

科研与开发

等离子体协同双金属催化剂氨分解制氢的性能研究

田世豪¹, 杨飞¹, 方柳肖¹, 房文健², 顾明言¹, 黄庠永^{1*}

(1. 安徽工业大学能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002;

2. 扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要:以 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{RuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 和 Y_2O_3 为原料, 采用浸渍法制备了以 Y_2O_3 为载体、不同 Ni-Ru 摩尔比(7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7)及不同总负载量(质量分数 1%~5%)的系列 Ni-Ru/ Y_2O_3 双金属催化剂。利用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)及能量色散 X 射线光谱(EDS)对优选催化剂的晶体结构、表面形貌及元素分布进行了表征。结果表明, 7Ni-3Ru/ Y_2O_3 -1% 催化剂在等离子体协同下展现出优越性能, 在 45 W 等离子体功率时氨转化率达到 85%。

关键词: 氨分解制氢; 浸渍法; 等离子体辅助催化; 双金属催化剂; Ni-Ru

中图分类号: O643

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)05-0087-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.016

Study on the performance of plasma-assisted bimetallic catalysts for hydrogen production via ammonia decomposition

TIAN Shi-hao¹, YANG Fei¹, FANG Liu-xiao¹, FANG Wen-jian²,
GU Ming-yan¹, HUANG Xiang-yong^{1*}

(1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;

2. School of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: A series of Ni-Ru/ Y_2O_3 bimetallic catalysts with varying Ni/Ru molar ratios (7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7) and total metal loadings (1%~5%) were prepared via the incipient wetness impregnation method using $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{RuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, and Y_2O_3 as precursors. The crystalline structure, surface morphology, and elemental distribution of the optimal catalysts were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDS). The results demonstrate that under plasma activation, the 7Ni-3Ru/ Y_2O_3 -1% catalyst exhibits superior catalytic performance, achieving an ammonia conversion of 85% at a plasma power input of 45 W.

Key words: ammonia decomposition for hydrogen production; impregnation method; plasma-assisted catalysis; bimetallic catalyst; Ni-Ru

在全球能源结构加速调整、“碳中和”目标引领的大背景下,清洁能源开发成为关键任务。氢能作为理想的清洁能源,具有能量密度高、燃烧产物无污染等突出优势,在诸多领域应用前景广阔,被视为未来能源体系的核心^[1]。氢气因其高氢质量密度(质量分数 17.7%)、易液化便于存储运输、分解产物无碳污染等特性,成为极具潜力的储氢和制氢载体^[2]。通过氨分解获取氢气,能为氢能供应开辟新途径,符合可持续发展的能源战略需求。

目前,热催化是最为成熟的氨分解制氢方法^[3],该方法利用 Ru 基、Ni 基、Fe 基、Co 基等金属

催化剂,可以在 500~800℃ 的反应温度下实现 50% 以上的 NH_3 转化^[4]。然而,目前热催化效果最好的 Ru 基催化剂价格昂贵,因此,有必要开发基于非贵金属的廉价高活性催化剂^[5]。大量的相关研究表明, Ni 基催化剂被认为是最有前景的材料^[6-10] 如 Ni/ Al_2O_3 ^[11]、Ni/ SiO_2 ^[12]、Ni/稀土氧化物^[13]、Ni/CNFs^[14-17]。近年来,研究者发现利用等离子体在常温下即可产生具有高反应活性的环境实现氨的有效分解制氢^[18]。与热催化法相比,等离子体法既可显著降低反应能耗,也可避免催化剂在高温下反应存在的启动慢、需要连续运行、设备损耗和催化剂失活

收稿日期: 2025-12-31; 修回日期: 2026-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(52376088, 52206129); 安徽省高校协同创新(GXXT-2022-025)

作者简介: 田世豪(2001-), 男, 硕士生, 研究方向为等离子体催化氨分解制氢, 1245714182@qq.com; 黄庠永(1981-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为氨煤混燃机理与技术、等离子体催化氨裂解/氨合成, 通讯联系人, 25343232@qq.com。

等问题^[19]。

因此,本文旨在开发低成本、高活性的催化剂协同等离子体催化,探究其作用机制,为此,本研究设计和制备 Ni-Ru 双金属催化剂,对等离子体协同双金属催化剂(Ni-Ru/Y₂O₃)的氨分解制氢性能及反应机理进行详细研究。首先,利用浸渍法制备了 Ni-Ru 双金属催化剂,在热催化条件下考察 Ni-Ru 摩尔比和温度对氨催化分解性能的影响。之后,在等离子体辅助催化条件下考察了 Ni-Ru 摩尔比和等离子功率对氨催化分解性能的影响。在此基础上,对性能较好的双金属催化剂研究不同总负载量(质量分数 1%~5%、间隔 1%)对氨分解性能的影响。最后,采用 X 射线衍射分析(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)研究性能较好的 Ni-Ru 双金属催化剂等离子体辅助催化体系下氨分解反应机理。

1 实验部分

1.1 实验试剂与设备

试剂: Ni(NO₃)₂·6H₂O, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司生产; RuCl₃·xH₂O、Y₂O₃、无水乙醇, 均为分析纯, 上海泰坦科技股份有限公司生产; 高纯 NH₃(99.999%)、高纯 N₂(99.9%)、高纯 Ar(99.9%), 均为南京特种气体厂股份有限公司生产。

设备: 低温等离子体电源: CTP-2000K 型, 南京苏曼等离子科技有限公司生产; 氢气发生器: SPH-500 型, 北京中惠普分析技术研究所生产; 质量流量计: 华思仪器有限公司生产; 气相色谱分析仪: GC9790-plus 型, 浙江福立分析仪器股份有限公司生产。

1.2 催化剂制备

制备 Y₂O₃ 为载体负载 Ru-Ni 的双金属催化剂: 取 1 g Y₂O₃、20 mL 乙醇于烧杯中, 然后加入配制好的 RuCl₃ 溶液、Ni(NO₃)₂·6H₂O 溶液, 将烧杯放置于水浴锅中, 用搅拌器在 80℃ 下搅拌溶液直至乙醇蒸干, 随后样品在 600℃ 下于马弗炉中焙烧 4 h。得到样品命名为 xRu-yNi/Y₂O₃-z%, 其中, x、y 为 Ru 和 Ni 的摩尔比, z 为 Ru 和 Ni 的总负载质量比。

1.3 催化剂表征

1.3.1 X 射线衍射分析(XRD)

使用日本 Rigaku SmartLab SE 聚焦衍射仪。测试时, 设定 X 射线电压为 40 kV, 电流为 30 mA, 采用铜靶(X 射线波长 λ=0.154 05 nm)作为辐射源。选择这样的测试条件, 是因为该电压和电流能够保

证 X 射线具有足够的强度以获得清晰的衍射信号, 而铜靶的特征波长在分析常见晶体结构时具有较好的分辨率和灵敏度。X 射线扫描角度(2θ)范围设定为 5~90°, 扫描速率为 4°/min。

1.3.2 扫描电子显微镜(SEM)

使用日立超高分辨场发射扫描电子显微镜观测催化剂的形貌与尺寸。观察前, 先将样品置于无水乙醇溶液, 放入超声仪超声 15 min, 使其在无水乙醇溶液中均匀分散; 之后用毛细管将样品置于硅片上, 常温自然风干, 即可待测。样品放置在硅片上后, 在常温下自然风干, 这样的处理方式既能去除无水乙醇溶剂, 又能避免因高温干燥等方式可能导致的样品结构变化或颗粒团聚, 最终使样品达到可待测状态。

1.4 实验工况

本实验在常压等离子体氨分解固定床反应器中进行, 催化剂总负载量固定为 1% 时, 考察不同 Ni-Ru 摩尔比(7:3、6:4、5:5、4:6、3:7)的双金属催化剂在热催化条件下(300~550℃)、等离子体催化辅助条件(20~45 W、400℃)下的氨分解性能。反应温度通过电加热炉精确控制, 升温速率为 10℃/min。高纯氨气(流量 20 mL/min)由质量流量计控制通入反应器, 催化剂填充量为 0.2 g。每次实验前均通入氩气吹扫反应器以排除空气干扰, 待温度稳定后开始计时, 每 30 min 采集一次气相色谱数据, 记录不同温度下的氨转化率。

2 结果与讨论

2.1 热催化氨分解反应性能

如图 1 所示, 在热催化条件下, 随着催化剂床层温度从 300℃ 逐渐升高至 550℃, 5 种不同 Ni-Ru 摩

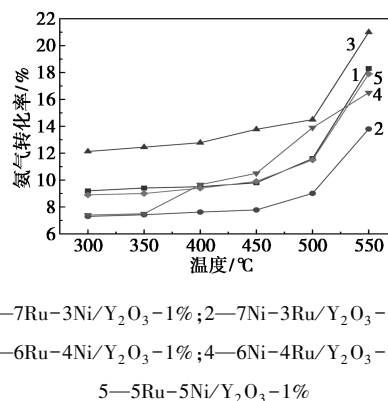


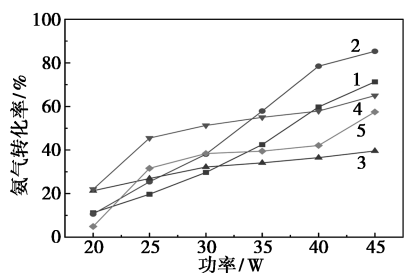
图 1 不同 Ni-Ru 摩尔比双金属纯热催化的氨分解活性比较

尔比的 Ni-Ru/Y₂O₃ 双金属催化剂的氨分解性能均有所提升。这是因为温度升高,反应物分子的动能增加,更多的分子能够获得足够的能量越过反应的活化能垒,从而促进氨分解反应的进行。其中,6Ni-4Ru/Y₂O₃ 催化剂表现出相对较好的热催化性能,但在 550℃ 时氨转化率也仅为 20% 左右。这表明传统热催化方式下,即使采用双金属催化剂,氨分解效率仍然较低。

从催化剂的活性组分角度分析,镍(Ni)具有一定的催化活性且成本较低,但在氨分解反应中,其单独催化活性有限;钌(Ru)虽然是一种高活性的贵金属,对氨分解有较好的催化作用,但在热催化体系中,二者的协同作用未能充分发挥,导致整体反应效率不高。此外,热催化过程主要依赖于热激活,缺乏额外的能量输入来进一步降低反应的活化能,使得氨分解反应难以在相对较低的温度下高效进行。

2.2 等离子体辅助催化氨分解性能研究

将制备的不同 Ni-Ru 摩尔比(7/3、6/4、5/5、4/6、3/7)的 5 种 Ni-Ru 双金属催化剂用于等离子体辅助催化氨分解反应。图 2 展示了不同 Ni-Ru 摩尔比的双金属催化剂在炉温 400℃ 时,等离子体催化氨分解的活性比较。从图中可以看出,随着等离子体功率从 20 W 增加到 45 W,所有催化剂对应的氨分解转化率均呈上升趋势。这表明功率的提升能够促进氨分解反应的进行,可能是因为功率增加使得等离子体提供了更多的能量,从而加速了反应速率。具体来看,不同摩尔比的催化剂表现出了明显差异。7Ni-3Ru/Y₂O₃ 催化剂的氨分解转化率始终处于领先地位,在 45 W 功率时达到了最高值,这说明该摩尔比的催化剂在等离子体辅助催化氨分解反应中具有最佳的活性。相比之下,5Ru-5Ni/Y₂O₃、



1—7Ru-3Ni/Y₂O₃-1%; 2—7Ni-3Ru/Y₂O₃-1%;
3—6Ru-4Ni/Y₂O₃-1%; 4—6Ni-4Ru/Y₂O₃-1%;
5—5Ru-5Ni/Y₂O₃-1%

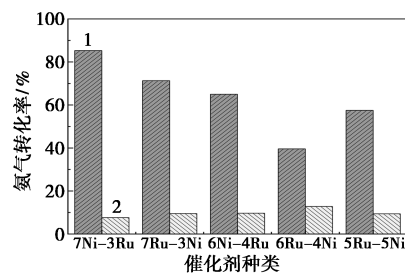
图 2 不同 Ni-Ru 摩尔比双金属炉温 400℃ 等离子体催化的氨分解活性比较

6Ru-4Ni/Y₂O₃ 等催化剂的转化率提升幅度相对较小。总体而言,Ni-Ru 摩尔比是影响催化剂性能的关键因素,合适的摩尔比能够增强催化剂在等离子体辅助催化氨分解反应中的活性,而 7Ni-3Ru/Y₂O₃ 催化剂在本实验条件下展现出了最优的催化效果,这为进一步优化氨分解反应的催化剂提供了重要参考。

这一性能差异源于等离子体与双金属的协同效应:等离子体产生的高能电子(1~10 eV)通过碰撞直接活化氨分子,降低 N—H 键断裂的活化能,而 Ni-Ru 双金属通过电子转移优化吸附位点-Ni 的 d 轨道电子向 Ru 迁移,形成富电子活性中心,增强对氨分子的化学吸附能力。同时,Ru 的高活性解离位点与 Ni 的氢脱附促进作用相结合,形成“吸附-解离-脱附”高效反应路径。此外,等离子体中的活性物种与催化剂表面相互作用,加速中间产物的转化,进一步提升反应速率。

2.3 等离子体辅助催化与热催化性能对比

实验中,我们对 5 种不同配比的 Ni-Ru 双金属催化剂,分别进行了功率为 45 W 的等离子体辅助催化与 400℃ 的热催化实验,并对比其氨转化率。如图 3 所示,在这 5 种催化剂体系下,等离子体辅助催化对应的氨转化率数值均显著高于热催化。这表明在相同的实验条件下,45 W 等离子体辅助催化在促进氨分解方面相较于 400℃ 热催化展现出了明显优势,有望为氨分解反应提供更高效率的催化路径,为后续深入研究等离子体辅助催化氨分解反应机制及优化催化剂性能奠定了基础。



1—等离子体催化 45 W; 2—热催化 400℃

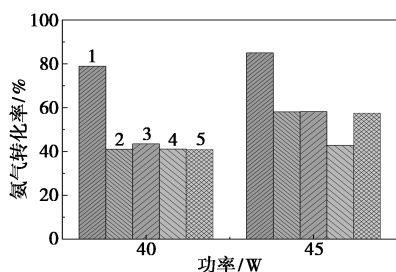
图 3 等离子体辅助催化与热催化氨转化率对比图

这种差异的本质在于反应机理的不同:热催化依赖温度驱动分子动能,活化能主要通过催化剂表面吸附降低,反应路径单一且需高温;而等离子体辅助催化引入“非热效应”,高能电子直接激发氨分子至高能态,同时催化剂通过结构调控(如 Ni-Ru 合

活化)优化活性位点分布,形成“等离子体活化-催化剂定向反应”的双路径机制^[20]。此外,等离子体的自清洁效应(高能粒子轰击)可抑制催化剂表面积碳,而热催化中积碳覆盖活性位点导致效率下降,这也是等离子体稳定性更优的重要原因^[21]。

2.4 催化剂的总负载量对氨分解的影响

由图 2 可知在不同 Ni-Ru 摩尔比的双金属催化剂中 7Ni-3Ru/Y₂O₃-1% 催化剂的等离子体辅助催化氨分解的性能是最好的,因此在此基础上探究 Ni:Ru 为 7:3 的催化剂负载于氧化钇上时总负载量对氨分解影响的实验。从图 4 可以看出,随着功率在 40~45 W 区间变化,不同负载量的催化剂对应的氨转化率均呈现上升趋势。其中,负载量为 1% 的催化剂氨转化率增幅最为显著,在 45 W 时达到较高水平。负载量为 2%、3%、5% 的催化剂氨转化率变化趋势相近,且在该功率区间内数值较为接近。而负载量为 4% 的催化剂氨转化率相对较低,增长幅度也相对较小。这表明在一定功率范围内, Ni:Ru 为 7:3 的催化剂负载于氧化钇上时,负载量对氨分解反应有显著影响,较低负载量(如 1%) 在功率提升时更有利于氨转化率的提高,为优化氨分解反应中催化剂负载量提供了重要参考依据。



1—7Ni-3Ru/Y₂O₃-1%; 2—7Ni-3Ru/Y₂O₃-2%;
3—7Ni-3Ru/Y₂O₃-3%; 4—7Ni-3Ru/Y₂O₃-4%;
5—7Ni-3Ru/Y₂O₃-5%

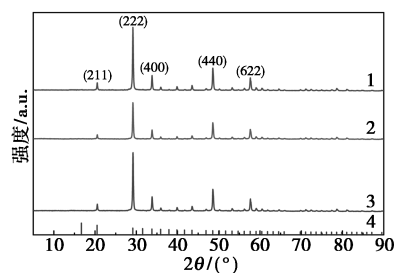
图 4 7Ni-3Ru/Y₂O₃ 催化剂不同负载量氨分解活性比较

这一现象与金属颗粒分散度和载体相互作用密切相关。低负载量(1%)时, Ni-Ru 以单原子或纳米簇(<10 nm)高度分散于 Y₂O₃ 表面,比表面积大且活性位点暴露充分,等离子体中的高能电子与金属颗粒碰撞概率高,电子-分子能量传递效率显著。当负载量增至 4%,金属颗粒团聚形成 2 μm 以上块状结构,内部活性位点被掩埋,且 Y₂O₃ 载体与金属间相互作用减弱,导致等离子体活化效率下降。此外,过高负载量可能引发电子结构畸变,削弱 Ni-Ru

协同效应,如能量色散 X 射线光谱(EDS)元素分布显示,负载量 4% 时 Ni-Ru 分布不均加剧,局部聚集区域虽活性较高,但整体位点利用率降低。实验结果表明,适度负载(1%~2%)可平衡活性位点密度与分散性,实现催化性能优化。

2.5 XRD 检测

图 5 中涉及的样品有 Y₂O₃,以及负载不同比例 Ru 和 Ni 的催化剂、7Ni-3Ru/Y₂O₃-5%、7Ni-3Ru/Y₂O₃-1%,还有作为对照的 Y₂O₃ 标准 PDF 卡片(PDF # 41-1105)。Y₂O₃ 在 2θ 为 20.5、29.2、33.8°、48.5、57.6° 处分别出现对应(211)、(222)、(400)、(440)、(622)晶面的特征衍射峰,与标准 PDF 卡片中 Y₂O₃ 的特征峰位置基本吻合,说明其晶体结构与标准相符。7Ni-3Ru/Y₂O₃-5% 和 7Ni-3Ru/Y₂O₃-1% 的衍射峰基本与 Y₂O₃ 特征峰位置一致,表明负载 Ru 和 Ni 后 Y₂O₃ 主体晶体结构未变,但峰强度有变化,可能是负载的 Ru 和 Ni 对 Y₂O₃ 晶体的生长、取向或表面结构产生影响,且不同负载量导致晶体结构微环境变化。从图中未观察到明显的 Ru 或 Ni 单质及其氧化物的特征衍射峰,原因可能是 Ru 和 Ni 在 Y₂O₃ 载体上高度分散,晶粒尺寸极小低于 XRD 检测限,或者是 Ru 和 Ni 与 Y₂O₃ 载体发生较强相互作用,形成固溶体或新化合物相,特征衍射峰与 Y₂O₃ 峰重叠或被掩盖。综上,负载 Ru 和 Ni 后 Y₂O₃ 载体晶体结构基本不变,但负载量影响衍射峰强度,未检测到明显负载金属特征峰,这些结果为研究负载型催化剂的结构-性能关系提供了基础。



1—Y₂O₃; 2—7Ni-3Ru/Y₂O₃-5%; 3—7Ni-3Ru/Y₂O₃-1%;
4—Y₂O₃(PDF#41-1105)

图 5 Y₂O₃、7Ni-3Ru/Y₂O₃-5%、7Ni-3Ru/Y₂O₃-1% 的 XRD 谱图

2.6 SEM 检测

在 SEM 图像分析中,7Ni-3Ru/Y₂O₃-1% 催化剂展现出丰富多样的微观结构特征。图 6(a) 左上角图像显示,催化剂表面存在尺寸约为 50 nm 的细

小颗粒,推测这些颗粒是活性组分 Ni 和 Ru 在载体 Y_2O_3 表面的聚集态;图 6(a) 右上角图像中,催化剂呈现出尺寸约 $2\ \mu\text{m}$ 的片状或层状结构,该结构可能对反应物分子在催化剂表面的吸附和扩散过程产生影响。从图 6(b) 左下角图像更宏观的视角来看,催化剂颗粒大小分布较为分散,涵盖亚微米级到微米级,这暗示在催化剂制备过程中存在一定程度的不均匀性;而右下角图像里,催化剂表面相对致密,颗粒尺寸约为 $100\ \text{nm}$,或因特定处理或反应致使颗粒发生团聚或重构。进一步通过 EDS 元素分布分析可知,O 元素凭借 Y_2O_3 载体的大量存在,在整个催化剂表面广泛分布(红色区域),Ni 元素(绿色区域)和 Ru 元素(紫色区域)的分布则相对不均匀,表明活性组分在载体表面并非均匀负载,Y 元素(青色区域)分布与 O 元素具有一定相关性,契合 Y_2O_3 载体的特征。值得注意的是,Ni 和 Ru 元素的分布差异对催化剂的活性和选择性影响显著,不均匀的负载易造成部分活性位点聚集,使反应物分子在催化剂表面的吸附和反应行为出现差异,进而影响诸如氨分解制氢等催化反应的性能,比如 Ni 和 Ru 聚集区域虽可能反应活性较高,但也可能因过度聚集致使活性位点被掩埋,降低整体催化效率。

从 SEM 图像对催化剂 $7\text{Ni}-3\text{Ru}/Y_2O_3-5\%$ 进行微观结构分析可知,图 6(c) 左上角图像呈现出催化剂表面存在大量尺寸约 $50\ \text{nm}$ 的细小颗粒,这些颗粒大概率是活性组分 Ni 和 Ru 在 Y_2O_3 载体表面的聚集形态,其密集分布状态为催化剂提供了丰富的潜在活性位点;右上角图像则展示出催化剂具有不规则的块状结构,尺寸在 $1\ \mu\text{m}$ 左右,表面带有纹理和裂缝,这些细微结构会显著影响反应物分子在催化剂内部的扩散路径,左右着催化反应的进行。从左下角图像的宏观视角来看,催化剂颗粒分布较为分散,大小跨度从亚微米级到微米级,反映出制备过程中可能存在一定的不均匀性;右下角图像中,催化剂表面质地致密,颗粒尺寸约 $100\ \text{nm}$,可能是制备或反应进程中颗粒发生团聚,使得颗粒间隙缩小,降低了反应物与活性位点的接触效率。通过对 EDS 分层图像[图 6(d)]进行元素分布分析,能够清晰看到,O 元素因 Y_2O_3 载体的大量存在,在整个催化剂表面广泛分布,呈现红色区域;Ni 元素和 Ru 元素分布不均,表明活性组分在载体表面负载并不均匀,绿色和紫色区域分布杂乱;Y 元素分布与 O 元素呈现出一定的相关性,符合 Y_2O_3 载体的特性。而 Ni 和 Ru 元素的这种不均匀分布,会致使催化剂表面

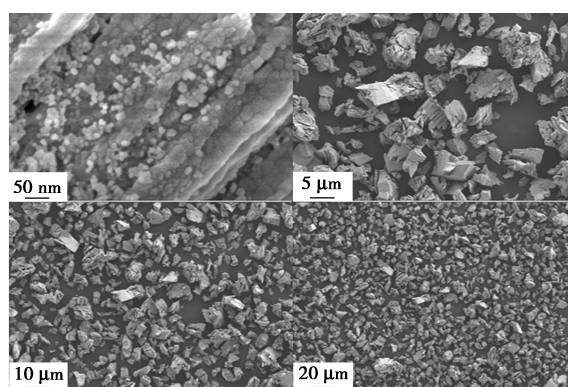
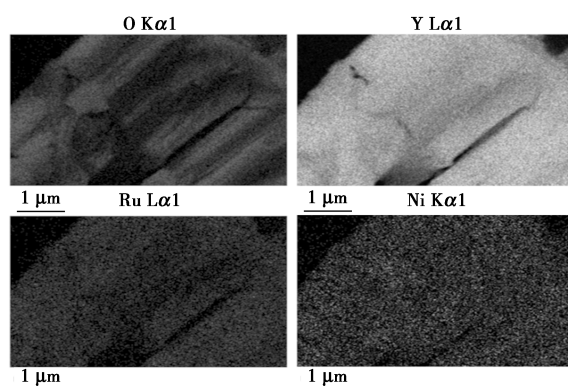
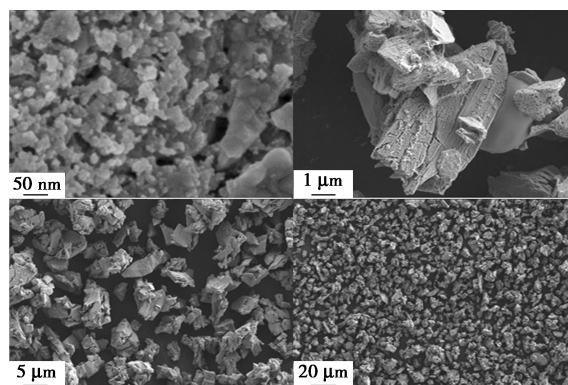
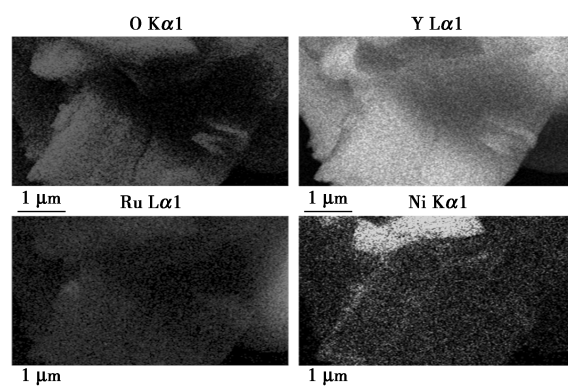
(a) $7\text{Ni}-3\text{Ru}/Y_2O_3-1\%$ 的 SEM 图像(b) $7\text{Ni}-3\text{Ru}/Y_2O_3-1\%$ 的 EDS 图像(c) $7\text{Ni}-3\text{Ru}/Y_2O_3-5\%$ 的 SEM 图像(d) $7\text{Ni}-3\text{Ru}/Y_2O_3-5\%$ 的 EDS 图像

图 6 催化剂的 SEM 图和 EDS 元素分布分析
不同区域活性参差不齐,在 Ni 或 Ru 浓度较高的区

域,反应活性增强,但也可能引发积碳等副反应,而浓度较低区域活性较弱,这种差异严重影响着反应物分子在催化剂表面的吸附、活化与反应过程,最终对氨分解制氢等催化反应的活性、选择性以及稳定性产生深远影响,左右着催化反应的整体效能与可持续性。

3 结论

(1) 等离子体辅助催化显著提升氨分解效率。在相同温度(400℃)下,等离子体辅助催化的氨转化率(85%)远高于传统热催化(20%)。其核心机制是等离子体产生的高能电子(1~10 eV)可直接活化氨分子,降低 N—H 键断裂的活化能,同时与催化剂形成协同效应,实现低温高效反应。

(2) Ni—Ru 双金属间存在显著的协同效应,且催化剂性能强弱依赖于金属配比与总负载量。7Ni—3Ru/Y₂O₃-1% 催化剂的氨分解转化率最佳,在 45 W 功率时达到了最高值;1% 为最优负载量。过低则活性位点不足;过高(如 4%)会导致金属颗粒团聚,掩埋活性位点,反而降低效率。

(3) 催化剂的微观结构(分散度、颗粒尺寸、元素分布)直接决定其宏观性能。基于 SEM/EDS 分析,7Ni—3Ru/Y₂O₃-1% 与 7Ni—3Ru/Y₂O₃-5% 催化剂均呈现多尺度颗粒结构(50 nm~2 μm)与不均匀的 Ni、Ru 元素分布,这种微观结构与元素分布特点既可能因活性颗粒局部聚集提升催化活性,也可能因过度团聚或分布差异降低活性、引发副反应,影响氨分解制氢性能。

参考文献

- [1] 曹蕃,陈坤洋,郭婷婷,等.氢能产业发展技术路径研究[J].分布式能源,2020,5(1):1-8.
- [2] 徐也茗,郑传明,张毓宏.氨能源作为清洁能源的应用前景[J].化学通报,2019,82(3):214-220.
- [3] 韩建,孔熙瑞,张立波.Ni/Al₂O₃ 催化剂的制备及其催化 NH₃ 分解性能研究[J].现代化工,2019,39(3):127-130.
- [4] Wang Y, Mao X, Yang J, *et al.* One-step synthesis of Ni/yttrium-doped barium zirconates catalyst for on-site hydrogen production from NH₃ decomposition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(4):2608-2621.
- [5] Yin S F, Xu B Q, Zhu W X, *et al.* Carbon nanotubes-supported Ru catalyst for the generation of CO_x-free hydrogen from ammonia[J]. Catalysis Today, 2004, 93/95(9):27-38.
- [6] Yin S F, Xu B Q, Zhou X P, *et al.* A mini-review on ammonia decomposition catalysts for on-site generation of hydrogen for fuel cell applications[J]. Applied Catalysis A: General, 2004, 277(1/2):1-9.
- [7] Andersen J A, van't Veer K, Christensen J M, *et al.* Ammonia decomposition in a dielectric barrier discharge plasma: Insights from experiments and kinetic modeling[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 271:118550.
- [8] Duan G, Fang Z, Fu J, *et al.* Influence of water cooling for outer electrode on the discharge characteristics of an atmospheric coaxial DBD reactor[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(3):1173-1180.
- [9] Apaiyakul R, Ranong P N, Kiatthirachara T, *et al.* Density, viscosity, physical CO₂ diffusivity, and CO₂ absorption capacity of novel blended N-methyl-4-piperidinol and piperazine solvent[J]. Energy Reports, 2021, 7(5):844-853.
- [10] Plana C, Armenise S, Monzón A, *et al.* Ni on alumina-coated cordierite monoliths for in situ generation of CO-free H₂ from ammonia[J]. Journal of Catalysis, 2012, 275(2):228-235.
- [11] Ganley J C, Thomas F S, Seebauer E G, *et al.* A priori catalytic activity correlations: The difficult case of hydrogen production from ammonia[J]. Catalysis Letters, 2004, 96(3/4):117-122.
- [12] Okura K, Okanishi T, Muroyama H, *et al.* Ammonia decomposition over nickel catalysts supported on rare-earth oxides for the on-site generation of hydrogen[J]. ChemCatChem, 2016, 8(18):2988-2995.
- [13] Li H, Guo J, Li Z, *et al.* Research progress of hydrogen production technology and related catalysts by electrolysis of water[J]. Molecules, 2023, 28(13):5010.
- [14] Okura K, Okanishi T, Muroyama H, *et al.* Additive effect of alkaline earth metals on ammonia decomposition reaction over Ni/Y₂O₃ catalysts[J]. RSC Advances, 2016, 6(88):85142-85148.
- [15] Yin S F, Zhang Q H, Xu B Q, *et al.* Investigation on the catalysis of CO_x-free hydrogen generation from ammonia[J]. Journal of Catalysis, 2004, 224(2):384-396.
- [16] Zhang H, Alhamed Y A, Kojima Y, *et al.* Structure and catalytic properties of Ni/MWCNTs and Ni/AC catalysts for hydrogen production via ammonia decomposition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(1):277-287.
- [17] 李钟帆,竺新波,邬晨,等.等离子体协同催化强化氨分解制氢的研究进展[J].现代化工,2025,45(1):42-45,50.
- [18] 韩丰磊,季纯洁,张子琦,等.低温等离子体协同催化技术处理 VOCs 研究综述[J].洁净煤技术,2022,28(2):23-31.
- [19] 胡柯.氮化钼基催化剂协同介质阻挡放电等离子体催化氨分解制氢[D].济南:山东大学,2023.
- [20] 国乐心.Y₂O₃ 负载双金属催化剂的制备及其氨分解性能研究[D].青岛:青岛科技大学,2024.
- [21] 孙帅其.负载型双金属催化剂用于氨分解制氢[D].大连:大连理工大学,2018. ■