

轨道客车 TVOC(总挥发性有机化合物) 溯源分析与管控措施

夏春晶^{1,2} 周 丹¹ 陈 光¹

(1. 中南大学交通运输学院, 410083, 长沙; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司工程实验室, 130021, 长春)

摘 要 [目的] 轨道客车内的 TVOC(总挥发性有机化合物)质量浓度与成分,受到车内零部件与化工产品的综合影响,因此有必要对车内 TVOC 进行溯源分析与分类管控。

[方法] 以某列新造整备状态下的轨道客车为例,测试并分析各车厢内的 TVOC 质量浓度及成分,以及车内材料、零部件、化工产品(油漆与胶黏剂)的 TVOC 质量浓度与成分,明确车内 TVOC 主要来源的判定方法,并进一步得出对车内 TVOC 成分与质量浓度影响较大的零部件与化工产品。[结果及结论] 轨道客车车内各区域 TVOC 中的主要释放物质种类和各物质占比近似。车内所用材料与零部件的 TVOC 质量浓度与成分组成有较大差异。车内所用化工产品在不同测试方法下所得的 TVOC 质量浓度存在正相关性,其主要成分种类与占比排序基本一致,但存在高低释放速度之分。材料与零部件对整车的 TVOC 质量浓度贡献占比较小,仅占 12%;化工产品对整车的 TVOC 质量浓度会产生重要的影响,其影响程度受化工产品的使用位置与覆盖状态的综合作用,其中直接暴露使用的胶黏剂需重点管控。

关键词 轨道客车; 总挥发性有机化合物; 溯源分析; 管控措施

中图分类号 U270.42

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.050

Traceability Analysis and Control Measures of TVOC in Rail Passenger Vehicles

XIA Chunjing^{1,2}, ZHOU Dan¹, CHEN Guang¹

(1. Transportation Engineering College, Central South University, 410083, Changsha, China; 2. Engineering Laboratory, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130021, Changchun, China)

Abstract [Objective] The mass concentration and composition of TVOC (total volatile organic compounds) inside rail passenger vehicles are influenced by a combination of interior components and chemical products. Therefore, it is necessary to conduct traceability analysis and implement classified control measures for TVOC inside the vehicles. [Method] Taking a newly manufactured and fully equipped rail passenger vehicle as an example, the TVOC mass concentration and composition

in each carriage, as well as in the interior materials, components, and chemical products (paints and adhesives), are tested and analyzed. A method for determining the main sources of TVOC inside the vehicle is clarified, and the components and chemical products that significantly affect the TVOC mass concentration and composition are further identified. [Result & Conclusion] The main types of TVOC-releasing substances and proportions of each substance are similar across different areas inside the rail passenger vehicle. However, there are significant differences of the TVOC mass concentration and component composition among the materials and components used inside the vehicle. The obtained TVOC mass concentrations of the chemical products used inside the vehicle under different testing methods are positively correlated. The main types of components and their proportion rankings are largely consistent, but with different release rates. Materials and components contribute a relatively small proportion to the overall TVOC mass concentration in the entire vehicle, accounting for only 12%. Chemical products have a significant impact on the TVOC mass concentration in the entire vehicle, and this impact degree depends comprehensively on the location and coverage state of the chemical products. Notably, adhesives used in direct exposure require focused control measures.

Key words rail passenger vehicle; TVOC; traceability analysis; control measures

近年来,我国轨道交通事业快速发展,以地铁、轻轨等为代表的城市轨道交通客车,以及以动车组为代表的高铁等轨道客车已融入每个人的出行生活,其中,高铁已成为轨道交通出行的主要交通方式。目前,对轨道客车车内的空气质量研究已成为热点问题^[1-2],整车甲醛和 TVOC(总挥发性有机化合物)水平测试已经成为轨道客车交付客户前的例行检测项目。各轨道客车制造企业投入了大量人力与物力,纷纷进行车内空气质量溯源与控制研究。相比于甲醛,TVOC 是一种混合物,其溯源过程

相对复杂,需要测试大量的材料与零部件,并进行大数据对比分析。同时,TVOC 所含物质大多是稳定性较高的苯系物(甲苯、二甲苯及乙苯等)^[3-4],在客车制造后期很难用理化方法彻底清除,因而对其进行溯源并进行源头控制是十分必要的^[5]。目前,对轨道客车 TVOC 的溯源工作正处于起步阶段,相关理论与方法尚不成熟。

鉴于此,本文对轨道客车车内 TVOC 进行采样分析,并采用袋式法^[6]、顶空法^[7]、舱室法^[8]等测试方法,对轨道客车主要的内装材料、零部件及车内用量较大的化工产品(油漆与胶黏剂)进行测试,分析材料、零部件同整车 TVOC 质量浓度与物质的对应关系,并建立相应的计算模型。同时,综合分析整车与所用化工产品 TVOC 成分的关联性,溯源轨道客车车内材料、零部件及化工产品对车内空气质量的影响。本文研究可为车内空气质量优化研究提供借鉴。

1 TVOC 试验测试

1.1 测试概述

选取某列新造整备状态下的轨道客车,按 TB/T 3139—2021《机车车辆非金属材料及室内空气中有害物质限量》中的工况 2,即车辆采样前在自然状态下关闭门窗、空调新风和废排风口,封闭 12 h 后,开启空调至自动运行位或设置空调目标温度为 22 ~ 26 ℃,2 h 后进行采样测试,采样温度不低于 16 ℃(以下简称“TB/T 3139—2021 标准中工况”)进行多区域采样。测试客车及测点布置示意图如图 1 所示。采用轨道客车内装材料、零部件及常用化工产品(油漆与胶黏剂)作为试验材料。

1.2 测试过程

1.2.1 整车 TVOC 采样测试

为了便于成分检测,需要获取更高质量浓度的 TVOC 样本,本文在 TB/T 3139—2021 标准中工况的基础上进行了改进型采样,即将原来标准中“空调可与室外通风”改为全程密闭内循环(以下简称“密闭内循环工况”)。采用 Tenax-TA 管收集 TVOC,采用气相色谱-质谱联用仪检测 TVOC。

1.2.2 内装材料与零部件 TVOC 采样测试

采用袋式法^[9],将选定的一定尺寸与规格的材料或零部件放入已高温老化的 PVF(聚氟乙烯)采样袋中,向袋中充入一定体积的高纯氮气,并置于

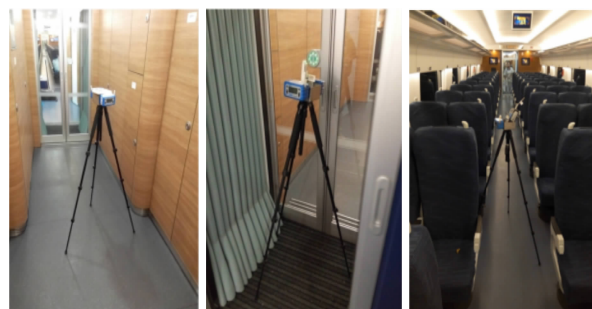
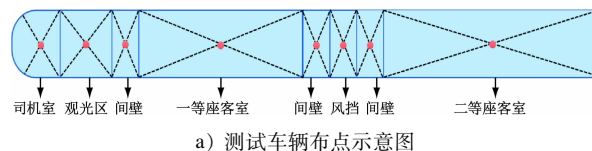


图 1 测试客车及测点布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test vehicle and layout of measuring points

恒温测试舱。测试温度与保持时间设定与整车 TVOC 改进型采样时一致,达到测试保持时间后,进行采样测试。

1.2.3 化工产品 TVOC 采样测试

1) 顶空法:准确称量 0.1 g 化工产品至 20 mL 的顶空瓶中,放在 90 ℃恒温箱中平衡 30 min 后,采用气相色谱-质谱联用仪检测挥发出来的 TVOC。

2) 舱室法:将 3 g 化工产品均匀地涂在 10 cm × 10 cm 的金属样板上,将样板放入一定条件(环境温度为 24 ~ 26 ℃、相对湿度为 50%、空气交换率为 1.0 次/h)的环境测试舱中,保持一定时间后,在测试舱的出气口进行采样测试。

3) 袋式法:将 3 g 化工产品均匀地涂在 10 cm × 10 cm 的金属样板上,在环境温度为 24 ~ 26 ℃、相对湿度为 50% 的室内环境中自然固化 7 d 后,再将干燥后的样品放入 10 L 的 PVF 采样袋中进行采样测试,具体试验过程同内装材料与零部件的 TVOC 采样测试过程一致。

2 TVOC 测试结果分析

2.1 整车 TVOC 测试

设置 2 种工况(TB/T 3139—2021 标准中工况与密闭内循环工况)进行对比测试。2 种工况下,车内各区域的 TVOC 测试结果如表 1 所示。由表 1 可知:TB/T 3139—2021 标准中工况下,车内各区域 TVOC 质量浓度均小于 0.6 mg/m³,满足 TB/T 3139—2021 标准中的限值规定;改进型采样后的

TVOC 质量浓度均显著增高;在相同工况下,车内各区域 TVOC 质量浓度近似相同。

改进型采样后,对车内各区域的 TVOC 成分进行分析。不同释放物质种类在车内各区域的质量百分比如表 2 所示。由表 2 可知:车内各区域主要的释放物质种类及各物质质量百分比近似相同;共同物质有对二甲苯、间二甲苯、邻二甲苯、甲基丙烯酸甲酯、甲苯、乙苯、乙酸丁酯、丙二醇甲醚醋酸酯、苯乙烯等。由此可知,车内各区域的 TVOC 主要来源于各典型区域的一些共性材料、零部件及化工产品,因此在对车内各区域的 TVOC 进行溯源分析时,可以仅选择一种典型车厢进行分析。

表 1 2 种工况下车内各区域的 TVOC 测试结果

Tab.1 TVOC test results of various areas inside the vehicle under two working conditions

车内区域	质量浓度/(mg/m ³)	
	TB/T 3139—2021 标准中工况	密闭内循环工况
一等座	0.431	8.674
二等座	0.377	7.958
餐车吧台	0.412	8.143
机械师室	0.351	8.201
乘务员室	0.335	8.182

表 2 不同释放物质在车内各区域的质量百分比

Tab.2 Mass percentages of different released substances in various areas inside the vehicle

车内区域	质量百分比/%											
	对二甲苯、 间二甲苯	邻二甲苯	甲基丙 烯酸 甲酯	甲苯	乙苯	乙酸 丁酯	丙二醇 甲醚醋 酸酯	苯乙烯	3-乙氧 基丙酸 乙酯	十甲基 环五硅 氧烷	1,2,4- 三甲苯	1-(2-甲 氧基丙 氧基)- 2-丙醇
一等座	15	8	7	6	4	4	3	3	0	0	3	5
二等座	15	7	8	7	4	4	3	3	3	2	0	0
餐车吧台	15	7	7	10	4	4	3	3	3	2	0	0
机械师室	15	7	7	10	4	4	3	3	3	2	0	0
乘务员室	16	7	7	10	4	4	3	3	3	2	0	0

注:表中物质为各区域 TVOC 中质量百分比排名前 12 的物质。

2.2 内装材料与零部件 TVOC 测试

选取轨道客车二等座车厢的主要内装材料与零部件进行 TVOC 质量浓度测试,并进行成分分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知:不同材料与零部件的 TVOC 质量浓度差异较大,且所含化学物质种类也各不相同;TVOC 质量浓度最高的是软风道,其次是侧墙板与地板组件,地板布与中顶板紧随其后。

2.3 化工产品 TVOC 测试

化工产品的 TVOC 质量浓度情况与零部件有所不同,零部件在短期内的 TVOC 质量浓度保持稳定,即同一零部件在装车前与装车后,其 TVOC 释放水平变化不大,而化工产品(油漆与胶黏剂)是液态装车使用的,涉及由液态转为固态的相变过程。

为研究化工产品从液态变为固态全过程中的 TVOC 释放情况和具体释放物质,选取 4 种代表性的化工产品(甲基丙烯酸胶、防潮漆、聚氨酯胶、防火毛毡胶),采用顶空法对初始液态下,化工产品的 TVOC 质量浓度进行测试与成分分析。同时,用舱

室法对化工产品从液固转变过程中 TVOC 的释放衰减情况进行跟踪监测。此外,为了模拟化工产品在使用一定时间后的 TVOC 释放情况,采用袋子法分析固化 7 d 后的化工产品 TVOC 质量浓度与成分。

不同测试方法下,化工产品的 TVOC 质量浓度、质量分数及成分分析如表 4 所示。由表 4 可知:采用顶空法测得的 TVOC 质量分数较高;采用舱室法测得的 TVOC 质量浓度越大,固化 7 d 后,采用袋子法测得的 TVOC 质量浓度就越大。本试验过程中的 4 种化工产品均在 7 d 后完全固化,而顶空法所测样品为液态,这进一步说明了液体状态下 TVOC 质量浓度越高的化工产品,固化后通过袋子法测得的 TVOC 质量浓度也越大。在 TVOC 成分方面,3 种测试方法所测得的各产品的 TVOC 主要成分种类相同,各成分占比排序也基本一致。

分析舱室法所得结果可知,不同化工产品使用后的 TVOC 释放速度有所不同。其中:防潮漆与甲

表3 内装主要材料与零部件的 TVOC 质量浓度及成分分析
Tab.3 Analysis of TVOC mass concentration and composition of main interior materials and components

项目	TVOC 质量浓度/ (mg/m ³)	TVOC 中主要物质及其占比
防寒材料	0.074	六甲基环三硅氧烷, 占比为 45%; 甲苯, 占比为 11%
侧顶板	0.164	苯乙烯, 占比为 43%; 丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 16%
中顶板	2.504	对二甲苯及间二甲苯, 占比为 35%; 乙苯, 占比为 21%; 邻二甲苯, 占比为 20%
侧墙板	0.511	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 38%; 乙酸丁酯, 占比为 16%; 对二甲苯及间二甲苯, 占比为 13%
双层间壁	0.156	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 53%; 甲苯, 占比为 28%; 乙酸, 占比为 20%
地板布	0.395	环己酮, 占比为 18%; 环己基异硫氰酸酯, 占比为 12%; 1,3-二异丙苯, 占比为 11%
地板组件	0.608	乙酸, 占比为 32%; 环己酮, 占比为 26%; 正己醛, 占比为 10%
软风道	3.836	正丁醇, 占比为 71%
主风道	0.174	甲苯, 占比为 37%; 对二甲苯及间二甲苯, 占比为 14%
二等座椅	0.257	甲苯, 占比为 21%; 对二甲苯及间二甲苯, 占比为 18%; 邻二甲苯, 占比为 10%

注:表中仅列出 TVOC 成分占比 >10% 的物质。

基丙烯酸胶所释放的 TVOC 质量浓度峰值较高,属于高 TVOC 释放的化工产品,其 TVOC 释放速度亦较快,在释放 4 h 时就已达到最高质量浓度;聚氨酯胶与防火毛毡胶释放的 TVOC 质量浓度在 8 h 时达到最高峰值,二者属于低 TVOC 释放的化工产品,其 TVOC 释放速度较慢。

综上所述,虽然不同化工产品释放的 TVOC 质量浓度随时间变化的趋势有一定差异,但随着释放时间的增加,TVOC 释放量均逐渐降低,固化 7 d 后,TVOC 释放量下降至较低水平后逐渐趋于稳定,这也验证了采用袋子法测量固化 7 d 后的化工产品是可行的,所测结果能够代表短期内化工产品的 TVOC 释放水平。

采用舱室法测得的化工产品所释放的 TVOC 主要物质,均包含在采用顶空法和袋子法测得的 TVOC 主要物质中,因此为了快速检测化工产品 TVOC 中所含物质,本文采用顶空法对轨道客车常

用的 16 种化工产品进行检测,其 TVOC 质量分数及成分分析如表 5 所示。由表 5 可知:油漆类化工产品具有较高的 TVOC 质量分数;水性胶 TVOC 质量分数较低;甲基丙烯酸胶在轨道客车常用胶中的 TVOC 质量分数最高;螺纹锁固剂也具有较高的 TVOC 质量分数;大部分聚氨酯胶所释放的主成分物质相同。

3 TVOC 溯源分析

3.1 材料与零部件溯源分析

选取轨道客车同一列车中车厢数量最多的二等座客室作为整车空气研究对象,基于客室内的主要材料与零部件的袋子法 TVOC 测试结果,同时结合其在二等客室内的用量,不考虑各材料之间 TVOC 释放物质之间的相互作用^[10],以及同种释放物质的高浓度释放材料对低浓度释放材料的释放抑制,基于线性叠加分析材料部件对车内 TVOC 释放水平的影响。具体步骤如下。

步骤 1 计算各材料与零部件在车内的 TVOC 理论质量浓度 ρ_0 , 可以表示为:

$$\rho_0 = (\rho_1 V_1 S_0 / S_1) / V_0 \quad (1)$$

式中:

ρ_1 ——采用袋子法测得的材料与零部件的 TVOC 实测质量浓度;

V_1 ——材料部件进行袋子法测试时的袋内充气体积;

S_0 ——材料部件在车内的用量,若材料为座椅,单位为个,其他产品单位为 m²;

S_1 ——材料部件按标准要求的取样量,若材料为座椅,单位为个,其他产品单位为 m²;

V_0 ——车内空气体积。

步骤 2 基于 ρ_0 , 计算所有材料与零部件对整车 TVOC 理论总贡献质量浓度 ρ_s , 可以表示为:

$$\rho_s = \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (2)$$

式中:

ρ_i ——第 i 种材料或零部件的车内 TVOC 理论质量浓度;

n ——材料与零部件数量。

轨道客车二等座客室材料与零部件对车内 TVOC 释放水平的影响,如表 6 所示。其中:轨道客车二等座客室的改进型 TVOC 理论质量浓度 $\rho_{\text{改}}$ 为 7.958,由于对材料与零部件的采样密闭时间与整车

表 4 不同测试方法下的化工产品 TVOC 质量浓度、质量分数及成分分析

Tab. 4 Analysis of TVOC mass concentration, mass fraction and composition of chemical products under different testing methods

化工产品	顶空法		袋子法		舱室法	
	TVOC 质量分数/ (mg/kg)	TVOC 主要物质及其占比	TVOC 质量浓度/ (mg/m ³)	TVOC 主要物质及其占比	TVOC 质量浓度/ (mg/m ³)	TVOC 主要物质及其占比
甲基丙烯酸胶	68 287	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 65%; 甲基丙烯酸, 占比为 19%	4. 200	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 84%	15. 134(4 h)	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 99%
					11. 833(8 h)	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 99%
					5. 606(24 h)	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 98%
					2. 375(3 d)	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 94%
					0. 974(7 d)	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 96%
					0. 483(14 d)	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 97%
					0. 287(21 d)	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 100%
防潮漆	216 073	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 43%; 3-萜烯, 占比为 14%	9. 653	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 22%; 3-萜烯, 占比为 18%	411. 802(4 h)	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 45%
					134. 180(8 h)	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 48%; 3-萜烯, 占比为 10%
					18. 048(24 h)	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 32%; 3-萜烯, 占比为 20%
					5. 796(3 d)	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 23%; 3-萜烯, 占比为 20%
					1. 333(7 d)	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 26%; 3-萜烯, 占比为 23%
					0. 414(14 d)	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 30%; 3-萜烯, 占比为 23%
					0. 273(21 d)	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 25%; 3-萜烯, 占比为 17%
聚氨酯胶	17 034	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 47%; 邻二甲苯, 占比为 23%; 乙苯, 占比为 14%	0. 092	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 68%; 邻二甲苯, 占比为 20%; 乙苯, 占比为 12%	6. 303(4 h)	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 55%; 邻二甲苯, 占比为 33%; 乙苯, 占比为 10%
					47. 828(8 h)	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 57%; 邻二甲苯, 占比为 29%; 乙苯, 占比为 13%
					0. 143(24 h)	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 48%; 邻二甲苯, 占比为 26%
					0. 037(3 d)	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 30%; 邻二甲苯, 占比为 14%
					0. 005(7 d)	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 80%
					ND(14 d)	—
					ND(21 d)	—
防火毛毡胶	1 029	2-乙基己醇, 占比为 62%; 未识别成分物质, 占比为 19%	0. 033	2-乙基己醇, 占比为 58%	2. 961(4 h)	2-乙基己醇, 占比为 56%
					4. 825(8 h)	2-乙基己醇, 占比为 56%
					1. 164(24 h)	2-乙基己醇, 占比为 8%
					0. 276(3 d)	2-乙基己醇, 占比为 32%
					0. 015(7 d)	2-乙基己醇, 占比为 60%
					ND(14 d)	—
					ND(21 d)	—

注:表中仅列出 TVOC 成分占比 >10% 的物质;舱室法 TVOC 质量浓度右侧括号中的数值为释放时间;ND 为未检测到。

表 5 常用 16 种化工产品 TVOC 质量分数及成分分析

Tab.5 Analysis of TVOC mass fraction and composition of 16 commonly used chemical products

化工产品	TVOC 质量分数/ (mg/kg)	TVOC 主要物质及其占比
聚氨酯胶 1	10 861	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 28%; 邻二甲苯, 占比为 11%
聚氨酯胶 2	7 593	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 21%; 邻二甲苯, 占比为 20%; 甲苯, 占比为 12.2%
聚氨酯胶 3	12 708	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 41%; 邻二甲苯, 占比为 16%; 乙苯, 占比为 13%
聚氨酯胶 4	18 674	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 54%; 邻二甲苯, 占比为 23%; 乙苯, 占比为 17%
聚氨酯胶 5	17 034	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 47%; 邻二甲苯, 占比为 23%; 乙苯, 占比为 14%
聚氨酯胶 6	30 342	对二甲苯、间二甲苯, 占比为 52%; 邻二甲苯, 占比为 24%; 乙苯, 占比为 17%
聚氨酯胶 7	8 945	乙酸丁酯, 占比为 31.9%; 甲苯, 占比为 13.7%
甲基丙烯酸胶	68 287	甲基丙烯酸甲酯, 占比为 65%; 甲基丙烯酸, 占比为 19%
防火毛毡胶	1 029	2-乙基己醇, 占比为 62%; 未识别成分物质, 占比为 19%
孔密封胶	1 154	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 32.8%; 3-萘烯, 占比为 20.2%; 1,2,4-三甲苯, 占比为 14.2%
水性胶 1	1 998	2,4,7,9-四甲基-5-癸炔-4,7-二醇, 占比为 37%; 1,6-二氧杂环十二烷-7,12-二酮, 占比为 22%; 异佛尔酮二异氰酸酯, 占比为 14%
水性胶 2	92	异噻唑啉酮, 占比为 42%; 甲基丙烯酸己酯, 占比为 37%; 玟烯, 占比为 21%
防潮漆	216 073	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 43%; 3-萘烯, 占比为 14%
水性聚氨酯面漆	28 086	丙二醇甲醚醋酸酯, 占比为 57%; 1-丁氧基-2-丙醇, 占比为 12%
特种润滑酯	1 385	3,3,5-三甲基环己基异丁烯酸酯, 占比为 71.7%; 甲苯, 占比为 28.3%
螺纹锁固剂	106 192	1,4-丁二醇二甲基丙烯酸酯, 占比为 49%; 1,3,5-三聚氰酸三烯丙基酯, 占比为 28%

注:表中仅列出 TVOC 成分占比 >10% 的物质。

改进型采样时间相同,因而可将整车改进型采样结果作为与理论计算结果对应的实测结果。通过对比发现,中顶板的 ρ_0 较大,说明其对整车 TVOC 释放水平贡献作用超过其他材料与零部件的作用;而材料与零部件对整车 TVOC 理论释放水平贡献与

表 6 轨道客车二等座客室材料与零部件对车内 TVOC 释放水平的影响

Tab.6 Impact of materials and components in the second-class passenger compartment of rail passenger vehicles on the interior TVOC release level

名称	S_0/m^2	$\rho_1/(\text{mg}/\text{m}^3)$	S_1/m^2	V_1/m^3	$\rho_0/(\text{mg}/\text{m}^3)$
防寒材料	202.1	0.074	1.0	0.50	0.061
侧顶板	21.8	0.164	1.3	0.65	0.014
中顶板	26.2	2.504	1.0	0.50	0.266
侧墙板	35.2	0.511	1.0	0.50	0.073
双层间壁	8.5	0.156	1.0	0.50	0.005
地板布	59.8	0.395	1.6	0.50	0.059
地板组件	56.5	0.608	1.0	0.50	0.139
主风道	77.9	0.174	2.6	0.50	0.021
软风道	14.3	3.836	1.0	0.50	0.221
二等座椅		0.257		1.00	0.094

注:二等座客室内空气体积为 123.53 m^3 , S_0 为 90 个, S_1 为 2 个; ρ_s 为 0.953。

实测结果相差较大,仅占后者的 12%,说明材料与零部件对整车的 TVOC 贡献占比较小,需要考虑其他因素(如化工产品)的影响。

对材料与零部件的 TVOC 主要物质,以及整车 TVOC 主要物质进行一致性对比,结果如表 7 所示。由表 7 可知:中顶板、侧墙板及二等座椅所释放的 TVOC 物质与整车 TVOC 中所含主要物质的重复项最多。结合零部件对整车的 TVOC 贡献占比结果可知,中顶板是影响整车 TVOC 释放水平的重要零部件,需重点管控。

表 7 材料与零部件对整车 TVOC 主要物质的溯源分析

Tab.7 Traceability analysis of the TVOC main substances in the whole vehicle from materials, parts, and components

TVOC 中主要物质名称	可能来源的材料与零部件名称
对二甲苯、间二甲苯	中顶板、侧墙板、主风道、二等座椅
邻二甲苯	中顶板、二等座椅
甲基丙烯酸甲酯	侧墙板、双层间壁
甲苯	二等座椅、防寒材料、主风道、双层间壁
乙苯	中顶板
乙酸丁酯	侧墙板
丙二醇甲醚醋酸酯	侧顶板

3.2 化工产品溯源分析

在车辆装配过程中,化工产品通常是液态或半固态的。固化过程中,这些化工产品大量释放的 TVOC 可以被车内其他材料部件(座椅、防寒材料等)或已使用的化工产品(阻尼浆)所吸附,被吸附的 TVOC 会在一定条件下脱附出来,进而严重影响车内的 TVOC 释放水平^[11]。同时,大多数化工产品在使用后会被覆盖物遮蔽,其 TVOC 释放量会被阻碍。虽然,化工产品固化 7 d 后的 TVOC 质量浓度较低(见表 4),但在固化期间释放的 TVOC 总量很大,且均在车内释放,而车内空气流动性较差,这又使得化工产品的固化过程有所减缓,大量 TVOC 残留在本体中或被车上其他已装配的材料与零部件所吸附。在之后的一段时间里,化工产品本体中残留的 TVOC 释放与材料及零部件吸附的 TVOC 发生脱附,进而影响车内的 TVOC 释放水平。

鉴于现有的萃取法、舱室法及袋子法等 TVOC 测试方法均无法准确模拟化工产品在内车的实际 TVOC 释放状态,无法量化其对车内 TVOC 释放水平的贡献值,只能从物质一致性角度分析化工产品的 TVOC 释放量与车内 TVOC 释放量之间的关系。

对表 2 与表 5 中化工产品的 TVOC 主要物质,以及整车 TVOC 主要物质进行一致性对比,结果如表 8 所示。由表 8 可知:各类聚氨酯胶与整车 TVOC 中所含主要物质的重复项最多,整车 TVOC 前 5 种释放物质中有 4 种来自聚氨酯胶黏剂;甲基丙烯酸胶贡献了整车 TVOC 中占比较大的甲基丙烯酸甲酯质量浓度。

表 8 化工产品对整车 TVOC 主要物质的溯源分析

Tab.8 Traceability analysis of TVOC main substances in the whole vehicle from chemical products

TVOC 中主要物质名称	可能来源的化工产品名称
对二甲苯、间二甲苯	聚氨酯胶 1-6
邻二甲苯	聚氨酯胶 1-6
甲基丙烯酸甲酯	甲基丙烯酸胶
甲苯	聚氨酯胶 2、特种润滑脂、聚氨酯胶 7
乙苯	聚氨酯胶 3-6
乙酸丁酯	聚氨酯胶 7
丙二醇甲醚醋酸酯	防潮漆、水性聚氨酯面漆、孔密封胶

考虑到化工产品车辆在车辆装配过程中的使用位置与覆盖状态,及其释放到整车 TVOC 质量浓度存在的影响^[5],本文将化工产品进行了使用位置分类

与管控分级,如表 9 所示。由表 9 可知:两款聚氨酯胶属于直接暴露与客室空气接触的化工产品,被列为 I 级管控对象,即为重点管控化工产品;II 级管控的化工产品最多,而 I 级和 III 级管控化工产品较少,符合正态分布。该结论对轨道客车的化工产品环保管控具有科学指导意义。

表 9 化工产品使用位置分类与管控分级

Tab.9 Location classification and control grading for chemical products

使用位置分类	管控分级	化工产品
直接暴露	I	聚氨酯胶 1、聚氨酯胶 5
非直接暴露,但与客室空气存在交换	II	甲基丙烯酸胶、聚氨酯胶 2-4、聚氨酯胶 7、防潮漆、水性聚氨酯面漆、孔密封胶、特种润滑脂
非直接暴露,并与客室空气基本隔绝	III	水性胶 1、水性胶 2、防火毛毡胶、螺纹锁固剂

4 结语

通过分析轨道客车不同车内区域的 TVOC 质量浓度与成分,以及车辆材料、零部件、化工产品(油漆与胶黏剂)的 TVOC 释放量与主要物质占比,主要获得以下结论:

1) 轨道客车车内各区域 TVOC 中的主要释放物质种类与各物质占比较为接近,车内的 TVOC 主要来源于各典型区域的一些共性材料、零部件及化工产品。

2) 车内所用材料与零部件的 TVOC 质量浓度与成分组成有较大差异;车内所用化工产品在不同测试方法下所得的 TVOC 质量浓度存在正相关性,其主要成分种类与占比排序基本一致,但存在高低释放速度之分;固化 7 d 后,化工产品的 TVOC 释放水平较低,并趋于稳定。

3) 材料与零部件对整车的 TVOC 释放量贡献占比较小,仅占 12%;化工产品对整车 TVOC 的质量浓度有重要影响,其影响程度受化工产品使用位置与覆盖状态的综合作用,其中直接暴露使用的胶黏剂需重点管控。

参考文献

- [1] 王咏祥,卜繁强,窦磊,等. 轨道车辆玻璃钢制品环保性能提升技术[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(3): 425.
WANG Yongxiang, BU Fanqiang, DOU Lei, et al. Improvement technology of environmental protection performance of FRP prod-

- ucts for rail vehicles[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 41(3): 425.
- [2] 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.
- [3] 于全蕾, 荣幸, 刁朔. 轨道交通车辆用胶黏剂 TVOC 试验研究[J]. 轨道交通材料, 2023, 2(2): 49.
- YU Quanlei, RONG Xing, DIAO Shuo. TVOC test of adhesives for rail transit vehicles[J]. Materials for Rail Transportation System, 2023, 2(2): 49.
- [4] 鄢桂珍, 石卫兵. 轨道车辆纺织产品中 VOCs 散发量的测定[J]. 纺织报告, 2020, 39(12): 1.
- YAN Guizhen, SHI Weibing. Determination of VOCs emission in textile products of rail vehicles[J]. Textile Reports, 2020, 39(12): 1.
- [5] 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.
- [6] 卜繁强, 窦磊, 黄德明, 等. 非金属材料中 VOC 袋式法测定结果的影响因素[J]. 化学分析计量, 2023, 32(4): 78.
- BU Fanqiang, DOU Lei, HUANG Deming, et al. Effect factors for test value of VOC in non-metallic materials by bag method [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2023, 32(4): 78.
- [7] 卞景阳, 孙兴荣, 刘琳帅, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱的不同品种香稻米快速鉴别方法[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(4): 164.
- BIAN Jingyang, SUN Xingrong, LIU Linshuai, et al. Rapid identification of different varieties of fragrant rice based on head-space gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Research and Development, 2024, 45(4): 164.
- [8] 刘干, 郑伟涛, 王虹. 聚氨酯塑胶跑道总挥发性有机化合物的检测及潜在健康影响分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2539.
- LIU Gan, ZHENG Weitao, WANG Hong. Detection and potential health impact analysis of total volatile organic compounds released from polyurethane plastic runway [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2539.
- [9] 石卫兵, 李莉, 张春娇, 等. 后处理措施对橡塑地板布挥发性有机物释放的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(6): 1035.
- SHI Weibing, LI Li, ZHANG Chunjiao, et al. Effect of after-treatment methods on the volatile organic compounds emissions of rubber and plastic floor covering [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(6): 1035.
- [10] 吴亮东, 冷文军, 赵俊涛, 等. 密闭空间非金属材料 VOC 散发模型研究[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(4): 102.
- WU Liangdong, LENG Wenjun, ZHAO Juntao, et al. VOC emission model of nonmetallic materials used in airtight container [J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(4): 102.
- [11] 卜繁强, 张春娇, 王峰, 等. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(4): 64.
- BU Fanqiang, ZHANG Chunjiao, WANG Feng, et al. Analysis of absorption and desorption of TVOC by rail transit vehicle damping coating [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(4): 64.
- [12] 王冰松, 魏玲玲, 董佳, 等. 轨道交通车辆内装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.
- [13] 葛美周, 高立东, 刘学辉, 等. 列车车厢内装材料 VOCs 释放特性研究[J]. 中国环境监测, 2022, 38(2): 143.
- GE Meizhou, GAO Lidong, LIU Xuehui, et al. Study on VOCs release characteristics of interior materials in train [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(2): 143.
- [14] 卜繁强, 窦磊, 王庆文, 等. 氯丁胶在轨道车辆用粘接组件中的 VOC 释放性研究[J]. 粘接, 2021, 48(7): 1.
- BU Fanqiang, DOU Lei, WANG Qingwen, et al. Study on the VOC release of neoprene in bonding components for rail vehicle [J]. Adhesion, 2021, 48(7): 1.
- 收稿日期:2024-09-02 修回日期:2024-11-02 出版日期:2025-05-10
Received:2024-09-02 Revised:2024-11-02 Published:2025-05-10
• 通信作者:夏春晶,正高级工程师,irience@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license