

有序结构催化剂制备方法研究进展

关福祥, 胡洁琼*, 聂陟枫, 冀舒, 何红星, 邓秀君, 张毅

(昆明学院化学化工学院, 云南省金属有机分子材料与器件重点实验室, 云南 昆明 650214)

摘要:介绍了有序结构催化剂的优点,包括提高催化剂的利用率、增强催化剂的活性、提升催化剂的传质效率和提高催化剂的选择性和效率。对二元和三元有序结构催化剂的结构特点进行了对比。结合实例介绍了模板法、浸渍法、水热法、聚醇法等常见的几种有序催化剂的制备方法和原理步骤,并对有序结构催化剂的研究方向和应用领域提出了展望。

关键词:有序结构;催化剂;模板法;浸渍法;催化活性

中图分类号:TQ426

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)06-0053-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.010

Research progress on preparation methods of ordered structure catalysts

GUAN Fu-xiang, HU Jie-qiong*, NIE Zhi-feng, JI Shu, HE Hong-xing,
DENG Xiu-jun, ZHANG Yi

(Yunnan Key Laboratory of Metal-Organic Molecular Materials and Device, School of Chemistry and Chemical Engineering, Kunming University, Kunming 650214, China)

Abstract: This paper first outlines the advantages of ordered-structure catalysts, including enhanced catalyst utilization, improved catalytic activity, optimized mass transfer efficiency, and increased selectivity and efficiency. Subsequently, a comparative analysis of the structural characteristics of binary and ternary ordered-structure catalysts is presented. Finally, several common synthesis methods for ordered catalysts such as templating, impregnation, hydrothermal, and polyol processes are introduced with practical examples, along with their underlying principles and procedural steps. The conclusion provides an outlook on future research directions and potential applications of ordered-structure catalysts.

Key words: ordered structure; catalyst; template method; impregnation method; catalytic activity

催化剂(catalyst)是一类能够在不被消耗的情况下加速化学反应的物质,最重要的3个性质是活性、选择性、稳定性,被广泛应用于工业、医疗、石油加工、环保等多个领域,对于提高生产效率、降低能耗和减少环境污染具有重要意义。在长期生产实践中,人们对催化反应和催化剂的了解逐渐增加,能够以一定的理论为指导,为特定的反应选择具体的催化剂。而催化剂的形貌、尺寸、结构直接影响其性能。使用各种表征手段研究服役前后催化剂的变化,以推测催化剂在服役过程中的行为,为进一步改进催化剂提高催化性能提供了理论基础^[1]。

有序结构催化剂因为具有独特的物理化学性质,在催化领域中展现出了广泛的应用前景。有序的孔道结构、较大的比表面积和活性位点分布均匀,这些特点使催化剂在催化反应中表现出优异的催化性能^[2]。近些年来,纳米技术和材料科学快速发展,有序结构催化剂的制备方法得到了广泛研究,特别是在二元和三元有序结构催化剂的制备及其性能优

化方面取得了显著的进展^[3]。Kim等^[4]通过调控PtCo纳米合金的有序度,采用碳壳包裹技术,调整热处理条件,制备了具有不同有序度(低、中、高)的PtCo@NCL/CB催化剂,并发现有序度影响脱合金行为:低有序度催化剂(LO-PtCo)在酸处理后形成更厚的Pt壳层,表现出最高质量活性(1.118 A/mg,是商用Pt/C的4.3倍),而高有序度催化剂(HO-PtCo)则展现出优异的稳定性。

本文中综述了有序结构催化剂的优点,二元有序结构和三元有序结构的结构特点对比,以及近年来纳米有序合金催化剂的合成方法,包括模板法、浸渍法、水热法、聚醇法,对有序合金催化剂存在的问题和未来发展前景。

1 有序结构催化剂的介绍

1.1 有序结构催化剂的优点

相较于无序结构催化剂,有序结构催化剂通常具有以下显著的优点。

收稿日期:2025-08-25;修回日期:2026-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52361006);云南省科技人才与平台计划(202105AC160002);云南省基础研究专项重点项目(202401AS070021);云南省金属有机分子材料与器件重点实验室自主课题(YNMO-ZD-2409)

作者简介:关福祥(2001-),女,硕士生;胡洁琼(1982-),女,博士,研究员,研究方向为计算材料学及催化材料的设计研究,通讯联系人,joanr8210@163.com。

(1) 提高催化剂的利用率

通过精心设计的微观架构,有序结构显著提高了材料的比表面积,通过调整催化剂载体的排列,让更多的活性位点暴露,提高了催化剂的利用率。在质子交换膜电池 PEMFC 中^[5],具有内在内部空隙的有序微阵列 (OMA) 在催化剂层内建立了垂直通道,优化了质子和氧气的传输路径,使 Pt/C 催化剂与质子和氧气能够更好地接触,从而减少了因催化剂被覆盖或隐藏而导致的活性位点浪费。对于高温聚合物电解质膜燃料电池 (HT-PEMFCs),TiO₂ 纳米棒表面均匀分布着 Pt 纳米线,使 Pt 纳米颗粒避免了聚集的现象,从而提高了催化剂的活性位点数量和利用率^[6]。据报道,较大的比表面积和孔径有利于降低污染物分子在催化剂表面的扩散阻力,同时增加与催化剂活性中心的接触概率,进而提高催化剂的催化性能^[7]。

(2) 提高催化剂的活性

有序结构催化剂通常有高度发达的孔隙结构和较大的比表面积优势,这样的特性使它能够提供更多的活性位点,从而有效提高催化剂的活性。例如,通过原位沉淀 3D 打印技术制备的 HPHO Ag@/AgCl 光催化剂,具有高度有序的三维多孔网络结构,比表面积较大,能够提供更多的活性位点^[8]。有序介孔钼碳化物 (如 fCMK-3-MoCx) 具有高比表面积和高度有序的介孔结构,比表面积高达 566.79 m²/g,能够提供更多的活性位点^[9]。

(3) 提高传质效率

有序结构能够实现空隙的均匀分布,这对于提高传质效率有着至关重要的作用。在 SOFC 中,具有有序大孔结构 (STFN-3DOM) 阳极材料,促进了用于烷烃燃料的固体氧化物燃料电池中的原位 Ni-Fe 析出,增强了燃料的吸附和转化效率^[10]。在离子交换膜燃料电池 (AEMFC) 中,OMC 材料通过软模板法合成,孔径分布均匀,主要集中在 7 nm 左右^[11]。这种均匀的孔隙结构为电解质和反应物提

供了良好的传输通道,也避免了孔隙的堵塞,提高了电池的性能和稳定性。3DOMM-Al₂O₃ 催化剂的有序多孔结构增大了比表面积,有利于丙烯的扩散,提高了丙烷非氧化脱氢 (PDH) 反应的效率^[12]。Pt@Cu 核壳结构催化剂在低温条件下形成高度有序的 PtCu 合金,有效避免了高温情况下 Cu 原子在碳载体上的扩散现象,进而在较低的温度下形成高度的有序结构,显著提高了传质效率^[13]。

(4) 提高催化剂的选择性和效率

根据所需对有序结构催化剂的孔径和孔隙结构的要求,可以选择不同的制备方法。例如,通过硬模板法制备的 CoCe-HT 催化剂,孔径和孔隙结构可以通过选择不同的模板剂 (如 KIT-6) 来调控,从而优化催化剂的性能^[14]。对于各种不同的催化反应,在不同的催化反应中,根据反应物和产物的分子大小,可以设计出适合特定反应的孔径和孔隙结构,提高催化剂的选择性和效率。

1.2 二元有序结构和三元有序结构的结构特点对比

1.2.1 二元有序催化剂的结构特点

在原子尺度上,2 种组分的原子按照一定的规律排列,这种有序性可以是周期性的。如 PtCu 催化剂中 Pt 和 Cu 原子周期性交替排列,形成特定晶体结构,像具有 L1₀ 结构的 PtCu NPs,有 (021) 超晶格峰^[13]。PtCu 有序金属间化合物中,Pt 和 Cu 原子呈周期性交替排列,形成有序层状结构。这种有序排列增强了原子间 d 轨道相互作用,提升了催化剂的本征催化活性和稳定性。He 等^[15]采用两步直接退火法,制备了均匀有序的 PtFe 合金催化剂 (图 1)。PtFe@NC/SWCNHs (H₂-9 h) 样品在 0.9 V 时表现出较高的质量活性 (1.53 A/mg) 和比活性 (3.61 mA/cm²),这归因于有序 fct-PtFe 结构增强的电子相互作用,同时还有防止纳米颗粒聚集的作用。Ye 等^[13]通过 Pt 辅助 H₂ 还原 Cu²⁺ 生成了 Pt@Cu 核壳纳米颗粒 (Pt@Cu NPs),随后在 500~1 000℃ 下

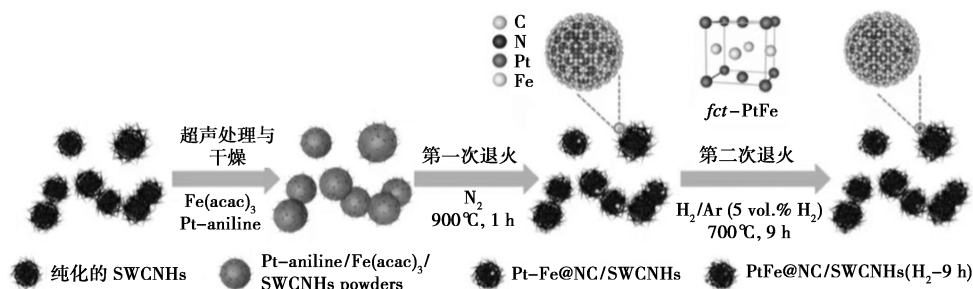


图 1 Pt-Fe@NC/SWCNHs (H₂-9 h) 合成示意图

退火,合成了 PtCu 有序金属间催化剂(图 2)。高有序度的 PtCu 纳米颗粒在 ORR 性能测试表现出更高的 MA 值和面积比活性(SA),并且 ORR 活性与有序度之间存在正相关。

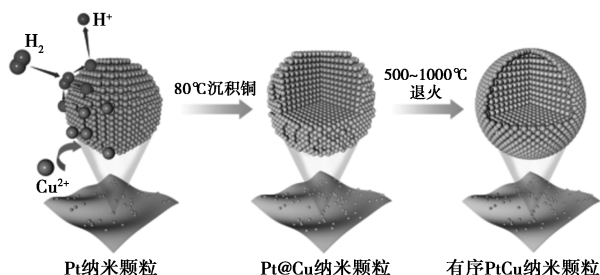


图 2 Pt@Cu 纳米粒子和有序 PtCu 纳米粒子合成示意图

1.2.2 三元有序催化剂的结构特点

二元有序催化剂通常存在活性相分布不均、孔径和结构限制等缺点,在制备 CuO-CeO₂/SBA 催化剂的研究中,SBA-16 的“墨水瓶”型介孔结构可能阻碍纳米颗粒的掺入和气体传输,部分活性位点难以接触到反应物,导致催化活性受限;且活性相粒子尺寸若大于载体孔径,会堵塞部分介孔,进一步降低催化性能^[16]。对于 Pr_xMn_{1-x}O₈/3DOM ZSM-5 催化剂,负载 Pr_xMn_{1-x}O₈ 后,3DOM ZSM-5 催化剂的微孔和介孔结构发生变化,吸附量下降,比表面积和孔体积减小,平均孔径增大^[17]。这是因为活性成分可能堵塞部分沸石微孔和介孔,占据了孔道空间,进而影响了催化剂对反应物的吸附和扩散,降低了催化活性。

三元有序结构催化剂的结构比二元有序结构催化剂更加复杂。三元复杂的有序结构使得催化剂具有多种活性位点。例如,曹季冬^[18]通过 Au 和 Co 原子共同作用,使 Pt 催化剂的氧吸附能力达到适中,提高了 ORR 催化效率,L1₀-PtCoAu_{0.1}/C 的质量活性达到 1.08 A/mg(图 3)。

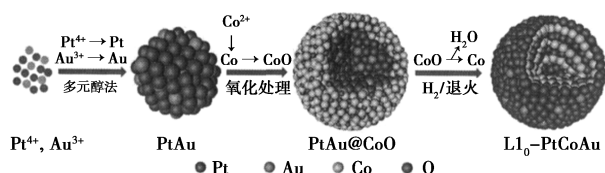


图 3 有序 L1₀-PtCoAu/C 催化剂的制备流程

2 有序结构催化剂的合成方法

2.1 模板法

模板法是一种通过预先设计好的模板材料,引

导前驱体形成特定结构的有序结构催化剂的制备方法。核心原理是通过模板自身的物理结构(如孔道、通道或框架)来限制催化剂前驱体的生长和分布,之后将模板去除后,得到具有特定孔结构和形貌的催化剂。这种方法能够显著提高催化剂的比表面积、孔隙率和活性位点数量,从而增强催化剂的催化性能。

Liu 等^[19]通过精确调控聚苯乙烯(PS)模板的尺寸和有序性,成功制备了具有有序大孔框架的 Fe-N-C 催化剂[OM-Fe-NC(200)],该催化剂在酸性介质中表现出卓越的氧还原反应(ORR)活性,半波电位($E_{1/2}$)达 0.885 V,优于商用 Pt/C(0.847 V)和无 PS 模板的 Fe-N-C 催化剂(0.796 V)。模板法在多种方法制备有序催化剂中具有明显优势。Zhou 等^[14]通过多种方法制备了 CoCe 催化剂,其中通过模板法制备的 CoCe-HT 催化剂拥有有序介孔结构,较高的活性,促进反应物扩散和活性位点暴露,显著提升 CO₂ 加氢活性和稳定性。

通过结合多种方法,可以显著提升催化剂的性能。Chen 等^[20]利用 PS 模板通过热解和硫化方法制备了具有有序结构的多孔 MoS₂-Fe₂Mo₃O₈/MoO₂ 电催化剂,其异质结构显著提升了活性位点数量并促进离子扩散,从而有效改善整体性能。该催化剂在 1 mol/L 氢氧化钾溶液中表现出优异的析氧反应(OER)和析氢反应(HER)性能,分别需 213 mV 和 60 mV 的过电位才能达到 10 mA/cm² 的电流密度,相比商用催化剂展现出更优的性能和长期稳定性。Sun 等^[12]采用蒸发诱导自组装与胶体晶体模板(EISA-CCT)联合作用,制备了三维有序大介孔(3DOMM)氧化铝负载活性 PtSn 纳米颗粒的分级多孔催化剂。这种结构增加了催化剂的比表面积,促进了丙烯的扩散,并且减少了表面酸性位点的数量。3DOMM-Al₂O₃ 的特殊表面性质和孔结构可以调节金属与载体之间的相互作用,稳定金属纳米颗粒,从而促进高活性和稳定 PtSn 相的形成。与具有大孔和介孔结构的 PtSn/Al₂O₃ 催化剂相比,PtSn/3DOMM-Al₂O₃ 催化剂表现出更高的生产率和稳定性。在丙烷转化率为 33.9% 时,PtSn/3DOMM-Al₂O₃ 催化剂的丙烯选择性超过 95%。

2.2 浸渍法

浸渍法是一种利用活性组分前驱体在溶液中的溶解度差异为基础,通过控制溶液浓度、浸渍时间和温度等变量因素,使所需的活性组分能够在载体表面和孔隙中均匀有效吸附的一种有序结构催化剂制备

方法。浸渍法具有操作简单、成本低的优点,这些优点能够使活性组分高度分散,继而使催化剂的活性和稳定性提高。Zhang 等^[21]通过浸渍-还原法在有序介孔 MCM-41 载体上负载超细 PtNi 纳米颗粒,开发了一种高效双功能催化剂($\text{Pt}_{0.4}\text{Ni}_{0.6}/\text{MCM-41}$),在 AB 水解中表现出卓越的催化活性,TOF 值(turnover frequency, 转换频率)高达 $939 \text{ mol}/(\text{molmin})$,且具有良好的循环稳定性。

浸渍法结合退火处理可以促进催化剂的有序性,Song 等^[22]通过湿浸渍法合成高活性有序金属化合物燃料电池催化剂,通过调控颗粒间距和退火温度控制催化剂的粒径、合金化程度和有序度,揭示了金属间化合物中粒径与合金化/有序度之间的权衡关系,受到颗粒间距和退火温度的影响,合成了平均粒径为 2.65 nm 且有序度高达 73% 的金属间化合物 PtFe 催化剂,为合成具有增强燃料电池性能的小尺寸、高有序度金属间催化剂提供了通用性指导。

通过合适的介孔材料加入,可以提高催化剂的性能。Lacoste 等^[16]通过对比研究不同形貌的有序介孔二氧化硅负载 $\text{CuO}-\text{CeO}_2$ 催化剂的制备方法,得出 SBA-15 的介孔结构与初始湿法浸渍工艺对提升催化性能具有显著促进作用。得益于 WI 法避免了机械研磨导致的颗粒破碎和组分偏析,同时更好地保持了介孔结构的完整性。

2.3 水热法

水热合成法是研究物质在高温和密闭或高压条件下溶液中的化学行为与规律的化学分支。水热合成是指在一定温度($100\sim 1000^\circ\text{C}$)和压强($1\sim 100 \text{ MPa}$)条件下,使通常难溶或不溶的物质溶解,并且重结晶进行无机合成与材料处理的一种有效方法。相对于其他粉体制备方法,水热法制得的粉体具有晶粒发育完整,粒度小,且分布均匀,颗粒团聚较轻,可使用较为便宜的原料,易得到合适的化学计量物和晶形等优点。

Liu 等^[23]通过水热法合成过渡金属(V、Mo、W)掺杂的 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 前驱体,随后在 450°C 氨气氛围中煅烧 2 h,成功制备了具有丰富氮空位和晶格畸变的 $\text{M}-\text{Co}_{3.75}\text{N}_{0.14}$ 催化剂。该催化剂保留了前驱体的 3D 海胆状微球结构,过渡金属掺杂有效调控了电子结构,使 d 带中心下移,显著提升了载流子分离效率和析氢反应动力学。最优的 $\text{V}-\text{Co}_{3.75}\text{N}_{0.14}$ 在 Eosin-Y 敏化体系中表现出 $21.21 \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ 的析氢速率和 38% 的量子效率,性能优于多数报道的杂化光催化剂。研究揭示了金属-氮键形成和缺陷工程在增

强光催化活性中的关键作用。Song 等^[24]通过水热法结合酸蚀刻与氩气气氛下的碳热还原工艺,成功合成了新型氮掺杂碳包覆的 OA-P 结构四氧化三铁立方体材料。这种具有独特结构的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{N-C}$ 在锂离子电池和 PMS 活化降解双酚 A(BPA) 方面展现出优异性能。

2.4 聚醇法

聚醇法利用多元醇(如乙二醇)既作为溶剂又作为还原剂的特性,在一定条件下将金属前驱体还原成金属纳米粒子,并使其负载在载体(如碳黑)上。在这个过程中,多元醇的羟基具有还原性,能够将金属离子逐步还原为金属原子,这些金属原子会在载体表面聚集、生长,最终形成均匀分散的纳米催化剂。同时,通过控制反应条件和前驱体的比例,可以调控纳米催化剂的组成、结构和性能。

Kim 等^[25]通过微波辅助多元醇法合成 PtNi/C 催化剂,并采用氢气退火处理优化性能。研究发现, $\text{Pt}_7\text{Ni}_3/\text{C}$ 在 700°C 退火后具有最佳 ORR 活性,起始电位达 555.1 mV ,质量活性为 $70.15 \text{ mA}/\text{mg}$ 。热处理促使无序结构转变为有序面心四方相,同时减少表面氧含量,显著提升了导电性和稳定性。经 1 000 次循环测试后,退火样品活性损失仅 1.24%,远优于未处理样品(20.79%)。该研究为开发高效稳定的燃料电池催化剂提供了新思路。Zhu 等^[26]通过微波加热多元醇法及后续退火处理,成功合成了碳负载的 Au-Pt-Fe 三元纳米颗粒,并形成有序结构。微量 Au(质量分数 0.2%) 的引入显著提升了 Pt-Fe 金属间化合物的氧还原反应(ORR)性能,其中 Au-PtFe/C-H 的质量活性达 $0.66 \text{ A}/\text{mg}$,是商业 Pt/C 的 3.9 倍,且经过 5 000 次循环后半波电位仅衰减 5 mV。作者发现微波加热法比传统油浴加热更有利于形成高合金化结构,并通过 XPS 和 HAADF-STEM 证实 Au 与 Pt-Fe 的合金化有效调控了 Pt 的电子结构,降低氧吸附能。

表 1 对以上几种方法的优缺点进行了总结,并对溶胶-凝胶法和液相还原法进行了简单的补充。溶胶-凝胶法操作简单、纯度高,是在毛细力作用下,通过金属醇盐或无机盐溶液填充模板,经过水解、聚合逐渐生成溶胶^[27],再经凝胶化、干燥和热处理。Zhi 等^[28]通过溶胶-凝胶法结合湿化学还原法制备了具有有序-无序结构的 $\text{PtCu}/2\text{D}-\text{CeO}_2$ 催化剂。该催化剂在甲醇氧化中展现 $37.24 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 的高活性(是 Pt/C 的 7 倍),同时保持优异稳定性。液相还原法是一种通过化学还原剂溶解在液相中,

将金属离子还原为金属纳米颗粒的合成方法,操作简便,反应条件温和,通过调控还原条件来控制纳米颗粒的尺寸、形貌和分散性。

表1 不同有序结构催化剂制备方法的优缺点对比

制备方法	优点	缺点
模板法	孔道精确可控,高比表面积	步骤复杂,模板去除困难
浸渍法	操作比较简单,负载灵活	分散性差,易堵塞孔道
水热法	形貌可控,高结晶度	高压设备,条件敏感
聚醇法	纳米颗粒均一,温和还原	成本高,有机残留
溶胶凝胶法	操作简单,纯度高	机械强度低,周期长
液相还原法	快速合成,粒径可控 ^[29]	杂质残留

3 结论与展望

在催化领域中,有序结构催化剂凭借结构的独特性和催化能力的优异表现,应用前景广泛。常见的制备具有高度有序结构催化剂的方法有模板法、浸渍法、水热法、聚醇法等;通过这些方法制备出的二元和三元有序结构催化剂能够在催化反应中表现出优异的活性和高度的稳定性。

未来,探索新型有序结构催化剂的制备方法,特别是如何通过借助引入多种元素的方法,使催化剂的电子结构和表面性质发生预期的改变,继而提高催化剂的活性和稳定性这一方向具有广阔的前景。除此之外,在生物质转化、能源储备、环境催化等领域中,有序结构催化剂的应用也值得关注和研究。

参考文献

[1] 汤敏.外场环境下 Pd 基纳米催化剂结构与性能的电子显微学研究[D].杭州:浙江大学,2020.

[2] 王森,孟繁春,李卓,等.有序介孔炭负载 Pt-MoO_x 催化剂的制备及其催化甲基环己烷脱氢性能[J].石油炼制与化工,2024,55(9):33-41.

[3] 刘鑫宇,王成雄,刘光信,等.用于 CO 氧化的铂基催化剂研究进展[J].贵金属,2025,46(1):99-106.

[4] Kim M, Bae H E, Song J, et al. Ordering-dependent dealloying dynamics and catalytic advancements in PtCo nanoalloys for oxygen reduction reaction[J]. Materials Today Energy, 2025, 52: 101934.

[5] Gao J, Wang H, Zhang Z, et al. Semi-ordered catalyst layer with ultra-low Pt loading for proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2024, 606: 234516.

[6] Tan M, Zhang W, Liu H, et al. Revolutionizing high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells: Unleashing superior performance with vertically aligned TiO₂ nanorods supporting ordered

catalyst layer featuring Pt nanowires[J]. Fuel, 2024, 357: 130084.

[7] 史蕊,李坚.添加 WO₃ 对铂钴催化剂 CO 氧化性能的影响[J].工业催化,2018,26(3):39-44.

[8] Chen G C, Huang W T, Lee P C, et al. In-situ-precipitation three-dimensional printing and photocatalytic applications of highly ordered interconnected submicron-scale pores in silver atomic cluster-silver chloride photocatalyst structures[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126: 797-811.

[9] Zheng M, Cao B, Liu J, et al. Facile synthesis of ordered mesoporous molybdenum carbide electrocatalysts for high-performance hydrogen evolution reaction[J]. Electroanalysis, 2023, 35(7): e202200519.

[10] Jiang Y, Liu J, Cheng B, et al. In situ exsolved NiFe nanoparticles in Ni-doped Sr_{0.9}Ti_{0.3}Fe_{0.63}Ni_{0.07}O_{3-δ} anode with a three-dimensionally ordered macroporous structure for solid oxide fuel cells fueled by alkanes[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 491: 151865.

[11] Lilloja J, Mooste M, Kibena-Pöldsepp E, et al. Cobalt-, iron- and nitrogen-containing ordered mesoporous carbon-based catalysts for anion-exchange membrane fuel cell cathode[J]. Electrochimica Acta, 2023, 439: 141676.

[12] Sun Y, Feng B, Lian Q, et al. Ordered hierarchical porous structure of PtSn/3DOMM-Al₂O₃ catalyst for promoting propane non-oxidative dehydrogenation[J]. Nanomaterials, 2023, 13(4): 728.

[13] Ye X, Shao R Y, Yin P, et al. Ordered intermetallic PtCu catalysts made from Pt@Cu core/shell structures for oxygen reduction reaction[J]. Inorganic Chemistry, 2022, 61(38): 15239-15246.

[14] Zhou G, Xie L, Xie F, et al. CoCe composite catalyst for CO₂ hydrogenation: Effect of pore structure[J]. Journal of the Energy Institute, 2024, 117: 101856.

[15] He S, Liu Y, Zhan H, et al. Direct thermal annealing synthesis of ordered Pt alloy nanoparticles coated with a thin N-doped carbon shell for the oxygen reduction reaction[J]. ACS Catalysis, 2021, 11(15): 9355-9365.

[16] Lacoste A M, Tiscornia I S, Bonne M, et al. Study of CuO-CeO₂ catalysts supported on ordered porous silica with different mesostructure and morphology. Influence on CO preferential oxidation[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2021, 320: 111094.

[17] Wang L Y, Ren Y, Yu X H, et al. Novel preparation method, catalytic performance and reaction mechanisms of Pr_xMn_{1-x}O₈/3DOM ZSM-5 catalysts for the simultaneous removal of soot and NO_x[J]. Journal of Catalysis, 2023, 417: 226-247.

[18] 曹季冬.燃料电池三元铂基催化剂的制备与性能研究[D].北京:北京化工大学,2021.

[19] Liu Y, Li Q, Liang Y, et al. Controlled preparation of Fe-N-C catalyst with ordered macroporous framework for superior acidic oxygen reduction performance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1036: 182115.

[20] Chen H, Wang Y, Zhou S, et al. MoS₂-decorated ordered macroporous Fe₂Mo₃O₈/MoO₂ with heterogeneous structure as bifunctional electrocatalyst for efficient overall water splitting[J]. Ceramics International, 2024, 50(9): 16714-16721.

[21] Zhang H, Niu Q, Mou Y, et al. MCM-41-supported ultrafine PtNi nanoparticles as highly active catalysts for hydrogen generation from ammonia borane hydrolysis and tandem reduction of 4-nitrophenol[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(2): 115936.

- [6] 欧尚元(天津)有限公司.一种粗L-乳酸的精制纯化方法及其纯化装置:CN 114605254A[P].2022-06-10.
- [7] 窦欣宇.隔壁塔双向反应精馏耦合提纯乳酸工艺研究[D].天津:天津科技大学,2023.
- [8] 窦欣宇,刘沙,姚洪,等.反应精馏隔壁塔提纯乳酸工艺研究[J].现代化工,2024,44(3):225-229.
- [9] 姚洪.催化精馏酯化-水解提纯乳酸工艺研究[D].天津:天津科技大学,2023.
- [10] Alao A I, Afolabi T J, Agarry S E. Extraction of lactic acid from fermentation broth using long-chain alkanones[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2023, 68(3):642-653.
- [11] Gugel I, Marchetti F, Costa S, et al. Efficient downstream processing of second-generation lactic acid from lignocellulosic waste using aqueous two-phase extraction[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2025, 12(1):20.
- [12] Baral P, Pundir A, Kurmi A, et al. Salting-out assisted solvent extraction of L(+) lactic acid obtained after fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 269:118788.
- [13] Pau S, Oliva A, Tan L C, et al. Recovery of organic acids from lactic acid-enriched fermentation broth via salting-out assisted solvent extraction[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 187:376-384.
- [14] Erdas A, Marti M E. Eco-friendly approach for the recovery of lactic acid by complex extraction[J]. ACS Omega, 2024, 9(15):16959-16968.
- [15] Kanbur M, Yetisen M, Uslu H. Unlocking potential: Vegetable oil effects on lactic acid extraction[J]. Chemical Engineering & Technology, 2025, 48(5):e70007.
- [16] Zhou X, Huang L, He W, et al. Extractive adsorption of lactic acid from fermentation broth on a novel ion exchange resin impregnated by the [Bmim]PF₆ ionic liquid[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(45):16063-16073.
- [17] Guo Y, Li C, Zhao H, et al. The performance of ultrafiltration process to further refine lactic acid from the pre-microfiltered broth of kitchen waste fermentation[J]. Membranes, 2023, 13(3):330.
- [18] 郭佩,赵黎明,刘鲁杰,等.利用纳滤膜技术分离秸秆发酵液中糖和乳酸的研究[J].膜科学与技术,2023,43(3):104-115.
- [19] 王博轩.发酵液中L-乳酸的分离与纯化[D].北京:北京化工大学,2019.
- [20] 何飞宇,封玲,朱铭,等.电渗析选择性分离与回收工业废水有价物质研究进展[J].工业水处理,2025,45(9):10-18.
- [21] Wang Q, Chen G Q, Lin L, et al. Purification of organic acids using electrodialysis with bipolar membranes (EDBM) combined with monovalent anion selective membranes[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 279:119739.
- [22] Papadopoulou E, González M C, Reif D, et al. Separation of lactic acid from fermented residual resources using membrane technology[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(5):110881.
- [23] 欧阳佳琪,张璐,董同力嘎,等.基于活性炭吸附与离子交换树脂法的玉米发酵液乳酸纯化工艺优化研究[J].包装工程,2025,46(11):11-20.
- [24] Taniguchi S, Onishi T, Ishida N, et al. Waste-reducing and energy-saving lactic acid production using activated carbon[J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2025, 23:100790.
- [25] Pradhan N, Rene E R, Lens P N L, et al. Adsorption behaviour of lactic acid on granular activated carbon and anionic resins; thermodynamics, isotherms and kinetic studies[J]. Energies, 2017, 10(5):665.
- [26] Ahmad A, Othman I, Taher Hanifa, et al. Lactic acid recovery from date pulp waste fermentation broth by ions exchange resins[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 22:101438.
- [27] Oliveira P Z D, Vandenberghe L P D S, Soccol C R. Lactic acid production using sugarcane juice as an alternative substrate and purification through ion-exchange resins[J]. Fermentation, 2023, 9(10):879.
- [28] 舒怡.乳酸纯化连续离交系统及工艺优化研究[J].科学技术创新,2023,(21):1-4.
- [29] Rahimi M S, Esfahanian M. Adsorption and the subsequent desorption of lactic acid molecules on zirconium metal-organic frameworks: An innovative and efficient approach for the recovery of the produced lactic acid from fermentation broth[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2025, 103(8):3940-3954. ■

(上接第57页)

- [22] Song T W, Zuo L J, Zuo M, et al. Breaking trade-off between particle size and ordering degree of intermetallic catalysts for fuel cells[J]. Journal of Catalysis, 2023, 419:19-25.
- [23] Liu S, Qi W, Liu J, et al. Modulating electronic structure to improve the solar to hydrogen efficiency of cobalt nitride with lattice doping[J]. ACS Catalysis, 2023, 13(4):2214-2222.
- [24] Song Y, Wang H, Ren H, et al. Selective etching induced Fe₃O₄ cubes with orderly aligned porous structure for the effective lithium-ion storage and bisphenol A degradation[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 334:126054.
- [25] Kim S I, Lim S, Son M, et al. Highly active and stable bimetallic ordered catalysts for oxygen reduction reaction improvement in polymer exchange membrane fuel cells[J]. Applied Surface Science, 2024, 656:159620.
- [26] Zhu H, Cai Y, Wang F, et al. Scalable preparation of the chemically ordered Pt-Fe-Au nanocatalysts with high catalytic reactivity and stability for oxygen reduction reactions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(26):22156-22166.
- [27] Bruna A D, Martins L C, Paulino T M A, et al. Uniform composition of sol-gel synthetic aluminosilicate precursor as a key factor for the production of geopolymers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(8):04023265.
- [28] Zhi H, Dong B, Guo X, et al. Ultra-thin order-disorder CeO₂ nanobelts as the non-carbon support of the PtCu catalyst towards methanol oxidation and oxygen reduction reactions[J]. RSC Sustainability, 2024, 2(11):3456-3463.
- [29] Li X, Liu Y, Zhang J J, et al. No annealing synthesis of ordered intermetallic PdCu nanocatalysts for boosting formic acid oxidation[J]. Chemistry of Materials, 2022, 34(3):1385-1391. ■