5月

2011 年

文章编号:0253-9993(2011)05-0818-05

综掘工作面水气旋转射流降尘系统的数值模拟与试验

马中飞¹² 闫正波¹ 陈家祥³ 沐俊卫³

(1. 江苏大学 环境学院 江苏 镇江 212013;2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 江苏 徐州 221008;3. 淮北矿业集团 安徽
 淮北 235000)

摘 要:为提高综掘工作面的降尘效果,提出了水气旋转射流降尘系统治理综掘工作面粉尘措施, 分析了其机理,并在现场进行了试验,同时进行了综掘工作面水气旋转射流控尘系统与传统直流送 风控尘的数值模拟。结果表明,该系统不但雾化效果好,且可形成旋风水气幕罩,有效控制粉尘快 速扩散及污染整个巷道,除尘效果明显。

关键词:综掘工作面;水气旋转射流;降尘;数值模拟

中图分类号:TD714.41 文献标志码:A

CFD numerical simulation and experiment of the water-air rotating jet flow dust-controlling system on the comprehensive mechanized mining faces

MA Zhong-fei^{1,2}, YAN Zheng-bo¹, CHEN Jia-xiang³, MU Jun-wei³

(1. College of Environment Jiangsu University Zhenjiang 212013 China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining China University of Mining and Technology Xuzhou 221008 China; 3. Huaibei Coal Mining Group Huaibei 235000 China)

Abstract: To improve the dust-controlling effects on the comprehensive mechanized mining faces a new dust-controlling method on the mining faces the water-air rotating jet flow dust-controlling system was proposed. The mechanism of the dust-controlling system was analyzed the site actual application effects was experimented and CFD numerical simulation was carried through the water-air rotating jet flow dust-controlling system and the traditional direct-current supply air dust-controlling system on the mining faces. The result show that the system not only has a good atomization result but also can form rotating water-air curtain to prevent the dust from spreading quickly and polluting the entire roadway efficiently and improves the dust-controlling effects evidently.

Key words: comprehensive mechanized mining faces; water-air rotating jet flow; dust-controlling; numerical simulation

掘进机割煤是矿井高尘源之一,无防尘措施时的 粉尘浓度可高达1000~3000 mg/m^{3[1-3]},目前的粉 尘防治措施仍存在一些问题,为提高综掘工作面降尘 效果,笔者进行了水气旋转射流降尘系统治理综掘工 作面粉尘技术研究。

综掘工作面水气旋转射流降尘系统的组成 与原理

综掘工作面水气旋转射流降尘系统由旋转射流 吸风式喷雾装置、二次旋转高压水射流吸尘除尘装 置、旋流送风控尘装置组成,如图1所示。 旋流送风控尘装置的作用是将掘进局部通风风 筒末端的直流送风变为旋转射流送风,既降低风筒出 口风速以免扬起煤粉和落尘,又形成旋风空气幕 罩^[4-6]控制浮尘向外扩散;旋转射流吸风式喷雾装置 的作用,既将水管的压力水变为更细雾滴的雾体,喷 向产尘区,降低掘进机割煤产生的粉尘,又抽吸附近 空气,并形成旋风水气幕罩,抑制粉尘扩散;二次旋转 高压水射流吸尘除尘装置的作用是依靠高压水在文 丘里管中喷雾而吸入旋转射流吸风式喷雾装置未能 捕捉的粉尘并去除。

旋转射流送风控尘装置是建立在紊动射流理论

收稿日期:2010-09-27 责任编辑:毕永华

基金项目:中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金资助项目(10KF04);国家安全生产监督管理总局科技计划资助 项目(08-086)

作者简介:马中飞(1962—),男 浙江东阳人 教授 博士生导师。E – mail: mzf@ujs.edu.cn



图1 综掘工作面水气旋转射流控尘系统

Fig. 1 Sketch of the water-air rotating jet flow dust-controlling system on the comprehensive mechanized mining faces

基础之上,通过在通风射流出口附近采用一定的加旋 措施,使风流成为轴向前进的旋转射流,利用旋转射 流具有扩散角大,卷吸和掺混能力强的特点,在作业 空间形成一"旋风空气幕罩",从而控制粉尘的扩散。

和一般的射流相比较,旋转射流通风的扩散角大,射程较短,紊动性强。

旋转射流吸风式喷雾装置和二次旋转高压水射 流吸尘除尘装置均由喷嘴、喉管、扩散管、吸入室等部 件组成,所不同的是,旋转射流吸风式喷雾装置为短 扩散管,二次旋转高压水射流吸尘除尘装置为长扩散 管,如图2、3所示。



图 2 旋转射流吸风式喷雾装置结构原理









Fig. 3 Structure and working principle of the double waterair rotating jet flow dust absorption and dedusting unit

旋转射流吸风式喷雾装置的吸风原理和二次旋转高压水射流吸尘除尘装置的吸尘原理均与液气射流泵相似^[7-9],首先,压力水通过喷嘴高速喷射出时,

与静止的空气存在速度不连续的间断面 间断面受到 不可避免的干扰 失去稳定而产生涡旋 涡旋卷吸周 围空气进入射流,同时不断移动、变形、分裂,产生紊 动 这样 由于喷嘴出口处射流边界层的紊动扩散及 黏滞作用,水射流与含尘空气产生动量交换,使之产 生负压而将气体从吸入室及外界卷吸到喉管;然后, 水射流到达喉管时,因喉管断面最小,射流在喉管处 的速度增至最高 其气压也降到最低 因此 由于喉管 入口处的气压低于吸入室及外界的气压 其气压差促 使吸入室内及外界含尘空气向喉管流动;其次,射流 在喉管运动中,水射流和含尘空气呈多相混合运动, 它们进行能量和质量的传递,压力水速度减小,被吸 空气速度增大 结果又使外界及吸入室的含尘气体增 加;最后,射流水在扩散管运动时,含尘水气速度也已 经基本一致,由于扩散管断面呈增大趋势,水气速度 减小,使得水气混合物的部分动能转化成压能,又增 加了抽吸和压缩的效果。

旋转射流吸风式喷雾装置的降尘原理:高压水射 流不仅在表面波的作用下分解为液滴,而且与吸入的 气体分子发生碰撞,使得水滴进一步被破碎成更小粒 径的雾滴,与此同时,水射流对气体进行压缩并把气 体粉碎为微小气泡,这样,压力水经过旋转射流吸风 式喷雾装置出来的物体为细小雾滴和气泡的混合体, 从而提高降尘效果。二次旋转高压水射流吸尘除尘 装置的除尘原理是,压力水从喷嘴喷出后,与含尘空 气接触方式大致有水滴、水膜和气泡3种形式,这3 种接触形式的捕尘机理主要是依靠惯性碰撞、截留、 布朗扩散及凝集作用来捕尘,最后通过脱水器将尘泥 与空气分离。

忽略体积力和黏性项 旋转射流通风控尘和旋转 射流吸风式喷雾控尘的微分方程可用轴对称、稳定湍 流的柱坐标(x、y、r)的雷诺运动方程和连续方程表 示^[10] 即

$$\overline{U}\frac{\partial U}{\partial x} + \overline{V}\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial r}\overline{u}\overline{v} - \frac{\partial}{\partial x}\overline{u}^2 - \frac{\overline{u}\overline{v}}{r}$$
(1)

$$\overline{U}\frac{\partial\overline{V}}{\partial x} + \overline{V}\frac{\partial\overline{V}}{\partial r} - \frac{\overline{V}^{2}}{r} = -\frac{1}{\rho} \times$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \bar{v}^2 - \frac{\partial}{\partial x} \bar{u} \bar{v} - \frac{\bar{v}^2}{r} + \frac{\bar{w}^2}{r}$$
(2)

$$\overline{U}\frac{\partial W}{\partial x} + \overline{V}\frac{\partial W}{\partial r} + \frac{V}{r}\frac{W}{r} =$$

$$-\frac{\partial}{\partial r}\,\overline{w}\,\overline{v} - \frac{\partial}{\partial x}\,\overline{u}\,\overline{w} - 2\,\frac{\overline{v}\,\overline{w}}{r} \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(r\overline{U}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\overline{V}) = 0 \qquad (4)$$

式中 P 为射流压力; $\overline{U}, \overline{V}, \overline{W}$ 分别为射流的轴向、径 向和切向时均速度分量; $\overline{u}, \overline{v}, \overline{w}$ 分别为 x, y, r 方向时 均速度湍流(脉动) 分量; ρ 为水气密度。

2 综掘工作面水气旋转射流降尘系统现场试验

现场试验在淮北矿业集团祁南煤矿北翼辅助进 风大巷综掘工作面进行。

该大巷位于井田中部,施工段在32煤层至32煤 层底版下 20 m 范围之内 岩性以细砂岩和泥岩为主, 3,煤层厚1.6~3.2 m,平均2.8 m,以亮煤和半亮煤 为主,巷道掘进穿过地段的地质构造简单。采用 EBZ-160SH 型悬臂式掘进机铣削式切割破煤(岩), 滚筒直径 0.8 m, 一次截割深度为 350 mm, 巷道净高 3 700 mm ,净宽 4 500 mm ,巷道净断面面积 14.4 m² , 工作面供水采用直径 50 mm 管路供水,掘进工作面 自然水压 3 MPa,采用内外喷雾装置降尘 共有 14 个 直径为 1.6 mm 喷嘴进行喷雾,总耗水量大约为 100 L/min。该掘进工作面瓦斯含量较大,瓦斯绝对 涌出量为 0.25~2.03 m³/min 煤尘具有爆炸危险性。 工作面通风方式为压入式通风,使用 2 台 2BJN06.3 通风机和直径 600 mm 软质风筒供风,功率 2 × 30 kW,供风量 260~630 m³/min,全风压 360~ 6 300 Pa 试验时的供风长度 950 m,风量 255 m³/ min 最大瓦斯涌出量 2.09 m³/min ,掘进工作面瓦斯 浓度 0.22% 回风瓦斯浓度 0.53% 温度 23 ℃ 掘进

工作面风流温度 21 ℃。该工作面在原防尘措施下粉 尘浓度仍然较高 粉尘弥漫整个工作空间,风筒出口 高速风流会扬起落尘。

旋流送风装置安装在压入式通风风筒出口侧,外 径为600 mm,螺旋角45°;共使用4个旋转射流吸风 式喷雾装置,每个装置的外径110 mm、长度50 mm, 水压10 MPa 耗水量8 L/min,安装在掘进机滚筒后 面,雾滴平均直径(SMD)88 μm;二次旋转高压水射 流吸尘除尘装置安装在掘进机机身,水压10 MPa,耗 水量20 L/min,抽风量70~120 m³/min 除尘器外径 500 mm 左右,长度2.15 m 除尘效率98.5% ,供水系 统由两组180 目 Y 型过滤器和5BZ 系列高压喷雾泵 提供,加压泵安装在掘进机机身中,额定流量2 m³/ h 额定压力15 MPa,与掘进机截割部联动。

粉尘测定采用滤膜称重法,使用承德产 DCH2II型 粉尘采样器采样,采用十万分之一分析天平称重。通 过对 100 多个测定数据统计分析,该工作面在无防尘 措施、原防尘措施和本文防尘措施下的司机处、回风侧 粉尘浓度可见表 1。可以看出,采用本系统防尘措施 后,司机处的全尘、呼吸性粉尘浓度分别为 45.0、 9.2 mg/m³,与无防尘措施相比的降尘率分别为 83.92%、90.52%,与原防尘措施相比的降尘率分别为 72.00%、85.09%;工作面回风 10~15 m 的全尘、呼吸 性粉尘浓度分别为 53.0 和 11.5 mg/m³ 与无防尘措施 下相比的降尘率分别为 93.95%、95.67%,与原防尘措 施相比的降尘率分别为 86.51%、92.19%。

Table 1 Summarizing of the dust concentration					
项目 —				呼吸性粉尘	
		司机处	回风10~15 m	司机处	回风10~15 m
无防尘措施	粉尘浓度/(mg • m ⁻³)	279.8	875.6	97.0	265.6
原防尘措施	粉尘浓度/(mg•m ⁻³)	160. 7	392. 8	61.7	147.3
	与无措施相比降尘率/%	42. 57	55.14	36.39	44. 54
	粉尘浓度/(mg • m ⁻³)	45.0	53.0	9.2	11.5
本文	与无措施相比降尘率/%	83.92	93.95	90. 52	95.67
防尘措施	与原措施相比降尘率/%	72.00	86. 51	85.09	92.19
	比原措施提高降尘率/%	41.35	38.81	54.12	51.13

表1 粉尘浓度汇总

3 综掘工作面水气旋转射流系统与传统直流 送风控尘的数值模拟

结合现场试验,对综掘工作面水气旋转射流降尘 系统和传统直流送风控尘系统进行了数值模拟。物 理模型图采用 Gambit 软件来绘制,数值模拟采用 Fluent 软件。

3.1 计算模型

其物理模型基本根据淮北矿业祁南煤矿北翼辅助进风大巷综掘工作面情况确定,工作面宽4.5 m, 风筒及旋流送风控尘装置设在模型左壁面距掘进工 作面1.5 m处;二次旋转高压水射流吸尘除尘装置设 在模型右壁面距掘进工作面1.5 m处;旋转射流吸风 式喷雾装置位于巷道中间,距掘进工作面1 m处。 为了利于数值模拟,先假设:模型中的流体为常 温常压不可压缩空气;工作面主风流沿工作面流动稳 定,且流速分布均匀;旋转射流吸风式喷雾装置、旋流 送风控尘装置的进风侧均简化,设定以一定初速度沿 各自内部导流叶片进风侧稳定流出,且流速分布均 匀;二次旋转高压水射流吸尘除尘装置的吸风侧简 化,设定以一定初速度沿吸风口稳定流入,且流速分 布均匀;忽略重力影响和热交换。采用的相关方 程^[11-13]如下。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_{\rm p}} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_{\rm p}} \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_{\rm p}} \frac{\partial T}{\partial z}\right) + S_{\rm T}$$
(5)

式中 $\rho_{\rm p}$ 为比热容; T 为温度; k 为流体的传热系数; $S_{\rm T}$ 为黏性耗散项。

标准 $k - \varepsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ε 方程为 $\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Big[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \Big] + G_k - \rho \varepsilon$ (6) $\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Big[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \Big] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$ (7)

式中 湍流黏度 μ_i 可表示成 k 和 ε 的函数 即

$$\mu_{\rm t} = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

 G_k 则代表平均速度梯度产生的湍流动能,可由下式 计算

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial u_j}$$
(9)

在此模型中 根据 Launder 等的推荐值及后来的 实验验证,模型常数 $C_{1_{\varepsilon}} = 1.44$, $C_{2_{\varepsilon}} = 1.92$, $C_{\mu} = 0.09 \sigma_{k} = 1.0 \sigma_{\varepsilon} = 1.3$ 。

3.2 网格划分

本文采用 Gambit 绘制平面图并划分网格。对于 传统直流送风流场,划分网格时以 20 mm 为间距,采 用 map 方式映射成结构化四边形网格,网格总数为 11 250; 对于采用降尘新技术系统后的工作面流场, 采用 pave 方式平铺成非结构化四边形网格,划分网 格时网格间距为 20 mm。因选取模型求解简单,可作 整体细化。在旋流送风控尘装置出口和旋转射流吸 风式喷雾装置出口对网格作了局部加密处理,加密部 分的网格间距为 2 mm,生成网格总数为 34 096。

3.3 参数设置及边界条件

选择分离式隐式求解器,二维计算区域,稳态定 常流动,采用 Mixture 混合模型,环境压力为 9 500 Pa,空气密度 1.225 kg/m³,水的密度为 998.2 kg/m³。设置压力的亚松弛因子为 0.3,密度 为 1,体力为 1 动量为 0.7。压力离散方法选择标准 化离散方法。压力和速度耦合离散方法采取 SIMPLE 算法。动量、体积分数、湍动能、耗散相离散方法都采 用默认的一阶迎风格式。设置残差监视器中的 continuity、*x*-velocity、*y*-velocity、energy、*k* 的收敛依据均为 0.000 01。

边界条件^[14-15]如下:① 风筒出口边界条件, μ = 20.64 m/s p = 0;② 旋转射流吸风式喷雾装置出口 速度 经过换算 ,最佳出口速度为 30 m/s;③ 二次旋 转高压水射流吸尘除尘装置吸入口速度 ,经过换算 , 最佳吸入口速度为 30 m/s;④ 固壁无滑移条件, μ = 0 p = 0。风筒、旋转射流吸风式喷雾装置和二次旋转 高压水射流吸尘除尘装置模型定义为速度出口模型 , 选用垂直于各模型出入口平面的平均速度来确定其 出口速度。

3.4 模拟结果与分析

采用 Fluent 软件对综掘工作面水气旋转射流系 统与传统直流送风的数值模拟的矢量图如图 4、5 所 示。



图4 传统直流送风的速度矢量分布

Fig. 4 Velocity and vector distribution of the traditional direct-current supply air

可以看出: 传统直流送风和内外喷雾降尘时,风 筒高速出口风流会扬起落尘,工作面产生的粉尘会快 速扩散,并弥漫污染整个巷道,而采用本文的水气旋 转射流系统时,风筒出口风流大大降低,不会扬起落 尘,且旋流送风控尘装置和旋转射流吸风式喷雾装置 形成的旋风水气幕罩,使得未被旋转射流吸风式喷雾

报



图 5 水气旋转射流系统速度矢量分布

Fig. 5 Velocity and vector distribution of the waterair rotating jet flow system

捕捉的粉尘沿着预先控制线路流动,有效抑制了粉尘 快速扩散及污染整个巷道。

4 结 论

(1)理论研究和数值模拟表明,水气旋转射流降 尘系统采用旋转射流吸风式喷雾装置、旋流送风控尘 装置形成的旋风水气幕罩控尘,采用不旋转射流吸风 式喷雾装置提高雾化效果,采用二次旋转高压水射流 吸除尘装置吸尘除尘,该新技术不但雾化效果好,且 可有效控制粉尘快速扩散及污染整个巷道。

(2)现场试验表明,该系统与原防尘措施相比的 降尘率为72.00%~92.19% 降尘效果显著。

参考文献:

 [1] 周茂普. 综掘工作面通风除尘系统研发与应用[J]. 煤炭科学技 术 2009 37(10):1-3.
 Zhou Maopu. Research and application of ventilation and dust collecting system for fully mechanized gateway heading face [J]. Coal Sci-

ence and Technology 2009 37(10): 1 - 3.

[2] 常建兵,刘 涛,胥 奎,等. 综掘工作面粉尘防治技术研究
 [J]. 煤炭工程 2007(3):53 - 54.
 Chang Jianbing Liu Tao Xu Kui et al. Research on dust prevention

and control technology for fully mechanized mine heading face [J]. Coal Engineering 2007(3):53 -54.

[3] 赵书田,晁钟春,毛铁林.双鸭山煤田呼吸性粉尘的研究[J].煤 炭学报,1988,13(1):1-10.

Zhao Shutian ,Chao Zhongchun ,Mao Tielin. Study on respirable dust in Shuangyashan coalfield [J]. Journal of China Coal Society ,1988 , 13(1):1-10.

[4] 聂 文 程卫民,郭允相,等.综掘工作面空气幕封闭式除尘系 统的研究与应用[J].煤矿安全 2009(3):19-20.

Nie Wen ,Cheng Weimin ,Guo Yunxiang ,et al. Research and application of the closed air-stream curtain controlling dust system on the comprehensive mechanized mining faces [J]. Safety in Coal Mines , 2009(3): 19-20.

[5] 蔡 农. 掘进工作面风水喷雾除尘技术的研究与应用[J]. 能源 技术与管理 2008(1):59-61.

Cai Nong. Research and application of water-air mist spray dust-controlling technology in driving face [J]. Energy Technology and Management 2008(1):59-61.

[6] 马 恒,刘 剑,李 伟.综掘面集尘除尘技术[J].煤矿安全, 2009(5):12-14.

Ma Heng JLiu Jian JLi Wei. Dust-collecting and controlling technology on the comprehensive mechanized mining faces [J]. Safety in Coal Mines 2009(5):12 – 14.

[7] 马中飞 赵 锋.水气射流通风器参数对吸风性能影响的实验 研究[J].流体机械 2007(1):8-11.

Ma Zhongfei Zhao Feng. Experimental research on parameter of hydrosphere jet aeration implement influencing ventilation performance [J]. Fluid Machinery 2007(1):8-11.

[8] 马中飞 施帮华. 文氏管组喷雾器在采煤机降尘技术中的应用[J]. 煤矿安全 2003(1):21-23.

Ma Zhongfei ,Shi Banghua: Application of venturi tubes sprayer for coal winning machine in dust-controlling technology [J]. Safety in Coal Mines 2003(1):21-23.

- [9] 陆宏圻.射流泵技术的理论及应用[M].北京:水利电力出版社, 1989.
- [10] 马中飞 郝明奎,赵 峰.二次实心旋转水气射流驱散积聚瓦斯的理论与试验[J].煤炭学报 2008 33(2):140-143.
 Ma Zhongfei, Hao Mingkui, Zhao Feng. Theory and test on solid twi-rotary hydrosphere jet eliminating local gas accumulation[J].

Journal of China Coal Society 2008 33(2): 140 – 143.

- [11] 马中飞,戴洪海. 旋流与直流送风改善回风隅角风流状态的 3CFD 数值模拟[J]. 煤炭学报 2008 33(11):1 280-1 282. Ma Zhongfei ,Dai Honghai. 3CFD numerical simulation of improving airflow state in upcast corner of coalface by spinning and direct airflow ventilation[J]. Journal of China Coal Society 2008 33(11): 1 280-1 282.
- [12] 傅德薰,马延文.计算流体力学[M].北京:高等教育出版社, 2004.

Fu Dexun ,Ma Yanwen. Computational fluid dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press 2004.

[13] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M].
 北京: 清华大学出版社 2004.

Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis: CFD software principle and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[14] 杨秀莉 涨化龙. 自吸喷雾对采煤机控尘作用的数值模拟[J].煤矿安全 2008(5):20-22.

Yang Xiuli ,Zhang Hualong. Numerical simulation of dust-controlling for coal winning machine in self-absorption mist spray [J]. Safety in Coal Mines 2008(5):20 – 22.

[15] 杨秀莉,刘干光.高压二次旋转水射流通风治理上隅角瓦斯的 试验[J].煤矿安全 2007(10):17-19.

> Yang Xiuli ,Liu Ganguang. Test on high pressure twi-rotary hydrosphere jet controlling the upper corner gas accumulation [J]. Safety in Coal Mines 2007(10):17 – 19.