

“双洞互补式+静电除尘”通风方式下公路隧道污染物浓度分布规律研究

封晓黎¹, 胡彦杰², 宋晓³, 李勇³, 王亚琼³

(1. 河北高速公路集团有限公司荣乌分公司, 河北 保定 072550; 2. 武汉中交交通工程有限责任公司;
3. 长安大学 公路学院)

摘要:为验证“双洞互补式+静电除尘”组合通风方式的通风效果,该文依托于荣乌高速公路营尔岭隧道工程,采用计算流体力学软件 Fluent 建立数值仿真模型,探讨换气通道位置以及射流风机增压在不同除尘效率下对隧道污染物浓度的影响规律。结果表明:随着换气通道距上坡隧道入口距离的增加,两条隧道出口污染物浓度逐渐接近;除尘设备可显著降低污染物浓度,同时随着除尘效率的增加,换气通道对平衡上下坡隧道出口污染物浓度的作用降低;随着隧道内射流风机增压的升高,隧道出口处的污染物浓度均逐渐减少,除尘设备除尘效率降低。

关键词:隧道工程;互补式通风;静电除尘;数值模拟;通风效果

1 引言

中国公路隧道发展迅速,截至2019年底,中国公路隧道共19 067处、总长约1 896.66万m。为了保障公路隧道行车的安全性、舒适性,需要对隧道空气质量进行控制,如何在经济节能的情况下满足隧道通风要求已成为特长公路隧道研究的重点,许多学者不满足现有造价较高的全横向通风、半横向通风以及分段式纵向通风方式,提出一种新的通风方式——互补式通风,并对该通风方式的通风效果进行了验证,提出了该通风方式的适应条件等。

互补式通风作为一种新型的通风方式,研究者一直致力于这方面的相关研究,胡彦杰等在针对大别山隧道通风方式研究时提出了双洞互补式通风系统设计理论和方法,在不增设通风斜井的条件下,满足大别山隧道左右线需风量要求;夏丰勇基于大别山公路隧道研究了互补式通风运营模式,提出根据通风负荷选用单U形通风模式或双U形通风模式;王亚琼等通过双洞互补式通风物理模型试验论证了互补式通风方案的可行性。静电除尘是降低特长隧道污染物浓度的重要手段,可有效降低通风负荷,实现经济、节能的效果,在挪威、日本等国家已成功应用于公路隧道中。韩星等

从隧道需风量计算方法出发,指出在一定坡度下,柴油车比例达到临界比例时,才需要使用静电除尘设备;杨洪海等采用物理试验方法验证静电除尘系统在运营公路隧道的实际除尘效果,表明隧道运行静电除尘设备后,可以显著降低污染物浓度,改善空气质量;鲁娜等介绍了ESP在隧道中的工作原理,表明ESP对粉尘颗粒的除尘效果显著。虽然目前研究者对互补式通风方案和隧道静电除尘应用进行了较多研究,但是对互补式通风方案和静电除尘综合影响的研究尚少,对“双洞互补式+静电除尘”组合通风方案的研究还有待进一步深入。

该文依托于荣乌高速公路营尔岭隧道工程,采用流体力学软件 Fluent 数值模拟,分析隧道“双洞互补式+静电除尘”组合通风方式的换气通道位置、射流风机增压对隧道通风效果的影响,期望对隧道通风方式的选择以及隧道后期运营起到一定的指导作用。

2 双洞互补式通风方式

对于双洞单向公路隧道,当隧道内为单坡或左右线隧道的交通量与车型不同时,会导致两条隧道的污染物排放量存在较大的差异,需风量相差较大。互补式通风方式的基本原理是在两条隧道之间增设两条换

气通道,将上下坡隧道联结成一个整体的通风网络(图1)。将下坡隧道相对新鲜的空气通过2[#]换气通道送入上坡隧道,对上坡隧道内的污染相对严重空气进行稀释,降低上坡隧道空气中的污染物浓度;上坡隧道通过1[#]换气通道将隧道内的污染空气送入下坡隧道,以降低上坡隧道内风速。通过换气通道的双向换气,可降低上坡隧道的污染物浓度,增加下坡隧道的污染物浓度,但此时的上下坡隧道内空气质量均满足通风要求。

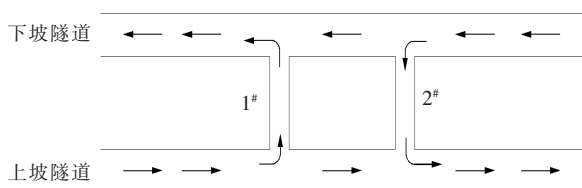


图1 互补式通风系统

3 计算模型的建立

运用计算流体力学软件 Fluent 建立三维模型进行数值模拟,由于隧道长度较长、规模过大,完全采用1:1的三维模型计算对计算机要求很高,一般计算较难实现,故在隧道模型中设置多孔介质阶跃边界条件来模拟沿程阻力损失,利用局部阻力损失代替沿程阻力损失,从而利用较少的资源实现对隧道通风系统的整体数值模拟。

3.1 控制方程

公路隧道在运营期间隧道内气体的流动状态为紊流状态,因此选用 $K-\epsilon$ 计算模型进行求解,控制方程组如式(1)~(5)所示。

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial (-\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} \quad (2)$$

k 方程:

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \quad (3)$$

ϵ 方程:

$$\rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

黏性系数方程:

$$\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (5)$$

式中: u 为平均速度; u' 为脉动速度; x 为位置张量 ($i, j=1, 2, 3$); μ 为动力黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数; k 为湍动能; ϵ 为耗散率; $c_1=1.44, c_2=1.92, c_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.92$ 。

3.2 模型参数与边界条件

隧道全长 5 660 m, 设置阻力格栅(多孔介质阶跃边界条件)来模拟沿程阻力损失后将模型缩短至 600 m, 阻力格栅分别位于模型 50、100、300、350、500、550 m 处, 通过调节阻力格栅参数大小, 以实现换气通道相对位置的改变。模型统一采用四面体网格进行划分, 网格尺寸为 2 m, 不设边界层, 划分后的网格如图 2 所示, 参数如表 1 所示。

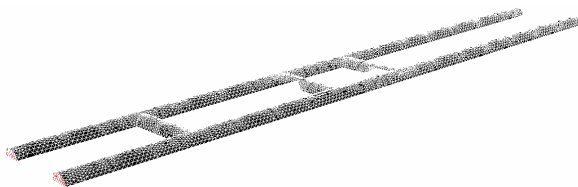


图2 互补式通风方式数值仿真模型

表1 数值模型参数

空气密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空气黏度/ [$\text{kg} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$]	温度/ K	气压/ Pa
1.225	1.7894×10^{-5}	288.16	101 325

4 研究结果与分析

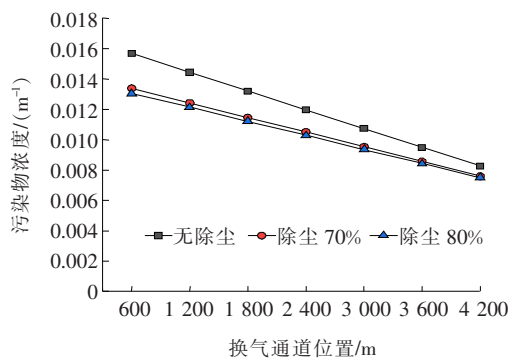
在数值仿真计算过程中,保持两条换气通道中换气风量相同,变量为换气通道的相对位置、射流风机增压以及除尘设备的除尘效率,用以研究换气通道相对位置以及射流风机增压对“互补式+静电除尘”通风方式通风效果的影响。

4.1 换气通道位置对污染物浓度的影响规律

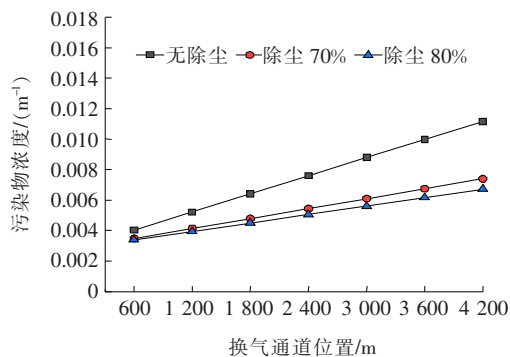
通过改变换气通道到上坡隧道入口的距离,针对换气通道位于不同位置进行模拟,共选取 7 个工况进

行对比研究,分别为换气通道距离上坡隧道入口 600、1 200、1 800、2 400、3 000、3 600、4 200 m。数值模拟过程中射流风机增压固定为 175 Pa,换气通道风量为 350 m^3 。各工况上坡隧道出口污染物浓度(C_U)、下坡隧道污染物浓度(C_D)以及隧道出口处污染物浓度比值 C_U/C_D 计算结果如图 3、4 所示。

从图 3(a)可以看出:上坡隧道出口污染物浓度随着换气通道至上坡隧道入口距离的增加呈下降趋势,且下降趋势与换气通道位置变化呈线性关系。换气通道在 600 m 处与在 4 200 m 处相比,上坡隧道污染物浓度在未安装除尘设备,除尘设备效率为 70%、80% 时分别降低了 0.074 1、0.005 78、0.005 54 m^{-1} ,由此可以看出安装除尘设备后,隧道内污染物浓度显著降低,但随着除尘设备除尘效率的增加,改变换气通道位置对上坡隧道出口污染物浓度的影响反而降低,分析原因主要是除尘设备降低了隧道内污染物浓度,降低了下坡隧道相对新鲜的空气对上坡隧道污染物的稀释作用。



(a) 上坡隧道



(b) 下坡隧道

图 3 隧道污染物浓度分布

从图 3(b)可以看出:下坡隧道出口污染物浓度随着换气通道至上坡隧道入口距离的增加呈上升趋势,换气通道在 600 m 处与在 4 200 m 处相比,下坡隧道

污染物浓度在未安装除尘设备,除尘设备效率为 70%、80% 时分别增加了 0.007 12、0.003 91、0.003 34 m^{-1} ,这是由于上坡隧道空气中的污染物浓度随着换气通道至上坡隧道入口距离的增加而升高,通过 2[#] 换气通道进入下坡隧道,从而提高了下坡隧道空气中的污染物浓度;安装除尘设备后,改变换气通道位置对下坡隧道出口污染物浓度的影响显著降低,且除尘效率越高,换气通道相对位置对下坡隧道出口污染物浓度的影响越小,主要是除尘设备降低了隧道内污染物浓度,降低了上坡隧道污染空气进入下坡隧道对下坡隧道空气的影响。

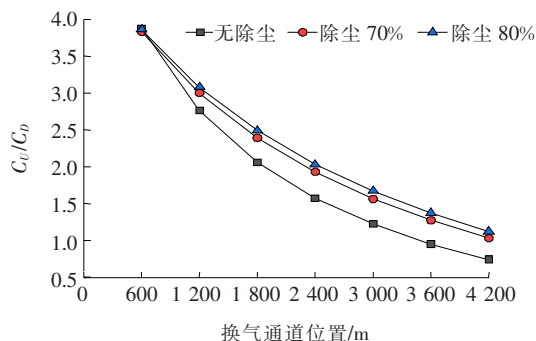


图 4 隧道出口污染物浓度比 C_U/C_D

由图 4 可知:换气通道相对位置对两条隧道出口处污染物浓度比值 C_U/C_D 有着显著的影响,随着换气通道至上坡隧道入口距离的增加, C_U/C_D 逐渐降低,表明上坡隧道和下坡隧道出口处的污染物浓度随着换气通道至上坡隧道入口距离的增加而逐渐接近,有效缓解了上坡隧道的通风压力。安装除尘设备后, C_U/C_D 降低趋势变缓,这是由于除尘设备降低了隧道纵向方向的污染物浓度,进而缩小了两条隧道内污染物浓度差值,降低了下坡隧道相对新鲜空气对上坡隧道空气的稀释作用。

4.2 射流风机增压对污染物浓度的影响规律

在纵向通风方式下,隧道内污染物浓度沿隧道内行车方向不断累积,射流风机位于隧道顶部,运行时,将空气从射流风机后方吸入,并从出口高速喷出,从而推动隧道内空气顺风机喷射气流方向流动。

通过改变射流风机增压,研究射流风机增压对“互补式+静电除尘”通风方式通风效果的影响,针对不同射流风机增压进行模拟,共选取 6 个工况进行对比研究,分别为射流风机增压为 75、100、125、150、175、200 Pa。数值模拟过程中换气通道至上坡隧道入口距离为 3 600 m,换气通道风量为 300 m^3 。各工况上坡隧道出口污染物浓度 C_U 、下坡隧道出口污染物浓度 C_D

计算结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出:随着隧道内射流风机增压的升高,上坡隧道出口污染物浓度 C_U 与下坡隧道出口污染物浓度 C_D 均呈下降趋势,且安装除尘设备与未安装除尘设备相比,变化趋势更为平缓,射流风机增压为 75 Pa 与 175 Pa 相比,在未安装除尘设备和除尘效率 70%、80%时,上坡隧道出口污染物浓度 C_U 分别降低了 13%、8%、8%,下坡隧道出口污染物浓度 C_D 分别降低了 31%、24%、23%,这是由于射流风机增压升高使得隧道内纵向风速增加,进而增大了隧道通风量,使得沿隧道纵向方向污染物浓度减小,导致通过除尘设备的空气中污染物总量降低,使得除尘设备的除尘效果下降。

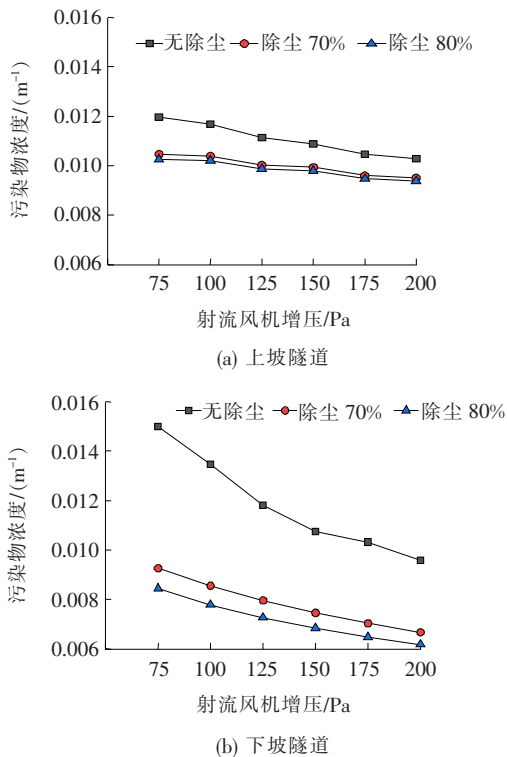


图 5 隧道污染物浓度分布

5 结论

通过建立数值仿真模型,对换气通道相对位置以及射流风机增压对“互补式+静电除尘”通风方式通风效果进行研究,将模拟计算得出的数据进行对比分析,得出如下结论:

(1) 随着换气通道距上坡隧道入口距离的增加,上坡隧道出口处的污染物浓度 C_U 逐渐降低,下坡隧道出口处的污染物浓度 C_D 逐渐增加,上坡隧道出口

污染物浓度与下坡隧道出口污染物浓度比值 C_U/C_D 降低,两条隧道出口污染物浓度逐渐接近。

(2) 安装除尘设备后,隧道出口污染物浓度显著降低,除尘效果显著,随着除尘设备除尘效率的增加,隧道内通过换气通道进入下坡隧道的空气中污染物浓度降低,降低了改变换气通道位置对隧道出口污染物浓度的影响,互补式通风方式通风效果减弱。

(3) 随着隧道内射流风机增压的升高,隧道出口处的污染物浓度 C_U 、 C_D 均逐渐减少;但随着射流风机增压值的增大,隧道内纵向风速增加,进而增加了隧道通风风量,使得沿隧道纵向方向污染物浓度减小,通过换气通道内除尘设备的烟尘总量减少,降低了除尘设备的除尘效率。

参考文献:

- [1] 肖尧. 特长公路隧道通风方式探讨[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2014(8).
- [2] 张世颀, 胡彦杰, 邓敏. 大别山公路隧道运营通风测试与分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012(11).
- [3] 王亚琼, 胡彦杰, 邓敏, 等. 大纵坡双洞隧道互补式通风运营测试[J]. 交通运输工程学报, 2014(5).
- [4] 王亚琼, 蒋学猛, 武义凯, 等. 公路隧道双洞互补式通风适用性分析[J]. 现代隧道技术, 2015(3).
- [5] 胡彦杰, 邓敏, 杨涛. 双洞互补式通风在大别山隧道中的应用研究[J]. 交通科技, 2011(2).
- [6] 夏丰勇, 谢永利, 王亚琼, 等. 特长公路隧道互补式通风模式[J]. 交通运输工程学报, 2014(6).
- [7] 王亚琼, 夏丰勇, 谢永利, 等. 特长公路隧道双洞互补式通风物理模型试验[J]. 中国公路学报, 2014(6).
- [8] 李德英. 静电吸尘在公路隧道通风中的应用[J]. 现代隧道技术, 2002(1).
- [9] 邵玉兰, 蒋树屏, 崔兴华. ESP 系统在公路隧道通风系统中的应用研究[J]. 公路隧道, 2012(2).
- [10] 罗慧, 周开壹, 孙学军. 静电除尘装置(ESP)在我国公路隧道中应用的可行性[J]. 公路工程, 2012(1).
- [11] 沈婕青, 乔宗昭. 静电除尘器(ESP)系统在世界隧道工程中的应用[J]. 地下工程与隧道, 2005(2).
- [12] 韩星, 张旭. 静电除尘装置在公路隧道通风中的使用条件研究[J]. 公路交通技术, 2007(1).
- [13] 杨洪海, 郭浩, 崔兴华, 等. 静电除尘器在公路隧道中的试验研究[J]. 现代隧道技术, 2019(1).
- [14] 鲁娜, 孙丹凤, 罗朋振, 等. 静电除尘技术在公路隧道空气净化中的应用[J]. 环境科学与技术, 2017(1).
- [15] 夏丰勇, 宋神友, 谢永利, 等. 双洞互补式通风在公路隧道中的应用[J]. 现代隧道技术, 2017(4).