引用格式：李可莹，邢定峰，李军，等. 微波驱动LOHCs脱氢：响应型催化剂设计与吸波性能研究进展[J]. 材料工程，2026，54(6)：145-159.
LI Keying，XING Dingfeng，LI Jun，et al. Research progress in microwave-driven dehydrogenation of LOHCs：design and microwave-absorption performance of responsive catalysts[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(6)：145-159.

微波驱动LOHCs脱氢：响应型催化剂设计与吸波性能研究进展

李可莹[1]，邢定峰[2]，李　军[2]，范夏雨[1]，孙建辰[1]，商　辉[1*]
（1 中国石油大学（北京）化学工程与环境学院，北京 102249；2 中国石油规划总院，北京 100083）

摘要：液态有机氢载体（LOHCs）储氢技术被视为极具潜力的储氢方式。LOHCs脱氢过程受化学平衡和传质传热限制，需新技术推动进一步发展。微波加热技术凭借热效应与非热效应优势，为破解脱氢反应困局提供了思路。微波加热具有选择性，需开发高效微波响应催化剂以优化能量利用，提高催化效率。本文从微波加热技术的优势出发，优化微波能量吸收，系统综述了几种新型微波响应催化剂的研究进展，分析了各类材料的优势与挑战，介绍了目前微波响应催化剂在催化LOHCs脱氢领域的发展与挑战；其次，综述了催化剂微波吸收性能的量化方法，为催化剂结构设计与优化吸波与能量分布提供指导；最后展望了新型高效微波响应催化剂的设计方向及微波响应LOHCs脱氢技术的发展方向，为实现低温、高效LOHCs脱氢，推动液态储氢技术发展提供理论依据。

关键词：微波加热；微波响应催化剂；微波吸收；脱氢；液态有机氢载体；储氢
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000225　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000225
中图分类号：TB333　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)06-0145-15

Research progress in microwave-driven dehydrogenation of LOHCs: design and microwave-absorption performance of responsive catalysts

LI Keying[1]，XING Dingfeng[2]，LI Jun[2]，FAN Xiayu[1]，SUN Jianchen[1]，SHANG Hui[1*]
（1 College of Chemical Engineering and Environment，China University of Petroleum（Beijing），Beijing 102249，China；
2 China Petroleum Planning and Engineering Institute，Beijing 100083，China）

Abstract：Liquid organic hydrogen carriers（LOHCs）hydrogen storage technology represents a highly promising hydrogen storage method. The dehydrogenation process of LOHCs is limited by chemical equilibrium and mass and heat transfer，thereby new technologies are required to promote further development. Microwave heating technology exhibits both thermal and non-thermal effects，offering a potential solution to the challenges encountered in dehydrogenation reactions. This technology demonstrates selective activation characteristics in catalytic systems，necessitating the development of highly efficient microwave-responsive catalysts to optimize energy utilization and enhance catalytic efficiency. This article first examines the unique advantages of microwave heating technology and optimization strategies for microwave energy absorption，systematically reviews the research progress of several new microwave responsive catalysts，and examines the advantages and challenges of various materials. The current progress and persistent challenges in applying microwave-responsive catalysts to LOHCs dehydrogenation are subsequently discussed. Secondly，the quantitative methods for the microwave absorption performance of catalysts are summarized，providing guidance for the design and optimization of catalyst structures in terms of absorption and energy distribution. Finally，the design direction of new efficient microwave responsive catalysts and the development direction of microwave responsive LOHCs dehydrogenation technology are discussed，providing theoretical basis for achieving low-temperature and

efficient LOHCs dehydrogenation and promoting the development of liquid hydrogen storage technology.
Key words: microwave heating; microwave-responsive catalyst; microwave absorption; dehydrogenation; liquid organic hydrogen carrier; hydrogen storage

氢能具有能量密度高、清洁无污染等优点，是我国未来能源体系的重要组成部分。然而，氢气具有极低的体积能量密度（2.5 Wh/L）和易燃易爆等特性，寻找高效安全的氢能储存技术是关键[1-2]。与其他氢气储存技术相比，液态有机氢载体（liquid organic hydrogen carriers，LOHCs）储氢技术通过芳香族化合物可逆的加氢和脱氢反应实现氢气的化学键合存储和可控释放。LOHCs 常温下呈液态，储氢密度高，兼容现有燃料设施，适合大规模、长周期储运氢能，是极具前景的储氢技术[3]。LOHCs 脱氢是强吸热反应，依赖高温实现高效转化。研究表明微波加热技术可通过快速均匀加热突破反应平衡及传质传热限制，实现温和条件下的高效脱氢。微波加热依托介质材料损耗自身的电场能量实现，兼具热效应与非热效应双重优势。电场作用下，物体内极性分子发生转向极化并随电磁场交变而持续运动，分子碰撞加剧，动能转化为热能，升温耗时更短；非热效应是基于变化的电磁场对极性分子产生力的作用，从而改变分子的电荷分布，形成微波催化作用[4-5]。在催化反应过程中，微波的热效应往往与非热效应同时发挥作用，从而促进传热传质强化反应。

微波加热具有高效均匀性、选择性和及时性，越来越多的学者在微波领域展开研究[6-7]。Sung 等[8]研究表明使用微波活化可以将储氢可逆循环中的脱氢阶段温度从 280～320 ℃大幅降低到 150～200 ℃。Gao 等[9]研究发现与传统加热 8 h 和 12 h 相比，以 400 W 功率微波加热 45 h 后的催化剂焦炭沉积速率明显较低，且 MCH 的转化效率更高，总体保持在 80% 以上。Kustov 等[10]研究表明在 5 W、5.77 GHz 的微波条件下，双金属 Pd-M/TiO_2 在 110 min 时间内可实现全氢-N-乙基咔唑（H-NEC）完全转化；而传统热模式在相同温度条件下（195 ℃），Ru 基和 Pt 基催化剂分别需要 374 min 和 346 min 才能达到 75% 的转化率。本课题组[11]采用响应面法和 Box-Behnken 设计分析甲基环己烷脱氢关键参数的相互影响，并进行定量解析与多目标优化。结果表明，微波加热的转化率比常规加热高出近 70%，其中进料速率和温度参数对转化率的影响最大。除了热效应外，其独特的非热效应也不容忽视[12]。Antonio 等[13]对 Arrhenius 方程中活化能（熵）的变化进行评估，研究表明由于微波的电磁场和反应分子之间的相互作用，微波非热效应可以改变 Arrhenius 方程中的指数前因子 A 和活化能 E_a。Wang 和 Nie 等[14]的研究则表明微波降低了催化体系的表观活化能（从常规加热的 59.58 KJ/mol 降至 20.98 KJ/mol），可以在更低温度下活化反应，达到相同的转化效果。另外，Zhang 等[15]研究表明微波电场会对催化剂活性位点电子分布产生影响，从而影响反应路径及实验结果。

微波诱导催化体系产生高温位点和温度梯度，成为一定范围内的高温位点，即“热点效应”[16]。研究表明“热点”是使用微波增强化学反应的关键因素，其存在使化学键更容易断裂。Suttisawat 等[17]研究发现在微波催化过程中，Pt-活性炭催化剂优先吸收微波能量形成局域高温位点，表面热点提供额外能量，削弱萘（活性位点吸附键），降低了萘吸附阻滞常数（0.8 mL/mmoL 降至 0.6 mL/mmol），显著促进了产物解吸，使催化活性得到明显提升。除提高反应速率外[18]，Zhang 等[19]研究发现，微波诱导产生的局部热点能够显著改变反应体系的表观平衡常数，更有利于吸热反应的进行，促进传质，改变产物选择性。因此，有效利用微波热点是高效强化反应的基础。

在 LOHCs 脱氢过程中，反应物和产物一般不具有极性或仅为弱极性，难以吸收微波。因此，研究核心在于优化微波热利用以提升反应效率。构建与微波场响应的催化剂是一种有效利用微波的热量的手段。本文首先探讨微波加热技术在脱氢反应中的应用，系统阐述微波响应催化剂的研究进展及各类催化剂的优势与现存问题，详述了优化微波能量吸收的实现途径，并分析潜在的微波强化机理。其次，综述了几类微波响应催化剂在催化 LOHCs 脱氢反应中的研究进展，重点分析了催化剂微波吸收性能与脱氢效率的构效关系；总结了量化催化剂微波吸收性能的方法，为催化剂设计和性能优化提供指导；最后，对高效微波响应催化剂的结构设计和微波催化 LOHCs 脱氢的发展方向进行展望，旨在推动 LOHCs 技术发展。图 1 展示了微波驱动 LOCHs 脱氢反应中，几种典型微波响应型催化剂的结构特征及其吸波机制。

1 微波响应催化剂

构建与微波场响应的催化剂是有效利用微波能

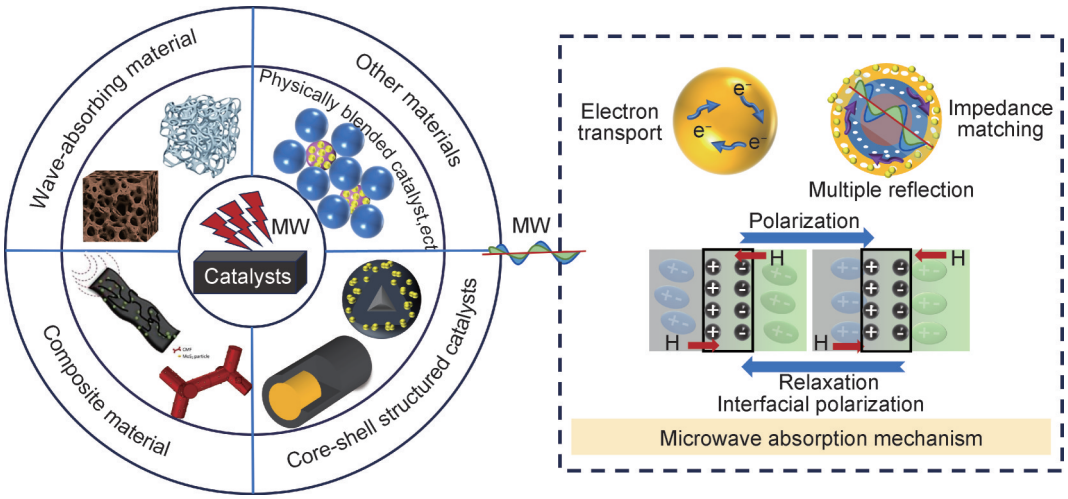


图 1　微波驱动LOHCs脱氢的响应型催化剂类型与吸波机制图

Fig.1　Types of responsive catalysts and microwave absorption mechanisms of microwave-driven dehydrogenation of LOHCs

量,实现高效强化反应的关键。研究表明,微波响应催化剂是一种利用微波能量与催化剂相互作用,以强化化学反应过程的技术。微波的选择性加热特性使其对弱极性体系作用有限,而微波响应催化剂通过“材料—结构—能量”三位一体的优化设计,实现材料对微波的选择性吸收与能量定向传递,将微波能量高效转化为热能或化学能,有利于突破传统催化剂的效率与能耗限制,为低温高效催化反应提供了全新解决方案。物体对微波的吸收能力与其介电性质成正相关。在微波加热反应器系统中,寻找具有优异的化学稳定性和介电损耗的催化剂载体或吸收剂,是微波强化的基础[20]。微波吸收材料主要包括碳基材料(如活性炭、碳纳米管、石墨烯)、金属氧化物[21](如Fe_3O_4、ZnO)、陶瓷材料(如SiC)、铁氧体[22](如$ZnFe_2O_4$)以及复合材料[23]等。这些材料的吸波性能主要取决于介电性质、磁损耗及阻抗匹配特性。本节将重点介绍物理混合型、吸波介质作为载体、结构化、复合型以及核壳型微波响应催化剂在微波能量利用方面的研究进展。

1.1　物理混合型催化剂

有效利用微波能量的一种典型策略是将微波(microwave,MW)吸收剂和催化剂物理混合。采用物理混合型催化剂策略,通过协同耦合微波吸收组分与具有催化活性的载体,实现了微波能高效转化与催化反应的同步强化。Mohamed 等[24]将具有良好微波吸收性的K_3PO_4与具有高导热性的膨润土混合,两种催化剂混合提高了微波吸收速率并减少含氧焦的形成,从而进一步影响微波吸收。Gao 等[9]在微型固定床反应器中,将催化剂和SiC颗粒进行物理混合置于固定床的中心区域,利用SiC颗粒优异的微波吸收性能与电磁场有效耦合,吸收能量并将其传播至催化剂颗粒中,从而构成了一种快速且高穿透性的加热方法。研究表明,在微波加热条件下,甲基环己烷在 350 ℃,Pt/Al_2O_3混合催化剂体系中的总转化率始终保持在 80% 以上,且与传统加热相比焦炭沉积显著下降。研究发现,微波作用下催化剂颗粒生长被有效抑制,这可能与微波选择性加热产生非均匀温度场抑制了奥斯特瓦尔德熟化过程,阻碍碳沉积的连续性生长有关。Li 等[25]也研究了碳化硅作为外源性微波吸收剂在微波辅助催化过程中的吸热特性。研究发现,微波辅助加热下含和不含SiC的原料RH的加热速率相比较,添加SiC时原料的加热速率是无SiC的加热速率的17倍。

然而,物理混合型微波响应催化剂驱动催化反应所需的热量将通过固体间传热从MW吸收剂转移到催化剂[26]。最近 Jing 等[27]的研究表明,物理杂化结构中反应位点和加热位点的空间位错阻碍了从微波吸收器到催化剂的高效热传递,显著降低了兆瓦级能量的有效利用和催化剂的催化活性。

1.2　吸波介质为载体的催化剂

吸波介质为载体的催化剂其核心是通过吸波介质作为催化剂的支撑骨架,高效吸收微波能量并转化为热能,从而显著提升催化反应效率和能量利用率。吸波介质一般是能够通过介电损耗或磁损耗吸收微波能量的材料(如碳材料、SiC、TiO_2、CeO_2、Fe_3O_4、Ni-Fe合金等)。与物理混合型微波响应催化剂相比,微波辐射直接被吸波介质即载体吸收,能量通过载体快速传递至活性位点,减少热传导路径损耗。另外,物理混合型中吸波材料与催化剂颗粒可能分散不均,导致微波能量分散被非活性区域吸收,因此吸波介质直接作为载体的设计,通过“能量—传质—结构”协同优

化，有望显著提升微波吸收的效率，是突破传热传质瓶颈的关键策略。

碳基材料因其独特的介电损耗特性和可调控的电磁参数，展现出优异的微波吸收性能[28]。Ge 等[29]通过纤维素碳化制备了一种微波响应催化剂 HC-SO_3H，在果糖催化转化中表现出优异的催化性能，远高于常规加热催化所达到的水平。认为活性提高的关键在于微波响应催化剂（HC-SO_3H）在微波辐照下可产生局部热点，显著提升了反应物分子与活性位点的碰撞频率。动力学分析证实微波与催化剂存在协同效应，这种“热点-碰撞”双重促进机制为高效微波催化体系设计提供了新思路。Zhang 等[30]在研究中发现磺化多孔碳质催化剂在微波辐照下的催化效率较传统油浴加热提升显著。在微波照射下，生物碳基固体酸催化剂（700-RSBC-SA）在 700 ℃、5 min 内实现了 92.6% 的最高 5-羟甲基糠醛（HMF）产率。使用 RSBC-SA 催化剂在微波辐照下增强的催化过程可归因于 3 个因素：（1）磺酸基团在微波场作用下的偶极极化效应，（2）吸收微波的 RSBC 载体的选择性加热，（3）上述两个因素之间的协同效应。

Jie 等[31]研究发现 SiC 载体负载的 Fe 和 Ni 催化剂在微波引发下产生了出色的制氢产率，吸波材料的结构和形状会影响与入射微波辐射的相互作用。随着微波的启动，体系吸收功率显著提升，表明 Fe 纳米颗粒和 SiC 载体的适当结合产生了阻抗匹配，从而更高效地将微波能量耦合至催化剂活性位点。Fe 颗粒和 SiC 载体的近端接触会导致协同界面效应（如电子转移或极化场协同），使金属负载催化剂表现出高于独立组成材料的热性能。两种支撑材料对比证明组成材料的结构差异会影响载体和金属颗粒之间的界面性质，从而导致微波吸收和加热的差异。

LOHCs 脱氢反应通常需要高温（>300 ℃）条件，导致能耗高、催化剂易失活等问题。近年来，微波催化技术因其独特的选择性加热和能量高效利用特性，为 LOHCs 低温高效脱氢提供了新思路。不同材料对微波的吸收能力不同，而微波吸收能力的强弱影响催化性能。Li 等[32]研究了不同碳材料在微波照射下的性能，并确定了微波下的最佳碳载体。在 5 种不同碳材料（碳纳米管（CNT）、碳纳米纤维（CNF）、炭黑（CB）、石墨（G）和活性炭（AC））中，碳纳米管在 MW 下具有出色的热性能，初始升温速率最快，其催化活性与选择性也明显较高，在 Pt/CNT 催化系统中得到最大 H_2 析出量。研究发现：微波可以将 Pt/CNT 催化的反应体系加热到高于十氢萘沸点的温度，从而提高 Pt/CNT 催化剂在微波下的催化性能；CNT 凭借高纵横比和低体积密度结构，不仅赋予悬浮液强介电损耗能力以高效转化微波能，其高比表面特性更利于 Pt 纳米颗粒分散，从而协同提升催化剂的微波吸收与脱氢效率。Ichikawa 等[33]制备了一种与微波耦合的负载铂的球形碳催化剂用于甲基环己烷连续生产氢气，并研究了其在完全饱和环烷烃的高效脱氢芳构化中的应用。微波条件下不同材料的升温性能及两种加热模式下的催化剂催化性能随时间的变化如图 2（a），（b）所示。研究表明微波与球形碳载体相互作用，通过选择性吸波产生局部加热效应，其脱氢效率有效提高。通过传统加热装置将 MCH 在 5% Pt/CB 加热至相同温度，0.5 h 内仅产生 0.15 L H_2（收率 2%），而在 10 W 微波辐照条件下，0.5 h 内可产生约 1.80 L H_2（产率 25%），充分证明了微波辐照对提高 Pt/CB 催化 MCH 脱氢活性的促进作用。此外研究了在 10 W 照射下，5%Pt/CB 催化剂的升温速率，研究结果表明微波加热提高了 MCH 的脱氢效率和能量利用率，催化体系在 7 min 内迅速上升到 248 ℃。

Horikoshi 等[34]研究有机氢化物 MCH 在微波辐射下脱氢性能，微波存在条件下甲基环己烷脱氢超过 94%，微波加热在更短的时间内实现了氢的析出。如图 2（c），（d）所示，研究发现具有微波吸收能力的 Pd/AC 颗粒温度可达 557 ℃，MCH 才能达到 340 ℃并有效发生脱氢。大量的微波辐射直接作用于催化剂内部，与具有吸波能力的催化剂颗粒产生强相互作用，与传统加热模式相比，微波体系下反应体系更快达到反应所需温度从而强化脱氢过程。然而，在脱氢过程中催化剂颗粒内部的局部高温不利于催化剂的稳定性。

微波通过吸波载体（如碳材料、SiC 等）的介电损耗可快速提升催化剂颗粒内部温度，产生局部高温或热点效应，“热点效应”的存在能够迅速发生化学反应，从而提高催化效率。但单一吸波物质作为载体，热点效应使微波能主要集中在催化剂表面的某些点位上，导致催化剂整个颗粒温度高、可控性弱，造成活性组分聚集、催化剂活性降低、稳定性变差。因此开发新型催化剂结构，优化能量分布，实现靶向用能，并将其高效地传递给催化剂活性位点十分必要。

1.3 复合型催化剂

复合型催化剂通过结构设计将多种吸波材料与催化活性组分相结合，形成多种材料协同体系，通过多机制吸波协同，拓宽能量吸收频段，改善微波场中的能量分布均匀性，优化微波能量吸收、传递与利用效率，从而提升催化反应的活性。Shu 等[35]通过一步溶剂热法将平均直径为 250 nm 的 Fe_3O_4 微球均匀地锚

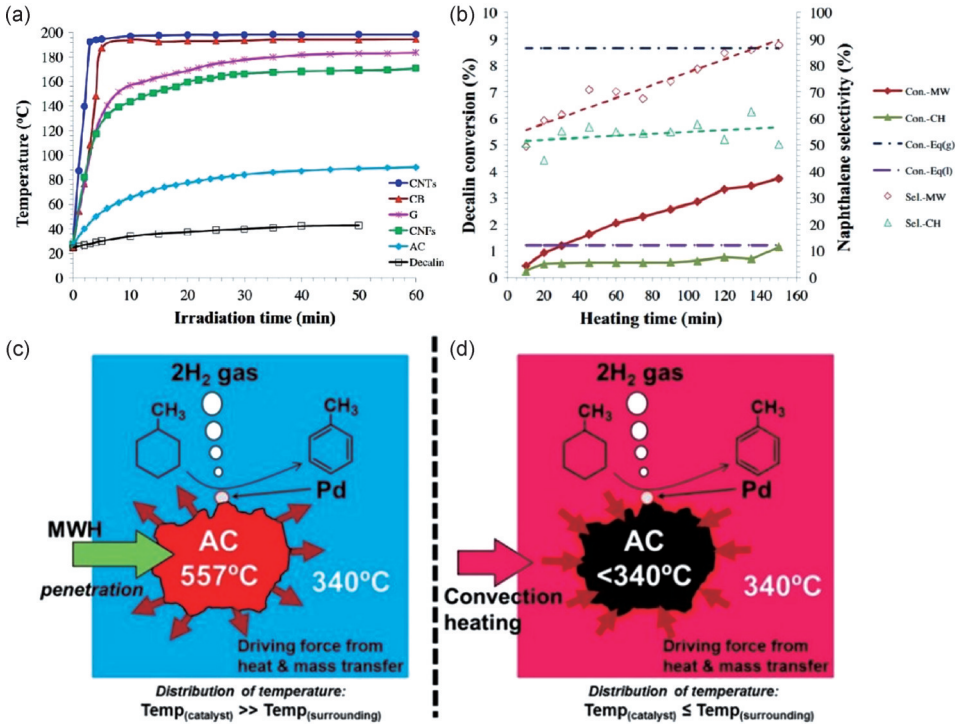


图2　微波((250±15) W)下四氢化萘中不同碳材料的温度曲线(a),在两种不同的加热条件下,Pt/CNT催化剂的十氢萘转化率和萘选择性随加热时间的变化图(b)[32],在微波加热下,热量从催化剂传递到周围环境(c)和在经典加热下,热量从周围环境传递到催化剂(d)的传热方向模型[34]

Fig.2　Temperature curves of different carbon materials in tetralin under microwave irradiation((250±15) W)(a) and variation of decalin conversion and naphthalene selectivity of Pt/CNT catalyst with heating time under two different heating conditions(b)[32],model of heat transfer direction of heat transfers from the catalyst to the surroundings under microwave heating(c) and heat transfers from the surroundings to the catalyst under classical convection heating[34]

定在RGO片表面,通过磁损耗与介电损耗协同吸收更宽频段,提高微波能量吸收效率。

CNT由于其出色的MW吸收能力、高比表面积和良好的导热性,是一种很有前途的MW响应催化剂的支撑材料。同样,磁铁矿(Fe_3O_4)也因其卓越的电磁性能、合适的饱和磁化强度和成本效益而被广泛用作MW响应催化剂的潜在载体物质[36-37]。Luo等[38]设计并合成了一系列复合型MW响应催化剂(CNTs-Fe_3O_4)-Co用于微波辅助$NaBH_4$水解制氢。实验结果表明,在40~60 ℃的温度范围内,MW辐照可导致(CNTs-Fe_3O_4)(1∶4)-Co(10%,质量分数,下同)催化剂的产氢速率与常规加热相比从75.0%提高到95.4%。MW辐照显著提高了催化剂反应界面处原子的有效碰撞频率,导致催化剂表面的活性位点数量增加。

MoS_2不仅是一种出色的微波吸收剂,而且在木质素转化为酚类方面也表现出高选择性。碳化三聚氰胺甲醛(CMF)树脂泡沫是一种低成本、质量轻、孔隙率高的碳基材料。Wang等[39]通过简单的一步水热法成功制备了具有纳米花微观结构的3D多孔Fe-MoS_2/CMF微波响应催化剂显著提高了苯酚(30.01%)和苯乙烯(16.34%)的选择性。有限元模拟表明,Fe-MoS_2/CMF催化剂可以通过在表面产生热点来增强局部热效应,从而促进木质素气相重整。

Yin等[40]采用简单的一步水热法合成了还原氧化石墨烯/CeO_2纳米复合材料(RGO/CeO_2),并研究了RGO/CeO_2的微波吸收性能。形貌和结构分析表明制备的RGO/CeO_2表现出优异的微波吸收性能。与原始RGO或纯CeO_2纳米颗粒相比,复合材料在2~18 GHz的频率范围内实现了更宽和更强的波吸收(17 GHz,最佳反射损耗RL:−32 dB)。增强的微波吸收性能归因于RGO/CeO_2中CeO_2的较高氧空位浓度以及在CeO_2和RGO片材之间的多界面中发生的多重界面极化。Feng等[41]构建了一种CoZn合金纳米颗粒/N掺杂多孔碳复合材料,并研究了其多孔结构对介电和磁性能的影响。研究表明,该复合材料电磁波吸收能力的增强归因于多孔碳中丰富的碳-空气界面,另外多孔结构可通过孔道尺寸调控微波穿透深度,证实了多孔结构对碳材料的介电性能有很大影响,为新型多孔电磁波吸收材料的设计提供了新的思路。

Shi 等[42]制备了石墨-CNT 复合材料作为微波辅助十氢萘脱氢催化剂，石墨-CNT 复合催化剂示意图及微波辅助其脱氢的性能如图 3 所示，石墨-CNT 复合材料通过与微波的特异性耦合作用，实现了反应体系温度提升。十氢萘脱氢反应是强吸热反应，较高的温度和较低的氢压力在热力学和动力学上加速反应。负载在 rGO-CNT0.17 复合材料上的 Pt 催化剂表现出最佳的氢释放催化性能，其出色的催化活性可归因于在 rGO 和 CNT 之间形成丰富的界面，界面可以沉积具有优异催化活性的 Pt 纳米颗粒。另外，研究表明，将导电 CNT 纤维引入还原氧化石墨烯（rGO）片上构建了桥接网络，形成了有效的导电网络，从而改善复合材料的介电性能。因此，微波吸收性能大大增强。

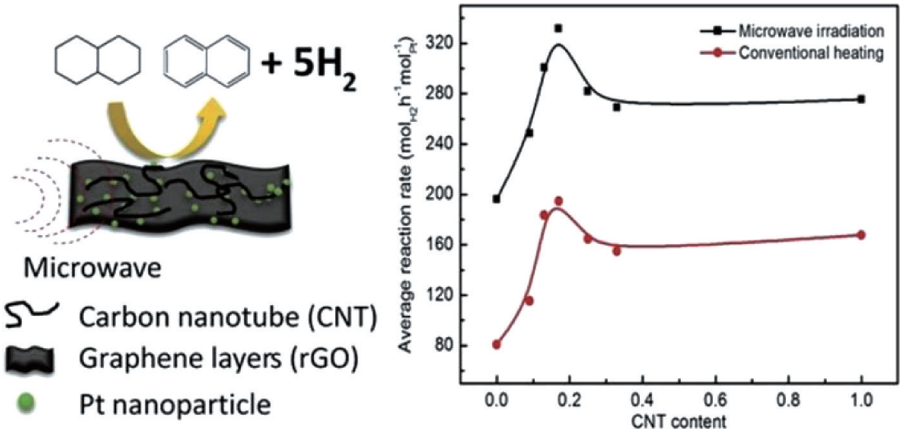


图 3 石墨-CNT 复合催化剂示意图及微波辅助其催化十氢萘脱氢性能[42]

Fig.3 Schematic illustration of the graphite-CNT composite catalyst and its microwave-assisted dehydrogenation performance for decalin[42]

1.4 结构化催化剂

微波响应的结构化催化剂是一种将催化剂活性组分与具有特定几何结构的吸波载体结合，通过物理或化学手段实现微波能量高效吸收、传递与利用的功能材料。其核心在于通过结构化设计优化微波场中的能量分布、传质效率和反应动力学，从而显著提升催化性能。该结构催化剂通过在蜂窝状、泡沫金属、3D 打印网格等有序结构中负载或复合吸波材料，提供高比表面积和规则孔道，增强反应物扩散与微波穿透性的同时赋予载体微波吸收能力。Li[43]与 Chen 等[44]设计了一种新型微波响应的结构化催化剂，催化剂结构的示意图如图 4(a)～(c)所示。研究表明，在微波照射下，SiC 泡沫芯既用作微波吸附剂又用作催化剂载体，从而将产生的热能集中在发生催化反应的 ZSM-5 沸石外壳上。具有开放多孔结构的 SiC 泡沫还可以改善催化热解过程中的整体质量和热量传输[44]。研究表明，作为结构化反应器，碳化硅泡沫比填料配置具有更好的液体分散能力，从而提高了有效传质气液界面面积。Wei 等[45]通过将 ZIF-67/酚醛树脂有机前驱体涂覆到三聚氰胺泡沫自牺牲模板表面，经高温退火成功获得蜂窝状磁性泡沫碳，磁性 Co 组分均匀嵌入石墨化碳层中。由蜂窝三维网络结构形成的内部空腔充当“阻抗匹配介质”，让更多的电磁能进入，同时为电磁波传导增加许多散射位点，实现了 14.22 GHz 的超宽带微波吸收。

1.5 核壳结构催化剂

核壳催化剂是一类具有双层或多层结构的复合纳米材料，一般由中心的核和包覆在外部的壳构成[46]。微波响应核壳催化剂是由吸波介质作为内核（负责吸收微波并转化为热能），催化活性层为外壳组成的复合结构材料，其独特的结构设计是实现微波吸收剂与微波催化耦合的有效方法[47]。一方面，核和壳之间的紧密连接使微波吸收器产生的热量能够迅速转移到壳层表面的催化位点，以加速反应。另一方面，有效利用微波热点，减弱内部的微波吸收核心对壳表面催化活性位点的干扰。Ji 等[48]以碳纳米管（CNTs）作为微波吸收器芯，以 TiO_2/SO_4^{2-} 作为催化活性壳层，合成了一种微波响应核壳结构的 CNTs/TiO_2 催化剂。研究表明，CNTs 的空心管结构促进管内的微波反射，提高了整体的微波吸收性能，较薄的 TiO_2 层有利于达到更高的反应温度以及反应转化率和产率。反应达到平衡后，最高能量效率为 4.2 mol/(kJ·L)，在相同的 15 W 功率水平下，比纯 TiO_2 高 6 倍，比 CNT 高 4 倍。

微波耦合核壳型催化剂直接作用于内核吸波介质，快速选择性加热实现能量高效定向传输，减少传统热传导损失，有效降低能耗；同时热点效应的存在，降低反应温度与活化能。Chen 等[49]报道了一种新型

微波催化剂——通过原位形成核壳Mo_2N-MoC@SiO_2催化剂。研究表明核壳Mo_2N-MoC@SiO_2催化剂表现出优异的微波选择性催化效果和稳定性。在微波照射下，微波响应核壳Mo_2N-MoC@SiO_2催化打破反应的化学平衡限制，表观活化能降低至16.9 kJ/mol。Liu等[50]以β-MnO_2为强微波吸收核，HZSM-5分子筛为催化活性壳层制备了微波响应核壳分子筛催化剂。通过优化壁厚和微波吸收芯的量成功制备了具有超薄沸石壳和显著增强产热能力的核壳催化剂，有效降低微波吸收芯与壳表面催化位点之间的传热阻力。与传统的表面负载催化剂相比，新型核壳催化剂在微波辅助烷基化反应中将甲苯转化率提高了44%，对二甲苯(PX)选择性提高了66%。β-MnO_2@zeolite核壳结构催化剂的性能及传热传质机理图如图4(d)～(f)[50]所示。核壳催化剂的优异催化性能是由于微波热点和催化位点的有效耦合。数值模拟研究表明，核壳结构催化剂呈现出内高外低的温度分布特征，这种独特的温度梯度促进了PX从沸石内部孔道向气相的定向扩散，缩短了PX在微孔通道中的停留时间，从而有效抑制异构化副反应，显著提升PX选择性。与此同时，产物的快速扩散确保了其与微孔内酸性位点的及时分离，从而避免了过度反应导致的积碳现象，有效防止酸性位点覆盖和孔道阻塞，显著提升了反应转化率与选择性。这种内高外低的温度梯度特性，一方面促进了微孔内的择形催化过程，另一方面抑制了沸石外表面非择形催化位点的副反应，从而协同提高了反应选择性。由此可见，核壳结构沸石催化剂通过精准调控微孔内反应活化与外表面反应抑制，展现出独特的双重优势。

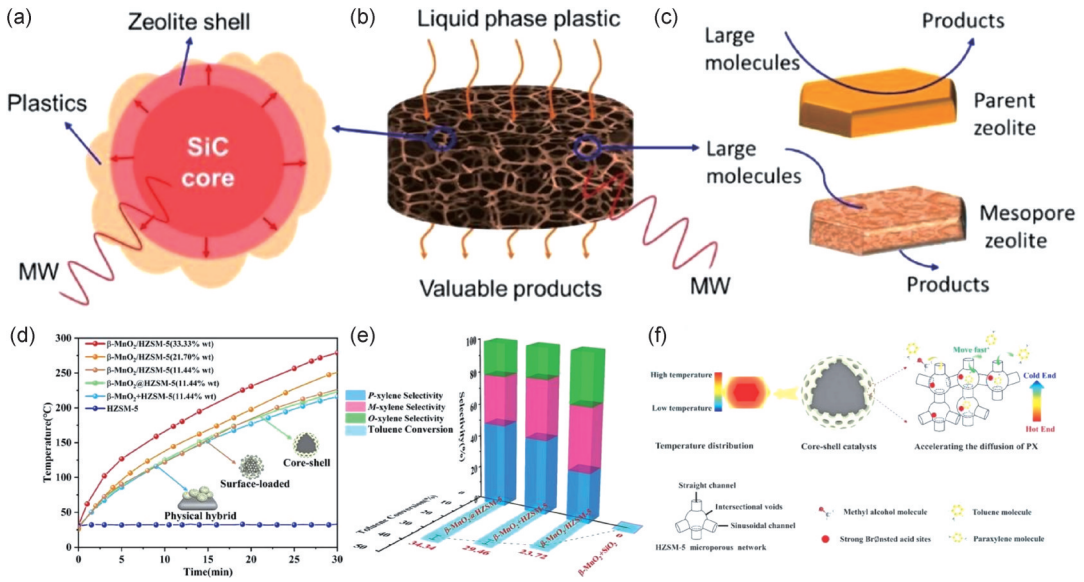


图4　催化剂传热传质机理

(a)反应器尺度的全局传递；(b)中尺度的定向传热；(c)纳米尺度的内部扩散[44]；(d)不同类型催化剂在石英反应管中的加热曲线；(e)不同催化剂的MW辅助烷基化反应结果；(f)β-MnO_2@zeolite核壳结构催化剂的传热传质机理图[50]

Fig.4　Heat and mass transfer mechanism of catalysts

(a)global transport in reactor scale; (b)directional heat transfer in mesoscale; (c)internal diffusion in nanoscale[44]; (d)heating curves for different types of catalysts in quartz reaction tubes; (e)MW-assisted alkylation reaction results with different catalysts; (f)heat and mass transfer mechanism diagram for the β-MnO_2@zeolite catalysts with core-shell structure[50]

微波响应催化剂的吸波性能不仅依赖材料本征特性(如介电/磁损耗)，还与活性位点-载体界面电子传输密切相关。Li等[51]采用水热法通过静电自组装合成了不同空位浓度的$Ti_3C_2T_x$ MXene@$ZnIn_2S_4$异质结构。图5[51,53]展示了两种催化剂的微波吸收机制，为阐释其在微波场下的能量转化及脱氢性能差异提供了核心理论依据。研究表明，空位可以触发不饱和活性位点，作为电子陷阱优化电子传输和偶极化，并通过偶极极化耗散电磁能量。界面结构优化设计影响能带结构和界面极化，电荷积累和转移在异质界面附近，影响电荷载流子的定向传输。同时，由电荷不平衡分布形成的内置电场引起了电磁波的极化弛豫效应，从而影响导电损耗和极化损耗[52-53]。界面和空位设计协同优化界面电子效应，异质结构的电磁吸收性能得到了有效提高，在1.6 mm厚度下，有效吸收带宽达到4.8 GHz，比纯MXene高96%。

MOF衍生材料的特殊多孔/空心形态及独特的界面结构有利于开发具有增强阻抗匹配的轻质吸收器，

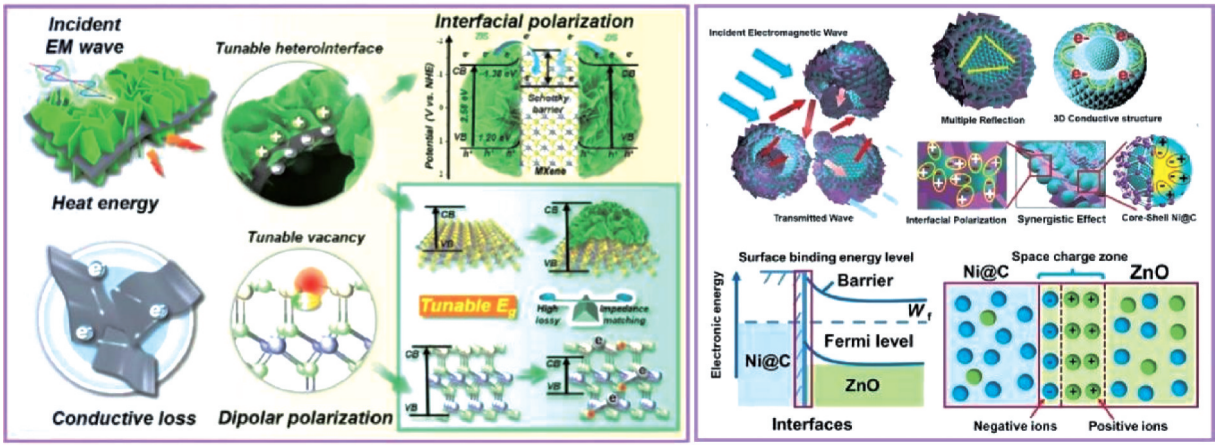


图5 两种催化剂的微波吸收机制图[51,53]

Fig.5 Schematic diagrams of microwave absorption mechanisms for two catalysts[51,53]

在微波吸收领域受到越来越多的关注。Wang等[54]成功制备了一种新型多级多界面Ni@C@ZnO高微波吸收性能微球。独特的蛋黄壳微球由核壳Ni@C微单元和ZnO薄片组装在一起，均匀分散的ZnO薄片锚定在多级导电碳基体内。出色的微波吸收性能可归因于Ni-C-ZnO的界面极化和石墨化碳基体的电子传输。Ni@C@ZnO蛋黄壳结构通过多级协同设计实现了高效微波吸收：其MOF衍生的多孔碳基体锚定ZnO纳米片，暴露高活性表面并引发界面极化，而内核金属Ni提供磁损耗，结合分层孔隙与梯度阻抗匹配，使电磁波深度渗透并多重耗散。

$ZnFe_2O_4$(ZFO)作为一种典型的铁氧体尖晶石，具有优异的磁性能、较强的MW吸收能力和较宽的响应频带。$ZnIn_2S_4$(ZIS)被认为是一种很有前途的Cr(Ⅵ)还原光催化催化剂，具有优异的导电性和高比表面积，具有丰富的Cr(Ⅵ)活性吸附位点和优异的e^-转移能力。Zhang等[55]将两者结合设计了一类新型微波响应核/壳结构催化剂ZFO@ZIS，用于Cr(Ⅵ)水溶液还原。研究表明，该催化剂表现出高MW催化活性。ZFO@ZIS核壳催化剂通过独特的结构设计实现微波催化性能的协同提升：ZFO核提供优异的微波吸收能力，而花状ZIS壳层通过增大比表面积显著增强Cr(Ⅵ)吸附，并促进ZFO激发电子的转移。该复合材料的卓越催化活性源于良好的阻抗匹配和微波诱导的“热点”效应。

微波响应核壳催化剂通过“吸波-催化”功能分离与界面协同，实现了微波能量的定向传递与高效利用，其优势体现在能量局域化增强、热点分布均匀、电子效应优化及长效稳定性。当前，微波响应催化剂在LOHCs脱氢中的应用研究虽处于初步探索阶段，但已展现出独特的优势，如高效能量传递、催化效率和潜在的节能特性。然而，新型微波响应催化剂的设计、催化剂微波吸收机制、结构与性能的关联规律，以及规模化应用的可行性制约了微波催化技术在LOHCs脱氢领域的实际应用进程，仍需深入探索。

2 微波吸收性能

微波吸收能力作为影响微波响应催化剂催化效率的关键因素，直接决定了微波能量向反应体系的传递效率以及局部热点的生成效果。当电磁波投射到吸收剂表面时，部分微波在表面发生反射，入射吸收剂涂层内的微波通过介电损耗和磁损耗以及多重反射等物理损耗形式转化为热能，而未被转化的微波能量则穿过材料内部，成为透射波。一般来说，决定微波吸收性能因素有2个：阻抗匹配(Z)与衰减常数(α)。其中，具有良好阻抗匹配的微波吸收材料能够使到达材料表面的入射微波尽可能地被吸收，使其进入材料内部，减少微波的反射。衰减常数用来反应微波吸收材料对微波的损耗能力，在相同阻抗匹配的条件下，衰减常数的值越大，微波吸收材料对微波的衰减能力越强。基于电磁波传输理论，介电常数和磁导率的虚部越大，同时介电常数和磁导率的实部越小，材料的电磁衰减能力越强。两者关系的表达式如式(1)，(2)所示[56]：

$$Z=Z_{in}/Z_0=\sqrt{\mu/\varepsilon}\ \mathrm{th}(2(\pi/\lambda)\sqrt{\varepsilon\mu}\ ) \tag{1}$$

$$\alpha=\frac{\sqrt{2}\,\pi f}{c}\sqrt{(\mu''\varepsilon''-\mu'\varepsilon')+\sqrt{(\mu''\varepsilon''-\mu'\varepsilon')^2+(\mu'\varepsilon''+\mu''\varepsilon')^2}} \tag{2}$$

式中：空气阻抗Z_0为定值；ε为复介电常数；μ为复磁导率，$\mu=\mu'-\mathrm{j}\mu''$，$\varepsilon=\varepsilon'-\mathrm{j}\varepsilon''$，其中$\mu'$和$\varepsilon'$分别为材料的磁导率实部和介电常数实部；$\mu''$和$\varepsilon''$分别材料磁导率

虚部和介电常数虚部,作为衡量材料的本征磁损耗和介电损耗强弱的参量;f为微波频率,Hz;c为光速。

因此,为了满足吸收材料对电磁波最大限度的吸收,需从介电损耗、磁损耗、阻抗匹配特性等核心参数入手,结合催化剂结构与微波场相互作用的微观机制分析,对其进行微波吸收性能评价,为高效微波响应催化剂的设计提供理论依据。

2.1　材料介电/磁性能测试

催化剂的介电损耗和磁损耗在决定微波吸收性能方面起重要作用。介电损耗反映电场能量转化为热能的效率,磁损耗则反映磁场能量耗散效率。样品电磁参数可使用矢量网络分析仪(VNA)测试,矢量网络分析法通过测量材料在微波频段(2~18 GHz)的散射参数,结合传输线理论计算复介电常数和复磁导率,从而定量表征材料的电磁波吸收性能。该方法具有频域分辨率高(±0.1 dB)、数据定量准确的优点,适用于精确测量材料的电磁特性,但需样品均匀成型且无法反映实际动态温升过程。Fe_2O_3对微波有一定的吸收作用,可增强复合材料的吸收性能。Wang等[57]采用矢量网络分析对制备的Fe_2O_3负载钙钛矿插层蒙脱土(MMT)复合催化剂进行微波吸收性能分析,研究几种催化剂的反射损耗RL、介电损耗和磁损耗的正切值之间的关系及其随频率的变化。较大的负反射损耗以及较强的介电损耗和磁滞损耗表明材料微波吸收性能越好[58]。Lu等[59]使用矢量网络分析仪(VNA)测试了整体式$La_mMn_nO_x$/CH催化剂的微波吸收性能,并研究了其与催化活性之间的关系。VNA测试获得的介电损耗参数可反映催化剂在微波辐照下的极化能力,较高的介电损耗表明材料具有更强的极化特性。研究表明,在微波辐射下,该催化剂强烈吸收微波能量,在催化剂表面形成热点,使床层温度迅速升高,反应物分子在La、Mn活性位点及氧空位上的吸附强度随床层温度升高而增强,同时微波极化效应使吸附态反应物从局域热点获取能量,显著降低其反应活化能。研究证实,“微波-催化剂”协同作用提升了催化活性。

阻抗匹配比(Z_r)和α是决定微波吸收能力的两个关键因素,分别决定了微波吸收效率和吸收体衰减入射电磁波的能力。Li等[60]以三聚氰胺泡沫碳化中获得的网状泡沫碳(RCF)为网状模板,制备双层中空网状SiC泡沫(DHRSF)用作高性能微波吸收器。使用同轴方法在矢量网络分析仪上对2~18 GHz频率范围内的电磁参数进行测量,并对决定微波吸收性能的两个重要参数进行研究[61]。RCF和DHRSF阻抗匹配比曲线和衰减常数曲线如图6[60]所示。对于DHRSF,较高的阻抗匹配比保证了大量的微波可以进入,然后微波衰减开始生效,最终使DHRSF表现出优异的微波吸收性能。研究总结了特殊结构的微波响应机理,为先进微波响应催化剂的结构优化提供了实际参考。

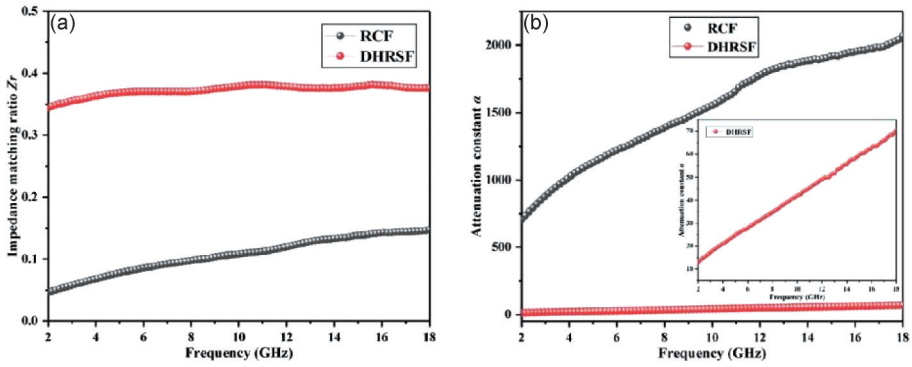


图6　RCF和DHRSF的阻抗匹配比曲线(a)和衰减常数曲线(b)[60]

Fig.6　Impedance matching ratio curves(a)and attenuation constant curves(b)for RCF and DHRSF[60]

2.2　微波热响应表征

红外热像仪(IRT)通过检测材料表面红外辐射,实时、非接触的温度监测,原位记录样品的整个加热过程,收集样品表面的热波数据生成热图像,为微波吸收材料的性能评估提供直观手段。红外热像测试时,将催化剂粉末均匀平铺于石英皿,置于微波反应腔中心。设定微波功率(如800 W)辐照,用红外相机以≥30 Hz帧率同步采集热图,实时记录样品表面温度场分布特征及动态热点演变过程。该方法采用非接触测量,避免干扰微波场分布;瞬态响应,可捕捉毫秒级温变,直观反映实际工况下的热效应;适用于比较不同材料的吸波产热能力,可与VNA测试形成互补性说明,但该方法仅能定性分析无法获取电磁参数本征值。Pan等[62]为了证明PMMA/Ni@GNP复合材

料的微波吸收性能，使用IRT方法原位记录了复合材料表面温度在加热过程中随时间的变化。样品的红外热图像及样品温度变化情况如图7(a)～(c)所示，发现样品在初始加热阶段的平均加热速率从65.4 ℃/min增加到103.2 ℃/min，表明由于掺入了Ni@GNP纳米杂化物，PMMA复合材料的热导率得到了有效增强。结合反射损耗实验表明PMMA/Ni@GNP复合材料具有良好的微波吸收性能。

微波量热实验通过测量材料在微波场中的温升速率和热量积累，直接反映其将微波能转化为热能的能力，也是衡量微波响应催化剂吸波性能的有效手段。Liu等[63]采用实验室设计的微波加热设备，在样品中心插入K型护套热电偶以测量温度。温升情况如图7(d)～(f)所示，其结论结合电磁参数测试和实际催化效果验证，全面评估“吸波-催化”协同效应。

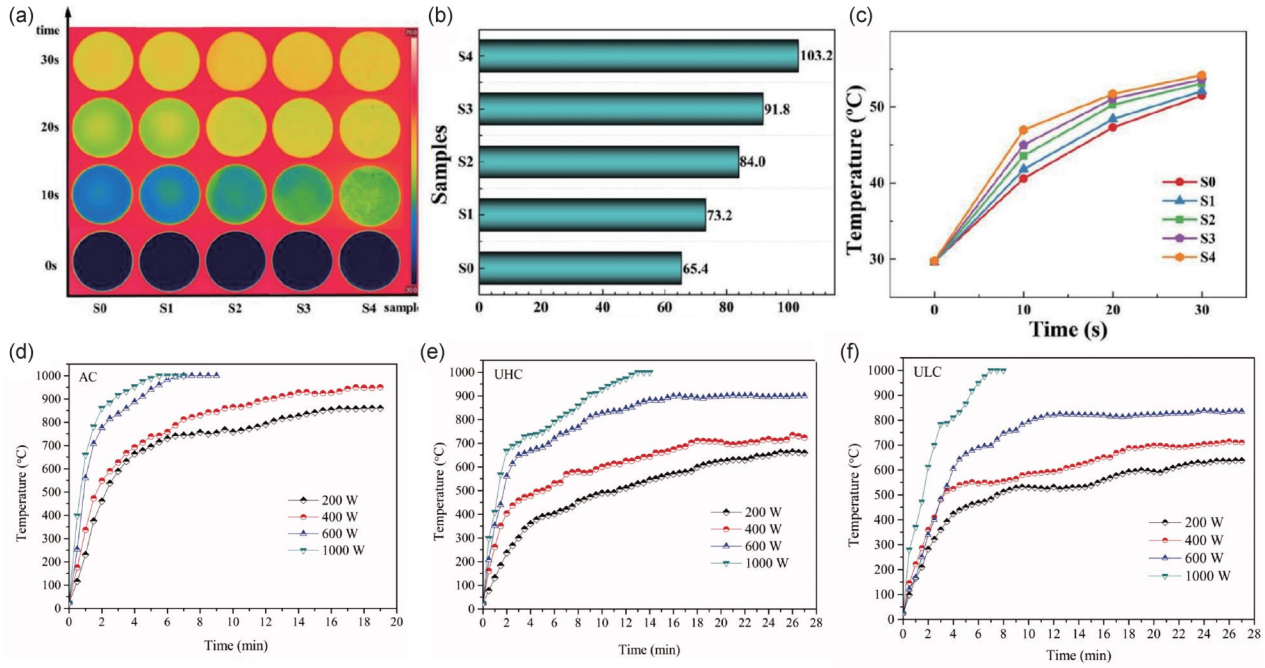


图7 微波热响应表征

(a)加热过程中的红外热图像；(b)平均加热速率(AHRs)；(c)样品表面温度与加热时间的关系[62]；(d)～(f)不同输入功率下，不同催化剂的温度与微波加热时间的关系图[63]

Fig.7 Characterization of microwave thermal response

(a)infrared thermal images during heating; (b)average heating rates (AHRs); (c)relationship between surface temperatures and heating time[62]; (d)-(f)plots of relationship between temperature and microwave heating time for different catalysts under varying input power levels[63]

2.3 模拟计算

实验测试提供真实的性能数据，但微观尺度的电磁相互作用难以测量。有限元模拟关联宏观微波吸收性能与微观电磁参数的定量关系，并实时分析微波场分布及电磁—热耦合效应；模拟分析与实验在材料微波吸收性能研究中优势互补[11,64]，为高效微波吸收催化剂的设计与优化提供了强有力的理论支撑。有限元模拟分析催化剂的微波吸收性能通过电磁场数值建模(如COMSOL、CST等)，在特定微波频率(如X波段10 GHz)下通过构建催化剂几何结构，计算其电流密度分布、电磁损耗功率密度及阻抗匹配特性。模拟结果可直观指导催化剂结构设计(如孔隙率、层厚梯度)，为平衡介电/磁损耗协同效应、提升微波能量定向吸收效率提供理论依据。Tang等[65]根据样品的TEM和SEM图像构建简化的3D模型，在有限元软件包COMSOL环境中使用Maxwell方程进行理论计算，通过电磁有限元模拟可视化了吸收体和微波之间相互作用的影响。根据焦耳定律，热能与电流强度的平方成正比，电流强度是微波衰减的主要模式，因此表面电流分布可用于测量微波的衰减能力。可以观察到，YS-NiFe/GC@C-2具有最高的电流密度，并且内部分布均匀，表明适当厚度的非晶碳层可以激发更好的感应电流密度和电磁衰减能力。同时，它还模拟了3个吸收体的电磁损耗功率密度，该密度与电流密度呈正相关，表明介电损耗是主要的损耗模式。图8展示了YS-NiFe/GC@C复合材料的电流密度及其截面、电磁功率损耗密度及其截面的电磁有限元仿真结果。

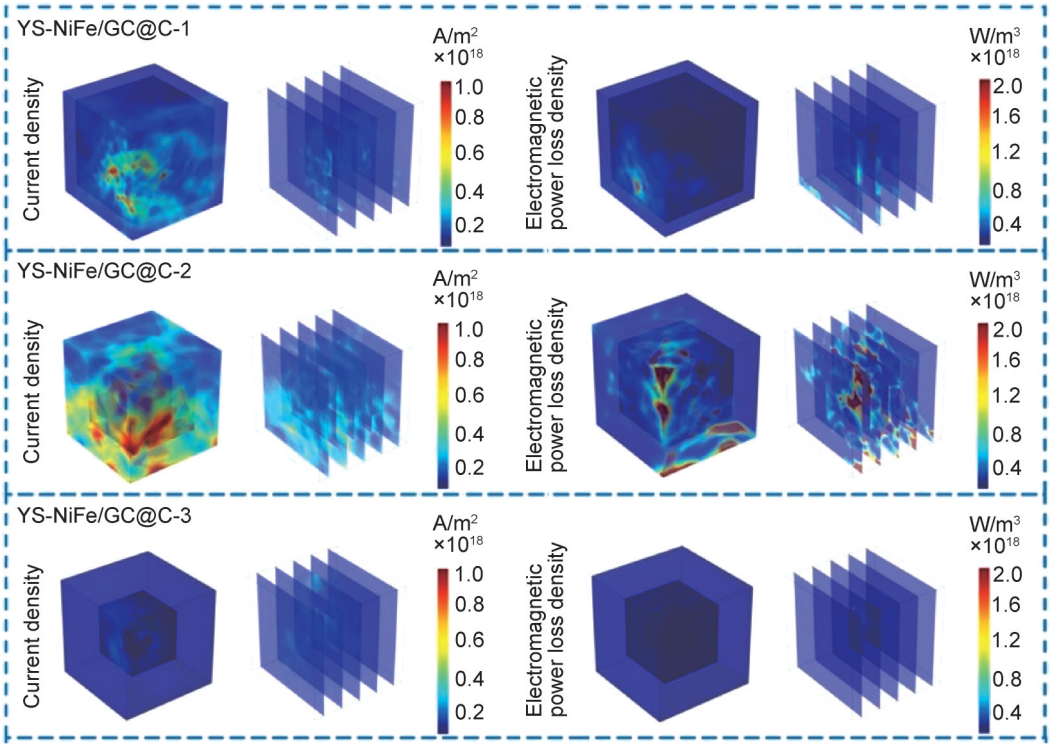


图8　电磁有限元仿真：YS-NiFe/GC@C复合材料的电流密度和相应截面、电磁功率损耗密度和相应截面[65]

Fig.8　Electromagnetic finite element simulation: current density and corresponding sections, electromagnetic power loss density and corresponding sections of YS-NiFe/GC@C composites[65]

CST仿真通过建立催化剂的多层电磁模型，结合实测复介电常数与复磁导率参数，采用频域求解器模拟2～18 GHz微波在材料中的传播特性。通过分析反射损耗、阻抗匹配及电场/磁场能量分布，量化催化剂对微波的衰减能力，并结合焦耳热模型揭示介电/磁损耗的协同机制。Geng等[66]利用电磁仿真软件CST Microwave Studio结合MATLAB优化构建了MMA-LE-1M和MMA-LE-2M模型，并使用频域求解器对其进行了求解。通过使用阻抗匹配理论和仿真软件分析微波吸收特性，评估了MMA-LEs的微波吸收性能。仿真与实验相结合为优化催化剂结构提升微波能量局域化效率提供理论指导。Pattanayak等[67]使用CST Microwave Studio（CST MWS）电磁仿真软件作为仿真工具，研究了不同木炭填料负载量的玉米壳的微波吸收性能。模拟结果显示了最佳回波损耗点处的电场密度与表面电流密度分布特征，识别出平行/反平行表面电流产生的强局域电磁场（S6样品在19.22 GHz处反射损耗达－50.27 dB），并量化了木炭填料（0%～4.44%）对界面极化损耗的增强作用（吸收率96.94%～99.20%）。模拟结果与实验数据相结合，不仅验证了“反射损耗＜－10 dB（吸收率＞90%）”的标准，更通过多物理场可视化解析了“传导损耗—偶极极化—界面极化”的协同机制，为吸波材料的理性设计提供了可靠的计算指导。

3　总结与展望

LOHCs脱氢是强吸热反应，依赖高温实现高效转化，高效利用微波能量可突破反应平衡及传质传热限制，实现温和条件下的高效脱氢。本文系统综述了物理混合型、吸波介质作为载体、复合型、结构化、核壳型几种新型微波响应催化剂在微波能量利用方面的研究进展，并分析了其在微波辅助LOHCs脱氢反应中的优势与挑战。采用物理混合型催化剂策略，通过微波吸收组分与催化活性载体的协同耦合，实现了微波能量的高效转化与催化反应的同步强化；但此类催化剂驱动反应所需的热能，需经由固-固界面传热途径从微波吸收剂传递至催化活性位点。以吸波介质直接作为催化剂载体的设计策略，通过“能量-传质-结构”协同优化，是突破传热传质瓶颈的核心技术。然而，单一吸波物质作为载体，其强热点效应易导致微波能集中在催化剂表面的局部点位上，引发颗粒整体温升过高造成活性组分聚集。复合型催化剂通过将多种吸波材料与催化活性组分相结合，形成多种材料协同体系，通过多机制吸波协同拓宽能量吸收频段，优化微波能量吸收。结构化微波响应催化剂通过在

蜂窝状、泡沫金属、3D打印网格等有序结构中负载或复合吸波材料，提供高比表面积和规则孔道，增强反应物扩散与微波穿透性，从而显著提升微波响应性能与催化性能。核壳型催化剂通过核壳材料介电性能差异与微波能量梯级耦合，提高催化性能。这些催化剂结构设计及微波吸波性能与能量分布优化为有机液态氢载体脱氢技术的发展提供新思路。此外，本文列举出量化微波吸收性能的几种方法为催化剂优化提供了重要指导。研究表明，通过优化催化剂结构设计，可显著提升微波能量吸收与局域化效率，进而改善催化性能，但微波响应催化剂在LOHCs脱氢反应的应用还比较少，高性能催化剂（如核壳结构、结构化催化剂）的制备与微波吸收性能的精准调控以及微波场中催化剂与反应物的相互作用机理尚未明晰。

微波响应催化技术的未来发展方向主要有下几方面：

（1）高效微波响应催化剂设计

开发多组分协同催化体系，结合介电损耗、磁损耗及界面效应，实现宽频强吸收；通过精准调控催化剂界面（如孔道结构、缺陷工程）优化阻抗匹配，提升微波能量定向传递效率。“界面-孔道”协同设计策略开发兼具高吸波性能和催化活性的材料，通过界面效应显著增强界面极化损耗，同时优化电子转移路径降低反应活化能；设计多级孔道结构可实现“微波场-反应物-催化剂”三者的高效耦合，使电磁能量在孔道内通过多重“反射-吸收”循环，最终协同提升微波催化效率；结合人工智能与高通量计算，加速高性能催化剂筛选与设计。通过高通量计算针对微波响应特性与脱氢催化性能的关键参数进行催化剂快速筛选；构建核壳结构、复合吸波载体或多孔结构等模型，批量计算不同组分比例、形貌尺寸、缺陷浓度下等条件下载体的介电响应特性，明确“组分-结构-吸波性能”的内在关联规律；在此基础上，整合高通量计算数据与实验数据构建标准化数据库，提取结构、电子结构及微波响应等描述符，借助人工智能技术逆向设计目标催化剂结构。

（2）微波耦合LOHCs脱氢技术

开发动态响应微波场的智能催化剂（如温敏/电磁敏材料），实现反应过程实时调控；将温敏、电磁敏等智能响应材料与催化活性组分/吸波载体协同耦合，使催化剂可根据微波场强度或反应体系状态（温度、反应物浓度）的变化，自发调节自身吸波性能与局域热点温度，进而实现对反应过程的实时动态调控。基于第一性原理、分子动力学理论以及有限元仿真等手段，多尺度解析微波场中“催化剂-反应物”动态作用机制；设计规模化微波反应器，通过优化反应器腔体结构、馈能方式及场强调控策略，解决穿透深度与能量分布均匀性问题，推动LOHCs实现低温、高效脱氢，为液态储氢商业化提供关键技术支撑。

参考文献

[1] LE T H, TRAN N, LEE H J. Development of liquid organic hydrogen carriers for hydrogen storage and transport [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(2): 1359.

[2] TULUHONG A, CHANG Q, XIE L, et al. Current status of green hydrogen production technology: A review [J]. Sustainability, 2024, 16(20): 9070.

[3] HE R J, DONG P, LIU M B, et al. Research on large-scale wind power consumption in the electricity market considering demand response and energy storage systems [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 10: 1025152.

[4] HANEISHI N, TSUBAKI S, ABE E, et al. Enhancement of fixed-bed flow reactions under microwave irradiation by local heating at the vicinal contact points of catalyst particles [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 222.

[5] WEI R, WANG P, ZHANG G S, et al. Microwave-responsive catalysts for wastewater treatment: a review [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382: 122781.

[6] LU Z X, LI K Y, YANG J E, et al. Unlocking the full potential of green catalysis: a novel thermosensitive catalytic system for ultrasonic-microwave liquefaction of woody biomass [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 215: 118678.

[7] ZHANG Q, SHANG H, XUE Z H, et al. The effect of microwave electric field on sulfur vacancies formation over the edge sites of Co/Ni-promoted and unpromoted MoS_2 catalysts through DFT investigations [J]. Fuel, 2022, 318: 123553.

[8] SUNG J S, CHOO K Y, KIM T H, et al. Comparative study on dehydrogenation of bulky, branched and polycondensed naphthenes for hydrogen storage in microwave and thermal modes [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(15): 4116-4121.

[9] GAO B T, GUO S H, HOU M, et al. Study on a potential hydrogen storage system: microwave-activated methylcyclohexane dehydrogenation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 79: 619-629.

[10] KUSTOV L M, TARASOV A L, KIRICHENKO O A. Microwave-activated dehydrogenation of perhydro-N-ethylcarbazol over bimetallic Pd-M/TiO_2 catalysts as the second stage of hydrogen storage in liquid substrates [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(43): 26723-26729.

[11] SUN J C, SHANG H, FAN X Y, et al. A multi-objective optimization of methylcyclohexane dehydrogenation *via* microwave-enhanced process: 3D multiphysics simulation and response surface methodology [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 112: 322-332.

[12] TANG L F, CHEN X L, TAO X X. Non-thermal effect of microwave on organic sulfur removal from coal by microwave with peroxyacetic acid [J]. Fuel, 2023, 338: 127262.

[13] DE LA HOZ A, DÍAZ-ORTIZ Á, MORENO A. Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects[J]. Chemical Society Reviews, 2005, 34(2): 164-178.

[14] WANG Q G, XU W T, MA Z C, et al. Highly effective direct dehydrogenation of propane to propylene by microwave catalysis at low temperature over Co-Sn/NC microwave catalyst[J]. ChemCatChem, 2021, 13(3): 1009-1022.

[15] ZHANG Q, SHANG H, ZHANG W H, et al. The influence of microwave electric field on the sulfur vacancy formation over MoS_2 clusters and the corresponding properties: a DFT study[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 234: 116441.

[16] HORIKOSHI S, OSAWA A, ABE M, et al. On the generation of hot-spots by microwave electric and magnetic fields and their impact on a microwave-assisted heterogeneous reaction in the presence of metallic Pd nanoparticles on an activated carbon support [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115(46): 23030-23035.

[17] SUTTISAWAT Y, HORIKOSHI S, SAKAI H, et al. Hydrogen production from tetralin over microwave-accelerated Pt-supported activated carbon[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(12): 6179-6183.

[18] DOMÍNGUEZ A, FIDALGO B, FERNÁNDEZ Y, et al. Microwave-assisted catalytic decomposition of methane over activated carbon for CO_2-free hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(18): 4792-4799.

[19] ZHANG X L, HAYWARD D O, MINGOS D M P. Effects of microwave dielectric heating on heterogeneous catalysis[J]. Catalysis Letters, 2003, 88(1): 33-38.

[20] SUN J C, SHANG H, MIAO C, et al. Microwave enhanced hydrogen production from liquid organic hydrogen carriers: a review [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2023, 190: 109432.

[21] 潘虹,胡磊,徐丽慧,等.绿色低温法制备Fe_3O_4及其复合材料吸波性能[J].材料工程,2025,53(4):150-162.
PAN H, HU L, XU L H, et al. Fe_3O_4 prepared by green low temperature method and its composites absorbing property[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(4): 150-162.

[22] 毕松,汤进,王鑫,等.共沉淀过程中镍锌添加比例对两步法制备的$Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$吸波性能的影响[J].材料工程,2019,47(4):91-96.
BI S, TANG J, WANG X, et al. Effect of proportion of nickel and zinc in coprecipitation method on absorption property of $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ prepared by two steps[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(4): 91-96.

[23] 贾海鹏,苏勋家,侯根良,等.石墨烯基磁性纳米复合材料的制备与微波吸收性能研究进展[J].材料工程,2013,41(5):89-93,100.
JIA H P, SU X J, HOU G L, et al. Progress in fabrication and microwave absorption capacity of graphene-based magnetic nanocomposites[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(5): 89-93, 100.

[24] MOHAMED B A, ELLIS N, KIM C S, et al. Microwave-assisted catalytic biomass pyrolysis: effects of catalyst mixtures[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 253: 226-234.

[25] LI Z Y, ZHONG Z P, ZHANG B, et al. Effect of alkali-treated HZSM-5 zeolite on the production of aromatic hydrocarbons from microwave assisted catalytic fast pyrolysis (MACFP) of rice husk [J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134605.

[26] JI T, TU R, MU L W, et al. Structurally tuning microwave absorption of core/shell structured CNT/polyaniline catalysts for energy efficient saccharide-HMF conversion[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, 220: 581-588.

[27] JING X D, DONG J Q, HUANG H L, et al. Interaction between feedstocks, absorbers and catalysts in the microwave pyrolysis process of waste plastics[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 291: 125857.

[28] 李天天,夏龙,黄小萧,等.介电损耗型微波吸收材料的研究进展[J].材料工程,2021,49(6):1-13.
LI T T, XIA L, HUANG X X, et al. Progress in dielectric loss microwave absorbing materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(6): 1-13.

[29] GE X W, LI H, LIU M Y, et al. Microwave-assisted catalytic alcoholysis of fructose to ethoxymethylfurfural (EMF) over carbon-based microwave-responsive catalyst[J]. Fuel Processing Technology, 2022, 233: 107305.

[30] ZHANG Y L, YANG C H, YAN X, et al. High-efficient microwave-assisted conversion of fructose to 5-hydroxymethylfurfural over rice straw-derived sulfonated porous carbonaceous catalyst[J]. Fuel, 2024, 373: 132348.

[31] JIE X Y, CHEN R J, BIDDLE T, et al. Size-dependent microwave heating and catalytic activity of fine iron particles in the deep dehydrogenation of hexadecane[J]. Chemistry of Materials, 2022, 34(10): 4682-4693.

[32] LI X, TUO Y X, LI P, et al. Effects of carbon support on microwave-assisted catalytic dehydrogenation of decalin[J]. Carbon, 2014, 67: 775-783.

[33] ICHIKAWA T, MATSUO T, TACHIKAWA T, et al. Microwave-mediated site-selective heating of spherical-carbon-bead-supported platinum for the continuous, efficient catalytic dehydrogenative aromatization of saturated cyclic hydrocarbons[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(3): 3052-3061.

[34] HORIKOSHI S, KAMATA M, SUMI T, et al. Selective heating of Pd/AC catalyst in heterogeneous systems for the microwave-assisted continuous hydrogen evolution from organic hydrides: temperature distribution in the fixed-bed reactor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(28): 12029-12037.

[35] SHU R W, WANG M, YANG Y Y, et al. Solvothermal synthesis of reduced graphene oxide/ferroferric oxide hybrid composites with enhanced microwave absorption properties[J]. Nano, 2017, 12(12): 1750144.

[36] NASOURI K, SHOUSHTARI A M. Designing, modeling and manufacturing of lightweight carbon nanotubes/polymer composite nanofibers for electromagnetic interference shielding application [J]. Composites Science and Technology, 2017, 145: 46-54.

[37] ADEBAYO L L, SOLEIMANI H, YAHYA N, et al. Recent ad-

vances in the development of Fe_3O_4-BASED microwave absorbing materials[J].Ceramics International,2020,46(2):1249-1268.

[38] LUO C L,LIU S,YANG G,et al.Microwave-accelerated hydrolysis for hydrogen production over a cobalt-loaded multi-walled carbon nanotube-magnetite composite catalyst[J]. Applied Energy,2023,333:120538.

[39] WANG W L,HUANG J L,FU Y S,et al.A 3D porous Fe-MoS_2/CMF catalyst for high-efficient catalytic reforming of lignin vapor by microwave irradiation[J].Applied Catalysis B:Environment and Energy,2023,333:122787.

[40] YIN Q,XING H L,SHU R W,et al.Enhanced microwave absorption properties of CeO_2 nanoparticles supported on reduced graphene oxide[J].Nano,2016,11(5):1650058.

[41] FENG W,WANG Y M,CHEN J C,et al. Metal organic framework-derived CoZn alloy/N-doped porous carbon nanocomposites:tunable surface area and electromagnetic wave absorption properties[J]. Journal of Materials Chemistry C,2018,6(1):10-18.

[42] SHI L J,LIU X J,TUO Y X,et al.Graphene-CNT composite as catalyst support for microwave-assisted hydrogen releasing from liquid organic hydride[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2017,42(27):17403-17413.

[43] LI H,WANG F Z,WANG C C,et al.Liquid flow behavior study in SiC foam corrugated sheet using a novel ultraviolet fluorescence technique coupled with CFD simulation[J].Chemical Engineering Science,2015,123:341-349.

[44] CHEN Z H,MONZAVI M,LATIFI M,et al. Microwave-responsive SiC foam@zeolite core-shell structured catalyst for catalytic pyrolysis of plastics[J]. Environmental Pollution,2022,307:119573.

[45] WEI B,WEI X F,WANG M Q,et al. Ultra-broadband microwave absorption of honeycomb-like three-dimensional carbon foams embedded with zero-dimensional magnetic quantum dots[J].Journal of Alloys and Compounds,2023,939:168781.

[46] 李彦兴.二氧化硅包裹的核壳结构纳米金属催化剂的制备及氨分解制氢研究[D].南京:南京大学,2011.
LI Y X. Silica encapsulated core-shell nanostructured metallic catalyst synthesis and application in CO_x-free H_2 production *via* NH_3 decomposition[D].Nanjing:Nanjing University,2011.

[47] 于明飞,姚伦标,卿玉长,等.核-壳结构Al_2O_3@CIPs的制备及其抗氧化性能和吸波性能[J].材料工程,2022,50(10):111-117.
YU M F,YAO L B,QING Y C,et al.Preparation of core-shell Al_2O_3@CIPs and its anti-oxidation properties and microwave absorbing performance[J]. Journal of Materials Engineering,2022,50(10):111-117.

[48] JI T,TU R,MU L W,et al. Enhancing energy efficiency in saccharide-HMF conversion with core/shell structured microwave responsive catalysts[J].ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2017,5(5):4352-4358.

[49] CHEN J N,XU W T,ZHU J,et al.Highly effective direct decomposition of H_2S by microwave catalysis on core-shell Mo_2N-MoC@SiO_2 microwave catalyst[J].Applied Catalysis B:Environment and Energy,2020,268:118454.

[50] LIU K,DING Q Y,WANG N,et al.Melting-salt crystallization assisted controllable synthesis of core-shell zeolite catalyst for effective coupling of microwave hotspot and catalytic active site[J]. Chemical Engineering Journal,2024,485:149985.

[51] LI X,WANG G H,LI Q,et al. Dual optimized $Ti_3C_2T_x$ MXene@$ZnIn_2S_4$ heterostructure based on interface and vacancy engineering for improving electromagnetic absorption[J]. Chemical Engineering Journal,2023,453:139488.

[52] LU X K,LI X,ZHU W J,et al.Construction of embedded heterostructures in biomass-derived carbon frameworks for enhancing electromagnetic wave absorption[J].Carbon,2022,191:600-609.

[53] ZHAO Y,ZUO G,WANG Y,et al. Ultrathin $ZnIn_2S_4$ nanosheets anchored on $Ti_3C_2T_x$ MXene for photocatalytic H_2 evolution[J]. 2020,59(28):11287-11292.

[54] WANG L,YU X F,LI X,et al. MOF-derived yolk-shell Ni@C@ZnO schottky contact structure for enhanced microwave absorption[J].Chemical Engineering Journal,2020,383:123099.

[55] ZHANG J Z,YUAN G Q,WANG H H,et al. Preparation of core/shell-structured $ZnFe_2O_4$@$ZnIn_2S_4$ catalysts and its ultrafast microwave catalytic reduction performance for aqueous Cr(Ⅵ)[J].Chemical Engineering Journal,2023,451:138182.

[56] 贺改花.锰氧化物复合材料制备及其吸波性能研究[D].大连:大连理工大学,2020.
HE G H.Synthesis and microwave absorption properties of manganese oxide composites[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2020.

[57] WANG Y,WANG R T,LIN N P,et al. Highly efficient microwave-assisted Fenton degradation bisphenol A using iron oxide modified double perovskite intercalated montmorillonite composite nanomaterial as catalyst[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2021,594:446-459.

[58] GAO Y,CONG S B,YU H Y,et al.Investigation on microwave absorbing properties of 3D C@$ZnCo_2O_4$ as a highly active heterogenous catalyst and the degradation of ciprofloxacin by activated persulfate process[J]. Separation and Purification Technology,2021,262:118330.

[59] LU X G,BO L L,LUO M Y,et al.Microwave-absorbing property, chemical adsorption, and catalytic activity of monolithic $La_mMn_nO_x$ catalyst in microwave catalytic combustion of toluene[J].Separation and Purification Technology,2025,359:130627.

[60] LI B B,MAO B X,HE T,et al.Preparation and microwave absorption properties of double-layer hollow reticulated SiC foam[J].ACS Applied Electronic Materials,2019,1(10):2140-2149.

[61] ZHANG X J,WANG S W,WANG G S,et al.Facile synthesis of NiS_2@MoS_2 core-shell nanospheres for effective enhancement in microwave absorption[J]. RSC Advances,2017,7(36):22454-22460.

[62] PAN Y,YANG B,JIA N,et al.Enhanced thermally conductive and microwave absorbing properties of polymethyl methacrylate/Ni@GNP nanocomposites[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2021,60(33):12316-12327.

[63] LIU C,LIU C H,ZHANG L B,et al.Microwave heating behaviors of used mercury-containing catalysts[J].Chemical Engineer-

ing Communications，2018，205(12)：1653-1664.

[64] 孙建辰，杨捷，李军，等. 催化剂颗粒排列方式对微波加热效果的影响[J]. 化工进展，2025，44(1)：57-65.
SUN J C，YANG J，LI J，et al. Effect of catalyst particle arrangements on microwave heating[J]. Chemical Industry and Engineering Progress，2025，44(1)：57-65.

[65] TANG C H，MA W J，HE P，et al. Encapsulated Prussian blue analogs derived nanocubes with tunable yolk-shell structure enabling highly efficient microwave absorption [J]. Carbon，2023，215：118462.

[66] GENG Y C，HAN X，WANG J B，et al. Metamaterial-based radar-infrared camouflage material for building insulation：design and performance analysis [J]. Journal of Building Engineering，2024，98：111088.

[67] PATTANAYAK S S，LASKAR S H，SAHOO S. Microwave absorption performance enhancement of corn husk-based microwave absorber[J]. Journal of Materials Science：Materials in Electronics，2021，32(1)：1150-1160.

基金项目：碳中和联合研究院自主基金(CNIF20240102)
收稿日期：2025-04-22；**录用日期**：2025-11-18
通讯作者：商辉(1974—)，女，教授，博士，主要研究微波强化、清洁能源生产，联系地址：北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)化学工程与环境学院(102249)，E-mail：huishang@cup.edu.cn

(本文责编：齐　新)