

文章编号: 1671-6612 (2023) 04-512-07

层式通风模式下 全地下地铁检修库污染物控制效果研究

尹 涵 毕海权 王宏林

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 针对全地下地铁检修库工作区空气污染物局部超标、送风可及性差、气流不畅的问题及自然通风条件缺乏、风口布置固定等局限性,提出集中于下部作业区的单向流层式通风方式。通过数值模拟,研究对比了单向流层式通风、射流混合通风模式下工作区有机挥发性污染气体的控制效果及流场特征。研究结果表明,单向流层式通风模式对地铁检修库下部空间污染气体的控制效果明显优于以射流为主导的混合通风模式,当换气次数分别为 $6h^{-1}$ 、 $8h^{-1}$ 、 $10h^{-1}$,层式通风模式下污染总积累量较射流混合通风模式分别降低了 38%、62.2%及 62%,控制区呼吸层面污染气体浓度分别降低了 9.1 倍、16.1 倍及 12.4 倍,表现出较好的通风控制及污染排除能力,为解决全地下地铁检修库近地面区域、敞开式作业污染气体防护难题提供了新的通风设计思路。

【关键词】 全地下地铁检修库; 污染物; 气流组织; 层式通风; 数值模拟

中图分类号 X820.3 文献标识码 A

Preliminary Study on Odor Pollution of Volatile Organic Compounds in Subway Stations: Case Studies in Southern China

Yin Han Bi Haiquan Wang Honglin

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In order to solve the problems of local excessive air pollution, poor air supply accessibility, poor airflow, lack of natural ventilation conditions, fixed tuyere arrangement and other limitations in the working area of the underground subway overhaul warehouse, a one-way flow layer ventilation mode concentrated in the lower working area was proposed. By means of numerical simulation, this paper studies and compares the control effect and flow field characteristics of organic volatile pollution gas in working area under one-way flow layer ventilation and jet mixed ventilation mode. The results show that the one-way layer ventilation mode is better than the mixed ventilation mode dominated by jet flow in terms of the control effect of polluted gas in the lower space of the subway maintenance warehouse. When the air exchange times were $6h^{-1}$, $8h^{-1}$ and $10h^{-1}$, respectively, the total pollution accumulation under the layer ventilation mode was reduced by 38%, 62.2% and 62% compared with the jet mixed ventilation mode, respectively, and the pollution gas concentration at the respiratory level in the control area was reduced by 9.1 times, 16.1 times and 12.4 times, respectively. Layer ventilation shows a better ability of risk control and pollution removal, which provides a new ventilation design idea for solving the problem of pollution gas protection in the near-ground area and open operation of all underground subway overhaul warehouses.

【Keywords】 underground subway maintenance warehouse; pollutants; air flow structure; layer ventilation; numerical simulation

作者简介: 尹 涵 (1997.04-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 330919211@qq.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2023-04-12

0 引言

国内城市轨道交通迅猛发展^[1], 线网规模不断扩大, 地铁车辆基地作为城市轨道交通的重要配套设施, 其规模和数量也迅速增长。车辆段是对城市轨道交通车辆进行运营管理、停放及维修养护的场所, 亦是轨道交通系统必不可少的部分, 具有占地规模大、用地强度低等特点^[2]。这与日益紧缺的城市地面空间产生了矛盾, 并严重制约了城市规划发展。近年来, 地下车辆场段作为地铁可持续发展的一种新模式, 已成为不可阻挡的地铁车辆段建设趋势^[3]。

对于常规的地面车辆段而言, 检修厂房四周几乎完全敞开并附带上部通风天窗, 更有效利用外部主导风向, 加强自然通风换气, 作业环境较好。与地面车辆段及高架车辆段相比, 地下场段具有作业环境密闭、自然通风极差的特点, 客观条件决定了地下空间空气环境质量不容乐观。检修作业过程中常常会散发各类污染物, 一旦通风不畅, 有害物质难以及时有效排出, 空气品质将进一步恶化。不仅给运维作业带了安全隐患, 也会威胁作业人员健康。现阶段, 轨道交通职业健康危害因素显示, 车辆段存在局部性粉尘、噪声及毒害气体暴露风险, 空气品质保障方面存在明显不足。

地下场段的气流组织是需要探索解决的难点问题。目前, 在地铁维修厂房通风策略控制方面, 其通风方案设计较为工程化, 亦无相关规范及有效案例。由于与其他类型厂房空间存在的问题不尽相同, 类似工程项目中所提出的改善室内空气质量的措施与通风手段在此类特殊作业空间中也难以直接借用。因此, 开展全地下地铁检修厂房通风气流组织优化研究, 控制工作区空气污染浓度低于安全限值, 可为地铁车辆段通风设计提供依据, 具有非常重要的工程意义。同时也有利于增强运维人员职业保护, 预防和控制车辆基地相关职业病^[4]。

1 数值计算

采用前处理软件 SPACE CLAIM 建立几何模型、划分网格和定义边界条件, 再将数值模型导入 FLUENT 软件进行流场分析计算。

1.1 几何模型

建立如图 1 所示地铁检修库模型, 地下大型厂房为狭长型, 南北向厂房, 模型尺寸为 127m×36m×

10m, 入库端设置 5 个门洞。库区主要检修区域自入库坡道整体下沉约 1m。上部空间为通风管道、照明设备及接触网。下部空间主要由车辆、维修平台及检修坑道组成。本研究中所用球形喷口直径为 0.4m, 回风口尺寸为 1.5m×0.6m, 电客车长 100m、宽 3.2m、高 3.7m。

模拟时无法建立全部物理细节, 对实际模型简化处理如下: (1) 假设气流为定常、不可压稳态湍流流动, 且满足 Boussinesq 假设, 认为流体密度变化仅在计算浮升力时考虑, 不计粘性耗散率^[9]。(2) 不考虑库内照明设备及人体散热、太阳辐射, 各壁面视为绝热壁面。(3) 室忽略毒害气体的动态释放过程, 污染气体源视为面源且污染释放率为恒定。

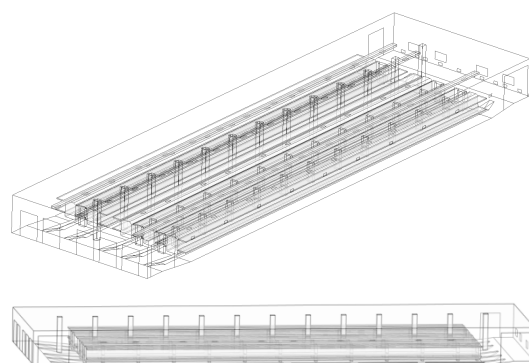


图 1 地下检修库大型厂房计算模型图

Fig.1 Calculation model of large workshop in underground maintenance warehouse

1.2 数值计算模型及边界条件

运维作业伴生有害气体随着室内气流扩散。为贴合工程实际, 采用多组分模型模拟地铁检修库中有害气体的空间分布规律。流场模拟基于有限体积法求解流动和浓度方程, 利用迭代法求解离散化后的线性代数方程组。选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型预测机械通风引起的湍流流动。采用 QUICK 格式对动量对流和浓度方程进行离散, 其他方程使用二阶迎风格式。求解采用 SIMPLE 计算方法, 壁面边界均采用标准壁面函数。当能量方程的残差达到 10^{-6} , 其他方程的残差达到 10^{-3} , 且变量监视值趋于恒定, 则可认为收敛。

维修库送风口均采用速度入口边界条件, 车身下部污染面源设为质量出口, 库区出入口门洞、门窗设为压力出口条件, 侧墙为绝热壁面。本研究选择多面体网格对大空间的流场进行划分, 厂房网格基础尺寸为 0.6m 并对污染源散发面及送回风口的

表面网格进行了加密处理, 计算模型达 1124 万网格。

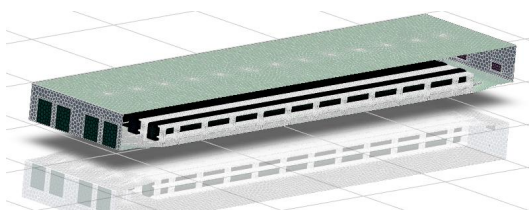


图2 网格划分图

Fig.2 Diagram of calculating meshing use

1.3 数值计算模型有效性验证

检修列位两侧为不锈钢平台, 平台下部为13根平台支柱, 间隔约7.7m, 支柱纵向覆盖距离与车身长度相当(见图3), 在检修平台以下呼吸面高度(距地面1.5m)、近平台支柱位置布置13个固定测点, 测点距待检修列位的中轴线水平距离为2.2m。沿车身方向均匀地取100个点位污染气体的模拟数值, 与实测点的污染气体浓度值进行对比分析。从图4数据对比可得: 模拟结果与实验数据吻合良好, 表明本文建立的数值计算模型能够较准确地模拟库区污染气体分布情况。

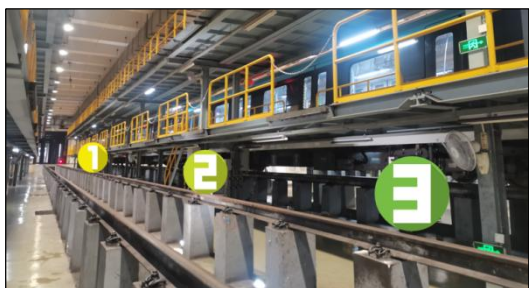


图3 检修线旁侧测点布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the layout of the measurement points next to the maintenance line

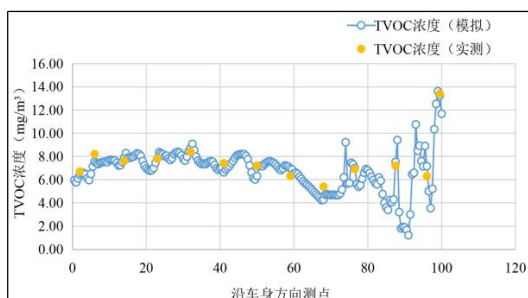


图4 沿车身方向污染气体浓度实测与模拟对比图

Fig.4 Comparison between measured and simulated pollution gas concentration along the surface body

2 射流混合通风模式

地铁检修库地下大空间典型的通风方式为“三层射流送风、顶部排风”, 并满足送排风量守恒的条件。射流通风系统运行工况下库区通风属于全面通风中的混合通风形式。混合通风是通过稀释的方法, 将一定量处理过的清洁空气由房间上部送风口送入室内, 并与室内浑浊空气充分混合达到相同状态, 以此来稀释室内污染物使其浓度达到卫生规范允许浓度以下。高大空间采用混合通风效率较低, 能耗较大。但地铁检修库设备及管线繁杂、作业流程较多、工艺及建筑空间压缩导致通风系统布置受限, 为避免影响工序操作, 全面通风模式仍被广泛应用于这类特殊的大空间通风设计中^[5]。

在地铁检修库中布置了大量球形射流喷口, 如图4所示。室外新风经射流喷口以较大的速度射出后, 由于紊流的横向脉动作用, 运动风流与室内静止空气产生动量交换, 不断地扩散和掺混, 从而带动射流路径周围的空气一起运动。在主要射流区内, 气流速度逐渐衰减并向四周辐散, 中心气流散失, 压强降低, 附近气流就会向中心汇聚并发生偏转, 形成漩涡状卷吸现象。特别地, 由于停靠车辆及检修平台等占据较大空间, 实体边界阻挡了射流气体发展, 气流在地铁检修库厂房中有效流动空间较小, 因此大空间内存在自由射流及受限射流两类典型的主导气流^[6]。

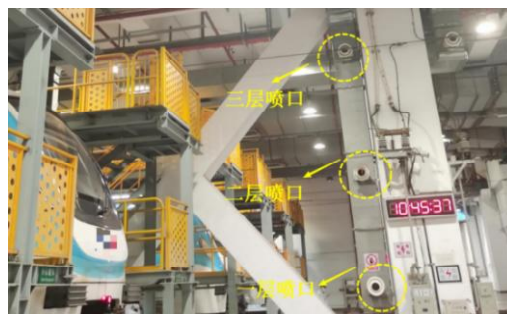


图4 地下式地铁检修库射流通风系统调研图

Fig.4 Investigation on jet ventilation system of underground subway maintenance warehouse

流场云图反映了射流通风发展路径, 在车顶以上空间, 射流前进沿途无阻挡, 至两列位中间仍具有一定的动能, 风速约 1.2m/s, 射流末端最远可达另一侧平台。二层平台高度射流跨过平台后撞击车体, 速度快速衰减, 各列位呈现了较大范围气流静滞区域。从工作区纵截面流场图5发现, 射流通风

模式下气流扰动主要集中于顶部空间,一层平台以下人员长时间作业空间的气流流动性非常差,风速几乎为零。

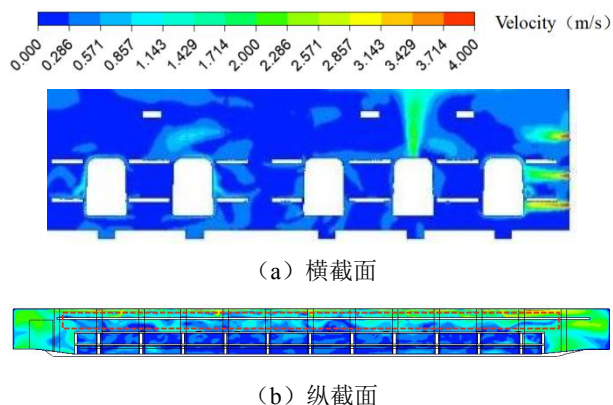


图5 射流混合通风模式下检修区流场图

Fig.5 Flow field in maintenance area under mixed jet ventilation mode

如图6所示呼吸高度平面出现了块状高污染区域,该片区污染气体浓度约 $10\text{mg}/\text{m}^3$;一层平台下部检修区工作人员的呼吸层面污染气体浓度均值为 $1.92\text{mg}/\text{m}^3$ 超过规范限值 $0.6\text{mg}/\text{m}^3$ 达2.2倍。结合模拟结果与实测数据,发现地铁检修库既有射流混合通风系统正常运行工况下近地面作业区局部污染超标问题并未得到有效解决。

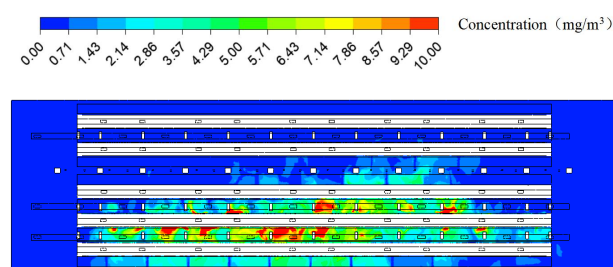


图6 一层检修面呼吸平面(距地面1.5m)污染分布

Fig.6 Respiratory height of the first layer inspection surface pollution distribution

3 单向流层式通风模式

3.1 地铁检修库通风控制目标

对于承担检修工艺的地铁检修厂房而言,舒适性不是通风主要目的,首要任务是为检修人员提供健康的工作环境。部分检修环节产生了一定量的低毒性污染物,严重威胁了作业人员身体健康。作业时人员多处于站立状态,结合规范要求;需避免毒害物质作业人员操作区囤积及大范围扩散。因此,

将重点实现检修区人员呼吸层面污染物有效控制作为地下式地铁检修库通风控制目标。

通过调研实测发现,地铁检修库高度往往达10m,而大量检修人员长时间集中于离地2.4m以下的区域进行检修作业,因此对2.4m以上的空间进行通风控制意义不大。如图7所示,沿高度方向将空间划分为控制区与非控制区,控制区为一层检修作业平台以下空间。为实现重点区域空气品质重点改善,提出针对地铁检修厂房的风量分配原则:合理分配大空间送风量,适当增大库区地面与一层平台形成的夹层空间内通风量,提升送风可及性,降低或不设置次要、非控制区域通风。

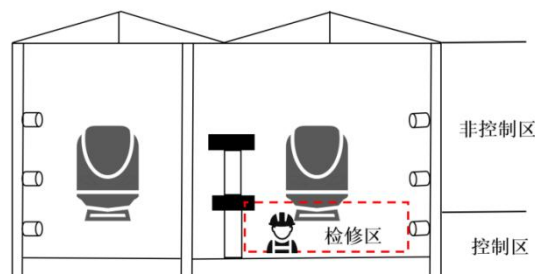


图7 地铁检修库通风控制范围示意图

Fig.7 Scope of risk control system for subway maintenance depot

通风方式的选择需以地铁维修库通风需求为导向,对于不同位置提供不同条件的送风,满足重点控制区域要求。当检修库采用射流混合通风模式,库区中大部分气流较为混杂,污染气体跟随室内气流无组织扩散,并大量囤积于控制区。

此外,下层空间局部污染源散发影响了其他检修列位甚至全局空间,是非常不利的。此外,采用全面通风方式改善高大空间近地面层的污染气体囤积问题,难度较大且能源消耗过大。为改善检修库底部工作区微小环境,提出采用局部通风模式,集中保障控制区的空气品质。较好的局部空气品质改善方法是从局部气流组织的处理上着眼:一是对局部污染源加以围挡和进行局部排风;二是结合现场因素,联合中下部空间送风气流与排风气流形成空气屏障,将毒害物质控制在空气屏障下^[7]。

目前,对于高大工业厂房等大空间送风量的计算目前还没有成熟的方法。依据《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50019-2015)当厂房高度大于6m时,排风量可按 $6\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 计算^[11]。当采用全面通风消除余热、余温或者是其他有害物

质时,应分别从室内温度最高、含湿量或有害物质浓度最大的区域排风。《城市轨道交通通风空气调节与供暖设计标准》(GB/T51357-2019)规定夏季时段采用机械通风,应按换气次数不宜小于 1h^{-1} 计算^[12]。依据《工业企业设计卫生标准》(GBZ1-2010)当数种溶剂(苯及其同系物、醇类或醋酸酯类)蒸气或数种刺激性气体同时放散于空气中时,应按各种气体分别稀释至规定的接触限值所需要的空气量的总和计算全面通风换气量^[13]。依据上述相关规范得到库区推荐换气次数为 6.2h^{-1} 至 10.4h^{-1} 。

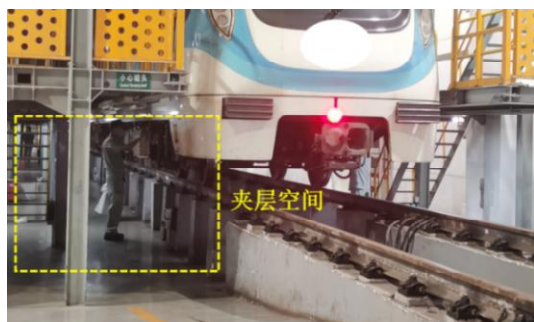


图8 一层平台下部夹层空间图

Fig.8 Mezzanine space below the first floor platform

3.2 地铁检修库层式通风模式

受限于检修作业、车体及平台空间阻碍因素等,难以在库区理想位置设置排风罩、净化器等局部排风或空气净化设备。除了通风条件及空间限制,检修厂房还具有进深较大、开口率较小、近地面空间污染局部超标的特点。综合考虑了该类特殊工业厂房诸多限制条件后,选择横向侧送风,送风主导气流可沿最短路径贯穿检修区,达到人员作业区域;并提出将送风量集中于控制区层面,研究层式送风与单向流结合的气流组织形式是否可实现局部污染控制及较好的通风效果。

层式通风是利用低湍流强度、均匀宽阔的空气流动层的新型通风模式^[8]。送风或者排风需为速度及方向完全一致的宽大气流。为避免不必要气流掺混,导致工作区大面积污染,原则上要控制送风气流处于较低的风速。采用横向侧送风的方式营造大空间内的层式通风,送风口通常布置于检修厂房一侧墙中下部区域,横向、均匀的主导气流可携带污染物穿过工作区,从对侧回风口排至室外。如图9所示,根据厂房空间跨度大小,可采用单向流层式通风模式。

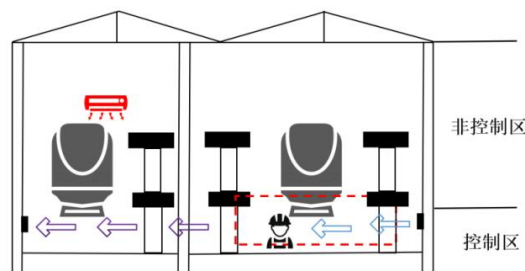


图9 地铁检修库单向流层式通风应用图

Fig.9 Application of one-way flow layer ventilation in subway maintenance warehouse

3.3 库区内流场对比

与射流混合通风分散的“束状”送风不同,单向流层式通风模型营造了明显的“薄层”气流组织。如图10所示,由于仅针对控制区,即人员长时间驻留、作业区域进行集中送风,作业夹层新风流量增大,夹层空间气流扰动明显增强,主导气流几乎可横向贯穿厂区的整个下部空间,形成了风速均匀“冷空气湖”,有效改善了送风可及性差的问题。对比贯穿检修线侧工作区的纵截面流场差异,射流通风模式下气流扰动主要集中于顶部空间,改用层式送风后,近地面作业夹层空间气流扰动明显增强,大部分区域风速达 2m/s ,可实现主要控制区有效送风。

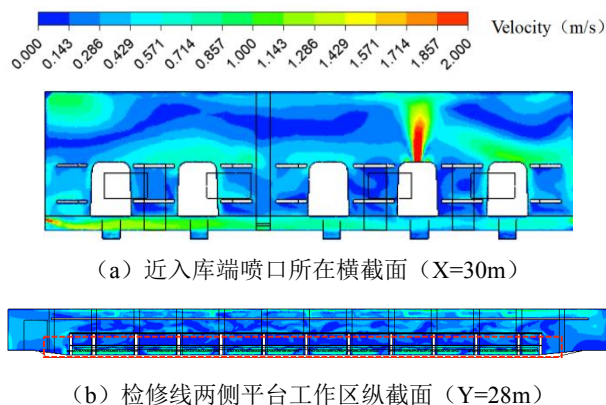


图10 单向流层式通风模式下检修区流场图

Fig.10 Flow field in maintenance area under unidirectional layer ventilation mode

3.4 通风效果对比

对比图11中检修区呼吸平面污染分布发现,采用层式通风后,平面内污染囤积量整体性降低,达到了明显的污染控制效果。这是由于近似层状的扁平单向流新风不断横向“置换”底部检修区域的污浊气体。当持续送入新风,作业夹层呈现相对正

压,辅助混合污染气体通过两侧坡道区域至库门排出。相较于射流混合通风模式,检修区呼吸面块状、聚集性的高污染点位及区域消失,污染气体囤积现象明显改善,空气清洁度提高。

改变送风模式后,如图 12 中虚线库门区域及近库区后端坡道位置出现了明显污染气体区域,反映了有毒物质随主导气流流动至与外界连通面积最大侧,充分利用了地铁检修库的入库端开口率最大的通风换气优势。

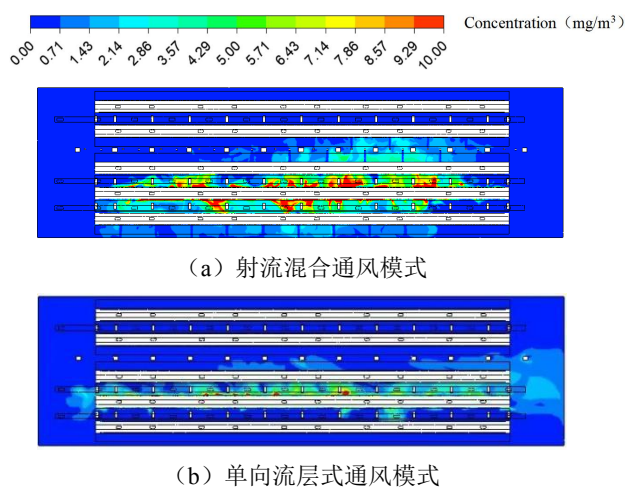


图 11 检修区呼吸面污染物分布对比图

Fig.11 Comparison of pollutant distribution on respiratory surface in inspection area

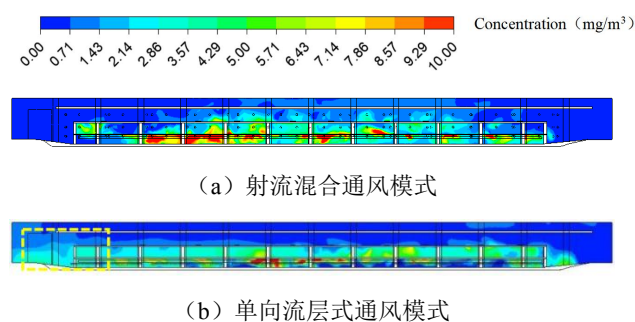


图 12 纵截面污染分布对比图

Fig.12 Comparison of pollution distribution in longitudinal section

单向流层式通风模式下送风口高度污染气体分布图 13 显示了从车体下部散发源至库区侧壁排风口的排除路径,低毒性污染物随横向接力式的送排风气流,沿径直线路排至室外。在空间相对位置上,横向的薄层气流与列车两侧的污染带相互垂直,送风横穿列车下部,减少了检修区下部污染气体与其他区域干净空气之间的掺混,可保持送风上

游区域良好的清洁度。

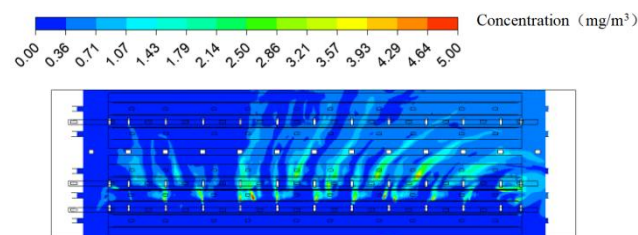


图 13 单向流层式通风模式下送风口高度污染分布图

Fig.13 Pollution distribution of air outlet height under one-way layer ventilation mode

不同换气次数下 ($\text{ACH}=6\text{h}^{-1}/8\text{h}^{-1}/10\text{h}^{-1}$) 控制区呼吸层面的污染气体浓度均值如图 14 所示。当换气次数为 6h^{-1} ,射流混合通风对应的检修区污染浓度均值达 $1.92\text{mg}/\text{m}^3$,为《室内空气质量标准》(GB/T18883-2022)中 TVOC 限值 $0.6\text{mg}/\text{m}^3$ 的 3.2 倍,层式通风模式对应数值为 $0.19\text{mg}/\text{m}^3$,远低于控制标准^[10]。当换气次数为 8h^{-1} ,射流混合通风对应的检修区污染浓度为层式通风的 17 倍,当换气次数继续增大至较大的 10h^{-1} ,射流混合通风对应的检修区污染浓度为 $0.93\text{mg}/\text{m}^3$,依旧超过限值且为层式通风的对应值的 13.4 倍,在各换气次数下,单向流层式通风控制下检修区呼吸面的污染浓度均为较低值,显示出良好的排污能力。

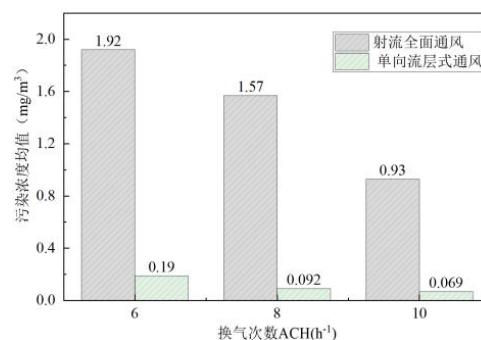


图 14 控制区呼吸层面污染浓度均值对比图

Fig.14 Comparison of mean pollution concentration at respiratory level in control area

不同换气次数工况下地铁检修库全库区的污染浓度均值如图 15 所示,它亦可反映室内污染气体积累总量差异。当换气次数分别为 6h^{-1} 、 8h^{-1} 、 10h^{-1} ,层式通风模式下污染总积累量较射流混合通风模式分别降低了 38%、62.2%及 62%。各换气次数下,单向流层式通风模式的毒害气体积累总量均低于射流全面通风模式。

综合上述污染数据对比及分析,发现现有车辆段中采用的混合射流通风模式并未有效解决地铁检修库下部作业空间中有机挥发性污染物囤积问题,而单向流层式通风作为一种较新的局部性通风手段,以远低于规范中通风量推荐值,实现全地下地铁检修库作业区环境控制,对应的通风系统能耗也较低,具有较大的工程推广及应用优势。

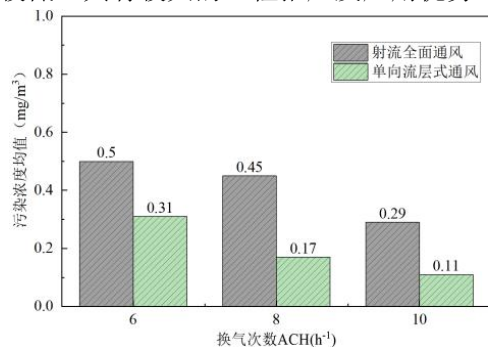


图 15 全库区污染浓度均值对比图

Fig.15 Comparison of mean pollution concentration in whole reservoir area

4 结论

针对下沉式地铁维修库地下大空间作业环境特性及通风条件限制,提出近一层平台工作区高度的单向流层式通风方式。通过数值模拟,对比研究了“单向流侧送侧回式”层式通风模式及射流混合通风模式对应的流场特征及低毒性有机挥发性物控制效果,得到结论如下:

(1) 全地下地铁检修库所采用的射流混合通风模式并未有效解决近地面工作区 VOC 气体局部性超标问题,严重危害作业人员健康。

(2) 采用近一层平台高度的层式通风模式可明显减小控制区域的气流静滞范围及涡旋区,增大了局部污染超标区域的实际通风量与送风可及性,显著改善了车体及维修平台遮挡性强、气流不畅的难点问题。

(3) 单向流层式通风模式对近地面工作区污染气体的控制效果明显优于以射流主导的混合通风模式,当换气次数分别为 6h⁻¹、8h⁻¹、10h⁻¹,层式通风模式下污染总积累量较射流混合通风模式分别降低了 38%、62.2%及 62%,控制区呼吸层面污染气体浓度分别降低了 9.1 倍、16.1 倍及 12.4 倍。

总体上显示了较强的排污能力,有效解决了全地下地铁检修库近地面区域、敞开式作业污染气体防护的技术难题,为类似工程通风系统设计及决策,提供一定理论及技术指引。

目前研究对检修空间污染物浓度判断依据仅为工业建筑空气品质相关规范,未来可采用更为专业的人体健康损害模型进行深入评价,为地铁检修库这类特殊空间的空气品质及通风设计标准建立提供更精确的数据。

参考文献:

- [1] 周文慧,刘培龙.城市轨道交通地下车辆基地绿色建筑 designs 研究[J].运输经理世界,2022,(19):4-6.
- [2] 刘新科,王冠琼,庄寅,等.城市轨道交通智慧化综合应急管理系统建设研究[J].都市轨道交通,2023,36(1):59-64.
- [3] 张海雷,潘斌.轨道交通车辆段上盖综合开发项目全过程交通规划研究与实践[J].交通世界,2022,(36):4-6.
- [4] 苏艺伟,王建宇,张燕,等.我国城市轨道交通企业职业卫生现状[J].中国职业医学,2018,45(4):517-520.
- [5] 何俊,彭言群,胡平成.某全面通风除尘设备除尘效果评价[J].中国卫生工程学,2014,13(2):98-99,103.
- [6] 谷现良,韩维平,赵加宁,等.高大空间喷口射流计算方法研究[J].暖通空调,2009,39(10):128-136.
- [7] 杜雅兰,黄明娟,周丽铭.全面通风与局部通风的应用分析[J].铁路节能环保与安全卫生,2014,4(3):143-147.
- [8] Zhang Lin, T T Chow, C F Tsang, et al. Stratum ventilation - A potential solution to elevated indoor temperatures[J]. Building and Environment, 2009,44(11):2256-2269.
- [9] 马骏.室内颗粒物分布的对比分析[D].太原:太原理工大学,2019.
- [10] GB/T 18883-2022,室内空气质量标准[S].北京:中国计划出版社,2022.
- [11] GB 50019-2015,工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [12] GB/T 51357-2019,城市轨道交通通风空气调节与供暖设计标准[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [13] GBZ1-2010,工业企业设计卫生标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.