周智,陈连军,崔向飞,等. 掘进巷道湿喷施工过程粉尘弥散规律研究[J]. 矿业安全与环保,2019,46(2):10-14. **文章编号:**1008-4495(2019)02-0010-05

掘进巷道湿喷施工过程粉尘弥散规律研究

周 智1,陈连军1,2,崔向飞1,2,蒋学凯1,董其征1,陈 军3

(1.山东科技大学 矿业与安全工程学院,山东 青岛 266590;2.山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590;

3. 兖州煤业股份有限公司东滩煤矿,山东 邹城 273500)

摘要:为了研究长压短抽通风条件下湿喷施工作业产尘在掘进巷道空间内的弥散规律,应用 Fluent软件中的离散相模型,对湿喷中的初喷施工产尘、复喷施工与凿岩机破岩同时作业时产尘进行 数值模拟,得到了粉尘在巷道中的弥散规律。研究结果表明:压风侧初喷作业粉尘质量浓度高于抽风 侧初喷作业粉尘质量浓度,且掘进巷道端头附近尤为明显;压风侧或抽风侧复喷施工与凿岩机破岩同 时作业时,粉尘质量浓度变化规律均为沿程先降低,后因复喷作业而升高,然后再降低。根据粉尘弥散 规律,提出了相应的防尘建议,以减轻粉尘对施工作业人员的危害。

关键词:掘进巷道;湿喷;粉尘质量浓度;长压短抽;数值模拟 **中图分类号:**TD714⁺.4 **文献标志码:**A

Study on Dust Dispersion during Construction of Wet Spraying in Tunneling Roadway

ZHOU Zhi¹, CHEN Lianjun^{1,2}, CUI Xiangfei^{1,2}, JIANG Xuekai¹, DONG Qizheng¹, CHEN Jun³
(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control of the Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
3. Dongtan Coal Mine, Yanzhou Coal Mine Co., Ltd., Zoucheng 273500, China)

Abstract: In order to study the dispersion rule of wet-spraying dust in excavation roadway under far-pressing-nearingabsorption, the discrete phase model in Fluent software was applied to simulate the dust production in the initial spray of wet spraying, dust production as spray construction and drill break the rock at the same time, the dispersion law of dust in roadway was obtained. Research results show that the dust concentration of the press air side initial spray is higher than the air pumping side initial spray, and it is particularly obvious near the end of the excavation roadway; when the press air side or air pumping side multiple spray and drill breaks the rock at the same time, the change rule of dust mass concentration is first reduced along the exit direction of the roadway, then increased due to multiple spray produces dust, and then decreased again. According to the rules of dust dispersion, some suggestions are made to reduce the damage of dust to workers.

Keywords: excavation roadway; wet spraying; dust concentration; far-pressing-nearing-absorption; numerical simulation

在煤矿掘进巷道锚喷作业过程中,因湿喷技术 具备粉尘浓度低、输送距离长、喷射质量高等优点, 逐渐取代了传统的干喷和潮喷技术。随着湿喷技术 的推广应用,湿喷施工过程中的产尘量依旧高于国

收稿日期:2018-04-13;2019-03-12 修订

基金项目:"十三五"国家重点研发计划重点专项(2017YFC0805203);国家自然科学基金项目(51604163); 青岛市博士后研究人员应用研究项目(2015176)

作者简介:周 智(1995—),男,山东济宁人,硕士研究 生,主要从事矿井灾害预防与控制技术研究工作。E-mail: 395644590@qq.com。 家的职业卫生标准^[1-4]。因此,研究湿喷施工产尘在 掘进巷道内的弥散规律,为进一步的粉尘治理提供 理论基础显得尤为重要。聂文^[5]、周刚^[6]、于欣^[7]等 研究初喷产尘在巷道内的弥散规律,并未研究复喷 施工和凿岩机破岩同时作业时巷道内粉尘弥散规 律,且根据现场实际情况,复喷施工和凿岩机破岩同 时作业时产尘量较大,有必要进一步了解该过程产 尘在掘进巷道内的弥散规律。由于长压短抽式通风 的降尘效果较显著,故在长压短抽式通风的基础上, 通过对湿喷的初喷工艺施工产尘、复喷工艺施工与 凿岩机破岩同时作业时产尘进行数值模拟,得到湿 喷施工产尘在掘进巷道内的弥散规律,可为粉尘治 理提供参考依据。

1 风流—粉尘数学模型

在掘进巷道的通风系统中,风流、粉尘颗粒两相 流符合欧拉—拉格朗日模型中的"离散相"模 型(DPM)。笔者利用该模型,将气相设为连续相,采 用 *k—ε* 方程湍流模型描述风流场;将固相视为离散 相,利用 DPM 方法描述和追踪固体颗粒在掘进巷道 中的运移轨迹。

1.1 气相流的运动方程

 $k - \varepsilon$ 方程是在湍动能 k 的基础之上,加入湍动 耗散率 ε 所形成的,在 $k - \varepsilon$ 方程中,将 ε 定义为^[8]:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right] \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right)$$
(1)

于是,湍动黏度 μ_{l} 可表示成k与 ε 的函数:

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

因此,标准 k-ε 模型的输运方程为:

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

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

其中:

$$G_{k} = \mu_{t} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}}$$
(5)

$$G_{\rm b} = \beta g_i \, \frac{\mu_{\rm t}}{P r_{\rm t}} \, \frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{6}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \tag{7}$$

$$Y_{\rm M} = 2\rho \varepsilon M t^2 \tag{8}$$

式中: u_i 为 x_i 方向的速度, m/s; x_i 、 x_j 、 x_k 为坐标位 置; μ 为流体的动力黏度, Pa · s; ρ 为密度, kg/m³; t 为时间, s; C_{μ} 为常量, $C_{\mu} = 0.09$; G_k 是由平均速度 梯度产生的湍动能 k 的衍生项; G_b 是由于浮力影响 引起的湍动能产生项; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对 总的耗散率的影响; C_{1e} 、 C_{2e} 和 C_{3e} 为经验常数, Fluent 中的默认取值为 $C_{1e} = 1.44$, $C_{2e} = 1.92$, $C_{3e} = 0.09$; σ_k 是与 k 对应的普朗特数, σ_e 是与耗散率 ε 对应的 普朗特数, 常用取值 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_e = 1.3$; Pr_t 为湍动普 朗特数, 默认值取 0.85; g_i 为重力加速度在 i 方向上 的分量,m/s²; β 为热膨胀系数;Mt 为湍动马赫数,其 值 $Mt = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$;a 为声速,m/s; S_k 和 S_e 为定义的源项; T 为温度, $K^{[8]}$ 。

1.2 固相粉尘的运动方程

利用 Fluent 软件中的拉普拉斯坐标系中粒子间 相互作用的微分方程,解算离散粒子的运动轨迹。 在笛卡尔坐标系中,粒子之间的相互作用的方程可 以写成^[9-13]:

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} = F_{\mathrm{D}}(u - u_{\mathrm{p}}) + \frac{g_{x}(\rho_{\mathrm{p}} - \rho)}{\rho_{\mathrm{p}}} + F_{x}$$
(9)

$$F_{\rm D} = \frac{18\mu}{\rho_{\rm p} d_{\rm p}^2} \frac{C_{\rm D} Re}{24}$$
(10)

$$Re = \frac{\rho d_{\rm p} \mid u_{\rm p} - \mu \mid}{\mu} \tag{11}$$

$$C_{\rm D} = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \tag{12}$$

式中: u 表示流体相速度, m/s; u_p 表示粒子速度, m/s; ρ_p 表示粒子的密度, kg/m³; d_p 表示粒径, m; Re 是指相对雷诺兹数; F_p 为粒子单位质量的曳力, N; C_p 为阻力系数; g_x 表示沿 x 方向的重力加速度, m/s²; a_1, a_2, a_3 为常数; F_x 是指沿 x 方向的力, N。

2 建立仿真模拟的物理模型

首先,利用 Solidworks 建立模型。不考虑机械设 备和工作人员对产尘过程的影响,且对掘进巷道进 行适当简化,将巷道视为半圆拱形,模型的长×宽×高 为45.0 m×5.7 m×5.0 m。通风方式为长压短抽式 通风,将压风筒和抽风筒近似看作圆柱体,压风筒长 度为30 m,抽风筒长度为42 m,风筒半径为0.5 m, 风筒中心距离底板1.7 m。

再利用 ICEM CFD 16.0 软件对模型进行网格划分。本模型网格取最大尺寸为0.2 的整体四面体网格,网格总数为1933007个。物理模型及网格划分如图1所示。



3 仿真模拟结果分析

将网格导入 Fluent 中,利用 Fluent 提供的离散 相模型,首先对掘进巷道内的风流场进行求解。待 收敛后再建立粉尘喷射源进行计算。

3.1 风流扩散规律模拟结果分析

当压风量为 250 m³/min 时控尘能力较好,故将 压风量设置为 250 m³/min,设置压抽比为 1.25,抽 风量为 200 m³/min^[14]。湍流动力能量为 0.8 m²/s², 湍流耗散率为 0.8 m²/s³,出口边界处类型为 Outflow。计算采用 SIMPLE 算法,计算收敛后分析 计算结果。

掘进巷道距底板不同高度位置风速矢量分布云 图如图 2 所示。



以y=1.50 m(呼吸带)截面为例,风流从压风筒 射出一段距离后,风速逐渐降低,形成射流区。之后 风流以自由射流的形式沿巷道壁向前流动,当风流 到达端头时,前进路线受阻,被迫形成冲击射流附壁 区;当冲击贴附风流到达抽风筒一侧边壁时,方向 又发生改变,向抽风筒方向流动,形成回流区;因射 流方向与回流方向相反,在进风与回风的交界区域 受风流卷吸的作用形成涡流^[15]。综合y=0.75 m、 y=1.50 m和y=2.25 m截面观察可知,风流在y方 向涡流区域分布相似,均分布在靠近端头附近,且涡 流区域分布面积较广。

3.2 初喷产尘弥散规律模拟结果分析

通过 Fluent 计算,对单相风流场求解收敛后,对 离散相喷浆产尘源进行解算。计算选择瞬态求解器 和标准 *k*—ε 方程模型。在实际初喷作业过程中,喷 浆点在抽风侧时的粉尘弥散规律与喷浆点在压风侧 时的粉尘弥散规律不同。故在模拟过程中分别在距 端头 5 m 处的抽风侧与压风侧各设置 1 个产尘源。 模拟得出距离底板 0.75、1.50、2.25 m 截面内的粉 尘质量浓度分布云图,以及距离端头不同位置截面



由图 3 可知,当喷浆点在压风侧时,端头附近的 粉尘质量浓度较高,这是因为该喷浆点位于出风口 位置,喷浆处产生的粉尘随风流向端头方向扩散,且 端头附近存在涡流场,粉尘受涡流影响在端头处扩 散较为严重。

由图 4 可知, 压风侧喷浆产尘沿 z 轴正方向的 粉尘质量浓度总体呈降低趋势。其中, 产尘点附近 粉尘质量浓度高达 72.36 mg/m³; 以 z=20 m 截面为 界, 粉尘由高质量浓度区域向低质量浓度区域过渡; 从 z=25 m 截面起,粉尘进一步扩散,直到 z=30 m 截面处,粉尘质量浓度已经下降至 5.16 mg/m³ 以 下。故在压风侧喷浆时,其他作业工人位于距端头 30 m 甚至更远处为最佳。

由图 5 可知,当喷浆点在抽风侧时,端头附近的 粉尘质量浓度较低,原因是该喷浆点附近的风流是 从端头向 z 轴正方向流动,因而喷浆产生的粉尘随 风流向 z 轴正方向扩散。

由图 6 可知,与压风侧喷浆粉尘扩散规律相反, 抽风侧喷浆产尘沿 z 轴正方向的粉尘质量浓度总体 呈上升趋势,这是因为抽风侧喷浆点处的风向与压 风侧喷浆点处的风向相反(见图 2),风流由端头向 巷道出口流动。其中,产尘点所在的 z=5 m 截面上 粉尘质量浓度反而最低,仅在产尘点附近有高浓度 粉尘团,约为 61.7 mg/m³。另外,粉尘从 z=10 m 截 面起开始向整个横截面扩散,至 z=15 m 截面处粉尘 已基本扩散至整个断面。故在抽风侧喷浆时,其他 作业工人位于距端头 5 m 或更近处为最佳。

另外,对比图 3 和图 5 可知,在压风侧进行初喷 作业时,巷道内的粉尘质量浓度高于抽风侧初喷作 业。其中,在端头附近,抽风侧初喷的粉尘质量浓度 明显低于压风侧初喷的粉尘质量浓度。故建议缩短 在压风侧初喷作业的时间。

3.3 复喷产尘弥散规律模拟结果分析

通过 Fluent 计算,对单相风流场求解收敛后,对 离散相喷浆产尘源及凿岩机破岩产尘源进行解算。

根据实际情况,复喷作业可能会单独进行或与 端头处凿岩机破岩作业同时进行。因为复喷与凿岩 机破岩同时作业时粉尘弥散情况比复喷作业单独进 行时要复杂,故重点研究复喷与凿岩机破岩同时作 业产尘的弥散规律。根据实际施工情况,将复喷产 尘点设置在距端头 28.5 m 压风侧与抽风侧各一处, 模拟时同时设置喷浆点和凿岩机破岩点为产尘源, 可得复喷与凿岩机破岩同时作业时产尘在掘进巷道 内的弥散情况,如图 7~10 所示。



图 7 距底板不同高度截面内压风侧复喷、凿岩机 破岩产尘质量浓度分布云图



破岩产尘质量浓度分布云图

由图 7 可知,首先,由于粉尘颗粒受重力而沉降 或附着于壁面,粉尘质量浓度沿 z 轴正方向逐渐降 低;之后由于复喷作业产生粉尘,导致粉尘质量浓度 增大至 132.7 mg/m³;之后逐渐降低至 44.2 mg/m³ 以下。

由图 8 可知,从端头开始至 z=25 m 截面,虽然 粉尘质量浓度逐渐降低,但整个巷道断面均有粉尘 分布;从 z=25 m 截面至 z=28.5 m 截面,高浓度粉尘 团主要分布在巷道顶板及喷浆点附近,且喷浆点处粉 尘质量浓度可达 88.4 mg/m³ 以上;从 z=28.5 m 截面 起直至 z=33 m 截面,粉尘质量浓度增大,粉尘颗粒 再次扩散至整个巷道断面,且 z=33 m 截面内粉尘质 量浓度最高处位于巷道顶板;而后粉尘质量浓度逐 渐降低,至 z=40 m 截面处,除顶板位置有少量粉尘 外,其他区域粉尘质量浓度已基本为0;至巷道出口 处,粉尘质量浓度已降为0。故建议在同时进行压风 侧复喷作业与凿岩机破岩作业时,其他作业工人位 于距端头 40 m 或更远处为最佳。

由图9可知,首先,由于粉尘颗粒受重力作用而

沉降或附着于壁面,粉尘质量浓度沿 z 轴正方向逐 渐降低;之后由于复喷作业产生粉尘,使得巷道内粉 尘质量浓度上升至 133.4 mg/m³;随后逐渐降低至 44.4 mg/m³以下。

由图 10 可知,从端头开始至 z=25 m 截面,粉尘 质量浓度逐渐降低,但是粉尘在整个巷道断面均有 分布;从 z=25 m 截面至 z=38.5 m 截面,粉尘逐渐 向整个巷道断面扩散,其中喷浆点处粉尘质量浓度 达到 88.9 mg/m³;随后粉尘质量浓度逐渐降低,至 z=43 m 截面处,除顶板位置有少量粉尘团外,其他 区域粉尘质量浓度已基本为0;直至巷道出口处,粉 尘质量浓度已降为0。故建议在同时进行凿岩机破 岩作业与抽风侧复喷作业时,其他作业工人位于距 端头 43 m 或更远处为最佳。

综上所述,凿岩机破岩的同时进行压风侧或抽 风侧复喷作业产生的粉尘在巷道内的弥散情况大致 相同,无明显差异。

4 结论与建议

1)通过对长压短抽式通风掘进巷道内初喷产尘 进行数值模拟计算,得出在压风侧进行初喷作业时 粉尘质量浓度高于在抽风侧进行初喷作业时粉尘质 量浓度,且这一规律在巷道端头处尤为明显。建议: 在压风侧进行初喷作业时,其他作业工人位于距端 头 30 m 甚至更远处为最佳;在抽风侧进行初喷作业 时,其他作业工人位于距端头 5 m 或更近处为最佳; 缩短在压风侧初喷作业的时间。

2)通过对长压短抽式通风掘进巷道内凿岩机破 岩与复喷同时作业产尘进行数值模拟计算,得出 2种作业情况下粉尘质量浓度变化规律大致相同, 均为沿 z轴正方向先降低,后因喷浆产尘而增大,然 后再次降低。建议:在凿岩机破岩与压风侧复喷同 时作业时,其他作业工人位于距端头40 m 或更远处 为最佳;在凿岩机破岩与抽风侧复喷同时作业时,其 他作业工人位于距端头43 m 或更远处为最佳。

参考文献:

[1] JIANG Z A, CHEN J S, WEI N, et al. Numerical simulation of dust concentration distribution regularity in a belt conveyer roadway [J]. Journal of University of Science & Technology Beijing, 2012, 34(9):977-981.

- [2] 谢中强. 锚喷支护巷道喷浆作业粉尘分布规律的数值模 拟[J]. 煤矿开采,2012,17(3):96-99.
- [3] 任广信,贾国平,杨晋,等. 湿喷工艺在大巷掘进初期的 研究与应用[J].煤炭与化工,2013,36(9):23-24.
- [4] 耿凡,周福宝,罗刚.煤矿综掘工作面粉尘防治研究现状 及方法进展[J].矿业安全与环保,2014,41(5):85-89.
- [5] 聂文,张琦,白若男,等.巷道湿喷作业风流—粉尘运移规律的数值模拟[J].安全与环境学报,2015,15(5): 73-77.
- [6] 周刚,张琦,程卫民,等.煤矿锚喷作业区喷浆粉尘数值 模拟与新型湿喷一体机研制[J].中南大学学报(自然 科学版),2016(2):606-614.
- [7] 于欣,陈连军,刘国明.喷浆作业粉尘分布影响因素的数 值模拟[J].矿业研究与开发,2017,37(2):97-101.
- [8] LIU Q , NIE W , HUA Y , et al. The effects of the installation position of a multi-radial swirling air-curtain generator on dust diffusion and pollution rules in a fullymechanized excavation face: A case study [J]. Powder Technology, 2018, 329:371–385.
- [9] CAO W, GAO W, PENG Y, et al. Experimental and numerical study on flame propagation behaviors in coal dust explosions[J]. Powder Technology, 2014, 266:456-462.
- [10] YANG L,XUE L,LI G, et al. Numerical prediction effects of particle-particle collisions on gas-particle flows in swirl chamber [J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(3):1748-1754.
- [11] NAZIF H R, TABRIZIH B. Development of boundary transfer method in simulation of gas-solid turbulent flow of a riser [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(4):2445-2459.
- [12] 杜扬柱.湿喷工艺在新安煤矿的应用技术实践[J].煤 矿现代化,2014(4):21-23.
- [13] WANG H, CHENG W, SUN B, et al. Effects of radial air flow quantity and location of an air curtain generator on dust pollution control at fully mechanized working face[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28 (7): 1780-1791.
- [14] 聂文,马骁,程卫民,等.通风条件影响长压短抽掘进面 粉尘扩散的仿真实验[J].中南大学学报(自然科学 版),2015(9):3346-3353.
- [15] 蒋仲安,闫鹏,陈举师,等. 岩巷掘进巷道长压短抽通风 系统参数优化[J]. 煤炭科学技术,2015,43(1):54-58.

(责任编辑:李 琴)