

分子筛介孔化技术研究进展

柳林^{1,2,3}, 王洪亮^{1,2,3}, 胡宏杰^{1,2,3}, 许昕^{1,2,3}, 张然^{1,2,3}, 赵毅^{1,2,3}, 宋广毅^{1,2,3*}

1. 中国地质调查局郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
2. 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 河南 郑州 450006;
3. 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 河南 郑州 450006)

摘要: 分子筛介孔化技术是通过在分子筛中引入孔径 2~50 nm 的介孔结构, 构建微孔-介孔多级孔体系, 以改善传质性能、提升反应效率的关键改性手段。系统综述了分子筛介孔化的主要技术方法, 包括后处理法、模板法以及晶体工程法, 分析了各类方法的优势、局限及其对分子筛酸性、结构稳定性的影响。当前该技术仍面临孔结构精确调控困难、酸性易受影响、工艺成本较高及规模化制备受限等挑战, 未来应致力于发展绿色、低成本的介孔化新工艺, 推动介孔分子筛在能源化工与环境催化等领域的应用突破。

关键词: 分子筛; 介孔化技术; 后处理法; 模板法; 晶体工程法

中图分类号: TQ426

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0082-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.015

Research advances in mesoporous technology of molecular sieves

LIU Lin^{1,2,3}, WANG Hong-liang^{1,2,3}, HU Hong-jie^{1,2,3}, XU Xin^{1,2,3}, ZHANG Ran^{1,2,3},
ZHAO Yi^{1,2,3}, SONG Guang-yi^{1,2,3*}

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, China Geological Survey, Zhengzhou 450006, China;
2. China National Engineering Research Center for Utilization of Non-Metallic Mineral Resources, Zhengzhou 450006, China;
3. Key Laboratory of Evaluation and Multipurpose Utilization of Polymetallic Ore of Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Mesoporous zeolite technology refers to a key modification approach that introduces mesopores (2–50 nm in diameter) into zeolites to construct a hierarchical microporous-mesoporous structure, thereby improving mass transfer properties and enhancing reaction efficiency. This review systematically summarizes the main techniques for creating mesoporous zeolites, including post-treatment methods, template-assisted synthesis, and crystal engineering approaches. It analyzes the advantages and limitations of each method, as well as their effects on the acidity and structural stability of zeolites. At present, this technology still faces challenges such as difficulty in precisely controlling pore architecture, susceptibility to acidity loss, high processing costs, and limitations in scalable production. Future efforts should focus on developing green and low-cost mesopore-forming processes to promote breakthroughs in the application of mesoporous zeolites in fields such as energy chemistry and environmental catalysis.

Key words: molecular sieve; mesoporous modification technology; post-treatment method; template method; crystal engineering method

分子筛是一类具有规则多孔结构的水合硅铝酸盐无机材料, 其孔道尺寸通常位于亚纳米尺度, 以其规则的孔结构、较高的比表面积以及可调控的酸性特征实现对分子尺寸和特定性质分子的精确筛分, 在石油化工、精细化工、环境治理和能源转化等领域得到广泛应用, 已成为现代分离与催化技术中不可或缺的关键材料。

然而, 随着化工原料逐渐向重质化和复杂化方向发展, 传统仅含微孔结构的分子筛在实际应用中逐渐暴露出传质受限等问题。微孔孔径通常小于

2 nm, 当反应物分子尺寸较大或反应过程涉及多步转化时, 分子在微孔内的扩散受到严重限制, 导致反应速率降低、选择性下降以及积炭加剧等问题。此外, 扩散受限还会加速活性位点失活, 缩短分子筛使用寿命, 这些问题成为制约分子筛进一步高效应用的重要瓶颈。

为克服传统微孔分子筛在传质方面的不足, 研究人员通过在分子筛中引入介孔结构, 实现多级孔道协同作用, 即分子筛介孔化^[1]。所谓介孔化, 是指在保持分子筛骨架完整性的前提下, 在其内部或

收稿日期: 2026-02-28; 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2904802)

作者简介: 柳林(1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为功能性矿物材料制备, sunnyllin@163.com; 宋广毅(1986-), 男, 专科, 工程师, 研究方向为分子筛产品研发, 通讯联系人, SGY0723@163.com。

表面构筑孔径介于2~50 nm的介孔结构,从而形成微孔-介孔复合或多级孔分子筛体系,通过介孔与微孔的协同作用,在保持微孔择形性的同时,介孔结构的引入为反应物和产物分子提供了额外的扩散通道,从而在一定程度上降低了大分子在微孔体系中的扩散阻力,提高了反应物分子对活性位点的可达性,从而提高反应效率和催化活性^[2-4]。同时,介孔的存在有助于缓解反应过程中积炭在孔道内的沉积,增强催化剂的抗失活能力和循环稳定性^[5-8],不同孔结构层级的典型特征及其在分子筛中的功能作用见表1。

表1 不同孔结构层级的典型特征及其在分子筛中的功能作用

孔结构类型	孔径范围/ nm	主要结构特征	传质特性	主要功能
微孔	<2	规则晶态孔道	构型扩散受限	提供择形性与活性位点
介孔	2~50	非规则或半有序	快速扩散	缓解扩散限制、连接微孔
大孔	>50	开放孔结构	类体相扩散	分子快速运输与集散

介孔化技术不仅拓展了分子筛结构调控的自由度,也为实现“结构-性能”协同优化提供了新的研究思路,通过合理调控分子筛孔径的尺寸、分布及其与活性位点之间的联系,可以在一定程度上实现对扩散行为、酸性分布以及反应路径的精细调控,使分子筛在复杂反应体系中表现出更加优异和稳定的性能^[9]。

1 介孔结构对分子扩散行为的影响机理

在分子筛作用体系中,扩散过程通常包括外扩散和内扩散两个阶段,其中内扩散主要发生在分子筛孔道内部,是影响整体反应速率的关键因素之一^[10]。对于仅含微孔的分子筛材料,反应物分子在狭窄孔道中迁移时,往往受到构型限制,其扩散行为可近似描述为构型扩散或Knudsen扩散。当反应物分子尺寸接近甚至大于微孔孔径时,扩散阻力显著增大,易导致传质受限。介孔结构的引入可以有效改变这一扩散模式。一方面,介孔孔径远大于分子尺寸,使分子在其中的迁移更接近体相扩散,从而显著提高扩散速率;另一方面,介孔可作为连接外表与微孔活性位点的中转通道,缩短分子进入微

孔的有效扩散路径。这种“由介孔导入微孔”的扩散方式,有助于提高反应物对微孔内部活性位点的可达性^[11]。

介孔并非简单地替代微孔,而是与微孔共同构成多级孔网络^[12-13],介孔与微孔之间应具有良好的连通性,其中,微孔主要提供催化活性位点和择形性,而介孔则充当分子传输的“高速通道”,有助于缓解扩散限制,使分子能够在不同孔道尺度之间顺畅切换。因此,介孔结构的有效性不仅取决于其存在与否,更取决于其空间构型及与微孔体系的协同程度,这种多尺度孔道之间的功能分工,是介孔分子筛性能提升的结构基础,传统微孔分子筛与介孔分子筛中分子扩散行为对比见图1。

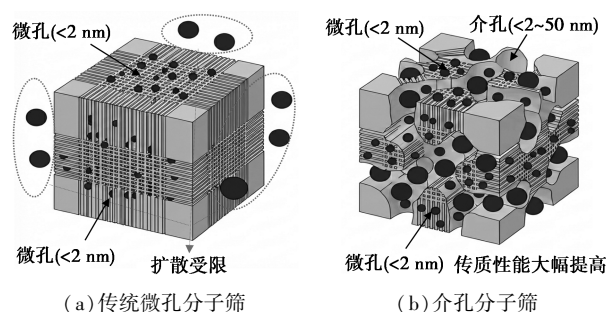


图1 传统微孔分子筛与介孔分子筛中分子扩散行为对比

2 分子筛介孔化的主要技术路线

分子筛介孔化技术主要包括后处理法、模版法、原位合成法以及若干新兴调控法等,这些方法各具特点,在构筑分子筛介孔结构、改善传质性能等方面取得了一定进展。

2.1 后处理法

后处理法是分子筛介孔化研究中最先提出、也是目前应用最为广泛的一类技术方法。该方法以已合成的分子筛为起始材料,通过化学刻蚀或热处理等方式,在原有微孔骨架中引入介孔结构,从而构建微-介孔层级孔结构,主要分为脱硅法、脱铝法、协同刻蚀法等。

2.1.1 脱硅法

脱硅法又称碱处理法,是后处理法中最具代表性的方法之一,其基本原理是在碱性条件下,由于分子筛中硅和铝原子在骨架中的化学稳定性存在差异,合理控制碱性条件可实现对硅的选择性刻蚀,使分子筛骨架中的硅原子优先被溶出,脱硅主要发生在晶体内部或缺陷富集区域,从而形成尺寸分布较为均一的介孔,同时微孔骨架得以较好保留。该方

法在中等硅铝比的分子筛体系介孔化中尤为有效,例如 ZSM-5、Beta 和 Y 型分子筛^[14-16]。

然而,脱硅法的效果高度依赖于处理条件的精细调控。当溶液碱浓度过高或处理时间过长时,脱硅过程可能失去选择性,导致晶体骨架严重破坏,甚至出现局部塌陷现象。此外,过度脱硅还可能引起硅铝比显著变化,从而影响分子筛的酸性分布。因此,在实际应用中,碱处理法通常需要结合缓冲剂或有机阳离子进行调控,以提高介孔形成的可控性。

2.1.2 脱铝法

脱铝法是指通过酸处理或高温水蒸汽处理,可促使铝原子迁移或脱除,选择性去除分子筛骨架或非骨架中的铝原子,从而在晶体内部形成缺陷位点,从而诱导介孔生成。

其中,酸处理过程通常采用无机酸或有机酸作为刻蚀剂,其优势在于操作条件相对温和,且对部分高硅分子筛具有较好的适用性。然而,酸处理往往伴随着 Brønsted 酸位点数量的减少,若脱铝程度过高,可能导致催化活性下降。水蒸汽处理法是利用高温水蒸气促使分子筛骨架铝发生迁移并形成非骨架铝,同时在晶体中引入一定程度的介孔结构。相较于液相刻蚀,水蒸汽处理法对分子筛晶体整体形

貌影响较小,且更接近实际工业条件,但是其介孔结构的尺寸和分布通常较难精确控制。

2.1.3 协同法

酸碱协同处理法可以克服单一刻蚀方式的局限性,该方法通常通过先脱铝、后脱硅,或采用酸碱交替处理的方式,在分子筛中构筑更加均匀且连通性良好的介孔网络。

酸碱协同处理的优势在于能够在一定程度上平衡孔结构调控与酸性保持之间的矛盾。例如,适度的预脱铝可削弱局部骨架稳定性,使后续脱硅过程更加温和可控,从而避免晶体整体破坏。此外,该方法还可改善介孔与微孔之间的连通性,有利于形成更高效的多级孔体系。

后处理法原理见图 2,不同后处理法特点对比见表 2。

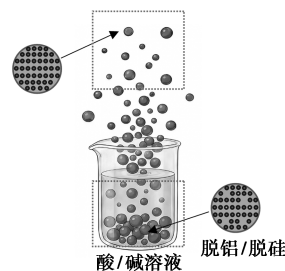


图 2 后处理法

表 2 不同后处理法特点

方法	工艺	主要作用原子	介孔形成特征	对酸性的影响	结构稳定性	主要优缺点
脱硅法	碱处理	Si	内部介孔、连通性好	Si/Al 变化	中等	可控性高,但易过刻蚀
脱铝法	酸处理	Al	表面/缺陷介孔	Brønsted 酸下降	较好	条件温和,但活性易损
	高温蒸汽处理	Al	非均匀介孔	生成 Lewis 酸	较好	工业友好,但难精准调控
协同法	酸碱交替处理	Si+Al	介孔均匀	可调	较好	工艺复杂,成本较高

后处理法成熟、适用范围广,且可直接对现有分子筛成品进行改性,在分子筛介孔化中具有不可替代的地位。然而,该方法本质上属于“破坏—重构”过程,不可避免地会对分子筛骨架、酸性分布及结构稳定性产生影响。因此,如何在分子筛后处理介孔化过程中实现对刻蚀程度的精准控制,并在结构完整性与传质性能提升之间取得合理平衡,仍是该类方法进一步发展的研究关键。

2.2 模版法

与后处理法通过刻蚀已有分子筛骨架不同,模版法是指在分子筛晶化过程中,引入具有特定空间尺度和自组装行为的有机或无机模版剂,通过空间占位、协同自组装或结构导向作用,在分子筛骨架形成的同时构筑介孔结构,最终经模版去除获得介孔

分子筛的方法^[17]。该类方法通常能够在较大程度上保持分子筛骨架的完整性,因此在调控介孔结构的同时,对微孔结构和酸性特征的破坏相对较小。根据模版在合成过程中所起作用方式的不同,模版法通常可分为硬模版法、软模版法和双模版法^[18]。

2.2.1 硬模版法

硬模版法是利用具有固定尺寸和形貌的固体材料作为空间占位剂,分子筛前驱物在模版表面或模版间隙中发生结晶生长,形成包覆或嵌入式结构。随后通过高温焙烧或化学刻蚀去除模版,即可在分子筛晶体中复制出与模版尺寸相对应的介孔结构。常用的硬模版包括碳材料、聚苯乙烯、二氧化硅球、纤维素、生物质模版等可去除的固体颗粒。这类模

版在合成体系中通常不发生形貌变化,其尺寸和分布在很大程度上决定了最终介孔结构的特性,硬模版法原理见图 3。

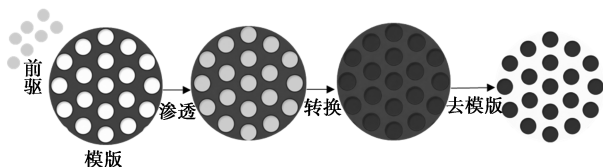


图 3 硬模版法原理

硬模版法由于模版尺寸可事先精确控制,能够构筑孔径分布较窄、形貌较为规则的介孔结构,有利于建立明确的结构-性能关系,在介孔孔径调控方面具有显著优势。但是该方法通常涉及多步合成过程,操作相对复杂,且模版去除过程需要增加额外成本,模版废料会造成环境负担。因此,硬模版法更多用于分子筛结构模型研究或特定高附加值分子筛材料的制备。

2.2.2 软模版法

软模版法是利用表面活性剂、有机胺或嵌段共聚物等有机分子作为结构导向剂,在合成体系中通过自组装形成胶束或有序聚集体,其尺寸和形貌可通过分子结构及溶液条件进行调控。当分子筛前驱物在其周围发生水解和缩聚反应时,胶束作为动态模版嵌入晶体生长体系中,与分子筛前驱物发生协同晶化,随后通过焙烧或溶剂萃取等方式去除有机模版,即可在分子筛中形成相应的介孔结构^[19]。常用的软模版法结构导向剂有 CTAB、P123、F127、SDA 等,软模版法原理见图 4。

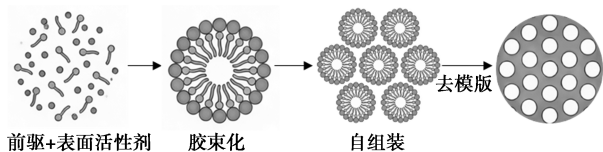


图 4 软模版法原理

软模版法的突出优势在于介孔形成过程相对温和,有助于维持分子筛晶体骨架的完整性和微孔结构的有序性。

2.2.3 双模版法

双模版法是将硬模版法和软模版法相结合,在同一介孔分子筛合成体系中,同时引入微孔结构导向剂与介孔模版,其中微孔结构导向剂决定分子筛晶型,而介孔模版调控孔道尺度,从而实现微孔与介孔的独立可控,两者协同作用构建层级孔结构。双模版法的分子筛结构设计自由度高,层级孔结构清

晰,但是生产成本较高,合成条件复杂,目前主要集中于实验室研究阶段,工业放大受限,双模版法原理见图 5。

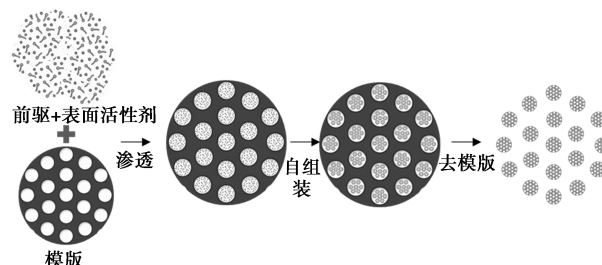


图 5 双模版法原理

此外,随着绿色可持续理念不断深化,新型模版如生物模版^[20]、可降解模版等不断开始应用^[21]。生物分子、天然高分子或其衍生物可作为临时结构导向剂^[22],在介孔分子筛合成或后处理过程中诱导介孔结构形成^[23]。这类模版通常具有来源广泛、可降解性好等优点,有助于降低介孔化过程中的环境风险。然而,由于生物模版的结构复杂性和稳定性有限,其在高温合成条件下的适用性仍存在一定挑战^[24]。

与后处理法相比,模版法在介孔形成过程中对骨架原子的破坏程度较低,分子筛骨架完整性高,构筑的介孔通常与分子筛微孔体系具有较好的空间协同关系,有助于保持微孔的结晶度和拓扑结构。这一特征使得模版法制备的介孔分子筛在择形性和酸性稳定性方面通常表现较好,在长周期反应中往往表现出更优异的稳定性。但是,模版法引入的介孔结构仍可能改变局部酸性分布,且模版残留或去除不完全可能对材料性能产生不利影响。因此,在实际介孔化设计中,需要综合考虑模版类型、合成条件及后处理工艺,以实现介孔结构与催化性能的协同优化。

2.3 晶体工程法

晶体工程法是近年来分子筛介孔化研究中逐渐兴起的一类方法,其核心思想是在分子筛结晶生长过程中同步引入介孔结构,实现微孔骨架与介孔体系的一体化构筑。与后处理法和模版法相比,该方法不再依赖于对既有晶体的刻蚀或模版去除,而是通过对成核、生长及晶体形貌演化过程的精细调控,在合成阶段直接获得具有多级孔结构的分子筛材料。这种介孔化方法在一定程度上避免了骨架破坏和酸性流失等问题,被认为是实现高性能介孔分子筛的重要发展方向,主要分为晶种诱导法和限域

生长法。

2.3.1 晶种诱导法

晶种诱导法通常引入适量对分子筛成核行为和晶体生长方式具有重要影响的晶种,通过控制晶种的尺寸、数量和分布,显著降低成核能垒,调控晶体的生长速率和形貌演化路径,当晶体生长受到空间或动力学限制时,往往会在晶体内部或晶界区域形成介孔结构。但是晶种诱导介孔化往往伴随着晶体尺寸的减小,其介孔结构在一定程度上来源于晶体间的堆积孔隙。因此,如何区分“晶间孔”与“真正的晶内介孔”,并实现对孔结构的精确表征和调控,是该方法研究中的一个关键问题,晶种诱导法原理见图 6。

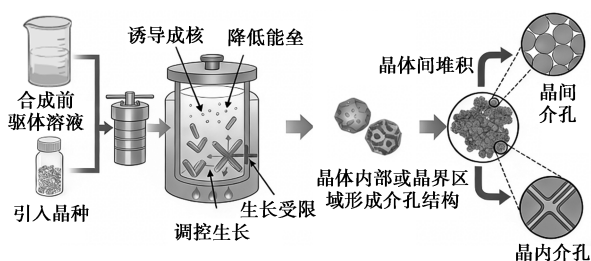


图 6 晶种诱导法原理

2.3.2 限域生长法

限域生长法是指通过在分子筛晶化过程中引入空间限制条件,使分子筛晶体在受限空间内生长,从而抑制其沿特定方向的过度扩展,诱导形成具有介孔特征或层级孔结构的分子筛材料。

与模版法不同,限域生长法并不依赖于明确的空间占位模版,而是通过对生长环境的调控,实现介孔的“自发形成”,受限空间可以由有机结构导向剂、凝胶网络或其他临时性空间约束因素提供。该方法既能够保持较高的骨架完整性,又可在不引入复杂模版去除步骤的情况下构筑介孔结构。然而,由于限域效应往往较为间接,其介孔尺寸和分布的可控性仍有待进一步提升,限域生长法原理见图 7。

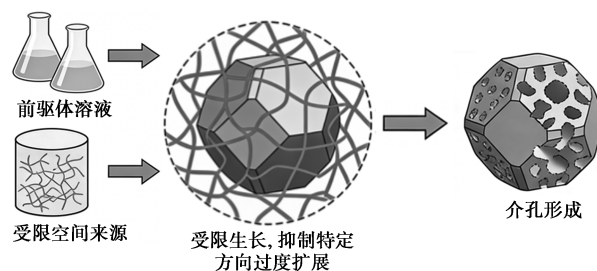


图 7 限域生长法原理

3 介孔分子筛的应用

介孔分子筛通过在保持微孔择形性和酸性特征的同时显著改善传质性能,在多种催化反应体系、吸附与分离领域展现出优于传统分子筛的综合性能。尤其是在涉及大分子反应物、多步反应路径或易积炭反应体系中,介孔结构的引入提供了新的解决方案和技术支撑,其主要应用领域及优势见表 3。

表 3 介孔分子筛主要应用领域及优势

应用领域	核心机制与结构优势	关键性能提升
重油加工与大分子催化裂化	缩短大分子扩散路径,积炭优先沉积于介孔区域,保护微孔活性中心。	提高重质原料转化效率与轻质油收率,延缓催化剂失活,延长运行周期。
烯烃转化与芳构化	改善中间产物的扩散迁移能力,避免其在孔道内停留过久而发生副反应。	抑制深度裂化和过度缩合,提高目标产物选择性,需平衡传质增益与择形性。
生物质转化	介孔适应生物质大分子的扩散,降低焦炭前驱体的生成倾向。	提高生物油升级反应中的转化率,增强催化剂在含氧氛围中的运行稳定性。
环境催化	增强高空速下反应物向活性中心的运输效率,介孔可作为活性组分的负载空间。	提升整体催化反应效率,利于构建多功能协同催化体系。
吸附材料	增大孔体积和外比表面积,缩短分子进入微孔的路径。	显著提高吸附容量;加快吸附速率,改善吸附动力学性能。
气体分离与储存	降低扩散阻力,使气体分子快速进出微孔,改善孔道连通性。	提升分离效率与装置处理能力;增加对较大或极性分子的储存容量。
液相吸附与分子分离	介孔使溶质大分子更易扩散至分子筛内部,提供功能化修饰的载体空间。	缩短吸附平衡时间;在精细化工和制药等领域实现精准分离。

4 结语

(1) 分子筛介孔化仍面临诸多挑战。在结构调控方面,多数方法难以在引入介孔的同时完全保持

微孔骨架的结晶度与机械强度,孔结构的精确可控性与骨架完整性之间存在矛盾。在酸性调控方面,介孔化过程常伴随脱硅、脱铝等原子迁移,导致 Brønsted 酸与 Lewis 酸比例与分布发生改变,影响催

化反应的择形性与活性稳定性。在制备工艺方面,部分方法过程复杂、成本较高,且重复性、放大性不足,制约了其工业应用前景。在机理认识方面,介孔尺寸、分布、连通性及其与微孔、酸性位点的协同机制尚未完全明晰,缺乏统一的结构-性能设计准则与预测模型。

(2)为推动分子筛介孔化技术的进一步发展及实用化,未来应着重在以下方面深入探索:一是发展绿色、低成本的介孔化新工艺,如开发生物模版、气相刻蚀、低毒溶剂体系等,以降低能耗与环境负担;二是实现多尺度孔结构的精准调控,结合计算模拟与先进表征,协同设计介孔尺寸、分布、连通性及微孔-介孔界面,构建性能优化的层级孔网络;三是注重酸性-结构协同优化,通过掺杂、复合、表面修饰等手段,在引入介孔的同时精细调控酸性位点的类型、强度与空间分布;四是开展面向重油加工、生物质转化、环境催化等特定应用的功能化设计,提升材料在扩散控制反应、大分子转化及苛刻条件下的综合性能;五是深化机理研究与表征技术融合,借助表征方法、多维显微技术与人工智能方法,揭示介孔化过程中结构演化与性能提升的内在机制,推动材料设计从经验探索向理性构建跨越。

参考文献

- [1] 韩文鹏,王淑娟,耿付江,等.介孔分子筛的合成、改性及催化应用进展[J].广州化工,2025,53(1):4-7.
- [2] 董文君,所艳华,张微,等.MCM-48介孔分子筛合成和改性研究进展[J].化工科技,2022,30(1):63-68.
- [3] 周一思,马守涛,汪颖军,等.KIT-6介孔分子筛的研究进展[J].化学与粘合,2022,44(2):158-161.
- [4] 刘启予,范炜.介孔分子筛制备技术新进展——二次合成、超分子自组装和介孔生成剂法(英文)[J].高等学校化学学报,2021,42(1):60-73.
- [5] 李云闯,谢方明,席亚男,等.高水热稳定性介孔分子筛的低成本合成研究进展[J].化工进展,2023,42(4):1877-1884.
- [6] 张鑫鑫,刘文浩,赵宏伟,等.介孔分子筛调制有序介孔碳超级电容器性能研究[J].辽宁科技大学学报,2023,46(6):420-425,433.
- [7] 伏洪兵,高天画,李兴宾,等.硅灰基介孔 ZSM-5 分子筛的合成及催化裂解性能[J].精细化工,2023,40(11):2480-2486.
- [8] Singh B K, Kim Y, Kwon S, *et al.* Synthesis of mesoporous zeolites and their opportunities in heterogeneous catalysis [J]. Catalysts, 2021, 11(12):1541.
- [9] 郑云锋,樊红超,汪毅,等.ZSM-5分子筛介孔化及其在多产低碳烯烃中的应用[J].石化技术与应用,2022,40(4):243-246.
- [10] 郝芳,贾晶萨,张晓欣,等.甲苯扩散行为与 ZSM-5 分子筛介孔化的关系探究[J].石油炼制与化工,2025,56(8):77-85.
- [11] 李琳琳,龚维,付海,等.介孔分子筛 KF-SBA-15 的制备及其催化 Knoevenagel 反应[J].化学工业与工程,2020,37(3):17-22.
- [12] 胡美秋,袁红,张泓.介孔 SAPO-11 分子筛的制备及应用[J].应用化工,2019,48(11):2682-2687.
- [13] 李青翠,韦美彩,黄以军.低成本制备 MCM-41 介孔分子筛及其对镉离子的吸附性能(英文)[J].硅酸盐学报,2019,47(1):117-124.
- [14] 张泽,程军,仇亿,等.碱处理脱硅介孔分子筛催化脱氧断键制生物航油研究[J].化工学报,2019,70(8):2919-2927.
- [15] 王斌腾.介孔 Y 型分子筛的合成及性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [16] 卢信清,许春慧,张富民,等.碱处理制备介孔-微孔沸石分子筛的影响因素及其应用研究进展[J].化工进展,2014,33(8):2038-2043,2122.
- [17] 李冰欣.MCM-41介孔分子筛的合成及其研究现状[J].化工技术与开发,2024,53(7):54-57.
- [18] 江珊,刘红梅,刘东兵.HMS介孔分子筛合成及其在丙烷脱氢制丙烯反应中的应用[J].工业催化,2023,31(9):49-55.
- [19] Zhou H, Zhang M, Sun S, *et al.* Synthesis of coal gangue-based mesoporous X zeolite with soft template and its adsorption methylene blue [J]. Science of Advanced Materials, 2021, 13:2157-2166.
- [20] Radoor S, Karayil J, Jayakumar A, *et al.* Efficient removal of methylene orange from aqueous solution using mesoporous ZSM-5 zeolite: Synthesis, kinetics and isotherm studies [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 611:125852.
- [21] 张磊,袁亚飞,朱海林.无介孔剂绿色合成多级孔分子筛的研究进展[J].应用化工,2023,52(10):2945-2948.
- [22] 李剑,朱海山,沈健,等.天然糖类模板辅助合成多级孔 ZSM-5 分子筛研究进展[J].硅酸盐学报,2025,53(11):3420-3432.
- [23] Nagase T, Miyakawa M, Nishioka M, *et al.* Microwave-assisted green synthesis of mesoporous zeolite adsorbents for direct air capture of CO₂ [J]. Chemistry Letters, 2022, 51(3):296-299.
- [24] 左楠楠,刘大伟,郭妮亚,等.介孔分子筛 SBA-15 中表面活性剂的回收及再利用研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(2):209-214. ■
- [25] 冯艳秋,郑国彤,王立成,等.XYH型淤浆法聚乙烯高效催化剂的开发[J].石化技术与应用,2002,(5):311-314.
- [26] Liu X M, Qin Y W, Zhao S M, *et al.* In situ promotion of long-chain branching in polyethylene from Ziegler-Natta catalysts [J]. ACS Appl Polym Mater, 2021, 3(12):6455-6467.
- [27] 王喆,李绍杰,庞宝清,等.XY-H催化剂在淤浆法 HDPE 装置上的应用[J].石化技术与应用,2005,(1):46-47,88.
- [28] 宁英男,吴昊,蒋岩,等.乙烯淤浆聚合用 Ziegler-Natta 催化剂的制备及催化性能[J].合成树脂及塑料,2013,30(1):14-18.
- [29] 张勇,程林杰,王鹏,等.SEL催化剂在 Hostalen ACP 工艺 HDPE 装置上的工业应用[J].合成树脂及塑料,2022,39(2):50-54.
- [30] 肯杰别克·赛力克汗,高哈尔·努拉里,吴登峰,等.国产 BCL 和 SEL 催化剂在高密度聚乙烯双峰产品生产中的性能评价[J].工业催化,2023,31(7):59-68. ■

(上接第 81 页)