

Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化氧化 CO 的性能研究

金奇杰^{1,2,3} 陶兴军^{1,2} 沈建宇^{1,2} 俞建忠¹ 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;

3.德克萨斯大学埃尔帕索分校化学与生物化学系,埃尔帕索 79968)

摘 要 采用挤出成型法制备系列铜铈负载钛铝氧化物(Ce-Cu/Ti-Al-O_x)催化剂,研究 Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化氧化一氧化碳(CO)的性能,并对催化剂进行表征。结果表明:三氧化二铝(Al₂O₃)的掺入抑制了二氧化钛(TiO₂)的颗粒长大,不仅增大了催化剂的比表面积,同时提高了铜铈负载二氧化钛(Ce-Cu/TiO₂)催化剂的缺陷浓度,有利于催化剂表面反应气体的吸附以及催化反应的进行,因此适量添加 Al₂O₃ 能明显提升 Ce-Cu/TiO₂ 催化剂的低温催化氧化活性,拓宽其活性温度窗口,添加 20%(wt,质量分数)Al₂O₃ 制得的 Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化剂具有对催化氧化 CO 的最好催化活性,在 140℃ 条件下,活性达到了 98%,170℃ 以上活性达到了 100%。

关键词 铜铈负载钛铝氧化物,催化氧化,一氧化碳,低温

Study on performance of Ce-Cu/Ti-Al-O_x for catalytic oxidation of CO

Jin Qijie^{1,2,3} Tao Xingjun^{1,2} Shen Jianyu^{1,2} Yu Jianzhong¹ 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;3.Department of Chemistry and Biochemistry,

University of Texas at El Paso,El Paso 79968)

Abstract The series copper cerium supported titanium aluminum composite oxide (Ce-Cu/Ti-Al-O_x) catalysts were prepared by an extrusion method.The performance of the Ce-Cu/Ti-Al-O_x during catalytic oxidation of carbon monoxide (CO) was investigated and several tests were carried out to characterize the catalysts.Results showed that the additions of aluminum oxide (Al₂O₃) could inhibit the growth of titanium dioxide (TiO₂) particles,which increased the specific surface areas and the defects species concentration of Ce-Cu/TiO₂.It was beneficial for the adsorption of reaction gas and the enhancement of catalytic activity.Therefore,the appropriate addition of Al₂O₃ improved catalytic activity at the low temperature,and broadened the active temperature window.The Ce-Cu/Ti-Al-O_x catalyst prepared by adding 20wt% Al₂O₃ showed the best catalytic activity for catalytic oxidation of CO.It reached 98% CO conversion at 140℃ and 100% CO conversion at 170℃.

Key words Ce-Cu/Ti-Al-O_x, catalytic oxidation, CO, low temperature

随着交通运输行业和工矿企业的发展,煤和石油等化石燃料大规模使用,其不完全燃烧产生的一氧化碳(CO)尾气污染,已逐渐成为主要的大气污染物之一^[1]。CO 具有较强的毒性,同时还会与氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOC)等大气污染物产生光化学反应,造成生态环境的破坏^[2]。因此,CO 已经逐渐成为大气污染治理的研究热点。对 CO 的

治理主要有如下几种方法:(1)溶液吸收法;(2)固体吸附法^[3-5];(3)膜分离法^[6-7];(4)直接燃烧法;(5)催化氧化法^[8-10]。前几种治理 CO 的方法受限于气体组成,很难去除多组分尾气中的 CO,而采用催化剂催化氧化 CO,具有效率高、没有二次污染、适用广泛等优点,是较为理想的治理方式。

二氧化铈(CeO₂)是独特的萤石结构,具有较高

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);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18-1078);江苏省六大人才高峰(JNHB-044);江苏重点研发计划(BE2018074)

作者简介:金奇杰(1991-),男,博士,主要从事环境催化材料的研究。

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。

的储释氧能力和氧化还原性能,在催化剂中常作为主要活性组分^[11-12]。然而单纯的 CeO₂ 催化氧化 CO 时所需要的温度较高,需要加入其他金属离子调变,以提高催化剂的低温催化氧化活性和热稳定性。一氧化铜(CuO)则具有优异的氧化性能,可以与 CeO₂ 具有良好的协同催化作用,能表现出与贵金属相近的催化能力,大大降低催化剂工业规模化应用的成本^[13-14]。二氧化钛(TiO₂)具有较大的比表面积、较强的表面酸性、环境友好性以及低廉的成本而常用作工业催化剂载体^[15-17]。另外,TiO₂ 本身就具有一定的催化氧化 CO 能力,且能与活性组分 CeO₂ 产生较强的相互作用,增加催化活性。然而单一的 TiO₂ 载体强度不高,工业应用时在空速较大时容易造成磨损,降低催化剂使用寿命。另一方面,三氧化二铝(Al₂O₃)具有较大的比表面积和有效的孔结构,与 TiO₂ 复合时能够有效增强催化剂强度,从而提高催化剂使用寿命^[18-20]。

本研究以 CeO₂ 为主要活性组分,CuO 为助催化剂,通过与载体 TiO₂ 以及 Al₂O₃ 进行复配,探究不同活性组分、载体及其含量对 CO 催化氧化活性的影响。并对样品进行测试,来探究催化机理,为后期研发新型高效的工业用催化剂奠定基础。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

六水合硝酸铈、五水合硝酸铜、去离子水、Al₂O₃,国药集团化学试剂有限公司;TiO₂(锐钛矿型),安徽铜陵超彩钛白科技有限公司。

磁力加热搅拌器(DF-101S 型),郑州予科仪器设备有限公司;真空干燥箱(DZF-6020 型),上海精宏实验设备有限公司;挤出成型装置(TB-2 型),天津大学北洋化工实验设备有限公司;马弗炉(Y-1800 型),宜兴前锦炉业设备有限公司;X 射线衍射仪(XRD,Rigaku D max/RB 型),日本理学公司;扫描电子显微镜(SEM,JSM-6360LV 型),日本电子株式会社;比表面积及微孔分析仪(ASAP 2020M V3.00H 型),美国 Micromeritics 公司;固定床反应器,实验室自制;专用质子流量计(S4832 型),北京崛场汇博隆精密仪器有限公司;烟气分析仪(J2KN 型),德国 ECOM 公司。

1.2 样品的制备

称取适量六水合硝酸铈,采用磁力加热搅拌器(DF-101S 型,郑州予科仪器设备有限公司)加热搅拌,得到澄清透明状 A 溶液,然后称取适量五水合

硝酸铜溶解于一定量的去离子水中制得 B 溶液。将 A 液与 B 液混合采用磁力加热搅拌器(DF-101S 型,郑州予科仪器设备有限公司)搅拌均匀,加入到锐钛矿型 TiO₂ 载体粉末中,充分搅拌,待其充分陈腐、老化后,采用挤出成型装置(TB-2 型,天津大学北洋化工实验设备有限公司)挤出成型,得到条状泥料。再将泥料采用真空干燥箱(DZF-6020 型,上海精宏实验设备有限公司)80℃干燥 12h,最后采用马弗炉(Y-1800 型,宜兴前锦炉业设备有限公司)在空气气氛条件下,500℃焙烧 2h,得到铜铈负载二氧化钛(Ce-Cu/TiO₂)催化剂。其中铈和铜摩尔配合比为 1:1,CeO₂ 与 CuO 共占 TiO₂ 载体质量的 10%(wt,质量分数,下同)、15%、20%、30%,制得的催化剂分别记为 10% Ce-Cu/TiO₂、15% Ce-Cu/TiO₂、20% Ce-Cu/TiO₂、30% Ce-Cu/TiO₂。

在 Ce-Cu/TiO₂ 催化剂基础上,以钛和铝的质量配合比为 9:1 在载体中加入 Al₂O₃ 粉末,制备负载量分别为 15%(wt,质量分数,下同)和 20%的铜铈负载钛铝氧化物(Ce-Cu/Ti-Al-O_x)催化剂样品,分别记为 15% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 和 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x。

1.3 样品的测试

采用 X 射线衍射仪(XRD,Rigaku D max/RB 型),日本理学公司)对样品进行晶体结构和物相组成分析,40kV,40mA,CuKα 靶,(入射光波长 λ = 0.154nm),步长为 0.02°,扫描速度 10°/min,扫描范围 10~80°。采用扫描电子显微镜(SEM,JSM-6360LV 型,日本电子株式会社)观察样品表面形貌和颗粒大小,电压为 15kV。采用比表面积及微孔分析仪(ASAP 2020M V3.00H 型,美国 Micromeritics 公司)对样品进行比表面积和孔容孔径分布等测试,测试前,样品先采用真空干燥箱(DZF-6020 型,上海精宏实验设备有限公司)350℃真空处理 3h,以液氮为吸附质,在-196℃进行分析测试。

催化剂的催化活性测试。采用固定床反应器(实验室自制)对样品进行催化活性测试,在测试之前,催化剂不经过任何预处理,将 10mL 催化剂加入到石英管中,测试气体组成为:CO(1%)、氧气(O₂,10%),载气为氮气(N₂),空速 5000h⁻¹,气体流量采用专用质子流量计(S4832 型,北京崛场汇博隆精密仪器有限公司)控制,每个温度测试点均稳定反应 30min 后采用烟气分析仪(J2KN 型,德国 ECOM 公司)分析反应前后的 CO 浓度值。催化氧化活性以 CO 的脱除率计算见式(1)。

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

式中, η 为脱除率, %; $V_{\text{CO-in}}$ 为反应 CO 进气量, mg/L; $V_{\text{CO-out}}$ 为反应时 CO 出气量, mg/L。

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

20% Ce-Cu/TiO₂ 和 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 的 SEM 图见图 1。从图 1(a) 可以看出, 20% Ce-Cu/TiO₂ 颗粒粒径较大。从图 1(b) 可以看出, 添加 Al₂O₃ 制得的 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 的颗粒粒径明显减小, 颗粒更加均匀, 小颗粒更多。催化剂粒径减小, 可以有效地增加粒径与反应气体接触的概率, 从而促进催化氧化反应的进行。

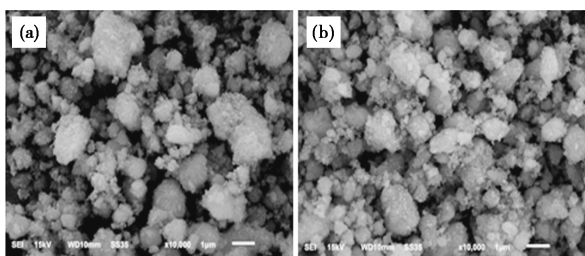


图 1 20% Ce-Cu/TiO₂ 和 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 的 SEM 图

[(a) 20% Ce-Cu/TiO₂; (b) 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x]

2.2 XRD 分析

不同催化剂的 XRD 谱图见图 2。从图可以看出, 不同负载量和不同载体铈基催化剂的谱图与 PDF 卡片核对, 发现谱图中共有 2 种不同晶相, $2\theta = 25.36^\circ, 37.91^\circ, 48.15^\circ, 54.05^\circ, 55.20^\circ, 62.86^\circ, 68.97^\circ, 70.47^\circ, 74.27^\circ$ 分别对应锐钛矿型 TiO₂ (PDF 73—1764) 的 (101)、(004)、(200)、(105)、(211)(204)、(116)、(220)、(215) 晶面; 而 $2\theta = 29.2^\circ$ 和 34.0° 对应立方晶系 CeO₂ (PDF 65—2975), 谱图中并没有观察到 CuO 对应的衍射峰, 说明 CuO 在 Ce-Cu/TiO₂ 和 Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化剂表面具有很好的分散度或者以无定形存在, 另外活性组分含量增加后, CeO₂ 对应的衍射峰增强, 其半峰宽, 峰

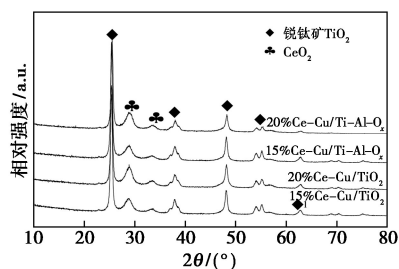


图 2 不同催化剂的 XRD 谱图

面积均增大, 而 TiO₂ 衍射峰轻微地下降, 说明活性组分的增加会抑制 TiO₂ 晶粒长大, 有利于其催化氧化活性的提高。

2.3 比表面积、孔容及平均孔径分析

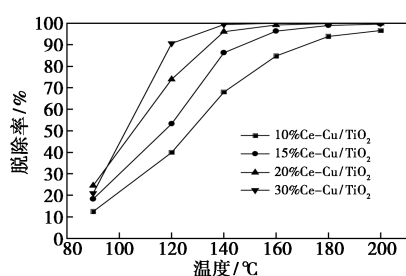
20% Ce-Cu/TiO₂ 和 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 的孔隙结构参数见表 1。从表 1 可知, 20% Ce-Cu/TiO₂ 催化剂的比表面积、孔容和平均孔径分别为 73.5 m²/g、0.309 cm³/g 和 16.8 nm; 掺杂 Al₂O₃ 制得的 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 与 20% Ce-Cu/TiO₂ 催化剂相比, 孔容和平均孔径有所减小分别为 0.282 cm³/g、14.2 nm, 但比表面积有所提高, 为 79.7 m²/g。催化剂比表面积大, 更多的酸性位点得以暴露并与反应气体分子接触, CO 更易于吸附在催化剂表面^[21], 因此 Al₂O₃ 掺入后, 催化剂比表面积的提高是其低温催化氧化活性提高的原因之一。

表 1 20% Ce-Cu/TiO₂ 和 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 的孔隙结构参数

样品	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm
20% Ce-Cu/TiO ₂	73.5	0.309	16.8
20% Ce-Cu/Ti-Al-O _x	79.7	0.282	14.2

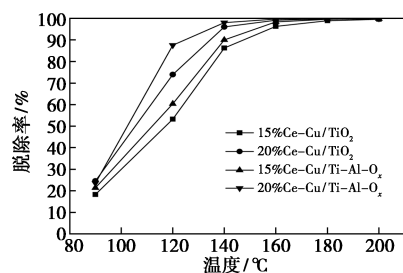
2.4 铈和铜负载量对催化活性的影响

在铈和铜摩尔配合比为 1:1, CeO₂ 与 CuO 共占 TiO₂ 载体质量不同而制得的 Ce-Cu/TiO₂, 在 90~200℃ 区间条件下, 对 CO 催化氧化活性见图 3。从图可以看出, 在反应温度低于 100℃ 条件下, 增加活性组分含量虽然能够一定程度上提高催化氧化活性, 但效果不明显, 可能是反应温度过低, 没有达到 Ce-Cu/TiO₂ 催化剂的起燃温度; 而反应温度高于 200℃ 条件下, 10% Ce-Cu/TiO₂ 也达到其完全催化氧化 CO 温度, 因此催化活性差异不明显; 随着活性组分含量的增加, Ce-Cu/TiO₂ 催化剂在 120~180℃ 温度区间的性能明显增强, 另外 CO 催化氧化在实际工业应用时, 其尾气温度通常在 150~180℃ 之间, 在此温度条件下, 15% Ce-Cu/TiO₂ 催化剂活性不高 (在 160℃ 的催化活性只有 96.3%), 只有 20% Ce-Cu/TiO₂ 与 30% Ce-Cu/TiO₂ 催化剂能够满足实际应用需求, 此时 20% Ce-Cu/TiO₂ 催化剂在 160℃ 条件下催化活性达到 99.5%, 接近 100%, 能够满足实际工况活性要求, 催化剂负载量继续增大至 30%, 其活性虽有提高, 但活性组分含量较高, 既增加经济成本同时也会影响催化剂成型性能, 因此选择 20% Ce-Cu/TiO₂ 催化剂为最优配方。

图3 铈和铜负载量对 Ce-Cu/TiO₂ 催化剂活性的影响

2.5 Al₂O₃ 负载量对催化活性的影响

Al₂O₃ 负载量对 Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化剂活性的影响见图4。从图可以看出,在活性组分 Al₂O₃ 负载量为 20% 条件下,制得的 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化剂具有最好的催化活性,在 140℃ 条件下,活性达到了 98%,170℃ 以上活性达到了 100%,与 Ce-Cu/TiO₂ 催化剂体系相比,载体中加入 10% 的 Al₂O₃,对催化性能具有明显的提升,尤其是在 120℃ 条件下,催化氧化活性可提高约 14% 左右,这可能是 Al₂O₃ 的比表面积较大,负载的活性组分能够更容易与反应气氛接触,从而促进了催化氧化活性的提高^[22]。

图4 Al₂O₃ 负载量对 Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化剂活性的影响

3 结论

对 Ce-Cu/TiO₂ 体系催化剂负载量进行优化,并在载体加入 Al₂O₃ 进行改性,探究了 Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化剂催化氧化 CO 的性能。在铈与铜摩尔配合比为 1:1 条件下,催化氧化活性随着负载量的增大而增加,但考虑到催化剂可能的实际工况条件以及活性组分含量对催化剂成型的影响,选取添加 20% Al₂O₃ 为催化剂最佳活性组分含量,加入 Al₂O₃ 进行掺杂改性后,Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化性能明显增强,添加 20% Al₂O₃ 制得的 20% Ce-Cu/Ti-Al-O_x 催化剂,具有对催化氧化 CO 最好的催化活性,在 140℃ 条件下,活性达到 98%,170℃ 以上活性达到 100%,这主要因为 Al₂O₃ 掺杂改性后,催化剂

晶粒生长受到抑制,同时比表面积增加,因而低温催化氧化活性得到增强。

参考文献

- [1] 谭海燕,王祥,石新雨,等.ML-53(Al)与 Al₂O₃ 负载铜铈催化剂的制备及 CO 氧化性能对比[J].化工新型材料,2017,45(8):193-195.
- [2] Nagarajan V, Chandiramouli R. Investigation on adsorption properties of CO and NO gas molecules on aluminene nanosheet: a density functional application[J]. Materials Science and Engineering B(Advanced Functional Solid-State Materials), 2018, 229: 193-200.
- [3] 刘有毅,黄艳,何嘉杰,等.CO/N₂/CO₂ 在 MOF-74(Ni)上吸附平衡和选择性[J].化工学报,2015,66(11):4469-4475.
- [4] Yu X H, Zhang X M, Meng Y, et al. CO adsorption, dissociation and coupling formation mechanisms on Fe₂C(001) surface[J]. Applied Surface Science, 2018, 434: 464-472.
- [5] Meunier F, Maffre M, Schuurman Y, et al. Acetylene semi-hydrogenation over Pd-Zn/CeO₂: relevance of CO adsorption and methanation as descriptors of selectivity[J]. Catalysis Communications, 2018, 105: 52-55.
- [6] Tou M, Michalsky R, Steinfeld A. Solar-driven thermochemical splitting of CO₂ and in situ separation of CO and O₂ across a ceria redox membrane reactor[J]. Joule, 2017, 1(1): 146-154.
- [7] Korelskiy D, Grahn M, Ye P, et al. A study of CO₂/CO separation by sub-micron b-oriented MFI membranes[J]. RSC Advances, 2016, 6(70): 65475-65482.
- [8] Green I X, Tang W J, Neurock M, et al. Spectroscopic observation of dual catalytic sites during oxidation of CO on a Au/TiO₂ catalyst[J]. Science, 2011, 333(6043): 736-739.
- [9] Ostrom H, Oberg H, Xin H, et al. Probing the transition state region in catalytic CO oxidation on Ru[J]. Science, 2015, 347(6225): 978-982.
- [10] Chen G Z, Xu Q H, Yang Y, et al. Facile and mild strategy to construct mesoporous CeO₂-CuO nanorods with enhanced catalytic activity toward CO oxidation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(42): 23538-23544.
- [11] 张喜悦,张华,介孔 CuO-CeO₂ 复合催化剂的制备及催化性能研究[J].化工新型材料,2016,44(12):174-176.
- [12] Jin Q J, Shen Y S, Zhu S M, et al. Effect of praseodymium additive on CeO₂(ZrO₂)/TiO₂ for selective catalytic reduction of NO by NH₃[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(11): 1111-1120.
- [13] 孙敬方,张雷,葛成艳,等.固相浸渍法和湿浸渍法制备 CuO/CeO₂ 催化剂及其 CO 氧化性能的对比研究[J].催化学报,2014,35(8):1347-1358.
- [14] Guo X L, Li J, Zhou R X. Catalytic performance of manganese doped CuO-CeO₂ catalysts for selective oxidation of CO in hydrogen-rich gas[J]. Fuel, 2016, 163: 56-64.
- [15] Han Q W, Zhu B L, Tian J, et al. Synthesis and catalytic per-

formance for CO oxidation of CuO modified-TiO₂ nanotubes with high thermal stability via functionalized sol modification[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2014, 30(3): 573-578.

- [16] Wang C L, Wang H W, Yao Q, et al. Precisely applying TiO₂ overcoat on supported Au catalysts using atomic layer deposition for understanding the reaction mechanism and improved activity in CO oxidation[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2016, 120(1): 478-486.
- [17] Zhou Y, Doronkin D E, Chen M L, et al. Interplay of Pt and crystal facets of TiO₂: CO oxidation activity and operando XAS/DRIFTS studies[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(17): 9773-9780.
- [18] Zhu J, Mu W T, Su L Q, et al. Al-doped TiO₂ mesoporous material supported Pd with enhanced catalytic activity for complete oxidation of ethanol[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2017, 248: 142-149.
- [19] Yang K, Liu J F, Si R R, et al. Comparative study of Au/TiO₂

and Au/Al₂O₃ for oxidizing CO in the presence of H₂ under visible light irradiation[J]. Journal of Catalysis, 2014, 317: 229-239.

- [20] Reddy B M, Reddy G K, Ganesh I, et al. Single step synthesis of nanosized CeO₂-M_xO_y mixed oxides (M_xO_y = SiO₂, TiO₂, ZrO₂, and Al₂O₃) by microwave induced solution combustion synthesis; characterization and CO oxidation[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(11): 2743-2751.
- [21] Wang Y G, Cantu D C, Lee M S, et al. CO oxidation on Au/TiO₂: condition-dependent active sites and mechanistic pathways[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(33): 10467-10476.
- [22] Liu S M, Guo R T, Sun P, et al. The enhancement of Zn resistance of Mn/TiO₂ catalyst for NH₃-SCR reaction by the modification with Al₂(SO₄)₃[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 78: 370-377.

收稿日期: 2018-03-31

修稿日期: 2019-06-21

(上接第 177 页)

- [14] 齐亚凤, 何正艳, 余军霞, 等. 改性甘蔗渣对 Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 的吸附机理[J]. 环境工程学报, 2013, 7(2): 585-590.
- [15] Zhao D L, Feng S J, Chen C L, et al. Adsorption of thorium (IV) on MX-80 bentonite; effect of pH, ionic strength and temperature[J]. Appl Clay Sci, 2008, 41(1): 17-23.
- [16] 戚晓燕, 袁立永, 吴红枚, 等. 磷酸酯功能化介孔硅材料对钍(IV)的吸附性能[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(6): 652-657.
- [17] Tsushima S. Hydrolysis and dimerization of Th⁴⁺ ion[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2008, 112(23): 7080-7085.
- [18] Zhao D, Wang X, Yang S. Impact of water quality parameters on the sorption of U(VI) onto hematite[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2012, 103(1): 20-29.
- [19] 王所伟, 李家星, 陈磊, 等. Th(IV) 在高庙子膨润土上的吸附行为[J]. 核化学与放射化学, 2010, 32(2): 106-110.

(上接第 181 页)

(4) 在 SA/PEG/GO 凝胶球中, SA 起到了良好的包埋作用, GO 被包埋在凝胶球中经 5 次再生后对 UDMH 的去除率仍可达 30% 以上, 且在这种情况下 GO 便于回收利用。

参考文献

- [1] 季玉晓, 贾瑛, 李明, 等. 改性凹凸棒石黏土吸附处理偏二甲肼废水研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2017, 15(1): 71-74.
- [2] 贾瑛, 贺亚南, 梁峰豪, 等. ZnO/Pd 光催化降解偏二甲肼废水[J]. 含能材料, 2014, 22(4): 554-558.
- [3] 王晓晨, 张彭义. 真空紫外光臭氧降解偏二甲肼的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(1): 57-61.
- [4] 姜丽萍, 孔庆山, 王兵兵, 等. 海藻酸钙纤维的制备及阻燃性能研究[J]. 阻燃材料与技术, 2008(4): 14-14.

- [20] 赵二芳, 尹爱萍, 张秀玲, 等. 高粱秸秆生物炭对 Cr(VI) 的吸附热力学与动力学研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(11): 186-188; 193.
- [21] Dong Z M, Qiu Y F, Dai Y, et al. Removal of U(VI) from aqueous media by hydrothermal cross-linking chitosan with phosphate group[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2016, 309(3): 1217-1226.
- [22] 王诗博, 宁平, 瞿广飞, 等. 改性麦饭石吸附除磷性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(12): 137-140; 144.
- [23] Zhang Z B, Qiu Y F, Dai Y, et al. Synthesis and application of sulfonated graphene oxide for the adsorption of uranium(VI) from aqueous solutions[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2016, 310(2): 1-11.

收稿日期: 2018-06-11

修稿日期: 2019-05-09

- [5] 吴威, 龚继来, 曾光明, 等. 氧化石墨烯负载纳米零价铁的制备及其对亚甲基蓝的吸附[J]. 化工环保, 2015, 35(4): 426-431.
- [6] 李沁华, 韦丽萍, 莫小慧. 聚乙二醇相对分子质量及用量对海藻酸钙支架多孔结构及性能的调控[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008(1): 65-68.
- [7] 卜晓宇, 刘祥莹. 草酸改性凹凸棒土吸附偏二甲肼实验研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2013, 11(1): 55-58.
- [8] 方智, 许国根, 朱光威. 碳纳米管对偏二甲肼的吸附性能分析[J]. 环境工程学报, 2009, 3(4): 703-706.
- [9] 朱光威, 许国根. 改性碳纳米管对偏二甲肼的吸附热力学研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2009, 7(1): 55-58.
- [10] 中国化学会. 第 30 届学术年会摘要集[C]. 大连: 大连理工大学, 2016.

收稿日期: 2018-04-20

修稿日期: 2018-06-12