

钻爆法施工过程中有害气体分布特性研究

杨玉如¹ 张峰² 李林林¹ 李磊² 耿凡¹

1 中国矿业大学 低碳能源与动力工程学院

2 中国铁路上海局集团有限公司 合肥铁路枢纽工程建设指挥部

DOI:10.32629/etd.v7i4.20253

[摘要] 在钻爆法施工过程中,隧道掌子面处往往会产生多种有害气体,这些气体不仅对施工人员的健康和安​​全构成严重危害,也影响隧道内的空气质量,还可能在特定条件下引发爆炸风险。为探究隧道掌子面处产生的CO、CH₄、H₂S等主要有害气体的协同扩散过程,以一实际铁路隧道为研究对象,建立组分输运模型开展研究。结果表明:CO、CH₄和H₂S的浓度均在隧道内呈现出上下区域扩散较快而中间区域扩散较慢的特征;有害气体的运动受涡流影响,逐步向隧道顶部扩散,风速越大效果越明显。本文的研究可为隧道内有害气体的扩散与运移规律提供理论支持。

[关键词] 隧道; 钻爆法; 有害气体; 分布特征; 组分模型

中图分类号: U45 **文献标识码:** A

The Distribution Characteristics of Harmful Gases during the Drilling and Blasting Construction Process

Yuru Yang¹ Feng Zhang² Linlin Li¹ Lei Li² Fan Geng¹

1 School of Low-Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology

2 Hefei Railway Hub Project Construction Command, China Railway Shanghai Group Co., LTD.

[Abstract] During drill-and-blast excavation, the tunnel face frequently releases a mixture of hazardous gases. These gases not only pose severe health and safety risks to workers, but they also deteriorate the air quality inside the tunnel and, under certain conditions, may trigger explosions. To explore the synergistic diffusion process of major harmful gases such as CO, CH₄, and H₂S generated, An operational railway tunnel was taken as the research object to establish a component transport equation model for research. The results indicate that the concentrations of CO, CH₄ and H₂S all exhibit pronouncedly accelerated diffusion within the upper and lower regions of the tunnel, while in the medial region the diffusion markedly attenuated. The movement of harmful gases is affected by vortices and gradually spreads towards the top of the tunnel. The greater the wind speed, the more obvious the effect. The research in this paper can provide theoretical support for the diffusion and migration laws of harmful gases in tunnels.

[Key words] tunnel; drilling and explosion method; harmful gases; distribution characteristics; component model

引言

开挖隧道的过程中,岩体的原始结构会遭到破坏,一些岩石(如煤系地层、页岩等)本身可能含有瓦斯、H₂S等有害气体^[1,2],当隧道掘进到这些地层时,气体就会从岩石的裂缝或孔隙中释放出来,进行爆破作业时,炸药爆炸后会产生大量的有害气体,如CO等。这些气体如果不能及时排出隧道,会在隧道内积聚,对施工人员的健康和安​​全构成威胁^[3-5]。同时,长期暴露在低浓度的有害气体环境中,会对人体的呼吸系统、神经系统等造成慢性损伤^[6-8]。如表1所示,在隧道爆破和施工过程中产生的CH₄、CO等多种污染物会存在潜在的爆炸威胁,影响施工安全^[9-11]。

表1 钻爆法施工过程中常见的易爆气体与爆炸极限

名称	化学式	爆炸下限	爆炸上限
甲烷	CH ₄	5.0%	15%
一氧化碳	CO	12.5%	74.2%
乙烷	C ₂ H ₆	3.0%	15.5%
丙烷	C ₃ H ₈	2.1%	9.5%

隧道开挖过程中有毒有害气体的防控是一个复杂而重要的任务,需要从源头控制、监测预警和应急处置等多个方面入手。为了推动节能环保,建设生态环境安全屏障,提升各类工程或建

筑“含绿量”，促进绿色低碳产业的转型升级改造，开展隧道施工过程中有害气体的防治工作是非常有意义的。

目前国内对隧道内污染物防治主要集中在降尘方面，2018年陶利等^[12]采用了水泡喷雾、静电除尘及水过滤除尘和水帘喷雾相结合的三级降尘工艺，有效控制70%以上的粉尘传播；陈小峰等^[13]提出了综合除尘系统，除尘率高达80%以上；2019年王欣等^[14]研究了不同压力和直径下喷嘴喷雾降尘的效果，得到了雾滴和粉尘的运动关系，有利于优化喷雾降尘技术；2021年来弘鹏等^[15]实验得出了一种降尘剂，配合水压爆破可有效抑制粉尘扩散；王飞等^[16]研究了隧道爆破后的粉尘及CO的浓度变化；2022年李鹏辉等^[17]提出一种基于模糊理论的隧道分区除尘方法，经应用验证该方法可有效降低粉尘浓度高达78%以上；2025年李平安^[18]、2024年聂兴信等^[19]、2020年魏存厚^[20]研究了隧道内粉尘的运移规律并最终确定了通风系统的最佳布置方案；2024年邓欢等^[21]改善了隧道内台车周边的通风装置，有效地提高了空气质量。

上述的降尘技术在实际工程作业中发挥了重大作用，但目前对隧道内有害气体的研究较少，对污染物的运移规律较为模糊，针对这一问题，本文以一实际公路隧道为研究对象，采用组分运输模型研究粉尘与CO、CH₄、H₂S协同扩散的过程，揭示污染物的协同扩散规律，有助于优化通风设计、制定防护措施，保障施工安全和人员健康。

1 隧道物理模型

在隧道钻爆法施工过程中，风流为气相，粉尘为离散相颗粒，可以应用拉格朗日方法追踪颗粒的扩散运动。根据隧道的实际尺寸建立了隧道的三维物理模型，掌子面是一个宽为14米，高为10米的四心圆形，它由四个圆心位于不同位置的圆弧组成，实际状况如图1所示，选取自掌子面开始的100米为研究对象。

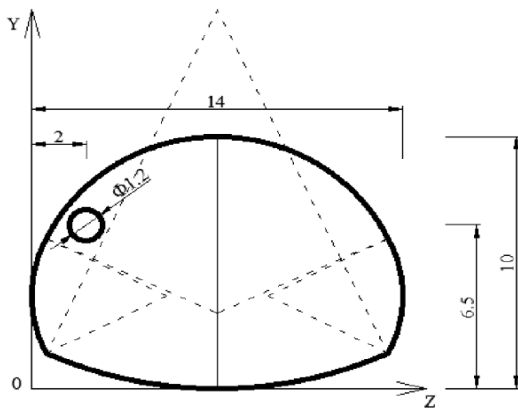
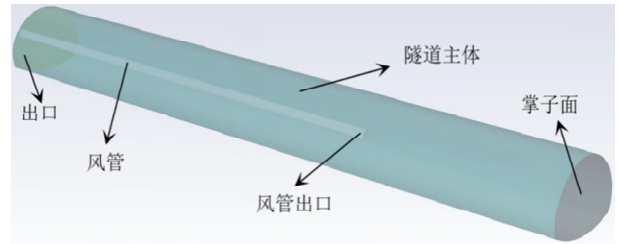


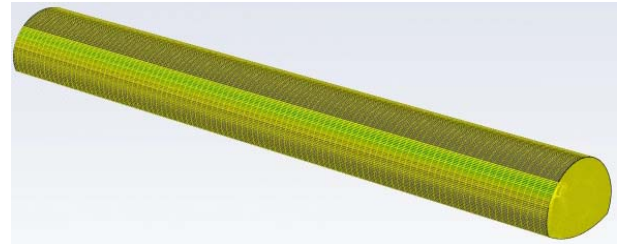
图1 隧道掌子面示意图

所建立模型由隧道本体和一个内部风管组成，如图2(a)所示，X方向为隧道长度方向，Y方向为隧道高度方向，Z方向为隧道宽度方向。隧道长100米，内设风管，其他隧道内实际设备忽略不计，如水管，电线，水沟等。风管的进口连接在隧道出口掌子面上半部分，风管出口在隧道内部，且风管平行于地面安装，圆形风管直径为1.2m。据文献实验数据验证^[22]，通风管的出口与隧道

掌子面保持30m-40m的间距时能够保证大断面、长隧道得到最大的通风效率，本文取通风管的出口距离掌子面30m。



(a) 隧道物理模型



(b) 网格划分

图2 隧道物理模型及其网格

利用ICEM划分网格，如图2(b)所示，并开展网格独立性验证。

2 隧道中有害气体、粉尘扩散的数学模型

2.1 组分运输模型

如果多种流体的相态和运动状态都相同，且都呈现出某种混合状态时，例如空气，这种情况适合采用组分运输方程。组分运输方程实际上是模拟混合物各组成成分之间或者其他相之间的相互作用，在进行设置时，需要打开Energy，着重关注各种成分的含量，这是组分运输方程在计算时与多相流最大的不同。本文研究的是浓度扩散问题，属于标量运输方程^[23]。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_t \frac{\partial T}{\partial x} + D_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \Phi$$

其中， $\frac{\partial T}{\partial t}$ 表示瞬态项， $u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}$ 表示对流项，

$D_t \frac{\partial T}{\partial x} + D_t \frac{\partial T}{\partial y}$ 表示扩散项， Φ 表示源项。标量运输方程

最大的特点，就是其方程形式基本相同，都包含上述四项。

2.2 主要计算条件

边界条件进口处设置为“速度-进口”，隧道风管喷口出风速度为18.86m/s，方向沿x轴负方向，DPM模型设置为“反应”。隧道出口边界条件设置为“外流”，DPM模型设置为“逃逸”，即到达隧道尽头的污染颗粒物将直接逃出隧道，不与其他物质发生碰撞。管壁，隧道侧面，隧道出口截面都设置成“墙壁”，DPM模型设置为“反应”，即在隧道内粉尘只与其他物质发生碰撞，不

会从隧道出去, 逃离产生时间分别设置为0.5s, 1s, 2s, 三个工况其余条件均相同。为了便于计算和检查, 隧道主要参数的设置如表2所示。

表2 隧道面相关参数设置

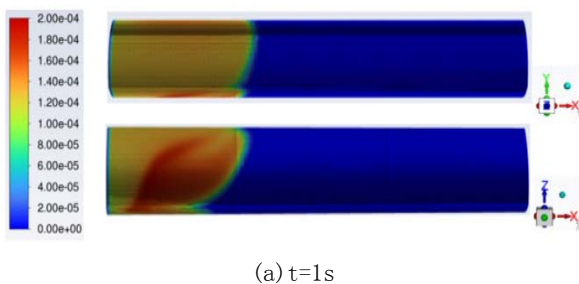
参数名称	设置	备注
注射	隧道面	隧道掌子面
材料	SiO ₂	
直径	R-R	
开始时间(s)	0	
总流量(kg/s)	0.3	
最小直径(m)	1e-6	粉尘直径
最大直径(m)	0.002	粉尘直径
空气密度(kg/m ³)	1.225	
空气粘度(kg/m·s)	1.7894e-05	
空气温度(K)	300	
入口速度(m/s)	18.86	
总流量(kg/s)	0.3	
时间步长	1s	
产尘时间	0.5s, 1s, 2s	本章变量

3 有害气体协同扩散过程

首先, 使用组分方程, 打开模型里面的能量方程, 在混合物里面加入0.3%的CO、0.08%的CH₄和0.07%H₂S气体, 产尘时间设为两秒钟, 产尘速度为0.8m/s, 两秒后将三种组分的速度和产量都设为0, 重新进行初始化后再继续计算, 研究此后的气体扩散过程。

3.1 CO在不同时刻的分布特征

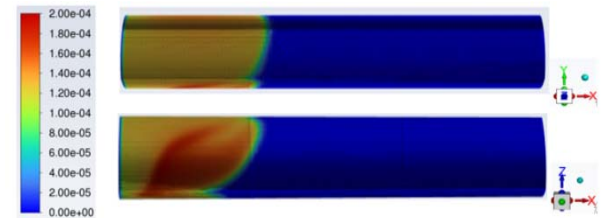
本实验假设掌子面爆炸前的有害气体为0, 所有计算中的有害气体均由隧道爆炸过程中产出。图3展示了四个不同时刻不同方向的CO组分分布图。



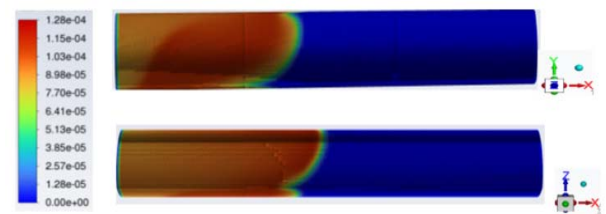
(a) t=1s



(b) t=10s



(c) t=50s



(d) t=100s

图3 不同时刻CO浓度分布图

如图所示, 初始时刻, CO在掌子面处浓度最大, 随着时间的推移, CO逐渐由隧道掌子面向着隧道出口方向移动, 掌子面处CO浓度降低, 且靠近隧道顶部和底部区域CO的扩散速度较隧道内部区域CO的扩散速度快, 当t=50s后, 这一趋势越来越明显。由于混合了其他有毒有害气体, 空气的稀释作用减弱, 因此浓度降低得慢。这样, 就使得由于CH₄和H₂S的加入, CO降低为安全可吸入浓度的时间变缓, 爆炸后需要更长的等待时间, 接尘工人可以进入隧道内工作。

3.2 CH₄在不同时刻的分布特征



(a) t=1s



(b) t=10s

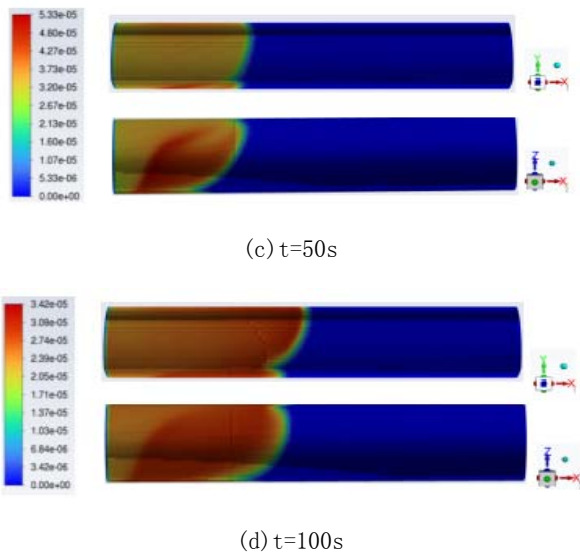
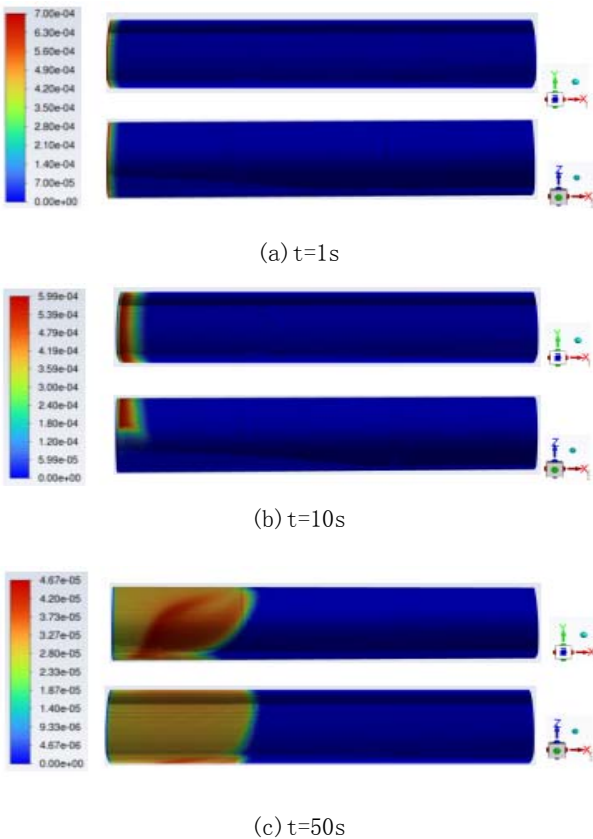


图4 不同时刻CH₄浓度分布图

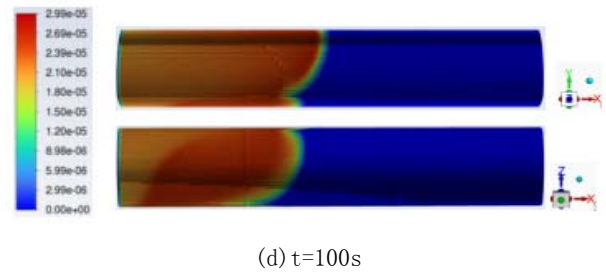
如图4所示, 1s时刻CH₄的浓度达到了产生的最高浓度0.08%, 随着时间的推移, CH₄从隧道入口随着风流向着隧道出口方向移动, 浓度趋于均匀, 且在隧道内空气的稀释下, 浓度迅速降低。

除此之外, 在10s时已经形成回流, 射流区的CH₄浓度小于回流区的CH₄浓度, 当隧道内回流区的CH₄浓度较高时, CH₄的运动会影响隧道内的风场的流动变化, 当CH₄的浓度一定时, 在风流的推动下, CH₄会在隧道顶部产生漩涡。

3.3 H₂S在不同时刻的分布特征



(c) t=50s



(d) t=100s

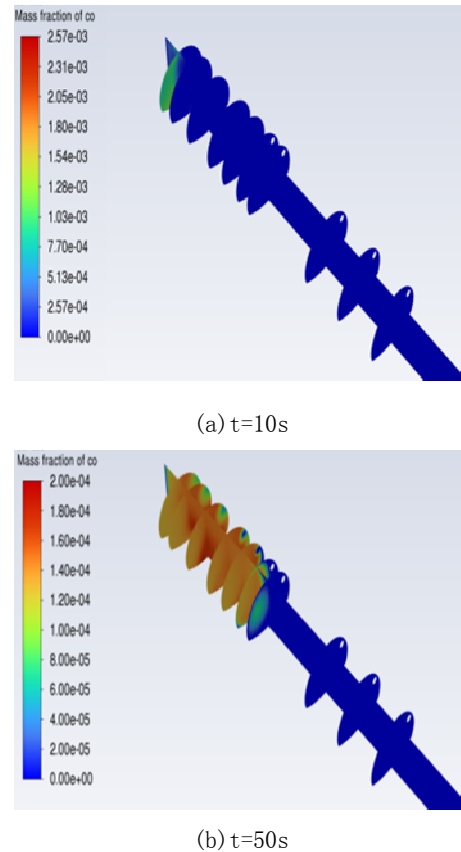
图5 不同时刻H₂S浓度分布图

本实验的H₂S在前100s内四个不同时刻的分布如图5所示, 与CO和CH₄的分布规律相似, 1s时刻H₂S的浓度达到了产生的最高浓度0.07%, 随着时间的推移, H₂S从隧道入口随着风流向着隧道出口方向移动, 浓度趋于均匀。

综上所述, 三种物质在前100s内的运动规律相似, 前进速度也几乎一致, 浓度因为爆炸产生量的不同而不同, 运动过程中, 三种气体浓度都会被空气不断稀释。

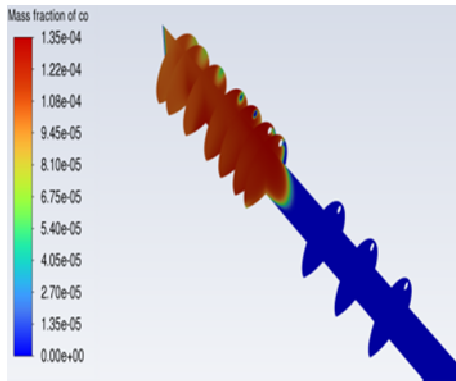
3.4 CO在不同截面的浓度分布

图6展示的是CO在沿着X轴方向的十个切面和Y轴中心切面的浓度图(CH₄和H₂S分布图相似, 因此只研究一种物质即可), 可以看出随着时间的推移, CO浓度逐渐扩散, 浓度的最高值不断降低, 初始时刻, t=10s时, CO的最高质量分数为0.257%, t=50s时, CO的最高质量分数为0.02%, CO浓度降低的速度较快, 随着时间的推移, t=80s时, CO的最高质量分数为0.0135%, t=100s时, CO的最高质量分数为0.0128%, CO浓度降低的速度越来越慢。

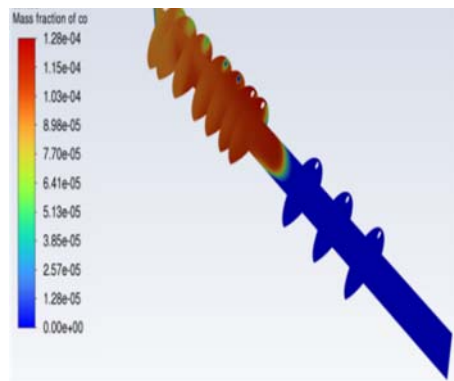


(a) t=10s

(b) t=50s



(c) t=80s



(d) t=100s

图6 CO在不同截面的分布

从图中可以看出, 贴近隧道底部处的CO浓度值较高, 随着时间的增加扩散至隧道上部。隧道断面的左侧浓度较高, 右侧浓度较低, 且随着时间的推移, 断面上的浓度值会趋于均匀, 80s时刻, 距离产尘面27.5m的截面后的空间, 粉尘逐渐扩散至隧道内的整个断面。100s时刻, 距离产尘面32.5m的截面后的空间, 粉尘逐渐扩散至隧道整个断面, 粉尘浓度在这些断面上达到一个稳定的值。

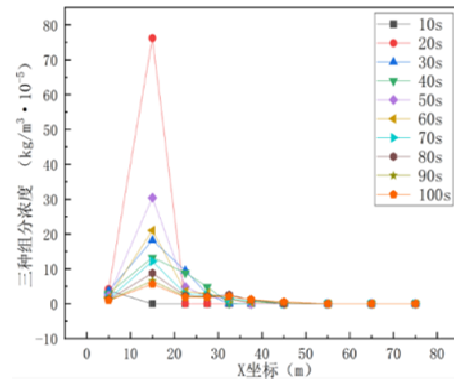
当风流从风管内流出时, 中心风速最大, 并且在拱顶形成“附壁射流”, 在风管出口和隧道掌子面之间形成射流, 并卷吸周围介质, 使得沿程流速不断下降, 断面逐渐扩大, 流量不断增加, 在到达掌子面附近时, 由于爆炸的压力巨大, 使得风流向着反方向移动, 射流区粉尘浓度较低, 它的粉尘颗粒主要来源于风流自身携带的粉尘颗粒射流以及前进过程中卷吸周围流体而携带的粉尘颗粒。

在出风管后的截面, 截面右侧CO的浓度降低很快, 这是因为这一侧的通风状况良好, 而左侧CO浓度降低明显慢于右侧, 因为这一侧的风流主要是来源于风流的回流, 不仅携带了更多的粉尘, 而且流速也相应减缓, 有害气体难以扩散。

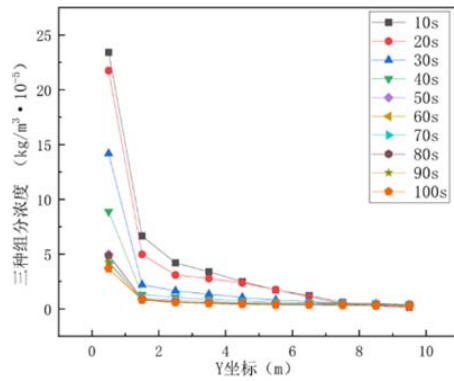
4 污染气体作用下的粉尘分布特征

如图7、图8所示, 从整体上来看, 三种组分下各个截面的浓

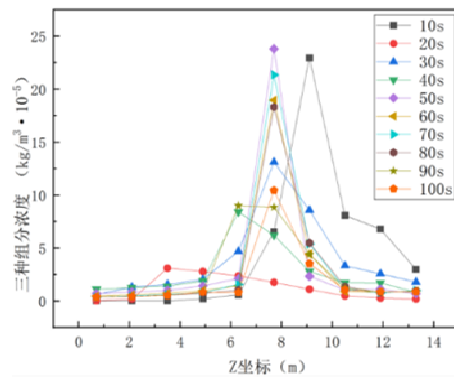
度随着时间的推移在空间上的分布规律和只加CO一种组分的很相似, 但也有不同之处。在X轴方向上, 两种工况都在20s时刻达到最大值, 并且呈现出三种组分的浓度最大值约是一种组分浓度最大值三倍的关系; 在Y轴方向上, 两种工况达到最大值的时刻有所不同, 分别是10s和20s时刻, 但最大值还是呈现出三倍关系; 在Z轴方向上, 两种工况均在50s时刻达到最大值, 但最大值的关系由原来的三倍变为了两倍, 主要原因是组分浓度随着在X方向上不断前进, 其分布趋于均匀。



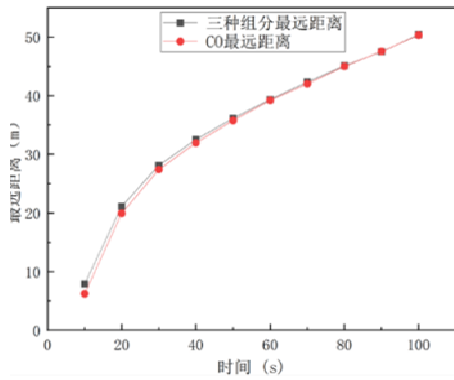
(a) X轴方向



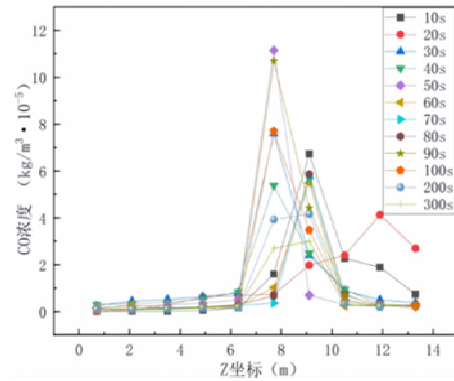
(b) Y轴方向



(c) Z轴方向



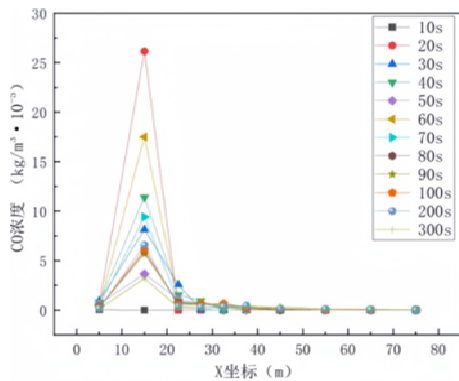
(d) 最远距离



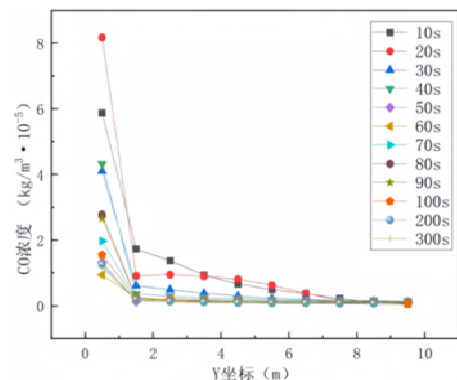
(c) Z轴方向

图7 三种有害气体在X, Y, Z三个方向上的浓度分布及在X方向上所能到达的最远距离

最后, 图7还展示了两种不同工况颗粒物所能到达的最远处, 可以看出, 在刚开始时, 三种组分的工况的最远距离稍大于只加CO一种工况的最远距离, 但随着时间的推移, 在60s以后, 两者几乎重合。可以推断, 两种工况从隧道出口逸出的时间相似。



(a) X轴方向



(b) Y轴方向

图8 CO在X, Y, Z三个方向上的浓度分布

5 结论

本文主要通过引入组分输运方程建立组分输运模型, 模拟分析了有害气体与粉尘在隧道中的扩散过程, 并发现了不同气体、不同直径粉尘等时空分布规律, 所得主要结论如下:

(1) CO在隧道内的扩散过程可以分为三个阶段, 第一阶段为CO产生后1s内浓度急剧下降; 第二阶段为随着时间的推移, 隧道掌子面残留的CO在隧道风流的作用下不断稀释; 第三阶段为CO浓度降低到人体安全值。

(2) 对于CO、CH₄和H₂S三种有害气体均加入的工况, 三种气体会随着时间的推移而被空气稀释, 浓度分布趋于均匀, 因此可以在爆炸的初始时刻采取喷水等除尘措施, 更有利于粉尘和有害物质的稀释。

(3) 三种有害气体在初始时, 坐标原点附近的浓度较低, 沿着Z轴方向浓度逐渐增加, 因为原点附近距离风管口较近, 通风状况好, Z轴方向主要依靠风的回流而稀释、带走粉尘; 贴近隧道底部处的CO浓度值较高, 且随着时间的推移, 会在断面上趋于均匀。

[基金项目]

中国铁路上海局集团有限公司科研项目(2024140)。

[参考文献]

[1]高红军, 罗刚, 陈勇, 等. 隧道施工通风效率及有害气体迁移规律试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(1): 333-337.

[2]钟宜宏. 基于气-固两相流的隧道烟尘运移机制及控制技术[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023: 1-121.

[3]李海强, 侯志强, 李晓配. 隧道施工粉尘防治方法研究[J]. 工程机械, 2022, 53(07): 124-127.

[4]王欣. 矿山法施工隧道喷雾降尘技术研究[D]. 昆明: 西南交通大学, 2022: 1-91.

[5]沈阳, 王永伟, 曹柳, 等. 高速公路隧道掘进工粉尘累积暴露评估[J]. 现代预防医学, 2018, 45(10): 1753-1758.

[6]徐忠卫, 李玉, 陈星宇. 螺旋隧道施工通风效果影响因素优化研究[J]. 公路, 2023, 68(10): 358-361.

- [7]蒋小平,张军,唐潇,等.基于FLUENT的长大山岭隧道施工粉尘运移分布特征研究[J].四川建筑,2023,43(04):124-126.
- [8]谢全敏,黄昆.小半径曲线隧道施工通风粉尘迁移规律研究[J].安徽建筑,2022,29(12):81-82.
- [9]滕伟.砂泥岩隧道悬臂掘进机施工粉尘扩散规律及其控制研究[D].重庆:重庆交通大学,2022:1-107.
- [10]林一川.山岭公路隧道施工作业环境特征及其消除除尘照明改善对策研究[D].重庆:重庆交通大学,2020:1-83.
- [11]包相华,邹茹,杨蓓,等.尘肺病合并肺部感染病原菌类型及感染危险因素分析[J].中国病原生物学杂志,2023,18(1):77-81.
- [12]陶利,周彪,刘超,等.盾构隧道大修施工分级除尘技术及工艺研究[J].现代隧道技术,2018,55(05):27-32+60.
- [13]陈小峰,郭春,程江浩,等.单臂掘进机施工下的城市硬岩隧道综合除尘技术研究[J].现代隧道技术,2018,55(S2):343-348.
- [14]王欣,董长松,宋斌,等.天台山隧道喷雾降尘雾化性能研究[J].现代隧道技术,2019,56(S2):138-142.
- [15]宋弘鹏,周冬辉,宋竹兵,等.山岭隧道水压爆破降尘剂试验研究[J].现代隧道技术,2021,58(02):188-194.
- [16]王飞,王庆,焦卫宁,等.隧道钻爆施工降尘技术的试验研究[J].现代隧道技术,2021,58(05):196-203.
- [17]李鹏辉,李科,王方,等.基于模糊控制的隧道施工期分区除尘技术研究[J].现代隧道技术,2022,59(06):216-223+231.
- [18]李平安.隧道施工粉尘扩散规律及通风管口位置优化研究[J].施工技术(中英文),2025,54(01):21-27.
- [19]聂兴信,李凯鹏,洪勇,等.高海拔隧道施工粉尘运移特性及通风系统布置研究[J].安全与环境学报,2024,24(6):2269-2276.
- [20]魏存厚.全断面隧道掘进机工作面通风系统参数及控尘优化数值模拟研究[D].山东:山东科技大学,2020.
- [21]邓欢,陈世强,吴世先,等.钻爆法隧道洗尘消热与台车周边作业环境营造[J].安全与环境工程,2024,31(4):68-74.
- [22]Liu Q.,Nie W.,Hua Y.,Hua Y.,et al.Investigation of efficient dust control strategy for construction tunnels: Ventilation System's implications for cleaner production[J].Building and Environment,2020,180.
- [23]李润双.瓦斯隧道有害气体运移规律及通风方案优化研究[J].铁道建筑技术,2022(02):117-121.

作者简介:

杨玉如(2002--),女,汉族,山东省菏泽市人,硕士研究生,从事隧道粉尘防治等方面的研究。

*通讯作者:

耿凡(1982--),女,博士,副教授,主要从事粉尘防治与节能环保方面的研究工作。