

文章编号:1671-8879(2009)05-0081-05

特长公路隧道排送组合通风设计计算

吕康成¹, 伍毅敏^{1,2}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要:根据空气动力学基本方程, 推导了特长隧道排送组合通风中排风口与送风口的升压力、各区段有害气体的体积浓度、各区段风量与风压等的计算公式。特别是考虑了排风道与隧道交角对排风口升压力的影响; 建立了根据有害气体体积浓度进行需风量计算的方法; 提出排送组合通风中隧道整体和各区段风量、风压应满足的充分必要条件; 根据中国排送组合通风系统送风口的常用构造形式, 建立了新的送风口通风分析计算模型。研究结果可供特长公路隧道排送组合通风设计计算和规范修订时参考。

关键词:隧道工程; 特长公路隧道; 排送组合通风; 设计计算

中图分类号:U453.5 **文献标志码:**A

Design calculation for longitudinal ventilation in extra long tunnel with air ejecting and blowing system

LU Kang-cheng¹, WU Yi-min^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: Based on aerodynamics, this paper deduces the new fundamental formulas for calculations the pressure increasing at ejecting and blowing mouths, consistence of CO, required quantity and pressure of air at the controlling crosses of extra long highway tunnel. The special results are in the following aspects: to determine the pressure increasing at the ejecting mouth considering the influence of the angle between the tunnel and ejecting mouths; to construct a new method to determine the quantity of required air by the polluted air; to put forward the necessary and sufficient condition of the amount and pressure at different sectors in extra long tunnel; to build a new analysis model for the ventilation design according the common structure of ejecting and blowing mouth in China. These conclusions can be used in design calculation for extra long tunnel ventilation with air ejecting and blowing system, and in perfection of the related specifications. 3 figs, 10 refs.

Key words: tunnel engineering; extra long highway tunnel; longitudinal ventilation with air ejecting and blowing system; design calculation

0 引 言

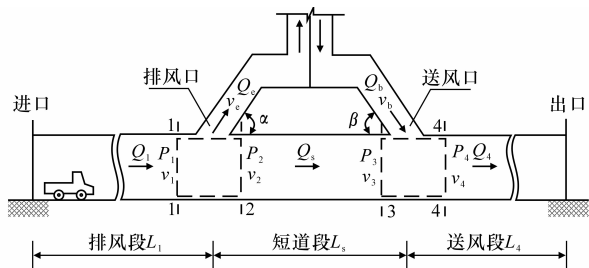
随着中国公路交通事业的蓬勃发展, 长度超过

5 000 m 的特长公路隧道数量不断增加, 仅 2007 年和 2008 年就建成十余座, 目前还有大量的特长公路隧道在建设中。为了保证隧道内的空气质量和能见

度,并使隧道内的纵向风速不影响行车安全,中国特长公路隧道多采用斜(竖)井排送组合通风。对于排送组合通风的设计计算,中国《公路隧道通风照明设计规范》^[1]提供了一套算法。这套算法以空气动力学理论为基础,原理简单可靠。但是,由于排送组合通风系统自身构造较复杂,在实际工程中还要考虑通风区段的长度与坡度差异、联络风道的长度与角度差异和不同运行工况等多种因素,这套算法还存在一些问题,需要通过进一步的理论研究和工程实践来完善^[2-7]。为此,本文应用空气动力学理论,对特长隧道排送组合通风的设计计算方法进行系统分析,并对文献[1]中存在的若干问题进行探讨。

1 排送组合通风压力模式

排送组合通风模式如图 1 所示。采用这种通风方式时,在排风口与送风口之间的短道内一般会存在空气流动,称之为短道风流。短道风流有两种可能流动方向,即与隧道内车流方向一致或相反,一致时称为顺流,相反时称为回流。设计中通常要求短道内为顺流。



图中: P_1, P_2, P_3, P_4 分别为断面 1、2、3、4 的静压; v_1, v_2, v_3, v_4 分别为断面 1、2、3、4 的风速; Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 分别为断面 1、2、3、4 及短道内的风量; v_e, Q_e 分别为排风口的风速与风量; v_b, Q_b 分别为送风口的风速与风量; α, β 分别为排风道、送风道的外端(段)与隧道的夹角。

图 1 排送组合通风模式

在短道顺流情况下,在排风口和送风口分别取图 1 中虚线所示的控制体,并分别在隧道轴线方向(向右为正)建立动量方程^[8-9],则有

$$A(P_1 - P_2) = c_2 \rho Q_s v_2 + c_e \rho Q_e v_e \cos(\alpha) - c_1 \rho Q_1 v_1 \quad (1)$$

$$A(P_3 - P_4) = c_4 \rho Q_4 v_4 + c_b \rho Q_b v_b \cos(\beta) - c_3 \rho Q_s v_3 \quad (2)$$

式中: A 为隧道的断面面积; ρ 为空气的密度; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_e, c_b$ 均为动量修正系数。

根据连续性方程 $Q_s = Q_1 - Q_e$, 注意到 $v_2 = Q_s/A = v_1(1 - Q_e/Q_1)$, 代入式(1)并整理; 同样, 根据 $Q_s = Q_4 - Q_b$, 注意到 $v_3 = Q_s/A = v_4(1 -$

$Q_b/Q_4)$, 代入式(2), 并按照工程上常用的处理方法, 取 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_e, c_b$ 均为 1。整理后可得

$$P_1 - P_2 = 2 \frac{Q_e}{Q_1} \left(\frac{Q_e}{Q_1} - 2 + \frac{v_e}{v_1} \cos(\alpha) \right) \frac{\rho v_1^2}{2} \quad (3)$$

$$P_3 - P_4 = 2 \frac{Q_b}{Q_4} \left(2 - \frac{Q_b}{Q_4} - \frac{v_b}{v_4} \cos(\beta) \right) \frac{\rho v_4^2}{2} \quad (4)$$

令 $P_2 - P_1 = \Delta P_e, P_4 - P_3 = \Delta P_b$, 并分别称为排风口与送风口的升压力, 从而有

$$\Delta P_e = 2 \frac{Q_e}{Q_1} \left(2 - \frac{Q_e}{Q_1} - \frac{v_e}{v_1} \cos(\alpha) \right) \frac{\rho v_1^2}{2} \quad (5)$$

$$\Delta P_b = 2 \frac{Q_b}{Q_4} \left(\frac{Q_b}{Q_4} + \frac{v_b}{v_4} \cos(\beta) - 2 \right) \frac{\rho v_4^2}{2} \quad (6)$$

文献[1]中排风口升压力的计算公式为

$$\Delta P_e = 2 \frac{Q_e}{Q_1} \left[\left(2 - \frac{K_e v_e}{v_1} \right) - \frac{Q_e}{Q_1} \right] \frac{\rho v_1^2}{2}$$

将其中的动量系数 K_e 也取为 1, 再与式(5)比较。可见文献[1]的公式(3.5.8-1)遗漏了 $\cos(\alpha)$, 即遗漏了排风道与隧道交角 α 的影响。

2 有害气体浓度

短道顺流情况下, 隧道内的空气流动情况如图 1 所示。根据文献[1]介绍的方法, 可分别计算出隧道入口至断面 1 范围内(下称“排风段”)车辆的 CO 排放量 Q_{CO1} , 断面 4 至隧道出口范围内(下称“送风段”)车辆的 CO 排放量 Q_{CO4} 。对于车辆在短道内 CO 排放量 Q_{CO3} , 在纵坡不变或变化不大的情况下, 可以根据排风段 L_1 和短道段 L_s 长度的比例关系进行简化处理, 计算式为

$$Q_{CO3} = Q_{CO1} \frac{L_s}{L_1} \quad (7)$$

各区段 CO 浓度详细分析如下。

隧道入口处全为新鲜空气, CO 浓度为 $\delta_{in} = 0$ 。

隧道入口至断面 1, CO 浓度呈线性递增, 断面 1 处浓度 δ_1 为

$$\delta_1 = \frac{Q_{CO1}}{Q_1} \quad (8)$$

经排风口分流后, 断面 2 处 CO 浓度 δ_1 与断面 1 处相当, 浓度 δ_2 为

$$\delta_2 = \delta_1 = \frac{Q_{CO1}}{Q_1} \quad (9)$$

由断面 2 带入短道的 CO 流量为

$$Q_{CO2} = \delta_2 Q_s = \frac{Q_{CO1}}{Q_1} (Q_1 - Q_e) \quad (10)$$

则断面 3 处 CO 浓度 δ_3 为

$$\delta_3 = \frac{Q_{CO2} + Q_{CO3}}{Q_s} \quad (11)$$

代入式(7)和式(10)并整理得

$$\delta_3 = \frac{Q_{CO1}}{Q_1} \left(\frac{Q_1}{Q_1 - Q_e} \frac{L_s}{L_1} + 1 \right) = \delta_1 \left(\frac{Q_1}{Q_1 - Q_e} \frac{L_s}{L_1} + 1 \right) \quad (12)$$

断面 4 处与断面 3 处的 CO 流量相当,为 $Q_{CO2} + Q_{CO3}$,则断面 4 处 CO 浓度 δ_4 为

$$\delta_4 = \frac{Q_{CO2} + Q_{CO3}}{Q_4} = \frac{Q_{CO2} + Q_{CO3}}{Q_s + Q_b} \quad (13)$$

断面 4 至隧道出口间 CO 浓度线性递增,出口处 CO 浓度为

$$\delta_{out} = \frac{Q_{CO2} + Q_{CO3} + Q_{CO4}}{Q_4} = \frac{Q_{CO2} + Q_{CO3} + Q_{CO4}}{Q_s + Q_b} \quad (14)$$

通过分析各控制点的 CO 浓度,可以绘出短道顺流情况下隧道 CO 浓度分布,如图 2 所示。

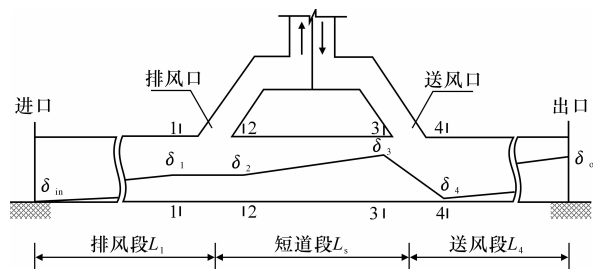


图 2 隧道 CO 浓度分布

从图 2 可以看出:①短道末端和隧道出口出现 CO 浓度极值;②短道内由于风速和空气流量小,CO 浓度升高很快。

值得指出的是,这里所定义的几个断面的 CO 浓度均为一般意义下的有害气体体积浓度。而文献[1]所定义的通风井底部的浓度 C_2 和隧道出口内侧处的浓度 C_3 均为需风量与设计风量的比值,不易被理解与应用,即

$$C_2 = \frac{Q_{req1}}{Q_{r1}}$$

$$C_3 = \frac{Q_{req2}}{Q_{r1} - Q_e - Q_{req1} + Q_e Q_{req1} / Q_{r1} + Q_b}$$

式中: Q_{req1} 为排风段需风量; Q_{req2} 为送风段需风量; Q_{r1} 为排风段设计风量。

3 排、送风段的风量和风压

3.1 排风段风量与风压

根据上述有害气体浓度分析,排风段风量设计以满足稀释短道末端有害气体的要求为标准,除与隧道内污染空气的排放有关外,还取决于 2 个控制因素:排风口分流系数和短道长度。

排风口分流系数 k 定义为排风口排出流量占隧道入口进风量的比例,即

$$k = Q_e / Q_1 \quad (15)$$

由于只考虑顺流情况, k 值总是小于 1。从有效排放污染空气角度出发,应尽量提高 k 值;但如果 k 值过高,短道内风速大大降低,污染空气浓度很容易超限。根据相关资料, k 一般取为 0.85 ~ 0.90。

短道长度 L_s 的选取考虑两方面因素:短道内气流方向和污染空气浓度。短道内设计为顺流,为了避免出现回流,短道长度不应过短;由于短道内污染空气浓度上升很快,为了避免短道污染空气浓度超过设计值,短道长度不宜过长。事实上,影响短道内空气流动的因素很多,其流动状态复杂多变,短道合理长度需要通过试验确定。参考国内外资料,短道长度取值略大于 50 m。

选定分流系数 k 和短道长度 L_s ,考虑短道末端(断面 3)有害气体浓度应低于设计容许浓度,应有

$$\delta_3 \leq \delta_D \quad (16)$$

式中: δ_D 为有害气体设计容许浓度。

将式(16)代入式(12),可得隧道入口送风量为

$$Q_1 = \frac{Q_{CO1}}{\delta_D} \left(\frac{L_s}{(1-k)L_1} + 1 \right) \quad (17)$$

进而由 Q_1 可算出短道风量 Q_s 和排风口的排风量 Q_e 。

由排风机提供的排风口升压力 ΔP_e 能否保证从隧道进口送入风量 Q_1 ,需要进一步分析排风段的压力情况。分别计算排风段的通风阻力 ΔP_{r1} 、交通通风阻力 ΔP_{t1} 和自然风阻力 ΔP_{m1} ,即

$$\Delta P_{r1} = (\xi_{in} + \lambda \frac{L_1}{D_r}) \frac{\rho}{2} v_{r1}^2 + \xi_p \frac{\rho}{2} v_{r1}^2 \quad (18)$$

$$\Delta P_{t1} = \frac{A_m}{A_r} \frac{\rho}{2} n_1 (v_{t1} - v_{r1})^2 \quad (19)$$

$$\Delta P_{m1} = \text{Const} \quad (20)$$

式中: ξ_{in} 为隧道入口局部阻力系数; ξ_p 为排风口分叉处局部阻力系数; λ 为排风段隧道壁面摩擦损失系数; D_r 为隧道断面当量直径; v_{r1} 为排风段隧道设计风速; A_m 为汽车等效抗阻面积; A_r 为隧道净空断面面积; n_1 为排风段内车辆数; v_{t1} 为排风段内车速。令 $\Delta e = \Delta P_{r1} - \Delta P_{t1} + \Delta P_{m1} - \Delta P_e$ (21)

Δe 为隧道排风段的通风阻力与通风动力之差。如果 $\Delta e \leq 0$,表明排风段通风动力充足,能保证从隧道进口吸入风量 Q_1 ;相反,如果 $\Delta e > 0$,则不能从隧道进口吸入风量 Q_1 。在后一种情况下,可调整设计参数重新计算;若仍希望能从隧道入口送入风量 Q_1 ,则需要在排风段设置射流风机,并使射流风机

$$\Delta P_e = 2 \frac{Q_e}{Q_1} (2 - \frac{Q_e}{Q_1}) \frac{\sigma v_1^2}{2} \quad (33)$$

可见式(33)与将 $\alpha = 90^\circ$ 代入式(5)得到的结论是相同的。

在送风口,由于送风口的构造有些许变化,取图3所示的虚线包围的体积为控制体,对控制体内的风流应用动量方程,设坐标轴水平向右为正,可得

$$A_b P_b + A_3 P_3 - A P_4 = \rho Q_4 v_4 - \rho Q_b v_b - \rho Q_3 v_3 \quad (34)$$

在式(34)中,考虑到 $A_b + A_3 = A$, $Q_4 = Q_b + Q_3$;由于断面3的上、下部静压差别不大,如果该静压很大,则喷出的射流应立即向下扩散或向上收缩。因此,假设断面3的上、下部静压相同,即 $P_b = P_3$ 。代入式(34)并整理,可得断面4与断面3的静压差 $P_4 - P_3 = \Delta P_b$,即送风口的升压力

$$\Delta P_b = 2 \left[\frac{A}{A_3} (1 - \frac{Q_b}{Q_4})^2 - (1 - \frac{v_b}{v_4} \frac{Q_b}{Q_4}) \right] \frac{\sigma v_4^2}{2} \quad (35)$$

文献[1]在计算常用送风口的升压力时,将 $\cos(0^\circ) = 1$ 和 $K_b = 1$ 代入式(3.5.8-2),得到常用构造下的送风口升压力计算公式为

$$\Delta P_b = 2 \frac{Q_b}{Q_{r2}} \left(\frac{k_b v_b \cos(\beta)}{v_{r2}} - 2 + \frac{Q_b}{Q_{r2}} \right) \frac{\sigma v_{r2}^2}{2}$$

将上式与式(35)进行比较,显然两者之间有较大的出入。此外,文献[1]中将式(3.5.8-2)送风口的倾角 β 取为 0° ,此倾角对应的结构不够清楚。

6 结 语

(1)推导了排送组合通风中排风口和送风口的升压力计算公式,计算结果表明,文献[1]在计算中遗漏了排风道与隧道交角 α 的影响。

(2)导出了排送组合通风中各区段的有害气体体积浓度计算公式,可直接用于新鲜空气需风量的计算,避免采用文献[1]中的浓度比指标,概念更清晰、准确。

(3)导出了排送组合通风中各区段的风量、风压关系,提出全隧道的通风动力大于全隧道的通风阻力仅是隧道通风的必要条件,排风段和送风段各自的通风动力分别大于各自的通风阻力是隧道通风的充要条件。

(4)提出了符合中国特长隧道斜竖井排送组合通风常用风口构造的升压力计算公式。

参考文献:

References:

[1] JTJ 026.1—1999,公路隧道通风照明设计规范[S].

- [2] 项小强,吴德兴.公路隧道多竖井送排式通风计算方法与实践[J].现代隧道技术,2007,44(4):46-51,84.
XIANG Xiao-qiang, WU De-xing. Multi-shaft blow-in and exhaust ventilation of a road tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(4): 46-51, 84.
- [3] 韩 星,张 旭.公路隧道纵向送排式通风竖井数量及其间距研究[J].现代隧道技术,2006,43(3):58-61.
HAN Xing, ZHANG Xu. Study on the number and spacing of ventilation shafts in a highway tunnel with longitudinal ventilation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(3): 58-61.
- [4] 夏永旭,石 平.公路隧道扩(缩)径风道局部损失数值模拟[J].中国公路学报,2006,19(6):83-86.
XIA Yong-xu, SHI Ping. Numerical simulation of local loss of expanding or reducing duct in highway tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 83-86.
- [5] 夏永旭,石 平.公路隧道通风空气交叉污染三维数值分析[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(6):44-47.
XIA Yong-xu, SHI Ping. 3D numerical analysis on air cross pollution of opening and shaft in ventilation of highway tunnel [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 44-47.
- [6] 闫治国,杨其新,王明年,等.火灾工况下公路隧道竖井通风模式试验研究[J].土木工程学报,2006,39(11):101-106.
YAN Zhi-guo, YANG Qi-xin, WANG Ming-nian, et al. Experimental study of shaft ventilation modes for road tunnels in case of fire [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(11): 101-106.
- [7] 郭 春,王明年,周仁强.特长公路隧道全射流通风方式火灾网络计算研究[J].筑路机械与施工机械化,2007,24(11):49-50.
GUO Chun, WANG Ming-nian, ZHOU Ren-qiang. Calculation and research of fire net of full jet flow ventilation system for extra-long highway tunnel [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(11): 49-50.
- [8] 吴望一.流体力学[M].北京:北京大学出版社,1983.
- [9] 姜兴华.流体力学[M].成都:西南交通大学出版社,1999.
- [10] 吕康成.公路隧道运营管理 [M].北京:人民交通出版社,2006.