

Al³⁺ 掺入对 CeO₂(ZrO₂)/TiO₂ 催化剂脱硝性能的影响

金奇杰^{1,2} 潘有春^{1,2} 陶兴军^{1,2} 沈岳松^{1,2*} 祝社民^{1,2}

(1.南京工业大学材料科学与工程学院,南京 210009;

2.南京工业大学江苏先进无机功能复合材料协同创新中心,南京 210009)

摘 要 采用溶胶-凝胶法制备 Al³⁺ 掺杂 CeO₂(ZrO₂)/TiO₂ 催化剂,研究了 Al³⁺ 掺入对 CeO₂(ZrO₂)/TiO₂ 催化剂脱硝性能的影响。采用 X 射线衍射、氮气吸附脱附、氨气程序升温吸附、氨气程序升温还原以及荧光光谱等表征技术对催化剂进行表征。结果表明:Al³⁺ 的掺入有利于抑制 TiO₂ 从无定型相向锐钛矿相转变,增强了催化剂的储释氧性能,提高了催化剂的强酸酸量和缺陷浓度。强酸酸量和缺陷浓度的提高有利于反应气体的吸附;储释氧性能的增强,吸附的 NO 物种被氧化的速率加快,有利于催化反应的进行。因此,适量 Al³⁺ 的掺入会明显提升 CeO₂(ZrO₂)/TiO₂ 催化剂的高温脱硝活性,拓宽活性温度窗口。71400h⁻¹ 条件下 0.8Al-CZT 催化剂在 330℃ 达到最高活性(98.9%)且在 400℃ 脱硝活性依然能够维持 90.8%。

关键词 CeO₂(ZrO₂)/TiO₂, 烟气脱硝, 酸性位, 溶胶-凝胶法

Influence of Al³⁺ on the performance of CeO₂(ZrO₂)/TiO₂ for selective catalytic reduction of NO

Jin Qijie^{1,2} Pan Youchun^{1,2} Tao Xingjun^{1,2} Shen Yuesong^{1,2} Zhu Shemin^{1,2}

(1.College of Materials Science and Engineering,Nanjing Tech University,Nanjing 210009;

2.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Advanced Inorganic Function Composites,
Nanjing Tech University,Nanjing 210009)

Abstract A series of CeO₂(ZrO₂)/TiO₂ catalysts were modified with Al³⁺ using a sol-gel method.The effect of Al³⁺ on the catalytic performance of CeO₂(ZrO₂)/TiO₂ for the selective catalytic reduction (SCR) of NO with NH₃ was investigated.The catalysts were characterized by XRD,N₂-BET,NH₃-TPD,H₂-TPR and PL spectra,respectively. Results showed that the addition of Al³⁺ could inhibit the transformation of TiO₂ from amorphous phase to anatase phase.In addition,Al³⁺ ions could increase the defects species concentration and the amount of strong acid sites,which was beneficial for the adsorption of reaction gas.The enhancement of oxygen storage capacity was good for catalytic activity.Therefore,the additions of Al³⁺ improved catalytic activity at the high temperature and broadened the active temperature window while the amount was appropriate.Under GHSV was 71400h⁻¹,0.8Al-CZT obtained the maximum activity (98.9%) at 330℃ and maintained 90.8% NO conversion at 400℃.

Key words CeO₂(ZrO₂)/TiO₂, flue gas denitrification, acid site, sol-gel method

氮氧化物(NO_x)是造成光化学烟雾和酸雨等环境污染的主要原因之一,火电厂和水泥厂等尾气脱硝处理成为大气污染治理的重点研究对象之一^[1-2]。脱硝催化剂中金属氧化物因其优异的脱硝性能和较低的成本等优点有望成为脱硝催化剂工业应用的主流^[3]。目前应用最为广泛的商业脱硝催化

剂是钒钛体系,但钒钛催化剂在促进 NO_x 减排的同时,易产生有毒固体废弃物,存在二次污染,且机械强度低,不耐冲击,限制了其在高粉尘浓度的水泥、钢铁行业的脱硝应用^[4]。因此,研发高活性低成本的环境友好型催化剂有望成为脱硝催化剂规模化应用的关键部分。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0205500);国家自然科学基金(51772149);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介:金奇杰(1991-),男,博士研究生,主要从事脱硝催化材料的研究。

联系人:沈岳松(1981-),男,研究员,主要从事新型环保催化材料和能源催化转换研究。

TiO₂ 具有较大的比表面积、较强的表面酸性以及环境友好性而常用作脱硝催化剂载体^[5-6]; CeO₂ 在脱硝领域中因其优异的氧化还原性能和储释氧性能而常作为活性组分^[7]。脱硝催化剂中, 引入其他金属离子能够提高 CeO₂ 的储释氧性能, 国内外学者研发了较多铈基催化剂, 如 Ce-Zr-O_x^[8-9]、CeO₂/Al₂O₃^[10-13] 和 CeO₂(ZrO₂)/TiO₂^[14-15] 等在较宽的温度窗口范围内都表现出优异的脱硝性能, 但需要继续深入研究以奠定工业应用的基础。

对于 CeO₂(ZrO₂)/TiO₂(CZT), Al³⁺ 的价态低于 Ce⁴⁺、Ti⁴⁺ 和 Zr⁴⁺, Al³⁺ 的掺入能够提高催化剂中氧缺陷浓度。另外, Ti⁴⁺ 和 Al³⁺ 的配位数分别为 6 和 4, 根据 Tanabe 法则, Al³⁺ 的掺入能够提高催化剂 L 酸的酸量^[16]。众所周知, L 酸的酸量和氧缺陷浓度均对催化剂脱硝性能具有重要影响。因此, 本研究以课题组前期工作为基础, 探索了 Al³⁺ 掺入对 CZT 催化剂性能的影响, 为后期研发新型高效的工业用脱硝催化剂奠定基础。

1 实验部分

1.1 样品制备

将钛酸四丁酯与无水乙醇按质量比 17:20 配成 A 液, 磁力搅拌 10min, 再将冰醋酸、蒸馏水和无水乙醇以质量比 12:5:35 以先后顺序加入配制成 B 液, 然后将 B 液滴加到 A 液中并磁力搅拌 20min, 最后依照活性组分中 Ti/Ce/Zr 元素摩尔比为 4:1:1, 分别称取适量硝酸铈和氧氯化锆加入 A 液中, 磁力搅拌 30min, 即制得钛铈锆复合溶胶。上述复合溶胶经过 60℃ 保温 24h, 然后 110℃ 保温 6h, 最后在空气气氛下 500℃ 焙烧 2h 即得 CZT 催化剂。

在 CZT 催化剂基础上, 向 B 液中加入适量六水合氯化铝制备 Al³⁺ 掺杂 CZT 催化剂, 其中 Al:Ce=0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0(元素摩尔比), 制备的催化剂分别记作 0.1 Al-CZT、0.2 Al-CZT、0.4 Al-CZT、0.6 Al-CZT、0.8 Al-CZT 和 1.0 Al-CZT。催化剂经过筛制得粒径为 0.3~0.45mm 的颗粒用于活性测试。

1.2 测试与表征

采用 X 射线衍射仪(XRD, Smartlab TM 9Kw 型, 日本 Rigaku 公司)测试并分析催化剂的晶体结构与参数, Cu Kα 靶, 扫描速度 10°/min, 扫描范围 10~80°; 以 He-Cd 为激光源(λ=325nm), 采用分光光度计(PL, Labram-HR800 型, 法国 Jobin Yvon 公司)对催化剂进行测试; 采用全自动比表面分析仪

(BET, ASAP 2020M V3.00H 型, 美国 Micromeritics 公司)测试催化剂的孔隙结构参数, 350℃ 真空处理 3h 后以 N₂ 为吸附质, 在 -196℃ 进行测试; 氧化还原性能(H₂-TPR)测试时载气组成为 5% H₂+95% Ar, 载气流速 20mL/min, 400℃ 下 Ar 气吹扫样品 1h, 降温至 50℃, 再以 10℃/min 升温至 900℃; 酸性(NH₃-TPD)测试时在 He 气氛中 400℃ 下处理 1h, 然后冷却至 100℃, 并在 NH₃ 气氛下饱和吸附 1h, 以 10℃/min 升至 450℃ 进行 NH₃ 脱附。

1.3 催化剂活性评价

利用自制固定床反应器评价催化剂的活性, 反应器中石英管总长 1.2m, 内径 6mm。管式炉(德国 Nabertherm 公司)控制催化剂的反应温度, 反应条件: NO(600×10⁻⁶)、NH₃(600×10⁻⁶)、O₂(6%)、载气为 N₂, 空速 71400h⁻¹, 气流总量 833mL/min, 催化剂用量 0.7mL; 质量流量计控制各气体流量, 每个温度测试点均稳定反应 30min 后采用烟气分析仪(Vario Plus 型, 德国 MRU 公司)测试 NO_x 浓度。本课题组在前期工作中, 对相同系列催化剂的 N₂ 选择性进行了测试分析^[15]。催化剂的脱硝活性由反应前后 NO 的转化率(η, %)表示, 按式(1)进行计算:

$$\eta = [(V_{\text{NO-in}} - V_{\text{NO-out}}) / V_{\text{NO-in}}] \times 100\% \quad (1)$$

式中, V_{NO-in} 为反应时 NO 进气量, mg/L; V_{NO-out} 为反应时 NO 出气量, mg/L。

2 结果与讨论

2.1 催化性能分析

不同反应温度下 Al 掺入量对 CZT 催化剂脱硝活性的影响见图 1。由图可知, CZT 催化剂在 300℃ 达到最高活性(95.4%), 且其活性温度窗口为 240~390℃。Al³⁺ 的掺入会降低催化剂的低温脱硝性能, 尤其是 200℃ 的活性; 但能明显提高其高温性能且拓宽活性温度窗口。0.8 Al-CZT 在 330℃ 时最高活性达到 98.9%, 活性温度窗口拓宽为

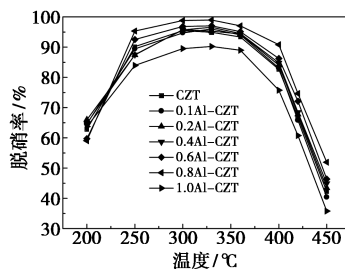


图 1 不同反应温度下 Al 掺入量对 CZT 催化剂脱硝活性的影响

235~400℃且其在 400℃时活性能够依然能够维持在 90.8%, 比 CZT 高了 8.2%。众所周知, 纯 Al_2O_3 没有明显的脱硝活性, 且 Al^{3+} 掺入量增大后, 活性组分(CeO_2)的相对含量逐渐降低, 催化剂表面活性位点数量相应减少。因此, Al^{3+} 的掺入量继续增大时, 催化剂的整体活性下降较为明显。

由图还可知, 催化剂活性与反应温度呈抛物线关系。在低温区, 催化剂具有良好的储释氧能力和氧化还原性能, 促进脱硝反应进行^[17], 且反应温度升高, 催化剂表面活化能提高, 反应气体动能增加, 有利于提高催化活性; 当反应温度进一步升高, NH_3 与 O_2 反应逐渐占主导作用, 还原剂量减少, 催化活性明显下降。最后, 根据课题组前期工作可知, CZT 在测试温度范围内的 N_2 选择性较高, 能够满足工业用需求^[15]。

2.2 XRD 分析

图 2 为 CZT 和 0.8 Al-CZT 的 XRD 谱图。由图可知, 与 PDF 卡片核对, 发现 XRD 谱图中共有两种不同晶相。2 θ =25.2°、37.5°和 47.9°对应锐钛矿型 TiO_2 (PDF 71-1168); 而 2 θ =29.2°、34.0°和 48.7°对应立方晶系 $\text{Ce}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ (PDF 38-1436)。XRD 谱图中并没有观察到 Al^{3+} 对应的衍射峰, 说明 Al^{3+} 在 CZT 催化剂表面具有很好的分散度或者以无定形形式存在。另外, Al^{3+} 掺入后, 对应无定形相的宽衍射峰其相对强度提高, 而对应锐钛矿相 TiO_2 的衍射峰强度降低。换言之, Al^{3+} 的掺入会抑制 TiO_2 从无定形向锐钛矿转变。众所周知, 无定形是缺陷综合体, 无定形相对含量增加会提高催化剂中各种缺陷的浓度, 而缺陷的存在是较高催化活性的关键。因此, Al^{3+} 的掺入抑制 TiO_2 物相转变可能是其脱硝活性提高的原因之一。

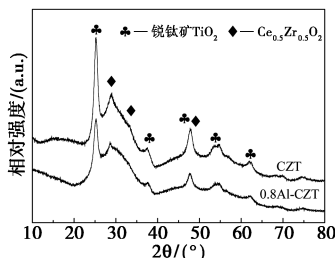


图 2 CZT 和 0.8 Al-CZT 的 XRD 谱图

2.3 BET 分析

表 1 列出来 CZT 和 0.8 Al-CZT 的孔隙结构参数。由表可知, CZT 催化剂的比表面积(S_{BET})、孔容(V_{pore})和平均孔径(d_{pore})分别为 105.5 m^2/g 、0.196 cm^3/g 和 7.44 nm。 Al^{3+} 掺入后催化剂的平

均孔径和孔容略有提高, 比表面积略微降低。催化剂比表面积大, 更多的酸性位点得以暴露并与反应气体分子接触, NO 、 NH_3 等更易于吸附在催化剂表面。因此, Al^{3+} 掺入后, 催化剂比表面积的降低可能是其低温脱硝活性降低的原因之一。

表 1 CZT 和 0.8 Al-CZT 的孔隙结构参数

样品	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$V_{\text{pore}}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$d_{\text{pore}}/\text{nm}$
CZT	105.5	0.196	7.44
0.8 Al-CZT	102.9	0.224	7.58

2.4 NH_3 -TPD 分析

催化剂表面酸性对其吸附 NH_3 的能力具有重要影响^[18]。图 3 为 CZT 和 0.8 Al-CZT 的 NH_3 -TPD 谱图。由图可知, 100~500℃的低温脱附峰对应于弱酸位上 NH_3 的脱附, 500~800℃的高温脱附峰对应于强酸位上 NH_3 的脱附^[19]。CZT 和 0.8 Al-CZT 均有两个明显的 NH_3 脱附峰, 但低温脱附峰面积有所减小, 即适量 Al^{3+} 掺入后会降低催化剂弱酸酸量; 高温脱附峰面积则随着 Al^{3+} 的掺入明显提高, 即 Al^{3+} 掺入后会增加催化剂强酸酸量。总的来说, 适量 Al^{3+} 的掺入能够提高催化剂强酸酸量, 有利于反应气体 NH_3 在催化剂表面的吸附, 这可能是 0.8 Al-CZT 高温脱硝活性比 CTZ 高的原因之一。

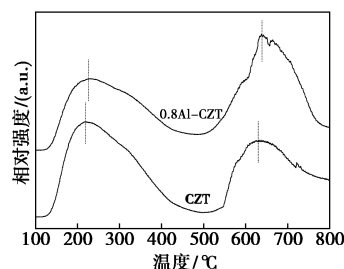


图 3 CZT 和 0.8 Al-CZT 的 NH_3 -TPD 谱图

2.5 H_2 -TPR 分析

CZT 和 0.8 Al-CZT 的 H_2 -TPR 曲线见图 4。由图可知, CZT 在 461℃有一个较强的耗氢峰, 对应的是 $\text{Ce}^{4+}-\text{O}-\text{Ce}^{4+}$ 表面氧的还原^[20-21]; 在 611℃的弱峰对应的是 TiO_2 和 $\text{Ce}^{3+}-\text{O}-\text{Ce}^{4+}$ 表面氧的还原^[22]; 由于体相 CeO_2 的还原温度通常高于 750℃, 所以在 848℃的还原峰对应的是体相 CeO_2 的还原^[23]。0.8 Al-CZT 分别在 471、628 和 847℃处具有耗氢峰, 且 471℃对应的耗氢峰面积较大。另外, 文献中常用 H_2 -TPR 曲线的积分面积对比催化剂的储释氧性能。通过对比可以发现, 0.8 Al-

CZT 在低温的 H_2 -TPR 曲线积分面积明显高于 CZT, 而高温下的积分面积相差不大, 即 Al^{3+} 掺入后, 催化剂的低温储释氧性能有一定的增强。总的来说, Al^{3+} 的掺入对氧化还原性能影响不大, 但能够明显增强 CZT 催化剂的低温储释氧性能。

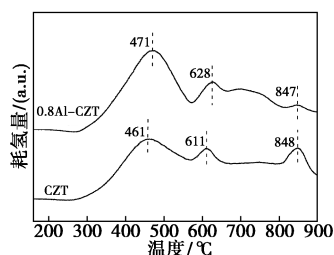


图4 CZT 和 0.8 Al-CZT 的 H_2 -TPR 曲线图

2.6 PL 分析

根据文献报道, 超氧离子在氧化反应中具有较好的促进作用, 且能够将催化剂表面吸附的 NO 氧化^[24]。PL 谱图已经广泛应用于表征催化剂表面缺陷浓度。当缺陷浓度提高时, 更多的电子被捕获, 并通过非放射性方式与孔隙结合, 因此谱峰强度降低^[25]。图 5 为 CZT 和 0.8 Al-CZT 的 PL 谱图。由图可知, 两组催化剂有着相似的曲线形状, 对应的是 TiO_2 缺陷浓度。据文献报道, 558nm 左右的谱峰对应着催化剂表面缺陷, 而 633nm 左右的谱峰是缺陷周围晶格离子极化的结果^[26]。与 CZT 相比, 0.8 Al-CZT 的 PL 谱峰强度减弱。因此, 可以推测 Al^{3+} 的掺入提高了催化剂表面缺陷浓度, 且表面缺陷浓度的提高有利于催化活性的提升。

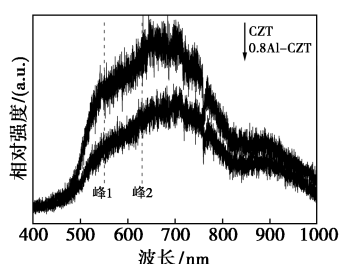


图5 CZT 和 0.8 Al-CZT 的 PL 谱图

3 结论

在 CZT 中掺入适量 Al^{3+} , 其高温活性明显增强。0.8 Al-CZT 在 330°C 时最高活性达到 98.9%, 活性温度窗口拓宽为 235~400°C 且其在 400°C 时活性能够依然能够维持 90.8%, 比 CZT 高了 8.2%。主要是因为: Al^{3+} 的掺入抑制了 TiO_2 从无定型相向锐钛矿相转变, 增大了催化剂表面的强酸酸量, 增强了 CZT 的储释氧性能。CZT 是固体酸催化剂,

其脱硝催化活性与固体酸的性质直接相关。弱酸酸量的减少对应着低温活性的降低, 而强酸酸量的增加对应着高温活性的提高。另外, 缺陷浓度的提高和储释氧性能的增强, 吸附的 NO 被氧化的速率加快, 有利于催化反应的进行。因此 Al^{3+} 的掺入使得 CZ 高温脱硝活性明显增强。

参考文献

- [1] 顾韵婕, 韩粉女, 唐喆, 等. 低温选择性催化还原脱硝催化剂 $CeVO_4$ /凹凸棒土的制备和性能研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(3): 51-53.
- [2] 陈健, 郑玉婴, 张延兵, 等. 氧化还原沉淀法制备 MnO_2 /MWCNTs 催化剂及其低温 SCR 活性[J]. 无机材料学报, 2016, 31(12): 1347-1354.
- [3] Tang C J, Zhang H L, Dong L. Ceria-based catalysts for low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH_3 [J]. Catalysis Science & Technology, 2016, 6(5): 1248-1264.
- [4] Zhang S L, Zhong Q. Surface characterization studies on the interaction of $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ catalyst for low temperature SCR of NO with NH_3 [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2015, 221: 49-56.
- [5] Qiu L, Wang Y, Pang D D, et al. SO_4^{2-} -Mn-Co-Ce supported on TiO_2/SiO_2 with high sulfur durability for low-temperature SCR of NO with NH_3 [J]. Catalysis Communications, 2016, 78: 22-25.
- [6] 何发泉, 程继红, 王宝冬, 等. SCR 脱硝催化剂用纳米 TiO_2 研究进展[J]. 化工新型材料, 2015, 43(6): 1-3.
- [7] Zhou L L, Li C T, Zhao L K, et al. The poisoning effect of PbO on Mn-Ce/ TiO_2 catalyst for selective catalytic reduction of NO with NH_3 at low temperature[J]. Applied Surface Science, 2016, 389: 532-539.
- [8] Ding S P, Liu F D, Shi X Y, et al. Promotional effect of Nb additive on the activity and hydrothermal stability for the selective catalytic reduction of NO_x with NH_3 over $CeZrO_x$ catalyst[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 180: 766-774.
- [9] Ma Z R, Wu X D, Si Z C, et al. Impacts of niobia loading on active sites and surface acidity in NbO_x/CeO_2-ZrO_2 NH_3 -SCR catalysts[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2015, 179: 380-394.
- [10] Li X L, Li Y H. Molybdenum modified $CeAlO_x$ catalyst for the selective catalytic reduction of NO with NH_3 [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2014, 386: 69-77.
- [11] Jin B F, Wei Y C, Zhao Z, et al. Synthesis of three-dimensionally ordered macroporous Al-Ce mixed oxide catalysts with high catalytic activity and stability for diesel soot combustion[J]. Catalysis Today, 2015, 258: 487-497.
- [12] Yan W, Shen Y S, Zhu S M, et al. Promotional effect of molybdenum additives on catalytic performance of CeO_2/Al_2O_3 for selective catalytic reduction of NO_x [J]. Catalysis Letters, 2016, 146(7): 1221-1230.
- [13] Jin Q J, Shen Y S, Zhu S M. Praseodymium oxide modified

- $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst for selective catalytic reduction of NO by NH_3 [J]. Chinese Journal of Chemistry, 2016, 34 (12): 1283-1290.
- [14] 付伟良, 沈岳松, 祝社民, 等. W 掺入对 $\text{Ti}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{O}_{2.4}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ 催化脱硝性能的优化[J]. 无机材料学报, 2014, 29(12): 1294-1300.
- [15] Jin Q J, Shen Y S, Zhu S M, et al. Effect of praseodymium additive on $\text{CeO}_2(\text{ZrO}_2)/\text{TiO}_2$ for selective catalytic reduction of NO by NH_3 [J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34 (11): 1111-1120.
- [16] 曾燕伟. 无机材料科学基础[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2015, 113.
- [17] Qi G S, Yang R T, Chang R. $\text{MnO}_x\text{-CeO}_2$ mixed oxides prepared by co-precipitation for selective catalytic reduction of NO with NH_3 at low temperatures[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2004, 51(2): 93-106.
- [18] Zhou A Y, Yu D Q, Yang L, et al. Combined effects Na and SO_2 in flue gas on Mn-Ce/ TiO_2 catalyst for low temperature selective catalytic reduction of NO by NH_3 simulated by Na_2SO_4 doping[J]. Applied Surface Science, 2016, 378: 167-173.
- [19] Ning P, Song Z X, Li H, et al. Selective catalytic reduction of NO with NH_3 over $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-WO}_3$ catalysts prepared by different methods[J]. Applied Surface Science, 2015, 332: 130-137.
- [20] Jiang Y, Xing Z M, Wang X C, et al. Activity and characterization of a Ce-W-Ti oxide catalyst prepared by a single step sol-gel method for selective catalytic reduction of NO with NH_3 [J]. Fuel, 2015, 151: 124-129.
- [21] Gao X, Jiang Y, Fu Y C, et al. Preparation and characterization of $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ catalysts for selective catalytic reduction of NO with NH_3 [J]. Catalysis Communications, 2010, 11 (5): 465-469.
- [22] Zhu H Q, Qin Z F, Shan W J, et al. Pd/ $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$ catalyst for CO oxidation at low temperature: a TPR study with H_2 and CO as reducing agents[J]. Journal of Catalysis, 2004, 225(2): 267-277.
- [23] Ndifor E N, Garcia T, Solsona B, et al. Influence of preparation conditions of nano-crystalline ceria catalysts on the total oxidation of naphthalene, a model polycyclic aromatic hydrocarbon[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2007, 76 (3-4): 248-256.
- [24] Baylet A, Capdeillayre C, Retailleau L, et al. Relation between partial propene oxidation, sulphate content and selective catalytic reduction of NO_x by propene on ceria/sulphated titania [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2010, 96 (3-4): 434-440.
- [25] Ding J, Zhong Q, Zhang S L. A new insight into catalytic ozonation with nanosized Ce-Ti oxides for NO_x removal: confirmation of Ce-O-Ti for active sites[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(7): 2012-2022.
- [26] Li D, Haneda H, Labhsetwar N K, et al. Visible-light-driven photocatalysis on fluorine-doped TiO_2 powders by the creation of surface oxygen vacancies[J]. Chemical Physics Letters, 2005, 401(4-6): 579-584.

收稿日期: 2017-03-16

(上接第 226 页)

(2) 添加 1.5% 油酸钠与 CTAB 复配表面活性剂, 液体石蜡乳液稳定性和分散性好, 无漂油现象。

(3) 温度低时乳化效果不好, 50°C 条件下获得的乳液无分层现象, 稀释分散性达到一级。

(4) 染料法和电导法测定表明制备的乳液为 O/W 型, 乳液的表面张力约为 24.50mN/m , D50 平均粒径为 $1.56\mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 马金菊, 马李一, 张重权, 等. 油茶籽油与虫白蜡复配物在乳液化妆品中的应用研究[J]. 日用化学工业, 2015, 45(3): 161-165.
- [2] 陈硕, 陈飞平, 唐传核. 植物球蛋白/姜黄素纳米复合物的制备及其对 O/W 型 Pickering 乳液氧化稳定性影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(12): 197-204.
- [3] 李松岩, 刘己全, 李兆敏. 油藏条件下 CO_2 乳液稳定性实验[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 84-90.
- [4] 陈杨华, 郭文帅, 彭辉, 等. 制冷空调用石蜡乳液的蓄能特性实验分析[J]. 化工新型材料, 2014, 42(6): 157-159.
- [5] Takebayashi Y, Sagisaka M, Sue K, et al. Near infrared spectroscopic study of a water-in supercritical CO_2 microemulsion as a function of the water content[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2011, 115(19): 6111-6118.
- [6] 王农, 杨利娟, 王兴权, 等. CTAB 反相微乳体系的相行为研究[J]. 化学研究与应用, 2014(8): 1200-1209.
- [7] 徐文总, 张丙亮, 聂祝婷, 等. 含氟、硅丙烯酸酯改性水性聚氨酯乳液的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(5): 70-73.
- [8] 殷素梅, 李春明. 二甲基硅油-液体石蜡复合乳液的制备[J]. 有机硅材料, 2013, 27(1): 20-24.
- [9] 冯国琳, 刘有智, 焦伟洲, 等. 石蜡乳液的制备及性能研究[J]. 日用化学工业, 2011, 41(6): 415-418.
- [10] 代礼杨, 李洪俊, 苏秀纯, 等. 纳米石蜡乳液的制备及稳定性研究[J]. 石油化工应用, 2011, 30(3): 3-5.
- [11] 暴军萍, 李凤艳, 赵天波. 硅油乳液的制备及乳化条件的研究[J]. 日用化学工业, 2009, 39(6): 395-398.
- [12] 李晋, 李鹏, 蔡晴, 等. 非离子型水性环氧树脂乳液的合成与性能研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(1): 178-181.
- [13] 郭泽军, 李会鹏, 沈建, 等. 非离子石蜡乳液的研究[J]. 化学工业与工程, 2008, 25(5): 414-418.
- [14] Matsumoto K, Matsumoto K. Development of W/O emulsion to form harmless ice slurry to human being[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(3): 411-420.
- [15] Carletti C, Montante G, DeBlasio C. Liquid mixing dynamics in slurry stirred tanks based on electrical resistance tomography [J]. Chemical Engineering Science, 2016, 152: 478-487.

收稿日期: 2017-03-13