

中文引用格式:吴宗之,周玉竹,魏丁一,等. 基于气-固两相流的深埋隧道烟尘运移特征[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 213-219.

英文引用格式:WU Zongzhi, ZHOU Yuzhu, WEI Dingyi, et al. Characterization of smoke and dust transport in deep buried tunnel based on gas-solid two-phase flow[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 213-219.

基于气-固两相流的深埋隧道烟尘运移特征*

吴宗之^{1,2}研究员, 周玉竹^{2,3}正高级工程师, 魏丁一^{**4}讲师,
曹伟杰⁴, 马文谨⁴, 余杰²

(1 中国职业安全健康协会, 北京 100029; 2 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
3 四川铸创安全科技有限公司, 四川 成都 610040; 4 河南工程学院 资源与安全工程学院,
河南 郑州 451191)

中图分类号: X964 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.1590

基金项目: 国家卫生健康委粉尘危害工程防护重点实验室开放课题(KLECDH20230201); 河南省高等学校重点科研项目(23B440005); 河南工程学院博士培育基金资助(D2022021)。

【摘要】 为提高深埋隧道施工机械的耐用性及改善工人作业环境, 基于气-固两相流理论, 选取CO和粉尘作为主要研究对象, 利用Fluent软件建立深埋隧道物理模型, 通过模拟分析深埋隧道中不同围岩温度及风筒出口速度对烟尘运移过程的影响。结果表明: 爆破后, CO在抛掷区内均匀分布, 随通风时间的增加, CO的运移呈现为平移和扩散2种方式, CO以团状的形式向隧道外排出, 且隧道壁处的CO运移速度大于隧道中心的运移速度; 爆破瞬间, 粉尘大量聚集在工作面附近, 随通风时间的增加, 粉尘不断向隧道外排出; 其中, 围岩温度对CO的运移有一定影响, 且围岩温度越高, CO的运移速度越快, 但围岩温度对粉尘运移的影响相对较小; 风筒出口速度对CO及粉尘的运移均有较大影响, 且风筒出口速度越大, CO及粉尘的运移速度越快, 在现场应用中要结合实际条件和经济预算情况合理选择相关设备。

【关键词】 气-固两相流; 深埋隧道; 烟尘运移; 风筒出口速度; 围岩温度

Characterization of smoke and dust transport in deep buried tunnel based on gas-solid two-phase flow

WU Zongzhi^{1,2}, ZHOU Yuzhu^{2,3}, WEI Dingyi⁴, CAO Weijie⁴, MA Wenjin⁴, YU Jie²

(1 China Occupational Safety and Health Association, Beijing 100029, China; 2 School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3 Sichuan Zhuchuang Safety Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610040, China; 4 School of Resource and Safety Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou Henan 451191, China)

Abstract: In order to improve the durability of the construction machine and the working environment in deep buried tunnels, based on the theory of gas-solid two-phase flow, CO and dust were selected as the

* 文章编号: 1003-3033(2024)11-0213-07; 收稿日期: 2024-06-11; 修稿日期: 2024-09-12

** 通信作者: 魏丁一(1991—), 男, 河南禹州人, 博士, 讲师, 主要从事职业健康安全方面的研究。E-mail: weidy103@126.com。

main objects of study, and a physical model of deep buried tunnels was established by Fluent software. The effects of different surrounding rock temperatures and the outlet speed of the wind pipe on the transport process of soot in deep tunnels were investigated through simulation. The results show that after blasting, CO is uniformly distributed in the throwing area. With the increase of ventilation time, the CO transport shows two modes of translation and diffusion. CO is discharged out of the tunnel in the form of a mass, and the CO transport speed at the tunnel wall is larger than that at the center of the tunnel. At the moment of blasting, a large amount of dust gathers near the working face, and with the increase of ventilation time, the dust is continuously discharged out of the tunnel. Among them, the temperature of the surrounding rock has a certain effect on the transportation of CO. The higher the temperature of the surrounding rock, the faster the transportation of CO. However, the effect of the surrounding rock temperature on the transportation of dust is relatively small. The outlet speed of the wind pipe has a greater impact on the transportation of CO and dust. The greater the outlet speed of the wind pipe, the faster the transportation of CO and dust. The field application should be combined with the actual conditions and economic budget to select the relevant equipment.

Keywords: gas-solid two-phase flow; deep buried tunnels; smoke and dust transport; outlet speed of wind pipe; surrounding rock temperature

0 引言

随着国家经济的发展,我国西部大批基础设施工程开始建设。西南地区受欧亚板块和印度洋板块挤压影响,地热活动异常显著,使得众多深埋隧道面临严峻的高温挑战。隧道施工中,各工序会产生大量粉尘,长期吸入会导致肺组织发生弥漫性的纤维组织增生,有可能引发尘肺病。此外,爆破过程中产生大量如 CO 等有毒气体,同样对人员健康构成严重威胁,必须采取严格的防尘和有害气体防控措施,才能确保施工人员的健康和安全。

诸多学者对此开展了研究,如张汉中等^[1]针对抓斗卸料中散体物料下落引发的粉尘扩散问题,开展气-固两相流场研究,揭示其扩散机制并寻求优化措施;陆国琛等^[2]运用气-固两相流理论计算气井井筒临界携垢流量;张玥等^[3]应用计算流体力学研究了煤矸石粒径和入口气体速度对炉膛内气-固两相流动特性的影响,获得了颗粒速度和体积分数的详细分布;国内其他学者通过模拟分析工作面的粉尘运移特征,研究隧道壁面粗糙度、通风等对施工烟尘扩散的影响,指出我国非煤矿山粉尘源头防治主要技术^[4];王冕^[5]基于气-固两相流理论构建相关试验模型,利用掘进巷道相似模拟试验平台和 Fluent 软件研究风流场及粉尘运移特征;SAGAR^[6]、WOUTER^[7]、BECK^[8]等研究了风流场中粉尘运动时彼此之间的关系;乔力伟等^[9]研究了施工隧道中 SiO₂ 粉尘质量浓度变化及扩散特征,合理设计通风

系统参数。现有文献大多采用理论分析方法,研究矿山烟尘的产生及其运移特征,而对深埋隧道爆破烟尘运移特征的研究还较为鲜见。

鉴于此,笔者拟基于气-固两相流理论,构建模型分析高地温隧道 CO 和粉尘的运移特征,以期有效改善职工作业环境、降低尘肺发生概率。

1 深埋隧道模型建立与假设

1.1 深埋隧道物理模型

按照某深埋隧道尺寸建立模型,隧道采用压入式通风,长度为 120 m,风筒出口距工作面 20 m,风筒距地面 4 m 且半径为 0.4 m,风筒出口位于隧道横截面右上方,隧道围岩级别为Ⅲ级。

1.2 深埋隧道物理模型简化与假设

隧道内 CO 等分布趋势与影响烟尘运移的各种因素有关,且隧道内存在大量施工器械,如果考虑各种因素,烟尘运移模拟将非常复杂。因此,基于气-固两相流理论,对模型作出如下简化与假设^[10-11]:

1) 烟尘运移模拟期间隧道内空气流体为三维黏性不可压缩气流。

2) 烟尘运移期间的流场为恒温场。

3) 烟尘运移期间忽略自然风等外部因素对空气流场的潜在干扰,忽略隧道内部人员活动及器械运作产生的热量,假设隧道壁面的粗糙度为固定的统一值。

4) 烟尘运移期间忽略隧道内的有害气体 CO₂、

H₂S 等,主要考虑 CO,并假设通过计算的抛掷距离范围内,CO 在隧道内部均匀分布。

5) 围岩与周围空气充分接触,假设其与空气温度相同。

2 模拟边界条件

工作面附近爆破时会产生 CO,其迅速扩散至炮烟抛掷范围,模型条件及参数设置见表 1。

表 1 计算模型设定

Table 1 Calculation model setting

参数	设定
求解器	压力基
湍流模型	k-ε 双方程模型
能量方程	打开
离散相模型	打开
压力速度耦合	简单
梯度方案	基于最小二乘法
瞬态离散方案	一阶隐式
炮烟抛掷范围/(L·m ⁻¹)	60
CO 初始体积分数/%	0.125
与连续相的交互	打开
离散相模型迭代间隔	10
跟踪最大步数	9 000
非定常跟踪	打开
按流动时间步跟踪	打开
注射类型	打开
颗粒材料	大理岩
粒径分布	R-R 分布
离散随机轨道模型	打开
使用曲线法方向注入	打开
总流速/(kg·s ⁻¹)	3

3 深埋隧道烟尘运移特征分析

3.1 CO 运移特征

隧道爆破后会产生 CO,CO 迅速充满炮烟抛掷区,选取 Y=0 m 平面 CO 体积分数进行研究,随着通风的进行,CO 体积分数逐渐降低且随气流排出隧道。围岩温度 37 °C 时,风筒出口速度为 10 m/s 时,不同时刻 Y=0 m 的 CO 体积分数云图如图 1 所示。

从图 1a 可以看出,通风 10 s 时工作面处 CO 体积分数迅速减少,且 CO 气体的运动展现出明显的整体性流动趋势,此时工作面处 CO 体积分数远高于炮烟抛掷区外的 CO 体积分数。从图 1b 可以看

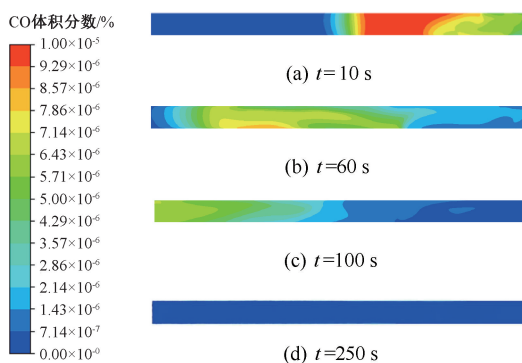


图 1 围岩温度 37 °C,风筒出口速度 10 m/s 时 CO 体积分数云图

Fig. 1 Cloud map of CO volume fraction at surrounding rock temperature of 37 °C and outlet speed of wind pipe of 10 m/s

出,通风 60 s 时工作面处的 CO 体积分数在风流作用下降至安全阈值之下,但隧道中部直至入口的 CO 体积分数仍维持在安全浓度限制之上,此时工作面区域的 CO 体积分数部分低于炮烟抛掷区外的 CO 体积分数。从图 1c 可以看出,通风 100 s 时除隧道出口附近 CO 体积分数高于安全标准,其余区域均处于安全范围,此时炮烟抛掷区域 CO 的浓度全部低于炮烟抛掷区外 CO 体积分数。从图 1d 可以看出,通风 250 s 时隧道内 CO 已全部排出隧道。

围岩温度 37 °C 时,风筒出口速度为 15 m/s 时,不同时刻 Y=0 m 的 CO 体积分数如图 2 所示。随着通风的进行,CO 体积分数会降低且随气流排出隧道。

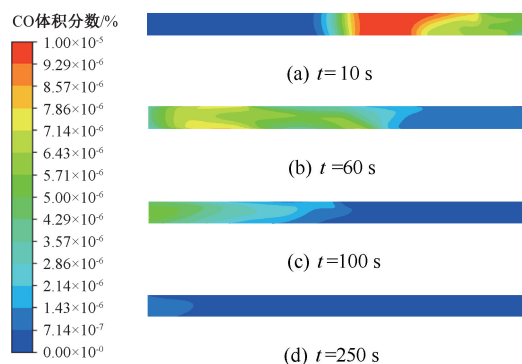


图 2 围岩温度 37 °C,风筒出口速度 15 m/s 时 CO 体积分数云图

Fig. 2 Cloud map of CO volume fraction at surrounding rock temperature of 37 °C and outlet speed of wind pipe of 15 m/s

从图 2a 可以看出,通风 10 s 时工作面处 CO 体积分数变化与风速为 10 m/s 时整体趋势相同,工作

面处 CO 体积分数均降低,风速为 15 m/s 时工作面处 CO 扩散范围更大,此时工作面处 CO 体积分数也远高于炮烟抛掷区外的浓度。从图 2b 可以看出,通风 60 s 时工作面处的 CO 体积分数下降至安全范围,隧道中部 CO 体积分数小于风速为 10 m/s 时隧道中部的 CO 体积分数,隧道中部直至入口区域的 CO 体积分数仍超过安全标准,此时工作面区域的 CO 全部低于炮烟抛掷区外的 CO 体积分数。从图 2c 可以看出,通风 100 s 时炮烟抛掷区域 CO 体积分数为 0,除隧道出口,其余区域 CO 体积分数均处于安全范围。从图 2d 可以看出,通风 150 s 时隧道内 CO 几乎全部排出隧道,隧道内 CO 体积分数全部达到安全标准。综上,风速为 15 m/s 时,隧道内 CO 随风流加速排出隧道,且 CO 扩散范围更大,隧道内 CO 体积分数能更快地降低到安全范围。

围岩温度 45 °C,风速为 10 m/s 时隧道内 CO 体积分数分布如图 3 所示。

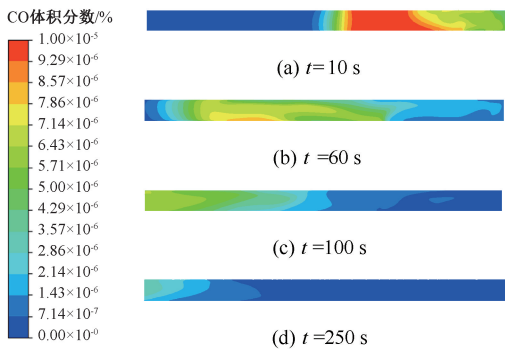


图 3 围岩温度 45 °C,风筒出口速度 10 m/s 时 CO 体积分数云图

Fig.3 Cloud map of CO volume fraction at surrounding rock temperature of 45 °C and outlet speed of wind pipe of 10 m/s

从图 3a 可以看出,通风 10 s 时工作面处 CO 体积分数变化与围岩温度为 37 °C 时整体趋势相同,相比于工作面处 CO 体积分数,风筒出口处 CO 体积分数更低。从图 3b 可以看出,通风 60 s 时工作面处的 CO 体积分数降至安全范围,隧道中部 CO 体积分数仍不符合安全标准,隧道中部至入口区域的 CO 体积分数仍超过安全标准,此时工作面区域的 CO 体积分数全部低于炮烟抛掷区外的 CO 体积分数。从图 3c 可以看出,通风 100 s 时炮烟抛掷区域 CO 体积分数为 0,除隧道出口,其余区域 CO 体积分数均处于安全范围。从图 3d 可以看出,通风 150 s 时隧道内 CO 几乎全部排出隧道,隧道内 CO 体积分数全部达到安全标准。综上,围岩温度为 45 °C 时,隧道

内 CO 随风流排出隧道的速度较 37 °C 时快,CO 扩散范围略微变大,CO 运移的整体趋势与围岩温度为 37 °C 时相似。

围岩温度 45 °C,风速为 15 m/s 时隧道内 CO 体积分数分布如图 4 所示。随着通风的进行,CO 体积分数降低更快且更快排出隧道。

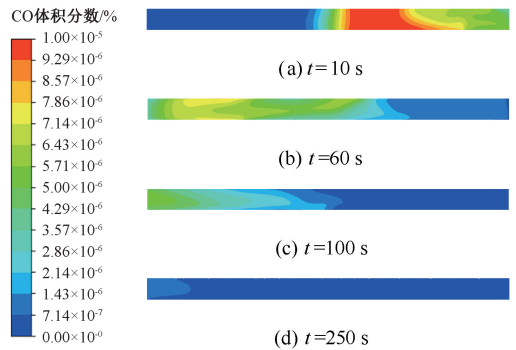


图 4 围岩温度 45 °C,风筒出口速度 15 m/s 时 CO 体积分数云图

Fig.4 Cloud map of CO volume fraction at surrounding rock temperature of 45 °C and outlet speed of wind pipe of 15 m/s

从图 4a 可以看出,通风 10 s 时风筒出口附近 CO 体积分数更低,工作面处 CO 体积分数达到最高值,CO 扩散范围较小,隧道入口区域 CO 体积分数为 0。从图 4b 可以看出,通风 60 s 时 CO 扩散范围更大,布满整个隧道,工作面处 CO 体积分数下降至安全范围,隧道中部及隧道入口区域的 CO 体积分数仍然较高,此时工作面区域的 CO 全部低于炮烟抛掷区外的 CO 体积分数。从图 4c 可以看出,通风 100 s 时炮烟抛掷区域 CO 体积分数为 0,隧道入口处 CO 体积分数最高。从图 4d 可以看出,通风 150 s 时隧道内 CO 体积分数几乎为 0,隧道内 CO 体积分数全部达到安全标准。结合图 2 和图 3,在风速相同围岩温度不同时,CO 体积分数变化趋势几乎一致,在风速不同围岩温度相同时,风速越大 CO 扩散范围更大,排出隧道所需时间更短。

3.2 粉尘运移特征

选取围岩温度分别为 37、45 °C,风筒出口速度分别为 10、15 m/s,不同组合条件下粉尘运移云图如图 5—图 8 所示。

从图 5 可以看出,爆破后粉尘大量聚集在工作面附近,随通风时间的增加,粉尘在风流作用下不断向隧道外排出。由图 5a 可知:通风 40 s 时粉尘依然大量聚集在炮烟区域,贴近隧道上壁的粉尘运移速度更快,呈团状向隧道外排出。由图 5b 可知:通风

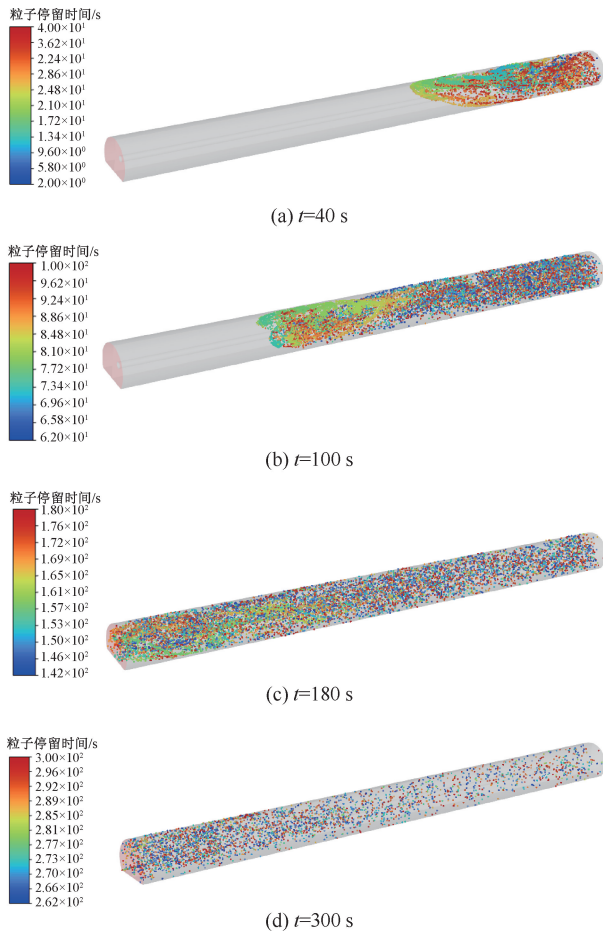


图 5 围岩温度 37 °C,风筒出口速度 10 m/s 时
粉尘运移云图

Fig. 5 Cloud map of dust transport at outlet speed of
wind pipe of 10 m/s and surrounding rock
temperature of 37 °C

100 s 时,工作面处粉尘质量浓度降低,部分粉尘已运动出炮烟范围,粉尘颗粒的分散度增加,贴近隧道壁的粉尘运移速度更快。由图 5c 可知:在通风 180 s 时,靠近隧道入口的粉尘质量浓度大于工作面附近粉尘质量浓度,此时粉尘扩散范围更广,悬浮时间较长。由图 5d 可知:通风 300 s 时,大部分粉尘已排出隧道,工作面附近粉尘质量浓度明显小于隧道入口附近粉尘质量浓度。

由图 6a 可知:通风 40 s 时粉尘依然大量聚集在炮烟区域,对比于风速为 10 m/s 时,此时粉尘扩散范围更广,且贴近隧道上壁的粉尘运移范围更大,呈团状向隧道入口移动。由图 6b 可知:通风 100 s 时,工作面处粉尘质量浓度降低,贴近隧道壁的粉尘运移速度更快,对比风速为 10 m/s,明显看出粉尘扩散范围变大。由图 6c 可知:通风 180 s 时靠近隧道入口的粉尘质量浓度大于工作面附近粉尘质量浓度,

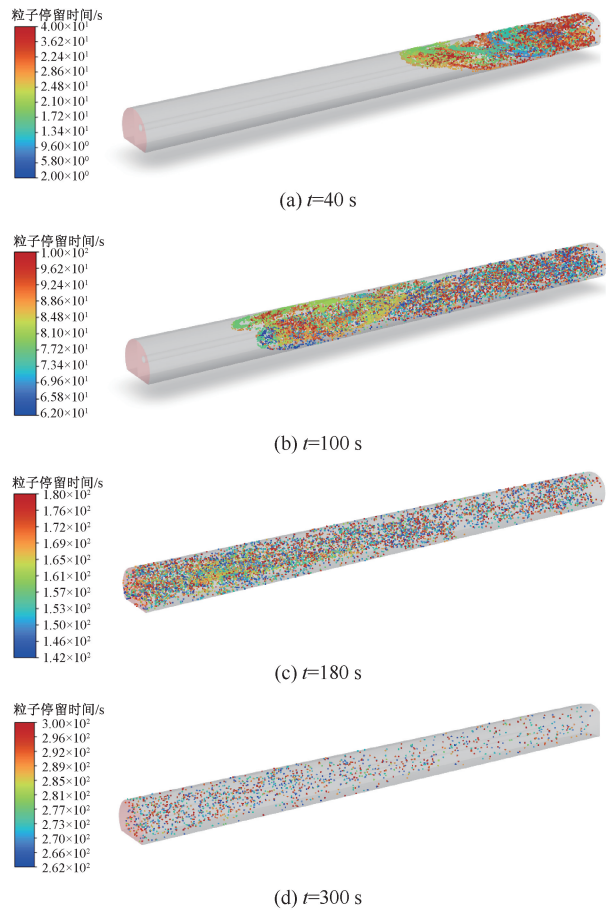


图 6 围岩温度 37 °C,风筒出口速度 15 m/s 时
粉尘运移云图

Fig. 6 Cloud map of dust transport at outlet speed of
wind pipe of 15 m/s and surrounding rock
temperature of 37 °C

对比风速为 10 m/s,此时隧道整体粉尘质量浓度变小,工作面附近粉尘明显减少。由图 6d 可知:通风 300 s 时,对比风速为 10 m/s,此时隧道整体粉尘质量浓度明显下降,工作面处粉尘质量浓度几乎为 0,隧道其余部分粉尘扩散范围更广,绝大部分粉尘已经排出隧道,仅少量粉尘存在于隧道入口处。综上,爆破后粉尘仍大量聚集在工作面附近,随通风时间的增加,粉尘随风流向隧道外排出。风速为 15 m/s 时,粉尘运移速度更快,隧道内粉尘扩散程度明显变大。

从图 7a 可以看出,通风 40 s 时粉尘大量聚集在工作面处,粉尘聚集程度高,靠近风筒附近的粉尘运移速度更大。从图 7b 可以看出,通风 100 s 时粉尘扩散范围变大,粉尘向隧道入口移动,靠近隧道壁的粉尘运移速度更快。从图 7c 可以看出,通风 180 s 时粉尘扩散范围变大,粉尘在风流作用下充满整个隧道,工作面附近粉尘质量浓度较低,隧道中粉尘随

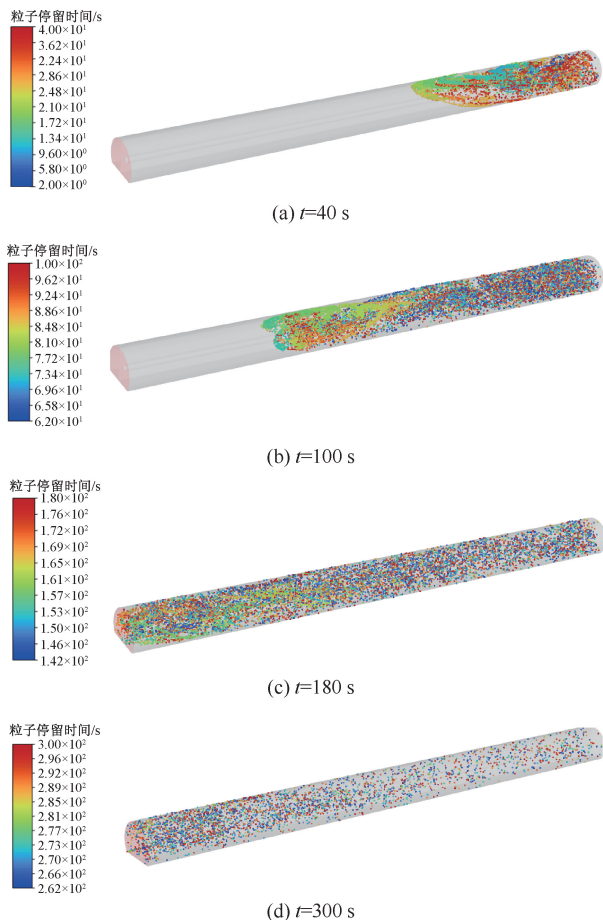


图7 围岩温度 45 °C,风筒出口速度 10 m/s 时
粉尘运移云图

Fig. 7 Cloud map of dust transport at outlet speed of
wind pipe of 10 m/s and surrounding rock
temperature of 45 °C

风流呈团状向隧道入口移动。从图 7d 可以看出,通风 300 s 时,粉尘分散范围更广,工作面及炮烟区域粉尘质量浓度极低,大部分粉尘已经排出隧道,仅隧道入口处悬浮部分粉尘,此时工作面附近粉尘质量浓度明显小于隧道入口处。综上,从整体变化趋势可以看出,在围岩温度为 45 和 37 °C 时,粉尘运动趋势基本一致。

从图 8a 可以看出,通风 40 s 时粉尘依然大量聚集在工作面处,部分粉尘呈团状向隧道入口移动。从图 8b 可以看出,通风 100 s 时,粉尘不断向隧道入口运动至隧道中部,贴近隧道壁的粉尘运移速度更快,粉尘扩散范围变大。从图 8c 可以看出,通风 180 s 时工作面附近粉尘质量浓度低于隧道入口附近粉尘质量浓度。从图 8d 可以看出,通风 300 s 时,隧道内大部分粉尘已经排出隧道,工作面附近粉尘质量浓度几乎为 0,仅剩少量粉尘悬浮在隧道入口

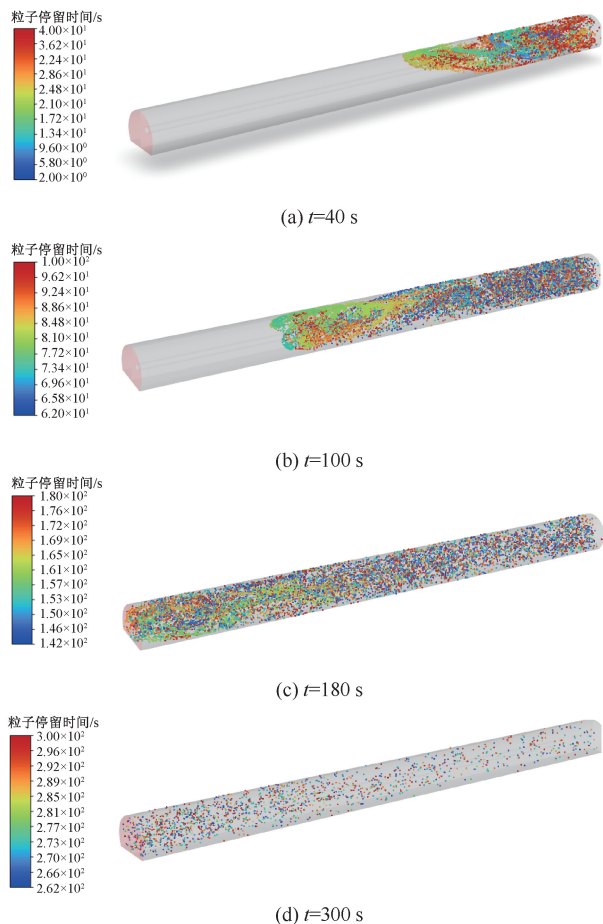


图8 围岩温度 45 °C,风筒出口速度 15 m/s 时
粉尘运移图

Fig. 8 Cloud map of dust transport at outlet speed of
wind pipe of 15 m/s and surrounding rock
temperature of 45 °C

处。综上,结合图 6 在围岩温度不同但风速相同时,粉尘运动轨迹几乎相同,温度对粉尘的运移影响不大。结合图 7,在围岩温度相同但风速不同时,粉尘扩散范围更广,工作面处粉尘质量浓度降低更快,风速越大,粉尘排出隧道所需时间越短。

4 结论

1) 气-固两相流条件下,CO 在抛掷区内均匀分布,CO 运移随通风时间的增加呈平移和扩散 2 种运移方式,CO 以团状的形式涌出隧道,且隧道壁处的 CO 运移速度大于隧道中心的运移速度。

2) 围岩温度对 CO 的运移有一定影响,围岩温度越高,CO 运移速度越快,但对粉尘运移影响较小。

3) 风筒出口速度对 CO 及粉尘运移影响较大,速度越快,CO 及粉尘运移速度越快,更利于在隧道开展作业。

参 考 文 献

- [1] 张汉中, 孟文俊, 王贝贝. 基于 CFD-DEM 耦合仿真的抓斗卸料气固两相流场研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(4): 166-172.
ZHANG Hanzhong, MENG Wenjun, WANG Beibei. Research on gas-solid two-phase flow field in grab discharge based on CFD-DEM coupling simulation[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(4): 166-172.
- [2] 陆国琛, 秦丙林, 田天, 等. 气井井筒临界携垢流量计算与分析[J]. 石油机械, 2023, 51(10): 107-112.
LU Guochen, QIN Binglin, TIAN Tian, et al. Calculation and analysis of critical scale carrying flow rate in gas wells[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(10): 107-112.
- [3] 张玥, 唐诗洋, 丁会敏, 等. 煤矸石 CFB 锅炉内气固两相流动特性模拟研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(12): 136-138, 142.
ZHANG Yue, TANG Shiyang, DING Huimin, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow characteristics in coal gangue CFB boiler[J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(12): 136-138, 142.
- [4] 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 Jie, ZHOU Haowen, WANG Wanqing, et al. Study on CO distribution and diffusion in spiral construction tunnel on plateau[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 79-87.
- [5] 王冕. 掘进巷道流场结构及粉尘沉降规律相似模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(3): 56-61.
WANG Mian. Similar simulation study on the flow field structure and the law of dust settlement of heading roadway[J]. Mining Safety Environmental Protection, 2021, 48(3): 56-61.
- [6] SAGAR P, TED Z, GARY K, et al. New insights into the wind-dust relationship in sandblasting and direct aerodynamic entrainment from wind tunnel experiments [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(4): 1776-1792.
- [7] WOUTER D, UDO H, DIETER F, et al. Wind tunnel and CFD study of dust dispersion from pesticide-treated maize seed[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 128: 27-33.
- [8] BECK W, SEAMAN E, SHAHAN R, et al. Open-air sprays for capturing and controlling airborne float coal dust on longwall faces[J]. Mining Engineering, 2018, 70(1): 42-48.
- [9] 乔力伟, 蒋葛夫. 双向掘进隧道游离 SiO₂ 粉尘扩散规律模拟与分析[J]. 环境科学研究, 2019, 32(6): 1043-1051.
QIAO Liwei, JIANG Gefu. Numerical analysis and simulation of SiO₂ dust diffusion in tunnel by inclined shaft[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(6): 1043-1051.
- [10] 王将, 袁大军, 金大龙, 等. 基于非线性滑动面假设的盾构隧道松动土压力计算模型研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 165-172.
WANG Jiang, YUAN Dajun, JIN Dalong, et al. Research on calculation model for loosening earth pressure of shield tunnel based on assumption of non-linear sliding surface[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(6): 165-172.
- [11] DU Bo, LI Yanhe, CHEN Xingming, et al. Optimization of paste backfilling material ratios for long-distance transportation[J]. Engineering Letters, 2024, 32(3): 595-600.

作者简介: 吴宗之 (1963—), 男, 安徽宿松人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事重大危险源监控、风险评估、应急管理、职业健康等方面的研究。E-mail: wuzongzhi@vip.sina.com。