

# 基于 Fluent 巷道断面平均风速点定位监测模拟研究

王 翰 锋

(煤炭科学研究技术研究院有限公司 北京 100013)

**摘 要:** 为了确定与巷道断面内平均风速相适应的风速传感器的安设位置,以保证巷道风量监测的准确性,利用 Fluent 软件在不同巷道类型、不同断面尺寸、不同风速的条件下,对 24 个矿井巷道模型的风流场进行了三维数值模拟,确定了巷道断面中轴线上与平均风速相等的点位,并得到了该点位置与巷道断面的关系,其中矩形巷道该点位置至顶板距离为巷道高度的 11%~12%,半圆拱形巷道该点位置至顶板距离为巷道高度的 15%~16%;同时,给出了平均风速位置查询表格和计算公式,并与实测结果比较,发现风速数据基本吻合,为矿井利用风速传感器准确监测巷道风量提供了有力保障。

**关键词:** 通风监测; 风速监测; 通风数值模拟; 风速传感器; 平均风速

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2015)08-0092-05

## Simulation study on monitoring and measuring location of average air velocity in section of mine roadway based on Fluent

Wang Hanfeng

(China Coal Research Institute Co., Ltd. Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to confirm installation location of air velocity sensor adaptive to average air velocity in section of mine roadway and to ensure the accuracy of air volume monitored and measured in the mine roadway, Fluent software was applied to the three dimensional numerical simulation on the air flow fields of 24 mine roadway models under different mine roadway type, different section size and different air velocity condition. The point location where average air velocity was equal to the central axial line in the section of the mine roadway was established and the relationship between the point location and the mine roadway section was summarized. The distance to roof from the point location of the mine rectangle roadway would be 11% ~ 12% of the mine roadway height and the distance to the roof from the point location of half arch roadway was 15% ~ 16% of the mine roadway height. Meanwhile a search table and calculation formula of the average air velocity was provided and in comparison with site measured results, the air velocity data could be fitted basically and could provide powerful protection to the air velocity sensor applied to accurately monitor and measure the air flow volume of the mine roadway.

**Key words:** mine ventilation monitoring and measuring; air velocity monitoring and measuring; numerical simulation of mine ventilation; air velocity sensor; average air velocity

## 0 引 言

随着矿井通风实时监测与自动控制技术的发展,准确的风量或平均风速参数监测是矿井通风自动控制系统有效控制的必要条件。在矿井通风系统中,风量是一个最重要的参数,风量的监测实际上是通过监测巷道的平均风速和断面积计算所得,由于

一个风速传感器只能监测一个点的风速,而巷道断面上各个点的风速分布不均,如何准确监测风量是矿井通风管理与通风控制的基础<sup>[1-6]</sup>。为了监测整个巷道断面平均风速,一般有 2 种方法,第 1 种方法是布置多个风速传感器,求其平均值;另一种方法是布置 1 个风速传感器监测 1 个点的风速,再给定 1 个风速补偿系数进行修正,计算平均风速<sup>[7-8]</sup>。由

收稿日期: 2015-04-27; 责任编辑: 朱拴成 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.08.018

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB13B02)

作者简介: 王翰锋(1978—),男,辽宁阜新,副研究员,博士。Tel: 010-84261718

引用格式: 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.

于布置多个传感器监测巷道平均风速影响巷道内行人等井下工作,且成本高,不能满足现场实际要求,所以矿井通风监控系统都一般采用第 2 种方法,布置 1 个风速传感器监测巷道的平均风速。但是如果风速传感器在巷道中悬挂位置相对不固定,修正系数很难保证监测数据的准确性,因为修正系数一般是将传感器监测值与人工测得的平均风速加以比较确定,在不合适的位置和不同的风速下,点风速与平均风速不完全是线性关系,修正系数并不是一个固定值,同时受到人工测量精度的影响,通常存在较大误差。郝元伟等<sup>[9]</sup>利用 CFD 软件模拟了传感器在巷道中轴线距顶板 400 mm 位置的矩形、半圆拱和梯形 3 种巷道点风速与平均风速的关系,认为在这个位置上是存在线性关系的,可以采用修正系数。但是为了找到一个不需要修正系数的位置,其监测点风速就等于巷道的平均风速,为了解决这个问题,笔者通过应用 Ansys14.0 中 Fluent 软件进行数值模拟,对矩形、半圆拱形断面巷道的风流分布规律进行了研究,找到巷道断面上与平均风速相等的位置,并将此点定为风速传感器的安设位置,使矿井巷道风速监测的准确性得到有效改善,为矿井通风自动化提供支持。

## 1 Fluent 数值模型的建立与条件假设

### 1.1 巷道模型

针对煤矿使用最多的半圆拱、矩形 2 种巷道类型,基于锚喷、锚网和砌碇 3 种支护形式,建立了 24 个不同断面尺寸巷道物理模型。巷道的宽分别为 3.5、4.0、4.5、5.0 m,高分别为 2.5、3.0、3.5 m,巷道纵向长度均取 200 m。针对所建立的几何模型,计算网格划分采用六面体网格划分,模型的三维直角坐标系以巷道断面的宽为  $X$  轴方向,以断面的高为  $Y$  轴方向,以巷道的长为  $Z$  轴方向,坐标原点位于巷道入口断面的左下角。

### 1.2 条件假设与求解算法

假定流体与巷道壁面无热交换,假定巷道中无质量源输入,巷道风流视为黏性不可压缩流体,空气密度为常数,假定沿程的巷道壁面粗糙程度相同。

选用压力基求解器,通过连续性方程导出压力和速度的耦合算法,选用 *realizable  $k-\varepsilon$*  湍流模型方程。速度采用绝对速度,采用基于体积单元的梯度选项;用 Simplec 算法求解流速和压力耦合;采用压力梯度效益加强墙面处理方式,接口黏度系数与密度取相邻节点的算术平均值,压力场采用标准离散

方式,其他的采用二阶迎风格式离散。

### 1.3 边界条件设置

巷道模型包括 1 个风流入口和 1 个风流出口,其余面为壁面,风流入口作为模型边界入口,风流出口作为模型边界出口,巷道壁面为固定边界。入口类型为 *velocity-inlet*,按计算要求给定速度,分别取 1~8 m/s,设入口风流的速度入口风速均匀,垂直于壁面的压力梯度为 0;出口的类型为 *pressure-outlet*;壁面采用无滑移边界条件,假设壁面绝热。

## 2 数值模拟结果分析

由于巷道平均风速位置理论上是一圈点,为了方便确定一个位置,以巷道中轴线为平均风速位置基准线,找到平均风速位置  $A$  在巷道中轴线上距顶板的距离  $r$ ,风速传感器安装到  $A$  点测得的风速即该断面的平均风速,如图 1 所示。

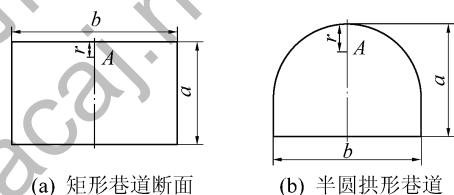


图 1  $A$  点位置示意

Fig. 1 Location sketch of point A

### 2.1 风速对平均风速位置影响分析

根据矿井实际巷道一般的风速范围,选择模拟速度 1.0~8.0 m/s,每隔 1 m/s 取 1 个速度,共取 8 个不同的平均风速,对 24 个不同断面尺寸巷道平均风速位置进行模拟分析,选取距离风流入口 100 m 处截面进行分析。垂直断面上云图如图 2 所示,可以看到断面上风速分布比较规律,巷道边壁上风速为 0,靠近边壁处风速小,但梯度大,巷道中心位置风速最大。因此,风速传感器的应安装在与平均风速相等位置。

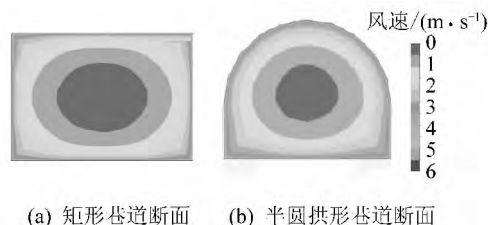


图 2 巷道断面风速分布云图

Fig. 2 Air velocity distribution diagram of mine roadway section

24 个不同断面尺寸模拟结果一致显示,同一断面尺寸同一支护形式巷道,在不同风速条件下,平均

风速的位置基本不变,风速的变化对平均风速位置的影响很小。现以部分断面数据为例,分 2 种形式进行说明。第 1 种形式,每一巷道在不同风速条件下,找平均风速位置  $A$  在巷道中轴线上距顶板的距离  $r$  进行比较,见表 1,  $r$  值变化极小,可以认为同一

巷道风速平均位置不变。第 2 种形式,每一巷道在 1 个风速条件下,先找到平均风速位置  $A$ ,然后在不同风速条件下,对  $A$  点风速与平均风速进行比较,见表 2,  $A$  点处风速与平均风速变化很小,可以认为  $A$  点风速就等于巷道平均风速。

表 1 不同风速下平均风速位置距顶板距离

Table 1 Distance from average air velocity point to roof with different air velocity

断面尺寸/ (m×m)	断面类型	平均风速位置至顶板距离/m							
		1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s
3.5×5.0	矩形锚喷	0.388	0.389	0.386	0.388	0.386	0.388	0.387	0.390
3.0×4.0	矩形锚网	0.341	0.341	0.342	0.340	0.341	0.340	0.343	0.340
3.5×5.0	半圆拱锚喷	0.528	0.528	0.529	0.528	0.527	0.528	0.527	0.528
3.0×4.0	半圆拱砌碇	0.482	0.482	0.481	0.481	0.481	0.484	0.481	0.486

表 2 不同风速下平均风速位置风速与平均风速关系

Table 2 Relationship between average air velocity and air velocity in average air velocity point with different air velocity

断面尺寸/ (m×m)	断面类型	平均风速位置 $A$ 点风速/(m·s <sup>-1</sup> )							
		1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s
3.5×5.0	矩形锚喷	1.000	2.021	3.015	4.013	5.014	6.012	7.013	8.014
3.0×4.0	矩形锚网	1.000	2.020	3.018	4.016	5.013	6.015	7.023	8.024
3.5×5.0	半圆拱锚喷	1.000	2.011	3.017	4.016	5.018	6.022	7.023	8.019
3.0×4.0	半圆拱砌碇	1.000	2.021	3.025	4.023	5.014	6.014	7.016	8.012

## 2.2 断面尺寸对平均风速位置影响分析

通过对 24 个不同断面尺寸巷道进行模拟分析,找到了不同断面尺寸下平均风速位置  $A$  在巷道中轴线上距顶板的距离,制定了不同断面尺寸下平均风速位置查询表格(表 3),模拟结果可以得出,在同样宽度的巷道下,巷道越高,平均风速位置距顶板距离越大;在同样高度的巷道条件下,巷道越宽,矩形巷道平均风速位置距顶板距离越大,而半圆拱巷道平均风速位置距顶板距离越小。根据不同巷道条件下平均风速位置距顶板距离与巷道高的比例,在巷道高和宽分别为 2.5~3.5 m 和 3.0~5.0 m 条件下,矩形巷道平均风速位置距顶板距离等于巷道高的 11%~12%,半圆拱巷道平均风速位置距顶板距离等于巷道高的 15%~16%。对于模拟范围其他断面尺寸巷道平均风速位置距顶板距离,可以通过插值计算求得。计算公式如下:

设巷道  $T$  的高为  $a$ ,宽为  $b$ ,如果  $a_1 \leq a \leq a_2$ ,  $b_1 \leq b \leq b_2$ ,  $a_1, a_2$  取值为 2.5、3.0、3.5 m;  $b_1, b_2$  取值为 3.5、3.0、4.5、5.0 m; 则巷道  $T$  平均风速位置距顶板距离  $r$  为

$$r = (1 + CB - C - B)r_1 + B(1 - C)r_2 + C(1 - B)r_3 + CB r_4 \quad (1)$$

$$C = (a - a_1) / (a_2 - a_1) \quad (2)$$

$$B = (b - b_1) / (b_2 - b_1) \quad (3)$$

式中  $r_1, r_2, r_3, r_4$  分别为巷道  $T_1$ (高  $a_1$ ,宽  $b_1$ )、巷道  $T_2$ (高  $a_1$ ,宽  $b_2$ )、巷道  $T_3$ (高  $a_2$ ,宽  $b_1$ )、巷道  $T_4$ (高  $a_2$ ,宽  $b_2$ ) 对应的平均风速位置距顶板距离。

例如矩形锚网巷道高为 2.8 m、宽 3.7 m,  $C = 0.6$ ;  $B = 0.4$ ; 巷道  $T$  平均风速位置距顶板距离  $r = 0.324$  m。

## 2.3 支护形式对平均风速位置影响分析

通过对 12 个不同尺寸矩形断面在锚网、锚喷 2 种支护形式进行模拟,结果表明(表 3),同一断面尺寸条件下,采用锚网支护时,大于平均风速位置距顶板距离处采用锚喷支护。

通过对 12 个不同尺寸半圆拱断面在砌碇、锚喷 2 种支护形式进行模拟,结果表明(表 3),同一断面尺寸条件下,对于平均风速位置距顶板距离,采用锚喷支护时大于采用砌碇支护。

对于砌碇、锚喷和锚网 3 种支护形式,锚网巷道的摩擦因数大于锚喷巷道,锚喷巷道的摩擦因数大于砌碇巷道。说明巷道的壁面摩擦因数越大,壁面越粗糙,平均风速位置距顶板距离越大。

表 3 不同巷道条件下平均风速位置至顶板距离及其与巷道高的比

Table 3 Distance from average velocity point to roof and ratio of the distance and roadway height with different roadway conditions

断面 类型	支护 形式	$a/\text{m}$	不同巷道宽度下的 $r/\text{m}$				不同巷道宽度下的 $r/a$			
			3.5 m	4.0 m	4.5 m	5.0 m	3.5 m	4.0 m	4.5 m	5.0 m
矩形	锚网	3.5	0.382	0.388	0.389	0.393	0.109	0.111	0.111	0.112
		3.0	0.340	0.345	0.346	0.352	0.113	0.115	0.115	0.117
		2.5	0.297	0.299	0.305	0.312	0.119	0.120	1.122	0.125
矩形	锚网	3.5	0.371	0.377	0.380	0.388	0.106	0.108	0.109	0.111
		3.0	0.325	0.330	0.333	0.340	0.108	0.110	0.111	0.113
		2.5	0.287	0.288	0.295	0.301	0.115	0.115	0.118	0.120
半圆拱	砌碇	3.5	0.557	0.546	0.535	0.528	0.159	0.156	0.153	0.151
		3.0	0.484	0.471	0.458	0.455	0.161	0.157	0.153	0.152
		2.5	0.408	0.394	0.375	0.372	0.163	0.158	0.150	0.149
半圆拱	锚喷	3.5	0.571	0.560	0.550	0.543	0.163	0.160	0.157	0.155
		3.0	0.488	0.481	0.474	0.471	0.163	0.160	0.158	0.157
		2.5	0.412	0.401	0.392	0.386	0.165	0.160	0.157	0.154

3 现场实测结果

在王坡煤矿副斜井、辅助进风巷、集中轨道巷和集中回风巷 4 个测风站按要求重新安设风速传感器,巷道断面尺寸、支护形式、安设位置、实测数据详见表 4。监测数据结果与风表测试结果对比表明,在巷道中轴线上平均风速位置上监测平均风速数据与风表实测的平均风速基本吻合,相对误差小于 2%,说明基于 Fluent 模拟结果可以为风速传感器安设提供支持与参考。

表 4 平均风速传感器监测与风表实测数据结果

Table 4 Data results of average air velocity monitoring and air flow meter testing

地点	断面 类型	支护 形式	高度 /m	宽度 /m	传感器 至顶板 距离 /m	传感器风速 / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )				风表平均风速 / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )				相对 误差 /%
						第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值	
副斜井	半圆拱	砌碇	3.40	4.20	0.491	5.17	5.23	5.21	5.20	5.17	5.17	5.22	5.18	0.5
辅助进风大巷	半圆拱	砌碇	3.50	4.00	0.546	2.20	2.26	2.26	2.24	2.22	2.23	2.23	2.23	0.4
轨道大巷	矩形	锚喷	3.10	4.70	0.353	2.65	2.69	2.68	2.67	2.68	2.65	2.63	2.66	0.5
集中回风巷	矩形	锚喷	3.20	4.05	0.336	1.88	1.83	1.79	1.83	1.78	1.82	1.83	1.81	1.3

4 结 论

1) 对于同一断面与支护形式的巷道,平均风速监测位置在巷道中轴线上距顶板的距离不随风速的变化而变化。

2) 在同样宽度的巷道下,巷道越高,平均风速位置距顶板距离越大;在同样高度的巷道条件下,巷道越宽,矩形巷道平均风速位置距顶板距离越大,而半圆拱巷道平均风速位置距顶板距离越小。

3) 对于高和宽分别为 2.5~3.5 m 和 3.0~5.0 m 的巷道,矩形巷道平均风速位置距顶板距离等于巷道高的 11%~12%,半圆拱巷道平均风速位置距顶板距离等于巷道高的 15%~16%;同时,得出了平均风速位置距顶板距离查询表格和计算公式,并与实测结果比较,风速数据基本吻合。

4) 对于不同支护形式巷道,壁面摩擦因数越

大,壁面越粗糙,平均风速位置距顶板距离越大。

参考文献:

- [1] 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.  
Zhou Xihua, Meng Le, Li Chengyu, et al. Experimental study on determination and correction method of wind speed in circular pipe[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2012, 31(6): 801-804.
- [2] 金树军.矿井通风系统风速修正方法研究[J].控制工程,2013,20(S):39-41.  
Jin Shujun. Research of wind speed correction of mine ventilation system[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(S): 39-41.
- [3] 王从陆,吴超.基于移动参考框架的矿内运输工具活塞风数值模拟[J].煤炭学报,2007,32(8):838-841.  
Wang Conglu, Wu Chao. Numerical simulation of piston wind due to mine conveyance based on motion reference frame[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 838-841.
- [4] 王丙建,罗永豪,赵阳升.输送机布设矩形巷道断面风速分布特征风洞模拟[J].煤矿安全,2013,44(5):42-45.  
Wang Bingjian, Luo Yonghao, Zhao Yangsheng. Wind tunnel simulation on wind speed distribution characteristics in rectangle roadway section laid with conveyor[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(5): 42-45.
- [5] 余跃进.关于巷道风速分布问题的探讨[J].淮南矿业学院学报,1989(1):16-24.

- Yu Yuejin. Investigations into roadway air velocity distribution[J]. Journal of Huainan Mining Institute, 1989(1): 16-24.
- [6] 暨朝颂.巷道通风过程的理论基础[J].中国矿山工程,2005,34(3):32-34.  
Ji Chaosong. The theoretical foundation of ventilation process in tunnel[J]. China Mine Engineering, 2005, 34(3): 32-34.
- [7] 暨朝颂.巷道通风过程的数学模型[J].有色矿山,2001,30(3):1-5.  
Ji Chaosong. Mathematical model of tunnel ventilation process[J]. Nonferrous Mines, 2001, 30(3): 1-5.
- [8] 暨朝颂.完全发展的管路中紊流速度分布函数研究[J].中国矿山工程,2007,36(3):48-50.  
Ji Chaosong. Study on the distribution function of turbulent velocity in fully developed pipe flow[J]. China Mine Engineering, 2007, 36(3): 48-50.
- [9] 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.  
Hao Yuanwei, Chen Kaiyan, Jiang Zhongcheng, et al. Study on amendment of airflow velocity in roadway based on CFD[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(2): 1-3.
- [10] 王从陆,吴超.矿井通风及其系统可靠性[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [11] 王英敏.矿内空气动力学与矿井通风系统[M].北京:冶金工业出版社,1994.
- [12] 徐瑞龙.通风网路理论[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [13] 陈开岩.矿井通风系统优化理论及应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.

(上接76页)

- Chen Xiangjun. Impact of injected water on kinetics characteristics of methane desorption in coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [12] 陈向军,程远平.注水对煤层吸附瓦斯解吸影响的试验研究[J].煤炭科学技术,2014,42(6):96-99.  
Chen Xiangjun, Cheng Yuanping. Experimental study on water injection to desorption of coal adsorption gas[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 96-99.
- [13] 肖国国.煤层注水抑制瓦斯解吸效应试验研究与应用[D].焦作:河南理工大学,2010.  
Xiao Zhiguo. Experimental study and application of inhibitory effect on gas desorption of coal seam injected with water[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.
- [14] 张国华.外液侵入对含瓦斯煤体瓦斯解吸影响试验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2011.  
Zhang Guohua. Experimental study of external invasion impact on gas desorption about coal with gas[D]. Fuxin: Liaoning Technology University, 2011.
- [15] 张慧.煤孔隙的成因类型及其研究[J].煤炭学报,2001,(1):40-45.  
Zhang Hui. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 2001, (1): 40-45.
- [16] 张国华,鲁婷,梁冰,等.基于水锁机理的瓦斯超限防治治理

- 论[J].黑龙江科技学院学报,2010,20(2):103-106.
- Zhang Guohua, Lu Ting, Liang Bing, et al. Theory on preventing and controlling gas exceeding limit based on water lock mechanism[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2010, 20(2): 103-106.
- [17] 张代钧,鲜学福.煤大分子结构研究的进展[J].重庆大学学报,1993,16(2):58-63.  
Zhang Daijun, Xian Xuefu. The advances in study of the macromolecular structure of coal[J]. Journal of Chongqing University, 1993, 16(2): 58-63.
- [18] 聂百胜,何学秋,王恩元.煤吸附水的微观机理[J].中国矿业大学学报,2004,33(4):379-383.  
Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan. Micro-mechanism of coal adsorbing water[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(4): 379-383.
- [19] 张晓梅,宋维源.煤岩双重介质注水驱气渗流的理论研究[J].煤炭学报,2006,31(2):187-190.  
Zhang Xiaomei, Song Weiyuan. The theoretical study on waters driving gas displacement as for double medium of coal petrography[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 187-190.
- [20] 张遂安,霍永忠,叶建平,等.煤层气的置换解吸试验及机理探索[J].科学通报,2005,50(S1):143-146.  
Zhang Suian, Huo Yongzhong, Ye Jianping, et al. Replacement desorption experiment and explore CBM mechanism[J]. China Science Bulletin, 2005, 50(S1): 143-146.