

镁铝水滑石的制备及其应用研究进展

谢佳瑶, 向博文, 江颖, 唐毅, 汤家兴, 潘心妍, 刘敏, 刘春冬*

湖州学院生命健康学院, 浙江 湖州

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月12日; 发布日期: 2025年4月27日

摘要

水滑石类化合物的研究已经历了多年的发展, 其结构和性能得到了深入的研究和了解, 其中镁铝水滑石作为一种具有层状结构的材料, 其独特的结构和阴离子的可交换性, 以及碱性、热稳定性等性能, 使其成为在催化、水资源净化、大气治理等方面有巨大潜力的新材料。镁铝水滑石可以通过共沉淀法、水热合成法、溶胶-凝胶法、离子交换法、尿素水解法、焙烧还原法等多种方法合成, 着重介绍了共沉淀法和水热合成法并分析它们各自的优点, 同时重点综述了其在催化方面的应用。镁铝水滑石作为一种多功能材料, 在多个领域都有广泛应用, 并且随着研究和市场的发展, 其应用前景和市场潜力仍然在不断扩大。

关键词

镁铝水滑石, 制备方法, 催化应用, 环境治理

Research Progress on the Preparation and Application of Magnesium Aluminum Hydroxide

Jiayao Xie, Bowen Xiang, Ying Jiang, Yi Tang, Jiaying Tang, Xinyan Pan, Min Liu, Chundong Liu*

College of Life and Health Sciences, Huzhou College, Huzhou Zhejiang

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 12th, 2025; published: Apr. 27th, 2025

Abstract

The research of hydroxide compounds has experienced many years of development, and its structure and properties have been deeply studied and understood, among which magnesium aluminum

*通讯作者。

文章引用: 谢佳瑶, 向博文, 江颖, 唐毅, 汤家兴, 潘心妍, 刘敏, 刘春冬. 镁铝水滑石的制备及其应用研究进展[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 772-783. DOI: 10.12677/ms.2025.154082

hydrotalcite as a material with a layered structure, its unique structure and anionic exchangeability, as well as alkaline, thermal stability and other properties, make it become a new material with great potential in catalysis, water purification, atmospheric governance and other aspects. Magnesium aluminum hydrotalcite can be synthesized by coprecipitation, hydrothermal synthesis, sol-gel method, ion exchange method, urea hydrolysis method, roasting reduction method, etc. The advantages of coprecipitation method and hydrothermal synthesis method are introduced, and their applications in catalysis are reviewed. As a multifunctional material, magnesium aluminum hydrotalcite has been widely used in many fields, and with the development of research and market, its application prospect and market potential are still expanding.

Keywords

Magnesium Aluminum Hydrotalcite, Preparation Method, Catalytic Application, Environmental Treatment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

层状双金属氢氧化物(LDH)是水滑石与类水滑石的统称。由这些化合物构成的超分子材料被称为水滑石类插层材料。水滑石具备独特的结构特点,包括特殊的组分、层间阳离子种类的多样性、比例的可调性以及层间阴离子种类的丰富性等。因此,水滑石的结构可以根据不同的需求,如性能要求或用途,进行调节与优化[1]。随着现代分析技术的进步和测试手段的广泛应用,水滑石的结构与性能研究不断深入,且逐步能够通过人工合成方法获得优质的水滑石,并在工业生产、环境保护等领域发挥重要作用。

水滑石的广泛应用得益于其出色的热稳定性、适宜的碱性以及层间阴离子的可交换性。它在高温环境中能保持稳定的性能,尤其是在 450°C~500°C时,层间的阴离子完全脱除并以 CO₂ 形式释放,形成层状双金属氧化物(LDO)。此外,水滑石表面富含羟基,因此具备一定的碱性,且其碱性强度与二价金属氢氧化物的性质大致相符。水滑石层间阴离子的可交换性不仅是其化学活性的基础,还体现了其结构灵活性与功能化的潜力。插入过程的选择性与层间作用力的平衡揭示了离子交换的动力学机制,表明外界条件(如离子种类、浓度、温度)可精确调控层间结构的改性。这一特性不仅拓宽了水滑石在多功能材料设计中的应用边界,还为其在分子筛、催化载体等领域的精准优化提供了理论支持。

2. 水滑石的结构

水滑石是一种天然矿物,其化学通式为[Mg_{1-x}Al_x(OH)₂A_n⁻·mH₂O],其中 A_n⁻代表可交换的层间阴离子。典型的水滑石化学式为 Mg₆Al₂(OH)₁₆CO₃·4H₂O,其结构与水镁石(Mg(OH)₂)非常相似。水滑石的基本结构单元可以视为由金属阳离子(如 Mg²⁺、Al³⁺、Ni²⁺、Co²⁺、Zn²⁺等)与氢氧根离子(OH⁻)组成的层板。这些金属阳离子大多为二价和三价的混合体,且按照特定比例(通常二价阳离子占多数)排列,形成带正电的层板。层板之间填充有各种阴离子(如 CO₃²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻等)和水分子,这些阴离子与层板上的正电荷平衡,从而保持了整体结构的电中性。这些金属阳离子与氢氧根离子通过配位键结合,形成 M(OH)₆八面体结构[2]。由于水滑石中金属离子的种类、金属 M^{II}与 M^{III}的摩尔比、层间阴离子的种类等方面具有高度的多样性,如图 1 水滑石可以形成不同的主客体结构,并表现出各种理化性质,这也使得水滑石在吸附、电化学、催化等领域展现了巨大的应用潜力[3]。

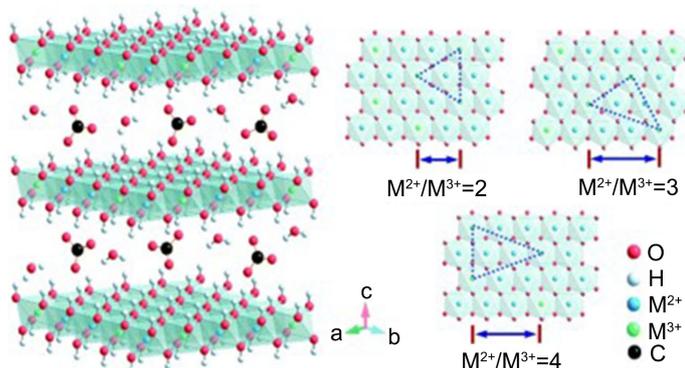


Figure 1. Ideal structural schematic diagrams of carbonate intercalated hydrotalcites with different MII/MIII molar ratios, where the metal hydroxide octahedra are stacked along the crystallographic c-axis, and water and anions exist in the interlayer region.

图 1. 具有不同 M^{II}/M^{III} 摩尔比的碳酸盐插层水滑石的理想结构示意图, 金属氢氧根八面体沿晶体学 c 轴堆叠, 层间区域存在水和阴离子[4]

2.1. 镁铝水滑石结构

本实验使用的镁铝水滑石, 其主体层板由氢氧化物(包括镁和铝的氢氧化物)组成。镁铝水滑石的结构如图 2 所示, 其中的金属阳离子(Mg^{2+} 和 Al^{3+})与氢氧根离子(OH^-)通过共价键连接, 形成稳定的八面体结构。由于 Al^{3+} 的离子半径与 Mg^{2+} 相似, Al^{3+} 可以部分替代 Mg^{2+} 的位置, 导致层板带有正电荷。这样的结构赋予了水滑石许多独特的性质, 如层间阴离子的可交换性和良好的吸附性能等, 使其在催化、离子交换、吸附等领域展现了广泛的应用潜力。Smoláková L [5] 及其团队通过尿素法合成了 Mg-Al、Zn-Mg-Al 和 Zn-Al 水滑石, 并在焙烧后将其用作糠醛与丙酮羟醛缩合反应的催化剂。研究表明, 催化剂的活性与其酸碱性质密切相关。当催化剂中的碱性位点较多时, 糠醛的转化率以及长碳链产物的选择性显著提高。进一步分析发现, 在相同铝负载量下, Mg-Al 水滑石的比表面积、碱性位点和酸性位点均优于 Zn-Al 水滑石, 因此具有更强的催化性能。此外, 在镁铝水滑石的改性研究中, 添加硼砂可以有效提升其阻燃性能, 表明镁铝水滑石在阻燃领域也有应用潜力[6]。

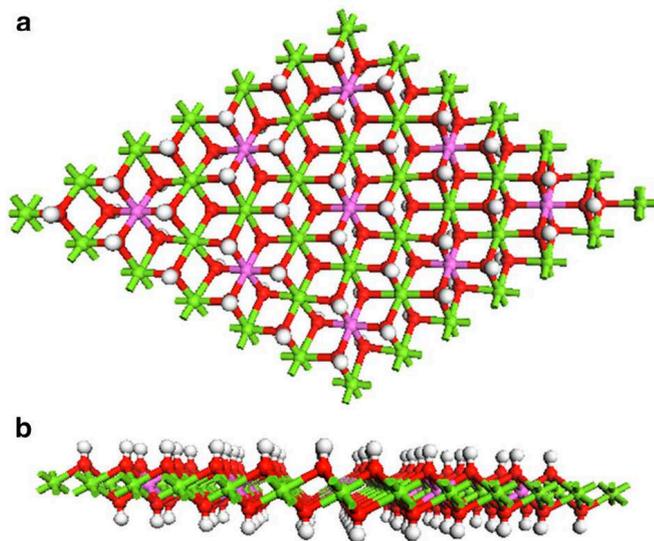


Figure 2. Structural diagram of magnesium-aluminum hydrotalcite [7]

图 2. 镁铝水滑石结构图[7]

2.2. 其他类水滑石

电解水是一种绿色制氢技术，涉及阳极的析氧反应(OER)和阴极的析氢反应(HER)。其中，析氧反应(OER)过程的动力学较为迟缓，限制了电解水的整体效率。虽然贵金属催化剂在电解水中表现出优异的催化性能，但其价格高昂且资源有限。因此，开发高效且低成本的催化剂成为关键，其中镍铁水滑石由于其优异的性能，受到了广泛关注[8]。通过两步水热法合成的镍铁水滑石，理论上能够满足电催化和光催化的性能需求。水滑石的特殊插层结构使得其阳离子(如镍和铁)的数量与比例、阴离子种类等可以在一定范围内调控，这种调节有助于提升其催化性能。为进一步优化性能，可以通过引入第三种金属元素来调节结构，造成晶体畸变并产生更多的活性位点。例如，引入电负性较弱的 Mn^{2+} 离子，可以有效调节水滑石中阳离子的电子结构， Mn^{2+} 对 Ni^{2+} 和 Fe^{3+} 有强还原作用，其电子转移促进了 Ni^{2+} 和 Fe^{3+} 形成适合质子化步骤的富电子结构，从而显著提高了水解性能。

3. 镁铝水滑石合成方法

镁铝水滑石可以通过多种方式合成，主要包括以下几类：共沉淀法、高温高压水热法、溶胶-凝胶技术、离子交换工艺、尿素分解法以及焙烧还原法。

3.1. 共沉淀法

共沉淀法是一种常用于合成含有两种或多种阳离子的复合氧化物超细粉体的方法。在该过程中，溶液中存在的阳离子经沉淀反应生成均一的沉淀，具有工艺简单、成本低、操作条件易于控制、合成周期短、煅烧温度低等优点。共沉淀法是镁铝水滑石合成中最常用的技术。具体操作步骤是在一定温度下，将含有金属离子的混合溶液加入碱性溶液中，促使水滑石层的共沉淀形成。所使用的碱可以是氨水、氢氧化钠、氢氧化钾等，碳酸盐则可以使用碳酸钾或碳酸钠等。金属盐通常采用硫酸盐、氯化物或硝酸盐，尿素也可用作碱和碳酸盐的替代品。操作流程如图3所示[9]。

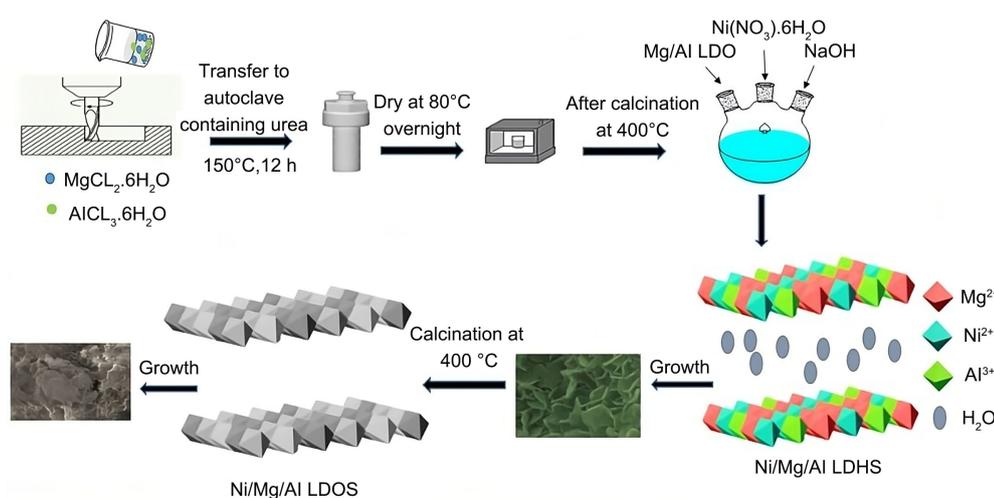


Figure 3. The operation process of coprecipitation method [9]

图3. 共沉淀法操作流程[9]

朱清[10]等研究了通过改变共沉淀法中的沉淀剂和晶化温度来优化镁铝水滑石的合成。张明浩[11]等采用 $MgSO_4$ 和 $Al_2(SO_4)_3$ 为原料，尿素 $CO(NH_2)_2$ 作为沉淀剂，通过增加尿素的用量，使水滑石的结晶度和层间距均有所增加。

根据过饱和度的不同,方法可分为低过饱和度法和高过饱和度法。两种方法的关键区别在于过饱和度的控制方式及其对沉淀动力学的直接影响。低过饱和度法通过缓慢滴加和搅拌,确保反应体系均匀性,利于形成结晶度高、颗粒均一的产物;而高过饱和度法利用快速混合引发瞬时高过饱和,促进快速成核,适合生成细小颗粒。这表明 pH 调控与过饱和度不仅决定沉淀过程的速率和均匀性,还深刻影响产物的微观结构与性能,为材料合成的精确设计提供了理论依据和工艺选择[12]。

3.2. 水热合成法

水热合成法是一种在高温 $100^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 、压力 $1\text{ MPa}\sim 1\text{ GPa}$ 条件下,通过高压釜利用水溶液使难溶或不溶的物质溶解并重结晶的方法。该方法通常在密闭容器内进行,利用高温和高压使溶剂膨胀并充满容器,从而产生极高的压力。为加速反应过程,常常在高压釜中加入各种矿物质。如图 4 所示,水热法通常使用氧化物或氢氧化物作为前驱物质,随着温度的升高,物质的溶解度增加,最终导致溶液过饱和并逐步形成更稳定的氧化物相[13]。



Figure 4. Hydrothermal operation process [13]

图 4. 水热操作流程[13]

相比于气相法和固相法,水热与溶剂热法的优点在于其低温、低压和溶剂条件。水热合成法有助于生长缺陷少且取向良好的晶体,所得产物具有较高的结晶度,晶体粒度容易控制。

谢晖[14]等人研究了通过改变水热反应的温度和时间,使用七水硫酸镁和十八水合硫酸铝合成水滑石。XRD 分析显示,在 120°C 至 160°C 之间的晶化温度,以及 6 至 10 小时的晶化时间,有助于获得结构完整的水滑石晶体。袁东[15]等则使用镁铝锌水合硝酸盐为原料,尿素作为沉淀剂,采用水热法合成锌镁铝水滑石。这种方法合成的水滑石表现出优异的耐高温性能,在 550°C 以下保持结构稳定,但温度进一步升高时会生成混合金属氧化物,并呈现微黄色。

3.3. 溶胶 - 凝胶法

溶胶 - 凝胶法是一种常用于合成金属氧化物材料的湿化学方法。其过程通过高化学活性的前驱体化合物与液相中的其他组分反应,会让前驱体首先溶解在溶剂中,形成低粘度的溶液,经过陈化后,溶胶粒子逐渐聚集并形成凝胶网络,凝胶内部充满了失去流动性的溶剂,再经过干燥和烧结处理,最终得到分子级或纳米级的结构材料,与其他合成方法相比,溶胶 - 凝胶法具有许多优点,特别是在形成均匀溶液和控制材料结构方面表现出色从而使得分子级均匀性易于达到。

Paredes [16]等人采用乙醇镁和乙酰丙酮镁作为镁源,乙酰丙酮铝作为铝源,使用溶胶 - 凝胶法合成水滑石。研究发现,水滑石的表面积和结晶度受乙酰丙酮前驱体的影响,且在合成过程中微波辐照时间

的长短决定了阴离子扩散的位置。Mora [17]等人利用溶胶-凝胶法制备了含有镁和三价金属(铝、镓或铟)的水滑石。证明了溶胶-凝胶法是合成含有各种三价阳离子的镁铝水滑石的有效工具。其合成最佳条件是在纯水中使用 $\text{pH} = 3$ 的氢氧化钠溶液作为水解介质(如图 5 所示)。通过高温时效处理,可进一步提高结晶度,与共沉淀法相比,溶胶-凝胶法在合成产量上表现出显著的提升。

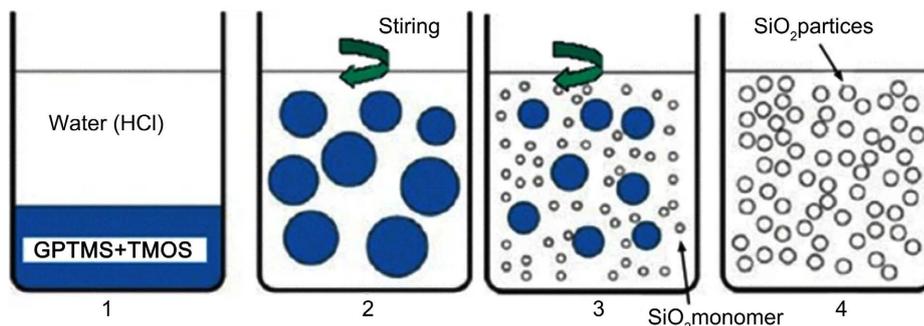
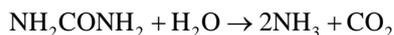


Figure 5. Flowchart of Sol Gel Operation [18]

图 5. 溶胶操作流程[18]

3.4. 尿素水解法

尿素水解法的原理主要基于尿素(化学式为 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)在加热条件下与水反应,释放出氨气(NH_3)和二氧化碳(CO_2)。尿素水解反应是吸热反应,该过程是尿素合成反应的逆过程。反应方程式可表示为:



这个过程可以看作是一种水解反应,即尿素分子中的氨基($-\text{NH}_2$)与水中的氢氧根($-\text{OH}$)结合,形成氨气,同时尿素分子中的羰基($\text{C}=\text{O}$)与水中的氢离子(H^+)结合,形成碳酸,进而分解为二氧化碳。在常温下,酸、碱或中性条件下尿素水解反应基本不进行,当温度 100°C 时才会明显加快,在高温反应条件下,反应速率很快[19]。通过尿素水解法制备的镁铝水滑石会发现它展现出了典型的层状结构,还能通过简单控制反应物浓度实现镁铝水滑石形貌及结构的改变,不同形貌镁铝水滑石的制备过程如图 6 所示。

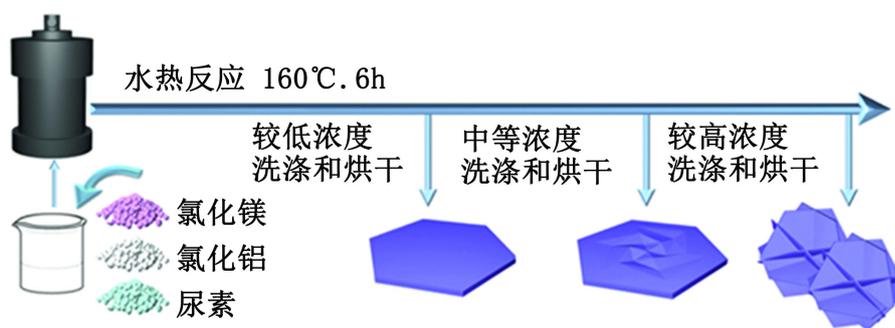


Figure 6. Preparation process diagram of magnesium aluminum hydroxide with different morphologies [20]

图 6. 不同形貌镁铝水滑石的制备过程示意图[20]

镁铝水滑石的性能优势(大比表面积、热稳定性)与其合成过程中晶体结构的精确调控密切相关,特别是尿素水解法结合 HMT 通过温度和 pH 协同作用,能显著提升晶体规整性和应用潜力[21]。这一规律揭示了合成工艺对材料微观结构与宏观性能的关键影响,为其在高温及功能材料领域的工业化应用奠定了理论基础。

3.5. 焙烧还原法

焙烧还原法以水滑石的“记忆效应”为基础。是一种通过热处理将被焙烧的水滑石即焙烧改性水滑石(calcined layered double hydroxides, CLDHs)置于含有某种阴离子的液体介质中,使其转化为目的阴离子插层水滑石的方法[22]。图7为CLDHs层状结构的重建过程。

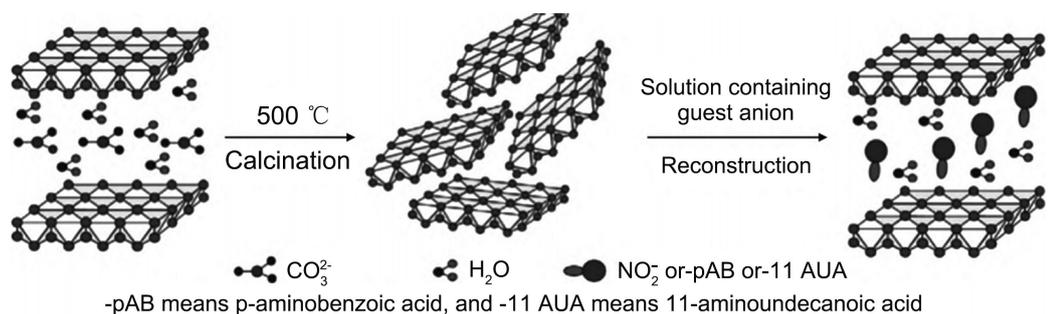


Figure 7. Structural reconstruction diagram of CLDHs [23]

图7. CLDHs 的结构重建示意图[23]

因此,这种方法能够较为方便地将焙烧前水滑石中的插层阴离子与其他阴离子进行交换,从而获得具有多种特性的水滑石。在水合重整过程中,阴离子的交换顺序一般为: $\text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{F}^- > \text{HPO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{B}(\text{OH})_4^- > \text{NO}_3^-$ [24]。水滑石由于具有较好的热稳定性,在高温条件下,其层柱结构可发生重建,阴离子便可进入水滑石的层间。随着温度逐渐降低并适当进行精华干燥,就能形成新的对应阴离子类型的水滑石。在阴离子插层的过程中,利用水滑石的记忆效应,经过高温煅烧后,其层状结构能恢复,这一特性减少了杂质的干扰,使得最终产品更为纯净且性能更好[25]。

4. 镁铝水滑石的应用

镁铝水滑石具有碱性、记忆效应、层间阴离子的可交换性等,是一类具有广阔应用前景的层柱状化合物。近年来,人们利用镁铝水滑石的结构特性,在催化化学反应和环境治理等领域中进行广泛应用如图8所示,并都取得很好的效果。

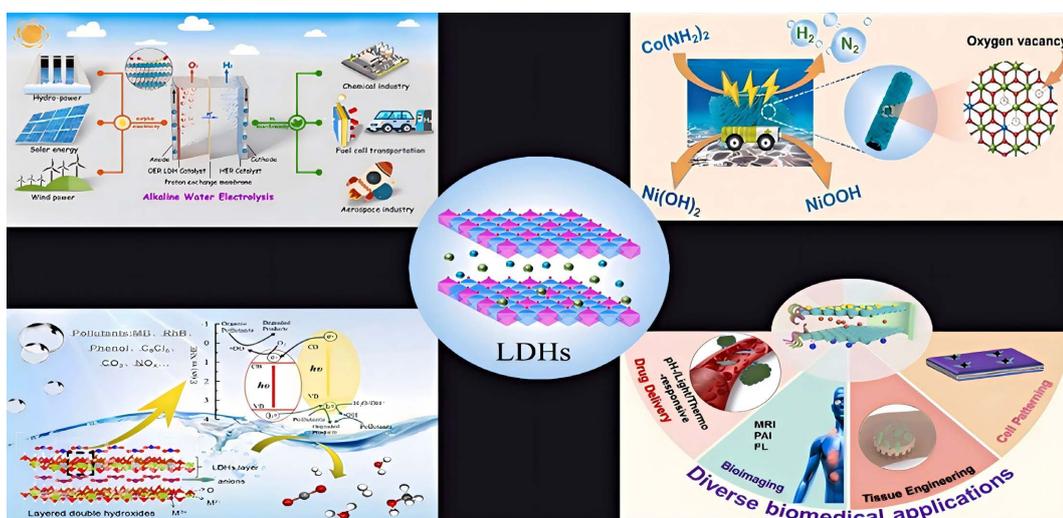


Figure 8. Application of hydrotalcite in different fields [26]

图8. 水滑石在不同领域中的应用[26]

4.1. 催化应用

在现代工业化学合成的快速发展背景下，催化剂已经成为了化学合成中不可或缺的一环。催化剂可加快或减慢化学中反应物的化学反应速率，甚至改变反应途径，使其在无机化学、有机化学、生物化学等方面被广泛应用，时至今日催化剂的种类已经多种多样，但在绿色环保的要求下，固体催化剂镁铝水滑石出现在大众眼中，其对多种反应的催化都有着环境友好性和可持续性的良好表现，且有开大前景大的未来优势，现已经在多种反应中被应用。

4.1.1. 光催化

镁铝水滑石作为一种新型光催化材料，近年来在环境治理和能源转换领域受到了广泛关注。其独特的层状结构和表面丰富的羟基团使其具备了优异的光催化性能。在光催化降解有机污染物方面，镁铝水滑石展现了显著的效能。当受到阳光或人工光源照射时，镁铝水滑石能够有效吸收光能并将其转化为化学能，激发其表面活性位点。这些活性位点能够高效地氧化并分解有机污染物，如染料、农药和油类等，将其转化为无害的二氧化碳和水。例如，在废水处理过程中，运用光催化氧化法不仅操作简便、效率高，而且经济性更好。镁铝水滑石负载 TiO_2 的光催化体系不仅依托基材的结构优势，还通过 TiO_2 的光响应特性实现高效抗生素降解。近年研究揭示，调控 TiO_2 的微观结构和表面缺陷是提升降解性能的关键，降解产物多为小分子有机物或无机物，毒性显著降低[27]-[29]。这一进展凸显了复合材料在光催化治理抗生素污染中的优越性，为开发高效、可持续的水处理技术提供了重要启示。

李旭[30]采用 TiO_2 和改性镁铝水滑石制备了 Mg-Al-LDO/TiO_2 复合光催化剂，用于甲基橙的光催化脱色反应。实验结果表明，镁铝水滑石的“记忆效应”使其吸附和光催化功能可以在光催化过程中同步发挥，从而显著提升脱色效率。图9展示了典型的光催化反应器。

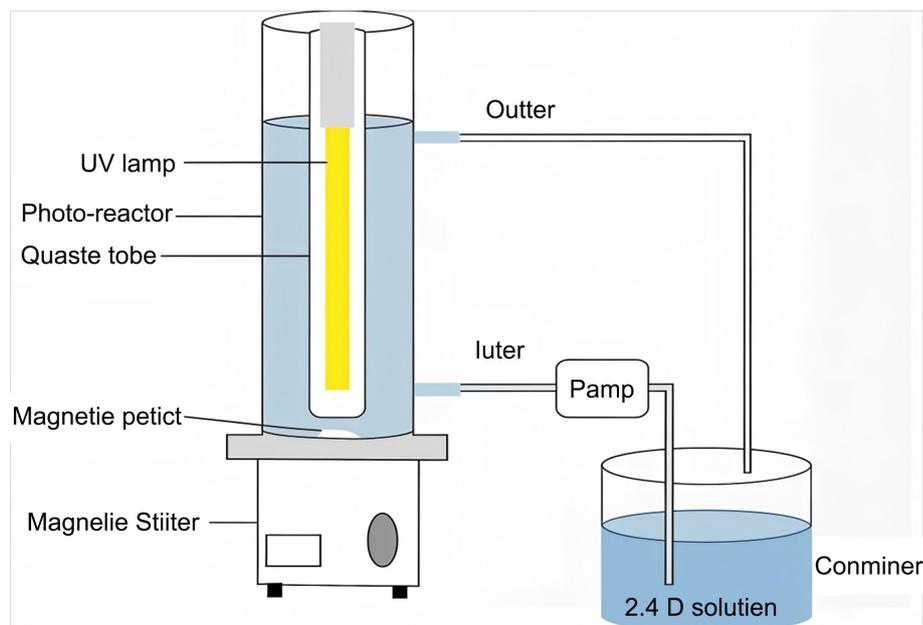


Figure 9. Photocatalytic reactor [31]

图9. 光催化反应器[31]

4.1.2. 电催化

镁铝水滑石凭借其独特的结构特点，主要通过层状结构和表面特性促进电化学反应的加速。在电催

化过程中, 镁铝水滑石能够作为电极材料, 通过电子传输加速反应的进程。其表面的活性位点能够吸附反应物分子, 并在电场的作用下促进反应速率的提升。与光催化体系相比, 电催化 CO_2 还原(CO_2ER)如图 10 所示, 近年来凭借其结构简洁、产物多样化以及催化性能优异等特点在该领域备受关注并成为研究热点。在环境治理领域, 镁铝水滑石在电解水制氢中展现了良好的电催化性能。电解水是利用外部电源提供电流, 使电流通过电解液, 促进水分子分解为氢气和氧气的氧化还原过程。

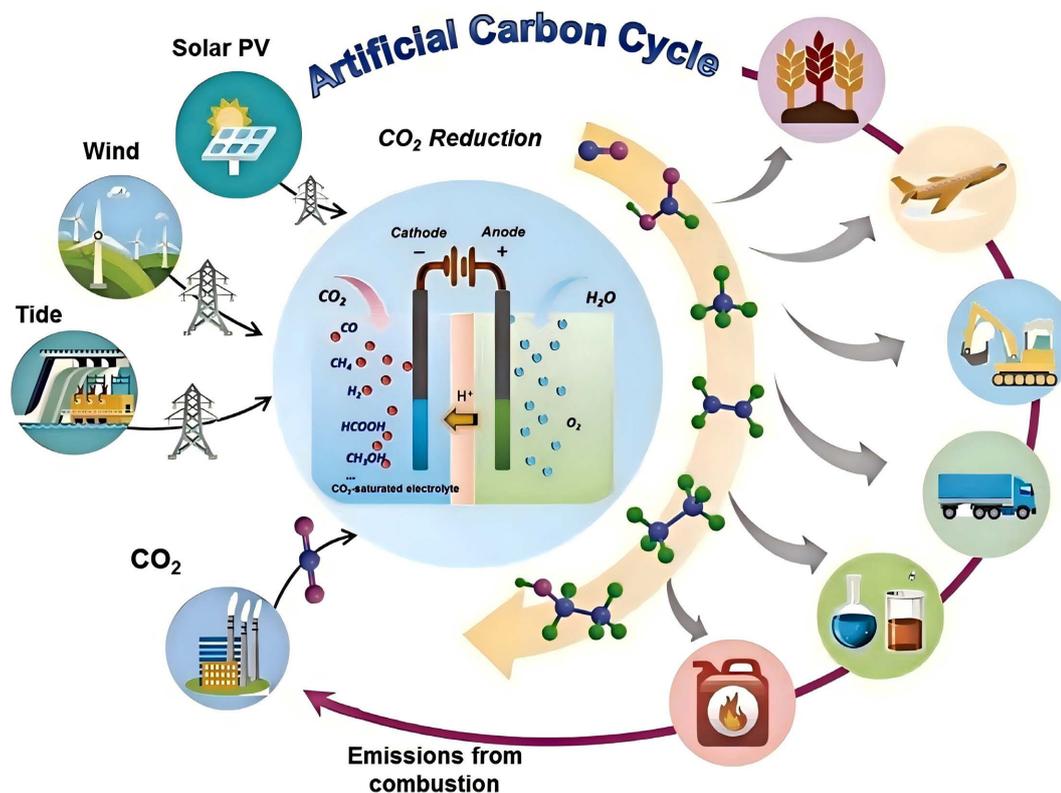


Figure 10. Carbon conversion diagram by CO_2ER [32]

图 10. 通过 CO_2ER 的碳转换图[32]

4.1.3. 催化 Aldol 缩合反应

羟醛缩合反应(Aldol 缩合)是通过具有 $\alpha\text{-H}$ 的醛或酮在酸碱性条件下发生亲核加成, 生成 β -羟基醛或酮, 进而脱水形成 α, β -不饱和醛或酮的重要反应[33]。由于传统液体催化剂存在分离困难、设备腐蚀等问题, 因此开发高效固体催化剂成为研究重点[34]。水滑石因其可调节组成、层状结构和酸碱性, 成为理想的催化材料, 显著提升了反应选择性和环保性, 其结构灵活性和高选择性为优化反应效果提供了重要途径, 推动了绿色化学合成的发展[35]。水滑石的酸碱性可以通过离子交换或高温脱羟基化来调控, 这一特性在酸碱催化的羟醛缩合反应中起着关键作用[36]。因此, 尤其是镁铝水滑石, 在此类反应中的应用十分广泛。Kikhtyanin [37]等研究了煅烧后重构镁铝水滑石固体碱催化剂在丙酮与糠醛羟醛缩合反应中的应用, 发现与 Mg/Al 氧化物相比, 重构后的镁铝水滑石催化剂显示出更高的活性。

4.2. 水资源净化

水是地球上最宝贵的资源之一, 对生态平衡、经济发展以及人类健康至关重要。然而, 随着工业化、城市化和人口增长, 水污染问题日益严重。农业活动, 尤其是过量使用化肥、农药以及畜禽养殖废弃物

的排放,是造成水污染的主要因素之一[38]。因此,修复被污染的水资源并实现水资源的循环利用成为当前亟待解决的课题。改性镁铝水滑石(尤其是铜掺杂)的吸附性能提升源于金属离子引入后表面化学性质的优化及结构稳定性的增强,这与吴国强研究结果一致[39]。近年研究进一步揭示,掺杂改性不仅提高初始吸附量,还通过强化材料的多孔性和离子交换能力,显著改善其在多次循环中的稳定性。这一进展表明,金属掺杂改性镁铝水滑石在处理抗生素废水中的应用潜力巨大,尤其在循环使用和成本效益方面具有工业化前景,为可持续水处理技术提供了重要参考。邓林[40]通过共沉淀法制备镁铝水滑石,研究其对水中铬和磷酸盐的吸附性能,发现初始浓度、反应时间等因素对吸附效果有显著影响,并且在吸附剂再生后,其对铬和磷酸盐的去除率仍具有较好的重复利用性。

4.3. 大气污染治理

随着社会的不断发展,各种工业气体排放不可避免,而排放气体对自然环境和人体有害,以及排放的温室气体所造成的全球气候变暖等问题不断出现。随着国家将污染防治提升为重点战略任务,社会对生态文明建设的重视程度日益提高,大气污染治理因此成为迫切需要解决的问题[41]。近些年来,随着人们的不断研究,镁铝水滑石作为一种新型环保材料进入大家的视野,因其具有良好的吸附性、层间离子可交换性和结构记忆效应等特性,被广泛应用于温室气体(CO_2 、 NO_x 等)、挥发性有害气体的处理[42]。XU XiangYu [43]等采用分离成核和老化步骤合成了 Ce/MgAl 水滑石前驱体,采用不同水滑石前驱体的老化时间来控制 Ce/MgAl 混合氧化物的孔隙结构。结果表明在 100°C 下, Ce/MgAl 水滑石前驱体的时效时间为 4~6 h,而 Ce/MgAl 混合氧化物具有最合理的孔隙结构,从而可以实现最大的 SO_x 吸收能力。

5. 结语

镁铝水滑石作为一种具有独特结构和功能的无机材料,在过去的几十年中,已经在催化、离子交换、药物传递和阻燃等领域展现出广泛的应用潜力。随着科技的进步和研究的深入,我们有理由相信,镁铝水滑石将在更多领域发挥其独特作用,并开启全新的应用篇章。随着先进合成方法的不断涌现,如共沉淀法、水热合成法、尿素水解法等,我们能够更加精确地控制其形貌、尺寸和化学组成,从而制备出具有特定功能的镁铝水滑石材料,通过插层、改性的方法能让镁铝水滑石有更强的适应性。镁铝水滑石通过与纳米技术和生物技术的深度融合,不仅性能显著优化(如催化效率和吸附选择性提升),还实现了从单一功能向多功能应用的转变,成为环境治理中的高效工具。研究预测,到 2030 年,镁铝水滑石及其复合材料在工业废水处理市场的应用规模可能增长 50% 以上,其在重金属和有机污染物处理中的独特优势,与全球环保政策趋严及公众意识觉醒形成共振,推动其应用前景加速扩展。近年研究进一步揭示,跨学科融合是释放镁铝水滑石潜力的关键路径,为其在可持续环境技术领域的工业化应用提供了坚实科学依据和广阔市场前景。

基金项目

2024 年国家级大学生创新创业训练计划(202413287005)。

2024 年国家级大学生创新创业训练计划(202413287020)。

参考文献

- [1] 路绍琰,田欣霞,骆碧君,等.水滑石的改性研究概况及发展趋势[J].盐科学与化工,2023,52(7):13-17.
- [2] 宋国君,孙良栋,李培耀,等.水滑石的合成、改性及其在功能复合材料中的应用[J].材料导报,2008,22(1):53-57.
- [3] Hameed, A., Batool, M., Liu, Z., Nadeem, M.A. and Jin, R. (2022) Layered Double Hydroxide-Derived Nanomaterials

- for Efficient Electrocatalytic Water Splitting: Recent Progress and Future Perspective. *ACS Energy Letters*, **7**, 3311-3328. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.2c01362>
- [4] Wu, Y., Liu, X., Lei, Y., Qiu, Y., Wang, M. and Wang, H. (2017) Synthesis and Characterization of 12-Tungstophosphoric Acid Intercalated Layered Double Hydroxides and Their Application as Esterification Catalysts for Deacidification of Crude Oil. *Applied Clay Science*, **150**, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.09.007>
- [5] Smoláková, L., Frolich, K., Kocík, J., Kikhtyanin, O. and Čapek, L. (2017) Surface Properties of Hydrotalcite-Based Zn(Mg)Al Oxides and Their Catalytic Activity in Aldol Condensation of Furfural with Acetone. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **56**, 4638-4648. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04927>
- [6] 黄洁莹, 乔建江. 硼砂改性镁铝水滑石的制备及阻燃应用[J]. 塑料工业, 2022, 50(12): 133-139.
- [7] 张客厅. 插层水滑石的合成及其在催化转化领域的应用[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [8] 杨杨. 镍铁水滑石/碳复合材料的制备及其电催化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [9] Yang, Z., Ren, X., Zhang, H., Su, D. and Rong, Z. (2024) CuMgAl Catalyzed Dimethyl 1, 4-Cyclohexane Dicarboxylate to 1, 4-Cyclohexane Dimethanol under Relatively Mild Conditions. *Catalysis Letters*, **154**, 4502-4510. <https://doi.org/10.1007/s10562-024-04632-y>
- [10] 朱清, 李成胜, 周建成. 镁铝水滑石的共沉淀法制备及表征[J]. 化工时刊, 2017, 31(4): 1-3, 17.
- [11] 张明浩, 胡盛, 胡卫兵. 反应条件对镁铝水滑石制备和吸附性能的影响[J]. 非金属矿, 2019, 42(5): 87-90.
- [12] 李志新. 铝镍钴类水滑石催化合成异佛尔酮[D]: [硕士学位论文]. 齐齐哈尔: 齐齐哈尔大学, 2013.
- [13] Zhang, J., Hou, A., Li, J., Lian, D., Zhang, M. and Wang, Z. (2022) Enhanced Corrosion and Wear Resistance of LA43M Magnesium-Lithium Alloy with Magnesium-Aluminum Layered Double Hydroxide Coating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **32**, 3550-3562. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07361-8>
- [14] 谢晖, 矫庆泽, 段雪. 镁铝型水滑石水热合成[J]. 应用化学, 2001, 18(1): 70-72.
- [15] 袁东, 周良芹. 锌镁铝类水滑石的制备与表征研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(3): 748-752, 757.
- [16] Paredes, S.P., Fetter, G., Bosch, P. and Bulbulian, S. (2006) Sol-Gel Synthesis of Hydrotalcite-Like Compounds. *Journal of Materials Science*, **41**, 3377-3382. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5347-4>
- [17] Mora, M., López, M.I., Jiménez-Sanchidrián, C. and Ruiz, J.R. (2010) MIR and NIR Spectroscopy of Sol-Gel Hydrotalcites with Various Trivalent Cations. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **55**, 59-65. <https://doi.org/10.1007/s10971-010-2213-x>
- [18] Amiri, S. and Rahimi, A. (2016) Hybrid Nanocomposite Coating by Sol-Gel Method: A Review. *Iranian Polymer Journal*, **25**, 559-577. <https://doi.org/10.1007/s13726-016-0440-x>
- [19] 汪港, 范展华, 邹煦, 等. 尿素水热生长法合成不同形貌镁铝水滑石及其对活性红染料的吸附性能[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 17-23.
- [20] 祝春蕾, 王海林, 孙春宝. 脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 2010-2017.
- [21] 李美娜. 原位镁铝水滑石的制备及其催化废水中尿素水解的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [22] 张琳. 镁铝水滑石的制备及其焙烧产物在水泥净浆中固化氯离子性能研究[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2019.
- [23] Yang, Z., Fischer, H., Cerezo, J., Mol, J.M.C. and Polder, R. (2015) Modified Hydrotalcites for Improved Corrosion Protection of Reinforcing Steel in Concrete—Preparation, Characterization, and Assessment in Alkaline Chloride Solution. *Materials and Corrosion*, **67**, 721-738. <https://doi.org/10.1002/maco.201508618>
- [24] 杜小旺. 水镁石基镁铝水滑石合成研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [25] 刘齐鲁. 水滑石的制备和应用综述[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2017(2): 9-11.
- [26] Cai, Z., Bu, X., Wang, P., Ho, J.C., Yang, J. and Wang, X. (2019) Recent Advances in Layered Double Hydroxide Electrocatalysts for the Oxygen Evolution Reaction. *Journal of Materials Chemistry A*, **7**, 5069-5089. <https://doi.org/10.1039/c8ta11273h>
- [27] 扈彬, 刘温霞, 张洁. 催化技术及前景分析[J]. 华东纸业, 2014, 45(3): 42-45.
- [28] Sun, J., Fan, H., Nan, B. and Ai, S. (2014) Fe₃O₄@LDH@Ag/Ag₃PO₄ Submicrosphere as a Magnetically Separable Visible-Light Photocatalyst. *Separation and Purification Technology*, **130**, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.04.007>
- [29] He, W., Wang, R., Zhang, L., Zhu, J., Xiang, X. and Li, F. (2015) Enhanced Photoelectrochemical Water Oxidation on

- a BiVO₄ Photoanode Modified with Multi-Functional Layered Double Hydroxide Nanowalls. *Journal of Materials Chemistry A*, **3**, 17977-17982. <https://doi.org/10.1039/c5ta04105h>
- [30] 李旭. 水滑石类层状化合物的制备、微分析及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北大学, 2015.
- [31] 刘永红, 王全红, 王宁, 等. TiO₂/ACF 光催化反应器在多种染料废水中的脱色应用[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(5): 1-6.
- [32] Han, N., Ding, P., He, L., Li, Y. and Li, Y. (2019) Promises of Main Group Metal-Based Nanostructured Materials for Electrochemical CO₂ Reduction to Formate. *Advanced Energy Materials*, **10**, Article ID: 1902338. <https://doi.org/10.1002/aenm.201902338>
- [33] 徐书群, 叶利民. 醛/酮羟醛缩合反应效率提升方法探讨[J]. 山东化工, 2021, 50(4): 169-170.
- [34] 邱俊, 周晶. 新型改性分子筛FSM-16催化对硝基苯甲醛与丙酮的Aldol缩合反应[J]. 化学试剂, 2016, 38(7): 621-624.
- [35] 何沁阳, 张越, 赵铭鑫, 等. 重构水滑石催化丙酮与苯甲醛的羟醛反应[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(4): 73-78.
- [36] 吴丽丽, 安华良, 梁宁, 等. 羟醛缩合反应中酸碱双功能催化剂的研究进展[J]. 化学通报, 2014, 77(2): 109-114.
- [37] Kikhtyanin, O., Tišler, Z., Velvarská, R. and Kubička, D. (2017) Reconstructed Mg-Al Hydrotalcites Prepared by Using Different Rehydration and Drying Time: Physico-Chemical Properties and Catalytic Performance in Aldol Condensation. *Applied Catalysis A: General*, **536**, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2017.02.020>
- [38] 纪月红. 水污染分析及水环境保护措施探究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(3): 36-38.
- [39] 吴国强. 改性水滑石的制备及其对盐酸四环素的吸附研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [40] 邓林. 镁铝水滑石基复合材料吸附去除水中铬(VI)、磷酸盐的研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [41] 张启彦. TiO₂-GO/LDHs 复合材料光催化降解 VOCs 的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [42] 张骄佼, 田森林, 周键. 镁铝水滑石的合成与应用研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(7): 144-148.
- [43] Xu, X., Jiang, L., Lü, Z., Song, J. and Li, Z. (2012) Influence of the Pore Structure of Ce/MgAl Hydrotalcite-Derived Mixed Oxides on Its SO_x Pick-Up Capacity. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 1670-1674. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5552-x>