

不规则巷道断面风速分布规律数值模拟

时创新¹, 胡 敏¹, 王 康¹, 朱传纪¹, 夏洪涛¹, 张永利¹, 黄鑫胜²

¹淮南矿业(集团)有限责任公司潘集第三煤矿, 安徽 淮南

²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1日; 录用日期: 2026年1月1日; 发布日期: 2026年1月13日

摘要

为明确不规则巷道断面的风速分布规律, 支撑井下通风系统优化与安全监测, 本研究采用数值模拟方法(借助Fluent软件), 构建含半圆凸体的模型模拟巷道壁面不规则性, 分析半圆拱规则/不规则断面在不同条件下的风速分布特征。结果显示: 规则断面巷道的风速与壁面距离符合对数函数关系(相关系数 R^2 为0.9681~0.9762), 其平均风速点距巷帮/顶底板的距离为巷道宽度/高度的0.11倍; 不规则断面的风速分布趋势与规则断面一致, 拟合相关系数 R^2 达0.9892~0.9962, 平均风速点距壁面的距离为巷道宽度/高度的0.1倍。本研究明确了不同断面巷道的平均风速点分布规律, 为井下风速传感器布置及测风作业提供了理论依据, 对提升矿井通风安全管理水平具有支撑作用。

关键词

风速分布, 数值模拟, Fluent软件, 矿井通风, 对数拟合

Numerical Simulation of Wind Velocity Distribution in Irregular Roadway

Chuangxin Shi¹, Min Hu¹, Kang Wang¹, Chuanji Zhu¹, Hongtao Xia¹, Yongli Zhang¹,
Xinsheng Huang²

¹Panji No.3 Coal Mine, Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan Anhui

²School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: December 1, 2025; accepted: January 1, 2026; published: January 13, 2026

Abstract

In order to clarify the wind speed distribution law of irregular roadway section and support the optimization and safety monitoring of underground ventilation system, this study used numerical

文章引用: 时创新, 胡敏, 王康, 朱传纪, 夏洪涛, 张永利, 黄鑫胜. 不规则巷道断面风速分布规律数值模拟[J]. 矿山工程, 2026, 14(1): 116-124. DOI: 10.12677/me.2026.141012

simulation method (with the help of Fluent software) to construct a model with semi-circular asperity to simulate the irregularity of roadway wall, and analyzed the wind speed distribution characteristics of regular/irregular sections such as semi-circular arch and trapezoid under different conditions. The results show that the relationship between the wind speed and the wall distance of the regular section roadway conforms to the logarithmic function (the correlation coefficient R^2 is 0.9681~0.9762), and the distance between the average wind speed point and the roadway side/roof and floor is 0.11 times the width/height of the roadway. The wind speed distribution trend of the irregular section is consistent with that of the regular section, and the fitting correlation coefficient R^2 is 0.9892~0.9962. The distance between the average wind speed point and the wall surface is 0.1 times the width/height of the roadway. This study clarifies the distribution law of average wind speed points in different cross-section roadways, provides a theoretical basis for the arrangement of underground wind speed sensors and wind measurement operations, and plays a supporting role in improving the safety management level of mine ventilation.

Keywords

Wind Speed Distribution, Numerical Simulation, Fluent Software, Mine Ventilation, Logarithmic Fitting

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. 绪论

利用数值计算方法研究井下巷道风流速度场及瓦斯、粉尘等物质的运移规律, 相关探索已持续多年。Zhou 等人^[1]通过计算流体动力学(CFD)技术分析了障碍物对井下气流的作用机制; Wróblewski 等人^[2]基于 CFD 技术开展井下固定碎石机空调操作员舱的风流特性研究; Rajak 和 Dey^[3]借助 CFD 模型开展井下作业面风流优化研究, 通过参数优化改善井下通风风流状态; DING^[4]结合数值模拟与实验测量, 得到梯形巷道的平均风速分布特征。

近年来, 学术界围绕巷道断面形态、风流参数及传感器布置等核心问题开展了系列专题研究。高建良等人^[4]通过模拟贯通巷道风流流场分布, 确定了流体力学入口长度与风流出口位置, 同时指出入口未充分发展区域的湍流参数计算方式对模拟结果影响显著; 王翰锋^[5]采用 Fluent 软件仿真矩形与半圆拱形巷道断面中轴线风速, 定位了与断面平均风速等值的测点, 为井下风速传感器精准监测通风参数提供了技术支持; 张浪^[6]基于巷道测风站风速场 CFD 模型, 定量模拟了人员在极端位置时的测风站风速场, 确定巷道中垂线距底板 3.63~3.64 m 为风速传感器最优布置区间, 保障人员在场时的测风精度。此外, 杜斌等^[7]对不同入口风速下矩形及半圆拱形巷道瞬时风速分布的分析、鹿广利等人^{[8] [9]}对巷道拐弯后风流变化规律及传感器布置依据的研究, 均为巷道通风参数优化提供了重要参考。贾剑^[10]构建了风速分布的流体动力学模型, 经 Fluent 仿真发现, 特定断面内传感器距顶板 30~40 cm 时, 点风速与平均风速呈近似线性关系且比例系数接近 1; 李曼等^[11]针对支架引发的测风误差问题, 采用改进算法确定测风点位, 经仿真与试验推导得出误差补偿方程; 周西华等^[12]通过实验与模拟结合的方式, 得到圆形断面点风速与平均风速的换算系数。

尽管现有研究成果丰富, 但巷道风速分布仍受入口风速、支护形式、断面形态与尺寸等多种因素影响, 尤其是不规则断面巷道的相关研究需进一步深化。Hu^[13]从理论上定义了巷道壁面粗糙度(R_a), 基

于顶板粗糙度正态分布构建不同三心拱巷道模型,研究表明: $Ra = 0.1$ m 时风速与 DA 值负相关, Ra 增大对风速分布影响显著; $Ra = 0.2$ 和 0.3 m 时风速分布呈不对称性; 且巷道高度增加会导致低速区域向顶板附近聚集; 霍曼[14]经 Fluent 仿真发现, 大断面拱形巷道平直段风速呈同心环状分布, 支架扰动会改变此分布特性; 郝元伟[15]等人指出监测点风速与平均风速呈线性关系, 但实际操作中难以通过大幅分梯度调节巷道平均风速获取拟合数据。鉴于上述背景, 本章将不规则半圆拱巷道的变形形态进行理想化处理, 运用数值模拟手段研究尺寸与实际工况相符的巷道在风流达到充分发展状态截面的风速分布规律, 旨在确定平均风速的分布位置, 构建平均风速线与巷道壁面位置关系的数学模型, 为井下通风系统优化与安全监测提供更为精准的理论依据。

2. 不规则巷道模型的建立与条件假设

2.1. 不规则巷道模型的建立

本文利用 Fluent 软件进行巷道内风流分布的数值模拟分析。煤矿井下正常通风时, 风流速度一般不超过 8 m/s, 最低风速处于 $0.15\sim0.25$ m/s 区间, 因此正常通风巷道内的风流均呈紊流状态。

实际井下巷道壁面具有一定的不规则性。为探究其对巷道断面风速分布的影响, 建模时对壁面不规则度进行了量化和理想化建模: 采用半径 300 mm 的半圆凸体模拟壁面不规则特性, 并将其设置在巷道紊流充分发展区域。不同半径凸体在半圆拱巷道断面的分布如图 1 所示。

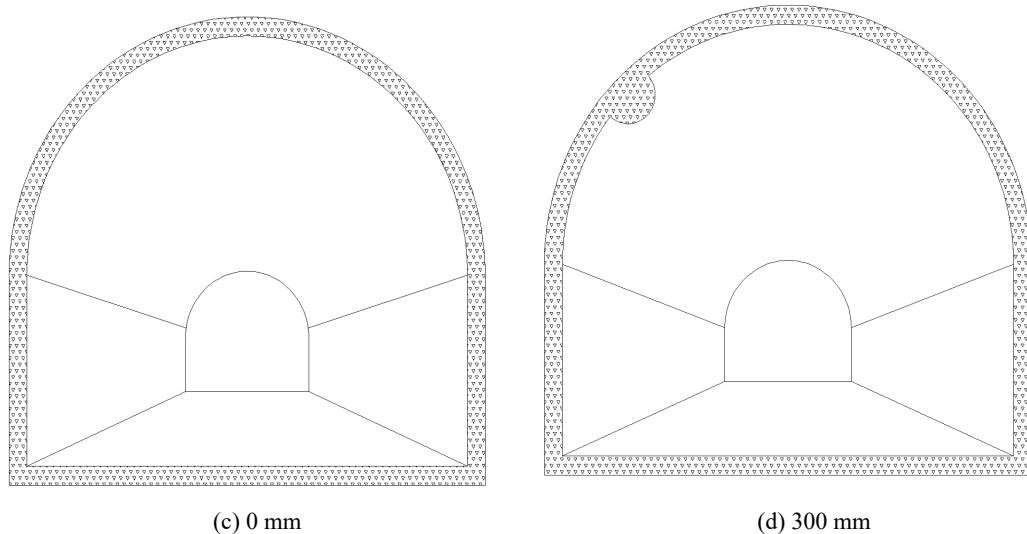


Figure 1. Section distribution diagram of convex bodies with different radii in semi-circular arch roadway
图 1. 不同半径凸体在半圆拱巷道断面分布图

(1) 模拟方案

依据井下实际通风巷道建立三维数值分析模型, 截面类型为半圆拱, 巷道总长 150 m, 不规则段位于紊流充分发展区域。结合现场实测经验, 选取 5×4.5 m 半圆拱巷道尺寸、 3 m/s 入口风速及锚喷支护条件进行模拟分析, 具体参数如表 1 所示。后续可通过对比不同支护形式下的模拟结果, 进一步揭示壁面特性对风速分布的影响机制, 提升研究结论的普适性。

(2) 模型坐标系定义及几何特征

巷道模型总长 150 m, 建模时将长度方向设为 Z 轴、高度方向设为 Y 轴、宽度方向设为 X 轴。本研究构建的半圆拱巷道几何模型如图 2 所示。

Table 1. Simulation plan
表 1. 模拟方案

断面类型	断面尺寸(宽度 × 高度)/m	支护类型	入口风速 m/s
半圆拱	5 × 4.5	锚喷	3



Figure 2. Semi-circular arch roadway geometric model
图 2. 半圆拱巷道几何模型

本模拟采用标准化建模流程保障数据精度, 为深入解析不规则断面风速分布规律及工程实践应用提供坚实理论支撑。后续可结合模型参数敏感性分析, 进一步优化模拟方案以提升结果可靠性。

2.2. 计算模型选择及计算过程

煤矿井下巷道内的风流可视为黏性不可压缩流体, 其空气密度保持不变; 同时假设: 风流与巷道壁面之间无热交换, 流场中除入口边界外无其他质量源输入, 且无漏风情况, 巷道壁面的整体粗糙度均匀一致。

水力直径的计算式如下:

$$d = \frac{4S}{U} \quad (1)$$

式中:

S ——巷道断面的面积, 单位为 m^2 ;

U ——巷道断面的周长, 单位为 m ;

湍流充分发展的计算公式:

$$Le = 25d \quad (2)$$

模拟方案中各断面的水力直径 d 与巷道模型内紊流充分发展长度 Le 如表 2 所示:

Table 2. Fully developed length of roadway turbulence
表 2. 巷道紊流充分发展长度

断面形状	断面尺寸(宽度 × 高度)/m	断面面积 S/m^2	断面周长 U/m	水力直径 d/m	紊流充分发展长度 Le/m
半圆拱	5 × 4.5	19.8	17.1	4.6	115

基于表 2 的参数设置, 对于本次构建的巷道模型, 数值计算采用标准 $k-\varepsilon$ 方程模拟流体的湍流运动。边界条件配置如下: 巷道入口设为速度入口边界条件(仅从入口输入风流), 出口设为压力出口边界条件; 具体参数为: 入口风速取 3 m/s, 出口相对压力设为 0 Pa。本次模拟通过严格控制边界条件和网格质量,

确保了计算结果的准确可靠, 为后续分析巷道风速分布规律奠定了坚实基础。后续可结合多组参数对比验证, 进一步提升模型对实际工况的适配性, 为工程实践提供更精准的参考依据。

3. 模拟结果与分析

3.1. 巷道断面风速分布

当巷道断面为不规则形状时, 凸体的存在会对巷道内的风流产生一定扰动。基于模拟方案, 获取半圆拱巷道在湍流充分发展处断面的速度分布等值线图, 并同步模拟了规则断面的风速分布, 以对比研究两类断面的风速分布规律。

以腰线宽 5 m、中线高 4.5 m 的半圆拱巷道为例, 入口风速 3 m/s 时, 断面风速分布等值线如图 3(a) 所示。

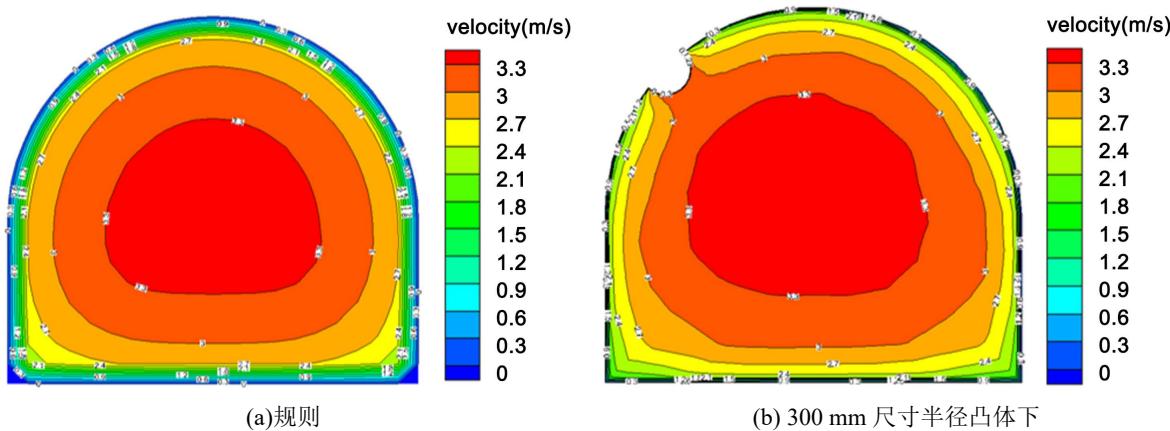


Figure 3. Wind speed distribution at the cross-section under an inlet wind speed of 3 m/s

图 3. 3 m/s 入口风速下断面风速分布图

规则断面巷道的风速分布等值线呈环形展布, 其形态与巷道断面轮廓基本吻合; 风速从巷道壁面向断面中心逐步递增, 中心区域的风速达到峰值。壁面附近的风速等值线分布密集, 对应区域风速梯度较大; 巷道中部的等值线分布稀疏, 风速梯度较小, 中央区域的风速保持稳定。

以腰线宽 5 m、中线高 4.5 m 且含半径 300 mm 凸体的半圆拱巷道为研究对象, 当入口风速设定为 3 m/s 时, 该巷道断面的风速等值线如图 3(b) 所示。从等值线特征可见, 断面变形区域附近的风速波动较为显著, 而断面规整区域的风速分布则基本维持稳定状态。

在凸体半径保持一致的条件下, 测风断面的风速分布整体呈现平缓态势, 且层次划分清晰, 等值线呈壁面至中心的同心圆状分布(壁面处风速趋近于零, 向中心方向逐步增大)。在湍流充分发展的断面中, 凸体并未改变风速分布曲线的整体形态, 但显著增大了壁面附近的风速梯度, 这一现象与飞机机翼升力原理具有相似性 - 翼型上凸下平的结构特征导致气流流速产生差异, 进而形成压力差。本研究通过对比规则断面与含凸体断面的风速分布特征, 为井下风速传感器的优化布置及通风系统的改良提供了精准的理论参考, 后续可进一步拓展至多凸体组合布置等复杂场景的相关分析。

3.2. 中轴线上风速分布结果分析

本节聚焦分析巷道中轴线点风速与壁面位置的函数关联。依据模拟方案设定的巷道类型, 选取湍流充分发展区距入口 120 m 的断面为研究对象, 将巷道中轴线设为数据监测基准线。

(1) 规则形状巷道断面的中轴线风速值分布见图4。

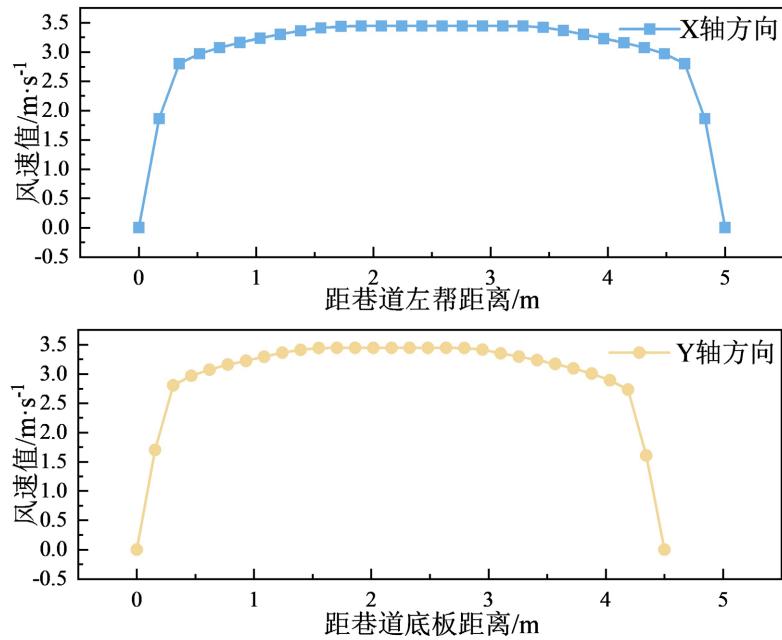


Figure 4. Distribution of wind speed values at 3 m/s in regular sections
图4. 规则断面 3 m/s 风速值分布

从图4可见,入口风速为3 m/s时,巷道断面风速从壁面向中心呈现“快速上升-平稳过渡-快速下降”的变化趋势。这说明壁面附近风速梯度大,断面中部梯度相对较小。

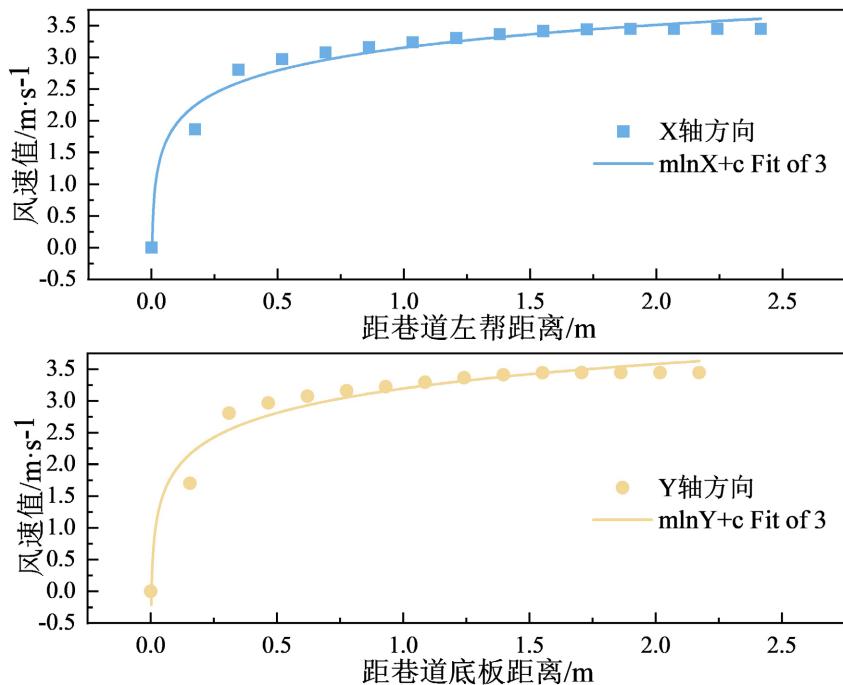


Figure 5. The fitting curve of the wind speed to the distance between the rule section and the roadway wall
图5. 规则断面风速与巷道壁距离拟合曲线

由于断面风速分布具有左右、上下对称性,故选取中轴线距左帮或底板 1/2 范围内的点风速与对应距离进行拟合分析,拟合关系如图 5 所示。

后续可通过对比不同风速条件下的拟合结果,进一步验证该对称特性对风速分布规律的影响,提升研究结论的普适性。

由图 5 可得,当入口风速设定为 3 m/s 时,风速值与距巷道左帮、底板的距离呈现出良好的曲线拟合特性,整体遵循对数函数变化规律,具体拟合结果详见表 3。

该对数拟合关系不仅为井下风速传感器的优化布置及通风参数的精准调控提供了量化支撑,也为后续不规则断面巷道风速分布规律的深入分析筑牢了理论基础。

Table 3. Table of fitting characteristics of wind speed distribution and average wind speed point position in rule cross-section roadway

表 3. 规则断面巷道风速分布拟合特性与平均风速点位置表

X 轴方向		Y 轴方向	
距左帮拟合函数	$v = 0.51818 \ln x + 3.15108$	距底板拟合函数	$v = 0.55556 \ln y + 3.19546$
相关系数 R^2	0.9754	相关系数 R^2	0.9652
平均风速点距巷道 左右帮距离/m	0.564	平均风速点距巷道顶底板 距离/m	0.513
距左右帮距离/巷道宽	0.1128	距顶底板距离/巷道高	0.1140

进一步分析表明,风速与距左帮、底板距离的拟合曲线相关系数 R^2 分别介于 0.9681~0.9762、0.9597~0.9672 区间,均接近 1.0,拟合精度高、可信度强,能精准表征规则断面巷道的风速分布特征。结合表 3 数据可知,平均风速点距巷道帮部或顶底板的距离约为巷道对应宽高的 0.11 倍,该比例在不同断面尺寸下稳定性良好,为井下风速传感器的快速精准布置提供了直接量化参考,助力提升通风监测数据的准确性。

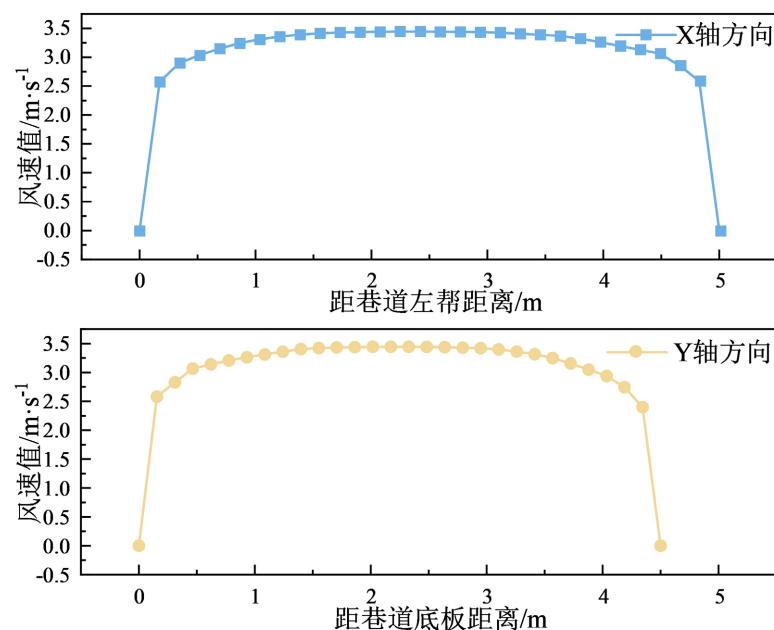


Figure 6. Wind speed distribution map of convex section with radius 300 mm
图 6. 半径 300 mm 凸体断面风速值分布图

(2) 当凸体半径为 300 mm 时, 巷道断面中轴线的风速分布特征如图 6 所示。

从图 6 数据可知, 不同入口风速条件下, 断面风速从壁面向中心呈现“快速上升-趋于平稳-快速下降”的变化趋势, 壁面区域风速梯度显著, 中部区域梯度较小。

鉴于断面风速分布具有左右、上下对称性, 选取中轴线距左帮或底板 1/2 范围内的点风速与距离进行拟合, 拟合关系如图 7 所示。此拟合为后续多凸体组合及复杂断面风速规律研究提供了基础数据支撑, 同时也为井下风速传感器的精准布置及通风系统的动态优化提供了量化参考依据, 助力矿井通风安全管理水品的提升。

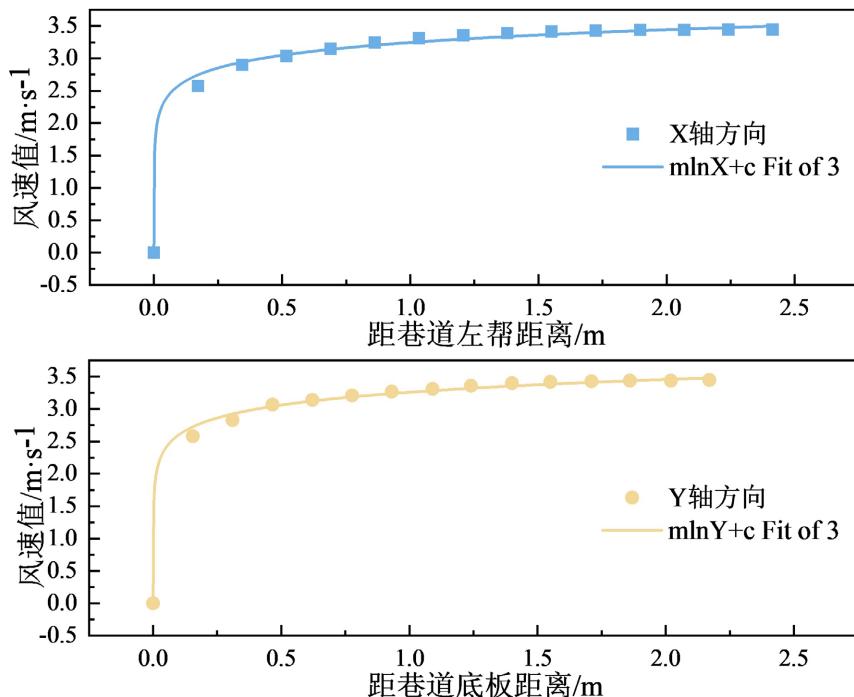


Figure 7. Fitted curve of wind speed versus distance from roadway wall for a convex body with a radius of 300 mm

图 7. 300 mm 尺寸半径凸体断面风速与巷道壁距离拟合曲线

从图 7 可知, 风速值与距左帮、底板的距离拟合曲线相关性良好, 整体遵循对数函数规律, 拟合结果详见表 4 所示。

Table 4. Fitting characteristics of wind speed distribution and average wind speed point position in convex cross-section roadway

表 4. 凸体断面巷道风速分布拟合特性与平均风速点位置表

X 轴方向		Y 轴方向	
距左帮拟合函数	$v = 0.28451 \ln x + 3.24611$	距底板拟合函数	$v = 0.2858 \ln y + 3.2596$
相关系数 R^2	0.9955	相关系数 R^2	0.9961
平均风速点距巷道左右帮距离/m	0.489	平均风速点距巷道顶底板距离/m	0.432
距左右帮距离/巷道宽	0.0978	距顶底板距离/巷道高	0.0960

风速与距左帮距离的拟合曲线相关系数 R^2 在 0.9892~0.9962 区间内, 与距底板距离的拟合曲线相关

系数 R^2 介于 0.9905~0.9972 之间。两类拟合方程的可靠性较高, 能够有效描述凸体断面巷道的风速分布规律。根据表 4 数据显示, 凸体断面巷道的平均风速点距巷帮或顶底板的距离, 大致为巷道对应宽度或高度的 0.1 倍。该结论为巷道风速监测点的优化布置提供量化依据, 有助于提升矿井通风系统的安全监测精度与效率。

4. 结论

- (1) 采用数值模拟方法, 深入分析规则断面(半圆拱)及含凸体不规则断面巷道的风速分布规律。
- (2) 规则断面风速与壁面距离符合对数函数关系(相关系数 R^2 为 0.9681~0.9762), 平均风速点距巷帮或顶底板距离为对应宽高的 0.11 倍; 不规则断面风速分布趋势与规则断面一致, 对数拟合相关系数 R^2 更高(0.9892~0.9972), 平均风速点距壁面距离为对应宽高的 0.1 倍。
- (3) 在不干扰井下运输作业与人员通行前提下, 建议将风速传感器布置于巷道风速充分发展区域内顶板及两帮平整位置附近; 成果为井下通风系统优化设计与安全监测方案制定提供可靠理论支撑, 后续结合现场实测验证可提升工程实用价值, 助力矿井通风智能化监测体系构建, 推动通风安全管理向数据驱动型转变。

参考文献

- [1] Zhou, L., Goodman, G. and Martikainen, A. (2013) Computational Fluid Dynamics (CFD) Investigation of Impacts of an Obstruction on Airflow in Underground Mines. *Transactions of Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc*, **332**, 505-513.
- [2] Wróblewski, A., Maciek, A., Banasiewicz, A., et al. (2023) CFD Analysis of the Forced Airflow and Temperature Distribution in the Air-Conditioned Operator's Cabin of the Stationary Rock Breaker in Underground Mine under Increasing Heat Flux. *Energies*, **16**, Article 3814. <https://doi.org/10.3390/en16093814>
- [3] Rajak, M.K. and Dey, K. (2019) Optimization of Parameters to Improve Ventilationin Underground Mine Working Using CFD. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, **8**, 12436-12441.
- [4] 高建良, 张生华. 压入式局部通风工作面风流分布数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2004(1): 96-99, 1.
- [5] 王翰锋. 基于 Fluent 巷道断面平均风速点定位监测模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 92-96.
- [6] 张浪. 巷道测风站风速传感器平均风速测定位置优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 96-102.
- [7] 杜斌, 朱蕾. 大断面巷道风量精准测量数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1): 186-190.
- [8] 鹿广利, 周浩, 梁秀峰, 等. 复杂流场下平均风速变化规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(8): 144-148.
- [9] 鹿广利, 武赞龙, 赵剑锋. 不同拐弯角度下巷道内风流变化规律的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(12): 116-121.
- [10] 贾剑. 对矿井风速监测的模拟分析[J]. 煤, 2011, 20(12): 73-74.
- [11] 李曼, 霍曼. 矿井通风风量测量及误差补偿的仿真研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 153-158.
- [12] 周西华, 孟乐, 李诚玉, 等. 圆形管道风速测定与校正方法实验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(6): 801-804.
- [13] Hua, H.J., Yang, Z., Tan, Z., et al. (2021) Multi-Factor Influence of Cross-Sectional Airflow Distribution in Roadway with Rough Roof. *Journal of Central South University*, **28**, 2067-2078.
- [14] 霍曼. 大断面拱形巷道风量测量及补偿方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [15] 郝元伟, 陈开岩, 蒋中承, 等. 基于 CFD 模拟的巷道风速监测值修正处理[J]. 煤矿安全, 2011, 42(2): 1-3, 7.