

隧道施工通风 CO 浓度分布及需风量研究

杨帆¹, 范磊², 陶亮亮^{1, 3}, 张震⁴, 李金权⁵

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 3. 西南交通大学 智慧城市与交通学院, 成都 610031; 4. 四川沿江宜金高速公路有限公司, 四川 宜宾 644009; 5. 四川路桥桥梁工程有限责任公司, 成都 610017)

摘要: 目前, 由于隧道施工通风中未能充分考虑出渣工序下的实际污染物排放, 因此极大地增加了隧道施工需风量, 造成巨大能源浪费。依托某隧道开展了 CO 浓度及风速现场测试, 研究了不同工序下 CO 浓度随时间的变化规律, 分析了工程车辆排放及风机供风量对隧道 CO 浓度与风速分布的影响。结果表明: 爆破阶段掌子面 CO 浓度在爆破后 25 min 内基本不变, 约为 190 mg/m³; 出渣阶段掌子面 CO 浓度呈线性降低, 通风 90 min 后达到规范限值(30 mg/m³); 出渣阶段隧道施工实际所需风量远小于规范要求, 随需风量增大回风段 CO 浓度呈指数衰减, 提出了 CO 排放量及需风量耦合影响下公路隧道施工通风 CO 比浓度经验计算公式。

关键词: 施工通风; 柴油车排放; CO 浓度分布; 流体模拟

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0724-08

Research on CO Concentration Distribution and Required Air Volume in Tunnel Construction Ventilation

Yang Fan¹, Fan Lei², Tao Liangliang^{1, 3}, Zhang Zhen⁴, Li Jinquan⁵

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, P. R. China; 3. Institute of Smart City and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 4. Sichuan Yanjiang Yijin Expressway Co., Ltd., Yibin, Sichuan 644009, P. R. China; 5. Sichuan Road and Bridge (Group) Corporation Bridge Engineering Co., Ltd., Chengdu 610017, P. R. China)

Abstract: At present, the actual pollutant emissions under slag removal stage have not been fully considered in the ventilation of tunnel construction, greatly increasing the required air volume for tunnel construction and causing huge energy waste. On-site testing of CO concentration and wind speed was conducted based on a certain tunnel, the changes in CO concentration over time under different processes were studied, and the effects of engineering vehicle emissions and fan air supply on the distribution of CO concentration and wind speed in the tunnel were analyzed. The results show that: The CO concentration on the palm face remained basically unchanged within 25 minutes after blasting, about 200 mg/m³; During the slag removal stage, the CO concentration on the palm surface decreases linearly and reaches the standard limit (30 mg/m³) after 90 minutes of ventilation; The actual required air volume for tunnel construction during the slag removal stage is much lower than the standard requirements. As the supply air volume increases, the CO concentration in the return air section decreases exponentially. Based on the research results, an empirical calculation formula for CO concentration in

收稿日期: 2025-06-17(修改稿)

作者简介: 杨帆(2000—), 男, 四川广元人, 硕士生, 主要从事隧道施工通风方面的研究。

E-mail: 1134558730@qq.com

通讯作者: 陶亮亮(1995—), 男, 四川广安人, 博士, 主要从事隧道通风及火灾方面的研究。

E-mail: taoliang@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(52178394); 四川省交通运输科技项目(2018-ZL-02)

highway tunnel construction ventilation is proposed, which takes into account the coupling effects of CO emissions and supply air volume.

Keywords: construction ventilation; diesel vehicle emissions; CO concentration distribution; fluid simulation

0 引言

随着我国对基建领域的持续投资,使得我国隧道建设在规模上和长度上取得巨大的发展^[1-2]。在隧道施工阶段,施工通风可为洞内的施工机械、人员等提供新鲜空气,同时稀释和排出各种有毒有害气体及粉尘,从而创造良好的劳动环境,这直接关系到工程质量和作业人员的身心健康。尤其采用钻爆法施工的隧道,爆破产生的硝烟和工程机械排出的废气需要大量的新鲜空气进行稀释。在相关研究中:杨立新等^[3]对当前隧道施工通风技术进行了全面归纳和总结;孙三祥等^[4]对高海拔出渣车CO的排放进行了数值模拟,刘敦文等^[5]研究了隧道出渣过程洞内通风流场的特性及CO浓度场的空间分布规律;邓祥辉等^[6]对隧道施工阶段CO扩散规律以及工作人员安全进洞时间进行了数值模拟研究;罗占夫等^[7]对特长隧道独头通风技术进行了研究;谭信荣等^[8]对钻爆法施工隧道进行了空气质量现场测试。刘钊春等^[9]对施工隧道内CO随时间的扩散进行动态分析。

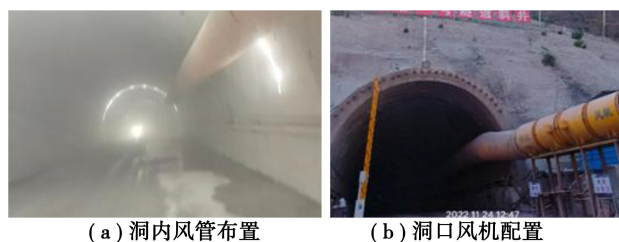
在隧道的通风设计中,需风量的求解至关重要,现行的施工通风需风量计算中,非瓦斯隧道施工作业面需风量的依据主要有隧道内同时工作的最多人、稀释爆破炸药产生的有害气体、稀释内燃机废气和达到隧道施工过程中允许的最低风速^[10]等,根据大量工程总结,控制需风量往往是稀释内燃机废气的需风量^[11-13],其他工序除爆破外产生的废气较少,所以本文重点考虑出渣阶段和爆破阶段CO的分布规律。目前关于该需风量的计算,主要考虑的是稀释废气中CO^[1],《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)^[14]中仍然沿用的是2002年已废止规范的标准,英国的BS 6164—2001规范^[15]和国际隧协ITA发布的《隧道施工良好职业健康与安全实践指南》^[16]距今也有较长的年份。然而近年来随着汽车工业的进步以及国家对节能减排的控制,在施工隧道中机械的尾气污染也已经有了很大的改善,王生昌等^[17]通过台架试验和道路试验测,认为目前我国公路隧道CO基准排放量偏高,王旭等^[18]运用基准排放因子计算方法,得出结论:机动车与2000年相比,2021年的CO基准排放量降低了81.6%。

目前出渣车辆排出的废气相对规范编纂时已经大大降低,稀释其所需风量也应降低,若继续沿用以前的规范,会造成能耗巨大的浪费。为了探明出渣阶段实际的需风量,本文在四川某隧道的出口工区测试了爆破阶段和出渣阶段CO浓度随时间变化的过程;在斜井工区测试了不同需风量下出渣阶段CO浓度和风速的分布,并使用CFD软件综合分析了不同需风量和工程机械CO产生量对隧道内CO分布的影响。

1 CO浓度现场测试

1.1 工程概况

某隧道位于四川省凉山州境内,介于四川盆地与云贵高原之间,主洞设计长度为8.125 km,斜井设计长度为650 m;测试时该隧道出口段左洞掘进约1500 m,右洞掘进约1300 m,斜井掘进约350 m,均采用独头压入式通风,出口工区采用SDF(C)-11.5(110×2 kW)风机匹配1.6 m风管向开挖面送风,斜井工区采用SDF(C)-11(90×2 kW)风机匹配1.4 m风管向开挖面送风。隧道风机和风管布置如图1所示。



(a) 洞内风管布置 (b) 洞口风机配置

图1 隧道概述

Fig. 1 Overview of the tunnel

1.2 测试方案

为研究隧道施工过程中爆破阶段和出渣阶段隧道内CO浓度与风速分布,在该隧道的出口工区和斜井工区进行了现场测试。CO浓度测试仪为便携式四合一检测仪,可同时检测甲烷、O₂、H₂S、CO共4种气体浓度,其中CO检测模块的量程为0~1000 ppm,分辨率为1 ppm,精度 $\leq \pm 3\%$;风速仪量程0~20 m/s,分辨率为0.01 m/s,精度 $\leq \pm 5\%$;同时施工方在出口工区的掌子面附近的隧道拱顶处安装有风速传感器与CO传感器。测试的工况分为爆破及出渣阶段和出渣阶段两种,分别在出口

工区和斜井工区进行测试,工况设置如表 1 所示。

表 1 现场测试工况

Table 1 On-site testing conditions

测试工区	测试工序	风机频率/Hz
出口工区	爆破出渣阶段	随施工进度调整
		40
		30
斜井工区	出渣阶段	20
		10

1.2.1 爆破出渣阶段

爆破发生前在掌子面台车、二衬台车、回风段(距离洞口 700 m 处)的呼吸面各布设一台 CO 检测仪,在回风段布设一台风速监测仪,如图 2 所示,打开仪器并每分钟记录一次数据,爆破开始后记录爆破开始的时间点,风机开启的时间点;开始出渣后记录出渣时隧道内运行的内燃机种类、功率、运行时间;出渣结束时取出传感器并记录采集到的数据。

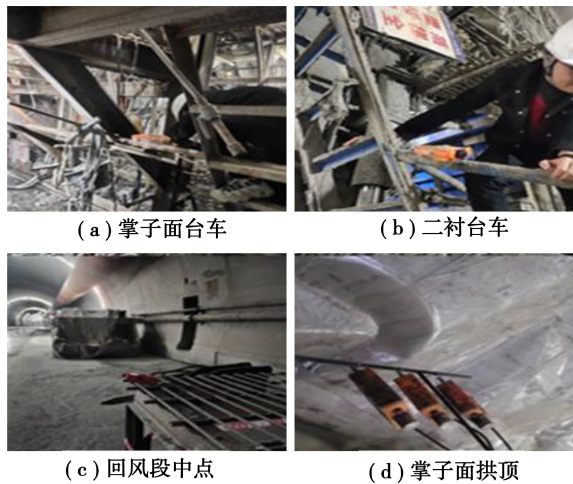


图 2 爆破阶段测点布置

Fig. 2 Layout of measuring points during the blasting phase

1.2.2 出渣阶段

图 3 为斜井工区试验时测点布置及车辆运行区域示意图。试验时布置了 3 辆处于半载状态的矿用出渣车,其中 2 辆出渣车在掌子面和 C3 测点之间做往复运动,1 辆出渣车在仰拱至洞口方向 25 m 距离做往复运动,模拟出渣状态的内燃机工作状态。隧道内共布设 3 处测点,分别位于距离洞口 100 m 处 C1 测点、距离洞口 200 m 处 C2 测点和距离掌子面 50 m 处的 C3 测点。测试时在隧道外控制风机的频率从 40 Hz 至 10 Hz,每间隔 10 Hz 为一个工况,根据爆破阶段的测试竖井,确定每个工况测试时长为 1 h。每个测点截面位置测定 3 个

点位呼吸平面的 CO 浓度和风速。

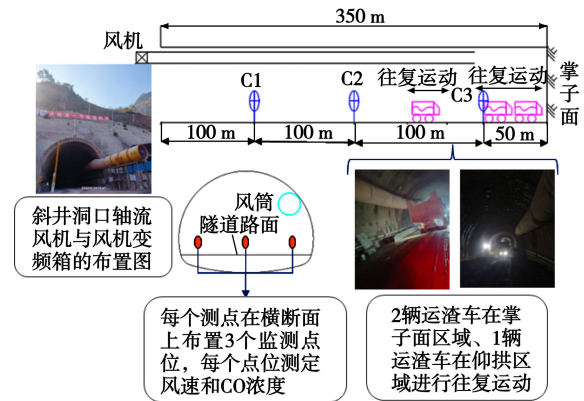


图 3 出渣阶段测试示意图

Fig. 3 Schematic diagram of testing in the slag removal stage

2 测试结果及分析

2.1 爆破及出渣阶段

在隧道施工过程中,一般在爆破后通风 15~30 min,然后开始出渣,此时爆破产生的炮烟一般没有完全排出隧道,因此现场测试的 CO 浓度前 15 min 为爆破产生的 CO,后面为爆破产生的 CO 与出渣内燃机产生的 CO 混合后的浓度。检测到隧道内掌子面、二次衬砌和回风段 CO 浓度如图 4 所示。

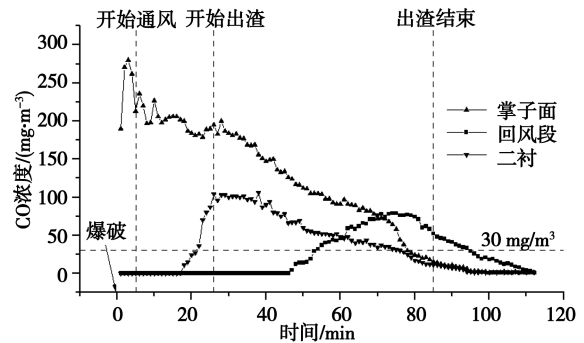


图 4 爆破后掌子面、二衬、回风段处 CO 浓度变化

Fig. 4 CO concentration change at the palm face, secondary lining, and return air section after export blasting

如图 4 所示,爆破后掌子面 CO 浓度迅速提升至 270 mg/m³,在 2 min 内下降到 190 mg/m³ 左右,开始出渣后 CO 浓度也没有明显上升,25 min 后 CO 浓度以 4.5 mg/(m³·min) 的速度下降至零。爆破 17min 后二衬区域 CO 浓度从零上升至约 110 mg/m³,在该浓度下维持 12 min 后开始以 2.7 mg/(m³·min) 的速度下降至零。爆破 45 min 后回风段才检测到 CO,CO 浓度以 2.7 (mg/m³·min) 的速度上升至 80 mg/m³ 后开始缓慢以 2.3 mg/(m³·min) 的速度下降,在通风后 90 min

降低到安全值 30 mg/m^3 以下。爆破后掌子面和二衬区域 CO 浓度降低到安全值以下需要约 60 min, 回风段的 CO 浓度滞后了二衬区域约 33 min, 可见回风段出现的 CO 主要是由爆破产生。

2.2 出渣阶段

不同风机频率下隧道内 3 个测点测得的 CO 浓度如图 5 所示。

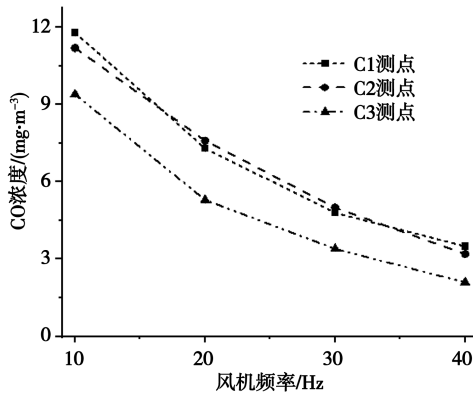


图5 隧道内各测点 CO 浓度

Fig. 5 CO concentration at 3 measuring points inside the tunnel

由图可见出渣阶段隧道内 CO 浓度最大值为 11.8 mg/m^3 , 仅为安全值 30 mg/m^3 的 40%。随着风机频率的升高, 新鲜风对工程机械产生的 CO 稀释作用更强, 3 个测点的平均 CO 浓度逐步降低, C1 测点呼吸平面 CO 浓度从 11.8 mg/m^3 降低至 3.5 mg/m^3 , C2 测点从 11.4 mg/m^3 降低至 3.2 mg/m^3 , C3 测点从 9.6 mg/m^3 降低至 2.6 mg/m^3 。根据施工通风设计理论, 稀释和排出内燃机尾气的需风量往往大于爆破排烟需风量, 而测试中出渣阶段中 CO 浓度小于爆破阶段, 因此, 目前采用的“柴油机额定功率系数法”求解稀释内燃机尾气需风量与实际不符, 需要探究目前出渣阶段的合理需风量。

如图 6 所示, 相同风机频率下, C1 测点风速在

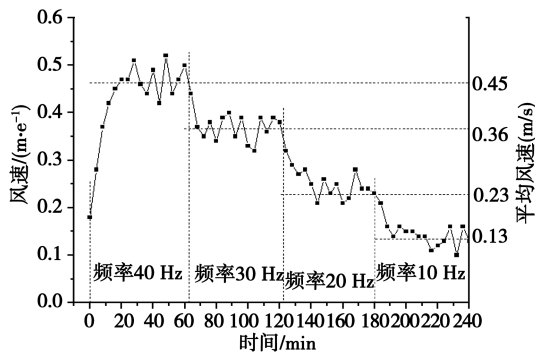


图6 不同风机频率下 C1 测点风速

Fig. 6 Air velocity at different frequencies in C1

小范围内浮动。随着风机频率降低, 隧道内风速平均值从 0.45 m/s 下降至 0.13 m/s 。根据理想气体状态方程, 在隧道内污染源固定的情况下, 稀释 CO 的风量与 CO 被稀释后的浓度成反比, 使用反比例曲线拟合如图 7 所示。拟合曲线方差 $R^2 = 0.988$, 拟合结果良好, 基于此, 下文将继续研究出渣阶段影响 CO 浓度场分布的主要因素。

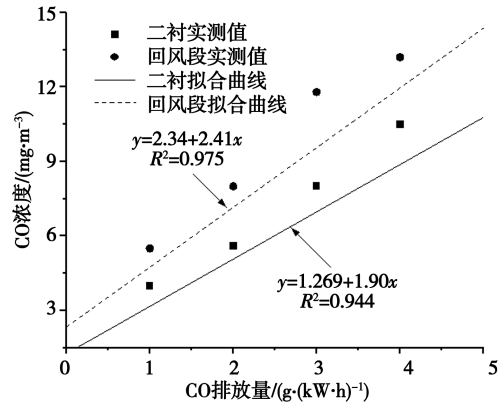


图7 风速与 CO 浓度的关系

Fig. 7 Relationship between wind speed and CO concentration

3 隧道出渣阶段数值计算模型

3.1 物理模型及网格划分

采用 CFD 软件建立斜井隧道, 隧道模型长度与斜井掘进长度一致为 350 m, 风管直径为 1.6 m, 风管出口距离掌子面 10 m。考虑运渣车在斜井内往复运动, 速度较慢且并不均匀, 交通风的影响较小, 3 辆运动的运渣车模型简化为静止模型, 2 辆运渣车停在距掌子面 25 m 的位置, 1 辆运渣车停在距仰拱 15 m 的位置, 运渣车模型长为 7.2 m, 宽为 2.4 m, 高为 2.7 m, 排烟口设置在车侧, 直径为 0.2 m。采用 Fluent Mesh 软件划分六面体网格, 对风管及运渣车排烟口局部加密, 将模型划分出 3 种不同数量的网格, 数量分别为 696 876、788 326、1 105 478, 针对 3 种不同数量的网格, 分别进行独立性检验, 结虽然 3 种方案划分的网格数量和质量不同, 但隧道内风速的模拟结果差异性较小, 满足独立性验证。为了兼顾计算精度与计算效率划分网格尺寸, 确定网格数量共计 79 万个, 网格数量适中且能满足计算精度需求, 模型及网格如图 8 所示。

3.2 模型验证

基于理想不可压缩流体假设, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 进行多组分气体计算。模型中, 隧道及风管边界设置为固壁边界 (wall 边界), 假设隧道壁面为绝热无滑移壁面; 风管入口设置为速度入口边界 (Velocity Inlet), 风管风速根据第 2 节测试中隧

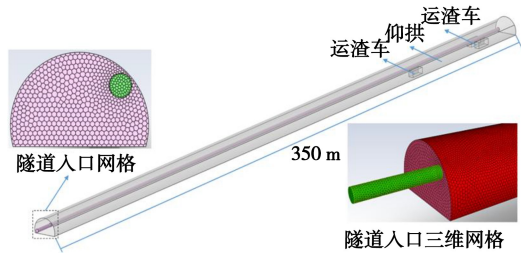


图8 网格划分结果

Fig. 8 Mesh division results

道内不同风机频率下的平均流速进行设置;隧道出口设置为压力出口(Pressure Outlet),隧道压力设置与外界大气压相同,大气压值和温度根据隧道平

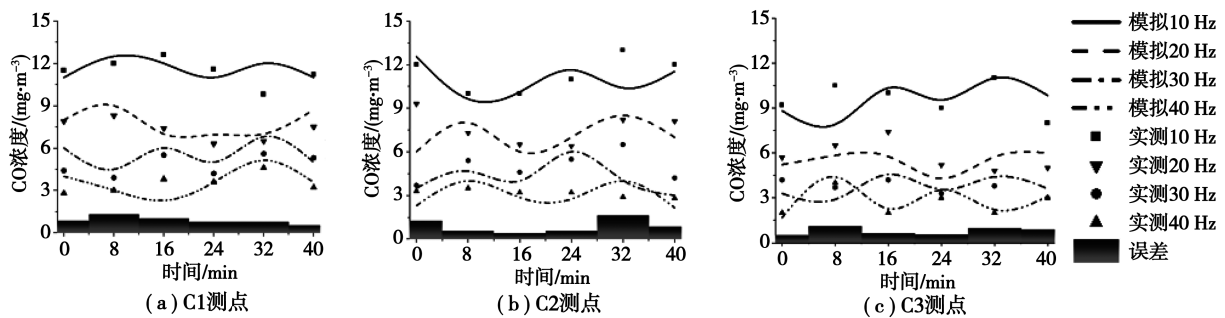


图9 隧道内各测点 CO 浓度

Fig. 9 CO concentration at each measuring points inside the tunnel

4 出渣阶段 CO 浓度场影响因素分析

隧道出渣过程中 CO 浓度分布受众多因素影响,出渣阶段隧道内 CO 的产生源为施工中的工程机械,随着国家对环保问题的重视,工程机械 CO 产生量越来越低,直接影响了隧道内 CO 浓度。此外,需风量的大小决定了 CO 排出隧道的速度,间接影响了隧道内 CO 的分布。因此,本节以研究 CO 产生量和需风量对隧道施工出渣阶段 CO 浓度分布的影响。

4.1 需风量

通过控制风管风速使隧道内风速分别为 0.45 m/s、0.36 m/s、0.23 m/s 和 0.13 m/s,设定工程机械 CO 排放量为 0.25 m³/h,进行数值模拟,截取模拟结果中不同风速下掌子面、二次衬砌和回风段中点处横断面的 CO 浓度云图,如图 10 所示。掌子面及隧道侧壁的限制迫使风流的大小及方向发生改变形成涡流,在涡流的作用下各风速掌子面区域靠近风管出风口侧壁的 CO 浓度最高,在风速为 0.13 m/s 时,侧壁 CO 浓度最高可以达到 32 mg/m³,该风速下远离风管的隧道侧壁 CO 浓度约为 9 mg/m³,为前者的 28.1%;二衬区域 CO 浓

均海拔 1 600 m,设置为 83.78 kPa 和 15 ℃;柴油车尾气管出口处 CO 浓度为 0.05%,每辆运渣车的 CO 排放速率为 0.25 m³/h;在现场测试中,风机频率从 40 Hz 降至 10 Hz 时,隧道内风速从 0.45 m/s 降至 0.13 m/s。

3 个测点数值模拟计算的 CO 浓度与实测结果 CO 浓度变化趋势及大小基本一致,C1 测点模拟值相对于实测值最大误差为 1.31 mg/m³,C2 测点最大误差为 1.61 mg/m³,C3 测点最大误差为 1.12 mg/m³,误差小于 15%,如图 9 所示。数值模拟与现场实测结果吻合程度较高,本文采用的数值模型对出渣阶段 CO 浓度分布进行探究具有合理性和可靠性。

度分布均匀,不存在 CO 积聚的情况,不同风速下 CO 平均浓度分别为 3.3 mg/m³,4.2 mg/m³,7.6 mg/m³,11.8 mg/m³;回风段的 CO 由于浮力效应影响,在风速较低时,高浓度 CO 气体集中在隧道上方,特别是在风速为 0.13 m/s 时,拱顶位置 CO 浓度达到了 21 mg/m³,随着风速的升高,回风段 CO 分布也趋于均匀。

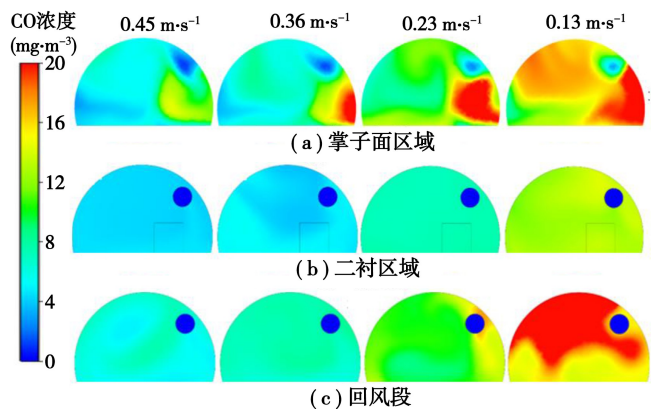


图10 不同风速下各断面 CO 浓度云图

Fig. 10 Nephograms of CO concentration at each section inside the tunnel

4.2 CO 产生量

如表 2 所示,我国分阶段规定了柴油车的排放限值^[19],隧道施工现场装载机功率为 178 kW,使

用系数为 0.9,自卸车功率 257 kW,使用系数 0.6,根据各实施阶段 CO 排放限值,计算得出不同实施阶段下每辆施工机械设备 CO 排放量。施工通风规范编制时排放阶段尚处于第一阶段,本文撰写前作者在邻近隧道测量了相同车型出渣阶段的 CO 排放,该隧道施工工程机械执行第四阶段的排放标准,CO 排放量约为第一阶段的 1/3。根据隧道设计规范^[3],隧道中内燃机作业时,需风量不小于 $3 \text{ m}^3/(\text{kW} \cdot \text{min})$,隧道内有一台挖掘机和两台自卸车作业,以此计算得出需风量为 $1\,410 \text{ m}^3/\text{min}$,风速 0.34 m/s 。改变工程机械 CO 产生量,得到不同实施阶段下呼吸平面 CO 分布,如图 11 所示。

表 2 CO 排放法规及工程车排放限值

Table 2 CO emission regulations and engineering vehicle emission limits

实施阶段	CO/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	装载机/ ($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)	自卸车/ ($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	4.5	720.9	693.9
2	4	640.8	616.8
3	2.1	336.4	323.8
4	1.5	240.3	231.3
5	1.5	240.3	231.3
6	1.5	240.3	231.3

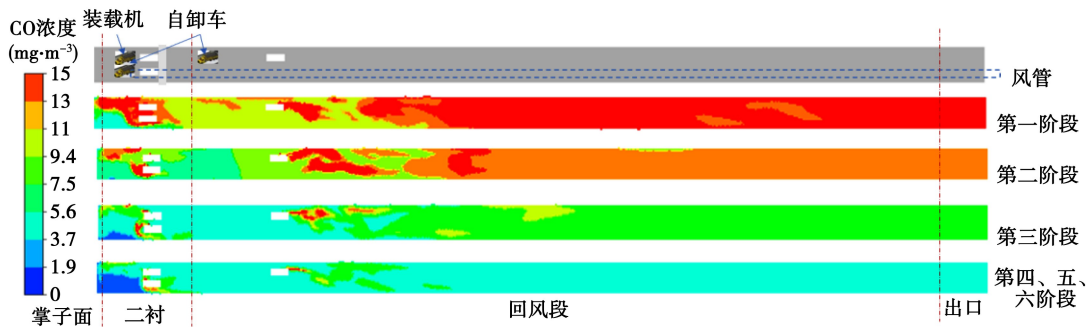


图 11 不同车辆排放阶段呼吸平面 CO 分布

Fig. 11 CO distribution at breathing level in different vehicle emission stages

执行第一阶段排放限值的车辆工作时,掌子面的 CO 浓度最大达到了 $19 \text{ mg}/\text{m}^3$,未超过限值 $30 \text{ mg}/\text{m}^3$,现阶段(第四、五、六阶段)掌子面的 CO 浓度为 $7 \text{ mg}/\text{m}^3$,为第一阶段的 37.5%;回风段和二衬区域的 CO 浓度在第一阶段最大达到了 $15 \text{ mg}/\text{m}^3$,现阶段浓度仅为 $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ 左右。同一排放阶段下,隧道内呼吸平面的 CO 空间分布呈现先减小后增大,最后保持不变的规律,如现阶段掌子面的 CO 浓度为 $7 \text{ mg}/\text{m}^3$,二衬区域 CO 浓度约为 $4 \text{ mg}/\text{m}^3$,在回风段 CO 浓度提升至 $5.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ 后趋于稳定。由于回风段风流稳定,在扩散作用下 CO 与空气均匀混合各排放阶段下 CO 浓度均在距掌子面 150m 后保持不变。

二衬、回风段呼吸平面不同排放阶段下 CO 浓度与 CO 排放量成正比关系,使用一次函数拟合得到两者的关系曲线如图 12 所示。当风速为 0.34 m/s 时,隧道内 CO 浓度随 CO 排放量的提高线性上升,二衬区域 CO 浓度上升速率为回风段区域的 78.8%,这是因为回风段 CO 浓度受 3 台工程机械影响,受排放法规的影响更大。拟合后,当前排放阶段(CO 排放量 $1.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$)下,二衬区域 CO 浓度为 $4.12 \text{ mg}/\text{m}^3$,为回风段的 69.3%,为第一阶段二衬区域排放量的 34.8%。

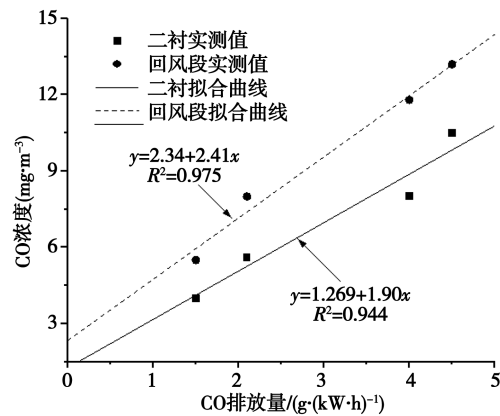


图 12 CO 浓度拟合曲线

Fig. 12 CO emission fitting curves

4.3 需风量-CO 产生量耦合分析

回风段是污染气体排出隧道的唯一通道,且此处风流和 CO 浓度稳定,适合定量分析对 CO 浓度的影响。以 CO 产生量 $1.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,隧道内风速 0.23 m/s 时隧道内 CO 浓度为基准浓度 ($12 \text{ mg}/\text{m}^3$),定义 CO 比浓度为隧道内 CO 浓度和基准浓度的比值,回风段不同风速和 CO 排放量下的 CO 比浓度如图 13 所示。风速低于 0.25 m/s 且 CO 排放量高于 $4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 时,CO 浓度随着需

风量的减小,随着排放量的增大明显升高。已知CO浓度与CO排放量成正比,与需风量成反比,为了更好地描述多因素耦合作用对隧道内CO浓度的影响,采用抛物面函数进行拟合,结果为:

$$V = \frac{0.158}{x} - 0.033y - \frac{0.017}{x^2} - 0.0072y^2 + 0.122\frac{y}{x} \quad (1)$$

式中: V 为CO浓度, mg/m^3 ; x 为需风量大小, m^3/s ; y 为CO排放量, $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

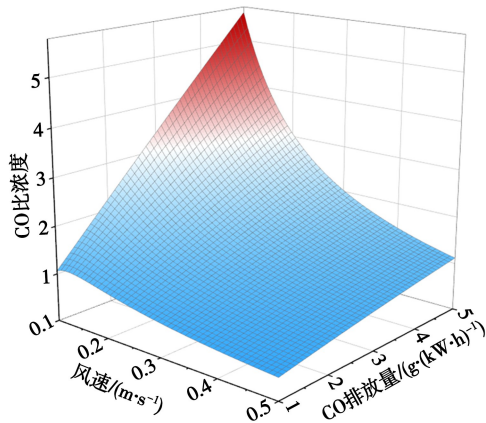


图13 需风量-CO产生量耦合作用下CO比浓度
Fig. 13 CO concentration ratio under the coupling effect of air demand and CO production

式(1)拟合函数方差 R^2 为0.989,拟合结果良好。为了验证计算公式的有效性,本文以现有研究某隧道为验证对象^[20],该隧道海拔3200m,CO排放量 $2.1\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,隧道风速 $0.32\text{ m}/\text{s}$,实测CO浓度约为 $38\text{ mg}/\text{m}^3$,在高海拔地区柴油车CO排放会上升,实测CO浓度除以海拔高度系数2.56后约为 $14\text{ mg}/\text{m}^3$,根据拟合函数计算得出CO比浓度为1.08,即CO浓度计算值约为 $13\text{ mg}/\text{m}^3$ 。

当隧道内风速为 $0.36\text{ m}/\text{s}$ 时,案例隧道实测CO浓度为 $7.6\text{ mg}/\text{m}^3$,根据拟合函数计算得出CO比浓度为0.68,即CO浓度计算值约为 $8.2\text{ mg}/\text{m}^3$ 。两条隧道CO浓度计算值与实测值的比较如表3所示。

表3 CO浓度实测值与计算值

Table 3 Actual and calculated values of CO concentration

工况编号	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	CO排放/ ($\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$)	CO排 放比	CO浓度计算 值/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	CO浓度实测 值/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	0.36	1.5	0.68	8.2	7.6
2	0.32	2.1	1.08	13.0	14.8

计算值与实测结果匹配度分别为93%和

88%,证明该公式可以用来预测出渣阶段不同CO排放量和需风量下隧道掌子面和回风段CO浓度,对于施工通风需风量的调整和施工通风节能有着重要意义。

5 结论

(1)爆破后产生的CO污染非常显著,爆破瞬间在掌子面附近的CO浓度在短时间内上升到 $270\text{ mg}/\text{m}^3$,并在 $190\text{ mg}/\text{m}^3$ 保持了25min,在开始出渣后CO浓度没有明显的上升。

(2)出渣阶段工程机械产生的CO浓度较小,即使风速低于隧道施工过程中允许的最低风速($0.15\text{ m}/\text{s}$),CO浓度也未超过 $30\text{ mg}/\text{m}^3$ 的安全限值。

(3)隧道内CO分布与CO排放成正比,与需风量成反比,CO会在掌子面区域靠近风管的隧道侧壁积聚,在通风距离超过200m后与空气充分混合,隧道内CO浓度与需风量和CO产生量之间的关系与抛物面函数拟合良好。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报[R]. 2022. (Ministry of Transport of the People's Republic. 2022 Statistical Bulletin of the Development of the Transportation Industry [R]. 2022. (in Chinese))
- [2] 陈湘生,徐志豪,包小华,等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 1-14. (Chen Xiangsheng, Xu Zhihao, Bao Xiaohua, et al. Challenges and technological breakthroughs in tunnel construction in China [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 1-14. (in Chinese))
- [3] 杨立新,洪开荣,刘招伟,等. 现代隧道施工通风技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2012. (Yang Lixin, Hong Kairong, Liu Zhaowei, et al. Modern tunnel construction Ventilation Technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [4] 孙三祥,王文,郭慧杰,等. 高海拔隧道出渣车排放一氧化碳的扩散规律[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(4): 85-92. (Sun Sanxiang, Wang Wen, Guo Huijie, et al. Diffusion law of carbon monoxide emissions from mucking machine in High Altitude Tunnel [J]. China Railway Science, 2018, 39(4): 85-92. (in Chinese))
- [5] 刘敦文,甘如鲁,张聪,等. 隧道出渣过程CO浓度监测与模拟研究及应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(5): 90-95. (Liu Dunwen, Gan Rulu, Zhang

- Cong, et al. Research and application of CO concentration monitoring and simulation under mucking process [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11 (5): 90-95. (in Chinese))
- [6] 邓祥辉, 刘钊, 刘钊春. 两河口长隧道独头掘进压入式施工通风三维数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36 (2): 35-41. (Deng Xianghui, Liu Zhao, Liu Zhaochun. 3D numerical simulation on forced construction ventilation of long single head tunnel of Lianghekou[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2014, 36 (2): 35-41. (in Chinese))
- [7] 罗占夫, 肖元平. 南水北调西线隧洞独头通风14km方案研究[J]. 隧道建设, 2011, 31 (增1): 354-357. (Luo Zhanfu, Xiao Yuanping. Case study on ventilation for 14km-long single-direction Tunnel on west route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Tunnel Construction, 2011, 31 (Supp. 1): 354-357. (in Chinese))
- [8] 谭信荣, 陈寿根, 周泽林. 钻爆法施工隧道空气质量现场测试[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 567-572. (Tan Xinrong, Chen Shougen, Zhou Zelin. Air quality field test in tunnel construction with the drilling and blasting method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12 (2): 567-572. (in Chinese))
- [9] 刘钊春, 柴军瑞, 贾晓梅, 等. 压入式通风掘进面有害气体浓度扩散数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2): 536-539. (Liu Zhaochun, Chai Junrui, Jia Xiaomei, et al. Numerical simulation of concentration diffusion of harmful gas in head face with force ventilation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (Supp. 2): 536-539. (in Chinese))
- [10] 庞伟, 付海陆, 耿伟, 等. 天目山隧道通风与施工环境有害气体组分实时监测研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 150-158. (Pang Wei, Fu Hailu, Geng Wei, et al. Ventilation and real-time monitoring of the harmful gas components during the construction of Tianmu mountain Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56 (1): 150-158. (in Chinese))
- [11] 赵宁雨, 吕陈伏, 陈弘杨, 等. 高海拔长大隧道压入式施工通风的合理长度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39 (3): 94-99, 128. (Zhao Ningyu, Lv Chenfu, Chen Hongyang, et al. Optimal length of ventilation in construction of long tunnel at high altitude [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39 (3): 94-99, 128. (in Chinese))
- [12] 陶亮亮, 曾艳华, 涂云龙, 等. 基于安全稀释法的柴油车CO综合海拔系数研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(1): 194-200. (Tao Liangliang, Zeng Yanhua, Tu Yunlong, et al. Study on CO comprehensive altitude coefficient of diesel vehicle based on safety dilution method [J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46 (1): 194-200. (in Chinese))
- [13] 周健, 邹逸伦, 徐汪豪, 等. 米仓山公路隧道出口段施工通风方案设计[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 199-204. (Zhou Jian, Zou Yilun, Xu Wanghao, et al. Design of Construction Ventilation Scheme for the Exit Section of Micangshan Highway Tunnel [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40 (3): 199-204. (in Chinese))
- [14] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范(TB 10003-2016) [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016. (National Railway Administration TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnels [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016. (in Chinese))
- [15] Publication B S. Code of practice for health and safety in tunnelling in the construction industry (BS 6164-2001_5625) [S]. London: 2011.
- [16] Association I T A U. Guidelines for good occupational health and safety practice in tunnel construction (BS 6164:2019) [S]. France, 2008.
- [17] 王生昌, 刘浩学, 王贺武. 基于公路隧道的汽车CO基准排放量试验研究[J]. 公路交通科技, 2004(9): 153-157. (Wang Shengchang, Liu Haoxue, Wang Hewu. Experimental study on vehicle CO criterion emissions amount in highway tunnels [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004 (9): 153-157. (in Chinese))
- [18] 王旭, 王明年, 严涛, 等. 基准排放因子更新对隧道需风量的影响研究[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(1): 113-120. (Wang Xu, Wang Mingnian, Yan Tao, et al. Influence of base emission factor update on tunnel fresh-air demand [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59 (1): 113-120. (in Chinese))
- [19] 余林啸. 重型柴油机在不同海拔高度的燃烧与排放特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014. (Yu Linxiao. Research of Combustion and Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Engine at Different Altitudes [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese))
- [20] 张国梁, 蒋仲安, 王睿. 高海拔隧道出渣过程CO分布分析及需风量研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(12): 174-184. (Zhang Guoliang, Jiang Zhong'an, Wang Rui. Analysis of CO distribution and study on required air volume during slag removal process in high-altitude tunnels [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2021, 48 (12): 174-184. (in Chinese))