

# 蒙脱土对重金属离子吸附的研究进展

臧运波 (商丘师范学院化学系, 河南商丘 476000)

**摘要** 简要介绍了目前国内采用蒙脱土吸附处理废水中重金属离子的研究状况, 探讨了 pH 值、温度、吸附时间、溶液初始浓度、有机物质和改性等因素对蒙脱土吸附重金属离子的影响, 最后展望了蒙脱土吸附重金属离子的发展趋势和应用前景。

**关键词** 蒙脱土; 重金属离子; 吸附作用

**中图分类号** X703 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2008)29-12884-03

## Research Advance of the Adsorption of Heavy Metal on Montmorillonite

ZANG Yun-bo (Department of Chemistry, Shangqiu Normal College, Shangqiu, Henan 476000)

**Abstract** The research situation of adsorption of heavy metal on montmorillonite in China were briefly introduced. The influencing factors of adsorption such as pH value, temperature, time, concentration of solution, organic substance and modification were discussed. Application prospects and development trend of adsorption of heavy metal on montmorillonite were also forecasted.

**Key words** Montmorillonite; Heavy metal ion; Adsorption

重金属离子废水主要来源于金属矿山、冶炼、电解、电镀等工业。由于重金属离子不仅不能降解, 而且会通过生物链富集, 危害人体健康, 所以含重金属的废水必须通过严格处理方可排放。传统的重金属离子废水处理技术包括化学沉淀、渗析、离子交换、活性炭吸附和共沉淀吸附等。吸附法是处理含重金属离子废水的一种很有前途的方法, 具有操作简单、费用低廉等优点。蒙脱土具有较大的比表面积及离子交换容量, 吸附性能好, 对废水中重金属离子的吸附有着特殊功效。用蒙脱土处理重金属废水, 在脱附时的释放率较低, 不易发生二次污染。

蒙脱土是膨润土的主要成分, 因此商业名称也叫膨润土, 具有单斜晶体结构, 是一种含水的二八面体或三八面体的层状铝硅酸盐矿物, 在单晶胞的外面有 2 层硅氧四面体, 中间夹 1 层铝氧八面体, 在四面体和八面体中, 高价的硅离子( $\text{Si}^{4+}$ )和铝离子( $\text{Al}^{3+}$ )能被其他低价阳离子置换, 使蒙脱土晶胞带负电荷, 而成为一个大的负离子, 从而使它具有吸附某些阳离子的能力, 这些阳离子和晶体的连接很不牢固, 易被其他低价离子所置换。

## 1 蒙脱土处理重金属废水的机理

蒙脱土对重金属离子具有很强的吸附能力, 归因于其本身的 3 个特性: 表面荷电性、结构通道和高比表面积。蒙脱土的吸附作用包括选择性吸附(专性吸附)和非选择性吸附(交换吸附)。非选择性吸附属于静电作用, 受蒙脱土所带的永久电荷量控制。蒙脱土通常具有一定的净负电荷, 根据电中性原理, 必然会有等量或近似量的阳离子被吸附在蒙脱土层间区域或表面以达到电性平衡。一般来说, 被吸附在蒙脱土层间区域的离子可以和溶液中的同号离子发生交换作用。选择性吸附属于化学吸附, 受可变电荷表面的电量控制。蒙脱土边缘由断键产生的铝醇、铁醇和硅烷醇的羟基表面均属可变电荷表面, 专性吸附量不仅受介质的 pH 值控制, 还与重金属离子的水合能、离子半径、有效水合半径及电价等因素有密切的关系。由于蒙脱土中的结构通道和高的比表面积, 而使它具有高效吸附性。

## 2 影响蒙脱土吸附重金属离子的因素

**2.1 pH 值** pH 值是影响蒙脱土吸附作用的最主要因素之一, 它一方面影响着被吸附物质的存在形式, 另一方面也影响到吸附剂的表面特性。一般认为, 随着 pH 值的增大, 吸附量增大。因为在酸性条件下,  $\text{H}^+$  与重金属离子竞争吸附位点, 当在碱性条件下, 溶液中  $\text{OH}^-$  能与重金属离子形成难溶性沉淀而引起吸附量的增大。

朱一民等<sup>[1-9]</sup>用膨润土吸附重金属离子, 发现随着溶液中 pH 值在研究范围内逐渐增大, 去除效果越来越好。胡振琪等<sup>[10]</sup>用膨润土除去  $\text{Cd}^{2+}$  时, 发现当溶液初始 pH 值增加时, 吸附量总体上呈现增加趋势, 但是在 pH 值等于 7 时出现了 1 个拐点。原因是在酸性条件下 ( $\text{pH}$  值  $< 6$ ),  $\text{H}^+$  将占据膨润土的吸附位, 不利于对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附作用, pH 值为中性或弱碱性条件下 ( $6 < \text{pH}$  值  $< 7$ ), 可能是由于  $\text{Cd}^{2+}$  由简单离子变为复合离子而发生沉淀作用或是低配位数向高配位数转变而不利于吸附反应发生, 在较高的 pH 值范围 ( $\text{pH}$  值  $> 8$ ) 内, 则由于膨润土与  $\text{Cd}^{2+}$  产生共沉淀吸附, 使吸附量增大。施惠生等<sup>[11]</sup>用膨润土吸附重金属离子  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cr(VI)}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  时, 发现 pH 值对不同的重金属离子的吸附效果是不一样的, 膨润土对  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附效果要好于  $\text{Cr(VI)}$ , 原因是  $\text{Cr(VI)}$  以阴离子形式存在, 形态不同于其他重金属离子。在强酸性或强碱性条件下, 膨润土对  $\text{Cr(VI)}$  的吸附效果较好。丁述理等<sup>[12-13]</sup>用膨润土除去溶液中的以阴离子形式存在的  $\text{Cr(VI)}$ , 发现去除率随 pH 值的升高而降低。

黄丽等<sup>[14]</sup>研究了不同 pH 值下有机酸对膨润土吸附  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  的影响, 发现 pH 值变化引起矿物表面性质、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$  存在形态、有机酸与重金属离子配合强度的改变, 从而影响  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和有机酸在矿物表面的吸附与固定, 也影响液相中两者的竞争作用。总体来说, 随着 pH 值的升高, 吸附率增加。

**2.2 温度** 吸附温度对吸附效果有一定的影响。一般认为, 温度的升高可以使溶液中的离子运动速度加快, 使溶液中活化离子增多, 从而促进离子的交换反应。丁述理等<sup>[5-6, 9]</sup>用膨润土吸附重金属阳离子, 在一定温度范围内, 温度的升高有利于提高对重金属离子的吸附效率。但是有文

献报道,用膨润土除去溶液中的 Cr(VI),发现去除率随温度的升高而降低<sup>[12-13]</sup>。笔者认为,不论是物理吸附还是化学吸附,吸附作用都是放热过程。温度升高,必然阻碍吸附的进行。

**2.3 吸附时间** 膨润土对重金属离子的吸附速度在较短的时间内进行的很快,随后吸附速度减慢,一段时间内吸附作用基本达到平衡,吸附率在 95% 以上。原因是蒙脱土具有孔状结构、呈负电性且有大量可交换阳离子及表面羟基,能够发生离子交换、表面络合反应及孔道吸附作用,随着吸附时间的延长,由于可交换阳离子及表面羟基逐渐减少,蒙脱土对重金属离子的吸附速率逐渐减小,直至达到吸附饱和。

丁述理等<sup>[5-9,12-13,15]</sup>用膨润土除去溶液中的重金属离子,发现反应很快,大部分反应时间都在 1 h 左右,其后随着振荡时间的延长,吸附量增加不大。但是夏畅斌等<sup>[4]</sup>用膨润土吸附 Zn<sup>2+</sup> 和 Cd<sup>2+</sup> 时,发现膨润土对重金属离子的吸附速率较慢,吸附平衡时间为 24 h。

**2.4 金属离子初始浓度** 在其他条件不变的情况下,溶液中重金属离子浓度增加,有利于膨润土对重金属离子的吸附。研究表明,随着溶液中重金属离子初始浓度的增加,膨润土的吸附总量明显增加,但单位质量膨润土的吸附量却减小,说明膨润土对重金属离子的吸附增加量明显小于溶液中重金属离子的增加量。

朱一民等<sup>[1,5-6,9-10,12-13,15]</sup>用膨润土除去重金属离子时,发现随着重金属离子浓度的增大,膨润土的吸附量增大,这可能是当重金属离子浓度增大时,它们与膨润土表面碰撞的机会也在增多,因而有较大的吸附机会,造成膨润土对重金属离子的吸附量增大。但吸附率随重金属初始溶液浓度的增加而减小。

李虎杰等<sup>[2]</sup>用膨润土吸附 Cd<sup>2+</sup> 时,发现随着溶液浓度的增加,膨润土对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附总量及单位质量的吸附量均逐渐增加。

**2.5 有机物质** 有机物质影响膨润土吸附重金属离子的效果及机理尚有争论。

刘廷志等<sup>[3]</sup>用蒙脱石除去重金属离子 Cr<sup>3+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 时,发现蒙脱石对重金属离子的吸附能力受有机酸和化学络合剂的影响,其影响效果与重金属离子与有机酸和化学络合剂间的反应系数有关。重金属离子与有机酸和络合剂形成化合物会阻碍蒙脱石对重金属离子的吸附。祝春水等<sup>[8]</sup>用膨润土吸附 Ni<sup>2+</sup> 时,发现 Ni<sup>2+</sup> 的去除率随着柠檬酸浓度的增加而减少,这可能是由于柠檬酸溶于水,其中的羧基官能团与膨润土表面的羟基通过阳离子桥、水桥及氢键作用,形成配合物,因而抢占了膨润土表面的吸附位,同时也由于该络合物分子较大,进入膨润土层间的难度增大,从而使得膨润土对 Ni<sup>2+</sup> 的吸附量减少。另外,也可能是柠檬酸根与 Ni<sup>2+</sup> 有着较强的络合作用,使部分 Ni<sup>2+</sup> 保持在溶液中不易移动所致。

黄丽等<sup>[14]</sup>研究了不同 pH 值下有机酸对膨润土吸附 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 的影响,发现有机酸对吸附 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 有较大的影响,有机酸可与 Cd<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 络合,形成较原来金属离子带正电荷数少的配离子,从而促进其在带正电荷吸附剂上的吸

附;有机酸既与矿物表面有较强的亲和力,又与 Cd<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 有很强的络合能力,这样在矿物与金属离子之间起了桥接作用,从而促进了对 Cd<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 的吸附。

郭堃梅等<sup>[16]</sup>用膨润土吸附 Pb<sup>2+</sup> 时,发现膨润土对 Pb<sup>2+</sup> 的吸附基本不受对硝基苯酚的影响。

**2.6 蒙脱土对不同重金属离子的吸附** 不同的重金属离子由于自身性质存在差异,跟吸附剂结合的快慢程度以及吸附强度也不一样。

施惠生等<sup>[11]</sup>用膨润土吸附重金属离子 Pb<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cr(VI) 和 Cd<sup>2+</sup> 时,发现膨润土对 Pb<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 和 Cd<sup>2+</sup> 的吸附效果要好于 Cr(VI),原因是 Cr(VI) 的存在形态不同于其他重金属离子,与 Cr(VI) 的自身性质有关。张金池等<sup>[17]</sup>用膨润土吸附重金属离子 Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>,发现在单组分时,吸附强度为 Pb<sup>2+</sup> > Cu<sup>2+</sup> > Ni<sup>2+</sup> > Cd<sup>2+</sup>;双组分时,Pb<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 的存在使膨润土对 Cu<sup>2+</sup> 的吸附产生不同程度的影响,Cu<sup>2+</sup> 对 Pb<sup>2+</sup> 影响较小,却能完全抑制膨润土对 Cd<sup>2+</sup> 和 Ni<sup>2+</sup> 的吸附。夏畅斌等<sup>[4]</sup>用膨润土吸附 Zn<sup>2+</sup> 和 Cd<sup>2+</sup>,发现对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附作用远大于 Zn<sup>2+</sup>。刘廷志等<sup>[3]</sup>用蒙脱石除去重金属离子 Cr<sup>3+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup>,证实了蒙脱石对重金属离子的吸附能力既与 pH 值有关,也与有机酸和络合剂等能与重金属离子发生化合反应的配位基团的存在有关,除了与重金属离子本身的半径及电价有关外,还与外界条件对它们的影响有关。

### 3 重金属离子吸附的热力学

膨润土对重金属离子的吸附等温式一般符合 Langmuir 或 Freundlich 方程。

夏畅斌等<sup>[4,9-10,16,18]</sup>用膨润土除去重金属离子时,发现其吸附模型符合 Langmuir 吸附等温线。祝春水等<sup>[8,12-13,15]</sup>用膨润土除去溶液中的重金属离子,发现吸附曲线符合 Freundlich 方程。

### 4 重金属离子吸附的动力学

席永慧等<sup>[18]</sup>用膨润土吸附重金属离子 Ni<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 时,发现试验数据吻合二级动力学方程式。祝春水等<sup>[8]</sup>用膨润土吸附 Ni<sup>2+</sup> 时,发现膨润土吸附 Ni<sup>2+</sup> 的行为不符合一级方程式,符合 Lagergren 二级动力学模型。

### 5 膨润土的改性

在处理重金属废水之前,为了达到更好的效果,一般先将膨润土进行改性处理,主要有以下几种改性方法。

**5.1 有机物质改性** 通过有机改性剂对天然膨润土进行改性可制得膨润土有机复合物。罗芳旭等<sup>[19]</sup>用膨润土结合聚丙烯酰胺处理含镍废水,发现膨润土与聚丙烯酰胺之间对去除重金属离子有很强的协同作用。刘博林等<sup>[20-21]</sup>利用有机高分子来改性膨润土,吸附重金属离子,结果表明,改性的膨润土比未改性的膨润土对金属离子的吸附率提高近 20 个百分点。马勇等<sup>[22]</sup>用膨润土负载壳聚糖吸附 Cu<sup>2+</sup>,发现膨润土对溶液中 Cu<sup>2+</sup> 的脱除率增大,但增幅不大,且壳聚糖仅仅吸附在蒙脱石的内外表面。

**5.2 无机物质改性** 无机物质改性也称为交联改性。其改性机理是通过加入无机分子改性剂如酸、盐等,制得改性膨润土。

刘云等<sup>[23]</sup>用  $\text{AlCl}_3$  跟蒙脱土反应,制得柱撑蒙脱土,用 XRD 测试发现层间距变大,对铜离子和镉离子的吸附性能比原矿要强。李国清等<sup>[24]</sup>用  $\text{AlCl}_3$  和  $\text{MgSO}_4$  改性膨润土,吸附能力显著增强,制得的镁铝交联膨润土既可以用于有机废水的处理,也可以用于重金属废水的处理,还可用于同时含重金属和有机污染物废水的处理,去除率、脱色率高,处理效果好,是一种可供选择的高效、无毒、价格低廉的水处理剂,具有广阔的应用前景。

彭荣华等<sup>[25-27]</sup>用无机酸对膨润土进行活化改性,吸附重金属阳离子,发现处理效果明显好于膨润土原土,其吸附机理主要是离子交换和表面配位吸附的共同作用。马小隆等<sup>[28]</sup>用无机酸对钙基膨润土进行活化改性,对污水中的重金属阴离子铬进行了吸附试验,发现有较强的吸附作用。罗道成等<sup>[29]</sup>对天然膨润土进行热处理、酸化处理、离子交换处理等改性处理后,制备出改性膨润土,用来除去  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$ ,发现改性膨润土的吸附性能明显优于天然膨润土。

**5.3 表面活性剂改性** 将表面活性剂与蒙脱土作用,表面活性剂可进入蒙脱土层间,制得的有机蒙脱土对重金属离子的吸附能力明显提高。

罗成玉等<sup>[30]</sup>用阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)与阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CT-MAB)改性制得了有机改性膨润土,对含  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  的废水进行处理,发现有机改性膨润土比原膨润土具有更大的吸附容量。苏玉红等<sup>[31]</sup>用系列季铵盐阳离子表面活性剂改性膨润土(单阳离子有机膨润土)及阴、阳离子表面活性剂和混合表面活性剂改性膨润土(阴-阳离子有机膨润土)对模拟废水中  $\text{Pb}^{2+}$  进行吸附。结果表明,各种有机膨润土吸附能力大于原土,且与有机膨润土的层间距呈正相关。

孙洪良等<sup>[32-34]</sup>采用表面活性剂和有机螯合剂复合改性膨润土,制得一系列螯合剂柱撑膨润土,表面活性剂和有机螯合剂进入膨润土层间,能同时有效地去除有机污染物对硝基苯酚和重金属离子,其对水中对硝基苯酚的强吸附能力来源于分配作用的增加和层间距的增大,而与比表面积无关。

## 6 结论

使用蒙脱土吸附法处理重金属废水具有以下优点:①储量丰富,价格低廉;②制备方法简单;③吸附效果好;④具有良好的稳定性;⑤天然、无毒、无味,对环境无害。因此,蒙脱土在重金属废水处理中具有广阔的应用前景。

在以后的研究工作中,应加强以下几方面的工作:①2种或者2种以上的重金属离子混合物在蒙脱土上的吸附过程及机理;②重金属离子在固-液界面上的微观作用过程;③有机物质尤其是持久性有机污染物与重金属离子之间的相互影响研究;④重金属离子在固-液界面上吸附的理论和模型;⑤目前研究样品多数还属于实验室合成,需要加强对实际样品的研究。

## 参考文献

[1] 朱一民,王忠安,苏秀娟,等.钙基膨润土对水相中铜离子的吸附[J].

- 东北大学学报:自然科学版,2006,27(1):99-102.
- [2] 李虎杰,刘爱平,易发成,等.膨润土对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附作用及影响因素[J].中国矿业,2004,13(11):79-81.
- [3] 刘廷志,田胜艳,高平,等.蒙脱石吸附  $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  的研究:pH值和有机酸的影响[J].生态环境,2005,14(3):353-356.
- [4] 夏畅斌,何湘柱.膨润土对  $\text{Zn}(\text{II})$  和  $\text{Cd}(\text{II})$  离子的吸附作用研究[J].矿产综合利用,2000(4):38-40.
- [5] 丁述理,彭苏萍,刘钦甫,等.膨润土吸附重金属离子的影响因素初探[J].岩石矿物学杂志,2001,20(4):579-582.
- [6] 王忠安,朱一民,魏德洲,等.钙基膨润土吸附废水中锌离子的研究[J].东北大学学报:自然科学版,2006,22(2):45-47.
- [7] 王宜鑫,赵斌,陈小峰,等.钠基膨润土对重金属离子的吸附特征[J].工业用水与废水,2007,38(5):55-58.
- [8] 祝春水,赵宇侠,魏涛,等.柠檬酸对膨润土吸附镍离子的影响研究[J].工业安全与环保,2007,33(7):1-4.
- [9] 刘雅琳,羊依金.用膨润土处理含铅离子废水的研究[J].成都信息工程学院学报,2007,22(S):23-27.
- [10] 胡振琪,杨秀红,高爱林.粘土矿物对重金属镉的吸附研究[J].金属矿山,2004(6):53-55.
- [11] 施惠生,刘艳红.膨润土对重金属离子  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cr}(\text{VI})$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的吸附性能[J].建筑材料学报,2006,9(5):507-510.
- [12] 丁述理,孟庆梅,孙晨光,等.膨润土吸附水中  $\text{Cr}(\text{VI})$  的实验研究[J].化工矿物与加工,2006(11):11-14.
- [13] 丁述理,孙晨光.膨润土吸附水中  $\text{Cr}(\text{VI})$  的影响因素研究[J].非金属矿,2006,29(3):45-48.
- [14] 黄丽,刘畅,胡红青,等.不同 pH 值下有机酸对针铁矿和膨润土吸附  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  的影响[J].土壤学报,2007,44(4):643-649.
- [15] 潘嘉芬.涌泉膨润土吸附废水中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  的试验研究[J].非金属矿,2006,29(3):49-51.
- [16] 郭莹梅,马毅杰,韩和平.膨润土对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附性能及影响吸附的主要因素[J].环境科学学报,2000,20(5):654-656.
- [17] 张金池,姜姜,朱丽珺,等.黏土矿物中重金属离子的吸附规律及竞争吸附[J].生态学报,2007,27(9):3811-3819.
- [18] 席永慧,赵红.粉煤灰及膨润土对  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  的吸附研究[J].粉煤灰综合利用,2004(3):3-7.
- [19] 罗芳旭,于书店,汪晓军,等.膨润土结合 PAM 处理含镍废水的研究[J].工业水处理,2002,22(3):20-22.
- [20] 刘博林,闫景辉,惠博然.改性膨润土吸附重金属离子[J].长春理工大学学报,2005,28(1):84-86.
- [21] 常晶晶.改性膨润土吸附重金属离子[J].吉林师范大学学报:自然科学版,2004(3):62-64.
- [22] 马勇,王恩德,邵红.膨润土负载壳聚糖对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附作用[J].安全与环境学报,2005,5(1):41-43.
- [23] 刘云,吴平霄,唐剑文,等.聚羟基铝柱撑蒙脱石吸附重金属离子实验研究[J].矿物岩石,2005,25(3):122-126.
- [24] 李国清,陈绛云.镁铝交联膨润土处理含重金属有机废水的研究[J].泉州师范学院学报:自然科学版,2006,24(4):43-47.
- [25] 彭荣华,李晓湘.酸改性膨润土吸附去除镍镉离子的研究[J].材料保护,2006,39(1):65-67.
- [26] 张秀英.天然及改性膨润土对重金属废水处理效果的试验研究[J].中国矿业,2006,15(9):82-87.
- [27] 陈志强,王绍梅.柱撑改性膨润土的制备及吸附性能研究[J].安阳师范学院学报,2006(2):79-81.
- [28] 马小隆,刘晓明,宋吉勇.膨润土的改性及其对废水中铬的吸附性能研究[J].能源环境保护,2005,19(4):18-21.
- [29] 罗道成,刘俊峰,陈安国.改性膨润土的制备及其对电镀废水中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  的吸附性能研究[J].中国矿业,2003,12(11):53-55.
- [30] 罗成玉,司友斌,刘小红,等.改性膨润土对废水中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  去除效果的研究[J].安徽农业大学学报,2007,34(1):34-39.
- [31] 苏玉红,王强.有机膨润土对重金属离子的吸附性能研究[J].新疆有色金属,2002(3):24-26.
- [32] 孙洪良,朱利中.表面活性剂改性的螯合剂有机膨润土对水中有机污染物和重金属的协同吸附研究[J].高等学校化学学报,2007,28(8):1475-1479.
- [33] 孙洪良,朱利中.膨润土纳米复合材料的制备、表征及吸附性能研究[J].无机化学学报,2007,23(7):1148-1152.
- [34] 孙洪良.有机膨润土吸附水中重金属和有机污染物的性能及机理研究[J].化学研究与应用,2007,19(7):745-751.