

DOI:10.11918/202307057

莫来石催化剂密闭舱内空气净化应用

石楷, 万翔, 温蕊, 赵春宁, 于勤, 王卫超

(南开大学 电子信息与光学工程学院, 天津 300354)

摘要: 针对现有载人航天器空气过滤净化技术效率低、净化能力单一、易造成二次污染的问题, 提出基于 YMn_2O_5 莫来石催化剂协同臭氧催化氧化的人机共存一体化技术路线。利用柠檬酸凝胶-溶胶法制备的 YMn_2O_5 催化剂通过 X 射线粉末衍射仪与扫描电子显微镜表征后发现, 其表面具有丰富的活性位点, 有利于在臭氧的协同作用下产生大量的还原性物质。该技术路线通过反应过程中产生的高活性 O^* , 可对空气中挥发性有机化合物与病毒、细菌等微生物实现高效、绿色、低能耗的降解与消杀。基于此技术路线, 结合 3D 建模与 3D 打印技术设计制作了空气净化和病毒消杀 (Mcaton) 一体化的原型机设备。针对空气中不同的挥发性有机污染物和病毒气溶胶, 在密封舱内测试了原型机对气体污染物和病毒气溶胶的净化和消杀效果, 验证了 Mcaton 技术可实现快速、高效净化各种挥发性有机污染物和病毒、细菌的消杀能力。

关键词: 载人航天器; 空气净化; 莫来石催化剂; 臭氧协同净化; 病毒消杀

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)02-0057-08

Application of mullite catalyst for air purification in sealed cabin

SHI Kai, WAN Xiang, WEN Rui, ZHAO Chunqing, YU Men, WANG Weichao

(College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300354, China)

Abstract: In response to issues of low efficiency, single purification capacity and potential secondary pollution associated with existing manned spacecraft air filtration and purification technology, an integrated technology route of man-machine coexistence based on YMn_2O_5 mullite catalyst synergized with ozone catalytic oxidation was proposed. The YMn_2O_5 catalyst prepared by citric acid gel-sol method was characterized by X-ray powder diffractometer and scanning electron microscope. The results revealed that the catalyst's surface possesses abundant active sites, which are conducive to the production of a large number of reductive substances under the synergistic effect of ozone. This technology route enables efficient, green and low-energy consumption degradation and elimination of volatile organic compounds, viruses, bacteria and other microorganisms in the air through the highly active O^* produced during the reaction process. Based on this technology route, a prototype equipment integrating air purification and virus elimination (Mcaton) was designed and produced by combining 3D modeling and 3D printing technologies. For different volatile organic pollutants and virus aerosols in the air, the purification and elimination effects of the prototype on gas pollutants and virus aerosols were tested in a sealed chamber, which validated the ability of the Mcaton technology to achieve rapid and efficient purification of various volatile organic pollutants and elimination of viruses and bacteria.

Keywords: manned spacecraft; air purification; mullite catalyst; O_3 synergistic purification; virus sanitize

随着中国载人航天工程的全面快速发展, 载人航天环境控制与生命保障系统 (environment control and life support system, ECLSS)^[1] 成为未来载人任务必不可少的关键技术。航天器舱内空间狭小, 长期处于密封状态, 舱内的环境和空气质量控制尤为重要, 舱内洁净空气质量是保证宇航员在轨期间生命正常工作的关键因素之一^[2]。航天器舱内结构特性可避免引入外界气体污染物或者病毒气溶胶等有害成分, 但内部有大量用于装饰、隔热、密封、绝缘用

途的非金属材料, 长期的在轨运行过程中, 常温 (18~20 °C) 条件下会发生氧化降解反应, 释放多种挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs)^[3], 主要成分包括醛类、苯类、酮类等^[4]。此外, 航天员在航天器舱内工作和生活过程中, 会不可避免地进行人体代谢, 代谢产物通过呼吸、皮肤汗液、排便的方式排出体外, 并由专门的废物收集设备及时收集处理, 但是在这个过程中也会存在氨气、硫化氢的泄漏^[5]。

收稿日期: 2023-07-19; 录用日期: 2023-09-19; 网络首发日期: 2024-04-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240410.1708.002>

作者简介: 石楷 (1997—), 男, 硕士研究生; 王卫超 (1979—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王卫超, weichaowang@nankai.edu.cn

载人航天器为航天员提供了良好生活、工作环境,也为病毒、细菌的滋生创造了有利条件^[6]。航天器在轨阶段舱内会出现空气流通不畅的窝风区域和低温冷凝的潮湿表面。同时,舱内具有特殊的环境因素如微重力、高真空、弱磁场和粒子辐射等,有利于病毒、细菌的生长繁殖甚至变异^[7]。虽然生活用品、工具设备在进舱前都经过严格的杀菌消毒,仍有少量病毒、细菌等微生物随着航天员的身体、设备部件进入舱内^[8]。航天员长期身处太空辐射环境,自身免疫力难免下降,航天器本身材料结构也会有退化,而病毒、细菌的活性得到增强^[9],随着时间积累会对航天员和航天器埋下潜在危害^[10]。研究发现,单一或混合细菌会黏附在物体表面形成微生物膜,在一定程度上腐蚀不锈钢、碳钢、铜、铝及其合金材料^[11-13]。

舱室中的 VOCs 与微生物群落是航天器安全运转的潜在威胁,世界各国已经开始了针对性研究。1957 年, Pomeroy^[14] 首先研究了利用土壤微生物除臭技术; 1988 年, 荷兰开始研究利用生物技术去除载人航天器中的污染气体^[14], 美国航空航天局 (NASA) 和欧盟航空局 (ESA) 相继开展长期载人航天工程中高级生保系统 (advanced life support system, ALSS) 研究, 提出了生物空气过滤器 (biological air filter, BAF)^[15], 目前已得到初步应用。中国在载人航天器内污染物的检测与控制方面开展了深入研究, 重点分析了航天器舱室污染物来源、种类、特性等, 初步制定了主要舱室中微量污染物最大容许浓度^[16]。然而, 针对载人航天器舱内 VOCs 和病毒、细菌的治理还缺乏更高效、可再生的处理方式。现有空气净化技术主要分为物理和化学方法两类。物理方法包括机械过滤、物理吸附、静电吸附等, 机械过滤与物理吸附技术主要依靠活性炭、氧化铝、分子筛这类吸附剂对空气中颗粒物以及 VOCs 进行吸附, 但是无法从根源去除 VOCs 与病毒、细菌, 时间久了会释放到空气中造成二次污染^[16]; 静电吸附利用高压静电场将含尘空气电离形成带电粒子吸附在集尘板上^[17], 其缺点是能耗太大, 无法广泛使用。化学方法主要是通过特定方法生成氧化性较强的自由基或利用化学反应去除 VOCs 及微生物, 如等离子体净化、光催化净化、次氯酸、过氧化氢消毒等技术^[18], 这类技术较少应用于室内或公共场所, 主要因为其一般需要使用强氧化剂材料或紫外光光催化技术实现对 VOCs 和病毒、细菌的消杀, 一旦使用不当造成材料泄漏或臭氧泄漏, 将对人体造成伤害^[19], 无法真正实现人机共存。

针对载人航天器舱内挥发性有机物和病毒气溶胶高效治理的迫切需求, 利用能产生高活性 O* 的臭氧与锰基莫来石催化材料 (YMn₂O₅)^[22], 结合计算流体力学模拟、Solidworks 建模和 3D 打印技术, 设计并装配了基于空气净化和病毒消杀一体化 (Mcaton) 技术的新一代智能原型机设备。进一步测试了原型机设备在 3 m³ 与 20 m³ 密闭实验舱中对苯与甲醛的净化效果及病毒、细菌的消杀能力。本技术的应用将有效解决传统空气净化技术效率低、能耗大、易造成二次污染的缺点, 在实现高效净化 VOCs 污染物与病毒、细菌消杀的同时做到无二次污染, 零臭氧泄漏, 真正意义上实现人机共存一体化, 为未来载人航天工程环境控制与生命保障系统中舱内空气环境治理提供了新的方法。

1 实验

1.1 样品制备

核心材料 YMn₂O₅ 莫来石催化剂由柠檬酸溶胶-凝胶法制备而成^[22]。取一定量的柠檬酸、Y(NO₃)₃·6H₂O 和 Mn(CH₃COO)₂·4H₂O 溶解于去离子水中, 加热至 120 °C, 持续搅拌得到固体混合物, 在马弗炉内 800 °C 下煅烧, 煅烧后取出研磨得到粉末状 YMn₂O₅ 莫来石催化剂。

取一定量莫来石催化剂粉末, 与铝溶胶 $\alpha(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}) \cdot b\text{Hx} \cdot c\text{H}_2\text{O}$ (Hx 为胶溶剂)、乙二醇 (CH₂OH)₂ 溶液混合并持续搅拌均匀后倒入准备好的氧化铝颗粒中进行涂覆, 放入马弗炉中在 500 °C 下煅烧 3 h 后, 得到负载 YMn₂O₅ 莫来石催化剂粉末的氧化铝颗粒。

1.2 活性组分 YMn₂O₅ 结构表征

采用 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku MiniFlex600)、扫描电子显微镜 (SEM, Zeiss Sigma 500) 和比表面积分析仪 (BET, BSD-3H-2000PM2) 对 YMn₂O₅ 莫来石催化剂的结构进行表征。XRD 结果显示, 制备得到的 YMn₂O₅ 莫来石催化剂具有良好的结晶度 (图 1(a))。YMO 的单元格由八面体 (Mn₄ + O₆) 和金字塔形 (Mn₃ + O₅) 晶场构成, A 位原子填充空隙并稳定结构 (图 1(a))。由于独特的配位结构, YMn₂O₅ 表面具有大量的活性位点, 能够实现臭氧 + VOCs 的高效协同降解^[22]。SEM 谱图可以看出, YMn₂O₅ 莫来石催化剂由许多纳米颗粒堆叠而成 (图 1(b)), 比表面积为 33.54 m²/g。在煅烧过程中有机物发生热解, 形成许多孔状结构, 有助于催化剂活性表面与待处理空气的充分接触。

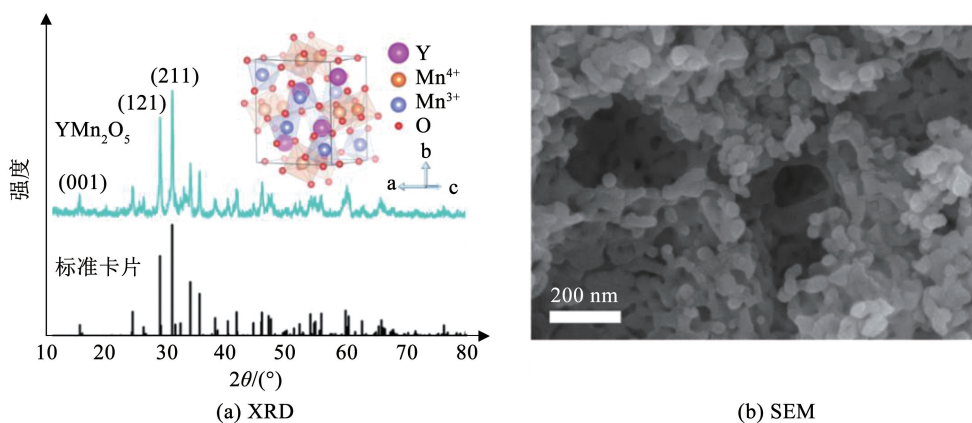


图 1 YMn₂O₅ 莫来石催化剂的 XRD 和 SEM 谱图

Fig. 1 XRD and SEM spectra of YMn₂O₅ mullite catalyst

1.3 Mcaton 原型机设计

使用 ANSYS Meshing 对 Mcaton 原型机进行了模型简化处理与网格划分,在原型机内部生成流体域进而模拟流体运动规律。利用 ANSYS Fluent 对原型机运行状态下内部的气体流速和轨迹进行了瞬态分析。在原型机入口处,考虑大气条件,采用压力入口为边界条件,在距出口 5 cm 处安装排风扇,选择压力出口为边界条件。在流体区界面处采用连续边界条件,可将一个区域的流体速度直接传递到另一个区域。计算求解部分使用了 Realizable *k*-epsilon 模型与可扩展壁面函数(SWF), Realizable *k*-epsilon 模型针对各种流动进行了广泛验证,包括自由流动、通道和边界层流动、分离流等,其性能大大优于标准模型的性能^[23]。原型机内部的流场通过迹线表示,图 2 为原型机内部气流运动轨迹和速度分布的计算结果。

通过 Solidworks 软件 3D 建模设计原型机模型(图 3(a)),主体由风扇格栅、主机外壳、滤筒、底座

4 部分组合而成,并利用 3D 打印技术,结合风扇、净化滤芯(臭氧产量 1 g/h)及控制电路等内部元件构成智能原型机装备(图 3(b))。图 3(c)为装有负载 YMn₂O₅ 活性组分的氧化铝颗粒滤芯,分解臭氧发生器产生的臭氧进而产生具有高活性的 O*,可以打断 VOCs 分子内的强化学键,同时破坏病毒、细菌的结构,实现 VOCs 和病菌的完全净化和消杀。

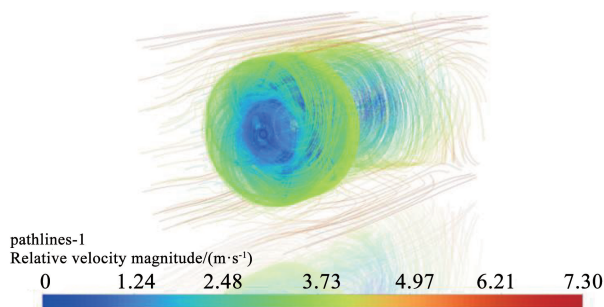


图 2 原型机内部流体速度分布

Fig. 2 Fluid velocity distribution inside the prototype



图 3 原型机 3D 模型及实物示意

Fig. 3 Prototype 3D model and physical schematic

1.4 Mcaton 原型机测试环境

按照 GB/T 18883—2022《室内空气质量标

准》^[25]要求搭建了 3 m³ 密闭实验舱(图 3)。实验舱框架为不锈钢材料,壁厚厚度 5 mm 的浮法平板玻

璃,顶部有直径 1 m 的三叶搅拌风扇。舱内具有温湿度调节系统与换气系统,确保实验舱内空气洁净。使用 HT-9829 型温湿度计(北京,鑫斯特仪器有限公司)、MS400 型 VOCs 检测器(重庆,基恩斯精密仪器设备有限公司)、DM509-O₃ 型臭氧检测器(深圳,鼎盟检测技术有限公司)实时监测记录数据。通常情况下,载人航天器内部的温度控制在 17 ~ 26 °C,相对湿度控制在 30% ~ 70%^[25],故实验时保持实验舱内温度为 25 °C ± 1 °C,相对环境湿度控制在 50% ± 5%。

1.5 VOCs 净化实验方案

选择具有代表性的、较难降解的苯与甲醛作为模型污染物进行净化实验和分析。分别将质量分数为 37% 的福尔马林溶液与苯溶液(99%,分析纯)同去离子水混合稀释至质量浓度为 9、15 mg/mL 的标准溶液作为 VOCs 污染源备用。

在甲醛与苯的净化实验中,用胶头滴管吸取 1 mL 稀释后的标准溶液滴加在密闭实验舱内的培养皿中,关闭舱门,控制密闭实验舱内温度保持在 25 °C ± 1 °C(相对湿度 50% ± 5%)。加热培养皿使皿内苯标准溶液完全挥发,同时开启舱内搅拌风扇,待密闭实验舱中 VOCs 质量浓度稳定(质量浓度相对变化小于 1%),开始自然衰减实验,测定舱内 VOCs 质量浓度的变化,采集时间为 t (min),按照式(1)计算此时间段内 VOCs 在实验舱内的自然衰减率:

$$\eta = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为自然衰减率; ρ_0 为 $t = 0$ 时,舱内 VOCs 初始质量浓度(mg/m^3); ρ_t 为 t 时刻舱内 VOCs 质量浓度(mg/m^3)。

测得自然衰减率后进行 Mcaton 原型机对 VOCs 净化性能测试实验,前期准备工作同上。当舱内 VOCs 质量浓度相对稳定时,开启 Mcaton 原型机,实验时间与自然衰减率测试时间相同。按式(2)计算在原型机正常工作状况下 VOCs 的总衰减率:

$$\eta_s = \frac{\rho'_0 - \rho'_t}{\rho'_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η_s 为总衰减率, ρ'_0 为 $t = 0$ 时舱内 VOCs 初始质量浓度, ρ'_t 为 t 时刻舱内 VOCs 质量浓度。Mcaton 原型机对 VOCs 的净化效率按式(3)计算:

$$E = \eta_s - \eta \quad (3)$$

式中: E 为 Mcaton 原型机对 VOCs 的净化效率, η_s 为 VOCs 总衰减率, η 为 VOCs 自然衰减率。

1.6 病毒、细菌消杀实验方案

病毒、细菌消杀实验分别测试了 Mcaton 技术对常见的冠状病毒 HCoV-229E、甲型 H1N1 流感病毒、

白葡萄球菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的消杀性能。实验基本原理^[26]是通过使用喷雾染菌装置(气溶胶喷雾器)将病毒与细菌以气溶胶微粒(微粒直径为 0.1 ~ 10 μm)的形式打入密闭实验舱内,保持密闭实验舱内环境温度为 25 °C ± 1 °C,环境相对湿度为 50% ~ 70%。开启 Mcaton 原型机运行特定时间后,使用空气微生物采样器分别采集密闭实验舱和对照实验舱内的空气,计数存活的病毒数量,计算病毒去除率,比较病毒的减少程度。单位空间中病毒数量按式(4)计算:

$$D = \frac{N \times V}{F \times t} \times 1\,000 \quad (4)$$

式中: D 为单位空间中病毒数量($\text{TCID}_{50}/\text{m}^3$), $\text{TCID}_{50}/\text{m}^3$ 是生物学中用于衡量病毒浓度的单位,指每立方米空气中所含的病毒数量,通常用于评估空气传播病毒性疾病的风险), N 为单位采样液原液中病毒的数量($\text{TCID}_{50}/\text{m}^3$), V 为采样液体积(mL), F 为采样流量(L/min), t 为采样时间(min)。病毒去除率按式(5)计算:

$$K_t = \frac{D_0(1 - N_t) - D_t}{D_0(1 - N_t)} \times 100 \quad (5)$$

式中: K_t 为 Mcaton 原型机的除病毒率, D_0 为实验组在实验前的空气含病毒量($\text{TCID}_{50}/\text{m}^3$), D_t 为实验组在实验后的空气含病毒量($\text{TCID}_{50}/\text{m}^3$), N_t 为对照组空气中病毒自然衰减率,按照式(6)计算:

$$N_t = \frac{D'_0 - D'_t}{D'_0} \times 100 \quad (6)$$

式中: D'_0 为对照组在实验前空气含病毒量($\text{TCID}_{50}/\text{m}^3$), D'_t 为对照组在实验后空气含病毒量($\text{TCID}_{50}/\text{m}^3$)。

2 Mcaton 技术对 VOCs 及病毒、细菌净化效率

2.1 VOCs 净化效率

最新室内空气质量标准^[25]中规定苯 1 h 平均质量浓度 $\leq 0.03 \text{ mg}/\text{m}^3$,测试中分别以 50 倍、100 倍、200 倍质量浓度作为初始质量浓度进行实验,图 4(a)分别展示了在 25 °C、相对湿度 50% 条件下,3 m^3 密闭实验舱内 Mcaton 原型机室温下对不同初始质量浓度苯的净化效率、未负载 YMn_2O_5 活性组分的氧化铝颗粒对苯的净化效果以及实验舱内苯的自然衰减率。当初始质量浓度为 1.5 mg/m^3 时,净化器在 5 min 内可以将其完全降解。当初始质量浓度增加至 3 mg/m^3 时,完全净化时间提升至 20 min。进一步提升苯初始质量浓度为 6 mg/m^3 ,Mcaton 原型机在 40 min 时实现了对其 100% 的降解净化,并

在关闭设备后不会出现污染物质量浓度的反弹。图 4(a) 结果表明, 随着苯初始质量浓度的增加, 在相同臭氧产量(1 g/h)条件下, 完全净化不同质量浓度苯的时间也相应增加。进一步在相同实验环境中分别使用臭氧产量为 1 g/h 和 2 g/h 的 Mcaton 原型机对初始质量浓度为 3 mg/m³ 的苯进行净化测试。从图 4(c) 可以看出, 当臭氧产量增加时, Mcaton 原型机对 3 mg/m³ 的苯净化所需时间减少接近 1/2。臭氧产量的增加会导致瞬时臭氧质量浓度的增加, 进而产生更多的活性 O*, 有利于加速对苯的完全

降解。作为对比, 密闭实验舱内苯的自然衰减率为 0.5%, 证明了原型机测试的可靠性。考虑到载人航天器生活舱内相对湿度在 30% ~ 70% 变化, 对 Mcaton 原型机在不同湿度环境下对苯污染物的净化效果进行实验测试(图 4(b))。结果显示, 当相对湿度依次由 30% 增加至 70% 时, 苯完全降解所需时间也会相应增加, 其原因是当湿度过高时, 水分子会与苯、臭氧分子在 YMn₂O₅ 表面的活性位点产生竞争吸附, 占据反应活性位点, 进而阻碍 O* 的产生和苯的分解, 降低净化效率导致完全降解时间增加^[27]。

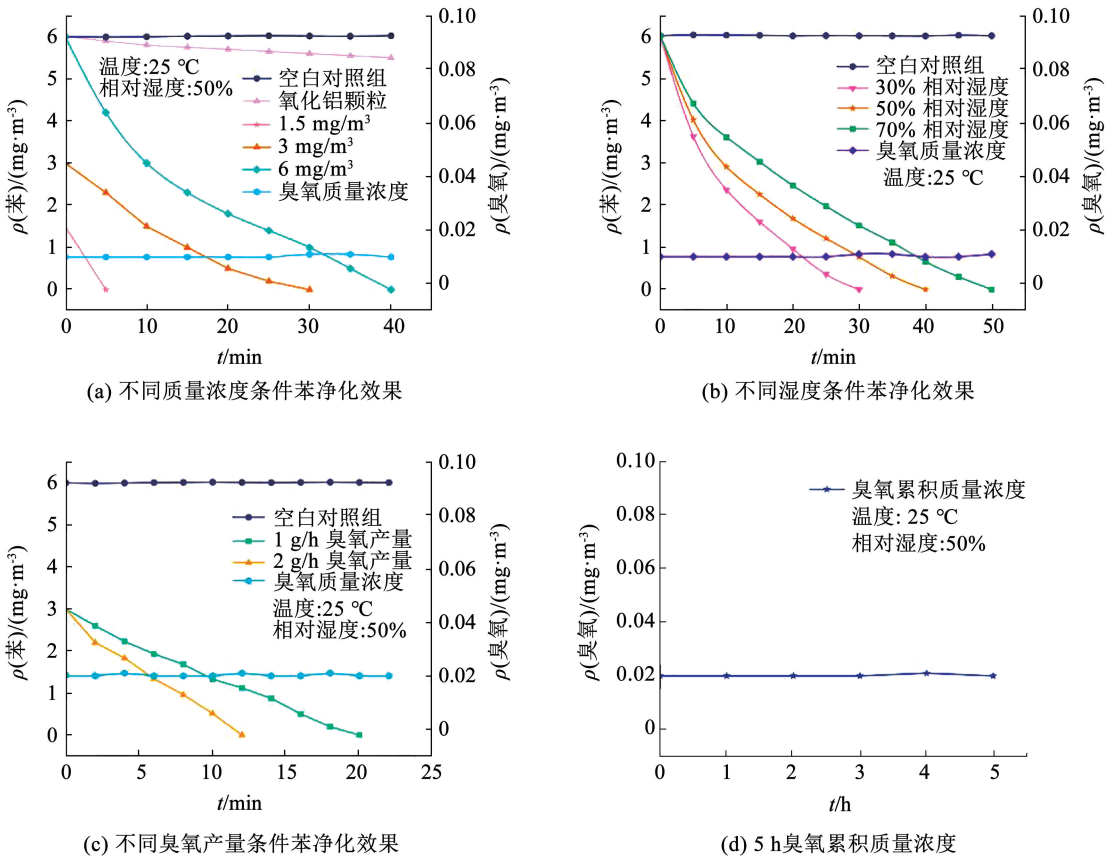


图 4 不同条件下对苯的净化效果与臭氧累积质量浓度

Fig. 4 Purification effect and ozone accumulation of benzene under different conditions

针对 O₃ 泄漏问题^[4], 莫来石催化材料(YMn₂O₅) 展示出在 -5 °C 以上 100% O₃ 转化为 O₂ 的效果, 避免了 O₃ 泄漏。在 Mcaton 原型机对苯的净化实验中, 监测了臭氧随时间积累的变化, 从图 4(a) 可以看出, Mcaton 原型机在实际应用中, 臭氧累积质量浓度均稳定在 0.02 mg/m³, 低于国家标准中每小时平均 0.16 mg/m³ 的质量浓度要求^[25]。同时, 在密闭实验舱内对 Mcaton 原型机进行了长达 5 h 的连续运行监测, 从图 4(d) 可以看出, 在 5 h 内臭氧累积质量浓度始终稳定在 0.02 mg/m³, 上下偏差

过 ± 0.01 mg/m³。由此可见, 在密闭实验舱内 Mcaton 原型机经过长时间的连续运转后仍可保证 O₃ 的零泄漏。

图 5 显示了在 25 °C、50% 相对湿度的条件下密闭实验舱内 Mcaton 原型机对不同质量浓度甲醛的净化效果以及臭氧累积质量浓度的检测。当甲醛初始质量浓度为 3 mg/m³ 时, 30 min 即可完全降解, 若初始质量浓度为 1 mg/m³ 时, 仅需 5 min 即可实现全部净化。上述实验结果说明, 利用 YMn₂O₅ 莫来石催化剂材料协同臭氧的技术可实现对 VOCs 高效净化。

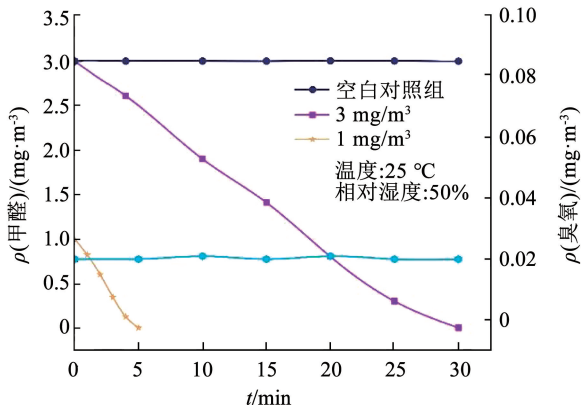


图 5 25 °C、50%湿度条件下不同质量浓度甲醛净化效果

Fig. 5 Purification effect of formaldehyde at different concentrations at 25 °C and 50% humidity

2.2 病毒、细菌消杀效率

采用 Mcaton 技术对于病毒及细菌的消杀灭活能力进行了详细的测试。在 20 m³ 密闭舱内测试 Mcaton 技术对于病毒的消杀能力。病毒测试依据流感病毒实验法, 选取甲型 H1N1 流感病毒与冠

状病毒 HCoV-229E 进行实验。表 1、2 为 Mcaton 原型机对两种病毒净化实验结果, 30 min 即可对冠状病毒与 H1N1 流感病毒达到 99.7% 的净化率, 60 min 内平均净化率 >99.99%。

细菌分别选用空气中常见菌类进行测试: 以金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*) ATCC 6548 作为细菌繁殖体中化脓性球菌代表; 大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 8099 作为细菌繁殖体中肠道菌的代表; 白色葡萄球菌 (*Staphylococcus albus*) 8032 作为空气中细菌的代表。将制备好的菌悬液^[28] 按照喷雾染菌装置设定的压力、气体流量及喷雾时间对密闭实验舱内进行喷雾染菌, 开启 Mcaton 原型机运行 60 min, 在 30 min 和 60 min 时分别进行舱内气体采样, 实验重复测试 3 次, 分别计算灭菌率, 取 3 次结果的平均值作为最后实验结果。表 3、4、5 分别为金黄色葡萄球菌、白色葡萄球菌及大肠杆菌灭菌率测试结果。在每组实验的 3 次平行重复实验中, Mcaton 原型机对于不同种类细菌的灭菌率 30 min 均达到 >99.99% 的效果。

表 1 冠状病毒 HCoV-229E 净化测试

Tab. 1 Coronavirus HCoV-229E purification test

实验病毒	实验次数	作用时间/min	对照组病毒感染滴度			实验组病毒感染滴度		病毒净化率/%	平均净化率/%
			初始浓度/ (10 ⁶ TCID ₅₀ ·m ⁻³)	终浓度/ (10 ⁶ TCID ₅₀ ·m ⁻³)	自然衰减率/%	初始浓度/ (10 ⁶ TCID ₅₀ ·m ⁻³)	终浓度/ (10 ³ TCID ₅₀ ·m ⁻³)		
冠状病毒 HCoV-229E	1		6.43	4.68	68.23	4.45	3.16	99.78	
	2	30	4.25	3.16	60.00	5.34	1.70	99.92	99.79
	3		5.34	2.14	72.96	2.50	2.14	99.68	
	1		6.43	3.23	78.07	4.45	0	>99.99	
	2	60	4.25	1.29	83.74	5.34	0	>99.99	>99.99
	3		5.34	1.07	86.48	2.50	0	>99.99	

表 2 甲型 H1N1 流感病毒净化测试

Tab. 2 Influenza A(H1N1) virus purification test

实验病毒	实验次数	作用时间/min	对照组病毒感染滴度			实验组病毒感染滴度		病毒净化率/%	平均净化率/%
			初始浓度/ (10 ⁶ TCID ₅₀ ·m ⁻³)	终浓度/ (10 ⁶ TCID ₅₀ ·m ⁻³)	自然衰减率/%	初始浓度/ (10 ⁶ TCID ₅₀ ·m ⁻³)	终浓度/ (10 ³ TCID ₅₀ ·m ⁻³)		
甲型流感病毒 H1N1	1		5.34	1.480	72.33	6.43	3.16	99.82	
	2	30	5.34	2.140	60.00	2.50	2.75	99.72	99.78
	3		5.34	2.140	60.00	2.50	2.14	99.79	
	1		5.34	1.070	80.00	6.43	0	>99.99	
	2	60	5.34	1.290	75.95	2.50	0	>99.99	>99.99
	3		5.34	0.849	84.11	2.50	0	>99.99	

表3 金黄色葡萄球菌灭菌率

Tab.3 Sterilization rate of *Staphylococcus aureus*

实验次数	作用时间/min	对照组		实验组		灭菌率/%
		空气中含菌量/ ($10^5 \text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	自然消亡率/%	初始浓度/ ($10^5 \text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	最终浓度/ ($\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	
1	30	1.18	5.12	1.28	0	>99.99
	60	1.10	11.43		0	
2	30	1.18	6.55	1.29	0	>99.99
	60	1.10	12.61		0	
3	30	1.99	9.88	2.35	0	>99.99
	60	1.72	21.98		0	

表4 白色葡萄球菌灭菌率

Tab.4 Sterilization rate of *Staphylococcus albus*

实验次数	作用时间/min	对照组		实验组		灭菌率/%
		空气中含菌量/ ($10^5 \text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	自然消亡率/%	初始浓度/ ($10^5 \text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	最终浓度/ ($\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	
1	30	1.17	6.13	1.28	0	>99.99
	60	1.05	15.50		0	
2	30	1.99	9.88	2.35	0	>99.99
	60	1.72	21.98		0	
3	30	1.11	11.21	1.23	0	>99.99
	60	1.03	17.15		0	

表5 大肠杆菌灭菌率

Tab.5 Sterilization rate of *Escherichia coli*

实验次数	作用时间/min	对照组		实验组		灭菌率/%
		空气中含菌量/ ($10^5 \text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	自然消亡率/%	初始浓度/ ($10^5 \text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	最终浓度/ ($\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$)	
1	30	1.29	6.33	1.34	0	>99.99
	60	1.21	12.19		0	
2	30	1.21	4.99	1.29	0	>99.99
	60	1.13	11.15		0	
3	30	1.18	6.22	1.28	0	>99.99
	60	1.11	12.27		0	

3 结 语

针对载人航天器内部空气污染治理问题,提出了基于 $\text{Y Mn}_2\text{O}_5$ 莫来石催化剂协同臭氧产生具有高活性 O^* 进而净化空气、消杀病毒的人机共存一体化技术(Mcaton)。通过3D打印外壳并组装原型机设备,密闭实验舱内测试验证了Mcaton技术对VOCs污染物及病毒、细菌的净化效率。结果表明,Mcaton技术对高质量浓度的VOCs污染物可实现快速100%降解且不会泄漏臭氧,同时,对常见细菌及冠状病毒、甲型H1N1流感病毒具有出色的消杀能

力。在未来的研究中,将进一步研究Mcaton技术对不同种类VOCs污染物与病毒、细菌的净化效果,优化原型机设计,进一步提升 Mn_2O_5 催化剂性能,围绕高湿度下Mcaton净化速率降低现象进行深入研究。通过掺杂疏水材料,改善 $\text{Y Mn}_2\text{O}_5$ 表面疏水性能,消除环境因素对于降解效率的影响,是将该技术进行广泛应用的关键。

参考文献

- [1]王康,高峰.载人航天器环控生保系统50年研制回顾与展望[J].航天医学与医学工程,2011,24(6):435
WANG Kang, GAO Feng. Review and prospects of fifty years'

- development of environment control and life support system in manned spacecraft [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2011, 24(6): 435. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2011.06.013
- [2] HONG Yang. Manned spacecraft technologies [M]. Singapore: Springer Singapore, 2021: 7
- [3] MOUKHAMEDIEVA L, OZEROV D, PAKHOMOVA A. The distribution of trace contaminants in the manned space station atmosphere [J]. *Acta Astronautica*, 2022, 201: 597. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.09.053
- [4] KUMAR K, KUMAR C, PANDEY R K. CFD analysis of an outdoor air purifier with experimental validation [J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2023, 17(3): 1409. DOI: 10.1007/s12008-022-01014-9
- [5] PERRY J L. Trace chemical contaminant generation rates for spacecraft contamination control system design [R]. [S. l.]: US Government Technology Report, 1995
- [6] LANG T, VAN LOON J J W A, BLOOMFIELD S, et al. Towards human exploration of space; the THESEUS review series on nutrition and metabolism research priorities [J]. *Npj Microgravity*, 2017, 3(1): 8. DOI: 10.1038/s41526-017-0013-0
- [7] 闫洁, 李兴乾, 张兰涛. 载人航天器密封舱地面微生物控制与检测 [J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(1): 4
YAN Jie, LI Xingqian, ZHANG Lantao. Ground control and detection of microbes in sealed cabin of manned spacecraft [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(1): 4. DOI: 10.12126/sec.2021.01.014
- [8] PIERSON D L, BOTKIN D J, BRUCE R J, et al. Microbial monitoring of the international space station [J]. *Ssrn Electronic Journal*, 2013, 115(Pt 9): 1939. DOI: 10.2139/ssrn.2427644
- [9] HOUDT R V, MIJNENDONCKX K, LEYS N. Microbial contamination monitoring and control during human space missions [J]. *Planetary & Space Science*, 2012, 60(1): 115. DOI: 10.1016/j.pss.2011.09.001
- [10] NOVIKOVA N D. Review of the knowledge of microbial contamination of the russian manned spacecraft [J]. *Microbial Ecology*, 2004, 47(2): 127. DOI: 10.1007/s00248-003-1055-2
- [11] VOORHIES A A, MARK O C, MEHTA S, et al. Study of the impact of long-duration space missions at the international space station on the astronaut microbiome [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 9911. DOI: 10.1038/s41598-019-46303-8
- [12] 陈景威, 杨军, 随欣, 等. 载人航天器下行细菌对 LY12 铝合金腐蚀行为的影响 [J]. *载人航天*, 2017, 23(2): 252
CHEN Jingwei, YANG Jun, SUI Xin, et al. Corrosion behavior of LY12 aluminum alloy influenced by bacteria isolated from manned spacecraft [J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(2): 252. DOI: 10.16329/j.cnki.zhht.2017.02.019
- [13] PATON S, MOORE G, CAMPAGNOLO L, et al. Antimicrobial surfaces for use on inhabited space craft; a review [J]. *Life Sciences in Space Research*, 2020, 26: 125. DOI: 10.1016/j.lssr.2020.05.004
- [14] POMEROY R D. Biological treatment of odorous air [J]. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1982: 1541
- [15] MC D, NIKIEMA J, BIBEAU L, et al. A new method to determine the microbial kinetic parameters in biological airfilters [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(16): 4126. DOI: 10.1016/j.ces.2008.05.020
- [16] 熊涛. 载人航天器舱内地面环境污染分析与控制方法 [J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(1): 100
XIONG Tao. Analysis and control method of ground environmental pollution in manned spacecraft cabin [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(1): 100. DOI: 10.3969/j.issn.1673.2010.01.021
- [17] LIGOTSKI R, SAGER U, SCHNEIDERWIND U, et al. Prediction of VOCs adsorption performance for estimation of service life of activated carbon based filter media for indoor air purification [J]. *Building and Environment*, 2019, 149: 146. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.12.001
- [18] KIM J H, LEE H S, KIM H H, et al. Electrospray with electrostatic precipitator enhances fine particles collection efficiency [J]. *Journal of Electrostatics*, 2010, 68(4): 305. DOI: 10.1016/j.elstat.2010.03.0002
- [19] ROY A, MISHRA C, JAIN S, et al. A review of general and modern methods of air purification [J]. *Journal of Thermal Engineering*, 2018, 5(2): 22. DOI: 10.18186/thermal.529054
- [20] LIN Fawei, WANG Zhihua, ZHANG Zhiman, et al. Flue gas treatment with ozone oxidation: an overview on nox, organic pollutants, and mercury [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 382: 123030. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123030
- [21] LIU B, JI J, ZHANG B, et al. Catalytic ozonation of VOCs at low temperature: a comprehensive review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422: 126847. DOI: 10.1016/j.hazmat.2021.126847
- [22] KUMAR K, KUMAR C, PANDEY R K. CFD analysis of an outdoor air purifier with experimental validation [J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2023, 17(3): 1409. DOI: 10.1007/s12008-022-01014-9
- [23] FERRARA F, PAMBIANCHI E, WOODBY B, et al. Evaluating the effect of ozone in UV induced skin damage [J]. *Toxicology Letters*, 2021, 338: 40. DOI: 10.1016/j.toxlet.2020.11.023
- [24] WAN Xiang, WANG Li, ZHANG Shen. Ozone decomposition below room temperature using Mn-based mullite Ym_2O_5 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(12): 8746. DOI: 10.1021/acs.est.1c08922
- [25] 国家标准化管理委员会. 室内空气质量标准: GB/T 18883—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022
Standardization Administration of China. Standards for indoor air quality: GB/T 18883—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022
- [26] 黄家荣, 范含林. 载人航天器生活舱内热湿环境的数值模拟 [J]. *中国空间科学技术*, 2004, 24(6): 7
HUANG Jiarong, FAN Hanlin. Numerical simulation of the thermal and humid environment in manned spacecraft habitation cabin [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2004, 24(6): 7. DOI: 10.3321/j.issn:1000-758X.2004.06.002
- [27] 上海市环境保护工业行业协会空气净化设备专业委员会. 空气净化器及类似功能产品除病毒性能试验方法: T/SAEPI 005—2020 [S]. 上海: 上海市环境保护工业行业协会, 2020
Profession Association of Environmental Protection Industry of Shanghai. Measurement of virus removal activity of indoor air cleaner and similar products; T/SAEPI 005—2020 [S]. Shanghai: Profession Association of Environmental Protection Industry of Shanghai, 2020
- [28] ZHANG Yi, CHEN Minxia, ZHANG Zhixiang, et al. Simultaneously catalytic decomposition of formaldehyde and ozone over manganese cerium oxides at room temperature: promotional effect of relative humidity on the mnceox solid solution [J]. *Catalysis Today*, 2019, 327: 323. DOI: 10.1016/j.cattod.2018.04.027
- [29] 国家标准化管理委员会. 家用和类似用途电器的抗菌、除菌、净化功能 空气净化器的特殊要求: GB 21151.3—2010 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2011
Standardization Administration of China. Antibacterial and cleaning function for household and similar electrical appliances-particular requirements of air cleaner; GB 21151.3—2010 [S]; Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2011