

公路隧道瓦斯运移及通风防灾研究

王中岐¹,林志^{2*},冯森²,杨红运²,陈相³,刘江⁴

(1.中铁建重庆投资集团有限公司,重庆市 400700;2.重庆交通大学 土木工程学院,重庆市 400074;

3.重庆三峡学院 土木工程学院,重庆市 404100;4.贵州省公路工程集团有限公司,贵州 贵阳 550000)

摘要:为掌握隧道建设中瓦斯运移规律及通风防灾技术,以实际隧道为工程背景,运用Ansys Fluent建立三维通风物理模型进行瞬态分析,并结合现场监测数据,研究通风对隧道瓦斯浓度的影响。研究表明:瓦斯及风流扩散不均衡性突出,随着通风时间增加,瓦斯浓度及风速在距离掌子面120 m处达到稳定;瓦斯监控及防治过程中,重点关注隧道掌子面至二衬台车区间瓦斯是否超限;放炮后掌子面瓦斯浓度不断升高,通风15 min左右,掌子面瓦斯浓度达到峰值,通风30 min后瓦斯浓度趋于稳定,且位于施工允许瓦斯浓度范围内。合理控制通风时间及通风量并加强隧道拱脚、底板等区域的通风,能够保证隧道施工的安全。

关键词:公路隧道;瓦斯工区;数值模拟;瓦斯浓度;现场监测

中图分类号:U458

文献标志码:A

0 引言

煤层瓦斯事故是隧道建设中的重大地质灾害之一,在瓦斯隧道建设中需要重点关注瓦斯浓度是否超限,针对公路瓦斯隧道通风防灾、瓦斯防突等问题,有学者采用数值分析、现场试验等方法进行理论研究。张东明等^[1]通过数值模拟分析论证了隧道开挖断面上隅角瓦斯易于积聚^[2-5]的原因,并基于渗流理论分析了瓦斯存在状态及涌出情况,设计出瓦斯渗流和分布规律的理论模型;蒋曙光等^[6]基于数值模型相似理论,找到了采场内瓦斯气体分布及扩散规律^[7-10];郝俊锁等^[11]通过研究通风安全预警,对通风系统的可靠性进行评价,提出加强通风系统在线监测,可以实现隧道施工中瓦斯浓度变化的动态预警。

通风对瓦斯隧道施工非常关键,如何合理进行隧道通风设计防止瓦斯超限是隧道通风研究的焦点。本文以贵州省遵义市桐梓隧道为工程背景,通过数值模拟分析瓦斯在洞内的分布规律,并结合现场监测数据进行对比分析,得出隧道通风流场及瓦斯场分布规律,以便为隧道通风防灾提供理论指导。

1 瓦斯工区分类控制指标

1.1 瓦斯隧道类别定义

针对瓦斯隧道,将洞口至开挖掌子面区段定义为瓦斯工区,通过对该区段瓦斯浓度进行检测划分工区类别,瓦斯工区分类由瓦斯绝对涌出量决定。在进行瓦斯隧道施工时,一个施工区段内瓦斯地层与瓦斯工区呈动态变化,如图1所示。

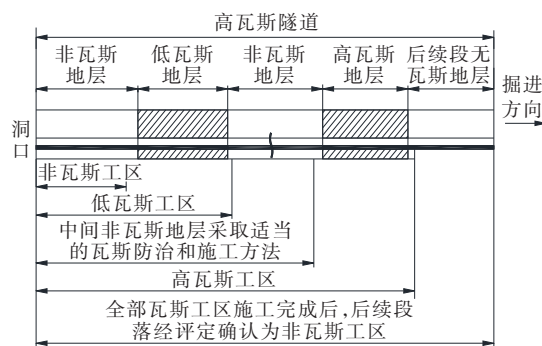


图1 瓦斯地层与瓦斯工区分类示意图

1.2 施工阶段瓦斯工区分类指标

瓦斯隧道施工作业时,需要时刻关注瓦斯浓度

收稿日期:2022-12-29(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51904043,52078089,52078090)

作者简介:王中岐,男,高级工程师.E-mail:235168024@qq.com

*通信作者:林志,男,博士,教授.E-mail:1066829864@qq.com

变化情况,对于隧道通风风速及瓦斯浓度的规定,常采用最小风速和最高瓦斯浓度作为不同类别瓦斯工区的施工管理控制指标,如表1所示。

表1 瓦斯工区任意处风速及浓度判定指标

瓦斯工区类别	最小风速/(m·s ⁻¹)	回风流最高瓦斯浓度/%
微瓦斯	0.15	0.25
低瓦斯	0.25	0.50
高瓦斯	0.50	0.50

2 工程概况

桐梓隧道为双向分离式特长隧道,隧道左、右幅间距在进口段为20.9 m,出口段约为21.9 m,设计速度为100 km/h。该隧道埋深较大,周边地质条件复杂,地势总体呈现中部高、两端低的特征,穿越灰岩、泥岩、煤系地层,同时隧道所处地层众多,岩性多样,组合复杂。主要不良地质为煤层瓦斯、岩溶等,隧道线路局部地形地貌如图2所示。

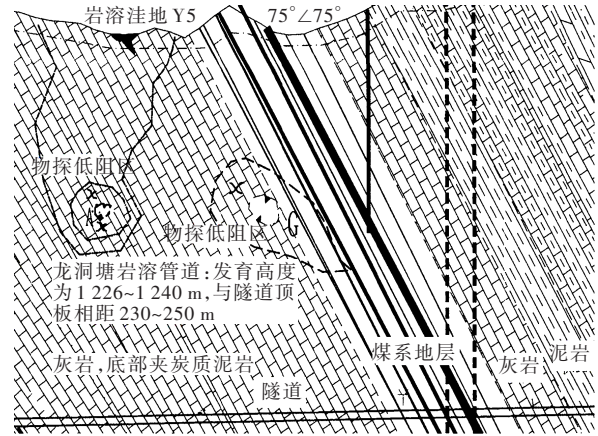


图2 隧址区地质情况局部示意图

该隧道穿煤段埋深大,隧址区周边存在高瓦斯矿井,经过瓦斯勘探及煤矿瓦斯鉴定分析得出周边矿井瓦斯涌出情况,如表2所示。同时该隧道与邻近的新凉风垭隧道穿越同一煤系地层P₃l,据勘察资料显示,新凉风垭隧道煤层瓦斯含量为6.82~21.34 mL/g,且穿煤段为高瓦斯煤层。因此综合鉴定桐梓隧道为高瓦斯隧道。

3 数值计算模型建立

3.1 理论分析

瓦斯隧道通风模型建立需满足流体理论中的质

表2 煤矿瓦斯等级鉴定表

矿井名称	绝对瓦斯涌出量/ (m ³ ·min ⁻¹)		相对瓦斯涌出 量/(m ³ ·t ⁻¹)		矿井瓦斯等级
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	
桐河煤矿	1.37	0.54	17.36	5.00	高瓦斯矿井
桐梓煤矿	5.92	0.99	26.44	4.46	高瓦斯、突出矿井
松坎煤矿	4.81	0.57	22.20	1.57	高瓦斯矿井
大河煤矿	7.17	2.81	24.79	2.11	高瓦斯、突出矿井

量守恒、能量守恒及动量守恒三大定律,对隧道进行通风模拟时,将隧道壁面设定为绝热恒温壁面;隧道风流速度较小,常假定风流流场为恒温流场,空气气流属于稳态紊流,隧道内的气流具有各向同性的湍流黏性,气流动力黏滞系数视作标量处理;瓦斯均匀从掌子面涌出,风筒口喷出的气流均匀分布。

考虑隧道实际工况,通风流场中瓦斯与空气会发生相向扩散,且在隧道壁面及内部气压等综合作用下发生对流,隧道内通风流场分布呈现不均匀性,使得瓦斯与空气充分混合后气流会发生紊流,因此将隧道中的气体流动视作紊流^[12-16]。靠近隧道内壁处通风气流选用标准壁面函数^[17]来处理。采用湍流模型和组分输运模型对隧道中空气及瓦斯的运移情况进行仿真计算,湍流选用标准k-ε本构模拟,其控制方程包括连续性方程、动量方程、k方程、ε方程和流体组分质量守恒方程^[18],具体形式如式(1)~(5)所示:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

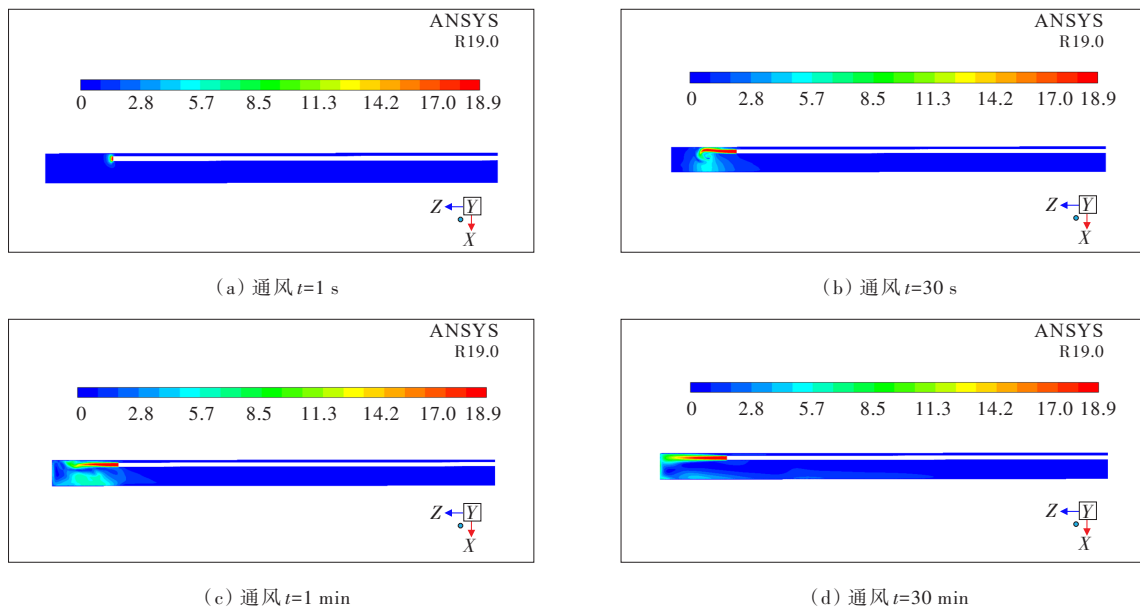
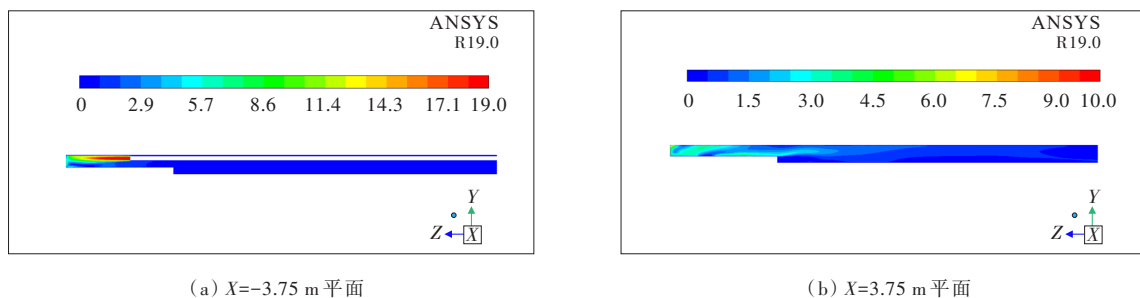
$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial}{\partial x_i} (p + \frac{2}{3} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i k) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t \partial \epsilon}{\sigma_k \partial x_i} \right) + G - \rho \epsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i \epsilon) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t \partial \epsilon}{\sigma_\epsilon \partial x_i} \right) + (c_1 G - c_2 \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k} \tag{4}$$

其中: $G = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_j}{\partial x_i}$; $\mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\epsilon}$ 。

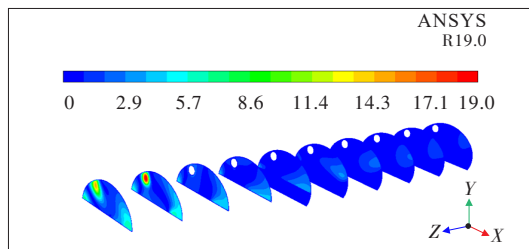
$$\frac{\partial (\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_s \mu) = \text{div} [D_s \text{grad}(\rho c_s)] + S_s \tag{5}$$

图5 隧道风筒中心 X - Z 面风流场分布云图(单位:m/s)图6 隧道各 Y - Z 平面风流场分布云图(单位:m/s)

由图6可知: $X=3.75$ m 平面相较于风筒中心 Y - Z 面(即 $X=-3.75$ m 平面)风流速度小,且风流速度分布梯度也较小。由风筒中心 Y - Z 面风场分布图可知,离风筒越近,风流速度越大,反之风流速度越小。

4.1.3 隧道 X - Y 面及 X - Z 面风流场分布分析

瓦斯隧道通风时,各断面风流分布与掌子面距离有关,通过数值仿真模拟,对距离掌子面 100 m 范围区域,采用间隔 10 m 的方式对隧道各平面风流分布情况进行分析,得到通风稳定(即 30 min)后的各 X - Y 平面风流分布情况,如图7所示。选取风筒中心 X - Z 面(即 $Y=4.24$ m 平面)及与其平行的 $Y=1$ m 平面进行流场分析,平面的风流分布情况如图8所示。综合分析可知:随着通风时间的不断推移,风流不断到达隧道各 X - Y 面,同时风流扩散不均衡性较大,使得远离风筒侧主要以回风为主,风速相较于风筒侧低。

图7 隧道 X - Y 平面风流场分布云图(单位:m/s)

4.1.4 隧道通风流场结构分析

对上述各平面风流分布云图进行对比分析可知,隧道通风风流沿着隧道掘进方向流动过程中,存在射流冲击区、涡流区、过渡区和稳定区4个区域^[19-22],如图9所示。随着通风时间的不断推移,风流不断到达掌子面,最终在隧道侧壁及顶底板共同作用下,风流冲击掌子面在风筒异侧形成回流区,隧道回流区回流与射流风流相对流,产生贴壁效应,且位于风筒异侧,距离风筒越远,回流风速越大,但总体上回流风速小于射流风速。

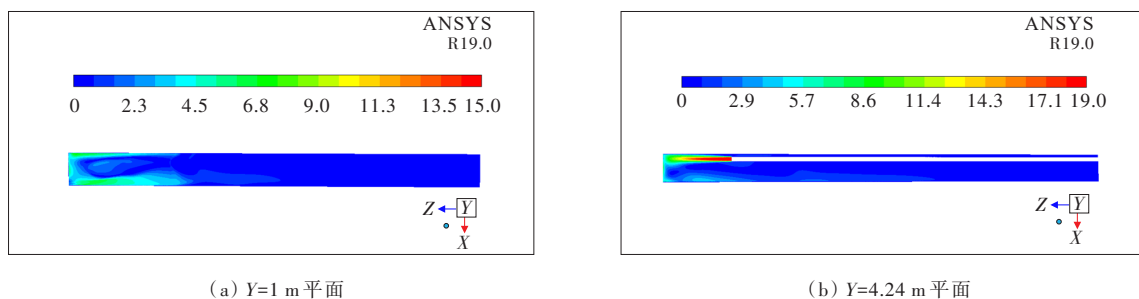
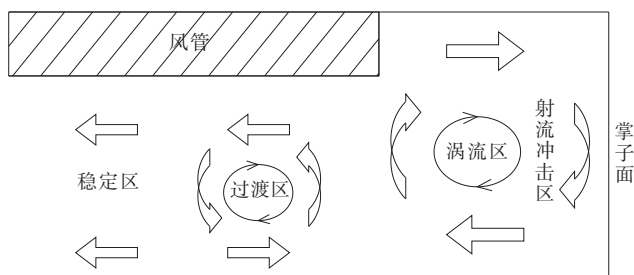
图 8 隧道各 X - Z 平面风流场分布云图(单位:m/s)

图 9 隧道内通风流场特征示意图

4.2 隧道瓦斯运移分析

4.2.1 隧道掌子面瓦斯浓度瞬态分析

瓦斯密度比空气小,风流到达掌子面附近将瓦斯不断稀释,同时在隧道壁面及底板的综合影响下,

瓦斯与风流相互作用,使得靠近风筒侧瓦斯浓度降低较快。随着通风时间的变化,掌子面瓦斯分布情况如图 10 所示。

由图 10 可知:侧壁效应使得靠近风筒一侧风速较大,进而使得掌子面处瓦斯浓度快速下降,同时射流风流到达掌子面时,部分风流横向扩散并传播,使得瓦斯在风流的作用下向远离风筒侧移动,逐渐降低掌子面附近的瓦斯浓度。当通风 30 min 左右时,掌子面上的瓦斯浓度基本稳定,表明隧道内部空间的瓦斯浓度场也基本稳定。

4.2.2 隧道 X - Y 面及 X - Z 面瓦斯浓度分布分析

通风稳定后,隧道内各平面瓦斯浓度分布如图

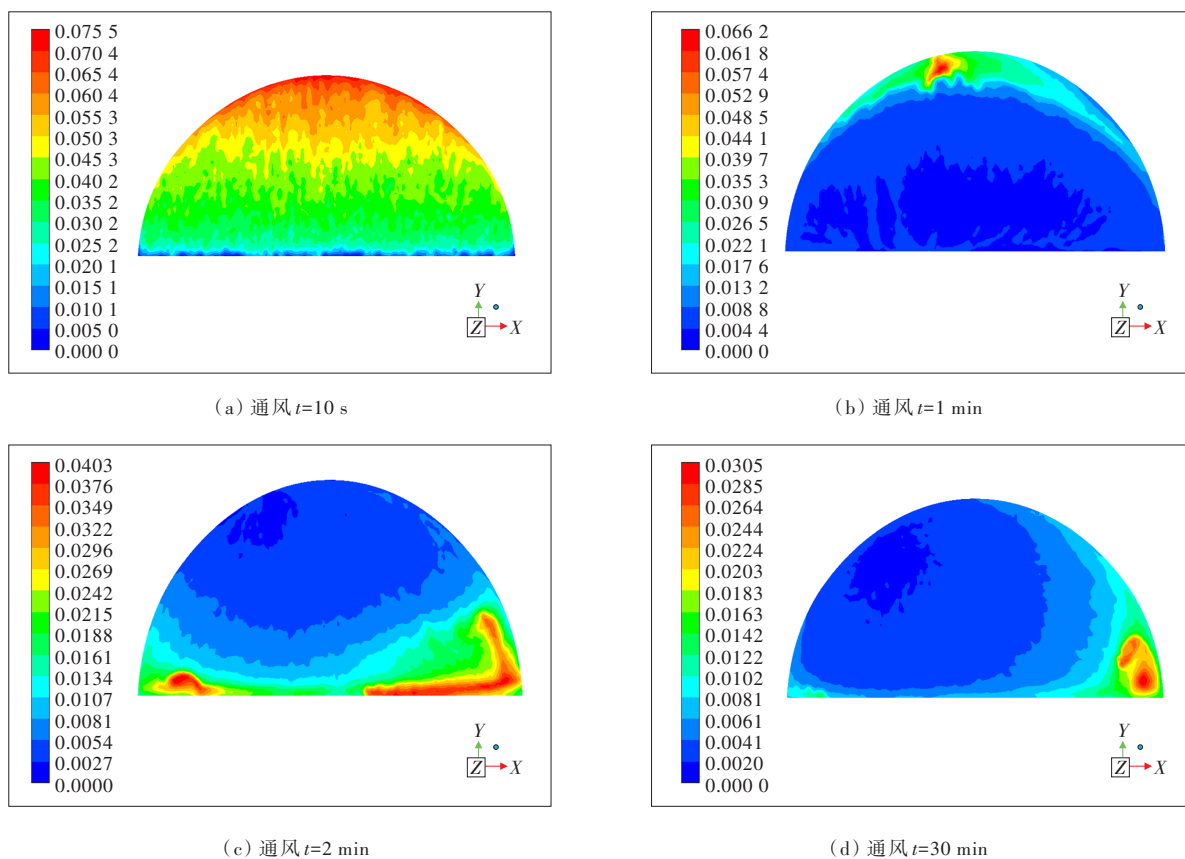
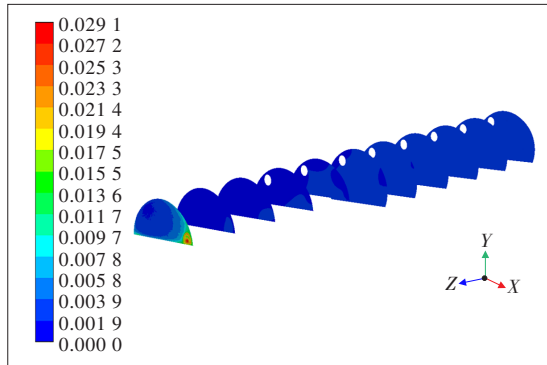
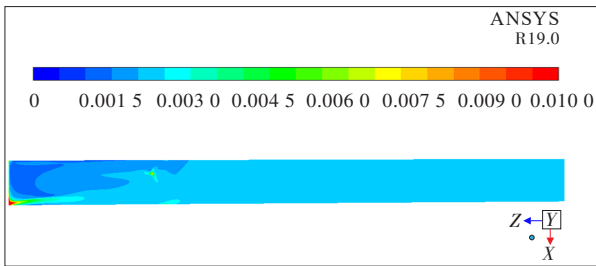


图 10 隧道掌子面瓦斯浓度分布云图

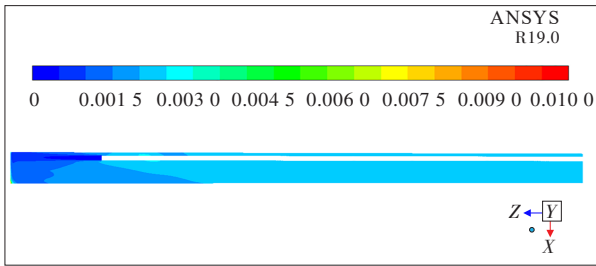
11所示。



(a) X-Y平面



(b) Y=1 m平面



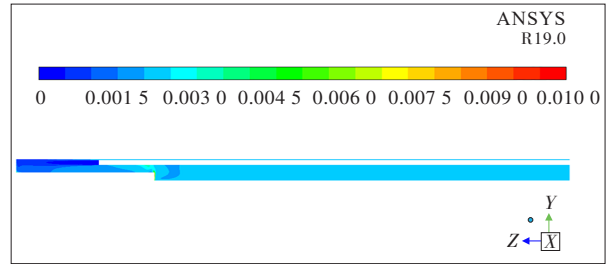
(c) Y=4.24 m平面

图11 隧道各平面瓦斯浓度分布云图

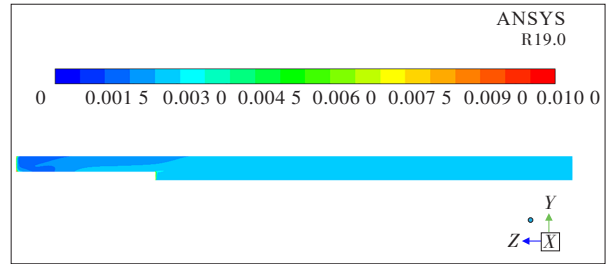
由图11可知:在隧道侧壁及底板共同作用下,形成稳定回风流,风流中瓦斯均匀扩散,使回风瓦斯浓度不断降低,同时洞内风流不断向隧道洞口运移,最终将瓦斯排出洞外。风筒异侧瓦斯出现小范围积聚,但积聚的瓦斯浓度相较拱脚低,浓度分布梯度较小。瓦斯与风流充分混合,使得隧道各处的瓦斯分布梯度较为均匀。

4.2.3 隧道 Y-Z面瓦斯浓度分布分析

选取两个典型的 Y-Z平面,对瓦斯浓度沿隧道空间高度上的分布进行对比分析,其瓦斯浓度分布如图12所示。



(a) X=-3.75 m平面



(b) X=3.75 m平面

图12 隧道各 Y-Z平面瓦斯浓度分布云图

由图12可知:保持足够长的通风时间,隧道内瓦斯与空气均匀混合,各 Y-Z平面瓦斯浓度均达到稳定,此后继续延长通风时间,隧道内各断面瓦斯浓度变化幅度不大,同时沿隧道高度上的瓦斯浓度呈均匀分布。通过合理控制通风时间及风速,可有效降低洞内瓦斯浓度,防止瓦斯超限。

5 数值模拟与现场监测分析

5.1 风筒中心 X-Z面各测点风速分析

对隧道风筒中心面不同位置测线进行风速对比分析,如图13所示。

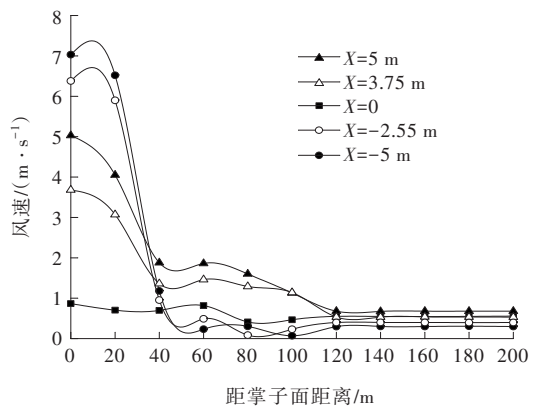


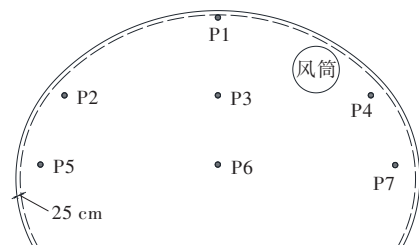
图13 Y=4.24 m平面不同位置测线风速对比分析

由图13可知:距离掌子面15 m以外,由于受到

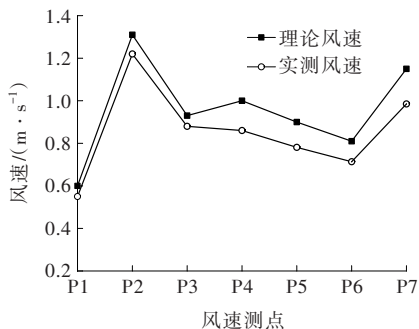
涡流影响,造成风速下降,同时随着回风流不断向洞外移动,距离出风口越来越远,受到射流风影响较小,使得回流风速进一步降低,最终趋于稳定。同时距离掌子面 120 m 后, $Y=4.24$ m 平面上各测点风速基本趋于稳定,表明距离隧道掌子面 120 m 后,形成稳定回风流,距离风筒侧越远,风速相对较大。

5.2 风速模拟量与现场实测对比分析

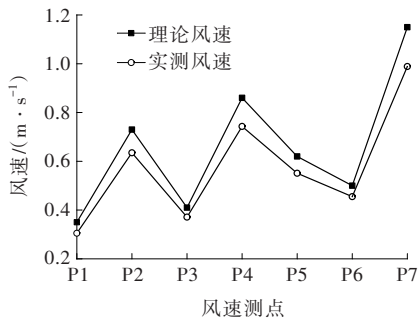
选取距离掌子面 80 m 及 120 m 两个断面开展风速测定,测点布置如图 14(a) 所示。不同断面风速对比分析如图 14(b)、(c) 所示。



(a) 风速测点布置示意图



(b) 距离掌子面 80 m



(c) 距离掌子面 120 m

图 14 不同断面风速对比分析图

由图 14(b)、(c) 可知:风速实测值与理论值平均误差小于 15%,表明数值模拟分析结果具有合理性,靠近风筒侧受射流风影响,相较于远离风筒侧风速大,由于风流具有贴壁效应,使得隧道两侧的风流分布梯度较大,中部区域风流分布梯度较小。

5.3 风筒中心 X-Z 面各测点瓦斯浓度分析

对风筒中心面不同测点瓦斯浓度与掌子面距离关系进行对比分析,结果见图 15。

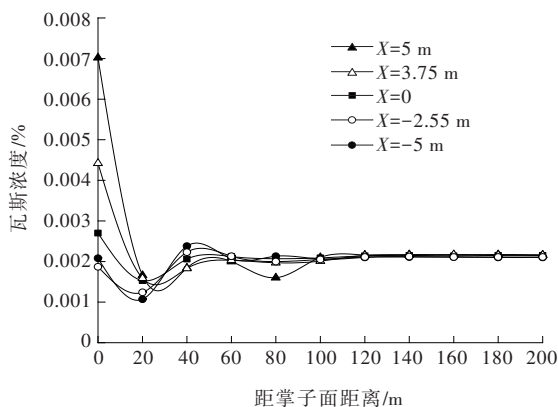


图 15 $Y=4.24$ m 平面不同位置测线瓦斯浓度对比分析

由图 15 可知:由于射流风流与回风流的相互作用,在距离隧道掌子面大致 40 m 位置处,存在涡流区,此时风速较小,易造成瓦斯积聚,使瓦斯浓度升高。同时风筒异侧拱脚处存在通风盲区,使得瓦斯小范围积聚。距离掌子面 120 m 后,隧道风筒中心面处各点瓦斯浓度趋于稳定,在掌子面附近,距离风筒侧越远,瓦斯浓度越大。由此说明,风筒侧由于射流风作用,风速较异侧大。

5.4 瓦斯浓度数值计算分析

通过隧道施工通风模拟,对掌子面及二衬台车处的平均瓦斯浓度进行数值计算发现,瓦斯浓度随通风时间的关系如图 16 所示。

由图 16 可知:通风前,隧道掌子面处瓦斯浓度最大,随着掌子面风量不断增加,瓦斯浓度逐渐下降。随着时间推移,瓦斯在风流场作用下,不断远离掌子面并向洞口处移动,掌子面瓦斯受风流稀释及涡流影响,导致部分风流瓦斯回流至掌子面附近,使得瓦斯浓度出现小幅上升,大部分瓦斯随风流不断到达二衬台车处,但瓦斯浓度较掌子面低。最终通过控制通风时间及通风量,能够保证隧道掌子面附近瓦斯浓度趋于稳定值 0.005% 左右,使掌子面处瓦斯浓度降至安全范围内。

5.5 瓦斯浓度现场监测分析

对隧道施工现场瓦斯浓度采用自动化监控系统^[23-25]进行一个月的实时监测,瓦斯传感器布置如图 17 所示。瓦斯传感器常悬挂至台车最高点处,一般设置在隧道拱顶附近,距顶部 25~30 cm 处,随着台车移动,实时监测瓦斯浓度变化情况。

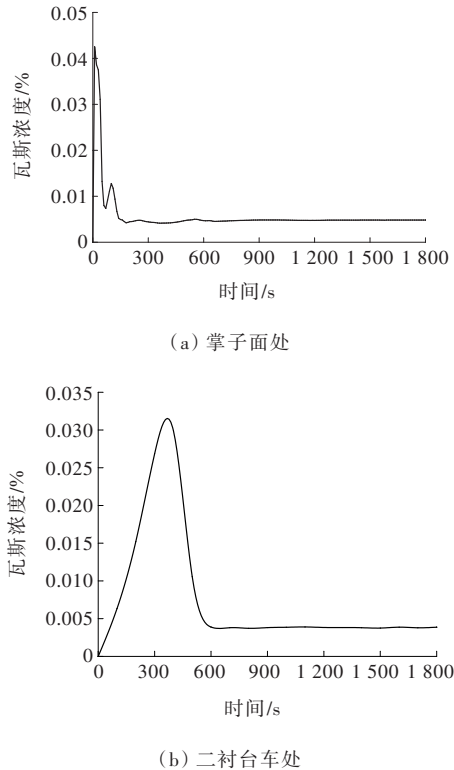


图16 瓦斯浓度随通风时间变化关系

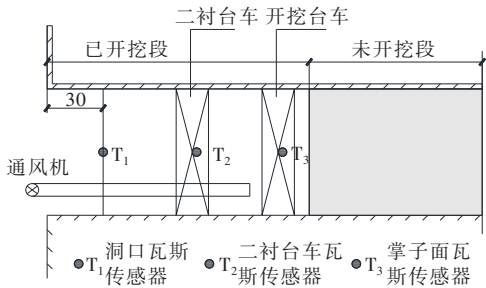


图17 隧道瓦斯传感器布置示意图(单位:m)

掌子面、二衬台车及隧道洞口处的瓦斯浓度随时间的变化关系如图18所示。

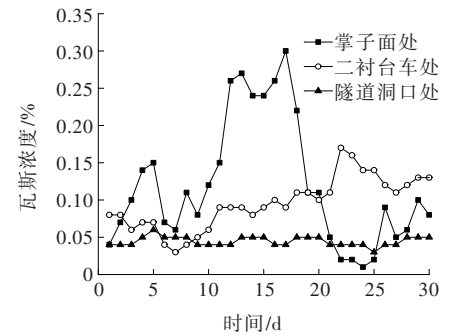


图18 不同位置瓦斯浓度随时间变化关系

由图18可知:隧道掌子面及二衬台车处瓦斯浓度均较洞口高,同时二衬台车防水板搭接处易发生

瓦斯积聚,易造成瓦斯浓度高于掌子面。因此在进行瓦斯监控及防治过程中需要重点关注隧道掌子面至二衬台车区间瓦斯是否超限。

采用自动化监控系统对隧道掌子面处瓦斯浓度进行监测,结合现场情况,选取掌子面放炮作业前后一段时间内瓦斯浓度随时间的变化情况进行分析,结果如图19所示。

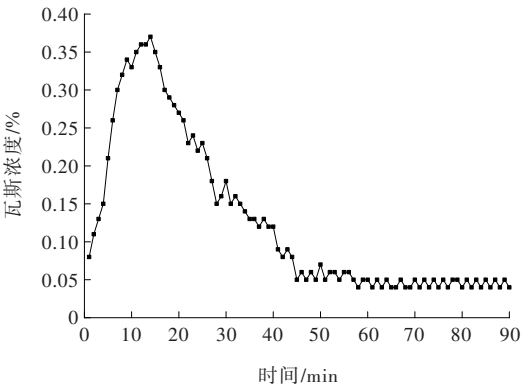


图19 实测掌子面处瓦斯浓度随时间变化关系

由图19得知:隧道放炮后掌子面处瓦斯浓度出现突变,形成一个波峰,通风30 min后,风流中瓦斯浓度不断降低,最终达到0.05%左右,低于0.5%,满足隧道安全施工作业要求。

6 结论

(1) 瓦斯隧道进行施工通风时,需要重点关注隧道底板、拐角及防水板搭接处等瓦斯易积聚的区域。在该区域加强通风,能有效降低瓦斯浓度,避免瓦斯事故发生。

(2) 根据隧道平面各测线风速变化情况分析,距离隧道掌子面40 m处,受涡流影响,风速减小,使得瓦斯浓度升高;距离掌子面120 m后,隧道风筒中心面处各点瓦斯浓度趋于稳定。

(3) 基于实测与理论计算对比分析,通风15 min左右,掌子面瓦斯浓度达到峰值;随着通风时间的增加,瓦斯浓度不断减小,最终趋于稳定。瓦斯浓度最低为0.05%左右,低于限值0.5%,满足隧道安全施工作业要求。

(4) 隧道瓦斯浓度随时间变化的幅度关系为:掌子面处>二衬台车处>隧道洞口处。由此说明,隧道掌子面瓦斯浓度变化情况较复杂,且隧道洞口瓦

斯浓度变化波动幅度最小。因此需加强对掌子面至二衬台车区段回风瓦斯的自动化监测与人工检测,并对掌子面至二衬台车区段加强通风处理,防止瓦斯积聚超限,确保施工安全。

参考文献:

- [1] 张东明,刘见中.煤矿采空区瓦斯流动分布规律分析[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(1):81-84.
- [2] 王林涛,刘启蒙,刘瑜.不同倾角裂隙粉砂岩扩展过程试验与模拟[J].中国科技论文,2020,15(1):89-93.
- [3] 王贯国,魏东旭,林志军,等.瓦斯隧道工程地质勘察[J].中外公路,2021,41(S2):162-164.
- [4] 薛彦军,刘奇,房师涛,等.低瓦斯隧道大直径土压平衡盾构快速分体始发技术[J].中外公路,2022,42(1):183-186.
- [5] 张永成.高瓦斯隧道瓦斯监测专项方案设计研究[J].国防交通工程与技术,2019,17(S1):26-29.
- [6] 蒋曙光,王省身.综放采场流场及瓦斯运移三维模型试验[J].中国矿业大学学报,1995,24(4):85-91.
- [7] 冯雪.隧道断面与瓦斯监测系统[D].成都:西南交通大学,2018.
- [8] 史吉辉,李庆超,李强,等.页岩气储层定向射孔压裂裂缝转向影响因素分析[J].中国科技论文,2020,15(5):528-536.
- [9] 林永贵,陈晓裕.莫洛瓦斯隧道通风设计[J].中外公路,2014,34(2):200-202.
- [10] 冯森.公路隧道瓦斯工区类别划分指标与方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [11] 郝俊锁,陈中方,沈殿臣,等.瓦斯隧道通风在线监测与动态分析预警[J].现代隧道技术,2012,49(4):32-36,55.
- [12] 洪开荣.我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].隧道建设,2017,37(2):123-134.
- [13] 康小兵,丁睿,许模,等.高瓦斯隧道施工通风处理数值模拟分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(3):311-316.
- [14] 王锐,田娇.上覆煤层采空区对公路隧道的影响分析及处治技术[J].中外公路,2019,39(5):194-197.
- [15] 龙港,黄飞,李树清,等.大断面公路隧道穿越构造煤层瓦斯抽放技术研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(S1):486-492.
- [16] 戎有龙.高瓦斯公路隧道穿越薄煤层群安全施工技术研究[J].山西建筑,2022,48(6):148-151.
- [17] 高建良,王春霞.倾斜巷道中风流方向对瓦斯分布与积聚的影响[J].安全与环境学报,2010,10(2):180-183.
- [18] 王海桥,施式亮,刘荣华,等.独头巷道附壁射流通风流场数值模拟研究[J].煤炭学报,2004,29(4):425-428.
- [19] 孙忠强,方宝君.大断面公路隧道施工风流分布规律研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(2):154-158.
- [20] 彭佩,熊艳.公路隧道施工压入式通风流场及瓦斯分布规律研究[J].公路交通技术,2015,31(2):117-121,126.
- [21] 郑仕跃,朱海明,关瑞士,等.公路穿零净距煤层组瓦斯突出危险性预测及效验施工方法:广东省,CN115163171A[P].2022-10-11.
- [22] 康卫,于海平,刘闯,等.高速公路瓦斯突出隧道超厚煤层水力压裂增透工艺:广东省,CN111335939A[P].2020-06-26.
- [23] 李勇.基于PLC控制系统的矿井瓦斯浓度监控系统设计研究[J].煤炭与化工,2020,43(9):69-70,73.
- [24] 李杰.公路下伏急倾斜煤层采空区全充填压力注浆加固技术研究[J].中外公路,2022,42(3):26-29.
- [25] 张超林,王恩元,许江,等.煤层瓦斯压力对瓦斯抽采效果的影响[J].采矿与安全工程学报,2022,39(3):634-642.