

DOI: 10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2024.03.026

• 专稿:化学中毒卫生应急新技术 •

室内挥发性有机污染物净化技术研究进展

Recent advances in purification technology of indoor volatile organic compounds

任泉明^{1,2}, 张海^{1,2}, 唐侍豪^{1,2}, 欧泽金^{1,2}, 王致^{1,2}REN Quanming^{1,2}, ZHANG Hai^{1,2}, TANG Shihao^{1,2}, OU Zejin^{1,2}, WANG Zhi^{1,2}

1. 广州市第十二人民医院(广州市职业病防治院), 广东 广州 510620; 2. 广州医科大学职业与环境卫生研究所, 广东 广州 511436

摘要: 针对室内空气净化问题, 概述了吸附、臭氧催化氧化、光催化氧化、非热等离子体催化氧化、热催化氧化等多种室内空气净化技术的原理、研究进展及局限性。在此基础上, 综述了空气净化集成技术的设计思路, 并分析其优势, 总结出不同室内空气净化技术的特点, 并对未来空气净化技术的发展进行了展望。

关键词: 室内空气; 净化; 挥发性; 有机污染物; 催化氧化; 集成技术

中图分类号: R122.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-1326(2024)03-0308-06

引用: 任泉明, 张海, 唐侍豪, 等. 室内挥发性有机污染物净化技术研究进展[J]. 职业卫生与应急救援, 2024, 42(3): 308-312; 317.

随着科技的进步, 黏合剂、涂料、塑料等各种高分子材料在家具、装饰材料、家用电器、化妆品等常见物品的制造过程中广泛使用。人们在享受这些物品带来便利的同时, 其身体健康也受到这些高分子材料释放的甲醛、甲苯等挥发性有机污染物(volatile organic compounds, VOCs)的危害。此外, 油漆制造、家具制造、金属制品的清洗、箱包加工等特定行业的工人在工作场所中时刻面临来自苯、甲苯、二甲苯等有毒有害气体的危害。2023 年 2 月, GB/T 18883—2022《室内空气质量标准》正式实施。与旧标准 GB/T 18883—2002 相比, 新标准对苯系物等指标的限值进行了调整, 苯的接触限值由原来的 0.11 mg/m³ 降至 0.03 mg/m³, 甲醛的限值由原来的 0.10 mg/m³ 降至 0.08 mg/m³。新标准的实施对室内空气净化技术的净化效率提出了更为严格的要求。目前, 室内空气污染物主要包括颗粒物(particulate matter, PM), 如 PM_{2.5} 和 PM₁₀; 燃料燃烧产生的无机污染物, 如一氧化碳(CO)、氮氧化物; 以及家具、建材中使用的黏合剂、涂料等释放甲醛、甲苯、丙酮等 VOCs。本文概述了不同空气净化技术的研究进展及

基金项目: 国家自然科学基金(52100121); 广州市基础与应用基础研究项目(202102021183); 广州市科学技术局重点研发计划项目(202206010061); 广州市医学重点学科建设项目(2021—2023 年); 广州市校(院)联合资助专题(广州市职业环境与健康重点实验室)(2023A0350502)

作者简介: 任泉明(1989—), 男, 博士, 助理研究员

通信作者: 王致, 主任医师, E-mail: zhi_wang@outlook.com

优缺点, 并展望了未来空气净化技术的发展方向, 以期室内 VOCs 净化技术的应用提供参考。

1 室内空气末端治理技术

目前对于控制室内 VOCs 污染主要包括三种方式。一是源头控制, 即选择环保产品, 减少室内建材、家具等材料释放出的 VOCs, 这是避免室内空气污染最有效、最根本的方式。但受技术条件限制, 还无法完全实现从根源上消除室内空气污染。二是加强室内通风。室内通风的方式简单、经济, 然而由于室外噪声、异味, 以及室内外的温差等因素使室内人员有时候不得不紧闭门窗, 从而导致室内通风受到限制。三是末端治理, 主要有回收和销毁两类技术。前者主要包括吸附、膜分离等技术; 后者则是销毁 VOCs, 主要包括臭氧催化氧化、光催化氧化、非热等离子体催化氧化、热催化氧化等技术。

1.1 吸附技术

吸附是由于物理或化学的作用力, 某些物质的分子能附着或结合在两相界面上(固-固相界面除外), 从而使这种分子在两相界面上的浓度大于体系其他部分的一种现象。常见的吸附材料包括活性炭、超交联聚合树脂、分子筛、金属有机框架(metal-organic frameworks, MOFs)等^[1-2]。吸附剂对 VOCs 的吸附性能与其比表面积、孔径大小、环境湿度等因素有关。例如, 采用纤维素分解菌预处理后制备的稻壳活性炭的比表面积为 3 714 m²/g, 是空白对照

组稻壳活性炭的 1.38 倍^[2]。因此,前者对 382.7 mg/m³ 甲苯的饱和吸附容量(708 mg/g)是后者的 1.32 倍。Liu 等^[3]研究表明,氢氧化钾(KOH)活化后的活性炭(KOH-activated carbon,KAC)对 VOCs 的吸附作用力与 VOCs 的动力学直径、KAC 的平均孔径之间的尺寸差异呈负相关。实际应用过程中,针对目标 VOCs 的动力学直径,选择平均孔径合适的吸附剂以提升吸附性能值得关注。此外,由于水分子与 VOCs 分子之间的竞争吸附,表面具有亲水性质的吸附剂(如硅胶和分子筛 13X)的吸附性能会随环境湿度的小幅增加而急剧下降^[4]。

吸附技术适合大风量低浓度或超低浓度 VOCs 的去除。吸附材料是吸附技术的核心。针对现有吸附剂存在易吸附饱和、低选择性、再生性能差的问题,研发超大吸附容量、高选择性、再生性能好的吸附剂是有待突破的方向。

1.2 臭氧催化氧化技术

臭氧催化氧化技术是利用臭氧(O₃)的强氧化性协同催化剂与 VOCs 反应,并将其氧化分解为二氧化碳(CO₂)和水(H₂O),从而达到净化气体的目的。一般认为,臭氧催化氧化 VOCs 的过程主要包括臭氧在催化剂活性位点上吸附分解产生活性氧物种,这些活性氧物种将 VOCs 氧化为 CO₂ 和 H₂O。Cha 等^[5]的研究表明,臭氧在木屑生物炭负载氧化锰(MnO_x/SDC-K3)催化剂表面的 Mn 位点(如 Mn³⁺)或氧空位上产生活性氧,最终将甲苯氧化为 CO₂ 和 H₂O。Zhang 等^[6]研究表明,O₃ 吸附在三氧化二铝负载氧化锰(MnO_x/Al₂O₃)催化剂表面的 Mn 位点和末端羟基处,转化为表面吸附氧(如 O²⁻和 O₂⁻),随后进一步转化为反应氧物种[如羟基自由基、超氧阴离子自由基等];同时,MnO_x/Al₂O₃ 催化剂表面吸附的甲苯被上述反应氧物种氧化为苯甲醇、苯甲醛等中间产物,最终氧化为 CO₂ 和 H₂O。类似有报道^[7],O₃ 可以夺取表面羟基的氢原子生成臭氧化氢自由基(HO₃),该自由基是不稳定的中间产物,容易分解为 O₂ 和羟基自由基,羟基自由基可将甲醇氧化为 CO₂ 和 H₂O。

臭氧催化氧化技术能够在较低催化剂浓度的情况下去除甲醛、丙酮、苯等 VOCs^[8],但由于反应过程中需要使用一定浓度的臭氧,因此,不建议在室内使用。

1.3 光催化氧化技术

光催化氧化的本质是光电转换中的氧化还原反应。当光催化剂吸收一个能量大于或等于其能隙的光子时,价带中的电子(e⁻)会跃迁到导带,同时在

价带留下带正电的空穴(h⁺),从而形成电子-空穴对。尽管大部分生成的电子-空穴对在光催化剂体相或表面重新组合,但最终到达催化剂表面的一小部分载流子与表面吸附的分子发生反应,生成活性氧,并参与 VOCs 氧化^[9]。由于 VOCs 氧化主要发生在光催化剂的表面,因此,除了光源波长、反应物 VOCs 种类,光催化剂的物化性质也是 VOCs 光催化氧化性能的关键因素,如表面积、吸附能力、晶面、形貌、氧空位等。Chen 等^[10]研究发现,α 型三氧化二铁负载 1,3,5-均苯三羧酸铁[MIL-100(Fe)/α-Fe₂O₃]复合物在 250 W 氙灯照射下对 220.8 mg/m³ 邻二甲苯的净化率为 100%,而在可见光(λ ≥ 420 nm)下对邻二甲苯的净化率为 90%,其光催化活性远超过同等条件下的商用二氧化钛(TiO₂)光催化剂的活性(250 W 氙灯照射下的净化率为 23%,可见光下的净化率为 0)。与初始的 TiO₂ 相比,采用铈(Er)单原子修饰 TiO₂(记为 Er₁-TiO₂)和 Er³⁺离子修饰 TiO₂(记为 Er³⁺-TiO₂)的催化剂光生载流子分离能力得到明显提高,并能产生更多的活性氧物种以氧化 VOCs。在邻二甲苯-乙醛混合物中,TiO₂、Er₁-TiO₂ 和 Er³⁺-TiO₂ 对邻二甲苯的降解效率分别为 45%、100%和 85%^[11]。此外,与 α 型二氧化锰(α-MnO₂)和四氧化三锰(Mn₃O₄)相比,多级孔 α-MnO₂/Mn₃O₄ 催化剂不仅具有丰富的界面,还具有更高的氧空位浓度。在辐照作用下,α-MnO₂/Mn₃O₄ 表面氧空位吸附的氧物种被活化生成氧离子自由基,加速 VOCs 催化氧化反应^[12]。

光催化氧化技术具有反应条件温和、节能、自然环境条件下对污染物的矿化效率高等优点,被认为是消除室内 VOCs 最有前途的技术之一。尽管近几十年来科研人员进行了大量的研究工作,但截至目前,光催化氧化技术的大部分工作仍处于实验室研究阶段,重点在于探索新的催化材料,该技术的实际应用仍然有限^[13-14]。

1.4 非热等离子体催化氧化技术

非热等离子体主要通过气体放电产生。根据放电方式不同可分为介质阻挡放电(dielectric barrier discharge,DBD)、辉光放电、电晕放电等,其中 DBD 因电子密度高、常压下有较大面积的放电区间等优点,具有较好的应用前景^[15]。在非热等离子体催化氧化过程中,非热等离子体空间内会富集大量活泼的离子、电子、激发态原子、自由基及分子等高活性粒子,活性粒子既活化了 VOCs 分子,也活化了位于非热等离子体空间内催化剂的活性中心;同时,催化剂可促进放电过程中产生副产物的完全氧化和

臭氧分解反应,提高 CO₂ 选择性、降低尾气残留臭氧浓度^[16-17]。例如,当能量密度为 211 J/L 时,单一 DBD 降解邻二甲苯的转化率和 CO₂ 的选择性分别为 52%和 47%(即 47%的产物是 CO₂),而 DBD 与 γ 型三氧化二铝负载质量分数为 6%的锰协同催化氧化邻二甲苯的转化率和 CO₂ 的选择性分别为 75%和 60%^[18]。Zhu 等^[19]研究显示,当能量密度为 600 J/L 时,单一非热等离子体(DBD 形式)降解甲苯的转化率为 26%,CO₂ 和 CO 的选择性分别为 4%和 7%;而 DBD 与钙钛矿镧铈钴复合氧化物负载金(Au/La_{0.5}Ce_{0.5}CoO_{3- δ})协同催化氧化甲苯的转化率为 55%,CO₂ 和 CO 的选择性分别为 15%和 7%。还有 Wu 等^[20]研究报道,当能量密度为 10 J/L、反应温度为 25 ℃时,单一 DBD 降解甲苯的转化率为 40.3%,CO₂ 选择性为 15.8%,生成 O₃ 的体积分数为 49.7%;而 DBD 与 γ 型三氧化二铝负载金(Au/ γ -Al₂O₃)协同催化氧化甲苯的转化率为 65.9%,CO₂ 的选择性为 39.7%,生成 O₃ 的体积分数为 16.1%。

非热等离子体催化氧化 VOCs 的研究已取得一定进展,但是该技术中非热等离子体和催化剂之间的相互作用十分复杂,相关理论有待完善。此外,该技术需使用高压放电电源,在实际应用中存在一定的安全隐患。

1.5 热催化氧化技术

热催化氧化技术是指在一定温度下催化剂将一定浓度的 VOCs 氧化为 CO₂ 和 H₂O,此过程中伴随着催化剂的还原-再氧化的循环过程。热催化氧化 VOCs 技术具有净化效率高、二次污染少、占地面积小等优点,而备受关注^[21],其核心是研发低温、高效、稳定的催化剂。目前,热催化氧化的催化剂主要有贵金属催化剂和非贵金属催化剂两大类。

对于贵金属催化剂而言,催化剂载体的种类、贵金属颗粒尺寸大小、制备方法等是影响催化剂催化活性的重要因素。Zhang 等^[22]研究发现,以不同 TiO₂ 晶相[金红石型(rutile)、锐钛矿型(anatase)和平均粒径为 25 nm 的锐钛矿和金红石混合相(P₂₅,25 表示这种材料平均粒度大约 25 nm)]为载体负载 Pt,分别记为 Pt/TiO₂-R、Pt/TiO₂-A、Pt/TiO₂-P 用于催化氧化 1,2-二氯乙烷(1,2-dichloroethane, DCE)。Pt/TiO₂-P 表现出更优的催化氧化活性,DCE 转化率为 90%时的反应温度(T₉₀)为 320 ℃,比 Pt/TiO₂-R、Pt/TiO₂-A 的 T₉₀ 分别低 78 ℃、154 ℃。这归因于 Pt/TiO₂-P 具有优异的氧化还原性能。Zhang 等^[23]报道,将一系列不同尺寸(1.5 ~ 3.5 nm)Pt 纳米颗粒负载在氧化锰八面体分子筛(OMS-2)上用于甲

苯氧化,Pt 尺寸为 3.0 nm 的催化剂(Pt/OMS-2-3)具有最优的催化活性(T₉₀ = 150 ℃),这归因于 Pt/OMS-2-3 表面具有更多的氧空位(Pt²⁺-Ov-Mn^{δ+})。Xie 等^[24]研究发现,与 Pt 嵌入 MnO₂ 中(Pt-in-MnO₂)相比,等量(质量分数 0.011%)Pt 负载于 MnO₂ 表面的(Pt-on-MnO₂)催化剂具有更好的甲醛催化活性,在甲醛质量浓度为 124.9 mg/m³、重时空速为 600 L/(g·h)(即每小时每克催化剂可以处理 600 L 的原料)、相对湿度 50%、反应温度为 40 ℃的条件下,该催化剂催化甲醛的转化率为 94%。

虽然贵金属催化剂具有良好的催化性能,但其资源匮乏、价格昂贵。近年来,科研人员对非贵金属催化剂的研究取得了一些进展。Tu 等^[25]研究发现,制备的锰钴复合氧化物(Mn₁Co₁)样品具有较高的催化活性和稳定性,在甲醛浓度为 37.5 mg/m³、重时空速为 60 L/(g·h)、相对湿度 50%的条件下,室温下甲醛转化率为 100%;且催化剂持续运行 34 h 后,催化活性没有明显降低的趋势。Chen 等^[26]研究发现,在甲苯浓度为 3 827 mg/m³、体积空速为 30 000 h⁻¹、催化剂 α -MnO₂-60 T₉₀ 为 203 ℃时,在甲苯氧化中表现出良好的催化活性。

目前,热催化氧化技术仅实现了甲醛的室温催化完全氧化,而对苯、甲苯等其他 VOCs 实现室温催化完全氧化,仍有一定挑战。

综上所述,不同室内空气净化技术适用的场景有差异,且优缺点各不相同。表 1 对不同室内空气污染末端治理技术的优缺点进行了比较。

表 1 主要室内空气末端治理技术的优缺点

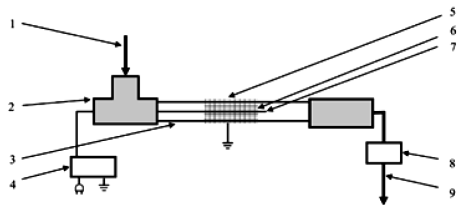
技术类别	优点	缺点	适合场景	克服现有缺点的途径
吸附技术	适用于低浓度或超低浓度 VOCs 的净化;能耗低	需定期更换或再生;脱附的 VOCs 易造成二次污染;选择性较差 ^[4]	适合大风量、低浓度或超低浓度 VOCs 的净化或富集	可脱附再生,与其他销毁技术联用;研发选择性更好、吸附循环更稳定的吸附剂
臭氧催化氧化技术	条件较温和 ^[8]	产生的臭氧易造成二次污染	适合中低温的较低浓度 VOCs 的净化	在臭氧使用量与臭氧消耗量之间保持平衡
光催化氧化技术	条件温和;能耗低 ^[10]	催化剂稳定性较差;需特定波长的光源	适合低温、具备光照条件、低浓度或超低浓度 VOCs 的净化	研发催化性能更稳定的催化剂;研发对自然光能够高效利用的催化剂
非热等离子体催化氧化技术	可同时去除多种污染物	易产生臭氧、副产物 ^[16-17] ;电压较高,安全风险高	适合低温、低浓度复杂多组分 VOCs 的净化	持续提升对等离子体催化氧化技术的理论认识
热催化氧化技术	净化效率高;二次污染少 ^[21]	净化温度有待进一步降低	适合中高浓度 VOCs 的净化	研发低温、高效、稳定的催化剂

2 空气净化集成技术

如表 1 所示,单一空气净化技术消除 VOCs 技术存在明显的缺陷,其成本或净化效率难以满足实际空气净化化的要求,因此,科研人员尝试将多种室内空气净化技术集成,以期降低成本并提升空气净化效率。

2.1 吸附与非热等离子体催化技术集成

Xu 等^[27]研究发现,与直接进行非热等离子体催化净化 VOCs 相比,VOCs 先被催化剂吸附,再进行等离子体放电的净化效率更高。基于上述研究结果,可将吸附与非热等离子体催化技术集成一体,达到吸附存储-原位销毁的目的,如图 1 所示。采用金属氧化物(如四氧化三钴、氧化镍、氧化锰等)/分子筛(如 SBA-15、MCM-41、ZSM-5 等)催化剂协同非热等离子体净化室内 VOCs^[28]。金属氧化物/分子筛扮演双重角色,非热等离子体停止工作时,金属氧化物/分子筛作为吸附剂,吸附室内低浓度、超低浓度 VOCs;非热等离子体工作时,金属氧化物/分子筛作为催化剂,协同非热等离子体将吸附在催化剂孔道内的 VOCs 进行原位销毁。非热等离子体停止工作后,作为吸附剂的金属氧化物/分子筛可循环用于吸附室内 VOCs,从而有效降低吸附剂的更换频率,大幅降低成本。另外,非热等离子体间歇运行,能够大幅降低能耗。



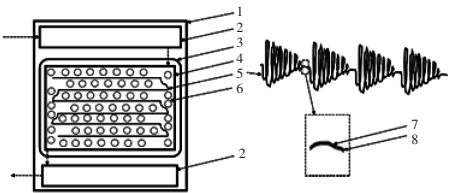
注:(1)进气管路;(2)聚四氟乙烯三通;(3)石英管;(4)非热等离子体电源;(5)外接电极(不锈钢网);(6)金属氧化物/分子筛催化剂;(7)内接电极(2 mm 的不锈钢棒);(8)风机;(9)出气管路。

图 1 吸附与非热等离子体催化技术集成技术示意图

2.2 吸附与热催化技术集成

此外,将吸附与热催化技术集成也能达到吸附存储-原位销毁的目的。研究人员制备了一种具有吸附-催化双功能材料,用于低浓度或超低浓度甲苯的净化^[29-30]。其中,疏水改性的微孔二氧化硅负载质量分数 2.0% 的铂(记为 2Pt/MS-H)对甲苯的最佳饱和吸附量为 56.09 mg/g,解吸温度低至 60 ℃,且催化氧化甲苯的最佳性能 T_{90} 低至 149 ℃^[29]。也可使用吸附剂和催化剂来替代吸附-催化双功能材料,如图 2 所示。进风机、出风机两者同步启动,进风机将室内 VOCs 吸入绝缘耐高温外壳中,与壳内

的吸附剂(稀土改性的分子筛)充分接触,与此同时,吸附剂对进入壳内的 VOCs 进行吸附。当吸附剂与 VOCs 接触后,将 VOCs 分子吸附在孔道内,含 VOCs 的空气经吸附剂净化后再由出风机排至室内。考虑到吸附剂的吸附容量有限,不定期为电热丝通电几分钟。电热丝通电后,加热丝升温的同时会对保温隔热层内的区间进行加热,电热丝表面的催化剂将吸附剂受热脱附的 VOCs 氧化为 CO_2 和 H_2O ,从而有效提升空气污染物的净化效率。一方面,吸附剂经过高温再生可重复使用,以降低吸附剂的更换周期,从而降低运行成本;另一方面,热催化氧化间歇运行,有效降低了能耗。



注:(1)塑料外壳;(2)风机;(3)保温层隔热层;(4)绝缘耐高温外壳;(5)涂覆催化剂的电热丝;(6)吸附剂;(7)催化剂;(8)电热丝。

图 2 吸附与热催化技术集成示意图

室内空气净化集成技术不仅能降低耗材(如吸附剂)更换周期、减少能耗,还能从根本上销毁污染物,提升净化效率。但目前,集成技术仍面临单一净化技术存在的问题。例如,吸附剂的选择性、吸附容量,催化剂的低温催化氧化性能、稳定性。因此,为从根本上提升空气净化技术的效率,其核心在于研发具有超大吸附容量、高稳定性、高选择性的吸附剂,以及研发低成本、低温/室温高效热催化氧化的催化剂。

3 小结

室内空气中的 VOCs 影响人们的身体健康。目前,从经济性和安全性的角度,依靠单一空气净化技术消除 VOCs 仍有一定挑战。吸附技术中采用的吸附剂需定期更换,且易造成二次污染;臭氧催化氧化技术的反应条件较温和,但需额外提供臭氧,且过高浓度的臭氧不利于人体健康;光催化氧化技术反应条件温和,但需要特定波长的光源,且光利用率较低,催化剂稳定性较差;非热等离子体催化氧化技术可同时去除多种污染物,但易产生臭氧,且副产物较多;热催化氧化技术虽然净化效率高, CO_2 选择性高,但反应温度较高。因此,需要集成两种或多种空气净化技术进行,以降低成本,提高 VOCs 净化效率。

未来室内空气净化技术可以从以下几方面优化:(1) 根据实际情况,吸附/催化氧化 VOCs 前,增加空气过滤装置,可延长吸附/催化材料的使用周期。(2) 需要考虑到室内湿度对吸附/催化材料的吸附/催化性能的影响。(3) 将多个单一空气净化技术集成,基于成本、能耗、净化效率等多因素对整个集成净化工艺进行优化。例如,可以将吸附和催化氧化结合起来,利用双功能吸附剂-催化剂有效地净化 VOCs。(4) 研发具有超大吸附容量、高稳定性、高选择性的吸附剂。(5) 研发低成本、低温/室温高效热催化氧化纳米功能材料。(6) 建立可接受的 VOCs 吸附/催化氧化纳米材料的评价体系,促进空气净化技术评价体系的建立。(7) 用于空气净化的吸附剂、催化剂的再生及资源化利用。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] LI X,ZHANG L,YANG Z,et al. Adsorption materials for volatile organic compounds (VOCs) and the key factors for VOCs adsorption process:a review[J]. Sep Purif Technol,2020,235:116213.
- [2] CHENG H,SUN Y,WANG X,et al. Hierarchical porous carbon fabricated from cellulose-degrading fungus modified rice husks: ultrahigh surface area and impressive improvement in toluene adsorption[J]. J Hazardous Mater,2020,392:122298.
- [3] LIU X,ZHU H,WU W,et al. Role of molecular size of volatile organic compounds on their adsorption by KOH-activated micro-mesoporous carbon[J]. J Hazardous Mater,2022,424:127355.
- [4] HUNTER-SELLARS E,TEE J,PARKIN I,et al. Adsorption of volatile organic compounds by industrial porous materials: impact of relative humidity[J]. Micropor Mesopor Mat,2020,298:110090.
- [5] CHA J,KIM Y,LEE I,et al. Mitigation of hazardous toluene via ozone-catalyzed oxidation using MnOx/Sawdust biochar catalyst [J]. Environ Pollut,2022,312:119920.
- [6] ZHANG B, SHEN Y, LIU B, et al. Boosting ozone catalytic oxidation of toluene at room temperature by using hydroxyl-mediated MnO_x/Al₂O₃ catalysts[J]. Environ Sci Technol,2023,57:7041-7050.
- [7] TIAN M, LIU S, WANG L, et al. Complete degradation of gaseous methanol over Pt/FeOx catalysts by normal temperature catalytic ozonation[J]. Environ Sci Technol,2020,54:1938-1945.
- [8] LIU B,JI J,ZHANG B,et al. Catalytic ozonation of VOCs at low temperature:a comprehensive review [J]. J Hazardous Mater,2022,422:126847.
- [9] ZHANG Y,WANG Y,XIE R,et al. Photocatalytic oxidation for volatile organic compounds elimination:from fundamental research to practical applications [J]. Environ Sci Technol,2022,56:16582-16601.
- [10] CHEN L,WANG X,RAO Z,et al. In-situ synthesis of Z-Scheme MIL-100 (Fe)/α-Fe₂O₃ heterojunction for enhanced adsorption and Visible-light photocatalytic oxidation of O-xylene [J]. Chem Eng J,2021,416:129112.
- [11] CHEN J,CHEN L,WANG X,et al. Er single atoms decorated TiO₂ and Er³⁺ ions modified TiO₂ for photocatalytic oxidation of mixed VOCs[J]. Appl Surf Sci,2022,596:153655.
- [12] WU P,DAI S,CHEN G,et al. Interfacial effects in hierarchically porous α-MnO₂/Mn₃O₄ heterostructures promote photocatalytic oxidation activity[J]. Appl Catal B-Environ,2020,268:118418.
- [13] WEON S,HE F,CHOI W. Status and challenges in photocatalytic nanotechnology for cleaning air polluted with volatile organic compounds:visible light utilization and catalyst deactivation [J]. Environ Sci-Nano,2019,6:3185-3214.
- [14] HU G,YANG J,DUAN X,et al. Recent developments and challenges in zeolite-based composite photocatalysts for environmental applications[J]. Chem Eng J,2021,417:129209.
- [15] 辛勤,徐杰. 现代催化化学[M]. 北京: 科学出版社,2016:339-341.
- [16] LIANG Y,LI J,XUE Y,et al. Benzene decomposition by non-thermal plasma:a detailed mechanism study by synchrotron radiation photoionization mass spectrometry and theoretical calculations[J]. J Hazardous Mater,2021,420:126584.
- [17] MU Y,WILLIAMS P. Recent advances in the abatement of volatile organic compounds (VOCs)and chlorinated-VOCs by non-thermal plasma technology:a review[J]. Chemosphere,2022,308:136481.
- [18] ZHU D,DI S,WU Z,et al. Engineering Pt/MnOx/γ-Al₂O₃ catalyst with enhanced Pt-MnOx interface to boost plasma catalytic oxidation of o-xylene [J]. J Environ Chem Eng,2022,10:107493.
- [19] ZHU B,LI Q,LI Y,et al. Improving oxidation removal of toluene in plasma coupling perovskite catalysts system by constructing Au sites on a La_{0.5}Ce_{0.5}CoO_{3-δ} [J]. Chem Eng J,2023,469:143897.
- [20] WU Z,ZHU D,CHEN Z,et al. Enhanced energy efficiency and reduced nanoparticle emission on plasma catalytic oxidation of toluene using Au/γ-Al₂O₃ nanocatalyst[J]. Chem Eng J,2022,427:130983.
- [21] ZHANG K,DING H,PAN W,et al. Research progress of a composite metal oxide catalyst for VOC degradation [J]. Environ Sci Technol,2022,56:9220-9236.
- [22] ZHANG N,LI X,GUO Y,et al. Crystal engineering of TiO₂ for enhanced catalytic oxidation of 1,2-dichloroethane on a Pt/TiO₂ catalyst[J]. Environ Sci Technol,2023,57:7086-7096.
- [23] ZHANG L, ZHONG L, YU P,et al. Size effect of platinum nanoparticles over platinum-manganese oxide on the low-temperature oxidation of toluene[J]. Langmuir,2023,39:13620-13629.
- [24] XIE J, WANG S, ZHAO K, et al. Regulating the Pt-MnO₂ interaction and interface for room temperature formaldehyde oxidation[J]. Inorg Chem,2023,62:904-915.
- [25] TU S,CHEN Y,ZHANG X,et al. Complete catalytic oxidation of

(下转第 317 页)

措施预防和控制 WMSDs 的发生。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] JIA N,ZHANG M,ZHANG H,et al. Prevalence and risk factors analysis for low back pain among occupational groups in key industries of China[J]. BMC Public Health. 2022,22(1):1-10.
- [2] SALVENDY G. Handbook of human factors and ergonomics: fourth edition[M]. New York:John Wiley & Sons,Inc.,2012.
- [3] 康伏梅,单永乐,冯斌,等. 某汽车总装车间工人多部位肌肉骨骼疾患调查及影响因素分析[J]. 中华劳动卫生职业病杂志,2021,39(1):40-43.
- [4] 王忠旭. 工作相关肌肉骨骼疾患及人因工效学评估方法[M]. 北京:人民卫生出版社,2023.
- [5] 陈春明,孔灵芝. 中国成人超重和肥胖症预防控制指南[M]. 北京:人民卫生出版社,2006.
- [6] 莫连芳. 对大学生体育锻炼习惯概念的界定[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2007,35(1):91-93.
- [7] BORG G A. Psychophysical bases of perceived exertion[J]. Med Sci Sports Exerc,1982,14(5):377-381.
- [8] 李峥,吴家兵,赵国兵,等. 某汽车制造厂电焊工手/腕部肌肉骨骼疾患的影响因素及归因分析[J]. 环境与职业医学,2023,40(1):43-48.
- [9] 徐宇萍,刘小安,时庆华,等. 某汽车制造企业员工职业性肌

肉骨骼疾患及相关危险因素研究[J]. 中国工业医学杂志,2020,33(4):295-299.

- [10] CHEN N,LI G,SUN X,et al. Prevalence status and associated factors of wrist postural injury in the Chinese occupational population[J]. Front Public Health,2022,10:1047814.
- [11] 舒友梅,陈培仙,杨燕,等. 某汽车零部件生产企业工人工作相关肌肉骨骼损伤影响因素分析[J]. 职业卫生与应急救援,2021,39(3):272-276.
- [12] HE X,XIAO B,WU J,et al. Prevalence of work-related musculoskeletal disorders among workers in the automobile manufacturing industry in China:a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Public Health,2023,23(1):2042.
- [13] WANG P C,REMPEL D M,HARRISON R J,et al. Work-organisational and personal factors associated with upper body musculoskeletal disorders among sewing machine operators[J]. Occup Environ Med,2007,64(12):806-813.
- [14] 秦东亮,王生,张忠彬,等. 工作相关肌肉骨骼疾患判别标准研究进展[J]. 中国职业医学,2017,44(3):362-364.
- [15] 姜萍,董一丹,金旭,等. 四家制造企业装配作业人员工作相关肌肉骨骼疾患的影响因素[J]. 环境与职业医学,2022,39(6):593-599.
- [16] CUNNINGHAM T R,GUERIN R J,FERGUSON J,et al. Work-related fatigue:a hazard for workers experiencing disproportionate occupational risks[J]. Am J Ind Med,2022,65(11):913-925.

收稿日期:2024-03-04

(上接第 312 页)

- formaldehyde at room temperature on $\text{MnxCo}_{3-x}\text{O}_4$ catalysts derived from metal-organic frameworks [J]. Appl Catal A-Gen,2021,611:117975.
- [26] CHEN L,LIU Y,FANG X,et al. Simple strategy for the construction of oxygen vacancies on $\alpha\text{-MnO}_2$ catalyst to improve toluene catalytic oxidation [J]. J Hazardous Mater,2021,409:125020.
- [27] XU X,WANG P,XU W,et al. Plasma-catalysis of metal loaded SBA-15 for toluene removal:comparison of continuously introduced and adsorption-discharge plasma system [J]. Chem Eng J,2016,283:276-284.
- [28] XU W,CHEN B,JIANG X,et al. Effect of calcium addition in

plasma catalysis for toluene removal by Ni/ZSM-5:acidity/basicity,catalytic activity and reaction mechanism[J]. J Hazardous Mater,2020,387:122004.

- [29] ZHOU M,LI S,CAO M,et al. Enhanced hydrophobic microporous Pt/silica with high adsorption and catalytic oxidation for trace toluene removal[J]. J Environ Chem Eng,2023,11(5):110821.
- [30] LI S,WANG T,ZHOU M,et al. PtPd/molecular sieve as dual-functional monolithic adsorbent/catalyst for effective removal of trace toluene at low-temperature and their electric-heating performance[J]. J Ind Eng Chem,2022,114:549-559.

收稿日期:2024-04-01