

DOI: 10.7672/sgjs2026070121

低瓦斯隧道爆破施工通风系统数值分析与参数研究*

王军

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 为探讨低瓦斯隧道爆破施工过程中通风效果及瓦斯运移特征,依托童家梁隧道工程,采用现场监测与数值模拟相结合的方法,对压入式通风条件下隧道内气流组织形式及瓦斯浓度空间分布规律进行了系统研究。结果表明:隧道内瓦斯浓度随距掌子面距离的增加整体呈现出先迅速衰减、随后小幅回升并最终趋于稳定的变化特征;不同空间位置瓦斯浓度差异显著,左侧墙角区域最高,其次为隧道轴线位置,再次为右侧墙角位置,而通风管中心区域浓度最低;数值模拟结果表明,在压入式通风工况下,隧道风流结构可划分为射流区、回流区及涡流区三类,当通风管布置于隧道右上方时,瓦斯低浓度区主要分布在风筒附近,而高浓度区则集中于远离风筒一侧的左下拱腰区域;风筒直径、通风风量以及风筒出口距掌子面的距离均对掌子面平均瓦斯浓度产生显著影响,其影响程度由大到小依次为风筒直径、通风风量和风筒口距掌子面距离。

[关键词] 隧道;爆破;通风;数值模拟;检测

[中图分类号] U453.5

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0121-07

Numerical Analysis and Parametric Study of Ventilation Systems During Blasting Construction in Low-gas Tunnels

WANG Jun

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: To explore the ventilation effect and gas migration characteristics in the process of blasting construction of a low-gas tunnel, based on the Tongjialiang Tunnel Project, the method of field monitoring and numerical simulation was used to systematically study the airflow organization form and gas concentration spatial distribution law in the tunnel under the condition of forced ventilation. The results indicate that the gas concentration in the tunnel decreases rapidly with the increase in the distance from the tunnel face, then rises slightly, and finally tends to be stable. There are significant differences in gas concentration at different spatial positions. The left corner area is the highest, followed by the tunnel axis position, the right corner position, and the lowest concentration is in the central area of the ventilation pipe. The numerical simulation results indicate that under the condition of forced ventilation, the airflow structure of the tunnel can be divided into three categories: jet zone, recirculation zone, and vortex zone. When the ventilation pipe is arranged on the upper right of the tunnel, the low concentration area of gas is mainly distributed near the air duct, while the high concentration area is concentrated in the left lower arch waist area far away from the side of the air duct. The diameter of the air duct, the ventilation air volume, and the distance between the outlet of the air duct and the face of the tunnel all have a significant impact on the average gas concentration on the face of the tunnel. The degree of influence, from large to small, is the diameter of the air duct, the ventilation air volume, and the distance between the outlet of the air duct and the face of the tunnel.

Keywords: tunnels; blasting; ventilation; numerical simulation; detection

0 引言

在隧道工程建设中,瓦斯隧道因其存在瓦斯积聚、燃烧、爆炸等安全风险,始终是施工安全管理的

* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 王军,助理工程师,E-mail:491445683@qq.com

[收稿日期] 2025-12-30

重点领域^[1-2]。行业统计数据显示,近十年国内隧道施工事故中,瓦斯相关事故占比达 23%,其中因通风系统失效导致的瓦斯超限事故占比超过 60%,对施工安全产生较大威胁。

目前对于瓦斯隧道通风设计及浓度监测的研究较多采用现场实测^[3]和数值模拟^[4-6]相结合的方法。如郭家琛等^[3]构建了瓦斯隧道通风数值计算模型,对通风方案进行系统分析,并通过专用设备对隧道内瓦斯浓度、风速及一氧化碳浓度等参数进行实测,以验证通风模型的可靠性及风筒布置方案的合理性;苗回归等^[5]基于计算流体力学(CFD)方法,利用 Fluent 软件对隧道内瓦斯分布特征进行了数值模拟,并通过正交试验分析断面宽度(A)、断面高度(B)及断面风速(C)等因素对断面平均瓦斯浓度的影响规律,进一步采用多元线性回归方法确定了平均瓦斯浓度的合理监测位置;王晨等^[6]则从煤与瓦斯流固耦合机理出发,借助 COMSOL Multiphysics 数值模拟平台,对三台阶法、二台阶法及全断面法等不同开挖工法条件下煤层瓦斯压力与流速的时变特性进行了对比研究。现有研究从通风系统优化^[7]、瓦斯分布特征^[8]及开挖方式^[6]等多个角度对瓦斯隧道安全问题进行了深入探讨,为瓦斯隧道通风设计和浓度监测提供了重要的理论依据与技术支撑。

本文以童家梁隧道为研究对象,建立隧道三维数值模型,对低瓦斯隧道光面爆破施工通风设计进行了有关分析,为低瓦斯隧道爆破施工提供科学依据和工程参考。

1 工程概况

童家梁隧道进口位于四川省达州市开江县罗山槽村,出口位于达州市达川区夹柏村,起讫里程为 DK74+250—IDK76+462.48,中点里程为 IDK75+356.24,全长 2 212.48m,最大埋深约 150m。进口左线轨面高程为 474.925m,出口左线轨面高程为 420.316m。隧道为单洞双线结构,线间距为 5m。

隧道围岩主要由泥岩和砂岩组成,研究区段属于低瓦斯隧道。地质钻孔检测结果表明,隧道内主

要有害气体为甲烷(CH_4)。隧道围岩级别如表 1 所示。

本隧道共分进口(800m)、出口(1 412m)两个工区,均为低瓦斯工区,采用无轨运输,工区划分具体情况如表 2 所示。

表 2 隧道工区划分

Table 2 Division of tunnel work areas

工区	长度/m	排水情况	瓦斯情况	机械化配套
进口工区	800	反坡排水, -25‰	低瓦斯	普通机械化 配套
出口工区	1 412	洞内其余段 顺坡排水	低瓦斯	普通机械化 配套

2 隧道通风

2.1 隧道通风方式

风管式通风是以风筒作为空气输送通道的一种隧道施工通风方式,根据隧道内气流组织形式的不同,可分为压入式通风、抽出式通风和混合式通风 3 种类型。

根据 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》第 11.2.2 条规定,施工通风方式应根据独头通风长度、断面尺寸、施工方法、有害气体浓度及设备条件等选取,包括压入式、抽出式、混合式等多种方式,结合本隧道的施工条件和通风需求,采用压入式通风作为本工程的通风方案。

2.2 童家梁隧道各工区施工通风长度

童家梁隧道进口、出口工区均采用压入式通风,风机布置在洞外 30m 位置,进、出口工区风管统一采用直径 1.8m 的抗静电、阻燃风管,风管出风口位置距离掌子面 15m,布置在隧道拱顶偏右一侧位置,以保证新鲜空气能够有效送达作业面,满足施工通风及人员安全要求。通风管布置如图 1 所示,进口工区与出口工区作业面最远通风距离如表 3 所示。

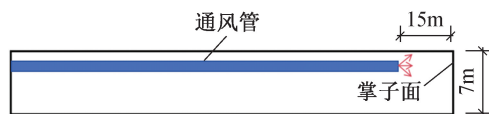


图 1 通风管布置

Fig. 1 Layout of ventilation duct

表 1 正洞围岩级别

Table 1 Rock mass classification for main tunnel

工作面	长度/m	围岩级别					
		Ⅲ		Ⅳ		Ⅴ	
		长度/m	占比/%	长度/m	占比/%	长度/m	占比/%
进口工区	800	0	0	520	65.0	280	35.0
出口工区	1 412	140	9.9	725	51.3	547	38.7

表3 隧道各作业面的最远通风距离

Table 3 Maximum ventilation distance for each tunnel workforce

工区	里程范围	施工长度/m	独头最大通风距离/m	通风方式
进口工区	IDK74+250—IDK75+050	800	830	压入式
出口工区	IDK75+050—IDK76+462.48	1 412	1 442	压入式

3 现场实测分析

在工作面爆破通风一段时间后,进入工作面附近对瓦斯浓度进行检测。选取进口工区距离工作面 200m 以内均匀设置 21 个等间距的监测断面,每 2 个监测断面之间的距离为 10m,通过激光瓦斯检测仪对隧道内的瓦斯浓度进行检测,检测时间为隧道爆破结束 30min 后,测试位置高度为人员呼吸面即距离地面 1.6m 位置处,所测位置为左右侧墙角位置、隧道轴线位置及通风管中心位置,所测曲线如图 2 所示。

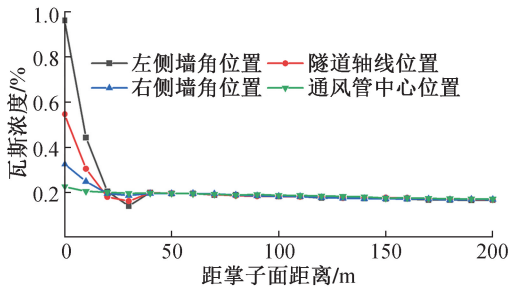


图2 瓦斯浓度变化曲线

Fig. 2 Variation curve of gas concentration

分析图 2 可知,随着测点距掌子面距离的逐渐增加,隧道内瓦斯浓度整体表现出明显下降、随后小幅回升并最终趋于平稳的变化趋势。当距离掌子面约 30m 时,瓦斯浓度降至最低值,之后各测点浓度基本稳定在 0.17%~0.20%,说明在该范围内隧道通风气流已形成相对稳定的流场结构。

从不同测点位置的对比来看,瓦斯浓度在空间分布上存在明显差异,其大小规律为:左侧墙角位置>隧道中心位置>右侧墙角位置>通风管中心位置。其中,通风管中心位置的瓦斯浓度最低,而远离通风管一侧(左侧墙角)出现了较明显的瓦斯聚集现象。分析其原因主要是通风管布置于隧道右侧,气流在通风管附近流速较大、扰动充分,能够有效稀释并带走瓦斯;而隧道左侧墙角区域受主通风气流影响较弱,局部气流速度较小,容易形成低速回流区或滞流区,从而导致瓦斯在该区域累积。此外,墙角位置受几何边界影响,流场发展受限,也进

一步加剧了瓦斯浓度的局部升高。

根据本工程施工方案要求,隧道内瓦斯允许的最高浓度为 0.5%。由图 2 可知,掌子面附近左侧墙角区域及隧道轴线位置的瓦斯浓度均超过该限值。因此,在施工过程中应将上述区域作为通风优化与瓦斯监测的重点控制部位,并采取针对性的通风强化及监测措施,以确保施工安全。

4 数值模拟

4.1 基本假设

隧道内通风风流场受多种因素共同影响,实际分布较为复杂。本文基于工程实际通风工况,采用 ANSYS Fluent 2022R1 软件对低瓦斯隧道爆破施工过程中的通风与瓦斯扩散规律进行数值模拟。ANSYS Fluent 基于有限体积法(finite volume method, FVM)对控制方程进行离散求解,能够有效处理复杂边界条件下的气体流动及污染物输运问题,在隧道通风及瓦斯扩散研究中得到较多应用。为在数值模拟过程中兼顾计算精度与计算效率,并减少非主要因素对分析结果的干扰,在数值计算过程中,对计算模型作如下合理假设。

1) 隧道内部环境为恒温、恒压条件,气体密度取常数,忽略气体流动过程中的热量交换及能量传递。

2) 通风气流视为不可压缩的稳态紊流流动。

3) 隧道壁面沿程粗糙度保持一致。

4) 风筒进口处风流速度分布均匀,并假定其具有各向同性特征。

5) 瓦斯仅在掌子面处以均匀方式涌出。

参考文献[9],依据现场实际条件,在隧道掌子面附近设置厚度为 0.1m 的瓦斯源项区域,用以模拟瓦斯产生与释放过程。瓦斯源项强度 S 由瓦斯实际涌出量确定,其计算公式为:

$$S = \frac{\rho Q}{V} \quad (1)$$

式中: ρ 为瓦斯密度,取值为 $0.716\text{kg}/\text{m}^3$; Q 为瓦斯绝对涌出量(m^3/min),取值为 $4.56\text{m}^3/\text{min}$; V 为瓦斯源项区域体积(m^3),取值为 3.85m^3 。

4.2 隧道几何模型

基于童家梁隧道的实际尺寸,为兼顾通风模拟的可行性与计算精度,对隧道模型进行了适当简化,模型长度设置为 200m,围岩等级为 IV~V 级。设计方案中,风筒直径为 1.8m,高度不低于隧道净高的 2/3。结合现场施工情况,当隧道进入瓦斯工区时,风筒出口距掌子面约 15m,风管布置于隧道右侧拱顶附近,并在距离掌子面约 0.1m 的薄层区域

设置瓦斯源项,用于模拟瓦斯释放过程。

隧道物理模型及网格划分如图 3 所示。三维直角坐标系原点置于隧道出口断面左下角,其中 x 轴沿隧道横向、 z 轴沿垂向、 y 轴沿隧道纵向。模型采用 Meshing 软件进行非结构化网格划分,并在掌子面及拱顶区域进行局部加密,以提高关键区域的计算精度。

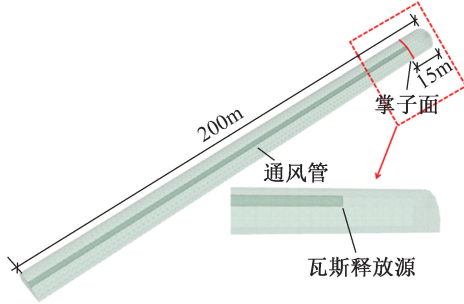


图 3 隧道几何模型及网格划分

Fig. 3 Tunnel geometric model and mesh generation

4.3 边界条件设置

在数值模拟过程中,为真实再现隧道通风及瓦斯扩散行为,对模型边界条件进行了合理设定。隧道入口采用自由出口(outflow)边界条件,以模拟空气流体自由流入或排出的状态;隧道拱顶、侧壁及地面均定义为壁面(wall),用于反映固体边界对流场的约束作用。风管作为空气输送通道,其管壁亦设置为壁面,而风管出口施加速度入口(velocity inlet)边界条件,以保证新鲜空气以设计速度送达掌子面。在掌子面区域引入瓦斯源项(source term),模拟施工过程中瓦斯的涌出过程。通过上述边界设置,可较为准确地重现隧道施工期间的空气流动与瓦斯扩散特性,为后续流场分析与通风优化提供可靠基础。

4.4 模拟结果分析

4.4.1 模型有效性验证

为验证本文所建立数值模型的合理性与计算结果的可靠性,将数值模拟结果与现场实测瓦斯浓度数据进行对比分析。选取爆破后通风 30min 内,掌子面左侧墙角位置处的瓦斯浓度作为对比对象。掌子面左侧位置处数值模拟结果与现场实测结果的对比曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,数值模拟所得掌子面左侧墙角位置处瓦斯浓度随时间的变化趋势与现场实测结果基本一致,均表现为爆破后初期瓦斯浓度迅速升高并达到峰值,随后在通风作用下逐渐衰减并趋于稳定。在通风 30min 内,数值模拟结果显示掌子面左侧墙角位置处瓦斯浓度最大值为 0.88%,而现场实测瓦斯浓度最大值为 0.96%,两者之间的最大相对

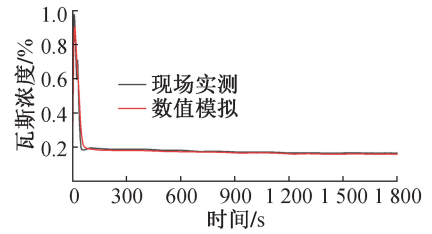


图 4 模型有效性验证

Fig. 4 Validation of the numerical model

误差约为 9%,处于工程计算允许范围内。

4.4.2 隧道内风速分布分析

为揭示压入式通风条件下隧道内风流结构及其速度分布特征,采用数值模拟方法对隧道施工区域的风速场进行了计算分析。风速分布云图能够直观反映射流发展、回流形成及涡流区域的空间分布情况,为风流流场特征分析及通风优化提供理论依据。隧道风速分布云图如图 5 所示。

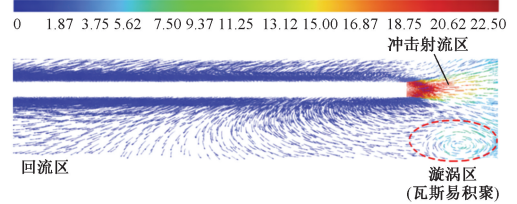


图 5 隧道风速分布

Fig. 5 Distribution of wind velocity in the tunnel

由图 5 可知,在压入式通风条件下,当风流达到稳定状态时,隧道内部的风场呈现出明显的空间分区特征,可划分为射流区、回流区及涡流区三类。风流从风管出口高速喷出,受射流卷吸效应影响,会带动周围空气一同向前运动,从而使射流区范围显著扩大。在风流到达施工掌子面时,由于受到空间约束及作业面阻挡,部分气流形成回流,其中靠近射流的回流风会再次被卷吸回掌子面区域,形成稳定的局部涡流;而远离射流的回流风则沿隧道向洞口方向运动,并在远离风管出口后逐渐扩散,实现整个断面的空气回流。该流场特征导致涡流区内污染气体循环流动,排出效率降低,从而成为瓦斯容易积聚的高风险区域。因此,在施工过程中,涡流区应被明确列为瓦斯浓度的重点监测与控制区域,以确保通风安全性和施工人员作业环境质量。

4.4.3 隧道不同断面位置的瓦斯浓度分布分析

为分析掌子面区域瓦斯浓度的空间分布特征,在通风管布置于隧道右上角并采用压入式通风的情况下,对通风 30min 后掌子面瓦斯浓度分布进行了数值模拟分析,如图 6 所示。瓦斯浓度分布云图可以直观反映通风作用下瓦斯在不同区域内的积

聚与扩散特征,并结合风速分布结果,对掌子面局部通风效果进行综合分析。

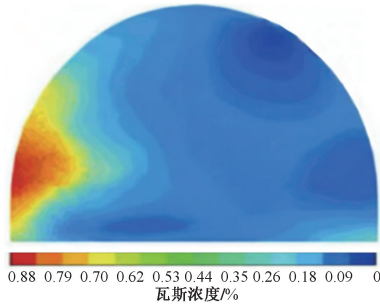


图 6 掌子面瓦斯浓度云图

Fig. 6 Gas concentration contour distribution at the tunnel face

由图 6 可知,当通风管布置于隧道右上角并采用压入式通风时,掌子面瓦斯浓度呈现明显的空间非均匀分布。结合风速分布云图可知,隧道左下角形成涡流区,该区域局部风速较低,通风效率不足,瓦斯容易在此累积。涡流区位于远离通风管射流的拱腰位置,空气流动受限,形成滞留或低速回流,从而导致瓦斯浓度相对较高。数值模拟结果显示,通风开始 30min 后,左下角瓦斯浓度虽趋于稳定,但仍高于其他区域,表明局部通风难以充分稀释涡流区污染气体。

相较之下,通风管右上角区域受射流直接作用,风速较大、扰动充分,瓦斯稀释与排出条件较优,浓度最低。分析结果表明,在单一压入式通风条件下,整体通风可满足施工需求,但涡流区仍存在瓦斯积聚风险。因此,应针对涡流区采取局部通风强化措施,增加监测点进行实时浓度监控,同时可通过优化风管出口方向或增设辅助风管,进一步提升局部通风效果和作业环境安全性。

5 响应曲面法下掌子面瓦斯浓度影响因素分析与优化

考虑到瓦斯扩散过程受风管参数影响显著,风管在通风模拟中采用空气动力学模型,其流场与瓦斯浓度分布随风筒直径、风筒口距掌子面距离以及风量变化而变化。单独以风筒直径或风量作为影响因子难以反映多因素之间的协同作用。因此,引入风筒直径与风筒口距离、风量之间的综合效应,通过响应曲面法分析各因素对掌子面平均瓦斯浓度的影响。

掌子面瓦斯浓度对通风参数敏感性更高,可直接反映局部瓦斯积聚程度,采用 Box-Behnken 设计 (BBD) 方法,以出风量 (A)、风筒距掌子面距离 (B)、风筒直径 (C) 为影响因子,以掌子面平均瓦斯

浓度 (C_{avg}) 为优化目标,进行三因素三水平复合设计。利用 Design-Expert13 软件设计 17 组试验方案,其中包括 5 组中心点重复试验。因素水平及编码值对照如表 4 所示,具体试验方案及模拟数据如表 5 所示。

表 4 Box-Behnken 试验因素水平及编码值对照

Table 4 Factor levels and coded values of the box-behnken design

因素	-1	0	+1
出风量 $A/(m^3 \cdot \min^{-1})$	20	25	30
风筒距掌子面距离 B/m	10	15	20
风筒直径 C/m	1.6	1.8	2.0

表 5 掌子面瓦斯浓度响应曲面试验方案及数据

Table 5 Response surface experimental design and results for gas concentration at the working face

编号	$A/(m^3 \cdot \min^{-1})$	B/m	C/m	平均浓度/%
1	20	10	1.8	0.328 5
2	30	10	1.8	0.308 8
3	20	20	1.8	0.338 5
4	30	20	1.8	0.319 0
5	20	15	1.6	0.342 0
6	30	15	1.6	0.318 6
7	20	15	2.0	0.298 9
8	30	15	2.0	0.283 6
9	25	10	1.6	0.328 2
10	25	20	1.6	0.347 6
11	25	10	2.0	0.295 0
12	25	20	2.0	0.298 3
13	25	15	1.8	0.328 6
14	25	15	1.8	0.328 6
15	25	15	1.8	0.328 6
16	25	15	1.8	0.328 6
17	25	15	1.8	0.328 6

基于上述响应曲面试验数据,通过最小二乘法拟合响应值与响应因子之间的关系,得到可表达掌子面平均瓦斯浓度的多项回归方程模型。

为考察优化模型的有效性,对模型进行可信度分析与方差分析。可信度分析如表 6 所示。

表 6 模型可信度分析

Table 6 Model adequacy analysis

指标	数值
标准差	0.000 7
平均值	0.320 6
变异系数 $CV/\%$	0.203 8
决定系数 R^2	0.999 4
校正决定系数	0.998 7
预测残差值	0.990 6
信噪比	127.43

由表 6 可知, CV 为 0.203 8% < 10%, 说明模型拟合稳定可靠; 决定系数和校正决定系数均高于

0.995,说明模型能够解释约 99.56%的数据变化;预测残差小,模型可信度高。

二次响应曲面模型的方差分析结果如表 7 所示。由表 7 可知,模型的 F 值为 1 326.36,对应的 P 值小于 0.000 1,表明所建立的响应曲面模型在统计意义上极显著,模型具有良好的可靠性。该 F 值如此之大仅有 0.01%的概率是由随机噪声引起的,说明模型对试验数据具有较强的解释能力。

表 7 方差分析

Table 7 Analysis of variance (ANOVA) for the model

方差分析	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	0.005 1	9	0.000 6	1 326.36	<0.000 1
A	0.000 8	1	0.000 8	1 780.43	<0.000 1
B	0.000 2	1	0.000 2	541.10	<0.0001
C	0.003 2	1	0.003 2	7 585.58	<0.000 1
AB	4.0×10^{-8}	1	4.0×10^{-8}	26.40	0.000 5
AC	0	1	0	41.30	0.000 4
BC	0.000 1	1	0.000 1	138.81	<0.000 1
A^2	0.000 1	1	0.000 1	334.47	<0.000 1
B^2	3.6×10^{-6}	1	3.6×10^{-6}	8.43	0.022 8
C^2	0.000 6	1	0.000 6	1 437.27	<0.000 1
残差	3.0×10^{-6}	7	4.27×10^{-7}	-	-
失拟项	3.0×10^{-6}	3	9.97×10^{-7}	-	-
纯差	0	4	0	-	-

在各模型项中,当 P 值小于 0.05 时,说明该因素或交互项对响应变量具有显著影响。本研究中,一次项 A (风量 Q), B (风筒口距掌子面距离 L), C (风筒直径 D),交互项 AC , BC 以及二次项 A^2 , B^2 , C^2 均为显著模型项,表明各因素不仅对掌子面瓦斯浓度具有显著影响,而且因素之间存在明显的交互作用。

利用 Design-Expert13 软件绘制出掌子面平均瓦斯浓度的响应曲面图和等高线图, A , B , C 分别代表风筒直径、风筒口距掌子面距离、出风量,掌子面平均浓度响应曲面如图 7 所示。

分析图 7 可知,出风量、风筒距掌子面距离、风

筒直径对瓦斯浓度的影响规律存在显著差异。随着风筒直径增大,掌子面平均瓦斯浓度呈现快速降低的趋势;通风量增加,瓦斯浓度降低,其降幅小于风筒直径;而风筒口距掌子面越远,瓦斯浓度越高。因此选取较大的风筒直径与通风量、较小的距离时,瓦斯浓度处于最小值。由图 7 可知,三因素交互作用明显,尤其是风筒直径与风筒口距离的交互作用最显著,基于响应曲面分析,对于掌子面平均瓦斯浓度的影响程度主次顺序为:风筒直径(C)>风量(A)>风筒口距掌子面距离(B)。

6 结语

本研究结合童家梁隧道工程,通过现场实测与数值模拟相结合的方法,对低瓦斯隧道爆破施工条件下的瓦斯分布特征进行了研究,主要结论如下。

1) 现场实测结果表明,隧道内瓦斯浓度随距掌子面距离的增大呈现“先快速降低、后略有回升、最终趋于稳定”的变化规律,不同测点位置瓦斯浓度存在明显空间差异,其大小规律为:左侧墙角位置>隧道中心位置>右侧墙角位置>通风管中心位置。

2) 数值模拟结果显示,在压入式通风条件下,隧道内风流流场可划分为射流区、回流区和涡流区,在风管布置于隧道右上角条件下,瓦斯最低浓度区位于风筒附近,而最大浓度区集中于远离风筒侧的左下角拱腰位置,该区域与风速分布中的涡流区位置高度一致。

3) 研究结果表明,单一压入式通风在满足总体通风需求的同时,仍可能在局部区域形成瓦斯积聚风险。针对远离风筒侧的涡流控制区域,有必要在施工中采取局部通风强化、优化风筒布置或加强监测等措施,以提高低瓦斯隧道爆破施工的安全性。

4) 基于响应曲面法的参数优化分析结果表明,风筒直径、风量及风筒口距掌子面距离对掌子面平均瓦斯浓度均具有显著影响,其中影响程度由大到

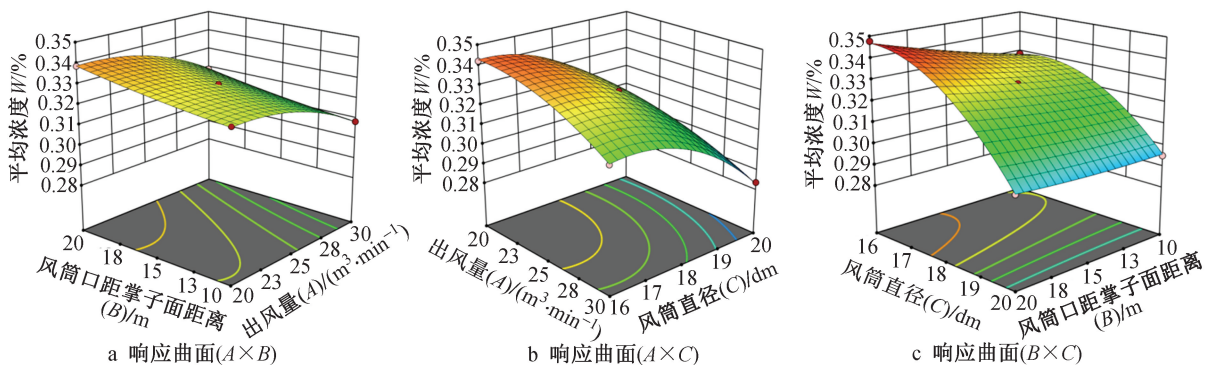


图 7 掌子面平均浓度响应曲面

Fig. 7 Response surface of the average concentration at the tunnel face

小依次为风筒直径、风量、风筒口距掌子面距离,且风筒直径与风筒口距离之间存在显著交互作用。通过合理组合通风参数,可有效降低掌子面瓦斯浓度,验证了响应曲面法在低瓦斯隧道通风参数优化中的适用性和可靠性。

参考文献:

- [1] 辛志军,宋子源,严荔,等. 二次衬砌台车处瓦斯分布规律参数化研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3):54-59.
XIN Z J, SONG Z Y, YAN L, et al. Parameterized study on gas distribution law at the secondary lining trolley [J]. Construction technology, 2024, 53(3): 54-59.
- [2] 李克刚,周高青,满永平. 某特长铁路隧道斜井转正洞施工通风方式研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3):110-116,122.
LI K G, ZHOU G Q, MAN Y P. Research on ventilation methods for the construction of a special long railway tunnel with an oblique shaft turning into a main tunnel [J]. Construction technology, 2024, 53(3): 110-116, 122.
- [3] 郭家琛,徐磊磊,许王亮,等. 基于数值模拟和现场试验的瓦斯隧道通风设计优化研究[J]. 陕西煤炭,2025,44(7):139-144.
GUO J C, XU L L, XU W L, et al. Optimization of ventilation design for gas tunnels based on numerical simulation and field experiments[J]. Shaanxi coal, 2025, 44(7): 139-144.
- [4] 辛志军,宋子源,严荔,等. 二次衬砌台车处瓦斯分布规律参数化研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3):54-59.
XIN Z J, SONG Z Y, YAN L, et al. Parameterized study on gas distribution law at the secondary lining trolley [J]. Construction

technology, 2024, 53(3): 54-59.

- [5] 苗回归,黄飞,李树清,等. 基于数值模拟-多元线性回归的大断面隧道平均瓦斯浓度检测位置研究[J]. 现代隧道技术,2023,60(5):128-135.
MIAO H G, HUANG F, LI S Q, et al. Study on detection location of average gas concentration in a large section tunnel based on numerical simulation-multiple regression [J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(5): 128-135.
- [6] 王晨,李树清,袁志刚,等. 大断面瓦斯隧道不同开挖方式瓦斯运移规律[J]. 矿业工程研究,2025,40(2):71-78.
WANG C, LI S Q, YUAN Z G, et al. Gas migration patterns in large cross-section gas tunnels under different excavation methods [J]. Mineral engineering research, 2025, 40(2): 71-78.
- [7] 何晓东. 白云山隧道高瓦斯斜井通风系统优化论证[J]. 四川建材,2024,50(11):165-167.
HE X D. Optimization demonstration of ventilation system of high gas inclined shaft in Baiyun Mountain tunnel [J]. Sichuan building materials, 2024, 50(11): 165-167.
- [8] 王贺,田成林,王清标,等. 瓦斯隧道爆破方案优化及掌子面处瓦斯运移规律研究[J]. 爆破,2024,41(4):187-196.
WANG H, TIAN C L, WANG Q B, et al. Optimization of gas tunnel blasting scheme and study on gas transportation law at working face [J]. Blasting, 2024, 41(4): 187-196.
- [9] 刘强. 高瓦斯地层公路隧道瓦斯运移扩散特征及通风优化措施研究[J]. 市政技术,2025,43(12):55-64.
LIU Q. Study on gas transportation and diffusion characteristics and ventilation optimization measures in highway tunnels with high-gas-content formations [J]. Journal of municipal technology, 2025, 43(12): 55-64.

(上接第 120 页)

- [3] 高大,王刚. 浅埋暗挖过街通道施工影响分析[J]. 上海公路,2025(3):52-55.
GAO D, WANG G. Construction impact analysis of shallow buried culvert street crossings [J]. Shanghai highways, 2025(3): 52-55.
- [4] 刘性锋,王梁,任相利,等. 超浅埋暗挖车站隧道下穿城市主干道沉降控制技术[J]. 科技和产业,2024,24(16):265-270.
LIU X F, WANG L, REN X L, et al. Settlement control technology for ultra shallow buried and underground excavated station tunnels crossing urban main roads [J]. Science technology and industry, 2024, 24(16): 265-270.
- [5] 李金奎,任恒,杨承源. 浅埋暗挖法隧道中临时仰拱对支护体系的作用机理分析[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(12):17-23.
LI J K, REN H, YANG C Y. Analysis of working mechanism of temporary inverted arch on support system in shallow-buried underground-excavated tunnel [J]. Urban mass transit, 2023, 26(12): 17-23.

- [6] 高波,钱叶存,朱小建,等. 改进 CRD 法在武汉三级阶地地下通道施工中的应用[J]. 铁道建筑,2018,58(7):76-79.
GAO B, QIAN Y C, ZHU X J, et al. Application of improved CRD method in construction of underpass in Wuhan III grade terraces [J]. Railway engineering, 2018, 58(7): 76-79.
- [7] 王秀婷,唐昌尧,方新雷,等. 地铁盾构隧道下穿既有地下人行通道建筑结构影响分析[J]. 科技通报,2024,40(9):64-70.
WANG X T, TANG C Y, FANG X L, et al. Influence of metro tunnel excavation on existing underground passage building structure [J]. Bulletin of science and technology, 2024, 40(9): 64-70.
- [8] 徐金刚. 地下通道施工对临近桥墩影响的数值分析[J]. 江苏建筑,2023(1):56-60.
XU J G. Numerical simulation analysis of the influence of underground passage construction on adjacent bridge pier [J]. Jiangsu construction, 2023(1): 56-60.