

催化剂制备与研究

# Rb<sub>2</sub>O 掺杂对 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化燃烧 碳烟的性能影响

徐晨峻 朱秋莲 黄金星 胡小波 卢晗锋\*

(浙江工业大学化学工程学院催化反应工程研究所 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 采用柠檬酸溶胶-凝胶法制备掺杂不同 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 复合氧化物催化剂,采用热重法考察其催化燃烧碳烟的活性,并借助 XRD 和 H<sub>2</sub>-TPR 手段探讨掺杂不同 Rb<sub>2</sub>O 含量对 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化燃烧特性的影响。结果表明,适量 Rb<sub>2</sub>O 可以使催化剂与碳烟在高温下接触更为紧密,吸附空气中 CO<sub>2</sub>,形成碳酸盐物质,提高催化剂的氧含量,并作为活性氧传输中心,提升 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化燃烧性能。与未掺杂 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂相比,完全燃烧温度下降 31 °C,碳烟在 394 °C 内完全氧化。

**关键词:** 催化化学; 溶胶-凝胶法; 活性氧; MnCe/ZrO<sub>2</sub> 复合氧化物催化剂; 催化燃烧碳烟

**doi:** 10.3969/j.issn.1008-1143.2015.07.007

**中图分类号:** TQ426.96; O643.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-1143(2015)07-0531-05

## Effects of Rb<sub>2</sub>O doping on the activity of Mn-Ce/ZrO<sub>2</sub> catalyst for soot combustion

Xu Chenjun, Zhu Qiulian, Huang Jinxing, Hu Xiaobo, Lu Hanfeng\*

(Institute of Catalytic Reaction Engineering, College of Chemical Engineering,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

**Abstract:** A series of MnCe/ZrO<sub>2</sub> catalysts with different contents of Rb<sub>2</sub>O was prepared by citric acid sol-gel method. Their catalytic activity for soot combustion was investigated by thermal gravimetric-differential thermal analysis. The as-prepared catalysts were characterized by XRD and H<sub>2</sub>-TPR. The results showed that the addition of appropriate amount Rb<sub>2</sub>O favored the contact of the catalyst with soot in high temperature and the absorption of CO<sub>2</sub> to form carbonate, increasing the surface mobility of active oxygen species, which enhanced the catalytic combustion activity of MnCe/ZrO<sub>2</sub> catalyst. Compared with MnCe/ZrO<sub>2</sub> catalyst, the complete burning temperature of MnCe/ZrO<sub>2</sub> catalysts doped with Rb<sub>2</sub>O decreased from 425 °C to 394 °C.

**Key words:** catalytic chemistry; sol-gel method; active oxygen; MnCe/ZrO<sub>2</sub> composite oxide catalyst; soot catalytic combustion

**doi:** 10.3969/j.issn.1008-1143.2015.07.007

**CLC number:** TQ426.96; O643.36 **Document code:** A **Article ID:** 1008-1143(2015)07-0531-05

柴油车由于其高功率、低油耗以及耐久性好等优点被广泛使用,但柴油车尾气排放的颗粒物对人

类健康和大气环境造成严重危害。碳烟是颗粒物的主要成分,在无负载催化剂的颗粒捕集器中,碳烟燃

收稿日期: 2015-03-09

作者简介: 徐晨峻, 1990年生,男,浙江省金华市人,在读硕士研究生,研究方向为环境催化。

通讯联系人: 卢晗锋,教授,硕士研究生导师,研究方向为环境催化和绿色催化氧化技术。

烧温度约 600 °C, 远超出柴油机正常工作的排气温度(200~400) °C, 随着碳烟的积累, 颗粒捕集中孔道堵塞, 背压升高, 无法正常工作。因此, 具有低温催化碳烟颗粒燃烧功能的颗粒捕集器是目前认可的碳烟后处理技术<sup>[1-2]</sup>。

CeO<sub>2</sub> 具有良好的储氧能力, 且其 Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup> 具有优异的氧化还原能力, 常被作为低温氧化碳烟的催化材料, 提供充足的氧物种。在 Mn 离子引入 CeO<sub>2</sub> 晶格后, 与 CeO<sub>2</sub> 的协同作用可有效提高催化剂的储氧和氧迁移速率, 增强催化剂的低温氧化还原性能<sup>[3-6]</sup>。

催化燃烧碳烟的反应为复杂的气-固-固三相氧化还原反应, 反应遵循 Mars-VanKrevelen 反应机理。即在碳烟与催化剂保持良好接触的条件下, 碳烟的氧化通过金属氧化物的氧化还原循环实现<sup>[7]</sup>。催化剂与碳烟的良好接触保证催化剂的活性氧有效传输给碳烟, 使其在低温下燃烧, 但一般情况下催化剂和碳烟的接触效果有限, 活性氧的传递受到抑制。文献<sup>[8-12]</sup>选择引入碱金属氧化物, 促进 CeO<sub>2</sub> 表面形成超氧化物和过氧化物, 且作为电子助剂, 增加碳原子附近的电子浓度, 增强其获取氧原子的亲和力, 从而加速催化氧化碳烟。本文采用柠檬酸溶胶-凝胶法制备掺杂不同 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 复合氧化物催化剂, 考察具有低熔点的氧化铷掺杂的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂催化燃烧碳烟的反应性能。

## 1 实验部分

### 1.1 催化剂制备

采用柠檬酸溶胶-凝胶法制备 Rb<sub>2</sub>O 掺杂的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂。将 Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O、RbNO<sub>3</sub> 和 Mn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液(50%)溶于去离子水后, 加入载体 ZrO<sub>2</sub> 搅拌均匀,  $m(\text{Rb}_2\text{O}) : [m(\text{Rb}_2\text{O}) + m(\text{MnO}_2) + m(\text{CeO}_2)] = x\%$  ( $x = 20, 40, 60, 80$ ),  $n(\text{Mn}) : n(\text{Ce}) = 0.15 : 0.85$ ,  $[m(\text{Rb}_2\text{O}) + m(\text{MnO}_2) + m(\text{CeO}_2)] : m(\text{ZrO}_2) = 2 : 1$ , 并加入金属阳离子 2 倍物质的量的柠檬酸和柠檬酸质量 10% 的聚乙二醇, 加热搅拌至出现凝胶, 110 °C 烘干 12 h, 300 °C 预烧 1 h, 500 °C 焙烧 3 h, 制得催化剂标记为  $x\%$  Rb-MnCeZr ( $x\%$  为负载 Rb 的质量分数)。

### 1.2 催化剂表征

X 射线粉末衍射在 ARLS CINTAG X'TRA 型 X 射线衍射仪上测定, Ni 滤波, CuK $\alpha$ , 工作电压为 45 kV, 工作电流 40 mA, 扫描范围 10°~80°, 步长 0.02°·s<sup>-1</sup>。

H<sub>2</sub>-TPR 实验在浙江泛泰仪器有限公司 FINE-SORB-3010E 型化学吸附仪上进行, 催化剂装填量 0.2 g, CuO 作为标样, 在氩气气氛 200 °C 预处理 1 h, 冷却至 80 °C, 然后通入 5% H<sub>2</sub>-95% Ar 的还原气, 80 °C 吹扫 20 min, 再以 10 °C·min<sup>-1</sup> 升温至 600 °C, 最后用氩气吹扫降温, 载气流速均为 30 mL·min<sup>-1</sup>。TCD 检测器, TCD 池温度 60 °C, TCD 电流 60 mA。

### 1.3 催化剂活性评价

采用德国 Netzsch STA 409PC 热重分析仪对催化剂活性进行测试, 将碳烟(德国 Degussa 公司的 Printex-U 工业模拟碳烟)和催化剂按质量比 1:10 混合, 在玛瑙研钵中仔细研磨 10 min 后装样(达到紧密接触以研究最佳条件下催化剂的本征活性)。取约 10 mg 样品置于热平衡反应室, 反应气为体积分数 1% NO-N<sub>2</sub> 和 10% O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>, 流量分别为 10 mL·min<sup>-1</sup> 和 50 mL·min<sup>-1</sup>, 从 25 °C 程序升温至 650 °C, 升温速率 10 °C·min<sup>-1</sup>。

催化剂活性评价标准: (1) 碳烟的起燃温度  $T_i$  (TG 曲线的外推起始点); (2) 碳烟燃烧速率最大时的温度  $T_m$  (DTG 曲线的峰值点); (3) 碳烟的燃烧终止温度  $T_f$  (TG 曲线的外推终止点)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD

图 1 为掺杂不同 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂的 XRD 图。表 1 为根据布拉格和谢乐公式计算所得晶格常数和晶粒尺寸。

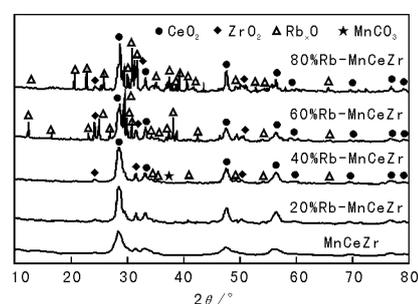


图 1 掺杂不同 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂的 XRD 图  
Figure 1 XRD patterns of MnCe/ZrO<sub>2</sub> catalysts doped with different contents of Rb<sub>2</sub>O

由图 1 可以看出, 所有催化剂样品均出现明显的面心立方萤石结构的 CeO<sub>2</sub> 衍射峰, 纯 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 样品中未检测到 MnO<sub>x</sub> 晶相, 因此除取代 CeO<sub>2</sub> 晶格

中的 Ce 离子外,其余的 Mn 主要以氧化物微晶的形式高度分散在催化剂表面。据文献<sup>[13-15]</sup>报道, Mn<sup>x+</sup> 和 Zr<sup>4+</sup> 均可进入 CeO<sub>2</sub> 晶格中,与 CeO<sub>2</sub> 形成良好的固溶体。

表 1 掺杂不同 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂的织构性质

Table 1 Texture properties of MnCe/ZrO<sub>2</sub> catalysts doped with different contents of Rb<sub>2</sub>O

催化剂	2θ/°	晶格常数/nm	晶粒尺寸/nm
MnCeZr	28.235 0	0.547 0	7.6
20% Rb - MnCeZr	28.392 1	0.544 0	10.3
40% Rb - MnCeZr	28.626 1	0.539 7	9.4
60% Rb - MnCeZr	28.559 2	0.540 9	12.9
80% Rb - MnCeZr	28.626 1	0.539 7	14.3

由图 1 和表 1 可以看出, Mn 和 Zr 与 CeO<sub>2</sub> 发生同晶取代,引起晶胞参数下降。引入 Rb<sub>2</sub>O 后,负载质量分数超过 20%,检测到 Rb<sub>x</sub>O 晶相,表明 Rb 以氧化物单晶形式游离于催化剂中,Rb<sub>2</sub>O 具有强碱性,能吸收空气中的 CO<sub>2</sub> 生成碳酸盐,并与 MnO<sub>2</sub> 反应生成 MnCO<sub>3</sub><sup>[16-17]</sup>,因此在 20% Rb - MnCeZr 和 40% Rb - MnCeZr 中检测到 MnCO<sub>3</sub> 的衍射峰,由于 Rb<sub>2</sub>O 含量增加, Mn 在催化剂中的比例逐渐被稀释, MnCO<sub>3</sub> 含量减少且高度分散在催化剂中, XRD 无法检测到。Rb<sub>2</sub>O 含量的增加导致 CeO<sub>2</sub> 的主衍射峰型变尖,峰宽变窄,且向右偏移,晶粒略有增大, Rb<sub>2</sub>O 质量分数高于 60% 时, MnCe 催化剂被 Rb<sub>2</sub>O 包覆。

## 2.2 H<sub>2</sub> - TPR

图 2 为掺杂不同 Rb<sub>2</sub>O 含量 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂的 H<sub>2</sub> - TPR 谱图。由图 2 可以看出, MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂在 251 °C 和 379 °C 出现两个还原峰,归属于

Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> → MnO 的还原。引入 Rb<sub>2</sub>O 后 277 °C 和 306 °C 附近分别出现两个大还原峰,归属于 Mn<sub>x</sub>O → MnO 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> → CO 的还原。碱金属具有较强碱性,容易吸收空气中的 CO<sub>2</sub> 形成碳酸盐,导致约 306 °C 出现强还原峰,耗氢量大幅增加。随着 Rb<sub>2</sub>O 含量的增加, MnCe/ZrO<sub>2</sub> 表面逐渐被 Rb<sub>2</sub>O 覆盖,无法暴露活性位,且 Mn<sup>x+</sup> 在催化剂中的比例被稀释,导致 MnCO<sub>3</sub> 含量减少,因此,还原峰面积不断减小,低温氧化还原性能明显降低。在 H<sub>2</sub> - TPR 过程中, H<sub>2</sub> 被活化后,可以从碱金属中快速得到活性氧, MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂中的活性氧也可以迅速补充到碱金属上,因此, Mn<sub>x</sub>O 还原峰往低温位置发生迁移且还原速率大幅提高,低温氧化还原性能比 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 明显提高。

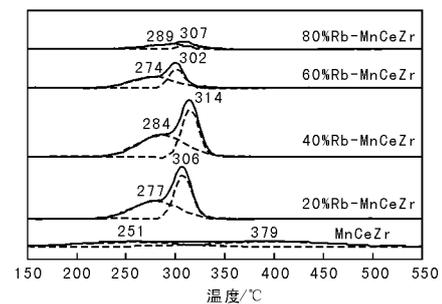


图 2 掺杂不同 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂的 H<sub>2</sub> - TPR 曲线

Figure 2 H<sub>2</sub>-TPR profiles of MnCe/ZrO<sub>2</sub> catalysts doped with different contents of Rb<sub>2</sub>O

柴油机正常尾气温度一般在 (200 ~ 400) °C, 催化剂在该温度的活性氧释放能力是决定碳烟燃烧活性的重要因素<sup>[18-20]</sup>。对图 2 中各 H<sub>2</sub> - TPR 曲线在 (200 ~ 400) °C 的还原峰面积进行积分,并由 CuO 标样计算得到耗氢量,结果如图 3 所示。

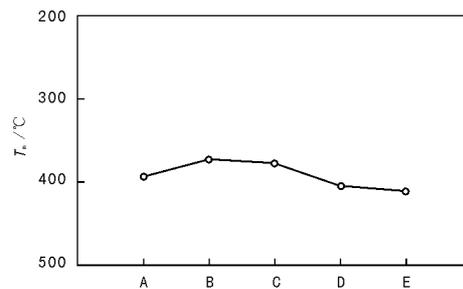
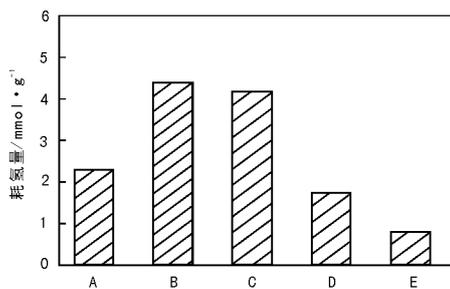


图 3 不同 Rb<sub>2</sub>O 含量的 MnCe/ZrO<sub>2</sub> 催化剂在 (200 ~ 400) °C 的耗氢量及 T<sub>m</sub> 分布图

Figure 3 Distribution of H<sub>2</sub> consumption at (200 - 400) °C and T<sub>m</sub> for MnCe/ZrO<sub>2</sub> catalysts with different contents of Rb<sub>2</sub>O

A. MnCeZr; B. 20% Rb - MnCeZr; C. 40% Rb - MnCeZr; D. 60% Rb - MnCeZr; E. 80% Rb - MnCeZr

由图3可以看出,  $\text{Rb}_2\text{O}$  的碱性增加了表面氧含量, 且其作为氧传输通道能将  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  中的活性氧快速传递给碳烟, 加快碳烟燃烧, 因此, 各催化剂催化燃烧碳烟的  $T_m$  随催化剂在 (200 ~ 400) °C 的耗氧量减小而逐渐升高, 即碳烟燃烧活性与催化剂在该温度释放的活性氧数量呈现良好的正相关。

### 2.3 催化剂活性评价

图4为不同  $\text{Rb}_2\text{O}$  含量的  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  催化剂作用下碳烟燃烧的 TG-DTG 曲线, 相应催化剂氧化

碳烟的温度  $T_i$ 、 $T_m$  和  $T_f$  见图5。由图5可以看出, 20%  $\text{Rb}-\text{MnCeZr}$  催化燃烧碳烟的起燃温度仅为 329 °C, 且在 394 °C 前完全氧化, 比  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  催化剂提前 31 °C 完成燃烧, 表明适量的  $\text{Rb}_2\text{O}$  可以作为活性氧快速传递的通道, 使  $\text{Mn}^{3+}$  在低温下氧化还原速率加快, 且增加表面氧含量, 可有效提高催化剂的催化燃烧特性。但  $\text{Rb}_2\text{O}$  含量继续增加, 导致  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  被  $\text{Rb}_2\text{O}$  逐渐覆盖, 活性位被覆盖, 催化剂低温活性逐渐下降。

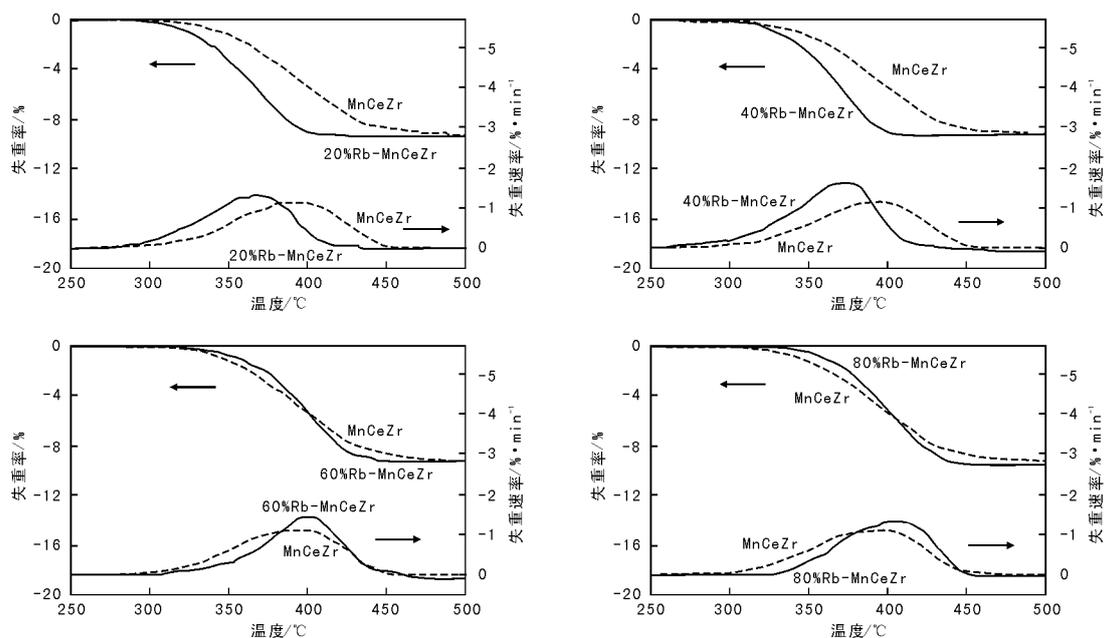


图4 不同  $\text{Rb}_2\text{O}$  含量的  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  催化剂作用下碳烟燃烧的 TG-DTG 曲线

Figure 4 TG-DTG curves of soot catalytic combustion on  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  catalysts with different contents of  $\text{Rb}_2\text{O}$

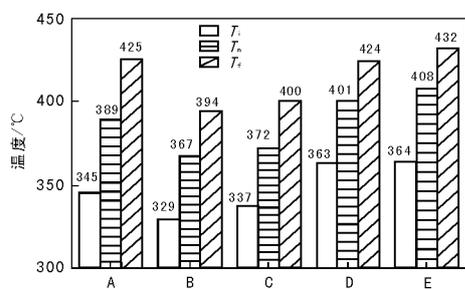


图5 掺杂不同  $\text{Rb}_2\text{O}$  含量的  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  催化剂活性测试图

Figure 5 Catalytic activity tests of  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  catalysts doped with different contents of  $\text{Rb}_2\text{O}$

A.  $\text{MnCeZr}$ ; B. 20%  $\text{Rb}-\text{MnCeZr}$ ; C. 40%  $\text{Rb}-\text{MnCeZr}$ ;  
D. 60%  $\text{Rb}-\text{MnCeZr}$ ; E. 80%  $\text{Rb}-\text{MnCeZr}$

### 3 结论

(1) 在催化剂表面掺杂  $\text{Rb}_2\text{O}$ , 利用其强碱性和吸附空气中  $\text{CO}_2$  能力, 可使催化剂表面氧含量大幅增加。在催化过程中  $\text{Rb}_2\text{O}$  可作为活性氧传输通道, 快速将  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  中的活性氧传输给反应物质, 加快催化燃烧反应的进行。

(2)  $\text{Rb}_2\text{O}$  是一种优良的助剂, 可有效提高  $\text{MnCe}/\text{ZrO}_2$  催化剂催化燃烧碳烟的活性。

### 参考文献:

[1] Raux S, Forber A, Jeudy E, et al. Low temperature activity of Euro4 diesel oxidation catalysts: comprehensive material analyses and experimental evaluation of a representative panel

- [J]. *Topics in Catalysis* 2009 ,52( 13/20) : 1903 – 1908.
- [2] Fino D , Russo N , Saracco G , et al. Catalytic removal of NOx and diesel soot over nanostructured spinel-type oxides [J]. *Journal of Catalysis* 2006 ,242( 1) : 38 – 47.
- [3] Liang Qing , Wu Xiaodong , Weng Duan. Oxygen activation on Cu/Mn-Ce mixed oxides and the role in diesel soot oxidation [J]. *Catalysis Today* 2008 ,139( 1/2) : 113 – 118.
- [4] Zhou Gong , Parag R. A study of cerium-manganese mixed oxides for oxidation catalysis [J]. *Catalysis Letters* ,2008 , 120( 3/4) : 191 – 197.
- [5] Drenchev N , Spassova I , Ivanova E. Cooperative effect of Ce and Mn in  $\text{MnCe}/\text{Al}_2\text{O}_3$  environmental catalysts [J]. *Applied Catalysis B: Environmental* 2013 ,138 – 139: 362 – 372.
- [6] Wu Xiaodong , Liu Shuang , Weng Duan.  $\text{MnO}_x$ - $\text{CeO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  mixed oxides for soot oxidation: activity and thermal stability [J]. *Journal of Hazardous Materials* ,2011 ,187( 1/3) : 283 – 290.
- [7] 刘坚 赵震 徐春明. 柴油车排放碳黑颗粒消除催化剂的研究进展 [J]. *催化学报* 2004 ,25( 8) : 673 – 680.  
Liu Jian , Zhao Zhen , Xu Chunming. Research progress in catalysts for removal of soot particulates from diesel engines [J]. *Chinese Journal of Catalysis* 2004 ,25( 8) : 673 – 680.
- [8] 单文娟 杨利花 马娜 等.  $\text{K}/\text{CeO}_2$  催化剂上碳黑催化燃烧性能及稳定性 [J]. *催化学报* 2012 ,33( 6) : 970 – 976.  
Shan Wenjuan , Yang Lihua , Ma Na , et al. Catalytic activity and stability of  $\text{K}/\text{CeO}_2$  catalysts for diesel soot oxidation [J]. *Chinese Journal of Catalysis* 2012 ,33( 6) : 970 – 976.
- [9] Sun Min , Wang Li , Feng Bingnan. The role of potassium in  $\text{K}/\text{Co}_3\text{O}_4$  for soot combustion under loose contact [J]. *Catalysis Today* 2011 ,175( 1) : 100 – 105.
- [10] Martin S Gross , Maria A Ulla , Carlos A Querini. Catalytic oxidation of diesel soot: new characterization and kinetic evidence related to the reaction mechanism on  $\text{K}/\text{CeO}_2$  catalyst [J]. *Applied Catalysis A: General* 2009 ,360( 1) : 81 – 88.
- [11] Weng Duan , Li Jia , Wu Xiaodong. Promotional effect of potassium on soot oxidation activity and  $\text{SO}_2$ -poisoning resistance of  $\text{Cu}/\text{CeO}_2$  catalyst [J]. *Catalysis Communications* 2008 ,9( 9) : 1898 – 1901.
- [12] Neri G , Rizzo G , Galvagno S. K- and Cs- $\text{FeV}/\text{Al}_2\text{O}_3$  soot combustion catalysts for diesel exhaust treatment [J]. *Applied Catalysis B: Environmental* ,2003 ,42( 4) : 381 – 391.
- [13] 李想 孟明 姚金松.  $\text{Mn}/\text{Ce}/\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂中锰物种的精细结构研究 [J]. *无机化学学报* ,2007 ,23( 2) : 211 – 216.  
Li Xiang , Meng Ming , Yao Jinsong. Fine structures of Manganese species in highly dispersed  $\text{Mn}/\text{Ce}/\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$  catalysts [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry* 2007 ,23( 2) : 211 – 216.
- [14] Zhu Ling , Yu Junjie , Wang Xuezhong. Oxidation treatment of diesel soot particulate on  $\text{Ce}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$  [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2007 ,140( 1/2) : 205 – 210.
- [15] Atribak I , Azambre B. Effect of NOx adsorption/desorption over ceria-zirconia catalysts on the catalytic combustion of model soot [J]. *Applied Catalysis B: Environmental* 2009 , 92: 126 – 137.
- [16] María A Peralta , María S Zanuttini. Diesel soot and NOx abatement on  $\text{K}/\text{La}_2\text{O}_3$  catalyst: Influence of K precursor on soot combustion [J]. *Applied Catalysis A: General* , 2011 ,399( 1/2) : 161 – 171.
- [17] Eleonora Aneggi , Carla de Leitenburg , Giuliano Dolcetti. Diesel soot combustion activity of ceria promoted with alkali metals [J]. *Catalysis Today* ,2008 ,136( 1/2) : 3 – 10.
- [18] Lu Hanfeng , Zhou Ying , Han Wenfeng. Promoting effect of  $\text{ZrO}_2$  carrier on activity and thermal stability of  $\text{CeO}_2$ -based oxides catalysts for toluene combustion [J]. *Applied Catalysis A: General* 2013 ,464 – 465( 15) : 101 – 108.
- [19] 盛叶琴 周瑛 卢晗锋 等. 铈基复合氧化物催化碳烟燃烧的性能及其  $\text{H}_2$ -TPR 研究 [J]. *催化学报* ,2013 ,34( 3) : 567 – 577.  
Sheng Yeqin , Zhou Ying , Lu Hanfeng , et al. Soot combustion performance and  $\text{H}_2$ -TPR study on ceria-based mixed oxides [J]. *Chinese Journal of Catalysis* ,2013 ,34( 3) : 567 – 577.
- [20] 周瑛 卢晗锋 张宏华.  $\text{LaBO}_3$  钙钛矿催化剂的 VOCs 催化燃烧特性 [J]. *中国环境科学* 2012 ,32( 10) : 1772 – 1777.  
Zhou Ying , Lu Hanfeng , Zhang Honghua. Catalytic properties of  $\text{LaBO}_3$  perovskite catalysts in VOCs combustion [J]. *China Environmental Science* 2012 ,32( 10) : 1772 – 1777.