

纵向通风隧道正常运营 CO 浓度限值计算

叶蔚, 张旭

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092)

摘要: 我国《公路隧道通风照明设计规范》与国外标准对隧道内 CO 浓度限值的设定在计算方法和取值上都存在差异. 针对射流风机式及竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道 CO 浓度分布特性, 基于差分形式的 Coburn-Forster-Kane 方程(CFK 方程), 拟合了两类典型纵向通风隧道正常运营 CO 浓度限值计算式. 结果表明: 尽管两类隧道具有不同的 CO 浓度分布特性, 工程中可按相同的限值设计; 对于长隧道, 我国应设定更严格的限值标准.

关键词: 纵向通风隧道; 射流风机; 竖井; CO 浓度; Coburn-Forster-Kane 方程(CFK 方程)

中图分类号: U453.5

文献标志码: A

Predicting Permissible CO Concentration Limit for Longitudinal Ventilation Tunnels in Normal Operation

YE Wei, ZHANG Xu

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The current Chinese code, Specifications for Design of Ventilation and Lighting in Highway Tunnel, lists the admissible CO mass concentration limits for tunnel, which varies from international standards on both values and principles. Two typical types of longitudinal ventilation tunnel are longitudinal ventilation tunnel with jet fan(s) and longitudinal ventilation tunnel with jet fan(s) and vertical shaft(s). Difference form of Coburn-Forster-Kane equation (CFK equation) is introduced to calculate the CO mass concentration limits for those two types of longitudinal ventilation tunnel and a fitting equation for predicting permissible CO mass concentration limits is presented and is applicable to both types of tunnel. The results show that the CO mass concentration limit values for long length longitudinal ventilation tunnel should be lower.

Key words: longitudinal ventilation tunnel; jet fan(s);

vertical shaft(s); CO mass concentration; Coburn-Forster-Kane Equation

从卫生角度讲, CO 是隧道内环境存在的主要污染物, 其对人的危害程度取决于 CO 浓度和人体暴露时间. CO 之所以危害人体健康, 是因其与血液中的血红蛋白(Hemoglobin, Hb)结合生成羧络(碳氧)血红蛋白(Carboxyhemoglobin, COHb)的结合力是 O₂ 与血红蛋白结合生成氧合血红蛋白(Oxyhemoglobin, O₂Hb)结合力的约 210 倍^[1]. 降低 CO 对人体健康危害的主要方式是进行隧道通风, 隧道中稀释 CO 的需风量由隧道内 CO 排放量、CO 浓度限值、隧道外 CO 浓度等因素确定. 我国现有隧道通风设计标准《公路隧道通风照明设计规范》^[2] 及国际主要隧道通风标准制订组织 PIARC 在 2004 年发布的报告“Road tunnel: vehicle emissions and air demand for ventilation”^[3] 中给出了不同的 CO 浓度限值和稀释 CO 的需风量计算方法. 我国规范^[2] 中 CO 浓度限值存在一定争议^[4]. 尽管在许多国家 CO 浓度并不是隧道需风量设计的决定性因素^[3], 但鉴于 CO 可能给人体健康带来的危害, 完善我国 CO 浓度限值指标仍值得深入研究.

目前求解 CO 浓度、人体暴露时间与羧络血红蛋白浓度饱和度关系的理论基础是 Coburn 等^[5] 建立的在恒定且较低的环境 CO 浓度下人体暴露时间与人体体内羧络血红蛋白浓度饱和度的微分关系式, 即 CFK(Coburn-Forster-Kane)方程. WHO 通过实验研究验证了 CFK 方程具有一定的可靠性^[6]. 原 CFK 微分方程以 CO 浓度为定值进行计算, 而隧道中沿程 CO 浓度通常并不恒定, 直接使用 CFK 微分方程计算 CO 浓度限值存在较大误差. 叶蔚等^[7] 基于不同通风方式隧道 CO 分布特性给出了

收稿日期: 2012-05-30

基金项目: 上海市科委基金(08DZ1203904)

第一作者: 叶蔚(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为室内空气品质及工业通风技术. E-mail: realshow@live.cn

通讯作者: 张旭(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为复杂通风技术. E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn

用CFK积分方程导出解析解用于计算隧道CO浓度限值.但积分方程中仍假定氧合血红蛋白饱和度为定值,得到的解析解为近似解析解.CFK差分方程可克服该缺陷.本文针对射流风机式及竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道CO浓度分布特性,基于差分形式的CFK方程,拟合了两类典型纵向通风隧道正常运营工况CO浓度限值计算式.

1 纵向通风隧道CO浓度分布

纵向通风是目前隧道的主要通风形式,具体有射流风机式、集中送入式、竖(斜)井(简称竖井)排出式、竖井送排式、竖井送排与射流风机组合式及静电除尘式等不同设计方式^[2].纵向通风通常使新鲜空气通过隧道口或送风竖井进入隧道,沿隧道纵向流动,将污染空气通过隧道口或排风竖井排出隧道.若不考虑静电除尘方式,纵向通风隧道CO浓度分布规律大致可分为无竖井和有竖井两类.

1.1 射流风机纵向通风隧道

射流风机纵向通风隧道是无竖井纵向通风隧道的典型.作如下假设:①隧道为单向交通等截面隧道,长为 L ,km;②隧道为正常运营,车速恒定为 v , $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,单位交通量单位长度CO排放量 g_{CO} , $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,为定值;③忽略隧道内CO的扩散作用;④隧道所有断面上机动车污染物均与空气混合均匀,且忽略机动车排放对隧道通风量体积的影响;⑤忽略隧道温升和坡度对CO浓度分布的影响.

以行车方向为坐标轴,以隧道入口为坐标原点,则隧道内坐标轴 x 处($0 < x \leq L$)人体吸入的CO分压力

$$P^{\text{CO}} = P^{\text{CO}(0)} + P^{\text{CO}'} = P^{\text{CO}(0)} + \frac{Gv}{60}t \quad (1)$$

式中: $P^{\text{CO}(0)}$ 为隧道入口处CO分压力,Pa; $P^{\text{CO}'}$ 为隧道内坐标轴 x 处由机动车排放产生的CO分压力,Pa; t 为人员在CO环境中暴露时间,min. $G = g_{\text{CO}}P_{\text{mix}}/(\rho q_j)$.其中, P_{mix} 为混合气体总压力,Pa; q_j 为纵向通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为CO密度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.2 竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道

竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道是有竖井纵向通风隧道的典型,如图1所示.

若竖井数量为 n ($n \geq 1$),隧道由每个竖井送排风口前后的排风段 $L_{1,d}$ ($d=1,2,\dots,n$,下同)、送风段 $L_{2,d}$ 连接组成,且中间段 $L_{m,d} = L_{1,d} + L_{2,d-1}$.假定:按设计要求所有短道段 $L_{s,d}$ 风流均与行车方向一致,即均为顺流^[8];纵向通风和竖井风流的分流、合

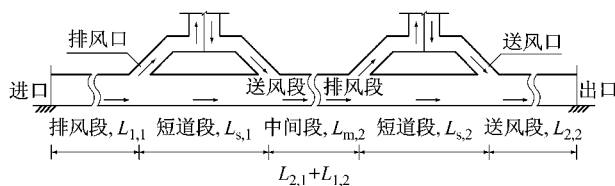


图1 竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道示意图
Fig.1 Schematic diagram of longitudinal ventilation tunnel with vertical shafts

流均仅发生在短道段的首尾两断面处.

为简化表达式,以 $P_{1,n}^{\text{CO}}(x)$, $P_{s,n}^{\text{CO}}(x)$, $P_{2,n}^{\text{CO}}(x)$ 分别代表第 n 个竖井的排风段、短道段、送风段在 x 处的CO分压力,以 $P_{1,n}^{\text{CO}}$, $P_{s,n}^{\text{CO}}$, $P_{2,n}^{\text{CO}}$ 分别代表该段坐标最大值处人体吸入的CO分压力;令 $\Delta L_{a,b,c}(x)$ 为 x 处至其所处段(排风段或短道段或送风段)段首的长度,即 $\Delta L_{a,b,c}(x) = x - \left(\sum_{i=1}^a L_{1,i} + \sum_{i=1}^b L_{s,i} + \sum_{i=1}^c L_{2,i} \right)$,其中 a,b,c 分别为隧道入口至 x 处之间含有的完整的排风段、短道段、送风段的数量.同时引入分流系数 k_d ^[8](第 d 个排风口排出流量占隧道第 $(d-1)$ 个排风段风量的比例),在 $x=L_{1,d}$ 处发生分流,在 $x=L_{1,d}+L_{s,d}$ 处合流.推导过程略.

当 $n=1$ 时,隧道各段 P^{CO} 可表示为

$$\begin{cases} P_{1,1}^{\text{CO}}(x) = P^{\text{CO}(0)} + G\Delta L_{0,0,0}(x) \\ P_{s,1}^{\text{CO}}(x) = P_{1,1}^{\text{CO}} + \frac{G}{(1-k_1)}\Delta L_{1,0,0}(x) \\ P_{2,1}^{\text{CO}}(x) = (1-k_1)P_{s,1}^{\text{CO}} + k_1P^{\text{CO}(0)} + G\Delta L_{1,1,0}(x) \end{cases} \quad (2)$$

当 $n \geq 2$ 时,隧道各段 P^{CO} 可表示为

$$\begin{cases} P_{1,n}^{\text{CO}}(x) = P_{2,n-1}^{\text{CO}} + G\Delta L_{n-1,n-1,n-1}(x) \\ P_{s,n}^{\text{CO}}(x) = \frac{1-k_{n-1}}{1-k_n}P_{1,n}^{\text{CO}} + \frac{G\Delta L_{n,n-1,n-1}(x)}{1-k_n} \\ P_{2,n}^{\text{CO}}(x) = (1-k_n)P_{s,n}^{\text{CO}} + k_nP^{\text{CO}(0)} + G\Delta L_{n,n,n-1}(x) \end{cases} \quad (3)$$

2 CFK 差分方程

CFK方程的推导过程见文献^[5,9],差分形式的CFK方程用式(4)表示.基于CFK差分方程及纵向通风隧道CO浓度分布特性(见式(1)~(3))可求解两类典型纵向通风隧道CO浓度限值.

$$\begin{aligned} C_{t+\Delta t}^{\text{COHb}} - C_t^{\text{COHb}} &= \frac{\dot{V}_{\text{CO}}}{V_b} + \\ & \frac{P^{\text{CO}} - \frac{C_t^{\text{COHb}} \bar{P}_{\text{O}_2}}{M(C_{\text{max}}^{\text{O}_2\text{Hb}} - C_t^{\text{COHb}})}}{V_b \left[\frac{1}{D_L} + \frac{P_B - P_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{V}_A} \right]} \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

式中: C^{COHb} 和 $C^{\text{O}_2\text{Hb}}$ 为单位体积血液中羧络血红蛋白浓度饱和度和氧合血红蛋白饱和度, %; \dot{V}_{CO} 为人体 CO 产生率, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$; V_b 为有效血容量, mL ; \bar{P}_{O_2} 为肺部毛细血管血中与 C^{COHb} 达到平衡时的平均 O_2 分压力, Pa ; D_L 为肺部扩散系数, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$; \dot{V}_A 为肺泡换气率, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$; P_B 为大气压力, Pa ; $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸气压力, Pa ; M 为 Haldane 常数, 表示 Hb 对 CO 的亲合力与对 O_2 的亲合力的比值; 下标 $t, \Delta t, \max$ 分别为 CO 暴露时刻、时刻的微小增量、最终时刻, min ;

3 国内外标准对 CO 质量浓度设计限值的设定

3.1 国内对 CO 质量浓度设计限值设定及描述

国内对正常运营工况的纵向通风隧道 CO 质量浓度限值的描述见表 1^[2], 按 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 计算. 隧道正常运营车速一般为 $50 \sim 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 取较低的车速计算, 即人员在隧道内历经时间较长, 结果将偏安全.

表 1 《公路隧道通风照明设计规范》中纵向通风隧道 CO 质量浓度限值

Tab.1 CO mass concentration limits from Chinese Code JTJ 026.1—1999		$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
隧道长度/m	CO 质量浓度限值	
$\leq 1\ 000$	344	
$\geq 3\ 000$	386	

注: 隧道长度在 $1\ 000 \sim 3\ 000 \text{ m}$ 以插值法取值.

3.2 国外标准对 CO 质量浓度限值设定

PIARC 对隧道 CO 质量浓度设定见表 2^[3].

此外, 国内外卫生标准通常给出短期暴露限值, 其等效 C^{COHb} 见表 3.

表 2 PIARC 对 CO 质量浓度限值

Tab.2 CO mass concentration limits from PIARC

交通状况	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	
	CO 质量浓度	
	1995 年	2010 年
正常高峰交通 ($50 \sim 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)	115	80

4 计算参数取值

4.1 人体血液中 C^{COHb} 限值的确定

文献[12]推荐采用 0.8% 作为 C^{COHb} 初始值. 我

表 3 国内外卫生标准及等效 C^{COHb}

Tab.3 CO mass concentration limits and equivalent COHb saturation level from hygienic standards

标准	CO 质量 浓度限值/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	暴露时间/ min	等效 C^{COHb} / %
美国加州 卫生标准 ^[10]	23	60	1.21
中国卫生标准 ^[11]	30	15	0.95

国规范引用梅氏曲线的结论, 认为 C^{COHb} 超过 10% 后, 就会对人体产生程度不同的症状, 并留安全余量为 5% ^[2]. WHO^[13] 推荐的 C^{COHb} 限值为 2.5% . 从表 3 中可知目前国内外主要卫生标准短期暴露等效 C^{COHb} 约为 1.00% . 本文选取 $1.0\%, 2.0\%, 2.5\%, 3.0\%, 5.0\%$ 作为 CO 质量浓度限值计算标准.

4.2 隧道入口处 CO 初始分压值确定

满足式(4)中等式右边恒非负的条件为 P^{CO} 恒不小于 360 Pa , 即其初始值(最小值) $P^{\text{CO}(0)} \geq 360 \text{ Pa}$, 另根据 GB 3095—2012《环境空气质量标准》二级环境空气浓度限值日平均指标为 320 Pa , 故 $P^{\text{CO}(0)}$ 取 360 Pa .

4.3 CFK 差分方程计算参数取值

除 P^{CO} 的初始值外, 式(4)中其他计算参数选取参照文献[9], 见表 4.

表 4 CFK 差分方程计算参数取值

Tab.4 Selected parameters' value in CFK difference equation

参数	取值	参数	取值
$\bar{P}_{\text{O}_2}/\text{Pa}$	13 329	P_B/Pa	101 300
M	218	$P_{\text{H}_2\text{O}}/\text{Pa}$	6 265
$D_L/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$	0.225	$\dot{V}_A/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	6 000
V_b/mL	5 500	$\dot{V}_{\text{CO}}/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	0.007

5 纵向通风隧道 CO 质量浓度限值讨论

5.1 射流风机纵向通风隧道

5.1.1 CO 质量浓度沿程分布

典型的射流风机纵向通风隧道沿程 CO 质量浓度分布如图 2. 图 2 给出了当隧道长度为 5 km , 运营车速为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时不同 C^{COHb} 指标对应的沿程 CO 质量浓度分布.

对于射流风机纵向通风隧道, 基于累积效应在隧道近出口处 CO 质量浓度达到最高值. 从卫生与安全角度应限定隧道近出口处的 CO 质量浓度.

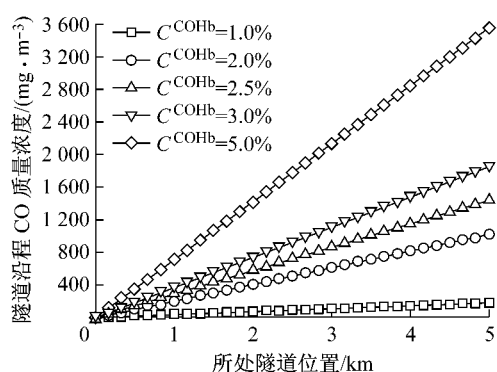


图2 射流风机纵向通风隧道沿程CO质量浓度分布

Fig.2 CO mass concentration profile in longitudinal ventilation tunnel with jets

5.1.2 隧道长度对CO质量浓度限值的影响

图3给出了车速为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,隧道长度在 $1 \sim 20 \text{ km}$ 范围内近出口处CO质量浓度限值,纵坐标采用对数坐标以突出在较低CO质量浓度范围内不同 C^{COHb} 指标对应的CO质量浓度限值变化趋势。

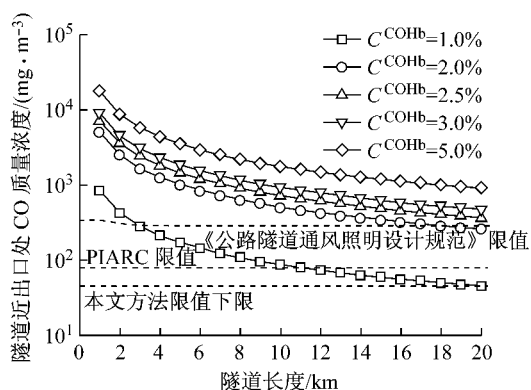


图3 隧道长度对CO质量浓度限值的影响

Fig.3 The effect of permissible CO mass concentration limits due to tunnel lengths

图3中我国规范^[2]和PIARC^[3]给出的限值与五条曲线仅有三个交点.若按 $C^{\text{COHb}}=2.0\%$ 或更大取值时,按我国规范取值的长度在 18.2 km 以下的射流风机纵向通风隧道均满足卫生要求,按PIARC限值取值则满足的隧道长度更长。

表3中短期暴露的等效 C^{COHb} 均接近 1.00% ,讨论 $C^{\text{COHb}}=1.0\%$ 的指标更具参考价值.在该条件下,仅当隧道长度小于 3.0 km 时,我国规范限值满足卫生要求.CFK差分方程计算结果并不支持我国规范对判定CO质量浓度限值长度分段点 1.0 km 和 3.0 km 的选取和划分.对于PIARC限值,当隧道长度小于 10.9 km 时PIARC限值(取设计年份为2010年)满足卫生要求.此外, $45 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 一般可作为限值的下限.总体来讲,我国规范除卫生要求整体低于

PIARC限值外,目前PIARC限值相比我国规范对长距离隧道的适用性也较好。

5.1.3 车速对CO质量浓度限值的影响

图4给出六种车速($50, 60, 70, 80, 90, 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)对CO质量浓度限值的影响。

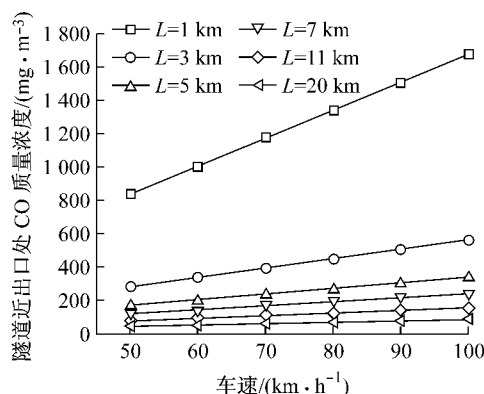


图4 车速对CO质量浓度限值的影响

Fig.4 The effect of permissible CO mass concentration limits due to velocities

由图4可知,在一定的隧道长度下随着车速的增加隧道近出口处CO质量浓度几乎呈线性增长.车速变化对短隧道CO质量浓度限值影响较大,但短隧道所需CO质量浓度限值在隧道正常运营车速范围内整体要求较低(即作为限值的CO质量浓度值较高)。

5.1.4 CO质量浓度限值计算式

令 $\delta_{\text{CO}}(L, v, C^{\text{COHb}})$ 为长度 L 、车速 v 、羧络血红蛋白浓度饱和度 C^{COHb} 的隧道CO质量浓度限值.对于射流风机纵向通风隧道应规定近出口处CO质量浓度为限值.计算可知,在相同 v 和 C^{COHb} ,但不同 L 的情况下, δ_{CO} 之比与 L 近似成反比;在相同 v 和 L ,但不同 C^{COHb} 指标的情况下, δ_{CO} 之比近似为 C^{COHb} 增量之比;相同 L 和 C^{COHb} ,不同 v 情况下, δ_{CO} 之比近似等于 v 之比.故拟合可得射流风机纵向通风隧道CO质量浓度限值计算式为

$$\delta_{\text{CO}}(L, v, C^{\text{COHb}}) =$$

$$\frac{\delta_{\text{CO}}(1, v, 1.0\%)}{L} \frac{C^{\text{COHb}} - 0.8\%}{0.2\%} = \frac{\delta_{\text{CO}}(1, 50, 1.0\%)}{L} \frac{v}{50} \frac{C^{\text{COHb}} - 0.8\%}{0.2\%} = \frac{844}{L} \frac{v}{50} \frac{C^{\text{COHb}} - 0.8\%}{0.2\%} \quad (5)$$

式(5)适用于设计和运营阶段.在式(5)适用范围内,即 v (六个水平)和 C^{COHb} (五个水平)的任意组合下,以隧道长度为变量计算 δ_{CO} 一元非线性回归方差范围为 $[0.99971, 0.99998]$.当隧道长度不大于

10 km 时, 式(5)与直接计算式误差范围为 $[-3.8\%, 0.5\%]$, 误差为负代表拟合值偏小, 也偏安全. 当隧道长度不大于 20 km 时误差范围为 $[-7.5\%, 0.5\%]$.

5.2 竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道

吕康成等^[8]推荐将短道长度取值略大于 50 m, 将分流系数 k_d 取 0.85~0.90. 经试算 k_d 变化对 CO 质量浓度分布影响较小, 故均按 0.90 取值. 短道长度按 50 m 取值计算.

5.2.1 CO 质量浓度沿程分布

图 5 给出了典型竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道沿程 CO 质量浓度分布. 隧道长度 5 km, 全程有两处送排风竖井. 运营车速为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

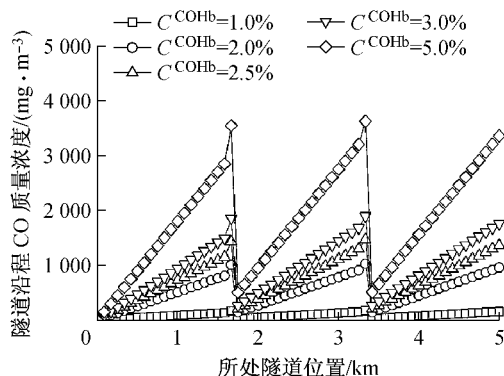


图 5 竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道沿程 CO 质量浓度分布

Fig. 5 CO mass concentration profile in longitudinal ventilation tunnel with vertical shafts

由图 5 可知, 竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道全程 CO 质量浓度存在多个峰值. 若隧道仅有一个竖井且处于均分隧道全长的位置时(同时假设隧道外环境 CO 质量浓度为零), 可推导(即令式(2)中 $P_{s,1}^{\text{CO}}(x) \leq P_{2,1}^{\text{CO}}(x)$)得到当隧道全长大于 9.05 km 时, 隧道全程浓度峰值位于隧道近出口处, 反之则位于竖井近送风口处. 而对于存在多个竖井, 且竖井位置不均匀分布于隧道全长时, 隧道全程 CO 质量浓度峰值可能出现在任何一个竖井近送风口处或隧道近出口处. 故对于竖井送排与射流风机组合纵向通风隧道, 在设计阶段和运营阶段都应关注所有可能出现 CO 质量浓度峰值的地点.

5.2.2 竖井位置对 CO 质量浓度限值的影响

假定竖井处于短道段的中心处, 并定义短道段中心至隧道入口的距离与隧道全长的比值为竖井位置比例. 当隧道有且仅有一个竖井时, 当位置比例不大于 0.5 时, 隧道全程 CO 质量浓度峰值出现在竖

井近送风口处; 当位置比例大于 0.5 时, 峰值出现在隧道近出口处. 表 5 中按隧道全程 CO 质量浓度峰值给出. 运营车速取为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $C^{\text{COHb}} = 1.0\%$ (若无特殊说明, 算例均按此取值).

表 5 竖井位置对隧道 CO 质量浓度限值的影响

Fig. 5 The effect of permissible CO mass concentration limit due to shafts' position

位置比例	变量	隧道长度/km		
		1	10	20
0.1	峰值	865.5	94.5	47.8
	G	0.805 3	0.008 5	0.002 0
0.3	峰值	947.9	101.0	52.6
	G	1.061 8	0.011 4	0.002 8
0.5	峰值	1 329.6	87.3	45.6
	G	1.185 9	0.012 9	0.003 2
0.7	峰值	1 434.6	103.9	52.4
	G	1.062 1	0.011 5	0.002 8
0.9	峰值	1 278.8	98.1	49.8
	G	0.808 7	0.008 5	0.002 1

注: “峰值”指隧道全程 CO 质量浓度峰值, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

由表 5 可知, 在隧道全长为 1~20 km 范围内, 由于 CO 质量浓度沿程分布的不同, 当竖井位于隧道中心(位置比例=0.5), 即均分隧道全长时, 其全程 CO 质量浓度峰值并非在各比例中最高. 实际上竖井仅存在于长隧道中, 对于长隧道, 位置比例为 0.3 或 0.7 时全程 CO 质量浓度峰值为位置比例 0.5 时的 110%.

当一定全长的竖井隧道送风段、排风段长度变化时, 可比较 G 值. G 值反映一定机动车污染物排放水平下断面风量的大小或一定断面风量下允许的机动车污染物排放水平. G 值越高, 在一定机动车污染物排放水平下, 所需的断面风量越小, 即需风量越小. 从表 5 中可知, 隧道全长在 1~20 km 范围内, 当竖井位于隧道中心(位置比例=0.5)时, G 值达到最高值. 故对于有且仅有一个竖井的隧道, 从卫生和经济角度出发应将竖井设于均分隧道全长的位置(实际上应取位置比例略大于 0.5 处). 对于有多个竖井的隧道计算比较同理.

5.2.3 竖井数量对 CO 质量浓度限值的影响

竖井数量对隧道 CO 质量浓度限值的影响见图 6. 图 6 中给出的均为隧道全程 CO 质量浓度峰值.

由图 6 可知, 即便纵坐标采用对数坐标, 对于全长 20 km 以内的竖井送排与射流风机组合纵向通风隧道, 增加竖井数量并不能有效降低隧道全程 CO 质量浓度峰值限值, 特别是对于一般需考虑增设竖井的长隧道、超长隧道而言, 无论是否设置竖井, 设置多少几乎不改变 CO 质量浓度限值. 但增设竖井

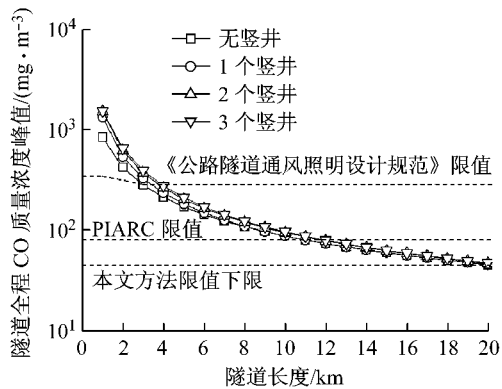


图6 竖井数量对隧道CO质量浓度限值的影响

Fig.6 The effect of permissible CO mass concentration limits due to shaft numbers

的结果在于允许隧道全程出现多处质量浓度峰值,从而影响断面风速、需风量等,此处不展开讨论。

进一步讨论竖井数量对隧道CO质量浓度限值的影响。表6给出了在两种卫生要求下竖井数量对隧道CO质量浓度限值的影响。表6中若隧道有竖井,其全程CO质量浓度峰值出现在距离出口最近的竖井处。可见无论卫生要求高低,对于长度大于10 km的隧道,增加三个以内(含三个)竖井,对于长度在8~10 km的隧道,增加两个以内(含两个)竖井,对于长度在4~8 km的隧道,增加一个竖井,均只能使隧道全程CO质量浓度峰值增加约10%。而长度在4 km以下的隧道一般在工程上不设置竖井,尽管设置竖井将大幅提高CO质量浓度峰值限值。

表6 竖井数量对隧道CO质量浓度限值的影响

Fig.6 The effect of permissible CO mass concentration limits due to vertical shaft numbers

COHb / %	隧道长度 / km	CO 质量浓度 峰值限值及影响	竖井数量/个			
			0	1	2	3
1.0	1	限值/(mg·m ⁻³)	843.7	1 329.6	1 510.7	1 536.0
		影响/%	—	57.6	79.1	82.1
	4	限值/(mg·m ⁻³)	213.7	234.7	264.2	275.9
		影响/%	—	9.8	23.6	29.1
	8	限值/(mg·m ⁻³)	108.8	109.6	120.1	123.2
		影响/%	—	0.7	10.4	13.3
	10	限值/(mg·m ⁻³)	87.7	87.3	94.2	96.5
		影响/%	—	-0.5	7.4	10.1
	20	限值/(mg·m ⁻³)	45.6	45.6	46.8	47.2
		影响/%	—	0	2.8	3.5
	1	限值/(mg·m ⁻³)	17 663.5	27 912.0	31 729.4	32 259.7
		影响/%	—	58	79.6	82.6
5.0	4	限值/(mg·m ⁻³)	4 435.8	4 881.6	5 509.4	5 759.6
		影响/%	—	10.1	24.2	29.8
	8	限值/(mg·m ⁻³)	2 229.1	2 247.2	2 476.7	2 542.6
		影响/%	—	0.8	11.1	14.1
	10	限值/(mg·m ⁻³)	1 788.3	1 784.4	1 937.7	1 979.0
		影响/%	—	-0.2	8.4	10.7
	20	限值/(mg·m ⁻³)	905.6	908.0	932.9	941.0
		影响/%	—	0.3	3	3.9

注:“影响”表示增加竖井后使隧道全程CO质量浓度峰值升高的百分比。

5.2.4 CO质量浓度限值计算式

从卫生和经济角度,竖井位于均分隧道全长的位置上较合理,且竖井数量对隧道全程CO质量浓度峰值限值的影响较小。一般情况下对于20 km以下的竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道其全程CO质量浓度峰值限值可按其在无竖井状态下纵向通风隧道的计算方法计算,即按等全长射流风机纵向通风隧道CO质量浓度限值计算式(见式(5))计算。区别在于竖井送排与射流风机组合纵向通风隧道需要在所有可能出现峰值处设定限值,无论是设计阶段还是运营阶段。对于有一个竖井的长度在

4~8 km的隧道,或有两个以内(含两个)竖井的长度在8~10 km的隧道,或有三个以内(含三个)竖井的长度在10~20 km的隧道,式(5)计算隧道全程CO质量浓度峰值与直接计算值误差 $\leq \pm 10.7\%$ 。

6 结论

(1)从卫生角度基于CFK差分方程结合纵向通风隧道CO浓度分布特性,给出了射流风机纵向通风隧道和竖井送排与射流风机组合纵向通风隧道两类典型纵向通风隧道正常运营工况下CO浓度限值

计算式. 尽管两类典型纵向通风隧道具有不同的 CO 浓度分布特性, 工程中可按相同的 CO 浓度限值计算.

(2) CO 浓度限值计算结果表明,《公路隧道通风照明设计规范》给出的分段式 CO 浓度限值并不一定合理. 对于短距离隧道, 无论我国规范还是 PIARC 限值均已远低于 CO 浓度限值计算式计算结果. 对长距离隧道, PIARC 限值比《公路隧道通风照明设计规范》的限值更安全, 我国应设定更严格的 CO 浓度限值标准.

(3) 从卫生和经济角度, 竖井位于均分隧道全长的位置较合理, 隧道竖井数量影响需风量但对一定长度隧道全程 CO 浓度峰值限值的影响较小. 相对于射流风机纵向通风隧道一般仅需控制隧道近出口处 CO 浓度, 竖井送排与射流风机组合式纵向通风隧道应有效控制所有可能出现 CO 浓度峰值之处以确保行车人员卫生安全需求.

参考文献:

- [1] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
HAO Jiming, MA Guangda. Air pollution control engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [2] 重庆交通科研设计院, 中华人民共和国交通部. JTJ 026.1—1999 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
Chongqing Communications Research & Design Institute, Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ 026.1—1999 Specifications for design of ventilation and lighting in highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [3] PIARC. Road tunnel: vehicle emissions and air demand for ventilation[S]. Paris: PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation, 2004.
- [4] 苏立勇. 公路隧道通风设计问题分析[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(5): 26.
SU Liyong. Analysis of the ventilation design problems of highway tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(5): 26.
- [5] Coburn R, Forster R, Kane P. Considerations of the physiological variables that determine the blood carboxyhemoglobin concentration in man[J]. Journal of Clinical Investigation, 1965, 44(11): 1899.
- [6] De Nevers N. 大气污染控制工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
De Nevers N. Air pollution control engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [7] 叶蔚, 张旭. 基于改进的 CFK 方程的隧道 CO 浓度限值的研究[J]. 铁道标准设计, 2010(增 2): 51.
YE Wei, ZHANG Xu. Discussion on CO concentration threshold in ventilation tunnels based on an altered CFK equation[J]. Railway Standard Design, 2010(Supplement 2): 51.
- [8] 吕康成, 伍毅敏. 隧道排送组合纵向通风计算公式的建立[C]//公路隧道运营管理与安全国际学术会议论文集. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 277-285.
LÜ Kangcheng, WU Yimin. Developing the calculating equation for longitudinal ventilation tunnel with exhaustion outlet and supply inlet [C]//Proceedings of International Conference on Highway Tunnel Management & Safety. Chongqing: Chongqing University Press, 2006: 277-285.
- [9] 陈文艺. 公路隧道空气质量模拟与控制[D]. 西安: 长安大学, 2006.
CHEN Wenyi. The simulation and control of air quality inside road tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [10] The Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHHA) of California, USA. All OEHHHA acute, 8-hour and chronic reference exposure levels as on December 18, 2008[EB/OL]. [2011-7-19]. <http://oehha.ca.gov/air/allrels.html>.
- [11] 卫生部职业卫生标准专业委员会, 中华人民共和国卫生部. GBZ 2.1—2007 工作场所有害因素职业接触限值. 第 1 部分: 化学有害因素[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2007.
National Occupational Health Standard Committee, Ministry of Health of the People's Republic of China. GBZ 2.1—2007 Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace part1: chemical hazardous agents [S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2007.
- [12] Muller K E, Barton C N. A nonlinear version of the Coburn, Forster and Kane model of blood carboxyhemoglobin [J]. Atmospheric Environment (1967), 1987, 21(9): 1963.
- [13] Prockop LD, Chichkova RI. Carbon monoxide intoxication: an updated review [J]. Journal of the Neurological Sciences, 2007, 262(1/2): 122.