

文章编号:1671-1637(2014)05-0029-07

大纵坡双洞隧道互补式通风运营测试

王亚琼^{1,2}, 胡彦杰^{3,4}, 邓敏^{3,4}, 夏丰勇¹, 谢永利¹

(1. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 弗吉尼亚理工大学
土木与环境工程系, 弗吉尼亚 黑堡 24061; 3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司,
湖北 武汉 430056; 4. 武汉中交交通工程有限责任公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:为解决大纵坡双洞隧道风量不平衡时,上坡隧道是否需要设置通风井的技术问题,以大别山公路隧道为实体工程,现场检测了互补式网络通风隧道内CO浓度、烟雾浓度和风速,分析了大纵坡隧道采用的双洞互补式网络通风方式中换气通道的作用和存在的问题。测试结果表明:互补式网络通风能够满足隧道内污染物浓度控制要求;2个换气通道能起到气流双向交换的作用,交换风量满足设计要求,互补式通风方案可行;上下行隧道通风负荷不平衡,对于纵坡较大的特长隧道,可以采用互补式通风,取消其上坡隧道的通风井。

关键词:隧道工程;互补式通风;污染物浓度;隧道风速;现场检测

中图分类号:U453.5

文献标志码:A

Complementary ventilation operational test in large longitudinal slope double-hole tunnel

WANG Ya-qiong^{1,2}, HU Yan-jie^{3,4}, DENG Min^{3,4}, XIA Feng-yong¹, XIE Yong-li¹

(1. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shannxi, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg 24061, Virginia, USA; 3. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, Hubei, China; 4. Wuhan Zhongjiao Traffic Engineering Co., Ltd., Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract: In order to solve the technical problem that whether ventilation shafts are needed to set up or not in upstream tunnel when the air inflow and outflow are imbalanced in the large longitudinal slope double-hole tunnel, Dabie Mountain Highway Tunnel was selected as an entity engineering for analysis. The CO concentration, visibility index, and air velocity in the complementary network ventilation tunnel were tested on site, and the effect and existing problem of ventilation channel in the double-hole complimentary network ventilation system were analyzed. Test result indicates that the complimentary network ventilation can meet the control criteria of contaminant concentration. Two ventilation channels can play the role of airflow bi-direction exchange, and the exchanged air volume can meet design requirement, therefore, the complementary ventilation plan is feasible. When ventilation loads in upstream and downstream tunnels are imbalanced, the complementary ventilation can be used instead of ventilation shaft in upstream tunnel for large longitudinal slope extra-long tunnel. 4 tabs, 7 figs, 16 refs.

Key words: tunnel engineering; complementary ventilation; contaminant concentration; air velocity in tunnel; on-site test

收稿日期:2014-03-20

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2014JM7245);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1502027,2013G3214011)

作者简介:王亚琼(1975-),男,安徽太湖人,长安大学副教授,工学博士,从事公路隧道结构与运营安全研究。

Author resume: WANG Ya-qiong (1975-), male, associate professor, PhD, +86-29-82334445, ys08@gl.chd.edu.cn.

0 引 言

随着公路建设的迅猛发展,特长公路隧道尤其是长度在 4 km 以上的隧道大量出现,这类隧道的运营问题受到广泛的关注。特长公路隧道内有害气体浓度高,排出或稀释相对困难,建设及运营中面临的首要问题便是隧道的通风问题。隧道通风研究主要集中在机械式通风方式的选择、通风井的设置、机械通风效果的评价及火灾下的通风模式等方面,隧道通风模式的研究陷入了瓶颈,尝试研究更新的通风模式相对较少,而互补式通风是对纵向通风更深层次的优化。在隧道通风研究方面,Bener 等首先提出了“双洞互补”的思路^[1],但并未对该方式进行深入研究;张光鹏等提出了空气交换法的理念,分析了该方法的应用范围和设计算法^[2],但没有应用到工程实践中;胡彦杰等依托大别山隧道,提出了双洞互补式通风设计方法,分析了竖井分段纵向通风和互补式通风的优缺点,采用互补式通风方式,可以在不修建通风井的情况下,满足隧道内通风要求,减小初期投资成本和运营管理费用,经济效益显著^[3];张世飏等对大别山公路隧道内 CO 浓度(体积分数)、烟雾(VI)浓度以及风速等进行了现场测试^[4];金文良等对新七道梁公路隧道内外气温、风速等气象条件进行了现场测试,研究了隧道内风速及洞内气温变化规律^[5];陈建勋等对公路隧道运营通风效果进行了现场实测,分析了隧道内污染物浓度的分布规律^[6];仇玉良等对喷射混凝土衬砌隧道通风阻力系数进行了测试研究,结果显示喷射混凝土作为隧道永久衬砌时通风阻力系数过大,不利于隧道通风^[7];王亚琼等利用隧道通风模型试验对不同通风方式进行了研究,分析了隧道内空气流场、压力场和烟雾浓度的分布规律^[8-11]。由于互补式通风研究和应用刚起步,互补式通风的效果和规律尚不清楚,因此,对互补式通风方式的应用测试与评价显得非常重要。本文分析了互补式通风作用原理,现场检测了在自然风和交通活塞风联合作用下隧道内的风速、污染物浓度和换气通道送、排风口的风速,评价了互补式通风效果。

1 双洞互补式通风设计理论

双洞互补式网络通风是全纵向射流通风加上

2 个换气通道,把原来左右隧道独立的通风模式结合起来,相互补充,把左右隧道的通风作为一个系统工程。其基本原理是当上下坡隧道需风量之和不大 2 个隧道的最大允许通风量之和时,在上下坡隧道之间开设 2 个通风联络风道,将 2 个隧道联系起来构成一个通风网络,将上坡隧道内污染严重的空气通过其中一个换气横通道输送到下坡隧道;同时在下坡隧道增设射流风机,增大新鲜空气的供给,将下坡隧道多余的新鲜空气通过另一个换气横通道输送到上坡隧道,稀释上坡隧道内污染空气,确保左右线隧道内污染物浓度都不超过限制值。与常规通风方案比较,互补式通风可以降低 2 个隧道总需风量和通风总能耗,上坡隧道可不设通风井,加快工程进度,减少前期投资和后期运营管理费用。

1.1 换气风道设置范围

互补式网络通风设计以污染物浓度不超标、短道不回流、功耗最低为准则,换气通道的设置范围非常关键,如果污染物浓度没有达到规定限制值就开始换气,会造成能源浪费,运营成本过高,如果污染物浓度已经超过规定限制值还没有换气,就不满足隧道的卫生标准,因此,在设计互补式通风时,首先要确定换气通道的设置位置。

双洞互补式换气通道的位置非常重要,如果换气通道位置安装不合适,互补式换气系统不仅无法发挥最佳效果,甚至对整个隧道通风系统都会产生不利影响,因此,需要综合考虑各种影响因素,确定合理的设置范围。图 1 为双洞互补式换气系统换气通道允许设置范围,其中左线为上坡隧道,右线为下坡隧道。 L_m 为上坡隧道污染物浓度的极值点,换气通道必须在 L_m 的右侧。 L_n 位置对应左右线污染物浓度相等点,如果在 L_n 的左侧换气,下坡隧道的浓度比上坡隧道高,失去了换气的意义,因此,换气必须在 L_n 的左侧。

根据互补式网络通风设计方法,换气风道设置范围计算公式如下

$$L_m = L_L - L_{L_{\max}}$$

$$L_{L_{\max}} = \frac{3.6\delta Q_L}{C_x K \sum_{M=1}^N N_M f_M}$$

$$L_n = \frac{q_L Q_R L_R L_L}{q_R Q_L L_L + q_L Q_R L_R}$$

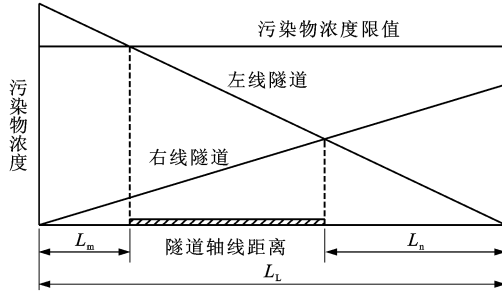


图1 互补式换气通道设置范围

Fig. 1 Setting range of complementary ventilation channel

$$C_x = \begin{cases} q_{CO} f_a f_d f_h f_{iv} & \text{按 CO 计算} \\ q_{VI} f_a f_d f_h f_{iv} & \text{按 VI 计算} \end{cases}$$

$$K = \frac{P_0 T}{P T_0}$$

式中: L_{Lmax} 为左线隧道在设计需风量下污染物浓度达到限制浓度时的长度; L_m 为从最左端到左线限制浓度极致点的距离; L_n 为从最右端到浓度相等点的距离; Q_L 为左线隧道设计需风量; Q_R 为右线隧道设计需风量; δ 为污染物浓度允许值; L_L 为左线隧道长度; L_R 为右线隧道长度; q_L 为左线隧道内污染物排放量; q_R 为右线隧道内污染物排放量; q_{CO} 为 CO 基准排放量; q_{VI} 为烟雾基准排放量; f_a 为考虑 CO 的车况系数; f_d 为车密度系数; f_h 为考虑 CO 的海拔高度系数; f_M 为考虑 CO 的车型系数; f_{iv} 为考虑 CO 的纵坡-车速系数; N 为车型类别数; N_M 为车型 M 的设计交通量; P_0 为标准大气压; P 为隧址设计气压; T_0 为标准气温; T 为隧道夏季的设计气温; C_x 为污染物 x 的浓度。

1.2 换气风量计算

在隧道通风中,上坡隧道和下坡隧道的需风量不尽相同,由于上坡隧道(左线)需风量大于全纵向通风的最大允许通风量,风机全部开启状态也不足以提供上坡隧道所需的新鲜空气量,依据双洞互补换气原理,为保证上坡隧道内的空气污染浓度不超过允许值,利用下坡隧道(右线)内的风机为上坡隧道提供不足的风量,因此,下坡隧道的设计风量要大于下坡隧道的实际需风量。图2为互补式通风计算,其中, L_1 、 L_2 、 L_3 、 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为图中所示的隧道长度, Q_{h1} 、 Q_{h2} 分别为对应横通道的换气量。

假设左右线隧道出口处污染物浓度相等,则有

$$\left(q_L - \frac{q_L L_3}{L_L Q_L} Q_{h1} + \frac{q_R R_1}{L_R Q_R} Q_{h2} \right) / (Q_L - Q_{h1} + Q_{h2}) =$$

$$\left(q_R + \frac{q_L L_3}{L_L Q_L} Q_{h1} - \frac{q_R R_1}{L_R Q_R} Q_{h2} \right) / (Q_R + Q_{h1} - Q_{h2})$$

经分析,当2个换气横通道换气风量相同时最

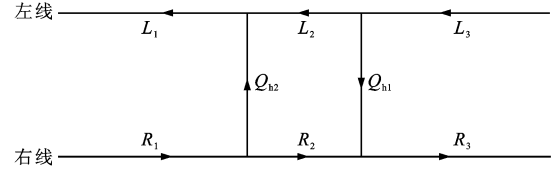


图2 互补式通风计算

Fig. 2 Complementary ventilation calculation

经济,换气风量计算公式为

$$Q_{h1} = Q_{h2} = \frac{Q'_L Q_R - Q'_R Q_L}{(Q_L + Q_R)(Q'_L L_3 / L_L Q_L - Q'_R R_1 / L_R Q_R)}$$

式中: Q'_L 、 Q'_R 分别为不设置互补式通风系统时左右线隧道需风量。

2 应用工程概况

大别山特长公路隧道是上海至成都高速公路湖北省内麻武段的控制性工程。隧址区域地形复杂,隧道最大埋深约为482 m,平均海拔高度为291 m。隧道为上下行分离式,左线长度为4 901 m,坡度为1.47%、1.97%,右线长度为4 908 m,坡度为-1.47%、-1.97%。两洞轴线相距40 m,设计行车速度为100 km·h⁻¹。预测近期2015年交通量为13 100 pcu·d⁻¹,远期2030年交通量为35 105 pcu·d⁻¹。经计算左线上坡需风量高达595 m³·s⁻¹,右线下坡需风量为278 m³·s⁻¹,通风负荷比为2.14,采用常规通风方式,左线上坡须设置竖井分段通风。

为解决两洞风量不平衡的问题,取消上坡隧道的通风斜井和大型轴流风机,降低隧道前期通风土建、设备费用和后期运营费用,采用双洞互补式网络通风方式,在两隧道间设置2个横向联络风道,一个将下坡隧道富余新鲜空气通过横通道送入上坡隧道,满足上坡隧道内污染物浓度不超标的要求,另一个将上坡隧道大部分污染空气经过横通道送入下坡隧道,从下坡出口排出,上下坡隧道的通风形成互补式网络,在充分利用下坡隧道富余风量的同时,也降低了上坡隧道的风速。

3 互补式通风运营测试

3.1 测试原理与内容

汽车在隧道内行驶时排放的污染物有机动车排放的细颗粒物以及机动车轮胎、刹车磨损和道路扬尘等非排放性粗颗粒物。隧道内污染空气主要包括一氧化碳、氧化氢、碳化氢、氧化硫、醛等对人体有害的物质;柴油车除排放对人体有害的气体外,还排放大量的游离碳素(煤烟);部分粉尘也被汽车卷起带入隧道中。粉尘和烟雾对隧道内空气的污染用烟雾

浓度表示,烟雾浓度本质上是大气物理学能见度理论中的消光系数,通过测定光线在烟雾中的透过率可以计算出烟雾浓度 k 。隧道通风照明规范中的烟雾浓度 k 与100 m厚烟雾的光线透过率 τ_R 之间的关系为

$$k = -\frac{1}{100} \ln(\tau_R)$$

在纵向通风的隧道中,每一个通风区段内污染物浓度在隧道纵向上基本成线性递增分布。在不同通风区段内,隧道排风口、隧道出口位置和隧道内短道末端污染物浓度最大。选定CO和VI的浓度测试位置分别为隧道内中间段横通道排风口附近、短道末端、隧道出口附近,在左右隧道上述位置布设测试控制断面。采用便携式CO检测仪测试CO浓度;采用SH-1型光透过率仪(图3)测试VI浓度,通过测试光透过率反算烟雾浓度^[12-14]。



图3 SH-1型光透过率仪

Fig. 3 Light transmittance instrument of SH-1 type

风速测试分为直接法和间接法,本次测试采用数显风速仪直接测试法。测试时将隧道断面分成若干面积大致相等的小块(图4),每块的中心点为测试点,分别测试每小块面积的平均风速 v_1 、 v_2 、 \dots 、 v_j ,最后取各分块平均风速的平均值作为整个隧道断面的平均风速 v ,即

$$v = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_j}{j}$$

式中: j 为划分的等面积小块数。

每个分块测试点采集10次数据,取其平均值。现场的风速测试采用侧面法,即具体测试时,在每个测试断面处有测风员和记录员两人,测风员背向隧道壁站立,记录员与测风员在隧道纵向平行站立。采用侧面法时(图5),采集人员与风表同在一个断面内,造成流经风表的流速增加,这就需要对风速进行修正,如果测得测试断面的平均风速为 v ,则修正平均风速 v' 为^[15-16]

$$v' = \frac{v(S - 0.4)}{S}$$

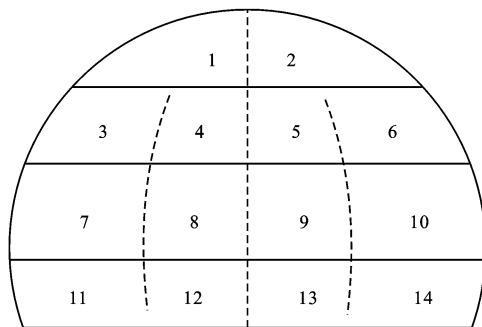


图4 隧道断面测区划分

Fig. 4 Test area division of tunnel section

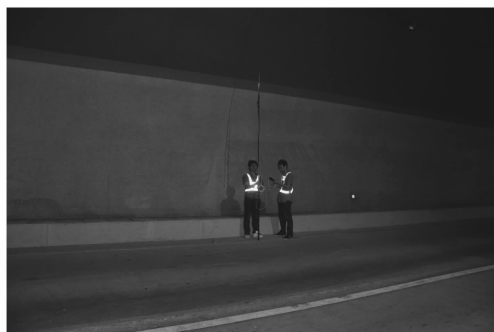


图5 隧道内风速测试

Fig. 5 Test of tunnel ventilation

式中: S 为所测隧道断面的面积;0.4为人体占据的隧道的断面积。

风速测试仪器为ZRQF-F30J型智能风速仪,在正常运营工况下,测试隧道内的风速、CO浓度、VI浓度和换气横通道送、排风口的风速,结合管理部门近期的交通量数据,对该阶段的运营效果进行验证和分析。

3.2 测试断面布置

主隧道内风速测试断面和CO浓度、VI浓度测试断面布置见图6,图中第I~VI组为风速测试断面,1#~6#为CO和VI测试断面。根据规范要求和现场测试条件测试运营工况下CO、VI浓度,测试时隧道交通流量较小,在行车条件下,CO浓度测试采样点距离隧道边墙0.5 m,距离隧道路面高度为1.5 m;VI浓度测试采样点分别在检修道上和已经封闭的半幅路面上,采用光透过率仪进行测试。

3.3 测试工况

根据射流风机和轴流风机的开启状态分为6种工况:工况1,隧道内风机未开启,测试自然通风状态下隧道内的风速;工况2,上下行线隧道分别将射流风机开启一半(即3组6台),换气通道关闭;工况3,上下行线隧道内射流风机全部开启(即5组10台),

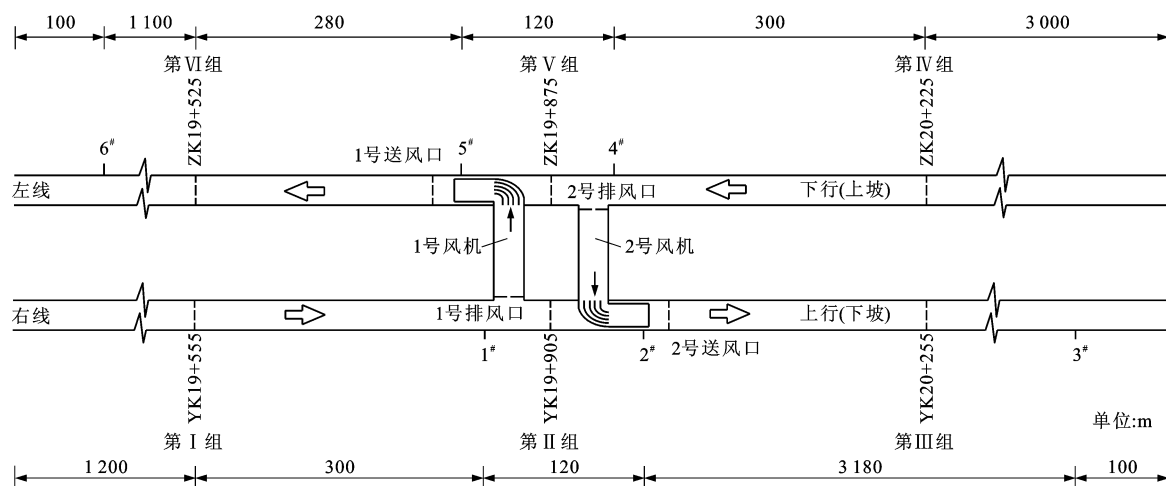


图6 风速与污染物浓度测试断面

Fig. 6 Test sections of wind speed and contaminant concentration

换气通道关闭;工况4,上下行线隧道内射流风机全部关闭,2个换气横通道内轴流风机全部开启;工况5,分别将射流风机开启一半(即3组6台),换气横通道内轴流风机全部开启;工况6,上下行线隧道内射流风机全部开启,换气横通道内轴流风机全部开启。该项测试是在隧道内交通未中断条件下进行的,每个隧道封闭右侧行车道进行测试。测试时间段选择在10:00~12:00、16:00~18:00这2个高峰小时交通流时间段上。

4 互补式通风测试结果分析

4.1 隧道风速测试

在现场测试中变换测试工况,分别检测不同工况、时段、断面的风速,通过计算分析得到每组断面的平均风速,见表1,不同工况下每组断面的风速变化曲线见图7。送、排风口是隧道通风的关键部位,重点测试了换气通道送、排风口的风速分布。

表1 各工况下平均风速

Tab. 1 Average wind speeds under different conditions $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

工况	测试断面					
	I	II	III	IV	V	VI
1	3.19		3.38	1.75		1.86
2	4.29		4.15	3.38		3.10
3	4.75		4.61	3.90		4.30
4	3.03	1.95	3.13	2.58	1.70	2.86
5	4.10	2.22	3.90	4.29	2.13	4.67
6	4.91	2.30	4.91	4.99	2.22	5.26

4.2 隧道CO浓度与VI浓度测试

通过现场实测和对测试数据的分析处理,计算得到不同工况下CO浓度与VI浓度,表2为工况

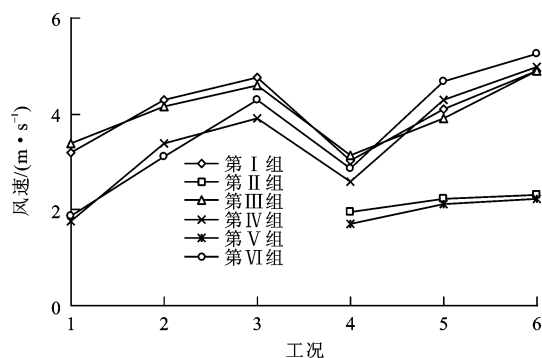


图7 平均风速变化

Fig. 7 Change of average wind speed

1、3、4、6下的CO浓度与VI浓度,由于工况1、3换气通道未开启,因此,只测试两隧道出口的污染物浓度,工况4、6为隧道内换气通道均打开,可以测试各测点的污染物浓度值。

5 测试与设计结果对比分析

5.1 风量测试与设计结果对比分析

通过风速测试反算到隧道断面的需风量,各工况下隧道需风量见表3,为了进一步核对已测风速风量是否能满足已有的设计要求,现根据各种工况下可提供的平均风量值和预测的车型交通组成在最不利的情况下反算可以满足的运营交通量,再将其与现有的交通量进行对比。

假定交通量为5000 pcu · d⁻¹。根据现有的交通组成,计算各类交通量,通过计算可得需风量为238.23 m³ · s⁻¹。以此类推,根据测得的风速计算得到近期能满足的交通量见表4。

由计算可知,近期交通工况1~3均满足目前交通流条件下隧道通风要求;远期在开启换气通道后,

表 2 CO 与 VI 浓度值

Tab. 2 Concentrations of CO and VI

断面		1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
工况 1	CO 浓度/ 10^{-6}			8			12
	VI 浓度/ m^{-1}			0.000 58			0.000 51
工况 3	CO 浓度/ 10^{-6}			9			7
	VI 浓度/ m^{-1}			0.000 55			0.000 55
工况 4	CO 浓度/ 10^{-6}	8	8	8	13	12	12
	VI 浓度/ m^{-1}	0.000 57	0.000 58	0.000 58	0.000 58	0.000 59	0.000 57
工况 6	CO 浓度/ 10^{-6}	6	4	5	4	6	4
	VI 浓度/ m^{-1}	0.000 54	0.000 56	0.000 56	0.000 56	0.000 57	0.000 57

表 3 隧道平均风量

Tab. 3 Average air volumes of tunnel $m^3 \cdot s^{-1}$

工况	1	2	3	4	5	6
左线	123.05	221.41	279.94	185.78	271.78	281.64
右线	224.48	288.45	319.62	210.64	239.07	267.11

表 4 交通量计算结果

Tab. 4 Calculation result of traffic volume pcu

工况	1	2	3	4	5	6
左线	4 053	5 871	7 268	4 930	6 945	7 135
右线	4 709	5 942	6 717	4 468	5 125	5 901

由于交通流量和组成会发生较大变化,结果供参考。

(1)从实测结果来看,在工况 3 下,隧道左右线的平均风量分别为 279.94 、 $319.62 m^3 \cdot s^{-1}$,实测需风量大于设计需风量,满足设计要求。

(2)在工况 6 下,根据风量守恒及连续性方程,由左线断面 4 与断面 5 风量的差值计算得到换气通道的风量为 $126.42 m^3 \cdot s^{-1}$,右线断面 1 与断面 2 风量的差值计算得到换气通道的风量为 $144.8 m^3 \cdot s^{-1}$,两者均大于近期设计换气风量要求的 $120 m^3 \cdot s^{-1}$,因此,互补式通风可行,能够满足隧道正常运营通风的要求。

(3)在工况 1 下测得隧道左线平均风速为 $3.09 m \cdot s^{-1}$,右线为 $1.81 m \cdot s^{-1}$,可以满足现有交通量下的运营需要;工况 4 与工况 1 的区别在于是否开启横通道内轴流风机,测试结果表明换气横通道内轴流风机开启与否对主隧道内风速影响较小,轴流风机开启没有出现主隧道内风速叠加效应。

(4)通过测试可知,1 号换气横通道送风口和排风口的风速均值分别为 13.67 、 $10.46 m \cdot s^{-1}$,而 2 号换气横通道送风口和排风口的风速均值分别为 12.58 、 $10.31 m \cdot s^{-1}$,送风口面积为 $13.81 m^2$,排风口面积为 $34.51 m^2$ 。通过计算可知,在风流通过轴流风机换气的过程中,风阻较大,风量损失较高。

5.2 污染物测试结果与设计对比分析

在目前运营工况下,交通量较小,CO 浓度在 $(4 \sim 13) \times 10^{-6}$ 之间。从实测结果来看,近期运营时,不开启射流风机,隧道内的 CO 浓度也远远小于《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)所规定的设计值。建议近期不开启隧道内的风机,采用自然通风。

隧道内各个工况测试断面的空气透过率在 94% 以上,VI 浓度在 $0.000 59 m^{-1}$ 以下,远远小于设计的各种行车速度下的浓度要求。在换气横通道开启后,CO、VI 浓度在上下行线不同测点处进行了重分布,并呈现出均匀的分布状态,互补效果明显,证明双洞互补式网络通风可行,随着交通流量不断增大,该通风方式的作用会愈加显著。

6 结 语

通过现场测试与分析,隧道内空气质量较好,污染物浓度满足规范要求。风速测试结果表明,近、远期交通量控制年限内,隧道通风系统满足设计要求,互补式换气通道的作用明显,证明双洞互补式通风可行。在工程实践中,隧道受地形、地质、排水等因素影响,且具有一定坡度,使得上下行隧道通风负荷不平衡,此类隧道应推广使用互补式通风。大别山隧道是国内外首次采用互补式通风,其运营测试管理为后续类似通风积累了重要数据。

参 考 文 献:

References:

- [1] BENER M A, DAY J R. A new concept for ventilation long twin-tube tunnels[C]//ISAVVT. Proceedings of the 7th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Cranfield: BHR Group, 1991: 811-820.
- [2] 张光鹏,雷 波,田明力. 空气交换法在公路隧道纵向通风中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 42-45, 56.

- ZHANG Guang-peng, LEI Bo, TIAN Ming-li. Study on air interchange system for road tunnel longitudinal ventilation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 42-45, 56. (in Chinese)
- [3] 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): 56-60.
- HU Yan-jie, DENG Min, YANG Tao. Application research for the complementary ventilation of Dabie Mountains Tunnel[J]. Transportation Science and Technology, 2011(2): 56-60. (in Chinese)
- [4] 张世彪,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): 351-353.
- ZHANG Shi-biao, HU Yan-jie, DENG Min. Dabie Mountain Highway Tunnel operation ventilation test and analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition, 2012(11): 351-353. (in Chinese)
- [5] 金文良,谢永利,李宁军,等. 新七道梁公路隧道运营通风效果测试及分析[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(1): 38-42, 48.
- JIN Wen-liang, XIE Yong-li, LI Ning-jun, et al. Field measurement and analyses of the operation ventilation effect of new Qidaoliang Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(1): 38-42, 48. (in Chinese)
- [6] 陈建勋. 公路隧道运营通风效果现场实测与分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2002, 22(5): 51-54.
- CHEN Jian-xun. Analysis and field survey about operation ventilation effect of highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(5): 51-54. (in Chinese)
- [7] 仇玉良,李宁军,谢永利. 喷射混凝土衬砌隧道通风阻力系数测试研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 81-84.
- QIU Yu-liang, LI Ning-jun, XIE Yong-li. Site test for ventilation resistance coefficient of shotcrete lining tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 81-84. (in Chinese)
- [8] 王亚琼,谢永利,刘洪洲,等. 海底隧道半横向通风孔物理模型试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 76-82.
- WANG Ya-qiong, XIE Yong-li, LIU Hong-zhou, et al. Physical model experiment on semi-transverse ventilation air inlet and outlet of subsea tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 76-82. (in Chinese)
- [9] 王亚琼,邓敏,胡彦杰,等. 单洞对向交通隧道火灾烟气模糊控制[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(5): 13-21.
- WANG Ya-qiong, DENG Min, HU Yan-jie, et al. Fuzzy control of fire smoke in single highway tunnel with subtended traffic[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(5): 13-21. (in Chinese)
- [10] 王亚琼,谢永利,张素磊,等. 氮氧化物对隧道需风量影响研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10): 89-94.
- WANG Ya-qiong, XIE Yong-li, ZHANG Su-lei, et al. Study on effect of nitrogen oxides on tunnel required ventilation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(10): 89-94. (in Chinese)
- [11] 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, 27(6): 84-90.
- WANG Ya-qiong, XIA Feng-yong, XIE Yong-li, et al. Physical model experiment on complementary ventilation of extra-long highway tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6): 84-90. (in Chinese)
- [12] 王磊,郭洋洋. 特长公路隧道运营网络通风技术[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2012, 32(4): 51-54, 104.
- WANG Lei, GUO Yang-yang. Network ventilation technology of operation period in super long highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(4): 51-54, 104. (in Chinese)
- [13] 苑郁林. 通风网络理论在公路隧道运营通风设计中的应用[J]. 公路, 2003(10): 22-24.
- YUAN Yu-lin. Application of ventilation network theory in the highway tunnel operation ventilation design[J]. Highway, 2003(10): 22-24. (in Chinese)
- [14] 周豫菡,朱合华,冯守中. 公路隧道能见度与烟雾浓度的概念辨析及计算分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(10): 152-158.
- ZHOU Yu-han, ZHU He-hua, FENG Shou-zhong. Analysis of concept and calculation of highway tunnel visibility and smoke concentration[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(10): 152-158. (in Chinese)
- [15] 陈建涛,李运华,刘东晓. 纵向通风公路隧道空气污染浓度短时预报算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(1): 114-118.
- CHEN Jian-tao, LI Yun-hua, LIU Dong-xiao. Short-period forecasting algorithm for air pollution concentration in road tunnel with longitudinal ventilation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(1): 114-118. (in Chinese)
- [16] 陈卫忠,郭小红,曹传林,等. 公路分岔隧道循环风相互影响及其对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1137-1147.
- CHEN Wei-zhong, GUO Xiao-hong, CAO Chuan-lin, et al. Research on interrelationship of exhaust air of highway forked tunnel and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1137-1147. (in Chinese)