

基于动态网格技术和离散相模型的地铁隧道活塞风特性及通风竖井井口污染物扩散研究

燕成飞¹ 郑学林¹ 臧建彬²

(1. 上海海事大学商船学院, 201306, 上海; 2. 同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海 // 第一作者, 硕士研究生)

摘要 利用动态网格技术和 DPM(离散相模型)技术, 并使用控制变量法分析了地铁列车行车速度、阻塞比、通风竖井数量等因素对隧道内活塞风速度场分布规律的影响, 以及不同竖井数量下井口释放污染物的扩散规律。结果表明: 隧道内活塞风速度场的分布情况及通风房间内污染物的衰减规律与试验数据基本一致; 竖井风量和行车速度、阻塞比成正比, 而与竖井数量无明显关系; 活塞风速与行车速度、阻塞比成正比, 而与竖井数量亦无明显关系; 当井口释放污染物时竖井的数量越多, 隧道内的污染越严重。

关键词 地铁隧道; 活塞风特性; 动态网格技术; 离散相模型; 通风竖井; 污染物扩散

中图分类号 U453.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.007

Piston Wind Characteristics and Ventilation Shaft Pollutant Diffusion in Metro Tunnel Based on Dynamic Grid Technology and DPM

YAN Chengfei, ZHENG Xuelin, ZANG Jianbin

Abstract With dynamic grid technology and DPM technology, control variable method is used to analyze the influence of factors including metro train speed, blocking ratio, number of ventilation shafts on piston wind flow field distribution pattern in the tunnel, and diffusion pattern of pollutants under different shaft numbers. Results show that the distribution situation of piston wind flow field in tunnel and the decay pattern of pollutants in ventilation room is in accordance with test data; the wind volume is proportional to train speed and blocking ratio but has no obvious relationship with the number of ventilation shafts; piston wind speed is directly proportional to train speed and blocking ratio, but has no obvious relationship with the number of ventilation shafts. When pollutants are diffusing, the more ventilation shafts there are, the more serious the pollution in tunnel will be.

Key words metro tunnel; piston wind characteristics; dynamic grid technology; DPM; ventilation shaft; pollutant diffusion

First-author's address Merchant shipping college, Shanghai maritime university, 201306, Shanghai, China

通风竖井作为地铁隧道通风系统的重要结构, 是隧道内外空气的“重要通道”。其作用可以归纳为: 正常运行时, 向地铁隧道内提供一定的新风量, 排除隧道内的余热余湿, 创造合适的温湿环境, 维持设备的正常运行; 发生紧急事件时, 提供必要的新风量, 诱导乘客疏散。目前, 对于地铁隧道的通风研究主要集中在活塞风特性, 以及活塞风对车站能耗影响的研究。文献[1]运用数值模拟和现场实测相结合的方式研究了区间隧道活塞风的风速、风压等规律, 发现列车运行会产生活塞风, 列车进站和出站两个过程活塞风在各个区域的分布有所不同。文献[2-3]通过模型试验验证了数值模拟的可靠性, 得到了无通风竖井情况下隧道内的空气压力和速度分布规律, 研究表明, 隧道内的空气压力和速度分布受行车速度和列车位置的综合影响。文献[4]运用 CFD(计算流体运动学)对耦合的多区域进行了首次现场试验验证, 发现耦合计算结果与实测结果拟合较好。文献[5]利用 CFD 中的组份传输模型, 模拟了毒气在通风管道中的扩散传播过程, 并通过试验手段进行了验证, 结果表明, 组份传输模型能够很好地应用于毒气传播领域的研究。

本文研究内容包括地铁活塞风特性, 以及在通风竖井口释放污染物的传播规律等。重点研究列车运行过程中, 以面源的形式在竖井口持续性释放污染物后, 污染物在活塞作用下向隧道内迁移的扩散规律。

1 地铁隧道活塞风数值模型

1.1 物理模型

本文选取 3 节编组列车, 其长度为 60 m, 初始

时刻列车车尾距隧道入口 30 m。为缩短计算域,同时在颗粒物释放前赋予隧道准确的活塞风速度场分布,选取长 780 m 的单竖井隧道段。隧道截面尺寸为 5.0 m(高度) \times 4.2 m(宽度);竖井高度为 14 m,其截面尺寸为 4.0 m(长度) \times 4.2 m(宽度);竖井 1 中心距隧道入口的纵向长度约为 420 m。具体模型示意图见图 1。

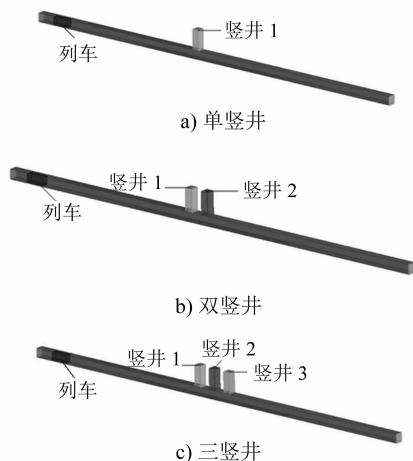


图 1 地铁隧道竖井模型

1.2 边界条件

- 1) 隧道入口: 设定为压力边界, 相对压力值为 0。
- 2) 隧道出口: 设定为压力边界, 相对压力值为 0。
- 3) 竖井口: 设定为压力边界, 相对压力值为 0。
- 4) 隧道壁面和地面: 采用固定壁面边界; 隧道壁面设置为反射条件, 反射系数为 1。
- 5) 列车: 列车运行是隧道非稳态速度场的根源, 通过 Profile 文件指导列车运行。列车以 1 m/s^2 的加速度加速至指定速度后, 保持匀速行驶。

1.3 数值模型验证

1) 动网格验证。对文献[2]中的试验模型进行仿真计算, 再将模拟结果和文献[2]中的试验结果进行对比。结果表明, 列车处于加速阶段和减速阶段速度的模拟值和试验值基本相等; 匀速运行阶段存在一定的偏差, 究其原因可能是由于本文的数值模型与文献[2]的试验模型存在细微区别, 但整体而言模拟结果和试验结果较为吻合。

2) 离散相模型验证。选取文献[6]中的三维全尺度房间模型进行数值模拟, 并采用 DPM(离散相模型) 对其进行验证。对颗粒物实时浓度与初始浓度之比的模拟结果与文献[6]的试验结果进行对

比发现, 模拟结果和试验结果在整体上存在高度一致性。

1.4 网格独立性检验

网格的疏密程度对数值模拟结果的准确性影响很大。当网格数量增加到一定程度, 其对数值模拟结果的影响很小甚至可以忽略不计, 被称之为网格无关性。本文研究中涉及的模型除竖井数量、列车尺寸存在差异外, 其余结构均基本相同。因此, 在进行网格独立性检验时, 选取了单竖井模型作为验证对象。对单竖井模型分别划分了 530 万和 250 万两种数量的网格, 通过计算得出两种网格数量下的数值模拟结果基本相同。为保证数值模拟计算的精度, 同时考虑到计算周期, 最终选取网格数量为 250 万。

2 不同影响因素下隧道内活塞风速度场分析

2.1 不同车速下隧道内活塞风速度场分析

当阻塞比为 0.65, 列车以不同速度在单竖井隧道内运行过程中, 活塞风风速沿隧道中心线均匀分布。列车运行速度越大, 由列车引起的活塞风风速越大。当列车运行速度为 60 km/h 时, 活塞风速为 9 m/s 左右, 而当列车运行速度为 30 km/h 时, 活塞风速仅为 4 m/s 左右(见图 2)。究其原因主要是随着列车运行速度增大, 车头前方正压亦增大, 而车尾后方负压减小, 导致隧道内空气流速加大。

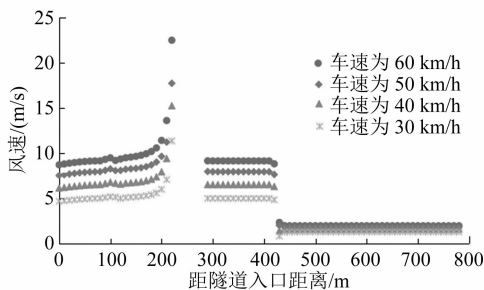


图 2 不同车速下列车位于风井 1 后隧道中心线风速分布

2.2 不同阻塞比下隧道内活塞风速度场分析

当列车以 60 km/h 的速度在隧道内运行时, 不同阻塞比下, 活塞风风速沿隧道内中心线的分布如图 3 所示。由图 3 可知, 阻塞比越大, 列车运行引起的隧道内活塞风风速亦越大。当阻塞比减小时, 列车和隧道之间的间隙增大, 这就意味着在列车运行中, 列车前方的气流流向车尾的间隙面积增大了, 这有利于列车前方空气迅速地补充到车尾区域, 使

得车尾负压和车头正压减小。

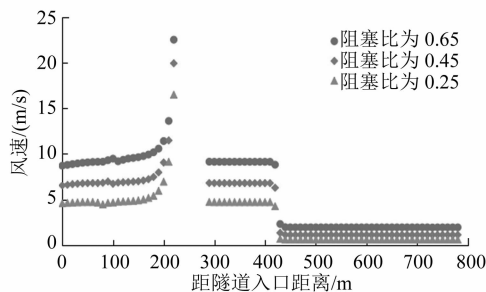


图3 不同阻塞比下活塞风风速沿隧道中心线分布

2.3 不同竖井数量下隧道内活塞风速度场分析

当阻塞比为0.65,列车以60 km/h的速度在隧道内运行时,不同竖井数量下,活塞风风速沿隧道内中心线的分布如图4所示。

由图4可知,当列车位于竖井1后方时,3种工况下竖井1前方隧道内活塞风速度分布基本一致;多竖井工况下,每经过1个竖井,隧道内活塞风风速就有所降低;双竖井和三竖井工况下,当列车驶出最后1个竖井后,隧道内活塞风风速急剧下降,分别降至1 m/s和0.5 m/s以下,由此可见,竖井作为泄压口的分流作用很强。

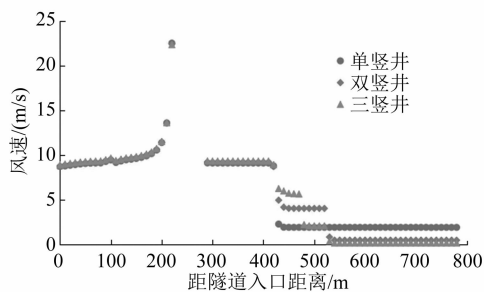


图4 不同竖井数量下活塞风风速沿隧道中心线分布

当列车位于竖井1前方时,竖井处于合流状态,受竖井分布的影响,单竖井工况下隧道内活塞风风速最大,三竖井隧道内活塞风风速最小;观察多竖井工况,发现竖井距列车距离越远,其合流作用越弱。

3 不同影响因素下通风竖井风量分析

3.1 不同车速对竖井风量的影响

当阻塞比为0.65,列车在单竖井隧道内以不同速度运行时,活塞风风速随列车位置变化如图5所示。由图5可知,竖井风量均呈现从排风转变为进风的规律;列车运行速度越大,列车对隧道内活塞风速度场的活塞作用越强,其竖井的风量亦越大。

3.2 不同阻塞比对竖井风量的影响

列车以60 km/h的速度在单竖井隧道内运行时,对比3种工况下的竖井风量发现,阻塞比越大,竖井口风量就越大。究其原因主要是阻塞比越大,活塞作用越明显,从而车头前方的正压越大,而车尾的负压越小。

3.3 竖井数量对其风量的影响

1) 单竖井工况。竖井排风阶段,竖井位于列车前方,初始时刻列车车头靠近竖井时,竖井排风量达到120 m³/s;随着列车的不断行进,竖井的排风量不断减小。在竖井送风阶段,列车行驶至竖井并越过后,竖井进风量随列车与竖井间距离的增大而增大,但其风量的增速越来越慢。

2) 双竖井工况。当列车中心未到达竖井1时,竖井1和竖井2均处于排风状态;随着列车的运行,竖井1排风量逐渐减小,而竖井2的排风量逐渐增大,且增长趋势逐渐变缓。当列车中心位于竖井1和竖井2之间时,竖井1开始向隧道进风,且进风量逐渐增大,随后竖井1进风量慢慢减小。

3) 三竖井工况。在列车运行期间,竖井1和竖井2的整体气流方向共经历了3次转变:先由排风状态转变为进风状态,进风量呈“山峰”状;然后由进风状态转变为排风状态,其排风量先增大再减小;最后由排风状态转变为进风状态,进风量增长缓慢但总体大于风井3的进风量增长率。竖井3的整体气流状态变化较为简单,当其处于排风状态时,其排风量随时间呈“几字型”变化。

图5为不同竖井数量下竖井总风量对比图。由图5可知,受列车和竖井的影响,单竖井工况下竖井总风量由排风状态转为进风状态的时间要明显早于多竖井工况,双竖井工况和三竖井工况的转换时间则基本相同;在3种工况都处于排风状态时,单竖井工况排风量最小,双竖井工况次之,三竖井工况最大,但双竖井工况和三竖井工况排风量差别不大;当列车运行至距竖井105 m左右时,双竖井工况和三竖井工况的竖井总风量变化趋于一致,且两者

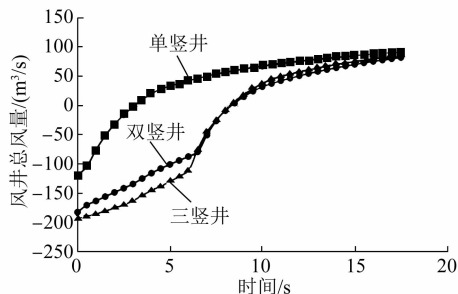


图5 不同竖井数量下竖井总风量对比图

的风量增速高于单竖井工况。由此可以推断,随着列车的运行,双竖井工况和三竖井工况的竖井总风量大于单竖井工况。因此,从隧道排热以及通风换气的角度而言,综合考虑建设成本,建议优先选用双竖井工况。

4 隧道内污染物扩散分析

4.1 竖井数量对颗粒物扩散的影响

通过前述分析可知,不同竖井数量下地铁隧道内的活塞风速度场变化最为复杂。本文对典型工况下不同竖井数量对颗粒物扩散的影响进行研究。

图6为不同竖井数量下,隧道内颗粒物有效污染量随时间的变化情况。由图6可知,在3种工况下,颗粒物初始释放时,竖井1均处于排风状态,空气对颗粒物的耦合作用占主导,使得部分颗粒被排出竖井外部。相较初始时刻3种工况下的颗粒物有效污染量,可以发现:单竖井工况<双竖井工况<三竖井工况。究其原因主要是竖井1的排风量随竖井数量的增加而减小,颗粒物与空气的耦合作用减小,导致初始释放时,单竖井工况下从竖井1排出的颗粒量最大。此外,竖井1处于排风状态的持续时间随着竖井数量的增加而减小,故单竖井工况下颗粒物向外排出时间最长。

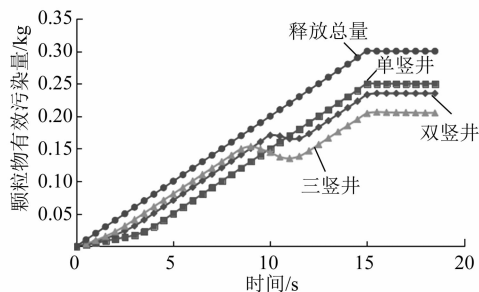


图6 隧道内颗粒物有效污染量随时间变化图

进一步观察图6发现,双竖井工况和三竖井工况都存在一个“急变区”,在该“急变区”中,随着颗粒物继续释放,隧道内的颗粒物有效污染量却出现了减小的现象。结合竖井风量和颗粒扩散位置进行分析,发现双竖井和三竖井工况下,在“急变区”出现前,竖井2处于排风状态,使得颗粒物向竖井2的井口扩散,造成之后的一段时间内因部分颗粒物被排出隧道而导致其有效污染量降低的现象。

4.2 颗粒物迁移分析

图7~9展示了不同竖井数量下,列车运行10s后隧道内污染物浓度的分布情况。由图7~9可知,

在竖井口污染物释放不久,颗粒物沿竖井向隧道内扩散的过程中,三竖井工况下颗粒物的扩散速度明显高于其他两个工况;三竖井工况和双竖井工况下由于颗粒物扩散速度较快,列车在未驶离竖井1时,就有部分颗粒物传播至列车周围。从列车通风换气的角度看,微细颗粒物会通过列车新风口扩散至客室内,由于地铁列车人员密度大、生化防护能力弱的特点,势必会造成较大的人员伤亡。由上述分析可知,3种工况下颗粒物浓度分布相似,受竖井内涡流的影响,靠近竖井左侧壁面的颗粒物浓度高于右侧壁面。

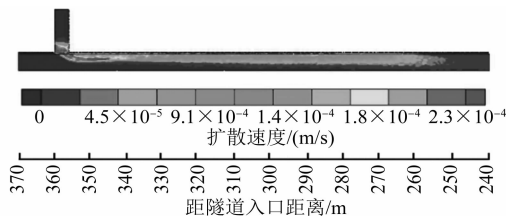


图7 单竖井工况下颗粒物扩散仿真云图

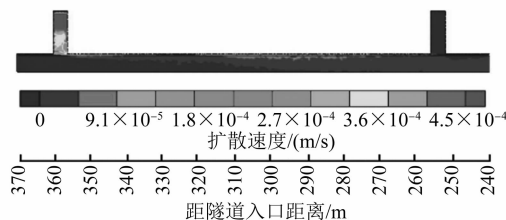


图8 双竖井工况下颗粒物扩散仿真云图

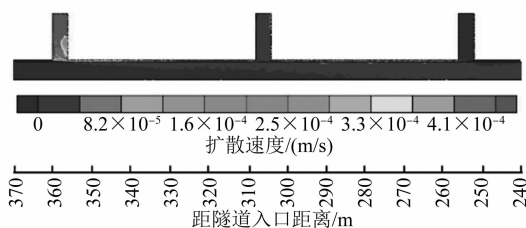


图9 三竖井工况下颗粒物扩散仿真云图

颗粒物的传播在区间隧道内主要是通过垂直于竖井口向内扩散和沿列车行驶方向的纵向扩散。3种工况下颗粒物在区间隧道纵向扩散存在两个共同特点:

1) 列车速度大于颗粒物纵向扩散速度,使得距列车尾部较近颗粒物的浓度随着时间推移越来越低;

2) 受隧道整体气流的作用,在竖井1附近的区间隧道内,靠隧道上壁面颗粒物的浓度会明显高于靠近隧道地面,即颗粒物出现向上扬的情况,且颗粒物在该区域呈现继续扩大的趋势。

三竖井工况出现一个独特的现象,即:颗粒物受隧道气流作用力和布朗扩散的影响,出现了部分颗粒物向竖井2出口扩散并通过竖井2排出,这就是造成三竖井工况出现颗粒物有效污染量急变现象的原因所在。

5 试验台设计

依据相似准则设计试验台。试验台主要由隧道和竖井、轨道、列车、行车控制系统、测试系统以及灯光系统等组成。试验台的组成部分如图10~11所示。

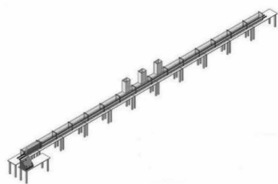


图10 模型试验台示意图

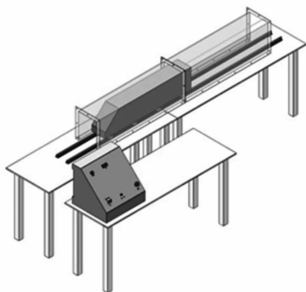


图11 控制台示意图

1) 隧道和竖井。隧道和竖井必须为透明介质,且两者连接处将设有活动板,可以通过手动控制来调节竖井数量。

2) 轨道。本试验台将采取安装行车轨道的方式来控制列车直线运行。

3) 列车。列车的核心是驱动系统,本试验台列车的最高行车速度为5 m/s,且速度较低。

4) 行车控制系统。列车速度调节采用PWM(脉宽调制)调速方法,在隧道两端设置传感装置,通过中控控制台能够实现列车起停、速度档位控制以及行车速度的数值显示。

5) 测试系统。沿隧道和竖井壁面设置多个速度测点和静压测点。

6) 灯光系统。试验选择在夜间进行,在模型隧道墙壁投影位置贴黑色墙纸,防止壁面白色背景弱化拍摄效果。

6 结论

1) 自然通风条件下,通风竖井风口气流的整体流动状态受列车位置的影响。当列车处于竖井后方时,竖井为“分流竖井”,竖井向外排风,且随着列车向竖井逐步靠近,竖井排风量减小;当列车运行至竖井底部时,竖井的气流变化较为复杂,竖井由排风状态逐渐转变为进风状态,且随着列车远离竖井,竖井的进风量也不断增大。

2) 列车从竖井上游运行至竖井下游的过程中,通风竖井遭受突发的持续性污染时,隧道内污染物浓度沿列车行驶方向逐渐降低,且污染物浓度出现垂直分层状况;竖井数量越多,颗粒物进入区间隧道的时间越早;三竖井工况和双竖井工况出现了污染物扩散至车体周围的情况,且污染物极有可能进入车内,导致大量人员受害。

参考文献

- [1] 沈翔. 地下铁道活塞风特性的研究[D]. 上海: 同济大学机械与能源工程学院, 2004.
- [2] KIM J Y, KIM K Y. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2007, 22(2): 166.
- [3] 甘甜, 王伟, 赵耀华, 等. 地铁活塞风 Fluent 动网格模型的建立与验证[J]. 建筑科学, 2011(8): 75.
- [4] GAO Y, CHEN Q. Coupling of a multi-zone airflow analysis program with a computational fluid dynamics program for indoor air quality studies[C]//Tsinghua University. Proceeding of the 2003 4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning. Beijing: Tsinghua University, 2003.
- [5] 宋天衍. 集中空调风管道系统毒气传播预警与应急[D]. 上海: 同济大学暖通空调及燃气研究所, 2014.
- [6] LU W, HOWARTH A T, ADAM N, et al. Modelling and measurement of airflow and aerosol particle distribution in a ventilated two-zone chamber[J]. Building & Environment, 1996, 31(5): 417.

(收稿日期: 2019-07-23)