

文章编号: 1671-251X(2023)09-0064-09

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2023020040](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2023020040)

# 巷道障碍物对风速监测位置的影响研究

张京兆<sup>1</sup>, 熊帅<sup>1</sup>, 范京道<sup>1,2</sup>, 闫振国<sup>1</sup>, 黄玉鑫<sup>1</sup>, 张亚爽<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:**现有高精度风速传感器在井下的安装位置统一采用正常风流流动状况下的方案,未综合考虑巷道放置障碍物等导致风流异常的情况,达不到智能通风的风速精度要求,难以实现矿井的安全生产。针对上述问题,以小纪汗煤矿11218回风巷为研究对象,对井下巷道中障碍物不同位置与不同尺寸对风速的影响展开研究,结合现场实测巷道基础参数与Fluent软件构建贴合该矿特征的巷道模型,研究了距上游端口10 m处底板放置的障碍物与两帮的距离(简称间距L)及其形状大小、放置方式等因素对巷道风速监测位置的影响。**①**定量分析结果发现:各模型于断面直角处存在微小部分的合理风速区域,其面积在L=0.5 m时最大,L=1 m时次之,L=0时最小;随着间距L的增加,风速传感器最佳布设位置随x坐标(巷道走向)的增加呈均匀分布—截面直角处微量分布—空心圆角矩形分布的规律,且合理风流向两帮扩散更快;L=0时,顶板位置中垂线的合理风流分布在2.59~2.78 m处;L=0.5 m时,顶板位置中垂线的合理风流分布在2.59~2.80 m处;L=1 m时,顶板位置中垂线的合理风流分布在2.61~2.78 m处。**②**定性分析结果表明:放置障碍物巷道的平均风速均呈增大—减小—增大—平衡的状态;障碍物竖放或宽度增加对风流影响较大;障碍物体积相同,风速峰值大致相同;风流发展稳定时,L=0.5 m时风速可靠性最高,L=1 m时次之,L=0时可靠性相对最低。**③**通过风速普适性分析得出:在同模型下,不同风速变化率均处于上升—下降—再上升—平衡的4个阶段;在模型2、间距L=0.5 m条件下,对回风巷风流运移规律影响较小的结论具有风速普适性。

**关键词:**矿井通风;智能通风;巷道障碍物;风速监测;矩形巷道;风速传感器

中图分类号: TD723

文献标志码: A

Research on the influence of roadway obstacles on the position of wind speed monitoring

ZHANG Jingzhao<sup>1</sup>, XIONG Shuai<sup>1</sup>, FAN Jingdao<sup>1,2</sup>, YAN Zhenguo<sup>1</sup>, HUANG Yuxin<sup>1</sup>, ZHANG Yashuang<sup>1</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

**Abstract:** The existing high-precision wind speed sensors are uniformly installed in the coal mines under normal airflow conditions. It does not consider the abnormal airflow caused by obstacles placed in the roadway. It cannot meet the wind speed precision requirements of intelligent ventilation and it is difficult to achieve safe production in the mine. In order to solve the above problems, taking the 11218 return air roadway of Xiaojihan Coal Mine as the research object, the influence of different positions and sizes of obstacles in the underground roadway on wind speed is studied. Based on on-site measured roadway basic parameters and Fluent software, a roadway model is constructed that fits the features of the mine. The influence of factors such as the distance between the obstacle placed on the floor at a distance of 10 meters from the upstream port and the two sides

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-09-15; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974232)。

作者简介: 张京兆(1976—), 男, 河南淮阳人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事矿井通风与粉尘防治方面的教学与研究工作,

E-mail: [1009282107@qq.com](mailto:1009282107@qq.com)。通信作者: 熊帅(1999—), 男, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 主要从事矿井通风方面的研究,

E-mail: [1627900018@qq.com](mailto:1627900018@qq.com)。

引用格式: 张京兆, 熊帅, 范京道, 等. 巷道障碍物对风速监测位置的影响研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(9): 64-72.

ZHANG Jingzhao, XIONG Shuai, FAN Jingdao, et al. Research on the influence of roadway obstacles on the position of wind speed monitoring [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(9): 64-72.



扫码移动阅读

(referred to as the distance  $L$ ), its shape, size, and position on the monitoring position of roadway wind speed is studied. ① The quantitative analysis results show that there are small reasonable wind speed regions at the right angles of the cross-section for each model. The maximum area is when  $L=0.5$  m, followed by when  $L=1$  m, and the minimum area is when  $L=0$  m. As the distance  $L$  increases, the optimal placement position of the wind speed sensor follows a uniform distribution with the increase of the x-coordinate (roadway direction) - a trace distribution at the right angle of the cross-section - a hollow rounded rectangle distribution pattern. The reasonable airflow diffuses faster towards the two sides. When  $L=0$  m, the reasonable airflow distribution of the vertical line in the roof position is at 2.59-2.78 m. When  $L=0.5$  m, the reasonable airflow distribution of the vertical line in the roof position is between 2.59-2.80. When  $L=1$  m, the reasonable airflow distribution of the vertical line in the roof position is 2.61-2.78 m. ② The qualitative analysis results indicate that the average wind speed in the roadway with obstacles is in a state of increase - decrease - increase - balance. The vertical placement or increase in width of obstacles has a significant impact on wind flow. The volume of obstacles is the same, and the peak wind speed is roughly the same. When the wind flow develops steadily, the wind speed reliability is highest at  $L=0.5$  m, followed by  $L=1$  m, and the reliability is lowest at  $L=0$  m. ③ Through the analysis of wind speed universality, it can be concluded that under the same model, different wind speed change rates are in four stages of ascending - descending - ascending - balancing. Under the condition of model 2 and spacing  $L=0.5$  m, the conclusion that the influence on the air flow transport law of the return air roadway is relatively small has wind speed universality.

**Key words:** mine ventilation; intelligent ventilation; roadway obstacles; wind speed monitoring; rectangular roadway; wind speed sensor

## 0 引言

近年来,随着矿井智能化的普及、矿井通风技术的飞速发展<sup>[1]</sup>,矿井智能通风系统覆盖面逐渐扩大,而该系统的建立与稳定运行对通风参数的精确度提出了更高的要求。高精度风速传感器在满足智能化系统对各项参数高准确度要求的前提下,一定程度上消除了井下测风人员的安全隐患,逐渐取代了传统的井下测风工具,成为大部分矿井测风工作的首选。井下巷道通风工作复杂且影响因素多变,尤其体现在异常风流对通风系统的影响上,其原因之一是巷道中堆放设备、杂物等,造成巷道风流局部紊乱,使附近风速测点所得数据产生偏差,不利于巷道通风环境的维持与通风网络的解算。在测风巷道中,风速传感器在不同的空间位置所测得的风速值也不尽相同,因此精准感知巷道通风参数,对异常风流巷道的测风仪器的合理空间位置进行研究,确保智能化通风系统基础信息的科学性与可靠性是至关重要的。

目前许多学者在井下巷道测风领域展开了研究。刘剑等<sup>[2]</sup>对通风参数在湍流脉动作用下的变化进行了研究,得到可实现精准测风的理论支撑。李雪冰等<sup>[3]</sup>通过理论与实验研究得出巷道断面任意点风速与巷道断面平均风速的关系,采用提高数据采集频率的方法,满足风速时均化要求。丁翠等<sup>[4]</sup>通过模拟与实验结合的方式对三心拱截面巷道进行研究,提出“关键环”概念,明确了“关键环”分布的关键影响因素。杨宇等<sup>[5]</sup>对拱形巷道断面中特征线上

的风流分布进行研究,巷道中没有障碍物时,风速分布呈现左右基本对称、上下差别较大的状况。潘竞涛等<sup>[6]</sup>对风速传感器的测量数据采用最小二乘法进行关系拟合与分析,将测量数据转换成平均风速并应用于实际生产。李亚俊等<sup>[7]</sup>对圆形巷道断面风流分布规律进行研究,得出可通过曲线拟合对巷道断面任一点风速值计算的结论。宋莹等<sup>[8]</sup>通过实验与模拟相结合的方法,得出巷道断面平均风速分布规律及多种截面风流的分布特征。张浪<sup>[9]</sup>通过现场实测与模拟,得出井下测风站人员与传感器的最优位置。张士岭<sup>[10]</sup>对风速变化规律进行研究,提出了巷道断面平均风速所在位置及测量方法。鹿广利等<sup>[11]</sup>通过对不同条件下的巷道进行模拟与分析,得出不同转弯角度下传感器最优布设位置。张京兆等<sup>[12]</sup>研究了人口形式对巷道定点测风位置的影响,得出巷道不同人口形式的合理测风定点位置,其中矩形巷道风流平衡时,合理测风高度变化区间为2.59~2.79 m。李虎民等<sup>[13]</sup>通过现场实测与数值模拟相结合的方式,确定了巷道相对粗糙度对定点测风位置的影响大小。盛典<sup>[14]</sup>通过数值模拟与分析,得出全断面风门能够有效对矿井通风系统进行调节与控制的结论。葛启发等<sup>[15]</sup>通过数值模拟与分析,对进路式采场通风参数进行了优化,为降低局部通风机能耗提供了理论指导。郭对明等<sup>[16]</sup>对深部掘进巷道进行相关研究,改善了井下高温环境。王春龙等<sup>[17]</sup>通过数值模拟分析,对矿井通风降温参数优化进行了分析研究,为矿井深部通风降温参数设置提

供了参考。上述学者采用数值模拟软件与理论分析结合实验验证的方法研究了井下巷道风流运移规律、优化了矿井通风相关参数,但未涉及巷道中存在不同形状的障碍物时风流运移规律的探索。

本文以中国华电集团有限公司小纪汗煤矿 11218 回风巷为例,对井下巷道中障碍物不同位置与不同尺寸对风速的影响展开研究,利用 Fluent 数值模拟软件模拟井下巷道中不同障碍物的大小和障碍物放置位置对风速的影响,并找到受障碍物放置位置影响最小的监测位置。

## 1 模型建立与模拟参数设置

### 1.1 模型建立

在不考虑巷道壁面发生局部形变的情况下,采用小纪汗煤矿矩形截面 11218 回风巷的测量尺寸与风速测量平均值进行模拟计算,其数据见表 1。

表 1 11218 回风巷截面参数信息

Table 1 11218 return air roadway parameter information

高度/m	宽度/m	周长/m	断面积/m <sup>2</sup>	进风口风速/(m·s <sup>-1</sup> )
3.16	5.54	17.4	17.51	2

ANSYS Fluent 软件可用于模拟各种复杂流场,湍流模型具有研究范围广、精度高的显著特征,适用于研究矿山井下风流场<sup>[18-19]</sup>。本文建立 6 种障碍物模型,其长、宽、高分别用  $l, b, h$  表示,障碍物信息见表 2。设障碍物与两帮之间的较近距离(以下简称间距)  $L=0, 0.5, 1 \text{ m}$ ;粗糙度常数为 0.8。

表 2 障碍物信息

Table 2 Obstacle information

	$l/\text{m}$	$b/\text{m}$	$h/\text{m}$
障碍物1	1	1	1
障碍物2	2	1	1
障碍物3	1	1	0.5
障碍物4	2	1	0.5
障碍物5	1	0.5	1
障碍物6	2	0.5	1

以表 1、表 2 数据为基础,采用 Design Modeler 软件建立不同参数的障碍物模型,分别对应 6 种障碍物模型,建立了 6 组巷道模型,将每组巷道模型分为 3 个子模型( $L=0, 0.5, 1 \text{ m}$ ),共计 18 个巷道子模型。 $L=0.5 \text{ m}$  时的各模型关键部位如图 1 所示。

以  $x$  轴为巷道走向,  $y$  轴为巷道宽度,  $z$  轴为高度,当  $L=0.5 \text{ m}$  时,巷道模型的俯视图如图 2 所示。根据障碍物模型与间距  $L$ ,对 11218 回风巷距上游端口 10 m 处放置障碍物的情况进行分类。由于该巷道截面具有对称结构特点,可由巷道一侧的结果推

导出另一侧的相关结论。

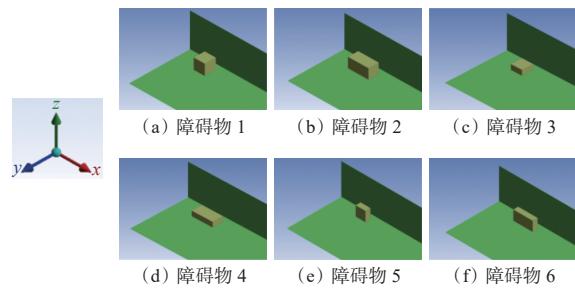


图 1 模型关键部位

Fig. 1 Key parts of the model

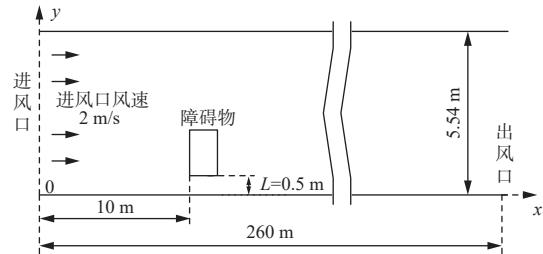


图 2  $L=0.5 \text{ m}$  时巷道模型的俯视图

Fig. 2 Top view plan of the roadway model at  $L=0.5 \text{ m}$

### 1.2 模拟参数设置

采用 ANSYS Fluent 软件建立 18 个巷道子模型,巷道子模型较为规整,采用 cartesianMesh 方法进行网格划分,网格单元平均尺寸为 0.2 m,最大、最小尺寸分别为 0.25, 0.1 m,经网格划分的独立性考核确定其合理性;以  $L=0.5 \text{ m}$  时模型 2 为例,该模型划分共计约 116 万个节点、100 万个网格单元,平均单元质量为 0.998。其局部网格划分如图 3 所示。

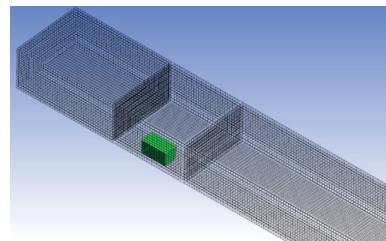


图 3  $L=0.5 \text{ m}$  时模型 2 局部网格划分

Fig. 3 Model 2 local grid division at  $L=0.5 \text{ m}$

井下巷道风流类型多为湍流<sup>[20-21]</sup>,在巷道放置障碍物后将导致风流更加紊乱,但风流依旧为湍流类型。本文采用只考虑动量传输,不涉及能量交换的 Standard  $k-\varepsilon$  湍流模型作为流体运动模型,采用双方程湍流模型压力耦合的半隐式方法(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, SIMPLE)对流体运动进行仿真,收敛标准除连续性方程为  $1 \times 10^{-4}$  外,其他均为  $1 \times 10^{-7}$ 。以空气为模拟风流,密度取实测平均密度  $1.07 \text{ kg/m}^3$ ,通过插值法结合温度数据确定巷道空气黏性系数为  $1.8185 \times 10^{-5} \text{ kg/(m·s)}$ ,使得模拟结果更符合 11218 回风巷的实际通风状况。

边界条件设置:进风口采用固定速度进风(2 m/s),出风口采用自由出流;表面粗糙度常数为0.5,其他巷道壁面粗糙度常数取0.7,障碍物粗糙度常数取0.8,壁面类型均为标准壁面函数,其余设置及参数采用软件系统的推荐值或默认值。

## 2 障碍物对巷道合理风速分布区间的定量分析

为研究障碍物在不同条件下对11218回风巷风流场的影响,选取障碍物种类、间距大小、入口风速3个变量结合控制变量法展开相关分析,所有巷道的模型尺寸、环境条件、网格划分所采用的方法、求解器参数设置等均保持一致。数据取自巷道断面宽度中心位置( $y=2.77$  m)、高度为2.7 m的所有计算单元,每0.2 m设置1个分析节点,进风口处风流场云图及分析节点如图4所示。

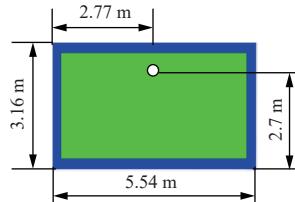


图4 进风口风流场云图及分析节点

Fig. 4 Inlet airflow field cloud diagram and analysis node

煤矿企业规定人工测风误差不大于5%,为满足井下测风工作精度需求,指导矿井智能测风工作的开展,本文以3%为风速传感器测风精度标准,开展以下分析工作。当进风口风速为2 m/s时,传感器测风误差为1.94~2.06 m/s,称测风精度内的风速数值为合理风速,风速在测风精度内的风流为合理风流,合理风流处即为风速传感器最优布设区域。由文献[12]可知,矩形巷道断面在无障碍物且风流充分发展条件下,当 $x>115$  m时,在 $2.59\text{ m}<z<2.79$  m位置布设风速传感器较为合理。因此本文在 $x=120$  m截面的中垂线 $z=2.7$  m处布设风速传感器;取障碍物迎风侧前1 m、障碍物迎风侧、障碍物背风侧、障碍物背风侧后1 m、风速传感器截面( $x=120$  m)为定量分析内容,根据 $x$ 坐标升序方式分别命名截面,为截面1—截面5。

### 2.1 $L=0$ 时障碍物对巷道风流场的影响

当 $L=0$ 时,取各个模型所对应的风流场云图做对比,结果如图5所示。可看出截面1、截面3、截面4的风流场云图中,合理风流所呈现形状大致为弧状,且与各自对应的障碍物矩形不符。在截面1中,合理风流分布面积随着障碍物宽度减小而减小。

结合图4与图5中的截面5可看出,顶板位置中垂线的合理风流分布于2.59~2.78 m处。

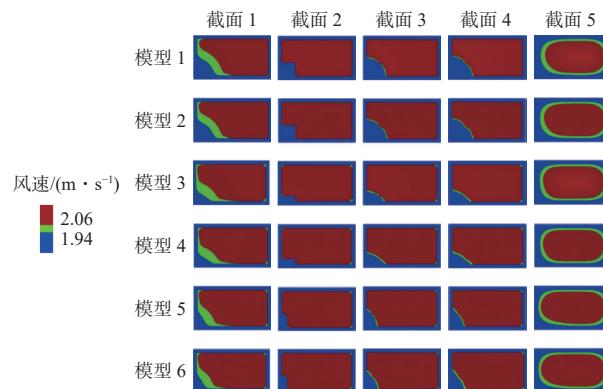


图5  $L=0$ 时所有模型的5种截面位置所对应的风流场云图

Fig. 5 Cloud plot of wind fields corresponding to the five cross-sectional positions of all models at  $L=0$  m

### 2.2 $L=0.5$ m时障碍物对巷道风流场的影响

当 $L=0.5$  m时,取各个模型所对应的风流场云图做对比,结果如图6所示。可看出截面1中合理风流分布面积随障碍物体积减小而减小,截面3中当宽度 $b=0.5$  m时,模型5、模型6可体现障碍物大致形状。结合图4与图6中的截面5可知,顶板位置中垂线的合理风流分布在2.59~2.80 m处,其中模型1、模型2风流发展较为缓慢,尚未形成圆角矩形的形状。

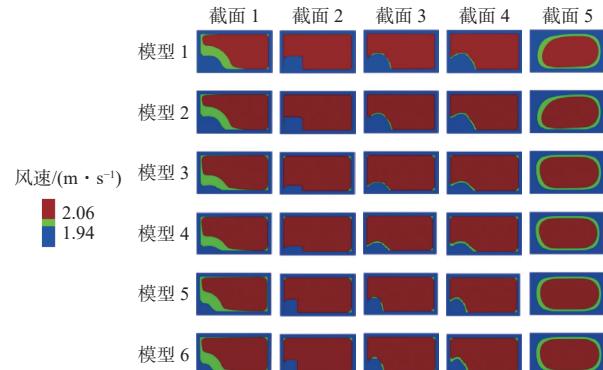


图6  $L=0.5$  m时所有模型的5种截面位置所对应的风流场云图

Fig. 6 Cloud plot of wind fields corresponding to the five cross-sectional positions of all models at  $L=0.5$  m

### 2.3 $L=1$ m时障碍物对巷道风流场的影响

当 $L=1$  m时,取各个模型所对应的风流场云图做对比,结果如图7所示。可看出随着障碍物宽度减小,截面1中合理风流横向变化不明显;截面3中,宽度 $b=0.5$  m时,模型5、模型6可体现障碍物大致形状。结合图4与图7中的截面5可知,顶板位置中垂线的合理风流分布于2.61~2.78 m处。

结合图4—图7可知,在3种间距中,各模型于断面直角处存在微小部分的合理风速区域,其面积在 $L=0.5$  m时最大, $L=1$  m时次之, $L=0$ 时最小,随着间距 $L$ 的增加,截面1中合理风流分布区域逐渐增加;模型3、模型4的风流场云图中,合理风流横向分布较广, $L=1$  m时较为明显。截面1、截面3、截

面 4 的风流场云图中,合理风流于横向扩散较快;在放置障碍物的矩形巷道中,合理风流在图 4 中均匀分布,截面 1—4 的直角处微量分布,截面 5 为圆角矩形分布,故合理风流随  $x$  坐标增加呈均匀分布→直角处微量分布→空心圆角矩形分布的规律。两帮附近风流发展不对称,障碍物体积越大,风流发展至平衡所需时间越长;巷道放置障碍物一侧的合理风流分布区域更广,即传感器最优布设区域更大;结合表 2,对比模型 1、模型 2 和模型 5、模型 6 可知,障碍物宽度越大,此现象越明显。

### 3 $L$ 不同对风流运移规律的影响分析

以同种障碍物、不同间距为模拟条件的计算结果分析 11218 回风巷风流发展情况,取巷道断面所有计算节点风速数据,各个模型对比数据如图 8 所

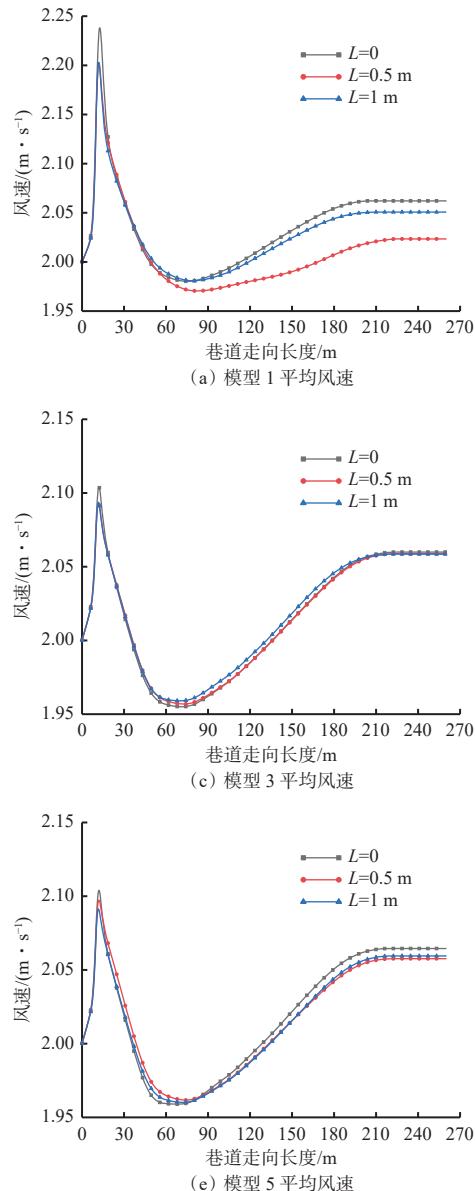


图 8 不同模型平均风速对比

Fig. 8 Comparison of the average wind speed of different models

示。可看出随着  $x$  的增加,各模型平均风速大小均呈增大—减小—增大—平衡的状态。

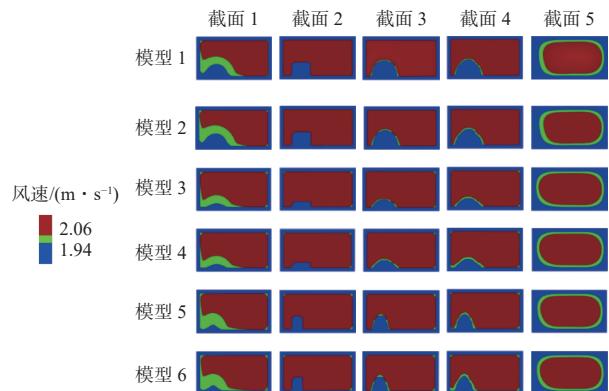
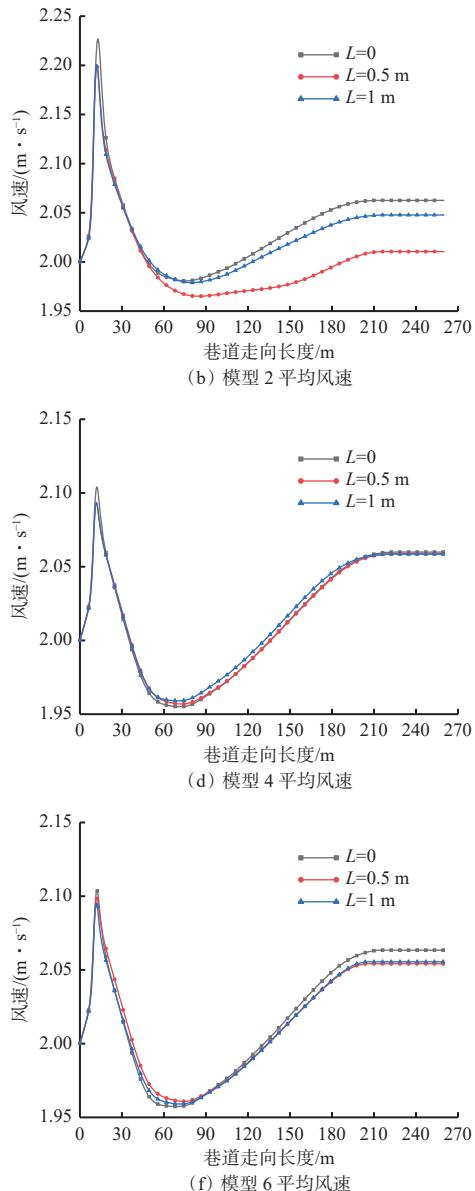


图 7  $L=1$  m 时所有模型的 5 种截面位置所对应的风流场云图

Fig. 7 Cloud plot of wind fields corresponding to the five cross-sectional positions of all models at  $L=1$  m



为方便对比各模型数据差异,降低分析研究的复杂程度,现以风速变化为依据,将风流发展分为4个阶段。

在 $x$ 为0~10 m时,各模型风速呈上升状态, $x$ 接近10 m区域时,风速急剧增加至最大值,这是由于风流发展受到阻碍,即此时风流与障碍物相接触,致使通风面积急剧减少,各模型风速在 $x$ 接近10 m时急剧上升,将此区间命名为第1阶段;当 $x>10$  m后,风速降低幅度逐渐减小,在 $x$ 为60~90 m内各模型风速先后降低至谷值,这是由于风流经过障碍物后通风面积突然增大,在障碍物后面形成涡流区域,进而使风速急剧降低,随后风速降幅逐渐减小,将此区间命名为第2阶段;风速在降低至最小值后缓慢增加,各模型风流在 $x$ 为180~220 m内先后发展至平衡,将风速在此增加的区间命名为第3阶段;风流发展平衡时 $x$ 坐标至巷道出风口区间命名为第4阶段。

在第1阶段,模型1,  $L=0$ 时风速峰值已超过2.225 m/s;模型3与模型5、模型4与模型6峰值均接近,且模型3与模型5、模型4与模型6所对应的障碍物体积相同。由此可见,障碍物体积相同,风速峰值大致相同。

在第2阶段,风速到达谷值时 $x$ 坐标与障碍物长度呈负相关;在模型1中,  $L=0.5$  m时风速谷值最大,模型4中,  $L=0$ 时风速谷值最小。

在第3阶段,  $L$ 不同时,模型1、模型2风速差别较大;模型3、模型4风速大致相同;障碍物高度 $h=1$  m时,  $L=0$ 时风速最大,  $L=1$  m时次之,  $L=0.5$  m时最小。

在第4阶段,障碍物长度与风流稳定位置呈负相关;风流发展平衡时,模型1、模型2的风速数值差最大,模型5、模型6次之,模型3、模型4的风流变化幅度最小,当 $h=0.5$  m时,风速集中于2.05 m/s。结合表2可知障碍物竖放或增加宽度对风流影响较大。

#### 4 不同模型对风流运移规律的影响分析

采用相同的数据采集方式及阶段式分析方法,对同间距 $L$ 条件下,不同模型对风流运移规律的影响进行研究。其对比结果如图9所示。

在第1阶段,各模型在风流经过障碍物时,在 $L=0$ 时风速波动较大,其他间距风速波动大致相同。

在第2阶段,各模型风速降低幅度大致相同,  $L=0.5$  m时,模型3—模型6相对模型1、模型2提前20 m降低至风速谷值;模型1、模型2风速谷值远大于其他模型,风速谷值降序为模型1、模型2、模型

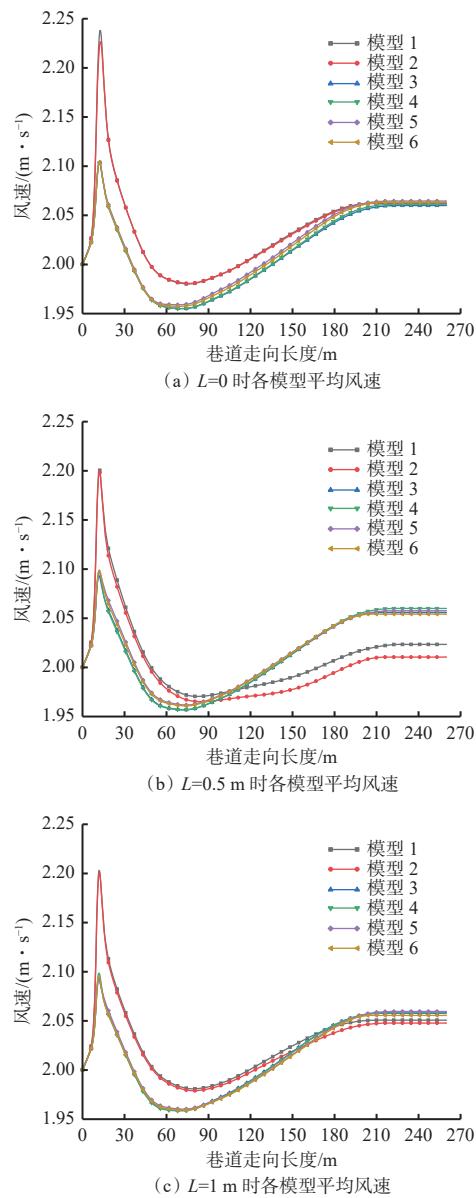


图9 同间距风速对比

Fig. 9 Wind speed comparison at the same distance

5、模型6、模型3、模型4;障碍物长度相同时,风速谷值与障碍物高度、宽度呈正相关,障碍物高度与宽度相同时,风速谷值与障碍物长度呈负相关。

在第3阶段,模型1、模型2风速相对其他模型增幅较小,在 $L=0.5$  m时最为明显,即障碍物体积与本阶段风速增幅呈负相关。

在第4阶段,风流发展平衡,模型2风速最接近初始风速;  $L=0, 1$  m时风速集中于2.05 m/s;  $L=0.5$  m时,风速不集中,但风速相对最小,接近于初始风速;因此风流发展稳定时,  $L=0.5$  m时风速可靠性最高,  $L=1$  m时次之,  $L=0$ 时可靠性相对最低。

#### 5 风流运移规律的风速普适性分析

煤矿安全规程规定,采区进回风巷风速应处于0.25~6 m/s,本文以1 m/s为最低风速,1 m/s为速度

增量, 5 m/s 为最高风速, 进行相关研究与分析。由于  $L = 0.5$  m 时风速可靠性最高, 所以在  $L = 0.5$  m 时, 不同风速条件下, 展开风流运移规律的风速普适性

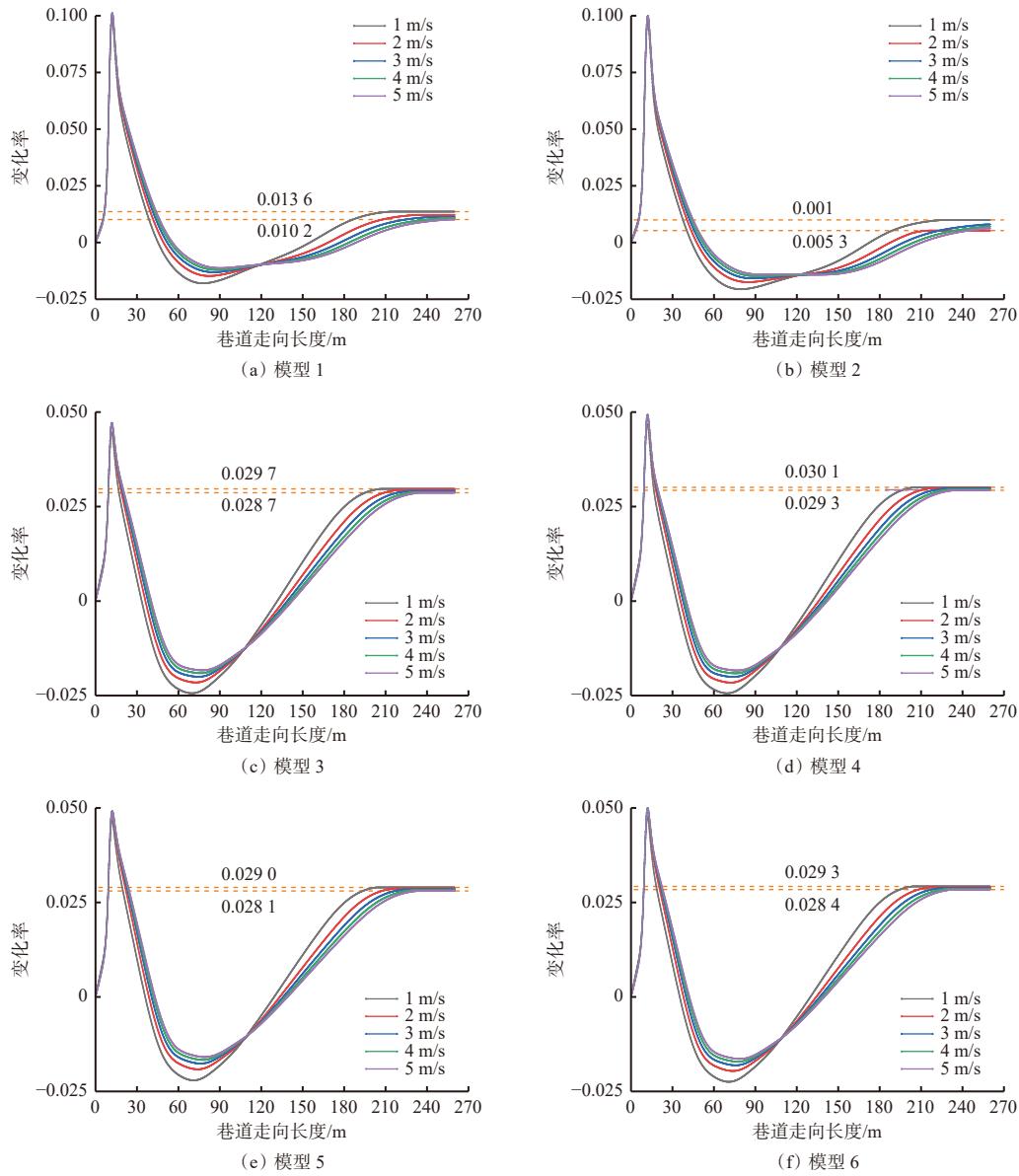


图 10 同模型风速变化率对比

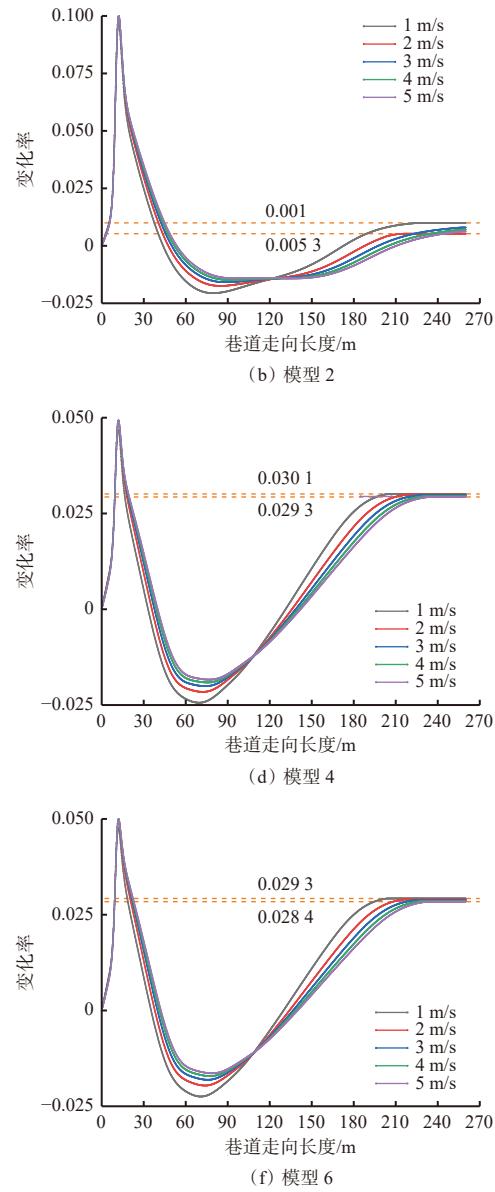
Fig. 10 Comparison of wind speed change rate with the same model

上述多种条件下, 风速变化率均处于上升一下降一再上升一平衡的 4 个阶段, 故采用阶段式分析方法, 其分析结果如下。

在第 I 阶段, 风速变化率增幅与初始风速大小呈正相关, 随着初始风速增大, 风速变化率波动幅度逐渐减低; 风速变化率峰值与障碍物参数呈正相关, 其中宽度( $b$ )影响最大, 高度( $h$ )影响次之, 长度( $l$ )影响最小。

在第 II 阶段, 风速变化率谷值与初始风速呈正相关, 初始风速越小, 风速变化率波动幅度越明显。风速变化率谷值大小与障碍物长度( $l$ )呈负相关, 与

研究是具有代表性的。采用相同的数据采集方式, 定义初始风速为  $v_1$ , 巷道平均模拟风速为  $v_2$ , 风速变化率  $\varphi = (v_2 - v_1)/v_1$ , 其对比结果如图 10 所示。



障碍物其他参数关联不明显。

在第 III 阶段, 模型 1、模型 2 风速变化率相对其他模型增幅较为平缓; 除 1 m/s 的风速变化率曲线外, 其他曲线于巷道走向长度 90~120 m 内相继交于一点, 障碍物宽度( $b$ )与高度( $h$ )越大, 该交点坐标值越大; 在曲线相交前, 初始风速越大, 则风速变化率越大, 在曲线相交后, 风速越小, 则风速变化率越大。

在第 IV 阶段, 风流发展平衡时, 风流变化率均小于 3%; 模型 1、模型 2 风速变化率较其他模型小, 其中模型 2 风速变化率最小, 即该模型最接近初始风速。

## 6 结论

1) 在放置障碍物的矩形巷道中,在 $x=120\text{ m}$ , $2.59\text{ m} < z < 2.79\text{ m}$ 处布设传感器条件下,截面5中传感器最优布设区域在该截面中垂线高度 $2.59\sim 2.80\text{ m}$ 处,两帮附近风流发展不对称,放置障碍物侧合理风流分布区域更广,障碍物宽度越大,该现象越明显;最优布设传感器区域随 $x$ 坐标增加呈均匀分布—截面直角处微量分布—空心圆角矩形分布的规律。

2) 障碍物体积相同时,风速峰值大致相同;风速谷值与障碍物高度、宽度呈正相关,障碍物高度与宽度相同时,风速谷值与障碍物长度呈负相关。 $h=0.5\text{ m}$ 时风速变化幅度小,平衡时风速集中于 $2.05\text{ m/s}$ 。

3) 在多种风速模拟条件下,第IV阶段中,模型2的风流变化率仍为各个模型的最小值,与单一风速结论形成对应。故在6类障碍物模型中,模型2对应的障碍物在 $L=0.5\text{ m}$ 时对回风巷风流运移规律影响较小的结论具有风速普适性,在此类条件下可确保在巷道中存在障碍物时,控制其对风速监测的影响最小。

## 参考文献(References):

- [1] 袁亮. 煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1-9.  
YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9.
- [2] 刘剑, 李雪冰, 宋莹, 等. 无外部扰动的均直巷道风速和风压测不准机理实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1447-1453.  
LIU Jian, LI Xuebing, SONG Ying, et al. Experimental study on uncertainty mechanism of mine air velocity and pressure with non-external disturbance[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1447-1453.
- [3] 李雪冰, 刘剑, 秦洪岩, 等. 湍流脉动影响下巷道平均风速单点统计测量方法[J]. 华北科技学院学报, 2018, 15(2): 1-9.  
LI Xuebing, LIU Jian, QIN Hongyan, et al. Method for air velocity measurement with single-point under the influence of turbulent fluctuation[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2018, 15(2): 1-9.
- [4] 丁翠, 何学秋, 聂百胜. 矿井通风巷道风流分布“关键环”数值与实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(10): 1131-1136.  
DING Cui, HE Xueqiu, NIE Baisheng. Numerical and experimental research on "key ring" distribution of ventilation in mine tunnels[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2015, 34(10): 1131-1136.
- [5] 杨宇, 王毅. 煤矿井下拱形巷道低风速区风速分布的风洞模拟[J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 42-45.  
YANG Yu, WANG Yi. Wind tunnel simulation on wind speed distribution of low speed zone in coal mine arch roadway[J]. Coal Technology, 2017, 36(6): 42-45.
- [6] 潘竟涛. 基于最小二乘法的风速传感器测量值推导巷道平均风速[J]. 煤炭技术, 2018, 37(1): 213-215.  
PAN Jingtao. Derivation of average wind speed of roadway from wind sensors measurements based on least square method[J]. Coal Technology, 2018, 37(1): 213-215.
- [7] 李亚俊, 李印洪, 吴洁葵, 等. 巷道断面风流分布规律试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(5): 102-104, 110.  
LI Yajun, LI Yinhong, WU Jiekui, et al. Experimental study on air flow distribution law of the roadway[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2019, 71(5): 102-104, 110.
- [8] 宋莹, 王东, 郭欣, 等. 突扩巷道流场风流分布特征的PIV实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(6): 86-91.  
SONG Ying, WANG Dong, GUO Xin, et al. Experimental study on airflow distribution characteristics of flow field in sudden enlarged roadway based on PIV[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(6): 86-91.
- [9] 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.  
ZHANG Lang. Optimized study on location to measure average air velocity with air velocity sensor in wind measuring station of underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3): 96-102.
- [10] 张士岭. 煤矿通风巷道断面风速测定与变化规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(4): 17-20.  
ZHANG Shiling. Study on measurement and change law of wind speed in cross section of coal mine ventilation roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(4): 17-20.
- [11] 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.  
LU Guangli, WU Zanlong, ZHAO Jianfeng. Numerical simulation on the change law of air flow in roadway with different turning angles[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(12): 116-121.
- [12] 张京兆, 王艳, 魏引尚, 等. 入口形式对矩形巷道定点测风位置影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6): 154-157.  
ZHANG Jingzhao, WANG Yan, WEI Yinshang, et al.

- Study on the influence of inlet patterns on the fixed-point air velocity measurement location in a rectangular airway[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(6): 154-157.
- [13] 李虎民, 陈国庆, 熊帅, 等. 相对粗糙度对巷道定点测风位置影响的数值分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(9): 113-117.  
LI Humin, CHEN Guoqing, XIONG Shuai, et al. Numerical analysis on the influence of relative roughness on the fixed-point air velocity measurement location in an roadway[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(9): 113-117.
- [14] 盛典. 基于 FLUENT 的煤矿井下风门通风系统研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(5): 149-151.  
SHENG Dian. Research on ventilation system of air door in coal mine based on FLUENT[J]. Coal Technology, 2022, 41(5): 149-151.
- [15] 葛启发, 于润沧, 翟建波, 等. 基于 FLUENT 的进路式采场通风优化控制[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(12): 111-116.  
GE Qifa, YU Runcang, ZHAI Jianbo, et al. Ventilation optimization and control of drift-type stope based on FLUENT[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(12): 111-116.
- [16] 郭对明, 李国清, 侯杰, 等. 基于 FLUENT 的深井掘进巷道局部通风参数优化[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(5): 753-763.  
GUO Duiming, LI Guoqing, HOU Jie, et al. Optimization of local ventilation parameters of deep mine excavation roadway based on FLUENT[J]. Gold Science and Technology, 2022, 30(5): 753-763.
- [17] 王春龙, 程力. 基于 FLUENT 的三山岛金矿深部通风降温系统数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(2): 129-134.  
WANG Chunlong, CHENG Li. Numerical simulation of deep ventilation and cooling system in Sanshandao Gold Mine based on FLUENT[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(2): 129-134.
- [18] 王波, 宋玉彬, 王鑫. 基于 ANSYS Workbench 的隔爆壳体目标驱动优化设计[J]. 工矿自动化, 2015, 41(12): 70-72.  
WANG Bo, SONG Yubin, WANG Xin. Goal driven optimization design of flameproof shell based on ANSYS Workbench[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(12): 70-72.
- [19] 时国庆, 王德明, 奚志林, 等. 基于 FLUENT 对采空区氧气浓度场的数值模拟[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(6): 76-79.  
SHI Guoqing, WANG Deming, XI Zhilin, et al. Numerical simulation of oxygen concentration distribution in gob areas based on FLUENT[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(6): 76-79.
- [20] 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.  
WANG Hanfeng. Simulation study on monitoring and measuring location of average air velocity in section of mine roadway based on Fluent[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 92-96.
- [21] 刘剑, 李雪冰, 陈廷凯, 等. 矿井定常湍流脉动对通风阻力测试影响的理论分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(5): 22-25.  
LIU Jian, LI Xuebing, CHEN Tingkai, et al. Theoretical analysis on influence of steady turbulence fluctuation on ventilation resistance measurement in mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(5): 22-25.