

综掘工作面附壁旋流通风控尘效果数值模拟

蒋逸丹¹,刘荣华^{1,2*},刘辉³,李泳俊¹,韩涵¹,裴叶¹

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;

3.山西冀中能源集团 山西金晖万峰煤矿有限公司,山西 吕梁 032300)

摘要:为了得到综掘工作面附壁旋流通风的最佳控尘效果,对附壁旋流通风的流场进行数值模拟.首先在附壁旋流通风方式下,对不同的吹吸流量比进行数值模拟,再改变压风筒轴向和径向的风量比进行数值模拟,得到不同的吹吸流量比和不同轴径风量比下的气流特性以及粉尘浓度分布规律.结果表明:在不同的吹吸流量比下,若吹风量太小,虽然对掘进面的扰动也小,但附壁旋流径向风幕太弱,对粉尘的封堵效果不好.若吹风量太大对掘进面的扰动太大会导致粉尘向巷道后方运动,不利于径向风幕对掘进面粉尘的封堵.在不同的轴径风量比下,随着轴径风量比的减小,径向风幕的强度增强,对掘进面粉尘的封堵效果也增强.当吹吸流量比为0.8和轴径风量比在1:9以下时可获得较为理想的控尘效果,能够有效的把粉尘控制在掘进面前端由吸风筒排出,使掘进机司机处粉尘浓度得到有效控制.

关键词:附壁旋流通风;吹吸流量比;轴径风量比;气流特性;粉尘浓度

中图分类号:TD714

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)03-0031-07

Numerical Simulation Study on Dust Control Effect of Combined Drilling and Ventilation in Fully Mechanized Head Face

Jiang Yidan¹, Liu Ronghua^{1,2}, Liu Hui³, Li Yongjun¹, Han Han¹, Pei Ye¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Shanxi Yuzhong Energy Group, Shanxi Jinhui Wanfeng Coal Mine Co., Ltd., Lyuliang 032300, China)

Abstract: In order to obtain the best dust control effect of the side wall swirling ventilation in the comprehensive excavation working face, the flow field of the side wall swirling ventilation is numerically simulated. Firstly, numerical simulation is carried out on the different suction and suction flow ratios under the method of the wall-swirl ventilation, and then the axial and radial air volume ratios of the pressure cylinder are changed for numerical simulation to obtain different suction flow ratios and different shaft diameters. Airflow characteristics and dust concentration distribution under air volume ratio. Results show that under different blowing and suction flow ratios, if the blowing volume is too small, although the disturbance to the tunneling surface is small, the radial wind curtain of the wall-swirl is too weak, and the sealing effect on dust is not good. If the amount of blowing is too large, the disturbance of the tunneling surface will cause the dust to move to the rear of the roadway, which is not conducive to the sealing of the dust by the radial air curtain. Under different axial air volume ratios, as the axial diameter ratio decreases, the strength of the radial air curtain increases, and the sealing effect on the dust is also enhanced. When the ratio of the suction flow ratio is 0.8 and the air volume ratio of the shaft diameter is less than 1:9, the ideal dust control effect can be obtained, and the dust can be

收稿日期:2019-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574123);湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3076)

*通信作者,E-mail:rhliu2008@sina.com

effectively controlled at the front end of the tunneling surface to be discharged by the suction cylinder, so that the dust concentration of the driver of the roadheader is made and effectively controlled.

Keywords: coanda vortex ventilation; blow suction flow ratio; shaft diameter air ratio; air flow characteristics; dust concentration simulation

众所周知,煤炭开采对我国国民经济的增长起着不可替代的作用^[1].但是在煤矿开采的同时,会产生大量的粉尘.根据实测,在煤矿井下综掘工作面粉尘浓度可达到 $5\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$,而且呼吸性粉尘浓度接近40%.煤矿井下高浓度粉尘不仅影响工作面的能见度,而且诱发的尘肺病也会威胁到矿井下工作人员的身心健康,因此控制粉尘扩散、降低粉尘浓度是改善煤矿井下工作环境的重要工作^[2].

通风除尘的方法是综掘工作面控制粉尘行之有效的方法之一^[3].早期,在综掘工作面应用最普遍的是长压短抽的通风方式,但是这种长压短抽的通风方式存在很多不足,虽然能降低工作面粉尘的浓度,但是无法形成一种将粉尘控制在巷道前端的控尘风幕,导致粉尘大量向巷道后方运动^[4].20世纪70年代,前西德学者克雷内尔发明了可产生单向旋流风幕的附壁风筒,从附壁风筒出来的风流能形成一道旋流风幕,阻挡向巷道后方运动的粉尘.随后,欧美一些国家也开始研究这一通风新技术,并分析了附壁风筒径向出风量、径向出风条隙宽度等参数对单向旋流风幕风流场的运移及阻隔粉尘弥散的影响.20世纪90年代末中国将该技术引入国内,在一些煤矿井下对该通风方式进行现场测试研究^[5-7].近年国内的一些科研单位,针对国内综掘工作面的具体情况,对附壁风筒的结构形式和材质开展了一些研究,取得了一些进展,使这种通风方法在国内能逐步得到推广应用^[8,9].现阶段,利用附壁旋流通风的方式来控制综掘工作面的粉尘是非常有效的.综掘工作面附壁旋流通风方式下的流场是一个非常复杂的运动过程,流场内影响因素有很多,流场很难通过现场实测直接得到.为此,笔者利用Fluent软件对综掘工作面附壁旋流通风方式下不同的吹吸流量比以及轴径风量比进行数值模拟,分析其在不同的吹吸流量比和不同的轴径风量比下的流场形成状况以及控尘效果,为附壁旋流通风控尘技术的现场应用提供理论基础,这对于改善煤矿井下作业环境,确保工作面安全生产,具有重要的意义^[9,10].

1 模型建立

1.1 物理模型

建一个长为30 m,宽为4.5 m,高为3.2 m的矩形巷道,其中距工作面3 m处布置长为27 m,直径为800 mm的圆柱体吸风筒,其中心轴线距巷道底面1.6 m,距巷道左右壁面均为2.25 m;掘进机和传送皮带布置在吸风筒下面,且掘进机距工作面也为3 m;在距工作面5 m处沿巷道左壁面布置长25 m,直径为800 mm的圆柱体吹风筒,吹风筒中心轴线高度距巷道底面2.7 m,吹风筒沿径向每5 m处开设一条长1.6 m,宽0.06 m的条缝口,共开设3条.模型垂直方向为y方向,如图1所示.然后把建好的物理模型导入Fluent自带的gambit划分网格,巷道物理模型的网格数量为117 098,网格类型为四面体网格.

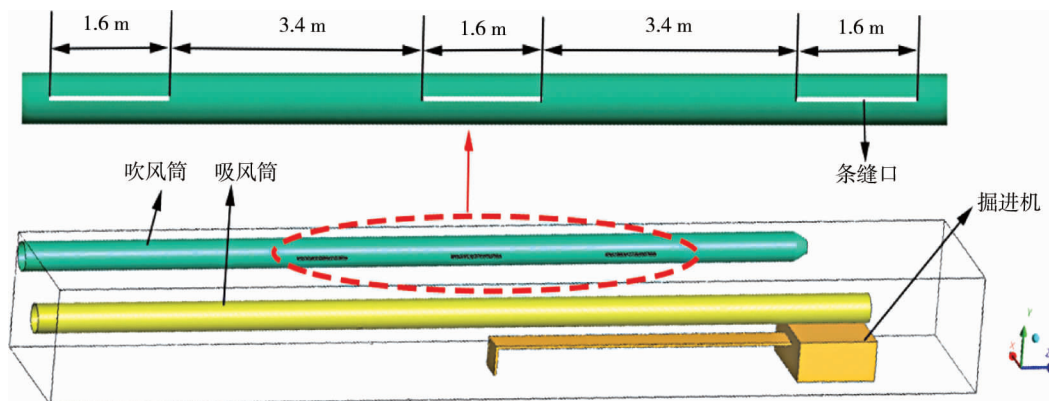


图1 巷道的物理模型及侧面视图

1.2 数学模型

为了模拟巷道内的气流特性和粉尘浓度的分布情况,利用欧拉-拉格朗日法建立数学模型.在 Fluent 中使用离散相模型,空气设为连续相,粉尘为离散相,两者之间有质量、能量和动量的交换^[11].采用标准的 $k-\varepsilon$ 模型,使用 SIMPLE 算法.模型假设如下:

- 1) 流场为稳态流场,空气为不可压缩流体,空气密度(ρ)定为常数:1.225 kg/m³.
- 2) 由于巷道内部没有强热源,故不考虑热传导,忽略温度对流场的影响.
- 3) 视巷道壁面为光滑壁面.

建立控制方程如下:

连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]. \quad (2)$$

k 方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k. \quad (3)$$

ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} + G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \quad (4)$$

式中: x_i, x_j 为 x, y 方向上的坐标; u_i, u_j 为流体在 x, y 方向上的速度; p 为湍流压力; g_i 为 i 方向重力加速度; μ 为层流黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数; k 为湍动能变率; ε 为湍动能耗散率; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为浮力引起的湍动能; Y_M 为扩散产生的波动; t 为切线方向; $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 为模型常量: $C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$; σ_k 和 σ_ε 是 k 方程和 ε 方程的 Prandtl 数, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$; S_k 和 S_ε 是用源相.

在笛卡尔坐标系下,颗粒相的作用力平衡方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho} + F_x. \quad (5)$$

式中: u_p 为颗粒运动速度; $F_D(u - u_p)$ 为颗粒单位质量曳力; u 为流体相速度; ρ_p 为颗粒密度; F_x 为颗粒质量力.

2 边界条件及参数设置

在 Fluent 中对模型边界条件进行设置.为了控制综掘工作面附壁旋流通风的吹吸流量比,在每一个吹吸流量比下,附壁风筒的轴向风量均占 20%,径向风量均占 80%^[12,13].此处将 β 定为吹吸流量比,具体设置如表 1 所示.

为了控制附壁风筒的径向风量与轴向风量之比,在每一个轴径风量比下,将吹吸流量比均设为 0.8.此处将 γ 定为轴径风量比,具体设置如表 2 所示.

表 1 不同吹吸流量比下的风速设置

吹吸流量比 β	吹风筒风速/(m/s)		吸风筒 风速/(m/s)
	轴向	径向	
0.6	3.98	6.94	8.29
0.7	4.64	8.08	8.29
0.8	5.30	9.25	8.29
0.9	5.97	10.40	8.29
1.0	6.63	11.50	8.29
1.1	7.24	12.70	8.29

表 2 不同轴径风量比下的风速设置

轴径风量比 γ	吹风筒风速/(m/s)		吸风筒 风速/(m/s)
	轴向	径向	
5 : 5	13.20	5.78	8.29
4 : 6	10.60	6.94	8.29
3 : 7	7.95	8.09	8.29
2 : 8	5.30	9.25	8.29
1 : 9	2.65	10.40	8.29
0 : 10	0.00	11.50	8.29

其余的 Fluent 参数设置不随风量的变化而变化,设置如表 3 所示.

表 3 Fluent 参数设置

模型变量	参数设定
求解器	SIMPLE
湍流模型	标准的 k-ε 模型
离散相模型	ON
入口边界类型	Velocity-inlet
墙壁处剪切条件	No slip
喷射源类型	Surface
材质	Anthracite
粒径分布	Rosin-Rammler
最小颗粒直径/m	1×E-6
最大颗粒直径/m	1.25×E-5
平均颗粒直径/m	6×E-5
分布指数	1.77
掘进面质量流率/(kg/s)	0.001 5
随机轨道模型	ON

3 模拟结果分析

使用 Fluent 软件对综掘工作面附壁旋流通风方式下不同的吹吸流量比以及不同的轴径风量比进行模拟计算,并对其气流流场特性和粉尘浓度及粉尘运移规律进行研究分析.

3.1 不同吹吸流量比下的模拟结果分析

为了准确的描述不同吹吸流量比下巷道内的气流流场特性和粉尘浓度分布规律,本文取 $y=2.7\text{ m}$ 高度平面上的风流速度矢量图和 $y=1.6\text{ m}$ (呼吸带)高度平面上的粉尘浓度分布图作分析.图 2 为巷道模型 $y=2.7\text{ m}$ 高度处 6 个不同吹吸流量比下的风流速度矢量图.

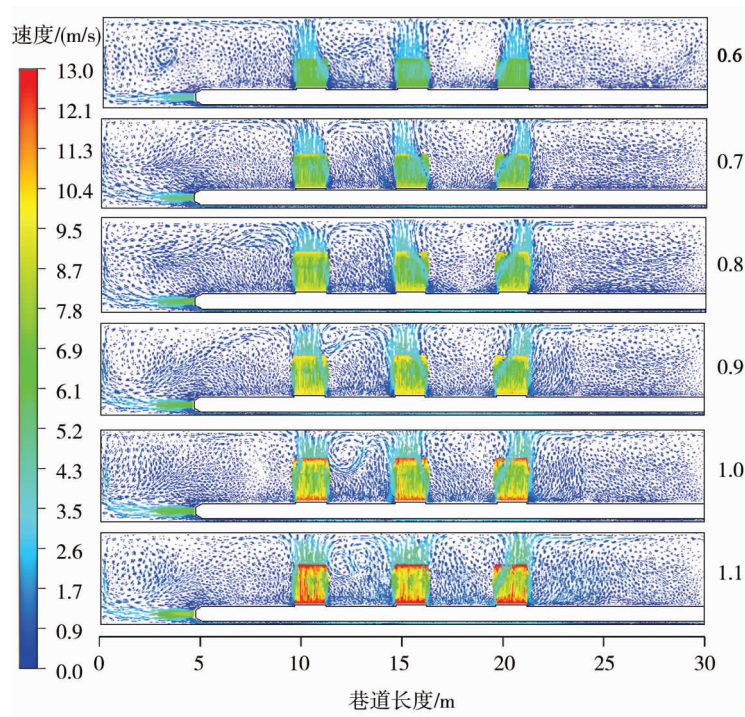


图 2 $y=2.7\text{ m}$ 高度处 6 个不同吹吸流量比下的风流速度

由图 2 可以看出:在附壁旋流通风状态下气流分别从吹风筒的轴向方向和径向方向射出,轴向方向的风流从吹风筒前端出口射出,射向掘进断面,当轴向方向的风流从吹风口前端射出时,随着射流断面逐渐

扩大,风流速度逐渐降低,风流吹向掘进头附近,受到掘进面的阻挡,风流方向逐渐由轴向变为径向,风流在掘进头右端处产生回流.径向方向的风流从条缝口垂直射出,射向巷道右侧壁面,由于受到右侧壁面的阻挡,其中部风流分别向巷道的前端和后端运动.当吹吸流量比为0.6和0.7时,吹风筒轴向出风风速很小,衰减速度非常快,当轴向风流到达掘进端头时对掘进面气流产生的扰动很微弱,而吹风筒径向出风风速也偏小,径向风流在射向巷道右侧壁面后流向巷道前端的风流也较弱.当吹吸流量比为0.8时,出风筒轴向风速与径向风速都相对提高,轴向风流对掘进前端的扰动相对更大,同时径向风流在射向巷道右侧壁面后流向巷道前端的风流较强.当吹吸流量比为0.9,1.0和1.1时,吹风筒轴向风流风速过大,对掘进前端的扰动过大,此时径向风流不能配合轴向风流起到很好的阻挡作用.

图3为巷道模型 $y=2.7\text{ m}$ 高度处6个不同吹吸流量比下的粉尘浓度分布图.图3中不同的粉尘浓度用不同的颜色代表,PMC为颗粒质量浓度(Particle Mass Concentration).当吹吸流量比为0.6和0.7时,高浓度粉尘主要堆积在巷道前5m处,粉尘平均浓度在 500 mg/m^3 左右,最高浓度达到 $1\ 000\text{ mg/m}^3$.当吹吸流量比为0.8时,粉尘扩散范围控制在5m以内,粉尘浓度分布也十分均匀,平均浓度在 300 mg/m^3 左右.当吹吸流量比为0.9时,粉尘扩散范围相对增大,扩散至巷道后方7m处,粉尘平均浓度在 400 mg/m^3 左右.当吹吸流量比为1.0时,粉尘扩散范围进一步增大,扩散至巷道后方9m处,并且粉尘浓度偏高.当吹吸流量比为1.1时,粉尘的扩散范围进而扩散至巷道后方10m处,并且在巷道前4m内有大量高浓度粉尘堆积.

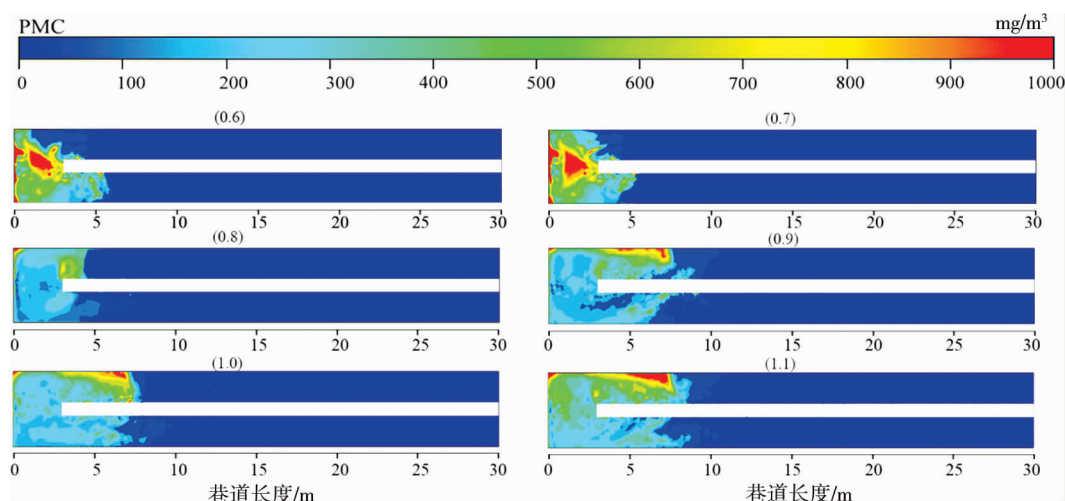


图3 $y=1.6\text{ m}$ (呼吸带)高度处6个不同吹吸流量比下的粉尘浓度分布

综合对比图2和图3可以得出:当吹吸流量比为0.6和0.7时,吹风筒轴向风速较小,衰减速度较快,对掘进端头的扰动很小,导致高浓度粉尘容易堆积在巷道前端,对掘进司机的工作视线带来严重影响,且吹风筒径向风速偏小,对粉尘的封堵效果不佳.当吹吸流量比为0.9,1.0和1.1时,吹风筒轴向风速逐步增大,对掘进端头的扰动增大,造成大量的粉尘向巷道后方扩散.只有当吹吸流量比为0.8时,吹风筒轴向径向的风速适中,在两者的配合下达到最好的控尘效果.

3.2 不同轴径风量比下的模拟结果分析

为了准确的描述不同轴径风量比下巷道内的气流流场特性和粉尘浓度分布规律,本节取 $y=2.7\text{ m}$ 高度平面上的风流速度矢量图和粉尘浓度分布图作分析.

图4为巷道模型 $y=2.7\text{ m}$ 高度处6个不同轴径风量比下的风流速度矢量图.当轴径风量比为5:5时,吹风筒前端出口风速非常高,有很强的风流吹向掘进端头,并且风流向巷道后方扩散范围很大,此时吹风筒的径向出风非常微弱;当轴径风量比为4:6时,吹风筒前端出口的风速较高,在靠近掘进断面处产生明显的涡流,风流经掘进断面反射向巷道后方扩散范围很大,不利于吸风筒对粉尘的控制;当轴径风量比为3:7时,吹风筒前端出口风速减小,风流经掘进端头反射向巷道后方扩散的范围减小;当轴径风量比为2:8时,吹风筒前端出口的风速进一步减小,靠近掘进端头处的涡流逐渐消失,风流不再向巷道后

方大范围扩散;当轴径风量比为 1 : 9 时,吹风筒前端出口的风速较小,在掘进前端没有明显的气流方向;当风量比为轴径 0 : 10 时,吹风筒前端出口无风流出,此时巷道的气流全部受风筒径向风流的影响,风流从巷道后方向掘进端头运动.

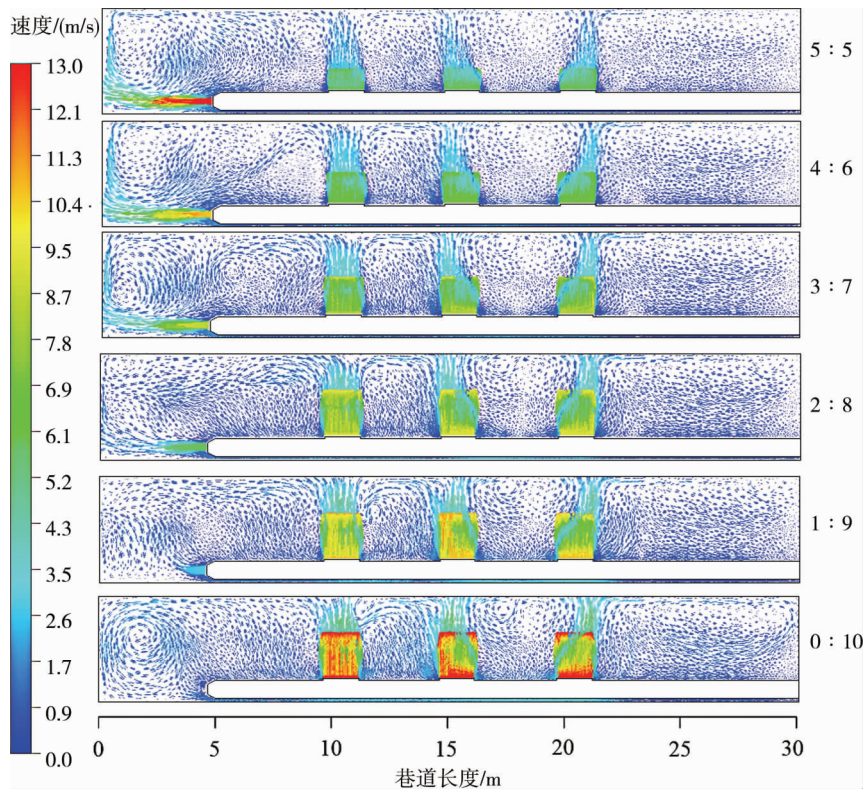


图 4 y=2.7 m 高度处 6 个不同轴径风量比下的风流速度矢量图

为了分析巷道全局粉尘浓度的分布情况,现沿巷道 Z 轴负方向每隔一定距离取一粉尘浓度的数值模拟结果作为截面,图 5 为在 Z 轴负方向分别取 1.0,3.0,5.5(司机处),7.5,9.5,11.5 m 做平行于掘进面的截面.当轴径风量比为 5 : 5 和 4 : 6 时,巷道前 9 m 范围内整体粉尘浓度很高,司机处粉尘浓度高达 600 mg/m³,并且扩散范围达到巷道后方 11.5 m 处.当轴径风量比为 3 : 7,2 : 8 时,粉尘扩散范围逐步减小,司机处和掘进端头的粉尘浓度也相对降低,但司机处的粉尘浓度仍然在 200~300 mg/m³.当轴径风量比为 1 : 9 和 0 : 10 时,粉尘能够很好地被控制在掘进面前端并由吸风筒吸收排出,使掘进司机处的粉尘得到很好的控制.

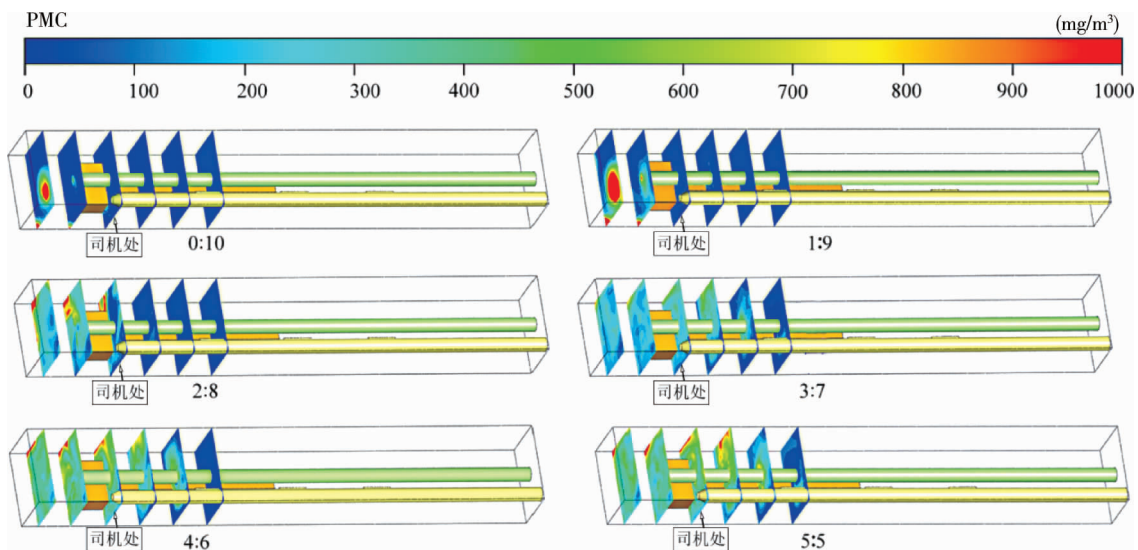


图 5 不同轴径比下巷道全局粉尘浓度分布

综合对比图4和图5可以得出:当轴径风量比为5:5和4:6时,吹风筒轴向风量占优势,粉尘的运动主要受轴向吹风气流速度大小的影响,轴向吹风气流速度越大,越容易把粉尘扩散到巷道后方,吹风筒轴向出风与吹风筒径向出风形成的附壁旋流互相阻碍,影响附壁旋流通风的效果,不利于吸风筒高效地捕集粉尘;当轴径风量比为3:7和2:8时,随着轴向风量的减小和径向风量的增大,轴向吹风气流经掘进断面反射后结合压风筒径向风流形成的附壁旋流通风,能够有效地将粉尘控制在距离掘进端头7 m以内的范围,避免大量粉尘扩散至巷道后方;当轴径风量比为1:9和0:10时,吹风筒的轴向出风量很小,而条缝口的径向出风量达到最大,形成强劲的径向风幕能够有效地将粉尘封堵在巷道前端,有效将粉尘控制在距离掘进端头3 m范围以内,达到理想控尘效果.但考虑到煤矿井下的实际情况,如果现场煤层瓦斯含量较高,若采用轴径风量比为0:10容易造成瓦斯聚集,可将轴径风量比提高到1:9,防止工作面端头出现瓦斯局部集聚.

4 结论

1) 附壁旋流通风的控尘效果受轴向风量、径向风量与吸风量三者大小关系的影响.吹风筒轴向出风对掘进端头的粉尘产生扰动,吹风筒径向出风形成的风幕将粉尘封堵在掘进面前端,在吸风筒的抽风作用下将粉尘排出.

2) 当吹吸流量比太小时,吹风筒的送风量太小,对掘进端头的粉尘扰动太小,导致高浓度粉尘容易堆积在巷道前端,对掘进司机的工作视线带来严重影响,且吹风筒径向风速也偏小,产生的径向风幕很弱对粉尘起到的阻挡效果不佳.当吹吸流量比过大时,吹风筒轴向出风量偏大,对掘进端头的扰动过大,造成大量的粉尘向巷道后方扩散,影响径向风幕对粉尘的封堵效果,不利于吸风筒对粉尘的捕集.当吹吸流量比为0.8时,吹风筒轴向径向的风量适中,轴向出风能对掘进端头的粉尘产生充分的扰动,径向出风能形成完整的风幕对粉尘封堵,并配合吸风筒的抽吸作用将粉尘捕集,达到最好的控尘效果.

3) 在吹吸流量比为0.8的情况下,随着轴向风量减小和径向风量增大,附壁旋流通风的控尘效果也越来越好,粉尘的扩散范围也逐渐减小,吸风筒处粉尘浓度和司机作业处粉尘浓度也逐渐降低,在吹吸流量比为0.8和轴径风量比在1:9以下时达到理想的控尘效果.

参考文献:

- [1] 王德明. 矿井通风与安全[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [2] 李德文, 马俊, 刘河清. 煤矿粉尘及职业病防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [3] 程卫民, 刘伟, 聂文, 等. 煤矿采掘工作面粉尘防治技术及其发展趋势[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2010, 29(4): 77-82.
- [4] 杜翠凤, 王辉, 蒋仲安, 等. 长压短抽式通风综掘工作面粉尘分布规律的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2010, 8(8): 957-961.
- [5] 叶绿, 张寿, 姚华, 等. 掘进机可控循环通风除尘方法与措施研究[J]. 化工矿物与加工, 2010(9): 30-32.
- [6] 李雨成. 基于风幕技术的综掘面粉尘防治研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.
- [7] 刘荣华. 综采工作面空气幕隔尘理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [8] 刘荣华, 王鹏飞, 宋佳, 等. 机掘工作面旋转射流屏蔽通风流场特性数值研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 198-203.
- [9] 王辉, 蒋仲安, 黄丽婷. 掘进巷道中长压短抽式通风合理压抽比实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 168-171.
- [10] 刘荣华, 王鹏飞, 张登春, 等. 机掘工作面旋转射流屏蔽通风风吹吸流量比研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(9): 133-139.
- [11] 李雨成, 刘剑. 基于气固两相流的风幕控尘数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 765-769.
- [12] 任建峰. 长压短抽通风方式中压抽参数匹配探讨[J]. 山西焦煤科技, 1997(2): 11-14.
- [13] 秦跃平, 张苗苗, 崔丽洁, 等. 综掘工作面粉尘运动的数值模拟及压风分流降尘方式研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 7(33): 790-794.