

梁王山公路隧道弯折斜井施工通风污染物运移特性研究

杨 坚

(中铁十五局集团 第四工程有限公司,河南 新郑 451199)

摘要:为解决隧道施工通风中工区污染物运移缓慢,致使通风效率不佳的问题,依托福宜高速梁王山隧道工程,采用现场监测和数值模拟方法,探究了弯折斜井风流场稳定性及纵向衰减机制和隧道爆破下的污染物时空分布特征,揭示了风流场耦合效应与压差作用机理,以及施工期污染物动态运移规律。结果表明,在稳态流场下,作业面呈中间低、两侧高的压强分布梯度,最终形成涡流,影响排污效率;涡流影响区域与两侧压差大小呈正相关;顺接弯折圆弧路径风速、风压波幅小,对通风排污基本无影响;骤变弯折路径处风流因撞壁作用多向分流,部分风流回流形成小范围涡流,致使CO局部积聚,期间伴有风速波幅大、风压骤降等现象,对施工通风影响显著。

关键词:公路隧道;弯折斜井工区;施工通风;污染物;现场监测

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2025)01-0035-08

0 引言

随着“十四五”战略规划的大力推进,中国交通网络重心开始西移,西部基础设施建设逐步完善,长大隧道工程不断涌现,而为缩短施工工期,常选择开辟斜井、竖井等辅助坑道,以实现“长隧短打”^[1]。考虑到西部地质条件差、地下水丰富、开挖难度大,导致辅助坑道施工时常因地质影响局部导改,最终形成复杂结构的隧道。针对以钻爆法为主要施工手段的山岭隧道,通风作为保障工人身心健康的唯一“生命线”,为迎合隧道逐渐“复杂化、长大化”发展趋势,通风设计已从最开始利用自然条件通风,逐渐发展到借助于通风管道和施工巷道进行通风,通风装置逐渐大型化、智能化^[2-5]。然而,传统的直线隧道通风理论和方法在此类复杂地形的隧道中往往存在局限性,难以准确预测污染物在隧道内的流动和积聚特性,增加了施工环境的安全隐患。因此,基于复杂结构隧道,深入剖析施工通风时的污染物运移特性,为类似工程提供通风设计参考。

目前,针对复杂通风网络使用斜井送排式通风的技术研究仍在探索阶段,尚未形成一套成熟系统的方法,在实际实施时还存在许多不足。TAO et al^[6]针对单斜井双正洞特长铁路隧道施工通风条件,表明风仓式通风能够有效延长通风距离,提高通风效率。裴真真等^[7]依托兴山东隧道斜井工区施工通风实例,通过大量理论计算发现,优化斜井风管布设空间、小幅度增高斜井断面、扩大通风管径均能提高通风效率。杨立新等^[8]对比分析了斜井内隔板式通风与风管式通风,发现隔板式在小直径风管下耗能更低,当管径增至2.5 m以上时,风管式的通风效率更优。童奕飞^[9]依托白云山隧道,通过CFD理论计算研究了不同倾角与斜井通风效率的相关性。高磊^[10]基于数值计算发现CO易滞留在斜井弯折处,提出在斜井弯折处增设射流风机以稀释局部淤积的CO。石拓^[11]采用施工现场与理论研究相结合的方式,提出抽排式竖井通风模式,并成功应用于成兰铁路松潘隧道工程。

收稿日期:2024-09-20 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzbzrb.20240239

基金项目:国家自然科学基金(51508477);中铁十五局集团有限公司科技研发计划项目(2022-C28)

作者简介:杨坚(1980—),男,高级工程师,研究方向为隧道施工管理。E-mail:sextraordinary@163.com

杨坚.梁王山公路隧道弯折斜井施工通风污染物运移特性研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(1):35-42.

综上可知,目前大量学者在斜井通风系统下对不同通风方案、气流分布和污染物扩散规律进行了大量探索,然而针对多段弯折、变截面斜井结构中的污染物运移特性尚缺乏深入研究。本文以福宜高速梁王山隧道弯折斜井工区施工为依托工程,旨在通过现场监测和数值模拟相结合的方式,探究既有通风系统下弯折斜井风流场稳定性及纵向衰减机制与污染物时空分布特征,揭示弯折斜井结构对通风效率的影响机制,研究成果可为类似工程的通风设计提供理论支持。

1 工程概况

梁王山隧道是昆明(福德立交)—宜良高速公路(昆石复线)的控制性工程,位于云南省东南部,为双向六车道双洞公路隧道,全长 7 978 m,设计速度为 100 km/h。工程为双线分离式隧道,洞身最大埋深 300 m,隧道净空(宽×高)14.5 m×5.0 m。隧道修建中设有一座斜井辅助施工通道,将全隧划分成进口(昆明端)、斜井、出口(宜良端)3 个作业工区,施工工区划分如图 1 所示。在斜井进入正洞后,分别向大小里程各开辟一个工作面,并沿程设置若干横通道与右洞衔接向两方向施工(斜井工区共 4 个工作面),全隧共设 8 个工作面。因此,梁王山隧道施工通风具有“距离长、作业面多、粉尘大、有害气体浓度高”等特点,通风困难。然而,在斜井掘进至 XK0+038 时多次发生突泥涌水,施工进度受阻,为提高施工安全性,降低建设难度,提出斜井断面改为三心圆曲墙断面,后续施工线路改为 40 m 直线段、半径 45 m,长 40 m 圆弧段和 45 m 直线段共计 125 m 的施工线路变更方案,变更点两直线段以 135°弯折转角衔接,最终在斜井段形成了 40 m 圆弧段和 135°弯折处 2 个弯折段。

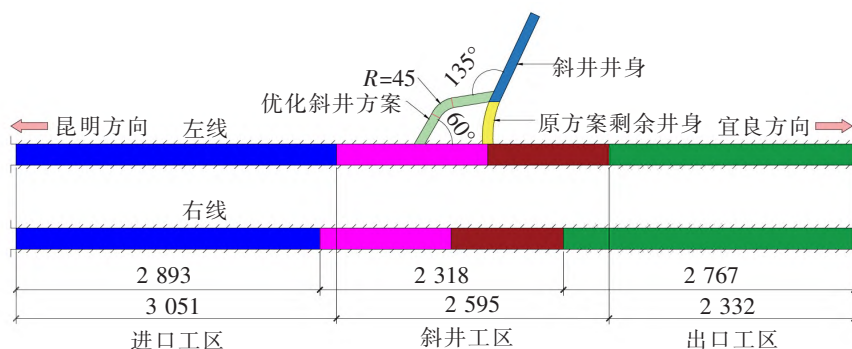


图 1 梁王山隧道施工工区示意图(单位:m)

当在斜井掘进长度 >150 m 时,为将施工污染物快速排出,采用压入式通风,通过洞口布置 1 台 SDF(B)-No 17(2×160 kW)变频轴流风机,风口距掌子面距离为 30 m,风管采用直径 1.8 m 软质风管。

2 污染物运移特性现场监测

2.1 测试内容及设备

不同污染气体理化性质表明,除 CO 极难溶于水,NO₂、SO₂、H₂S 等污染气体均可溶于水,故洒水降尘时部分污染气体也能够得到控制。为此本项目研发了一种隧道掌子面通风喷雾降尘装置(图 2)并在施工现场成功应用,此装置由多段轻质塑料管和多个雾化喷头构成,布设在风管上端,在爆破结束通风时,开启装置,在管内新鲜风的辅助下,装置喷出的雾滴在落地前经风流作用吸附粉尘与部分有害气体,将粉尘遏制在作业面 50 m 内,待粉尘质量浓度降至 2 mg/m³ 以下时,关闭装置。综上,选定以风速与 CO 浓度在隧道流场中的随时间变化规律作为通风效率反馈的目标因子。

为研究梁王山隧道斜井线路变更后曲折路径对通风排污的影响,探明掌子面爆破后污染物分布

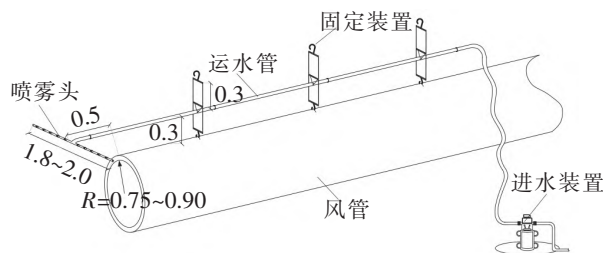


图 2 喷雾降尘的联合装置示意图(单位:m)

规律,对弯折斜井施工掌子面爆破后施工段范围内的 CO 浓度和风速进行以时间、监测断面为变量,对爆破后通风 30 min 内相关参量随时间的变化规律进行现场监测,监测设备有 DT-3880 矿用电子式风速表和 EM-20 CO 监测仪,如图 3 所示。

2.2 测试断面及方法

为探究隧道施工弯折斜井掌子面爆破后污染物在流场内的衍生情况,选取曲折段 125、85、65、45 m、斜井曲直交口处、直线段 800、600、400、200 m 关键断面进行监测,具体断面如图 4 所示。



图 3 监测仪器设备

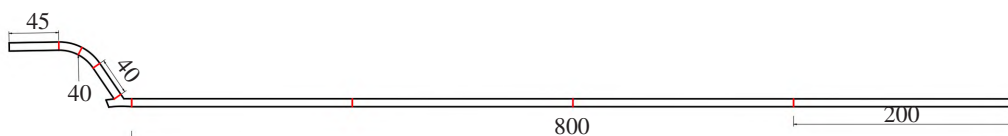


图 4 监测断面示意图(单位:m)

受洞内施工车辆、栈桥、台车(架)等横断面阻碍作用,污染物及环境参数监测结果随监测断面位置不同存在一定差距。为减少此因素所带来的误差,将断面分割为 6 块区域,各区域中心设置一个监测点,共计 6 个监测点,最终取其监测结果平均值作为该断面最终监测数值,斜井断面监测点布置如图 5 所示。现场每隔 2 min 记录一次风速和 CO 浓度数据,记录 30 min,每项参数共监测 16 组数据。

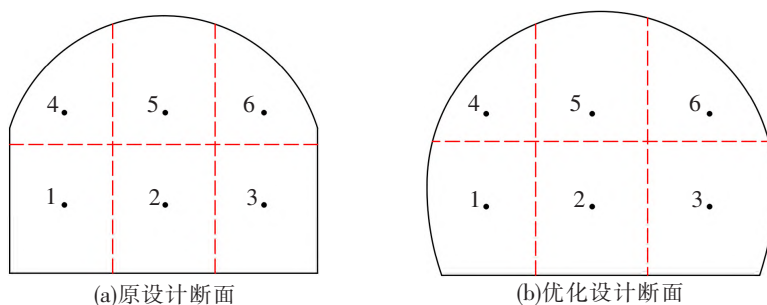


图 5 断面监测点布置示意图

2.3 监测数据分析

隧道爆破作业后,随即监测弯折斜井各断面 CO 浓度随时间变化规律,各监测断面的现场测试数据如图 6 所示。根据现场监测数据,绘制斜井各断面风速随时间的变化曲线,如图 7 所示。

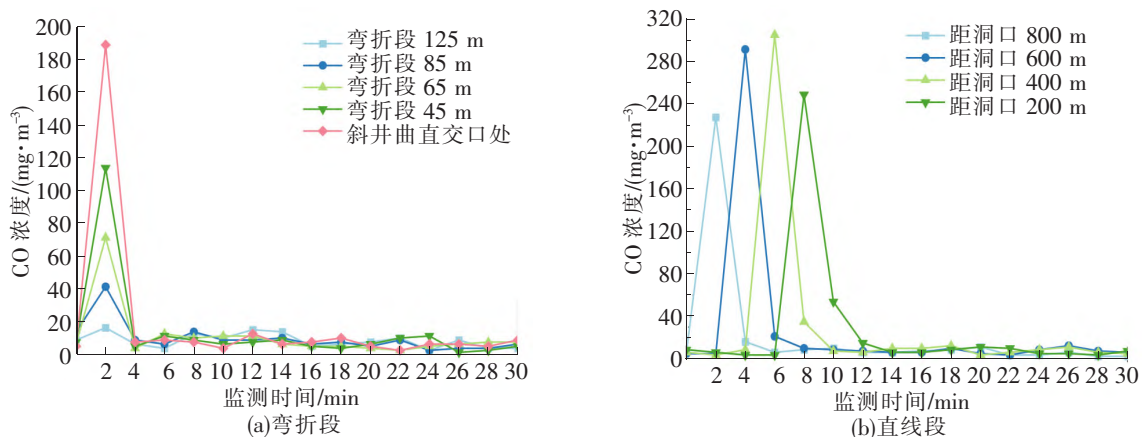


图 6 爆破后不同断面 CO 浓度随时间变化曲线

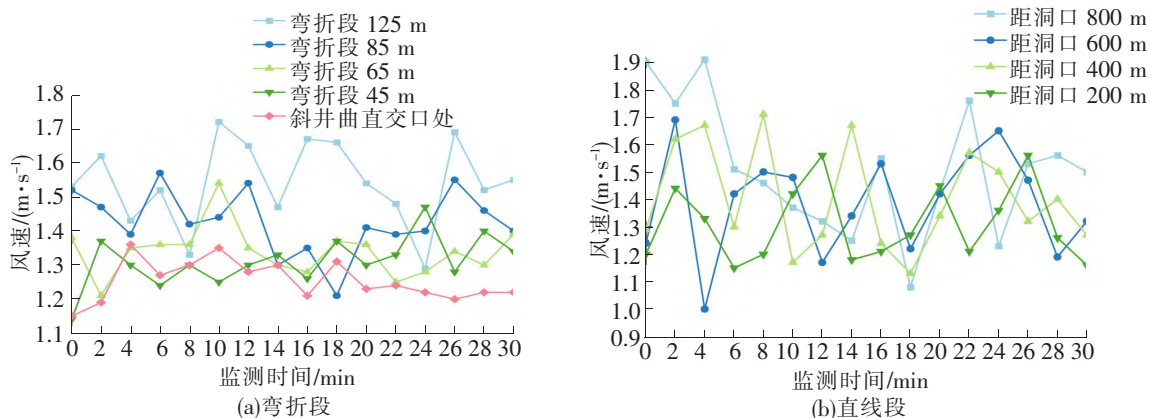


图 7 爆破后不同断面风速随时间变化曲线

由图 6(a)可以看出,随着风机启动,各断面 CO 浓度先后出现先增后缓慢降低的变幅,浓度峰值随距离增加不断降低;部分断面浓度有局部回升的趋势,可能是监测时有内燃机驶过导致实测数据偏差。弯折段不同断面的 CO 浓度峰值均出现在 2 min,段内峰值为 190 mg/m^3 ;随着通风的持续进行,在通风 4 min 时弯折段内的 CO 浓度已稳定在较低水平,可进行安全施工。

由图 6(b)可以看出,通风 2 min 时,CO 已运至直线段,在 2~12 min 时,直线段各断面 CO 浓度升至峰值后又迅速下降,最终稳定在 30 mg/m^3 以下;同时,图 6 表明通风至 14 min 时,全段 CO 浓度稳定在 12.5 mg/m^3 以下,通风排污基本完成。

由图 7 可以看出,弯折段 125、85 m 处风速分别在 1.54、1.42 m/s 上下波动,基本处于稳定趋势;随着时间的推移,在弯折段 65、45 m 处的风速逐渐降低,分别在 1.34、1.31 m/s 上下波动;接口处的回风风速波动较大,在 16 min 之前处于下降趋势,在 16~20 min 呈现上升趋势,可能是弯折段运渣车辆经过,导致偏差,在 20~30 min 呈缓慢下降又上升趋势,整体风速以 1.23 m/s 为基础呈小幅度波动,气流相对稳定。可以看出,风流流经弯折圆弧段时,断面风速相对稳定,表明顺接弯折圆弧段对通风排污无明显阻泄作用;进入直线段后,由于净空断面的缩减,各断面风速出现明显上升,但由于路径突变,受风流对壁面的冲击作用,在小范围形成涡流,使得污染物局部淤积,也导致 800 m 断面风速波幅较大,易使该区域气流进入无序阶段;600 m 后的 3 个断面波幅不大,均以某一均值线为基础呈现出不同程度的上下波动趋势,利于污染物排出。

3 污染物运移特性计算分析

3.1 计算模型建立及网格划分

动态模拟梁王山隧道弯折斜井施工通风阶段,断面详细尺寸见图 8,采用 SCDM 建立全尺寸隧道三维模型,弯折斜井长 930 m(其中直线段 805 m、曲折段 125 m),具体模型如图 9 所示。

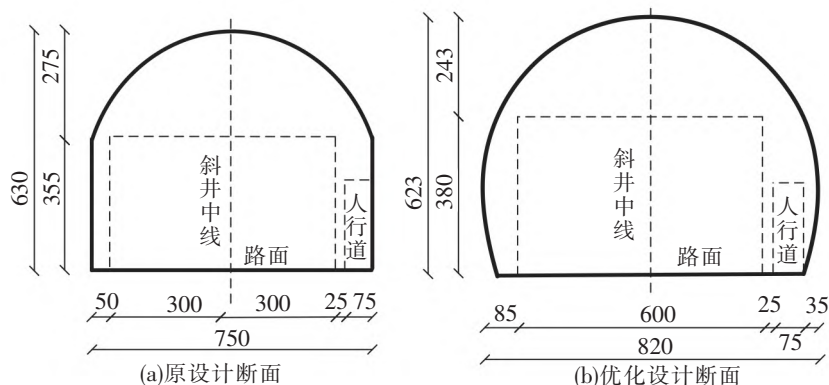


图 8 弯折斜井断面尺寸(单位:cm)

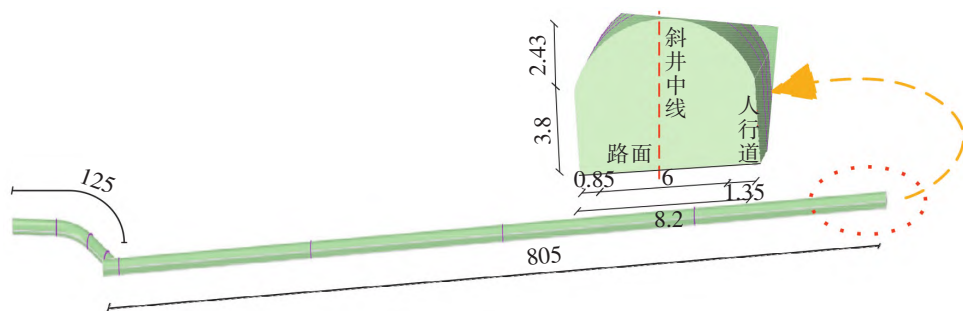


图9 弯折斜井三维计算模型(单位:m)

对三维计算模型进行网格划分,考虑隧道斜井弯折位置相对复杂,采用混合网格,隧道斜井整体区段采用六面体结构化网格,各连通部位采用四面体非结构化网格划分,对风管出口面采取局部加密网格,整体网格雅可比控制在0.6以上,具体网格划分情况如图10所示。

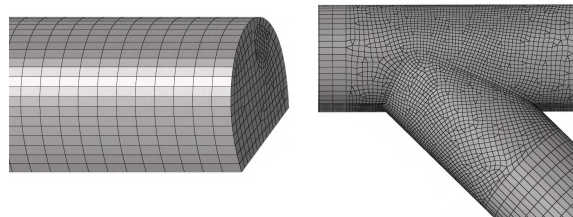


图10 网格划分示意图

3.2 求解器及边界条件设置

将风管出口作为进口边界并设为速度入口,隧道洞口作为出口边界并设为压力出口,垂直于壁面的压力梯度设置为0。详细边界条件及部分数值参数取值见表1。

表1 数值模拟边界条件及初始条件设定

参数名称	边界条件	参数取值	备注	参数名称	边界条件	参数取值	备注
隧道内壁	WALL	—	—	风管出风口风速	Velocity-inlet	23.38 m/s	理论计算
隧道掌子面	WALL	—	—	炮烟抛掷距离	—	23 m	$L_p = 15 + \frac{G}{5}$
风管壁面	WALL	—	—	初始CO浓度	—	1 995 mg/m ³	$C = \frac{25G}{(75 + G)A}$
隧道出口	Outlet	—	—				

3.3 模型验证

为验证模型的正确性,对比数值模拟与现场实测断面风速数据。根据上述所选断面现场监测30 min内的平均风速,并提取数值模拟风场稳定后沿斜井中心线上风速均值,具体如图11所示。对比曲线变化可知:①实际监测时受到运输车、监测选点、仪器误差等外部因素影响,使得现场监测结果小于数值模拟;②数值计算将流场视为理想状态,且壁面粗糙度、压强等计算参数与实际存在差异,也导致理论计算结果偏高;③总的来看,数值模拟与现场检测的最大误差为16.54%,但曲线变化及走势大体相似,表明该计算模型可用于进一步深入分析。

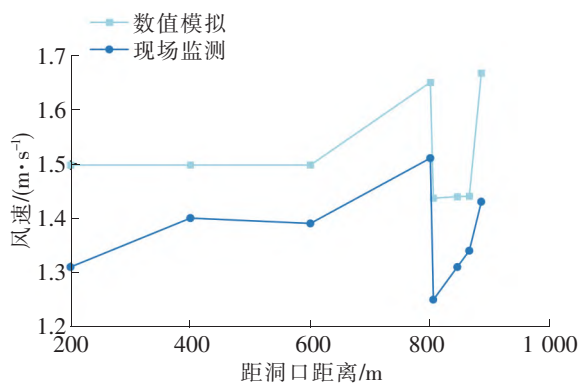


图11 现场监测风速值与数值模拟风速值对比

3.4 空气流动及环境模拟分析

3.4.1 风场分布

隧道爆破后,启动排污风机,新风由洞外轴流风机经由风管推送至施工面,爆破粉尘、CO等污染物随风流向洞外排出,风流作为污染物迁移扩散的动力,其分布及轨迹对污染物运移起着至关重要的作用。选取施工斜井范围内通风稳定后风场进行分析,计算结果如图12所示。

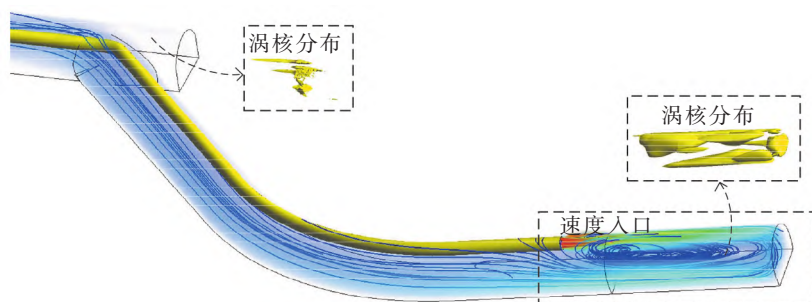


图 12 风流场计算结果

由图 12 可知,随着风机启动,风流以 23.38 m/s 的速度由风管出口向掌子面方向以束状形态流动,过程中有明显的附壁射流现象产生,且贴壁面积随距离增加不断增大;随后,风流在克服空气阻力后运行至作业面对污染物稀释,经掌子面阻挡,风流整体贴壁向掌子面侧壁发散,经壁面阻挡后向内侧回弹一段距离,随后逐步向外扩散,形成回风直至充满整个隧道流域;在掌子面附近回风与正向气流的相互作用,在距作业面 1 m 处形成范围约 40 m 的涡流;随着风束的不断推移,当风流运至斜井曲直交口时,由于排污路径的突变,风流为维持原运动路径再次撞向壁面,风流发生分流:大部分风束发生小角度偏转后向洞口方向移动,少部分风束发生较大角度偏转,向斜井原施工线路的超挖区域中运移,此部分风束撞向壁面后反射,最后与正向气流碰撞形成涡流,从而使得污染物局部聚集或仅在局部范围内循环流动,无法向外排出。

以风管中心水平线为参照,在掌子面左中右各选一点提取压强值,对比分析通风初期与稳定后的施工面风压变化情况,如图 13 所示。可以看出,在通风初期,掌子面整体受压差距不大,左右侧压强差约为 4 Pa ,此时流场尚未稳定,未形成明显涡流;随着通风持续进行,两侧压差逐渐增大至 20 Pa ,整体呈两侧大、中间小的分布梯度,最终在作业面附近形成涡流。因此,为减小涡流的作用区域,应合理缩减掌子面两侧压差以提升通风效率。

3.4.2 CO 扩散规律

为探究施工通风系统对有害气体的排除效果及污染物扩散规律,以 CO 为研究对象,以通风时长为变量,分析通风 30 min 内关键断面的污染物扩散情况。具体如图 14 所示。

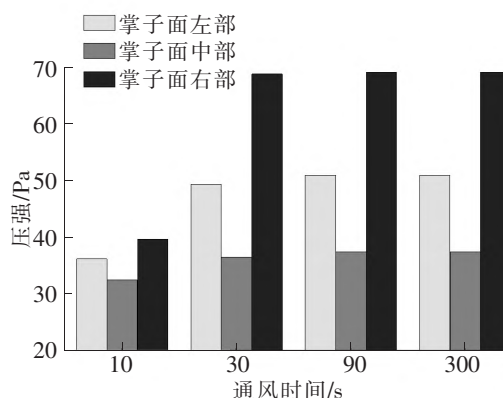


图 13 不同通风期作业面风压对比图

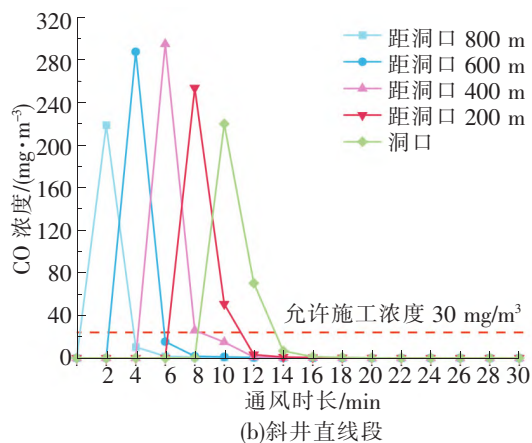
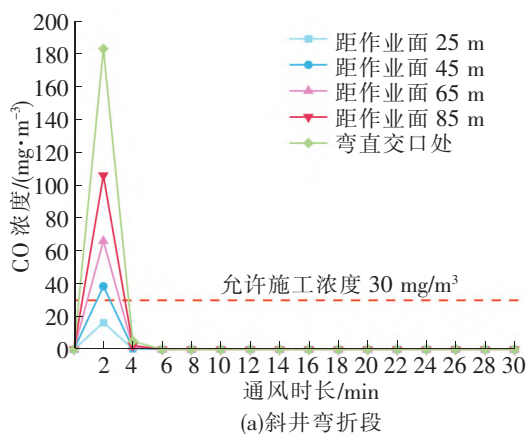


图 14 隧道爆破时不同断面 CO 浓度随时间变化曲线图

从图 14 可以看出,随着爆破结束进行通风,混有 CO 的污浊风扩散区域逐渐拉大,各断面 CO 浓度随时间推移以斜率不断下降的势态不断降低,最终趋于平缓,峰值不断减小,最终在风流的持续推移下运至洞外。由图 14(a)可知,在通风 2 min 时含有 CO 的污浊风已被推至监测区域,斜井弯折段各断面 CO 浓度均升至峰值,最高为 184 mg/m^3 ,4 min 时距作业面 25 m 处的 CO 浓度已被稀释至安全阈值,通风 6 min 时,斜井弯折段全线 CO 浓度均降至 30 mg/m^3 以下,可安全开展作业面施工。从图 14(b)可知,通风 2 min 时,CO 已扩散至直线段,在通风 2~10 min 时,直线段各断面 CO 浓度先后抵达峰值,并随着通风的持续进行,在 14 min 时全段 CO 均稳定在 30 mg/m^3 以下,满足相关行业允许施工的浓度值。

综上可知,在风机的辅助下,CO 不断被新鲜风稀释,CO 峰值随距离不断减小到最终消失,表明通风时流场内 CO 的整体浓度以不断减小的势态缓慢下降;同时,可以看出,在现有通风系统下排污 14 min 后基本排污完成,全段 CO 浓度均满足作业要求。

3.4.3 弯折段压降分析

为分析不同弯折路径对通风排污的影响,以作业面为起点,每间隔 20 m 取一个监测断面,计算各断面水平高度 1.6 m (人类平均呼吸高度)的平均风压,如图 15 所示。

由图 15 可以看出,作业面 1 m 内风压较大,随着风流向外运移,风压断崖式下降,在掌子面 20~40 m 间形成负压区,并在 40 m 处逐渐摆脱影响,风压缓慢回升,最后趋于平缓。产生此现象的原因为:作业面附近部分风流受正向风束的卷吸作用回流至壁面形成涡流,形成负压区阻碍回风向外运移,在扩散至一定距离后,回风逐渐摆脱涡流区的作用并趋于稳定;圆弧路径处的风压小幅度波动,并未出现风压骤变现象,流经交叉口时,受局部阻力影响风压出现明显降幅;最后在斜井直线段流动时,风压随距离线性减小,直至降为 0 Pa。

综上,弯折圆弧路径处风压下降缓慢,对通风排污无明显阻泄作用;而交口处因路径骤变,风压降幅明显,通风效率受损显著。

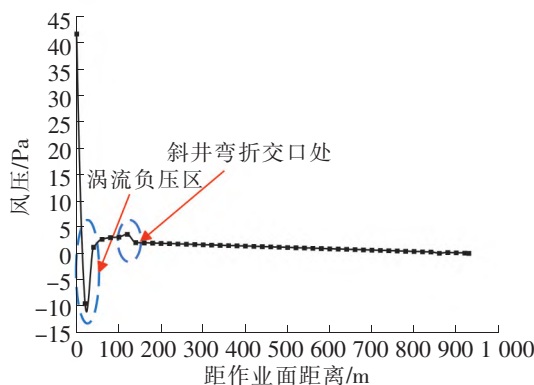


图 15 稳定流场下的沿程压降曲线图

4 结论

(1) 风流场稳定性受隧道纵向回风速率影响,风速在断面均值范围内波动幅度越小,风流场越稳定;风流场波动幅度越大,易导致流场内气流进入无序阶段。

(2) 在通风初期,掌子面右侧受风压相对较小,两侧压差较小,未形成明显涡流;在流场稳定后,作业面两侧压差增大,整体呈两侧大、中间小的压强分布梯度,并在作业面处形成大范围涡流。

(3) 顺接圆弧通风路径的断面风速相对稳定,未出现风压骤降现象,对通风效率无明显影响;骤变通风路径处的风流经壁面碰撞作用风流出现多向分流,导致局部形成涡流影响流场,使得此区域风速波动大、风压陡降,CO 在路径突变处局部淤积,对通风排污的影响显著。

参 考 文 献

- [1] 焦红卫. 郑万高铁巫山特长隧道长风室接力通风污染物运移特征研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(7): 1127-1138.
- [2] 王闯, 刘石磊, 邵建霖, 等. 京张高铁正盘台隧道施工通风方案研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 153-158.
- [3] 姚云晓, 马相峰, 王立川, 等. 铁路隧道双联式井底布置研究与应用[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(2): 131-137.
- [4] 王静华, 陈强, 田万良. 长斜井特长隧道施工通风设计研究与应用[J]. 公路, 2024, 69(1): 416-424.
- [5] 刘石磊, 童谣, 王树刚. 隧道施工通风系统中竖井风量及影响因素分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊 1): 104-111.
- [6] TAO Y, HU H, ZHANG H, et al. A new ventilation system for extra-long railway tunnel construction by using the air cabin re-

- lay: A case study on optimization of air cabin parameters length[J/OL]. Journal of Building Engineering, 2022, 45:103480 [2024-09-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103480>.
- [7] 裴真真, 王亚楠. 长斜井双洞隧道斜井断面与通风管尺寸经济对比研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊2): 213-219.
- [8] 杨立新, 周振建. 高原铁路某隧道斜井工区施工通风方式研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(11): 1930-1941.
- [9] 童奕飞. 倾角组合式斜井施工阶段力学效应及通风技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2022.
- [10] 高磊. 高寒地区特长公路隧道单斜井施工区域 CO 分布研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
- [11] 石拓. 高海拔铁路长大隧道斜井与竖井接力通风技术探讨[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(1): 105-107.

Study on the Characteristics of Pollutant Transport in Construction Ventilation of Curved Inclined Shaft of Liangwangshan Road Tunnel

YANG Jian

(China Railway 15th Bureau Group No.4 Engineering Co. Ltd., Xinzheng 451199, China)

Abstract: In order to solve the problem of slow transport of pollutants in the work area during tunnel construction ventilation, resulting in poor ventilation efficiency, this paper relied on the Fuyi Expressway Liangwangshan Tunnel Project, and adopted on-site monitoring and numerical simulation methods to investigate the stability of the wind flow field of the curved inclined shaft and the mechanism of vertical attenuation, as well as the characteristics of the pollutant spatial and temporal distributions under the blasting of tunnels. The coupling effect of the wind flow field and the mechanism of the differential pressure, and the dynamic transport law of pollutants during the construction period was revealed. The results show that in the steady-state flow field, the working surface exhibits a pressure distribution gradient with low pressure in the middle and high pressure on both sides, ultimately forming vortex, affecting the efficiency of sewage; Vortex impact area and the size of the pressure difference between the two sides are positively correlated; The wind speed and pressure amplitude of the bending arc path are small, basically has little effect on the ventilation and sewage; At the sudden bend path, the wind flow is diverted in multiple directions due to the collision of the wall, and part of the wind flow back to the formation of a small range of vortex, resulting in the local accumulation of CO, accompanied by large amplitude of wind speed and sudden drop of wind pressure, which has significant impact on construction ventilation.

Key words: highway tunnel; bending inclined shaft work area; construction ventilation; pollutant; on-site monitoring