

含铝催化剂对丙酮的催化氧化研究进展

朱烨婷, 蔡节奎, 蔡雯薇, 林毓辉, 陈渠甲

阳光学院土木工程学院, 福建 福州

Email: 383495955@qq.com

收稿日期: 2021年4月19日; 录用日期: 2021年5月20日; 发布日期: 2021年5月27日

摘要

丙酮等含氧挥发性有机污染物越来越受到人们的重视, 不同类型的催化剂通过催化氧化过程可以有效去除丙酮。其中, 含铝催化剂对丙酮具有优异的催化氧化活性。综述了共沉淀法、盐模板法、凝胶-水热反应法等合成方法在含铝催化剂制备中的应用。总结了金属负载比例和类型、煅烧温度、载体类型等对催化活性的影响, 并简要说明了含铝催化剂去除丙酮的催化活性和机理。从制备方法改进、催化氧化机理深入研究、AI的作用等方面对含铝催化剂的研究进行了展望。

关键词

铝, 丙酮, 催化剂, 催化氧化

Advances in Aluminum-Containing Catalysts for the Catalytic Oxidation of Acetone

Yeting Zhu, Jiekui Cai, Wenwei Cai, Yuhui Lin, Qujia Chen

School of Civil Engineering, Yango University, Fuzhou Fujian

Email: 383495955@qq.com

Received: Apr. 19th, 2021; accepted: May 20th, 2021; published: May 27th, 2021

Abstract

The oxygenated volatile organic pollutants (e.g. acetone) have been paid more attention. Different types of catalysts can effectively remove acetone through catalytic oxidation process. Among them, the aluminum-containing catalysts exhibited excellent catalytic activity in acetone oxidation. The preparation methods of aluminum-containing catalysts, for example co-precipitation method, salt-template synthesis technique, gel-hydrothermal reaction method, were reviewed. The effects of metal loading ratio and type, calcination temperature and support type on catalytic activity

were summarized, and the catalytic activity and mechanism of the aluminum-containing catalysts for acetone removal were briefly described. The promising research trends of the aluminum-containing catalysts have been prospected from three aspects: improvement of synthesis method, further study on catalytic oxidation mechanism and the role of Al.

Keywords

Aluminum, Acetone, Catalyst, Catalytic Oxidation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

含氧挥发性有机化合物(OVOCs)在环境中普遍且大量存在,主要包括酸、醇、酯、醚、酮类化合物。他们具有高反应活性而受到特别关注[1]。这些污染物通过阳光照射会与氮氧化物发生反应,并在某些特定的气象条件和特殊地理环境下变为光化学烟雾,变成更难处理的二次污染物[2]。其中丙酮被认为是典型的高挥发性有机化合物,广泛应用于包装行业以及印刷工业、塑料制造、涂料稀释剂和粘合剂[3]。

对丙酮等 OVOCs 的去除技术有直接燃烧、光催化、生物技术、吸附、冷凝和催化氧化(燃烧)等[4] [5] [6]。其中,催化氧化(燃烧)与直接燃烧的最大的区别在于它是无火焰燃烧,通过催化剂的低温催化反应作用,将丙酮等 OVOCs 氧化反应生成了 CO_2 和 H_2O 。具有无焰、低温、安全、无二次污染,净化效率高等优点[7]。催化氧化(燃烧)技术的关键是获得催化性能优异的催化剂。催化剂主要分为两类,贵金属催化剂,包括铂、钯、铑等贵金属[8] [9] [10];还有非贵金属催化剂,主要包括过渡金属氧化物催化剂,如锰、铜、铬、钴、镍、铝等过渡族金属氧化物的催化剂[11] [12] [13]。贵金属催化剂虽然具有较好的催化性能,但是这种催化剂具有来源少、价格比较昂贵、容易中毒失活的特点,因此限制了这种催化剂在丙酮等 OVOCs 去除方面的推广应用[7]。而非贵金属过渡金属氧化物具有良好的还原性、较低的成本和较强的抗毒能力,已被广泛用作 OVOCs 燃烧的催化剂。然而,单金属催化剂如 Fe_2O_3 、 Co_3O_4 、 MnO_2 、 CuO 、 Al_2O_3 对丙酮等 OVOCs 的催化活性仍然相对较差[14] [15]。因此,多种金属特别是双金属氧化物,可以作为丙酮等 OVOCs 催化燃烧的高效催化剂。以丙酮催化氧化为例,现有的研究表明在这些催化剂中,有较多文献报道涉及到含铝催化剂,研究发现铝的存在有助于提高催化剂对丙酮的催化性能[3] [12] [16]。因此,本研究对应用于催化氧化丙酮的含铝催化剂进行归类分析。

2. 含铝催化剂的制备方法

2.1. 共沉淀法

采用 NaOH 和 Na_2CO_3 等溶液调节双金属(或者三种金属)溶液的 pH 值,使其变为碱性而导致金属离子发生共沉淀作用而形成含铝(类)水滑石。通过调节金属离子的比例与煅烧温度来得到不同的水滑石。如图 1 所示,由于水滑石中金属元素特殊的成键方式,使得被煅烧后形成的催化剂中的金属元素相互之间分布比较均匀,有利于提高对丙酮的催化性能[2] [3]。

2.2. 盐模板法

如图 2 所示, Ce/Al-SiO_2 的气溶胶通过气溶胶喷雾反应器制备。将光电废粉与 NaOH 浓溶液在室温

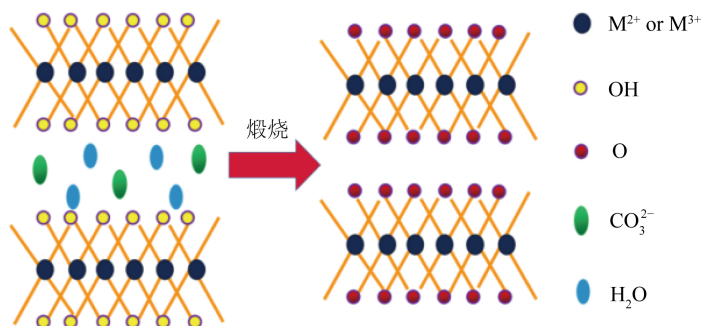


Figure 1. Schematic representation of the decomposition of hydroxalcite

图 1. 水滑石的分解示意图

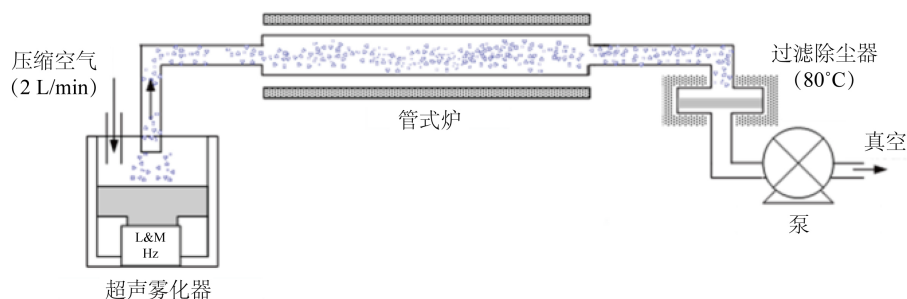


Figure 2. Schematic diagram of aerosol spray reactor

图 2. 气溶胶喷雾反应器示意图[16]

下充分混合后形成硅酸钠溶液。然后通过 HNO_3 的酸化处理，再加入硝酸铝和硝酸铈，然后用 1.8 MHz 的超声波喷嘴在一定流量的干燥且干净气流下形成雾化气溶胶，气溶胶通过管式炉(不同温度，例如 200℃、300℃、400℃和 500℃)，并在加热结束后，最后制备的样品由高效过滤器收集。用去离子水洗涤和过滤，然后在烘箱中烘干，最终得到介孔催化剂，例如 Ce/Al-SiO₂-200、Ce/Al-SiO₂-300、Ce/Al-SiO₂-400、Ce/Al-SiO₂-500 [16] [17] [18]。介孔 Ce/Al-SiO₂ 球的具体形成机理图见图 3，当前驱体溶液被加热雾化后，水滴迅速蒸发；与此同时硅低聚物、氧化铝低聚物和二氧化铈低聚物可以通过 Si-O-金属键相互连接。在加热过程中，随着气溶胶处理温度的升高，产生的 Ce/Al-SiO₂ 中形成更多的聚金属团簇。另一方面，水的快速蒸发也导致了 NaNO_3 盐的凝固，它可以作为模板基质来支撑形成多孔结构，最后 NaNO_3 盐被水洗掉后就形成了介孔材料[16]。

2.3. 凝胶 - 水热反应法

偏硅酸钠纳米水溶于去离子水，加入适量的硫酸铝等金属前驱体，充分混合后用硫酸铵调节 pH 后形成凝胶，再加入 CTAB 水溶液并充分混合转移到水热反应釜中反应。得到的固体经洗涤干燥和煅烧后获得相应的材料，例如介孔 Cu-Al-MCM-41 催化剂。

3. 含铝催化剂对丙酮的催化性能

3.1. 含铝(类)水滑石基催化剂

Sun 等人制备了一系列的含铝类水滑石并煅烧获得了 MnAlO、CoAlO、NiAlO、FeAlO 等含铝双金属氧化物催化剂，对丙酮的催化活性为 MnAlO > CoAlO > FeAlO > NiAlO，在空速为 18,000 mL·g⁻¹·h⁻¹ 反应条件下，MnAlO 能在 170℃ 以下全部催化氧化丙酮，这主要是由于 MnAlO 具有较低活化能垒、丰富

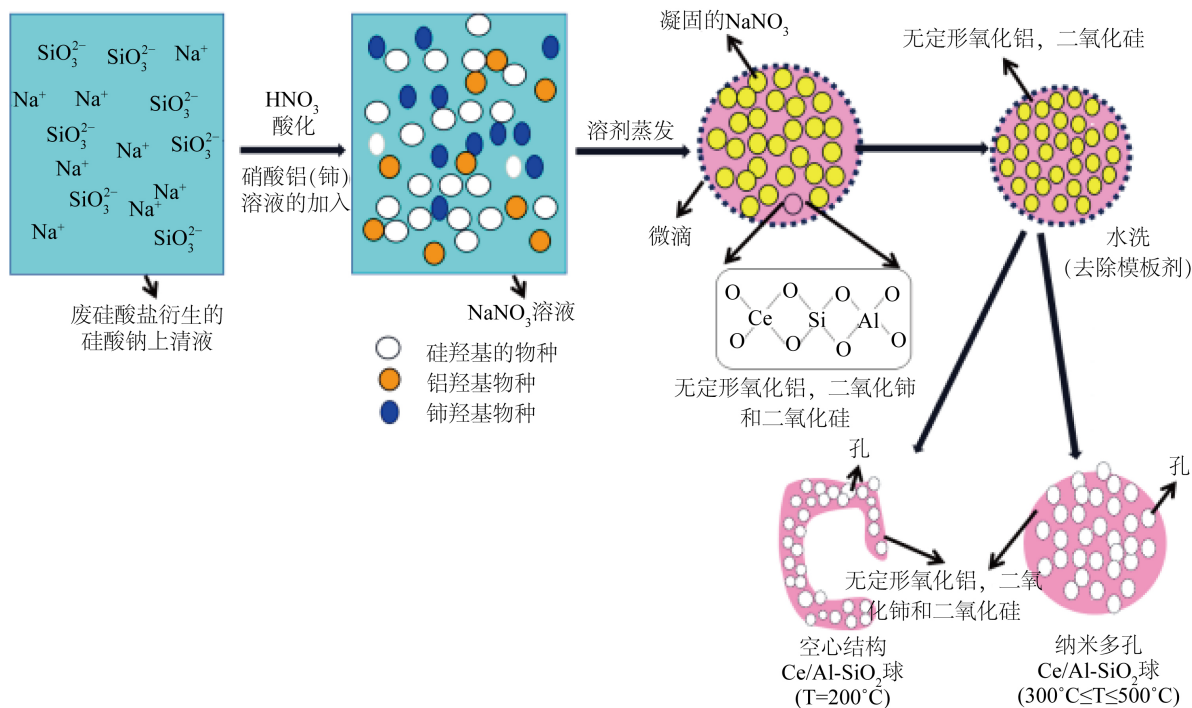


Figure 3. A plausible formation mechanism of the mesoporous Ce/Al-SiO₂ microspheres

图 3. 介孔 Ce/Al-SiO₂ 微球的形成机理[16]

的活性物种和较强的低温还原性[2]。为了进一步考察不同 Mn/Al 比例对 MnAlO 催化活性的影响，又制备 Mn₃AlO、Mn₂AlO、Mn₄AlO 和 Mn₁AlO。Mn₃AlO 催化剂表面已有的或形成的氧空位可以使得结构单元[MnO₆]的 Mn-O 键变弱，同时催化剂具有良好的氧化还原性、O₂ 吸附解离能力及丰富的活性氧，使得 Mn₃AlO 催化剂具有优异的催化活性、稳定性和耐水性。通过第一原理计算可知通过 α -H 脱离，O₂ 离解和 C-C 键断裂导致丙酮被氧化，其中 C-C 键断裂是丙酮氧化反应的主要限制步骤[3]。通过 XRD 表征发现 Mn₃AlO 催化剂主要晶相是 Mn₃O₄，Al 并没有掺杂进入 Mn₃O₄，因而也没有发生晶格替代。由于第一原理计算的局限性，上述结果是基于 Mn₃O₄ 晶胞为基础计算得出的结论。通过 Raman 表征发现 Al 的不同含量导致 Mn-O 键力常数发生变化，由此推断 Al 与 Mn 可能发生相互作用，但文中没有给出进一步的解释。只是从催化剂的氧化还原性(H₂-TPR)、活性氧(O₂-TPD)等方面进行了分析[3]，因而采用 X 射线吸收精细结构(EXAFS)、紫外-可见漫反射光谱(UV-vis DRS)、红外光谱(FT-IR)对催化剂活性相配位情况进行探究，应该可以加深对 Al 在催化剂中的作用的直观认识。

Zhao 等人也制备了一批 M-Al (M = Mg、Ni、Co)水滑石，通过直接煅烧获得相应的双金属氧化物催化剂，对丙酮的催化性能为 MgAlO < NiAlO < CoAlO，这可能是由于 Co 的强氧化性有关。进一步研究表明 Co/Al 摩尔比例和煅烧温度都可以影响催化剂的催化活性，一方面，催化剂的表面晶体结构、Co³⁺/Co²⁺ 摩尔比，低温还原性、Oads/Olatt 的摩尔比会影响不同 Co/Al 摩尔比的催化剂的催化活性；另一方面，低温还原性、Co³⁺/Co²⁺ 摩尔比、多孔结构与晶体结构会影响不同煅烧温度的催化剂的催化活性[19]。Zhao 等人进一步制备不同阴离子插层的 Co/Al 水滑石，然后通过 Mn 掺杂制备不同类型的催化剂，对丙酮的催化活性为 CoAlO-S-Mn < CoAlO-L-Mn < CoAlO-N-Mn < CoAlO-C-Mn。锰的掺杂和不同阴离子插层都会影响催化活性，较高含量的 Co³⁺ 和丰富的吸附氧使得 CoAlO-C-Mn 具有最高的催化活性[12]。Zhao 等人研究发现 Ce 的掺杂形成的 M/CeAl (M = Mg²⁺、Ni²⁺、Co²⁺)水滑石，通过煅烧后得到的催化剂具有更高

的催化活性,这主要是由于 Ce 的存在导致 Co^{2+} 的相对含量增加并且也显著增加了催化剂的晶格氧含量[20]。

3.2. 铝掺杂分子筛基催化剂

Wang 等人制备了 Al 和 Ce 掺杂的介孔二氧化硅球形粒子(Al-MSPs 和 Ce-MSPs),在 150℃和 250℃反应条件下,发现 Al-MSPs 对丙酮具有良好的吸附性能,但是对丙酮的催化氧化能力较弱;而在 150℃时,Ce-MSPs 对丙酮的转化率较低,而在 250℃时,Ce-MSPs 对丙酮具有非常高的转化率。但是当 Ce 和 Al 一起掺杂入 MSPs 中形成的 Ce/Al-MSPs 催化剂对丙酮的催化性能得到大幅度提升,而且催化性能更稳定。这主要是由于 Al 的存在有助于对丙酮的吸附,而 Ce 的存在有助于催化氧化丙酮,因而双金属协同作用再加上良好的介孔结构从而提高催化剂的催化活性[21] [22]。同时,与 Ce/Mn-MSPs (25/25)和 Ce/Cu-MSPs (25/25)相比,Ce/Al-MSPs (25/25)在低温阶段对丙酮有更高的去除效率,这说明 Al 的存在也有助于丙酮的低温转化[22]。

Karthik 等人[23]研究表明,与 Cu-MCM-41 相比,Cu-Al-MCM-41 材料对 NO 和丙酮的去除率更高。通过 UV-vis DRS 和电子顺磁共振(EPR)光谱表明 Cu^{2+} 在 Cu-Al-MCM-41 表面具有良好地分散性,有助于提高催化活性。同时,Cu-Al-MCM-41 框架内的 Al^{3+} 的存在稳定了孤立的 Cu^{2+} 离子,从而导致更高和更稳定的催化活性。

Lin 等人[16]通过盐模板法制备了介孔 Ce/Al-SiO₂ 催化剂,研究表明催化剂的表面氧化还原性和表面酸性决定了催化剂的催化活性,因而基于高表面酸性和强表面还原性,Ce/Al-SiO₂-300 对丙酮具有最好的催化活性。Lin 等人[17]又通过更换催化剂载体,将 SiO₂ 换成介孔铝硅酸盐粒子(MSPs),制备了一系列不同 Si/Al 摩尔比的介孔 Ce/Al-MSPs 催化剂。由于 Ce/Al-MSPs (50/25)具有强表面还原性和高表面酸性,表现出了优异的丙酮催化性能,且在 150℃时,经过 24 h 的连续测试,仍然具有良好的稳定性。进一步研究表明,与 Ce/Al-MSPs 和 Mn/Al-MSPs 催化剂相比,Mn-Ce/Al-MSPs 对丙酮具有更高的催化活性,这主要是由于 Mn 和 Ce 的双金属协同作用导致了高含量的 Ce^{3+} 和 Mn^{4+} 及良好的氧化还原性[18]。

3.3. 含铝黏土基催化剂

Gandia 等人研究了三种黏土对丙酮的催化性能,结果表明催化活性为 Al-柱撑黏土 < 无柱撑黏土 < Zr-柱撑黏土,通过 Mn 负载后可以提高对丙酮的催化性能,但是 Mn 负载的 Al-柱撑黏土的催化活性仍然是最低的[24]。另外,通过 Pt 负载后,以蒙脱土为载体的催化剂对丙酮的催化活性比以蒙脱土为载体的催化剂活性还要低[8]。这两种掺杂,都是用铝盐先负载柱撑黏土或者蒙脱土获得 Al-黏土,然后再负载 Mn 或者 Pt,可能导致 Mn 或者 Pt 与 Al 之间的混合不够均匀,从而相互之间不产生足够有效作用而导致活性提高较少。另外黏土本身存在 Al₂O₃,如果再负载 Al 元素导致载体中 Al 的含量过多,反而导致活性降低。

4. 结语与展望

表 1 是具有代表性的含铝催化剂对丙酮的催化性能,由表可知,现有的可以催化氧化丙酮的含铝催化剂的研究还比较少,且催化剂之间的催化活性差别较大,催化活性与载体和活性物质紧密相关。在催化剂制备方面,根据上述分析,含铝催化剂的制备方法相对较少,可能受制于 Al 元素的存在,但也可以考虑采用一步水热法、水解驱动-氧化还原法等技术得到元素分布均匀的含铝催化剂。在催化机理方面,现有文献鲜有涉及到催化剂对丙酮的催化机理,特别是理论计算方面,可以进一步深入研究含铝催化剂的催化氧化路径。在 Al 的作用方面,还只是停留在 X 射线光电子能谱(XPS)、程序升温氧脱附(O₂-TPD)、

Table 1. Catalytic performances of representative aluminum based catalysts for acetone oxidation
表 1. 具有代表性的含铝催化剂对丙酮的催化性能

催化剂	丙酮浓度	空速	T_{50}	T_{90}	参考文献
MnAlO	258 ppm	18,000 mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹	147	170	[2]
CoAlO	258 ppm	18,000 mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹	192	210	[2]
Mn ₃ AlO	258 ppm	18,000 mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹	145	164	[3]
5:1 CoAlO-300	1000 ppm	33,000 mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹	190	225	[19]
CoAlO-C-Mn-30	1000 ppm	33,000 mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹	158	173	[12]
Al-MSPs (25)	1000 ppm	15,000 h ⁻¹	340	>350	[21] [22]
Ce/Al-MSPs (25/25)	1000 ppm	15,000 h ⁻¹	<150	260	[21] [22]
Mn-Ce(2/1)/Al-MSPs	1000 ppm	15,000 h ⁻¹	112	137	[18]
Ce/Al-SiO ₂ -300	1000 ppm	15,000 h ⁻¹	116	165	[16]
Ce/Al-MSPs (50/25)	1000 ppm	15,000 h ⁻¹	120	175	[17]
Mn/BAsap-Al	600 ppm	34,000 h ⁻¹	345	365	[24]
Mn/GAmont-Al	600 ppm	34,000 h ⁻¹	325	342	[24]

程序升温还原(H₂-TPR)等技术研究 Al 的存在对催化剂表面元素价态和分布、可还原性能及表面活性氧的影响。但是 Al 的存在具体是怎么与 Mn 或者 O 相互作用, 以及对催化活性的影响方面的研究还比较少。

参考文献

- [1] Liu, X., Han, Q., Shi, W., Zhang, C., Li, E. and Zhu, T. (2019) Catalytic Oxidation of Ethyl Acetate over Ru-Cu Bimetallic Catalysts: Further Insights into Reaction Mechanism via *In Situ* FTIR and DFT Studies. *Journal of Catalysis*, **369**, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2018.11.025>
- [2] Sun, Y., Li, N., Xing, X., Zhang, X., Zhang, Z., Wang, G., Cheng, J. and Hao, Z. (2019) Catalytic Oxidation Performances of Typical Oxygenated Volatile Organic Compounds (Acetone and Acetaldehyde) over MAIO (M = Mn, Co, Ni, Fe) Hydrotalcite-Derived Oxides. *Catalysis Today*, **327**, 389-397. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.03.002>
- [3] Sun, Y., Zhang, X., Li, N., Xing, X., Yang, H., Zhang, F., Cheng, J., Zhang, Z. and Hao, Z. (2019) Surface Properties Enhanced Mn_xAlO Oxide Catalysts Derived from Mn_xAl Layered Double Hydroxides for Acetone Catalytic Oxidation at Low Temperature. *Applied Catalysis B: Environmental*, **251**, 295-304. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.03.035>
- [4] He, C., Cheng, J., Zhang, X., Douthwaite, M., Pattison, S. and Hao, Z. (2019) Recent Advances in the Catalytic Oxidation of Volatile Organic Compounds: A Review Based on Pollutant Sorts and Sources. *Chemical Reviews*, **119**, 4471-4568. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00408>
- [5] Yang, C., Miao, G., Pi, Y., Xia, Q., Wu, J., Li, Z. and Xiao, J. (2019) Abatement of Various Types of VOCs by Adsorption/Catalytic Oxidation: A Review. *Chemical Engineering Journal*, **370**, 1128-1153. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.232>
- [6] Guo, Y., Wen, M., Li, G. and An, T. (2021) Recent Advances in VOC Elimination by Catalytic Oxidation Technology onto Various Nanoparticles Catalysts: A Critical Review. *Applied Catalysis B: Environmental*, **281**, Article ID: 119447. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119447>
- [7] Li, J.R., Wang, F.K., He, C., Huang, C. and Xiao, H. (2020) Catalytic Total Oxidation of Toluene over Carbon-Supported CuCo Oxide Catalysts Derived from Cu-Based Metal Organic Framework. *Powder Technology*, **363**, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.060>
- [8] Gil, A., Vicente, M.A., Lambert, J.F. and Gandia, L.M. (2001) Platinum Catalysts Supported on Al-Pillared Clays—Application to the Catalytic Combustion of Acetone and Methyl-Ethyl-Ketone. *Catalysis Today*, **68**, 41-51. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(01\)00321-2](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(01)00321-2)
- [9] Zhao, Q., Ge, Y., Fu, K., Zheng, Y., Liu, Q., Song, C., Ji, N. and Ma, D. (2019) Catalytic Performance of the Pd/TiO₂ Modified with MnO_x Catalyst for Acetone Total Oxidation. *Applied Surface Science*, **496**, Article ID: 143579.

- <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143579>
- [10] Ma, Y., Chen, M., Song, C. and Zheng, X. (2008) Catalytic Oxidation of Toluene, Acetone and Ethyl Acetate on a New Pt-Pd/Stainless Steel Wire Mesh Catalyst. *Acta Physico-Chimica Sinica*, **24**, 1132-1136. [https://doi.org/10.1016/S1872-1508\(08\)60047-9](https://doi.org/10.1016/S1872-1508(08)60047-9)
- [11] Rezlescu, N., Rezlescu, E., Popa, P.D., Doroftei, C. and Ignat, M. (2016) Partial Substitution of Manganese with Cerium in SrMnO₃ Nano-Perovskite Catalyst. Effect of the Modification on the Catalytic Combustion of Dilute Acetone. *Materials Chemistry and Physics*, **182**, 332-337. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.07.040>
- [12] Zhao, Q., Liu, Q., Song, C., Ji, N., Ma, D. and Lu, X. (2019) Enhanced Catalytic Performance for VOCs Oxidation on the CoAlO Oxides by KMnO₄ Doped on Facile Synthesis. *Chemosphere*, **218**, 895-906. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.131>
- [13] Hu, C. (2011) Catalytic Combustion Kinetics of Acetone and Toluene over Cu_{0.13}Ce_{0.87}O_y Catalyst. *Chemical Engineering Journal*, **168**, 1185-1192. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.006>
- [14] Li, J.R., Zhang, W.-P., Li, C. and He, C. (2021) Efficient Catalytic Degradation of Toluene at a Readily Prepared Mn-Cu Catalyst: Catalytic Performance and Reaction Pathway. *Journal of Colloid and Interface Science*, **591**, 396-408. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.01.096>
- [15] Li, J.R., Zhang, W.-P., Li, C., Xiao, H. and He, C. (2021) Insight into the Catalytic Performance and Reaction Routes for Toluene Total Oxidation over Facilely Prepared Mn-Cu Bimetallic Oxide Catalysts. *Applied Surface Science*, **550**, 149179. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149179>
- [16] Lin, L.Y. and Bai, H. (2014) Salt-Templated Synthesis of Ce/Al Catalysts Supported on Mesoporous Silica for Acetone Oxidation. *Applied Catalysis B: Environmental*, **148-149**, 366-376. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.11.026>
- [17] Lin, L.Y., Wang, C. and Bai, H. (2015) A Comparative Investigation on the Low-Temperature Catalytic Oxidation of Acetone over Porous Aluminosilicate-Supported Cerium Oxides. *Chemical Engineering Journal*, **264**, 835-844. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.042>
- [18] Lin, L.Y. and Bai, H. (2016) Promotional Effects of Manganese on the Structure and Activity of Ce-Al-Si Based Catalysts for Low-Temperature Oxidation of Acetone. *Chemical Engineering Journal*, **291**, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.098>
- [19] Zhao, Q., Ge, Y., Fu, K., Ji, N., Song, C. and Liu, Q. (2018) Oxidation of Acetone over Co-Based Catalysts Derived from Hierarchical Layer Hydrotalcite: Influence of Co/Al Molar Ratios and Calcination Temperatures. *Chemosphere*, **204**, 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.198>
- [20] Zhao, Q., Liu, Q., Han, J., Lu, S., Su, Y., Song, C., Ji, N., Lu, X., Ma, D. and Cheung, O. (2019) The Effect of Cerium Incorporation on the Catalytic Performance of Cobalt and Manganese Containing Layer Double Oxides for Acetone Oxidation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **94**, 3753-3762. <https://doi.org/10.1002/jctb.5868>
- [21] Wang, C. and Bai, H. (2011) Catalytic Incineration of Acetone on Mesoporous Silica Supported Metal Oxides Prepared by One-Step Aerosol Method. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50**, 3842-3848. <https://doi.org/10.1021/ie101809t>
- [22] Wang, C.Y. and Bai, H. (2011) Aerosol Processing of Mesoporous Silica Supported Bimetallic Catalysts for Low Temperature Acetone Oxidation. *Catalysis Today*, **174**, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.02.025>
- [23] Karthik, M., Lin, L.Y. and Bai, H. (2009) Bifunctional Mesoporous Cu-Al-MCM-41 Materials for the Simultaneous Catalytic Abatement of NO_x and VOCs. *Microporous and Mesoporous Materials*, **117**, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2008.06.016>
- [24] Gandia, L.M., Vicente, M.A. and Gil, A. (2002) Complete Oxidation of Acetone over Manganese Oxide Catalysts Supported on Alumina- and Zirconia-Pillared Clays. *Applied Catalysis B—Environmental*, **38**, 295-307. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(02\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(02)00058-9)