

基于仿真的矿井通风阻力研究与优化分析

刘彦伟

(中冶长天国际工程有限责任公司,湖南 长沙 410205)

摘要: 矿井通风阻力是影响地下采矿安全与生产效率的核心因素,其科学分析与高效优化对保障矿井安全生产和提升通风系统能效具有重要意义。文章采用理论建模与 Ventsim 仿真相结合的方法,系统研究了矿井通风阻力的构成特征及其影响因素。基于达西-魏斯巴赫公式与局部阻力模型,推导了摩擦阻力与局部阻力的计算方法,阐明了巷道断面形状、壁面粗糙度及风速对通风阻力的影响机制;结合通风网络解算理论,分析了风量平衡、风压平衡与阻力分布之间的耦合关系;进一步利用 Ventsim 建立三维通风仿真模型,对通风系统风流分布与压力变化进行了模拟分析,并对理论计算结果进行了验证。结果表明:理论计算结果与仿真结果整体误差控制在 5% 以内,但在小断面及结构复杂区域,仿真结果更能反映非线性流动特征,如 L9 巷道局部区域仿真风速达 9.1 m/s,较理论计算值偏差 18%。在此基础上,提出了降低摩擦阻力系数、合理调控风量、扩大巷道断面、缩短通风路径、优化巷道断面形式及改善局部结构等通风阻力优化措施,工程应用表明,综合实施上述策略可使通风系统能效提升约 19%~27%,为矿井通风系统的设计与动态优化提供了可靠的理论依据和工程参考。

关键词: 矿井通风阻力; 摩擦阻力; 局部阻力; 仿真分析; Ventsim 软件; 网络解算; 通风系统优化

中图分类号:TD214

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)03-0034-08

doi:10.13402/j.gcjs.2026.03.028

Simulation-based optimization study of mine ventilation resistance

LIU Yanwei

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: Mine ventilation resistance is a core factor affecting the safety and production efficiency of underground mining. Its scientific analysis and effective optimization are of great significance for ensuring mine safety production and improving the energy efficiency of ventilation systems. This paper adopts a combined approach of theoretical modeling and Ventsim simulation to systematically investigate the composition characteristics of mine ventilation resistance and its influencing factors. Based on the Darcy-Weisbach equation and local resistance models, the calculation methods for frictional resistance and local resistance are derived, elucidating the influence mechanisms of roadway cross-sectional shape, wall roughness, and airflow velocity on ventilation resistance. Ventilation network solution theory is employed to analyze the coupling relationships among air quantity balance, pressure balance, and resistance distribution. Furthermore, a three-dimensional ventilation simulation model is developed using Ventsim software to simulate airflow distribution and pressure variations in the ventilation system, and to validate the theoretical calculation results. The results show that the overall error between theoretical calculations and simulation results is controlled within 5%. However, in regions with small cross-sections or complex structures, the simulation results better reflect the actual nonlinear flow characteristics—for example, in a local narrow section of the L9 roadway, the simulated velocity reaches 9.1 m/s, representing an 18%

收稿日期: 2025-03-31

作者简介: 刘彦伟(1978—),男,高级工程师,从事矿山提升、运输、通风、排水、压缩空气系统系统设计以及烧结系统压缩空气、氧气、氮气系统设计。

deviation from the theoretical value. On this basis, six optimization measures are proposed: reducing the frictional resistance coefficient, rationally regulating air quantity, enlarging roadway cross-sectional area, shortening ventilation paths, optimizing roadway cross-sectional shape (preferably circular or arched), and improving local structures (e. g., using rounded transitions). Engineering applications demonstrate that comprehensive implementation of these strategies can improve ventilation system energy efficiency by approximately 19% ~ 27%, providing reliable theoretical support and practical reference for the design and dynamic optimization of mine ventilation systems.

Key words: mine ventilation resistance; frictional resistance; local resistance; simulation analysis; ventsim software; network solution; ventilation system optimization

矿井通风是地下采矿作业中不可或缺的一环,其主要功能是为井下作业人员提供新鲜空气,排除有害气体(如甲烷、二氧化碳)和粉尘,调节矿井内的温湿度条件,确保安全生产。矿井通风系统是矿井生产系统的重要组成部分,直接影响矿井的稳产、高产、防灾抗灾能力及经济效益,并对其产生长期影响^[1]。然而,通风系统中存在多种阻力,这些阻力直接影响通风系统的运行效率并对生产的顺利进行构成挑战。通风阻力过高会导致空气流通不畅,增加通风设备的能耗,甚至引发安全隐患。因此,矿井通风阻力的研究及其优化具有重要的理论意义与实际价值。

目前,矿井通风阻力的研究主要依赖于传统的理论计算方法与经验公式,尤其是摩擦阻力和局部阻力的计算。经典的达西-魏斯巴赫公式和局部阻力模型为通风阻力的计算提供了基础框架。达西-魏斯巴赫公式(Darcy-Weisbach equation)广泛应用于流体力学中,主要用于计算管道中因摩擦引起的压力损失。该公式基于流体的黏度和管道的几何形状,能够较为准确地预测在均匀条件下的流动阻力。然而,这种方法在处理复杂、非均匀流动条件时存在一定局限性,特别是对于矿井中复杂的巷道结构和风流条件,单一的公式难以全面描述实际阻力。这表明,对于复杂通风系统,经典理论在工程实践中的应用仍存在适用性边界,也解释了为何后续学者持续致力于对该领域进行系统性梳理。例如,冯卫卫^[2]完整阐述了基于能量方程的通风阻力理论体系,涵盖了不同流态下的摩擦与局部阻力计算公式;陈家云^[3]则系统综述了倾斜压差计法、基点法等五种主要的通风阻力测定方法及其配套的数据处理流程。

此外,局部阻力模型是另一类广泛应用的经验公式,用于描述风流在巷道断面突变、分叉、

转弯等特殊结构处的阻力损失。根据流体力学的原理,局部阻力主要来源于气流方向和速度的变化。这类经验公式可以帮助快速估算复杂通风系统中的局部阻力,但在实际应用中,局部阻力系数的选择常依赖于实验数据或经验公式,这使得模型的准确性受限^[4]。

近年来,随着矿井规模的扩大和通风网络的复杂化,传统的理论计算和经验公式暴露出一定的不足。虽然这些方法能够在简化的模型中提供有效的预测,但当面对复杂矿井环境或大型通风网络时,单一公式的适用性较差。为此,越来越多的研究开始采用计算机仿真技术来模拟矿井通风系统。例如,马斌等^[5]设计并实现了基于B/S结构的矿井通风三维可视化仿真系统,通过JOGL技术实现了井巷与风流的三维动态展示,显著提升了系统空间关系的认知效率;周声才等^[6]则应用通风系统网络解算软件,对复杂通风网络进行了动态模拟与优化分析,实现了从定性到定量化调控的跨越。这些仿真工具通过三维建模与网络解算,能够更精确地反映复杂工况下的风流分布与阻力情况。然而,现有的仿真研究仍多聚焦于单一优化变量或静态系统的优化,对多因素耦合作用下通风阻力的动态交互机制缺乏系统分析。

在前人研究的基础之上,本文将开展如下研究:首先,结合理论计算与仿真分析方法,系统探索复杂通风系统阻力分布与多因素耦合机制,以弥补现有研究中对通风系统整体优化考虑不足的空白;其次,将提出并验证一套适用于实际工程的通风阻力优化策略,重点围绕局部阻力和摩擦阻力的协同降低途径,以期对矿井通风系统的高效设计与动态调控提供新的思路与方法。本研究预期在复杂通风网络的多变量交互分析与仿真驱动优化方面形成一定的开创性成果,并为矿井

通风节能与安全运行提供具有实践参考价值的技术支持。

1 通风阻力构成及其理论计算

矿井通风阻力主要由摩擦阻力和局部阻力组成。摩擦阻力是风流在井巷中流动时,由于空气与井巷壁面之间的摩擦以及空气分子间的内摩擦而产生的阻力;局部阻力则是风流运动中,因井巷边壁条件变化,受局部阻力物影响,导致风流流速大小、方向和分布突变,形成涡流,造成能量损失。如巷道断面突然变化、分叉与交汇、断面堵塞等情况。

1.1 摩擦阻力

1.1.1 摩擦阻力通用计算公式

摩擦阻力是风流在流经巷道时,因空气与巷道壁面之间的黏性摩擦和湍流脉动导致的能量损失。其本质是流体内部剪切应力做功,将部分机械能转化为热能。在矿井中,巷道壁面的粗糙度(如岩石凸起、支护结构)会加剧近壁面湍流强度,进一步增大摩擦阻力。

达西-魏斯巴赫公式是计算摩擦阻力的经典模型:

$$h_{\text{摩}} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

式中: $h_{\text{摩}}$ 为摩擦阻力, Pa; λ 为达西摩擦因子; L 为管道长度, m; d 为管道直径, m; ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; v 为管道内流体的平均流速, m/s 。

该公式在层流和湍流流动状态下均适用,但其适用性受限于流体流动的雷诺数(Re)和管道的相对粗糙度(ε/d)。特别是对于复杂的矿井通风系统,流动状态往往是湍流并且管道的粗糙度较高,因此无量纲阻力系数的取值会受到雷诺数和粗糙度的显著影响。

尼古拉兹(Nikuradse)通过实验研究揭示了无量纲阻力系数 λ 与雷诺数(Re)及相对粗糙度(ε/d)之间的关系。尼古拉兹实验表明,在不同的雷诺数范围内, λ 随雷诺数变化的规律会有所不同,具体表现:

层流区($Re < 2\,000$): 无量纲阻力系数与雷诺数成反比关系,符合公式 $\lambda = 64/Re$ 。

湍流区($Re > 4\,000$): 无量纲阻力系数与雷诺

数的关系趋于稳定,且受管道粗糙度影响较大。

在尼古拉兹实验的基础上,流体力学家总结了适用于不同流动状态的摩阻因子公式,这些公式为复杂流动状态下的摩擦阻力计算提供了理论依据。

对于复杂矿井通风系统中的风流,流动通常是湍流,并且巷道壁面存在显著粗糙度。因此,无量纲阻力系数在不同流动状态下的变化会对管道沿程的阻力计算结果产生显著差异。例如,在湍流状态下,管道的粗糙度对阻力的影响远大于层流状态,这导致了在不同流动状态下,摩擦阻力的计算结果会产生较大的差异。

1.1.2 井下巷道摩擦阻力计算公式推导

在涉及非圆形断面管道的流体力学研究中,需引入水力半径(hydraulic radius)作为特征参数,以此实现不规则断面与圆形断面的等效转换。水力半径 $R_{\text{水}}$ (或称为当量直径)在流体动力学中具有明确的物理意义:其定义为过流断面面积与湿周的比值:

$$R_{\text{水}} = \frac{S}{U} = \frac{d}{4} \quad (2)$$

式中: S 为非圆形管道面积, m^2 ; P 为非圆形管道断面周长, m; U 为巷净断面周长, m。

基于井下巷道流场特性分析,由于多数情况下巷道风流已进入完全紊流状态,其对应的达西摩擦因子 λ 的实验测定值主要受围岩表面粗糙度参数支配。故将(2)式带入式(1)可得紊流摩擦阻力表达式:

$$h_{\text{摩}} = \frac{\lambda \gamma}{8} \cdot \frac{LU}{S^3} v^2 \quad (3)$$

故令 $\alpha = \frac{\lambda \gamma}{8}$ 。 α 称井巷摩擦阻力系数,又 $v = Q/S$, 将其带入式(3)可得矿井巷道通风摩擦阻力综合表达式:

$$h_{\text{摩}} = \alpha \cdot \frac{LU}{S^3} Q^2 \quad (4)$$

式中: γ 为空气容重, N/m^3 ; α 为摩擦阻力系数, $(\text{N} \cdot \text{S}^2)/\text{m}^4$; L 为井巷长度, m; U 为巷净断面周长, m; Q 为过井巷的风量, m^3/s ; S 为井巷净断面面积, m^2 。

1.2 局部阻力

井下巷道结构的复杂性和多变性导致了局部

阻力损失的多样化来源。这些阻力损失主要源自于巷道断面的突变, 例如在采区车场、井口、风硐等区域的扩张与收缩。这些结构变化会引起气流的紊乱, 进而增加局部阻力。此外, 巷道中的各种转弯, 如车场、大巷、采区巷道以及工作面巷道等的曲折变化, 也会显著增加气流的局部阻力。这些转弯导致气流方向的改变, 增加了流动的复杂性和阻力。同时, 巷道之间的交叉与交汇, 特别是在井底车场和中部车场等关键位置, 也是局部阻力显著增加的重要因素。这些交汇点由于气流的汇聚和分流, 会产生复杂的流动现象, 进一步加剧了局部阻力损失。因此, 为了减少局部阻力损失, 需要对巷道结构进行合理设计和优化, 减少断面变化和转弯的影响, 同时对交汇点进行流动改善措施, 以提高通风效率 and 安全性。

根据上述论述, 井下巷道中的局部阻力损失主要由以下几个因素引起: 断面突变(扩张与收缩)、转弯以及交叉与交汇。为了量化这些局部阻力损失, 可以采用以下公式进行计算^[7]:

$$h_{\text{局}} = \xi \frac{\rho}{2} v^2 \quad (5)$$

又 $v = \frac{Q}{S}$, 联合式(5)可得矿井巷道通风局部阻力综合表达式:

$$h_{\text{局}} = \xi \frac{\rho}{2 S^2} Q^2 \quad (6)$$

式中: $h_{\text{局}}$ 为局部阻力, Pa; ξ 为局部阻力系数, 无因次, 数值选取见参考文献 [7] 采矿工程设计手册表 8-4-10;

2 井巷通风总阻力与网络解算

2.1 井巷通风总阻力

在矿井通风系统中, 根据各用风地点的需求或自然分配后, 当风量达到设计产量时, 需要确定通风阻力最大的风路。通常, 这涉及到选择通风最容易和最困难的两个时期(一般仅考虑通风机服务期限内)。接下来, 对这两条风路中的各段井巷进行通风阻力的计算, 并分别累加得到矿井通风最易和最难时期的通风阻力, 分别记为 $h_{\text{阻小}}$ 和 $h_{\text{阻大}}$ 。矿井达产后通风阻力最小时为矿井通风容易时期, 矿开通风阻力最大时为通风困难时

期。通风容易时期, 所需风量相对较小, 通风阻力也就相对较小; 而在通风困难时期, 可能由于井下作业面增多、通风线路延长等原因, 需要的总风量增大, 从而使得通风阻力增大。还有不同的采矿方法和工艺, 会影响通风系统的布置和风流的流动路径, 从而影响通风阻力。计算公式如下:

$$h = \sum \frac{\alpha L U}{S^3} Q^2 + h_{\text{局}} + H_e \quad (7)$$

式中: H_e 为自然风压, Pa, 其余符合同上。

2.2 网络解算

矿井通风网络是描述风流在巷道中流动规律的拓扑系统, 由巷道节点与分支构成的联网结构(即风流分岔、汇合等形式)定义其架构特征。通过将物理巷道抽象为节点与有向边, 可构建通风网络图这一可视化模型, 直观展现矿井气流通道的几何关系与连通性。通风网络中的风量分配本质上是非线性流体动力学问题, 其遵循流体网络守恒定律, 按各分支的风阻值自发形成稳定流态。为精准掌控通风系统的状态参数(风压、风量、风阻间的耦合关系), 需通过通风网络解算构建系统方程: 以质量守恒定律、能量守恒定律为核心, 依托风阻特性方程, 通过数值分析求解通风网络的全局风量分配与阻力分布。

2.2.1 通风网络中风流的基本规律

(1) 风量平衡定律:

$$\sum Q = 0 \quad (8)$$

该方程表明, 在节点、回路或网孔中, 流入的风量与流出的风量的代数和为零。通常, 规定流入风量取正号, 流出风量取负号。

(2) 风压平衡定律:

$$\sum h_i + \sum h_f + \sum h_n = 0 \quad (9)$$

式中: $\sum h_i$ 为网孔或回路中, 各风流风压的代数和, Pa。取顺时针方向风流的风压为正, 逆时针方向风流的风压为负; $\sum h_f$ 为网孔或回路中通风风机风压的代数和, Pa。要求取逆时针方向的风机风压为正, 顺时针方向的风机风压为负; $\sum h_n$ 为网孔或回路中自然风压的代数和, Pa。要求取逆时针方向的自然风压为正, 顺时针方向的自然风压为负。

(3) 通风阻力定律:

$$h_i = R_i Q_i^2 \quad (10)$$

式中: h_i 为第 i 条风路的风压或阻力, Pa; R_i 为第 i 条风路的风阻, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$; Q_i 为第 i 条风路的风量, m^3/s 。

(4) 串联风路规律

$$Q_{\text{总}} = Q_1 = Q_2 = \cdots = Q_n \quad (11)$$

$$h_{\text{总}} = h_1 + h_2 + \cdots + h_n = \sum_{i=1}^n h_i \quad (12)$$

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (13)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为串联风路中的总风量, m^3/s ; $h_{\text{总}}$ 为串联风路中的总风压, Pa; $R_{\text{总}}$ 为串联风路的总风阻, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$;

(5) 并联网络规律

$$Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (14)$$

$$h_{\text{总}} = h_1 = h_2 = \cdots = h_n \quad (15)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为并联网络的总风量, m^3/s ; $h_{\text{总}}$ 为并联网络的总风压, Pa;

(6) 并联网络中风阻规律

$$R_{\text{总}} = \frac{R_i}{\sqrt{\frac{R_i}{R_1}} + \sqrt{\frac{R_i}{R_2}} + \cdots + \sqrt{\frac{R_i}{R_n}}} = \frac{R_i}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{R_i}{R_j}}} \quad (16)$$

式中: $R_{\text{总}}$ 为并联网络的总风阻, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$; R_j 为并联网络中各分风路的风阻, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$; R_i 为并联网络中 i 风路的风阻, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$, $i=1, 2, \cdots, n$ 。

2.2.2 并联网络中风量自然分配规律

$$Q_i = \frac{Q_{\text{总}}}{\sqrt{\frac{R_i}{R_1}} + \sqrt{\frac{R_i}{R_2}} + \cdots + \sqrt{\frac{R_i}{R_n}}} \quad (17)$$

式中: Q_i 为并联网络中各分风路的风量, m^3/s ;

3 实际案例分析

3.1 某矿井通风系统概况

采用罐笼井进风、回风竖井回风的两翼对角抽出式通风系统。新鲜风流从罐笼井进入各阶段石门后, 由阶段运输平巷引入各工作面, 污风由回风上山进入回风平巷后, 经回风竖井出地表。各进回风井以及各巷道参数如表 1 所示。摩擦系数数值选取见参考文献 [7] 采矿工程设计手册表 8-4-1~8-4-8。本文摩擦系数取值: 有装备的井筒, 井壁用混凝土、钢筋混凝土、混凝土砖及砖砌的 $\alpha \times 10^4$ 值为 343~490 $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 。进回风井通风系统图如图 1 所示。

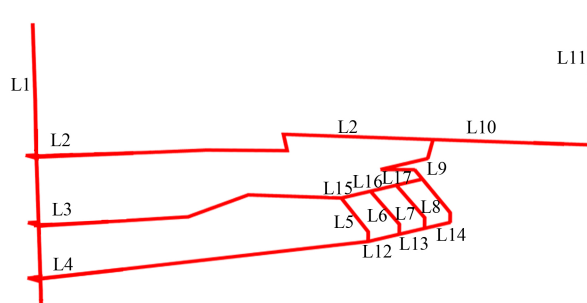


图 1 进回风井通风系统

3.2 通风阻力计算

根据前文所述可知, 各分支风阻的计算需要有各分支的风量或者风流速度, 而各分支的风量或者风流速度开始是未知的, 因此需要根据巷道的通风需求量来计算, 之后再修正参数。本工程设 L5~L8 段的风流速度为 1.15 m/s , 然后依据式 (3) 和式 (6) 计算各分支巷道摩擦阻力和局部阻力损失, 再依据串并联网络的规律, 分别计算各通风网络的阻力以及风量, 然后通过计算后的数值修正各通风网络的风流速度, 最终求出修正后的通风阻力。各通风巷道通风阻力值如图 2 所示。

表 1 进回风井以及各巷道参数

序号	形状	周长/m	断面面积/ m^2	长度/m	摩擦系数
L1	圆形	15.70	19.6	260.0	0.045
L1~L10(不含 L9)	拱形	5.45	5.9	94.8~311.8	0.045
L9	圆形	6.28	3.2	94.3	0.045
L11	圆形	9.42	7.1	260.0	0.045
L12~L17	拱形	5.45	5.9	56.0/30.4/30.5/39.8/23.4/26.0	0.045

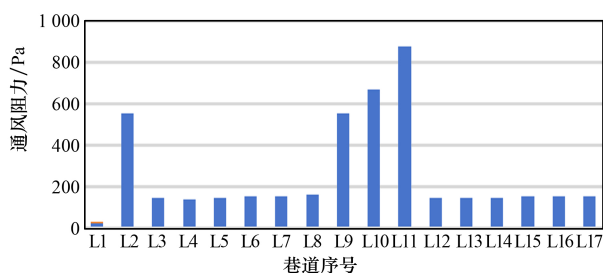


图2 各通风巷道通风阻力

4 基于 Ventsim 的通风阻力仿真模拟

4.1 仿真模型的建立

在矿井通风系统的研究与设计中，建立准确的仿真模型是分析和优化通风性能的关键步骤。本文使用 Ventsim 软件作为仿真工具，用于地下矿井通风系统的三维仿真模型。Ventsim 是一款由 Howden 集团开发的矿井通风模拟软件，以其强大的三维可视化功能和精确的计算能力在行业内广受认可。

在模型建立过程中，将巷道、采区和工作面等关键结构输入 Ventsim。通过定义巷道尺寸、粗糙度、风阻特性以及通风设备的参数（如风机功率、位置和运行模式），构建出反映真实矿井特征的初始模型。此外，Ventsim 提供动态风流模拟功能，能够实时计算气流分布和压力变化，并以颜色编码的形式直观显示结果，便于识别通风系统中的潜在问题，如风量不足或局部涡流。软件仿真界面以及仿真模型如图 3 所示。

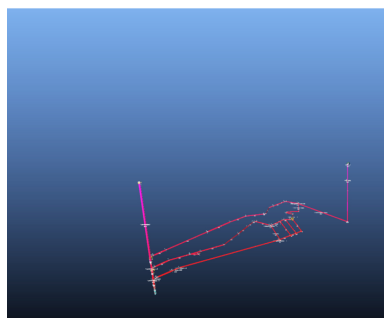
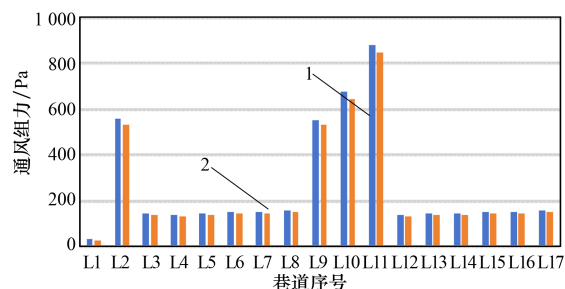


图3 Ventsim 仿真模型

4.2 理论计算与仿真结果验证

在通过 Ventsim 进行仿真后，得到多个关键的参数和结果。这些结果反映了通风系统在不同工作条件下的性能表现。通过对模拟数据的分析，深入探讨各项指标对通风系统设计和优化的影响。仿真与理论计算数据对比如图 4 所示。

仿真结果显示，在各个通风段的压力分布表现出一定的变化趋势。系统的压力沿着风道的长度逐渐增大，尤其是在管道弯头和风道交叉点处，压力损失更加显著。这一现象表明在设计通风系统时，需要特别注意这些位置的气流阻力，以避免过度的能量损失。此外，仿真还揭示了在某些情况下，通风系统的压力可能无法满足设计要求，导致通风效率下降。



1—仿真数据；2—理论计算数据。

图4 仿真与理论计算数据对比

Ventsim 仿真结果还提供了各个风道段的风速和流量数据。从风速分布来看，初步分析发现风速的变化与管道直径、气流阻力、风机性能等因素密切相关。在大多数情况下，风速在风道的中部区域较为平稳，但在管道入口和出口处会出现较大的波动。这表明，在实际应用中，风道的布局和风机的选型对风速分布的均匀性具有重要影响。

通过对理论计算数据与仿真结果的数值对比分析发现，通风系统的风量、流速和通风阻力的误差均在 5% 以内，能够满足工程设计要求。理论计算的风速范围为 0.42 ~ 4.7 m/s，仿真风速范围为 0.4 ~ 4.9 m/s，其中局部截面较小区域的仿真风速达到 9.1 m/s (L9)。从图 4 可以看出，仿真结果与理论计算结果的差异较小，但总体上理论计算值普遍低于仿真值。这是因为理论计算通常采用简化模型和理想化假设，忽略了湍流效应、局部阻力损失以及管道粗糙度等实际因素；而仿真技术能够更精细地刻画几何结构、边界条件及空气物性等复杂工况，从而更贴近工程实际。因此，仿真结果由于纳入了更多实际边界条件与细节，能够更贴近真实工况，揭示理论简化模型所无法反映的流动特征。

5 通风阻力优化策略

(1) 减少摩擦阻力系数。根据上文摩擦阻力系数的选取可知, 几种情况下摩擦阻力系数的差值比较大, 适当降低摩擦阻力系数可以有效地降低风压, 从而降低摩擦阻力, 通过调整不同参数的摩擦阻力系数进行仿真, 也证实了摩擦阻力系数对整个通风系统通风阻力的影响很大。为降低矿井通风系统的摩擦阻力系数 α , 设计时应优先选择摩擦阻力较小的支护方式, 如锚喷、砌碇、锚杆等, 尤其在主要并巷中更需注重支护方法的选择。施工质量同样关键, 采用光面爆破技术可显著提高巷道壁面平整度, 将表面凹凸度控制在 50 mm 以内, 有效降低气流阻力。此外, 对于支架巷道, 应确保支护质量, 保持整齐一致, 并控制支架失修率不超过 7%。

(2) 井巷风量要合理。在矿井通风系统中, 合理调控风量对降低通风阻力和提高效率至关重要。由于摩擦阻力与风量的平方成正比, 需避免不必要的风量过大。其它条件相同的条件下, 仅调整风量后发现理论计算和仿真都显示过大的风量会使通风阻力迅速增加。

因此在确保安全和空气质量的前提下, 应尽量减少用风地点的风量, 以降低能耗并提高经济性。掘进初期使用局部通风机时, 风量应匹配施工进度和安全需求, 避免浪费能源。随着掘进推进, 需灵活调整主通风机状态, 减少富裕风量以优化能耗。风量分布方面, 应实现总进风早分开、总回风晚汇合的布局, 以减少流动扰动和能量损失, 从而提升系统效率。

(3) 保证井巷通风断面。根据式(5)可知, 矿井摩擦阻力与通风断面积的三次方成反比, 因此扩大井巷断面是降低通风阻力的有效措施。当风量不变时, 井巷断面扩大 33% 可使通风阻力减少约一半, 尤其在主要通风路线的高阻力段, 常通过增大断面来优化效率。然而, 受技术和经济条件限制, 无法随意扩大断面时, 可采用双巷并联通风方案, 以实现均衡高效的风量分配。此外, 保持井巷通风断面的畅通性至关重要, 应定期修整巷道、清除堵塞物并确保巷道内壁平整清洁,

从而有效减少摩擦阻力并提升通风系统效率。

(4) 减少巷道长度。巷道的摩擦阻力与其长度成正比, 因此, 在矿井通风设计与管理过程中, 应尽量缩短通风路径, 特别是在满足开拓和开采条件的前提下。为了优化通风系统的效率, 应及时封闭废弃的旧巷道, 并剔除那些穿越采空区且通风路线过长的巷道。此外, 定期对矿井的通风系统进行评估与改造, 采用更加合理的通风方式, 不仅有助于减少通风阻力, 还能提高整体通风效率, 从而实现能源的节约与通风系统的优化。

(5) 选用周长较小的井巷断面。在相同断面面积的条件下, 井巷的周长与通风阻力密切相关。圆形断面的周长最小, 其次为拱形断面, 而矩形和梯形断面的周长较大。因此, 在矿井通风设计中, 通常建议立井井筒采用圆形断面, 以最小化通风阻力。对于斜井、石门、大巷等主要井巷, 宜选用拱形断面, 以提高通风效率。对于次要巷道以及服务年限较短的采区巷道, 矩形和梯形断面亦可作为备选方案, 但应考虑其通风性能与结构安全性。

(6) 降低局部阻力。局部阻力的产生主要源于巷道断面的变化, 这些变化导致风流的速度、方向和分布发生剧烈波动, 因此, 降低局部阻力的关键在于优化巷道断面的设计。为此, 应尽量减少局部阻力点的数量, 避免使用直径过小的风桥和过多的调节风窗, 同时避免巷道断面的突变, 确保断面比值合理。在连接不同断面的巷道时, 最好采用斜线或圆弧形设计, 以避免急剧的转角或直角连接。对于巷道转弯, 转角应尽量减小, 并在拐角处采用圆弧形设计, 以减少风流的冲击和能量损失。

6 结 论

本研究通过理论分析、网络解算与 Ventsim 三维仿真相结合的方法, 对矿井通风阻力特性及其优化策略进行了系统研究, 主要结论如下。

(1) 理论计算与仿真验证的一致性: 基于达西-魏斯巴赫公式与局部阻力模型推导的通风阻力计算方法, 与 Ventsim 仿真结果整体误差不超过 5%, 验证了理论体系的可靠性, 同时仿真在局部

小断面、复杂结构区域更能准确反映非线性流动特征。

(2) 通风阻力影响机制：巷道断面形状、壁面粗糙度及风速是影响通风阻力的关键因素。在湍流状态下，巷道粗糙度对摩擦阻力的影响较层流状态显著增大，局部阻力在断面突变区域可占总阻力的 35% 以上。

(3) 通风系统优化策略有效：提出的六项优化措施—降低摩擦阻力系数、合理调控风量、扩大巷道断面、缩短通风路径、优选断面形状及优化局部结构—可显著降低系统通风阻力。工程应用表明，综合实施上述策略可使通风系统能效提升 19% ~ 27%。

(4) 方法集成与工程价值：本研究构建了“理论建模—仿真验证—策略优化”的研究框架，实现了从阻力分析到系统优化的闭环，为矿井通风系统的动态设计、节能运行与安全调控提供了

理论依据与实践参考。

参考文献：

- [1] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [2] 冯卫卫. 矿井通风阻力的研究与探讨[J]. 内蒙古煤炭经济,2023(10):34-36.
- [3] 陈家云. 矿井通风阻力测量及计算研究[J]. 内蒙古煤炭经济,2018(18):45;47.
- [4] 李孜军,陈艳丽. 基于 Ventsim 的矿井通风风阻参数优化[J]. 金属矿山,2014(3):136-140.
- [5] 马斌,李仲学,李翠平,等. 矿井通风三维仿真系统设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2010,31(1):199-202.
- [6] 周声才,陈久福,周政林,等. 通风系统仿真动态模拟研究及应用[J]. 煤炭科学技术,2011,39(6):36-38;41.
- [7] 张荣立,何国纬,李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.