

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0142

# 基于正交试验的 U 形通风采煤工作面 瓦斯爆炸超压影响因素分析\*

刘佳佳<sup>1,2,3</sup>, 张翔<sup>1</sup>, 高志扬<sup>1,3</sup>, 张扬<sup>1</sup>, 陈玖强<sup>1</sup>, 靳马超<sup>4</sup>

(1. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003;

2. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;

3. 河南理工大学煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003;

4. 山西冶金岩土工程勘察有限公司, 山西 太原 030032)

**摘要:** 为探究 U 形通风采煤工作面瓦斯爆炸的传播规律, 并探讨瓦斯爆炸超压衰减对不同影响因素的敏感性, 利用 Fluent 模拟软件并结合某矿 3906 工作面情况开展了数值模拟研究。首先, 根据瓦斯爆炸机理搭建了数学模型, 并依据前人实验方案进行了数值模拟, 以此验证了该数学模型的可靠性; 其次, 依序进行了模拟关键参数的优化, 并得到了关键参数网格尺寸、迭代步长和点火温度的最合理设置分别为 0.2 m、0.05 ms 和 1900 K, 通过拟合得到了工作面爆炸超压峰值及其到达时间与爆心距之间的函数关系。通过正交试验分析了瓦斯爆炸超压衰减对不同影响因素的敏感性。极差分析结果表明, 温度、瓦斯体积分数和瓦斯积聚区压力 3 个主控因素的极差值依次减小, 温度对于爆炸超压衰减的影响最显著, 其中  $R$  值达到 5.928。运用方差分析对影响瓦斯爆炸超压衰减率的主控因素进行了显著性研究, 结果表明, 温度的方差值最大, 瓦斯积聚区压力的方差值次之, 瓦斯体积分数的方差值最小, 其中温度的显著值  $F$  达到 31.835, 其余两项不显著。

**关键词:** U 形通风; 采煤工作面; 瓦斯爆炸; 超压衰减率; 正交试验

中图分类号: O382

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Analysis on influencing factors of gas explosion overpressure peak in a U-shaped ventilation coal face based on orthogonal test

LIU Jiajia<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xiang<sup>1</sup>, GAO Zhiyang<sup>1,3</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, CHEN Jiuqiang<sup>1</sup>, JIN Machao<sup>4</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China;

2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines,

Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

3. Henan Collaborative Innovation Center of Coal work Safety and Clean-efficiency Utilization,

Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China;

4. Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Investigation Co., LTD, Taiyuan 030032, Shanxi, China)

**Abstract:** Numerical simulation was carried out by using the Fluent simulation software and combining it with the situation of the working face 3906 in a mine to investigate the propagation law of gas explosion in a U-shaped ventilation coal mining face and to explore the sensitivities of the overpressure attenuation of a gas explosion to different influencing factors. The relative

\* 收稿日期: 2024-05-15; 修回日期: 2024-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(52074106); 河南省优秀青年科学基金(232300421061); 中国博士后科学基金(2024M750803);

深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金(SKLMRDPC22KF11);

河南理工大学青年骨干教师培养计划(2023XQG-07)

第一作者: 刘佳佳(1985—), 男, 博士, 副教授, liujiajia@hpu.edu.cn

通信作者: 高志扬(1981—), 男, 博士, 副教授, aa19851985@sina.com

errors between the numerically-simulated results and experimental ones are less than 15%, which verifies the reliability of the mathematical model developed in this paper. Then, the key parameters, namely, grid size, iteration time step, and ignition temperature are optimized to 0.2 m, 0.05 ms, and 1900 K, respectively. Numerical simulation indicates that the relationship between the peak of the explosion overpressure and the distance away from the explosion center of the coal face meets an exponential function relationship. The relationship between the arrival time of the peak explosion overpressure and the distance away from the explosion center meets a linear function. By designing an orthogonal array, 16 sets of data were obtained through simulation, and the following analyses were conducted based on this data. The extreme difference values of the three main control factors were obtained by using extreme difference analysis. The extreme difference value of the temperature is the greatest, the one of the gas concentration take the second, and the one of the gas accumulation area pressure is the least. The most significant impact of the temperature on the explosion overpressure attenuation in the numerical simulation, in which the *R*-value reaches 5.928. ANOVA analysis was carried out to study the significances of the main control factors affecting the explosion overpressure attenuation rate. In the three main control factors, the significance of the temperature is the most, the one of the gas accumulation zone pressure comes second, and the one of the gas concentration is the weakest. And the temperature shows a significance level of 31.835, while the other two factors are not significant.

**Keywords:** U-shaped ventilation; coal face; gas explosion; explosion overpressure attenuation rate; orthogonal experiment

目前,煤矿井下工作环境已得到改善,但煤矿灾害事故依然会发生。瓦斯灾害事故在煤矿事故中占比较大,其中瓦斯爆炸影响范围大、危害严重,爆炸后产生的冲击波以及高温气体会直接对井下工作人员和机械设备造成不可逆的破坏和损失<sup>[1]</sup>,因此深入研究瓦斯爆炸的传播规律尤为重要。

瓦斯爆炸一直以来都是学者们研究的热点问题。Li 等<sup>[2]</sup>、Guo 等<sup>[3]</sup>、贾泉升等<sup>[4]</sup>、高娜<sup>[5]</sup>和李润之等<sup>[6]</sup>研究了瓦斯浓度、压力的变化对瓦斯爆炸的影响,发现瓦斯体积分数为 9.5% 时,爆炸后压力、温度均达到最大值。同时,高娜等<sup>[7]</sup>、Zhang 等<sup>[8]</sup>和赵军凯等<sup>[9]</sup>研究了瓦斯爆炸对环境温度变化的敏感性,发现随着环境温度的升高,最大爆炸压力降低且达到最大爆炸压力所需时间缩短。Ye 等<sup>[10]</sup>将自制的隔热材料贴于巷道内壁,研究壁热效应对瓦斯爆炸超压、温度及传播速度的影响,发现随着隔热材料铺设长度的增加,爆炸后的最大压力、温度及传播速度均有明显提升。此外,余明高等<sup>[11]</sup>研究了 CH<sub>4</sub> 不同自由扩散时间下非均匀与空气混合物爆炸火焰传播特性,发现 CH<sub>4</sub> 自由扩散时间越短、体积分数梯度越明显,对爆炸超压及火焰传播的影响越显著。针对瓦斯爆炸巷道结构的不同,众多学者开展了不同巷道结构下瓦斯爆炸超压及火焰传播规律的研究。其中针对 90°弯管瓦斯爆炸,学者们主要研究了不同瓦斯浓度<sup>[12]</sup>、不同混合气体<sup>[13-14]</sup>和障碍物<sup>[15]</sup>对瓦斯爆炸超压传播规律的影响,分别发现:在 90°弯管情况下,瓦斯爆炸主巷道内超压最高,分巷道内超压最低;在 90°弯管实验中,加入的氢气浓度越高,瓦斯爆炸超压越高;在爆炸中心点较近位置加入 90°弯管能够提高火焰的传播速度,通过实验对比 90°弯管和挡板型障碍物产生的火焰速度,发现 90°弯管与阻塞率为 10%~20% 的挡板型障碍物相当。此外,Emami 等<sup>[16]</sup>研究了三叉管道中烃、氢气和空气混合物火焰传播规律,发现三通接头距离爆炸点越近,分叉管道的爆炸超压越高、火焰速率越高。Jing 等<sup>[17]</sup>、张学博等<sup>[18]</sup>和孟显华等<sup>[19]</sup>分别开展了分叉巷道瓦斯爆炸超压传播规律的研究,发现直角巷道弯折处瓦斯爆炸超压峰值最大,且弯折处的存在会加快火焰的传播。同时,Lin 等<sup>[20]</sup>研究了巷道不同弯折角度情况下瓦斯爆炸超压的传播特性,发现当弯折角度大于 90°时,分支巷道的最大超压降低。欧益宏等<sup>[21]</sup>和张增亮等<sup>[22]</sup>研究了障碍物对爆炸超压及火焰传播的影响,发现障碍物会导致障碍物前后超压分布不均匀,并提高火焰的传播速度。余明高等<sup>[23]</sup>发现障碍物的阻塞率仅对火焰的瞬时传播速度影响较大。马恒等<sup>[24]</sup>、王维建等<sup>[25]</sup>和叶青等<sup>[26]</sup>分别从巷道本身结构、瓦斯积聚区范围以及爆源位置 3 个角度,对 H 形巷道内的爆炸超压传播特性进行了研究,发现瓦斯积聚区的增大及双爆源的同时引爆会提高爆炸最大压力。刘佳佳等<sup>[27]</sup>构建了全尺寸 Y 形通风采煤工作面模型,研究了进回风巷道及工作面瓦斯爆炸的传播规律,提出发生爆炸时胶带顺槽更危险。高建良等<sup>[28]</sup>和高智慧等<sup>[29]</sup>分别从巷道结构本身、入口风流出发研究了角联管网瓦斯爆炸超压的传播规律,发现角联管网能更大程度地加快超压的衰减,并且入口风流的存在导致初期超压峰值更大。张保勇等<sup>[30]</sup>和 Carson 等<sup>[31]</sup>从障碍物出

发研究了爆炸超压的衰减规律,发现改变阻爆物锯齿角度可以提高爆炸超压的衰减率,同时降低巷道总纵横比也可提高爆炸超压的衰减率。

综上所述,学者们对瓦斯爆炸物性参数和巷道结构已进行了较多的研究,基于井下巷道结构进行的瓦斯爆炸模拟研究也取得了不错的进展。其中针对 U 形通风采煤工作面爆炸冲击波的传播规律<sup>[32-33]</sup>,研究了不同通风方式下瓦斯爆炸冲击波随爆心距变化的衰减规律,但并未细致分析导致爆炸超压衰减变化的原因,以及爆炸超压衰减对相关影响因素耦合的敏感性。本文中,采用 Fluent 模拟软件并结合相关数学模型,研究 U 形通风采煤工作面瓦斯爆炸冲击波的传播规律,定量分析不同因素对爆炸超压衰减的影响,以期给现场实际防护提供理论指导。

## 1 模型的建立

### 1.1 物理模型及网格划分

利用 ANSYS Workbench 软件,并结合河南焦煤集团某矿 3906 工作面,建立 U 形通风系统三维物理模型,整体送风方式为上行通风,其中沿着进风巷道送风方向为 X 轴正方向,工作面沿送风方向为 Y 轴正方向,工作面垂直方向为 Z 轴,坐标原点 O 为进风巷道入口边界右下角,如图 1 所示。工作面长度为 130 m,高度为 3.5 m;进风巷道及回风巷道长度均为 50 m,宽度均为 4 m,高度均为 3.5 m;巷道横截面形状为矩形且尺寸为 4 m×3.5 m。通过 ANSYS 自带的网格划分软件 Mesh 进行网格尺寸结构化划分。

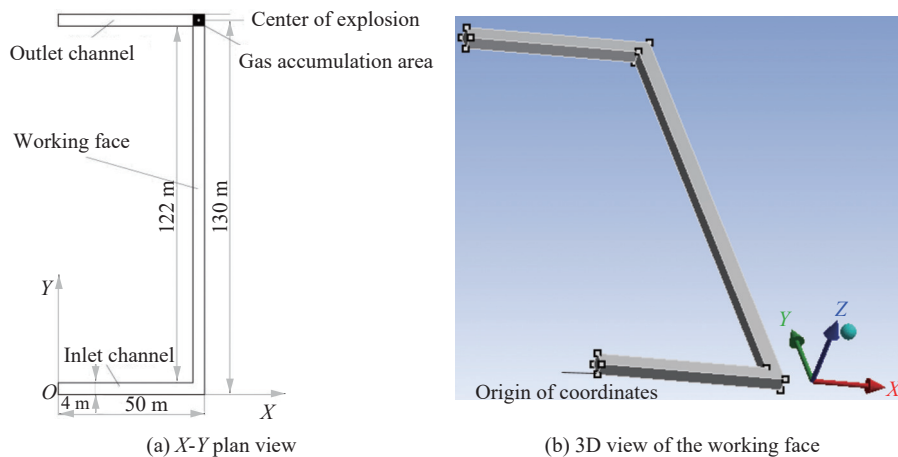


图 1 河南焦煤集团某矿 3906 工作面物理模型

Fig. 1 Physical model of working face 3906 of a mine of Henan Coking Coal Group

### 1.2 数学模型

#### 1.2.1 基本假设

瓦斯爆炸伴随着诸多化学反应及物理现象,反应较复杂,对巷道中的各种条件均进行模拟,并得出规律及结论,是很困难的。因此,为了在保证模拟准确性的基础上得到理想的爆炸规律,假设:

- (1) 预混合气体和燃烧生成物都符合理想气体状态方程;
- (2) 混合气体的比热容可按混合规则计算,各组分的比热容均为温度的函数;
- (3) 物理模型的壁面为刚性且绝热,无相对位移;
- (4) 瓦斯爆炸反应是单向且不可逆的;
- (5) 物理模型中瓦斯充填区为瓦斯和空气的均匀混合气体,且为理想状态。

#### 1.2.2 控制方程

大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 是介于直接数值模拟 (direct numerical simulation, DNS) 和雷诺平均湍流模型 (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 之间的一种方法,既能捕捉到湍流的时间和空间

结构, 又能够降低计算的复杂性。在 LES 中, 大尺度涡(直接求解得到)通常包含主要的湍流能量部分, 小尺度涡(通过模型进行处理)负责能量耗散, 通过这种方法可在相对较低的计算复杂性下获得更准确的结果。目前 LES 被广泛应用于解决工程中的复杂湍流问题, 因此数值模拟中使用 LES 控制方程, 具体如下。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{h}_{\text{sen}}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i \tilde{h}_{\text{sen}}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} - u_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho (u_i \tilde{h}_{\text{sen}} - \tilde{u}_i \tilde{h}_{\text{sen}})] \quad (3)$$

反应进程变量  $c$  的储运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{c}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i \tilde{c}) - \bar{\omega} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho (\tilde{u}_i c - \tilde{u}_i \tilde{c})] \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $p$  为压力;  $t$  为时间;  $u_i$  和  $u_j$  为速度分量;  $T$  为温度;  $h_{\text{sen}}$  为显焓;  $\lambda$  为热导率;  $\sigma_{ij}$  为应力张量分量;  $\tau_{ij}$  为亚网格尺度应力;  $D$  为扩散系数;  $\omega$  为归一化的化学反应速率, 根据  $\omega = S_{\text{h}}/(H_{\text{c}} Y_{\text{f}})$  计算得到, 其中  $S_{\text{h}}$  为化学反应热;  $H_{\text{c}}$  为 1 kg 燃料燃烧产生的热量;  $Y_{\text{f}}$  为混合物中燃料的质量分数。添加上划线“-”的量为物理空间过滤量, 添加上划线“~”的量为质量权重过滤量。亚网格热焓通量通过梯度近似假设为  $\rho (u_i \tilde{h}_{\text{sen}} - \tilde{u}_i \tilde{h}_{\text{sen}}) = -(\mu_{\text{sub}} c_p / Pr_{\text{sub}}) (\partial \tilde{T} / \partial x_i)$ , 其中  $\mu_{\text{sub}}$  为亚网格黏度,  $Pr_{\text{sub}}$  为亚网格 Prandtl 数,  $c_p$  为比定压热容。

### 1.3 边界及初始条件

数值模拟初始条件为常温常压, 温度为 300 K, 进风巷道边界为速度入口, 回风巷道边界为压力出口。瓦斯集聚区尺寸为 4 m × 4 m × 3.5 m, 气体初始质量分数分别为:  $w(\text{CH}_4) = 0.055$ ,  $w(\text{O}_2) = 0.21$ ,  $w(\text{H}_2\text{O}) = w(\text{CO}_2) = 0$ ,  $w(\text{N}_2) = 0.73$ 。爆源位置位于瓦斯积聚区内部中心点, 如图 1(a) 所示, 坐标为 (48 m, 128 m, 1.75 m), 同时已燃区即高温高压区是以爆源为中心、半径为 0.5 m 的球形区域, 该区域初始温度为 1 900 K, 已燃区气体质量分数分别为:  $w(\text{H}_2\text{O}) = 0.119 25$ ,  $w(\text{CO}_2) = 0.145 60$ ,  $w(\text{O}_2) = w(\text{CH}_4) = 0$ ,  $w(\text{N}_2) = 0.520 00$ 。一般空气区中各气体组分的质量分数分别为:  $w(\text{CH}_4) = w(\text{H}_2\text{O}) = w(\text{CO}_2) = 0$ ,  $w(\text{O}_2) = 0.21$ ,  $w(\text{N}_2) = 0.78$ 。

### 1.4 数学模型验证

为了确保数值模拟结果可靠, 在开展数值模拟之前, 需要验证数值模拟中拟采用的数学模型的可靠性。基于洪溢都等<sup>[34]</sup>开展的爆炸实验, 建立了长度为 5 m、横截面边长为 8 cm 的三维巷道模型, 相关监测点设置如图 2 所示。从距管道左端(点火端)2 m 位置开始每隔 0.5 m 设置一个压力监测点, 并采用 Patch 高温点火方式点火。

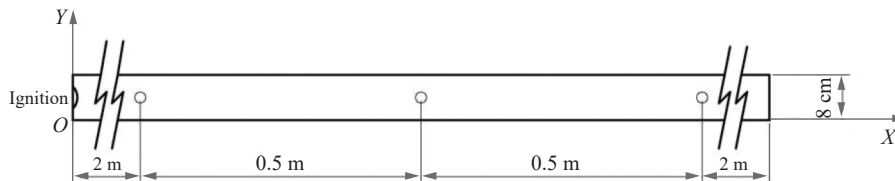


图 2 数学模型验证中监测点的布置

Fig. 2 Layout of monitoring points for validating the mathematical model

采用本文的数学模型对洪溢都等<sup>[34]</sup>的爆炸实验开展数值模拟,在不同测点处得到的超压峰值如图 3 所示。由图 3 可以看出,数值模拟得到的超压峰值和实验超压峰值<sup>[34]</sup>吻合较好,误差不超过 15%。可见,采用本文的数学模型研究 U 形通风采煤工作面瓦斯爆炸冲击波的传播规律是可行的。

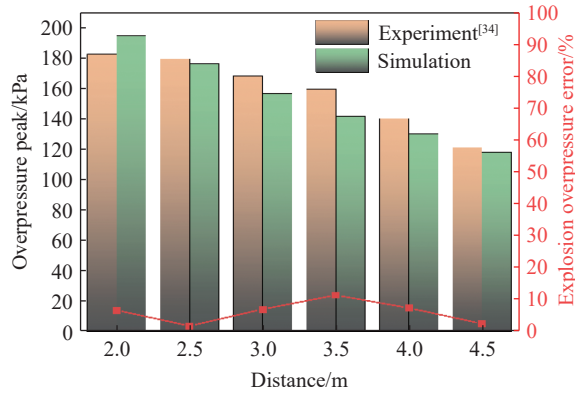


图 3 不同方法得到的不同测点处的超压峰值以及两者的误差

Fig. 3 Overpressure peaks of different measuring points obtained by different methods and their corresponding errors

## 2 数值模拟关键参数优化及瓦斯爆炸超压传播规律

为了得到较准确的模拟结果,对网格尺寸、迭代步长以及点火温度 3 个关键参数进行优化处理。为了更好地观测各参数下的模拟结果,在 Fluent 中建立 3 个监测点,即 (48 m, 120 m, 1.75 m)、(48 m, 115 m, 1.75 m)、(30 m, 128 m, 1.75 m),坐标系设置与图 1 一致,具体监测点布置如图 4 所示。

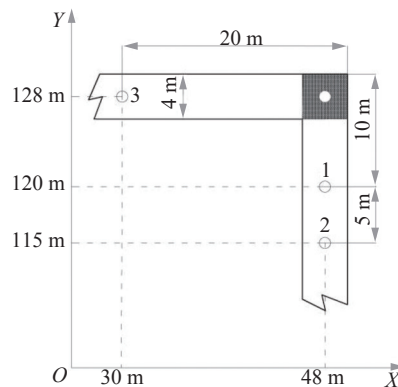


图 4 关键参数优化中监测点的布置

Fig. 4 Layout of monitoring points for optimizing the key parameters

### 2.1 关键参数优化

#### 2.1.1 网格尺寸优化

使用 Workbench 自带的 mesh 软件对全尺寸三维 U 形通风采煤工作面模型进行网格划分,得到 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40 和 0.45 m 等 7 种网格尺寸下的划分结果,见表 1。不同的网格尺寸下,数值模拟得到的爆炸超压峰值及其到达时间如图 5~6 所示。

由图 5 可知:当网格尺寸超过 0.25 m 时,测点 1~3 的爆炸超压峰值均呈现不稳定趋势,随

表 1 网格分布

Table 1 Grid distribution

网格尺寸/m	瓦斯充填区网格数	点火区域网格数
0.15	16284	154
0.20	7200	56
0.25	3584	32
0.30	2148	18
0.35	1310	14
0.40	900	12
0.45	648	6

网格尺寸的增大,爆炸超压峰值均出现了较大的波动。当网格尺寸不大于 0.25 m 时,任意测点内相邻工况下的爆炸超压峰值误差均小于 5%,考虑到同一参数模拟情况下瓦斯爆炸超压峰值传播规律的可靠性及稳定性,暂时选取网格尺寸为 0.25 m 以下的物理模型。由图 6 可知,当网格尺寸从 0.20 m 增大至 0.45 m 时,爆炸超压峰值的到达时间呈明显的延迟趋势;当网格尺寸不大于 0.20 m 时,测点 1~3 的爆炸超压峰值到达时间无明显变化。考虑研究同一参数模拟情况下瓦斯爆炸超压峰值到达时间的变化规律,选取网格尺寸不大于 0.20 m 的尺寸模型。综上所述,结合计算机配置,构建网格尺寸为 0.20 m 的物理模型进行下一步的数值模拟较合理。

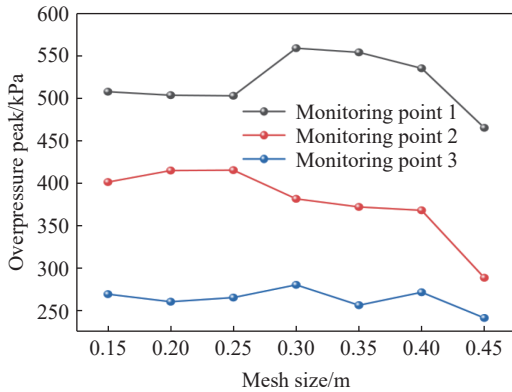


图 5 超压峰值随网格尺寸的变化

Fig. 5 Variation of overpressure peak with mesh size

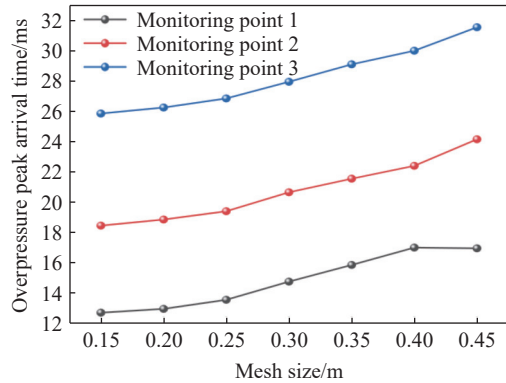


图 6 超压峰值到达时间随网格尺寸的变化

Fig. 6 Variation of overpressure peak arrival time with mesh size

### 2.1.2 迭代步长优化

构建网格尺寸为 0.20 m 的物理模型,选择 0.40、0.30、0.20、0.10、0.05 和 0.04 ms 等 6 种迭代步长,模拟得到的爆炸超压峰值及其到达时间如图 7~8 所示。

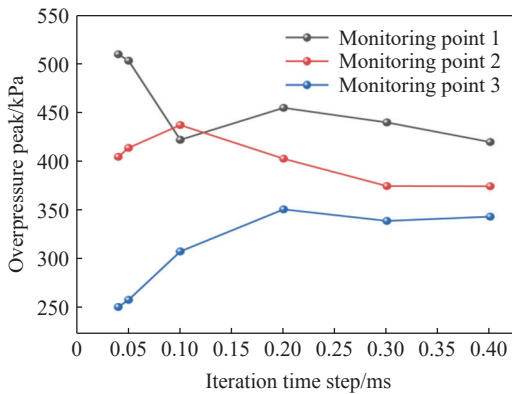


图 7 超压峰值随迭代步长的变化

Fig. 7 Variation of overpressure peak with iteration time step

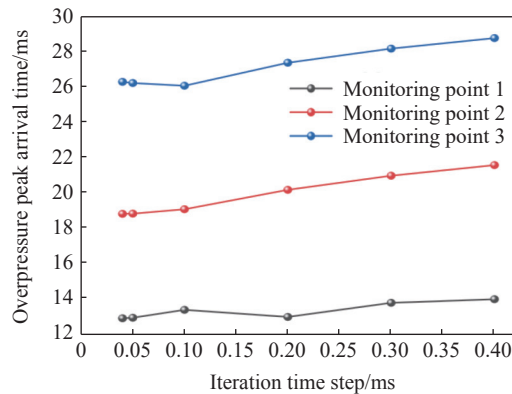


图 8 超压峰值到达时间随迭代步长的变化

Fig. 8 Variation of overpressure peak arrival time with iteration time step

由图 7 可知,当迭代步长大于 0.10 ms 时,爆炸超压无显著变化,相反当迭代步长小于等于 0.10 ms 时,距离爆炸点较近的测点即测点 1 的爆炸超压峰值随迭代步长的缩短而升高,相反测点 2 和测点 3 的爆炸超压峰值随迭代步长的缩短而降低。这是因为,迭代步长越短,模拟的时间分辨率越高,直接导致模拟能够更精准地捕捉爆炸初期爆炸波的变化,因此距离爆炸点近的测点会显示更高的爆炸超压。在 0.04 和 0.05 ms 之间瓦斯爆炸超压峰值相差不大于 5%。由图 8 可知,测点 1~3 的峰值到达时间在迭代步长小于 0.05 ms 的模拟中均无明显变化。综合考虑选取迭代步长 0.05 ms 进行下一步的模拟。

2.1.3 点火温度优化

基于已确定的网格尺寸 0.20 m 和迭代步长 0.05 ms, 对 1 300、1 600、1 900、2 200 和 2 500 K 等 5 种点火温度下的爆炸超压峰值及其到达时间进行数值模拟, 模拟结果如图 9~10 所示。

由图 9 可知, 随着点火温度的升高, 爆炸超压峰值变化并不明显。通过分析可知, 温度的升高会提高积聚区分子的活跃性, 导致部分未及时反应的气体逃逸, 从而使瓦斯体积分数降低进而导致超压峰值降低。由图 10 可知, 随着点火温度的升高, 测点 1~3 爆炸超压峰值的到达时间均无明显变化。因此, 推测爆炸点火温度并不影响冲击波的传播速度。考虑到前期初始点火温度的设置并结合数据分析, 选取点火温度 1 900 K 进行下一步的模拟。

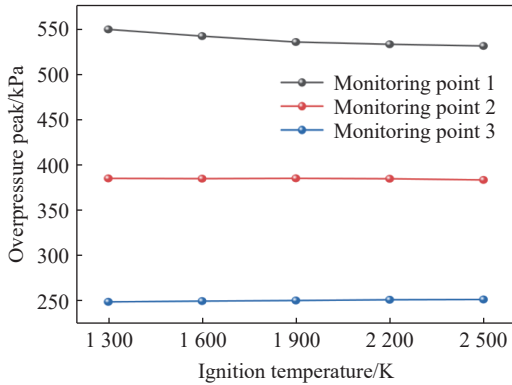


图 9 超压峰值随点火温度的变化

Fig. 9 Variation of overpressure peak with ignition temperature

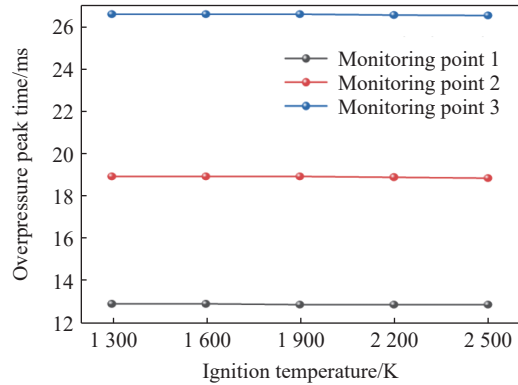


图 10 超压峰值到达时间随点火温度的变化

Fig. 10 Variation of overpressure peak arrival time with ignition temperature

2.2 U形通风采煤工作面瓦斯爆炸的传播规律

保持  $X=48\text{ m}$ ,  $Z=1.75\text{ m}$  的情况下, 在 U 形通风采煤工作面不同  $Y$  范围内设置不同间距的监测点 ( $48\text{ m}$ ,  $Y$ ,  $1.75\text{ m}$ ) 共 42 个, 如图 11 所示。不同范围内具体监测点数量及监测点间距见表 2。

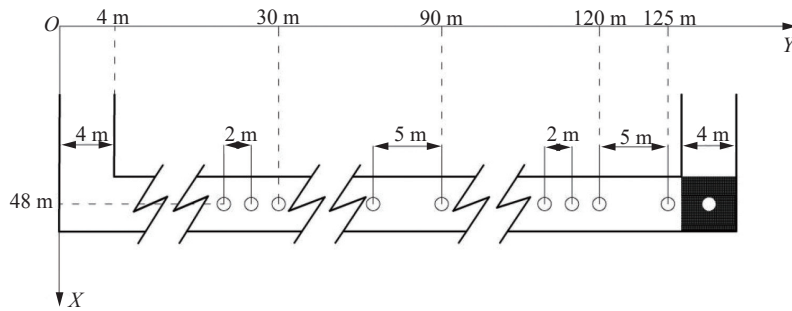


图 11 U形通风采煤工作面监测点的布置

Fig. 11 Layout of monitoring points in U-shaped ventilation coal face

根据张学博等<sup>[18]</sup>关于超压与瓦斯爆炸当量变化规律的研究可知, 瓦斯爆炸超压峰值随着瓦斯爆炸当量的增加而增大, 同时瓦斯爆炸超压峰值与比例距离和瓦斯爆炸当量存在一定的函数关系, 其中瓦斯爆炸当量和比例距离<sup>[35]</sup>分别为:

$$\omega_1 = n\xi Q_0 \rho_1 V_{\text{CH}_4} / Q_T = 1.049 V_{\text{CH}_4} \quad (5)$$

$$D = d / \sqrt{\omega_1} \quad (6)$$

表 2 监测点的分布

Table 2 Distribution of monitoring points

监测点设置范围	监测点数量	监测点间距/m
$120\text{ m} \leq Y \leq 125\text{ m}$	2	5
$90\text{ m} \leq Y < 120\text{ m}$	15	2
$30\text{ m} \leq Y < 90\text{ m}$	12	5
$4\text{ m} < Y < 30\text{ m}$	13	2

式中:  $\omega_1$  为瓦斯爆炸当量;  $n$  为 TNT 转化率, 取 0.2;  $\xi$  为爆炸系数, 取 0.6;  $Q_T$  为 TNT 爆轰发热量, 取 4.520 kJ/g;  $Q_c$  为瓦斯爆轰发热量, 取 55.164 kJ/g;  $\rho_1$  为瓦斯密度, 取 0.716 kg/m<sup>3</sup>;  $V_{CH_4}$  为参与爆炸的瓦斯体积, 即巷道瓦斯积聚体积与瓦斯体积分数的乘积;  $d$  为爆心距,  $D$  为比例距离。

数值模拟得到的采煤工作面瓦斯爆炸超压峰值  $\Delta p$  及其到达时间  $t$  随爆心距的变化如图 12 所示, 将式 (6) 代入图 12 中的拟合公式, 得到:

$$\Delta p = 545.073 \exp(-0.095D) + 87.855 \quad (7)$$

式中:  $\Delta p$  的单位为 kPa,  $D$  的单位为 m/kg<sup>1/3</sup>。

爆炸前期能量主要集中在爆炸点附近, 随着能量的传播和扩散, 能量会快速分布到更大的空间, 导致超压快速衰减, 而当冲击波传播更远时, 速度梯度降低, 耗散效应减弱, 超压衰减速度也随之降低。通过计算每隔 10 m 的爆炸超压衰减率得到相关数值, 如表 3 所示。

表 3 同等间距下爆炸超压的衰减情况

Table 3 Explosion overpressure attenuation at the same spacing

爆心距区间/m	超压衰减/kPa	时间间隔/ms	超压衰减率/%	爆心距区间/m	超压衰减/kPa	时间间隔/ms	超压衰减率/%
8~18	248.950	13.30	49.0	68~78	11.320	21.05	9.9
18~28	58.417	17.25	22.6	78~88	5.234	21.40	5.1
28~38	29.993	18.15	14.9	88~98	5.491	21.65	5.7
38~48	26.713	19.25	15.6	98~108	6.516	22.00	7.1
48~58	13.329	19.90	9.3	108~118	4.887	22.30	5.8
58~68	17.308	20.45	13.3				

由表 3 可知, 在相同间距下, 距离爆炸点越远, 爆炸超压衰减情况越不明显, 同时, 两测点爆炸超压峰值到达的时间间隔变大。这一现象基本符合爆炸超压传播规律。

### 3 瓦斯爆炸超压衰减影响因素模拟

#### 3.1 基于正交试验的数值模拟方案

正交试验是基于统计学与正交性原理, 并利用正交表科学选择试验方案, 然后对试验结果进行极差、方差分析的一种方法。本文主要研究瓦斯体积分数(A)、温度  $T$ (B) 及积聚区压力  $p$ (C) 对瓦斯爆炸超压衰减的影响, 根据高娜等<sup>[7]</sup> 关于不同温度及压力对瓦斯爆炸特性的研究, 将 3 个主控因素划分为 4 个水平, 相关数据见表 4。根据表 4 中的 4 个水平设计正交试验方案, 如表 5 所示。

表 4 瓦斯爆炸超压传播影响因素的水平设置

Table 4 Level setting of influencing factors of gas explosion overpressure propagation

水平	温度/K	瓦斯积聚区压力/MPa	瓦斯体积分数/%
1	300	0.2	7.5
2	350	0.4	9.5
3	400	0.6	11.5
4	450	0.8	13.5

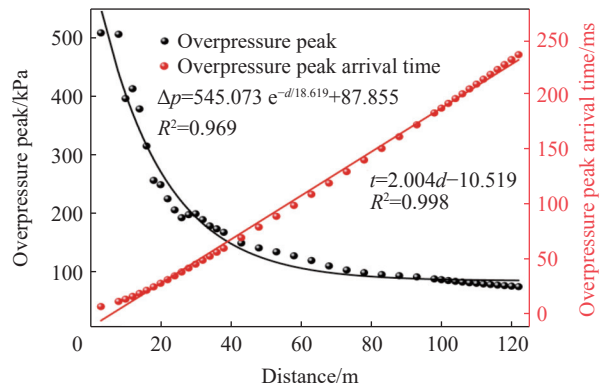


图 12 工作面瓦斯爆炸传播规律

Fig. 12 Propagation of gas explosion in working face



表 5 瓦斯爆炸超压传播影响因素的正交试验方案

Table 5 Orthogonal test scheme of influencing factors of gas explosion overpressure propagation

组别	温度/K	瓦斯积聚区压力/MPa	瓦斯体积分数/%	组别	温度/K	瓦斯积聚区压力/MPa	瓦斯体积分数/%
1	350	0.4	13.5	9	400	0.8	13.5
2	350	0.2	9.5	10	300	0.4	11.5
3	450	0.2	13.5	11	450	0.4	9.5
4	400	0.4	7.5	12	450	0.8	11.5
5	400	0.2	11.5	13	350	0.8	7.5
6	300	0.6	13.5	14	400	0.6	9.5
7	300	0.2	7.5	15	450	0.6	7.5
8	300	0.8	9.5	16	350	0.6	11.5

### 3.2 数值模拟结果分析

沿用 2.2 节中的工作面监测点布置, 依托表 5 中设计的 16 组水平组合进行分组模拟, 数值模拟结果如图 13 所示。

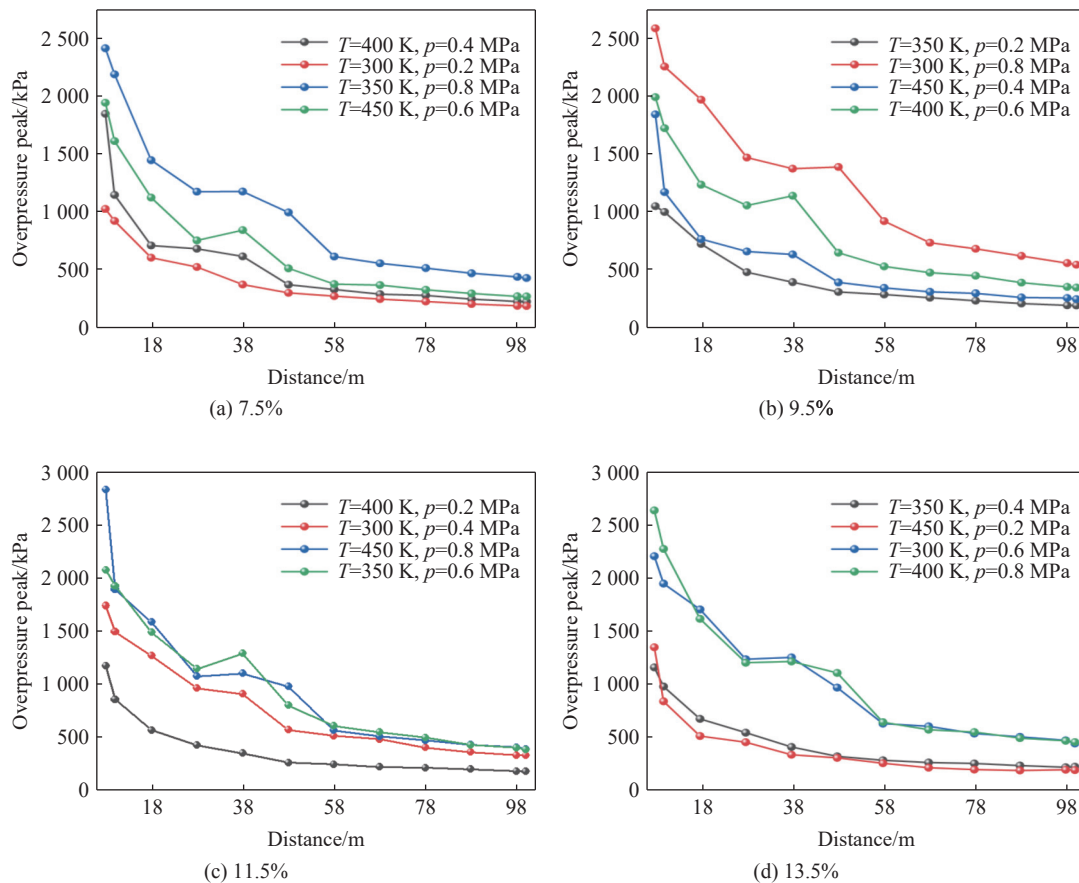


图 13 不同瓦斯体积分数水平下瓦斯爆炸超压峰值的衰减

Fig. 13 Attenuations of gas explosion overpressure peaks under different gas volume fraction levels

由图 13 可知, 所有工况下的爆炸超压均呈随着到瓦斯爆炸中心点距离的增大而逐渐降低的趋势。在前期水平设置时瓦斯初始压力不同, 导致在爆炸初期, 超压峰值出现明显的区别。为了消除这一数据对于后期数据分析的影响, 采用爆炸超压衰减率作为因变量并进行极差、方差分析。

### 3.3 基于正交试验的极差分析

根据数值模拟结果计算采煤工作面距爆心 100 m 内爆炸超压衰减率并汇总得到表 6。

表 6 不同影响因素对瓦斯爆炸超压衰减率的影响

Table 6 Influence of different influencing factors on attenuation rate of gas explosion overpressure

组别	影响因素			爆炸超压 衰减率/%	组别	影响因素			爆炸超压 衰减率/%
	瓦斯体积分数/%	温度/K	瓦斯积聚区压力/MPa			瓦斯体积分数/%	温度/K	瓦斯积聚区压力/MPa	
1	7.5	400	0.4	87.671	9	11.5	400	0.2	84.191
2	7.5	300	0.2	81.582	10	11.5	300	0.4	80.533
3	7.5	350	0.8	82.149	11	11.5	450	0.8	85.951
4	7.5	450	0.6	85.985	12	11.5	350	0.6	81.035
5	9.5	350	0.2	82.298	13	13.5	350	0.4	81.336
6	9.5	300	0.8	79.163	14	13.5	450	0.2	86.373
7	9.5	450	0.4	86.935	15	13.5	300	0.6	80.255
8	9.5	400	0.6	82.851	16	13.5	400	0.8	83.019

通过计算各因素各水平的和值  $K$  及平均值  $K_{ij}$  进行极差分析得到表 7, 通过使用极差分析法对比 3 个主控因素的极差, 分析不同主控因素的敏感性大小进而确定最佳水平。

表 7 极差分析

Table 7 Range analysis

因素	$K$				$K_{ij}$				最佳水平	$R_j$
	水平1	水平2	水平3	水平4	水平1	水平2	水平3	水平4		
A	337.387	331.247	331.710	330.983	84.346	82.812	82.928	82.746	1	1.6
B	321.533	326.818	337.732	345.244	80.383	81.705	84.433	86.311	4	5.928
C	334.444	336.475	330.126	330.282	83.611	84.119	82.532	82.571	2	1.587

注:  $K$  为  $i$  水平  $j$  因素下 4 组试验结果瓦斯爆炸超压衰减率之和,  $K_{ij}$  为对应的  $K$  的平均值,  $i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3$ ;  $R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j}\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}, K_{4j}\}$ ,  $R$  为某一因素下不同水平之间的极差, 即最大值减去最小值, 其中  $R$  越大, 表明该因素水平的改变对爆炸超压衰减的影响越大。

极差分析结果表明, 3 个主控因素的极差大小排序为  $R_B > R_A > R_C$ , 可以看出影响瓦斯爆炸超压衰减的主要因素为初始温度。根据表 7 可知, 随着温度的升高, 瓦斯爆炸超压衰减率出现一定程度的增大。从化学反应速率角度来看, 较高的温度会导致反应加快, 能量释放速率提高, 进而导致爆炸超压峰值出现一定程度的增大。

通过极差分析发现, 此次模拟试验中, 初始温度对瓦斯爆炸超压衰减的影响最大, 极差值可以达到 5.928。此外, 根据表 7 可以得出最佳水平为  $A_1B_4C_2$ 。

### 3.4 基于正交试验的方差分析

通过极差分析可以得到不同因素对瓦斯爆炸冲击波影响程度的高低, 对每个影响因素的主次顺序进行了明显的排序, 但仅通过排序很难判断模拟结果的差异性是由试验误差还是由改变因素水平造成的, 很难在数值上精准估计每个因素对模拟结果的影响程度。为了解决极差分析法存在的缺陷, 通常需要在极差分析的基础上进行方差分析, 做出更深层次的分析判断。

方差分析(ANOVA)常用来研究主控因素对因变量的显著性, 它将试验结果中出现的误差分成了不同因子水平造成的误差和试验误差两部分。在显著性检验中, 检验统计量由每个因子和试验误差的偏差平方和共同组成。方差分析不仅确定了每个因素对试验结果影响程度的显著性大小, 还评估了误差对于试验的影响。

### 3.4.1 模拟结果数据分析

基于上述理论,并结合表 6 计算主控因素离差平方和得到表 8。表 8 中:  $S_j$  为各个主控因素的离差平方和,  $S_j = (K_{1j}^2 + K_{2j}^2 + K_{3j}^2 + K_{4j}^2)/4 - C$ ;  $S_T$  为总离差平方和,  $S_T = \sum_{k=1}^{16} y_k^2 - C$ ;  $S_e$  为实验误差的离差平方和,  $S_e = S_T - \sum_{j=1}^3 S_j$ ;  $C$  为校正数,  $C = G^2/16$ ,  $G$  为以上 16 组试验爆炸超压衰减率  $y_k$  之和,  $G = \sum_{k=1}^{16} y_k$ 。

表 8 试验方案及数据分析

Table 8 Test scheme and data analysis

方差来源	$K_{1j}^2$	$K_{2j}^2$	$K_{3j}^2$	$K_{4j}^2$	$S_j$	$S_T$	$S_e$
瓦斯体积分数	113 829.988	109 724.575	110 031.524	109 549.746	6.98		
温度	103 383.47	106 810.005	14 062.904	119 193.42	85.476	105.249	5.369
瓦斯积聚区压力	111 852.789	113 215.426	108 983.176	109 086.2	7.424		

### 3.4.2 显著性检验

记各主控因素的平均偏差平方和与误差的平均偏差平方和之比为  $F^{[36]}$ :

$$F = (S_j/f_j)/(S_e/f_e) \quad (8)$$

式中:  $f_j$  和  $f_e$  分别为主控因素、试验误差自由度。  $F$  值体现了 3 个主控因素对试验结果的影响程度,并根据检验临界值判定其是否显著。

处理表 8 相关数据并代入式 (8),得到 3 个主控因素的  $F$  值及相关数据(表 9),并通过查找  $F$  分布表分析 3 个主控因素的显著性。

表 9 瓦斯爆炸超压衰减率主控因素方差分析

Table 9 Variance analysis of the main controlling factors of gas explosion overpressure decay ratio

主控因素	离差平方和	自由度	平均离差平方和	$F$	显著性
瓦斯体积分数	6.98	3	2.327	2.6	
温度	85.476	3	28.492	31.835	***
瓦斯积聚区压力	7.424	3	2.475	2.765	
误差	5.369	6	0.895		

注:  $F_{0.01}(3,6) = 9.78$ ,  $F_{0.05}(3,6) = 4.76$ ,  $F_{0.1}(3,6) = 3.29$ ; 若  $F > F_{0.01}$ , 认为显著性高,用\*\*\*表示; 若  $F_{0.01} > F > F_{0.05}$ , 认为显著性中等,用\*\*表示; 若  $F_{0.05} > F > F_{0.1}$ , 认为显著性低,用\*表示; 若  $F_{0.1} > F$ , 则该因素无显著性。

爆炸超压衰减率主控因素方差分析表明:除温度显著性较高外,瓦斯体积分数、瓦斯积聚区压力和误差项均不显著,各主控因素对爆炸超压衰减率的影响程度依次为:温度的影响最显著,瓦斯积聚区压力的影响次之,瓦斯体积分数的影响最弱。因此,为了有效控制温度,除正常的通风外,还可以利用空气冷却装置将较低的空气送入井下,同时定期维护机械设备以及设置温度传感器实时监控等。

## 4 结 论

(1) 爆炸超压数值模拟结果与前人的实验结果相比,误差小于 15%,验证了本文数学模型的可靠性;通过模拟优化得到了网格尺寸、迭代步长及点火温度最合理关键参数分别为 0.2 m、0.05 ms 及 1900 K。

(2) 瓦斯爆炸后,采煤工作面的瓦斯爆炸超压峰值与比例距离呈指数关系,且爆炸超压峰值的到达时间与到爆炸点的距离呈线性关系。在到爆炸点同等距离下,距爆炸点越远,爆炸超压的衰减越不明显,同时两测点超压峰值到达时间间隔变大,这一现象基本符合爆炸超压传播规律。

(3) 采用极差分析得到 3 个主控因素极差值从大到小依次排列为:温度的最大,瓦斯体积分数的次之,瓦斯积聚区压力的最小,温度在此次模拟中对爆炸超压衰减的影响最大,温度的提高一定程度上提

高了化学反应速率,也加快了能量释放的速度;同时此次试验中最佳水平为  $A_1B_4C_2$ 。

(4)运用方差分析法对影响瓦斯爆炸超压衰减率的主控因素进行了显著性研究,同样得到温度的影响显著,其余两项影响不显著,因此矿井井下应当严格监控温度的变化。

### 参考文献:

- [1] WANG Y X, FU G, LYU Q, et al. Accident case-driven study on the causal modeling and prevention strategies of coal-mine gas-explosion accidents: a systematic analysis of coal-mine accidents in China [J]. *Resources Policy*, 2024, 88: 104425. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104425.
- [2] LI Z, CHEN L, YAN H C, et al. Gas explosions of methane-air mixtures in a large-scale tube [J]. *Fuel*, 2021, 285: 119239. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119239.
- [3] GUO C W, SHAO H, JIANG S G, et al. Effect of low-concentration coal dust on gas explosion propagation law [J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 243–252. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.03.045.
- [4] 贾泉升, 司荣军, 李润之, 等. 初始瓦斯浓度对爆炸温度影响实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(12): 37–42. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.12.006.  
JIA Q S, SI R J, LI R Z, et al. Experimental research on influence of initial gas concentration on explosion temperature [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(12): 37–42. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.12.006.
- [5] 高娜. 初始温度和初始压力对瓦斯爆炸特性的影响研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 38–43.  
GAO N. Study on influence of initial temperature and pressure on gas explosion characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 38–43.
- [6] 李润之, 黄子超, 司荣军. 环境温度对瓦斯爆炸压力及压力上升速率的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(4): 415–419. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)04-0415-05.  
LI R Z, HUANG Z C, SI R J. Influence of environmental temperature on gas explosion pressure and its rise rate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(4): 415–419. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)04-0415-05.
- [7] 高娜, 张延松, 胡毅亭. 温度压力对瓦斯爆炸危险性影响的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(2): 218–223. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0218-06.  
GAO N, ZHANG Y S, HU Y T. Experimental study on gas explosion hazard under different temperatures and pressures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(2): 218–223. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0218-06.
- [8] ZHANG X B, GAO J L, REN J Z, et al. Analysis of the characteristics and influencing factors of gas explosion in heading face [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 8871865. DOI: 10.1155/2020/8871865.
- [9] 赵军凯, 王磊, 滑帅, 等. 瓦斯浓度对瓦斯爆炸影响的数值模拟研究 [J]. *矿业安全与环保*, 2012, 39(4): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4495.2012.04.001.  
ZHAO J K, WANG L, HUA S, et al. Numerical simulation study on effect of gas concentration upon gas explosion [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2012, 39(4): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4495.2012.04.001.
- [10] YE Q, WANG G G X, JIA Z Z, et al. Experimental study on the influence of wall heat effect on gas explosion and its propagation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 118: 392–397. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.02.084.
- [11] 余明高, 陈传东, 王雪燕, 等. 管道内瓦斯非均匀预混火焰传播特性实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1781–1790. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.HZ21.0426.  
YU M G, CHEN C D, WANG X Y, et al. Experimental study on combustion characteristics of non-uniform premixed gas within a pipeline [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1781–1790. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.HZ21.0426.
- [12] 贾智伟, 许胜铭, 景国勋. 瓦斯爆炸冲击波在单向分叉管道内的传播规律试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(12): 51–55. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2015.12.009.  
JIA Z W, XU S M, JING G X. Experimental study on propagation law of gas explosion shock wave in one-way bifurcated pipeline [J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(12): 51–55. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2015.12.009.
- [13] EMAMI S D, RAJABI M, HASSAN C R C, et al. Experimental study on premixed hydrogen/air and hydrogen-methane/air mixtures explosion in 90 degree bend pipeline [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(32): 14115–14120. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.08.056.
- [14] LI Q Z, LIN B Q, DAI H M, et al. Explosion characteristics of  $H_2/CH_4/air$  and  $CH_4/coal\ dust/air$  mixtures [J]. *Powder*

- Technology, 2012, 229: 222–228. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.06.036.
- [15] BLANCHARD R, ARNDT D, GRÄTZ R, et al. Explosions in closed pipes containing baffles and 90 degree bends [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23(2): 253–259. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.09.004.
- [16] EMAMI S D, KASMANI R M, NASERZADEH Z, et al. Experimental study on the flame acceleration of premixed hydrocarbons-hydrogen/air mixtures in tee pipes [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 45: 229–241. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.01.005.
- [17] JING G X, GUO S S, WU Y L. Investigation on methane-air explosion overpressure in bifurcated tubes according to methane concentrations and bifurcation angles [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, 47(7): 1–12. DOI: 10.1080/15567036.2020.1824036.
- [18] 张学博, 高建良, 沈帅帅, 等. 矿井大尺度冲击波传播规律数值模拟研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(4): 676–684. DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.001311.
- ZHANG X B, GAO J L, SHEN S S, et al. Numerical simulation of shock wave propagation law in large-scale mine [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2021, 50(4): 676–684. DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.001311.
- [19] 孟显华, 谢岩森. 甲烷体积分数及巷道结构对甲烷爆炸特性影响研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(S1): 136–142. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.S1.024.
- MENG X H, XIE Y S. Study on influence of methane's volume fraction and roadway structure on methane explosion characteristics [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(S1): 136–142. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.S1.024.
- [20] LIN B Q, GUO C, SUN Y M, et al. Effect of bifurcation on premixed methane-air explosion overpressure in pipes [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 464–470. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.07.011.
- [21] 欧益宏, 李润, 袁广强, 等. 置障条件下半密闭空间油气爆炸特性实验与数值模拟 [J]. *化工学报*, 2017, 68(11): 4437–4444. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170526.
- OU Y H, LI R, YUAN G Q, et al. Experimental and numerical simulation of gasoline-air mixture explosion characteristics in semi-confined space [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(11): 4437–4444. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170526.
- [22] 张增亮, 王昕, 王昊平. 带孔障碍物对管道中可燃气体爆炸特性的影响 [J]. *化工学报*, 2019, 70(11): 4497–4503. DOI: 10.11949/0438-1157.20190469.
- ZHANG Z L, WANG X, WANG H P. Influence of installation of perforated obstacles in pipelines on explosive characteristics of combustible gases [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(11): 4497–4503. DOI: 10.11949/0438-1157.20190469.
- [23] 余明高, 马梓茂, 韩世新, 等. 障碍物阻塞率梯度对甲烷爆炸特性影响研究 [J]. *化工学报*, 2021, 72(10): 5430–5439. DOI: 10.11949/0438-1157.20210525.
- YU M G, MA Z M, HAN S X, et al. Study on influence of obstacle blockage rate gradient on methane explosion characteristics [J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(10): 5430–5439. DOI: 10.11949/0438-1157.20210525.
- [24] 马恒, 陈晓军, 荆德吉. H型通风巷道瓦斯爆炸及泄爆过程模拟研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(1): 45–51. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.01.007.
- MA H, CHEN X J, JING D J. Simulation study on gas explosion and discharge process in H-type ventilation roadway [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(1): 45–51. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.01.007.
- [25] 王维建, 叶青, 贾真真. H型巷道不同聚积范围瓦斯爆炸模型数值模拟研究 [J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(4): 13–18. DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2023.04.003.
- WANG W J, YE Q, JIA Z Z. Numerical simulation of gas explosion model in different accumulation range of H-type roadway [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2023, 50(4): 13–18. DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2023.04.003.
- [26] 叶青, 王维建, 贾真真, 等. H型巷道内采用不同布置方式的双爆源瓦斯爆炸传播特性 [J]. *高压物理学报*, 2024, 38(2): 025201. DOI: 10.11858/gywlx.20230760.
- YE Q, WANG W J, JIA Z Z, et al. Propagation Characteristics of dual explosive sources gas explosion in different arrangements in H-type tunnel [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(2): 025201. DOI: 10.11858/gywlx.20230760.
- [27] 刘佳佳, 张翔, 张翔, 等. Y型通风采煤工作面瓦斯爆炸传播规律模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(8): 085401. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0018.
- LIU J J, ZHANG Y, ZHANG X, et al. Simulation study on propagation characteristics of gas explosion in Y-shaped ventilated coal face [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(8): 085401. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0018.

- [28] 高建良, 吴泽琳, 王文祺, 等. 瓦斯爆炸冲击波在角、并联巷道内传播规律对比研究 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(6): 2494–2499. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.1012.  
GAO J L, WU Z L, WANG W Q, et al. Comparative study on the propagation law of gas explosion shock wave in the diagonal and parallel roadway [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(6): 2494–2499. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.1012.
- [29] 高智慧, 李雨成, 张欢, 等. 瓦斯爆炸在角联通风管网中的传播特性研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(8): 72–78. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.08.011.  
GAO Z H, LI Y C, ZHANG H, et al. Study on propagation characteristics of gas explosion in diagonal ventilation pipe network [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(8): 72–78. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.08.011.
- [30] 张保勇, 崔嘉瑞, 陶金, 等. 不同迎爆面结构的泡沫金属对甲烷气体爆炸传播阻隔性能的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(2): 025402. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0531.  
ZHANG B Y, CUI J R, TAO J, et al. Experimental study on barrier performances of foamed metals with different blast front structures to prevent methane explosion propagation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(2): 025402. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0531.
- [31] CARSON R A, SAHNI O. Study of the relevant geometric parameters of the channel leak method for blast overpressure attenuation for a large caliber cannon [J]. *Computer and Fluids*, 2015, 115: 211–225. DOI: 10.1016/j.compfluid.2015.03.018.
- [32] LIU J J, ZHANG Y, CHEN S Q, et al. Simulation study of gas explosion propagation law in coal mining face with different ventilation modes [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 846500. DOI: 10.3389/fenrg.2022.846500.
- [33] LIU J J, SHEN M Q, CHEN S Q, et al. Influence of roadway cross-section shape on gas explosion shock wave law in U-type ventilation working faces [J]. *Shock and Vibration*, 2021: 5893179. DOI: 10.1155/2021/5893179.
- [34] 洪溢都, 林柏泉, 朱传杰. 开口型管道内瓦斯爆炸冲击波动压的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(2): 198–209. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0198-12.  
HONG Y D, LIN B Q, ZHU C J. Simulation on dynamic pressure of premixed methane/air explosion in open-end pipes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(2): 198–209. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0198-12.
- [35] 张秀华, 张春巍, 段忠东. 基于爆能等效原理大型模爆器燃气爆炸冲击加载的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(1): 80–86. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)01-0080-07.  
ZHANG X H, ZHANG C W, DUAN Z D. Numerical simulation on shock waves generated by explosive mixture gas from large nuclear blast load generator based on equivalent-energy principles [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(1): 80–86. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)01-0080-07.
- [36] 刘伟韬, 穆殿瑞, 杨利, 等. 倾斜煤层底板破坏深度计算方法及主控因素敏感性分析 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 849–859. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0863.  
LIU W T, MU D R, YANG L, et al. Calculation method and main factor sensitivity analysis of inclined coal floor damage depth [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 849–859. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0863.

(责任编辑 张凌云)