

文章编号:0253-9993(2013)S1-0147-06

采场爆破烟尘浓度分布及扩散规律的数值模拟

陈举师,王毅,蒋仲安,

(北京科技大学 教育部金属矿山高效开采与安全重点实验室,北京 100083)

摘要:针对采场爆破作业过程中烟尘浓度高且不易排出的特点,采用现场实测的方法对烟尘浓度进行实际测定,并依据气固两相流理论,运用计算流体力学的 Fluent 软件对采场爆破烟尘浓度分布及扩散进行数值模拟,通过对比分析,模拟结果与实测数据基本保持一致,极好地验证并完善了现场研究理论。通过研究发现:采场进路内有风流漩涡存在,在断面方向,烟尘浓度以断面中心为圆心径向逐步降低;在轴线方向,烟尘浓度随距工作面距离的增加逐步降低;随着时间的推移,烟尘浓度先迅速上升至最大值,后缓慢降低;联络巷风速为 2 m/s 时采场内烟尘排出效果达到最佳;此外,还可通过安装局部通风设施加强烟尘的排出效果。

关键词:爆破烟尘;浓度分布;扩散规律;数值模拟;气固两相流

中图分类号:TD714 **文献标志码:**A

Numerical simulation of blasting dust concentration distribution and diffusion regularities in stope

CHEN Ju-shi, WANG Yi, JIANG Zhong-an

(The Key Laboratory of Ministry of Education for High Efficiency Exploitation and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the dust characteristics of high concentration and difficult to discharge during the process of stope blasting operation, authors introduced the method of field measurement of dust concentration for actual determination. Based on gas-solid two-phase flow theory, authors carried out the numerical simulation of stope blasting dust concentration distribution and diffusion by computational fluid dynamics software Fluent. The measured data agreed well with the simulation results, validated and refined the theory of field studies. The study found there exist romantic whirlpool in the stope approach roads; in the section direction, the dust concentration is gradually radially reduced in the cross-section center as center of the circle; in the axial direction, the smoke concentration is gradually reduced with the distance increment from the working face; the dust concentration rised to maximum in the first place rapidly, and then decreased slowly over time; stope dust discharge effect achieved best with wind speed is 2 m/s in contact lane. In addition, the smoke discharged effect can also be strengthened by the installation of local ventilation facility.

Key words: blasting dust; concentration distribution; diffusion regularities; numerical simulation; gas-solid two-phase flow

爆破作业是金属矿山井下开采过程中不可缺少的工艺环节,当采场内炸药爆炸并对矿岩造成破碎瞬间,会产生大量的烟尘^[1]。爆破烟尘主要包括粉尘和有毒有害气体,具有浓度高且不易排出的特点。爆

破粉尘的来源可分为爆破准备阶段产生的粉尘、施爆阶段产生的粉尘,以及爆破后装运作业所产生的粉尘。爆破产生的有毒有害气体主要包括 CO, NO_x 等。井下开采爆破与露天相比,短时间内产生的粉尘及

收稿日期:2012-04-06 责任编辑:许书阁

作者简介:陈举师(1987—),男,贵州毕节人,博士研究生。E-mail:chenjushi@163.com。通讯作者:蒋仲安(1963—),男,浙江诸暨人,教授,博士生导师。E-mail:jza1963@263.net

CO, NO_x 等有毒有害物质局限在有限空间内, 爆破瞬间粉尘浓度可达数千毫克每立方米, CO 浓度达到数千毫克每立方米^[2-3]。高浓度粉尘对现场作业人员身体健康和安全生产带来了极大的威胁, 严重的可导致尘肺病; 此外, CO 和 NO_x 是毒性很强的气体, 进入呼吸道后, 能损坏呼吸器官粘膜, 使肺部抵抗力降低, 严重的会造成因炮烟中毒而死亡的事故^[4-7]。因此, 研究采场爆破作业时烟尘的扩散规律, 掌握烟尘浓度分布及变化的特点, 对于获取通风除尘设计的合理参数, 探索降低采场爆破烟尘污染的控制技术等具有十分重要的指导意义。

1 数学模型及控制方程

1.1 数学模型

研究采场爆破烟尘浓度分布及其扩散规律, 本质上属于气固两相流的研究范畴。目前关于气固两相流理论主要存在以下 3 种观点:

(1) 欧拉法。将颗粒看作拟流体, 假设其在空间内有连续的速度、温度分布及等价的输运特性, 将颗粒相与流体相都在 Euler 坐标系下进行求解。

(2) 拉格朗日法。把流体作为拟颗粒, 从单颗粒尺度上描述流体微团的运动特征, 将流体相和颗粒相都在 Lagrange 坐标系下处理。

(3) 欧拉-拉格朗日法。把流体看作连续介质, 在 Euler 坐标系下考察流体相的运动, 而将颗粒作为离散体系, 在 Lagrange 坐标系下研究颗粒相的运动轨迹。目前应用较多的离散相模型(DPM)本质上属于欧拉-拉格朗日法。

采场爆破烟尘的数值模拟流体除了固相的粉尘颗粒外, 气相还包括了大气及有毒有害气体, 将流动视为不可压缩流, 除了需要开启离散相模型外, 还需启用无化学反应的组分输运模型。由于需要同时考察粉尘及有毒有害气体浓度分布随时间在空间的变化规律, 本模型启用非稳态进行求解。此外, 爆破后烟尘温度较高, 与巷道空气存在热交换, 对气体扩散有略微影响, 因此还需启用能量方程, 但在此过程中气温的略微升高并不会改变气体的浓度。

1.2 控制方程

采场爆破烟尘浓度分布及扩散模型选用三维不可压缩非稳态 Navier-Stokes 方程作为控制方程, 采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型建立封闭控制方程组, 模型内考虑组分对流扩散及传热导, 得到方程组如下:

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = S_h + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right) \quad (3)$$

组分输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla J_i + R_i + S_i \quad (4)$$

标准 $k-\varepsilon$ 两方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} C_{1\varepsilon} G_k - \frac{\varepsilon^2}{k} C_{2\varepsilon} \rho + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中, $S_m, \tau_{ij}, F_i, k_{\text{eff}}, h_j, J_j, S_h, Y_i, R_i, S_i, G_k, k, \varepsilon, S_k, S_\varepsilon, \mu, \mu_t, \rho, g_i, \rho$ 分别为质量源项、应力张量、动量源项、有效热传导系数、组分 j ' 的生成焓、组分 j ' 的扩散通量、体积热源项、组分 i 的质量分数、净产生速率、额外产生速率、层流速度梯度产生的湍动能、湍动能 (m^2/s^2)、湍动能耗散率 (m^2/s^3)、湍动能源项、湍动能耗散率源项、层流黏性系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、湍流黏性系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、静压 (Pa)、 i 方向重力加速度 (m/s^2) 和气体密度 (kg/m^3); x_i, x_j 为 x, y, z 方向上的坐标, m ; u_i, u_j 为流体在 x, y, z 方向上的速度, m/s ; $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu, \sigma_\varepsilon, \sigma_k$ 为常数, 分别取 1.44, 1.92, 0.09, 1.3, 1.0。

粉尘运动轨迹运用拉格朗日法进行求解。通过积分拉格朗日坐标下颗粒作用力的微分方程来求解颗粒的轨道, 在求解过程中, 只考虑阻力和重力, 其他作用力由于数量级很小忽略不计, 则颗粒相的作用力平衡方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (7)$$

其中, $F_D(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量阻力, F_D 可根据如下公式计算:

$$F_D = 0.75 \frac{C_D \rho |u_p - u|}{\rho_p d_p} \quad (8)$$

式中, $C_D, u, u_p, \rho, \rho_p, d_p$ 分别是阻力系数、流体相速度 (m/s)、颗粒运动速度 (m/s)、流体密度 (kg/m^3)、颗粒密度 (kg/m^3) 和颗粒直径 (m)。

2 几何模型的建立及参数设定

2.1 工程概况

西石门铁矿南二采区 60 m 分层 14 号采场位于南二斜坡道附近,采用平底堑沟底部结构留矿采矿法进行回采。采场进路断面为三心拱,宽 3.6 m,高 3.2 m,进路内中孔爆破位置处风速小于 0.25 m/s。联络巷断面为三心拱,宽 3.5 m,高 3.2 m,断面风速为 0.5 m/s,湿度 68.3%,温度 21.2 ℃。施工部位围岩主要为闪长岩,围岩硬度较大, $f=10 \sim 12$,岩体整体性好,局部为矽卡岩。矿块底部集矿堑沟选用 Simba1354 型液压凿岩台车凿上向扇形中深孔,炮孔直径 76 mm,炮孔排距 1.5 ~ 2.0 m,孔底距 3 ~ 4 m。每次爆破 1 ~ 2 排炮孔,回采炸药单耗 0.45 kg/t,采用斗容 6 m³TORO1400 型柴油铲运机出矿。

2.2 几何模型的建立

根据 14 号采场现场实际情况,建立采场爆破烟尘浓度分布及扩散几何模型。建模过程中,由于现场情况较为复杂,不能完全遵照现场布置情况一一构建,需对模型计算区间作出一定的简化及假设,具体如下:

(1) 联络巷与采场进路严格垂直相交,且采场进路及联络巷断面皆视为标准三心拱;

(2) 电缆电线、水管及压风管等设备由于尺寸较小,模型中忽略不计;局部通风设施(局扇及风筒)是采场通风除尘设计的重要因素,在模型内完整体现;

(3) 采场爆破粉尘全部产生于施爆瞬间,准备及装运阶段粉尘数量较少忽略不计;有毒有害气体中只考虑 CO 的扩散,NO_x 及其余组分因与 CO 相比数量级较小而不予考虑;

(4) 模型中启用能量交换,但对于气相浓度随温度的细小变化过程不做细究。

基于上述简化及假设,模型计算域内建立尺寸为 10 m × 3.6 m × 3.2 m 的三心拱进路与尺寸为 16 m × 3.5 m × 3.2 m 的三心拱联络巷垂直相交,风筒直径为 600 mm,进路末端与尺寸为 3.0 m × 3.6 m × 3.2 m 的三心拱区域连接,该区域表示爆破发生后塌落矿岩所处空间,用多孔介质对其近似处理,最后采用 GAMBIT 2.0 建立采场三维几何模型,并对其进行网格划分,如图 1 所示。

2.3 参数设定及求解

根据 14 号采场的具体情况及相关实测数据,结合数学模型和 Fluent 的数值模拟方法,并对区域网格进行自适应等调试,最终求解出采场爆破烟尘浓度分布及扩散规律。数值模拟参数设定见表 1^[8-15]。

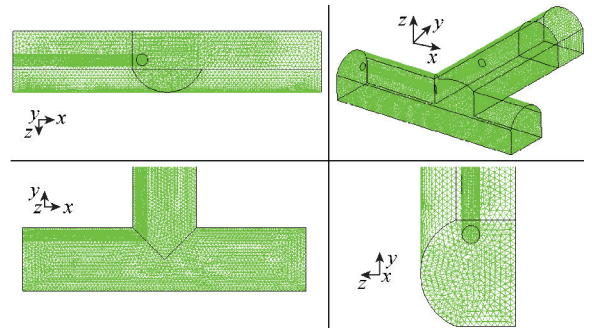


图 1 采场三维几何模型

Fig. 1 3D geometric model of stope

表 1 计算模型参数

Table 1 Defining the calculation model parameters

边界条件	参数设定
求解器	分离求解器
湍流模型	$k-\epsilon$ 双方程模型
能量	打开
时间	非稳态
入口边界类型	速度入口
入口速度	0.5 m/s
水力直径	3.4 m
湍流强度	3.73%
出口边界类型	自由出流
组分输运模型	CO-空气
孔隙率	0.375
黏性阻力系数	1 000 m ⁻²
源项	0.013 6 kg/(m ³ · s)
离散相模型	打开
计算频率	10
阻力特征	球形颗粒
喷射源类型	面喷射
材质	铁矿石
密度	3 800 kg/m ³
粒径分布	R-R 分布
分布指数	2.42
质量流率	0.122 kg/s
湍流扩散模型	随机轨道模型
离散相边界	捕捉
剪切边界	无滑移

3 数值计算分析

3.1 流场分布

为了考察采场内部空间风流流场分布情况,分别在 x, y, z 方向上各截取至少一个平面并垂直相交,得出采场风流流场分布情况。图 2 表示联络巷风速为 0.5 m/s 时采场空间内速度场分布。

从图 2 中可以看出:

(1) 联络巷内风流与进路相比较为稳定,进路内

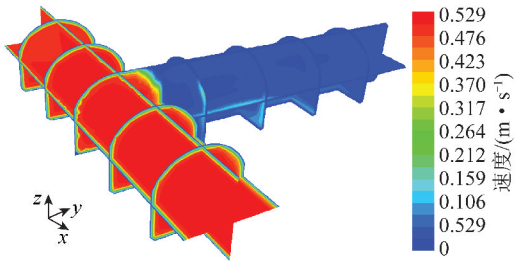


图2 采场空间风流速度场分布

Fig. 2 Spatial distribution of wind velocity field in stope

形成一个逆时针旋转的风流漩涡,且右侧风速明显高于左侧;

(2) 进路隅角处通风效果较差,左侧隅角由于漩涡流的存在通风比较困难,基本形成了一个无风区域;

(3) 在巷道断面方向,由于巷道壁面摩擦阻力的存在,壁面附近风速略低于巷道中心。

3.2 采场爆破烟尘浓度分布及扩散规律

为了研究爆破后采场内不同位置处粉尘及 CO 随时间的变化情况,在进路及联络巷中央呼吸带高度布置监测点,监测距工作面 1, 4, 7, 10 及 15 m 处烟尘浓度变化规律。图 3 为采场内距工作面不同距离处巷道中央呼吸带高度粉尘及 CO 浓度随时间的变化规律。

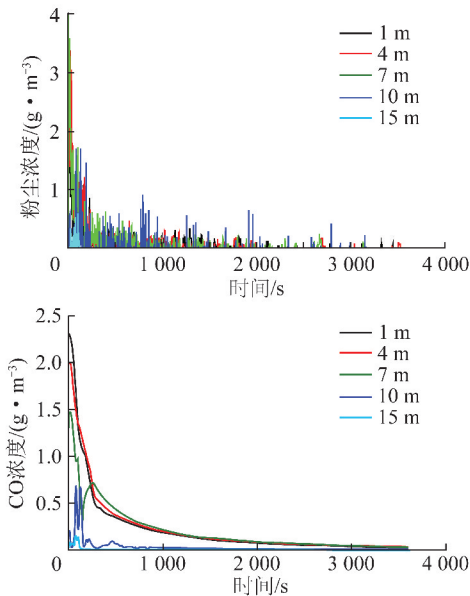


图3 采场不同位置粉尘和 CO 浓度变化

Fig. 3 Dust and CO concentration changing regularities in different position of stope

从图 3 中可以看出:

(1) 采场爆破瞬间,在爆破冲击波作用下,烟尘从工作面高速喷入采场内,并在初速度的作用下迅速向采场外扩散;在爆破完成后,积聚在工作面附近的

烟尘在漩涡流动的作用下,逐渐被带出采场外;

(2) 在进路断面方向,烟尘浓度以断面几何中心为圆心径向逐步降低;在轴线方向,烟尘浓度随距工作面距离的增加逐步降低;受距离工作面较近的漩涡流的影响,进路内左侧隅角处烟尘浓度较高;

(3) 随着时间的推移,采场空间内烟尘浓度先迅速上升到最大值,再逐渐缓慢降低;在进路轴线方向,距离工作面越近,烟尘浓度最大值越大,且达到最大值所需时间越短;在回风侧联络巷内,烟尘浓度较之进路内要小得多,这是由于联络巷内风流比较顺畅所致;

(4) 采场内粉尘及 CO 分别在 1 800 s 及 3 600 s 内能基本全部排出,在距工作面 1, 4, 7, 10 及 15 m 处,当 $T=1\ 800\text{ s}$ 时,粉尘浓度保持在 200, 180, 150, 100 及 10 mg/m^3 以内;当 $T=3\ 600\text{ s}$ 时,CO 浓度保持在 125, 115, 100, 90 及 20 mg/m^3 以内;由于 $d=15\text{ m}$ 监测点处于联络巷内,其烟尘浓度较其余位置要小得多。

3.3 不同风速条件下烟尘浓度变化规律

为了进一步优化通风除尘设计各项参数,寻求更为合理的烟尘排出风速,保持其他参数不变,分别取联络巷入口风速为 0.5, 1, 2 及 4 m/s 对采场爆破后烟尘浓度分布规律进行数值求解,并分别在联络巷回风侧巷道中央呼吸带高度 ($d=15\text{ m}$) 处布置一监测点,对烟尘浓度进行监测。图 4 为不同风速条件下粉尘及 CO 浓度随时间变化规律。

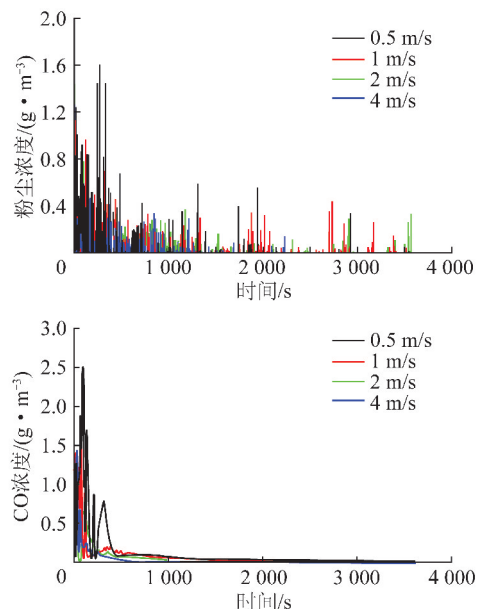


图4 不同风速条件下粉尘和 CO 浓度变化

Fig. 4 Dust and CO concentration changing regularities under different wind velocity conditions

从图 4 中可以看出:

(1)不同风速条件下烟尘浓度随时间变化规律基本保持一致,均为在爆破发生后迅速上升至最大值,然后随时间推移缓慢降低;

(2)当风速为0.5~4 m/s时,联络巷入口风速越大,在进路内形成的漩涡流动作用越强,烟尘整体浓度越低,排出时间越短;风速处于2~4 m/s区间时烟尘浓度降低速率较之0.5~2 m/s区间要小;

(3)当风速为0.5,1,2及4 m/s时,监测点粉尘排出时间分别1 800,1 500,900及500 s,且浓度保持在10,8,6,5 mg/m³以内;CO排出时间分别3 600,2 800,2 100及1 800 s,且浓度保持在20,14,9,6 mg/m³以内;

(4)较大的风速有利于爆破烟尘的稀释及排出,但同时也容易造成已沉降粉尘的二次污染以及积聚CO在进路内长时间做漩涡流动而滞留,综合考虑烟尘浓度与排出时间,可取联络巷入口风速为2 m/s进行通风除尘设计。

3.4 局部通风条件下烟尘浓度变化规律

爆破烟尘的高浓度及排除缓慢等特点,会对正常生产的恢复造成一定影响,为加快采场爆破后烟尘排出速度,可在采场内安装局部通风设施,将新鲜风流引至工作面附近。图5为压入式通风条件下粉尘及CO浓度随时间变化规律。

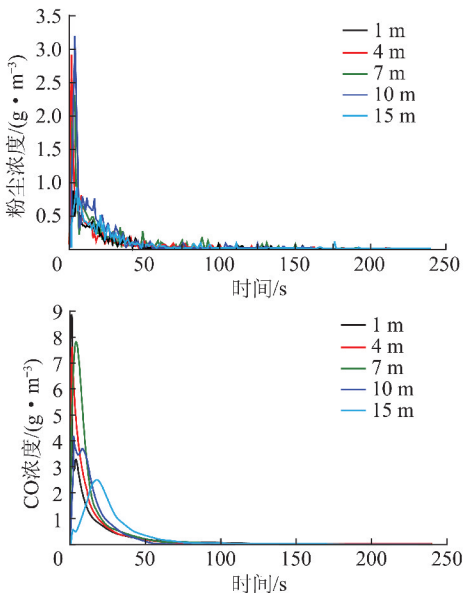


图5 压入式通风条件下粉尘和CO浓度变化

Fig.5 Dust and CO concentration changing regularities under forced ventilation condition

从图5中可以看出:

(1)采场内烟尘浓度分布规律与未安装局部通风设施时相似,其数值较未安装时有一定程度的升高,但烟尘排出时间大幅度缩减;

(2)采场内粉尘在150 s内基本能全部排出,且保持在5 mg/m³以内;CO在240 s内能基本全部排出;且保持在4 mg/m³以内;

(3)在进路轴线方向,不同位置处烟尘浓度在10 s内即上升至最大值,且其时间间隔极短;在联络巷回风侧,烟尘浓度在25 s后达到最大值。

3.5 模拟结果验证分析

根据GBZ 159-2004《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》以及相关文献中的采样点布置方法,在14号采场联络巷回风侧($d=15\text{ m}$)布置测点,采用LD-5C型微电脑激光粉尘仪对采场爆破后粉尘浓度进行监测,采用四合一气体检测仪对爆破发生30 min后CO浓度进行测量,结合模拟计算结果,得出粉尘及CO浓度的实测数据与模拟结果对比如图6所示。从图6可以看出,粉尘及CO的模拟结果与实测数据基本吻合,浓度分布及其变化规律基本保持一致。但相比较之下两者数值还是有所偏差,这是由于在现场实测、模型建立及参数设置过程中均会存在一定误差所造成的。通过对比分析,说明数学模型及物理模型的选择是准确的,采用离散相模型及组分输运模型对采场爆破烟尘扩散过程进行模拟具有可行性,模拟结果可信。

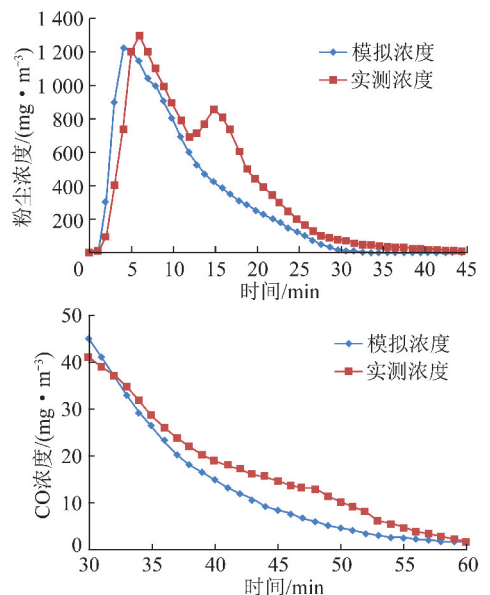


图6 粉尘和CO实测浓度与模拟浓度对比

Fig.6 Comparison of dust and CO concentration between field measurement and simulated model

4 结 论

(1)采场爆破瞬间,在爆破冲击波作用下,烟尘迅速向采场外扩散;在爆破发生后,采场内有漩涡流存在,积聚在工作面附近的烟尘在漩涡流动的作用

下,逐渐被带出采场外;

(2)在进路断面方向,烟尘浓度以断面几何中心为圆心径向逐步降低;在轴线方向,烟尘浓度随着距工作面距离的增加逐步降低;随着时间的推移,采场内烟尘浓度先迅速上升到最大值,再逐渐缓慢降低;

(3)联络巷入口风速越大,烟尘排出速度越快;但风速过大容易造成已沉降粉尘的二次污染,还会导致积聚在进路内的CO长时间做漩涡流动而滞留。综合考虑,可取联络巷入口风速为2 m/s进行通风除尘设计。

(4)安装局部通风设施后,采场空间烟尘浓度较未安装时有一定程度升高,但排出时间大幅度缩减。在工作面条件允许的情况下,可通过安装局部通风设施以加快爆破烟尘的排出。

参考文献:

- [1] 陈赞成,杨鹏,吕文生,等.高寒矿井穿脉巷道掘进炮烟扩散规律的数值模拟[J].北京科技大学学报,2011,33(5):521-525.
Chen Zancheng, Yang Peng, Lü Wensheng, et al. Numerical simulation on the diffusion law of blasting fume during roadway tunneling across a vein in an alpine mine[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(5): 521-525.
- [2] 孙佳.露天采矿爆破烟尘行为模拟及其环境效应评价系统的研究[D].北京:北京科技大学,2006.
Sun Jia. Simulation and research of soot behavior generated by blasting and its environmental effect appraisal system[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2006.
- [3] 蒋仲安,王伟.降低爆破烟尘的降尘剂配方的实验研究[J].煤炭学报,2011,36(10):1720-1724.
Jiang Zhong'an, Wang Wei. Research on optimal formula of dustfall agent to remove blasting smoke[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1720-1724.
- [4] 蒋仲安,万善福,孙佳.基于粒子系统的爆破烟尘运动的模拟研究[J].北京科技大学学报,2007,29(S2):25-29.
Jiang Zhong'an, Wan Shanfu, Sun Jia. Simulated study of the blasting smog-dust movement on account of particle system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(S2): 25-29.
- [5] 刘峰.回采爆破烟尘行为模拟及通风净化优化[D].武汉:武汉科技大学,2008.
Liu Feng. The mining blasting soot behavior simulation and optimizing of ventilation purification[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2008.
- [6] 张秀华.回采爆破空间有害物质扩散规律模拟与分析[D].长沙:中南大学,2010.
Zhang Xiuhua. Simulation and analysis of diffusion rule of smoke inside mining blasting space[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [7] 孙佳,蒋仲安,倪文.爆破烟尘行为的实时模拟[J].爆破,2006,23(1):1-6.
Sun Jia, Jiang Zhong'an, Ni Wen. Real-time simulation of soot behavior generated by blasting[J]. Blasting, 2006, 23(1): 1-6.
- [8] 杨胜来.综采工作面粉尘运移和粉尘浓度三维分布的数值模拟研究[J].中国安全科学学报,2001,11(4):61-64.
Yang Shenglai. Numerical simulation of 3-dimensional dust distribution on long wall coal faces[J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(4): 61-64.
- [9] 王辉,蒋仲安,杜翠凤,等.综掘巷道粉尘体积分数分布的现场实测与数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(3):345-348.
Wang Hui, Jiang Zhong'an, Du Cuifeng, et al. Field study and numerical research on dust concentration distribution in the excavation tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(3): 345-348.
- [10] 牛伟,蒋仲安,王晓珍,等.综放工作面粉尘浓度分布规律的数值模拟[J].中国矿业,2008,17(12):77-80.
Niu Wei, Jiang Zhong'an, Wang Xiaozhen, et al. Numerical simulation of distribution regularities of dust concentration in fully mechanized top-coal caving face[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(12): 77-80.
- [11] Niu W, Jiang Z A, Tian D M. Numerical simulation of the factors influencing dust in drilling tunnels; its application[J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(1): 11-15.
- [12] 刘毅,蒋仲安,蔡卫,等.综采工作面粉尘运动规律的数值模拟[J].北京科技大学学报,2007,29(4):351-353.
Liu Yi, Jiang Zhong'an, Cai Wei, et al. Numerical simulation of the dust movement rule in fully-mechanized coal faces[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(4): 351-353.
- [13] 王晓珍,蒋仲安,王善文,等.煤巷掘进过程中粉尘浓度分布的数值模拟[J].煤炭学报,2007,32(4):386-390.
Wang Xiaozhen, Jiang Zhong'an, Wang Shanwen, et al. Numerical simulation of distribution regularities of dust concentration during the ventilation process of coal roadway driving[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 386-390.
- [14] 牛伟,蒋仲安,刘毅.综采工作面粉尘运动规律数值模拟及应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(3):357-360.
Niu Wei, Jiang Zhong'an, Liu Yi. Numerical simulation on dust movement regularities at fully-mechanized coal faces and its utilization[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2010, 29(3): 357-360.
- [15] 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,2010,32(8):957-962.
Du Cuifeng, Wang Hui, Jiang Zhong'an, et al. Numerical simulations of dust distribution in a fully mechanized excavation face with far-pressing-near-absorption ventilation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(8): 957-962.