

文章编号:1671-1637(2014)06-0027-08

## 特长公路隧道互补式通风模式

夏丰勇<sup>1</sup>, 谢永利<sup>1</sup>, 王亚琼<sup>1,2</sup>, 胡彦杰<sup>3</sup>

(1. 长安大学公路学院, 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)

**摘要:**建立了公路隧道互补式通风计算模型, 编制了模型计算程序, 研究了大别山特长公路隧道互补式通风运营模式, 提出全射流纵向通风模式、单U型通风模式与双U型通风模式, 分析了3种通风模式转换的控制条件与2条互补式换气横通道的功能。现场测试了运营状态下大别山隧道内污染物浓度, 对比了计算结果与测试结果。分析结果表明: 大别山隧道互补式通风运营模式灵活、实用, 当上坡隧道交通量不超过11 500 pcu·d<sup>-1</sup>时, 可采用全射流纵向通风模式; 当上坡隧道交通量为11 500~14 100 pcu·d<sup>-1</sup>时, 可采用单U型通风模式; 当上坡隧道交通量为14 100~18 255 pcu·d<sup>-1</sup>时, 可采用双U型通风模式。离上坡隧道入口较近的换气横通道的主要作用是减小上坡隧道内的通风量, 降低通风速度, 离上坡隧道入口较远的换气横通道的主要作用是降低上坡隧道内的污染物浓度。采用双U型通风模式降低了离上坡隧道入口较近横通道的换气量, 减小了通风系统能耗与运营费用。模型计算结果与实测结果相对误差绝对值小于10%, 因此, 通风计算模型精度较高, 可应用于互补式通风计算。

**关键词:**隧道工程; 特长公路隧道; 互补式通风; 运营模式; 计算模型; 换气量

**中图分类号:**U453.5 **文献标志码:**A

## Complementary ventilation modes of extralong highway tunnel

XIA Feng-yong<sup>1</sup>, XIE Yong-li<sup>1</sup>, WANG Ya-qiong<sup>1,2</sup>, HU Yan-jie<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, 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)

**Abstract:** A ventilation calculation model of complementary ventilation system for highway tunnel was established, its calculation program was designed, and the operation modes of complementary ventilation system for Dabieshan Extralong Highway Tunnel were studied. Full-jet longitudinal ventilation mode, single U-type ventilation mode and double U-type ventilation mode were put forward, and their conversional control conditions were analyzed. The functions of two cross ventilation passages in the tunnel were studied. The pollutant concentrations in the operational state of the tunnel were tested and compared with the result calculated by the model. Analysis result shows that the operation modes of complementary ventilation system for Dabieshan Extralong Highway Tunnel are flexible and practical. When the traffic volume of uphill tunnel is less than 11 500 pcu·d<sup>-1</sup>, full-jet longitudinal ventilation mode is used only.

收稿日期:2014-06-18

基金项目:交通运输部行业联合科技攻关项目(2009-353-342-560);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:夏丰勇(1987-),男,湖北大悟人,长安大学工学博士研究生,从事隧道通风研究。

导师简介:谢永利(1961-),男,山西芮城人,长安大学教授,工学博士。

When the traffic volume is within 11 500-14 100  $\text{pcu} \cdot \text{d}^{-1}$ , single U-type ventilation mode is used only. When the traffic volume is within 14 100-18 255  $\text{pcu} \cdot \text{d}^{-1}$ , double U-type ventilation mode is used. The main function of cross ventilation passage near to the entrance of uphill tunnel is to reduce the ventilation volume and speed of uphill tunnel, while the main function of cross ventilation passage away from the entrance of uphill tunnel is to reduce the pollutant concentration of uphill tunnel. When double U-type ventilation mode is used, the ventilation volume of cross passage near the entrance of uphill tunnel reduces, which results in that the energy consumption and operating cost of ventilation system decrease. The absolute values of relative errors between the calculation result and the test result are less than 10%, so the proposed model has high precision and can be applied to the calculation of complementary ventilation. 15 tabs, 4 figs, 21 refs.

**Key words:** tunnel engineering; extralong highway tunnel; complementary ventilation; operation modes; calculation model; ventilation volume

**Author resumes:** XIA Feng-yong(1987-), male, doctoral student, +86-29-83143028, xiafengyong13@126.com; XIE Yong-li(1961-), male, professor, PhD, +86-29-83143028, xieyl@263.net.

## 0 引 言

当前,中国公路建设发展迅速,隧道修建越来越多。当隧道长度超过 5 km,需风量较大时,如果采用全射流纵向通风,往往因隧道内风速太大而不能满足通风标准,在这种情况下普遍做法是在隧道中部修建通风井用于通风和换气,同时需要在风机房内配备大功率风机用于提供通风动力。国内外学者对长大隧道通风系统进行了较多的研究:Jalali 等基于射流风机故障率时间和修复率时间提出了一种评估特长隧道通风系统可靠性的方法,确定了合理的射流风机开启策略,减小了通风系统不确定性风险<sup>[1]</sup>;Kwa 研究了新加坡某高速公路隧道通风系统的设计,包括通风系统方案评估、空气质量对环境的影响、正常运营和阻塞工况下的通风系统设计、火灾时的通风运营管理等<sup>[2]</sup>;Wang 等采用数值模拟研究了交通风和射流风机安装角度对高速公路曲线隧道通风系统的影响<sup>[3-4]</sup>;Chow 等利用 1/50 的隧道模型研究了不同倾斜角度下纵向通风隧道火灾烟气的运动模式和控制规律<sup>[5]</sup>;Yang 等采用数值模拟分析了纵向通风隧道火灾时热羽流的控制,利用逆流烟气温度解释临界风速的变化规律<sup>[6]</sup>;Colella 等采用多尺度模型分析了 Dartford 隧道的通风系统性能,该隧道拥有复杂的半横向通风系统,结果表明利用射流风机能够有效控制纵向风流动<sup>[7-8]</sup>;夏永旭等研究了纵向-半横向混合通风方式在单向交通和双向交通时的风压与风速分布,论证了这种通风方式在特长公路隧道通风中应用的可行性,通过多方案

的技术经济比较,给出了雁门关公路隧道的通风方案<sup>[9-10]</sup>;王明年等结合秦岭终南山 18 km 特长隧道的实际情况,将网络通风理论应用于实际工程中,取得了良好的效果<sup>[11]</sup>。可见,长大隧道多采用送排式通风系统,工程造价与运营费用大<sup>[12]</sup>。通常,隧道运营管理费用与隧道长度的平方成正比,与通风量的三次方成正比<sup>[13]</sup>。与此同时,通风设计中通常按最不利工况组合确定需风量,导致公路隧道运营过程中通风设备闲置率高,电能浪费严重<sup>[14]</sup>。

目前,一些学者对送排式通风系统进行了优化,Berner 等针对通风负荷不均匀的特长公路隧道首先提出了双洞互补的概念<sup>[15]</sup>,但是并未给出这种通风方式的具体设计过程和计算方法;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<sup>[16]</sup>;胡彦杰等依托大别山隧道,提出了双洞互补式通风设计理论,分析了 2 条换气横通道换气量相同时的设计方法,并运用于大别山隧道,在理论上,采用这种通风方案,可以取消修建通风井,减小隧道初投资和运营管理费用<sup>[17]</sup>;王亚琼等采用隧道通风模型试验和现场测试,研究了互补式通风隧道内的风速场、风压场和污染物浓度的分布规律,结果表明换气通道可以起到交换风量的作用,互补式通风方案可行<sup>[18-19]</sup>;Bogdan 等提出公路隧道通风系统模糊控制法,依据交通量、气象条件和隧道设计参数,计算隧道内污染物排放量和需风量,利用风压平衡原理计算风机开启数量,以提供足够的风量,确保隧道内污染物浓度不超标<sup>[20]</sup>。目前,国内外对互补式通风的研究集中于通风方式的设计和可行性上,

对隧道后期的运营管理、通风控制和换气时机尚不清楚,在建设节约型社会和倡导低碳经济的背景下,深入研究通风方式的运营模式具有重要意义,因此,本文依托大别山隧道互补式通风系统,根据预测的交通量和车型组成,以污染物浓度作为控制条件,研究不同交通量下通风方式的风机控制方式、换气时机与换气量,分析 2 条换气横通道换气量不同时隧道内的污染物浓度分布规律,揭示 2 条换气横通道的不同作用,以期充分挖掘该通风方式节能的优势,达到降低能耗与减小运营费用的目的。

## 1 互补式通风设计

### 1.1 基本原理

单坡或者左右线车型类别、载质量与交通量不同的隧道,污染物排放量不同导致左右线隧道需风量差异较大,假设上坡隧道需风量较大,下坡隧道需风量较小,互补式通风系统见图 1。图 1 中:A 点为上坡隧道出口;B 点为上坡隧道送风口;C 点为上坡隧道排风口;D 点为上坡隧道入口;E 点为下坡隧道入口;F 点为下坡隧道排风口;G 点为下坡隧道送风口;H 点为下坡隧道出口;1<sup>#</sup> 为离上坡隧道入口较近的换气横通道;2<sup>#</sup> 为离上坡隧道入口较远的换气横通道;AB、BC、CD 段对应长度分别为 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>;EF、FG、GH 段对应长度分别为 R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>。通风基本原理是以纵向通风系统为基础,在上下坡隧道之间的适当位置设置 2 条用于空气交换的联络风道,将孤立的两隧道连通构成一个整体网络进行通风设计;空气通过 1<sup>#</sup> 换气横通道送入下坡隧道,气流流动路径为 DCGH 和 DCBA;增大下坡隧道新鲜空气的供给,将相对新鲜的空气通过 2<sup>#</sup> 换气横通道送入上坡隧道,稀释上坡隧道内污染空气,气流流动路径为 EFBA 和 EFGH;双向换气后,上坡隧道内污染物浓度降低,下坡隧道内污染物浓度升高,但上下坡隧道内空气质量均满足通风要求。

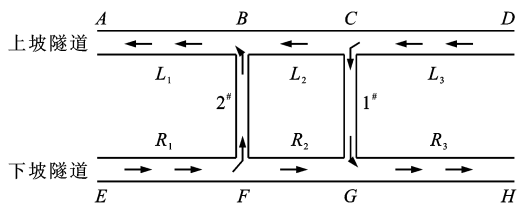


图 1 互补式通风系统

Fig. 1 Complementary ventilation system

### 1.2 设计方法

上下坡隧道需风量之和小于最大允许通风量之和,设计风量满足

$$Q_s + Q_x \geq \frac{q_s + q_x}{\delta} \quad (1)$$

式中:q<sub>s</sub>、q<sub>x</sub> 分别为上下坡隧道内污染物排放量(CO 或 VI);Q<sub>s</sub>、Q<sub>x</sub> 分别为上下坡隧道的设计风量;δ 为隧道内污染物浓度限值。

风机功率 N 与隧道风量 Q 的三次方成正比,即 N ∝ Q<sup>3</sup>,Q<sub>s</sub> 与 Q<sub>x</sub> 越接近,N<sub>s</sub> + N<sub>x</sub>(N<sub>s</sub>、N<sub>x</sub> 分别为上下坡隧道风机功率)越小,因此,设计中取 Q<sub>s</sub> = Q<sub>x</sub>。

将上下坡隧道投影至立面,坐标原点 O 为下坡隧道进洞口,按照上述设计风量,如果采用全射流纵向通风,上下坡隧道污染物浓度分布见图 2,上坡隧道污染物浓度将超过 δ,下坡隧道污染物浓度小于 δ。设换气通道安装位置为 L<sub>h</sub>,由图 2 可知,L<sub>m</sub> < L<sub>h</sub> < L<sub>e</sub>,L<sub>m</sub> 为上坡隧道污染物浓度达到限值的位置,L<sub>e</sub> 为上下坡隧道污染物浓度相等的位置。在 L<sub>m</sub> 左边,上坡隧道内污染物浓度超标,换气失去意义;在 L<sub>e</sub> 右边,下坡隧道内污染物浓度比上坡隧道高,换气将导致上坡隧道污染更加严重,换气无效果。根据《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)中需风量计算公式,可得

$$L_m = L_s - \delta Q_s S^{-1} \left( \sum_{j=1}^J N_j f_j \right)^{-1} \quad (2)$$

$$S = \begin{cases} q_{CO} K_1 K_2 K_3 K_4 P_0 T_1 / 3.6 P_1 T_0 & \text{污染物为 CO} \\ 10^{-6} q_{VI} K_1 K_2 K_3 K_4 / 3.6 & \text{污染物为 VI} \end{cases} \quad (3)$$

式中:q<sub>CO</sub> 为 CO 基准排放量;K<sub>1</sub> 为考虑 CO 或烟雾车况系数;K<sub>2</sub> 为车辆密度系数;K<sub>3</sub> 为海拔高度修正系数;K<sub>4</sub> 为纵坡车速系数;q<sub>VI</sub> 为烟雾基准排放量;P<sub>0</sub> 为标准气压;P<sub>1</sub> 为隧址设计气压;T<sub>0</sub> 为标准气温;T<sub>1</sub> 为隧址夏季的设计气温;f<sub>j</sub> 为车型 j 的系数;N<sub>j</sub> 为车型 j 的设计交通量;L<sub>s</sub> 为上坡隧道长度。

根据左右线隧道内污染物浓度相等,可得

$$L_e = q_s Q_x L_s L_x / (q_x Q_s L_s + q_s Q_x L_x) \quad (4)$$

式中:L<sub>x</sub> 为下坡隧道长度。

互补式通风 2 条横通道间距的确定很重要,因其作用类似于竖井送排式通风中的短道,建议间距

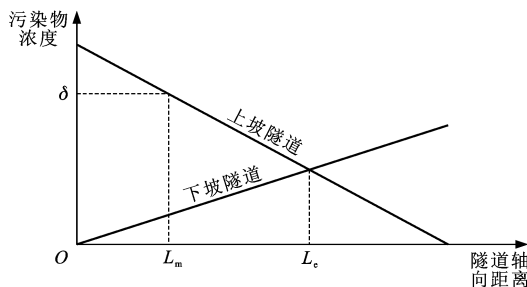


图 2 污染物浓度分布

Fig. 2 Pollutant concentration distributions

一般不小于 50 m,设计完成后需校核隧道内污染物浓度是否有超标的情况。

### 1.3 双向换气量确定

设 1#、2# 换气横通道换气量分别为  $Q_{h1}$ 、 $Q_{h2}$ ，假设上下坡隧道出口处污染物浓度相等，则有

$$\frac{(q_s - Y_1 Q_{h1} + Y_2 Q_{h2}) / (Q_s - Q_{h1} + Q_{h2})}{(q_x + Y_1 Q_{h1} - Y_2 Q_{h2}) / (Q_x + Q_{h1} - Q_{h2})} =$$

$$Y_1 = q_s L_3 / L_s Q_s$$

$$Y_2 = q_x R_1 / L_x Q_x$$

计算可得

$$Q_{h2} = \frac{[q_s + q_x - Y_1 (Q_s + Q_x)] Q_{h1} - q_x Q_s + q_s Q_x}{q_s + q_x - Y_2 (Q_s + Q_x)} \quad (5)$$

式(5)是一个二元一次方程,满足要求的  $Q_{h1}$  和  $Q_{h2}$  有很多,在运营控制过程中,需要选取合理换气风量。如果 2 个横通道换气量相等,则有

$$Q_{h1} = Q_{h2} = \frac{(q_s Q_x - q_x Q_s) (Q_s + Q_x)^{-1} \cdot (Y_1 - Y_2)^{-1}}$$

### 1.4 污染物浓度校核

设计了  $Q_{h1}$  和  $Q_{h2}$  后,需要对上下坡隧道内污染物浓度进行校核<sup>[21]</sup>,如果污染物浓度指标不大于 1,则设计能够满足通风要求。校核公式如下

$$\begin{cases} C_1 = (q_s - Y_1 Q_{h1} + Y_2 Q_{h2}) (Q_s - Q_{h1} + Q_{h2})^{-1} \delta^{-1} \\ C_2 = [q_s (L_2 + L_3) L_s^{-1} - Y_1 Q_{h1}] (Q_s - Q_{h1})^{-1} \delta^{-1} \\ C_3 = (q_x + Y_1 Q_{h1} - Y_2 Q_{h2}) (Q_x + Q_{h1} - Q_{h2})^{-1} \delta^{-1} \\ C_4 = [q_x (R_1 + R_2) L_x^{-1} - Y_2 Q_{h2}] (Q_x - Q_{h2})^{-1} \delta^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C_i$  为隧道位置  $i$  的污染物浓度指标, $i=1\sim 4$  分别代表上坡隧道出口、上坡隧道短道末端、下坡隧道出口与下坡隧道短道末端。

## 2 互补式通风程序开发

互补式网络通风设计过程较复杂,试算和校核过程较多,且换气量没有唯一解,本文利用式(1)~(6),编制了互补式网络通风计算程序,用于互补式通风系统设计与后期运营通风的控制分析,通风计算流程见图 3。

## 3 互补式通风工程概况

大别山特长公路隧道见图 4,隧道最大埋深约为 482 m,平均海拔高度为 291 m,设计行车速度为  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。隧道为上下行分离式,两洞轴线相距 40 m。隧道左线长度为 4 901 m,车道坡度分别为 1.47%、1.97%;右线隧道长度为 4 908 m,坡度分别为 -1.47%、-1.97%。由于坡度的存在,左右

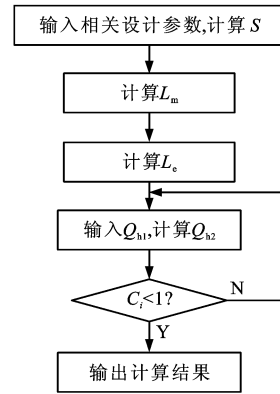


图 3 通风计算流程

Fig. 3 Ventilation calculation flow



图 4 大别山隧道入口

Fig. 4 Entrance of Dabieshan Highway Tunnel

线隧道内运行车辆产生的污染物排放量会有较大的差异,在车型、载质量与车流量相同的情况下,通常是上坡隧道内车辆的排污量大于下坡隧道。另外,受交通运行方面的影响,两隧道内的车型、车流量与载质量不同,也会使运行车辆污染物的排放量产生较大的差异。由于污染物排放量的不同,为保证隧道内的空气质量满足通风标准,其通风负荷将存在较大的差别。隧道预测交通量和车型构成比例分别见表 1~4<sup>[17]</sup>,其中高峰小时系数为 0.12,交通量不均衡系数为 0.52。依据《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)中需风量计算公式得到左右线近远期需风量计算结果见表 5。

表 1 预测交通量

Tab. 1 Forecasted traffic volumes

年份	2011	2015	2020	2031
交通量/(pcu · d <sup>-1</sup> )	9 601	13 100	18 480	35 105

隧道近期服务水平可以达到 1 级,所以近期取车速为  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时的需风量,而远期高峰小时交通量下服务水平达不到 2 级,所以取车速为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时的需风量为控制风量,最终确定的隧道需风量(针对 VI 浓度)见表 6。

表 2 交通组成

Tab. 2 Traffic compositions %

年份	客车		货车				合计
	小客车	大中客车	小货车	中货车	大货车	托挂车	
2011	30.5	7.6	15.6	20.3	18.8	7.2	100
2015	33.0	7.7	15.7	17.0	19.0	7.6	100
2020	34.9	7.8	15.8	14.3	19.3	7.9	100
2031	36.4	8.1	17.0	11.1	19.6	7.8	100

表 3 高峰时段交通量

Tab. 3 Peak period traffic volumes

年份	2011	2015	2020	2031
当量交通量/(pcu · h <sup>-1</sup> )	600	818	1 154	2 191
实际交通量/(veh · h <sup>-1</sup> )	435	602	859	1 656

表 5 需风量计算结果

Tab. 5 Computational result of air requirements

m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>

分线	年份	运行工况车速/(km · h <sup>-1</sup> )								火灾工况	换气工况
		10	30	40	50	60	70	80	100		
左洞	2011	147.08	116.77	115.45	180.16	150.14	209.79	232.88	250.82	204.92	279.37
	2015	185.38	171.75	169.80	264.98	220.82	308.56	342.52	368.89	204.92	279.37
	2020	242.36	192.42	190.24	296.88	247.40	345.71	383.76	413.31	204.92	279.37
	2031	376.08	298.58	295.19	460.67	383.89	536.43	595.47	641.32	204.92	372.20
右洞	2011	87.19	64.19	60.18	61.33	51.11	54.06	47.70	51.38	204.92	278.97
	2015	108.48	80.17	74.87	77.30	64.42	68.14	60.12	64.75	204.92	278.97
	2020	137.20	104.81	94.69	101.07	84.22	89.09	78.61	84.66	204.92	278.97
	2031	210.02	162.63	144.95	156.82	130.69	138.24	121.97	131.37	204.92	278.97

表 6 近远期需风量

Tab. 6 Short-term and long-term air requirements

分线	近期		远期	
	工况	需风量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	工况	需风量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )
左洞	运行工况 100 km · h <sup>-1</sup>	368.89	运行工况 80 km · h <sup>-1</sup>	595.47
右洞	换气工况	278.97	换气工况	278.97

表 7 通风设计结果

Tab. 7 Ventilation design result

Q <sub>s</sub> /(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	Q <sub>x</sub> /(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	L <sub>1</sub> /m	L <sub>2</sub> /m	L <sub>3</sub> /m	R <sub>1</sub> /m	R <sub>2</sub> /m	R <sub>3</sub> /m	Q <sub>h1</sub> /(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	Q <sub>h2</sub> /(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )
420	420	1 500	100	3 300	1 500	100	3 300	240	240

洞最大交通量见表 8。

隧道近期设计行车速度为 100 km · h<sup>-1</sup>,从表 8 可以看出,左线单洞最大交通量为 11 500 pcu · d<sup>-1</sup>,右线单洞最大交通量为 56 100 pcu · d<sup>-1</sup>,左线单洞交通量超过 11 500 pcu · d<sup>-1</sup>,全射流纵向通风不能满足通风要求。考虑到右线单洞最大交通量远大于

表 4 交通量

Tab. 4 Traffic volumes veh · h<sup>-1</sup>

年份	小客车	大中客车	小货车	中货车	大货车	拖挂车
2011	184	24	94	62	57	15
2015	270	32	129	71	79	22
2020	403	46	183	84	112	31
2031	798	90	373	123	216	58

从表 6 可以看出,右线隧道的远期需风量远小于左线的远期需风量,经计算,左右线隧道近期通风负荷比为 1.32,远期为 2.13,隧道通风负荷不均匀性较明显。初步设计左线采用竖井送排式通风,经过论证,大别山隧道最终采用了不设竖井的互补式纵向通风方式,通风设计结果见表 7。

## 4 互补式通风近期运营模式

### 4.1 全射流纵向通风运营模式

近期交通量小,可以采用全射流纵向通风,隧道左右线各布置射流风机 28 台,设计风量均为 420 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>,依据预测车型组成,以左右线出口处污染物浓度作为控制条件,可以反算出大别山隧道采用全射流纵向通风时,不同行车速度下左右线单

左线,可以利用右线通风潜能,将右线隧道相对新鲜的空气送入左线,提高左线通风能力。

### 4.2 单 U 型通风运营模式

对于互补式通风系统,可以单开 1 条换气横通道,形成单 U 型通风系统。单开 2# 换气横通道,将右线隧道内相对新鲜的空气送入左线,稀释左线隧

表 8 单洞最大交通量

Tab. 8 Maximum traffic volumes of single tunnels

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	10	30	40	50	60	70	80	100
左洞交通量/ (10 <sup>4</sup> pcu·d <sup>-1</sup> )	1.96	2.47	2.49	1.60	1.92	1.38	1.24	1.15
右洞交通量/ (10 <sup>4</sup> pcu·d <sup>-1</sup> )	3.51	3.97	4.24	4.70	5.64	5.34	6.04	5.61

道内污染较严重的空气,可提高左线隧道 B 点到出口的通风能力。

单开 2<sup>#</sup> 换气横通道只能满足某一数值的交通量,其限制有 2 个原因,一是左线污染物浓度在送入较新鲜空气以前已经超标,二是污染物浓度在出口处超标,即送入的较新鲜空气不足以稀释左线隧道的污染空气。通过计算,可以得到左线隧道在 B 点(短道末端)处污染物浓度最大时的交通量,见表 9。左线设计风量为 420 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,如果限定隧道内风速不超过 8 m·s<sup>-1</sup>,隧道断面面积为 68.3 m<sup>2</sup>,则从右线送入左线较新鲜的风量最大为 126 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,由此可以算出左线 A 点处污染物浓度达到极值时的交通量,计算结果见表 10。

表 9 B 点处污染物浓度达到最大时  
左线隧道交通量

Tab. 9 Traffic volumes of left tunnel when pollutant concentration reaches the maximum at point B

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	10	30	40	50	60	70	80	100
左线交通量/ (10 <sup>4</sup> pcu·d <sup>-1</sup> )	2.84	3.56	3.60	2.31	2.77	1.98	1.79	1.66

表 10 A 点处污染物浓度达到最大时  
左线隧道交通量

Tab. 10 Traffic volumes of left tunnel when pollutant concentration reaches the maximum at point A

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	10	30	40	50	60	70	80	100
左线交通量/ (10 <sup>4</sup> pcu·d <sup>-1</sup> )	2.45	3.11	3.15	1.98	2.40	1.69	1.51	1.41

从表 9、10 可以看出,表 10 中的交通量小于表 9,故单 U 型通风模式的控制条件是左线出口处的污染物浓度达到允许值,适用的交通量范围为 11 500~14 100 pcu·d<sup>-1</sup>。当左线隧道交通量超过 14 100 pcu·d<sup>-1</sup>时,需要同时开启 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 换气横通道,采用双 U 型通风模式。

## 5 互补式通风远期运营模式

### 5.1 换气量相同时双 U 型运营模式

如果 2 条换气横通道换气量相等,则左右线隧道内换气前后的风量波动较小。随着交通量的变化会

引起左右线隧道需风量和换气量的变化,选取交通量(双向)为 28 327、29 995、32 213、33 952 pcu·d<sup>-1</sup> 的左右线需风量计算结果见表 11。利用通风计算程序计算不同交通量下换气量和污染物浓度校核结果见表 12,  $Q_{h1} = Q_{h2} = Q_h$ 。

表 11 不同交通量下左右线需风量

Tab. 11 Air requirements of left and right tunnels with different traffic volumes

交通量/(pcu·d <sup>-1</sup> )	33 952	32 213	29 995	28 327
左线需风量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	580	550	510	480
右线需风量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	210	200	190	180

表 12 不同交通量时换气量与污染物浓度指标

Tab. 12 Inter-exchanging air volumes and pollutant concentration indexes with different traffic volumes

交通量/ (pcu·d <sup>-1</sup> )	Q <sub>h</sub> / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
33 952	238.08	0.94	0.99	0.94	0.17
32 213	237.70	0.89	0.94	0.89	0.16
29 995	235.51	0.83	0.87	0.83	0.15
28 327	234.91	0.78	0.82	0.78	0.15

由表 12 计算结果可以看出,如果要求 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 横通道换气量相同,随着交通量增大,换气量增大,但是增大不明显,换气量一直维持在 235 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> 左右,同时,左右线出口处和短道末端的污染物浓度增长较快,但都不大于限值。可见,从节能的角度考虑,要求换气量相同并不合理。

### 5.2 换气量不等时双 U 型运营模式

选取交通量为 28 327、32 213 pcu·d<sup>-1</sup> 进行分析,利用通风计算程序,可算出 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 横通道换气量与污染物浓度指标,分别见表 13、14。

表 13 交通量为 28 327 pcu·d<sup>-1</sup> 时换气量与污染物浓度指标

Tab. 13 Inter-exchanging air volumes and pollutant concentration indexes when traffic volume is 28 327 pcu·d<sup>-1</sup>

Q <sub>h1</sub> / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Q <sub>h2</sub> / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
0.00	229.17	0.785 71	0.793 00	0.785 71	0.150 44
30.00	229.91	0.785 71	0.794 79	0.785 71	0.150 52
60.00	230.65	0.785 71	0.796 89	0.785 71	0.150 59
90.00	231.38	0.785 71	0.799 36	0.785 71	0.150 67
120.00	232.12	0.785 71	0.802 33	0.785 71	0.150 74
150.00	232.85	0.785 71	0.805 96	0.785 71	0.150 82
180.00	233.59	0.785 71	0.810 49	0.785 71	0.150 90
210.00	234.32	0.785 71	0.816 32	0.785 71	0.150 97
240.00	235.06	0.785 71	0.824 10	0.785 71	0.151 05

表 14 交通量为 32 213 pcu · d<sup>-1</sup>时的换气量与污染物浓度指标  
Tab. 14 Inter-exchanging air volumes and pollutant concentration indexes when traffic volume is 32 213 pcu · d<sup>-1</sup>

Q <sub>h1</sub> / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	Q <sub>h2</sub> / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
0.00	234.17	0.892 85	0.908 46	0.892 85	0.167 46
30.00	234.62	0.892 85	0.910 51	0.892 85	0.167 51
60.00	235.06	0.892 85	0.912 91	0.892 85	0.167 56
90.00	235.51	0.892 85	0.915 75	0.892 85	0.167 62
120.00	235.95	0.892 85	0.919 15	0.892 85	0.167 67
150.00	236.40	0.892 85	0.923 30	0.892 85	0.167 73
180.00	236.85	0.892 85	0.928 50	0.892 85	0.167 78
210.00	237.29	0.892 85	0.935 18	0.892 85	0.167 83
240.00	237.74	0.892 85	0.944 09	0.892 85	0.167 89

从表 13、14 中计算结果可以看出:在某一交通量下, Q<sub>h1</sub> 变化对 Q<sub>h2</sub> 影响很小,随着 1<sup>#</sup> 横通道换气风量的增加, 2<sup>#</sup> 横通道换气量维持在 230 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> 左右;左右线隧道出口处污染物浓度不变,短道末端污染物浓度略有升高,原因是模型中假设左右线隧道出口处污染物浓度相等; Q<sub>h1</sub> 增大,左线隧道自身通风负荷能力降低,致使短道末端污染物浓度升高, Q<sub>h2</sub> 相应增大,且左线污染物浓度较高的空气从 1<sup>#</sup> 横通道进入右线,所以右线短道末端污染物浓度略有上升。交通量为 28 327 pcu · d<sup>-1</sup>时,左右线出口处污染物浓度指标均为 0.786,通风潜能有较大提升空间。交通量为 32 213 pcu · d<sup>-1</sup>时,左右线出口处污染物浓度指标上升到 0.893。由此可以看出, 1<sup>#</sup> 横通道换气风量并不是越大通风效果越好。

## 6 实测与计算结果对比

2012 年对大别山隧道进行了运营通风测试,测试期间大别山隧道左线平均交通量为 1 473 pcu · d<sup>-1</sup>,右线为 1 652 pcu · d<sup>-1</sup>。依据现有交通量和交通组成<sup>[17]</sup>,采用双 U 型通风模式,左右线隧道内风量均为 420 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>, 2 条换气横通道内风量均为 240 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>,程序计算结果 C<sub>1</sub> 为 0.058 33, C<sub>2</sub> 为 0.061 69, C<sub>3</sub> 为 0.058 33, C<sub>4</sub> 为 0.010 93,取 CO 设计浓度(体积分数)为 2.5 × 10<sup>-4</sup>, VI 设计浓度(透光率)为 7.0 × 10<sup>-3</sup> m<sup>-1</sup>,测试结果和程序计算结果见表 15。

由表 15 可知,采用 2 种方法获得的污染物浓度较一致,相对误差的绝对值均小于 10%,验证了程序计算结果的可靠性。程序计算结果和测试结果略有偏差,此误差可能来源于实际运营过程中,车辆交

表 15 污染物浓度对比

Tab. 15 Comparison of pollutant concentrations

CO 体积分数/ 10 <sup>-6</sup>	测试	14.00	15.00	14.00	3.00
	程序	14.58	15.42	14.58	2.73
相对误差/%		4.1	2.8	4.1	-9.0
VI 透光率/ 10 <sup>-4</sup> m <sup>-1</sup>	测试	3.90	4.10	3.90	0.70
	程序	4.08	4.32	4.08	0.77
相对误差/%		4.6	5.4	4.6	8.6

通风引起的污染物浓度在隧道横断面分布不均匀。

## 7 结 语

(1) 互补式通风方式充分利用了下坡隧道的富余通风能力,将下坡隧道内相对新鲜的空气调入上坡隧道,同时将上坡隧道内污染空气排入下坡隧道,达到“同流合污”的效果,有效解决了 5~7 km 隧道的通风问题。该通风方式不需设置分段通风竖井,降低了通风系统规模,且横通道施工方便,造价低。

(2) 互补式通风方式兼顾了纵向通风的优点,运营控制模式灵活,费用低。在运营过程中,近期采用全射流纵向通风,交通量增大到单洞最大交通量时,需开启 1 条换气横通道,采用单 U 型通风模式;交通量进一步增大,需着重关注通风负荷较大隧道出口处污染物浓度,当该处污染物浓度超标时,需开启 2 条换气横通道,采用双 U 型通风模式。

(3) 2 条换气横通道作用不同,离上坡隧道入口较近的换气横通道的主要作用是减小通风负荷大的隧道内的风量,降低风速;离上坡隧道入口较远的换气横通道的主要作用是降低通风负荷大的隧道内的空气污染物浓度。采用双 U 型通风模式时,可以使 2 条横通道换气量不同,在保证通风负荷大的隧道内风速不超标的前提下,可以尽量降低离上坡隧道入口较近的换气横通道的换气量,从而更好地发挥该通风方式的优势,减小能耗,降低运营费用。

(4) 互补式通风与通风井结合,可以使通风井的地点选择更加灵活,使隧道建设更加安全合理,可以对组合模式开展进一步研究。

## 参 考 文 献:

### References:

- [1] JALALI S E, FOROUHANDEH S F. Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction[J]. Safety Science, 2011, 49(5): 664-669.
- [2] KWA G S. The design of tunnel ventilation system for a long vehicular tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(4/5): 312.

- [3] WANG Feng, WANG Ming-nian, HE S, et al. Computational study of effects of traffic force on the ventilation in highway curved tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(3): 481-489.
- [4] WANG Feng, WANG Ming-nian, WANG Qing-yuan. Numerical study of effects of deflected angles of jet fans on the normal ventilation in a curved tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 31(1): 80-85.
- [5] CHOW W K, WONG K Y, CHUNG W Y. Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(2): 122-128.
- [6] YANG Hui, JIA Li, YANG Li-xin. Numerical analysis of tunnel thermal plume control using longitudinal ventilation[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(8): 1067-1077.
- [7] COLELLA F, REIN G, CARVEL R, et al. Analysis of the ventilation systems in the Dartford Tunnels using a multi-scale modelling approach[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(4): 423-432.
- [8] COLELLA F, REIN G, BORCHIELLINI R, et al. Calculation and design of tunnel ventilation systems using a two-scale modelling approach[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(12): 2357-2367.
- [9] 夏永旭, 赵 峰. 特长公路隧道纵向-半横向混合通风方式研究[J]. *中国公路学报*, 2005, 18(3): 80-83.  
XIA Yong-xu, ZHAO Feng. Research on the combined longitudinal and semi-transverse ventilation system in lengthy highway tunnels[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2005, 18(3): 80-83. (in Chinese)
- [10] 夏永旭, 张进县, 王永东, 等. 雁门关公路隧道通风方案[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2003, 23(4): 46-50.  
XIA Yong-xu, ZHANG Jin-xian, WANG Yong-dong, et al. Ventilation scheme of Yanmenguan Highway Tunnel[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2003, 23(4): 46-50. (in Chinese)
- [11] 王明年, 杨其新, 曾艳华, 等. 秦岭终南山特长公路隧道网络通风研究[J]. *公路交通科技*, 2002, 19(4): 65-68.  
WANG Ming-nian, YANG Qi-xin, ZENG Yan-hua, et al. Study on Qinling Zhongnanshan Extra-long Highway Tunnel network ventilation system[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2002, 19(4): 65-68. (in Chinese)
- [12] 吕康成, 伍毅敏. 公路隧道通风设计若干问题探讨[J]. *公路*, 2006(5): 223-227.  
LU Kang-cheng, WU Yi-min. Discussion of several problems in ventilation design for highway tunnel[J]. *Highway*, 2006(5): 223-227. (in Chinese)
- [13] 仇玉良. 公路隧道复杂通风网络分析技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.  
QIU Yu-liang. The complicated ventilation network technology research of highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [14] 韩 直. 公路隧道通风设计的理念与方法[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(3): 464-466.  
HAN Zhi. Concept and method of ventilation design for highway tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(3): 464-466. (in Chinese)
- [15] BERNER M A, DAY J R. A new concept for ventilation long twin-tube tunnels[C]// HAERTER A. *Proceedings of the 7th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Brighton: BHR Group, 1991: 811-820.
- [16] 张光鹏, 雷 波, 田明力. 空气交换方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)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 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, 14(5): 29-35.  
WANG Ya-qiong, HU Yan-jie, DENG Min, et al. Complementary ventilation operational test in large longitudinal slope double-hole tunnel[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 14(5): 29-35. (in Chinese)
- [20] BOGDAN S, BIRGMAJER B, KOVACIC Z. Model predictive and fuzzy control of a road tunnel ventilation system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2008, 16(5): 574-592.
- [21] 夏丰勇. 特长公路隧道双洞互补式通风数值模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.  
XIA Feng-yong. Numerical simulation research on twin tubes complementary ventilation system of extra-long highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)