

# 基于 Fluent 的风门巷道局部阻力及 风流场特性研究

Research on Local Resistance Characteristics and Air Volume Measurement  
Method of Damper Roadway Based on Fluent

陈彪<sup>1,2</sup>

(1. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012; 2. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南长沙 410012)

**摘要:**为了研究风门巷道的局部阻力特性以及风量精准测算方法,以湖南衡阳某矿山井下风门巷道为研究对象,采用了现场试验与数值模拟相结合的方法,对不同风门角度的风流场及局部阻力特征进行了研究,并结合风流通过区域面积推导了以风门尺寸、风门处风速最大值为自变量的风门巷道风量计算公式。结果表明:现场试验中通风阻力和阻力系数随风门角度的增加呈“缓慢增长—快速增长”的趋势;数值模拟试验中,风速随风门角度增大逐渐呈不均匀分布,对比现场试验与数值模拟结果发现 CFD 模拟方法能准确预测风门角度在 60°以下时局部阻力的变化规律;采用 CFD 模拟与数值分析相结合的方法构建的风门巷道风量计算公式可精准计算巷道风量,可为矿井通风系统监测、风量智能调控提供准确数据。

**关键词:**巷道流场; 风门角度; 局部阻力; 风量测算方法

中图分类号: TD722

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)05-0029-08

**Abstract:** In order to study the local resistance characteristics of the damper roadway and the accurate calculation method of air volume, taking the underground damper roadway of a mine in Hengyang, Hunan as the research object, the method of combining field test and numerical simulation was used to study the air flow field and local resistance characteristics of different damper angles. Combined with the area of air flow passing through the area, the calculation formula of air volume in the damper roadway with the size of the damper and the maximum wind speed at the damper as independent variables was deduced. The results show that the ventilation resistance and resistance coefficient in the field test show a trend of “slow growth-rapid growth” with the increase of the damper angle; in the numerical simulation test, the wind speed gradually shows an uneven distribution with the increase of the damper angle. Comparing the results of the field test and the numerical simulation, it is found that the CFD simulation method can accurately predict the change law of the local resistance when the damper angle is below 60°; the air volume calculation formula constructed by the combination of CFD simulation and numerical analysis can accurately calculate the air volume of the damper roadway, which can provide accurate data for the monitoring of the mine ventilation system and the intelligent regulation of the air volume.

**Key words:** tunnel flow field; wind door angle; local resistance; airflow calculation

## 1 前言

风门巷道是指矿井中设置风门的巷道,此类巷道在金属非金属矿山开采过程中十分常见。风门的设置主要是为了控制风流方向和风量分配,以满足不同作业区域的通风需求,随着矿山开采深度的增加,通风系统的复杂性和通风难度也在不断增加。因此,深入研究带风门的巷道,对充分利用现有的设施完成通风系统的优化以及风量合理分配具有重大

意义。20 世纪中期,国外众多学者开展了管道内风流场特征的相关研究。Macagno 等<sup>[1]</sup>采用数值模拟与测试试验的方法研究了粘性流体在突扩管道中的流动,发现涡流的流动伴随着微弱的能量交换。Fletcher 等<sup>[2]</sup>研究了不同突扩比突扩管内分流流动与热交换的问题。Scott 等<sup>[3]</sup>利用数值模拟软件研究了不同突扩比管道的分流流动,分析了不同突扩比和雷诺数对突变截面后回流区长度的影响,并得到涡流中心的位置和相对涡流强度的函数关系。

[作者简介] 陈彪(1996—),男,湖南涟源人,汉族,硕士,从事智能装备研究。

[基金项目] 中国五矿全国重点实验室专项资金项目;矿山智能装备失效分析验证与提升安全保障技术(WKZB2412BJ0402108)

[引用格式] 陈彪. 基于 Fluent 的风门巷道局部阻力及风流场特性研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(5): 29-36.

Badekas 等<sup>[4]</sup>研究雷诺数在 50 ~ 200, 突扩比在 15 ~ 6.0 范围内的突扩流动, 考虑充分发展的入口边界条件, 并给出了回流区长度的相关公式。M. Bhamjee 等<sup>[5]</sup>利用计算流体力学方法(CFD)建立三维模型, 模拟风窗的流场等物理特性。并采用激光多普勒测速仪对速度场进行测量, 通过烟雾捕获整体流场使流场可视化。结果表明, CFD 模拟结果与实验结果吻合较好。近年来, 国内许多学者也开展了局部阻力和风流分布规律的研究。史晓娟等<sup>[6]</sup>采用数值模拟和试验验证手段, 研究了井下风窗叶片不同开启角度的情况下巷道局部阻力的变化规律, 结果表明: 风窗的局部阻力与其过风面积呈现出负指数关系。鹿广利等<sup>[7]</sup>利用 Fluent 数值模拟软件分析了不同拐弯角度巷道的风流分布变化规律, 得出了拐弯后的巷道相对稳定的风速点, 适合布置风速传感器。王禹等<sup>[8]</sup>研究了对不同壁面粗糙度的断面突扩巷道的流场分布特征以及局部阻力特性, 发现随着风速增大, 突扩巷道的涡流区长度先增大后保持不变, 局部阻力随着巷道粗糙度的增加呈非线性增大。邵和等<sup>[9]</sup>利用局部阻力测定实验系统, 研究不同雷诺数对局部阻力系数的影响, 并采用 CFD 数值模拟软件进行验证, 得出结论: 局部阻力系数在层流状态下受雷诺数的影响较大, 紊流状态下影响较小。刘剑等<sup>[10-12]</sup>研究了不同示踪粒子示踪特性, 并采用 LDA 试验系统对均直以及突扩巷道后的风流状态进行了实验研究, 得出均直巷道的瞬时风流特征具有湍流脉动性, 其大小和方向服从正态高斯分布; 断面突扩后存在涡流区域, 风流方向极其不规律, 工程测风时应远离此区域测定。尹斌等<sup>[13]</sup>利用 Fluent 软件针对风窗的局部阻力进行了模拟研究, 确定了风窗局部风阻的最佳计算公式。梁婷婷<sup>[14]</sup>以不同漏风面积的风门为研究对象, 进行实验与数值模拟研究, 发现风门后的涡流区范围会随着风速和风门漏粉面积的变化而变化, 确定并验证了风量漏风面积的计算方法。胡建华等<sup>[15]</sup>应用计算流体力学方法研究了风速、风门开合程度和壁面粗糙度对风速分布规律的影响。结果表明: 风门后流场存在空腔区及尾流区。吴兵等<sup>[16]</sup>采用分形维数表征巷道表面粗糙度, 并推出基于分形理论的摩擦风阻计算方法。姜黎明等<sup>[17]</sup>采用 CFD 模拟了巷道转弯区域气压分布规律及局部阻力损失, 并对比现场实测数据, 结果表明: 巷道转弯区域通风阻力损失具有“前大波峰-后小波峰”双波峰型特征。刘

明浩<sup>[18]</sup>利用 LDA 对矩形巷道的风流状态、风速分布规律以及湍流脉动性进行了实验研究。齐艺斐<sup>[19]</sup>从能量耗散的角度研究了通风阻力与风流速度的关系。宋莹等<sup>[20-22]</sup>利用 LDA 和 PIV 系统研究了巷道支护方式以及突扩巷道对风流分布特征的影响, 实验表明: 风流经过支护位置后形成湍流回流区域, 风速大小不影响回流区长度及涡心位置; 突扩巷道回流区内的断面风速呈现出“Ω”型分布。辛宪耀等<sup>[23]</sup>从经济性方面分析了并联巷道降阻调节方法, 得出了并联降阻巷道位置是影响通风经济性的重要因素。

众多学者利用多种手段在矿井不同类型巷道的风流场特征和风速精准测量等领域开展了许多研究, 并取得了一定成果, 但仍未得出普遍适用的风量精准测量方法。因此, 本文以湖南衡阳某矿山井下三个中段带有风门的巷道为研究对象, 利用 Fluent 流体力学数值模拟软件建立不同工况下的三维模型, 模拟分析风流在风门巷道中的流动特性, 深入系统地研究风门巷道的局部阻力特性, 并在此基础上开展风门巷道风量计算方法的研究, 为完善通风系统理论、优化通风设计和实现智能化通风调控提供有力的技术支持和理论依据。

## 2 现场试验

### 2.1 试验概况

选取湖南衡阳某矿山井下三个中段带有风门的巷道(以下简称为试验巷道), 将风门处前 50 m、后 50 m 的断面定为测段首、末端, 测量该断面的风速、静压、宽、全高等参数, 在风速测量时应避免涡流的影响并采用等面积法进行测量。考虑到巷道摩擦阻力的影响, 选取一段与试验巷道断面类型、支护形式相同的 100 m 直线巷道(以下简称为验证巷道)进行摩擦阻力系数的测定。图 1、图 2 所示为现场试验巷道与验证巷道, 共选取了 3 条带有风门的水平巷道进行试验, 表 1 为九中段的现场试验数据。(风门角度为 0°时风门为全开状态。)

### 2.2 试验结果及分析

试验巷道断面类型均为三心拱, 其周长  $U$ 、面积  $S$ 、空气密度  $\rho$  计算公式为

$$U = 2(h - b/3) + 2.33 \times b \quad (1)$$

$$S = b \times (h - b/3 + 0.26 \times b) \quad (2)$$

$$\rho = 3.484 \times 10^{-3} \frac{p - 0.377 \varphi p_w}{273.15 + t} \quad (3)$$



图1 试验巷道



图2 验证巷道

表1 现场通风阻力试验测定数据

工况	断面类型	断面宽/m	断面高/m	相对湿度/%	干球温度/℃	风门角度/(°)	测段长度/m
1				56.7	26.5	0	
2	三心拱	2.401	2.400	55.7	26.4	15	104.1
3				55.2	26.2	30	
4				55.0	26.4	45	
5				56.1	26.5	60	
6				56.2	26.5	75	

式中:空气密度  $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>;测点的绝对静压  $p$ , Pa;空气相对湿度  $\varphi$ , %;测点空气干球温度  $t$ , °C;绝对饱和蒸气压  $p_w$ , Pa。

并根据式(4)、(5)计算通风阻力  $P$  和阻力系数  $\alpha$ :

$$P = \left( \frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 + \rho g h_1 \right) - \left( \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2 + \rho g h_2 \right) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{PS_{avg}^3}{LU_{avg} Q_{avg}^2} \quad (5)$$

式中: $v_1, v_2$ 为测段首、末测点风速, m/s; $p_1, p_2$ 为测段首、末测点静压, Pa; $\rho$ 为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$ 为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $h_1, h_2$ 为测段首、末测点标高, 因首、末测点在同一水平, 故此次试验中忽略高程的影响。表2为九中段风门不同角度的通风阻力试验结果。

表2 风门不同角度的通风阻力试验结果

工况	断面面积/ m <sup>2</sup>	巷道周长/ m	风量/ m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	通风阻力/ Pa	阻力系数/ N·s <sup>2</sup> ·m <sup>-4</sup>	风门角度 影响系数	风门角度/ (°)
1	5.355	8.792	9.414	18.000	0.034	0.747	0
2	5.355	8.792	9.170	18.224	0.036	0.750	15
3	5.355	8.792	8.918	19.188	0.055	0.763	30
4	5.355	8.792	7.684	21.189	0.060	0.785	45
5	5.355	8.792	7.684	29.189	0.083	0.844	60
6	5.355	8.792	7.188	36.177	0.117	0.874	75

图3、图4所示为本次现场试验中风门不同角度对测段通风阻力以及阻力系数的影响。由图可知,随着风门角度从0°增大到30°,测段通风阻力和阻力系数增长的趋势较为平缓,当风门角度增大到30°以上时,增长幅度逐渐变大。分析认为,风门角度30°以下时,风流的紊乱程度较低,更接近均匀稳

定流场,风速变化较小,因此风流的局部阻力和阻力系数变化较为平缓,而风门角度大于30°时,风流经过风门时流线发生急剧变化,风速急剧增大,此时风流的能量损失集中于局部区域,且损失程度较大,相应的阻力系数也较大。

选取的验证巷道测量得出的巷道摩擦阻力系数

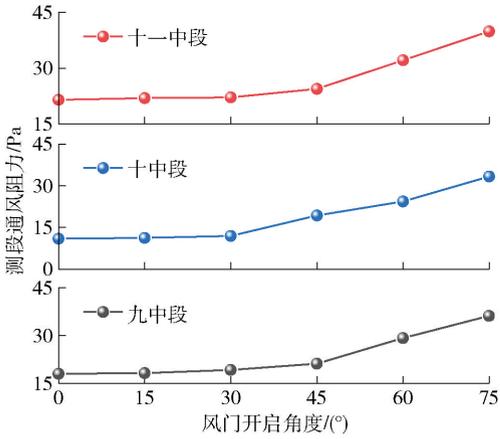


图3 风门角度与测段通风阻力

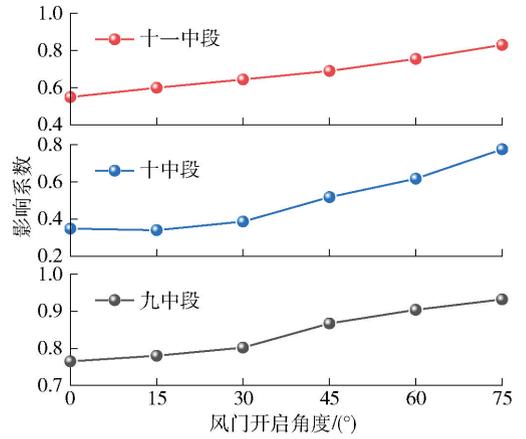


图5 风门角度对测段通风阻力的影响系数

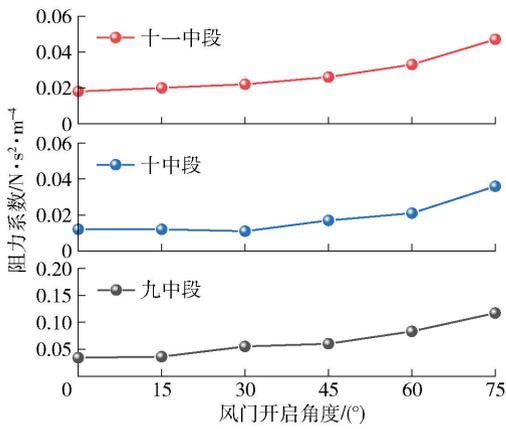


图4 风门角度与阻力系数

的巷道模型,风门角度分别为0°、15°、30°、45°、60°、75°,共6个模型,为更好的分析风门后风流场特征,设定进风巷道为10 m,出风巷道为50 m,试验模型尺寸如图6所示。

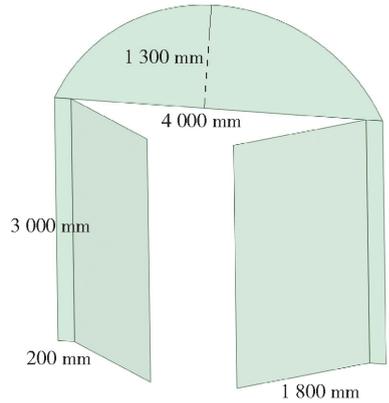
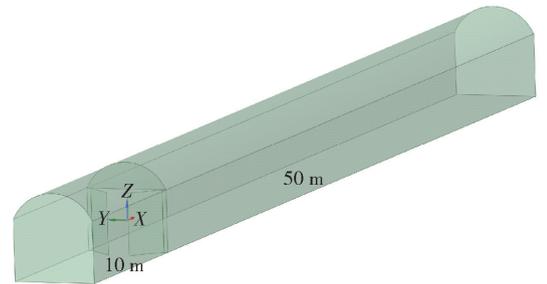


图6 巷道模型尺寸



为  $0.008 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ,故试验巷道的巷道壁面摩擦阻力  $P_m$  为

$$P_m = \frac{0.008 \cdot LU_{avg} Q_{avg}^2}{S_{avg}^3} \quad (6)$$

为探究不同风门角度与局部阻力的关系,减去现场试验中巷道壁面摩擦阻力等其他因素的影响,给出风门角度对通风阻力的影响系数  $\gamma$  为

$$\gamma = \frac{P - P_m}{P} \quad (7)$$

图5所示为风门角度与测段通风阻力的影响系数的关系图,从图中可以看出,三条试验巷道的风门影响系数与风门角度均呈正相关,但是不同巷道的增长趋势存在差异,这与风门密封性、尺寸等现场安装条件有关。

## 3 数值模拟

### 3.1 巷道模型建立

以现场试验为参考,构建了断面形式为三心拱

巷道的模型,风门角度分别为0°、15°、30°、45°、60°、75°,共6个模型,为更好的分析风门后风流场特征,设定进风巷道为10 m,出风巷道为50 m,试验模型尺寸如图6所示。巷道内风流运动过程采用 N-S 方程组求解,所用的质量守恒方程和动量守恒方程如式(8),计算模型使用标准 k-epsilon,巷道模型入口类型为 Velocity-inlet,出口类型为 Pressure-outlet,巷道壁面为无滑移边界条件且粗糙度设置为0,计算方法选择速度-压力耦合的 SIMPLE 算法,初始化时设置从全域(all-zones)开始计算。

$$\begin{cases}
\frac{\partial(\rho_f u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f w)}{\partial z} = 0 \\
\frac{\partial(\rho_f uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f uw)}{\partial z} = \\
\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\
\frac{\partial(\rho_f vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f vw)}{\partial z} = \\
\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\
\frac{\partial(\rho_f wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f ww)}{\partial z} = \\
\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \\
\frac{\partial(\rho_f uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f vT)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f wT)}{\partial z} = \\
\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T
\end{cases} \quad (8)$$

式中:风流密度  $\rho_f, \text{kg/m}^3$ ;  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  轴方向风速,  $\text{m/s}$ ; 空气动力黏度  $\mu$ , 取值为  $17.9 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ; 气体压力  $p, \text{Pa}$ ;  $S_u, S_v, S_w$  分别为  $x, y, z$  轴方向的动量源项,  $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}^2$ ; 气体温度  $T, \text{K}$ ; 空气传热系数  $k$ , 取值为  $0.023 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ; 空气比热容  $C_p$ , 取值为  $717 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ; 黏性耗散项  $S_T, \text{kg}\cdot\text{K/m}^3\cdot\text{s}$ 。

### 3.2 计算结果与分析

#### 1) 风门角度与流场特征

图 7 ~ 图 12 所示为不同风门角度时巷道速度云图,其中图 7(a) 至图 12(a) 为巷道俯视图,图 7(b) 至图 12(b) 为巷道侧视图。对比俯视图可以发现,风门角度为  $0^\circ$  时,巷道内风速分布较为均匀,云图色彩过渡相对平缓,整个巷道的风速呈现出较为一致的状态;随着风门角度增大至  $75^\circ$  时,巷道内的风速分布逐渐变得不再均匀,部分区域风速明显加快,在云图上表现为颜色更明亮的区域集中出现,而另一些区域风速减缓,颜色相对较暗,整体云图的色彩变化更加剧烈,表明风速差异增大。从侧视图可以看出,风门角度为  $0^\circ$  时,垂直方向上的风速受风门的影响可明显分为三个较长的区域,变化较为平缓,当风门角度增大后,垂直方向上的风速差异明显增大,并出现局部高速区域和低速区域交替的情况,云图在不同高度上的色彩变化更加复杂,表明垂直方向的气流变得不稳定。

分析认为,风门角度的变化会使风流的流场特

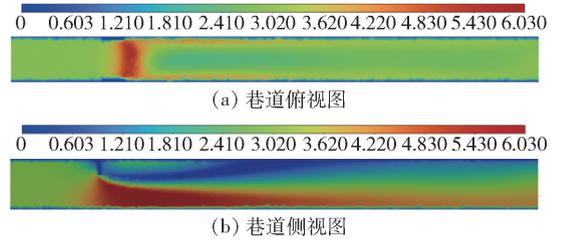


图 7 风门角度为  $0^\circ$  时巷道风速云图

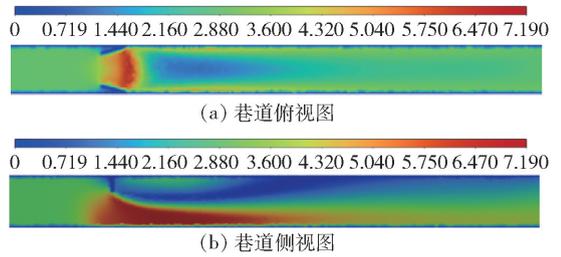


图 8 风门角度为  $15^\circ$  时巷道风速云图

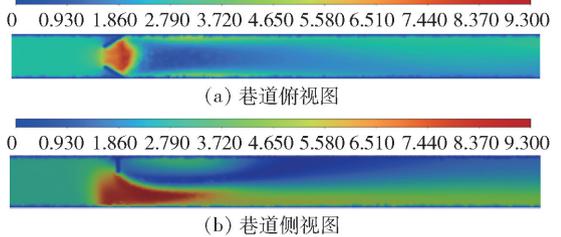


图 9 风门角度为  $30^\circ$  时巷道风速云图

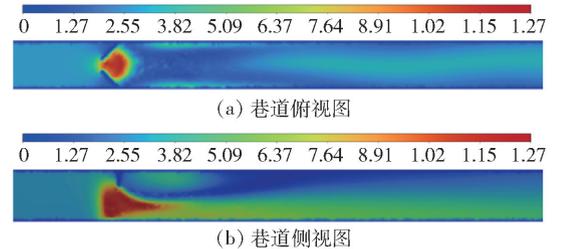


图 10 风门角度为  $45^\circ$  时巷道风速云图

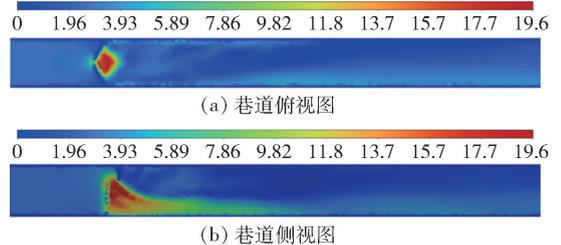


图 11 风门角度为  $60^\circ$  时巷道风速云图

征随之改变。当风门角度增大时,风流可通过的区域相应变小,而风门的阻碍作用会致使风门前后压力差增大。在此情况下,风流会加速通过该区域,并

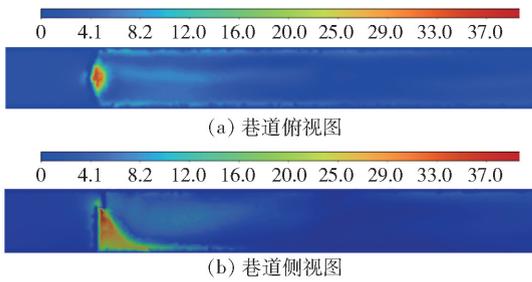


图 12 风门角度为 75°时巷道风速云图

且风速越大,就越容易带动风门后流速较低的风流,进而致使流场变得紊乱,出现高速区和低速区交替的现象。

### 2) 风门角度与进出口压差

随着风门角度的变化,风门对风流的阻碍作用也会发生变化,风门角度与进出口压力差关系如图 13 所示。由图可见,不同风门角度的巷道压力最大值均分布在风门前端,随着风门角度的增大而增大。通过计算巷道进出口的压力差可以得出:风门角度从 0°增加到 45°时,模拟试验的进出口压力差随之增大,但增长趋势十分缓慢,而在风门角度从 60°增加到 75°时,进出口压力差呈现爆炸式增长的现象,整体增长趋势可以表征为  $P = 0.77e^{0.11\beta}$ ,相关系数  $R = 0.99$ 。

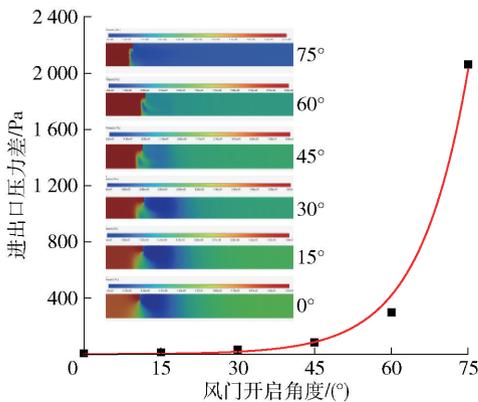


图 13 风门角度与进出口压力差关系

对比图 3 和图 13 可以发现,风门角度从 0°到 60°这一区间内,现场试验与模拟试验的局部阻力变化趋势基本一致,而风门角度从 60°到 75°时,模拟试验的局部阻力出现突增的现象,分析认为,模拟试验中的巷道与风门连接处不存在缝隙,所以当风门角度增大到一定程度时,风流受到的阻碍作用急剧增加,导致局部阻力突增;而现场试验中由于条件复杂,巷道与风门的贴合处、风门下部、风门转动处等位置往往存在漏风现象,从而导致局部阻力变化较

小。

综上,矿山井下巷道条件错综复杂,不同风门角度的局部阻力的大小与巷道断面类型、断面大小、支护形式等息息相关,不同风门角度的模拟试验结果与现场试验存在差异,当风门角度在 60°以下时,数值模拟结果可以较好的预测现场不同风门角度的局部阻力的变化趋势。

## 4 风量精准测算方法

综合现场试验与数值模拟试验结果可以发现,风流通过风门后产生的局部阻力、阻力系数以及风门影响系数均与风门角度存在正相关关系。假设巷道风门四周与巷道壁贴合处密封良好,不存在漏风现象,巷道风流通过风门的面积可以分为两个区域,一个与风门方向垂直的长方形区域和一个与风流方向平行的梯形区域如图 14 所示。

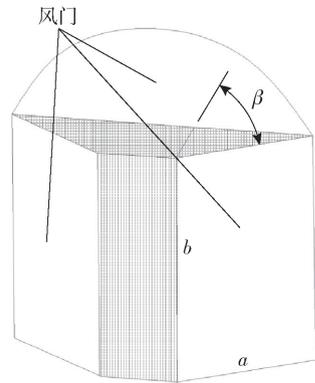


图 14 巷道风门风流通过区域

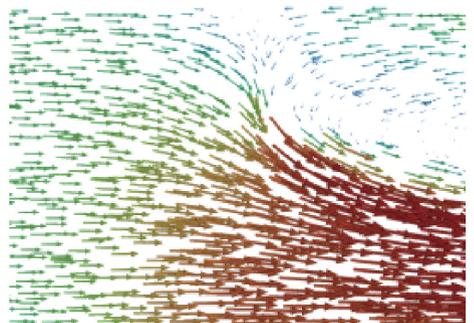


图 15 巷道风门处风流流场

从图 15 可以看出,由于梯形区域与风流方向平行,梯形区域的风流主要由两部分组成:一是风门上部区域受挤压下行的风流,二是下部风速较大的风流带动的风流。因此,梯形区域的风流通过面积存在一定的折损系数  $\omega$ ,且  $\omega$  与风门处最大风速存在正相关关系,根据通风连续性方程,最大风速与风流

通过区域总面积相关,故最大速度  $V_{max}$ 、风流通过区域面积  $S_f$ 、长方形区域面积  $S_c$ 、梯形区域面积  $S_t$  计算公式为

$$V_{max} = \frac{Q}{S_f} \quad (9)$$

$$S_f = S_c + \omega S_t \quad (10)$$

$$S_c = b(2a - 2a\sin\beta) \quad (11)$$

$$S_t = (2a - a\sin\beta)a\cos\beta \quad (12)$$

式中:单扇风门长度  $a = 1.8 \text{ m}$ ;单扇风门高度  $b = 3 \text{ m}$ ;风量  $Q = 46.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据数值模拟结果,并结合公式(9)~(12)得出不同风门角度风流通过面积,具体见表3。

表3 不同风门角度风流通过面积

$\beta/(\text{°})$	$Q/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{max}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$S_f/\text{m}^2$	$S_c/\text{m}^2$	$\omega S_t/\text{m}^2$
0	46.98	3.68	12.77	10.8	1.97
15	46.98	4.02	11.69	8.00	3.69
30	46.98	4.87	9.65	5.40	4.25
45	46.98	6.34	7.41	3.16	4.25
60	46.98	9.24	5.08	1.45	3.63
75	46.98	16.86	2.79	0.37	2.42

图16所示为不同风门角度与风流通过区域面积曲线图。由图可知,随着风门角度的增加,风流通过区域总面积和长方形区域面积随之降低,而梯形区域面积则呈现先增大后减小的趋势,对比图7~图12巷道速度云图侧视图可以发现,梯形区域的颜色同样随着风门角度的增大由浅变深。

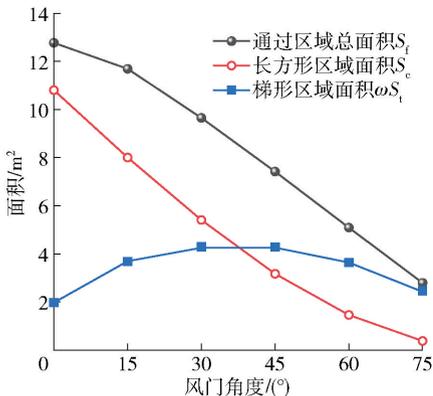


图16 风门角度与风门通过区域面积曲线

结合式(10)~(12),得出折损系数  $\omega$  关于风门角度  $\beta$  的变化如图17所示,其关系可以表征为  $\omega = 0.14 \times 1.05^\beta$ , 相关系数  $R = 0.99$ , 将其代入公式(10),并结合公式(9)、公式(11)、公式(12)可得:

$$Q = V_{max} [2ab(1 - \sin\beta) + 0.14 \times 1.05^\beta (2 - \sin\beta) a^2 \cos\beta] \quad (13)$$

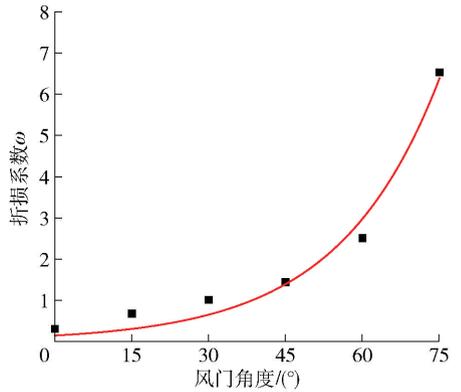


图17 风门角度与折损系数

式(13)是充分研究了不同风门角度情况下,风门处最大风速以及风流通过区域面积变化规律的基础上所得出的巷道风量计算公式,该式可以通过已知的风门尺寸、风门角度以及风门处的风速最大值精准计算整个巷道的风量。由于井下巷道面积较大,仅通过传感器单点测风,风速不稳定,可靠性较低,而风门处通风面积较小,风速最大值位置基本不变且风速稳定,更适合传感器单点测风。因此,结合现场实际情况,利用此公式即可做到精准测量巷道风量,为井下通风系统风量监测、智能调控提供理论依据。

### 5 结论

(1) 现场试验表明:风门角度在  $0^\circ$  到  $30^\circ$  内,风流紊乱程度低,流场比较稳定,测段通风阻力和阻力系数增长平缓,当风门角度大于  $45^\circ$  时,风流流线急剧变化,能量损失集中且损失量大,通风阻力及阻力系数增长幅度变大。同时,三条试验巷道的风门影响系数与风门角度呈正相关,但增长趋势因现场安装条件而异。

(2) 数值模拟试验显示:风门角度为  $0^\circ$  时巷道风速分布均匀,随着角度增大风速分布逐渐不均匀,垂直方向气流也变得不稳定。进出口压力差随角度增大而增大,  $0^\circ$  到  $45^\circ$  缓慢增长,  $60^\circ$  到  $75^\circ$  爆炸式增长,与现场试验对比发现,风门角度  $60^\circ$  以下时,数值模拟可较好预测局部阻力变化趋势。

(3) 基于模拟试验结果,考虑了风门角度与风流通过区域面积关系及折损系数,得出了风量精准计算公式,该公式可通过已知参数精准计算巷道风量,为井下通风系统风量监测、智能调控提供理论依据。

## [参考文献]

- [1] Macagno Enzo O., Hung Tin Kan. Computational and experimental study of a captive annular eddy[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 28(1): 43-64.
- [2] Fletcher D. F., Askell S. J., Patrick M. A.. Heat and mass transfer computations for laminar flow in an axisymmetric sudden expansion[J]. Computers & Fluids, 1985, 13(2): 207-221.
- [3] Scott P. S., Mirza F. A., Vlachopoulos J.. A finite element analysis of laminar flows through planar and axisymmetric abrupt expansions[J]. Computers & Fluids, 1986, 14(4): 423-432.
- [4] Badekas D., Knight D. D.. Eddy Correlations for Laminar Axisymmetric Sudden Expansion Flows I. Journal of Fluids Engineering, 1992, 114(1): 119-121.
- [5] M. Bhamiee, A. Nurick, D. M. Madyira. An experimentally validated mathematical and CFD model of a supply air window: Forced and natural flow[J]. Energy & Buildings, 2013, 57: 289-301.
- [6] 史晓娟, 程森林, 马德平, 等. 百叶式自动调节风窗流场分布及局部阻力特征研究[J]. 煤炭技术, 2024, 43(4): 171-174.
- [7] 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.
- [8] 王禹, 刘剑, 黄瀚仪, 等. 断面突然扩大巷道流场特征及局部阻力特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(2): 63-70.
- [9] 邵和, 陈开岩, 赵红梅. 风窗局部阻力系数的实验测定及数值模拟分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(21): 2467-2471.
- [10] 刘剑, 李雪冰, 白崇国, 等. 管道风流 PIV 实验中示踪粒子特性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(10): 1057-1062.
- [11] 刘剑, 宋莹, 刘明浩, 等. 基于 LDA 的均直巷道断面风速分布规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(12): 65-71.
- [12] 刘剑, 宋莹, 李雪冰, 等. 基于 LDA 的均直巷道断面突扩风速分布规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 892-898.
- [13] 尹斌, 刘彦青, 李伟, 等. 矿用自动控制风窗局部风阻数值模拟[J]. 煤矿安全, 2016, 47(10): 172-175.
- [14] 梁婷婷. 矿井风门漏风特性实验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [15] 胡建华, 赵阳, 周坦, 等. 矿山通风巷道风门后的风速分布特性研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(04): 1-5+10.
- [16] 吴兵, 赵晨光, 雷柏伟. 巷道摩擦风阻粗糙表面分形表征及计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 633-640.
- [17] 姜黎明, 刘彦青, 赵灿. 巷道转弯区域流场特征及局部通风阻力系数计算研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 95-102.
- [18] 刘明浩. 矩形断面巷道风速分布规律的 LDA 实验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
- [19] 齐艺裴. 巷道风流能量耗散机理及粉尘输运动力学模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
- [20] 宋莹, 刘剑, 李雪冰, 等. 矿井巷道风流平均风速分布规律的试验与模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(6): 146-151.
- [21] 宋莹, 李海霞, 史俊伟, 等. 基于激光多普勒测速技术的突扩巷道流场风速分布研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(6): 617-623.
- [22] 宋莹, 朱萌, 邓立军, 等. 巷道边壁支护方式下风流场流速分布特征的 PIV 实验研究[J]. 金属矿山, 2021(8): 203-207.
- [23] 辛宪耀, 李雨成, 周西华, 等. 矿井通风系统并联巷道降阻调节经济性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 323-328.