

超大断面隧道三阶梯施工段风流场规律研究

牛瑜, 杨应迪

安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年12月25日; 录用日期: 2026年2月9日; 发布日期: 2026年3月13日

摘要

针对超大断面三阶梯工法隧道通风效率低、风流场不均及瓦斯积聚风险问题, 本文提出适配性通风优化策略, 揭示复杂工况下风流运动规律。以昭通隧道为研究对象, 其断面面积达 131 m^2 , 结合需风量修正结果与CFD数值模拟, 基于RNG $k-\varepsilon$ 模型构建三维通风模型, 分析各阶梯段风速分布、涡流特征, 验证风机与风管布局合理性。研究表明, 风筒出口风速 13.59 m/s 时, 掌子面附近形成贴壁射流, $0\sim 18\text{ m}$ 区域涡流显著, 三阶梯下部风流扩散能力较弱, 易导致瓦斯积聚。通过调整风筒位置、优化射流角度可有效抑制涡流, 提升瓦斯稀释效率。该研究明确三阶梯工法下风流场的非均匀分布特性, 为超大断面隧道的通风系统优化及安全施工提供理论支撑。

关键词

三阶梯施工法, 超大断面隧道, 风流场规律, 数值模拟

Study on Airflow Field Law of Three-Step Construction Section in Super-Large Cross-Section Tunnel

Yu Niu, Yingdi Yang

School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: December 25, 2025; accepted: February 9, 2026; published: March 13, 2026

Abstract

To address the issues of low ventilation efficiency, uneven airflow distribution, and gas accumulation risks in super-large cross-section tunnels constructed by the three-step method, this study proposes an adaptive ventilation optimization strategy and reveals the airflow movement laws under complex working conditions. Taking Zhaotong Tunnel as the research object with a cross-sectional

area of 131 m², a three-dimensional ventilation model was established based on the RNG $k-\varepsilon$ model, integrating corrected air demand results and CFD numerical simulation. The wind speed distribution and vortex characteristics in each step section were analyzed, and the rationality of fan selection and air duct layout was verified. The results indicate that when the air duct outlet wind speed is 13.59 m/s, a wall-attached jet is formed near the working face, with significant vortices in the 0~18 m region. The lower part of the three-step structure exhibits weak airflow diffusion capacity, which is prone to gas accumulation. Adjusting the air duct position and optimizing the jet angle can effectively suppress vortices and improve gas dilution efficiency. This study clarifies the non-uniform distribution characteristics of the airflow field under the three-step construction method, providing theoretical support for the ventilation system optimization and safe construction of super-large cross-section tunnels.

Keywords

Three-Step Construction Method, Super-Large Cross-Section Tunnel, Airflow Field Rules, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 综述

我国是多山的国家, 75%的国土上为崇山峻岭, 我国中西部地区更为显著。近年来, 随着西部大开发战略的推进, 隧道在工程项目建设中所占的比重越来越大[1]。隧道经常会成为一个工程项目的控制性工程, 山区特长公路隧道、铁路隧道、水工隧洞的频繁出现, 使得隧道施工通风对隧道安全快速施工成为一个重要的课题。隧道通风在隧道施工和运营过程中扮演着至关重要的角色。首先, 在隧道施工过程中, 通风系统能够提供新鲜空气, 排除粉尘及各种有害气体, 创造良好的劳动环境, 保障施工人员的健康与安全。这一点在公路隧道施工中尤为重要, 因为随着隧道长度的不断增加, 通风问题成为影响施工安全的关键因素。大断面隧道施工过程中的风流场规律研究对于确保施工安全至关重要[2] [3]。

近些年, 随着国内大断面长距离隧道的快速发展, 针对大断面瓦斯隧道的风流流动和如何合理通风被提到了一个前所未有的高度。对于隧道内施工风流流动和流场的研究, 到上世纪 60 年代才具备了较为完整的理论分析和模型试验研究, 并在原有的基础上加深了对隧道工作面通风特性的认识。

其中, 徐昆仑[4]运用 CFD 软件 Fluent 对瓦斯隧道内的掘进工作面进行模拟研究, 建立了用于工作面流场模拟的几何模型, 对掘进工作面的流场进行验证, 得到了掘进工作面风流流动的一般规律, 为防止瓦斯积聚提供了理论基础。

陈选生[5]根据成贵铁路兴隆坪隧道施工, 运用理论分析、现场验证等方法对高瓦斯隧道施工通风难题进行研究, 分析长大瓦斯隧道施工方法的同时, 进一步确定了瓦斯隧道施工总体通风方案, 计算了瓦斯隧道通风参数, 选择了合理的通风机械设备。

Suo Liang 等人[6]为研究通风参数对大段公路隧道瓦斯运动的影响, 以四川省伊金高速公路卡哈洛一号三车道隧道项目为研究对象, 利用 Fluent 数值模拟软件对瓦斯隧道施工进行模拟, 建立了隧道内瓦斯运动数学模型。得到了隧道施工中气体浓度的时空分布特征, 分析了通风参数对气体运动的影响。

Wang Yuqi 等人[7] [8]通过数值模拟和实验, 建立了相关的三维数值模型, 研究了瓦斯隧道施工期间的气流结构, 得出了风流运移规律和瓦斯扩散特性, 对隧道安全施工具有重要意义。

安天明[9]立足隧道工程现场实测条件, 系统阐释了特长隧道通风系统的设计原理与布设方案, 并通过现场工程实践完成验证, 取得了理想的应用成效。

马建华等[10]以哈巴隧道为工程依托, 针对高海拔隧道掌子面需风量计算、通风机选型及工况参数匹配等关键问题展开研究, 据此提出适配性通风方案, 实现了掌子面通风效果的有效提升。

李明等[11]借助 Fluent 数值模拟软件, 揭示了隧道掘进阶段扬尘浓度分布规律与风流场演化特征, 基于模拟结果提出了针对性的通风方案优化策略。

唐宏辉等[12]探明了带上盖开发模式下隧道结构的通风流场分布特性, 研究成果可为隧道通风机布设参数的优化设计提供理论支撑。

蒋仲安等[13]构建了隧道爆破施工阶段压入式通风数值模型, 探究了海拔高度、通风距离及通风量等关键参数对污染物运移规律的影响机制, 运用灰色关联度分析法完成了各影响因素的敏感性排序。

总而言之, 前人研究在隧道通风流场规律、瓦斯运移特性及通风参数优化等方面取得了阶段性成果, 有效支撑了常规隧道工程建设, 但结合当前超大断面、复杂地质的隧道建设新需求, 针对三阶梯等超大断面专用工法的流场耦合机制、多因素动态耦合调控等研究仍显薄弱。面向我国山区隧道建设的持续推进, 未来需进一步强化“数值模型-现场监测-智能调控”的深度融合, 以更好地适配复杂工程需求, 助力隧道施工通风技术向更精准、更智能的方向发展。

本文针对昭通隧道的三阶梯超大断面隧道专用工法, 开展“多台阶空间流场耦合机制”研究, 建立考虑“台阶高度、台阶间距、施工顺序”的工法适配性数值模型, 突破现有模型对“单一空间结构”的依赖, 实现通风规律与参数优化的“工法定制化”, 满足超大断面隧道施工需求。

2. 工程背景

新建重庆至昆明高速铁路云贵段站前工程 YKYGZQ-4 标段, 位于云南省彝良县与昭通市之间, 正线全长 16.44 km。项目以昭通隧道为主, 全长 16,260 m, 占线路总长的 98.9%, 是全线控制性工程, 属 I 级高风险隧道。昭通隧道的地质纵断面图如图 1。

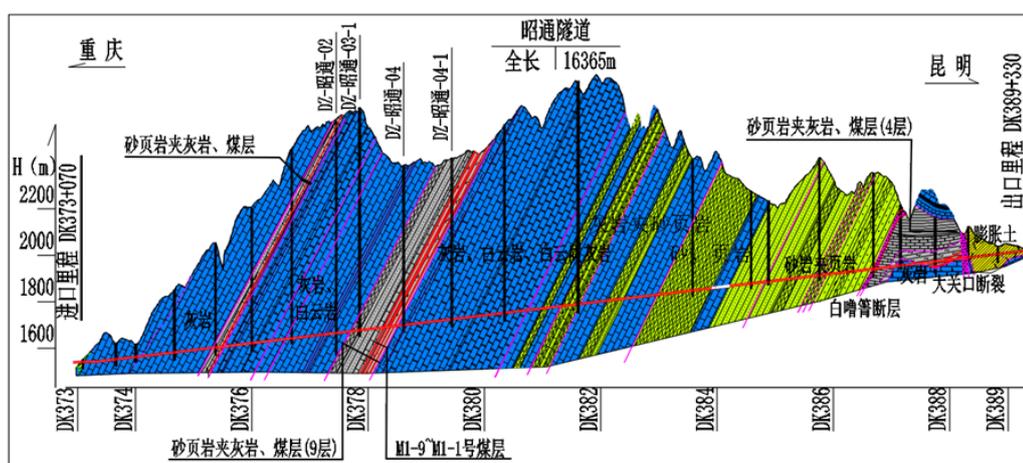


Figure 1. Longitudinal section diagram of tunnel geology
图 1. 隧道地质纵断面图

项目以昭通隧道为主, 全长 16,260 m, 起讫里程 DK373 + 070~DK389 + 330, 是全线控制性工程, 属 I 级高风险隧道。隧道采取“3 横洞 + 2 斜井 + 平导”的辅助坑道方案, 1 号横洞(1175 m)+ 2 号横洞(1700 m)+ 新增 3 号横洞(3658.5 m)+ 1 号斜井(1816 m)+ 2 号斜井(250 m)+ 平导(8451 m)。隧道为单洞

双线, 单面上坡, 最大埋深为 980 m。隧道工程地质条件复杂, 主要不良地质为岩溶突泥涌水、膨胀土、软岩大变形等。隧道开挖采用三台阶分部掘进法, 上台阶先行, 中、下台阶、仰拱同步推进, 并始终保持开挖 5 m, 检验 10 m, 确保工作面前方有 5 m 的安全区, 必要时增设临时横撑。

大断面地下工程主要指隧道工程中开挖断面较大的情况, 国际隧道协会对大断面的定义为: 净空断面面积在 50.0~100.0 m² 为大断面, 超过 100.0 m² 为超大断面。昭通隧道断面面积为 131 m², 超过 100 m², 属于超大断面隧道。

3. 瓦斯隧道施工通风计算理论

3.1. 通风方式

隧道通风方式与施工方案同步确定, 分为自然通风和机械通风。自然通风仅适用于长度 < 300 m 且无有害气体涌出的隧道, 适用范围有限, 目前瓦斯隧道施工以机械通风为主。机械通风通过灵活布置实现新鲜风流循环, 瓦斯隧道机械通风包括风管式(压入式、抽出式、混合式)和巷道式(主扇巷道式、射流巷道式)两类。昭通隧道压入式局部通风示意图如图 2 所示。

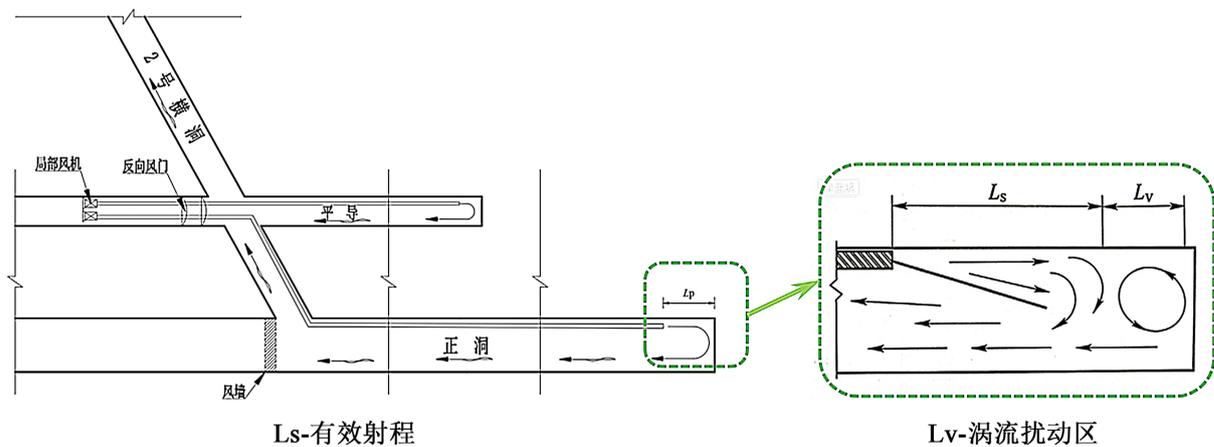


Figure 2. Schematic diagram of forced local ventilation
图 2. 压入式局部通风示意图

昭通隧道进口至 2 号横洞平导已贯通, 进口平导洞口设置两台 SFC-8-No22 (1 × 132 kW) 型主扇风机及风墙, 进口段平导作为进风巷; 2 号横洞平导小里程侧设置风机及两道防爆风门(爆破时关闭), 采用压入式通风向平导、正洞送风, 2 号横洞为回风巷。昭通隧道通风系统布置示意图如图 3 所示。

3.2. 隧道需风量计算

1) 需风量计算参数设定

风量计算相关参数见表 1。

2) 需风量计算结果

① 按洞内同时作业最多人数计算:

$$Q_{\lambda} = k \cdot q \cdot n$$

式中: q ——作业面每一作业人员的需风量, 取 4 m³/min;

n ——作业面同时作业的最多人数, 人;

k ——风量备用系数, 取 1.1~1.25。

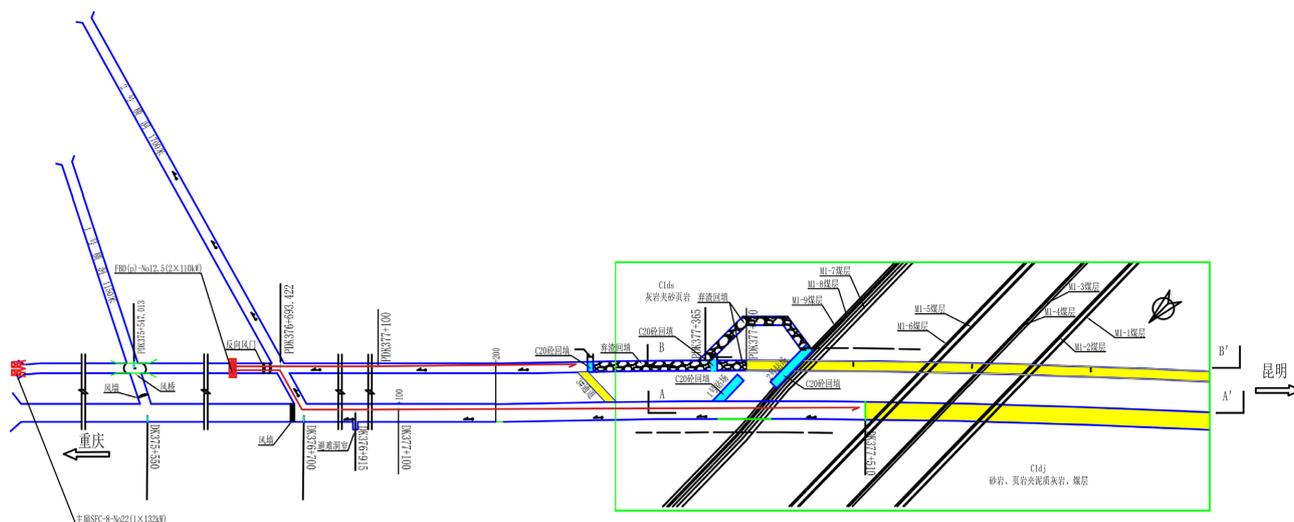


Figure 3. Ventilation system diagram of No. 2 cross tunnel of Zhaotong Tunnel

图 3. 昭通隧道 2 号横洞通风系统图

Table 1. Airflow calculation parameters

表 1. 风量计算参数

序号	项目	参数	单位	备注	
1	开挖面积	正洞	140	m ²	
		平导	45		
		横洞/斜井	50		
2	一次爆破炸药量	正洞	332	kg	
		平导	122		
		横洞	147		
3	洞内最多作业人数	正洞	100	人	
		平导/横洞	45		
4	内燃机械设备功率	装载机	162	kW	
		出碴汽车	215		
		砼罐车	214		
		挖机	125		
		农用车	103		
5	百米漏风率平均值	0.01	/		
6	瓦斯涌出量	2 号横洞	3.35		
7	隧道内瓦斯允许浓度		0.5	%	相关规范
8	爆破排烟时间		15	min	相关规范

经计算, 正洞工作面需风量为 500 m³/min。

② 按开挖面爆破排烟计算:

$$Q_0 = \frac{2.25}{t} \sqrt[3]{\frac{A(S \cdot L)^2 Kb}{P^2}}$$

式中: t ——通风时间, min;

A ——同时爆破炸药量, kg;

b ——1 kg 炸药爆破时有害气体生成量, L;

L ——临界长度, m;

S ——隧道断面面积, m^2 ;

β ——紊流扩散系数;

K ——淋水系数;

P ——巷道计算长度范围内漏风系数。

经计算, 正洞工作面需风量为 $1909 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

③ 按内燃机械设备总功率计算:

$$Q_{\text{内}} = q \cdot \sum H_i \cdot \alpha_i$$

式中: H_i ——各种内燃机械功率, kW;

α_i ——同时工作柴油机械设备利用系数, 取 0.65;

q ——内燃机械单位功率供风量, 取 $4 \text{ m}^3/(\text{kW} \cdot \text{min})$ 。

经计算, 正洞需风量为 $1960 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

④ 按瓦斯涌出量计算:

$$Q_{\text{瓦斯}} = \frac{K \cdot A}{B_1 - B_0}$$

式中: K ——瓦斯涌出不均衡系数, 取 1.8;

A ——瓦斯涌出量, m^3/min ;

B_0 ——送风瓦斯浓度, 取 0.00%;

B_1 ——隧道内允许瓦斯浓度, 取 0.5%。

经计算, 正洞工作面需风量为 $1206 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

⑤ 以隧道最低风速(排尘最低风速)作为控制设计通风量, 计算为:

$$Q_{\text{风}} = S \cdot V$$

式中: S ——隧道最大开挖断面积, m^2 ;

V ——洞内允许最小风速, 取 0.25 m/s 。

经计算, 正洞工作面需风量为 $2100 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

⑥ 风机风量的计算

根据以上计算结果, 取 2 号横洞正洞按最低风速风量为控制风量:

$$Q_{\text{max}} = \max(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) = 2100 \text{ m}^3/\text{min}$$

又结合《铁路瓦斯隧道技术规范》, 考虑昭通隧道高海拔(大气压力 620 mmHg)影响, 对总需风量修正:

$$Q_{\text{高}} = \frac{760}{P_{\text{高}}} \cdot Q$$

式中: $Q_{\text{高}}$ ——高海拔地区需风量, m^3/min ;

Q ——正常条件下需风量, m^3/min ;

$P_{\text{高}}$ ——高海拔地区大气压力, mmHg 。

最终确定正洞开挖面需风量为 $2562 \text{ m}^3/\text{min}$, 匹配风筒横截面积为 3.14 m^2 , 由公式 $Q_{\text{风}} = S \cdot V$ 得出风

筒出风口风速大小为 13.59 m/s, 该参数已作为现场风机选型和风管配置的核心依据。

3.3. 通风设备选型

1) 风管直径的选择

风筒直径按以下公式进行计算:

$$\Phi = 2\sqrt{\frac{Q_{\text{供}}}{60\pi V}}$$

式中: Φ ——风筒直径, m;

$Q_{\text{供}}$ ——风机供风量, 取以上计算结果 2562 m³/min;

V ——风筒内最大允许风速, 取 15 m/s。

经计算得: $\Phi = 1.9$ m。风管选型原则为在断面允许的情况下尽量选取大直径风管, 考虑到运输设备影响, 2 号横洞正洞选择直径 2.0 m 的风管; 有阻燃防静电性能。

2) 轴流风机选择

轴流风机选择时按照困难阶段进行选择, 然后兼顾通风过程中其他各阶段, 通风管路的阻力与风机风量的关系式如下:

$$P = \frac{400\lambda\rho}{\pi^2 d^5} \times \frac{(1-\beta)^{\frac{2L}{100}} - 1}{\ln(1-\beta)} \times Q_f^2$$

式中: P ——风管阻力, Pa;

λ ——沿程阻力系数;

ρ ——空气密度, kg/m³;

d ——风管直径, m;

β ——风管平均百米漏风率;

L ——管路长度, m;

Q_f ——风机工作点风量, m³/s。

正洞通风距离 849 m, 选用一台 FBD(p)-No16 (2 × 110 kW) 型风机, 匹配 2.0 m 风管, 风机性能曲线和管路阻力曲线交点即为风机工况点, 风机风管匹配结果如图 4 所示, 风机出风口风量 3922 m³/min > 2562 m³/min, 风机工况条件下对应的风量能满足要求。风机与直径 2.0 m 风管匹配解算结果及隧道主要设备配置见表 2 和表 3。

4. 隧道施工通风流场数值模拟及结果分析

4.1. 几何模型建立与网格划分

隧道模型建立以昭通隧道 2 号横洞正洞为参考, 构建的隧道纵向剖面简图如图 5 所示。

本文通风模型以昆渝铁路昭通隧道为实际工程背景, 根据 Fluent 内部逻辑关系, 将瓦斯隧道压入式通风及风筒模型分为隧道模型和风筒模型两部分, 在 SpaceClaim 中建立隧道三维模型, 并采用前处理软件 Fluent Meshing 划分空间几何模型网格。将隧道施工开挖方向确定为 X 轴的正方向, 隧道横断面为 Y-Z 平面。建立的隧道三维模型如图 6 所示。

由于昭通隧道 2 号横洞正洞长度有 855.4 m, 若选取隧道全长建立隧道通风模型, 则模型网格划分数量巨大, 严重影响计算工作量; 同时, 若选取的隧道长度过短, 则有害气体在隧道内的稀释、扩散排出的过程无法完整展现出来, 在短时间内隧道内的有害气体就将排出隧道, 会降低结果的有效性。因此,

风机选型曲线匹配

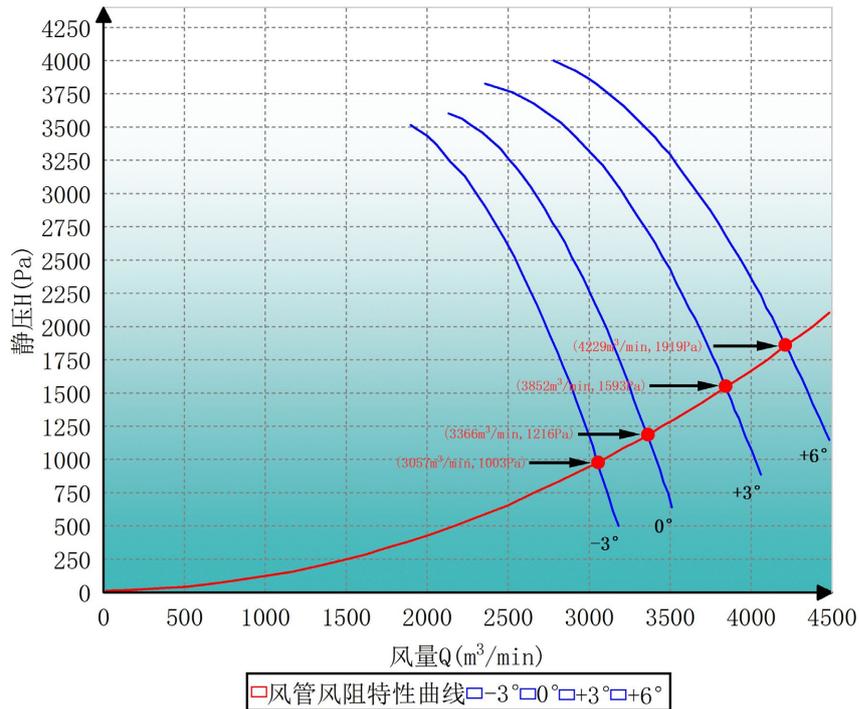


Figure 4. Wind turbine selection curve matching diagram
图 4. 风机选型曲线匹配图

Table 2. Calculation results of fan matching with 2.0 m diameter duct
表 2. 风机与直径 2.0 m 风管匹配解算结果

叶片角度	出口风量(m³/min)	风机静压(Pa)	风机风量(m³/min)	风管风阻(Ns²/m⁸)
+6°	3922.37	1919.78	4229.03	0.38643
+3°	3573.28	1593.27	3852.65	0.38643
0°	3122.76	1216.83	3366.91	0.38643

Table 3. Main equipment configuration table
表 3. 主要设备配置表

工区	名称	型号	单位	数量	备注
2 号横洞	主扇	SFC-8-No22 (1 × 132 kW)	台	2	1 用 1 备
	轴流风机	FBD(p)-No12.5 (2 × 110 kW)	台	2	1 用 1 备, 防爆型
	轴流风机	FBD(p)-No16 (2 × 110 kW)	台	2	1 用 1 备, 防爆型
	风管	Φ1800 mm	m		阻燃防静电, 损耗 20%
	风管	Φ2000 mm	m		阻燃防静电, 损耗 20%

综合计算工作量以及计算精度的考虑, 最终选取隧道模型长度 300 m 进行通风模拟。

关于隧道模型的几何参数, 根据内轮廓半径和高度不同, 可分为下面三种截面。

正洞风墙 - 二衬隧道内轮廓采用半径 $R = 6.65$ m 拱圆结构, 隧道宽度为 8.21 m, 高度为 11.88 m, 隧道长度为 687.4m; 隧道断面面积为 130.9698 m²。正洞风墙 - 二衬的隧道截面(A-A)如下图 7 所示。

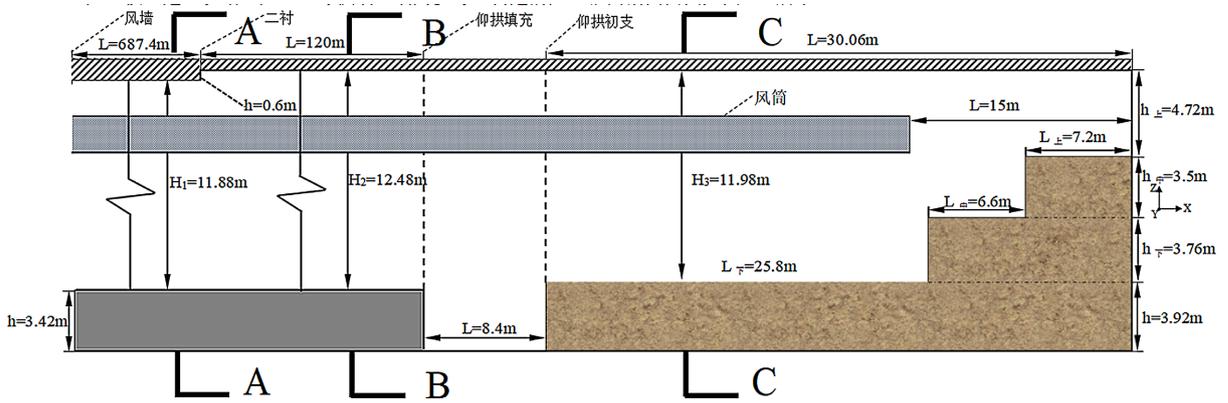


Figure 5. Schematic diagram of longitudinal section of tunnel
图 5. 隧道纵向剖面简图

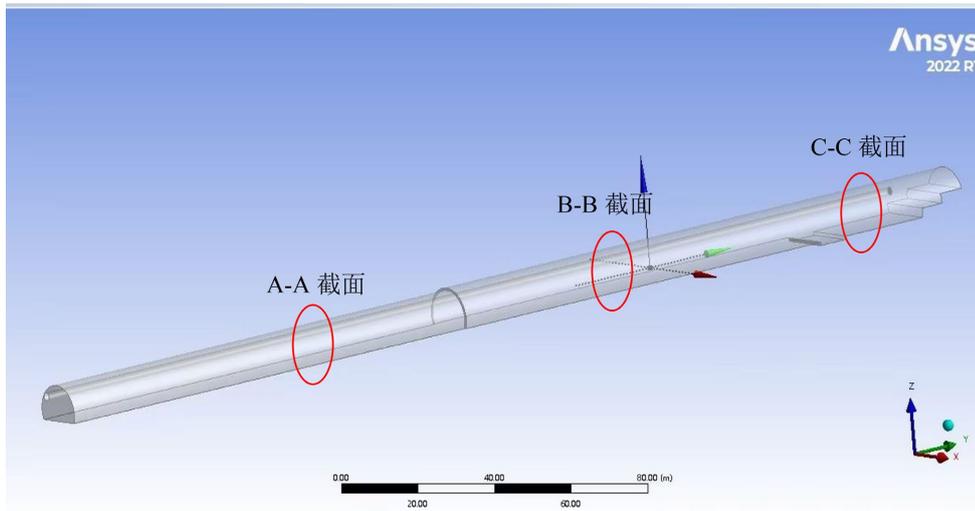


Figure 6. Three-dimensional model diagram of tunnel
图 6. 隧道三维模型图

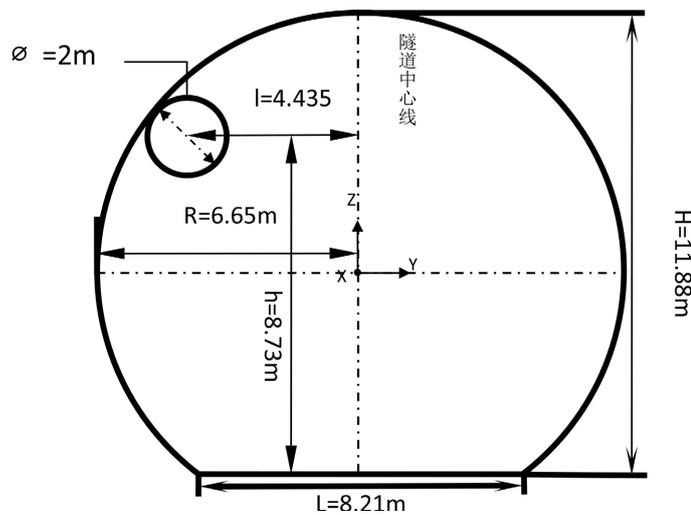


Figure 7. Tunnel cross-section (A-A) diagram of the main tunnel ventilation wall-second lining
图 7. 正洞风墙 - 二衬的隧道截面(A-A)图

二衬 - 仰拱填充隧道内轮廓采用半径 $R = 7.25\text{ m}$ 拱圆结构, 隧道宽度为 10.04 m , 高度为 12.48 m , 隧道长度为 120 m ; 隧道断面面积为 151.1788 m^2 。正洞二衬 - 仰拱填充的隧道截面(B-B)如下图 8 所示。

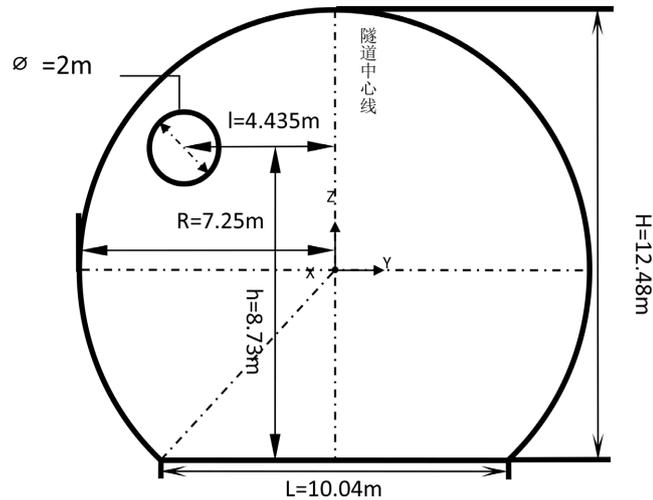


Figure 8. Tunnel cross-section (B-B) diagram of the main tunnel second lining-inverted arch filling
图 8. 正洞二衬 - 仰拱填充的隧道截面(B-B)图

仰拱初支 - 掌子面隧道内轮廓采用半径 $R = 7.25\text{ m}$ 拱圆结构, 隧道宽度为 10.99 m , 高度为 11.98 m , 隧道长度为 30.06 m ; 隧道断面面积为 145.9136 m^2 。正洞仰拱初支 - 掌子面的隧道截面(C-C)如下图 9 所示。

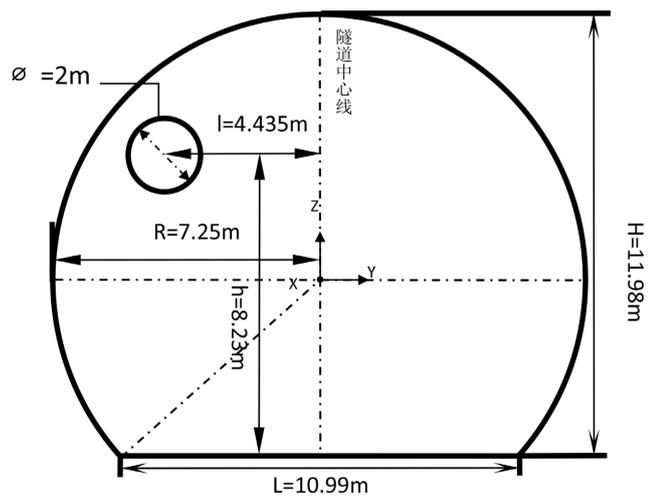


Figure 9. Tunnel cross-section (C-C) diagram of temporary support for the main tunnel with inverted arches-face of tunneling
图 9. 正洞仰拱初支 - 掌子面的隧道截面(C-C)图

风筒半径为 1 m , 横截面积为 3.14 m^2 , 风筒出风口距离掌子面为 15 m , 风筒出风口中心距离拱顶高度为 3.75 m , 距离隧道中心线 4.435 m , 距离地面高度为 8.23 m (现场实际安装位置)。

4.2. 边界条件与参数选择设置

为研究大断面隧道施工风流流动的规律, 根据隧道物理模型, 忽略瓦斯扩散对风流的影响, 建立单风筒隧道通风模型来模拟研究无瓦斯隧道内通风时的风流运动特征。求解参数选择设置与边界条件如下。模拟具体求解参数设定见表 4。

Table 4. Parameter settings

表 4. 求解参数设定

参数	设定
求解器	密度基求解器
空间属性	三维空间
时间属性	非定常流动
速度属性	绝对速度
非定常流动算法	二阶隐式算法
能量	采用能量方程
组份模型	组份运输方程
湍流模型	RNG $k-\epsilon$ 模型
各项残差精度	1e-03

1) 进口边界: 风管出口选用速度入口边界, 根据隧道最低风速计算结果得出的需风量为 $2562 \text{ m}^3/\text{min}$, 设置风筒出口风速大小为 $v = 13.59 \text{ m/s}$ 。

2) 出口边界: 隧道出口边界条件设置为压力出口, 相对压力取 0 Pa 。

3) 壁面边界: 将隧道内所有壁面均定义为固定壁面, 视为无滑移边界条件, 所有壁面均视为绝热。

其次, 将隧道内气体视为不可压缩流体, 气体在隧道内的流动视为温度恒定的稳态紊流, 为探究流动过程中与壁面无热交换通风时的风流运动特征, 截取了单风筒隧道风速矢量图, 如图 10 所示。

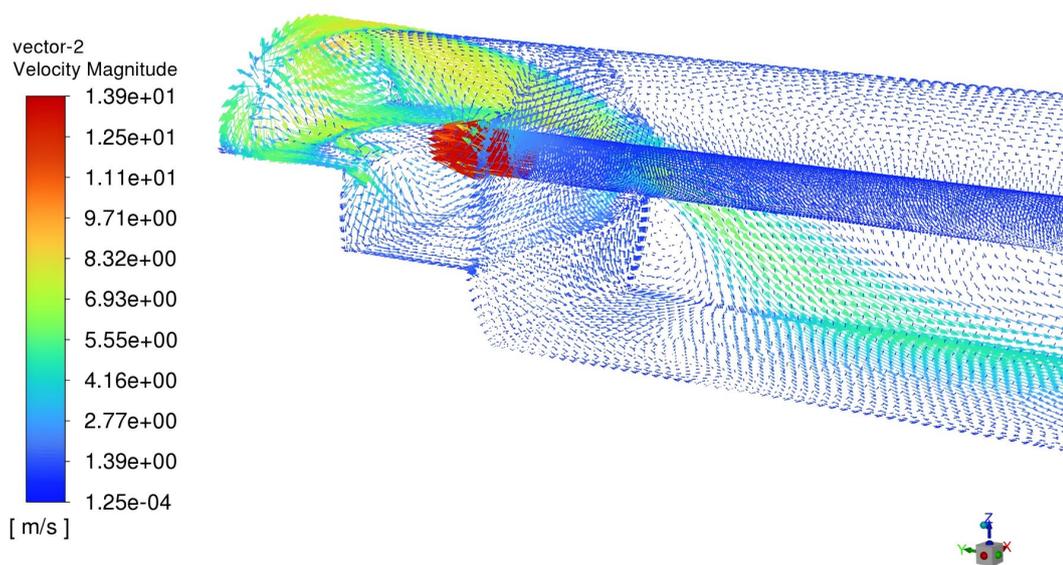


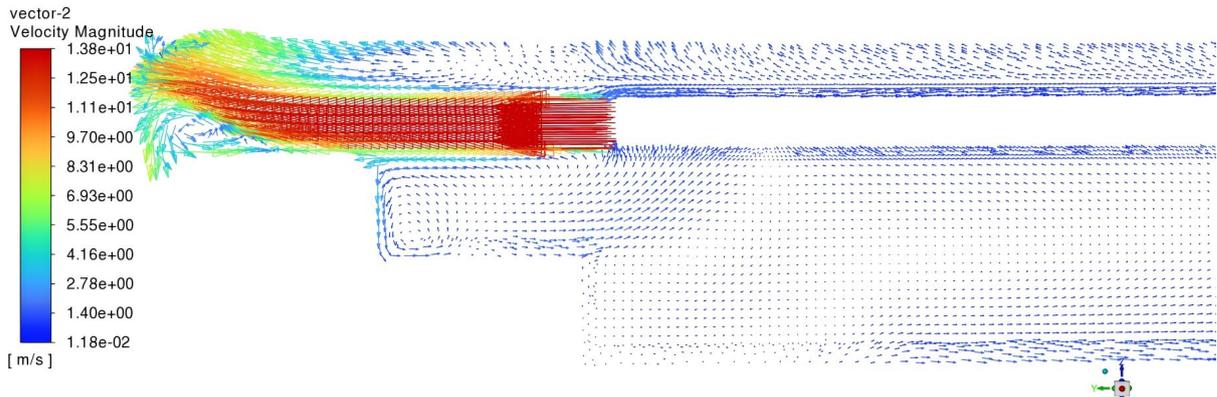
Figure 10. Velocity vector diagram of single wind tunnel

图 10. 单风筒隧道速度矢量图

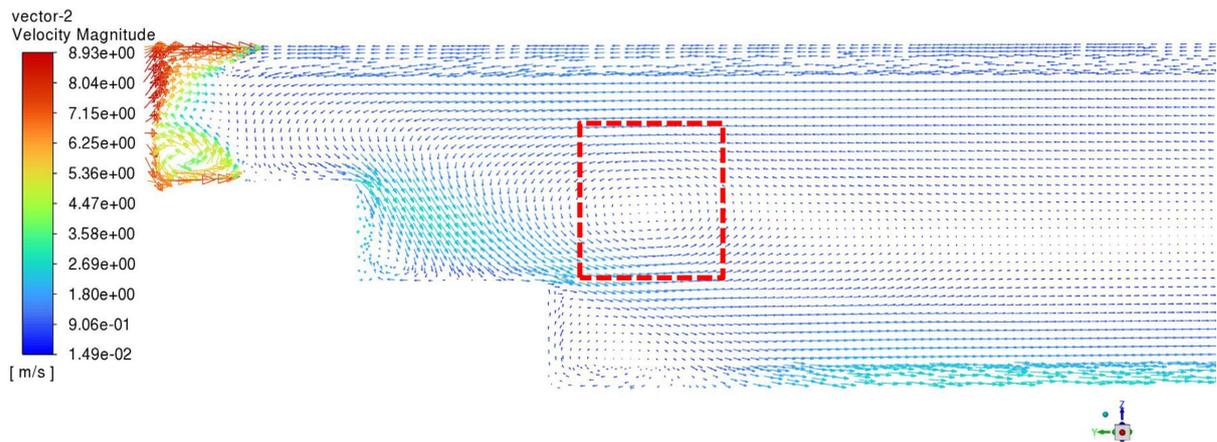
为探究隧道风筒射出风流和隧道中心处风流场规律, 截取风速流场趋于平稳时选取掌子面附近纵断面上 $Y = -4$ 和 $Y = 0$ 处的风速矢量图, 如图 11 所示。

对于该隧道, 风筒出口离掌子面的距离为 15 m , 并且风筒出口风速 $v = 13.59 \text{ m/s}$, 比较大, 风流从风筒口射出后很快就达到了掌子面, 其射出的风流对周围空气的席卷作用并不能得到充分的发展, 因此

附壁射流区不明显。由图 11(a)可知, 风筒出口附近处, 风流从风筒射出, 紧贴隧道侧壁向前射出, 此时风筒出口处的风速最大, 最高能达到 13.9 m/s。随着射流距离的增加, 在距离掌子面 17 m 之后的风筒周围的风速逐渐升高, 风速围绕风筒形状出现明显的层次性。



(a) 隧道风筒处纵断面风速矢量图



(b) 隧道中心线处纵断面风速矢量图

Figure 11. Velocity vector diagram of the tunnel partial longitudinal section

图 11. 隧道部分纵断面速度矢量图

为探究隧道风筒射出风流在横断面上的规律, 截取风速流场趋于平稳时掌子面附近横断面上的风速矢量图, 如图 12 所示。

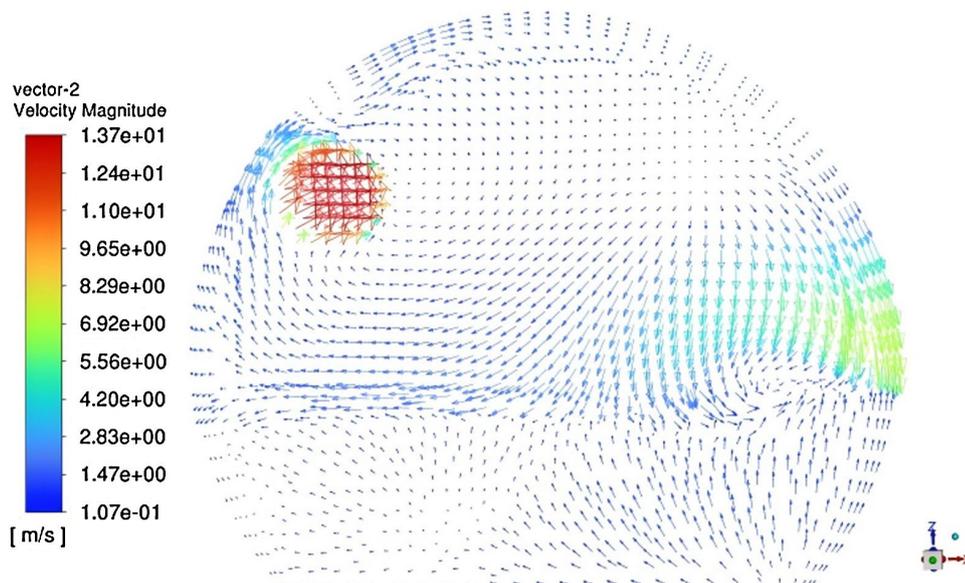
从图 11(b)和图 12 可以看出, 回流风加上有限隧道空间的影响, 从不断席卷空气变为不断析出空气。析出空气和席卷空气两者有明显的分界, 分界处在离地面 9.5 m 的位置形成了漩涡, 这一区域即为涡流区。射流风流达到掌子面后产生的回流风流与射流风流的方向相反, 由于流体之间的相互摩擦, 在贴壁射流区范围内射流风流的区域形成了明显的涡体, 越往涡体内部其风速越小, 这对通风不利, 应该在施工时采取相应的措施加以消除。

掌子面及三台阶附近为隧道掘进核心作业区域, 该区域瓦斯浓度分布直接关乎施工安全, 是有毒有害气体积聚风险防控的关键研究区域。为针对性探究该区域的瓦斯积聚规律, 选取风筒出口至掌子面沿线不同横断面的风速云图进行分析, 具体变化特征如下图 13 所示。

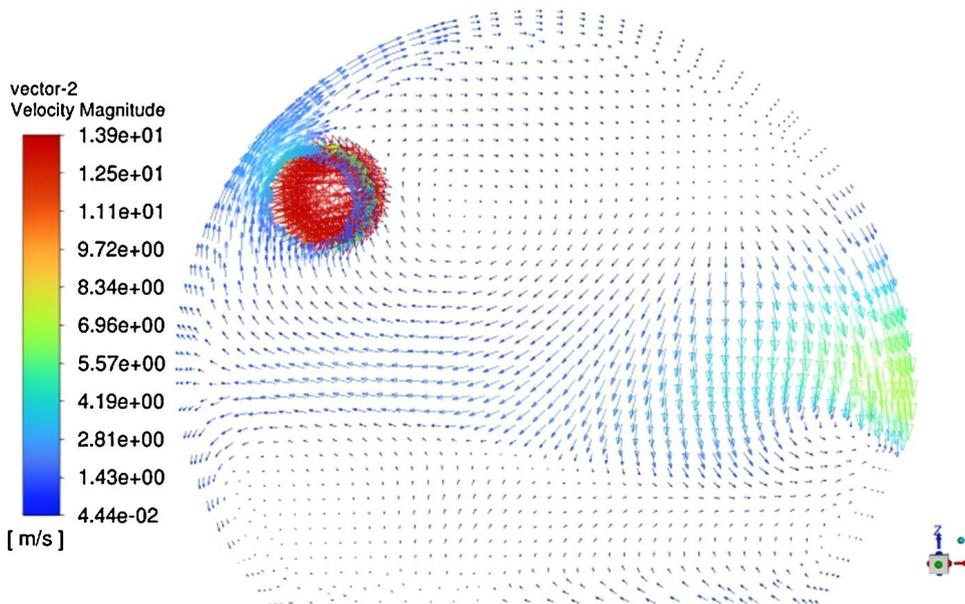
由图 13 可清晰观察到, 风筒出口近端区域, 风流呈现明显的贴壁射流特征, 沿隧道侧壁向掌子面方

向延伸扩散, 其中风筒出口中心轴线处风速达到该区域最大值。当射流气流传播至掌子面后, 受掌子面壁面的阻挡作用, 气流运动方向发生反向偏转并形成回流。与此同时, 在上阶梯施工形成的有限空间约束效应下, 回流气流与后续射流气流相互作用, 进一步强化了气流的贴壁流动趋势, 最终形成稳定的受限贴壁射流现象。

由图 14 可见, 风筒出口下方特定区域风速显著高于周边, 核心成因是回风流在左侧壁面形成贴壁射流, 对该区域产生动能叠加效应。断面右侧中间近壁区域风速异常偏高, 源于上阶梯风流的贴壁射流作用与受限空间约束的耦合影响, 导致气流扩散受阻、能量集聚, 最终形成局部高速区。



(a) 风筒出风口前 1.15 m 处横断面($X = -13.85$)速度矢量图



(b) 风筒出风口处横断面($X = -15$)速度矢量图

Figure 12. Velocity vector diagram of partial cross-section near the tunnel air duct

图 12. 隧道风筒附近部分横断面速度矢量图

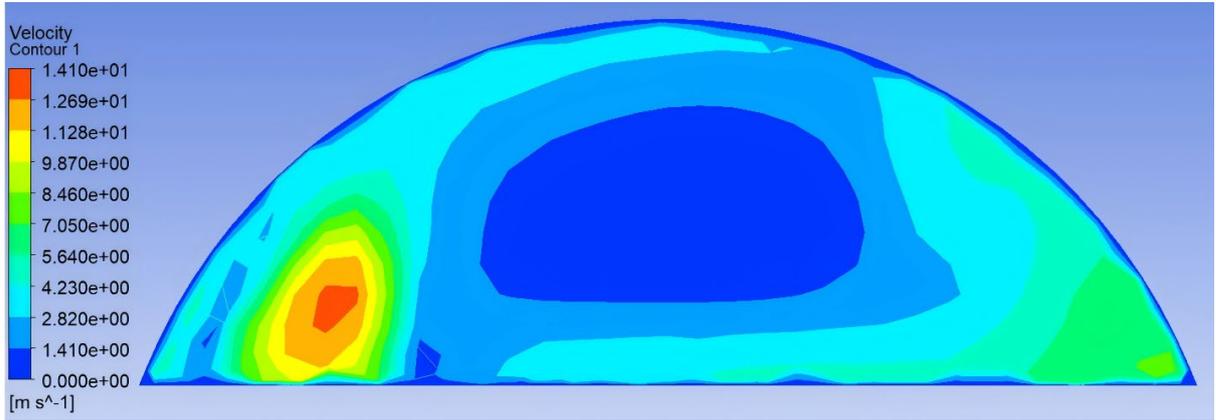


Figure 13. Wind speed distribution cloud map of the upper step section 6.1 m above the face
图 13. 距离掌子面 6.1 m 上阶梯段断面风速分布云图

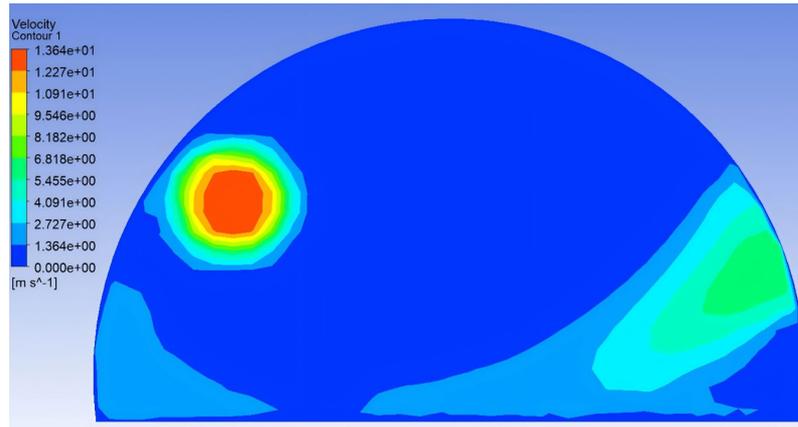


Figure 14. Wind speed distribution cloud map of the middle step section at 12.8 m from the face
图 14. 距离掌子面 12.8 m 中阶梯段断面风速分布云图

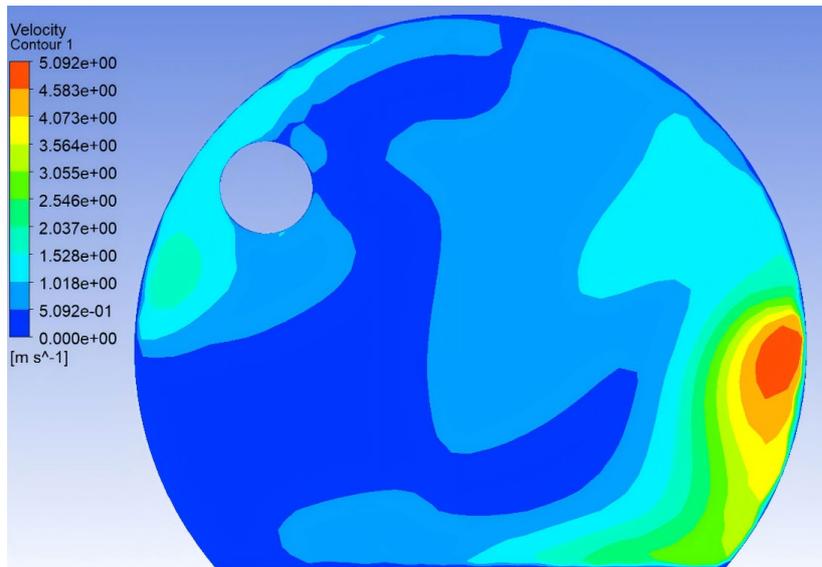


Figure 15. Wind speed distribution cloud map of the step section 24.9 m below the face
图 15. 距离掌子面 24.9 m 下阶梯段断面风速分布云图

从图 15 可以看出, 在风筒出口左下方区域, 由于来自中阶梯风流的动能大和局部空间受限, 使风流无法得到有效扩散, 导致局部风速变大。中右侧由于风流扩散, 使得断面右侧中间靠近壁面区域中心风速变小, 但因右侧贴壁射流的风流动能过大和扩散区域受壁面限制, 其风速仍比断面大部分区域大。

5. 结论

1) 隧道断面的风速和紊流区域分布极为不均匀, 同一断面不同位置的风速和涡体范围均有所差异, 同一高度、不同位置的风速分布规律也有所不同。主要体现在离掌子面越近, 涡流区域越大, 风流越紊乱。

2) 风筒出风口作用在掌子面射流的面积大小不同对隧道施工通风的影响明显, 风筒出风口作用在掌子面射流的面积越大, 对隧道内部风流流动和产生涡体范围的影响越大, 该影响主要体现在距掌子面 0~18 m 这一区段。

3) 隧道速度场分布受掌子面距离、阶梯空间结构及风筒射流影响显著, 近掌子面以射流 - 回流主导, 中阶梯呈现局部高速区, 远掌子面因扩散作用风速梯度化。

4) 针对三阶梯、CRD 等超大断面隧道专用工法, 需综合考虑“地质煤层赋存 - 施工工序 - 通风参数 - 环境温湿度”多因素的耦合作用, 建立多变量协同优化模型, 调整优化传感器布设和通风参数, 实现从“被动通风”向“主动精准调控”的转变, 应对局部的瓦斯涌出突变、设备故障等动态工况, 实现通风规律与参数优化的工法定制化。

参考文献

- [1] 代绍述. 西部山区深埋特长公路隧道综合勘察技术研究[J]. 灾害学, 2019, 34(S1): 91-95.
- [2] 熊建明. 公路瓦斯隧道施工期安全管理与预警技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
- [3] 王海洋, 赵树磊, 陈祥, 等. 我国隧道瓦斯事故统计及影响因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 34-40.
- [4] 徐昆仑. 局部通风掘进工作面风流流场和瓦斯分布数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2007.
- [5] 陈选生. 长大瓦斯隧道施工通风参数与设备选型[J]. 铁道建筑, 2016(6): 51-54.
- [6] Suo, L., Li, S. and Wu, F. (2025) Influence of Ventilation Parameters on Gas Transportation Patterns in Long Highway Tunnels and Sustainable Development of Ventilation Systems. *Sustainability*, **17**, Article 1020. <https://doi.org/10.3390/su17031020>
- [7] Wang, Y. (2020) Optimization of Gas Drilling in Pre- Pumping Coal Seam of Gas Tunnel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **741**, Article ID: 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/741/1/012036>
- [8] Liu, R., Ren, S., Fan, J., Wu, F. and William, N. (2019) The Air-Flow Structure and Gas Dispersion Behavior in Gas Tunnel Construction through Bench Cut Method. *Thermal Science*, **23**, 1417-1424. <https://doi.org/10.2298/tsci180825206l>
- [9] 安天明. 特长隧道通风方案研究[J]. 工程建设与设计, 2023(5): 91-94.
- [10] 马建华, 胡雯杰, 田伟权, 等. 哈巴雪山隧道通风设计及优化技术研究[J]. 安徽建筑, 2022, 29(11): 61-62.
- [11] 李明, 幸垚, 刘农. 雪山梁高原特长隧道施工通风关键技术三维数值模拟[J]. 公路, 2017, 62(11): 284-289.
- [12] 唐宏辉, 魏立新, 赵家明, 等. 带上盖开发隧道通风流场特性及射流风机偏转角度研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(3): 1114-1125.
- [13] 蒋仲安, 曾发镇, 冯雪, 等. 高海拔隧道爆破后粉尘污染动力学模型及影响因素[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 263-278.