

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-909-05

公路隧道环境二氧化碳的运移机理 及计算方法研究

王 蕾^{1,2} 韩兴博² 夏永旭²

(1. 陕西工业职业技术学院 咸阳 712000; 2. 长安大学 西安 710064)

【摘 要】 隧道内外环境参数差异较大, 以普通大气环境 CO₂ 浓度进行隧道衬砌碳化耐久性设计存在明显不足。针对隧道特殊运营环境, 以公路隧道环境 CO₂ 作为研究对象, 基于公路隧道机动车污染物扩散理论, 分析了隧道环境 CO₂ 浓度影响因素和扩散规律, 建立了公路隧道中 CO₂ 的对流扩散模型, 给出了一种纵向通风隧道 CO₂ 浓度的计算方法, 并进行了实例验证。

【关键词】 公路隧道; CO₂ 浓度; 扩散方程; 计算模型

中图分类号 U451.4 文献标识码 A

Study on Diffusion Mechanism and Calculation Method of Environmental Carbon Dioxide in Highway Tunnel

Wang Lei^{1,2} Han Xingbo² Xia Yongxu²

(1. Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang, 712000; 2. Chang'an University, Xi'an, 710064)

【Abstract】 Due to the large differences of environmental parameters inside and outside the tunnel, there are obvious deficiencies in the carbonation durability design of tunnel lining based on the CO₂ concentration of ordinary atmospheric environment. Aiming at the special operating environment of tunnel, based on the theory of vehicle pollutant diffusion in highway tunnel, this paper takes the CO₂ in highway tunnel environment as the research object, and analyzes the influencing factors and diffusion laws of CO₂ concentration in tunnel environment. The convection diffusion model of CO₂ in highway tunnel is established, and a calculation method of CO₂ concentration in longitudinal ventilation tunnel is given. Finally, this paper is verified by an example.

【Keywords】 highway tunnel; CO₂ concentration; diffusion equation; calculation model

0 引言

随着我国运营隧道数量和里程的不断增长, 隧道的耐久性研究也越来越重要, 钢筋混凝土作为隧道工程的主要材料, 是耐久性研究的重要对象。碳化作用是影响钢筋锈蚀的最显著因素^[1], 造成混凝土碳化的主要因素可归结为材料因素和环境因素

两大类, 对于运营隧道而言, 材料因素的影响因子完全可以用一个定值来表示, 不可控因素主要为处于变化状态的环境因素。由于隧道的半封闭性, 导致隧道内外环境参数存在一定差异, CO₂ 浓度更是远高于外界大气浓度, 约为外界的 3~5 倍^[2,3]。而根据碳化深度模型计算可知^[4], 当 CO₂ 浓度从

基金项目: 中央高校基金项目 (公路隧道衬砌劣化模型与预防性养护策略研究, 300102210124); 宁波市公益类科技计划项目 (隧道结构服役状态评价及集约化养护决策研究, 2021S191); 陕西工业职业技术学院院级科研项目 (公路隧道运营环境特征及衬砌结构碳化耐久性研究, 2022YKYB-020)

作者 (通讯作者) 简介: 王 蕾 (1994-), 男, 硕士, 研究方向为隧道安全及养护管理, E-mail: 382873308@qq.com

收稿日期: 2022-06-14

400ppm 上升至 800ppm 时, 碳化深度将增大至原来的 1.41 倍。公路隧道衬砌混凝土长期处于此等环境下, 直接影响整个结构的工作性能, 所以对运营隧道衬砌碳化环境的研究是不容忽视的。

针对混凝土碳化的环境影响因素, 学者们开展了较多的理论研究和试验研究^[5-8], 对混凝土碳化环境影响因素进行了较为深入的分析, 并取得了一定的成果, 但研究对象多为普通建筑、公路或桥梁结构。针对隧道衬砌碳化问题, 也有部分学者进行了研究^[9-11], 但在相关研究中, 多关注碳化对衬砌结构力学性能及耐久性的影响, 对隧道衬砌碳化环境影响因子的研究较少, 并且对运营隧道内的环境 CO₂ 浓度关注度较低, 相关监控资料也几近于无, 尤其是对隧道环境 CO₂ 的运移机理和计算体系研究远不及 CO 那样丰富与完备。考虑公路隧道运营环境的特殊性, 本文选取隧道环境 CO₂ 为研究对象, 以机动车污染物扩散理论为基础, 拟分析隧道环境 CO₂ 浓度影响因素和扩散规律, 建立一套符合公路隧道实际情况的 CO₂ 浓度计算方法, 以期为公路隧道衬砌碳化耐久性设计提供借鉴与参考。

1 CO₂ 浓度影响因素

在计算隧道环境二氧化碳浓度之前, 首先对二氧化碳浓度的主要影响因素进行研究。公路隧道中二氧化碳的产生主要来源于其内部运行的车辆, 而车辆又有不同类型, 且隧道内的运营环境也在变化。所以, 影响二氧化碳浓度的因素主要包括机动车的车型、车速、交通量、风速、隧道长度和边界浓度等几个方面, 它们主要通过影响二氧化碳的源强排放和气体扩散来影响隧道中二氧化碳的浓度。其中, 交通量、车型和车速等因素对源强的大小造成了影响, 二氧化碳扩散情况则受风速、隧道长度和边界浓度等因素的影响。

(1) 车速

张少君^[12]通过对二氧化碳排放因子和交通流的平均速度进行拟合分析, 发现二者之间的拟合系数高达 0.9, 这说明了二氧化碳排放因子与机动车的行驶速度有着高度的相关性, 大型货车以 20km/h 速度行驶时的二氧化碳排放量约为其在 60km/h 行驶时排放量的 1.5 倍。由于本文研究的是公路隧道环境二氧化碳对衬砌碳化的影响, 需要求解的二氧化碳浓度是隧道长期运营过程中的平均

浓度, 同样, 对于机动车行驶速度的取值也是按平均速度进行取值。根据全国各地高速公路隧道限速标准和《道路交通安全法》规定, 按最不利工况取值, 在碳化耐久性设计时, 高速公路隧道所行驶机动车的平均速度统一取 60km/h。

(2) 车型

《公路隧道通风设计细则》中将机动车按用途和重量分为小客车、小货车、中货车、大客车、大货车等几类, 按发动机类别则分为汽油车和柴油车两类。根据张少君^[12]、吴潇萌^[13]、任明亮^[14]等人的研究成果, 可以明显看出不同车型的二氧化碳排放因子差异显著。由于不同隧道所行驶的车辆种类复杂, 车型比例各不相同, 且在设计规划期时较难预测未来交通量的车型比例, 为方便计算, 在考虑车速和空调修正系数的基础上, 根据不同车型的二氧化碳排放因子, 将所有机动车均换算为小型客车进行计算。

表 1 60km/h 工况下不同车型 CO₂ 排放因子^[15]

Table 1 CO₂ emissions of different vehicles at 60km/h

车辆类别	CO ₂ 排放因子 (g/km)
小型客车	149
小型货车	247
中型货车	322
大型客车	539
大型货车	471

(3) 交通量

交通量是隧道通风设计中的一个重要参数, 影响公路隧道中污染物浓度分布的最主要因素就是交通量, 交通量对污染物的排放强度有着最为直接的影响。许多学者^[16,17]通过现场实测、数值计算等方法均验证了交通量是决定隧道污染物浓度大小的最主要因素, 交通量越大, 则隧道中污染物的浓度越高。

(4) 隧道长度

随着隧道长度的增加, 车辆在隧道内的行驶时间增长, 在隧道中排放的污染物总量也会增加, 同时二氧化碳距隧道洞口的扩散距离也随之增长, 这就导致了二氧化碳的进一步积聚。

(5) 风速

风速对污染物的扩散具有非常大的影响。对于隧道中的某一点而言, 当风速增大时, 该点的污染物浓度随之减小^[18]。隧道中的纵向风速主要受自然

风、交通风和机械风的影响, 自然风与隧址区域的气象条件有关, 交通风受机动车行驶速度等因素影响, 机械风则取决于隧道中的风机设置情况。

在确定计算风速时, 按最不利情况取值, 优先考虑机械风和交通风的作用, 即当交通风满足通风需要时, 选取交通风作为计算风速, 否则取稀释隧道中一氧化碳和烟雾所需风速的最小值作为计算风速, 当不设置机械通风且无连续交通风时, 计算风速按最小自然风速取值, 自然风速可取 2m/s。

(6) 边界浓度

对于公路隧道而言, 边界浓度指的是隧道外大气环境中二氧化碳的浓度, 根据陈文艺^[18]计算结果, 边界浓度对公路隧道污染物浓度的影响显著, 边界浓度每提高 5ppm, 隧道环境污染物的最终浓度也会随之升高 5ppm。

由于我国不同地域的大气二氧化碳浓度差异较小, 对于绝大多数地域而言, 二氧化碳浓度最大值与最小值的差距在 10ppm 以内, 如此小的差异基本上可以忽略不计。在设置二氧化碳边界浓度时, 可以按照我国地面大气二氧化碳平均浓度进行取值。根据中国气象局发布的《中国温室气体公报》和卫星监测得到的中国陆地区域大气二氧化碳年均浓度分布图, 取我国陆地区域近几年二氧化碳浓度的平均值作为数值计算中的二氧化碳的边界浓度, 如表 2 所示, 为方便计算, 边界浓度取 400ppm。

表 2 我国陆地区域年平均 CO₂ 浓度

Table 2 The average annual CO₂ concentration in China's land area

年份	2013	2014	2015	2016	2017
CO ₂ 浓度	397.3	397.7	401	402.5	405
平均值	400.7				

(7) 其他因素

其他因素包括湍流扩散系数、温湿度、海拔等, 根据郭浩^[16]、陈文艺^[18]等人的研究结果, 相比于交通量、车型、车速和风速等主要因素, 其他因素的影响效果相对而言比较小, 并且王宇^[19]研究发现海拔和湿度属于机动车污染物排放因子的一般敏感参数, 对总体车队的排放因子影响较小。

2 理论计算

在分析二氧化碳浓度分布规律前, 需先确定二氧化碳的排放强度。本文拟采用单车排放因子法进

行计算。公路隧道机动车污染物的排放源强计算如下^[20]:

$$S_j = \frac{1}{3.6 \times 10^6 A} \sum_{i=1}^m \lambda_{ij}(v) K_{ij} A_i \quad (1)$$

式中: S_j 为公路线源 j 种污染物排放源强, $g/(m^3 \cdot s)$; A 为隧道横截面积, m^2 ; $\lambda_{ij}(v)$ 为 i 类机动车 j 类污染物排放因子的车速修正因子; K_{ij} 为 i 类机动车以 60km/h 行驶时 j 类污染物的单车排放因子, $g/(km \cdot veh)$; A_i 为计算年 i 类机动车小时交通量, veh/h 。

2.1 扩散模式

(1) 分子扩散

分子扩散是工程上最普遍的扩散现象, 是在浓度差、温度差或其他推动力作用下, 物质分子发生无规则热运动而形成的一种物质传递现象。从微观上而言, 分子在迁移过程中会发生高频率的碰撞, 在碰撞的过程中, 高浓度区的分子会被迫向低浓度区移动, 但是由于碰撞的无序性, 方向与速度均不可控, 所以气体的定向运动仅靠分子扩散是非常缓慢的。分子扩散作用通常采用菲克 (Fick) 定律进行描述, 如式 (2) 所示。

$$J_c = -D_d \cdot \text{grad}c \quad (2)$$

式中: J_c 为污染物的分子扩散通量, $g/(m^2 \cdot s)$; D_d 为分子扩散系数, m^2/s ; c 为污染物浓度, kg/m^3 。

(2) 紊流扩散

紊流扩散是由物质组分分布不均匀产生的浓度梯度所引起的一种随机的扩散现象。在大气环境中始终存在各种随机运动的空气涡团, 气体被空气涡团带动, 通过湍流混合和交换, 完成了从密度较大区域向小密度区域的传递, 紊流扩散作用强于分子扩散作用。根据菲克 (Fick) 第一定律, 紊流扩散通量与气体的浓度梯度成正比, 见式 (3)。

$$J_t = -D_t \cdot \text{grad}c \quad (3)$$

式中: J_t 为污染物的紊流扩散通量, $g/(m^2 \cdot s)$; D_t 为紊流扩散系数, m^2/s 。

(3) 对流扩散

由于隧道自然风、交通风、机械风等的存在, 将会导致隧道内的空气沿纵向发生流动, 将这种由风力所引起的水平对流称之为对流扩散。对流扩散是隧道内各种气体扩散的主要形式, 可用下式来描述。

$$J_v = c \cdot u \quad (4)$$

式中： J_v 为污染物的对流扩散通量， $g/(m^2 \cdot s)$ ； u 为绝对风速， m/s 。

(4) 衰减作用

将不同物质之间发生化学反应所导致的浓度降低称为衰减作用。由于隧道中污染物的化学性质比较稳定，不存在明显的化学反应，所以衰减作用的影响可忽略不计，衰减作用可用下式来表示。

$$\Delta q = -kc\Delta t \quad (5)$$

式中： Δq 为衰减量， g/m^3 ； k 为反应速度系数， s^{-1} ； Δt 为反应时间， s 。

2.2 公路隧道 CO₂ 浓度计算模型

基于气体扩散的梯度输送理论，同时考虑气体的分子扩散、紊流扩散、对流扩散和衰减作用，建立扩散方程如式 (6) 所示，以此来计算隧道环境 CO₂ 浓度。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + S_j(x, y, z, t) + R_j(x, y, z, t) \quad (6)$$

式中： u 、 v 、 w 为沿 x 、 y 、 z 轴的绝对风速； $D_{eff} = D_d + D_t$ ； $Q'_s = S_j(x, y, z, t)$ ，表示气体的产生率； $Q'_r = R_j(x, y, z, t)$ ，表示气体的消除率。

大气平流扩散方程、初始条件和边界条件等共同组成了气体在隧道中流动的数学力学方程组，这是一个非常复杂的微分方程组，二维、三维的解析解非常复杂，比较常见的是通过数值解法获得一维近似数值解。高速公路隧道横断面尺寸相比其纵向长度而言微不足道，且交通、机械等风力的作用使气体在横断面混合的较为充分，在计算时，可仅考虑沿隧道纵向的气体运动，因此可认为公路隧道中的气体扩散过程近似为一维扩散过程。而紊流扩散是一种随机无序的扩散过程，根据相关研究，讨论紊流扩散作用至少得在二维情况下才具有实际意义^[21]。通过文献^[22]，计算 CO₂ 气体在空气中的分子扩散系数，当环境条件为 293K，1atm 时，CO₂ 气体在空气中的分子扩散系数： $D_d = 1.633 \times 10^{-5}$ 。因分子扩散系数过小，计算得到的扩散通量数值也

很小，因此可以忽略分子扩散作用的影响。同时隧道中气体的消除率主要受衰减作用的影响，由于不存在明显的化学反应，因此可忽略气体的消除率。综上所述，式 (6) 可简化为：

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = S_j(x, t) \quad (7)$$

当隧道处于长期运营条件下，交通量、风速等相关参数趋于稳定，可忽略时间对隧道内气体浓度的影响，上式可转换为：

$$c_n(x) = c_{n0}(x) + S_j(x) \Delta x / u \quad (8)$$

式中： $c_{n0}(x)$ 为第 n 段隧道始端的气体浓度， g/m^3 。

3 实例验证

为进一步验证上述模型的准确性和适用性，以陕西省西安市金花隧道为例，金花隧道为矩形隧道，位于西安市东二环主道，设计车速为 60km/h，全长 320m，宽约 10m，高 6m，通行车辆基本为小型客车。根据西安工程大学刘洋统计结果^[23]，金花隧道平均交通量为 5248 辆/h，年平均风速为 2.5m/s，采用前文所建立的计算模型进行计算，将计算结果与文献^[23]中的年均 CO₂ 浓度实测结果进行比较，如图 1 所示，计算值与实测值变化趋势基本趋于一致，且误差较小。计算不同测点计算值与实测值之间的相对误差，结果见表 3。由表 3 可知，各测点最小相对误差为 0.2%，最大相对误差为 4.18%，相对误差均比较小。对理论模型结果与现场实测结果之间的整体误差进行计算，整体误差仅为 2.09%，说明前文所建立的理论计算模型较为可靠。

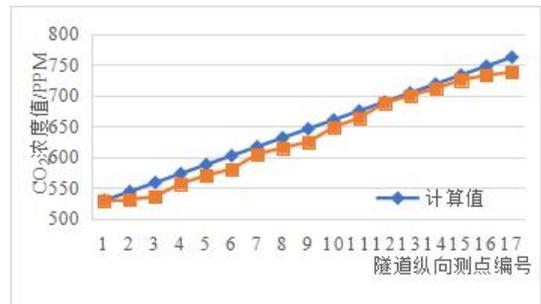


图 1 CO₂ 浓度计算值与实测值折线图

Fig.1 Comparison between calculated and measured values of CO₂ concentration

表3 CO₂浓度计算结果与实测结果比较

Table 3 The relative error between calculated results and measured results of CO₂

测点编号	计算值/ppm	实测值/ppm	相对误差
0	529.02	529.02	0.00%
1	543.62	530.44	2.48%
2	558.22	535.81	4.18%
3	572.82	556.5	2.93%
4	587.42	570.09	3.04%
5	602.02	580.04	3.79%
6	616.62	604.48	2.01%
7	631.22	614.94	2.65%
8	645.82	624.44	3.42%
9	660.42	648.44	1.85%
10	675.02	663.57	1.73%
11	689.62	688.24	0.20%
12	704.22	699.98	0.61%
13	718.82	711.56	1.02%
14	733.42	725.26	1.12%
15	748.02	733.09	2.04%
16	762.61	738.19	3.31%

4 结论

(1) 隧道中 CO₂ 浓度与交通量和隧道长度近似成正比, 与风速近似成反比。

(2) 计算公路隧道环境气体浓度时, 可不考虑分子扩散作用的影响;

(3) 纵向通风公路隧道环境 CO₂ 浓度的一维解析解为:

$$c_n(x) = c_{n0}(x) + S_j(x) \Delta x / u$$

(4) 通过实例验证可知, 本文所建立的计算模型基本可以描述公路隧道 CO₂ 浓度的分布情况, 整体误差仅为 2.09%。

参考文献:

[1] Zhang Y, Cao Y, Chen X. Study on durability technology and life prediction of tunnel structure suffering chloride salt attack[J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2009,35(3):151-155.

[2] Funasaka K, Miyazaki T, Kawaraya T, et al. Characteristics of particulates and gaseous pollutants in a highway tunnel[J]. *Environmental Pollution*, 1998,

102(2-3):171-176.

[3] Chow W K, Chan M Y. Field measurement on transient carbon monoxide levels in vehicular tunnels[J]. *Building and Environment*, 2003,38(2):227-236.

[4] GB/T 51355-2019,既有混凝土结构耐久性评定标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[5] Leemann A, Moro F. Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity[J]. *Materials & Structures*, 2017,50(1):30.

[6] 余波,成获,杨绿峰.混凝土结构的碳化环境作用量化与耐久性分析[J].*土木工程学报*,2015,48(9):51-59.

[7] 李兆恒,杨永民,蔡杰龙,等.不同环境因素对混凝土碳化深度的影响规律研究[J].*人民珠江*,2017,38(1):21-24.

[8] Yoon I S, Çopuroğlu O, Park K B. Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete[J]. *Atmospheric environment*, 2007,41(34):7274-7285.

[9] 刘四进.侵蚀环境作用下盾构隧道结构性能衰退演变机理研究[D].成都:西南交通大学,2017.

[10] 何薇.混凝土碳化及其对地下结构力学性能的影响研究[D].成都:西南交通大学,2013.

[11] 陈连姝.二氧化碳作用下衬砌混凝土的碳化侵蚀规律研究[J].*混凝土*,2010(4):17-19.

[12] 张少君.中国典型城市机动车排放特征与控制策略研究[D].北京:清华大学,2014.

[13] 吴潇萌.中国道路机动车空气污染物与 CO₂ 排放协同控制策略研究[D].北京:清华大学,2016.

[14] 任明亮.城市地下道路污染物扩散规律研究[D].北京:北京工业大学,2008.

[15] 王蕾.基于环境因素的公路隧道衬砌结构碳化耐久性研究[D].西安:长安大学,2020.

[16] 郭浩.公路隧道内污染物分布的模拟与控制[D].上海:东华大学,2016.

[17] 杜峰,张村峰,鲁钢.公路隧道内废气分布规律的研究[J].*公路隧道*,2012(2):27-30.

[18] 陈文艺.公路隧道空气质量模拟与控制[D].西安:长安大学,2006.

[19] 王宇.北京市典型道路空气中挥发性有机物污染特征与模拟[D].北京:北京林业大学,2014.

[20] 邓顺熙,李百川,陈爱侠.中国公路线源污染物排放浓度的计算方法[J].*交通运输工程学报*,2001,1(4):83-86.

[21] 范厚彬,樊志华,董明刚.公路长隧道污染物的运移机理及一维解析分析[J].*交通运输工程学报*,2002,2(3):57-59.

[22] 童景山,李敬.流体热物理性质的计算[M].北京:清华大学出版社,1982.

[23] 刘洋.西安城市公路隧道空气污染物浓度分布及通风方式研究[D].西安:西安工程大学,2018.