

轨道交通车辆阻尼涂料对总挥发性有机化合物的吸附与脱附作用分析

卜繁强¹ 张春娇² 王 峰¹ 都青华¹ 窦 磊³ 王庆文⁴ 朱梅奇³

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春; 2. 绥化市北林区疾病预防控制中心, 152001, 绥化; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春; 4. 中车长春轨道客车股份有限公司质量保证部, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为提高轨道交通车辆的车内空气质量,以客车常用的阻尼涂料和腻子湿料为试样,进行吸附效应试验和脱附效应试验,实时监测并记录环境测试舱内的 TVOC(总挥发性有机化合物)质量浓度,分析阻尼涂料对环境舱中 TVOC 的吸附效应,研究吸附后的阻尼涂料在不同通风量和温度下对 TVOC 的脱附效果。研究结果表明:阻尼涂料对 TVOC 具有较强的吸附效应;在对吸附 TVOC 后的阻尼涂料进行脱附时,通风量越大、脱附温度越高脱附效果越好。

关键词 轨道交通车辆;挥发性有机化合物;阻尼涂料;吸附;脱附

中图分类号 U270.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.014

Analysis of Absorption and Desorption of TVOC by Rail Transit Vehicle Damping Coating

BU Fanqiang, ZHANG Chunjiao, WANG Feng, DU Qinghua, DOU Lei, WANG Qingwen, ZHU Meiqi

Abstract To improve the interior air quality of rail transit vehicle, the damping coating and acrylic wall putty commonly used on passenger compartment are taken as specimens to conduct adsorption and desorption effect tests. The TVOC (total volatile organic compounds) mass concentration in the test chamber is monitored and recorded in real time to analyze the damping coating adsorption effect of TVOC in the environmental chamber. For the damping coating that has absorbed TVOC, the desorption effects at different ventilation volumes and under different temperatures are studied. Research results show that damping coating has strong adsorption effect of TVOC; when the desorption is carried out on the damping coating that has absorbed TVOC, the higher the ventilation volume and the desorption temperature, the better the desorption effect.

Key words rail transit vehicle; volatile organic compounds;

damping coating; absorption; desorption

First-author's address National Engineering Research Center of Railway Vehicle, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

随着人们环保意识的不断增强,人们对轨道交通车内空气质量尤为关注^[1-4]。目前,车内空气质量研究主要采用袋式法来测试客室内部装修材料及零部件的 TVOC(总挥发性有机化合物)水平^[5-8]。该方法可简便实现整车的车内空气质量检测,但未考虑装车后各材料及零部件之间相互影响情况。考虑到车内非金属材料对 TVOC 的吸附与脱附作用会直接影响车内空气质量,本项目选取车内使用面积较大的阻尼涂料作为吸附与脱附研究对象,利用环境测试舱验证 TVOC 与阻尼涂料之间是否存在 TVOC 吸附效应,并探究通风量和温度变化对阻尼涂料脱附 TVOC 效果的影响,为指导优化装车工艺及车内空气质量控制提供数据支撑和理论依据。

1 试验准备

试验材料:客车常用阻尼涂料湿料,高 TVOC 释放的客车常用腻子湿料,3 mm×300 mm×300 mm 拉丝铝板,毛刷及刮板。

试验装置采用 EmissionEvent VOC/1000 型 1 m³ 环境测试舱(德国 Weiss Technik),2000MP-BMW 型挥发性有机化合物 FID(在线监测系统)。

试验样件为阻尼涂料样板和腻子湿样。

1) 阻尼涂料样板:用毛刷在铝板上涂抹 5.0 mm 厚的阻尼涂料,用刮板刮平,并制备多个平行样,放置在阴凉干燥处固化 7 d 后进行试验。

2) 腻子湿样:用毛刷在铝板上涂抹 0.5 mm 厚

的腻子,制样 5 min 后进行测试试验,每次试验前制备。

2 试验过程与结果分析

2.1 吸附效应试验

将 1 个腻子湿样、9 个固化后的阻尼涂料样板及 1 套组合件(含 1 个新制腻子湿样 + 9 个阻尼涂料样板)分别在 25 °C 环境测试舱内密闭 16 h。利用 FID 在线监测系统,检测并记录 3 组试样的舱内 TVOC 质量浓度 ρ_{TVOC} 变化情况。

吸附效应试验完成后,取出组合件中已吸附了 TVOC 的阻尼涂料样板,并立即用铝箔和 PE(聚乙烯)膜包裹好,以待做后续脱附效应试验。

2.1.1 阻尼涂料与腻子间的 TVOC 吸附

不同样件时舱内 $\rho_{\text{TVOC}}-t$ (t 为试验时间) 曲线见图 1。

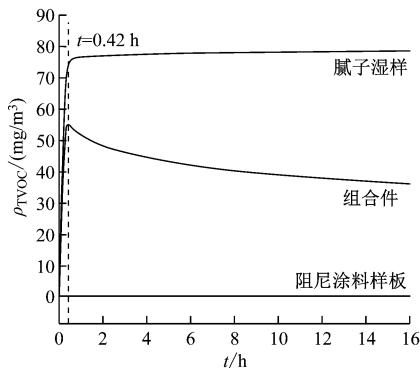


图 1 不同样件时 $\rho_{\text{TVOC}}-t$ 曲线

Fig. 1 $\rho_{\text{TVOC}}-t$ change curve in the chamber for different specimens

由图 1 可知:

1) 阻尼涂料样板测试时,环境舱内因阻尼涂料样板释放作用而导致的 TVOC 质量浓度增加值 $\rho_{2,b}$ 较小(接近设备检出限值)且基本稳定,整个测试过程的 $\rho_{2,b}$ 保持在 $<0.5 \text{ mg/m}^3$ 水平。

2) 腻子湿样测试时,在初始固化阶段(t 约为 0.5 h 内),环境舱内腻子湿样释放导致 ρ_{TVOC} 快速增大,相应的 ρ_{TVOC} 增加值 $\rho_{1,b}$ 为 75.0 mg/m^3 ;之后, ρ_{TVOC} 缓慢增加至近似稳定, $t = 16 \text{ h}$ 时 $\rho_{1,b} = 78.6 \text{ mg/m}^3$ 。

3) 二者组合件测试时,环境舱内因组合件释放作用而产生的 ρ_{TVOC} 增加量 $\rho_{3,b}$ 快速增大, $t = 0.42 \text{ h}$ 时, $\rho_{3,b}$ 增至 55.0 mg/m^3 ,之后开始持续降低并趋于稳定, 16 h 时降至 36.2 mg/m^3 。

假设固化后的阻尼涂料不存在吸附效应,故 $\rho_{2,b}$ 极小,组合件与腻子湿样由释放 TVOC 而产生的 ρ_{TVOC} 水平及变化趋势理论上应近似。然而,实际测试结果表明,相较于腻子湿样, 16 h 时组合件的 ρ_{TVOC} 降幅高达 53.9% (降低了 42.4 mg/m^3)。这说明组合件中的阻尼涂料对腻子湿样释放的 TVOC 存在吸附效应。

由试验结果进一步可得:

$$\rho_{2,a} = \rho_{1,b} + \rho_{2,b} - \rho_{3,b} \quad (1)$$

式中:

$\rho_{2,a}$ ——因阻尼涂料样板吸附作用而产生的 ρ_{TVOC} 减少量。

测试过程中的 $\rho_{2,a}-t$ 曲线见图 2。由图 2 可知:试验开始后, $\rho_{2,a}$ 先快速增加; $t = 0.5 \text{ h}$ 后, $\rho_{2,a}$ 增速减缓,趋于稳定; $t = 16 \text{ h}$ 时, $\rho_{2,a}$ 为 42.4 mg/m^3 。

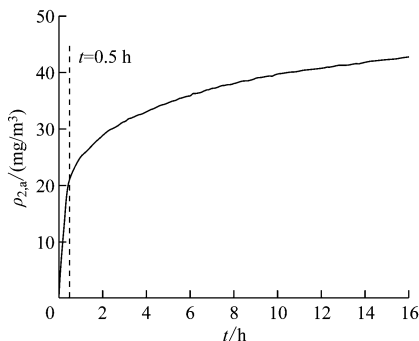


图 2 测试过程中的 $\rho_{2,a}-t$ 曲线

Fig. 2 $\rho_{2,a}-t$ curve during test

2.1.2 阻尼涂料与腻子间的 TVOC 吸附速率

环境舱内因释放或吸附作用而产生的 ρ_{TVOC} 随 t 变化的情况为:

$$\rho_{\text{TVOC}} = \int_0^t v_{\text{TVOC}} dt \quad (2)$$

式中:

v_{TVOC} ——单位时间内因测试样件释放或吸附作用而产生的 ρ_{TVOC} 变化量,即样件的 TVOC 释放速率或吸附速率。

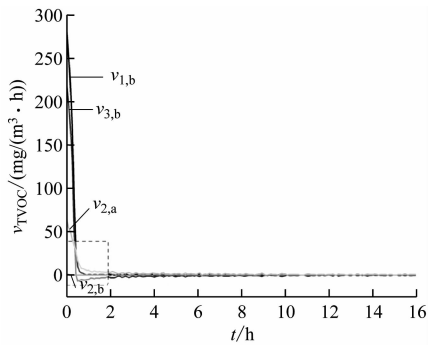
将式(2)对 t 求导,即可得到样件瞬时释放或吸附速率:

$$v_{\text{TVOC}} = d\rho_{\text{TVOC}}/dt \quad (3)$$

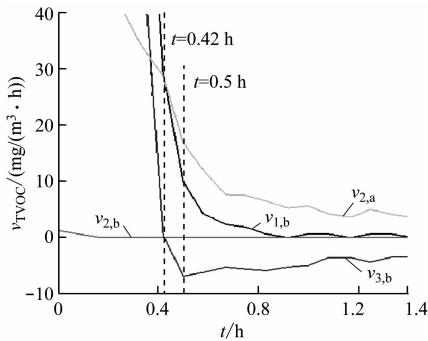
基于上述关系,利用 Origin 软件,将图 1 和图 2 中 ρ_{TVOC} 及 $\rho_{2,a}$ 对 t 求导,得到不同样件的 $v_{\text{TVOC}}-t$ 曲线,见图 3。

分析图 3 可知:

1) 对于阻尼涂料样板,从释放速率曲线可知,



a) 整体曲线



b) 局部曲线

注: $v_{2,b}$ 为阻尼涂料样板的 TVOC 释放速率; $v_{2,a}$ 为阻尼涂料样板的 TVOC 吸附速率; $v_{1,b}$ 为腻子湿样的 TVOC 释放速率; $v_{3,b}$ 为组合件的 TVOC 释放速率。

图3 不同样件的 $v_{\text{TVOC}}-t$ 曲线Fig. 3 $v_{\text{TVOC}}-t$ curve of different specimens

整个测试过程中 $v_{2,b}$ 近似为 0, 对应舱内 $\rho_{2,b}$ 保持稳定, 说明阻尼涂料样板是 TVOC 低释放源。从吸附速率曲线可知, $v_{2,a}$ 虽呈快速衰减趋势, 但一直保持正值; 阻尼涂料样板吸附质量浓度增幅逐渐减缓, 约 15 h 后, $v_{2,a}$ 趋近于 0, 说明阻尼涂料样板基本达到吸附饱和状态。

2) 对于腻子湿样, 初始阶段 (约 0.5 h 内) $v_{1,b}$ 呈快速衰减趋势, 环境舱内中的 $\rho_{1,b}$ 快速增加; 之后 $v_{1,b}$ 逐渐趋近于 0, 与之对应的舱内 $\rho_{1,b}$ 增量放缓至近似稳定。结合图 1 可知, 腻子湿样是 TVOC 高释放源。

3) 对于组合件, $v_{3,b}$ 先快速降低, 并降到 0 以下; 之后, $v_{3,b}$ 缓慢升高, 并逐渐趋近于 0。

在忽略 $v_{2,b}$ 对试验结果影响的前提下, $v_{1,b}$ 、 $v_{2,a}$ 、 $v_{3,b}$ 都呈快速下降趋势, 最终逐渐趋近于 0。 $t=0.42$ h 时, $v_{3,b}$ 等于 0, 此时 $v_{1,b}=v_{2,a}$; 0.5 h 时, $v_{3,b}$ 降到最低, 此时 $v_{1,b}$ 与 $v_{2,a}$ 负差达最大值; 0.5 h 后 $v_{3,b}$ 小幅升高至逐渐趋近于 0, 此时 $v_{1,b}$ 仍保持小于 $v_{2,a}$, 但二者速率都在持续衰减。 $t=0.9$ h 后腻子湿样 $v_{1,b}$ 基本

为 0, $v_{2,a}$ 持续缓慢降低并逐渐趋近于 0, 最终导致舱内 $\rho_{3,b}$ 不断降低且逐渐趋于稳定 (见图 1)。

2.2 脱附效应试验

脱附效应试验需分别验证通风量和温度对阻尼涂料 TVOC 脱附效应的影响。

1) 通风量对脱附效应影响试验。在 25 °C 条件下, 将单个已吸附 TVOC 的阻尼涂料样板按通风量 Q 为 0、6 L/min、30 L/min, 分别进行通风处理 2 h, 之后在测试舱内密闭 14 h。监测通风和密闭期间舱内的 ρ_{TVOC} 变化情况, 并全程用 FID 监测记录。

2) 温度对脱附效应影响试验。将单个已吸附 TVOC 的阻尼涂料样板在不同温度 (25 °C、30 °C、35 °C、40 °C、45 °C) 下密闭加热处理 4 h, 再于 25 °C 下经 $Q=30$ L/min 通风 2.5 h 后, 密闭 16 h。检测密闭过程中舱内 ρ_{TVOC} 变化情况, 并全程用 FID 监测记录。

2.2.1 通风量对阻尼涂料 TVOC 脱附效应的影响

通风过程中, 不同 Q 下的 $\rho_{\text{TVOC}}-t$ 曲线见图 4 a); 通风处理 2 h 后再在环境舱密闭 14 h (以下称为“通风+密闭”)的过程中, 舱内 TVOC 质量浓度绝对增量 $\Delta\rho$ 随 t 变化曲线见图 4 b)。

由图 4 可知:

1) 通风处理 2 h 后的环境舱内, $Q=0$ 对应的 $\rho_{\text{TVOC}}=1.2$ mg/m³; $Q=6$ L/min 对应的 $\rho_{\text{TVOC}}=0.8$ mg/m³; $Q=30$ L/min 对应的 $\rho_{\text{TVOC}}=0.1$ mg/m³。

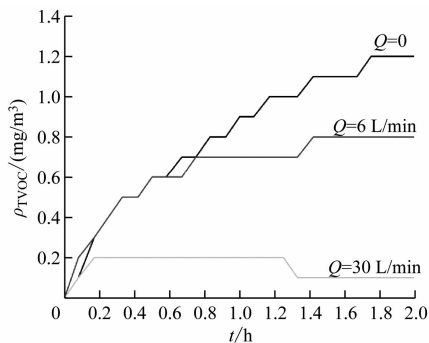
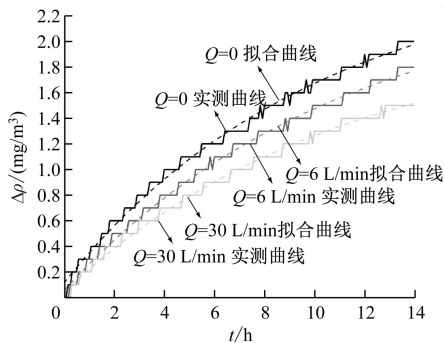
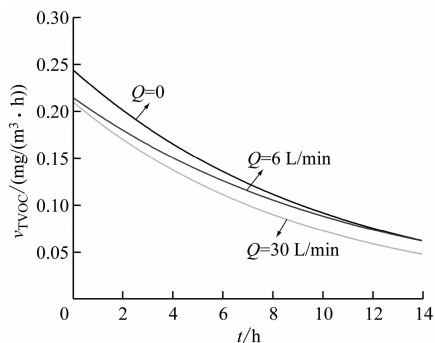
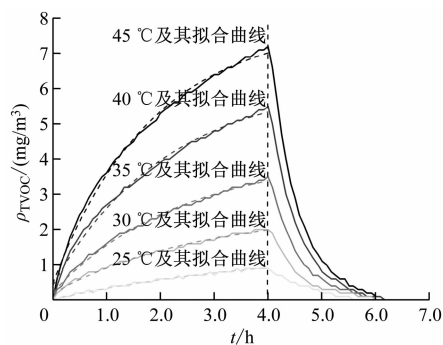
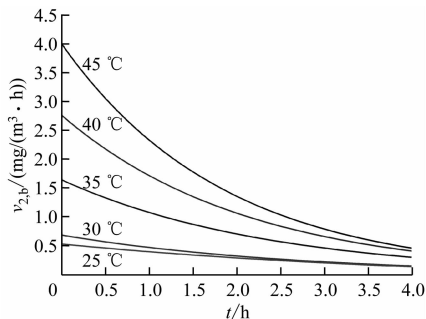
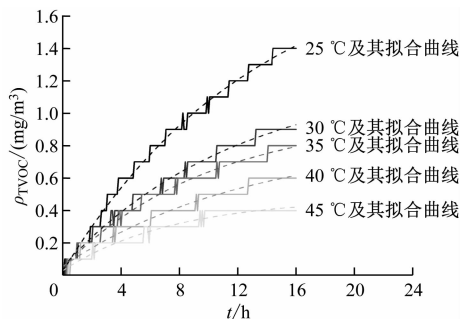
2) 通风+密闭过程中, Q 越大, 则试验后期的 ρ_{TVOC} 越小。

为方便进一步研究其 v_{TVOC} 的变化规律, 对图 4 b) 中曲线进行平滑拟合后求导, 得到不同 Q 下的 $v_{\text{TVOC}}-t$ 曲线, 见图 5。

由图 5 可知: 测试过程中 v_{TVOC} 均逐渐减小; 通风处理时间相同时, Q 越大则后期 v_{TVOC} 越小。这也说明了材料的 TVOC 脱附效果受 Q 的影响—— Q 越大, 则材料中的 TVOC 脱附效果越明显。

2.2.2 温度对阻尼涂料 TVOC 脱附效应的影响

温度对脱附效应影响试验的 $\rho_{\text{TVOC}}-t$ 曲线见图 6。为方便进一步研究不同加热处理温度 T 下 $v_{2,b}$ 情况, 将加热处理阶段的舱内 $\rho_{\text{TVOC}}-t$ 曲线进行平滑拟合后求导, 得到不同 T 时 $v_{2,b}-t$ 曲线, 见图 7。将降温后的阻尼涂料样板在同一温度下进行密闭释放 TVOC 试验, 密闭过程中环境舱内的 $\rho_{\text{TVOC}}-t$ 曲线见图 8。

a) 通风过程中不同 Q 下的 ρ_{TVOC} - t 曲线b) 通风 + 密闭过程中的 $\Delta\rho$ - t 曲线图4 不同 Q 对阻尼涂料 TVOC 脱附效应的影响效果Fig. 4 Impact of different Q on the damping coating desorption effect of TVOC图5 不同 Q 下的 v_{TVOC} - t 曲线Fig. 5 v_{TVOC} - t curve under different Q 图6 温度对脱附效应影响试验的 ρ_{TVOC} - t 曲线Fig. 6 ρ_{TVOC} - t curve of temperature impacting desorption effect图7 不同 T 时的 $v_{2,b}$ - t 曲线Fig. 7 $v_{2,b}$ - t curves under different T 图8 不同 T 下密闭过程中环境舱内的 ρ_{TVOC} - t 曲线Fig. 8 ρ_{TVOC} - t curve of environment chamber during the closed process under different T

由图6—图8可知:

1) 在加热处理过程中, T 越高, 则 ρ_{TVOC} 越大, 说明阻尼涂料样板的 TVOC 脱附效应越明显。当 $t = 4 \text{ h}$ 时, 试验进入后期: $T = 45 \text{ °C}$ 时, $\rho_{TVOC} = 7.2 \text{ mg/m}^3$; $T = 40 \text{ °C}$ 时, $\rho_{TVOC} = 5.5 \text{ mg/m}^3$; $T = 35 \text{ °C}$ 时, $\rho_{TVOC} = 3.5 \text{ mg/m}^3$; $T = 30 \text{ °C}$ 时, $\rho_{TVOC} = 2.0 \text{ mg/m}^3$; $T = 25 \text{ °C}$ 时, $\rho_{TVOC} = 0.9 \text{ mg/m}^3$ 。

2) 加热过程中, $v_{2,b}$ 均逐渐减小。当其他条件相同时, T 越高, 则 $v_{2,b}$ 越大, 即 TVOC 脱附效应越明显。

3) 在降温至 25 °C 、通风 2.5 h 过程中, 舱内 ρ_{TVOC} 均大幅降低, 直至 ρ_{TVOC} 水平趋于稳定 (低于设备检出限值)。

4) 与加热过程相比, 密闭过程中的舱内 ρ_{TVOC} 均大幅下降, 且 T 越高, 则后期的 ρ_{TVOC} 越小。为方便进一步研究 $v_{2,b}$ 变化规律, 对图8中的曲线进行拟合并求导, 得到不同 T 时的 $v_{2,b}$ - t 曲线, 见图9。由图9可知, 密闭过程中 $v_{2,b}$ 均逐渐减小, 基本上, 当加热处理时间相同时, T 越高则试验后期的 $v_{2,b}$ 越小。这也说明了材料的 TVOC 脱附效果受 T 的影响—— T 越高, 材料中的 TVOC 脱附效果越明显。

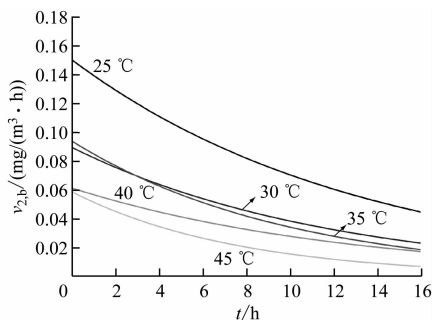


图9 不同 T 下密闭过程中 $v_{2,b}$ - t 曲线

Fig. 9 $v_{2,b}$ - t curves during the closed process under different T

3 结语

本研究利用环境测试舱进行试验,研究阻尼涂料对TVOC的吸附与脱附作用,得到如下结论:

1) 固化后的阻尼涂料样板为TVOC低释放源,释放速率基本为零;腻子湿样为TVOC高释放源,但其释放速率呈快速衰减趋势。

2) 固化后的阻尼涂料与腻子湿样之间存在吸附效应,阻尼涂料样板为吸附源,腻子湿样为释放源,二者组合件相较于单一组分腻子湿样存在TVOC明显降幅;当腻子湿样释放速率与阻尼涂料样板吸附速率相等时,组合件TVOC释放质量浓度达最大值,之后缓慢降低并趋于稳定。

3) 阻尼涂料的TVOC脱附效果受 Q 的影响。当 Q 越大时,阻尼涂料的TVOC脱附效果越明显。

4) 阻尼涂料的TVOC脱附效果受 T 的影响,当 T 越高时,阻尼涂料TVOC脱附效果越明显。

上述研究结果表明,轨道交通车辆客室內的疏松多孔材料对TVOC具有吸附与脱附作用。这也进一步说明,客车某些多孔疏松的零部件(如阻尼涂料、座椅、防寒材料等)会吸附化工产品或其他高释放源部件释放的TVOC,可通过通风与加热两种方式使零部件脱附TVOC,且增加通风量和提高温度均可增强脱附效果。

参考文献

[1] 胡冠九,穆肃,张祥志,等. 空气中挥发性有机物污染状况及健康风险评价[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(1): 5.

HU Guanjiu, MU Su, ZHANG Xiangzhi, et al. Current situation with volatile organic compounds pollution in air and health risk assessment[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2010, 2(1): 5.

[2] 李福敏,郑林青. 铁路车厢空气中总挥发性有机物检测方法探讨[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2017, 7(5): 253.

LI Fumin, ZHENG Linqing. Discussion on detection method of total volatile organic compounds in air of railway carriages[J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2017, 7(5): 253.

[3] 李莉,石卫兵,张兰兰,等. 轨道交通车辆车内挥发性有机化合物的管控现状及建议[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(6): 81.

LI Li, SHI Weibing, ZHANG Lanlan, et al. Current management and control of interior volatile organic compounds in rail transit vehicles and suggestions [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(6): 81.

[4] 王冰松,魏玲玲,董佳,等. 轨道交通车辆内装修材料的挥发性有机物测试方法[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(11): 21. WANG Bingsong, WEI Lingling, DONG Jia, et al. Test method for volatile organic compounds in the interior parts of rail transit vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(11): 21.

[5] 何雪珠,冯静弦,顾也飞,等. 轨道车辆整车空气质量检测研究[J]. 技术与市场, 2021, 28(5): 48.

HE Xuezhu, FENG Jingxian, GU Yefei, et al. Study on overall air quality detection of rail vehicles[J]. Technology and Market, 2021, 28(5): 48.

[6] 李人哲,钟源,关玲玲. 轨道车辆车内空气挥发性有机物溯源研究[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(12): 79.

LI Renzhe, ZHONG Yuan, GUAN Lingling. Research on volatile organic compounds source traceability of a railway vehicle indoor air[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2020, 46(12): 79.

[7] 邵方方,王琼,张阳,等. 商用车车内空气质量典型问题溯源浅析[J]. 汽车实用技术, 2019(3): 75.

SHAO Fangfang, WANG Qiong, ZHANG Yang, et al. Retroactive source of commercial vehicle indoor air[J]. Automobile Applied Technology, 2019(3): 75.

[8] 张仲荣,武金娜,姚谦. 车内空气质量的VOC及气味评价试验研究[J]. 汽车工艺与材料, 2020(9): 57.

ZHANG Zhongrong, WU Jinna, YAO Qian. VOC of vehicle interior air quality and odor evaluation test & research[J]. Automobile Technology & Material, 2020(9): 57.

(收稿日期:2022-08-01)