

# 烟气中 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂催化 CO 氧化性能的研究

向小凤, 张波, 张向宇, 陆续, 徐宏杰  
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 采用传统浸渍法制备了 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 非贵金属催化剂, 基于深度分级燃烧炉膛外 CO 氧化催化作用, 在管式炉实验平台上, 开展低温 CO 氧化催化基础实验研究。结果表明: 在 250~300 °C 之间, 催化氧化 CO 效果明显 (255 °C 时 CO 转化率 78.62%), 300 °C 之后保持较高 CO 转化率 (大于 99.5%); 停留时间 1.2 s 时, 在 150~200 °C 就具有较高的 CO 氧化活性, 延长到 5 s 后 CO 转化率 55.7% (150 °C), 很快增加到 97% (200 °C), 催化效果明显; 对高体积分数的 CO (3 000×10<sup>-6</sup>) 也具备较高的催化剂活性和处理能力; 催化效率随气速 (0.2~0.8 L/min) 减小而增大; 含氧量 (体积分数 2%~3%) 越高, 催化剂效率越高; 添加 Co 后 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衍射峰轻微下降, 有利于催化氧化活性的提高。

**[关键词]** 深度分级燃烧; CO 氧化性; 催化剂; Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 浸渍法; 管式炉  
**[中图分类号]** TK233 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfid.202012303

**[引用本文格式]** 向小凤, 张波, 张向宇, 等. 烟气中 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂催化 CO 氧化性能的研究[J]. 热力发电, 2021, 50(10): 124-129. XIANG Xiaofeng, ZHANG Bo, ZHANG Xiangyu, et al. Study on CO oxidation performance of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in flue gas[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(10): 124-129.

## Study on CO oxidation performance of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in flue gas

XIANG Xiaofeng, ZHANG Bo, ZHANG Xiangyu, LU Xu, XU Hongjie  
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Based on the catalytic effect of CO oxidation outside the furnace of deep staged combustion, the experimental study on Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> non-precious metal catalyst prepared by conventional impregnation method was carried out in a tubular furnace. The results show that, the catalytic oxidation of CO was obvious at 250~300 °C (the conversion rate of CO reached 78.62% at 255 °C), and the conversion rate of CO was maintained at a high level (>99.5%) at temperatures higher than 300 °C. When the residence time was 1.2 s, the CO oxidation activity was higher at 150~200 °C. When the residence time was 5 s, the conversion rate of CO was 55.7% (150 °C) and quickly increased to 97% (200 °C), with obvious catalytic effect. The catalyst also had high activity and treatment capacity for CO with high volume fraction (3 000×10<sup>-6</sup>). The catalytic efficiency increased with the decrease of gas velocity (0.2~0.8 L/min) and the increase of oxygen content (2%~3%). The diffraction peak of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> decreased slightly after the addition of Co, which is beneficial to the improvement of catalytic oxidation activity.

**Key words:** deep staged combustion; CO oxidation; catalyst; Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; impregnation method; tubular furnace

近年来, 为了获得较高的锅炉燃烧效率和更低的 NO<sub>x</sub> 生成浓度, 在进一步降低煤粉细度 (即环保经济细度)、降低截面热负荷和容积热负荷、深度分

级燃烧等措施的基础上, 结合先进的煤粉锅炉燃烧技术, 从而在保证燃烧效率的同时获得更低的 NO<sub>x</sub> 排放, 但炉膛出口 CO 含量较高<sup>[1-3]</sup>。在深度分解燃

修回日期: 2021-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0604100); 中国华能集团有限公司总部科技项目(ZD-19-HKR01)。

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2018YFB0604100); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (ZD-19-HKR01)

第一作者简介: 向小凤(1980), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为烟气脱硝技术, xiangxiaofeng@tpri.com.cn。

烧条件下, CO 随着烟气进入水平烟道及燃煤锅炉尾部受热面, 其中布置的大量金属材料具有一定的催化特性。高含量 CO 在烟气飞灰、壁面金属等材料的催化作用下, 完成氧化反应生成 CO<sub>2</sub>, 这个过程对保证锅炉效率方面非常重要<sup>[4-6]</sup>。

CO 氧化过程是放热过程, 理论上可自发进行, 但反应的引燃温度较高, 需要借助催化剂的作用<sup>[7-8]</sup>。根据催化剂的本质特征 CO 氧化催化剂大致可分为 2 类<sup>[9-10]</sup>: 贵金属催化剂 (由 Au、Pt 等成分组成); 金属氧化物 (非贵金属催化剂), 如 Cu、Mn 等金属, 以提供反应中的活性基础。后者具有性价比高, 原料采取容易等优点。

稀土元素 CeO<sub>2</sub> 具有独特的萤石结构<sup>[11-12]</sup>, 储释氧能力和氧化还原性能均较高, 对 CO 的催化性能较好。但 CeO<sub>2</sub> 催化氧化 CO 的温度较高, 需要加入其他金属离子调变, 提高催化剂的低温催化氧化性能和热稳定性。CuO 具有优异的氧化性能<sup>[13-14]</sup>, 与 CeO<sub>2</sub> 协同催化作用效果明显, 其催化能力与贵金属相近, 可降低催化剂工业规模化成本。活性 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 负载催化剂催化性能较好<sup>[15]</sup>, 纳米级的粒径使其有较大的比表面积和有效的孔结构, 负载的活性组分能够更加容易与反应气氛接触, 从而促进了催化氧化性能的提高, 也可以有效增加催化剂强度, 提高催化剂使用寿命。

因此, 本文采用传统的等体积浸渍法制备了 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂, 基于深度分级燃烧炉膛外 CO 氧化催化作用, 在管式炉实验平台上, 进行了低温 CO 氧化催化基础实验研究, 将烟气中过量的 CO 氧化为 CO<sub>2</sub>, 使气体不完全燃烧热损失降低, 为深度分级燃烧炉膛外高体积分数 CO 的氧化催化提供一种可行性, 还为烟道内 CO 氧化过程化学动力学计算模型的建立, 提供了动力学数据和参考。

## 1 实验内容

### 1.1 材料与试剂

实验材料包括: 硝酸铈 [Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O,  $M=434.22$ ]、硝酸铜 [Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O,  $M=241.60$ ]、硝酸钴 [Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O,  $M=291.03$ ], 均为分析纯 (国药化学集团有限公司); 活性  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (粒径 30 nm, 上海巷田纳米材料有限公司); 去离子水。

### 1.2 分析仪器与设备

实验用分析仪器及设备有: 烟气分析仪 (艾默生 rosemount NGA2000)、电子天平 (上海浦春计量

仪器有限公司)、数显电热鼓风干燥箱 (WHL-25A, 天津市泰斯特仪器有限公司)、箱式电阻炉 (SX-2.5-12, 苏州江东精密仪器有限公司)、电恒温加热磁力搅拌器 (CLT-1A, 天津工兴实验室仪器有限公司)、立式管式炉 (TSVT1100-60, 上海萨佑电炉技术有限公司)、比表面积分析仪 (美国麦克公司)、X 射线衍射仪 (XRD, 德国 Bruker 公司)。

### 1.3 催化剂制备

采用传统等体积浸渍法制备 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂。按照摩尔比  $n(\text{Ce}):n(\text{Cu})=1:1$ , 质量比  $m(\text{CeO}_2+\text{CuO}):m(\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)=0.1$ , 分别称取相应质量的硝酸铈、硝酸铜溶于适量去离子水中, 将 2 种溶液在磁力搅拌电热套中混合搅拌均匀, 加入到活性  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 载体粉末中, 充分搅拌浸渍陈化 8 h, 电热恒温干燥箱 80 °C 干燥 14 h, 箱式电阻炉 500 °C 焙烧 3 h, 研磨过筛, 获得 (425~250  $\mu\text{m}$ ) Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒催化剂, 密封储存于干燥器内, 实验待用。

### 1.4 催化剂氧化性能评价实验

催化剂的 CO 氧化性能评价实验在立式管式炉反应器上进行, 管式炉的石英反应管内径为 30 mm, 管壁厚 4 mm。进口气体 CO 体积分数为 500×10<sup>-6</sup>、1 500×10<sup>-6</sup>、3 000×10<sup>-6</sup>, 根据该烟气分析仪型号进气流速要求 0.2~1.2 L/min, 设定混合气流速范围为 0.5~0.8 L/min, 对应于空速为 15 000 h<sup>-1</sup>, 测试温度范围为 150~550 °C。

将催化剂用相应粒径的石英砂稀释, 置于石英反应管的石英砂芯板上。测试气体组成为: CO (0.5%~0.8%, 体积分数, 下同)、O<sub>2</sub> (2%~3%)、CO<sub>2</sub> (14%), 载气为 He。气体混合物通过管式炉催化床层进行 CO 氧化。稳定反应后采用在线烟气分析仪, 记录管式炉出口气体 CO 体积分数, 升温速率由管式炉温控仪控制。

催化剂性能可通过 CO 转化率来评价<sup>[16-17]</sup>:

$$\eta = [(V_{\text{CO-in}} - V_{\text{CO-out}}) / V_{\text{CO-in}}] \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为 CO 转化率, %;  $V_{\text{CO-in}}$  为 CO 进口体积分数;  $V_{\text{CO-out}}$  为 CO 出口体积分数。

### 1.5 催化剂表征

采用全自动比表面及孔隙度分析仪 (NOVA 4200e), 低温氮气吸附法测定催化剂的比表面积<sup>[18]</sup>。测试前, 先将样品置于真空干燥箱 (DZF-6020, 上海精宏试验设备有限公司) 110 °C 条件下, 高纯氮气吹扫处理 1 h, 然后以液氮为吸附质, 在 -196 °C

下进行分析测试,用 BET (brunauer-emmett-teller) 公式计算比表面积。

采用 X 射线衍射仪对样品进行晶体结构和物相组成分析,管电压 40 kV,管电光电子流 40 mA, CuK $\alpha$  靶,入射光波长 $\lambda=0.154$  nm,步长为 0.02°,测量模式为连续扫描,扫描速度 10(°)/min,扫面范围  $2\theta$  为 10°~80°<sup>[19-20]</sup>。

## 2 结果及讨论

### 2.1 催化剂催化 CO 氧化性能测试

在管式炉实验平台上,开展催化剂性能评价实验,考察不同温度下催化剂对 CO 转化率的影响,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出:对于 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  催化剂,当反应进行 10 min 时,出口 CO 体积分数从  $3\ 288.3\times 10^{-6}$  (炉温 159 °C) 迅速降低到  $705\times 10^{-6}$  (炉温 255 °C),CO 转化率 78.62%;当反应继续进行 5 min 后,出口 CO 体积分数进一步降低到  $30.4\times 10^{-6}$  (炉温 269 °C),CO 转化率达到 99.08%;当炉温达到 300 °C 时,出口 CO 体积分数降低到  $19.5\times 10^{-6}$ ,在炉温 550 °C 时达到最低  $18.8\times 10^{-6}$ 。对比空白实验,Ce-Cu 催化剂在 150~550 °C 的范围内表现出较好的 CO 催化活性,在 250~300 °C 催化氧化 CO 效果开始明显,300 °C 之后保持较高的 CO 转化率(转化率>99.5%)。

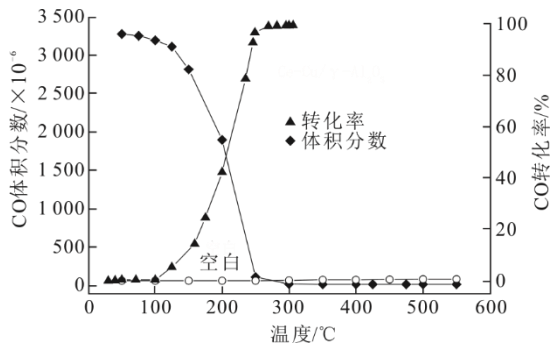


图 1 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  催化剂的 CO 催化氧化性能  
Fig.1 The CO oxidation performance of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  catalyst

### 2.2 停留时间及温度对催化 CO 氧化性能的影响

图 2 为 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  催化剂在不同停留时间的 CO 催化性能。由图 2 可以看出:在 150~200 °C 低温范围内,停留时间变化不大;当温度大于 250 °C 以后,停留时间为 1.0 s 和 1.2 s 时显示出较好的转化率;当 250 °C 时,停留时间为 0.6、0.8、1.0、1.2 s 时转化率均达到 99.5% 以上。

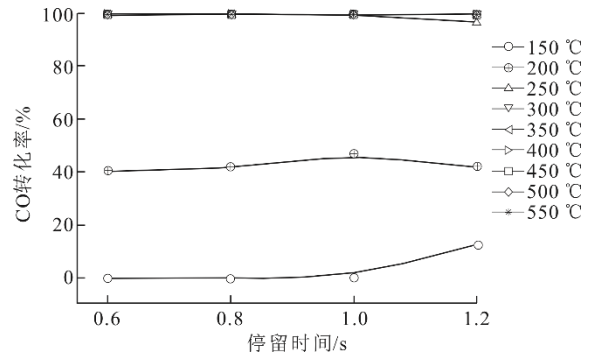


图 2 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  催化剂在不同停留时间的 CO 催化性能  
Fig.2 The CO conversion rates of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  catalyst with different residence times

Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  催化剂在停留时间 5 s 的 CO 转化率如图 3 所示。由图 3 可见:在 150 °C 和 200 °C 低温范围内,与 1.2 s 停留时间(150 °C)的 CO 转化率(12.2%)相比,5 s 停留时间对 CO 催化效果明显提升(150 °C,CO 转化率 55.7%);当温度升高到 200 °C,CO 转化率达到 97.0%;当温度升至 250 °C 以后,转化率达到 99.5% 以上,CO 基本完全转化。

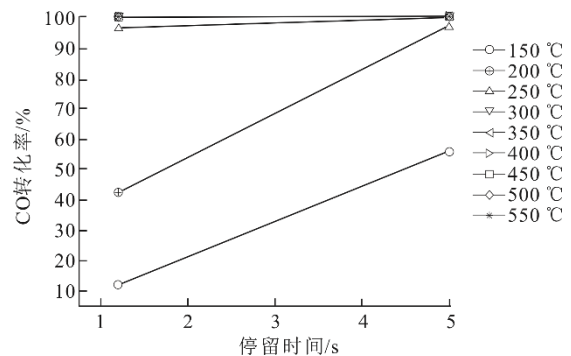


图 3 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  催化剂在停留时间 5 s 的 CO 催化性能  
Fig.3 The CO conversion rates of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  catalyst with residence time of 5 s

值得注意的是,过长的气体停留时间需要更多的材料和反应器运行时间,所以应考虑经济性和实际需要选择合适的气体停留时间<sup>[21-22]</sup>。

### 2.3 CO 初始体积分数对催化剂催化性能的影响

实验测试了催化剂在  $3\ 000\times 10^{-6}$ 、 $1\ 500\times 10^{-6}$ 、 $500\times 10^{-6}$  CO 初始体积分数下的催化效率,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,在温度 200~300 °C 之间,3 种初始体积分数气氛下,CO 的转化率均随着温度的升高达到较高值。CO 和 O $_2$  在催化剂表面存在竞争吸附的关系,随着温度的升高催化剂的活性提高,对 CO 的处理能力以及脱附能力也得到提高,竞争吸附作用减弱,因此催化剂的效率不受 CO 的初始体积分数的影响。可见,该 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al $_2$ O $_3$  催化

剂对高体积分数的 CO 也具备较高的催化剂活性以及较高的处理能力。

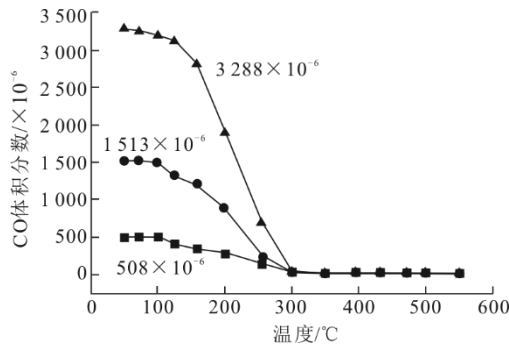


图 4 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂在不同 CO 初始体积分数的催化性能

Fig.4 The CO conversion rates of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst at different initial volume fractions of CO

对 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行不同流量下 CO 催化性能实验, 结果如图 5 所示。调节气速为 0.2~0.8 L/min, Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂随着气体流速的减小, 对 CO 的催化活性效果增大, CO 转化率增大。这可能是因为固定其他条件不变的情况下, 减小进气流速, 增加了原料气与催化剂床层的接触时间, CO 转化率得到一定程度的增加。

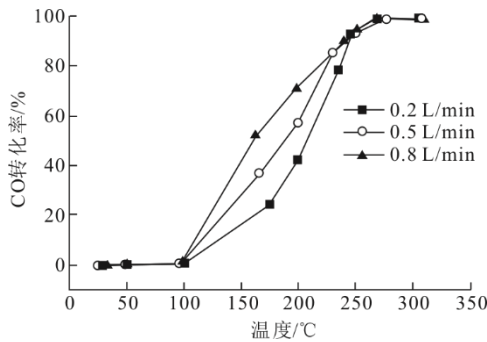


图 5 不同流量下 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂对 CO 的催化性能  
Fig.5 The CO conversion rate of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst at different gas flow rates

实验测试了在其他条件不变的情况下, 改变含氧量 (2%~3%, 体积分数) Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂的性能, 结果如图 6 所示。由图 6 可见, 相同温度下, 反应气体中含氧量越高, 催化剂的效率越高。当实验温度为 50~100 °C 时催化剂性能较低, 含氧量对 CO 氧化性能的影响不明显; 但随着温度升高催化剂的性能逐渐体现出来, 特别是 100~300 °C 之间, 反应气体中含氧量越高, 催化剂的效率越高, 温度升至 300 °C 后, CO 完全转化。这可能是因为, 当含氧量降低时, 催化剂对氧气的吸附能力减弱, 大大降低了反应过程中的催化速率。

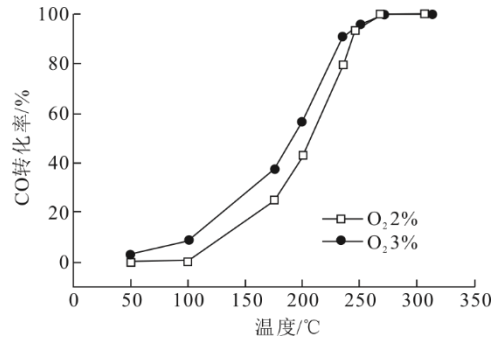


图 6 不同含氧量下 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂的 CO 催化性能  
Fig.6 The CO conversion rates of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst with different O<sub>2</sub> concentrations

## 2.4 活性组分添加对催化 CO 氧化性能的影响

添加活性组分 Co 对 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂性能的影响如图 7 所示。由图 7 可见, 在反应温度较低的情况下 (低于 185 °C), 理论上增加活性组分含量能一定程度上改变催化氧化性能, 但实验效果不明显。当反应温度升高到 200 °C, 添加活性组分的 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂性能明显提高, 直到反应温度到 250~300 °C 时, 催化剂几乎完全催化氧化 CO。但活性组分含量的提高, 增加了 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂的成本, 同时也会影响其成型性能, 因此选择合适的活性组分含量更加重要<sup>[23-27]</sup>。

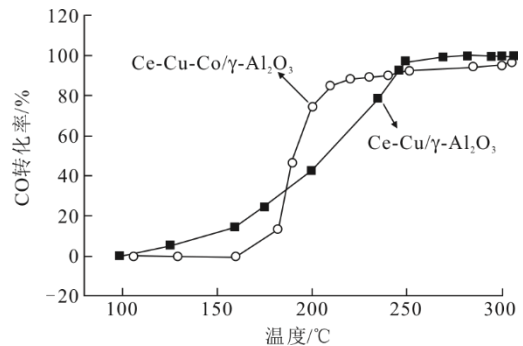


图 7 添加活性组分 Co 对 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂性能的影响  
Fig.7 The CO conversion rate of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst when adding Co

## 2.5 催化剂表征

实验试制 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂和 Ce-Cu-Co/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂的比表面积分别为 126.8、119.4 m<sup>2</sup>/g。Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂的比表面积优势显著, 由于纳米级活性 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 载体催化剂的比表面积较大, 更多的酸性位点得以暴露, 并与反应气体分子接触, CO 更容易吸附在催化剂表面, 催化剂低温催化氧化性能进一步提高。添加活性组分 Co 并没有增大 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂的比表面积。所以, 为改善催化活性, 应选择有利于反应气体的扩散和吸附-脱附,

并暴露更多的催化剂活性中心的活性组分。

图8为Co掺杂前后的催化剂谱图。由图8可以看出：催化剂表现出明显的立方晶系CeO<sub>2</sub> (PDF65-2975)衍射峰 $2\theta=28.5^\circ, 47.5^\circ, 56.5^\circ$ ; Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>衍射峰 $2\theta=31.4^\circ, 36.8^\circ, 44.8^\circ, 59.4^\circ$ ; CuO的衍射峰较为微弱；催化剂掺杂前后均存在 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的特征衍射峰。可见，添加活性组分Co后的Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>谱图变化不大。但Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>衍射峰轻微下降，说明添加活性组分后，抑制了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶粒长大，有利于催化氧化性能的提高。

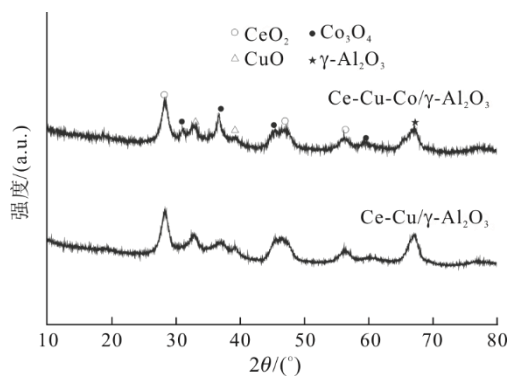


图8 Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂XRD分析  
Fig.8 The XRD patterns of Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst

### 3 结 论

1) 采用普通浸渍法制备的Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂，具有较高的CO催化氧化性能，300℃之后保持较高的CO转化率（转化率大于99.5%）。停留时间1.2s工况时，300℃达到CO最大转化率99.6%；延长停留时间到5s，150℃时CO转化率55.7%，200℃时增加到97.0%，对CO氧化催化效果明显。可选择搁置于烟道内SCR催化剂位置（320~380℃），便于更换降低成本。

2) Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂对高体积分数（ $3\ 000\times 10^{-6}$ ）CO有较高的催化剂活性和较高的处理能力；风速（0.2~0.8L/min）减小，对CO的催化活性效果增大；含氧量（2%~3%）越高，催化效率越高；添加活性组分Co在200℃后催化剂活性明显提高，250℃后CO均完全转化。

3) Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂添加Co后没有增加催化剂的比表面积，但纳米级活性Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>载体暴露的酸性位点较多，使催化剂表现出较好的CO催化性能。Ce-Cu/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂添加Co后XRD谱图出现Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>衍射峰，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>衍射峰轻微下降，抑制了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶粒长大，有利于催化氧化性能提高。

### [参 考 文 献]

- [1] WATANABE H, YAMAMOTO J I, OKAZAKI K. NO<sub>x</sub> formation and reduction mechanisms in staged O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion[J]. Combustion and Flame, 2010, 7: 1255-1263.
- [2] 罗伟. 焦炭气化反应对煤粉空气深度分级燃烧NO<sub>x</sub>生成的影响[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(2): 93-101.  
LUO Wei. Effect of char gasification reaction on NO<sub>x</sub> formation in pulverized coal air-stage combustion[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 93-101.
- [3] FAN W D, LI Y, GUO Q H, et al. Coal-nitrogen release and NO<sub>x</sub> evolution in the oxidant staged combustion of coal[J]. Energy, 2017, 125: 417-426.
- [4] MARIER P, DIBBS H P. The catalytic conversion of SO<sub>2</sub> to SO<sub>3</sub> by fly ash and the capture of SO<sub>2</sub> by CaO and MgO[J]. Thermochimica Acta, 1974, 8(1): 155-165.
- [5] BELO L P, ELLIOTT L K, STANGER R J, et al. High-temperature conversion of SO<sub>2</sub> to SO<sub>3</sub>: homogeneous experiments and catalytic effect of fly ash from air and oxy-fuel firing[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(11): 7243-7251.
- [6] 王永兵, 戴高峰, 单志亮, 等.  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面SO<sub>2</sub>吸附及SO<sub>3</sub>催化生成的密度泛函分析[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(2): 1-8.  
WANG Yongbing, DAI Gaofeng, SHAN Zhiliang, et al. DFT study on the adsorption of SO<sub>2</sub> and catalytic formation of SO<sub>3</sub> on the  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 1-8.
- [7] 李宏亮. 富氢条件下CO选择性氧化高效催化剂涂层和微小型反应器研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011: 20.  
LI Hongliang. Catalyst coating and micro-reactor for preferential CO oxidation[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011: 20.
- [8] 王永钊, 赵永祥, 刘滇生. 低温CO催化氧化催化剂研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(8): 8-12.  
WANG Yongzhao, ZHAO Yongxiang, LIU Diansheng. The research progress in low temperature catalytic oxidation catalysts of carbon monoxide[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(8): 8-12.
- [9] 刘东亮, 刘道胜, 张晓彤, 等. CO低温氧化负载金催化剂研究进展[J]. 化工进展, 2007, 26(8): 1110.  
LIU Dongliang, LIU Daosheng, ZHANG Xiaotong, et al. Studies on low-temperature oxidation of CO by Au catalyst[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(8): 1110.
- [10] 毕玉水, 吕功煊. 一氧化碳低温催化氧化研究进展[J]. 分子催化, 2003, 17(4): 313-320.  
BI Yubing, LYU Gongxuan. Advances of catalytic CO oxidation at low-temperature[J]. Journal of Molecular Catalysis (China), 2003, 17(4): 313-320.
- [11] MONTINI T, MELCHIONNA M M, FORNSIERO P. Fundamentals and catalytic applications of CeO<sub>2</sub>-based materials[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(10): 5987-6041.
- [12] NIE L, MEI D H, XIONG H F, et al. Activation of surface lattice oxygen in single-atom Pt/CeO<sub>2</sub> for low temperature CO oxidation[J]. Science, 2017, 358: 1419-1423.
- [13] AVGOUROPOULOS G, IOANNIDES T. Effect of synthesis parameters on catalytic properties of CuO-CeO<sub>2</sub>[J]. Applied Catalysis B Environmental, 2006, 67(1/2): 1-11.
- [14] GÓMEZ-CORTÉS A, MÁRQUEZ Y, ARENAS-ALATORRE J, et al. Selective CO oxidation in excess of

- H<sub>2</sub> over high-surface area CuO/CeO<sub>2</sub> catalysts[J]. *Catalysis Today*, 2008, 133: 743-749.
- [15] ZENG S H, LIU Y. Nd- or Zr- modified CuO-CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeCrAl monolithic catalysts for preferential oxidation of carbon monoxide in hydrogen-rich gases[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(15): 4879-4885.
- [16] AVOGAOUROPOLOS G, IOANNIDES T, PAPADOPOULOU C, et al. A comparative study of Pt/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Au/ $\gamma$ -Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and CuO-CeO<sub>2</sub> catalysts for the selective oxidation of carbon monoxide in excess hydrogen[J]. *Catalysis Today*, 2002, 75(1/4): 157-167.
- [17] HERNANDEZ J A, GOMEZ S A, ZEPEDA T A, et al. Insight into the deactivation of Au/CeO<sub>2</sub> catalysts studied by in situ spectroscopy during the CO-PROX reaction[J]. *ACS Catalysis*, 2015, 5(7): 4003-4012.
- [18] 刘小元. CeO<sub>2</sub> 基催化剂的制备及其 CO 氧化性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 20.  
LIU Xiaoyuan. Synthesize of CeO<sub>2</sub> based catalysts and their CO oxidation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 20.
- [19] LUO M F, FANG P, HE M, et al. In situ XRD, Raman, and TPR studies of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for CO oxidation[J]. *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*, 2005, 239(1/2): 243-248.
- [20] ZHOU X D, HUEBNER W. Size induced lattice relaxation in CeO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(21): 3512-3514.
- [21] LEE W J, BORDOLOI A, PATEL J, et al. The effect of metal additives in Cu/Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a catalyst for low-pressure methanol synthesis in an oil-cooled annulus reactor[J]. *Catalysis Today*, 2020, 343: 183-190.
- [22] KUNTIMA K, THANES U, UNALOME W H. Methanol synthesis in a slurry phase reactor over Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 931/932: 27-31.
- [23] 林玥廷, 张维奇, 林英明, 等. 考虑燃煤机组健康度与负荷转移的连锁故障防控策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(17): 101-108.  
LIN Yueting, ZHANG Weiqi, LIN Yingming, et al. Control strategy of cascading failures considering the health degree of coal-fired units and load transfer[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17): 101-108.
- [24] WANG Y F, LIU Z Q, WANG R G. NaBH<sub>4</sub> surface modification on CeO<sub>2</sub> nanorods supported transition metal catalysts for low temperature CO oxidation[J]. *ChemCatChem*, 2020, 12(17): 4304-4316.
- [25] LU R, HE L, WANG Y, et al. Promotion effects of nickel-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanosheet-supported Au catalysts for CO oxidation[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2020, 41(2): 350-356.
- [26] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 139-146.  
ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 139-146.
- [27] DAR M A, KRISHNAMURTY S, PAL S. Endohedrally doped gold nanocages: efficient catalysts for O<sub>2</sub> activation and CO oxidation[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, 18(10): 7068-7074.

(责任编辑 杨嘉蕾)

(上接第 100 页)

- [15] 张学镭, 陈海平. 回收循环水余热热泵供热系统热力性能分析[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(8): 1-8.  
ZHANG Xuelei, CHEN Haiping. Thermodynamic analysis of heat pump heating supply systems with circulating water heat recovery[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(8): 1-8.
- [16] 曹欢, 张光明, 牛玉广, 等. 耦合热泵的热电联产机组机理模型研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(3): 129-137.  
CAO Huan, ZHANG Guangming, NIU Yuguang, et al. Mechanism model analysis for CHP units coupled with heat pump[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(3): 129-137.
- [17] 边重阳, 朱月振, 张明琨. 基于热泵的供热机组深度调峰试验研究[J]. *热电技术*, 2019(2): 4-7.  
BIAN Chongyang, ZHU Yuezheng, ZHANG Mingkun. Experimental research on deep peak adjustment of heating unit based on heat pump[J]. *Cogeneration Power Technology*, 2019(2): 4-7.
- [18] 高耀岩, 曾德良, 平博宇, 等. 吸收式热泵供热机组安全区的计算[J]. *热力发电*, 2020, 49(2): 58-64.  
GAO Yaokui, ZENG Deliang, PING Boyu, et al. Calculation of safe operation area for CHP units with absorption heat pump[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(2): 58-64.
- [19] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 139-146.  
ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 139-146.
- [20] WANG W, LIU J, GAN Z, et al. Flexible control of combined heat and power units based on heat-power estimation and coordination[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 123: 106261.

(责任编辑 杜亚勤)