

铁路瓦斯隧道通风流场及参数优化

臧万军^{1,2}, 刀慧娟^{1,2}

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为有效降低瓦斯隧道内被污染气体的浓度, 文章结合实际工程, 采用 FLUENT 软件进行数值模拟, 探究瓦斯隧道内的通风流场特征和瓦斯浓度分布规律, 并分析不同参数条件下隧道洞内的通风效果。结果表明: 在通风 20 min 后隧道内流场基本稳定, 上台阶形成涡流, 使得受污染的空气以及粉尘难以排出, 且在风筒异侧拱脚处出现瓦斯积聚的情况; 台阶法压入式施工通风中, 台阶高度、台阶长度及风管口距上台阶掌子面的距离之间存在优化组合。建议台阶高度取 4~6 m, 台阶长度取 5~15 m, 风筒出口距上台阶掌子面的距离取 10~15 m。

关键词: 铁路隧道; 数值模拟; 台阶法; 瓦斯隧道

中图分类号: U453.5

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0236-09

Optimisation of ventilation flow field and parameters in railway gas tunnels

ZANG Wanjun^{1,2}, DAO Huijuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to effectively reduce the concentration of contaminated gas in the gas tunnel, practical engineering is combined with numerical simulation using FLUENT software to investigate the characteristics of the ventilation flow field and the distribution law of gas concentration in the gas tunnel, and to analyze the ventilation effect of the tunnel under different parameter conditions. Results show that: the flow field inside the tunnel is basically stable after 20 min of ventilation, a vortex is formed on the upper step, which makes it difficult to discharge the polluted air and dust, and gas accumulation occurs at the foot of the opposite side of the wind pipe; in the press-in construction ventilation by the step method, there is an optimal combination of the step height, step length and the distance between the nozzle and the palm surface of the upper step. It is suggested that the height of the step is 4~6 m, the length of the step is 5~15 m, and the distance of the air duct outlet from the palm face of the upper step is 10~15 m.

Keywords: railway tunnels; numerical simulation; step method; gas tunnels

随着我国基建力度的不断加强,隧道的建设规模也不断扩大,部分隧道会穿越煤层地区,为此许多学者针对瓦斯隧道的施工通风流场规律开展大量的研究。李斌强等^[1]通过掌子面最大通风量、供风量及沿程风压损失计算不同工区施工阶段的通风,采用水气分离法处理地下水,利用自动

安全监控系统实时监测隧道瓦斯浓度;安俊杰等^[2]采用计算流体动力学方法模拟风管漏风工况下的瓦斯隧道通风案例,分析漏风面积与漏风位置对隧道瓦斯分布的影响规律;Zhang 等^[3]对通风系统的动态通风特性进行研究,建立了标准瓦斯隧道通风时长计算模型;Zhou 等^[4]阐述了气

收稿日期:2024-07-08

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2023J01344)

第一作者简介:臧万军(1975—),男,吉林农安人,教授,博士,研究方向:地下结构施工力学。

体通风压力的形成及特性,并通过数值模拟验证了气体通风压力对气道气流稳定性的作用;陈治宇等众多学者^[5-6]探究了隧道内通风流场、瓦斯浓度场分布规律,揭示不同台阶长度、通风速度、风筒直径、风筒口距掌子面距离、双风筒技术方案下瓦斯气体的运移规律,并结合现场监测数据进行验证;李冰等^[7]针对特长瓦斯隧道多工作面施工通风流场问题,采用数值模拟软件 Fluent 对隧道多作业面施工通风流场进行分析,探究多作业面通风系统中的射流风机最佳布设方案;周泽林等^[8]基于属性识别理论建立了非煤系地层隧道瓦斯突出的风险评价体系。

综上所述,前人对于瓦斯隧道工况的研究大多只考虑了单一因素,较少同时考虑不同台阶高度和长度等因素下的隧道通风流场和瓦斯浓度分布规律。鉴于此,本文结合实际工程,采用 FLUENT 软件进行数值模拟,以风速和瓦斯体积分数为评价指标,探究铁路瓦斯隧道的通风流场和瓦斯浓度分布规律,并对不同台阶高度、台阶长度及风管口距掌子面的距离进行研究,确定最佳通风参数组合,从而提高铁路瓦斯隧道的通风排气效率。

1 工程概况

某单洞双线铁路隧道长 4 136 m,设计行车速度 350 km/h,铺设无砟轨道,最大埋深约 360 m。隧道分进、出口两个工区,进口为低瓦斯,工区长 2 225 m;出口为高瓦斯,工区长 1 911 m。

隧道周边地质复杂,地貌单元属川东岭谷低山丘陵区。进口段地势较平缓,出口段山势陡缓相接,隧道区覆盖灰岩、泥岩、页岩和煤系地层,岩性复杂多样,主要不良地质灾害为有害气体。隧道穿越的地层碳质含量较多,具有一定的生烃能力。从油气地质条件上看,隧道穿越铜锣峡背斜核部,且隧址区地层断层发育,因此,隧址区是有害气体的运移指向区与有利储集区。

现场对隧道的勘探钻孔进行了有害气体检测,检测结果显示 CH₄ 最大浓度为 9.38%,CO 最大浓度为 0.36%,H₂S 最大浓度为 0.03%,CH₄ 显示浓度高于危险值,CO₂、H₂S 和 CO 低于矿井允许的最高浓度。隧道施工采用压入式通风,在洞口设置 2 台对旋式轴流风机,距离洞口大于 30 m,避免污风循环。采用直径 1.8 m 软式风筒将空气压

入掌子面,风筒布置在起拱线位置。

2 数值计算及模型建立

2.1 理论分析

2.1.1 基本假设

通风时,隧道内的瓦斯与空气混合扩散,在隧道内多种因素的影响下发生对流,且通风流场分布不均匀,瓦斯与空气充分混合后发生紊流。考虑隧道施工时的实际情况,根据流体力学和相关理论,对通风数学模型做出以下假设:

(1)考虑到数值模拟所需精度要求和时间,将隧道内的气体视为不可压缩流体,且为非稳态紊流;

(2)假设隧道内的温度恒定,隧道壁面粗糙度恒定;

(3)假设瓦斯只从掌子面溢出,隧道内的其他位置无瓦斯溢出;

(4)不考虑施工人员和运输设备的影响。

2.2.2 控制方程

湍流模型采用 standard $k-\varepsilon$, 其控制方程为^[11]:

$$(1) \text{连续性方程: } \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$$

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

$$(3) \text{紊流动能 } k \text{ 方程: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i k) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t \partial \varepsilon}{\sigma_k \partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon$$

$$(4) \text{紊流动能耗散率方程: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i \varepsilon) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial x_i} \right) + (c_1 G - c_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$$

$$(5) \text{流体组分质量守恒方程: } \frac{\partial (\rho c_s)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho c_s \mu) = \operatorname{div}[D_s \operatorname{grad}(\rho c_s)] + S_s$$

$$\text{其中, } G = \mu t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_j}{\partial x_i}; \mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$$

式中, v_i, v_j 分别为 i, j 方向上的速度矢量, m/s; x_i, x_j 为 i, j 方向上的 x 坐标; ρ 为流体的密度, kg/m³; p 为气体压力, Pa; μ, μ_t 分别为层流因

子和湍流体动力黏结因子, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; k 为湍流动能, m^2/s^2 ; G 为湍流能量生成率; ε 为湍流能量消散率, m^2/s^3 ; c_s 为瓦斯浓度; D_s 为瓦斯扩散系数; S_s 为瓦斯单位时间体积组分的产生速率; c_1 、 c_2 、 c_μ 、 σ_k 、 σ_ε 为系数。

2.2 模型建立

以隧道出口段为研究对象,通过 Space Claim 软件建立数值计算模型,利用 FLUENT 软件进行数值模拟运算。通风管直径为 1.8 m,将其放置于隧道的拱腰处,距地面的高度为 6 m。台阶高度设置为 5 m,上台阶长度为 10 m,风筒距掌子面的距离为 15 m。为便于模拟分析,结合流体力学的相关理论,选取距掌子面 200 m 的隧道长度进行计算。在距掌子面很短的距离(0.1 m)范围内划定一个空间作为瓦斯涌出源项。利用 FLUENT 软件自适应功能将模型划分为非结构化网格,如图 1 所示。

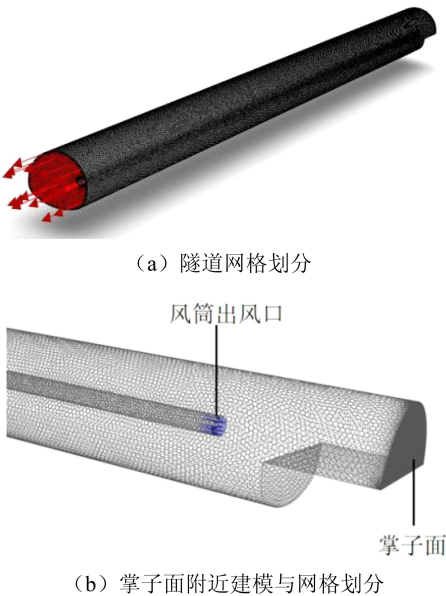


图 1 隧道模型示意

Fig.1 Schematic diagram of tunnel model

2.3 边界条件设置

采用 FLUENT 的三维非稳态组分运输模型求解,数值模拟边界条件参数设置见表 1。

将通风管出口定义为入口边界,风流沿风管垂直掌子面的方向射出,根据所需风量计算速度大小 $V = 14.39 \text{ m/s}$; 将隧道入口定义为出口,类型为压力出流;隧道中所有的壁面均设置为等温绝热、无滑移壁面;用瓦斯源项模拟瓦斯涌出,根

据瓦斯隧道实际涌出量 $1.551 \text{ m}^3/\text{min}$,计算得到掌子面处瓦斯源项 $S = 0.0047 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,设定上台阶掌子面为瓦斯源项。

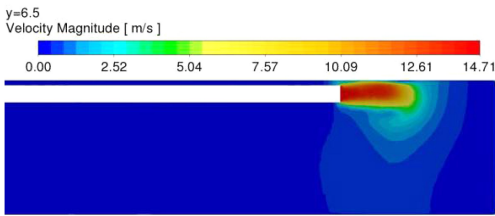
表 1 边界条件设置
Tab.1 Boundary condition settings

类型	边界类型	参数大小
隧道壁面 (拱顶、侧壁、底板)	壁面	粗糙度取 0.5
风管	壁面	粗糙度取 0.5
出风口	速度入口	14.39 m/s
隧道进口	压力出口	出流比率为 1
掌子面	瓦斯源项	0.0047 kg/(m ³ · s)

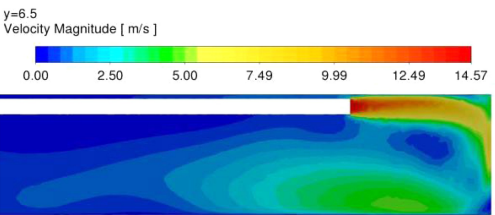
3 通风模拟分析

3.1 通风风流场分析

图 2 为风流场分布云图,由图 2 可知,风流由风筒射入,大部分风流沿射流方向冲击掌子面,小部分风流偏离射流方向向四周扩散。当射流冲击掌子面时,由于隧道内部空间的限制发生回流,从风筒异侧排出洞外,回流风向洞外运移的过程中稀释并带走粉尘和被污染的空气。通风 1 s 时,风流几乎无法到达隧道掌子面,随着通风时间的增加,射流的贴壁效应逐渐明显,并且隧道中的通风流场呈紊流状态。通风 20 min 后,隧道内风流流场没有明显的变化,即认定此刻的风流场已基本稳定,因此选取通风 20 min 作为稳定时刻进行研究。



(a) 通风 1 s



(b) 通风 1 min

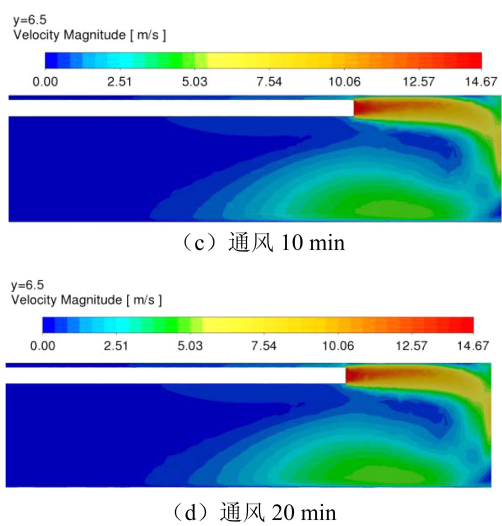


图 2 风流场分布云图

Fig.2 Cloud map of wind flow field distribution

图 3 为稳定时刻下的速度流场矢量图。由图 3 可知,当隧道采用台阶法施工时,风流由风筒射入洞内,在上台阶距离掌子面约 10 m 的位置开始出现偏移,到达掌子面后,受到掌子面的限制,风流表现为贴附射流。当风流到达掌子面后,与其发生撞击,由于隧道内部空间的限制,撞击的风流发生回流,一部分回弹的风流受到射流的卷吸影响,在掌子面前形成涡流。距风筒越远,回流风的风速越大,从整体上看,回流风速小于射流风速。由图 2 和图 3 可知,隧道通风流场存在射流冲击区、涡流区、过渡区和稳定区 4 个区域。

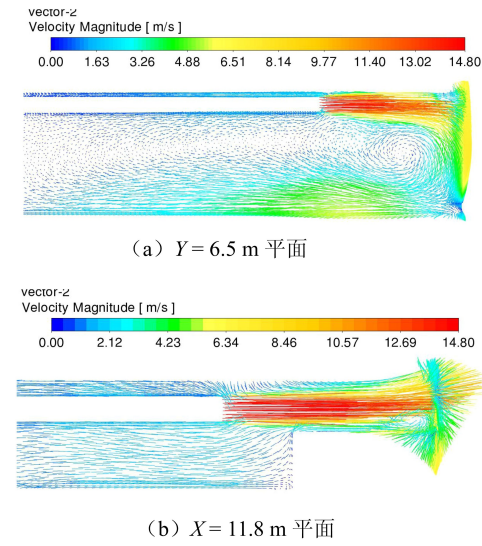


图 3 稳定时刻下的速度流场矢量图

Fig.3 Vector diagram of velocity flow field at the moment of stability

选取断面的 6 条测线对流场进一步研究。#1~#6 测线坐标为 $(6.7, 4, n)$ 、 $(11.8, 4, n)$ 、 $(1.6, 4, n)$ 、 $(6.7, 7, n)$ 、 $(6.7, 10, n)$ 、 $(1.6, 7, n)$, n 取 0~200 m。图 4 为各测线的风速分布规律。由图 4 可知,在掌子面后方风速有波动,这是由于风流受涡流的影响,风速发生改变,降低的风速在涡流区速度增加,当回流风穿过涡流区域后,风速逐渐降低,最后趋于稳定。在距掌子面 120 m 处,各测线的风速基本稳定,表明此处形成稳定的回流,为稳定区。由图可看出,距风筒越近,测线的风速越大;距风筒越远,测线风速越小,且越容易发生波动。随着风流向隧道洞口移动,风速逐渐减小并逐渐稳定,这是由于远离出口,回流风受射流风的影响减小。

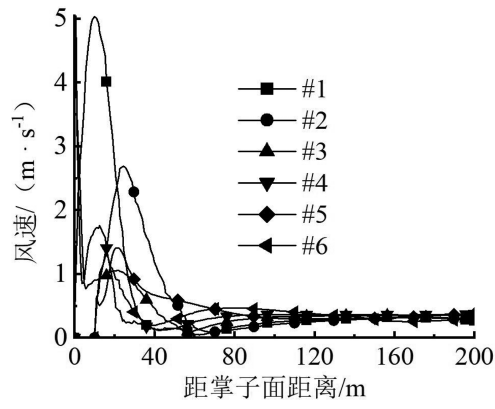


图 4 风速分布规律

Fig.4 Wind speed distribution pattern

3.2 瓦斯运移分布规律

图 5 为上台阶掌子面瓦斯分布情况。当射流到达掌子面后,由于隧道壁面的限制,部分风流横向移动,在风流的作用下,瓦斯向远离风管的方向移动,风管一侧的瓦斯浓度降低。由于风流的作用以及隧道壁面的影响,风管异侧隧道拱脚处发生瓦斯积聚的现象。随着通风时间的增加,掌子面处的瓦斯不断被稀释,但由于风管异侧风速较小,拱脚处的瓦斯积聚区域很难被稀释,瓦斯浓度仍较大;风管一侧由于射流的作用瓦斯浓度降低较快,当通风 20 min 后,掌子面处的瓦斯浓度基本稳定。

图 6 为通风稳定时的瓦斯浓度场分布图。由于风筒异侧风速较低,易稀释瓦斯气体,且部分风流携带瓦斯横向移动,从而在拱脚处出现高浓度区域。由图 Y-Z 面和 X-Z 面可知,稳定时刻的

通风流场回流风稳定,风流中瓦斯均匀扩散,瓦斯随着风流不断向洞口运移,最终排出洞外,隧道内的瓦斯浓度逐渐降低。

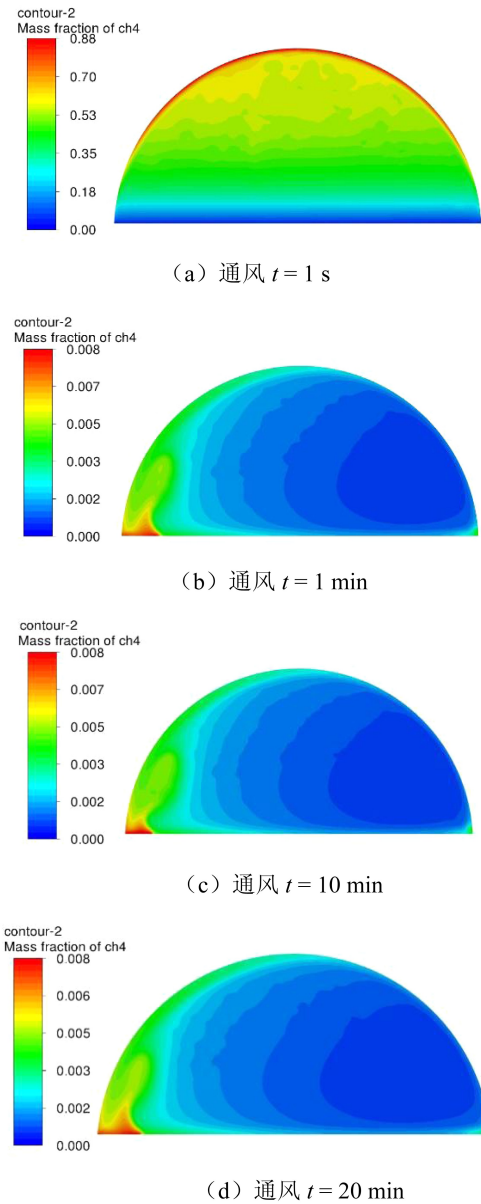
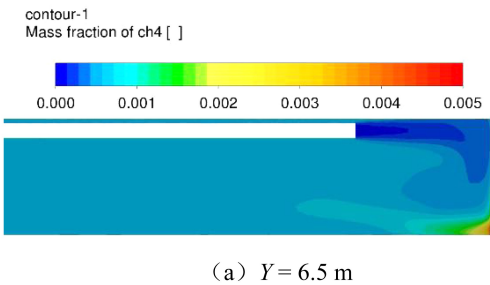
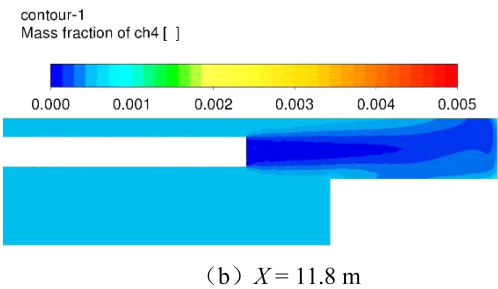


图 5 隧道掌子面瓦斯浓度分布云图

Fig.5 Cloud map of gas concentration distribution at tunnel palm face



(a) $Y = 6.5\text{ m}$



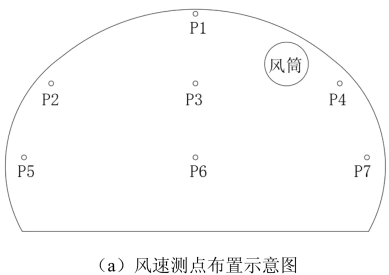
(b) $X = 11.8\text{ m}$

图 6 隧道各平面瓦斯浓度分布云图

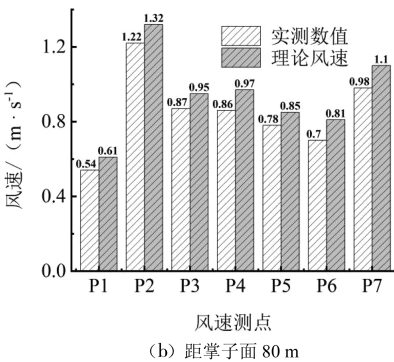
Fig.6 Distribution cloud map of gas concentration in each plane of the tunnel

3.3 模型可行性验证

采用王中岐等^[9]对桐梓隧道现场通风测试的监测数据作为验证实例,验证本数值模型和边界条件的可靠性。根据桐梓隧道的相关信息选取模型试验所涉及的相关参数和物理量,在本文模型的基础上修改各项参数,风筒直径 1.8 m,距地面高度 6.5 m,台阶长度 50 m,风筒出口口距掌子面的距离 30 m;通过建立三维模型,将距掌子面距离 80、120 m 的风速数值模拟结果与实测值进行对比,得到的结果如图 7 所示。图 7(a)为风速测点布置示意图,图 7(b)和图 7(c)为不同断面分析对比图。由图可知,模拟值与实测值相似度较高,两者结果虽有一定的偏差,但变化趋势较为吻合,平均误差小于 15%,表明所选用的数值模拟计算模型具有合理性。



(a) 风速测点布置示意图



(b) 距掌子面 80 m

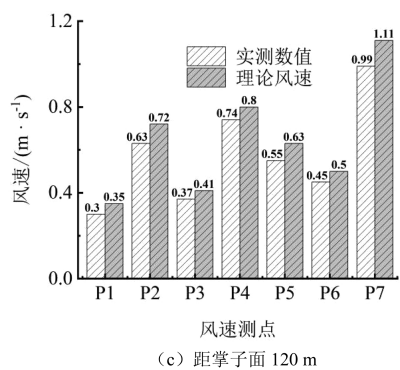


图 7 实测值与模拟值对比图

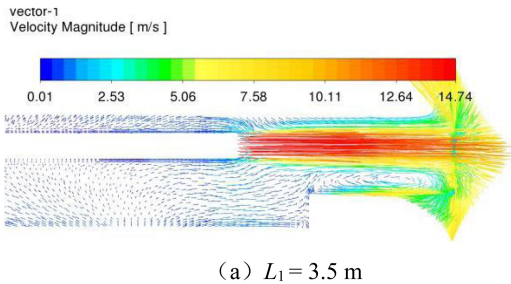
Fig.7 Comparison of measured and simulated values

4 隧道通风规律影响因素研究

设置台阶高度 L_1 为 3.5、4、5、6、7 m,台阶长度 L_2 为 5、10、15、20、30 m,风管出风口距掌子面的距离 L_3 为 5、10、15、20、30 m 进行计算分析,得出最佳的参数组合。

4.1 台阶高度

风管出风口布置在隧道侧部,取 L_1 为 3.5、4、5、6、7 m, L_2 为 10 m, L_3 为 15 m 进行模拟。图 8 为不同工况下的速度矢量图(以 $x = 11.8$ m 为参考面)。当 L_1 为 3.5 m 时,上方台阶空间较大,射流向掌子面射入时未受台阶的影响,能够充分发展。但当射流到达掌子面时,发生碰撞回流,受到台阶的影响而无法充分发展,在回流过程中由于射流的卷吸作用形成较大的涡流区。当 L_1 为 4、5 m 时,由于台阶高度低于风管布置高度,射流受台阶影响较小,能够充分发展,在台阶上方形成较小的涡流区,影响较小。当 L_1 为 6 m 时,由于台阶高度等于风管布置高度,射流受到台阶的影响,在下台阶开挖处发生偏移,形成小涡流,而在台阶上方由于发展空间受限,未形成涡流区。当 L_1 为 7 m 时,台阶高度大于风管布置高度,部分射流在射入时被台阶挡住,在下台阶面前发生偏移。故台阶高度不应大于风管布置高度,否则射流易被挡住不能充分发展。



(a) $L_1 = 3.5$ m

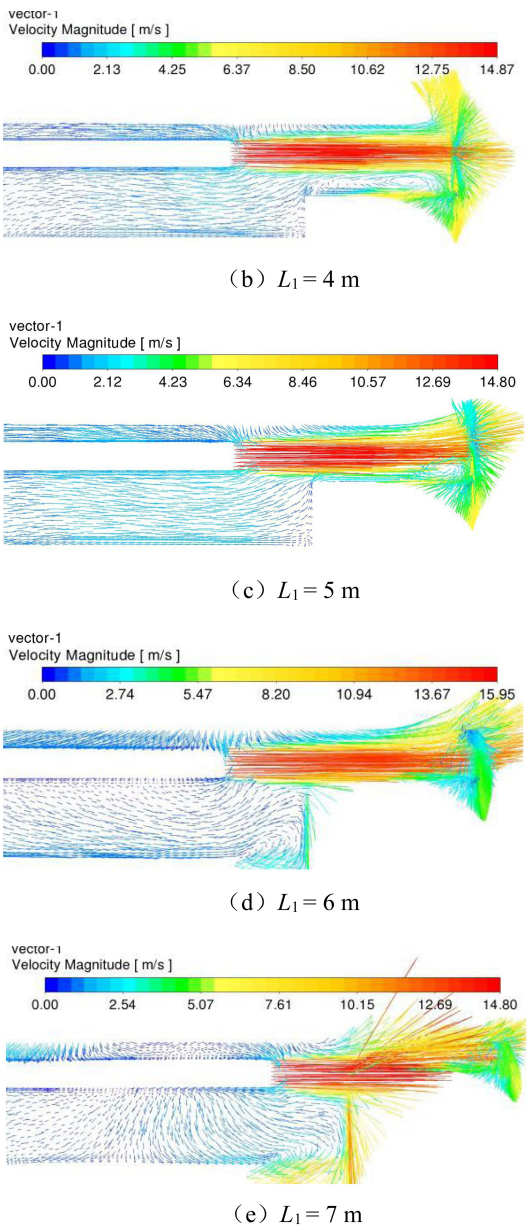


图 8 速度流场矢量

Fig.8 Velocity flow field vector

图 9 为不同工况下的瓦斯浓度,以坐标(6.7,6)建立参考线,由图可知,在距掌子面 50 m 处,各工况瓦斯浓度趋于稳定。当 L_1 为 3.5 m 时,稳定后的瓦斯浓度为 0.081%,随着 L_1 的增大,瓦斯浓度分别降至 0.073%、0.072%、0.061%、0.045%。

综上所述,以速度流场矢量与瓦斯浓度为通风效果评价指标,为确保射流能够充分发展,台阶高度不宜过高也不宜过低,台阶高度 L_1 应小于风管布置高度,取 4~6 m 较为适宜。

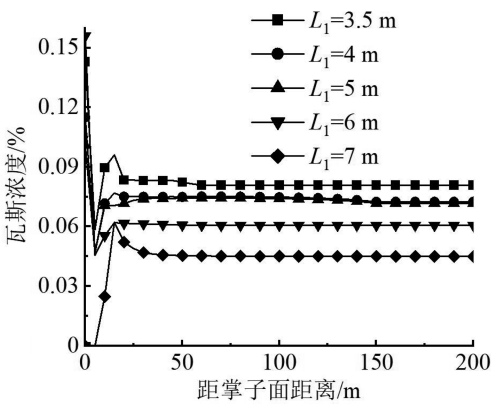


图 9 不同工况下瓦斯浓度

Fig.9 Gas concentration under different working conditions

4.2 上台阶长度

风管出风口布置在隧道侧部,取 L_1 为 5 m, L_2 为 5、10、15、20、30 m, L_3 为 15 m 进行模拟,图 10 为不同工况的风流速度矢量(取 $Y=6.5$ m 为参考面)。由图 10 可知,当 L_2 为 5、10 m 时,掌子面前出现涡流区,射流出现偏移,但形成的涡流和发生偏移的程度较小;当 L_2 为 15 m 时,射流偏移程度开始明显,形成的涡流影响范围也变大;当 L_2 为 20、30 m 时,射流发生较为明显的偏移,且掌子面前形成的涡流影响范围较大,但这两种工况下隧道风流场特征变化不大。由此可得出,当 $L_2 \leq L_3$ 时,射流一般在台阶处发生偏移,这是因为台阶的存在,使得射流运移至台阶处时,发展空间由大变小,射流顺着台阶爬升,故发生偏移;当 $L_2 > L_3$ 时,台阶长度的增加对隧道内流场的影响不大,这是因为当 $L_2 > L_3$ 时,台阶上方的空间可近似看作全断面开挖,即使台阶长度增加,射流的发展空间受台阶长度变化的影响以及台阶面附近流场的影响也越来越小。总之,当 $L_2 \leq L_3$ 时,台阶长度越短,射流偏移越晚,掌子面前形成的涡流越小;当 $L_2 > L_3$ 时,台阶长度增加对射流和风流场的影响不大。

图 11 为不同工况下的瓦斯浓度(以坐标(6.7,6)建立参考线),图中曲线呈先下降后上升的趋势,在距掌子面 50 m 处趋于稳定。当 L_2 为 5、10、15、20、30 m 时,曲线在距掌子面 5 m 处的下降幅度分别为 59.35%、53.52%、54.44%、48.41%、50.12%,在中掌子面 50 m 后,各工况瓦斯浓度基本稳定在 0.075%、0.074%、0.074%、0.077%、0.078%。

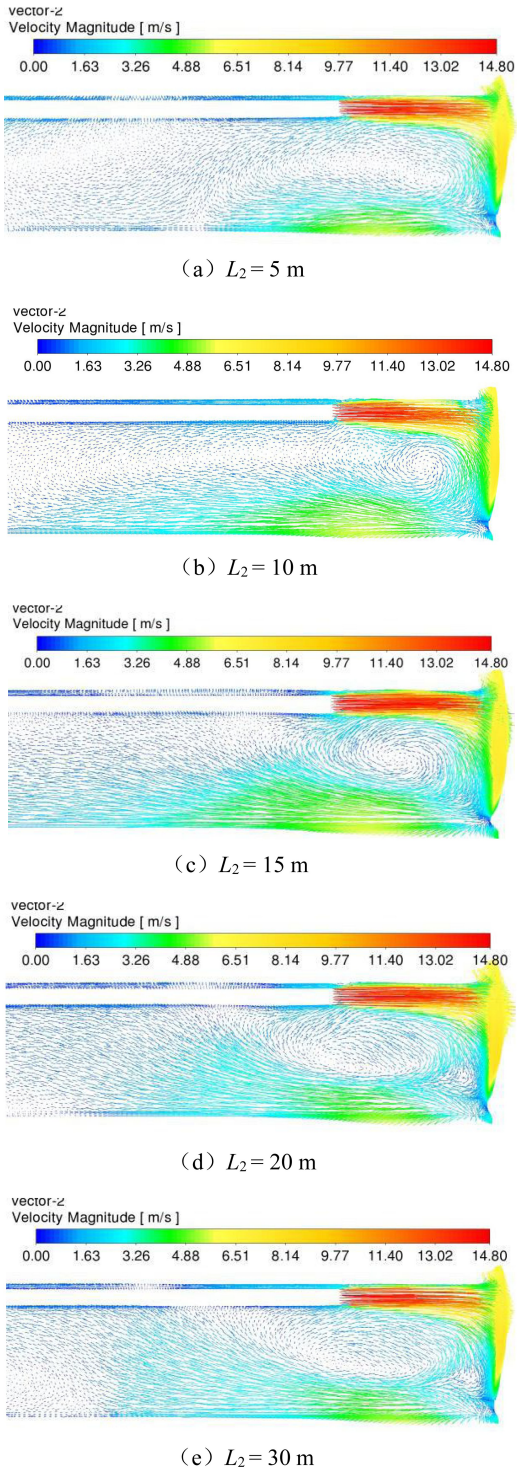


图 10 速度流场矢量

Fig.10 Velocity flow field vector

综上所述,若以速度流场与瓦斯浓度为通风效果评价指标,建议台阶长度 L_2 的取值范围为 5~15 m。

4.3 风管出风口距掌子面距离

风管出风口布置在隧道侧部,取 L_1 为 5 m, L_2

为 10 m, L_3 为 5、10、15、20、30 m 进行模拟,图 12 为 5 种工况下,管口至掌子面的风速变化曲线。由图 12 可知,在风速相同条件下,距离掌子面越近,射流流速变化梯度越大。当距掌子面 0.5 m 时,各工况风流速度分别为 7.68、7.51、5.11、4.54、4.01 m/s,故当 L_3 越大时,射流偏移的越早,对掌子面的冲击效果也越弱。

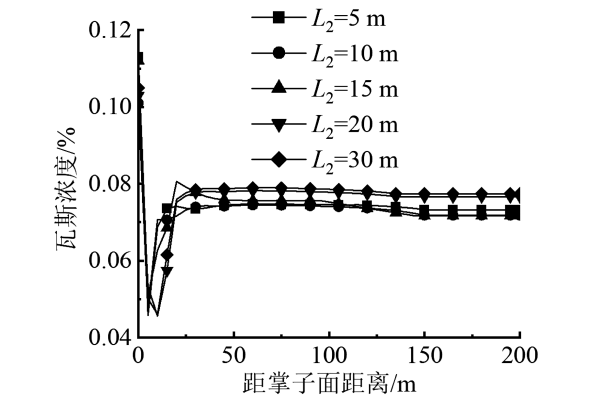


图 11 不同工况下瓦斯浓度

Fig.11 Gas concentration under different working conditions

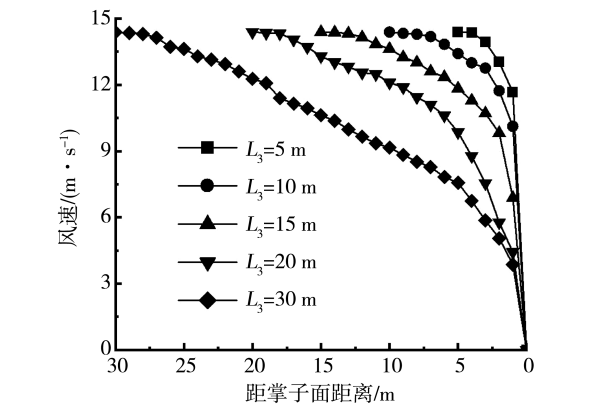


图 12 不同工况下管口至工作面风速变化曲线

Fig.12 Curve of wind speed change from nozzle to working face under different working conditions

图 13 为不同距离的风流速度矢量(取 $Y = 6.5$ m 为参考面)。由图 13 可知,当 L_3 为 5 m 时,隧道风流流场未形成涡流区,且由于风管口距掌子面较近,表现的贴附射流较为明显,此时隧道内流场较为均匀。当 L_3 为 10 m 时,贴附射流效果减弱,掌子面前开始形成明显的涡流区,这是因为射流与掌子面相撞发生回流。由于风筒出口距掌子面的距离较近,回流风在向隧道口运移的过程中被卷吸形成明显的涡流。当 L_3 为 15 m 时,射流偏

移程度不明显,掌子面前形成的涡流区相对较为均匀。当 L_3 为 20 m 时,掌子面前形成的涡流区影响范围扩大。当 L_3 为 30 m 时,掌子面前形成大范围的涡流区,受污染的空气和粉尘在大涡流的影响下极难排出。由此可得出,随着风管出口距掌子面距离的增大,掌子面前所形成的涡流也随之增大。

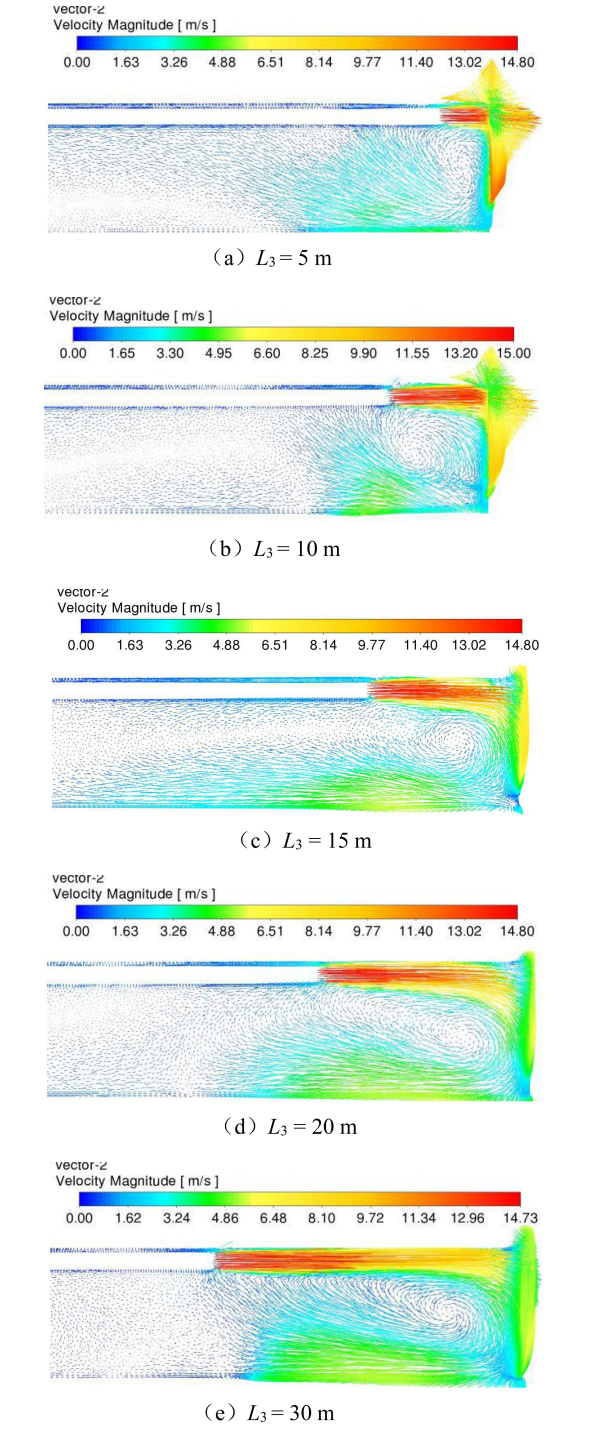


图 13 不同距离的速度流场矢量

Fig.13 Velocity flow field vectors at different distances

图 14 为不同工况下的瓦斯浓度,以坐标 (6.7,6) 建立参考线,由图可知,曲线呈先下降后上升的趋势,并在距掌子面 50 m 处趋于稳定。当 L_3 为 5、10、15、20、30 m 时,掌子面处的瓦斯浓度分别为 0.098%、0.096%、0.100%、0.110%、0.120%,距掌子面 5 m 处的瓦斯浓度与掌子面处的瓦斯浓度相比,下降幅度分别为 40.08%、52.47%、53.52%、43.86%、40.69%。

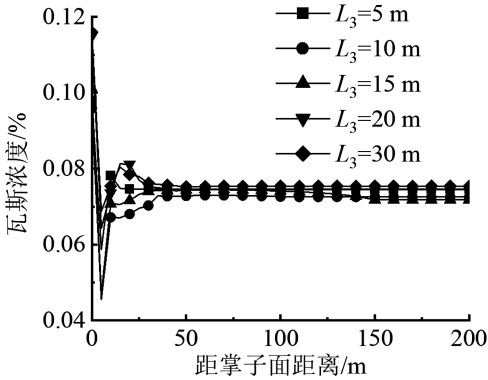


图 14 不同工况下瓦斯浓度

Fig.14 Gas concentration under different working conditions

综上所述,适当增加风管口距掌子面的距离可以加强通风降气的效果。以速度流场矢量与瓦斯浓度为通风效果评价指标,建议 L_3 的取值范围

为 10~20 m。

5 结论

1)持续通风 20 min 后,隧道内流场没有明显变化。回弹的风流在射流的卷吸作用下,在隧道掌子面前形成涡流区,使得有毒气体难以排出,且在风筒异侧拱脚处出现瓦斯积聚的现象。

2)台阶高度 L_1 不宜过高也不宜过低,要满足射流充分发展的条件,台阶高度 L_1 要小于通风管的布置高度,保证射流不被台阶挡住,故 L_1 取 4~6 m 较为适宜。

3)随着 L_2 长度的增加,上台阶工作面前的涡流区覆盖范围逐渐扩大。由速度流场矢量图可知,当 L_3 一定, $L_2 \leq L_3$ 时,射流一般在台阶处发生偏移;当 $L_2 > L_3$ 时,台阶长度增加对隧道内流场的影响不大。故以速度流场与瓦斯浓度为通风效果评价指标时,建议台阶长度 L_2 的取值范围为 5~15 m。

4)风管出风口与上台阶掌子面距离 L_3 越小时,回流风易被射流卷吸;当风管口距掌子面越远时,掌子面前形成的涡流越大,而且有随着 L_3 的增大而增大的趋势,涡流越大越不利于气体的排出。故 L_3 取 10~20 m 为宜。

参考文献:

[1] 李斌强,申慧涛,景银丰,等. 高瓦斯特长高铁隧道通风方案设计及监测分析[J]. 科学技术与工程,2024,24(8): 3407~3415.

[2] 安俊杰,黄飞,王少龙,等. 瓦斯隧道压入式通风风管漏风对瓦斯分布的影响[J]. 科学技术与工程,2024,24(12): 5179~5184.

[3] ZHANG P,LAN H Q. Experimental study on dynamic exhaust law for ventilation system of gas tunnel[J]. Applied Sciences, 2023,13(23): 12783.

[4] ZHOU A T,WANG K. Airflow stabilization in airways induced by gas flows following an outburst[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2016,35:720~725.

[5] 李向平. 超大断面低瓦斯隧道独头施工通风流场研究[J]. 铁道建筑技术,2023(5):175~179.

[6] 杨永斌,王铁君,王庆,等. 考虑双风筒通风隧道瓦斯运移规律数值计算及试验研究[J]. 北京交通大学学报,2023,47(2):169~178.

[7] 李冰,叶爱军,崔鹏杰,等. 特长瓦斯隧道多作业面施工通风流场研究[J]. 现代隧道技术,2022,59(5):118~124.

[8] 周泽林,张凯,张恒,等. 非煤系地层隧道瓦斯突出风险属性识别体系[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(5):1708~1718.

[9] 王中岐,林志,冯森,等. 公路隧道瓦斯运移及通风防灾研究[J]. 中外公路,2023,43(2):164~172.

(责任编辑:陈雯)