

文章编号: 0451-0712(2006)05-0223-05

中图分类号: U453.5

文献标识码: B

# 公路隧道通风设计若干问题探讨

吕康成, 伍毅敏

(长安大学公路学院 西安市 710064)

**摘 要:** 长大公路隧道的通风系统工程造价高、运营能耗大, 通风系统设计合理与否, 对长大隧道工程建设有重要影响。现行的《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1-1999) 在隧道自然风阻力计算、根据稀释烟雾计算隧道需风量、竖井送排式通风系统中“不应有短道回流”等方面存在一定问题。在分析论证的基础上提出: (1) 隧道自然风阻力应由自然风等效压差确定, 在缺少工程实地观测资料的情况下, 假定隧道自然风阻力为常量, 并在 10~30 Pa 之间取值; (2) 依据稀释烟雾计算隧道需风量时, 在公式中应引入烟雾的质量浓度或烟雾的体积浓度, 并用其替代公式中的一般烟雾浓度; (3) 竖井送排式通风系统中宜变短道顺流为有控制的回流。

**关键词:** 公路隧道; 通风; 自然风; 烟雾浓度; 短道回流

随着我国公路建设的快速发展, 公路隧道越建越多, 越建越长, 长度超过 3 000 m 的特长公路隧道大量出现。由于稀释长大公路隧道内的有害气体比较困难, 所以长大公路隧道建设中面临的首要问题便是隧道的通风问题。复杂的长大隧道通风系统不仅使隧道工程造价急剧增加, 而且隧道运营费用也大幅上升。日本的惠那山二线隧道 ( $L=8\ 625\text{ m}$ ) 采用了静电集尘器与竖井送排风相结合的通风方式, 以隧道通风为主的安全服务设施的工程造价占隧道总造价的 60%; 我国在建的秦岭终南山特长公路隧道 ( $L=18\ 020\text{ m}$ ), 仅通风竖井就有 3 座, 其通风设施的规模在国际上也名列前茅, 耗资巨大, 其运营期的通风费用亦相当可观。所以, 在全国倡导节约型社会的背景下, 认真搞好长大隧道的通风设计对公路建设的可持续发展具有重要意义。现行的《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1-1999)

(以下简称《规范》) 是隧道通风设计的依据, 其中还给出若干设计计算示例, 对我国公路隧道通风设计影响很大。笔者认为上述规范中的一些公式与结论存在问题, 它们对长大隧道通风系统的经济性与可靠性的影响尤为突出。本文拟就有关问题进行讨论。

## 1 自然风对隧道通风的影响问题

### 1.1 隧道两洞口等效压差

自然状态下隧道内产生的风流称为隧道自然风。隧道自然风由隧道外的自然风和隧道内外的温度差引起。设某单向坡隧道长度为  $L$ , 两洞口的高差为  $H$ , 见图 1 所示, 洞外的自然风和洞内自然风的方向由左向右流动, 根据流体力学的能量方程, 可以建立自然条件下隧道的各种压差与隧道阻力之间的平衡方程:

收稿日期: 2005-11-10

## 参考文献:

- [1] 周则天. 四连拱大跨度浅埋隧道的设计[J]. 世界隧道, 1999, (1).
- [2] 翟朝晖. 连拱隧道新施工方法浅谈[J]. 西部探矿工程, 2003, (6).
- [3] 林刚, 何川. 连拱公路隧道施工方法模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2003, (6).
- [4] 林兴锴, 张士杰. 单导洞方案在骨塘连体隧道的应用[J]. 公路, 2005, (10).
- [5] 姚振凯, 黄运平, 彭立敏. 公路连拱隧道工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [6] 李俊, 李泳伸, 王志杰, 贾刘强. 双联拱隧道开挖技术探讨[J]. 现代隧道技术, 2003, (4).
- [7] 柯小华, 乔春江, 梁巍. 马鞍山隧道施工图设计[Z]. 2004.
- [8] JTJ D70-2004, 公路隧道设计规范[S].



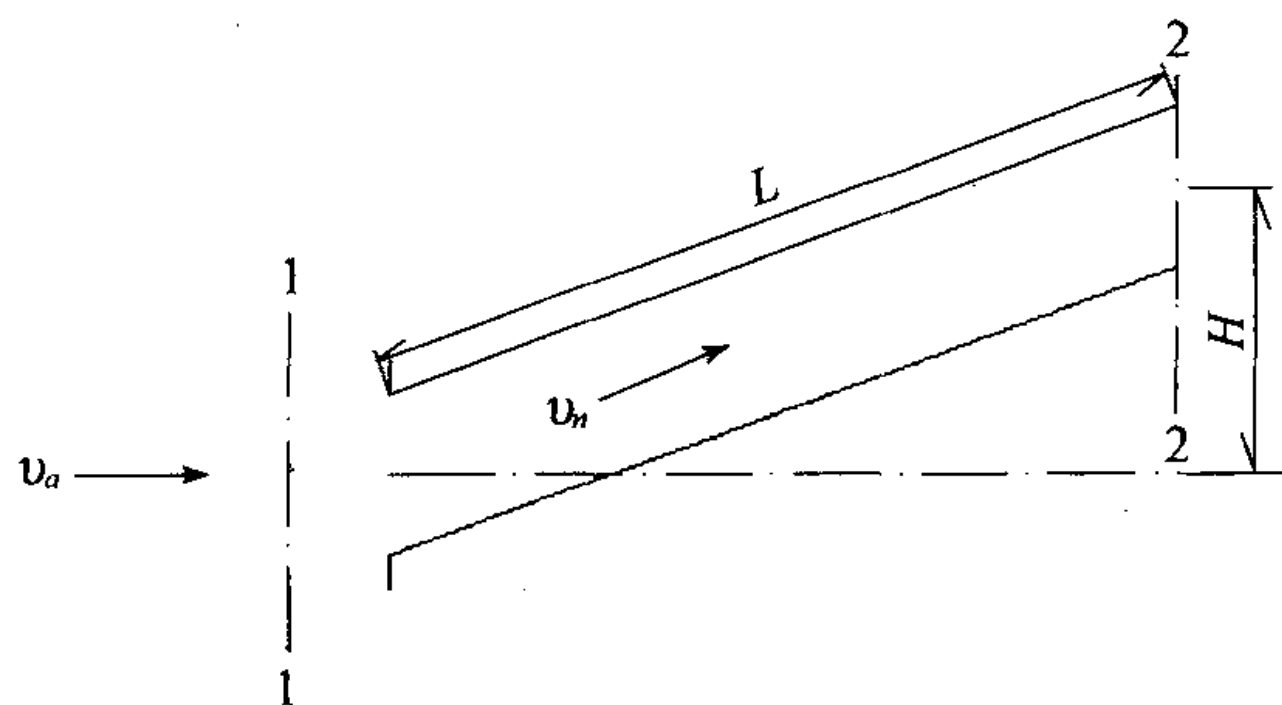


图 1 自然风等效压差推导简图

$$\Delta P + \frac{\rho_i v_a^2}{2} + (\rho_a - \rho_i)gH = \left( \lambda \frac{L}{D_r} + \zeta_e + 1 \right) \frac{\rho_i v_n^2}{2} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为两洞口的超静压差,  $N/m^2$ ;  $v_a$  为流向隧道的洞外风速,  $m/s$ ;  $v_n$  为隧道内的自然风速,  $m/s$ ;  $\rho_i$  为洞内空气的密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_a$  为洞外空气的密度,  $kg/m^3$ ;  $g$  为重力加速度;  $H$  为两洞口的高差;  $\lambda$  为隧道沿程阻力系数;  $L$  为隧道的长度;  $D_r$  为隧道的水力直径;  $\zeta_e$  为隧道入口局部阻力系数。

式(1)右边是自然风在隧道内流动过程中的阻力, 而左边可理解为形成洞内自然风的动力, 称为等效压差, 用  $\Delta P_m$  表示。

$$\Delta P_m = \Delta P + \frac{\rho_i v_a^2}{2} + (\rho_a - \rho_i)gH \quad (2)$$

于是式(1)可写成:

$$\Delta P_m = \left( \lambda \frac{L}{D_r} + \zeta_e + 1 \right) \frac{\rho_i v_n^2}{2} \quad (3)$$

从理论上讲, 形成洞内自然风的等效压差  $\Delta P_m$  应由式(2)计算确定。式(3)给出了  $\Delta P_m$  与洞内自然风风速  $v_n$  和隧道长度  $L$  等的关系。值得强调, 等效压差  $\Delta P_m$  是由洞外的自然风和洞内外的热位差引起的, 等效压差  $\Delta P_m$  是洞内自然风出现的原因, 洞内自然风是等效压差  $\Delta P_m$  导致的结果。

## 1.2 《规范》中自然风等效压差的确定方法与问题

《规范》3.5.2 条规定:

“1 在通风计算中, 一般可将自然风作为阻力考虑。

2 自然通风阻力应按式(3.5.2-1)计算:

$$\Delta P_m = \left( 1 + \zeta_e + \lambda \cdot \frac{L}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2$$

式中:  $\Delta P_m$  为自然风阻力 ( $N/m^2$ );  $v_n$  为自然风作用引起的洞内风速 ( $m/s$ ), 可取  $2 m/s \sim 3 m/s$ ;  $\zeta_e$  为隧道入口损失系数, 可按表 3.5.1-2 取值 (表略);  $\lambda$  为隧道壁面摩阻损失系数, 可按表 3.5.1-2 取值 (表略);  $\rho$  为空气密度 ( $kg/m^3$ ), 可按表 3.5.1-

1 取值 (表略);  $D_r$  为隧道断面当量直径 ( $m$ )。”

其中的“ $v_n$  为自然风作用引起的洞内风速 ( $m/s$ ), 可取  $2 m/s \sim 3 m/s$ ”存在问题。如果忽略隧道内外的温度差或热位差 (此时, 洞内外空气密度相同), 则由式(2)可知, 由隧道洞外自然风在隧道两洞口引起的等效压差  $\Delta P_m$  由两部分组成: (1) 两洞口的大气超静压差  $\Delta P$ ; (2) 洞外的气流的动压  $\frac{\rho_i v_a^2}{2}$ 。该等效压差  $\Delta P_m$  在隧道内引起的洞内自然风风速由式(4)计算:

$$v_n = \left[ \frac{\Delta P_m}{\lambda \frac{L}{D_r} + \zeta_e + 1} \cdot \frac{2}{\rho_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

在式(4)中, 对于车道数相同的隧道, 它们的  $\lambda$ 、 $\zeta_e$ 、 $\rho_i$  和  $D_r$  变化不大, 可以认为这几个参数在不同隧道间保持不变。在这种情况下, 由式(4)可知,  $v_n$  除了与等效压差  $\Delta P_m$  有关外, 还与隧道长度  $L$  有关。在洞外自然风不变和由其引起的等效压差不变的情况下, 由式(4)可以看出隧道越长, 其内的自然风速越小。按照《规范》, 对于不同长度的隧道, 计算隧道自然风引起的阻力时直接“可取”洞内风速为  $2 m/s \sim 3 m/s$ , 并据式(3.5.2-1)计算自然风引起的隧道通风阻力, 势必将导致很大的误差。例如两条相互平行的山岭隧道, 短隧道  $L_1 = 500 m$ , 长隧道  $L_2 = 18 000 m$ , 它们的  $\lambda = 0.02$ 、 $\zeta_e = 0.6$ 、 $\rho = 1.2 kg/m^3$  和  $D_r = 8.2 m$  (参考《规范》示例取值), 洞外风速相同, 方向均与隧道轴向平行, 忽略热位差。在这种情况下, 按式(2)计算出的自然风等效压差为  $\Delta P_{m1}$  ( $L_1 = 500 m$ ) =  $\Delta P_{m2}$  ( $L_2 = 18 000 m$ ); 而按《规范》计算出的自然风阻力分别为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{m1} &= \left( 1 + \zeta_e + \lambda \cdot \frac{L_1}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \\ &= 2.82 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{m2} &= \left( 1 + \zeta_e + \lambda \cdot \frac{L_2}{D_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \\ &= 45.5 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta P_{m2}}{\Delta P_{m1}} = 16.13 \quad (7)$$

本来特长隧道通风就比较困难, 装机容量大, 根据上述计算结果进行设计, 则会更增加设计难度并造成巨大浪费。

诚然, 自然风阻力的确定比较困难。现阶段我国已经修建了大量的山岭隧道, 许多隧道管理站还做



了大量的气象观测,结合隧道的运营资料进行分析,有可能分区域建立起自然风阻力的估算模式。在尚未做进一步的研究分析之前,笔者认为可将隧道自然风阻力按常压差考虑,参考有关算法与工程实例,此值宜在10~30 Pa之间。

## 2 据稀释烟雾计算隧道需风量问题

隧道需风量即隧道所需的新鲜空气量,要求新鲜空气量能稀释隧道内的有害气体与烟尘,使隧道内空气质量达到安全卫生标准。我国《规范》中,通风量按照稀释隧道内空气中的CO和烟雾达到通风标准分别计算,取其中较大者作为隧道需风量。《规范》中依据稀释烟雾计算隧道需风量的方法值得商榷。

### 2.1 烟雾浓度的概念

烟雾浓度是烟雾对空气污染程度的一种度量。烟雾浓度可通过测定光线在烟雾中的透过率来确定。光线在烟雾中的透过率用 $\tau$ 表示。

$$\tau = \frac{E}{E_v} \quad (8)$$

式中: $E$ 、 $E_v$ 分别表示同一光源通过污染空气和洁净空气后的照度。

透过率 $\tau$ 、烟雾的厚度 $L$ (m)和烟雾浓度 $k$ ( $\text{m}^{-1}$ )之间的关系为:

$$\tau = \exp(-kL)$$

$$k = -\frac{\ln \tau}{L} \quad (9)$$

在隧道通风中,取 $L=100$  m,测定 $\tau_{100}$ 后确定 $k$ ,并用 $K$ 代替 $k$ ,则:

$$K = -\frac{\ln \tau_{100}}{100} \quad (10)$$

式中: $K$ 为烟雾浓度, $\text{m}^{-1}$ ;  $\tau_{100}$ 为100 m厚烟雾的光线透过率。

由式(10)可见,烟雾浓度是通过测定100 m厚烟雾的光线透过率来确定的,所以,有人也将烟雾浓度叫100 m透过率。但需注意,烟雾浓度和100 m透过率在物理概念上和数值上都不相同。

### 2.2 烟雾排放量

《规范》3.4.4条规定:“烟雾排放量应按式(3.4.4)计算:

$$Q_{VI} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{VI} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_d \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{iv(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{n_D} (N_m \cdot f_{m(VI)})$$

式中: $Q_{VI}$ 为隧道全长烟雾排放量, $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $q_{VI}$ 为烟雾基准排放量, $\text{m}^2/(\text{辆} \cdot \text{km})$ ,可取 $2.5 \text{ m}^2/(\text{辆} \cdot \text{km})$ ;  $f_{a(VI)}$ 为考虑烟雾的车况系数,……;  $f_{h(VI)}$ 为考虑烟雾的海拔高度系数,……;  $f_{iv(VI)}$ 为考虑烟雾的纵坡—车速系数,……;  $f_{m(VI)}$ 为考虑烟雾的车型系数,……;  $n_D$ 为柴油车车型类别数。”

其中, $Q_{VI}$ 为隧道全长烟雾排放量( $\text{m}^2/\text{s}$ )和 $q_{VI}$ 为烟雾基准排放量( $\text{m}^2/(\text{辆} \cdot \text{km})$ )的单位很难理解。《规范》条文说明对后者做了解释:“烟雾基准排放量采用 $q_{VI}=2.5 \text{ m}^3/(\text{辆} \cdot \text{km})$ (疑误,应为 $q_{VI}=2.5 \text{ m}^2/(\text{辆} \cdot \text{km})$ ,笔者注),含义是每辆中型柴油车行走1 km排放浓度为 $1 \text{ m}^{-1}$ 的烟雾 $2.5 \text{ m}^3$ 。此值与PIARC最近数届大会隧道委员会推荐的 $q_T^0=16 \text{ m}^2/(\text{h} \cdot \text{t})$ 一致。”

### 2.3 稀释烟雾的需风量

《规范》3.4.4条规定:“稀释烟雾的需风量应按式(3.4.5)计算:

$$Q_{req(VI)} = Q_{VI} / K$$

式中: $Q_{req(VI)}$ 为隧道全长稀释烟雾的需风量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $K$ 为烟雾设计浓度, $\text{m}^{-1}$ ,……。”

笔者认为式(3.4.5)是一个根本不能成立的式子。尽管《规范》3.4.4条解释中,通过强调柴油车行走时排放浓度为 $1 \text{ m}^{-1}$ 的烟雾,解释了 $q_{VI}=2.5 \text{ m}^2/(\text{辆} \cdot \text{km})$ 的来历,并使隧道全长烟雾排放量 $Q_{VI}$ 具有了( $\text{m}^2/\text{s}$ )这样的单位,进而将式(3.4.5)的单位左右凑为一致,但仍难以掩盖其逻辑上的不合理性。不妨将式(3.4.5)变形,用式中 $Q_{req(VI)}$ 、 $Q_{VI}$ 表示,则有:

$$K = Q_{VI} / Q_{req(VI)} \quad (11)$$

比较式(11)与烟雾浓度的定义式(10),两者存在明显的差别,也很难推导证明两式等价。如果以定义式(10)为准,式(11)错误,也就是式(3.4.5)错误。对此,笔者认为可以考虑两种解决方案。

(1)引入烟雾的质量浓度 $C_{mVI}$ 。

烟雾的质量浓度 $C_{mVI}$ 的概念是单位体积污染空气内烟雾的质量,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。通过试验建立起 $C_{mVI}$ 与一般的烟雾浓度 $K$ 的关系 $C_{mVI}(K)$ 。烟雾基准排放量 $q_{VI}$ 的单位为 $\text{kg}/(\text{辆} \cdot \text{km})$ ,取值由试验确定。相应的隧道全长烟雾排放量 $Q_{VI}$ 的单位为 $\text{kg}/\text{s}$ 。将式(3.4.5)换为:

$$Q_{req(VI)} = Q_{VI} / C_{mVI}(K) \quad (12)$$

式(3.4.4)的形式与其他量值不变。

(2)引入烟雾的体积浓度 $C_{vVI}$ 。

烟雾的体积浓度 $C_{vVI}$ 的概念是单位体积污染空



气内烟雾( $K=1\text{ m}^{-1}$ )的体积,单位为 $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。通过试验建立起 $C_{vI}$ 与一般的烟雾浓度 $K$ 的关系 $C_{vI}(K)$ 。烟雾基准排放量的单位为 $\text{m}^3/(\text{辆}\cdot\text{km})$ ,取值由试验确定。注意车型车况不同,排出的烟雾浓度亦不同,度量柴油车排放的烟雾体积时,必须将烟雾的浓度化为一致,即 $K=1\text{ m}^{-1}$ 。相应的隧道全长烟雾排放量 $Q_{vI}$ 的单位为 $\text{m}^3/\text{s}$ 。将式(3.4.5)换为:

$$Q_{req(VI)}=Q_{vI}/C_{vI}(K) \quad (13)$$

式(3.4.4)的形式与其他量值不变。

### 3 竖井送排式通风的短道回流问题

#### 3.1 竖井送排式通风模式

高等级公路上的长大隧道都是单向交通,在单向交通并采用纵向通风的隧道内,交通风可作为隧道通风的动力而充分利用。如果在单向交通的隧道内采用纵向通风,则势必在排风井一侧的隧道内车辆行驶方向与风流方向一致,交通风是隧道通风的动力;而在排风井的另一侧隧道内车辆行驶方向与风流方向相反,交通风是隧道通风的阻力,这种情况显然是不理想的。为了在单向交通纵向通风的隧道内充分利用车辆产生的交通风,国外首先在一些长大隧道内采用了竖井送排式通风,见图2所示,近年来国内也在试验研究的基础上,进行了消化、吸收与完善,并在包括秦岭特长隧道(18 020 m)在内的多座公路隧道通风中应用。

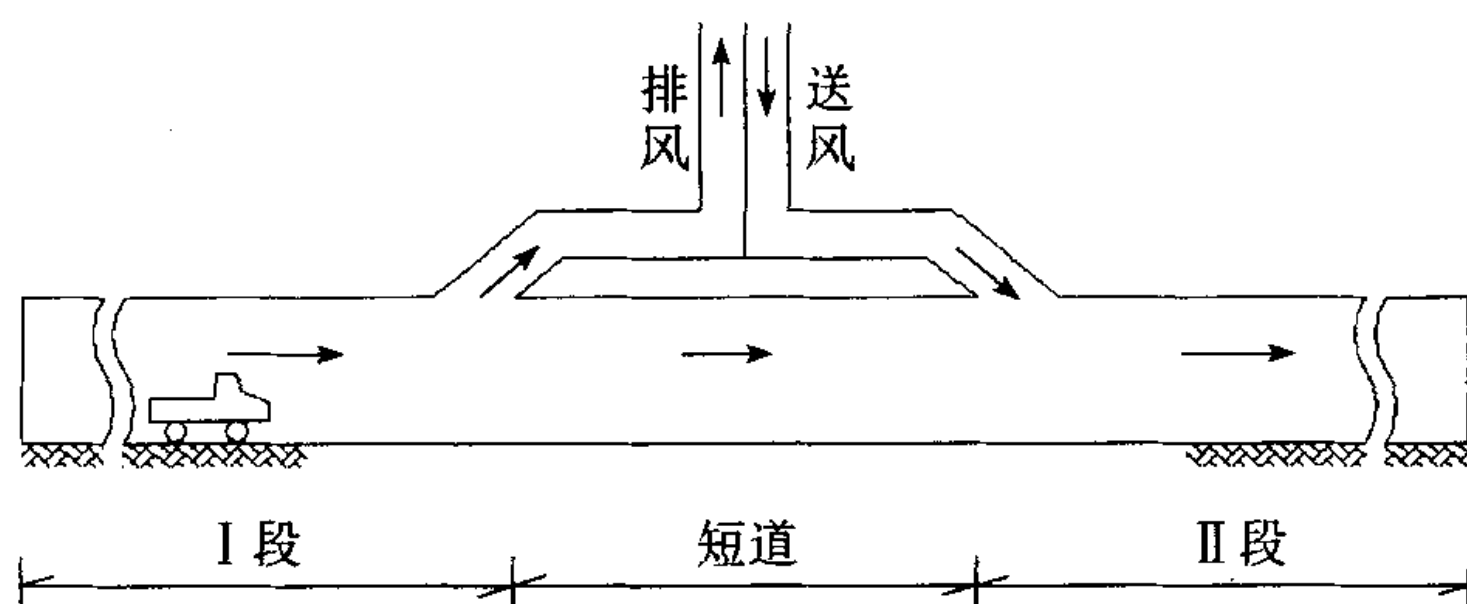


图2 竖井送排通风模式

#### 3.2 关于短道回流的讨论

由于竖井送排式通风系统比较复杂,许多问题仍在试验研究之中,其中研究的重点和难点集中在图2所示的短道段,包括排、送风口的构造形式,以及不同部位的风速、风量等参数的合理确定。《规范》3.5.8条第4款指出:“应防止短道内出现回流,短道长度不得小于50 m。”笔者认为“应防止短道内出现回流”值得商榷。这里将短道内顺流(图2所示方向)与回流(与图2所示方向相反)的优劣作简单

比较。

##### (1)短道内空气的污染程度。

顺流时,短道内空气的污染程度将比排风口空气的污染程度还高,因为风流在排风口分流后继续前行,在此过程中穿越短道的车辆对其内的空气还要进一步污染。如果短道内风流回流,则短道内流动的空气是刚刚送出的新鲜空气,自然空气质量高。

##### (2)短道内顺流与回流实现的难易。

在送排式通风系统中,排风口的压力是负压,即低于大气压;而在送风口前方的压力是正压,即大于大气压。众所周知,空气总是由压力高的地方向压力低的地方流动。在顺流情况下,只有通过合理设计送风口的构造,并加大送风口的风速,在送风口的前方形成射流,在射流的作用下,在送风口的后方产生负压。如果交通风在短道局部产生的压差与排风口的负压叠加后大于送风口后方的负压,才能在短道内形成顺流。有时上述条件不能满足,有的设计还在短道顶部设置射流风机,使射流风机产生的压差加交通风在短道局部产生的压差再加排风口的负压,使压力总和大于送风口后方的负压,在短道内形成顺流。可见短道顺流实现起来很不容易。相反,回流却很容易产生,只要在送风口的下方或后下方适当留送风窗口,便会在送风口的后方出现正压,该正压与排风负压之间的压差会引导风流回流。

##### (3)短道风流耗能。

有一种“不应有短道回流”的解释是出现短道回流能耗大,因为刚从送风口排出的新鲜空气很快又从排风口排出,空气没有充分发挥作用,浪费很大。这一点与全横向通风相比,风流在车道内流动的时间还要长些。如果将隧道在短道局部看成全横向通风,相信所有工程都可以接受。另一种解释是顺流有利于利用交通风,这一点是很显然的。但是短道两端的空气压力趋势是排风口压力小,送风口压力大,局部稍微控制不好便会出现回流,为了制止回流,又在短道顶部设置平衡回流压力的风机,一来一往难说该交通风是否值得利用。如果在短道内让风流回流,则不需射流风机,送风口的风速可以适当降低,因为不需要借助射流在送风口的后方形形成很低的负压。送风口风速的降低将使送风系统的阻力大幅度降低,在送风量相同的情况下可以扩大风道断面。由此可见,短道采用回流至少不会太多增加送排式通风系统的能耗。



以上讨论只是笔者对短道回流问题的粗浅看法,究竟如何实现短道回流,尚需进行严密的理论分析,并应用可靠的试验予以检验。

#### 4 结论

长大公路隧道的通风系统比较复杂,通风系统的工程造价很大,运营费用也十分可观。搞好长大隧道的通风设计对降低工程造价和后期运营费用极为重要。本文针对目前国内在隧道通风设计计算中业界普遍关心的问题,结合现行的《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)中的相关规定,进行了探讨。

(1)隧道自然风阻力应由自然风等效压差确定。假设隧道内自然风速并据此推算隧道自然风阻力的方法不合理。在缺少工程实地观测资料的情况下,可根据气象资料中的风速等条件,假定隧道自然风阻力为常值量,并在10~30 Pa之间取值。

(2)依据稀释烟雾计算隧道需风量时,在公式中应引入烟雾的质量浓度或烟雾的体积浓度,并用其替代公式中的一般烟雾浓度,同时将柴油车烟雾的

基本排放量与隧道全长的烟雾排放量计算公式做适当修改,可使概念清楚,便于理解与应用。新公式系统建立时需要试验资料的支持。

(3)竖井送排式通风系统中变短道顺流为有控制的回流,有利于提高短道内的空气质量,使短道内的风流更容易组织,并能从总体上降低工程造价和隧道运营通风的能耗。在这方面,进一步的理论分析与试验研究尚需进行。

#### 参考文献:

- [1] JTJ 026.1—1999,公路隧道通风照明设计规范[S].
- [2] 凤懋润. 中国公路与隧道建设[A]. 国际隧道研讨会暨公路建设技术交流会论文集[C]. 2002.
- [3] 邓顺熙. 公路与长隧道空气污染影响分析方法[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [4] 吕康成. 公路隧道运营设施[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [5] 魏军政,等. 秦岭终南山特长公路隧道纵向分段式通风设计[A]. 国际隧道研讨会暨公路建设技术交流会论文集[C]. 2002.

## Discussion of Several Problems in Ventilation Design for Highway Tunnel

LU Kang-cheng, WU Yi-min

(Highway Institute of Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Whether the ventilation system is designed reasonable or not can significantly affects the construction of long highway tunnel for its high cost in economy and energy. There are several problems in the present Specification for Design of Ventilation and Lighting of Highway Tunnel (JTJ 026.1—1999), such as the calculation of the resistance caused by natural wind in tunnel, the calculation of the amount of fresh air required to dilute smog, and “no circumfluence is permitted in the short section” when ventilating by shaft. On the basis of analyzing and reasoning, the conclusions are reached as the following: (1) The resistance caused by natural wind in tunnel is determined by equivalent pressure difference of the natural wind, and should be assumed to a constant value between 10 and 30 Pa if no observation data is available; (2) When calculating the amount of fresh air required to dilute smog, mass or volume concentration is introduced into the formula to replace the old smog concentration; (3) When ventilating by shaft, it is more reasonable to permit a controllable circumfluence than no circumfluence in the short section.

**Key words:** highway tunnel; ventilation; natural wind; smog concentration; circumfluence in short section