土的吸附率达 39.45%,比较两种材料的吸附率,可以发现 PAn/

MMT 对 HLB=6 的表面活性剂的吸附效果较好。

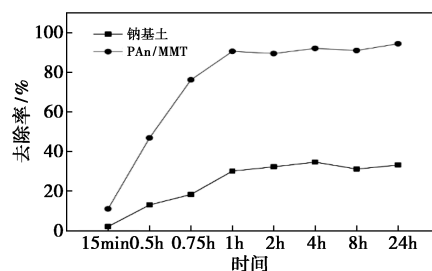


图 7 振荡时间对钠基土和 PAn/MMT 吸附 HLB=6 表面活性剂的影响

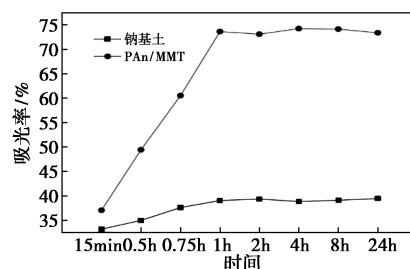


图 8 振荡时间对钠基土和 PAn/MMT 吸附 HLB=8 表面活性剂的影响

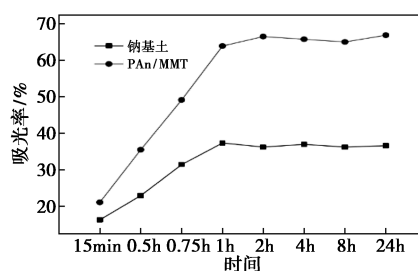


图 9 振荡时间对钠基土和 PAn/MMT 吸附 HLB=10 表面活性剂的影响

由图 8 可知,钠基膨润土和 PAn/MMT 对 HLB=8 的表面活性剂的吸附同 HLB=6 的表面活性剂的吸附,在 1h 左右达到平衡,PAn/MMT 的吸附率为 73.60%,钠基膨润土的吸附率达到 39.04%,吸附时间为 24h 时,PAn/MMT 的吸附率达到 73.35%,钠基膨润土的吸附率达到 39.45%,24h 时 PAn/MMT 对 HLB=8 的表面活性剂的吸附率比钠基膨润土提高了 33.9%。

由图 9 可知,钠基膨润土和 PAn/MMT 对 HLB=10 的表面活性剂的吸附在 1h 左右达到吸附平衡,PAn/MMT 的吸附率为 63.91%,钠基膨润土的吸附率为 37.34%,吸附 24h 后,PAn/MMT 的吸附率达到 66.86%,钠基膨润土的吸附率为 36.60%。对比两者的吸附率可知,PAn/MMT 对 HLB=10 的表面活性剂的吸附还是比较明显的。

由图 10 可知, PAn/MMT 对 $HLB=12$ 的表面活性剂的吸附在 1h 左右达到平衡, 吸附率达到 61.54%, 虽然在 4h 时, 吸附率有所上升, 但是整个吸附曲线的变化还是较为平缓, 4h 时吸附率的提高影响不大。钠基膨润土的吸附在 2h 左右达到吸附平衡, 吸附率为 30.50%, 2~24h 之间, 吸附率变化还是较为平缓。

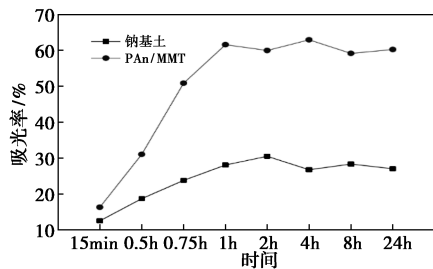


图 10 振荡时间对钠基土和 PAn/MMT 吸附 $HLB=12$ 表面活性剂的影响

由图 11 可知, PAn/MMT 对于 $HLB=14$ 的表面活性剂的吸附在 2h 左右达到吸附平衡, PAn/MMT 的吸附率为 56.94%, 钠基膨润土的吸附率为 27.58%, PAn/MMT 对于 $HLB=14$ 的表面活性剂的影响还是明显高于钠基膨润土的吸附率。

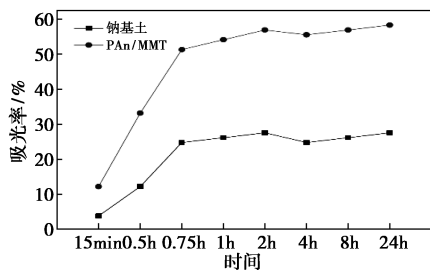


图 11 振荡时间对钠基土和 PAn/MMT 吸附 $HLB=14$ 表面活性剂的影响

对于 $HLB=6, 8, 10, 12, 14$ 的表面活性剂复配体系, 其 PAn/MMT 和钠基膨润土的最大吸附率与 HLB 之间的关系见图 12。由图可见, 钠基土和 PAn/MMT 最大吸附率都是随着 HLB 值的增大

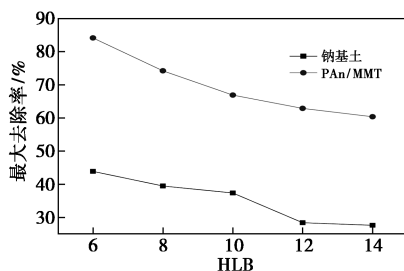


图 12 钠基土和 PAn/MMT 最大吸附率与 HLB 值之间的关系图

而减小, 钠基土随着 HLB 值的增加从 43.84% 降到 27.58%, PAn/MMT 的吸附率随着 HLB 值的增加分别为 84.11%、74.22%、66.86%、62.88% 和 60.34%, 这是由于苯胺分子在膨润土的层间聚合, 增大了膨润土的亲油性, 使得聚苯胺改性膨润土对亲油性的司班 80 的去除率远远高于钠基土, 说明改性后的膨润土层间域增大, 吸附性能提高, 更适用于表面活性剂的去除。

钠基膨润土和 PAn/MMT 饱和吸附量与 HLB 之间的关系见图 13。由图可见, 当 HLB 增大时, 即表面活性剂亲水性基团增多时, 饱和吸附量减少, 说明改性后的膨润土更适合于亲油性表面活性剂的吸附。

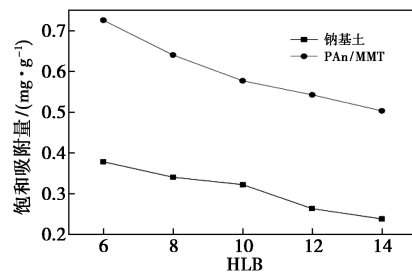


图 13 钠基土和 PAn/MMT 饱和吸附量与 HLB 之间的关系图

3 结论

(1) 本实验研究了 PAn/MMT 对苯酚、对硝基苯酚和邻甲酚的吸附动力学行为, 发现当 PAn/MMT 用量为 0.1g, 苯酚、对硝基苯酚和邻甲酚的起始浓度为 10mg/L 时, 对苯酚、对硝基苯酚和邻甲酚的去除率分别为 51.50%、80.56% 和 62.93%, 说明 PAn/MMT 对苯类物质具有较好的吸附性。

(2) 研究了 PAn/MMT 对 HLB 分别为 6、8、10、12、14 的表面活性剂复配体系的吸附动力学行为, 结果发现 PAn/MMT 用量为 0.1g, 表面活性剂的起始浓度为 10mg/L 时, 复配体系的去除率分别为 84.11%、74.22%、66.86%、62.88% 和 60.34%, 而且通过做出最大去除率和饱和吸附量的关系曲线, 发现当表面活性剂的 HLB 增加时, 最大吸附率和饱和吸附量都减少, 说明改性后的膨润土更适合于亲油性表面活性剂的吸附。

参考文献

- [1] Zhang Lujie, Hu Pan, Wang Jing, et al. Adsorption of Amido Black 10B from aqueous solutions onto Zr(IV) surface-immobilized cross-linked chitosan/bentonite composite[J]. Applied Surface Science, 2016, 369: 558-566.

- [2] Makhoukhi B, Djab M, Didi M A. Adsorption of telon dyes on-to bis-imidazolium modified bentonite in aqueous solutions [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3 (2): 1384-1392.
- [3] Fukushima M, Okabe R, Nishimoto R, et al. Adsorption of pentachlorophenol to a humin-like substan-bentonite complex prepared by polycondensation reactions of humic precursors [J]. Applied Clay Science, 2014, 87: 136-141.
- [4] Tekin N, Ates Y. Adsorption of poly(vinylimidazole) from aqueous solutions onto Na-bentonite [J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 112-113: 49-54.
- [5] 朱利中, 戚群. 有机膨润土吸附苯的性能及其在水处理中的应用 [J]. 环境污染与防治, 1994, 16(6): 15-17.
- [6] 朱利中, 李益民, 陈曙光, 等. CTMAB-膨润土吸附水中有机物的性能及应用 [J]. 环境化学, 1997, 16(2): 233-237.
- [7] 朱利中, 徐舒, 张琼. 酸性染料废水的脱色方法研究 [J]. 水处理技术, 1998, 24(5): 294-298.
- [8] 朱利中, 陈宝梁. 膨润土吸附材料在有机污染控制中的应用 [J]. 化学进展, 2009, 21(23): 42-429.
- [9] 孙洪良, 朱利中. 十六烷基三甲基季铵盐-乙硫醇铵盐复合改性膨润土吸附性能研究 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(5): 1037-1042.
- [10] 朱利中, 陈宝梁, 沈韩艳, 等. 双阳离子有机膨润土吸附处理水中有机物的性能 [J]. 中国环境科学, 1999, 19(4): 325-329.
- [11] 朱利中, 陈宝梁, 李铭霞, 等. 双阳离子有机膨润土吸附水中有机物的特征及机理研究 [J]. 环境科学学报, 1999, 19(6): 597-603.
- [12] 聂锦旭, 唐文广, 刘汨, 等. 有机 A 无机复合膨润土的制备及其对磷吸附特性研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1572-1575.
- [13] Churchman G J. Formation of complexes between bentonite and different cationic polyelectrolytes and their use as sorbents for non-ionic and anionic pollutants [J]. Applied Clay Science, 2002(21): 177-189.
- [14] Bailey S E, Olin T J, Bricka R M, et al. Research watch: risk assessment [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(11): 2469-2479.
- [15] Sj"blom R, Bjurstr"m H, Pusch R. Feasibility of compacted bentonite barriers in geological disposal of mercurycontaining waste [J]. Appl Clay Sci, 2003, 23(1-4): 187-193.
- [16] Hu Q H, Qiao S Z, Haghseresht F, et al. Adsorption study for removal of basic red dye using bentonite [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(2): 733-738.
- [17] Srinivasan K R, Fogler H S. Use of inorgano-organo-clays in the removal of priority pollutants from industrial wastewaters: structural aspects [J]. Clay Minerals, 1990, 38(3): 277-286.
- [18] Ferreiro E A, Bussetti S G, Helmy A K. Sorption of 8-hydroxyquinoline by some clays and oxides [J]. Clays and Minerals, 1988, 36(1): 61-67.
- [19] Lee J F, Crum J R, Boyd S A. Enhanced retention of organic contaminants by soils exchanged with organic cations [J]. EnvironSci Technol, 1989, 23: 1365-1372.
- [20] 杨晓凤, 彭龙贵, 林雅. 剥离型聚苯胺/蒙脱石介孔材料制备与结构表征 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2448-2451.
- [21] 刘永娟, 彭龙贵, 贾莉莉. 聚苯胺包覆膨润土材料的制备工艺研究 [J]. 化工新型材料, 2017, 45(2): 114-116.

收稿日期: 2019-05-25

(上接第 124 页)

根离子进行吸附。该种温敏性 P(NIPAM-co-ATU)微凝胶材料有望应用到磷酸根离子的吸附、分离与回收领域。

参考文献

- [1] Pelton R. Temperature-sensitive aqueous microgels [J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2000, 85(1): 1-33.
- [2] 路亚楠, 赵熊燕, 王鑫, 等. 聚(N-异丙基丙烯酰胺)微凝胶的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2015, 43(12): 7-11.
- [3] Zhou X, Nie J, Du B. Functionalized ionic microgel sensor array for colorimetric detection and discrimination of metal ions [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(24): 20913-20921.
- [4] Zhou X, Nie J, Xu J, et al. Thermo-sensitive ionic microgels via post quaternization cross-linking: fabrication, property, and potential application [J]. Colloid & Polymer Science, 2015, 293(7): 2101-2111.
- [5] 郑剑锋, 焦继东, 孙力平, 等. 天津中心城区河网氮磷污染与富营养化特征 [J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 326-335.
- [6] Rabinovich A, Rouff A A, Lew B, et al. Aerated fluidized bed treatment for phosphate recovery from dairy and swine wastewater [J]. Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(1): 652-659.
- [7] Qiu H, Qin Z F, Liu F L, et al. Fabrication of a biomass-based hydrous zirconium oxide nanocomposite for advanced phosphate removal [J]. Environmental Science, 2015, 7(37): 20835-20844.
- [8] 戴敏, 王建国, 巢军委, 等. 镧生物质炭对磷酸根离子的吸附特性 [J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(3): 372-379.
- [9] 刘勇, 李晖, 张永丽, 等. 羟基铝柱撑蛭石的制备及其吸附磷酸根性能研究 [J]. 四川大学学报, 2008, 4(3): 77-82.
- [10] Cheng X, Huang X, Wang X, et al. Phosphate adsorption from sewage sludge filtrate using zinc-aluminum layered double hydroxides [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1-3): 958-964.
- [11] 殷晓梅, 王欣, 雷磊. 磷钼蓝分光光度法测定有机磷农药残留量的改进 [J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(7): 171-175.
- [12] Zhou X, Zhou Y, Nie J, et al. Thermosensitive ionic microgels via surfactant-free emulsion copolymerization and in situ quaternization cross-linking [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(6): 4498-4513.

收稿日期: 2018-09-13