

李成武 杨 威 韦善阳 等. 煤与瓦斯突出后灾害气体影响范围试验研究[J]. 煤炭学报 2014, 39(3): 478-485. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0441

Li Chengwu, Yang Wei, Wei Shanyang, et al. Experimental research of influence scope of disaster gas after coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(3): 478-485. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0441

# 煤与瓦斯突出后灾害气体影响范围试验研究

李成武<sup>1</sup> 杨 威<sup>1</sup> 韦善阳<sup>1,2</sup> 李 腾<sup>1</sup> 迟雷雷<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 华北科技学院 安全工程学院, 北京 101601)

**摘 要:** 为确定煤与瓦斯突出事故发生后处于爆炸极限内的瓦斯分布区域, 避免在此区域布置机电设备, 降低突出后发生瓦斯爆炸的危险性, 根据矿井的实际参数, 设计相似模拟试验, 建立在巷道风流作用下的突出气体运移扩散模型, 并结合实际煤与瓦斯突出强度和通风条件, 分析了突出后高浓度瓦斯的时空分布规律。研究结果表明: 各测点监测的气体量与监测距离呈负指数关系, 紊流扩散系数与实测值基本一致, 灾害气体到达各测点的初至时间和监测距离均呈现良好的线性关系; 风量为  $648 \text{ m}^3/\text{min}$ , 断面面积为  $9 \text{ m}^2$  条件下, 突出  $10\,000 \text{ m}^3$  瓦斯后, 距离突出源  $563 \text{ m}$  以内的巷道区域为瓦斯爆炸危险区域,  $0 \sim 290 \text{ s}$  内发生瓦斯爆炸危险性最大, 而在距离突出源  $563 \text{ m}$  以外的区域布置机电设备, 巷道发生瓦斯爆炸的危险性较小。

**关键词:** 煤与瓦斯突出; 运移扩散; 时空分布

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)03-0478-08

## Experimental research of influence scope of disaster gas after coal and gas outburst

LI Cheng-wu<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, WEI Shan-yang<sup>1,2</sup>, LI Teng<sup>1</sup>, CHI Lei-lei<sup>1</sup>

(1. Faculty of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Safety Engineering College, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

**Abstract:** To determine distribution area of gas which lies in explosion limits and avoid electromechanical equipment's arranging in the area can reduce the risk of gas explosion after coal and gas outburst accident, based on actual parameters of mine, similar simulation test was designed and the model of migration and diffusion of gas along with air flow after outburst was put forward. Combining with the actual strength of coal and gas outburst and atmospheric conditions, space-time distribution of high concentration gas after coal and gas outburst was analyzed. The results show that the gas amount of each monitoring point has a negative exponent relation with monitoring distance. Turbulent diffusion coefficient is identical with the actually measured value. The first break time at which disaster gas reaches each monitoring point has good linear relationship with each monitoring distance. Under the air volume of  $648 \text{ m}^3/\text{min}$  and sectional area of  $9 \text{ m}^2$ , gas explosion more likely occurs in the area within  $563 \text{ m}$  from outburst source and during the time of  $0 \sim 290 \text{ s}$  after  $10\,000 \text{ m}^3$  gas extrudes. The occurrence probability of gas explosion is small when electromechanical equipments arrange beyond  $563 \text{ m}$  from outburst source.

**Key words:** coal and gas outburst; migration and diffusion; space-time distribution

收稿日期: 2013-04-09 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274206)

作者简介: 李成武(1969—), 男, 黑龙江延寿人, 研究员, 博士生导师。E-mail: lcw@cumtb.edu.cn。通讯作者: 杨 威(1986—), 男, 河南信阳人, 博士研究生。E-mail: ywbj2008@126.com

煤与瓦斯突出是一种极其复杂的煤岩动力现象, 其在极短时间内向采掘巷道抛出大量的煤粉, 并涌出大量的瓦斯<sup>[1]</sup>。煤与瓦斯突出机理较多, 但由于煤与瓦斯突出本身的复杂性, 现有理论并不能对其有完全合理的解释。理论的缺陷导致预测方法与防治措施不能完全有效地防止煤与瓦斯突出事故的发生。一旦事故发生, 高浓度瓦斯流经作业地区, 遇到机电设备可能产生爆炸, 因此预测高浓度瓦斯扩散的危险区域分布, 将机电设备布置到高浓度瓦斯扩散危险区域外, 则能够降低瓦斯爆炸发生的可能性。研究突出后高浓度瓦斯扩散区域分布, 可为煤矿机电设备的安全设置提供可靠的技术依据。

关于高浓度气体团瞬间涌入巷道混合气体运移规律, 国内外学者做出了大量研究。文献[2]统计分析 39 次煤与瓦斯突出事故, 认为煤与瓦斯突出后气体浓度呈现先直线上升后指数衰减的变化趋势。文献[3-6]从理论上推导巷道瓦斯运移微分方程组, 建立通用的三维数学模型, 提出通风网路中灾害气体浓度分布的计算方法。文献[7-11]采用数值模拟方法研究了高浓度气体运移规律。文献[12-14]分析高浓度毒气传播过程, 得出适合井下条件的毒气扩散公式, 并对公式中的扩散参数进行了修正。现有的文献主要是研究高浓度气体的扩散规律, 而对巷道各位置灾害气体浓度的动态变化研究较少, 尤其是关于动态扩散区域的时空分布规律研究则更为少见。本文利用煤与瓦斯突出瞬间释放瓦斯过程和炸药爆炸瞬间产生氮氧化物气体过程具有的相似性来设计相似试验系统, 建立在巷道风流作用下的突出气体运移扩散模型, 分析煤与瓦斯突出后高浓度瓦斯的时空分布规律, 得出煤与瓦斯突出后灾害气体的影响范围。

### 1 在巷道风流作用下的突出气体运移扩散模型的建立

煤与瓦斯突出后高浓度瓦斯运移扩散过程中浓度变化应综合考虑随风流移动和分子扩散两部分因素的影响。在流场中任取一微元, 其 3 个边长分别为  $dx$ 、 $dy$  和  $dz$ 。对于一维流动, 仅考虑  $x$  方向, 根据质量守恒定律, 得到一维流动的运移扩散方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(Cu)}{\partial x} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + J \quad (1)$$

式中,  $C$  为瓦斯浓度;  $t$  为监测时间;  $u$  为巷道平均风速;  $x$  为监测点距突出源的位置;  $D_m$  为瓦斯分子扩散系数;  $J$  为由生物、物理、化学等变化而引起的单位时间和单位体积内瓦斯的变化量。

煤与瓦斯突出过程瞬间发生, 突出后高浓度瓦斯

团可认为是瞬时源, 设高浓度瓦斯气体生成量为  $M$ , 在不考虑生物、物理、化学等变化而引起的瓦斯含量变化(即  $J=0$ )的情况下, 由菲克第二定律, 得出瞬时源一维运移扩散下瓦斯浓度分布<sup>[5]</sup>为

$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi D_1 t}} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4D_1 t}\right] \quad (2)$$

式中,  $C(x, t)$  为  $x$  位置处  $t$  时刻的瓦斯浓度;  $M$  为瓦斯气体生成量;  $D_1$  为紊流扩散系数。

紊流扩散系数  $D_1$  主要是反映巷道断面上风速分布不均匀及紊流流动等因素的变化程度, 关于其值的确定, 文献[15]提出了紊流扩散系数  $D_1$  的计算公式为

$$D_1 = 65.47r \sqrt{\alpha u} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为巷道通风摩擦阻力系数;  $r$  为井巷的水力半径, 可按照  $r = S/(c\sqrt{S})$  计算,  $S$  为断面积,  $c$  为断面形状系数, 矩形巷道  $c = 4.05$ <sup>[16-17]</sup>。

突出气体在实际巷道运移扩散过程中, 各地点实际监测到的瓦斯总量并不是保持不变的, 应对式(2)中参数  $M$  加以修正。本文将瓦斯运移扩散区域分为  $n+1$  个微小区域进行分析, 建立瓦斯运移扩散几何模型(图 1)。瞬时源的瓦斯气体量设为  $M_0$ 。当微小区域无限小时, 可将流经该区域内的瓦斯气体量看成一个常数, 设瓦斯流经第  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 个微小区域后, 在第  $i$  区域监测到的气体量为  $M_i$ 。瓦斯运移扩散至第  $i$  区域的初至时间为  $t_{0,i}$ 。

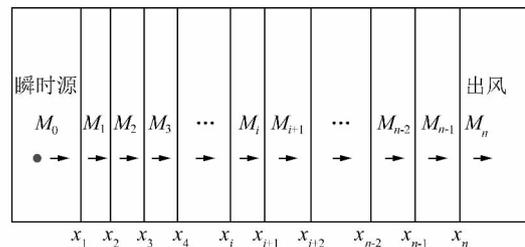


图 1 瓦斯运移扩散区域

Fig. 1 Turbulent diffusion area of gas

根据式(2), 第  $i$  区域的一维运移扩散浓度分布为

$$C(x_i, t) = \frac{M_i}{\sqrt{4\pi D_{1,i}(t-t_{0,i})}} \times \exp\left\{-\frac{[x_{r,i} - u_i(t-t_{0,i})]^2}{4D_{1,i}(t-t_{0,i})}\right\} \quad (4)$$

式中,  $C(x_i, t)$  为第  $i$  区域  $t$  时刻的瓦斯浓度;  $M_i$  为在第  $i$  区域监测到的气体量;  $x_i$  为第  $i$  区域距突出源的距离;  $u_i$  为第  $i$  区域平均风速;  $t_{0,i}$  为瓦斯运移扩散至第  $i$  区域的初至时间, 其值和  $u_i$ 、 $x_i$  及冲击超压有关;  $x_{r,i}$  为第  $i$  区域瓦斯浓度由 0 上升到峰值过程中瓦斯

的运移扩散距离;  $D_{i,j}$  为第  $i$  区域紊流扩散系数,按照式(3)计算。

## 2 在巷道风流作用下的突出气体运移扩散相似试验及数据分析

### 2.1 试验系统

对于同一种物理现象,对应点参数之间的关系应符合精确相似。精确相似包括几何相似、时间相似、速度相似、温度相似、动力学相似和运动学相似等<sup>[18-19]</sup>。本文根据相似理论和研究的需要,着重考虑几何尺寸相似、运动相似、时间相似和动力相似4种相似条件。设定几何相似比  $k_L = 30$ ,运动相似比  $k_V = 1$ ,时间相似比  $k_T = 30$ ,动力相似采用雷诺数准则,由几何相似比和速度相似比导出流量相似比  $k_Q = k_V k_L^2 = 900$ 。

由于仅模拟煤与瓦斯突出后瓦斯运移扩散情况,而不考虑煤粉的运移情况,可选择起爆黑火药瞬间产生气体源代替煤与瓦斯突出气体源。根据相似条件,试验使用的方形管道由16块壁厚为10 mm的亚克力板组合而成,管道内径尺寸为0.1 m×0.1 m,长度为6 m;气体浓度采集芯片和微震系统芯片均为自主设计研发,试验系统如图2所示。

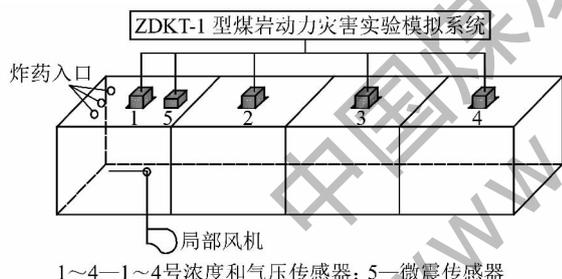


图2 试验系统示意

Fig. 2 Schematic diagram of test system

ZDKT-1型煤岩动力灾害实验模拟系统(图3)集成了微震、浓度和气压采集芯片。主要采集放炮后氮氧化物浓度数据,试验共布置4组气体浓度传感器,分别距爆炸点(瞬时源)0.35、1.55、2.75和3.95 m。黑火药药量分大(0.20 g)、中(0.08 g)、小(0.02 g)3个层次。气体浓度传感器采用City Technology公司生产的4NT CiTiceL传感器,测量范围为0~250×10<sup>-6</sup>,分辨率为0.5×10<sup>-6</sup>。微震传感器为加速度计传感器,其采集频率为2560 Hz。气压传感器采用霍尼韦尔公司的绝压传感器,量程为0~6.895 kPa。传感器布置位置如图4所示。离心风机采用130FLJ5型离心风机。风速测试仪为美国TSI9515风速测量仪。



图3 采集系统

Fig. 3 Acquisition system

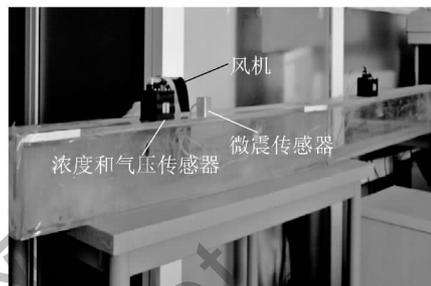


图4 传感器布置

Fig. 4 Location of sensors

### 2.2 试验结果分析

黑火药爆炸后产生的气体除N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>外,还会产生氮氧化物、SO<sub>2</sub>和CO等气体。据测定,大约每1 g黑火药着火燃烧时,可以产生70 L气体,本文采用黑火药爆炸后的氮氧化物气体量近似模拟突出气体量。试验对3种药量分别进行3组风速(0.80、1.00和1.20 m/s)条件供风。采集氮氧化物浓度数据,并进行非线性拟合分析。限于篇幅,本文仅列出药量为0.08 g,风速为1.20 m/s下不同监测距离氮氧化物浓度(C<sub>N</sub>)拟合曲线,如图5所示。

根据试验结果,氮氧化物浓度拟合方程见表1。从图5和表1可以看出,拟合曲线和监测数据吻合度非常高,R<sup>2</sup>在0.956~0.989。对比式(4)和表1,统计学模型各系数的拟合结果,见表2。为了说明拟合公式的实际意义,分别对拟合参数M<sub>i</sub>、μ<sub>i</sub>和D<sub>i,j</sub>加以分析。

#### (1) 参数M<sub>i</sub>的实际意义。

本文计算了x<sub>i</sub>处监测浓度数据包络线下的面积(表2中A<sub>i</sub>)。A<sub>i</sub>代表试验巷道x<sub>i</sub>处监测到的气体量,将其与对应的拟合气体量M<sub>i</sub>对比分析,如图6(a)所示。

从图6(a)可以看出,拟合气体量M<sub>i</sub>和包络线下面积A<sub>i</sub>呈线性关系,R<sup>2</sup>为0.8667,相关度较好,说明M<sub>i</sub>实际上代表的是气体量。随着距离的增大,包络线下的面积减小,说明在运移扩散过程中各地点监

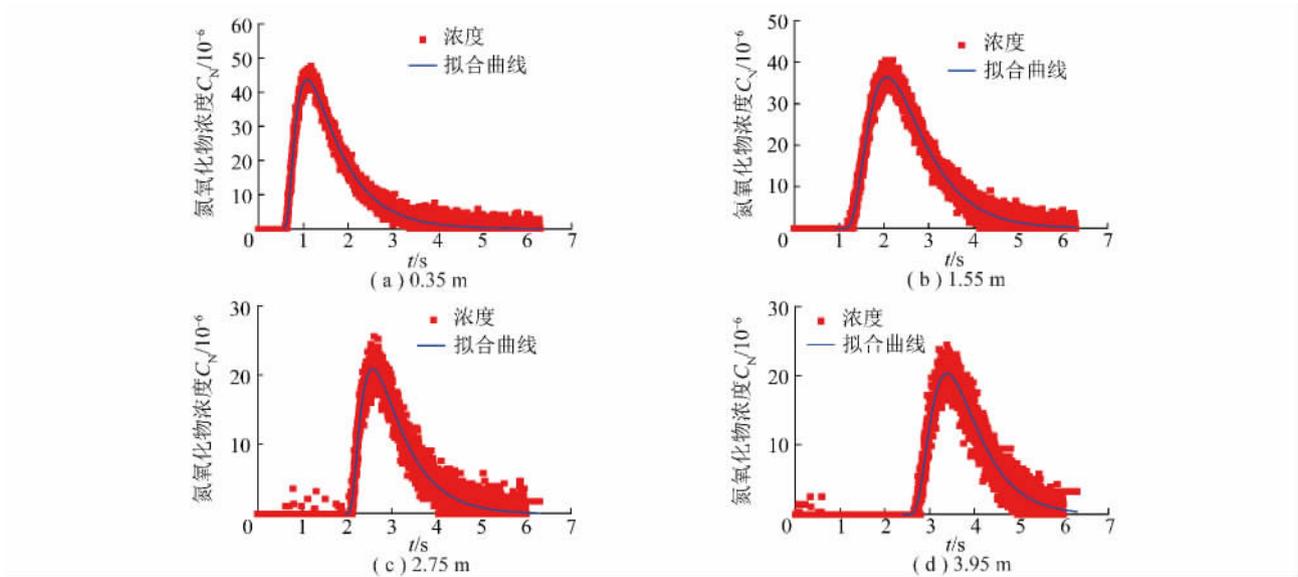


图 5 药量 0.08 g、风速 1.20 m/s 条件下不同监测距离的氮氧化物浓度(  $C_N$  )的变化

Fig. 5 Nitrogen oxide concentration changes of different monitoring points under 0.08 g and 1.20 m/s

表 1 药量为 0.08 g 的氮氧化物浓度拟合方程

Table 1 The fitting equation of nitrogen oxide concentration under 0.08 g

风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	监测距离/m	拟合方程	$R^2$
1.20	0.35	$C_N = \frac{63.36}{\sqrt{4\pi \times 0.141(t - 0.510)}} \exp\left\{-\frac{[0.789 - 1.23(t - 0.510)]^2}{4 \times 0.141(t - 0.510)}\right\}$	0.989
	1.55	$C_N = \frac{70.12}{\sqrt{4\pi \times 0.145(t - 1.562)}} \exp\left\{-\frac{[0.940 - 1.21(t - 1.562)]^2}{4 \times 0.145(t - 1.562)}\right\}$	0.987
	2.75	$C_N = \frac{29.50}{\sqrt{4\pi \times 0.135(t - 1.930)}} \exp\left\{-\frac{[0.950 - 1.19(t - 1.930)]^2}{4 \times 0.135(t - 1.930)}\right\}$	0.967
	3.95	$C_N = \frac{33.45}{\sqrt{4\pi \times 0.143(t - 2.388)}} \exp\left\{-\frac{[1.368 - 1.18(t - 2.388)]^2}{4 \times 0.143(t - 2.388)}\right\}$	0.961
1.00	0.35	$C_N = \frac{44.28}{\sqrt{4\pi \times 0.128(t - 0.523)}} \exp\left\{-\frac{[0.734 - 1.02(t - 0.523)]^2}{4 \times 0.128(t - 0.523)}\right\}$	0.985
	1.55	$C_N = \frac{38.60}{\sqrt{4\pi \times 0.150(t - 1.155)}} \exp\left\{-\frac{[0.948 - 1.03(t - 1.155)]^2}{4 \times 0.150(t - 1.155)}\right\}$	0.976
	2.75	$C_N = \frac{29.39}{\sqrt{4\pi \times 0.126(t - 1.907)}} \exp\left\{-\frac{[0.702 - 0.99(t - 1.907)]^2}{4 \times 0.126(t - 1.907)}\right\}$	0.956
	3.95	$C_N = \frac{33.04}{\sqrt{4\pi \times 0.131(t - 2.332)}} \exp\left\{-\frac{[0.925 - 1.01(t - 2.332)]^2}{4 \times 0.131(t - 2.332)}\right\}$	0.971
0.80	0.35	$C_N = \frac{29.78}{\sqrt{4\pi \times 0.129(t - 0.661)}} \exp\left\{-\frac{[0.592 - 0.83(t - 0.661)]^2}{4 \times 0.129(t - 0.661)}\right\}$	0.978
	1.55	$C_N = \frac{29.77}{\sqrt{4\pi \times 0.129(t - 1.264)}} \exp\left\{-\frac{[0.591 - 0.84(t - 1.264)]^2}{4 \times 0.129(t - 1.264)}\right\}$	0.979
	2.75	$C_N = \frac{27.35}{\sqrt{4\pi \times 0.096(t - 1.702)}} \exp\left\{-\frac{[0.944 - 0.81(t - 1.702)]^2}{4 \times 0.096(t - 1.702)}\right\}$	0.979
	3.95	$C_N = \frac{27.35}{\sqrt{4\pi \times 0.096(t - 2.332)}} \exp\left\{-\frac{[0.944 - 0.79(t - 2.332)]^2}{4 \times 0.096(t - 2.332)}\right\}$	0.976

表 2 试验参数和拟合参数(药量为 0.08 g)  
Table 2 Experimental parameters and fitting parameters

试验参数				拟合参数					
风速 $u_i'$ / (m · s <sup>-1</sup> )	监测距离 $x_i$ / m	$M_i$ / (10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> )	$D_{i,j}$	$t_{0,j}$ / s	$t_{\max,j}$ / s	$x_{r,j}$ / m	$t_{r,j}$ / s	$A_i$ / (10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> )	$u_i$ / (m · s <sup>-1</sup> )
0.80	0.35	29.78	0.129	0.661	1.239	0.592	0.578	37.037	0.83
0.80	1.55	29.77	0.129	1.264	1.804	0.591	0.540	36.997	0.84
0.80	2.75	27.35	0.096	1.702	2.719	0.944	1.017	34.135	0.81
0.80	3.95	27.35	0.096	2.332	3.398	0.944	1.066	34.052	0.79
1.00	0.35	44.28	0.128	0.523	1.082	0.734	0.559	46.293	1.02
1.00	1.55	38.60	0.150	1.155	1.979	0.948	0.824	37.319	1.03
1.00	2.75	29.39	0.126	1.907	2.415	0.702	0.508	31.654	0.99
1.00	3.95	33.04	0.131	2.332	3.067	0.925	0.735	33.142	1.01
1.20	0.35	63.36	0.141	0.510	1.082	0.789	0.572	56.764	1.23
1.20	1.55	70.12	0.145	1.562	2.098	0.940	0.536	60.612	1.21
1.20	2.75	29.50	0.135	1.930	2.543	0.950	0.613	26.450	1.19
1.20	3.95	33.45	0.143	2.388	3.369	1.368	0.981	29.054	1.18

注:  $t_{\max,j}$  为第  $i$  区域浓度达到峰值的时刻;  $t_{r,j}$  为第  $i$  区域浓度曲线上升阶段的持续时间。

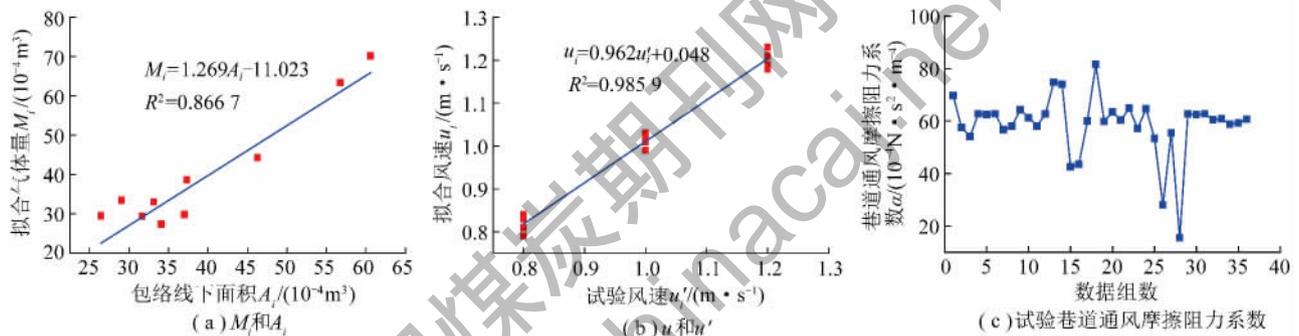


图 6 拟合参数分析

Fig. 6 Analysis of fitting parameters

测的气体量不是固定不变的,而是随监测距离的增大而减小,说明本文提出的气体运移扩散模型是可靠的。

(2) 参数  $u_i$  的实际意义。

试验风速  $u_i'$  和拟合风速  $u_i$  之间的关系如图 6 (b) 所示。可以看出,拟合风速和试验风速基本一致  $R^2$  为 0.985 9, 相关度很好,说明拟合系数  $u_i$  的实际意义代表风速。

(3) 参数  $D_{i,j}$  的实际意义。

实验室巷道模型断面边长为 0.1 m,水力半径  $r$  为 0.025 m。根据 3 种药量下  $D_{i,j}$  和风速  $u_i$  的拟合结果,按照式(3)反算 3 组药量下巷道通风摩擦阻力系数  $\alpha$  (共 36 组数据)如图 6(c) 所示。除去个别异常值,3 组药量下  $\alpha$  基本上在  $60 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$  基准线上下浮动。按照标准<sup>[20]</sup>测定了实验室巷道模型通风摩擦阻力系数试验,测点选在图 2 中 1 号和 4 号传感器位置上。试验巷道通风摩擦阻力系数实测范围大致为  $38 \times 10^{-4} \sim 86 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ,其值和式(3)

推算的通风摩擦阻力系数范围大致相同。说明按照式(3)计算紊流扩散系数是可靠的。

由以上分析可知,根据式(4)对监测数据拟合,参数  $M_i$ 、 $u_i$  和  $D_{i,j}$  均具有很好的实际意义,因此,选用式(4)分析一维运移扩散浓度分布具有合理性。

### 3 煤与瓦斯突出灾变影响范围的确定

本文建立的运移扩散模型和公式推导过程均与气体本身性质无关,且煤与瓦斯突出瞬间释放瓦斯的过程和爆炸瞬间产生氮氧化物气体的过程具有相似性。因此,上文分析的爆炸后氮氧化物运移扩散规律可用于煤与瓦斯突出后高浓度瓦斯团瞬间涌入巷道的运移扩散规律。假定煤与瓦斯突出后瞬间产生  $10\,000 \text{ m}^3$  瓦斯,巷道为断面  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  的方形巷道,长度为  $1\,000 \text{ m}$ ,突出后局部通风机仍持续供风,巷道内平均风速为  $1.20 \text{ m/s}$ ,则巷道风量为  $648 \text{ m}^3/\text{min}$ 。以下对一维运移扩散浓度分布模型中各参数进行确定。

(1) 实际气体量  $M'$  的确定。

根据相似条件, 将实验室测定的 3 种药量下气体量  $M$  转换成模拟实际的气体量  $M'$ ,  $M' = 900M$ 。模拟实际监测距离  $x'$  和实验室测得的监测距离  $x$  的关系:  $x' = 30x$ 。计算后的模拟实际气体量  $M'$  和模拟实际监测距离  $x'$  的关系拟合曲线如图 7 所示。

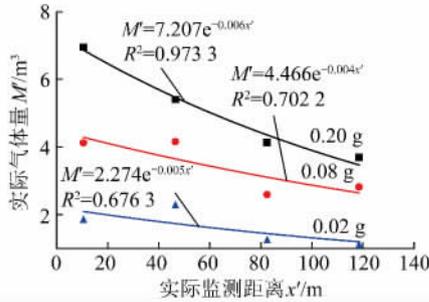


图 7  $M'$  和  $x'$  拟合关系

Fig. 7 Fitting relationship between  $M'$  and  $x'$

3 种药量下气体量  $M'$  与监测距离  $x'$  呈近似负指数变化关系  $R^2$  分别为 0.973 3、0.702 2 和 0.676 3。说明随着药量的增大, 气体量和监测距离的关系越接近指数衰减的变化规律。同时 3 种药量的气体量随监测距离的衰减系数大致相等, 为  $-0.004 \sim -0.006$ , 而  $M'$  幅值差别较大, 其值与瞬时源气体产生量有关。由于实验药量和监测距离有限, 拟合出的衰减系数并不能完全代表井下实际情况, 需根据井下实测数据对其进一步考察和修正。暂取衰减系数为  $-0.005$ , 由假定煤与瓦斯突出后瞬间产生  $10\ 000\ \text{m}^3$  瓦斯, 则  $M' = 10\ 000e^{-0.005x'}$ 。

(2) 实际紊流扩散系数  $D_l$  的确定。

文献 [21] 实测不同支护形式下巷道通风摩擦阻力系数, 掘进工作面巷道为锚喷支护、光面爆破, 凹凸度小于 150 时, 其摩擦阻力系数为  $68 \times 10^{-4} \sim 75 \times 10^{-4}\ \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ , 取平均值为  $70 \times 10^{-4}\ \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ , 水力半径为 0.741 m, 由式 (3) 计算得出  $D_l = 4.500$ 。

(3) 实际初至时间  $t'_0$  的确定。

由于时间相似系数和位移相似系数均为 30, 则实验室条件下初至时间  $t_{0j}$  和监测距离  $x_i$  的拟合关系即为实际情况下的初至时间  $t'_0$  和监测距离  $x'$  的拟合关系。统计分析不同药量和风速下的初至时间  $t_0$  随监测距离  $x$  的变化规律, 可以看出, 两者均呈现良好的线性关系。

图 8 列出实验室条件、风速为 1.20 m/s 下初至时间  $t_{0j}$  和监测距离  $x_i$  的线性拟合关系:  $t_{0j} = 0.478x_i + 0.349$ 。则实际情况下, 风速为 1.20 m/s 下的初至时间  $t'_0$  和监测距离  $x'$  拟合关系为:  $t'_0 = 0.478x' + 0.349$ 。

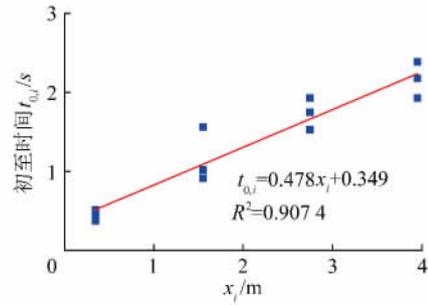


图 8  $t_0$  和  $x$  的拟合关系

Fig. 8 Fitting relationship between  $t_{0j}$  and  $x_i$

(4) 实际上升时间  $t'_r$  的确定。

取 3 种药量下风速为 1.20 m/s 时上升阶段持续时间  $t_{rj}$  的平均值作为上升时间, 经计算为 0.749 s。由于时间的相似比  $K_T = 30$ , 则实际上升时间  $t'_r = 0.749 \times 30 = 22.47\ \text{s}$ , 各区域内瓦斯气体浓度由 0 上升到峰值过程中瓦斯的实际运移扩散距离  $x'_r$  按实际上升时间和实际风速的乘积得出, 本次为  $22.47 \times 1.20 = 26.964\ \text{m}$ 。

(5) 高浓度瓦斯瞬间涌入巷道瓦斯影响范围的确定。

根据以上分析结果, 采用运移扩散模型, 按照上文假定突出条件, 得出高浓度瓦斯气体团瞬间涌入巷道实际瓦斯浓度  $C'$  与实际时间  $t'$  和距突出源实际监测距离  $x'$  之间的关系, 如图 9 所示。瓦斯浓度分布范围被 5% 和 16% 两个界面划分, 16% 截面以上区域为混入新鲜空气后爆炸区, 5% ~ 16% 范围内区域为瓦斯爆炸区, 5% 截面以下区域为非爆炸区。

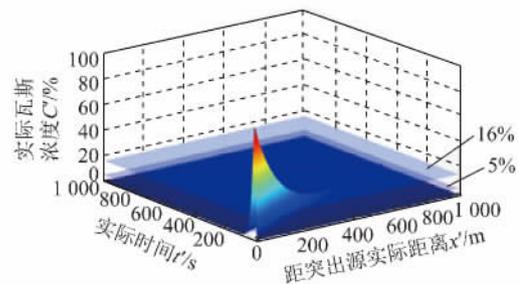


图 9 影响范围分布三维图

Fig. 9 Three-dimensional distribution of influence scope

为了便于观察, 将图 9 的实际瓦斯浓度  $C'$  和距突出源的实际距离  $x'$  关系 (正视图)、实际瓦斯浓度  $C'$  和实际时间  $t'$  关系 (左视图) 分别导出, 如图 10, 11 所示。

从图 10, 11 可以看出, 风量为  $648\ \text{m}^3/\text{min}$ , 断面为  $9\ \text{m}^2$  条件下, 突出  $10\ 000\ \text{m}^3$  瓦斯后, 瓦斯浓度达到 16% 的坐标点为 (339, 182, 16%), 5% 的坐标点为 (563, 290, 5%)。在距突出源 0 ~ 339 m 区域, 当混入新鲜空气后可发生瓦斯爆炸; 339 ~ 563 m 遇明火

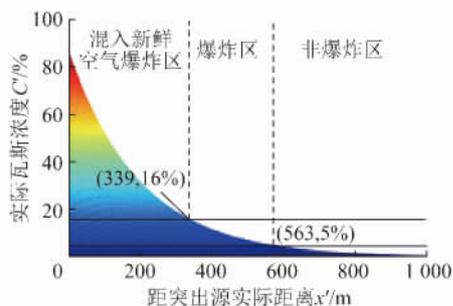


图 10 实际瓦斯浓度  $C'$  和距突出源的实际距离  $x'$  关系

Fig. 10 The relationship between actual gas concentration  $C'$  and distance from outburst source  $x'$

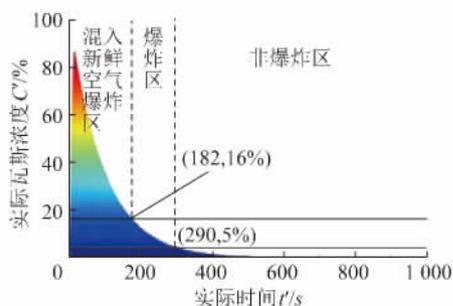


图 11 实际瓦斯浓度  $C'$  和实际时间  $t'$  关系

Fig. 11 The relationship between actual gas concentration  $C'$  and time  $t'$

可直接发生瓦斯爆炸,因此,瓦斯爆炸的可能发生区域为距突出源 0~563 m,时间为 0~290 s。而在距突出源 563 m 以外的巷道,瓦斯浓度均在 5% 以下,瓦斯爆炸危险性小。按照上述分析,现场机电设备应布置距突出源 563 m 以外的区域。本文仅对风量为  $648 \text{ m}^3/\text{min}$ ,断面为  $9 \text{ m}^2$  条件下,突出  $10\,000 \text{ m}^3$  瓦斯后高浓度瓦斯影响范围进行分析,对于其他条件下的瓦斯影响范围研究可参照此方法进行。

## 4 结 论

(1) 根据流体力学理论和菲克定律,建立了瞬态源一维运移扩散几何模型,改进了现有的运移扩散数学模型。相似试验结果和灾害气体运移扩散模型吻合度高,且拟合参数均具有实际意义,验证了所建的运移扩散模型用于分析高浓度气体团瞬间涌入巷道混合气体扩散规律的合理性。

(2) 各监测点监测的气体量随监测距离的增大呈负指数衰减;紊流扩散系数与巷道通风摩擦阻力系数、水力半径和风速有关;各监测点浓度变化的初至时间和监测距离均呈现良好的线性关系。

(3) 根据相似试验结果确定运移扩散数学模型的主要参数,分析了风量为  $648 \text{ m}^3/\text{min}$ ,断面为  $9 \text{ m}^2$  条件下,突出  $10\,000 \text{ m}^3$  瓦斯后突出高浓度瓦斯时空

分布规律。结果表明在巷道通风设施不损坏的条件下,发生瓦斯爆炸的可能区域为距突出源 0~563 m,时间发生在 0~290 s。而距突出源 563 m 以外的巷道区域瓦斯浓度均在 5% 以下,瓦斯爆炸危险性小。

(4) 受实验室药量和监测点数目的限制,各点监测气体量随监测距离变化的衰减系数需根据井下实测数据进一步考察和修正,上升阶段时间和监测距离之间的关系有待进一步分析。

## 参考文献:

- [1] 李成武,何学秋. 工作面煤与瓦斯突出危险程度预测技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 71-76.  
Li Chengwu, He Xueqiu. Prediction method of coal and gas outburst dangerous level in coal roadway face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(1): 71-76.
- [2] Noack K. 煤与沼气突出对矿井通风的影响[J]. 煤矿安全, 1988(4): 14.  
Noack K. The impact of coal and gas outburst on the mine ventilation[J]. Safety in Coal Mine, 1988(4): 14.
- [3] 梁 栋,王继仁,王树刚,等. 巷道风流中瓦斯逆流机理及其实验研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 476-479.  
Liang Dong, Wang Jiren, Wang Shugang, et al. The mechanism and test research of gas adverse current in roadway air flow[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 476-479.
- [4] 王恩元,梁 栋,柏发松. 巷道瓦斯运移机理及运移过程的研究[J]. 山西矿业学院学报, 1996, 14(2): 130-135.  
Wang Enyuan, Liang Dong, Bai Fasong. Study on the mechanism and process of the methane movement in the tunnel[J]. Shanxi Mining Institute Learned Journal, 1996, 14(2): 130-135.
- [5] 鹿广利,李崇山,辛 嵩. 集中有害气体在通风网路中传播规律的研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2000, 19(2): 120-122.  
Lu Guangli, Li Chongshan, Xin Song. Study on the law of concentration harmful gas spreading in ventilation networks[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Nature Science), 2000, 19(2): 120-122.
- [6] He Liwen, Song Yi, Shi Shiliang, et al. Research on time structure characteristic of gas concentration sequence in the working face[J]. Journal of Coal Science and Engineering(China), 2011, 17(3): 311-315.
- [7] Li Chengwu, Yang Wei, Xie Beijing, et al. Numerical simulation on hazardous area distribution after gas outburst in coal uncovering construction of hydropower station[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 212-213: 989-997.
- [8] 孙东玲,胡千庭,苗法田. 煤与瓦斯突出过程中煤-瓦斯两相流的运动状态[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 452-458.  
Sun Dongling, Hu Qianting, Miao Fatian. Motion state of coal-gas flow in the process of outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 452-458.
- [9] Wang Kai, Zhou Aitao, Zhang Jianfang, et al. Real-time numerical simulations and experimental research for the propagation character-

- istics of shock waves and gas flow during coal and gas outburst[J]. Safety Science 2012, 50(4): 835-841.
- [10] Zhang Jianrang, Wang Chunqiao, Dong Dingwen. Numerical simulation study of gob air leakage field and gas migration regularity in downlink ventilation[J]. Journal of Coal Science and Engineering (China) 2011, 17(3): 316-320.
- [11] Lü Wensheng, He Lei, Yang Peng. Simulation study of blast fume diffusion characters of driving face[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China) 2011, 17(1): 47-51.
- [12] Hideki Okamoto, Yasuhiro Gomi. Empirical research on diffusion behavior of leaked gas in the ground[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2011, 24: 531-540.
- [13] 刘永立, 陈海波. 矿井瓦斯爆炸毒害气体传播规律[J]. 煤炭学报 2009, 34(6): 788-791.  
Liu Yongli, Chen Haibo. Poison gases propagation rules of methane explosion in coal mine[J]. Journal of China Coal Society 2009, 34(6): 788-791.
- [14] 贾智伟, 景国勋, 张强. 瓦斯爆炸事故有毒气体扩散及危险区域分析[J]. 中国安全科学学报 2007, 17(1): 91-95.  
Jia Zhiwei, Jing Guoxun, Zhang Qiang. Analysis on the diffusion of toxic gases from gas explosion and the determination of risk area [J]. China Safety Science Journal 2007, 17(1): 91-95.
- [15] 王英敏. 矿内空气动力学与矿井通风系统[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [16] 张国枢. 通风安全学(第2版)[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [17] 王春新. 井巷断面形状系数新探[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(6): 35-41.  
Wang Chunxin. An new investigation on coefficient of mine sectional form [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2003, 30(6): 35-41.
- [18] 周美立. 相似工程学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 12-15.
- [19] 蒋曙光, 王省身. 综放采场流场及瓦斯运移三维模型试验[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(4): 85-91.  
Jiang Shuguang, Wang Xingshen. Study on 3-D modelling of air flow and methane transfer in top-coal drawing fields [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(4): 85-91.
- [20] MT/T 635—1996 矿井巷道通风摩擦阻力系数测定方法[S].
- [21] 胡汉华. 矿井通风系统设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

## 《煤炭学报》再次入选“中国最具国际影响力学术期刊”

2013年12月30日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、清华大学图书馆以及中国科学文献计量评价研究中心编制的《中国学术期刊国际引证年报(2013版)》正式发布,《煤炭学报》再次入选“中国最具国际影响力学术期刊”,这是煤炭行业惟一入选的期刊。

本次评价采用的国际引证统计源期刊多达13 324种,涵盖了全部Web of Science收录的学术期刊和会议论文,遴选团队对国内4 622种期刊(其中自然科学与工程技术类期刊3 502种,人文社会科学类期刊1 120种)进行了计量评价,分别按科技、人文社科两大序列进行排序,经70位期刊界研究专家审议后,取全部备选期刊的前5%(其中科技期刊排序取前175位)称为“2013中国最具国际影响力学术期刊”;其后至全部备选期刊的前10%(其中科技期刊排序176至350位)称为“2013中国国际影响力优秀学术期刊”。