

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-797-07

下沉式地铁维修库污染物分布的数值模拟分析

于晓波¹ 毕海权² 尹 涵²

(1. 中铁第五勘察设计院集团有限公司 北京 102600;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 为助力绿色城市轨道交通建设, 优化城市空间结构, 推广全地下地铁车辆基地已成为不可阻挡的趋势, 其库区内空气品质和作业人员职业健康安全更是得到广泛关注。以某带上盖的下沉式地铁检修库为研究对象, 采用 FLUENT 软件模拟分析库区气流组织和污染物空间分布情况, 探究了车顶冷凝器热源及射流喷口距地面高度对挥发性有机气体 (TVOC) 排除效果的影响。结果表明: 当车顶冷凝器由关闭至开启时, 当车顶冷凝器由关闭至开启时, 全库区污染均值浓度从 1.02mg/m³ 下降为 0.56mg/m³, 总积累量降低了 1 倍, 近地面作业区域污染排除率明显提高。当一层检修平台侧送射流喷口由 1.7m 降低至 1.1m 位置, 一层检修位工作区污染气体浓度从 0.97mg/m³ 降低至 0.71mg/m³, 库区污染总积累量降低了 43%, 各区域的清洁度均得到有效提高。

【关键词】 下沉式地铁维修库; TVOC; 气流组织; 污染物; 射流通风

中图分类号 X820.3 文献标识码 A

Numerical Simulation Analysis of Pollution Distribution in Sunken Subway Maintenance Depot

Yu Xiaobo¹ Bi Haiqu² Yin Han²

(1.China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Beijing, 102600 ;

2.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In order to help the construction of green urban rail transit, optimize the urban spatial structure, and promote the whole underground subway vehicle base has become an irresistible trend, and the air quality and occupational health and safety of operators in the reservoir area have been widely concerned. In this paper, taking a submerged subway maintenance warehouse with a cover as the research object, FLUENT software was used to simulate and analyze the air distribution and spatial distribution of pollutants in the reservoir area, and the influence of the heat source of the roof condenser and the height of the jet nozzle from the ground on the elimination effect of volatile organic gases (TVOC) was explored. The results show that when the roof condenser is switched from closed to open, the mean pollution concentration in the whole reservoir area decreases from 1.02 mg/m³ to 0.56 mg/m³, the total accumulation decreases 1 times, and the pollution exclusion rate in the near-surface working area increases obviously. When the jet nozzle at the side of the first-floor maintenance platform is reduced from 1.7m to 1.1m, the pollution gas concentration in the working area of the first-layer inspection station is reduced from 0.97mg /m³ to 0.71mg /m³, the total pollution accumulation in the reservoir area is reduced by 43%, and the cleanliness of each area is effectively improved.

【Keywords】 sunken subway maintenance depot; TVOC; air distribution; pollutant; jet ventilation

基金项目: 苏州市轨道交通集团有限公司科研项目 (SZZG06YJ1080007); 苏州市科技计划项目 (SS202115); 中国铁建股份有限公司科研计划项目 (2021-C57); 中铁第五勘察设计院集团有限公司科研计划项目 (T5Y2020-B01)
项目名称: 地下车辆基地消防、环境及节能相关技术研究项目

作者 (通讯作者) 简介: 于晓波 (1983-), 男, 高级工程师, E-mail: 281442819@qq.com

收稿日期: 2023-08-10

0 引言

近年来,随着城市轨道交通系统的迅猛发展^[1],地铁维修库数量日益增加,全地下式地铁检修库由于不占用地上空间,更是被广泛应用在城市的地下交通枢纽。对于检修库内的空气品质和人员健康也得到了广泛关注。

Wargocki P 等人^[2]通过研究发现,室内环境污染的主要因素有:生物污染和挥发性有机物的化学污染,其中化学污染对人体健康的影响更为明显。Guohui Gan^[3]利用 CFD 模拟软件对室内空气流动进行数值模拟得出:室内空气流动与室内空气品质有关,合理的通风方式不仅使室内具有舒适的热环境和节能效果,而且能够有效地控制室内污染物的浓度。目前针对污染物的数值模拟^[4-7]主要是研究地上建筑内部存在污染物时室内的最佳通风方式且是集中于单一污染物的研究。但对于地铁维修库,其阳光和空气处于隔离状态,为了使库区内保持良好的工作环境,主要依靠机械通风的方式来实现,且维修库内存在多种污染物。研究传统的地上式检修库的通风量、污染物浓度等参数已经不能满足需要,必须针对地下式检修库给出新的方案要求,使污染物的浓度降到最低,以满足室内的空气品质要求。

由于全地下式地铁检修库无法开设天窗,不能实现自然通风,因此,本文专门针对全地下式地铁检修库,在其采用机械通风的基础上,通过研究车顶冷凝器热源和射流喷口高度对 TVOC 浓度的影响,以降低污染物浓度,改善库区内的空气品质。

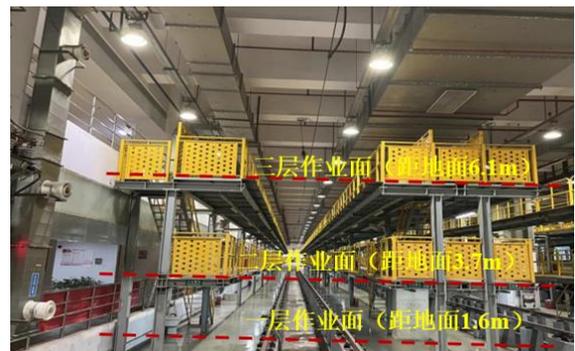
1 调研测试

调研的地铁检修库位于夏热冬冷地区,其主要承担某线路电客车停放及日常检修。由于上盖开发业务,无顶部开口或加装无动力风帽、通风气楼等条件,加之外部风环境较差,下沉式厂房仅可通过机械通风系统实现换气。既有射流混合通风系统为三层射流喷口侧送风、上部排风,如图 1(a)所示。不同高度作业面对应检修内容不同(见图 1(b)),二、三层检修作业主要是受电弓检修、滤网更换和车内电子检修,不涉及化学污染。检修库人员长时间停留及高频次检修区域为一层平台下部夹层空间,该区域车体部件擦洗作业采用“7070”清洗剂,同时出现了低毒性气体(VOC)

严重超标现象,测试人员在佩戴口罩的状态下,于检修位附近亦可闻到刺鼻柠檬味。综合来看,一层作业面空气污染较严重,作业时段的空气品质亟待改善。



(a) 通风系统



(b) 作业面

图 1 地铁检修库通风系统及作业面调研图

Fig.1 Survey drawing of ventilation system and operation surface of subway maintenance depot

2 数值计算模型

2.1 几何模型

本文下沉式维修库模型尺寸为长×宽×高=127m×36m×10m。厂区主要由检修车辆、三层维修平台及 5 列位维修坑道组成。通风模式为射流喷口侧送风,一层喷口距地面 1.4m,上部排风。球形喷口直径为 0.4m,上回风口单个尺寸为 1.5m×0.6m,冷凝器出风口尺寸为 1.2m×0.6m。厂房每条股道停放长 100m、宽 3.2m、高 3.7m 的列车,列车距地面 1.2m。建立如图 2 所示的维修库模型,在保留维修库所有与通风和传热相关几何特征与物理性能的前提下,进行部分简化,假设条件如下:

(1) 假设厂房内气流为定常、不可压、稳态

湍流流动且满足 Boussinesq 假设。

(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) 本课题采用稳态流动, 即室内污染气体源释放率稳定, 不随时间变化。

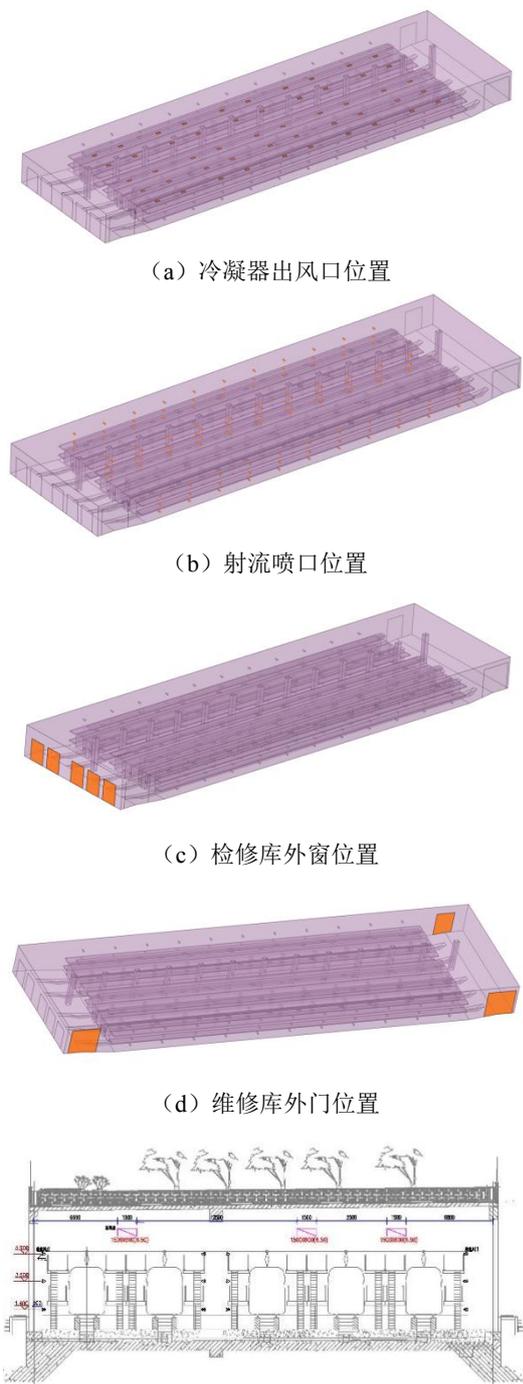


图 2 下沉式地铁维修库模型

Fig.2 Model of sunken subway maintenance depot

2.2 控制方程

机械通风系统开启时, 库区气体为三维、稳态、不可压缩的湍流流动, 同时考虑污染气体为室内混合空气的某一组分, 则采用多组分模型求解污染场。在研究库区内污染物的扩散, 需满足质量守恒、动量守恒、能量守恒和组分质量守恒。上述四种方程可写为式 (1) 的通用形式^[8]。

$$\text{div}(\rho u \Phi) = \text{div}(\tau \text{grad} \Phi) + S \quad (1)$$

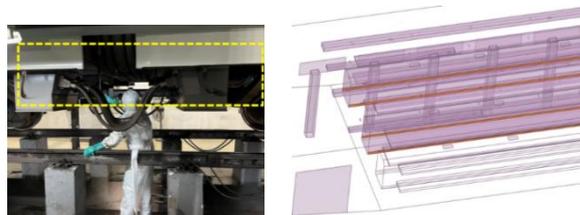
式中: ρ 为密度; u 为速度矢量; Φ 为通用变量, 可以表示速度、温度、组分浓度等求解变量; τ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

数值模拟时采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型^[9]预测大空间机械通风作用下的湍流流动, 壁面函数选用标准壁面函数边界, 并借助有限体积法求解流动及浓度方程。

2.3 边界条件

依据实测数据, 识别地铁检修库空气污染超标类别是有机挥发性气体。污染源沿车身两侧呈带状分布 (见图 3 (a)), 模拟中将其设为面污染源 (见图 3 (b))。检修过程 TVOC 气体以 $1.7 \times 10^{-2} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 向空间内稳定释放。此外还需考虑检修时, 持续运转的车顶冷凝器热流, 该热源位于 3/5 层高位置且沿列位纵向分布。根据文献[10]计算得到冷凝器出风口温度为 46.2°C , 风速为 2.7m/s 。射流喷口及上回风口温度取调研地通风室外计算温度 30.6°C 。

将 TVOC 和空气设置在同一 mixture-template 下, TVOC 的相对分子量为 56g/mol , 密度 $3.925\text{kg}/\text{m}^3$; 空气比热容取 $1.004\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 分子量 29g/mol 。



(a) 污染源散发位置 (b) 列车模型污染源散发位置

图 3 污染源散发位置

Fig.3 Emission location of pollution source

将列车底部 TVOC 释放源设为质量入口 (mass flow inlet), 射流喷口、冷凝器出风口和上回风口均设为速度入口 (velocity inlet), 入库门洞、库

门及底部窗户均设为压力出口 (pressure outlet)，各位置边界类型如表 1 所示。最后，采用混合初始化，经过 10 次迭代后能达到收敛值 10^{-6} 。

表 1 模型边界条件设置

Table 1 Setting of model boundary conditions

边界名称	边界类型
射流喷口、上回风口、冷凝器出风口	速度入口 (velocity inlet)
入库门洞、库门及外窗	压力出口 (pressure outlet)
污染带	质量入口 (mass flow inlet)
外墙	绝热壁面 (wall)

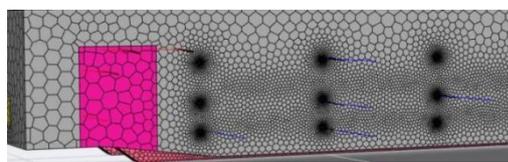
2.4 网格划分

为获得较好的模拟结果，模拟采用结构化网格，在网格划分时需对污染源、射流喷口、上回风口以及门窗位置进行局部加密，选择多面体网格划分模型，各区域网格尺寸设置如表 2 所示。厂房网格基础尺寸为 0.6m，网格总数约 1437 万，最小正交网格质量大于 0.1，证明网格划分良好，计算模型网格如图 4 所示。

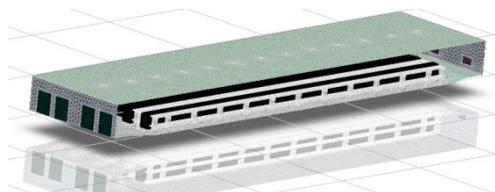
表 2 各区域网格尺寸设置

Table 2 Grid size Settings in each area

网格区域	网格大小/ (m)
基础尺寸	0.6
污染源面	0.2
送、回风口	0.2
门、窗	0.4



(a) 局部网格



(b) 整体网格

图 4 计算模型网格图

Fig.4 Grid diagram of calculation model

2.5 数值计算方法验证

为了验证所采用的数值模拟方法是否能够准确的反应室内污染物分布情况，采用 MP400S 测试仪 (测试仪器参数如表 3 所示) 检测一层作业面中，沿车身方向且接近检修柱的 13 个测点的 TVOC 数值；同时，沿车身方向取与实测情况同等方向的点位 (距离停车列位中心 2.2m 处，沿车身方向均匀布置 100 个点位)，模拟各点位 TVOC 的浓度，将实测值与对应测点的污染气体浓度模拟值进行对比分析。

从图 5 数据对比可得：模拟结果与实验数据的趋势相同，数据吻合度良好，但相对误差最大值出现在第 12 点位处，达到 22.47%。分析原因发现实际列车污染物的释放位置在转向架处，而在模拟时将整个列车模型底部两侧设置为污染物释放源。结果仍能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，并可用于实际研究。

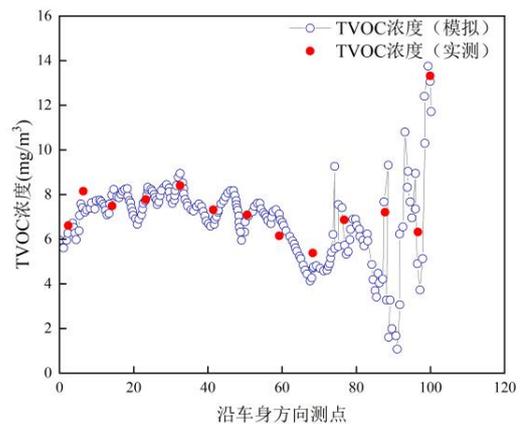


图 5 TVOC 气体浓度实测与模拟对比图

Fig.5 Comparison between measured and simulated TVOC gas concentration

表 3 MP400S 测试仪参数

Table 3 MP400S Tester parameter

仪器名称	仪器量程	仪器精度
MP400S 测试仪	0~3ppm	0.01ppm

2.6 模拟工况

车顶冷凝器热源及射流喷口距地面高度是否影响挥发性有机气体 (TVOC) 的排除效果需要对比研究，因此本文的计算工况如表 4 所示，其中工况 2 为通风系统正常运行时的工况，即原设计工况。

表 4 模拟工况表

Table 4 Simulated working conditions

工况	工况描述
1	五列位全线停车, L4 单列检修, 空调冷凝器关闭, 一层检修位喷口送风高度 $H=1.7\text{m}$
2	五列位全线停车, L4 单列检修, 空调冷凝器开启, 热量为 60% 的制冷量, 一层检修位喷口送风高度 $H=1.7\text{m}$
3	五列位全线停车, L4 单列检修, 空调冷凝器开启, 热量为 60% 的制冷量, 一层检修位喷口送风高度 $H=1.4\text{m}$
4	五列位全线停车, L4 单列检修, 空调冷凝器开启, 热量为 60% 的制冷量, 一层检修位喷口送风高度 $H=1.1\text{m}$

3 气流组织分布及污染物分布特征

3.1 气流组织特征

图 6 横向流场云图显示了射流覆盖范风力较为集中范围, 对顶部空间及二层平台小部分空间扰动较大, 一层射流气体由于发展后撞击车体, 风速衰减严重, 新风动力不足以跨越车体底部, 无法有效送达图中黄色虚线范围内的工作区, 该区域内超 95% 空间为气流静滞区域。

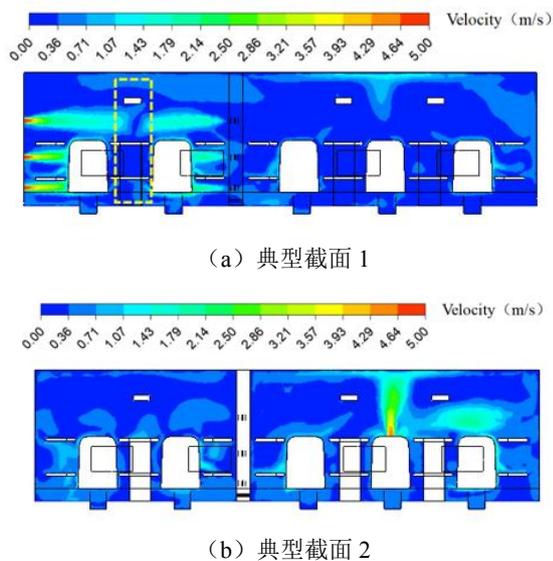


图 6 工况 2 射流通风系统正常运行风速云图

Fig.6 Cloud image of normal wind speed of jet ventilation system under condition 2

3.2 污染物分布特征

呼吸区污染物的浓度直接影响工作人员的健康,

是职业卫生保障和通风系统设计需重点关注区域^[11], 取近 L4 检修列位一侧的纵向剖面为观察面 A1, 取距地面高度为 2.05m 平面为观察面 A2, 如图 7 所示。

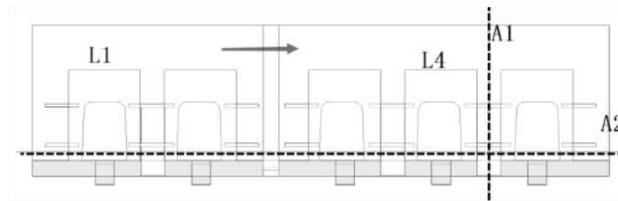


图 7 监测面

Fig.7 Monitoring surface

从图 8 污染物分布云图看出, 在自然通风下, 污染气体自车体两侧中下部面源扩散至周围空间, 由于污染物密度大于空气, 污染主要囤积于车体下部与一层平台及相邻检修位中上部空间, 扩散影响至就近两列位。从图 8 (a) 可以看出库区出现了浓度约 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 块状、聚集性高污染区域, 已经超过限值^[12] $0.6\text{mg}/\text{m}^3$ 达 30 倍以上, 严重影响室内空气品质和工作区人员健康。

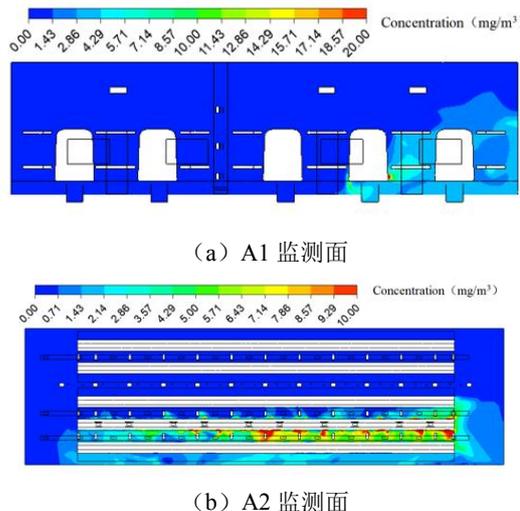


图 8 工况 1 冷凝器关闭时监测面污染物分布云图

Fig.8 Cloud picture of pollutant distribution on the monitoring surface when the condenser is closed in working condition 1

4 车顶冷凝器热源和喷口高度对通风效果的影响

4.1 车顶冷凝器热源

结合调研, 考虑车顶冷凝器热流为地铁维修库内唯一且强度不可忽略的稳态热源, 冷凝器热流实

为地铁维修库通风中十分容易忽略的重要问题,该部分热流风量及热量在以往工程设计或研究中均未被纳入计算,导致流场、温度场、污染物场及其他物理问题研究出现了较大偏差。

监测 A1 和 A2 面在冷凝器开启状态下 TVOC 浓度扩散分布如图 8 所示。在车顶冷凝器热气流影响下,库区污染物均值浓度约为 $0.56\text{mg}/\text{m}^3$,仅在释放源处有少量污染聚集,污染物稀释效果明显提升。对比图 8 和图 9 可知车顶冷凝器内热源从关闭状态至开启状态后,库区污染均值浓度从 $1.02\text{mg}/\text{m}^3$ 下降为 $0.56\text{mg}/\text{m}^3$,污染气体稀释效果明显增强、扩散范围缩小,室内空气品质得到提升。当空调开启后,顶部冷凝器大量散热直接排入上部区域,余热一方面会造成上部空间局部温度升高,另一方面热压与风压的协同作用会极大地影响气流组织与污染物扩散的轨迹。当一层与二层作业面协同检修过程中,热气流加强了大空间热力循环,使得下层作业气态污染物降低了 1 倍。

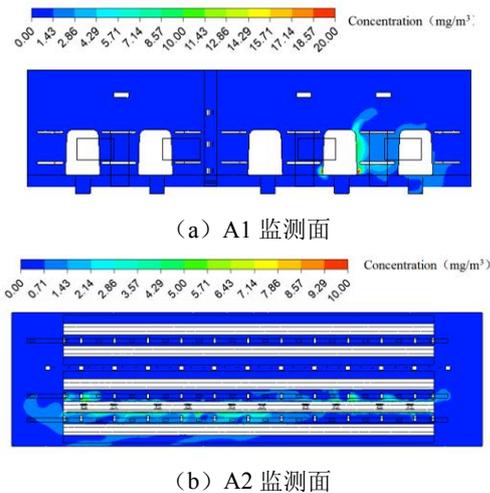
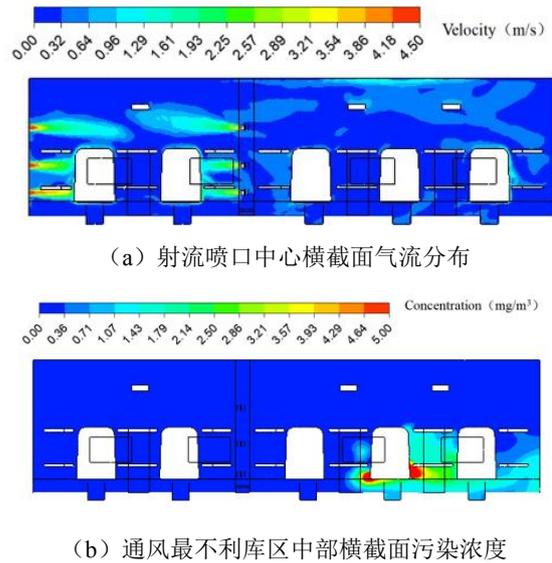


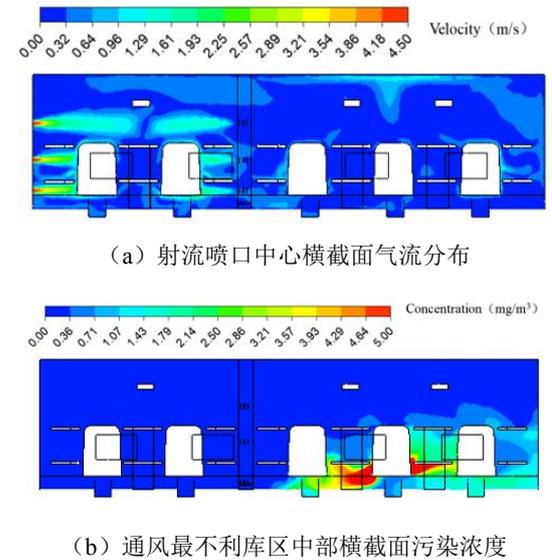
图 9 工况 2 冷凝器开启时监测面的污染物分布云图
Fig.9 Cloud picture of pollutant distribution on the monitoring surface when the condenser is opened in working condition 2

4.2 喷口高度

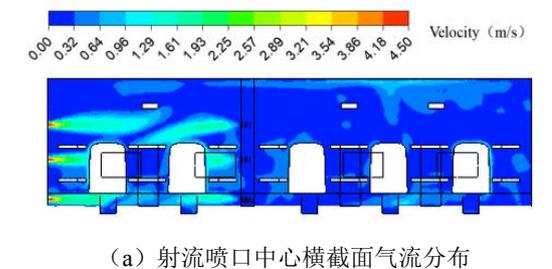
通风模式不变的情况下,研究当热源(空调冷凝器热源达到 60%的制冷量)、送风及污染源参数一定时,仅改变一层工作区射流送风喷口距地面(1.1m、1.4m、1.7m)高度,污染物的分布特征,如图 10~图 12 所示。



(a) 射流喷口中心横截面气流分布
 (b) 通风最不利库区中部横截面污染浓度
图 10 工况 2 条件 $H=1.7\text{m}$ 时气流及污染物分布
Fig.10 Distribution of air flow and pollutants under condition $H=1.7\text{m}$ in working condition 2



(a) 射流喷口中心横截面气流分布
 (b) 通风最不利库区中部横截面污染浓度
图 11 工况 3 条件 $H=1.4\text{m}$ 时气流及污染物分布
Fig.11 Distribution of air flow and pollutants when $H=1.4\text{m}$ in working condition 3



(a) 射流喷口中心横截面气流分布



(b) 通风最不利库区中部横截面污染浓度

图 12 工况 4 条件 $H=1.1\text{m}$ 时气流及污染物分布

Fig.12 Distribution of air flow and pollutants under condition $H=1.1\text{m}$ in working condition 4

由图 10 (a)~图 12 (a) 可观察到喷口距地面不同高度处射流喷口的气流出流路径以及气流影响范围。在车顶以上空间, 射流发展无阻挡, 至两列位中间仍有一定速度。二层平台高度送风跨过平台空间后撞击车体, 速度快速衰减, 相邻列位之间由于风速极小, 出现静滞区域, 污染物堆积。

不同喷口高度对应的一、二、三层检修区和全库区空间污染浓度均值如图 13 所示。对比得到下送喷口高度 $H=1.1\text{m}$ 时, 各层检修区污染浓度及库区污染积累量均为较小值。自原一层喷口设计高度 1.7m 降低 0.3m , 重点关注的一层人员活动区污染浓度均值从 $0.97\text{mg}/\text{m}^3$ 降低为 $0.77\text{mg}/\text{m}^3$; 继续降低至 1.1m , 一层检修区污染浓度均值降低至 $0.71\text{mg}/\text{m}^3$, 调整一层射流喷口高度后, 一层作业呼吸面污染浓度依旧超过规范限值; 二、三层检修区污染浓度均值远低于限值。横向对比各层面污染浓度, 一层检修区域的污染积累量最大。

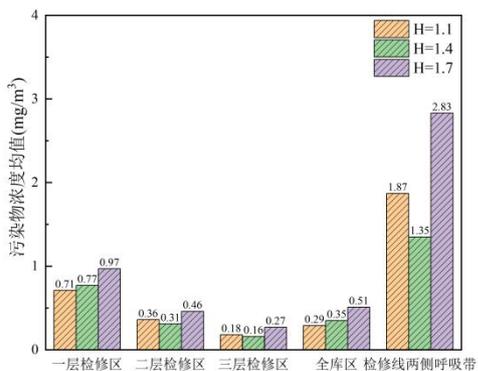


图 13 不同送风口高度时各区域污染浓度均值

Fig.13 Average pollution concentration of each region at different height of air supply outlet

5 结论

本文基于下沉式地铁检修库调研实测数据, 建立了下沉式地铁检修库内污染物的数值计算模型,

研究了射流混合通风模式下库区的流场和污染分布规律, 并分析了车顶冷凝器热源、射流喷口高度对通风效果的影响, 主要结论如下:

(1) 检修库人员长时间停留及高频次检修区域为一层平台下部夹层空间, 该区域车体部件擦洗作业采用“7070”清洗剂, 清洗剂散发的 VOC 气体以 $1.7 \times 10^{-2} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 向空间内稳定释放。

(2) 当一层射流喷口高度距地面 1.7m 且车顶冷凝器处于关闭状态时, 库区出现了浓度约 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 块状、聚集性高污染区域, 严重影响室内空气品质和工作区人员健康, 当车顶冷凝器开启后, 库区污染均值浓度从 $1.02\text{mg}/\text{m}^3$ 下降为 $0.56\text{mg}/\text{m}^3$, 污染气体稀释效果明显增强、扩散范围缩小, 室内空气品质得到提升, 库区污染积累量降低了 1 倍。

(3) 当下送射流喷口高度由 1.7m 降至 1.1m , 可使一层检修区污染气体浓度降低 25%, 二层检修区污染气体浓度降低 22%, 全库区污染积累总量降低 43%。

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 设计研究[J].运输经理世界,2022,(19):4-6.
- [2] Wargocki P, Wyon D P, Sundell J, et al. The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity[J]. Indoor air, 2000,10(4).
- [3] Guohui Gan. Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics[J]. Energy & Buildings, 1995,23(2).
- [4] Wargocki P, Wyon D P, Baik Y K, et al. Perceived air quality, sick building syndrome(SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads[J]. Indoor Air, 1999,9(3):165-179.
- [5] Lin Z, Z hou TT, Tsang CF. Stratum ventilation: A conceptual introduction[C]. Proceedings of the 10th international conference on indoor air quality and climate, 2005:3260-3264.
- [6] 李安桂,刘旺兴,要聪聪,等.竖壁贴附射流加导流板呼吸区送风气流组织CFD及试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(5):738-744.

(下转第833页)

量为 10056498kW。

为了进一步对系统应用可再生能源情况进行评价, 本文对系统可再生能源应用率开展计算, 可再生能源利用率 R_{ch} 按照下面公式计算:

$$R_{ch} = \frac{\sum \text{地源热泵机组全年供冷热量}}{\sum \text{空调系统全年总冷热负荷}} \quad (7)$$

带入上述计算数据可得, 站房空调系统 R_{ch} 为 32.1%, 枢纽空调系统 R_{ch} 为 21.5%, 项目可再生能源利用率均大于 20%, 节能减排效益显著。

4 结论

本文依托成都某综合交通枢纽土壤源地源热泵项目, 开展热响应试验分析与评价, 基于测试效果及经济角度提出推荐的换热器形式。再此基础上, 分析全年空调能耗中可再生能源利用率。主要结论如下:

(1) 该工程区地下水类型主要为基岩裂隙承压水, 地下水的渗流作用加强了热量交换速率, 使测试得到的岩土体的综合热换功率值偏大; 项目区域的岩土体 (深度 110m 内) 初始平均温度为 18.3~18.8℃, 由于受地下承压水和气温影响, 初始温度差别较大, 建议取 18.32℃;

(2) 该项目区域的岩土体双 U 平均导热系数平均值为: 2.45~2.78w/(m·K)。从测试效果和经济角度出发, 各试验孔双 U 形式的地埋管换热功率均大于单 U 形式的热换功率, 热换功率提高约 22%。结合四孔联合测试工况, 建议选用双 U25 地埋管, 夏季标准工况释热能力为 42.89W/m, 冬季标准工况取热能力为-42.66W/m。

(3) 全年动态负荷计算分析结果表明, 该项

目站房部分可再生能源应用率可达 32.1%, 枢纽部分可再生能源应用率可达 21.5%, 项目可再生能源利用率较高。

该研究成果可为在轨道交通领域推进浅层地热能利用提供可靠的技术路线及理论依据。

参考文献:

- [1] 徐伟, 刘志坚. 中国地源热泵技术发展及展望[J]. 建筑科学, 2013, 29(10): 26-33.
- [2] 中国地源热泵发展研究报告 (2018) [R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [3] 杨光明, 韩叙, 王鹏. 某体育场馆地源热泵系统应用与节能分析[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(3): 145-147.
- [4] 王义杰, 韩永亮, 汪启龙, 等. 西安某地源热泵项目设计优化研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(20): 123-126.
- [5] 杨文芳. 地源热泵在新建建筑中应用的经济性研究及政策建议[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [6] 巫朝敏. 成都地区地源热泵的环境和经济效益关联研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [7] GB 50366-2005, 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [8] 王静茹. 扬州灌云县浅层地源热泵热响应测试及影响因素分析研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [9] T/CECS 730-2020, 地埋管地源热泵岩土热响应试验技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [10] 冯国会, 赵佳绩, 黄凯良. 某超低能耗建筑地源热泵夏季运行的调试与运行问题分析[J]. 建筑科学, 2020, 36(6): 50-55.
- [11] GB/T 50378-2019, 绿色建筑评价标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [10] 彦启森, 石文星, 田长青. 空气调节用制冷技术[M]. 中国建筑工业出版社, 2016.
- [11] 李谊, 邱永祥, 王晓斌, 等. 动车组检维护作业职业病危害程度分析研究[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2015, 5(5): 227-233.
- [12] GB/T 18883-2022, 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

(上接第803页)

- [7] YIN H, LI A. Airflow characteristics by air curtain jets in full-scale room[J]. Journal of Central South University, 2012, 19: 675-681
- [8] 张辉. 基于多因素耦合的室内污染物扩散浓度场模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [9] 顾登峰, 张冷, 周春慧. 地下车库污染物浓度的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2007, (1): 93-96.