

# 膨润土基复合材料在废水处理中的应用研究进展

苗毅恒<sup>1</sup>, 曹亦俊<sup>1,2</sup>, 彭伟军<sup>2</sup>, 常鲁平<sup>2</sup>, 王伟<sup>1</sup>

1. 郑州大学 河南省资源与材料工业技术研究院, 河南 郑州 450001;  
2. 郑州大学 化工学院, 河南 郑州 450001

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)01-0056-09  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.01.009

**摘要** 膨润土储量大、分布广、物理化学特性优良, 广泛应用于工业废水处理。但是天然膨润土及改性膨润土直接作为吸附剂, 存在着吸附容量小、固液分离难等缺点。为弥补这些缺陷, 近年来研究者以膨润土或者改性膨润土为基底制备膨润土基复合材料并将其运用到废水处理。本文综述了改性膨润土和膨润土基复合材料的制备方法, 以及其在无机和有机废水处理中的应用和循环再生性能的研究进展。目的是为开发新型、高效的膨润土基复合材料及其在废水处理中的应用提供思路与方法。

**关键词** 膨润土; 复合材料; 废水处理; 循环再生

## 引言

随着工业的不断发展, 工业废水的排放量也日益剧增。工业废水主要可以分为无机废水、有机废水和重金属废水等。工业废水因具有水量大、污染物种类多且成分复杂多变、流动性强等特点, 而对环境造成相当大的破坏, 著名的“水俣事件”“富山事件”和“镉米事件”等都是由废水污染造成的。目前, 随着“绿水青山就是金山银山”和“黄河流域生态保护和高质量发展”等国家政策形式下, 废水污染已经引起了广泛关注和重视<sup>[1-4]</sup>。废水净化的方法主要有吸附法、生物修复<sup>[5]</sup>、沉淀<sup>[6]</sup>、反渗透<sup>[7]</sup>、离子交换<sup>[8]</sup>、电化学法<sup>[9]</sup>等, 其中, 吸附法因具有成本低廉、处理效果好、工艺简单、可实现废物资源化和循环再利用等优点, 而被广泛应用于工业废水处理。吸附法通过污染物和吸附剂分子之间的相互作用力, 例如范德华力、静电力、氢键和化学键等, 将污染物吸附到吸附剂上尤其对采用其它方法难以有效处理的剧毒和难降解的污染物, 具有独特的应用价值<sup>[10]</sup>。吸附剂的选用是吸附法的关键, 吸附剂性能的优劣决定了水中污染物分离效果的好坏及分离效率的高低。理想型吸附剂应具有较广的适用范围、较大的吸附容量、较短的吸附

时间、优良的再生性能以及低廉的价格等。

膨润土(Bentonite)是以蒙脱石为主要矿物的黏土类矿物, 储量大、分布广、售价低, 是一种环境友好型矿物材料。膨润土因具有较大的比表面积、较高的稳定性、突出的阳离子交换量和良好的吸附性能、体积膨胀性、悬浮性和分散性等特点, 被广泛用于工业废水处理<sup>[11]</sup>。目前, 膨润土在Cu、Pb、Zn等重金属废水、N、P等无机废水和亚甲基蓝、苯和油等有机污染废水中得到了应用, 但是吸附后的膨润土固液分离困难是限制其工业化应用的一个主要瓶颈。因此, 为了达到既能保持膨润土良好的物理化学特性, 又能使其在水处理后可以高效回收再利用的目的, 研究者们采用了不同的方法对膨润土进行改性<sup>[12]</sup>, 或以膨润土为基底制备了一系列膨润土基复合材料。因此, 本文综述了改性膨润土和膨润土基复合材料的制备方法, 以及其在工业废水高效资源化利用中的研究进展, 为膨润土高值化应用提供参考。

## 1 膨润土简介

膨润土主要成分是蒙脱石, 不仅具有比表面积大、稳定性好、阳离子交换性强、吸附性和体积膨胀性良好等优点, 而且还具备突出的悬浮性和分散性, 因

收稿日期: 2019-10-25

作者简介: 苗毅恒(1996-), 男, 硕士研究生, E-mail: miaoyihengzzu@163.com。

通信作者: 彭伟军(1986-), 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: pwj@zcu.edu.cn。

而被广泛应用于工业废水处理。蒙脱石具有 2:1 的层状结构,由两层硅氧四面体夹一层铝氧八面体组成<sup>[13]</sup>,通式是: $\text{Na}_x(\text{H}_2\text{O})_4\{(\text{Al}_2 - x\text{Mg}_{0.33})[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2\}$ ,结构如图 1,其中硅氧四面体中的  $\text{Si}^{4+}$  易被  $\text{Al}^{3+}$  替换,铝氧八面体中的  $\text{Al}^{3+}$  易被  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  等置换,所以蒙脱石晶体带永久性负电荷, $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等阳离子可通过静电力吸入晶体层间实现电荷平衡,且吸入层间这些阳离子可以被其他阳离子交换。此外,蒙脱石晶体边缘键被破坏,被质子化后端面带负电荷,对会通过静电作用吸引阳离子。由于蒙脱石晶体具有独特的负电性,使得膨润土可通过静电吸引或离子交换反应来吸附废水中的污染物<sup>[14]</sup>。

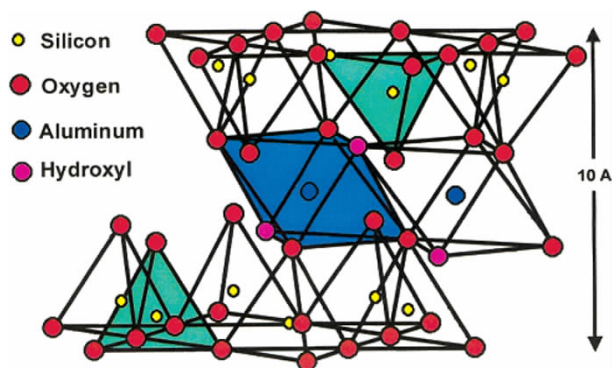


图 1 蒙脱石层状硅酸盐板的横截面模型。这种原子的排列,称为蒙氏结构,由两层朝内的硅酸盐四面体(淡蓝色)组成,其侧面是一层氧化铝八面体(深蓝色)<sup>[13]</sup>

**Fig. 1** Cross-sectional model of the montmorillonite layered silicate platelet. This arrangement of atoms, called a smectite structure, consists of two inward-facing layers of silicate tetrahedra (light blue) that flank a layer of alumina octahedra (dark blue)

## 2 膨润土基复合材料及其制备

膨润土作为吸附剂,在使用过程中,主要是将天然膨润土或者其改性产物直接用于净化污染物浓度较低的废水。虽然膨润土作为高效廉价吸附剂在废水净化中取得了一定成果,但是天然膨润土仍存在一些缺点:(1)表面的硅氧结构具有很强的亲水性,层间的阳离子易于水合,在吸附非亲水性污染物时吸附动力慢,而且吸附的污染物容易解吸脱附,导致吸附不稳定;(2)蒙脱石晶体层间距较小,杂质离子易堵塞孔隙,不利于物质的扩散传输,造成阳离子交换容量无法充分利用;(3)对污染物的吸附不具选择性;(4)具有较强的悬浮性,在废水处理过程中难以分离和回收<sup>[14, 15]</sup>。基于此,研究者对膨润土进行一系列的活化、改性和与其他材料复合,期望通过活化、改性和二者的协同作用克服上述缺点,使其成为理想的吸附

剂<sup>[16]</sup>。

### 2.1 膨润土的活化

常见的膨润土活化方法有热活化、酸活化以及微波活化,它们都是根据应用的需要有目的地改变膨润土的物理化学特性,从而提高膨润土的吸附能力。

#### 2.1.1 酸活化

酸活化是将膨润土浸泡在一定浓度的酸溶液中(如硫酸、盐酸等),恒温搅拌一定时间后过滤洗涤至中性,然后干燥研磨即得酸改性膨润土。在酸化过程中,通过  $\text{H}^+$  置换其层间的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等离子<sup>[17]</sup>,改善其孔道和孔结构,与天然膨润土相比,酸改性膨润土的片层堆积结构变得松散,孔道扩大,有利于污染物分子进入孔道,吸附性能得到了提高。崔文龙<sup>[18]</sup>等人采用不同浓度的硫酸溶液对低品位膨润土进行活化试验,结果显示用 30% 的硫酸活化效果最好,相较于原土比表面积由  $246 \text{ m}^2/\text{g}$  增大到了  $568 \text{ m}^2/\text{g}$ ,增加了 130%。林辉<sup>[19]</sup>等人采用盐酸对膨润土进行活化,并研究酸活化膨润土对苯胺和苯酚混合溶液的吸附性能,结果表明酸活化膨润土具有较强的吸附选择性,对苯胺的吸附效果明显优于苯酚,且酸活化膨润土对苯胺的吸附符合 Freundlich 等温线模型。

#### 2.1.2 热活化

热活化原理是通过在较高温度下焙烧将膨润土表面与层间的吸附水、部分结晶水和有机杂质挥发掉,达到疏通孔道、扩大孔径与孔容的目的。膨润土的活性也会随着温度的升高而逐渐增加,一般在  $300 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$  之间进行煅烧,当温度高于  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  时,结构水开始逃逸,膨润土结构遭到破坏,会导致其内表面消失,比表面积逐渐减小<sup>[20]</sup>。夏畅斌<sup>[21]</sup>等人分别研究了热活化和酸活化膨润土对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附性能,研究发现,活化后的膨润土吸附  $\text{Pb}^{2+}$  性能得到明显的提升,且在较高温度下热活化的膨润土吸附容量较大。

#### 2.1.3 微波活化

微波活化是采用微波对膨润土进行有效地改性和活化。与常规湿法活化相比,有机膨润土的层间距和有机碳含量得到提高,且染料去除效果显著提高。马少健<sup>[22]</sup>等人采用微波辐射技术将膨润土活化,用活化的膨润土吸附废水中的  $\text{Cu}^{2+}$ ,结果表明,微波辐射不仅可以活化膨润土,且比马弗炉焙烧活化的效果更好,微波活化膨润土的工艺简单、活化时间缩短、

能耗低。

综上,酸活化、热活化以及微波活化的主要目的是去除膨润土层间杂质,增大膨润土的比表面积与层间距,从而达到改善膨润土对于污染物的吸附能力。

## 2.2 有机/无机改性膨润土

虽然膨润土具有较大的离子交换容量和比表面积,但是由于它表面硅氧结构具有极强的亲水性以及层间阳离子易发生水解,所以未经改性的原土对有机物的吸附能力较差。采用表面活性剂对膨润土进行改性,制备有机改性膨润土,有机改性能显著提高膨润土的吸附性能和疏水性,使其在有机溶剂中具有较好的分散性、乳化性和增溶性<sup>[23]</sup>。

表 1 常见改性剂

Table 1 Common modifiers

Type of modifier	On behalf of the reagent	Typical structure	Reference
Coupling agent	Silane coupling agent	$R-SiX_3$ (X - the hydrolytic group, R - the hydrophobic group)	[24]
Anionic surfactant	Carboxylic acid salt	$R-COOH$ (M - the metal ion, R - the alkyl group)	[25]
Cationic surfactant	Quaternary ammonium salt	$R_4-N^+X^-$ (R - the alkyl group, X - the anion)	[26]

林辉<sup>[19]</sup>等在水浴加热条件下将一定量的四甲基氯化铵加入反应釜中,之后再向其中加入一定量的膨润土原土,反应一段时间,经过抽滤、洗涤(以  $AgNO_3$  溶液检测氯离子)、干燥、粉碎的后得到了有机膨润土。孟凡芳<sup>[26]</sup>等人以不同链长的季铵盐为改性剂制备出了四种改性膨润土,结果表明:相较于天然膨润土,季铵盐改性膨润土层间距均有所增加,季铵盐改性剂的碳链越短,改性膨润土的层间距越小。此外,膨润土经过改性后,层间距由 1.257 nm 增加到 1.803 nm, BET 比表面积由 20.6  $m^2/g$  增加到 83.5  $m^2/g$ , 耐热温度由 670  $^{\circ}C$  提高到 780  $^{\circ}C$ 。尹琦璋<sup>[27]</sup>等人采用阳离子改性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和非离子改性剂烷基酚聚氧乙烯醚(OP-10)对钙基蒙脱石进行湿法改性制得阳-非离子型有机蒙脱石,结果表明:CTAB 与 OP-10 可以同时嵌入到蒙脱石层间,阳-非离子型有机蒙脱石的片层膨胀程度和改性效果优于单阳离子型有机蒙脱石,表现出更好的热稳定性。

比较有机改性剂的使用对膨润土的影响,不难发现有机改性主要作用是增大了膨润土的层间距,改善其热稳定性。而长碳链的有机改性剂在改善膨润土层间距与热稳定性上效果较好。

### 2.2.2 无机柱撑改性

无机柱撑改性是利用膨润土的阳离子交换性和膨胀性,采用柱撑剂交换膨润土层间的阳离子,增大

### 2.2.1 有机改性

有机改性主要是采用有机试剂与膨润土相互作用来改变膨润土的理化性质。一般使用的有机试剂有偶联剂、离子型表面活性剂、有机胺和脂肪酸等。有机改性的作用机理一般是:(1)利用有机分子与膨润土表面的羟基发生键和作用而引入新的功能基团;(2)利用有机离子与膨润土层间阳离子交换,增大层间距同时引入新的功能基团<sup>[17]</sup>。经过有机改性后的膨润土局部结构会发生改变,结构单元层内变化较小,层间距会明显增加,有机溶剂除了与蒙脱石发生离子交换外,还与蒙脱石的部分结构发生了键和作用。近年来膨润土有机改性中常用到的改性剂见表 1。

其层间距,然后加热脱羟基得到柱状结构的复合材料,无机柱撑改性膨润土的吸附性能和选择性大大提高。常见的柱撑剂为聚合羟基阳离子如铝十三聚体( $Al_{13}$ ),  $[AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(OH_2)_{12}]^{7+}$ 。林辉<sup>[28]</sup>等以聚合羟基铝离子( $Al_{13}$  keggin 离子,  $[AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(OH_2)_{12}]^{7+}$ )为柱撑剂,制备了柱撑膨润土,研究发现改性膨润土的层间距由原土的 1.19 nm 增至 1.91 nm, BET 比表面积与微孔比表面积分别为 257.5  $m^2/g$  与 175.5  $m^2/g$ 。

### 2.2.3 无机-有机柱撑改性

研究发现将某些表面活性剂引入多聚羟基金属阳离子柱撑膨润土的层间,可以合成出孔径较大和热稳定性良好的无机-有机柱撑膨润土。一般选用分子大小不等的可溶性季铵盐作为表面活性剂,无机柱撑膨润土有机化时应选择碳链比较长的有机季铵盐<sup>[29]</sup>,这样可以有效地撑开膨润土的层间距。

无机-有机柱撑膨润土是利用无机物与有机物的共同作用,先将无机物引入膨润土层间,扩大其层间距离,然后再引入有机物,使改性后的膨润土具有较强的吸附架桥作用,从而为污染物提供更多的附着点。孟波<sup>[30]</sup>等选用不同碳链长度及不同类型的表面活性剂与聚合羟基铝对膨润土进行复合改性,结果表明:长碳链表面活性剂制备的复合改性样品比短碳链表面活性剂制备的复合改性样品的苯胺吸附效果好,

阴离子表面活性剂制备的复合改性样品比阳离子表面活性剂制备的复合改性样品的苯胺吸附效果好。孙银霞<sup>[32]</sup>等人采用具有不同结构的短碳链金属螯合剂和长碳链表面活性剂与钠基膨润土进行多元复合改性,制备出无机柱撑膨润土,其层间距增加且吸附能力增强。

综上,长链柱撑剂的引入可以有效地增加层间距,而且柱撑剂的引入,相较于原土增加了更多的吸附位点,使得污染物的附着点增加,污染物的处理量大大增加。但是单独使用改性膨润土作为吸附剂仍存在难分离,不容易回收等难题。然而膨润土的改性处理可以为后续复合材料的制备提供了更多的选择。

## 2.3 膨润土基复合材料

虽然膨润土在废水处理研究应用中取得了一定成果,但是单一的膨润土在废水处理过程中存在固液分离困难、吸附量低等不足。因此,研究者们将其他材料与膨润土进行复合制备了膨润土基复合材料,期望通过二者的协同、耦合作用,增强复合材料的吸附性能,克服其固液分离难题。

### 2.3.1 磁性有机膨润土

在膨润土吸附材料中引入磁性基团,可以提高膨润土固液分离能力,增加对难降解污染物的吸附效果等。

汤睿<sup>[31]</sup>等采用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)对磁性膨润土(MB)进行有机改性,制得CTAB改性磁性膨润土(CTAB/MB)。研究发现MB和CTAB/MB的磁滞回归曲线均为接近重合的“S”型磁滞回线,矫顽力的值均比5 Oe小,不存在磁滞现象,表明了两种材料均存在良好的超顺磁性。由于这种超顺磁性的存在,当施加外磁场时,MB和CTAB/MB便可以定向的收集起来,从而克服了固液分离难题。

### 2.3.2 壳聚糖/膨润土复合材料

壳聚糖(Chitosan,CS)是天然的高分子吸附材料,毒性低,可生物降解。壳聚糖分子中的氨基氮、羟基氧可以借氢键,或者借用盐键形成类似网状结构的笼形分子,使其与很多物质发生螯合反应<sup>[32]</sup>。基于膨润土比表面积大、吸附性能良好<sup>[33-37]</sup>,和壳聚糖活性基团吸附性能强等优点,并考虑到吸附后的固液分离问题,研究者采用一定的方法成功的制备了磁性壳聚糖/膨润土复合材料<sup>[38]</sup>。

Wang<sup>[39]</sup>通过共沉降法将膨润土固定在壳聚糖微球的多孔结构内,制备了一种易于获得的磁性膨润

土-壳聚糖混合珠(BN-CTS),研究发现BN-CTS具有均匀的孔状结构、丰富的结合位点和优良的吸附特性。此外,由于 $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ 的引入,这些混合珠存在顺磁特性使其易于分离,便于回收利用。

### 2.3.3 氧化石墨烯/膨润土复合材料

氧化石墨烯(GO)是一种二维蜂窝状结构单原子层纳米材料,具有非凡的机械、电学和热学性能和极高的比表面积,被认为是一种极具应用前景的吸附材料<sup>[40]</sup>。将其与膨润土相结合制备出新型的吸附材料,一方面有效地阻止了氧化石墨烯在水中的团聚现象,另一方面也实现了增强吸附性能的目的。

蒙脱石(MMt)是膨润土主要矿物成分,An<sup>[41]</sup>等成功制备了GO/MMt复合材料,并探究了GO与MMt组装的机理,研究发现吸附和插入是GO和MMT组装的主要机理,氧化石墨烯以插入的方式进入膨润土层间使蒙脱石层间距增大。Neelaveni<sup>[42]</sup>等采用简单的湿浸渍法制备了MMt还原氧化石墨烯复合材料(Mr-GO),对制备出的材料进行TEM扫描,发现MMt与GO充分融合,MMt的存在在一定程度上阻止了GO的团聚,使得GO较好地分布于复合材料中。

### 2.3.4 聚合物/膨润土纳米复合材料

高分子材料具有良好的韧性、耐腐蚀性、耐水性,而且它重量轻,容易加工,是生活中常见的材料。聚合物/矿物纳米复合材料有着耐热性、高强度、高模量、低膨胀系数等优点,已经开始逐步应用在环保领域<sup>[43]</sup>。

Dai<sup>[44]</sup>等以GO和膨润土为原料,制备了环境友好型聚乙烯醇/羟甲基纤维素/GO/膨润土复合材料,同时通过SEM扫描图像可知,该材料具有丰富多孔结构,且GO与膨润土各自出现的团聚现象几乎不存在。Liu<sup>[45]</sup>等研究了以羧甲基纤维素(CMC)/卡拉胶(kC)/活化蒙脱土(AMMT)为原料,制备了新型复合微珠复合材料。用SEM图对制备的吸附剂和天然聚合物的形态结构进行对比发现:天然CMC(图2A)和KC存在断口形貌,呈不规则的粒状表面,而CMC/KC微球的表面为卷曲状的织构表面(图2C1)。CMC/KC/AMMT复合微珠表面粗糙,通过对CMC/KC(图2C2)和CMC/KC/AMMT复合微珠(图2D2)的整体图像比较,发现CMC/KC/AMMT复合微珠表面出现了片层状的褶皱,说明三种材料紧密的结合在了一起。

综合以上膨润土基复合材料的制备研究,可以看出,以膨润土为基底,采用高分子聚合物为骨架是目前膨润土基复合吸附材料较好的制备方式。高分子聚合物所形成的外骨架可以有效地撑起吸附材料的

形状,同时也为膨润土提供了更多的负载位置,有效地解决了膨润土在水处理中因为较强悬浮性的原因导致的难分离的问题。

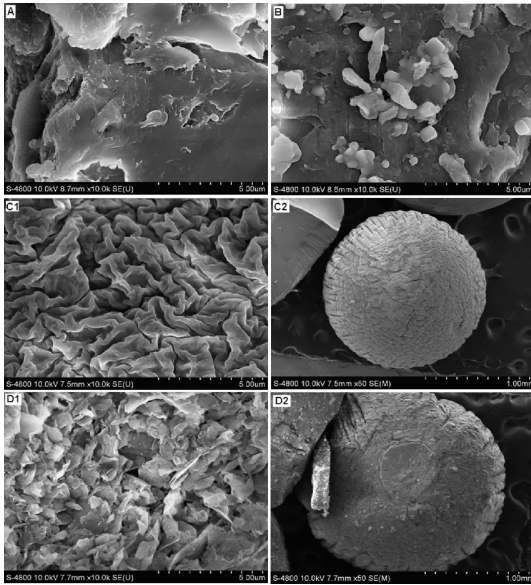


图2 (A)天然 CMC、(B)天然 KC、(C1 和 C2) CMC/kC 珠在  $50 \times 10.0$  k 放大倍数时的 SEM 图像,(D1 和 D2) CMC/kC/AMMT 复合珠在  $50 \times 10.0$  k 放大倍数时的 SEM 图像<sup>[45]</sup>

Fig. 2 SEM images of (A) native CMC, (B) native KC, (C1 and C2) CMC/ KC beads at  $\times 50$  and  $\times 10.0$  k magnification, and (D1 and D2) CMC/ KC /AMMT composite beads at  $\times 50$  and  $\times 10.0$  k magnification respectively

### 3 膨润土基复合材料在废水处理中的应用

大的比表面积、良好的吸附性能和突出的阳离子交换能力等优点为膨润土在污水处理中的应用奠定了基础。膨润土及膨润土基复合材料用于污水处理吸附剂具有制备方法简单、去除效果好、化学稳定性高、可再生等优点。因此,开发新型膨润土基复合材料并将其应用于废水处理对提高膨润土应用价值,减少废水排放,和打赢“蓝天保卫战”具有十分重要的意义。近年来国内外大量研究表明,价廉物美、绿色易得的膨润土有望取代离子交换树脂和活性炭等高成本吸附剂,将被广泛应用于重金属废水和有机废水的净化中(表2)。

#### 3.1 膨润土基复合材料在重金属离子废水处理中的应用

重金属废水水量大、有害物质种类多,由于不能被生物降解,进入水体和土壤的重金属会通过食物链在动植物体内累积,最终在人体内富集,严重危害人类身体健康和生命。重金属废水已经成为当前亟待解决的环境问题。膨润土因具有离子交换性和表面硅氧基和铝氧基等可以吸附重金属离子。此外,还可以通过活化、改性或者与其他材料复合等方法进一步提高其吸附性能。

表2 膨润土基复合材料在废水处理中的应用汇总

Table 2 Application of bentonite - based composites in wastewater treatment

Adsorbent	Adsorbate	The adsorption condition	Adsorption capacity (mg/g) or adsorption rate (%)	Equation of the isotherm	Reference
PVA/PCMC/GO/Bentonite	MB	T = 30 °C , pH = 10	172.14 mg/g	Langmuir	[44]
CMC/kC/AMMT	MB	T = 45 °C , pH = 6, n = 50 rpm, t = 180 min	98%	Langmuir	[45]
MrGO	Ni <sup>2+</sup>	pH = 7	178 mg/g	Langmuir	[42]
MrGO	RhB	pH = 7	625 mg/g	Langmuir	[42]
MMT/GO	MB	t = 5 min	641.1 mg/g	Langmuir	[46]
Ammonium - pillared montmorillonite/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Cs <sup>+</sup>	t = 90 min , T = 80 °C	27.5 mg/g	Langmuir	[47]
Magnetic bentonite	Pb <sup>2+</sup>	pH = 5, t = 90 min, T = 40 °C	80.40 mg/g	Langmuir	[48]
Bentonite/ thiourea - formaldehyde	Pb <sup>2+</sup>	pH = 4	13.38 mg/g	Langmuir	[49]
	Mn <sup>7+</sup>	pH = 4	18.81 mg/g		
	Cr <sup>6+</sup>	pH = 2	4.20 mg/g		
P(AO) - g - CTS/BT	U(VI)	PH = 8, t = 60 min	49.09 mg/g	Langmuir	[50]
Hydroxyapatite/bentonite	Cd <sup>2+</sup>	t = 40 min T = 80 °C	134.28 mg/g	Langmuir	[51]

Mohammed<sup>[52]</sup>首次采用包覆  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁铁矿纳米粒子的天然膨润土 (CB) 作为吸附剂,从污染水中分离  $\text{Cu}^{2+}$ ,结果表明,试验数据符合 Langmuir 模型,当 pH 值为 6,吸附剂用量为 0.5 g,最大吸附量可达到 46.948 mg/g,该复合材料不仅具有较强的吸附性能,而且便于固液分离。

王世威<sup>[53]</sup>研究了聚多巴胺改性膨润土 (PDA - Bentonite) 和 4 - 氨基吡啶改性膨润土 (4 - AP - Bentonite) 对 U(VI) 的吸附行为,研究发现:PDA - Bentonite 对 U(VI) 吸附为自发吸热的单层化学吸附,U(VI) 的去除率高达 93.56%;4 - AP - Bentonite 对 U(VI) 吸附也为自发吸热的化学吸附,U(VI) 最大吸附容量高达 136.43 mg/g。Wang<sup>[39]</sup>等采用磁性膨润土 - 壳聚糖混合珠 (BN - CTS) 对水中铯离子 ( $\text{Cs}^+$ ) 进行了混合吸附试验,研究发现该膨润土 - 壳聚糖微球的最大吸附容量为 57.1 mg/g,吸附原理为离子交换, $\text{Cs}^+$  与 BN - CTS 微球中复合的膨润土层间的离子进行交换,达到吸附去除水中  $\text{Cs}^+$  的目的,此外该微球且具有良好的选择性。用  $\text{MgCl}_2$  溶液处理微球,定量解吸  $\text{Cs}^+$ ,可使吸附剂循环使用。

张晓涛<sup>[55]</sup>等人以天然高分子材料木质纤维素和硅酸盐矿物蒙脱石为原料,采用插层复合反应将蒙脱石与木质纤维素复合,制备出一种新型吸附剂木质纤维素/蒙脱土纳米复合材料 (LNC/MMT)。研究其对废水中  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附行,结果表明,LNC/MMT 复合材料在初始浓度为 0.005 mol/L 的  $\text{Cd}^{2+}$  溶液, pH 值为 5.6、温度为 55 °C、吸附时间为 80 min 的条件下,吸附容量可达到最大值 118.45 mg/g,吸附过程符合 Langmuir 等温吸附模型,吸附方式主要为单分子层化学吸附。

Fu<sup>[56]</sup>等人合成了一种环保型的玉米芯生物炭基蒙脱土复合材料 (CC - mt),用于 Pb(II) 和一种新型有机污染物 (ATE) 的单吸附和共吸附。在单一吸附体系中,CC - mt 对 Pb(II) 和 ATE 的最大平衡容量分别为 139.78 mg/g 和 86.86 mg/g,相比蒙脱石或者玉米芯生物炭的单独吸附效果有着显著的提高。该研究还以中性酸和质子化酸 (PATE) 分子上的最小点来揭示 CC - mt 复合材料对 ATE 的微观吸附机理,结果表明:氨基和酰胺氧原子更容易提供一对孤电子,产生氢键或在 CC - mt 表面与其官能团发生强烈的静电相互作用,同时羟基 O 原子也是可能的反应位点。对于 PATE 分子来说,最有可能的反应位点是酰胺基的氧原子。李玉洁<sup>[57]</sup>等人采用水热振荡法制备了膨润土 - 壳聚糖复合吸附材料,从污染水中分离  $\text{Cu}^{2+}$ ,结果表明,试验数据符合 Langmuir 和 Freundlich 模型,在  $\text{Cu}^{2+}$  初始浓度为 50 mg/L、pH 值为 7、吸附温度为 30

°C、接触时间为 15 min 的条件下,膨润土 - 壳聚糖复合吸附剂对  $\text{Cu}^{2+}$  的去除效率可达 95% 以上,吸附量可达到 20.12 mg/g。刘相廷<sup>[58]</sup>等人以膨润土、聚乙烯醇 (PVA)、壳聚糖 (CS) 为原料,采用超声剥离 - 自组装 - 冷冻干燥法制备了膨润土纳米片基水凝胶,之后进行的  $\text{Pb}^{2+}$  离子吸附试验结果表明,该凝胶吸附铅离子的最佳 pH 值范围为 4 ~ 5,吸附过程较好的符合拟二级动力学方程和 Langmuir 等温吸附模型,且吸附过程比较容易进行。

由此可知,对膨润土进行改性或者与其他材料进行复合制备的新型膨润土基复合材料不仅能为重金属的吸附提供更多的吸附位点,增强重金属吸附性能,而且能实现负载污染物吸附剂的简易固液分离。

### 3.2 膨润土基复合材料在处理有机废水中的应用

有机废水是以有机污染物为主的废水,主要来自工业生产。有机废水有害组分复杂、排量大、毒害性大,对人类身体健康危害严重,也成为了一种迫切需要解决的环境问题。天然膨润土可通过分子引力作用吸附有机污染物,但吸附能力较差。然而,可通过对膨润土进行改性或者与其他材料复合,改变其表面性能和晶层间距,进而增强膨润土对有机污染物的吸附性能。

Neelaveni<sup>[42]</sup>等采用间歇吸附系统研究了 MMT/还原氧化石墨烯复合材料 (MrGO) 对罗丹明 B (RhB) 和  $\text{Ni}^{2+}$  离子的同时吸附性能,研究发现:中性条件下,MrGO 对  $\text{Ni}^{2+}$  的最大吸附量为 178 mg/g,对 RhB 的最大吸附量为 625 mg/g,对比 GO,MMT 的单独吸附,复合材料的吸附量明显增加,且实现了 1 + 1 > 2 的吸附效果,同时其解吸再吸附效果也较好。Dai<sup>[44]</sup>等研究了聚乙烯醇/羟甲基纤维素/GO/膨润土水凝胶对亚甲基蓝对 (MB) 吸附的性能,研究发现该水凝胶的最大吸附量达到 171.4 mg/g (30 °C),明显高于不制备成水凝胶时的 83.33 mg/g。此外,所制备的水凝胶具有良好的循环使用性能,是一种处理废水中阴离子染料的高效吸附剂。Yang<sup>[46]</sup>等通过 3 - 氨基丙基三乙氧基硅烷 (APTES) 的接枝反应,成功地合成了 MMT/GO 和 MMT/rGO 复合材料,亚甲基蓝 (MB) 吸附试验表明,MMT/GO 的吸附容量最高,达到了 641.1 mg/g,5 min 吸附时间内的去除率达到 94.3%。吸附机理分析表明,MMT 与 GO 纳米片之间的协同效应使得 MMT/GO 复合材料表现出高比表面积、高含氧基团和高吸附能力。

Pourjavadi<sup>[59]</sup>等人将亚甲基双丙稀 (MB) 与聚丙烯酰胺接枝共聚为原料,之后引入膨润土,制备出一种新型的基于树脂类卡拉胶的高吸水性复合材料。

该材料制备过程中以亚甲基双丙烯酰胺 (MBA) 作为交联剂,过硫酸铵 (APS) 为引发剂,碳酸钠为成孔剂,具体合成为亚甲基双丙稀 (MB) 与聚丙烯酰胺形成十字交叉的网络结构,为膨润土提供负载基地。之后对制备的材料进行溶胀行为研究和染料吸附行为研究,结果发现,随着卡拉胶与膨润土质量比的增加,复合材料的溶胀能力增大,凝胶含量降低。通过引入碳酸钠作为造孔剂,水凝胶的溶胀率得到了提高。在适当的吸附条件下,所制备的吸附剂对亚甲基蓝的最大吸附量为 156.25 mg/g,吸附结果符合 Langmuir 等温模型。

Pan<sup>[60]</sup> 等人制备了纤维素/蒙托石介孔复合微球 (ACeMt),以超细碳酸钙为成孔剂,提高纤维素/蒙脱石介孔复合微球的孔隙率和比表面积。结果表明,试验数据符合 Langmuir 模型,ACemt 的最大吸附容量远高于常规吸附剂,在温度为 55 °C 时,特别是对金胺 O 染料的最大吸附量可达 1 336.2 mg/g。同时进行正交试验的结果表明,化学吸附是限制反应速率的步骤。

### 3.3 膨润土基复合材料在废水处理中的循环利用

循环使用一方面可以降低吸附剂使用成本,提高其使用效率,另一方面也可以负载污染物的吸附剂进行再处理,避免其造成二次污染。

汤睿<sup>[31]</sup> 等对 CTAB/MB 复合材料进行吸附与解吸试验,研究发现经过 5 次循环后,其吸附效率仍然可以达到 80% 以上。说明了该材料在回收利用循环过程中具有一定优势,也符合资源循环再利用的准则。

Neelaveni<sup>[42]</sup> 等进行了 MrGO 对 RhB 和 Ni<sup>2+</sup> 离子的同时吸附后的解吸与再吸附试验,发现经过 5 次的解吸与再吸附试验,MrGO 仍然存在着较高的吸附效率,同时对于污染物的脱除效率也较高。

Zhou<sup>[61]</sup> 等人研究了将 APTES 和 MnO<sub>2</sub> 与磁性膨润土相结合,合成出一种新型磁性氨基官能化共轭吸附剂:膨润土/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@MnO<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub> (BCFMNs)。试验数据表明,材料的合成效果好,磁性强,表面积为 84.97 m<sup>2</sup>/g,孔隙体积为 0.15 cm<sup>3</sup>/g,平均孔径为 7.02 nm。吸附试验结果显示该材料对 Cd<sup>2+</sup> 的最大吸附效率可达 98.88%,符合 Langmuir 模型,最大吸附量为 115.79 mg/g。在高浓度阳离子共存的情况下,吸附剂对 Cd<sup>2+</sup> 的去除率仍然较高。利用所制备的磁性共轭吸附剂的磁性能,可以对其进行回收利用。

章俊<sup>[62]</sup> 等人利用 Al<sup>3+</sup> 离子较易水解聚合的性质,合成了原位柱撑改性膨润土 (PMCs),通过单因素试验探讨了 PMCs 的用量及搅拌时间对养殖废水的去除效果。试验数据表明,当添加 3 g/50 mL PMCs、搅拌时间为 60 min 时,对养殖废水的处理效果最优,此时,

COD-cr、总氮、总磷、氨氮的去除率分别为 90.27%、90.21%、90.1%、90.5%。

通过以上文献追踪与分析,采用纤维状高分子材料作为膨润土基复合吸附材料中的支撑与负载材料,不仅成功地将膨润土负载到复合材料上,同时也起到了共同吸附的作用,相比单一材料,对于污染物的去除形式增加,且吸附能力得到一定提升。虽然基于膨润土改性以及其复合材料的吸附性能研究取得了大量成果,然而由于受多种因素的影响,截至目前所开展的研究工作及形成的认识还远未达到工业应用的水平,仍需要大量的实际应用型研究。

## 4 结语

从上述复合材料的制备与应用案例可以看出,在制备膨润土基复合材料的过程中,不仅使得膨润土的比表面积、稳定性和吸附性能的优势得到优化,而且保留了引入材料的吸附与稳定等性能,通过协同作用,可以进一步提高膨润土基复合材料的吸附性能。目前,膨润土基复合材料的研究大多聚集在材料配比或者材料改性,而对吸附材料的形貌、溶胀率和机械强度等研究较少。由于膨润土基复合材料的形貌和机械强度等对吸附效率和应对复杂的水流环境具有重要的影响。因此,在膨润土基复合材料的制备过程中应着重考虑。

鉴于二维纳米材料优良的吸附性能,以膨润土为原料,通过剪切、超声等方法制备蒙脱石纳米片,并以蒙脱石纳米片为基底材料,采用不同的方法制备蒙脱石纳米片基复合材料也是当前研究热点。将蒙脱石纳米片插入高分子有机物骨架结构中,制备三维蒙脱石纳米片基凝胶,或者进一步将金属/金属氧化物/金属硫化物纳米颗粒负载在三维蒙脱石纳米片基凝胶中制备功能型三维蒙脱石纳米片基凝胶也是国内外研究焦点。

此外,膨润土虽然储量大,但也是有限的矿产资源,所以研究膨润土基复合材料的回收再生和循环利用技术,对降低使用成本,提高资源利用价值,实现社会可持续发展具有十分重要的作用。因此,迫切需要开发新型、高效的脱附剂和脱附技术。

### 参考文献:

- [1] 张英,周长民. 重金属铅污染对人体的危害[J]. 辽宁化工,2007(6): 395-397.
- [2] 李成剑. 汞污染危害分析与防范措施探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版)理工卷,2010,7(2):151-152.
- [3] Sun B, Li X, Zhao R, et al. Hierarchical aminated PAN/γ-AlOOH electrospun composite nanofibers and their heavy metal ion adsorption

- performance[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 62: 219–227.
- [4] Xiang B, Fan W, Yi X, et al. Dithiocarbamate – modified starch derivatives with high heavy metal adsorption performance[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 136: 30–37.
- [5] 王鲁民. 微生物法处理重金属污水的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2007.
- [6] 马健伟,任淑鹏,初阳,等. 化学沉淀法处理重金属废水的研究进展[J]. *化学工程师*,2018,32(8):57–59.
- [7] 黄万抚,徐洁. 反渗透法处理矿山含重金属离子废水的试验研究[J]. *矿业工程*,2005(4):36–37.
- [8] Scandelai A P J, Zotesso J P, Jegatheesan V, et al. Intensification of supercritical water oxidation (ScWO) process for landfill leachate treatment through ion exchange with zeolite[J]. *Waste Management*, 2020, 101: 259–267.
- [9] Hansen H K, Núñez P, Grandon R. Electrocoagulation as a remediation tool for wastewaters containing arsenic [J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(5): 521–524.
- [10] Tofighy M A, Mohammadi T. Adsorption of divalent heavy metal ions from water using carbon nanotube sheets[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(1): 140–147.
- [11] 邹成龙,梁吉艳,姜伟,等. 膨润土吸附处理污染物的再生研究进展[J]. *硅酸盐通报*,2017,36(9):3020–3023.
- [12] 李虎杰. 膨润土对重金属离子的吸附作用[J]. *中国矿业*,2005(2): 46–48.
- [13] Horch R A, Golden T D, D Souza N A, et al. Electrodeposition of nickel/montmorillonite layered silicate nanocomposite thin films[J]. *Chemistry of Materials*, 2002,14(8): 3531–3538.
- [14] 邹成龙. 磁性膨润土材料制备及吸附重金属离子与再生研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.
- [15] Abbas E, Hadi E. Efficient removal of Pb( II ) and Zn( II ) ions from aqueous solutions by adsorption onto a native natural bentonite [J]. *MethodsX*, 2019, 6: 281–287.
- [16] 陈宇. 膨润土改性材料对重金属离子和有机物的吸附研究[D]. 重庆:西南大学,2018.
- [17] 焦林宏,汪永丽,马娅,等. 膨润土的改性及在重金属废水处理中的研究进展[J]. *化学工程与装备*,2018(12):248–249.
- [18] 崔文龙,张春燕,苏昭冰. 低品位钙基膨润土活化改性的可行性试验[J]. *中国非金属矿工业导刊*,1998(4):23–25.
- [19] 林辉,孟波,郭巧霞,等. 改性膨润土对苯胺与苯酚混合液的吸附性能[J]. *工业催化*,2018,26(5):155–159.
- [20] 季桂娟,张培萍,姜桂兰. 膨润土加工与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2013:106.
- [21] 夏畅斌,史红文. 活化膨润土吸附 Pb ~ (2+) 离子的研究[J]. *矿产综合利用*,2001(3):15–18.
- [22] 马少健,李长平,陈建新. 微波焙烧活化膨润土处理 Cu ~ (2+) 废水的研究[J]. *金属矿山*,2004(6):56–60.
- [23] 宋美宁,吕宪俊. 有机膨润土的制备工艺及应用现状研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2005(4):13–17.
- [24] Yaying L, Tao Z. Polyethyleneimine modified porous aromatic framework and silane coupling agent grafted graphene oxide composite materials for determination of phenolic acids in Chinese Wolfberry drink by HPLC[J]. *Journal of separation science*, 2019.
- [25] 方永奎,王奕鹏,孙彤,等. 羧酸盐型 Gemini 表面活性剂的合成、表面性能及其胶束化热力学[J]. *化工科技*,2019,27(4):12–16.
- [26] 孟凡芳,侯凯军,高永福,等. 不同链长的季铵盐对改性膨润土性能的影响[J]. *石化技术与应用*,2016,34(1):37–41.
- [27] 尹琦琦,张泽朋,庄官政,等. 阳 – 非离子型有机蒙脱石制备、表征和机理[J]. *中国粉体技术*,2014,20(4):56–59.
- [28] 林辉,郭巧霞,申宝剑,等. 铝柱撑膨润土对水质中磷的吸附性能探索研究[Z]. 长沙,2015.
- [29] 曾秀琼,刘维屏. 无机 – 有机柱撑膨润土的制备及其在水处理中的应用进展[J]. *环境污染治理技术与设备*,2001(2):9–13.
- [30] 孟波,林辉,郭巧霞,等. 复合改性膨润土的制备及吸附苯胺的特性[J]. *工业催化*,2018,26(5):97–109.
- [31] 汤睿,张寒冰,施华珍,等. CTAB 改性磁性膨润土对刚果红和酸性大红的吸附[J]. *高校化学工程学报*,2019,33(3):748–757.
- [32] 杨继亮,岳贤田. 膨润土 – 壳聚糖复合材料对罗丹明吸附行为的研究[J]. *环境保护科学*,2017,43(3):91–94.
- [33] 彭庆庆. 壳聚糖改性材料制备及其对水溶液中重金属离子的吸附性能及机理研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [34] 陈婧,谢海波,刘迎九,等. 壳聚糖插层膨润土的制备及其对 U(VI) 的吸附[J]. *水处理技术*,2016,42(6):76–80.
- [35] 尚晓娟,关贺,李娟娟. 改性壳聚糖插层膨润土的合成及其对甲醛的吸附效果[J]. *化学世界*,2016,57(5):265–267.
- [36] 张欢,鱼涛,屈撑圉. 壳聚糖改性膨润土吸附剂的制备及其在废水中的应用[J]. *石油化工应用*,2017,36(3):1–5.
- [37] 马慧. 壳聚糖交联膨润土吸附剂的研究[J]. *新疆有色金属*,2015, 38(4):73–76.
- [38] Liu Y, Hu L, Tan B, et al. Adsorption behavior of heavy metal ions from aqueous solution onto composite dextran – chitosan macromolecule resin adsorbent [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 141: 823–833.
- [39] Wang K, Ma H, Pu S, et al. Hybrid porous magnetic bentonite – chitosan beads for selective removal of radioactive cesium in water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362:160–169.
- [40] Zhao J, Liu F, Wang Z, et al. Heteroaggregation of Graphene Oxide with Minerals in Aqueous Phase[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(5): 2849–2857.
- [41] An Y, Qu W, Yu P, et al. The assembly of a composite based on nano – sheet graphene oxide and montmorillonite [J]. *Petroleum Science*, 2018, 15(2): 366–374.
- [42] Neelaveni M, Santhana Krishnan P, Ramya R, et al. Montmorillonite/graphene oxide nanocomposite as superior adsorbent for the adsorption of Rhodamine B and Nickel ion in binary system[J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(3): 596–609.
- [43] 彭志刚,张博建,冯茜,等. 聚合物插层蒙脱土复合型高温缓凝剂的制备及性能[J]. *硅酸盐学报*.2018,46(8):1087–1094.
- [44] Dai H, Huang Y, Huang H. Eco – friendly polyvinyl alcohol/carboxymethyl cellulose hydrogels reinforced with graphene oxide and bentonite for enhanced adsorption of methylene blue [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 185:1–11.
- [45] Liu C, Omer A M, Ouyang X. Adsorptive removal of cationic methylene blue dye using carboxymethyl cellulose/k – carrageenan/activated montmorillonite composite beads: Isotherm and kinetic studies[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 106: 823–833.
- [46] Yang Y, Yu W, He S, et al. Rapid adsorption of cationic dye – methylene blue on the modified montmorillonite/graphene oxide composites [J]. *Applied Clay Science*, 2019, 168: 304–311.
- [47] Zheng X, Dou J, Yuan J, et al. Removal of Cs<sup>+</sup> from water and soil



- by ammonium – pillared montmorillonite/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 56: 12 – 24.
- [48] Chenglong Z, Wei J, Jiyan L, et al. Removal of Pb(II) from aqueous solutions by adsorption on magnetic bentonite. [J]. *Environmental science and pollution research international*, 2019, 26(2): 1315 – 1322.
- [49] El – Korashy S A, Elwakeel K Z, El – Hafeiz A A. Fabrication of bentonite/thiourea – formaldehyde composite material for Pb (II), Mn (VII) and Cr (VI) sorption: A combined basic study and industrial application[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 137: 40 – 50.
- [50] Anirudhan T S, Lekshmi G S, Shainy F. Synthesis and characterization of amidoxime modified chitosan/bentonite composite for the adsorptive removal and recovery of uranium from seawater[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 534: 248 – 261.
- [51] 刘国,徐丽莎,李知可,等. 羟基磷灰石/膨润土复合材料对水中 Cd<sup>2+</sup> 吸附研究[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(10): 1414 – 1425.
- [52] Mohammed A A, Samaka I A S. Bentonite coated with magnetite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles as a novel adsorbent for copper (II) ions removal from water/wastewater [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2018, 10: 162 – 174.
- [53] 王世威. 氨基类有机复合改性膨润土的制备及其对铀(VI)的吸附研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.
- [54] 张晓涛,王喜明,薛振华,等. 木质纤维素/蒙脱土纳米复合材料吸附水中 Cd(II) 的研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(5): 122 – 129.
- [55] Fu C, Zhang H, Xia M, et al. The single/co – adsorption characteristics and microscopic adsorption mechanism of biochar – montmorillonite composite adsorbent for pharmaceutical emerging organic contaminant atenolol and lead ions [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 187: 109763.
- [56] 李玉洁,李雨佳,李红芬,等. 膨润土负载壳聚糖对水中 Cu(II) 的吸附特性研究[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(1): 84 – 89.
- [57] 刘相廷,李俊锋,李培雅,等. 膨润土纳米片水凝胶的制备及其吸附性能研究[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(4): 144 – 150.
- [58] Pourjavadi A, Bassampour Z, Ghasemzadeh H, et al. Porous Carrageenan – g – polyacrylamide/bentonite superabsorbent composites: swelling and dye adsorption behavior [J]. *Journal of Polymer Research*, 2016, 23(3): 60.
- [59] Pan Y, Xie H, Liu H, et al. Novel cellulose/montmorillonite mesoporous composite beads for dye removal in single and binary systems [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 286: 121366.
- [60] Zhou G, Wang Y, Zhou R, et al. Synthesis of amino – functionalized bentonite/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@ MnO<sub>2</sub> magnetic recoverable nanoparticles for aqueous Cd<sup>2+</sup> removal [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 682: 505 – 513.
- [61] 章俊,陈旭,章文军,等. 改性膨润土处理养殖废水的性能研究[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(2): 85 – 88.

## Advances in Application of (Bentonite – based) Composites in Wastewater Treatment

MIAO Yiheng<sup>1</sup>, CAO Yijun<sup>1,2</sup>, PENG Weijun<sup>2</sup>, CHANG Luping<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>

1. Henan Institute of Resources and Materials Industry Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

**Abstract:** Bentonite is widely used in industrial wastewater treatment because of its large reserves, wide distribution and excellent physical and chemical properties. However, natural bentonite and modified bentonite are directly used as adsorbents, which have such defects as small adsorption capacity and difficult solid – liquid separation. In order to make up for these defects, (bentonite – based) composites have been prepared from bentonite or modified bentonite and applied to wastewater treatment in recent years. In this paper, the preparation methods of modified bentonite and (bentonite – based) composite materials, their application in inorganic and organic wastewater treatment and the research progress of cyclic regeneration are reviewed. The aim is to provide a new and efficient (bentonite – based) composite material and its application in wastewater treatment.

**Key words:** bentonite; composite materials; wastewater treatment; recycling

引用格式: 苗毅恒, 曹亦俊, 彭伟军, 常鲁平, 王伟. 膨润土基复合材料在废水处理中的应用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(1): 56 – 64.

Miao YH, Cao YJ, Peng WJ, Chang LP and Wang W. Advances in application of bentonite – based composites in wastewater treatment[J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2020, 40(1): 56 – 64.