

常压高频放电等离子体炬改进制备 CO₂/CH₄ 重整用 Ni/MgO 催化剂覃攀¹, 徐慧远², 龙华丽¹, 冉祎¹, 尚书勇², 储伟¹, 印永祥^{1,*}, 戴晓雁¹¹四川大学化学工程学院, 四川成都 610065²宜宾学院化学与化工学院, 四川宜宾 644000

摘要: 比较了常规法、等离子体炬法和等离子体炬辅助焙烧法制得的 Ni/MgO 催化剂上 CO₂/CH₄ 重整反应性能差异, 并利用 X 射线衍射、透射电镜、X 射线光电子能谱和 CO₂ 程序升温表面反应等技术对反应前后催化剂进行了表征. 结果表明, 采用等离子体炬辅助焙烧法制备的催化剂上 Ni 晶粒粒径小, 分散度较高, 低温活性和抗积炭性能较高; 在常压, 750 °C, 36 L/(h·g), $n(\text{CH}_4)/n(\text{CO}_2) = 1$ 的反应条件下, CO₂ 和 CH₄ 转化率分别为 90.7% 和 89.4%, 反应 36 h 催化剂无明显失活.

关键词: 镍; 氧化镁; 二氧化碳; 甲烷; 重整; 常压高频放电等离子体炬

中图分类号: O643 文献标识码: A

收稿日期: 2011-03-09. 接受日期: 2011-04-21.

*通讯联系人. 电话: 13348865689; 传真: (028)86282217; 电子信箱: hyyx0675@sina.com

基金来源: 国家自然科学基金 (11075113); 宜宾学院博士科研启动基金 (2010B12).

Atmospheric High Frequency Discharge Plasma Jet Improved Preparation of Ni/MgO Catalyst for CO₂ Reforming with CH₄QIN Pan¹, XU Huiyuan², LONG Hualiang¹, RAN Yi¹, SHANG Shuyong², CHU Wei¹,
YIN Yongxiang^{1,*}, DAI Xiaoyan¹¹School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China²School of Chemistry and Chemical Engineering, Yibin University, Yibin 644000, Sichuan, China

Abstract: A Ni/MgO catalyst was prepared using atmospheric high frequency discharge plasma jet. The influence of three preparation methods, the conventional method, plasma method, and plasma plus calcination method, on the catalyst activity was compared using CO₂ reforming with methane as the probe reaction. The catalyst samples were characterized by X-ray diffraction, transmission electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and CO₂ temperature-programmed surface reaction. The results suggested that the Ni-based catalyst sample prepared by the plasma plus calcination method possessed smaller Ni particle size, higher dispersion of active components, higher low-temperature activity, and enhanced anti-coking ability. The conversions of CO₂ and CH₄ were 90.70% and 89.37%, respectively, and lasted for 36 h without obvious deactivation under 0.1 MPa, 36 L/(h·g) and 750 °C with $n(\text{CH}_4)/n(\text{CO}_2) = 1$.

Key words: nickel; magnesium oxide; carbon dioxide; methane; reforming; atmospheric high frequency discharge plasma jet

Received 9 March 2011. Accepted 21 April 2011.

*Corresponding author. Tel: +86-13348865689; Fax: +86-28-86282217; E-mail: hyyx0675@sina.com

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11075113) and the Doctorial Scientific Research Foundation of Yibin University (2010B12).

CO₂/CH₄ 重整是间接利用天然气和煤层气资源的有效途径之一, 且生成的合成气 (H₂/CO = 1) 适用于费-托合成反应及含氧有机化合物的制备而成为研究热点^[1-3]. 通常, 负载型 Rh, Ru, Pd 和 Pt 等催化

剂对 CO₂/CH₄ 重整反应具有较高的催化活性和稳定性; 但由于其资源有限, 价格昂贵, 不利于工业上大规模应用^[4]. 目前认为, 负载型 Ni 基催化剂最有希望工业应用于 CO₂/CH₄ 重整反应. 由于 MgO 和

NiO 都呈 NaCl 型面心立方型结构, 并且它们的离子半径和晶格常数等结构性质相近, 在所有组成范围内, NiO 均可与 MgO 形成理想的固溶体而成为载体首选^[5]. 然而, Ni/MgO 催化剂极易因积炭而失活^[6]. 因此, 研制高效、稳定的 Ni/MgO 催化剂是开发 CO₂/CH₄ 重整反应催化工艺的重点和难点^[7-10].

近年来, 为提高催化剂的重整反应性能, 新型制备方法和处理方式相继出现. 等离子体作为一种表面改性技术能有效改善金属和载体之间的相互作用, 在催化领域显示出广阔的应用前景. Hua 等^[11]采用介质阻挡放电等离子体处理共沉淀法制备的 Ni/MgO 催化剂, 发现等离子体的引入提高了活性组分 Ni 的分散度, 比焙烧法制备的催化剂具有更高的催化活性和稳定性. Zhu 等^[12]采用辉光放电等离子体技术成功制备了抗积炭性能优异的 Ni/Al₂O₃ 催化剂. 郭芳等^[13]进一步考察了等离子体气氛对 CO₂/CH₄ 重整用 Ni/Al₂O₃ 催化剂催化性能的影响. 结果表明, 在 H₂ 原位还原前采用 N₂ 气氛等离子体处理, 使得催化剂具有较强的还原能力和较大的比表面积, 从而有效提高催化剂的低温催化活性. 本课题组曾采用常压高频放电等离子体炬制备了具有较高低温活性和抗积炭性能的 CO₂/CH₄ 重整用 Ni/Al₂O₃^[1,14]和 Ni/SiO₂ 催化剂^[15]. 基于此, 本文采用沉淀法制备了 MgO 载体, 用于负载 Ni 催化剂, 并考察了常规法、等离子体炬法和等离子体炬辅助焙烧法制备的 Ni/MgO 催化剂上 CO₂/CH₄ 重整反应活性和稳定性, 探讨了催化剂的构效关系.

1 实验部分

1.1 催化剂的制备

采用共沉淀法制备 MgO ($A_{\text{BET}} = 203 \text{ m}^2/\text{g}$) 载体. 以 Mg(NO₃)₂·6H₂O (AR, 天津市瑞金特化学品有限公司) 为前驱物, 以 Na₂CO₃ (AR, 天津市博迪化工有限公司) 溶液 (0.1 mol/L) 为沉淀剂, 强力搅拌下调节溶液 pH = 10, 滴加完毕后继续在 60 °C 搅拌 2 h, 陈化 2 h, 抽滤, 去离子水洗涤, 于 110 °C 干燥 12 h, 600 °C 焙烧 4 h. 采用等体积浸渍法制备 Ni/MgO 催化剂. 首先将 MgO 浸渍于 Ni(NO₃)₂·6H₂O (AR, 天津市博迪化工有限公司) 水溶液中, 经 110 °C 干燥后将样品分为两份: 一份在 650 °C 焙烧 4 h, 制得常规催化剂, 记为 Ni/MgO(C). 另一份在 H₂-Ar 混

合气氛下采用常压高频放电等离子体炬进行处理, 条件与文献[14]相同: 频率为 20 kHz 工作电源, 放电气体为 20% H₂-80% Ar 混合气, 处理 10 min. 处理后的样品标记为 Ni/MgO(P). 将 Ni/MgO(P) 再于 650 °C 焙烧 4 h, 得到的样品记为 Ni/MgO(P-C). 各催化剂样品中的 Ni 含量均为 12%.

1.2 催化剂的表征

催化剂的 X 射线衍射 (XRD) 分析在配有 Cu K_α (40 kV, 40 mA) 的 X'Pert Pro MPD 型 X 射线仪 (Philips) 上进行, 扫描范围 $2\theta = 30^\circ \sim 80^\circ$. 透射电镜 (TEM) 测试在 Tecnai G²F 20 型透射电子显微镜上进行. 加速电压为 200 kV. 将 50 mg 研磨好的粉末分散于约 10 ml 乙醇中, 超声分散 4 h, 静置 0.5 h 后, 吸取上层样液滴在镀碳膜的铜网栅上, 试样干燥后进行 TEM 观测. X 射线光电子能谱 (XPS) 分析在英国 Kratos 公司 XSAM 800 型 X 射线光电子能谱仪上进行. 以 Al K_α 为激发源 (1486.6 eV), 仪器基压 0.02 MPa, 工作压强 0.07~0.09 MPa. 样品的荷电效应以 C 1s (284.6 eV) 为内标加以校正. CO₂ 程序升温表面反应实验在常压固定床反应器中进行. 将反应后的催化剂置于 CO₂ 气氛中进行程序升温, 升温速率 10 °C/min, 以 QIC-20 型质谱仪检测产物.

1.3 催化剂的评价

CO₂/CH₄ 重整反应在常压固定床反应器内进行. 反应前催化剂均经 H₂ 于 700 °C 原位还原 1 h. 气体流量由质量流量计控制, 原料气中 $n(\text{CH}_4)/n(\text{CO}_2) = 1$, 反应空速 36 L/(h·g). 以 GC-1690 型气相色谱仪分析尾气组成, 数据由色谱工作站 N2000 记录. 原料气 CH₄ 和 CO₂ 转化率以及 H₂ 和 CO 产物收率计算公式如下:

$$X(\text{CH}_4) = (F_i(\text{CH}_4) - F_o(\text{CH}_4))/F_i(\text{CH}_4)$$

$$X(\text{CO}_2) = (F_i(\text{CO}_2) - F_o(\text{CO}_2))/F_i(\text{CO}_2)$$

$$Y(\text{H}_2) = F_o(\text{H}_2)/2F_i(\text{CH}_4)$$

$$Y(\text{CO}) = (F_o(\text{CO})/(F_i(\text{CH}_4) + F_i(\text{CO}_2)))$$

式中, X 为转化率, Y 为收率, F 为气体流量, 下标“i”和“o”分别表示“入口”(进料)和“出口”(尾气).

2 结果与讨论

2.1 催化剂上 CO₂/CH₄ 重整反应性能

图 1 为不同方法制备的 Ni/MgO 催化剂上 CO₂/CH₄ 重整反应性能. 可以看出, 随着温度从 600

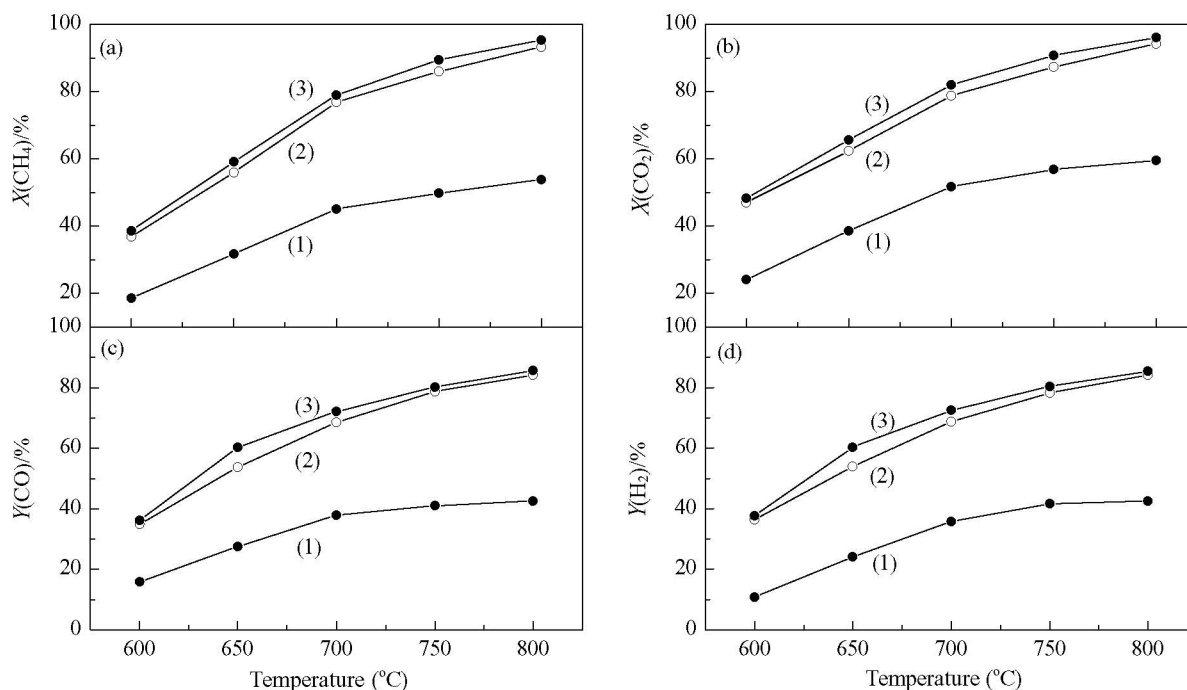


图 1 不同 Ni/MgO 催化剂样品上 CO₂/CH₄ 重整反应性能

Fig. 1. Reaction performance of CO₂ reforming with CH₄ over the Ni/MgO catalyst samples. (a) CH₄ conversion; (b) CO₂ conversion; (c) CO yield; (d) H₂ yield. (1) Ni/MgO(C); (2) Ni/MgO(P); (3) Ni/MgO(P-C). Reaction conditions: 0.1 MPa, $n(\text{CO}_2)/n(\text{CH}_4) = 1$, GHSV = 36 L/(h·g). C—prepared by conventional calcination method; P—prepared by plasma method; P-C—prepared by plasma and then conventional calcination.

°C 升至 800 °C, 各催化剂上原料气转化率和产物收率均逐渐升高. 其性能高低顺序为: Ni/MgO(C) < Ni/MgO(P) < Ni/MgO(P-C). 750 °C 反应时, Ni/MgO(C) 催化剂上 CH₄ 和 CO₂ 转化率分别为 49.73% 和 56.75%, Ni/MgO(P) 催化剂上分别为 85.88% 和 87.17%, 而 Ni/MgO(P-C) 催化剂上则进一步分别提高到 89.37% 和 90.70%. 另外, 各催化剂上 CO₂ 转化率均比 CH₄ 转化率高, 表明催化剂上存在吸热的逆水煤气变换反应 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$, $\Delta H_{298\text{K}} = +41 \text{ kJ/mol}$) 或 CO₂ 和 H₂O 分子的消炭反应 ($\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$; $\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$). 这与文献[16,17]结果一致.

相对于 Ni/MgO(C) 催化剂, Ni/MgO(P) 和 Ni/MgO(P-C) 催化剂上产物收率也大幅度提高. 750 °C 时 Ni/MgO(C) 催化剂上 H₂ 和 CO 的收率分别只有 42.76% 和 41.09%; 而 Ni/MgO(P) 和 Ni/MgO(P-C) 催化剂在 650 °C 时 H₂ 和 CO 的收率都达到 60% 以上, 750 °C 时二者收率达 80% 以上. 这表明等离子体炬的引入显著改善了 Ni/MgO 催化剂活性, 尤其是采用等离子体炬辅助焙烧方法制备的催化剂表现出最优的低温催化活性.

2.2 催化剂的物相

由于 NiO 与 MgO 的晶体结构相近, MgO, NiO 和 Mg-Ni 固溶体衍射峰的 2θ 值差别极小, 几乎完全重叠. 图 2 为不同 Ni/MgO 催化剂样品的 XRD 谱. 可以看出, 3 种样品均在 $2\theta = 37^\circ, 43^\circ, 63^\circ, 75^\circ$ 和 79° 处出现明显的特征衍射峰, 归属于方镁石相 MgO (JCPDS 87-0653) 的晶相衍射, 或 MgO 基的

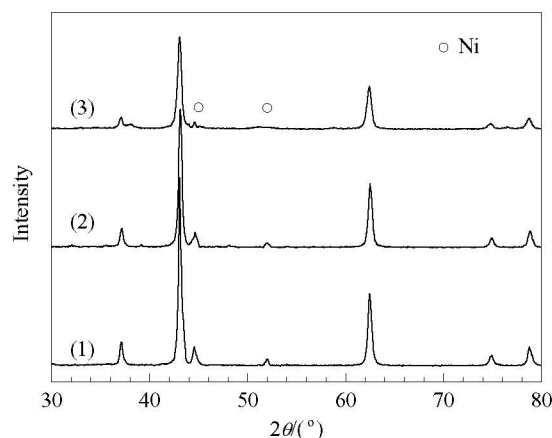


图 2 不同 Ni/MgO 催化剂样品的 XRD 谱

Fig. 2. XRD patterns of the Ni/MgO different catalyst samples. (1) Ni/MgO(C); (2) Ni/MgO(P); (3) Ni/MgO(P-C).

NiO-MgO 固溶体. 研究表明, 在 NiO 与 MgO 形成固溶体过程中, 可发生以下两种情况: (1) MgO 向 NiO 表面扩散形成容易还原的 NiO 基 MgO-NiO 固溶体; (2) NiO 向 MgO 扩散形成难还原的 MgO 基 NiO-MgO 固溶体^[18]. 在第二种情况下, NiO 可进入到 MgO 晶粒的表面层、次表面层和体相. Ni/MgO(C) 催化剂在 $2\theta = 45^\circ$ 和 52° 处出现金属 Ni(JCPDS 70-0989) 的特征衍射峰. Ni/MgO(P) 催化剂上 Ni 特征峰则相对矮而宽, 而 Ni/MgO(P-C) 催化剂上的更小, 其中 $2\theta = 52^\circ$ 处的衍射峰几乎消失. 可见, 等离子体炬辅助焙烧法制备的新型 Ni/MgO 催化剂中 Ni 组分分散得更好.

2.3 催化剂的形貌

根据各样品 $2\theta = 45^\circ$ 处的 Ni 衍射峰, 采用 Scherrer 公式, 可计算得 Ni/MgO(C) 催化剂中 Ni 粒子尺寸为 11.8 nm, 而 Ni/MgO(P) 和 Ni/MgO(P-C) 催化剂中 Ni 晶粒尺寸分别减小至 9.0 和 5.9 nm. Ni 晶粒尺寸越小, 其分散度越好^[19,20]. 由此可见, 等离子体炬技术制备的 Ni/MgO 催化剂活性组分 Ni 高度分散, 而高分散度正是导致催化剂低温催化活性升高的重要因素.

为了更直观观察催化剂表面 Ni 粒子尺寸及其分布状况, 对还原后的 Ni/MgO(C) 和 Ni/MgO(P-C) 催化剂进行了 TEM 表征及粒度分析. 图 3 为典型 Ni/MgO 催化剂样品的 TEM 照片. 可以看出, 常规催化剂中 Ni 晶粒分布不均匀, 有部分团聚现象, Ni 颗粒尺寸大约为 10 nm, 与 XRD 结果基本吻合. 等离子体炬辅助焙烧法制备的催化剂表面的 Ni 分散良好, 没有明显团聚现象, 并且 Ni 晶粒粒径分布较为集中. 由于积炭反应 (CH₄ 分解和 CO 歧化) 需要一定尺寸的金属颗粒^[21], 因而较小的活性组分颗粒有利于抑制积炭. 这预示着等离子体炬辅助焙烧法制备的 Ni/MgO 催化剂在 CO₂/CH₄ 重整反应具有良好的稳定性.

图 4 为典型 Ni/MgO 催化剂样品中 Ni 晶粒粒径分布 (粒度分析方法详见文献[11]).

2.4 催化剂的稳定性

本文初步考察了对常规焙烧法和等离子体炬辅助焙烧法制备的 Ni/MgO 催化剂的稳定性, 结果示于图 5. 可以看出, 随着反应的进行, 常规催化剂活性逐渐降低, 在考察的 36 h 内, CH₄ 和 CO₂ 的转化

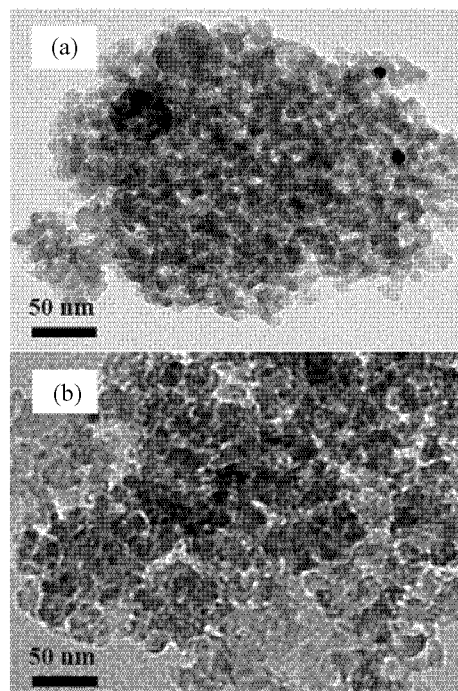


图 3 典型 Ni/MgO 催化剂样品的 TEM 照片

Fig. 3. TEM images of two typical Ni/MgO catalyst samples. (a) Ni/MgO(C); (b) Ni/MgO(P-C).

率分别由初始的 49.7% 和 56.8% 降低至 32.2% 和 33.4%. 而 Ni/MgO(P-C) 催化剂活性在反应 36 h 内仅略有降低. 由此可见, 等离子体炬辅助焙烧法制备的 Ni/MgO(P-C) 催化剂具有更高的稳定性.

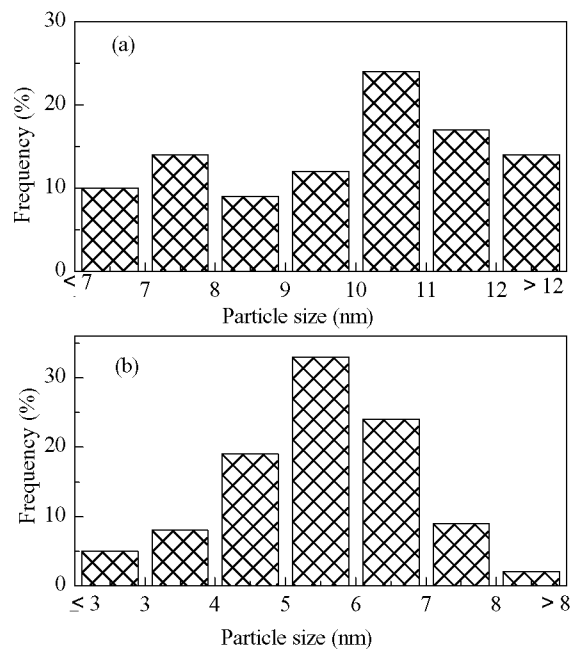


图 4 典型 Ni/MgO 催化剂样品中 Ni 晶粒粒径分布

Fig. 4. Particle size distribution of Ni in two typical Ni/MgO catalyst samples. (a) Ni/MgO(C); (b) Ni/MgO(P-C).

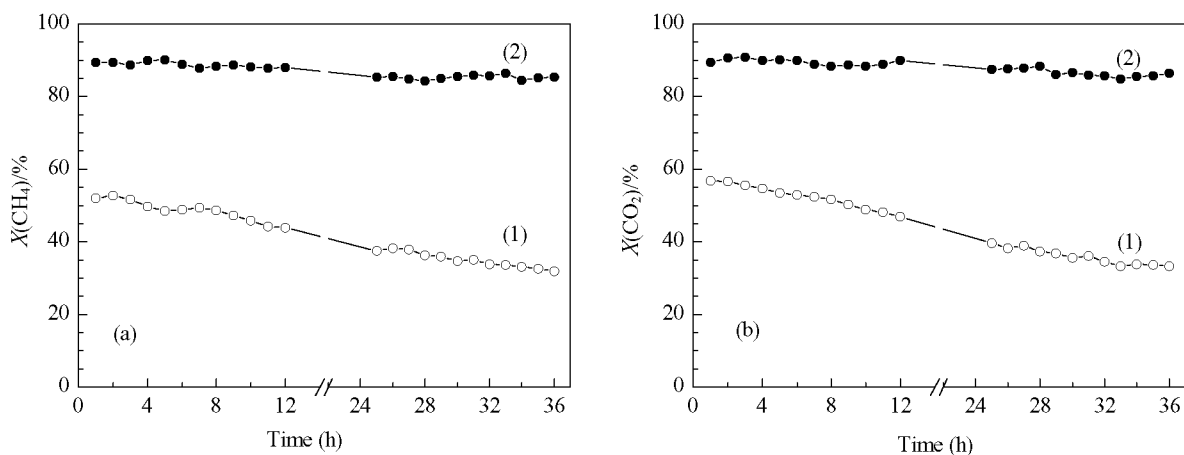


图5 典型Ni/MgO催化剂样品上CO₂和CH₄的转化率随时间的变化

Fig. 5. The CH₄ (a) and CO₂ (b) conversion as a function of time over two typical Ni/MgO catalyst samples. (1) Ni/MgO(C); (2) Ni/MgO(P-C). Reaction conditions: $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 0.1\text{ MPa}$, $n(\text{CO}_2)/n(\text{CH}_4) = 1$, GHSV = 36 L/(h·g).

积炭是Ni基催化剂失活的重要原因。对于CO₂/CH₄重整,存在积炭和消炭两个过程的“临时失衡”,从而导致产物中H₂/CO比出现振荡。当H₂/CO比值较低时,以CO₂+C→CO为主的消炭过程占主导地位,所以观察到CO₂转化率高于CH₄;当H₂/CO比值较高时,以CH₄→C+2H₂为主的积炭过程占主导地位,此时CH₄转化率高于CO₂。采用动态分析法研究反应机理的结果表明,催化剂上重整反应可分为两个相对独立的过程:CH₄裂解积炭和CO₂活化及积炭消除。只有当积炭速率和消炭速率匹配时,催化剂既具有较高的低温催化活性,又不致因迅速积炭而失活^[15]。Ni/MgO(C)催化剂上H₂/CO比为0.85,低于理论值;Ni/MgO(P-C)催化剂上的为0.97,与理论值接近。可见,等离子体炬辅助焙烧法制备的Ni/MgO催化剂上CH₄的积炭活性与CO₂的消炭活性基本保持平衡,因而具有较高的低温催化活性和稳定性。

2.5 催化剂积炭分析

对经36h稳定性测试的两种Ni/MgO催化剂样品进行XPS表征,结果示于图6。由图可见,两个催化剂结合能在 $E_b = 284\sim 290\text{ eV}$ 处存在着C 1s物种的结合能峰。解叠分峰后发现,反应后催化剂表面均存在两种炭物种: $E_b = 289.06\text{ eV}$ 归属于表面氧化态炭组分的残余物种; $E_b = 284.84\text{ eV}$ 则归属于趋于石墨化或已经石墨化的非活性碳。可以看出,Ni/MgO(C)和Ni/MgO(P-C)催化剂上非活性碳占总积炭量分别为87.5%和58.5%,且前者C 1s结合能

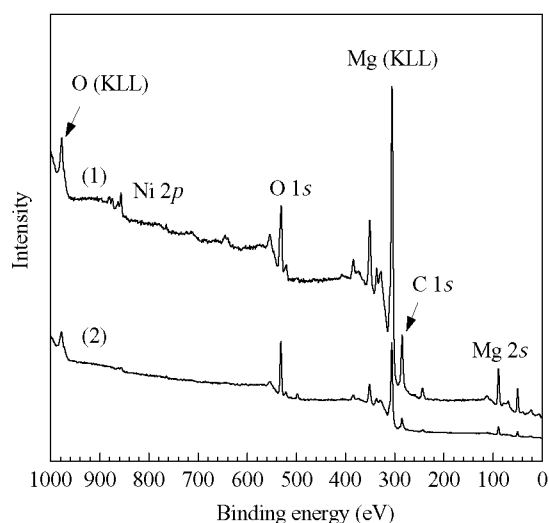


图6 反应后各Ni/MgO催化剂样品的XPS谱

Fig. 6. XPS profiles of two typical Ni/MgO catalyst samples after reaction. (1) Ni/MgO(C); (2) Ni/MgO(P-C).

峰面积显著更大。众所周知,非活性碳物种是导致负载型Ni催化剂失活的主要原因之一^[17]。C 1s结合能峰面积越大,表明催化剂表面非活性碳物种越多,催化剂积炭越严重,失活也就越严重。这与上文结果一致。

结合各元素在XPS测试中的灵敏度因子(Ni: 3; Mg: 0.12; O: 0.66; C: 0.25)和峰面积,对这两种催化剂表面元素含量进行定量计算,结果列于表1。可以看出,Ni/MgO(C)催化剂上碳物种含量达到14.7%,而催化剂Ni/MgO(P-C)上的仅为3.8%。另外,Ni/MgO(P-C)催化剂上表面O原子的相对百分

含量比常规催化剂高出近 10%。催化剂表面 O 含量高有利于消炭, 缓解表面 C 原子的石墨化, 从而提高催化剂稳定性。值得一提的是, 等离子体炬辅助焙烧法制备的催化剂表面活性组分 Ni 含量比常规焙烧法制备的明显提高。结合上文 XRD 和 TEM 结果可知, 等离子体炬结合焙烧法制备的催化剂 Ni 的分散程度更好, 表明其表面有更多高度分散的活性组分 Ni, 因而有利于提高其低温催化活性。有关催化剂表面活性组分含量提高的原因, 文献[11,20]均认为, 等离子体处理使催化剂的比表面积增大, 而大比表面积为活性组分在表面高度分散提供良好的微环境。

表 1 典型催化剂样品表面的元素含量

Table 1 The surface atomic compositions of two typical catalyst samples

Sample	Surface composition (at%)			
	Ni	Mg	O	C
Ni/MgO(C)	4.9	45.9	34.5	14.7
Ni/MgO(P-C)	9.4	42.9	43.9	3.8

2.6 CO₂-TPSR 结果

一般认为, CO₂-TPSR 谱中位于催化剂上 400~600 °C 的脱附峰对应于其氧化态碳物种残余以及 CH₄ 解离碎片 CH_x (x = 0~3), 其活性较高, 是反应的中间体; 而 600 °C 以上的峰对应于石墨化过程中或已石墨化的碳, 容易导致催化剂失活^[22]。图 7 是 Ni/MgO(C) 和 Ni/MgO(P-C) 催化剂反应 36 h 后的 CO₂-TPSR 谱。可以看出, Ni/MgO(C) 催化剂仅在 740 °C 处出现明显的 CO 峰, 表明催化剂表面存在较多石墨化碳; 而 Ni/MgO(P-C) 催化剂则无明显的

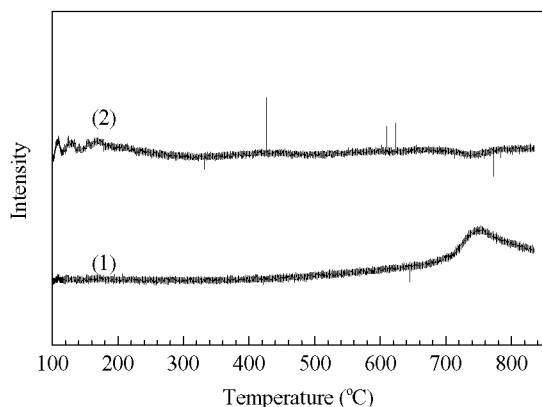


图 7 反应后典型 Ni/MgO 催化剂的 CO₂-TPSR 谱

Fig. 7. CO₂-TPSR profiles of two typical Ni/MgO catalyst samples after reaction. (1) Ni/MgO(C); (2) Ni/MgO(P-C).

CO 峰, 与 XPS 的结果一致。这进一步说明等离子体炬辅助焙烧法制备的 Ni 基催化剂抗积炭能比常规焙烧制备样品的更强。实际上, Ni 既是 CO₂/CH₄ 重整合成气反应的活性中心, 又是催化剂表面积炭的活性中心; 等离子体技术的引入可提高 Ni 分散度, 抑制催化剂表面炭的积累及其石墨化, 因而 Ni/MgO 催化剂的低温催化活性显著升高。

3 结论

与常规焙烧法相比, 采用等离子体炬辅助焙烧法制备的 Ni/MgO 催化剂, 可使催化剂表面活性组分 Ni 含量提高, 分散程度更好, 提供了更多的反应活性位, 而且可有效抑制催化剂表面炭的积累及其石墨化。因此, 催化剂的低温催化活性和稳定性均显著提高。可见, 常压高频放电等离子体炬是制备高分散度和高抗积炭性能 Ni 基催化剂的有效方法。

致谢 感谢罗靖洁博士和陶旭梅博士生在论文写作过程中的有益讨论。

参 考 文 献

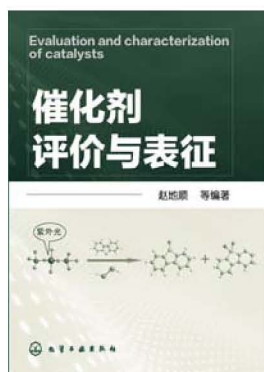
- Shang S Y, Liu G H, Chai X Y, Tao X M, Li X, Bai M G, Chu W, Dai X Y, Zhao Y X, Yin Y X. *Catal Today*, 2009, **148**: 268
- Takanabe K, Nagaoka K, Nariai K, Aika K. *J Catal*, 2005, **232**: 268
- Choudhary V R, Mondal K C, Choudhary T V. *Ind Eng Chem Res*, 2006, **45**: 4597
- Bitter J H, Seshan K, Lercher J A. *J Catal*, 1998, **176**: 93
- 王玉和, 刘红梅, 徐柏庆. 催化学报 (Wang Y H, Liu H M, Xu B Q. *Chin J Catal*), 2005, **12**: 1117
- Ruckenstein E, Hu Y H. *J Catal*, 1996, **162**: 230
- 李基涛, 陈明旦, 严前古, 万惠霖, 蔡启瑞. 高等学校化学学报 (Li J T, Chen M D, Yan Q G, Wan H L, Cai Q R. *Chem J Chin Univ*), 2000, **21**: 1445
- Chen Y G, Tomishige K, Yokoyama K, Fujimoto K. *Appl Catal A*, 1997, **165**: 335
- Soloviev S O, Kapran A Yu, Orlyk S N, Gubareni E V. *J Natur Gas Chem*, 2011, **20**: 184
- Xu B Q, Wei J M, Wang H Y, Sun K Q, Zhu Q M. *Catal Today*, 2001, **68**: 217
- Hua W, Jin L, He X, Liu J, Hu H. *Catal Commun*, 2010, **11**: 968
- Zhu X L, Huo P P, Zhang Y P, Cheng D G, Liu C J. *Appl Catal B*, 2008, **81**: 132
- 郭芳, 储伟, 石新雨, 张旭. 高等学校化学学报 (Guo F, Chu W, Shi X Y, Zhang X. *Chem J Chin Univ*), 2009, **30**: 746

- 14 柴晓燕, 尚书勇, 刘改焕, 陶旭梅, 李祥, 白玫瑰, 戴晓雁, 印永祥. 催化学报 (Chai X Y, Shang Sh Y, Liu G H, Tao X M, Li X, Bai M G, Dai X Y, Yin Y X. *Chin J Catal*), 2010, **31**: 353
- 15 Liu G H, Li Y L, Chu W, Shi X Y, Dai X Y, Yin Y X. *Catal Commun*, 2008, **9**: 1087
- 16 魏俊梅, 徐柏庆, 李晋鲁, 程振兴, 王亚权, 朱起明. 高等学校化学学报 (Wei J M, Xu B Q, Li J L, Cheng Zh X, Wang Y Q, Zhu Q M. *Chem J Chin Univ*), 2002, **23**: 92
- 17 Wang N, Chu W, Huang L Q, Zhang T. *J Natur Gas Chem*, 2010, **19**: 117
- 18 Arena F, Licciardello A, Parmaliana A. *Catal Lett*, 1990, **6**: 139
- 19 Xu H Y, Chu W, Luo J J, Liu M. *Catal Commun*, 2010, **11**: 812
- 20 徐慧远, 储伟, 士丽敏, 张辉, 周俊. 物理化学学报 (Xu H Y, Chu W, Shi L M, Zhang H, Zhou J. *Acta Phys-Chim Sin*), 2008, **24**: 1085
- 21 Tomishige K, Chen Y G, Fujimoto K. *J Catal*, 1999, **181**: 91
- 22 Chen Y G, Tomishige K, Fujimoto K. *Appl Catal A*, 1997, **161**: L11

《催化剂评价与表征》

赵地顺 等编著 ISBN 978-7-122-10654-4 定价 68.00 元

化学工业出版社 2011 年 6 月出版



催化剂是实现化工生产的必要化学物质. 近年来, 催化剂及催化反应的研究和开发已成为国内外化学工程与技术领域研究的热点. 对催化剂全面细致的评价和表征, 可以揭示催化剂在化学反应中的作用机理, 明确催化剂组成、结构和形态对化学反应的影响, 进而指导催化剂的制备, 选择出活性高、选择性好、使用寿命长、廉价的高

效催化剂.

《催化剂评价与表征》(*Evaluation and Characterization of Catalysts*) 一书根据国内外最新研究进展并结合作者近年来的研究成果, 全面系统地介绍了催化剂评价和表征新技术及其应用.

全书共分为 12 章. 第 1 章介绍催化剂活性评价的基本原理与主要的表征方法. 第 2 章介绍催化剂活性、选择性和稳定性的评价方法. 第 3 章介绍催化剂结构与性能表征的研究技术方法及原理. 第 4~11 章分别对催化剂现代物理表征技术进行了详尽的分析和比较. 第 12 章介绍采用计算机模拟技术在原子水平上研究催化剂, 提高催化剂设计的可预见性.

本书可供从事工业催化剂制备及催化研究的工作者阅读和参考, 也适合高等院校化学工程与技术专业本科生及研究生作为教学参考书使用.

(化学工业出版社)