

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202601010

隧道钻爆法施工不同阶段 CO 污染物 扩散特性

杨 帅¹, 任 锐², 刘 渊¹, 董 婧¹, 杜 娟¹, 冯 江¹, 高成强¹, 师金锋¹

(1. 火箭军工程大学, 西安 710025;

2. 长安大学 公路学院, 西安 710064)

摘 要: 为明晰隧道钻爆法施工过程中 CO 的动态扩散机制并提升施工安全性, 采用数值模拟方法建立了隧道施工不同阶段的污染物扩散模型, 并通过现场测试验证了数值模型的可靠性, 同时分析了不同施工阶段、风管风速、初始质量分数和出渣车车速对 CO 扩散特性的影响规律。结果表明: 在爆破初期, CO 迅速充斥在掌子面附近的抛掷区域内, 随后 CO 云团发生对流变形, 其影响范围随通风时间呈先增加后减小的趋势; 出渣阶段, 在交通风与机械风耦合作用下, 距离出渣车尾部 5 m 范围内的 CO 质量分数呈现中间高、四周低的分布形式; 增加风管风速可以缩短通风时间, 但两者并非线性关系, 在兼顾环保与通风效率的基础上, 推荐风管风速为 15 m/s 左右; CO 初始质量分数越低, 达到隧道施工安全规范的用时越少; 随着出渣车行驶速度的增加, CO 质量分数降低, 扩散范围变广, 因此在规定允许范围内可以适当增加出渣车的行驶速度。

关键词: 隧道工程; 钻爆法施工; 耦合流场; CO 扩散特性

中图分类号: U455

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)01-0110-10



听语音
与作者互动
聊科研

随着交通强国战略和“一带一路”建设的实施推进, 中国凭借先进的隧道设计施工技术, 在地下工程建设方面已经处于世界领先水平^[1], 隧道建设长度与数量正在逐年攀升^[2]。近年来, 中国交通基础设施的建设重心正逐步向复杂地质环境地区转移, 长大隧道建设施工面临巨大挑战^[3]。

在隧道施工的爆破阶段^[4]和出渣阶段^[5]均会伴有大量的污染物产生, 由于隧道狭长封闭的结构特点不利于污染物的扩散, 若不及时对其进行处理, 极易导致施工人员患上尘肺病, 同时加剧施工机械的磨损。因此, 相关研究人员提出细水雾除尘^[6]、静电除尘^[7]和负离子除尘^[8]等多种方法来清理隧道内空气中的粉尘颗粒。然而, 现有研究大多侧重于粉尘对施工环境所产生的影响, 对 CO

等有害气体的关注较少, 但 CO 浓度过高同样会对施工安全以及人员健康产生严重威胁^[9]。针对爆破后的 CO 扩散规律, Menéndez 等^[10]通过理论与数值模拟的方法对硬岩隧道爆破后产生的 CO 等有害气体的释放、传播和稀释过程进行了分析, 确定了爆破后的安全工作时间; Feng 等^[11]通过数值计算方法分析了高海拔隧道爆破后的 CO 动态扩散规律, 发现当地下基础设施位于高海拔环境时, 降低 CO 质量分数所需的时间会增加; 刘杰等^[12]采用 CFD 方法研究了某高原螺旋施工隧道内风流场分布及 CO 运移特征, 通过建立多元线性回归模型, 预测了不同条件下隧道内 CO 质量分数的变化; Guo 等^[13]基于实际数据, 采用 CFD 方法研究了巷道爆破产生的 CO 时空演化特征。针对出渣阶

收稿日期: 2025-04-24

修回日期: 2025-08-29

录用日期: 2025-09-03

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2025JC-YBQN-583)

第一作者: 杨帅 (1996—), 女, 讲师, 博士, 主要从事地下空间环境保障研究。E-mail: yangshuai@chd.edu.cn

引用格式: 杨帅, 任锐, 刘渊, 等. 隧道钻爆法施工不同阶段 CO 污染物扩散特性[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40 (1): 110-119. YANG Shuai, REN Rui, LIU Yuan, et al. Diffusion characteristics of CO pollutants at different construction stages of tunnel drilling and blasting [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40 (1): 110-119.

段中施工机械产生的CO有害气体, Wang等^[14]分析了不同负载条件下柴油半挂车的排放差异, 并计算了柴油车的比例牵引功率和排放模型; 夏远翔等^[15]通过模拟试验分析了防爆柴油无轨胶轮车尾气在受限空间内的扩散规律, 结果表明, 提高风速和车速可有效稀释尾气, 对井下环境治理与工人健康保护具有重要意义。

然而, 上述研究背景主要集中在隧道施工爆破阶段, 对其他施工工序下的CO迁移机制研究较少, 未能充分考虑施工工序改变所导致的有害气体来源改变和风场变化对CO扩散特性产生的影响, 从而限制了对污染物扩散传质行为^[16]的进一步分析。因此, 本文开展了不同施工工序下CO的扩散分布规律研究, 有助于综合治理隧道施工产生的CO等有害气体, 最大程度地保护施工作业人员的生命健康。

1 模型及边界条件

1.1 模型建立

以某隧道施工第一阶段的独头压入式通风为工程基础, 采用ANSYS软件^[17]中的SCDM模块建立长为300 m的隧道数值模型, 如图1所示。其中, 风管为PVC柔性管, 直径 Φ 为1.8 m, 距离地面4 m, 位于隧道中线左侧, 其出口到掌子面的距离为20 m。出渣阶段, 出渣车的功率为300 kW, 前、后挡风玻璃接近90°。因此, 本文将出渣车模型简化为长方体, 其长度 L 为7.5 m、宽度 W 为2.5 m、高度 H 为2.5 m, 车辆底盘距离地面0.6 m, 车辆排气管直径为0.04 m, 距离地面0.82 m。

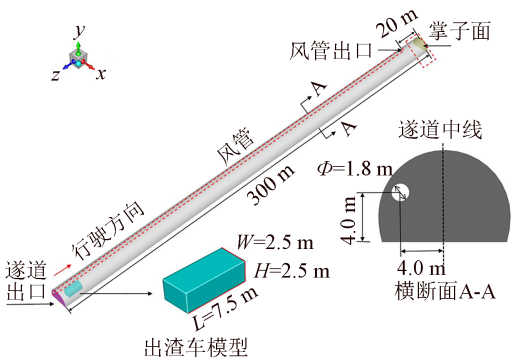


图1 隧道施工数值模型

Fig. 1 Numerical model of the tunnel construction

1.2 参数设置

假设隧道内的流场为恒温定常流场, 计算条件设置如表1所示。采用压力基求解器, 通过SIMPLE算法的速度和压力耦合修正关系来实现

质量守恒, 同时获得压力场。在研究CO的扩散规律时会涉及到不同空气组分间的混合和相互作用, 因此需要打开组分输运模型。

表1 计算条件设置

Table 1 Calculation condition settings

计算条件	设置
求解器	基于压力
涡流模型	标准墙壁函数
压力速度耦合方法	SIMPLE算法
组分输运模型	On
压力的离散方法	二阶迎风格式
涡流动能的离散方法	一阶迎风格式
收敛误差	≤ 0.0001

1.3 边界条件

1.3.1 爆破施工阶段

在隧道爆破施工过程中, 由于爆炸反应迅速且发生时间较短, 导致炸药燃烧不充分产生CO等不完全燃烧产物。由于本文研究的重点是隧道施工通风过程中爆破产生的CO分布规律, 所以不考虑爆破所产生的气流冲击。隧道施工爆破阶段模型的边界条件设置如表2所示。

表2 爆破阶段模型的边界条件

Table 2 Boundary conditions of the model in the blasting stage

边界	设置
风管出口	Velocity-inlet, $v=15$ m/s
隧道出口	Pressure-out
隧道壁面	Wall
隧道掌子面	Wall
风管壁面	Wall

在隧道掌子面爆破开挖的过程中, 爆炸在短时间内瞬时发生, 受到空间条件的限制, 炮烟在瞬间充满掌子面附近的抛掷区域内。爆破结束时, 认为CO在抛掷区范围内均匀分布, 因此爆破后抛掷区域内CO的初始体积分数 C_1 可表示为

$$C_1 = \frac{Gb}{L_0 A} \tag{1}$$

式中: G 为爆破使用的炸药量, 单位为kg; b 为单位质量炸药爆炸时生成的CO, 单位为 m^3/kg , 参考文献[18], 单位质量的确化甘油炸药爆炸时产生的CO体积为 0.04 m^3 ; L_0 为抛掷区长度, 单位为m, 本文中抛掷区长度设置为78.2 m; A 为隧道周向截面面积, 单位为 m^2 , 取值为63.63。其中,

本文参考隧道的设计炸药量为 316 kg。

将 CO 初始体积分数 C_1 换算成质量分数 C_0 为

$$C_0 = \frac{C_1 M_{CO}}{M_{空} + C_1 (M_{CO} - M_{空})} \cdot 100\% \quad (2)$$

式中： M_{CO} 为 CO 的摩尔质量，单位为 g/mol，取值为 28； $M_{空}$ 为混合气体的平均摩尔质量，单位为 g/mol，取值为 29。

1.3.2 出渣阶段

出渣车在运输过程中会排放 CO，假设 CO 在排放及扩散的过程中不会发生化学反应。此时，风管风速为 15 m/s，持续通风 15~20 min，认为隧道内的流场已经处于稳定状态。采用重叠网格法^[19]模拟出渣车在隧洞内的输运过程，出渣阶段模型的边界条件设置如表 3 所示。

表 3 出渣阶段模型的边界条件

Table 3 Boundary conditions of the model in the mucking stage

边界	设置
风管出口	Velocity-inlet, $v=15$ m/s
隧道出口	Pressure-out
出渣车排气口	Mass flow inlet
出渣车	Wall

为探讨出渣车在运输过程中尾气的 CO 含量，采用五气分析仪，对 CO 的排放百分比进行测定，为后续出渣车排放量设置提供参考。试验过程中，出渣车在隧洞内的行驶速度保持在 20 km/h，待发动机运行稳定后再进行数据采集，读取 30 s 内的数据取平均值作为最终的测量结果。由于现场情况复杂，未进行多工况下的数据采集，仅对出渣车车速为 20 km/h 工况进行了试验测试，得到出渣车的 CO 排放量为 0.04% vol，此后均假设出渣车的 CO 排放量保持不变。

1.4 现场测试

为验证数值模拟的准确性，采用 SW-6036 型风速仪对爆破后的流场进行现场检测。为保障检测人员的健康以及测试数据的准确性，在隧道爆破后通风时间达到 15 min 后进场检测。在距掌子面 100 m 范围内，每间隔 20 m 设置一个测试断面，共计 5 个，如图 2 所示。每个测试断面设置 6 个测点，测点高度分别为 1.7 m 和 3 m。

为确保数值模拟的准确性，对模型中相同位置测点的数据进行采集，与现场测试的结果进行对比。本文取同一截面中风速差异最大的测试位置，即图 2 中 2 号点位的风速测量结果与仿真结果进行对比，如图 3 所示。由图 3 可知，模拟值与实

测值在距离掌子面 20 m 位置处的流速差距最大，模拟风速比实际风速高 9.42%。这是因为掌子面附近的流场分布复杂，同一位置不同时刻的风速与风向都会发生较大幅度的变化，而其他截面的相同测点位置流速相对稳定，误差在 3% 以内，因此可认为该数值模拟的结果相对准确。

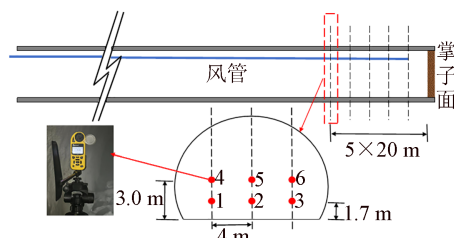


图 2 风速仪布置

Fig. 2 Anemometer layout

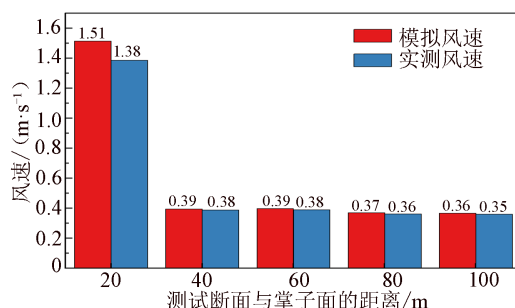


图 3 2 号点位的流场风速模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison between simulated and measured airflow velocities in the airflow field at point 2

2 长大隧道施工流场分布特征研究

2.1 机械风作用下流场的分布特征

距地面高度为 1.7 m 处 xz 截面的风速矢量云图如图 4 所示。从图中可以看到，风由风管出口射出，与掌子面碰撞后方向发生改变，掌子面附近流场可划分为射流区、回流区与紊流区。由于受到隧道壁面空间的限制，在掌子面的拐角位置形成了影响范围较小的涡流 I。在回流方向上，由于射流区高速射流的卷吸作用，回流区内流场方向发生改变，在掌子面附近形成了影响范围较大的涡流 II。随着与掌子面距离的增加，流场逐渐趋于稳定，隧道内整体风速稳定在 0.4 m/s 左右。

2.2 交通风与机械风耦合作用下流场的分布特征

以出渣车行驶速度为 20 km/h 为例，选取距离隧道地面 1.85 m 高度的 xz 截面对出渣车行驶过程中机械风与交通风耦合作用下的流场演化特征进行分析，结果如图 5 所示。从图中可以看到，出渣车在行驶过程中形成了较为均匀稳定的交通风

尾流, 风速在靠近车辆尾部处达到最大, 且向着洞口方向逐渐减小。在近洞口位置, 出渣车车头与车身两侧的涡流扰动范围较小, 这是由于近洞口位置的机械风已经处于稳定状态, 此时流场的扰动主要是由交通风所引起的。在近掌子面位置, 车辆两侧的涡流逐渐向行驶方向后方发展, 形成了较长的交通风尾流, 此时的扰动范围增大, 车辆与掌子面范围内的风流迹线较为紊乱, 这是由于在交通风与机械风的耦合作用下, 流场方向改变从而形成了多个涡流区域, 导致流场扰动过大。

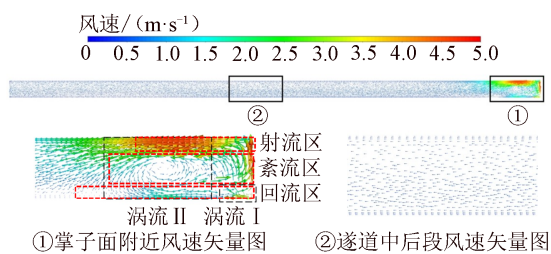


图 4 距地面高 1.7 m 处 xz 截面的风速矢量图

Fig. 4 Airflow velocity vector diagram of the xz section at a ground height of 1.7 m

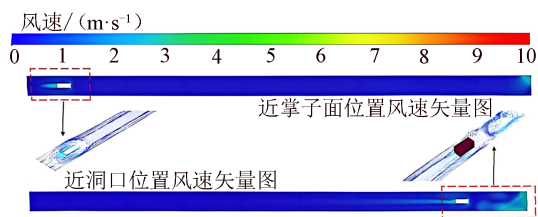
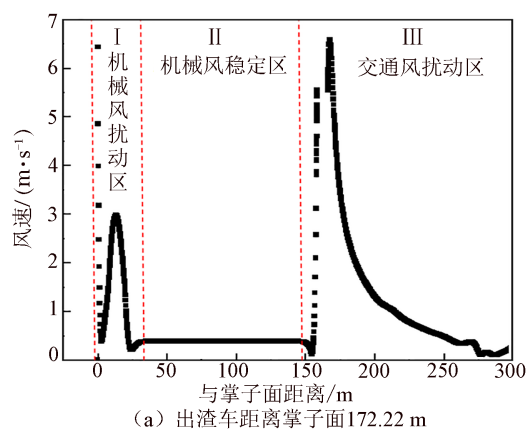


图 5 距地面高 1.85 m 处 xz 截面的交通风与机械风耦合流场分布

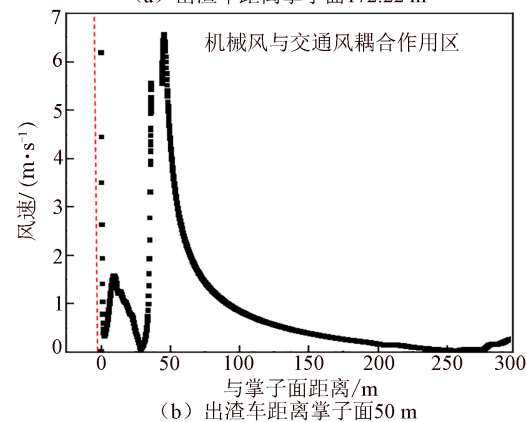
Fig. 5 Distribution of the coupled airflow field of traffic and mechanical winds of the xz section at a ground height of 1.85 m

为了直观展示交通风和机械风耦合作用下的流场波动情况, 提取隧道中线距离地面高度为 1.85 m 处的沿程风速数据进行处理, 结果如图 6 所示。从图 6 (a) 可以看出, 在出渣车距离掌子面 172.22 m 时, 隧道内流场可以大致分为 3 个区域: 第一个区域为距掌子面约 30 m 范围内, 由于机械风产生回流所造成的风流场扰动区; 第二个区域为机械风稳定区, 流场稳定后的风速为 0.4 m/s; 第三个区域为交通风扰动区, 由于交通风的作用, 隧道中线距地面 1.85 m 处的沿程风速呈先增大后减小的趋势, 出渣车尾部交通风峰值达 6.5 m/s, 机械风扰动区内风速峰值为 2.971 69 m/s。如图 6 (b) 所示, 随着车辆接近掌子面, 当交通风与机械风产生的流场波动相遇后, 在两者的耦合作用下使得掌子面附近 50 m 范围内的流场更加复杂,

直观表现为距离掌子面 20 m 范围内流场的风速峰值减小, 约为 1.565 16 m/s, 与图 6 (a) 相比, 风速峰值降低了 47.33%。



(a) 出渣车距离掌子面 172.22 m



(b) 出渣车距离掌子面 50 m

图 6 出渣车与掌子面不同距离下隧道中线距地面 1.85 m 的沿程风速分布

Fig. 6 Airflow velocity distribution along the tunnel centerline at a ground height of 1.85 m under different distances between the mucking truck and working face

3 污染物扩散规律研究

3.1 机械风作用下的 CO 扩散特性

隧道施工爆破后, CO 在短时间内迅速充斥在掌子面附近的抛掷区域内, 在风流的作用下不断稀释扩散。设置抛掷区内的 CO 初始质量分数为 0.25%, 提取隧道施工爆破后 30 s 内距离地面高度 4 m 处 xz 截面的 CO 质量分数分布云图, 结果如图 7 所示。据图 7 可知, 在抛掷区内, 风管出口位置处的 CO 质量分数较低, 随着持续不断的供风, CO 在隧道内的扩散范围不断扩大, CO 质量分数呈现中间高两端低的分布趋势。这是因为在近掌子面附近, 随着新鲜空气的不断输入, 风管与掌子面范围内的 CO 被不断稀释, 在对流作用下促使 CO 沿着纵向扩散, 同时在抛掷区与隧道其他位置的交界处存在较高的 CO 浓度梯度, 促使 CO 分子

向低浓度方向运动。

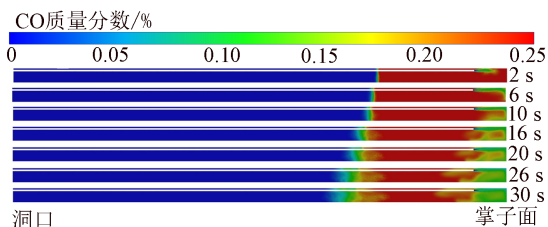


图 7 爆破后 30 s 内距地面高 4 m 处 xz 截面的 CO 质量分数分布云图

Fig. 7 Cloud maps of CO mass fraction distribution in the xz section at a ground height of 4 m within 30 s after blasting

为研究 CO 质量分数随通风时间的变化规律,选取隧道中线位置处的 yz 截面,观察 CO 质量分数在该截面上的分布情况,结果如图 8 所示。据图 8 可知,在机械风的作用下,CO 云团发生对流变形,长度随通风时间呈现先增加后减小的变化规律,这是由于当 CO 云团到达隧道出口位置后,CO 从隧道出口位置排出,云团长度开始逐渐减小,且 CO 的质量分数峰值逐渐降低。由于 CO 的密度小于空气密度,因此 CO 在纵向上的质量分数分布从上到下逐渐降低,呈现不规则的梯形。

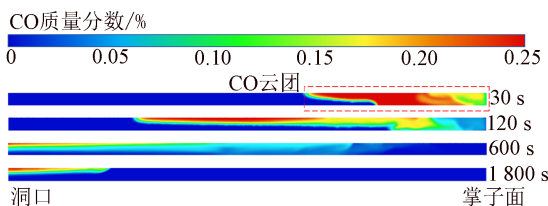


图 8 爆破后 1 800 s 内隧道中线位置处 yz 截面的 CO 质量分数分布云图

Fig. 8 Cloud maps of CO mass fraction distribution in the yz section at the tunnel centerline within 1 800 s after blasting

3.2 耦合风场下的 CO 扩散特性

隧道施工出渣阶段,在交通风与机械风耦合作用下,出渣车在隧道内不同位置的 CO 扩散特性不同。以出渣车车速 20 km/h 为例,对出渣车产生的 CO 在机械风与交通风耦合作用下的时空分布特性进行分析,结果如图 9 所示。据图 9 可知,出渣车在运输过程中产生的 CO 在车辆排放口处的质量分数最大,由于周围空气的稀释作用,CO 的扩散范围逐渐增加。距离出渣车尾部 4.5 m 范围内,CO 质量分数呈中间高、四周低的分布形式,随着与出渣车距离的增加,CO 质量分数逐渐减小。

在出渣车行驶过程中,CO 在行驶路径上存在一定残留。在 300 m 隧道范围内,每隔 1 m 提取不

同出渣车行驶时间下 xy 截面的 CO 质量分数平均值,得到隧道内 CO 质量分数分布曲线如图 10 所示。据图 10 可知,车辆行驶 45 s 后的质量分数峰值较行驶 23 s 后的质量分数峰值降低了 35.07%。随着行驶时间的增加,CO 在隧道内不断积累,影响范围不断增大。当出渣车刚开始进入隧洞 1 s 时,CO 分布仅限出渣车排气口后 3 m 范围内;当出渣车行驶时间为 23 s 时,CO 分布的影响范围增加到 134 m;当出渣车行驶时间为 45 s 时,CO 分布的影响范围增加到 256 m。

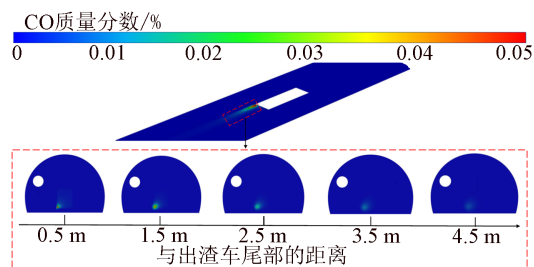


图 9 隧道纵断面及横断面 CO 时空分布云图

Fig. 9 Cloud maps of CO spatiotemporal distribution in the longitudinal and cross sections of the tunnel

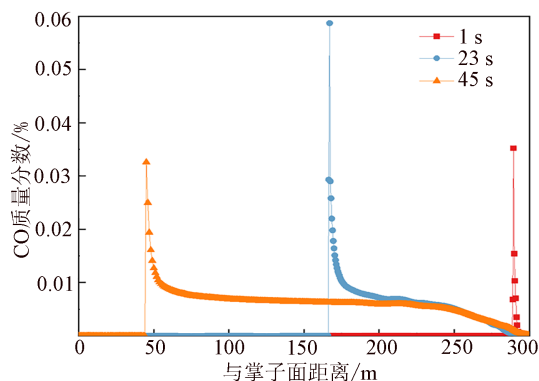


图 10 不同行驶时间下隧道沿程的 xy 截面 CO 质量分数均值变化曲线

Fig. 10 Variation curves of the CO mass fraction of tunnel xy section with different travel times

3.3 影响因素分析

3.3.1 风管风速的影响规律

为研究风管风速对 CO 扩散规律的影响,设置 CO 的初始质量分数为 0.25%,选取通风 1 min 和 10 min 时隧道中间位置处 yz 截面的 CO 质量分数分布云图进行分析,结果如图 11 所示。随着风管风速的增加,CO 的扩散距离增大,CO 质量分数峰值逐渐降低。在开始通风 1 min 后,通风速度每增加 2.5 m/s,CO 扩散距离相应增加 2.06%、2.89%、2.82% 以及 2.02%。

为定量分析风管风速对隧道内不同位置不同

时间的CO质量分数分布规律的影响，每隔25 m设置一个xy截面，然后提取该截面的CO质量分数平均值，结果如图12所示。随着通风时间的增加，不同工况下CO随着风流不断向隧道出口移动。在通风1 min后，除风速为17.5 m/s的工况外，其余4组试验的CO质量分数峰值随着风管风速的增加而逐渐降低，且与掌子面的距离逐渐增大。其中，当风管风速为17.5 m/s时，由于风速较大，CO质量分数峰值较前3种工况更远离掌子面，因75 m截面位置恰好处于CO云团移动的高浓度区域，从而导致CO质量分数并没有降低。在通风10 min后，风管风速超过12.5 m/s工况下CO已经扩散到隧道出口位置，由于涡流限制了CO的扩散，20 m/s工况时CO质量分数略大于17.5 m/s工况。在通风15 min后，由于流场的发展，受到涡流阻碍的CO也逐渐被稀释迁移，随着风管风速的增加，隧道内CO整体浓度降低。通风20 min后，在风管风速为20 m/s工况下，隧道内几乎已无CO残留。

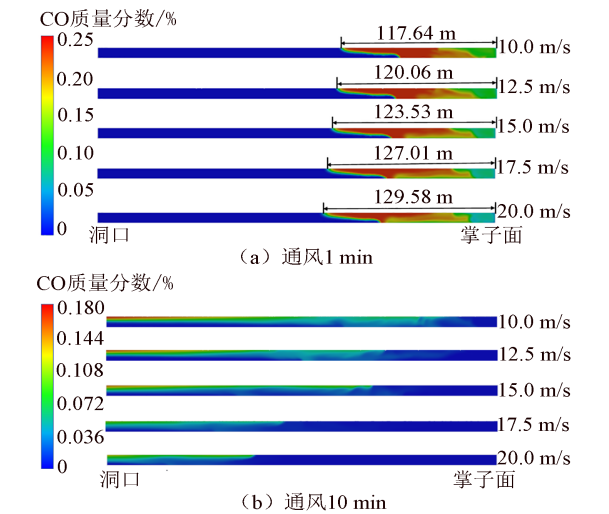


图 11 不同风管风速和通风时间下CO质量分数分布云图
Fig. 11 Cloud maps of CO mass fraction distribution under different air duct ventilation velocities and times

经计算，在上述5种风速工况下隧道内CO浓度均值符合《公路隧道施工技术规范》^[20]要求（即CO最高容许浓度30 mg/m³，换算成质量分数约为0.002 46%）所需的通风时间分别为50 min、36 min、30 min、25 min以及21 min。由此可得，风管风速每增加2.5 m/s，达到规范要求所需的通风时间依次缩短了28%、16.67%、16.67%和16%。综上所述，增加风管风速可以有效减少通风时间，但当风速增加到一定值后，增加风速对减少通风时间的效果相对减弱。因此，在兼顾节能环保与

通风效率的基础上，推荐风管风速为15 m/s。

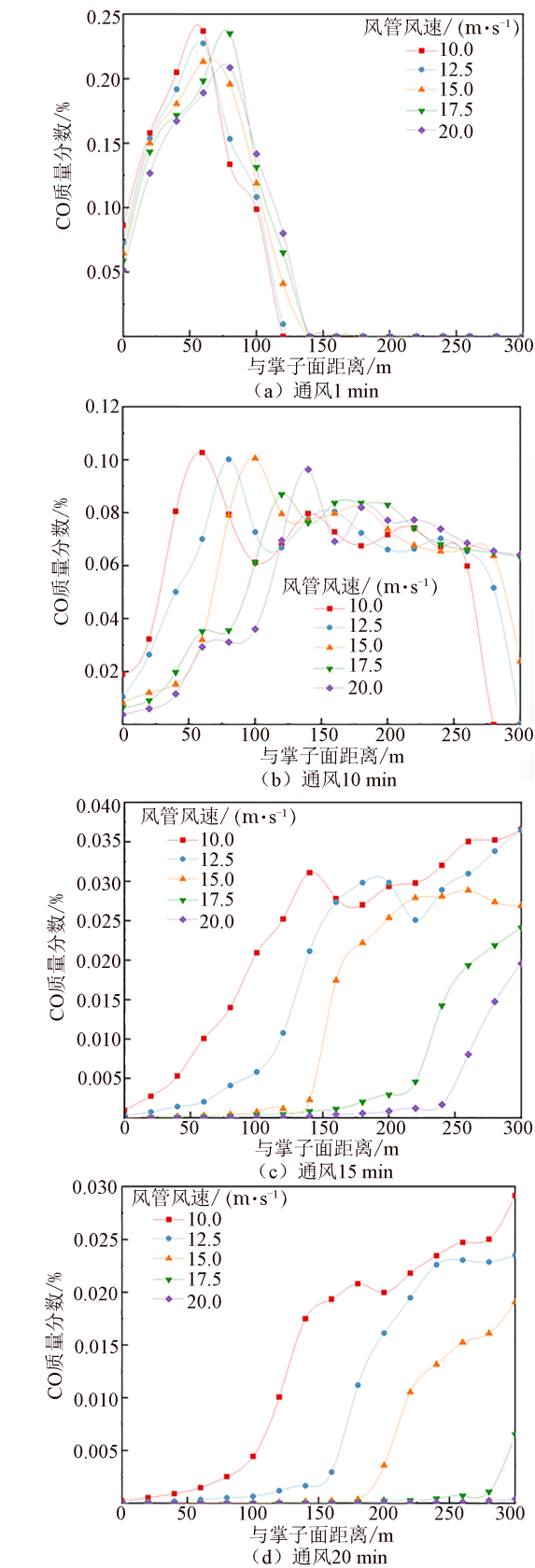


图 12 不同风管风速和通风时间下CO质量分数分布规律
Fig. 12 Distribution of CO mass fraction under different air duct ventilation velocities and times

3.3.2 CO 初始质量分数的影响规律

设置风管风速为 15 m/s, 选取隧道中间位置处 yz 截面, 对通风时间为 10 min 内的 CO 质量分数分布云图进行分析, 结果如图 13 所示。从图中可以看出, 在开始通风 1 min 后, 不同工况下 CO 运移距离相差不大, 随着初始 CO 质量分数增加, CO 的质量分数峰值相应增加; 通风 5 min 后, 随着 CO 初始质量分数增加, CO 的运移距离随之增大。这是由于 CO 初始质量分数越高, 对应的浓度梯度越大, 相应的扩散系数也越大, 扩散速度增加。通风 10 min 后, 初始 CO 质量分数越高, 隧道内 CO 残余范围越大, 这是由于 CO 初始质量分数越高, 欲要达到相应的 CO 浓度标准值所需的稀释风量越多, 所需通风时间变长。

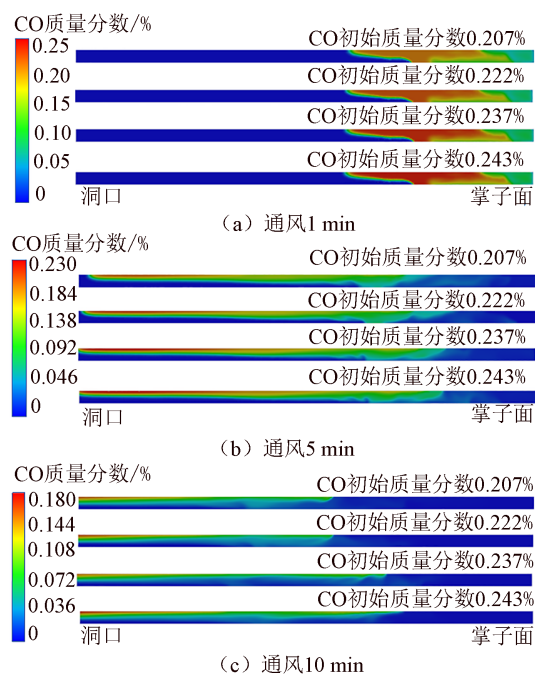


图 13 不同通风时间和 CO 初始质量分数工况下隧道内 CO 质量分数分布云图

Fig. 13 Cloud maps of CO mass fraction distribution in tunnels under different ventilation times and initial CO mass fractions

为定量分析不同 CO 初始质量分数对隧道内 CO 分布规律的影响, 每隔 25 m 设置一个 xy 截面, 提取该截面内的 CO 质量分数均值, 结果如图 14 所示。从图 14 中可以看出, 通风时间为 1 min 时, 随着 CO 初始质量分数降低, 隧道内 CO 质量分数峰值减小。当通风时间为 10 min 时, CO 初始质量分数为 0.237% 的 CO 运移速度相较于其他工况慢, 这是由于在对流扩散与分子扩散的共同影响下该工况的 CO 扩散速度较慢, 因此延长了该工况下的 CO 排出时间, 导致在通风 15 min 后, 此工况在距

离掌子面 150~280 m 位置的 CO 质量分数要高于其他工况。通风 20 min 后, 爆破产生的 CO 云团已

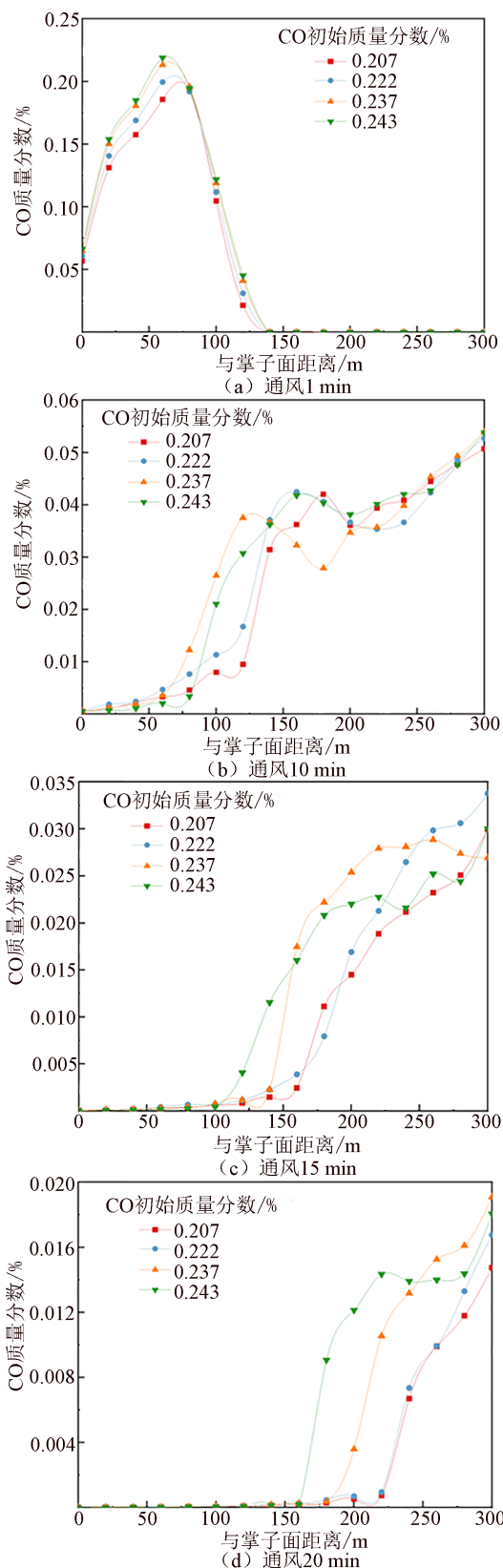


图 14 不同通风时间和 CO 初始质量分数工况下隧道内 CO 分布规律

Fig. 14 Distribution of CO in tunnels under different ventilation times and initial CO mass fractions

经被风流充分稀释,此时CO初始质量分数越小,达到隧道施工安全规范的时间越早。经计算,随着初始CO质量分数降低,4种工况下隧道内CO浓度符合规范要求所需的通风时间分别为33 min、30 min、27 min和26 min。

3.3.3 出渣车车速的影响规律

在出渣车进入隧道前,假设爆破阶段产生的CO已被排出隧道,设置风管风速为15 m/s。根据《公路隧道施工技术规范》规定,施工隧道内的车辆行驶速度在10~20 km/h,因此设置出渣车行驶速度分别为10 km/h、12.5 km/h、15 km/h、17.5 km/h以及20 km/h。同时,假设车辆在不同行驶速度下的CO排放量均相同。数据处理方法同3.2节,得到不同出渣车车速工况下CO质量分数沿程分布曲线如图15所示。

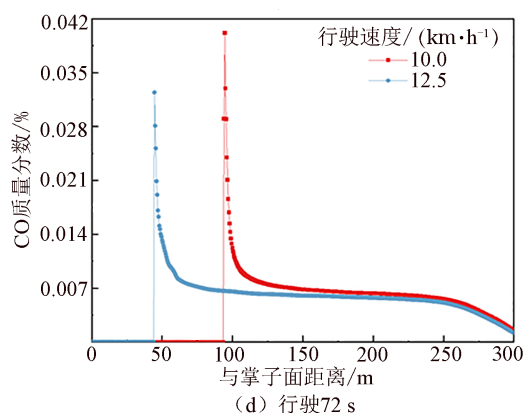
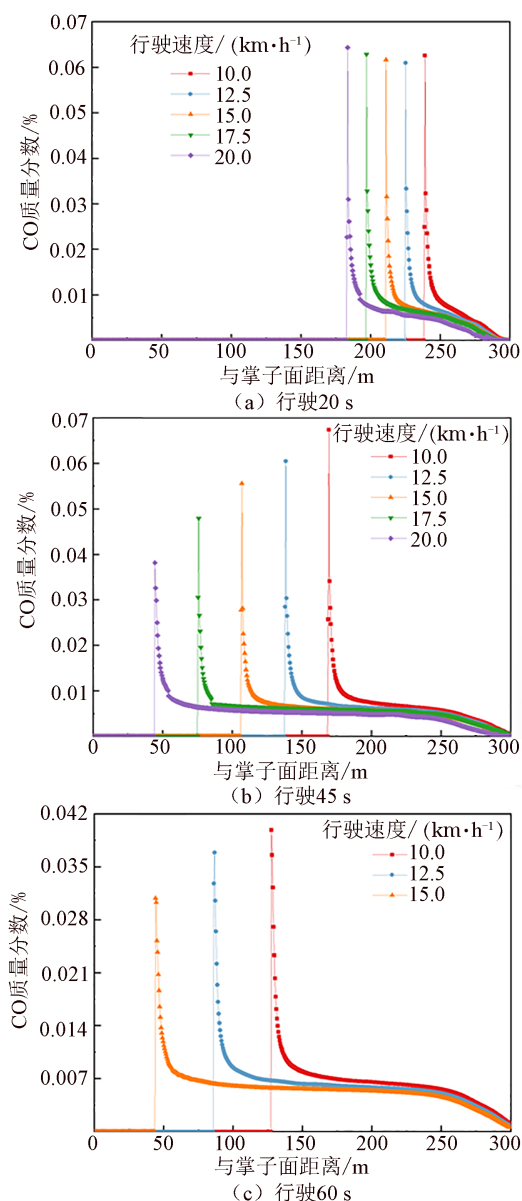


图15 不同出渣车车速及行驶时间工况下CO质量分数沿程分布

Fig. 15 Distribution of CO mass fraction along the tunnel under different mucking truck speeds and travel times

由图15可得,当行驶时间为20 s时,不同行驶速度下的CO质量分数峰值差距较小,但随着行驶时间的增加,车速越快,CO质量分数峰值越小。以行驶时间45 s为例,车速每增加2.5 km/h,CO质量分数峰值依次下降10.2%、8.13%、13.8%、20.4%,行驶途中残留的CO质量分数依次下降12.7%、11.5%、14.1%、11.3%,且扩散范围变长。在相同时间同等排放量的情况下,出渣车的行驶速度越快,行驶距离越长,从而增大了CO与隧道内新鲜空气的接触范围,促进了CO的分子扩散,而出渣车行驶速度越小,CO越容易积聚。因此,在兼顾施工环境的同时,为保障出渣效率,推荐出渣车的行驶速度在允许范围内越快越好。

4 结论

为明确隧道施工不同阶段的CO污染物扩散规律,本文采用ANSYS仿真软件建立隧道施工不同阶段污染物扩散模型,并通过将计算结果与实测结果进行对比,验证了模型的可靠性。同时,通过数值模拟分析了不同施工阶段的流场分布特征,探究了风管风速、CO初始质量分数以及出渣车车速对CO扩散特性的影响规律,主要结论如下。

1) 本文通过ANSYS仿真计算得到的风速与实测结果的误差在距离掌子面20 m位置处达到最大值9.42%,在其他截面相同测点位置处的测量误差在3%以内,从而验证了流场计算的可靠性。

2) 对隧道施工爆破与出渣阶段的流场分布进行分析,结果表明:在机械风单独作用下,掌子面附近形成了明显的射流区、回流区及紊流区,

远场风速稳定在 0.4 m/s 左右；当出渣车行驶至近掌子面时，在机械风与通风的耦合作用下，峰值风速较单一机械风工况下降了 47.33%，且涡流结构与紊流影响范围明显扩大。

3) 提高风管风速可缩短通风时间，但当风速超过某一阈值后，增加风速对缩短通风时间的影响较小，因此在综合考虑通风效率的前提下，建议将风速设定为 15 m/s；CO 初始质量分数越低，通风后达到安全规范要求所需的时间越短；出渣车速度增加虽然可降低 CO 浓度，但也会扩大污染物影响范围。

参考文献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
QIAN Q H. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40.
- [3] WANG Y Q, LI J Q, WANG Z F, et al. Structural failures and geohazards caused by mountain tunnel construction in fault zone and its treatment measures: a case study in Shaanxi[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106386.
- [4] 蒋仲安, 曾发镔, 冯雪, 等. 高海拔隧道爆破后粉尘污染动力学模型及影响因素[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 263-278.
JIANG Z A, ZENG F B, FENG X, et al. Dynamic model and influencing factors of dust pollution after blasting in high altitude tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 263-278.
- [5] 刘禹阳, 安驰, 来弘鹏, 等. 钻爆法隧道出渣粉尘时空扩散规律及运移计算[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(4): 1080-1093.
LIU Y Y, AN C, LAI H P, et al. Spatiotemporal diffusion law and transport calculation of slag dust in tunnel by drilling and blasting method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(4): 1080-1093.
- [6] 杨帅, 任锐, 薛育阳, 等. 细水雾除尘装置去除呼吸性粉尘作用效果研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S1): 494-500.
YANG S, REN R, XUE Y Y, et al. Effect of water mist dust removal device in removing respirable dust[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(S1): 494-500.
- [7] 郭志杰, 张灿程, 李志鹏, 等. 基于清洁能源车辆调查的太岳山隧道通风方案优化[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 818-824.
GUO Z J, ZHANG C C, LI Z P, et al. Optimization of ventilation scheme for Taiyueshan tunnel based on survey of clean energy fuelled vehicles[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 818-824.
- [8] 焦卫宁, 杨帅, 蒋灿, 等. 负离子除尘技术在隧道中的应用与数值模拟研究[J]. 暖通空调, 2024, 54(10): 102-107, 119.
JIAO W N, YANG S, JIANG C, et al. Application and numerical simulation of negative ion dust removal technology in tunnels[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2024, 54(10): 102-107, 119.
- [9] HAMPSON N B. Preventing carbon monoxide poisoning in the Hudson River tunnel in 1921: recounting history[J]. Undersea & Hyperbaric Medicine, 2021, 48(1): 89-96.
- [10] MENÉNDEZ J, MERLÉ N, FERNÁNDEZ-ORO J M, et al. Concentration, propagation and dilution of toxic gases in underground excavations under different ventilation modes[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(12): 7092.
- [11] FENG X, JIANG Z A, ZHANG G L, et al. Study on CO diffusion law and concentration distribution function under ventilation after blasting in high-altitude tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 220: 104871.
- [12] 刘杰, 周皓文, 王婉青, 等. 某高原螺旋施工隧道 CO 分布及扩散特征[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 79-87.
LIU J, ZHOU H W, WANG W Q, et al. Study on CO distribution and diffusion in spiral construction tunnel on plateau[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 79-87.
- [13] GUO S, ZHANG Q, HE M C, et al. Study on CO migration characteristics and hazard potential function under ventilation after roof cutting blasting[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 239: 105464.
- [14] WANG X, SONG G H, ZHAI Z Q, et al. Effects of vehicle load on emissions of heavy-duty diesel trucks: a study based on real-world data[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(8): 3877.
- [15] 夏远翔, 陈曦, 范超男, 等. 受限空间无轨胶轮车尾气(CO、SO₂)排放扩散规律试验研究[J]. 矿业安全

- 与环保, 2023, 50(3): 32-36.
- XIA Y X, CHEN X, FAN C N, et al. Test research on diffusion law of tail gas (CO, SO₂) discharged from trackless rubber-tyred vehicle in confined space[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(3): 32-36.
- [16] 陈诺, 赖志贤, 王世奇, 等. 基于欧拉-欧拉两相流模型核事故放射性物质扩散特性数值模拟[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(5): 17-24.
- CHEN N, LAI Z X, WANG S Q, et al. Numerical simulation of nuclear accident radioactive materials dispersion characteristics based on Eulerian two-phase flow model[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2024, 38(5): 17-24.
- [17] 崔雨晨, 易华辉, 黄金香, 等. 爆炸冲击作用下不同材料箱型梁桥损伤分析[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(1): 24-33.
- CUI Y C, YI H H, HUANG J X, et al. Damage analysis of box girder bridge with different materials under explosion impact[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2024, 38(1): 24-33.
- [18] LU H, TAN B, WANG S Q, et al. Study on the spatiotemporal diffusion law of CO from confined-space blasting and the efficiency of ventilation smoke exhaust in underground mines[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 202: 107754.
- [19] 张大朋, 严谨, 赵博文. 基于静态重叠网格法的全附体潜艇的斜航仿真[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(5): 25-31.
- ZHANG D P, YAN J, ZHAO B W. Numerical simulation of full appended submarine in drift process based on static overset grid method[J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(5): 25-31.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范: JTG/T 3660—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.

Diffusion Characteristics of CO Pollutants at Different Construction Stages of Tunnel Drilling and Blasting

YANG Shuai¹, REN Rui², LIU Yuan¹, DONG Jing¹, DU Juan¹,
FENG Jiang¹, GAO Chengqiang¹, SHI Jinfeng¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

ABSTRACT: A numerical simulation method was employed to establish a pollutant diffusion model for different construction stages to clarify the dynamic diffusion mechanism of CO during tunnel drilling and blasting construction and enhance construction safety. The reliability of the model was verified through on-site tests. The effects of construction stages, air duct ventilation velocity, initial mass fraction, and muck truck speed on CO diffusion characteristics were analyzed. The results show that in the early stage of blasting, CO quickly fills the throwing area near the working face. The CO cloud then undergoes convective deformation, with the impact range first increasing and then decreasing with ventilation time. During the mucking stage, under the coupling effect of traffic and mechanical winds, the CO mass fraction within 5 m from the tail of the mucking truck presents a distribution pattern that is higher in the middle and lower in the surrounding area. Increasing the air duct ventilation velocity can reduce ventilation time. However, the effect is nonlinear, and an air duct ventilation velocity of approximately 15 m/s is recommended, considering both environmental protection and ventilation efficiency. The lower the initial CO mass fraction, the earlier it meets the tunnel construction safety specifications. As the speed of the muck truck increases, the CO mass fraction decreases and its diffusion range widens. Therefore, within the permissible range of regulations, appropriately increasing the truck speed is recommended.

KEYWORDS: tunnel engineering; drilling and blasting construction; coupled flow field; CO diffusion characteristics

(编辑: 刘建民)