

· 专论与综述 ·

层状双氢氧化物在砷污染水体/土壤修复中的应用研究进展

黄玮婷, 白圆*, 马睿, 敬宗显, 万馨雯, 吴海龙, 刘洁
(兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 综述了层状双氢氧化物(LDHs)的结构、特性及其在砷污染水体/土壤修复中的应用研究现状, 介绍了共沉淀、水热合成、离子交换、溶胶-凝胶、焙烧等LDHs制备方法, 以及表面改性、插层、焙烧复原等改性方法。分析了LDHs吸附除砷的机理和影响因素, 以及当前在材料合成、优化和应用过程中存在的不足, 提出了形成工业化生产工艺、研发选择性和稳定性更强的复合材料、提升在复杂基体中的抗冲击负荷能力、探讨同构置换对层状结构的影响等后续研究方向。

关键词: 层状双氢氧化物; 改性; 吸附; 砷污染; 水体修复; 土壤修复

中图分类号: X592; TB34

文献标志码: A

文章编号: 1006-2009(2024)03-0001-06

Progress in Application of Layered Double Hydroxides in Arsenic Contaminated Water/Soil Remediation

HUANG Weiting, BAI Yuan*, MA Rui, JING Zongxian, WAN Xinwen, WU Hailong, LIU Jie
(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In this paper, the structure and properties of layered double hydroxides(LDHs) and their application in arsenic-contaminated water/soil remediation were reviewed. LDHs preparation methods such as co-precipitation, hydrothermal synthesis, ion exchange, sol-gel and calcination, as well as modification methods such as surface modification, intercalation and calcination restoration were introduced. The mechanism and influencing factors of arsenic removal by LDHs adsorption were analyzed, as well as the shortcomings existing in the process of material synthesis, optimization and application. Subsequent research directions were proposed to form industrial production process, develop composite materials with strong selectivity and stability, improve impact load resistance in complex matrix, and explore influences of isomorphic replacement on layered structure.

Key words: Layered double hydroxides; Modification; Adsorption; Arsenic contamination; Water remediation; Soil remediation

砷是一种类金属元素,可形成高毒性的亚砷酸盐[As(III)]或砷酸盐[As(V)]等化合物。我国土壤中砷的均值为11.2 mg/kg,高于全球土壤中砷的均值(6 mg/kg)^[1]。砷污染主要由自然和人类活动引起,其中,人类活动带来的农业和工业污染是主因;自然来源主要由地球早期的岩石经过复杂的物理、化学、生物作用形成,如地壳变动、土壤侵蚀等。砷在环境中的存在形态分为有机态与无机态两种,无机态以As³⁺和As⁵⁺为主^[2-5]。土壤和水体中的砷主要以无机态存在,土壤中的有机砷含量很低,地下水中的砷会以甲基化砷化合物的形式存

在。砷污染不仅会影响土壤肥力与农作物的产量和质量,还会在食物链中产生生物放大效应,给人体健康带来极大威胁,其污染防治刻不容缓^[6-7]。

含砷废水的处理方法主要有混凝沉淀法、生物处理法、离子交换法和吸附法等^[2],其中,吸附法

收稿日期:2023-06-02;修订日期:2024-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22166022);甘肃省自然科学基金资助项目(21JR11RA068);甘肃省高校产业支持计划基金资助项目(2020C-38)

作者简介:黄玮婷(1999—),女,安徽阜阳人,在读研究生,研究方向为水处理技术与固体废物资源化。

*通信作者:白圆 E-mail: 1834402619@qq.com

因成本低、操作简单、高效且绿色环保而备受关注^[3]。土壤重金属污染修复技术主要包括物理修复、化学修复和生物修复^[4],其中,化学钝化法经济可行^[8],适用于大规模的土壤修复。现阶段,寻找具有高吸附性能和高去除率的吸附剂是研究者关注的焦点^[9]。水滑石类化合物又称层状双氢氧化物(LDHs),是一种新型功能材料,作为典型的阴离子吸附剂在去除阴离子方面具有独特优势^[10],近年来已成为环境研究的热点。目前,LDHs在气态污染物吸附、水中污染物吸附、污染土壤修复^[5]、催化和离子交换等领域受到广泛关注^[11]。今从LDHs的结构、特性、制备和改性方法等方面介绍其在砷污染水体/土壤修复中的研究现状,并分析当前研究存在的不足,为未来研究提供方向与思路。

1 LDHs 材料特性

1.1 LDHs 结构

LDHs 是一种层状结构的阴离子黏土纳米材

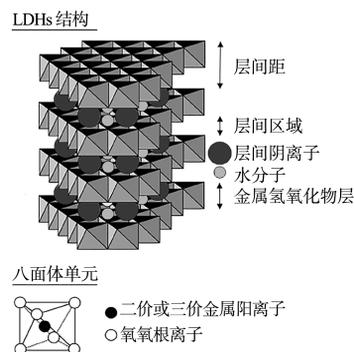


图1 LDHs 结构示意图^[15]

Fig. 1 Structural diagram of LDHs^[15]

1.2 LDHs 特性

(1) 酸碱双功能性。LDHs 总体呈现弱碱性,其碱性能力受层板中阳离子、OH⁻和层间阴离子种类的影响。LDHs 也具有酸性,其酸性强弱取决于两个因素,即三价金属氢氧化物的酸性和二价金属氢氧化物的碱性^[17]。

(2) 热稳定性。LDHs 层板内、层间、层板与层间存在弱结合和强结合两种作用,使其具有一定的热稳定性^[10]。当升至一定温度时,LDHs 会发生热分解,经历层间脱水、脱层间阴离子、新相形成 3 个过程^[16]。当温度低于 200 °C 时,虽然 LDHs 脱去外

料,由带正电的金属氢氧化物层与带负电的层间阴离子组成^[10,12-13]。其化学通式为: $M_{1-x}^{2+}M_x^{3+}(\text{OH})_2 \cdot A_{x/n}^{n-} \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ^[10-12,14],式中, M^{2+} 和 M^{3+} 分别代表二价和三价金属阳离子; A 为层间阴离子^[11]; n^- 为阴离子电荷,当 $n = 0$ 时表示中性层被弱范德华力吸引^[14]; m 为 LDHs 分子中结晶水的个数; x 取值范围一般为 0.2 ~ 0.33,若 x 值超过 0.33,则大量的三价阳离子会导致 $M(\text{OH})_3$ 杂相,若 x 值低于 0.2,则八面体中二价阳离子的增加会导致 $M(\text{OH})_2$ 沉淀。

在 LDHs 结构中,金属阳离子占据了由 OH⁻ 组成的正八面体中心^[10,12],且与 6 个 OH⁻ 配位结合,相邻的八面体共用棱边^[10,15-16]。在层板中,部分二价阳离子 (M^{2+}) 被三价阳离子 (M^{3+}) 同构替代,形成带正电的薄片。主体层板相互堆叠,形成带正电的片层结构^[10,17]。层间阴离子插入层间,中和层板上的正电荷,以保持材料整体的稳定性^[18-20]。此外,水分子通常会嵌入 LDHs 层间未被阴离子占据的位点^[11,18]。LDHs 结构示意图见图 1。

层和层间的物理水,但层状结构不会被破坏;当温度高于 450 °C 时,虽然层板间的阴离子消失,材料的孔隙和比表面积增大,但材料的层板结构未被破坏,且生成层状双金属氧化物;当温度高于 600 °C 时,材料的层状结构被彻底破坏,部分双金属氧化物出现烧结现象,形成比表面积和孔体积较小、结构不可逆的类尖晶石结构^[21]。

(3) 结构记忆效应。指将在一定温度下煅烧得到的 LDHs 加入含有特定客体阴离子的溶液中,其会吸收阴离子并恢复原来的层状结构^[20]。记忆效应与煅烧温度密切相关,LDHs 的煅烧温度应在

400 °C ~ 500 °C 范围内^[20], 当温度超过 600 °C 时, 其结构将不能恢复, 记忆效应消失。

(4) 层间阴离子的可交换性。LDHs 的层间阴离子可被其他阴离子取代, 且不会对其层状结构造成影响。一般情况下, 低价阴离子和有机阴离子易被取代, 高价阴离子和无机阴离子易进入 LDHs 层间^[10]。按照被交换的难易程度, 常见阴离子插层到层间的顺序^[10] 依次为 $\text{NO}_3^- > \text{B}(\text{OH})_4^- > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{HPO}_4^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-}$ 。

(5) 层板组成和结构的可调控性。当二价和三价金属离子半径接近于 Mg^{2+} 半径 (6.5 nm) 时, 其能以共价键的方式与羟基结合^[17], 进而形成目标材料。因此, 改变金属离子的种类、数量和不同价态金属的摩尔比, 不仅可以对 LDHs 的层板组成和比例进行调控, 还能获得具有不同物理化学性质 (如层间距、层间含水量、亲疏水性等) 的 LDHs 产品^[17]。

2 LDHs 的制备与改性

2.1 LDHs 的制备

LDHs 的制备方法主要有共沉淀法、水热合成法、离子交换法、溶胶-凝胶法和焙烧法等^[15-16, 22]。

共沉淀法是应用最普遍的方法之一, 分为恒定 pH 值法和变化 pH 值法^[13, 19]。Ardau 等^[23] 通过共沉淀法合成了锌铝硫酸盐 LDHs, 为验证砷吸附过程的有效性和可逆性, 在溶液中同时和随后加入竞争物。结果表明, 只有碳酸盐特别是完全脱质子形式的 CO_3^{2-} 可以从溶液中除去高达 90% 的 HAsO_4^{2-} , 当 CO_3^{2-} 体积分数下降至约 60% 时, 向溶液中加入 CO_3^{2-} , 约 30% 的 HAsO_4^{2-} 可被解吸。

水热合成法是先用水溶解金属盐, 再将溶液倒入反应器中, 在高温高压条件下获得目标产物^[15]。Kamali 等^[24] 采用水热合成法制备了 LDHs 改性的新型纳米球形石墨烯, 用于去除水溶液中的 As(III)。当 pH 值为 8、接触时间为 30 min、吸附剂用量为 50 mg 时, 吸附容量较高 (149.3 mg/g), 吸附机理为 Langmuir 等温吸附, 动力学模型符合拟二级动力学。

离子交换法是将预先合成的简单阴离子型 LDHs 置于目标阴离子溶液中, 再将其与原始的层间阴离子进行交换, 进而得到目标产物^[25]。该方法受多种因素制约, 通常要求进入层间的阴离子具有较强的离子交换能力。

溶胶-凝胶法的基本过程包括水解、沉淀、洗涤、干燥等步骤。在 HCl 或 HNO_3 溶液中水解金属烷氧基化合物, 同时向反应物溶液中加入适量的酸或碱, 沉淀得到的溶胶经洗涤、干燥、焙烧后获得目标产物^[16]。通常需要根据材料的最终应用情况来判定是否需要增加额外步骤, 如微波照射或水热处理^[26]。

焙烧法是利用 LDHs 的记忆效应制备新材料^[15], 得到的 LDHs 具有良好的纯度和结晶性, 适用于合成含氧酸盐、有机酸等尺寸较大的 LDHs^[15]。煅烧温度通常需要控制在 500 °C 以下, 否则会产生不可逆的尖晶石, 难以恢复原始的层状结构^[10]。

综上所述, LDHs 的制备方法各有优劣, 可以通过综合运用多种技术的方式进一步提高生产效率和产品质量, 今后的研究可能集中在水热条件对插入 LDHs 中的有机物结构特性影响等方面。

2.2 LDHs 的改性

原始 LDHs 存在吸附容量不高、吸附速率受限、吸附选择性差和易团聚等缺陷, 研究人员引入多种改性手段, 通过改变 LDHs 的制备条件来改善其综合性能, 进而提高 LDHs 的吸附性能, 拓宽应用范围^[18, 22]。常见的 LDHs 改性方法包括表面改性、插层、焙烧复原等。表面改性是在 LDHs 表面引入各种活性基团或其他富含官能团的有机聚合物^[13, 18], 能显著改善原始 LDHs 的物化性质, 并在一定程度上提高材料对污染物的亲和力和吸附能力^[18]。分子通常以直接交联或间接交联的方式与 LDHs 表面结合^[18]。插层是在 LDHs 的层间插入某些阴离子, 提升离子交换倾向^[9]。阴离子的引入能显著增大 LDHs 的层间距并阻碍纳米片的堆积, 进而增加 LDHs 的比表面积和活性吸附位点数量, 获得更快的污染物吸附速率和更大的吸附容量^[27], 并降低分离或提纯的难度^[28-30]。目前, 共沉淀法和离子交换法是制备插层改性 LDHs 材料的主要方法^[18, 21], 且使用共沉淀法合成具有复杂阴离子插层的 LDHs 更为简便。焙烧复原是一种基于记忆效应制备改性 LDHs 的方法。煅烧可以促进具有催化活性的金属氧化物形成, 进而提升材料的吸附性能^[31]。除上述几种方法外, 还可以使用剥离-重组^[20]、磁改性等方法进行 LDHs 改性。

3 LDHs 吸附法除砷

3.1 吸附机理

LDHs 对无机阴离子的去除主要归因于目标阴离子与带正电荷的主体层板之间的静电引力作用,以及与层板间可交换阴离子之间的阴离子交换作用^[32-34]。大量研究表明,LDHs 主要通过吸附、离子交换和结构重建除砷[见图 2(a)(b)(c)]^[12,35-36]。结构重建是基于 LDHs 具有不稳定性 and 记忆效应,煅烧后的 LDHs 在吸附砷作为层间离子后能重建其原始的层状结构^[35-36]。Bessaies 等^[37]将纤维素(CL)分别掺杂于 Ca/Al 和 Zn/Al LDH 中制备了 CCA 和 CZA 纳米复合材料,吸附模型、pH 值、扫描电镜(SEM)和能量色散 X 射线光谱(EDX)等测试结果表明,砷在 CCA 和 CZA 表面的吸附属于静电吸附。Ji 等^[38]研究发现,在 4 种球形吸附剂中, $[\text{SnS}_4]^{4-}/\text{MgFe-LDH-2}$ 的吸附过程主要由铁与砷的络合作用决定,而 $[\text{SnS}_4]^{4-}@\text{MgFe-LDH}$ 、 $[\text{SnS}_4]^{4-}/\text{MgFe-LDH-1}$ 和 $[\text{SnS}_4]^{4-}/\text{MgFe-LDH-3}$ 则通过 $[\text{SnS}_4]^{4-}$ 与砷的离子交换作用去除 As(III)。Yang 等^[39]分别使用煅烧和未煅烧的 Mg-Al- CO_3 LDH 开展除 As(V) 研究,结果表明,二者对 As(V) 均有较好的吸附性能,吸附等温线符合 Freundlich 模型,且煅烧的样品比未煅烧的样品表现出更高的 As(V) 吸附能力。综上可知,LDHs 吸附除砷的机理多样,在不同的处理条件下,可以根据不同的机理对吸附性能进行优化。

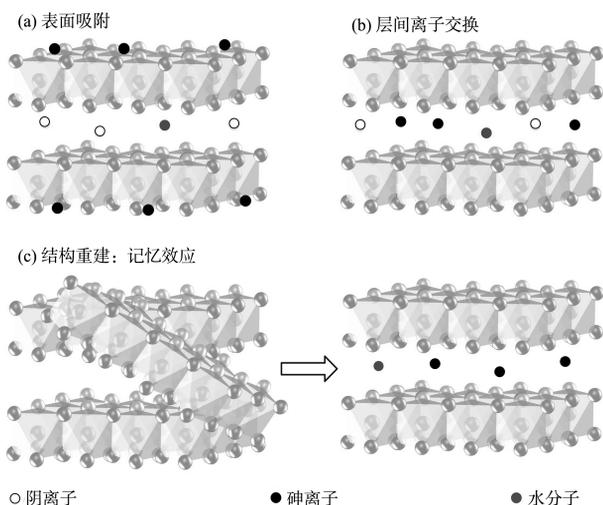


图 2 LDHs 的吸附机理

Fig. 2 Adsorption mechanism of LDHs

3.2 LDHs 吸附影响因素

pH 值、吸附时间和吸附剂用量等因素均会对 LDHs 吸附除砷过程造成影响。

介质 pH 值和插层阴离子的化学性质对砷化物的吸附会产生一定影响。Li 等^[40]将 $[\text{SnS}_4]^{4-}$ 簇与 MgFe-LDH 组装合成了 $[\text{SnS}_4]^{4-}/\text{LDH}$ 复合材料,用来同时捕获汞和砷离子,结果表明,该复合材料在较宽的 pH 值范围内具有良好的除汞、除砷性能,去除率均在 99% 以上;插入的 $[\text{SnS}_4]^{4-}$ 簇通过增加 LDH 的层间距,扩大了表面积并形成层次化的孔道,进而提高了吸附性能;对汞的吸收主要归因于 $[\text{SnS}_4]^{4-}$ 簇合物位,对砷的去除主要归因于 LDH 中 Fe 位的存在。Borges 等^[41]采用恒定 pH 值条件下的共沉淀法合成了含硝普基的 MgAl-LDH-NP 吸附材料,用以去除水中的 As(III) 和 As(V),结果表明,当类金属初始质量浓度为 10 mg/L 且 pH 值为 2.00 时,As(III) 未被吸附,As(V) 的去除率达到 103.8%;当 pH 值为 6.02 和 12.00 时,As(III) 的去除率分别为 22.93% 和 60.07%,而 As(V) 的去除率却逐渐下降,分别为 89.81% 和 71.64%。Lu 等^[42]在使用插层氯化物或硝酸盐阴离子的 MgAlFe-LDH 型 LDH 对 As(V) 进行吸附研究时也得出类似结论,即 pH 值升高会导致 LDH 对 As(V) 的吸附量减少,这是由于 As(V) 与 LDH 表面之间的静电斥力增加所致。综上所述,LDHs 的表面电荷、结构和吸附位置均会受到环境 pH 值和插层化合物的影响。在 pH 值低于 pH_{pzc} 的酸性条件下,LDHs 表面带正电荷,能够吸引阴离子砷酸盐物种(酸性介质中的静电吸引机制)。然而,非常低的 pH 值会对 LDHs 结构的稳定性产生负向影响,导致对砷离子吸附能力的下降。中性 As(III) 的吸附可以通过物理吸附的一种形式——特定的弱范德华引力来进行。在较高的 pH 值范围内,随着 OH^- 吸附对 LDHs 竞争效应的增强, OH^- 会与目标重金属阴离子争夺有限的吸附位点,使阴离子物种被 LDHs 表面排斥,进而可能进一步加剧 pH 值的负面影响。因此,增加 LDHs 的等电点(IEP)并维持层电荷,对于稳定阴离子的吸附性能不可或缺。

吸附剂与污染物质之间的接触时间是吸附过程中需要考察的另一个重要参数。Lee 等^[43]开发了一种新型颗粒吸附剂 PES-LDH,用于去除水中的 As(V),结果表明,As(V) 的吸附在 100 min 内

较为迅速,之后吸附速率较慢,6 h后达到平衡,最大吸附量为7.44 mg/g。Ji等^[38]研究制备了LDHs负载/包覆 $[\text{SnS}_4]^{4-}$ 材料,对As(Ⅲ)进行选择吸附,4种球形材料($[\text{SnS}_4]^{4-} @ \text{MgFe-LDH}$ 和 $[\text{SnS}_4]^{4-}/\text{MgFe-LDH-1}$ 、 $[\text{SnS}_4]^{4-}/\text{MgFe-LDH-2}$ 、 $[\text{SnS}_4]^{4-}/\text{MgFe-LDH-3}$)在120 min内吸附效果基本一致,As(Ⅲ)的浓度随接触时间的增加而逐渐降低,球形 $[\text{SnS}_4]^{4-} @ \text{MgFe-LDH}$ 对砷的去除率较高,可达47.6%。上述结果表明,硫团簇与LDH材料双活性位点(S和Fe)的结合对砷离子的吸附有很大作用。在初始阶段,砷的吸附去除速率较快,可能归因于该阶段材料表面大量的吸附位点和砷的浓度梯度,能够促进砷分子的快速摄入;随后,砷分子在LDHs孔道内缓慢扩散,吸附速率减缓,最终达到平衡状态。

考虑到成本和效益,需要评估吸附剂的最佳用量。Hong等^[44]研究了LDHs用量对砷酸盐吸附的影响,结果表明,在低用量范围内,砷酸盐和亚砷酸盐的去除效率随着吸附剂用量的增加而急剧提高,当吸附剂用量超过0.5 g/L时,二者的去除率趋于平稳。在一定的范围内,砷的去除率会随着吸附剂用量的增加而增大,可能是因为可用吸附位点随之增多。当吸附剂用量超过范围上限时,LDHs颗粒可能会因碰撞而聚集,导致比表面积降低,扩散路径长度值增大,进而限制砷分子进入LDHs时与可用吸附位点的结合,使砷的去除率不再发生变化。

4 结语

LDHs是一类新型功能材料,独特的结构和性能使其在有机物和重金属废水治理、农田土壤修复等领域具有广阔的应用前景。基于当前在LDHs材料合成、优化和应用过程中存在的不足,后续可以在以下几个方面加强研究。

(1) LDHs吸附除砷技术及其对土壤中砷的钝化效应研究多停留在实验阶段,在实际应用中具有一定的局限性,大规模适用性难以实现,未来需要改进合成方法,形成规范成熟的工业化生产工艺。

(2) 选择性和稳定性缺陷是LDHs实际应用的主要障碍,可以通过改善LDHs的结构特性,或将LDHs与具有所需特性的其他物质相结合,探索复合材料的相容性,同时开发高产量、低成本的合成方法。

(3) 综合考虑LDHs在复杂基体中的抗冲击负

荷能力,进一步评价LDHs对砷离子的吸附效果。

(4) 尽管目前在基础研究方面取得了突破性进展,如对LDHs基本结构特征和吸附机理的认知,但尚未探明其层结构组成原理、层间离子排列规律和层表面配位机理,未来需要深入探讨同构置换对层状结构的影响,以及插层取向和叠加布置的因果关系。

[参考文献]

- [1] 纪冬丽,孟凡生,薛浩,等. 国内外土壤砷污染及其修复技术现状与展望[J]. 环境工程技术学报,2016,6(1):90-99.
- [2] 吴万富,徐艳,史德强,等. 我国河流湖泊砷污染现状及除砷技术研究进展[J]. 环境科学与技术,2015,38(S1):190-197.
- [3] 何雅馨,柯心怡,魏世强,等. 富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷镉的吸附性能与机制[J]. 环境科学,2023,44(5):2646-2660.
- [4] 龙良俊,宋雪婷,潘宝宇,等. 砷污染土壤修复技术综述[J]. 应用化工,2020,49(10):2649-2653.
- [5] 廖玉梅. 铁锰类层状双氢氧化物对水体和土壤中砷镉复合污染修复研究[D]. 重庆:西南大学,2021.
- [6] 阿依努尔·麦提努日,麦提吐尔逊·艾则孜,李新国. 基于地理加权回归模型的葡萄园土壤砷含量高光谱反演[J]. 环境监测管理和技术,2021,33(4):45-48.
- [7] 潘莎,陈再琴,汪钊宇,等. 燃煤电厂周边河流中氟、砷和重金属污染健康风险评估[J]. 环境监测管理和技术,2019,31(4):33-37.
- [8] 汤小群,张恒,吴颖靖,等. 镉砷复合污染土壤稳定化修复技术研究与应用[J]. 环境监测管理和技术,2023,35(1):64-67.
- [9] 贺怀儒,王倩,段应娇. 提高层状双金属氢氧化物水中吸附性能研究进展[J]. 水处理技术,2021,47(1):19-26.
- [10] 刘吉明. 层状双金属氢氧化物的制备、表征及硫酸根和氟离子吸附性能研究[D]. 太原:太原理工大学,2015.
- [11] 赵晓玲,常宏岗,何金龙,等. 水滑石类化合物在水处理和气体净化领域中的应用[J]. 材料导报,2023,37(S1):74-86.
- [12] 唐朝春,朱蓓,许荣明,等. 金属基吸附剂除砷技术研究进展[J]. 环境科学与技术,2020,43(10):221-228.
- [13] 李致达,石瑶,张凤姣,等. 层状双氢氧化物在环境修复领域中的研究进展[J]. 化工进展,2023,42(11):5801-5810.
- [14] SABA J, AFAAF R A, SHANZA R K, et al. Layered double hydroxides (LDHs): Synthesis & applications [J]. Progress in Chemistry, 2019, 31(2/3):394-412.
- [15] 张栋强,王园园,贾倩,等. 层状双氢氧化物的制备及其摩擦学性能研究进展[J]. 中国表面工程,2022,34(2):91-102.
- [16] 孙金陆,甄卫军,李进. LDHs材料的结构、性质及其应用研究进展[J]. 化工进展,2013,32(3):610-616.
- [17] 张波. 层状双金属氢氧化物基杂化复合材料的制备及其吸附性能研究[D]. 济南:山东大学,2019.

- [18] 蒋柱武, 吴梦帆, 李登胜, 等. 层状双金属氢氧化物吸附剂的功能化改性策略[J]. 精细化工, 2023, 40(6): 1239-1252.
- [19] 杨靖, 范议议, 王赛娣, 等. 二维层状双金属氢氧化物在去除磷酸盐中的应用[J]. 化工进展, 2022, 41(7): 3689-3706.
- [20] 李聪, 杨斌, 杨金辉, 等. 层状双氢氧化物材料在染料废水中的应用进展[J]. 精细化工, 2021, 38(2): 226-233.
- [21] 黄爽秋. 层状双金属氢氧化物基材料的制备及其对六价铬吸附性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [22] 吕维扬, 孙继安, 姚玉元, 等. 层状双金属氢氧化物的控制合成及其在水处理中的应用[J]. 化学进展, 2020, 32(12): 2049-2063.
- [23] ARDAU C, FRAU F, LATTANZI P. New data on arsenic sorption properties of Zn-Al sulphate layered double hydroxides: Influence of competition with other anions [J]. Applied Clay Science, 2013, 80: 1-9.
- [24] KAMALI N, GHASEMI J B, ZIARANI G M, et al. Design, synthesis, and nanoengineered modification of spherical graphene surface by layered double hydroxide(LDH) for removal of As(III) from aqueous solutions[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2023, 53: 374-380.
- [25] 胡锋平, 罗文栋, 彭小明, 等. 层状双金属氢氧化物去除水中污染物研究进展[J]. 水处理技术, 2019, 45(1): 17-22.
- [26] CHAILLOT D, BENNICI S, BRENDLÉ J. Layered double hydroxides and LDH-derived materials in chosen environmental applications: A review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 24375-24405.
- [27] SHAMSAYEI M, YAMINI Y, ASIABI H. Fabrication of zwitterionic histidine/layered double hydroxide hybrid nanosheets for highly efficient and fast removal of anionic dyes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 529: 255-264.
- [28] FENG C, WANG F, LIU Z, et al. A self-healing catalyst for electrocatalytic and photoelectrochemical oxygen evolution in highly alkaline conditions [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 5980.
- [29] ZHANG L X, HE F X, GUAN Y T. Immobilization of hexavalent chromium in contaminated soil by nano-sized layered double hydroxide intercalated with diethyldithiocarbamate: Fraction distribution, plant growth, and microbial evolution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 430: 128382.
- [30] TIAN C, TU J W, QIU P P, et al. Ultrastrong anion affinity of anionic clay induced by its inherent nanoconfinement[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(2): 930-940.
- [31] INTACHAI S, NAKORN M N, KAEWNOK A, et al. Versatile inorganic adsorbent for efficient and practical removal of hexavalent chromium in water[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 288: 126388.
- [32] CHENG Z Y, YANG J, LI L, et al. Flocculation inspired combination of layered double hydroxides and fulvic acid to form a novel composite adsorbent for the simultaneous adsorption of anionic dye and heavy metals[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 618: 386-398.
- [33] KANG J, LEVITSKAIA T G, PARK S, et al. Nanostructured Mg-Fe and CoCr layered double hydroxides for removal and sequestration of iodine anions[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 380: 122408.
- [34] KOILRAJ P, KAMURA Y, SASAKI K. Cosorption characteristics of SeO_4^{2-} and Sr^{2+} radioactive surrogates using 2D/2D graphene oxide-layered double hydroxide nanocomposites [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(11): 13854-13866.
- [35] WANG J Y, ZHANG T P, LI M, et al. Arsenic removal from water/wastewater using layered double hydroxide derived adsorbents, a critical review [J]. RSC Advances, 2018, 8(40): 22694-22709.
- [36] DONG Y C, KONG X R, LUO X R, et al. Adsorptive removal of heavy metal anions from water by layered double hydroxide: A review [J]. Chemosphere, 2022, 303(1): 134685.
- [37] BESSAIES H, IFTEKHAR S, DOSHI B, et al. Synthesis of novel adsorbent by intercalation of biopolymer in LDH for the removal of arsenic from synthetic and natural water[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 91: 246-261.
- [38] JI L P, LI S T, XU H M, et al. Morphology control enables $[\text{SnS}_4]^{4-}$ clusters and MgFe-LDHs dual active sites for the adsorption of mercury and arsenic ions [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 433: 133761.
- [39] YANG L, SHAHRIVARI Z, LIU P K T, et al. Removal of trace levels of arsenic and selenium from aqueous solutions by calcined and uncalcined layered double hydroxides (LDH) [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(17): 6804-6815.
- [40] LI S T, XU H M, WANG L L, et al. Dual-functional sites for selective adsorption of mercury and arsenic ions in $[\text{SnS}_4]^{4-}/\text{MgFe-LDH}$ from wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123940.
- [41] BORGES G A, FERREIRA G M D, SIQUEIRAI K P F, et al. Adsorption of organic and inorganic arsenic from aqueous solutions using MgAl-LDH with incorporated nitroprusside [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2020, 575: 194-205.
- [42] LU H T, LIU S X, ZHANG H, et al. Comparative study on synchronous adsorption of arsenate and fluoride in aqueous solution onto MgAlFe-LDHs with different intercalating anions [J]. RSC Advances, 2018, 8(58): 33301-33313.
- [43] LEE S H, CHOI H, KIM K W. Removal of As(V) and Sb(V) in aqueous solution by Mg/Al-layered double hydroxide-incorporated polyethersulfone polymer beads (PES-LDH) [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, 40: 2119-2129.
- [44] HONG J, ZHU Z L, LU H T, et al. Synthesis and arsenic adsorption performances of ferric-based layered double hydroxide with α -alanine intercalation [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 252: 267-274.

本栏目编辑 姚朝英 刘罗