

横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: 基于差分形式的用于计算一定环境 CO 浓度及暴露时间下人体血液中碳氧血红蛋白饱和度的 Coburn-Forster-Kane 方程(CFK 方程), 结合不同形式横向通风隧道 CO 浓度分布特性, 拟合了适用于正常运营工况下 CO 浓度限值计算式, 对于送风型半横向通风隧道给出事故通风 CO 浓度指示值计算式. 计算结果显示全横向通风隧道与送风型半横向通风隧道可采用同一 CO 浓度限值, 排风型半横向通风隧道可采用三倍该 CO 浓度作为限值.

关键词: 横向通风隧道; CO 浓度限值; Coburn-Forster-Kane 方程

中图分类号: U453.5

文献标识码: A

Predicting Permissible CO Concentration Limit for Transverse Ventilation Tunnels Under Normal Case

YE Wei, ZHANG Xu

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

Abstract: Permissible CO concentration limits for three types of transverse ventilation tunnels were predicted by calculating under certain Carboxyhemoglobin(COHb) saturation level on the basis of CO concentration profile in tunnels and difference form of Coburn-Forster-Kane equation (CFK equation). A fitting equation for predicting permissible CO concentration limits is presented for each kind of transverse ventilation tunnels. Furthermore, a fitting equation for air supply type semi-transverse ventilation tunnel for emergency ventilation is presented as well. The results show that the permissible CO concentration limits for transverse and air supply type semi-transverse ventilation tunnels should be the same which is approximate 1/3 of the values for air exhaust type semi-transverse ventilation tunnel.

Key words: transverse ventilation tunnel; permissible CO concentration limit; Coburn-Forster-Kane equation

公路隧道中, 机动车排放的废气中有诸多有害物质, 主要包括 CO, NO_x, Pb, CO₂, SO₂, HCHO 和烟雾等^[1]. CO 之所以对人体健康有害, 是因为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, 即使血红蛋白饱和和所需的 CO 分压力仅为与氧饱和和所需氧分压力的 1/200~1/250^[2]. COHb 的形成受诸多因素的影响, 如环境 CO 浓度、人体暴露时间、活动量(导致呼吸量的不同)、海拔高度(导致环境压力的不同)、人体自身健康状况、人体新陈代谢程度等^[3].

我国对公路隧道环境污染物浓度限值的研究工作起步较晚. 1999 年交通部颁布 JTJ 026.1—1999《公路隧道通风照明设计规范》(简称《规范》), 解释了对 CO 进行稀释的目的是保证卫生条件, 并给出了隧道 CO 浓度设计限值. 但《规范》无论在限值取值或在基于 CO 设计限值的需风量计算方法上都存在争议^[4], 研究合理的 CO 浓度限值对我国隧道工程发展仍具有指导意义.

长期以来, 计算隧道 CO 浓度限值的理论依据主要源于 Coburn 等^[5]建立的在一定且较低的环境 CO 浓度下人体暴露时间与人体内 COHb 饱和度(表示为[COHb])的微分形式的关系式, 即 Coburn-Forster-Kane 方程(CFK 方程). 世界卫生组织(WHO)通过实验验证了 CFK 方程具有一定的可靠性^[6]. Smith^[7]比较了线性 CFK 方程和非线性 CFK 方程(即在原 CFK 方程基础上允许 O₂Hb 饱和度随[COHb]变化而变化), 计算表明线性化 CFK 方程相比非线性方程的误差可接受. 但无论线性或非线性 CFK 方程均认为人暴露环境中 CO 浓度为定值, 与大部分隧道情形不符. 叶蔚等^[8]基于不同隧道 CO 分布特性, 得到改进的 CFK 积分方程, 但其解析解

收稿日期: 2011-07-20

基金项目: 上海市科委基金项目(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, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为复杂通风技术. E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn

为降低积分求解难度,仍假定 O_2Hb 饱和度为定值。

本文基于 CFK 差分方程,引入所有已知的变量,结合全横向通风、半横向通风隧道 CO 浓度分布特性,拟合了适用于横向通风隧道正常运营工况的 CO 浓度限值计算式。

1 横向通风隧道 CO 浓度分布特性

横向通风隧道主要分全横向通风隧道和半横向通风隧道两类。作如下假设:①隧道为单向交通等截面隧道,全长为 L , km;②隧道正常运营,车速 v , km \cdot h $^{-1}$, 恒定;交通量单位长度 CO 排放量 g_{CO} , mg \cdot s $^{-1} \cdot$ m $^{-1}$, 为定值;隧道单位长度送风量 q_b , m $^3 \cdot$ s $^{-1} \cdot$ m $^{-1}$, 或排风量 q_e , m $^3 \cdot$ s $^{-1} \cdot$ m $^{-1}$, 为定值;③忽略隧道内 CO 扩散作用;④隧道任意断面上机动车污染物均与空气混合均匀,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。

1.1 全横向通风隧道 CO 浓度分布特性

理论上横向风沿垂直于隧道轴线的方向流动,无纵向风速,故认为隧道全程 CO 浓度均匀,即人体吸入的 CO 分压力 P_{ICO} , Pa, 为定值。

1.2 送风型半横向通风隧道 CO 浓度分布特性

半横向通风隧道的通风方式一般有两类:在洞口处引风,从路面上方设置风道排风,称为排风型半横向通风;在路面下侧设置风道送风,在洞口处排风,称为送风型半横向通风。半横向通风隧道中车道内风速为 0、且左右风向相逆的点称作中性点(neutral point, NP),中性点可位于隧道内或隧道两端延长线,假定以隧道入口为坐标原点,隧道入口至中性点距离为 l , km。

1.2.1 中性点位于隧道两端内

中性点位于隧道两端内的送风型半横向通风隧道示意图如图 1 所示,图中虚线表示中性点所处断面(下同)。由于隧道内各截面送风量与污染物产生量比例一致,故坐标为 x 处($0 < x \leq L$)机动车排放的 CO 浓度 C_{CO} 可认为定值。

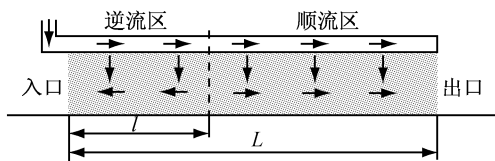


图 1 中性点位于隧道两端内气流组织

Fig.1 Air flow pattern when NP is inside the tunnel

1.2.2 中性点位于隧道入口延长线

中性点位于隧道入口延长线时送风型半横向通风隧道示意图如图 2 所示。隧道内坐标为 x 处($0 \leq x \leq L$)机动车排放的 CO 浓度 C_{CO} 可计算如下^[9]:

$$C_{CO} = \frac{g_{CO}x}{q_b(x+l)} = \frac{g_{CO}}{q_b(1+l/x)}$$

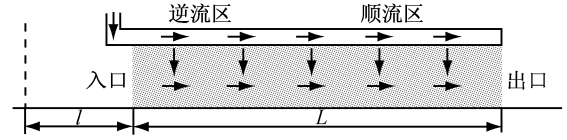


图 2 中性点位于隧道入口延长线气流组织

Fig.2 Air flow pattern when NP is at the extended line of the entrance

根据道尔顿分压定律推得人体吸入的 CO 分压力 P_{ICO} 可表示为^[8]

$$P_{ICO} = P_{ICO(0)} + P'_{CO} = P_{ICO(0)} + \frac{G'}{(1 + \frac{60l}{vt})} \quad (1)$$

式中: $P_{ICO(0)}$ 为隧道背景(入口)CO 分压力, Pa; t 为人体在 CO 环境中的暴露时间, min; $G' = g_{CO} \cdot P_{mix} / \rho q_b$, 其中, P_{mix} 为混合气体总压力, Pa; ρ 为 CO 密度, mg \cdot m $^{-3}$;

1.2.3 中性点位于隧道出口延长线

中性点位于隧道出口延长线时送风型半横向通风隧道示意图如图 3 所示。隧道内坐标为 x 处($0 \leq x \leq L$) P_{ICO} 可计算如下^[8]:

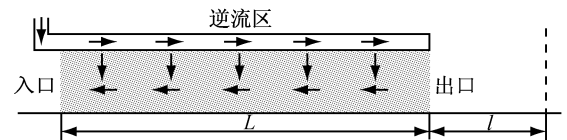


图 3 中性点位于隧道出口延长线气流组织

Fig.3 Air flow pattern when NP is at the extended line of the exit

$$P_{ICO} = P_{ICO(e)} + \frac{G'}{[1 + l/(L - vt/60)]} \quad (2)$$

式中: $P_{ICO(e)}$ 为隧道出口处 CO 分压力, Pa。

1.3 排风型半横向通风隧道

排风型半横向通风隧道中性点仅位于隧道两端内。隧道内坐标为 x 处($0 \leq x \leq L$)人体吸入的 CO 分压力 P_{ICO} 可表示如下^[8]:

$$\begin{cases} P_{ICO} = P_{ICO(0)} + G'' \ln \frac{l}{l - vt/60} & 0 \leq t < 60l/v \\ P_{ICO} = P_{ICO(e)} + G'' \ln \frac{L-l}{vt/60 - l} & 60l/v < t \leq 60L/v \end{cases} \quad (3)$$

式中, $G'' = g_{CO} \cdot P_{mix} / \rho \cdot q_e$ 。

2 CFK 方程

2.1 CFK 微分方程

在建立 CFK 方程之前, Coburn 等^[7] 进行如下假设: ①人体中 CO 储量与血液中 COHb 始终保持平衡; ②肺泡中 CO 分压力一致; ③不考虑肺气体中的 CO 含量交换; ④人体吸入与呼出气体速率相等; ⑤CO 只通过肺进行交换。

推导详见文献^[5], CFK 微分方程表示如下:

$$\frac{dw_{CO}}{dt} = \dot{V}_{CO} - \frac{[COHb]\bar{P}_{CO_2}}{[O_2Hb]M} \cdot \frac{1}{\frac{1}{D_L} + \frac{P_B - P_{H_2O}}{\dot{V}_A}} + \frac{P_{ICO}}{\frac{1}{D_L} + \frac{P_B - P_{H_2O}}{\dot{V}_A}} \quad (4)$$

式中: w_{CO} 为人体内 CO 含量, mL; \dot{V}_{CO} 为人体 CO 产生率, mL · min⁻¹; D_L 为肺部扩散系数, mL · min⁻¹ · Pa⁻¹; \dot{V}_A 为肺泡换气率, mL · min⁻¹; P_B 为大气压力, Pa; P_{H_2O} 为水蒸汽压力, Pa; $[COHb]$ 和 $[O_2Hb]$ 为单位体积血液中的 COHb 和 O₂Hb 饱和度, mL · mL⁻¹; \bar{P}_{CO_2} 为肺部毛细管血中与 COHb 达平衡时的平均 O₂ 分压力, Pa; M 为 Haldane 常数, 表示 Hb 对 CO 的亲合力与对 O₂ 的亲合力的比值。

对于全横向通风及中性点位于隧道内的送风型半横向通风隧道, 其沿程 CO 浓度基本为定值, 可直接用式(4)计算 CO 浓度限值。

2.2 CFK 差分方程及计算方法

传统的 CFK 微分方程假定除 $[COHb]$ 和 t 外均为定值, 直接对式(4)进行计算。CFK 差分方程^[9] 可引入所有已知的变量, 并结合不同隧道 CO 浓度分布特性求解相应的 CO 浓度限值。

$$[COHb]_{t+\Delta t} - [COHb]_t = \frac{\dot{V}_{CO}}{V_b} + \frac{\left(P_{ICO} - \frac{[COHb]_t \bar{P}_{CO_2}}{M([O_2Hb]_{max} - [COHb]_t)} \right)}{V_b \left[\frac{1}{D_L} + \frac{P_B - P_{H_2O}}{\dot{V}_A} \right]} \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中, V_b 为有效血容量, mL。

基于 CFK 差分方程(式(5))及半横向通风隧道 CO 浓度分布特性(式(1)~(3)), 可求解横向通风隧道 CO 浓度限值。

3 国内外标准中 CO 浓度设计限值

3.1 《规范》对 CO 浓度设计限值设定及描述

《规范》对正常运营工况通风隧道 CO 浓度限值的设定见表 1, 正常运营车速取 50 km · h⁻¹。

表 1 《规范》中 CO 浓度限值

Tab.1 CO concentration limits from Chinese Code JTJ 026.1—1999

隧道长度	mg · m ⁻³	
	≤1 000 m	≥3 000 m
半横向通风	286	229
全横向通风		

注: 隧道长度在 1 000—3 000 m 以插值法取值。

3.2 国内外标准对 CO 浓度限值设定

国际主要隧道通风标准制订组织 PIARC 在其报告^[10] (简称《报告》) 中对隧道 CO 浓度设定见表 2。

表 2 《报告》中 CO 浓度限值

Tab.2 CO concentration limits from PIARC

交通状况	mg · m ⁻³	
	1995 年	2010 年
正常高峰交通 (50—100 km · h ⁻¹)	115	80

目前国内外主要卫生标准中对 CO 浓度限值的设定及等效 $[COHb]$ 见表 3。国内外卫生标准通常给出短期暴露限值, 将该限制与暴露时间用 CFK 方程折算成等效 $[COHb]$ 作为计算参考取值。

表 3 国内外卫生标准及等效 $[COHb]$

Tab.3 Admissible CO concentration limits and equivalent $[COHb]$ from hygienic standards

标准	CO 限值 (mg · m ⁻³)	暴露时间 /min	等效 [COHb]/%
美国加州 卫生标准 ^[11]	23	60	1.21
中国卫生 标准 ^[12]	30	15	0.95

4 计算参数取值

4.1 人体血液中 $[COHb]$ 限值的确定

文献^[9] 采用 0.8% 作为 $[COHb]$ 初始值。《规范》引用 20 世纪 40 年代 May 氏实验的结论^[1], 认为 $[COHb]$ 超过 10% 后, 会对人体产生程度不同的症状, 并留安全余量取为 5%。从表 3 中可知目前国内典型卫生标准实际短期暴露等效 $[COHb]$ 约为 1.0%。本文选取 1.0%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 5.0% 作为 CO 浓度限值计算标准。

4.2 隧道入口处 CO 初始分压力值确定

当 $[COHb]$ 在 $[0.8\%, 5.0\%]$ 内, 式(5)中等式右边恒非负的条件为 $P_{ICO(0)} \geq 4.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。按 GB

3095—1996《环境空气质量标准》给出的三级环境空气浓度限值日平均指标 $6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 取值。

4.3 其他部分参数取值

表 4 给出了其他计算参数的选取^[9]。

表 4 其他部分计算参数取值

Tab.4 Some other parameters' values

参数	\bar{P}_{CO_2} /Pa	M	D_L /($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	V_b /mL	P_B /Pa	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ /Pa	\dot{V}_A /($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	\dot{V}_{CO} /($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)
取值	13 329	218	0.225	5 500	101 300	6 265	6 000	0.007

5 横向通风隧道 CO 浓度限值的讨论

5.1 全横向通风隧道

5.1.1 CO 浓度限值计算及比较

理论上全横向通风隧道内沿程 CO 浓度趋于一致,CO 浓度限值直接求解 CFK 方程。

图 4 给出了正常运营工况隧道长度自 1—20 km 的全横向通风隧道沿程 CO 浓度限值,车速取 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (从安全角度,取较低的车速计算,即人员在隧道内历经时间较长),纵坐标采用对数坐标。

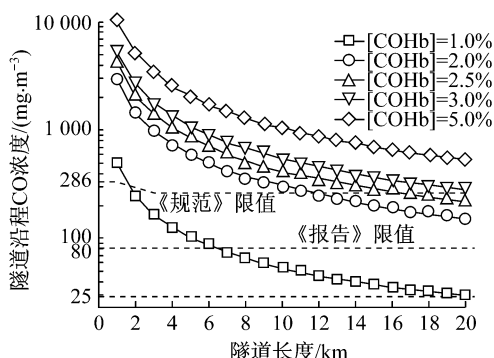


图 4 隧道长度对 CO 浓度限值的影响

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

由图 4 可知,仅对于长距离全横向通风隧道,《规范》和《报告》提供的限值满足 $[\text{COHb}] = 2.0\%$ 及以上(指取更大的 $[\text{COHb}]$ 值)的卫生指标要求。如按《规范》取值,长度在 11.4 km 以下的隧道满足 $[\text{COHb}] = 2.0\%$ 及以上的要求。当 $[\text{COHb}] = 1.0\%$ 时,仅当隧道长度小于 1.9 km 时,《规范》限值满足卫生要求。

显然计算结果并不支持《规范》对判定 CO 浓度限值的长度分界点(1 和 3 km)的选取和划分。相对而言,《报告》取值较为安全。此外,当隧道长度在 20 km 之内时, $25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 可作为 CO 浓度限值的下限。

5.1.2 CO 浓度限值计算式拟合

令 $\delta_{\text{CO}}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 为隧道 CO 浓度限值,对于长

度为 L ,运营车速为 v 且以 $[\text{COHb}]$ 为卫生指标的全横向通风隧道 CO 浓度限值 $\delta_{\text{CO}}(L, v, [\text{COHb}])$ 应为隧道内任何一处的 CO 浓度限值。通过计算可知,在相同车速和 $[\text{COHb}]$ 指标下,不同隧道长度 δ_{CO} 之比近似与长度成反比;在相同隧道长度相同车速下,不同 $[\text{COHb}]$ 指标 δ_{CO} 之比近似为 $[\text{COHb}]$ 增量之比;相同隧道长度和 $[\text{COHb}]$ 指标下,不同车速 δ_{CO} 之比近似等于车速之比。故拟合可得全横向通风隧道 CO 浓度限值计算式,见式(6)。拟合过程略。

$$\delta_{\text{CO}}(L, v, [\text{COHb}]) = \frac{425}{L} \cdot \frac{v}{50} \cdot \frac{[\text{COHb}] - 0.8\%}{0.2\%} \quad (6)$$

在式(6)适用范围内(即 v (6 个水平)和 $[\text{COHb}]$ (5 个水平)的任意组合下),当隧道长度不长于 20 km 时, δ_{CO} 一元非线性回归方差范围为 $[0.99802, 0.99988]$ 。

5.2 送风型半横向通风隧道

5.2.1 CO 浓度沿程分布

送风型半横向隧道 CO 浓度沿程分布受中性点位置影响。引入量纲一中性点相对位置 X ^[8]。图 5 给出了当中性点位于隧道入口延长线($X = -0.1$)、隧道内($X = 0-1$)和隧道出口延长线($X = 1.1$)时 CO 浓度沿程分布。隧道长度取 5 km,运营车速取为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $[\text{COHb}]$ 取为 1.0% (若无特殊说明,算例均按此取值)。

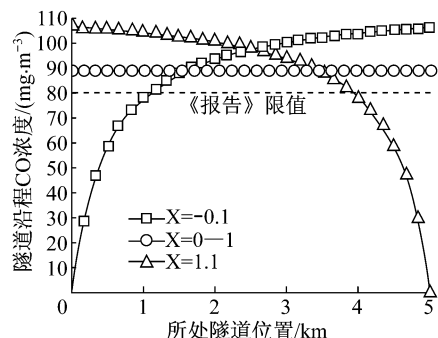


图 5 送风型半横向通风隧道沿程 CO 浓度分布

Fig.5 CO concentration profile in air supply type semi-transverse ventilation tunnel

由图 5 可知,当中性点位于隧道内时,隧道内沿

程 CO 浓度近趋于一致. 此时 CO 浓度表征当 CO 浓度非均匀分布时沿程 CO 浓度分布的平均值, CO 浓度限值求解同全横向通风隧道; 当中性点位于隧道入口延长线或出口延长线时, 隧道全程 CO 浓度峰值出现在隧道近出口或近入口处. 通常中性点受隧道特征、气象等因素影响并不固定, 应关注隧道出入口及沿程 CO 浓度.

5.2.2 中性点对 CO 浓度限值的影响

图 6 给出了中性点位置改变引起的隧道全程 CO 浓度峰值的变化. 纵坐标取对数坐标.

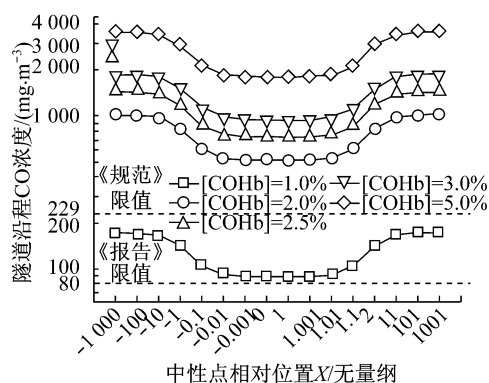


图 6 送风型半横向通风隧道中性点对 CO 浓度限值的影响

Fig.6 The effect of permissible CO concentration limits due to NP position

由图 6 可知在某一 [COHb] 浓度指标下, 随着中性点位置的变化, 送风型半横向通风隧道沿程 CO 浓度峰值存在区间. 其最小值 (δ_{CO}) 即为当中性点位于隧道内时的 CO 浓度值. 当中性点位于隧道入口延长线极远处或出口延长线极远处时, 隧道全程 CO 浓度峰值趋近于最大值 ($\delta_{CO, \max}$), 且近似等于峰值最小值的两倍. 假定 $\delta_{CO, \max} / \delta_{CO} = 2$, 当隧道长度不长于 20 km 时, 计算 X 得到送风型半横向通风隧道沿程 CO 浓度峰值最大值与最小值的比值 $\delta_{CO, \max} / \delta_{CO}$ 在 [1.809, 2.011] 范围内, 故认为该假设成立.

5.2.3 CO 浓度限值计算式

由于正常运营工况下送风型半横向通风隧道沿程 CO 浓度峰值存在区间, 故从安全角度出发可将最小值 δ_{CO} 作为全程 CO 浓度设计限值, 并将 $\delta_{CO, \max}$ 作为隧道事故通风指示值.

即送风型半横向通风隧道 CO 浓度设计限值可按式 (6) 计算, 事故通风 CO 浓度设计限值 $\delta_{CO, \max}$, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 可计算如下:

$$\delta_{CO, \max}(L, v, [\text{COHb}]) = \frac{850}{L} \cdot \frac{v}{50} \cdot \frac{[\text{COHb}] - 0.8\%}{0.2\%}$$

5.3 排风型半横向通风隧道

5.3.1 CO 浓度沿程分布

图 7 给出当中性点位于隧道前半程 ($X=0.25$)、中央 ($X=0.5$) 和后半程 ($X=0.75$) 时 CO 浓度沿程分布. 当 $X=0.5$ 时, 采用峰值修正和无修正两种方法计算. 理论上中性点处 CO 浓度峰值为无穷大. 文献 [13] 推荐峰值修正办法, 即一般可认为 C_{CO} 最大值约为 g_{CO} / q_e (定义为峰值倍数 B) 的 2~3 倍. 图 7 中取 $B=3$.

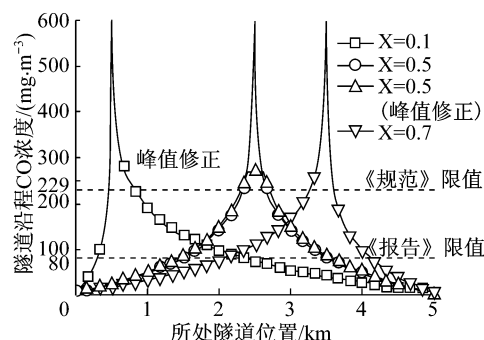


图 7 排风型半横向通风隧道沿程 CO 浓度分布

Fig.7 CO concentration profile in air exhaust type semi-transverse ventilation tunnel

由图 7 可知, 排风型半横向通风隧道沿程 CO 浓度分布同样受中性点位置影响. 隧道出入口 CO 浓度为背景浓度, 全程 CO 浓度峰值即 CO 浓度限值位于中性点处.

5.3.2 峰值倍数 B 对 CO 浓度限值的影响

由于加入峰值修正方法计算排风型半横向通风隧道 CO 浓度, 分析加入峰值修正方法及 B 值取值对 CO 浓度限值的影响. 表 5 给出了计算比较, X 取 0.5.

表 5 峰值倍数取值对 CO 浓度限值的影响

Tab.5 The effect of permissible CO concentration limits due to B value

B	峰值/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$G''/(\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	误差/%
2.0	198.4	11 223.0	16.5
2.5	232.7	10 569.0	9.7
3.0	268.8	10 210.0	5.9
4.0	345.3	9 890.0	2.6
5.0	425.2	9 770.1	1.4
无修正	$+\infty$	9 636.8	0

注: ①峰值指隧道全程 CO 浓度最高峰值, 下同; ②“误差”指有峰值修正时 G'' 值相对于无修正时 G'' 值的误差.

G'' 值与机动车排放水平成正比, 与隧道通风量成反比, 反映隧道自身特征. 无论是否采用修正倍数及对其取值如何, 某计算工况下 G'' 值不应有较大的偏差, 否则结果适用性将受影响. 若认为峰值修正对

G' 值影响在 10%以内可接受,则 $B \geq 3$ 。若 $B \geq 4$,其 CO 浓度峰值高于 $B=3$ 时峰值。故从适用性和安全角度出发,推荐将峰值倍数取 $B=3$ 。

5.3.3 中性点对 CO 浓度限值的影响

表 6 给出中性点位置变化时隧道全长 CO 浓度峰值。峰值倍数 B 取 3。

中性点位置变化对排风型半横向通风隧道全程 CO 浓度峰值影响非常小。假设中性点位置对 CO 浓度峰值无影响,并以 $X=0.5$ 为代表(其他计算条件一致)计算 CO 浓度限值。在适用范围内计算限值误差在 $[-1.0\%, -0.2\%]$ 范围内。认为假设成立。

表 6 中性点对 CO 浓度限值的影响

Tab.6 The effect of permissible CO concentration limits due to NP position

X	0	0.3	0.5	0.9	1.0
峰值	233.6	234.3	234.6	235.3	235.5

5.3.4 CO 浓度限值计算式

由于认为中性点对排风型半横向通风隧道全程 CO 浓度峰值无影响,排风型半横向通风隧道 CO 浓度限值 δ_{CO} 可拟合表达如下:

$$\delta_{CO}(L, v, [\text{COHb}]) = \frac{1}{L} \cdot \frac{330}{50} \cdot \frac{v}{0.2\%} \cdot \frac{[\text{COHb}] - 0.8\%}{0.2\%} \quad (7)$$

此外,在相同长度、运营车速和卫生指标条件下,式(7)计算结果约为式(6)的 3 倍。

6 结论

(1)从卫生角度基于 CFK 差分方程结合横向通风隧道 CO 浓度分布特性,给出了全横向通风隧道、送风型半横向通风隧道及排风型半横向通风隧道正常运营工况下 CO 浓度限值计算式,可用于横向通风隧道制定运营阶段 CO 浓度限值的参考。此外,给出了送风型半横向通风隧道事故通风 CO 浓度指示值的参考。

(2)CO 浓度限值计算式拟合结果表明全横向通风隧道及送风型半横向通风隧道可按同一方法取值。在相同长度、运营车速和卫生指标条件下,排风型半横向通风隧道 CO 浓度限值约为全横向通风隧道的三倍。计算结果表明《规范》对横向通风隧道 CO 浓度限值的统一取值及其判定方法并不合理。

(3)对于排风型半横向通风隧道,工程上可将峰值倍数取为 3 作为近似计算中性点 CO 浓度的依据。

参考文献:

- [1] 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.
JTJ 026.1—1999 Specifications for design of ventilation and lighting in highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [2] 郝吉明,马广大. 大气污染控制工程[M]. 第 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.
- [3] Modic J. Carbon monoxide and COHb concentration in blood in various circumstances[J]. Energy and Buildings, 2003,35(9): 903.
- [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] Nevers N D. Air pollution control engineering[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
Nevers N D. Air pollution control engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [7] Smith M. Comparing solutions to the linear and nonlinear CFK equations for predicting COHb formation [J]. Mathematical Biosciences, 1990,99(2): 251.
- [8] 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(增刊 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(Suppl 2): 51.
- [9] 陈文艺. 公路隧道空气质量模拟与控制[D]. 西安:长安大学环境科学与工程学院,2006.
CHEN Wenyi. The simulation and control of air quality inside road tunnel[D]. Xi'an: School of Environmental Science and Engineering of Chang'an University, 2006.
- [10] PIARC. Road tunnel: vehicle emissions and air demand for ventilation[S]. Paris: World Road Association, 2004.
- [11] The Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHHA) of California, USA. All OEHHHA acute, 8-hour and chronic reference exposure levels as on Decemer 18, 2008[EB/OL]. [2011-7-19]. <http://oehha.ca.gov/air/allrels.html>.
- [12] GBZ 2.1—2007 工作场所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.
GBZ 2.1—2007 Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace part 1: chemical hazardous agents[S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2007.
- [13] 陈德芳. 半横向通风方式分析研究和计算[J]. 地下工程与隧道, 1996(2): 24.
CHEN Defang. Research and calculation on semi-transverse ventilation tunnels[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1996(2):24.