

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.08.025

自然开口及射流风机位置对公路隧道 CO 浓度分布的影响

凌继红¹, 李放¹, 李建兴², 江崇旭³

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051;
3. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251)

摘要: 为了优化公路隧道自然开口及射流风机的位置, 实现降低隧道建设成本、节约能源和减少环境影响的目的, 以开设自然开口的公路隧道分段式纵向通风方式为研究对象, 通过建立公路隧道的通风数学模型, 研究自然开口和射流风机的布置位置对隧道 CO 浓度分布的影响。研究表明: 设置自然开口后, 隧道内污染物浓度分布情况并非一定优于不布置自然开口; 在多自然开口通风方案中, 将距离隧道出口较近的自然开口作为排风自然开口可提高分污效果; 将自然开口集中布置在隧道后部, 同时将较多的射流风机布置在自然开口群后端, 可增大隧道出口的实际通风量并降低隧道出口污染物浓度。

关键词: 环境工程; 城市隧道; 数学模型; CO 浓度分布; 自然开口; 射流风机

中图分类号: X734

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)08-0151-08

Influence of Position of Natural Openings and Jet Fans on CO Concentration Distribution in Urban Tunnel

LING Ji-hong¹, LI Fang¹, LI Jian-xing², JIANG Chong-xu³

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China; 3. The Third Railway Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Tianjin 300251, China)

Abstract: To optimize the positions of natural openings and jet fans in highway tunnel, and to achieve the purpose of reducing the construction cost, saving energy and reducing the environmental impact, taking the longitudinal ventilation system of urban tunnel section with natural openings as a study object, we studied the influence of positions of natural openings and jet fans on CO concentration distribution in the tunnel through establishing highway tunnel ventilation mathematical model. The results show that (1) with the natural openings, the pollutant concentration distribution is not always better than the situation without roof openings; (2) among the multiple natural ventilation opening schemes, it will promote purification effect when the natural openings are near the tunnel exit as exhaust natural openings; (3) by centralizing natural openings in the back of the tunnel and putting more jet fans behind the natural openings, the pollutant concentration will decrease and actual ventilation rate will rise up at tunnel exit.

Key words: environmental engineering, urban tunnel, mathematical model, CO concentration distribution, natural opening; jet fan

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 2010年度天津市科委科技支撑重点计划项目(10ZCKFSF02300)

作者简介: 凌继红(1971-), 女, 天津人, 副教授。(jihongling@126.com)

0 引言

具有射流风机调压并开设自然开口的隧道分段式纵向通风系统,可通过调节各自然开口和射流风机的布置位置及数量,来实现对各个自然开口的送、排风风速及风量的控制,进而控制隧道污染物的浓度分布及隧道出口的污染物排放总量。目前,国内外关于射流风机与自然开口的布置位置对隧道内污染物浓度的影响规律这方面的研究还比较欠缺。天津大学王晓磊^[1]研究了射流风机调压与交通风耦合作用时对自然开口通风效果的影响,试验结果表明自然开口之间的射流风机的调压作用明显,而且可以使各通风口达到稳定的进、排风状态;西南交通大学葛家美^[2]指出城市公路隧道采用顶部开孔的自然通风方式时隧道内的气流运动和污染物扩散受到通风口组合方式的影响较大,但对较长的公路隧道,仅开设自然开口对降低隧道污染物浓度效果不明显。

在隧道正常运营工况下,当在一定的汽车流量和车辆间距下,隧道内污染物分布特点主要由隧道各段长度和各自然开口的进、排风量决定。隧道内环境控制考虑的污染物是CO、NO_x、烟气和其他有害气体,烟气排放量主要由大型车辆决定,而对于城市隧道,隧道内中小型车辆比例较高,且烟气和其他有害气体的浓度分布趋势与CO的分布趋势相近^[3],故本文利用CO的浓度分布规律来描述隧道内的污染物分布特点。

1 隧道自然开口通风数学模型

1.1 计算模型描述

本研究以长3 000 m,布置12台同型号的射流风机及3个长方形自然开口,埋深为5 m的市政公路隧道为算例,分析射流风机和自然开口耦合作用下的隧道通风规律及其对隧道CO浓度的影响。该隧道宽12.5 m,高6 m,自然开口长5 m,宽2 m。

1.2 隧道污染物排放量

污染物排放量计算中是以交通量与污染物基准排放量为主要参数。本文根据《城市道路设计规范》(CJJ37—90)对隧道交通量进行预测,同时参考《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026—1999)中采用的基准排放量,并以按每年1%的折减率进行计算获得的排放量作为设计年限(2023年)的污染物排放量。行车速度选取最小正常工况20 km/h和较有代表性的60 km/h。交通量预测结果及CO排放量见表1。

表1 不同车速下隧道通行能力及CO排放量

Tab.1 Tunnel traffic capability and CO emission at different vehicle speeds

行车速度/ (km·h ⁻¹)	高峰车流量/ (pcu·h ⁻¹)	CO排放基准/ [m ³ ·(km·veh) ⁻¹]	CO排放总量/ (m ³ ·s ⁻¹)
20	3 312	0.01	0.065
60	3 218	0.01	0.021

1.3 基本作用力

由于隧道内空气流动的复杂性,在满足设计计算精度的前提下,在对隧道通风情况进行计算时做出如下假设:流体是不可压缩气体、连续介质,气流为稳定流,有害气体沿隧道一维分布。隧道自然开口的气流是流出还是流入隧道取决于自然开口底部与外界大气之间的压差:当自然开口底部压力大于外界时,隧道内的气体通过自然开口向外流出;反之,则隧道外的新鲜空气流入隧道内。同样,隧道的通风量和作用在隧道内空气上的作用力密切相关。空气流动受到的作用力包括以下4大类:隧道内的自然风力、交通通风力、射流风机升压力、空气流动所产生的通风阻力。自然开口底部静压力与4种作用力的关系式如下:

$$\Delta P_{ji} = \Delta P_{jif} + \Delta P_{+jf} - \Delta P_{zk} - \Delta P_{zr}, \quad (1)$$

式中, ΔP_{ji} 为自然开口底部静压力; ΔP_{zr} 为自然风力; ΔP_{jif} 为交通风力; ΔP_{+jf} 为射流风机的增压力; ΔP_{zk} 为通风阻力。

通过自然开口底部静压,可以计算得到通过自然开口的进、排风风速和进、排风量,并根据CO的排放速率计算出空气中CO的浓度。

2 热压作用对自然开口通风效果的影响

车辆在隧道内行驶,会使隧道环境的空气温度上升,隧道内外会产生热压差。对于顶部设置自然开口的隧道,热压差会对隧道内污染物的稀释和分流作用产生影响。本小节通过对自然开口和射流风机都均匀布置、车速为20 km/h时,考虑热压作用的隧道通风效果的计算研究,来分析正常工况下热压对隧道通风效果的影响。不同风速下隧道内空气对应的稳定温度所需时间和温度值是不同的。在隧道用水量为10 g/(m·s)、均匀发热量等于100 W/m以及风速为2 m/s时,在隧道正常运行12个月后,隧道内空气温度基本达到稳定状态,约为25℃^[5]。本小节设置了1个不考虑热压作用的基准工况和4个考虑热压作用的计算工况,计算热压作用对应的室外温度,分别取天津地区冬季极限温度、冬季最

冷月份平均温度、夏季最热月份平均温度、夏季极限温度。自然开口均匀布置位置如图 1 所示。根据式 (2)

$$\rho_{CO} = \rho + \frac{q_{CO} \cdot n \cdot l}{L \cdot Q_{req(CO)}}, \quad (2)$$

式中, ρ_{CO} 为隧道内某点的 CO 浓度; ρ 为隧道入口或计算点上游自然开口处的 CO 浓度; q_{CO} 为 CO 的基准排放量; n 为同时处在隧道内车辆数; l 为计算点到隧道入口或上游自然开口的距离; L 为隧道长度; $Q_{req(CO)}$ 为稀释 CO 的通风量。

对各工况分别进行计算, 结果见表 2, 隧道 CO 浓度分布规律见图 2 所示。

表 2 热压作用效果计算结果

Tab. 2 Calculation result of thermal pressure effect

工况 编号	隧道外 空气平 均温 度/°C	自然开口通风量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)			出洞口 通风量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	最高 CO 浓度/ ($\times 10^{-6}$)	平均 CO 浓度/ ($\times 10^{-6}$)	出口 CO 排放总 量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
		A	B	C				
工况 1	25	-118.3	-32.1	100.1	252.1	120.5	59.7	0.063 8
工况 2	-20	-112.3	-31.5	93.8	248.6	123.4	58.2	0.064 7
工况 3	-5.5	-114.4	-31.7	95.9	249.8	122.4	57.7	0.064 3
工况 4	26	-118.4	32.1	100.3	252.2	120.4	56.8	0.063 7
工况 5	42	-120.0	32.2	101.9	253.2	119.6	56.4	0.063 6

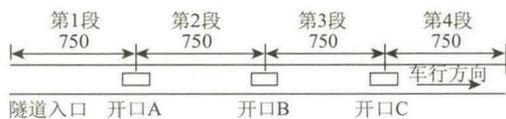


图 1 自然开口均匀布置示意图 (单位: m)

Fig. 1 Uniform layout of natural openings (unit: m)

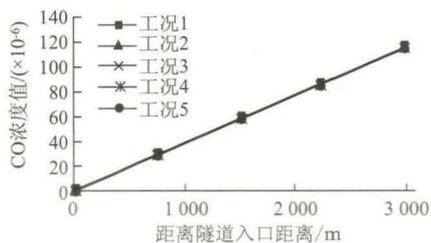


图 2 隧道 CO 浓度分布情况

Fig. 2 CO concentration distribution in tunnel

从图表中可以看出, 各工况隧道 CO 平均浓度与忽略热压时隧道 CO 平均浓度相差不超过 2.57%; 隧道出口污染物排放总量基本相当, 相差不超过 2.40%。当隧道内空气温度高于隧道外空气温度时, 热压作用会增强自然开口的排风作用, 有利于隧道内的污染物的分流。反之, 热压作用会增强自然开口的进风作用, 有利于隧道内污染物浓度的稀释。

由于计算模型的隧道进出口高差很小, 热压作用对隧道纵向通风效果影响尤为微弱。考虑热压后隧道内的污染物浓度与忽略热压的分布情况基本相同, 热压作用在隧道正常运营通风中可以不予考虑。

3 不开设自然开口隧道沿程 CO 分布规律

在顶部不开设自然开口的公路隧道通风中, 根据公式 (2), 在交通量和行车速度一定的条件下, 理论上隧道内污染物浓度沿隧道长度方向表现为线性增长关系。根据杜锋等 [7] 对交通流量相对较大的南京玄武湖隧道沿程 CO 浓度的测试数据, 绘制了南京玄武湖隧道以及采用本计算模型计算的行车速度为 60 km/h 时的隧道沿程 CO 浓度分布 (玄武湖隧道最大行车速度 60 km/h, 交通量 3 576 pcu/h, 双洞双向, 长度为 2 300 m)。从图 3 可以看出:

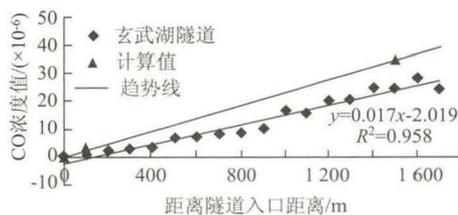


图 3 玄武湖隧道理论计算与实测 CO 浓度

Fig. 3 Calculated value and measured value of CO concentration in Xuanwu Lake tunnel

实际隧道虽然受到车间距不均匀性以及运行车速随机变化的影响, 但是隧道沿程 CO 浓度分布依然与距隧道入口距离呈现较强的正线性相关性; 由于受运行车速以及交通量差异的影响, 隧道内沿程 CO 浓度分布的线性斜率存在差异。根据上述分析可以得出, 采用理论方法分析隧道内 CO 的浓度分布是可行的。隧道内污染物浓度沿隧道长度方向呈现线性增长关系。在已知大气中 CO 背景浓度的情况下, 求得隧道洞口处的 CO 浓度, 便可以知道隧道内各处的 CO 浓度。

表 3 为行车速度分别在 20 km/h 和 60 km/h 条件下, 隧道内风速和隧道出口处的 CO 浓度情况。不开设自然开口的工况称为基准工况, 分别表示为基准工况 1 和基准工况 2。

表 3 隧道出口 CO 浓度

Tab. 3 CO concentration at tunnel exit

工况	CO 排放总量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	通风量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	风速/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	CO 出口浓度/ ($\times 10^{-6}$)
基准工况 1	0.065	519.5	6.93	125.1
基准工况 2	0.021	633.9	8.45	33.1

从表3中可以看出,基准工况2的通风量较大。这主要是因为,在单向行驶隧道中,车辆行驶产生的交通风是通风的主要动力,而交通风的大小是由行车速度和车流量来决定的,行车速度和车流量越大,通风量越大。从表中还可以看出,行车速度越大,在整个隧道内产生的CO总量越少。

在未设置自然开口的情况下,隧道内污染物浓度最大的位置一般为隧道洞口。因此需要考虑洞口污染物对周围环境的影响,根据隧道洞口污染物扩散的经验公式:

$$C_x = C_0 \cdot \exp\left[-a\left(\frac{x}{F_v}\right)^m\right], \quad (3)$$

式中, C_x 为距洞口 x 处的污气浓度; C_0 为排气洞口处的污气浓度; x 为沿隧道轴线距洞口距离; F_v 为洞口横截面面积。计算获知在基准工况1和基准工况2下,分别在隧道洞口外68.5m和46.3m达到CO浓度要求。隧道洞口处的CO的排放浓度和排放量对洞口外CO浓度的分布影响巨大,当洞口的CO排放浓度较高时,会影响到周围环境的空气质量,因此需要开设通风口,以降低隧道洞口的排污浓度。

4 自然开口均匀布置时射流风机位置对隧道通风效果的影响

采用自然开口排出隧道内污染物的方法将会对地表的空气造成污染,因此,需对污染情况进行评价。根据《环境空气质量标准》和《公路隧道通风照明设计规范》等关于排风污染物浓度的规定,隧道自然开口的排风污染物浓度应低于规定的浓度限值,并根据自然开口地上的环境要求适当调节排污浓度,以减少对周围环境造成的影响,满足环评要求。当不能满足环评要求时,需要改变自然开口的位置或增大隧道的通风量,以达到稀释污染物浓度的目的。自然开口处污染空气扩散到大气中,其浓度服从 y 与 z 两个坐标方向 (x 为平均气流方向, y 为垂直于 x 轴的水平方向, z 为竖直方向) 上的二维正态分布,当两坐标方向的随机变量独立时,分布密度为每个坐标方向的一维正态分布密度函数的乘积^[8]。

自然开口和隧道出口CO排放速率的影响因素主要是隧道内CO的浓度分布及通风量,根据第3节的分析,CO在隧道内的沿程分布呈线性增加的特点,而自然开口的通风量主要由通风口的结构形式和通风井底部压力决定,因此可以根据上述条件,计算

自然开口的通风量及CO浓度。

童艳和苏荣华等通过模型试验验证了根据质量平衡原则、能量守恒原则和几点压力平衡原理建立的隧道气流流动数学模型较接近实际情况,能较好地反映竖井型通风隧道内的气流流动状况^[9]。为了验证这一规律,本课题设计了如下模型试验,实验台如图4所示。

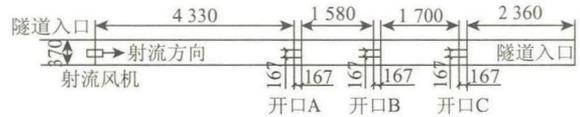


图4 模型实验台(单位:m)

Fig. 4 Model test bench (unit: m)

开启射流风机,模型汽车(尺寸为0.36m×0.15m×0.13m)车速为14km/h,车间距为3.5m,共设置方形通风竖井3个,竖井设置位置及尺寸如图5所示。待通风状况稳定后,利用风量罩,分别测量3个竖井和隧道出口通风量。同时采用建立的数学模型计算模型试验工况下3个自然开口和5隧道出口的通风,对比结果如图5所示。

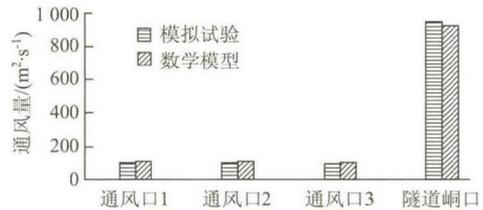


图5 自然开口及隧道出口通风量

Fig. 5 Ventilation rates at natural opening and tunnel exit

从图5可以看出,数学模型的计算结果与模型试验的试验结果十分接近,这说明利用数学模型计算隧道的风量分配是可行的。考虑CO的扩散速度较快,同一断面上CO的浓度相同,因此CO分布可以通过气流流动状况确定,根据CO的排放速率可计算出隧道中不同位置的CO浓度。

本节通过研究自然开口均匀布置在隧道顶部时,射流风机位置对隧道通风综合效果的影响,以期根据通风需求优化射流风机的布置位置。

根据射流风机与自然开口的不同相对位置,共设置9种情况,其相对位置描述如表4所示。

图6、图7为自然开口均匀布置,车速分别为20km/h和60km/h条件下隧道CO浓度分布图和隧道出口污染物排放总量柱状图。

注:下图图例中各工况后的“20”、“60”代表隧道中车辆的速度,单位为km/h。

表 4 风机与自然开口的位置关系

Tab. 4 Relation of jet fan of positions with natural opening positions

工况编号	第 1 段射流风机数量	第 2 段射流风机数量	第 3 段射流风机数量	第 4 段射流风机数量
1	12	0	0	0
2	0	12	0	0
3	0	0	12	0
4	0	0	0	12
5	3	3	3	3
6	2	2	2	6
7	0	0	6	6
8	0	0	4	8
9	0	0	2	10

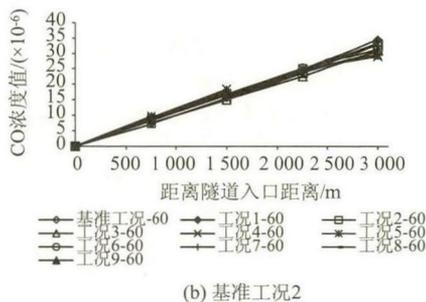


图 6 20 km/h、60 km/h 车速下隧道 CO 浓度分布图
Fig. 6 CO concentration distribution in tunnel
(20 km/h and 60 km/h vehicle speeds)

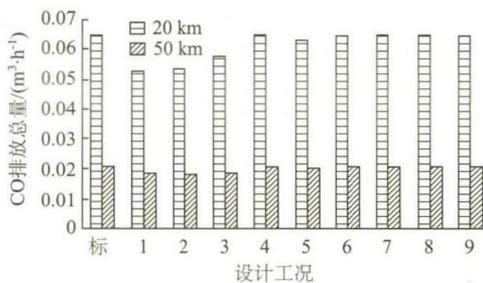


图 7 不同车速下隧道出口 CO 排放总量

Fig. 7 CO emission at tunnel exit at different vehicle speeds
从以上计算结果中可以看出, 在不同的车速下, 各工况隧道内污染物分布规律十分相似、洞口处污染物排放总量比例变化趋势基本相同。鉴于隧道内污染物浓度沿隧道长度一般呈线性增长的趋势, 出

口浓度最高, 且污染物排放总量最大, 因此本文重点比较出口处的污染物浓度和总量。

设置自然开口后, 隧道内污染物浓度并非一定低于不布置自然开口的情况。如工况 1, 由于自然开口的分流作用, 隧道后部通风量小于基准工况, 因此隧道出口的 CO 浓度比不布置自然开口还要大, 工况 1-20 比基准工况 1 大 11.0%, 对降低隧道内污染物浓度起到消极的作用。但也正是由于自然开口的分流作用, 工况 1 隧道出口的污染物排放总量较小, 将减小对周边环境的影响范围。

从图中可以看出, 布置在自然开口后面的风机越多, 自然开口的补风作用就会越强, 隧道出口污染物浓度呈现越低的趋势; 同时, 自然开口的排风作用就会越弱, 分污效果越差。在相同的排风量下, 自然开口位置越靠近隧道出口, 排出空气中污染物浓度相对越高, 即在多自然开口通风方案中, 将距离隧道出口较近的自然开口作为排风自然开口, 其分污效果更为明显。

鉴于此, 在工程应用中, 应综合考虑隧道污染物的浓度标准和排放口污染物排放总量的限制, 合理布置射流风机, 以便利用射流风机的调压作用满足补风或排风需求。

5 自然开口集中布置时射流风机位置对隧道 CO 浓度分布的影响规律

根据实际工程需要, 某些隧道 (一般为穿山公路隧道) 的通风设计只要保证隧道内污染物浓度符合卫生标准即可, 而某些隧道 (一般为城市公路隧道) 除了保证隧道内的卫生标准外, 还要避免排放口污染物排放总量过大, 不满足环评要求。根据通风目的不同, 自然开口集中布置更为有利, 鉴于此, 本节分别针对自然开口集中布置在隧道前部、中部和后部 (如图 8) 条件下, 通过改变射流风机布设的位置及台数, 来研究不同工况下隧道 CO 浓度分布规律。共设置 6 个研究工况, 其描述如表 5 所示。

表 5 工况描述

Tab. 5 Working conditions

工况编号	自然开口前射流	自然开口后射流
	风机数量	风机数量
1	12	0
2	10	2
3	8	4
4	4	8
5	2	10
6	0	12

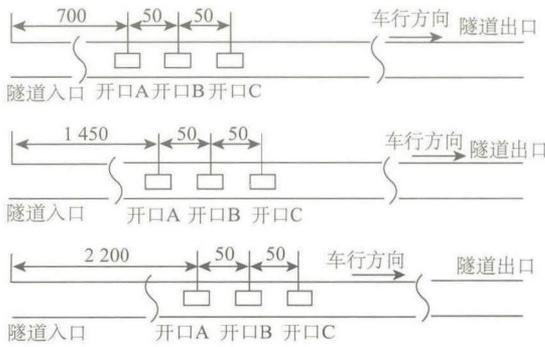


图8 集中布置在隧道前部、中部、后部自然开口位置分布 (单位: m)

Fig. 8 Layout of natural openings centralized at front, middle and back of tunnel (unit: m)

5.1 自然开口集中布置在隧道前部 CO 浓度分布

图9是自然开口集中布置在隧道前部,车速分别为20 km/h (基准工况1)和60 km/h (基准工况2)条件下隧道CO浓度分布图。

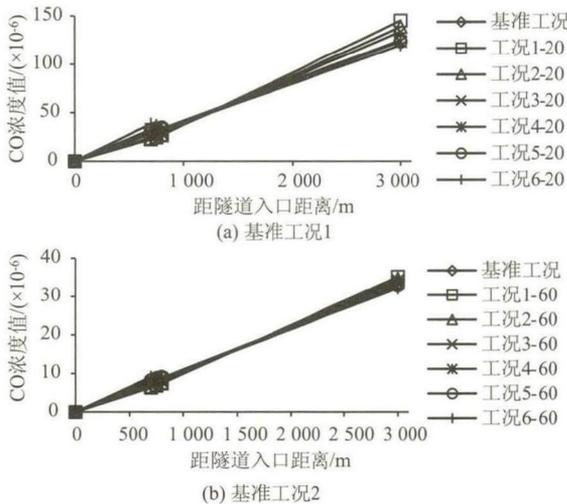


图9 20 km/h、60 km/h 车速下隧道 CO 浓度分布图

Fig. 9 CO concentration distribution in tunnel (20 km/h and 60 km/h vehicle speeds)

隧道出口 CO 排放总量和 CO 浓度如表6所示。

表6 隧道出口 CO 排放总量和 CO 浓度

Tab. 6 CO emission and CO concentration at tunnel exit

工况编号	出口浓度/($\times 10^{-6}$)		出口 CO 排放量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	20 km/h	60 km/h	20 km/h	60 km/h
标准工况	125.0	33.1	0.065 0	0.021 0
工况 1	145.3	35.2	0.058 4	0.019 5
工况 2	138.8	34.7	0.059 3	0.019 7
工况 3	134.0	34.3	0.060 4	0.020 0
工况 4	123.7	33.5	0.063 6	0.020 7
工况 5	123.7	32.9	0.065 0	0.021 0
工况 6	119.9	32.2	0.065 0	0.021 0

注:自然开口和射流风机的相对布置位置使所有的自然开口都为进风口时,隧道出口的 CO 排风量为定值。

自然开口集中布置在隧道前部时,自然开口前后隧道 CO 浓度曲线斜率变化不大,其引起隧道内通风量的变化效果不明显,对隧道内污染物浓度分布影响较小,对通风状况的改善效果不显著。

5.2 自然开口集中布置在隧道中部 CO 浓度分布

图10是自然开口集中布置在隧道中部,车速分别为20 km/h (基准工况1)和60 km/h (基准工况2)条件下隧道CO浓度分布图。

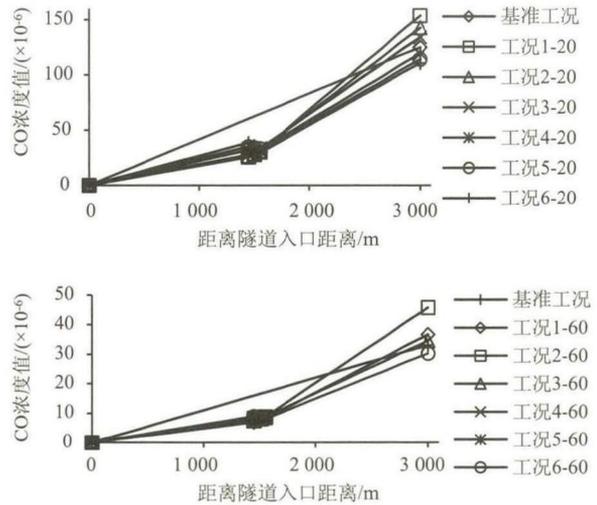


图10 20 km/h、60 km/h 车速下隧道 CO 浓度分布图

Fig. 10 CO concentration distribution in tunnel (20 km/h and 60 km/h vehicle speeds)

隧道出口 CO 排放总量和 CO 浓度如表7所示。

表7 隧道出口 CO 排放总量和 CO 浓度

Tab. 7 CO emission and CO concentration at tunnel exit

工况编号	出口浓度/($\times 10^{-6}$)		出口 CO 排放量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	20 km/h	60 km/h	20 km/h	60 km/h
标准工况	125.0	33.1	0.065 0	0.021 0
工况 1	153.6	36.7	0.059 3	0.019 8
工况 2	142.6	45.8	0.060 8	0.019 1
工况 3	134.1	34.6	0.062 6	0.020 5
工况 4	119.3	32.3	0.065 0	0.021 0
工况 5	114.0	31.2	0.065 0	0.021 0
工况 6	110.5	30.3	0.065 0	0.021 0

自然开口集中布置在隧道中部,自然开口后隧道内污染物浓度增加率明显变大,说明自然开口后通风量减小,自然开口排出的空气中污染物浓度较低,未充分利用此部分空气来降低自然开口后隧道内污染物浓度,对降低隧道出口污染物浓度起到消极的作用。

5.3 自然开口集中布置在隧道后部 CO 浓度分布

图11是自然开口集中布置在隧道后部,车速分

别为 20 km/h (基准工况 1) 和 60 km/h (基准工况 2) 条件下隧道 CO 浓度分布图。

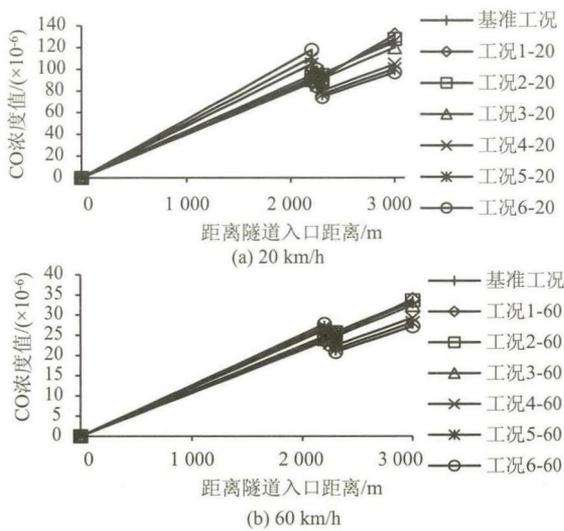


图 11 20 km/h、60 km/h 车速下隧道 CO 浓度分布图

Fig. 11 CO concentration distribution in tunnel (20 km/h and 60 km/h vehicle speeds)

隧道出口 CO 排放总量和 CO 浓度如表 8 所示。

表 8 隧道出口 CO 排放总量和 CO 浓度

Tab. 8 CO emission and CO concentration at tunnel exit

工况编号	出口浓度/($\times 10^{-6}$)		出口 CO 排放量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	20 km/h	60 km/h	20 km/h	60 km/h
标准工况	125.0	33.1	0.065 0	0.021 0
工况 1	131.7	33.9	0.050 7	0.0180
工况 2	127.7	33.6	0.058 4	0.019 6
工况 3	119.9	32.4	0.063 8	0.020 6
工况 4	104.6	29.3	0.065 0	0.021 0
工况 5	100.4	28.1	0.065 0	0.021 0
工况 6	97.2	27.2	0.065 0	0.021 0

自然开口集中布置在隧道后部, 自然开口群后隧道内污染物浓度增加幅度较自然开口在隧道前部、中部集中布置有所下降, 其对降低隧道出口污染物浓度起到了相对积极的作用。但是在自然开口群前部, 隧道内的通风量较低, 污染物浓度增加速度较快。

从图中可以看出, 自然开口的布置位置对 20 km/h 车速下隧道 CO 浓度分布影响更为明显。自然开口集中布置在隧道后部隧道出口污染物浓度最低, 各工况隧道出口污染物浓度平均值分别比集中布置在前部和中部的小 11.1% 和 12.2%。尽管自然开口集中布置在隧道中部时污染物平均浓度最低, 各工况隧道内污染物浓度的平均值分别比集中布置在前部和后部的小 24.0% 和 24.4%, 但是隧道通风

设计中更加关注最大浓度是否超标, 因此出口浓度的高低更为重要。

在相同的行车速度和自然开口布置情况下, 隧道出口 CO 浓度从工况 1 到工况 6 依次降低, 说明越多的射流风机布置在自然开口群后端, 隧道出口的实际通风量越大, 对降低隧道出口污染物浓度越有利。

5.4 开设自然开口后隧道洞口污染物排放对周围环境的影响

隧道的自然开口会起到分流隧道污染物或稀释污染物的作用, 同时会降低隧道洞口污染物排放浓度及污染物排放总量。当自然开口集中布置在隧道后部, 并将较多的射流风机布置在自然开口群后, 可有效降低隧道出口污染物浓度。自然开口集中布置在隧道后部时, 在工况 6-20 和工况 6-60 下, 隧道洞口的污染物排放浓度最低, 分别在隧道洞口外 64.5 m 和 40.5 m 达到 CO 浓度要求。与不开设自然开口的情况相比, 隧道出口外 CO 浓度分布有了明显的下降, 减小了对周围环境的影响。

6 结论

(1) 热压作用对开设自然开口的城市隧道通风效果的影响可以忽略。

(2) 设置自然开口后, 隧道内污染物浓度分布情况并非一定优于不布置自然开口。

(3) 在多自然开口通风方案中, 将距离隧道出口较近的自然开口作为排风自然开口, 其分污效果更为明显。

(4) 对于自然开口采用集中布置的情况, 将自然开口集中布置在隧道的后部, 对降低隧道出口污染物排放速率有相对积极的作用; 将自然开口集中布置在隧道中部, 隧道内的污染物平均浓度更低; 将较多的射流风机布置在自然开口群后部, 可增大隧道的实际通风量。

参考文献:

References:

[1] XING Jin-cheng, WANG Xiao-lei. Model Experiment Research On Natural Ventilation Of Urban Tunnel With Roof Openings [C] // 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE). Lushan: IEEE, 2011: 5193 - 5196.

[2] 葛家美, 毕海权. 顶部开孔组合方式对城市公路隧道自然通风的影响 [J]. 制冷与空调, 2011, 25 (1): 91 - 95.

- GE Jia-mei, BI Hai-quan. Influence of the Opening Combinations of Urban Tunnel on Natural Ventilation [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25 (1): 91-95.
- [3] 姚敏丽, 雷波, 张光鹏. 公路隧道通风中 CO 和 NO_x 浓度设计限值的分析 [J]. 制冷与空调 (四川), 2005 (增1): 145-147.
- YAO Min-li, LEI Bo, ZHANG Guang-peng. Analysis on Permissible Concentration Limits of CO and NO_x in Road Tunnel Ventilation [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2005 (S1): 145-147.
- [4] 郭春, 王明年, 李玉文, 等. 公路隧道通风 CO、烟雾基准排放量折减率研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (10): 105-109.
- GUO Chun, WANG Ming-nian, LI Yu-wen, et al. Research on Discount Rate of CO and Smoke Base line Emission in Road Tunnel Ventilation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (10): 105-109.
- [5] 麦继婷, 陈春光. 秦岭特长隧道内温度预测 [J]. 西南交通大学学报, 1998, 33 (2): 153-157.
- MAI Ji-ting, CHEN Chun-guang. Prediction of Temperatures in the Qinling Extra-long Tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1998, 33 (2): 153-157.
- [6] JTJ026—1999, 公路隧道通风照明设计规范 [S]. JTJ026—1999, Specifications for Design of Ventilation and Lighting of Highway Tunnel [S].
- [7] 杜峰, 张村峰, 鲁钢. 公路隧道内废气分布规律的研究 [J]. 公路隧道, 2012 (02): 27-30.
- DU Feng, ZHANG Cun-feng, LU Gang. Research on Distribution of Polluting Gases in Highway Tunnel [J]. Highway Tunnel, 2012 (2): 27-30.
- [8] 沈恒根, 钟秦. 大气污染控制原理与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- SHEN Heng-gen, ZHONG Qin. Principles and Processes of Air Pollution Control Engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [9] 童艳, 苏荣华, 龚延风. 竖井型自然通风公路隧道气流与污染物分布的影响因素研究 [J]. 建筑科学, 2011, 27 (6): 92-98.
- TONG Yan, SU Rong-hua, GONG Yan-feng. Study on Influence Factors about Airflow and Pollution Distribution for Road Tunnels with Shafts under Natural Ventilation Condition [J]. Building Science, 2011, 27 (6): 92-98.
- [10] 钟星灿, 曾臻. 自然通风公路隧道有害气体浓度分布 [J]. 铁道工程学报, 2006, (9): 44-49.
- ZHONG Xing-can, ZENG Zhen. Distribution of Harmful Gas Concentration in Highway Tunnel with Natural Ventilation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 99 (12): 44-49.
- [11] 周军莉, 张国强. 自然通风开口流量系数影响因素探讨 [J]. 暖通空调, 2006, 36 (12): 42-45.
- ZHOU Jun-li, ZHANG Guo-qiang. Discussion on Influencing Factors of Opening Discharge Coefficient in Natural Ventilation [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006, 36 (12): 42-45.
- [12] 宋国森, 胡斌. 特长公路隧道平导通风方案研究及优化 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (4): 84-95.
- SONG Guo-sen, HU Bin. Research and Optimization of Parallel Heading Ventilation Scheme for Super-long Highway Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (4): 84-95.
- [13] GB3095—2012, 环境空气质量标准 [S]. GB3095—2012, Ambient Air Quality Standards [S].
- [14] DG/TJ08—2033—2008, 道路隧道设计规范 [S]. DG/TJ08—2033—2008, Specification for Design of Road Tunnel [S].
- [15] 麦继婷, 陈春光. 秦岭特长隧道内温度预测 [J]. 西南交通大学学报, 1998, 33 (2): 153-157.
- MAI Ji-ting, CHEN Chun-guang. Prediction of Temperatures in the Qinling Extra Long Tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1998, 33 (2): 153-157.
- [16] 江崇旭. 短竖井及射流风机位置对城市隧道通风效果的影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- JIANG Chong-xu. Research of Effect of Short Shafts' and Jet Fan's Position on Urban Tunnel's Ventilation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [17] 林卫, 朱培根. 竖井型城市隧道自然通风模型实验研究 [J]. 制冷空调与电力机械, 2011, 32 (4): 25-29.
- LIN Wei, ZHU Pei-gen. Study on the Natural Ventilation Model Experiment in City Tunnel with Vertical Shaft [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2011, 32 (4): 25-29.
- [18] COLELLA F, REIN G, CARVEL R O. Analysis of the Ventilation Systems in the Dartford Tunnels using a Multi-scale Modelling Approach [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010 (25): 423-432.
- [19] FAN C G, JI J, GAO Z H. Experimental Study of Air Entrainment Mode with Natural Ventilation using Shafts in Road Tunnel Fires [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 56 (1/2): 750-757.