

# 不同参数对综放工作面尘流运动规律的影响

姚锡文<sup>1</sup>, 鹿广利<sup>2</sup>, 许开立<sup>1</sup>, 闫放<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘 要:** 基于耦合的离散相模型,应用 CFD 软件对综放工作面内的尘流规律进行数值模拟,对比研究不同倾角、不同配风量、不同粒径粉尘参数对综放工作面粉尘浓度分布规律的影响,并与现场实测的粉尘浓度分布情况进行对比分析.结果表明,大倾角综放工作面内风流更趋于流向靠近煤壁的空间.倾角增加,呼吸性粉尘运动活跃.适当增大风量后,呼吸性粉尘易被风流携带,粉尘浓度降低明显,但风速过大易产生二次扬尘.

**关 键 词:** 综放工作面;倾角;配风量;粉尘;数值模拟;浓度分布

中图分类号: TD 714

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)11-1622-05

## Effect of Different Factors on Dust Flow Regularities in Fully Mechanized Caving Face

YAO Xi-wen<sup>1</sup>, LU Guang-li<sup>2</sup>, XU Kai-li<sup>1</sup>, YAN Fang<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Mining and Safety Engineering Department, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China. Corresponding author: YAO Xi-wen, E-mail: yxw\_20061005@126.com)

**Abstract:** Based on the theory of coupling discrete phase model, air flow regularities and dust distribution were investigated by using CFD, contrastive research on dust concentration was carried out under different factors, such as different coal seam dip angle, different ventilation quantity and different dust diameter, and comparative analysis between simulating dust concentration and field measurement results was conducted. The results showed that air trends to flow near coal wall in high inclination-angle fully mechanized caving face. The respirable dust is active with adding coal seam dip angle. After appropriate increase air volume, respiratory dust is easy to be carried by air, and the dust concentration reduces obviously, but too large air speed may produce secondary dust.

**Key words:** fully mechanized caving face; seam inclination; ventilation quantity; dust; numerical simulation; concentration distribution

综放工作面产尘点多,产生量大,增加了发生各种工伤事故的机率,还潜存着煤尘爆炸的可能性,严重威胁矿井安全生产<sup>[1-2]</sup>.

国内外学者对采煤工作面的粉尘运动进行了一定的研究. Enwald 和 Crowe<sup>[3-4]</sup>对颗粒相运动的湍流流动模型进行研究. 蒋仲安等<sup>[5]</sup>利用数值模拟研究了割煤、移架以及放顶煤等工序的粉尘浓度分布规律. 程卫民等<sup>[6]</sup>根据气体-粉尘流动特性,建立了求解粉尘浓度空间分布规律的  $k-\varepsilon-\Theta-k_p$  双流体封闭方程组,对综放工作面粉尘

浓度分布规律进行了研究等.

但在实际生产中,不同综放面的现场条件截然不同,风流运动复杂多变,粉尘分布规律也不能一概而论. 目前对不同生产条件下综放面内的风流运动及粉尘分布规律的研究报道相对较少,因此,研究不同倾角、不同配风量、不同粒度粉尘等条件参数对综放面风流及粉尘运动的影响规律,可为综放面的合理通风和粉尘防治提供理论依据.

## 1 粉尘运动的数学模型概述

离散型模型通过积分 Lagrangian 参考系下的颗粒的运动方程<sup>[7]</sup> 计算其运动轨迹. 由颗粒的惯性与受力平衡, 写出离散相颗粒运动方程为(以直角坐标系内  $x$  方向为例)

$$\frac{du_p}{dt}=f_D(u-u_p)+\frac{g_x(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+f_x. \quad (1)$$

式中:  $f_x$  为附加加速度项; 等号右边第二项为单位颗粒质量的重力与浮力的合力;  $f_D(u-u_p)$  为单位颗粒质量受到的阻力;  $u$  为连续相速度;  $u_p$  为颗粒速度;  $\rho$  为连续相密度;  $\rho_p$  为颗粒密度.

## 2 综放工作面尘流规律数值模拟

### 2.1 工程概况

某煤矿综放面煤层厚度大(5.8~7.1 m)、倾角大(23°~49°), 工作面巷道采用矩形断面, 净宽 5.8 m, 净高 3.2 m, 走向长度约 110 m. 综放面内采煤机由上向下单向割煤, 前滚筒割顶煤、后滚筒割底煤. 采用下行通风方式.

### 2.2 仿真模型的建立及其网格划分

结合现场实际, 利用 Fluent 软件自带的前处理软件 Gambit 构建综放工作面为长×宽×高=110.0 m×5.8 m×3.2 m 的长方体计算区域.

采煤机模型外形尺寸为长×宽×高=16.0 m×0.9 m×1.2 m, 滚筒直径 1.4 m, 摇臂长度 1.7 m, 模型中采煤机中心位置处于工作面沿程倾向  $x=50$  m 处, 对采煤机运行到此位置时的割煤场景进行模拟计算. 液压支架宽度为 1.6 m, 顶梁至底板的高度为 3.2 m. 几何模型见图 1.

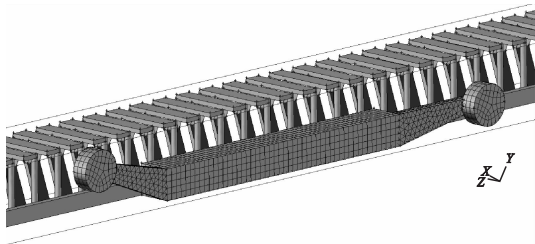


图 1 Gambit 几何模型  
Fig. 1 Gambit geometric model

### 2.3 数值模拟的边界条件及尘源参数设定

综放工作面尘流中粉尘含量高, 尘流的运动为黏性、不可压缩、稀疏悬浮的气固两相湍流问题. 本文使用气固两相耦合的离散相数学模型进行模拟计算. 参考相关资料<sup>[8-9]</sup>, 根据现场设定边

界条件见表 1, 粉尘源参数见表 2.

表 1 边界条件设定  
Table 1 Boundary conditions setting

边界条件	参数设定
入口边界类型	速度入口
入口速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1.5
水力直径/m	3.6
湍流强度/%	3.2
出口边界类型	自由出流

表 2 粉尘源主要参数设定  
Table 2 Parameters setting of dust source

颗粒源主要参数	参数设定
粉尘粒径分布	$R-R$ 分布
分布指数/m	1.73
粉尘最大粒径/m	全尘 $4.0 \times 10^{-5}$ 呼吸性粉尘 $7.07 \times 10^{-6}$
粉尘中位径/m	$1.129 \times 10^{-6}$
粉尘最小粒径/m	全尘 $2.6 \times 10^{-7}$ 呼吸性粉尘 $2.6 \times 10^{-7}$
颗粒轨道跟踪次数	4 000
积分时间尺度常数	0.27
滚筒尘源质量流率/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.104
移架尘源质量流率/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.016
放煤尘源质量流率/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.021

### 2.4 风流场数值模拟结果

研究大倾角综放面呼吸带风速的沿程分布, 入口速度设为  $v=1.5$  m/s, 倾角  $\theta$  设为 40°. 采煤机上风侧 30, 20, 10 m 和下风侧 10, 20, 30 m 呼吸带断面风速沿煤壁-采空区方向变化曲线, 如图 2 所示, 煤壁为坐标原点.

从图 2 可以看出:

1) 采煤机上风侧 30 m 内, 风流进入到综放面后在靠近煤壁 0.5 m 以内风速迅速增加至 2 m/s 左右, 在 0.5~3.5 m 以内的机道空间和架前空间, 风速基本稳定在 1.8~2.5 m/s 之间.

2) 采煤机下风侧 10 m 与 20 m 断面风速变化保持一致, 前 20 m 处的风速最大值为 5.6 m/s, 距煤壁约 4 m, 而 30 m 处的最大值距煤壁约 0.7 m, 随着沿程距离增加, 风速最大值趋向煤壁.

## 3 不同参数对粉尘浓度分布的影响

### 3.1 粉尘浓度空间分布数值模拟结果

模拟中分 4 种情况对比研究不同倾角、不同配风量、不同粉尘粒径边界条件对粉尘浓度分布规律的影响. 其他条件均一致, 见表 1 和表 2.

①风速 1.2 m/s, 倾角 8°, 呼吸性粉尘.

- ②风速 1.2 m/s,倾角 40°,呼吸性粉尘.
- ③风速 2.5 m/s,倾角 40°,呼吸性粉尘.
- ④风速 2.5 m/s,倾角 40°,全尘.

对比①和②研究大倾角综放面与缓倾斜综放面由于倾角不同造成粉尘运动的差异. 对比如图 3 所示.

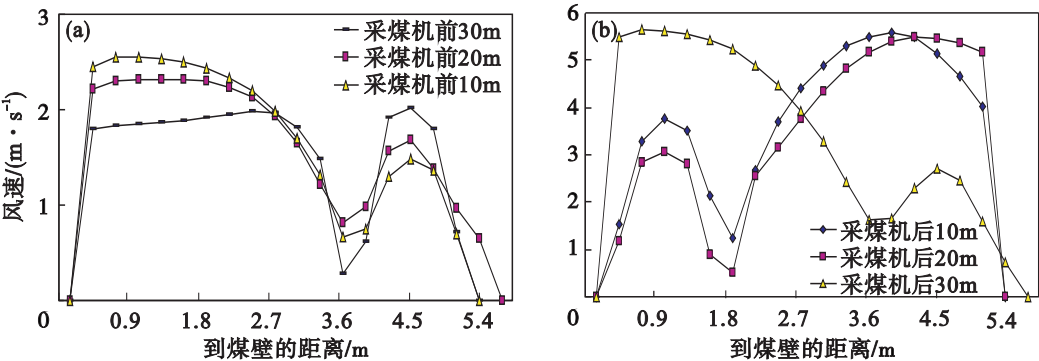


图 2 沿煤壁-采空区方向各横断面呼吸带高度风速变化  
Fig. 2 Air velocity variation of different cross-sections at breathing zone height along coal wall to goaf direction  
(a)—采煤机前; (b)—采煤机后.

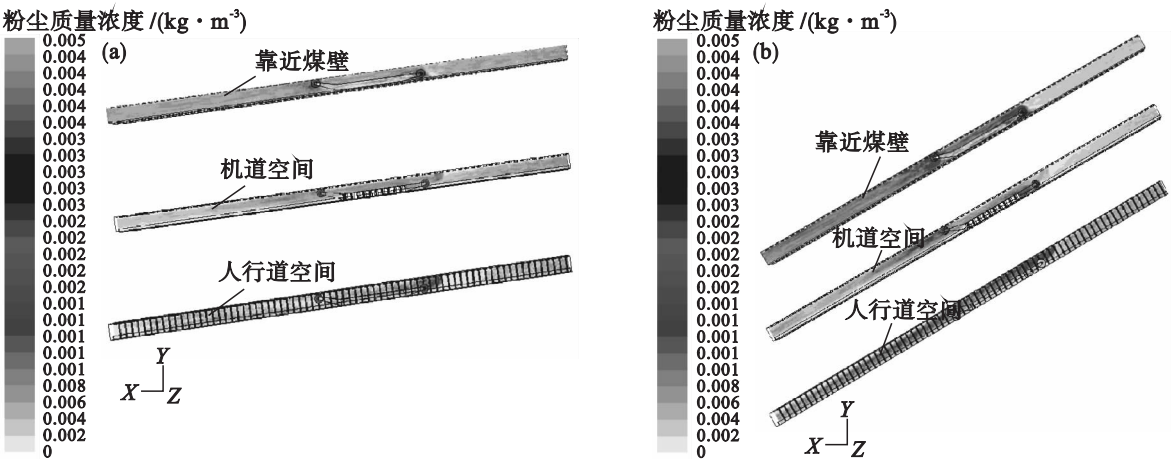


图 3 不同倾角时沿煤壁-采空区方向呼吸性粉尘浓度对比  
Fig. 3 Comparison of respirable dust concentration with different seam inclination along coal wall to goaf direction  
(a)—倾角 8°; (b)—倾角 40°.

从图 3 看出,倾角 40°的综放面的人行道呼吸性粉尘浓度明显高于倾角为 8°的综放面,倾角增大,风流多为湍流,粉尘在风流中漂浮时间长,运动更加紊乱,造成人行道呼吸性粉尘很难沉降.

对比②和③研究综放面不同配风量对粉尘浓度分布规律的影响,沿底板-顶板方向各水平剖面内粉尘浓度沿程变化对比如图 4 所示.

从图 4 中可看出,沿工作面倾向(X轴正向),增大风量后,采煤机下风侧各横断面呼吸性粉尘浓度减小,风流稀释粉尘作用明显. 沿底板-顶板方向(Y轴正向),呼吸带高度处的粉尘降幅大,增大风量后呼吸带处的粉尘易被风流带走. 沿煤壁-采空区方向(Z轴正向),增大风量后,机道空间、液压支架和人行道空间粉尘浓度均降低. 可见适当提高风量有助于降低呼吸性粉尘浓度.

对比③和④研究不同粒径粉尘在综放面内的运动规律,呼吸性粉尘与全尘浓度对比见图 5.

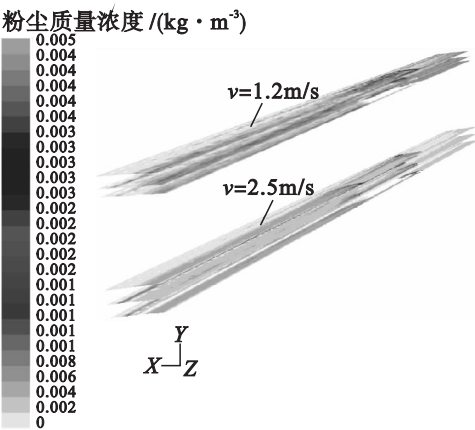


图 4 风速不同时沿底板-顶板方向呼吸性粉尘浓度对比  
Fig. 4 Comparison of respirable dust concentration by different air velocities along seam floor to roof direction

从图 5 看出,沿煤壁至采空区方向,采煤机下风侧全尘浓度逐渐降低,呼吸性粉尘不断积累. 随着风流的横向流动,大颗粒粉尘不断沉降,而呼吸

性粉尘不易被液压支架或底板捕获,易随风流横向流动,漂浮到人行道空间.

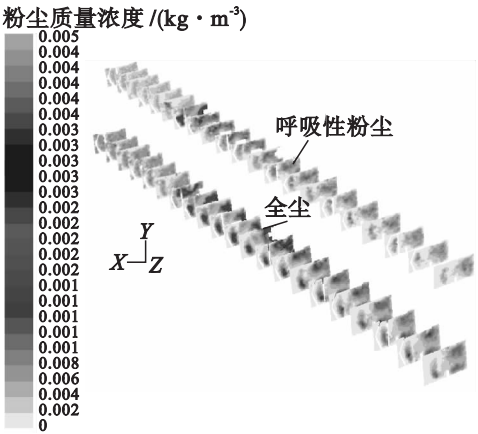


图 5 不同粒径粉尘浓度沿工作面倾向对比  
Fig. 5 Dust concentration comparison of different diameters along coal cutting direction

3.2 不同边界条件下粉尘浓度沿程变化规律

对比研究不同倾角、不同风速和不同粒径条件下人行道空间呼吸带高度粉尘浓度沿程变化规律,如图 6 所示.

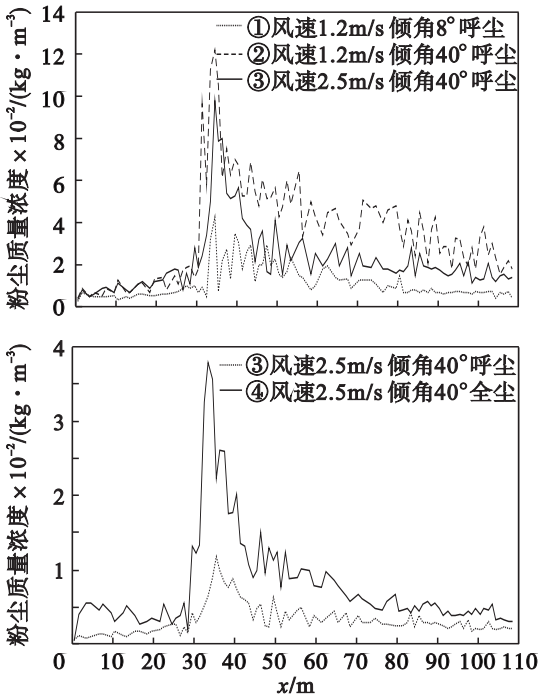


图 6 不同边界条件下粉尘浓度沿程变化  
Fig. 6 Dust concentration variations along the roadway under different boundary conditions

从图 6 中可以看出:

1) 对比曲线①和②可知,倾角 40°的综放面呼吸性粉尘浓度在采煤机附近急剧上升至约 1 200 mg/m³,倾角 8°的综放面内呼吸性粉尘浓度最大约 400 mg/m³. 采煤机下风侧,倾角 40°的综放面内粉尘浓度波动较大,倾角 8°的综放面内

粉尘浓度逐渐降低,最终保持在约 50 mg/m³. 说明倾角增加,呼吸性粉尘运动活跃.

2) 对比曲线②和③可知,在倾角均为 40°的大倾角综放面中,不同入口风速条件下,采煤机上风侧粉尘浓度沿程变化基本一致,下风侧 30 m 内,风速为 2.5 m/s 时的呼吸性粉尘浓度迅速降至 200 mg/m³,而风速为 1.2 m/s 时的粉尘质量浓度依旧在 500 ~ 600 mg/m³ 的高浓度范围内波动. 采煤机下风侧 30 m 后,风速为 2.5 m/s 时的呼吸性粉尘质量浓度比 1.2 m/s 时低 100 mg/m³ 左右. 实际生产中,既要保证综放面正常生产,又要控制粉尘浓度处于低水平. 综合考虑,倾角较大的综放面入口风速可设为 2.0 ~ 2.8 m/s,风速不宜过大,过大易造成二次扬尘.

3) 对比曲线③和④可知,采煤机附近全尘质量浓度最高约 3 800 mg/m³,呼吸性粉尘浓度最高约 1 000 mg/m³,采煤机下风侧 30 m 内全尘浓度迅速降低,而呼吸性粉尘浓度缓慢降低. 在下风侧 30 m 后,全尘质量浓度在 300 mg/m³ 左右小幅波动,呼吸性粉尘则稳定在约 200 mg/m³ 至出口.

4 现场实测与模拟结果对比分析

沿工作面每隔 5 m 在液压支架前约 1.6 m 高的呼吸带空间布设一个测尘点. 每个测尘点至少测定 3 次取平均值. 将现场测定与数值模拟结果对比,如图 7 所示.

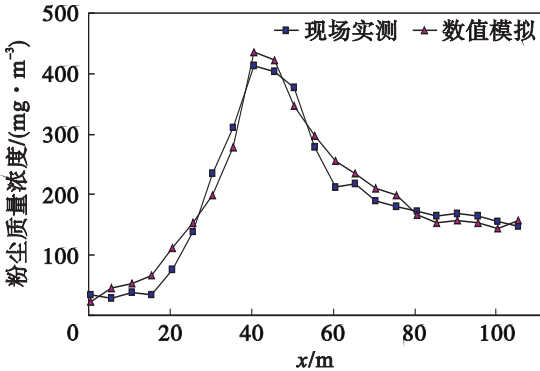


图 7 现场实测与数值模拟粉尘质量浓度对比  
Fig. 7 Dust concentration contrast of measuring and simulation

通过模拟计算得出的架前空间呼吸带高度的粉尘浓度分布符合现场实际,在到达采煤机之前,粉尘浓度保持低水平缓慢上升,在采煤机下风侧 30 m 内粉尘浓度急剧下降,下风侧 30 m 后基本保持稳定,综放工作面内粉尘浓度变化与实测沿程粉尘浓度分布基本吻合. 验证了利用离散相数学模型进行数值模拟的可行性和准确性.

(下转第 1630 页)