

管道煤尘爆炸超压传播动静态耦合模型

程磊^{1,2,3} 孙圆圆¹ 景国勋^{1,2,3} 顾顺豪¹ 高晨静¹ 高怡朵¹

1. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

2. 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 454000

3. 河南理工大学河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室, 河南, 焦作 454003)

摘要: 为了保障煤矿安全生产, 降低煤尘爆炸造成的人员伤亡和经济损失, 对管道中不同浓度的煤尘发生爆炸后的超压传播规律进行了研究。根据煤尘爆炸冲击波与火焰波之间的正反馈机制采用量纲分析法综合考虑影响煤尘爆炸超压传播的动静态因素, 结合实验数据建立了半封闭直线管道内煤尘爆炸超压单向传播的动静态耦合数学模型并对模型进行了验证和综合对比。结果表明: 爆炸混合物能量、测点与爆源距离、煤尘浓度、火焰传播速度、煤尘粒径是影响煤尘爆炸超压传播的主要因素; 煤尘爆炸超压与火焰传播速度正相关, 在进行煤尘爆炸危险性评估时, 应重点关注湍流、障碍物等促进火焰加速的因素; 所建立的动静态耦合模型具有较高的可靠性, 与已有的超压预测方法相比, 操作门槛低且可解析超压动态传播过程, 具备综合优势。

关键词: 煤尘爆炸; 冲击波超压; 火焰波速度; 正反馈机制; 量纲分析法

Static-dynamic coupling model for overpressure propagation in pipeline coal dust explosions

CHENG Lei^{1,2,3}, SUN YuanYuan, JING GuoXun^{1,2,3}, GU ShunHao, GAO ChenJing, GAO YiDuo

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

2. Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production and Clean High-efficiency Utilization Co-established by Province and Ministry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;

3. Henan Key Laboratory of Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

Abstract: To ensure safe production in coal mines and effectively mitigate casualties as well as economic losses caused by coal dust explosions, the overpressure propagation laws following explosions of coal dust with varying concentrations in a pipeline were investigated. Based on the positive feedback mechanism between the shock wave and the flame wave during coal dust explosions in a horizontal pipeline—realized specifically through heating and compression effects, a rigorous dimensional analysis method was employed. This method allowed a comprehensive consideration of a series of dynamic and static factors affecting the overpressure propagation of coal dust explosions, including energy of the explosive coal dust mixture, accumulated volume of the explosive coal dust mixture, pipeline cross-sectional area, hydraulic diameter, distance from the meas-

收稿日期: 2026-02-10; 修回日期: 2026-05-08;

基金项目: 国家自然科学基金深部开采条件下人—环耦合关系与安全性研究(52374196);

第一作者: 程磊(1973—), 男, 博士, 教授. E-mail: chengl@hpu.edu.cn;

通信作者: 孙圆圆(出生年—2002), 女, 硕士研究生. E-mail: 3168806796@qq.com。

uring point to the explosion source, initial air pressure before explosion, air density, coal dust concentration,

flame propagation velocity at the measuring point, coal dust particle size, and pipeline friction coefficient. By incorporating experimental data, a dynamic-static coupling mathematical model was established to describe the unidirectional propagation of overpressure from coal dust explosions in a semi-closed straight pipeline. The model was subsequently validated and subjected to further comprehensive comparisons. The results clearly indicate that the energy of the explosive mixture, the distance between the measuring point and the explosion source, coal dust concentration, flame propagation velocity, and coal dust particle size constitute the main factors influencing the overpressure propagation of coal dust explosions. A strong positive correlation exists between coal dust explosion overpressure and flame propagation velocity. In practical hazard assessments of coal dust explosions, particular attention should be paid to factors that promote flame acceleration, such as turbulence and obstacles. The established dynamic-static coupling model demonstrates high reliability. Compared with existing overpressure prediction methods, this model offers lower operational thresholds and the capability to resolve the dynamic overpressure propagation process, thereby presenting overall comprehensive advantages.

Keywords: Coal dust explosion; Shock wave overpressure; Flame propagation velocity; Positive feedback mechanism; Dimensional analysis

引言

煤尘是重特大煤矿事故的重要诱因，多数重特大煤矿事故均有煤尘的参与^[1]，煤尘的参与会大大增加煤矿井下爆炸事故的威力，造成难以估量的损失。为了推动煤炭行业技术进步，保障煤矿安全，对煤尘爆炸的传播特性进行深入研究变得十分迫切。

针对煤尘爆炸、瓦斯煤尘混合物爆炸冲击波传播特性，已有众多学者展开了研究。景国勋、杨书召^[2]的研究结果表明：煤尘爆炸传播过程中各测点冲击波超压随时间呈现出先“升”后“降”的变化趋势。李庆钊、翟成^[3]的研究结果表明：煤尘的爆炸超压及超压的上升速率，随煤尘浓度增大基本呈先“增加”后“降低”的变化趋势。程磊^[4]、陈卉^[5]先后研究了传播距离、障碍物位置及尺寸对煤尘爆炸冲击波传播规律的影响。景国勋^{[6][7]}、王博^{[8][9]}、高建良^[10]、张学博、温一凡^[11]等采用实验和数值模拟的方法分别研究了煤尘浓度、粒径、障碍物、点火条件、爆炸当量等因素对瓦斯-煤尘爆炸冲击波传播规律的影响机制，张迎新、王佳伟^[12]等还构建了甲烷/煤尘两相体系最大爆炸压力的预测模型，为相关研究提供了有力支撑。

除了探究初始边界条件、点火温度等静态因素对爆炸冲击波的影响外，还有不少学者指出了冲击波与火焰波传播速度这一动态因素之间的关系。黎体发^[13]、王昊平^[14]、刘万光^[15]等学者通过火焰波与冲击波伴生关系的实验和一系列研究指出：火焰波对冲击波的加强有直接影响，火焰波的发展对冲击波的加速十分重要；王文祺^[16]、牛鑫^[17]的研究又指出：冲击波对火焰传播起着正向激励作用。Macek^[18]、王平^[19]、陈雷^[20]、高智慧^[21]、孟亦凡^[22]的研究进一步指出：爆炸传播过程中，冲击波和火焰波之间存在正反馈机制，冲击波与火焰波的相互影响、相互促进。

煤尘爆炸过程较为复杂，虽然大量学者对其传播特性和影响因素进行了研究，指出了冲击波和火焰波在传播过程中的紧密关系，但目前学术界尚没有对其超压传播进行预测的通用公式，且已有的煤尘爆炸冲击波传播特性研究和瓦斯爆炸超压传播公式^{[23][24][25]}在对超压传播的影响因素进行分析研究时，多数从静态因素方面着手进行研究，较少考虑动态因素对超压的影响。本文根据煤尘爆炸冲击波与火焰波之间的正反馈机制，综合考虑动静双重因素，在研究影响超压传播的静态因素的基础上，分析了火焰传播速度这一动态因素与煤尘爆炸超压传播的关系，应用量纲分析法建立了较为全面的管道煤尘爆炸超压传播动静耦合模型。

1 煤尘爆炸冲击波超压传播动静态耦合模型

1.1 超压传播动静态耦合模型数学建模

当煤尘爆炸冲击波在管道中向单一方向传播，影响超压 P 传播的动静态因素分析如下：

(1) 煤尘爆炸混合物能量 E ：

实验中所用煤样为烟煤，利用门捷列夫公式对热值进行估算可得其发热量约为：

$$E_{\text{煤}} = 35 \text{ M J / kg}$$

$$E = E_{\text{煤}} * V * c \quad (1)$$

式中： E ——煤尘爆炸混合物能量； $E_{\text{煤}}$ ——每千克实验煤样完全燃烧放出的热量（ 35 M J / kg ）； V ——煤尘爆炸混合物体积聚量； c ——煤尘浓度。

(2) 煤尘爆炸混合物体积聚量 V 。

(3) 管道截面积 S 、水力直径 d_B ：

$$d_B = \sqrt{4S / \pi} \quad (2)$$

(4) 测点与爆源距离 R 。

(5) 爆炸前空气初始压力 P_0 、密度 ρ_0 ：

$$P_0 = 101300 \text{ Pa}$$

$$\rho_0 = 1.29 \text{ kg / m}^3 \quad (3)$$

(6) 煤尘浓度 c 。

(7) 测点火焰传播速度 v 。

煤尘爆炸超压传播过程中，火焰波波速和冲击波超压之间存在着紧密的正反馈机制并通过具体的加热和压缩机理实现。加热机理由热效应主导，前驱冲击波压缩前方未燃煤尘云，由于这一过程时间尺度极短，热交换效应可以忽略，等效为绝热压缩过程，未燃煤尘云因绝热压缩而温度迅速升高，热解效率增加，挥发分析出增多，同时未燃混合物温度迅速升高，根据阿伦尼乌斯定律，反应速率骤增，火焰传播速度加快。压缩机理由力学效应主导，火焰波在管道内快速放热使已燃气体剧烈膨胀，形成前驱压缩波，随着火焰速度提高，压缩波强度不断增大最终演化为威力巨大的冲击波。火焰波传播规律直接影响着前驱冲击波的强度和传播规律，决定着爆炸破坏程度^[26]，火焰传播速度也是超压传播的影响因素之一。

(8) 煤尘粒径 d 。

(9) 管道摩擦系数 β 。

根据上述影响煤尘爆炸超压传播动静态因素分析结果，建立煤尘爆炸超压 P 单向传播的无量纲关系式：

$$f(P, E, V, S, d_B, R, P_0, \rho_0, c, v, d, \beta) = 0 \quad (4)$$

该式中的变量均包含长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 、质量 $[M]$ 3个基本量纲，应该选择3个量纲互不相关

但包含这三个基本量纲的变量作为核心独立变量^{[23][24][25]}。

$$\left. \begin{aligned} \bar{R} &= [L]^1 [T]^0 [M]^0 \\ \bar{P}_0 &= [L]^{-1} [T]^2 [M]^1 \\ \bar{\rho}_0 &= [L]^{-3} [T]^0 [M]^1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 1 \\ -3 & 0 & 1 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (5)$$

上式中构造的量纲矩阵可逆，则 R, P_0, ρ_0 三个变量互不相关，满足核心独立变量条件，依据各变量间关系构造 π 项，具体如下式所示：

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{P}{R^{x_1} P_0^{y_1} \rho_0^{z_1}} \\ \Rightarrow L^{-1} T^{-2} M^1 &= L^{x_1} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{y_1} (L^{-3} M)^{z_1} \\ \Rightarrow x_1 &= 0, y_1 = 1, z_1 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \pi_2 &= \frac{E}{R^{x_2} P_0^{y_2} \rho_0^{z_2}} \\ \Rightarrow L^2 T^{-2} M^1 &= L^{x_2} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{y_2} (L^{-3} M)^{z_2} \\ \Rightarrow x_2 &= 3, y_2 = 1, z_2 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \pi_3 &= \frac{V}{R^{x_3} P_0^{y_3} \rho_0^{z_3}} \\ \Rightarrow L^3 &= L^{x_3} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{y_3} (L^{-3} M)^{z_3} \\ \Rightarrow x_3 &= 3, y_3 = 0, z_3 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \pi_4 &= \frac{S}{R^{x_4} P_0^{y_4} \rho_0^{z_4}} \\ \Rightarrow L^2 &= L^{x_4} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{y_4} (L^{-3} M)^{z_4} \\ \Rightarrow x_4 &= 2, y_4 = 0, z_4 = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \pi_5 &= \frac{d_B}{R^{x_5} P_0^{y_5} \rho_0^{z_5}} \\ \Rightarrow L &= L^{x_5} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{y_5} (L^{-3} M)^{z_5} \\ \Rightarrow x_5 &= 1, y_5 = 0, z_5 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \pi_6 &= \frac{c}{R^{x_6} P_0^{y_6} \rho_0^{z_6}} \\ \Rightarrow L^{-3} M^1 &= L^{x_6} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{y_6} (L^{-3} M)^{z_6} \\ \Rightarrow x_6 &= 0, y_6 = 0, z_6 = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \pi_7 &= \frac{\nu}{R^{x_7} P_0^{y_7} \rho_0^{z_7}} \\ \Rightarrow L^1 T^{-1} &= L^{x_7} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{y_7} (L^{-3} M)^{z_7} \\ \Rightarrow x_7 &= 0, y_7 = 0.5, z_7 = -0.5 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\pi_8 = \frac{d}{R^{x_8} P_0^{y_8} \rho_0^{z_8}}$$

$$\Rightarrow L^1 = L^{x_8} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{y_8} (L^{-3} M)^{z_8}$$

$$\Rightarrow x_8 = 1, y_8 = 0, z_8 = 0 \quad (13)$$

$$\pi_9 = \beta \quad (14)$$

则无量纲式为:

$$f = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) = \left(\frac{P}{P_0}, \frac{E}{R^3 P_0}, \frac{V}{R^3}, \frac{S}{R^2}, \frac{d_B}{R}, \frac{c}{\rho_0}, \frac{v}{P_0^{0.5} \rho_0^{-0.5}}, \frac{d}{R}, \beta \right) = 0 \quad (15)$$

根据隐函数定理: $f = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) = 0$, 若 $\frac{\partial f}{\partial \pi_1} \neq 0$, 则可将 π_1 表示为其余 π 项的显式函数, 用 f_1 表示此显式函数关系, 即:

$$\pi_1 = \frac{P}{P_0} = f_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) = f_1\left(\frac{E}{R^3 P_0}, \frac{V}{R^3}, \frac{S}{R^2}, \frac{d_B}{R}, \frac{c}{\rho_0}, \frac{v}{P_0^{0.5} \rho_0^{-0.5}}, \frac{d}{R}, \beta\right) \quad (16)$$

P_0, ρ_0 为定值, 再根据各无量纲量之间的关系, 可用新函数关系 g 明确表示为:

$$P = g\left(\frac{E}{R^3}, \frac{V}{R^3}, \frac{S}{R^2}, \frac{d_B}{R}, \frac{d}{R}, \frac{c}{\rho_0}, \frac{v}{P_0^{0.5} \rho_0^{-0.5}}, \beta\right) \quad (17)$$

幂函数天然满足量纲齐次性原理, 且适用于多因素耦合的工程力学问题, 故采用幂函数形式对函数关系进行建模。根据无量纲量的运算性质: 不同无量纲数 π 的乘积、乘方、开方仍为无量纲量,

假设无量纲量 π_1 为其余 π 项的幂乘积, 令:

$$\pi_1 = C \pi_2^{k_1} (\pi_3^{-1})^{k_2} \pi_4^{k_3} (\pi_5^{-1})^{k_4} \pi_6^{k_5} \pi_7^{k_6} \pi_8^{k_7} \pi_9^{k_8} \quad (18)$$

式中: C 为无量纲比例系数, $k_1 \sim k_8$ 为待定幂指数, 其余各值含义同前。

将各无量纲量代入式 (18), 展开并将表达式进行指数归并、系数整合, 将所有常数统一吸收为新的综合系数 A , 耦合后的指数记为 $a_1 \sim a_8$, 最终得:

$$P = A \left(\frac{E}{R^3}\right)^{a_1} \left(\frac{R^3}{V}\right)^{a_2} \left(\frac{S}{R^2}\right)^{a_3} \left(\frac{R}{d_B}\right)^{a_4} (c)^{a_5} (v)^{a_6} \left(\frac{d}{R}\right)^{a_7} (\beta)^{a_8} \quad (19)$$

式中: $A, a_1 \sim a_8$ 为待求参数, 其余各值含义同前。

1.2 超压传播动静耦合模型回归分析

1.2.1 多元线性回归方程建立

将式 (19) 转换为线性模型:

$$\lg P = \lg A + a_1 \lg \left(\frac{E}{R^3} \right) + a_2 \lg \left(\frac{R^3}{V} \right) + a_3 \lg \left(\frac{S}{R^2} \right) + a_4 \lg \left(\frac{R}{d_B} \right) + a_5 \lg (c) + a_6 \lg (v) + a_7 \lg \left(\frac{d}{R} \right) + a_8 \lg (\beta) \quad (20)$$

令：

$$y = \lg P, \quad a = \lg A, \quad x_1 = \lg \frac{E}{R^3}, \quad x_2 = \lg \frac{R^3}{V}$$

$$x_3 = \lg \frac{S}{R^2}, \quad x_4 = \lg \frac{R}{d_B}, \quad x_5 = \lg c, \quad x_6 = \lg v, \quad x_7 = \lg \frac{d}{R}, \quad x_8 = \lg \beta$$

得到多元线性回归方程：

$$y = a + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_7 x_7 + a_8 x_8 \quad (21)$$

1.2.2 数据处理和参数确定

以河南理工大学的管道煤尘爆炸试验数据为基^[27]，测点布置示意图如图 1^[27]所示：

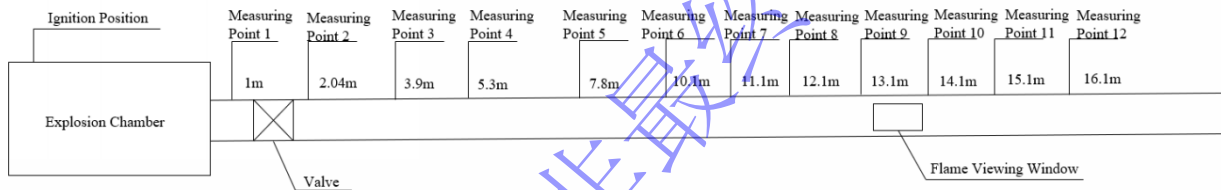


图 1 测点布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring point distribution

当煤尘云的某一局部区域被施加热载荷，部分煤尘受热分解析出可燃性气体，与空气混合燃烧后形成初始火焰核，由于热传导、热对流及热辐射的综合效应，越来越多的煤尘受热分解参与反应，反应面迅速扩张、反应速度陡然增加，最终形成煤尘爆炸。达到煤尘爆炸瞬间，火焰波以及未燃煤尘迅速向管道内传播，同时，已燃部分煤尘云压力剧增，像一个“活塞”一样持续压缩未燃区域煤尘，为未燃煤尘创造了一个更加良好的条件进行燃烧，火焰加速导致已燃区温度升高，后续压缩波波速增大，不断叠加形成激波，也就是“冲击波”。这种情况下，火焰波波阵面与冲击波分离，火焰锋面速度始终低于当地声速，这种类型的爆炸被称为爆燃，相应的火焰波称为爆燃波。爆炸还有一种更猛烈的形式，也就是一爆轰。当冲击波的强度足够大时，火焰波波阵面与冲击波波阵面紧密耦合，并满足自持反应放热条件时，就会形成稳定的爆轰波，爆轰波以超声速传播，波速稳定，对外界扰动的敏感性低于爆燃波。本次所研究的煤尘爆炸实验就涉及了爆燃和爆轰两种爆炸形式，原始实验数据如表 1^[27]、表 2^[27]所示，其中测点火焰传播速度 v 用式 (22) 计算得到，冲击波最大超压由压力传感器测定。

$$v = \frac{L_2}{T_3 - T_1} \quad (22)$$

L_2 —— 该测点前后两个测点处传感器的间距，m；

T_1 —— 火焰到达测点 1 的时刻，s；

T_2 —— 火焰到达测点 3 的时刻，s。

表 1 煤尘爆炸各测点火焰传播速度

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

Table 1 Propagation velocity of each measuring point of coal dust explosion flame

测点位置 R/d _B	NO.1 火焰速度 (m/s)	NO.2 火焰速度 (m/s)	NO.3 火焰速度 (m/s)	NO.4 火焰速度 (m/s)	NO.5 火焰速度 (m/s)	NO.6 火焰速度 (m/s)	NO.7 火焰速度 (m/s)	NO.8 火焰速度 (m/s)	NO.9 火焰速度 (m/s)
11	191	140	170	247	234	308	228	316	264
23	231	186	208	340	404	422	290	341	358
43	236	229	230	374	435	438	324	373	387
59	241	301	264	362	420	398	364	390	404
86	268	312	268	347	409	391	362	366	402
112	305	334	287	335	386	387	353	357	361
123	307	351	336	333	336	377	328	352	307
134	305	342	328	331	316	368	320	347	304
145			323	326	310	364	316	341	303
156			320	322	307	360		335	
167				321		356			

表 2 煤尘爆炸各测点最大压力

Table 2 Maximum pressure of each measuring point of coal dust explosion flame

测点位置 R/d _B	NO.1 超压 (MPa)	NO.2 超压 (MPa)	NO.3 超压 (MPa)	NO.4 超压 (MPa)	NO.5 超压 (MPa)	NO.6 超压 (MPa)	NO.7 超压 (MPa)	NO.8 超压 (MPa)	NO.9 超压 (MPa)
11	0.3812	0.7341	0.3156	0.7627	0.6887	1.0483	0.5112	0.7552	0.7085
23	0.6482	0.7607	0.5236	1.3104	0.8855	1.4577	0.5891	0.8111	0.9604
43	0.8273	0.7147	0.5536	1.7387	1.5242	1.9263	0.9287	1.2554	0.9932
59	0.7609	0.8413	0.6546	1.5712	1.2647	1.5338	1.2819	1.4827	1.1616
86	0.9267	1.2177	0.9253	1.0417	1.4415	1.4413	0.9125	1.1423	0.9871
112	1.0597	1.1034	0.8572	1.2809	1.0117	1.3018	0.7735	1.0116	0.6192
123	1.4357	1.3483	1.1307	1.2493	1.0565	1.2043	0.7618	0.9293	0.5834
134	0.8571	1.1429	0.9714	1.3091	1.0324	1.0326	0.8081	0.8572	0.5202
145	0.7496	1.0293	0.9528	1.2555	0.8556	1.1623	0.6484	0.8863	0.5479
156	0.8092	0.9465	0.9647	1.1012	0.8743	1.0567	0.7208	0.8216	0.5837
167	0.5832	0.7974	0.9205	1.0137	0.7438	1.0593	0.6664	0.7972	0.5477

根据表 1、表 2，得到煤尘爆炸超压传播动静耦合公式回归分析基础数据，如表 3 所示：

表 3 煤尘爆炸超压传播公式回归分析基础数据

Table 3 Basic data for regression analysis of coal dust explosion overpressure propagation formula

y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈
-0.321482	6.034284	1.083816	-2.185090	1.041393	-0.425969	2.222716	-4.126403	-2.045757
-0.190979	5.073278	2.044821	-2.825761	1.361728	-0.425969	2.318752	-4.446739	-2.045757
-0.155834	4.258056	2.860043	-3.369242	1.633468	-0.425969	2.364870	-4.718479	-2.045757
-0.123609	3.845906	3.272194	-3.644009	1.770852	-0.425969	2.429219	-4.855863	-2.045757
0.009961	3.354966	3.763133	-3.971302	1.934498	-0.425969	2.451280	-5.019509	-2.045757
0.002943	3.010808	4.107292	-4.200741	2.049218	-0.425969	2.489494	-5.134229	-2.045757
0.115577	2.888746	4.229353	-4.282115	2.089905	-0.425969	2.520261	-5.174916	-2.045757
-0.004146	2.777147	4.340952	-4.356515	2.127105	-0.425969	2.511883	-5.212116	-2.045757
-0.040672	2.674358	4.443742	-4.425041	2.161368	-0.425969	2.509203	-5.246379	-2.045757
-0.042488	2.579088	4.539011	-4.488554	2.193125	-0.425969	2.505150	-5.278135	-2.045757
-0.079251	6.159222	1.083816	-2.185090	1.041393	-0.301030	2.419956	-4.126403	-2.045757
0.085612	5.198217	2.044821	-2.825761	1.361728	-0.301030	2.589581	-4.446739	-2.045757

0.237971	4.382995	2.860043	-3.369242	1.633468	-0.301030	2.618749	-4.718479	-2.045757
0.163340	3.970844	3.272194	-3.644009	1.770852	-0.301030	2.594757	-4.855863	-2.045757
0.116674	3.479905	3.763133	-3.971302	1.934498	-0.301030	2.582438	-5.019509	-2.045757
0.078493	3.135746	4.107292	-4.200741	2.049218	-0.301030	2.567415	-5.134229	-2.045757
0.068186	3.013685	4.229353	-4.282115	2.089905	-0.301030	2.542415	-5.174916	-2.045757
0.051037	2.902086	4.340952	-4.356515	2.127105	-0.301030	2.529341	-5.212116	-2.045757
0.037865	2.799297	4.443742	-4.425041	2.161368	-0.301030	2.522874	-5.246379	-2.045757
0.004622	2.704027	4.539011	-4.488554	2.193125	-0.301030	2.518079	-5.278135	-2.045757
-0.027381	2.615251	4.627787	-4.547738	2.222716	-0.301030	2.529559	-5.307727	-2.045757
-0.181576	6.256132	1.083816	-2.185090	1.041393	-0.204120	2.430285	-4.126403	-2.045757
-0.104080	5.295127	2.044821	-2.825761	1.361728	-0.204120	2.518079	-4.446739	-2.045757
0.024937	4.479905	2.860034	-3.369242	1.633468	-0.204120	2.557904	-4.718479	-2.045757
0.116840	4.067754	3.272194	-3.644009	1.770852	-0.204120	2.586587	-4.855863	-2.045757
0.006038	3.576815	3.763133	-3.971302	1.934498	-0.204120	2.575961	-5.019509	-2.045757
-0.096151	3.232656	4.107292	-4.200741	2.049218	-0.204120	2.552668	-5.134229	-2.045757
-0.120216	3.110595	4.229353	-4.282115	2.089905	-0.204120	2.517196	-5.174916	-2.045757
-0.137570	2.998996	4.340952	-4.356515	2.127105	-0.204120	2.510102	-5.212116	-2.045757
-0.158515	2.896207	4.443742	-4.425041	2.161368	-0.204120	2.505150	-5.246379	-2.045757
-0.149538	2.800937	4.539011	-4.488554	2.193125	-0.204120	2.525045	-5.278135	-2.045757

本文基于最小二乘法，利用 MATLAB 软件 regress 函数实现多元线性回归分析，最终获得实验数据点 31 个，拟合结果散点图和回归分析结果如图 2、表 4 所示：

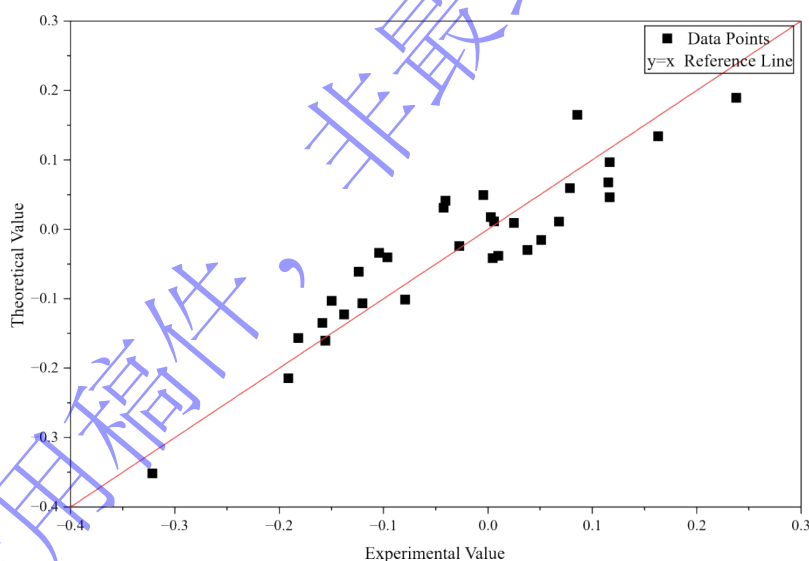


图 2 拟合结果散点图

Fig.2 Scatter plot of fitted results

表 4 回归分析结果

Table 4 Results of the regression analysis

参数	估计值
a	0
a ₁	-0.22124
a ₂	0
a ₃	0
a ₄	0
a ₅	-0.53925

a_6	1.75225
a_7	0.76126
a_8	0

多元线性回归分析拟合优度 $R^2 = 0.8501$ ，相关系数 $R = 0.9220$ 接近 1，回归模型

$y = -0.22124x_1 - 0.53925x_5 + 1.75225x_6 + 0.76126x_7$ 成立，得到管道煤尘爆炸超压的单向传播模型为：

$$P = \left(\frac{E}{R^3}\right)^{-0.22124} (c)^{-0.53925} (v)^{1.75225} \left(\frac{d}{R}\right)^{0.76126} \quad (23)$$

化简可得：

$$P = \frac{v^{1.75225} d^{0.76126}}{E^{0.22124} c^{0.53925} R^{0.09754}} \quad (24)$$

上式表明管道煤尘爆炸超压与火焰传播速度正相关，在进行潜在爆炸危险性评估时，应重点关注湍流、障碍物等促进火焰加速的因素。

必须指出的是，由于煤尘爆炸超压传播过程中多物理因素的天然耦合性导致了多元线性回归分析中自变量的多重共线性，如爆炸混合物能量与煤尘浓度就存在近似线性关系，这进一步导致了 E 、 c 、 d 的符号与理论预期不一致，尽管尝试了岭回归和主成分回归等正则化方法，但共线性问题仍导致系数符号与物理机制不符，后续研究中若具备更完善的实验平台，可进一步拓宽工况范围或引入湍流强度、挥发分析出速率等新的独立物理变量以进一步解释耦合多因素影响，但本研究的核心目标在于建立基于量纲分析的耦合关系式，模型的拟合优度 $R^2 = 0.8501$ 仍表明其整体有效性。

2 模型验证

根据建立的管道煤尘爆炸超压传播数学模型对文献^[28]的煤尘爆炸超压数据进行预测，将爆炸混合物能量、火焰传播速度、煤尘浓度等各项参数代入模型计算超压理论值，将超压的理论值和实验值进行对比计算相对误差并绘制出拟合效果图。

表 5 理论数据和实验数据^[28]

Table 5 Theoretical and experimental data

测点位置 (m)	煤尘浓度 (g/m ³)			实验均值	理论值	相对误差%	煤尘浓度 (g/m ³)			实验均值	理论值	相对误差%
	500	500	500				625	625	625			
1.17	0.154	0.165	0.180	0.1663	0.1331	-19.97	0.219	0.235	0.204	0.2193	0.1500	-31.62
2.16	0.179	0.163	0.192	0.1780	0.2154	21.00	0.262	0.242	0.232	0.2453	0.2018	-17.76
4.77	0.234	0.224	0.197	0.2183	0.2776	27.15	0.328	0.370	0.305	0.3343	0.2436	-27.15
6.30	0.255	0.238	0.223	0.2387	0.3302	38.37	0.454	0.449	0.460	0.4543	0.3437	-24.35
8.64	0.337	0.328	0.350	0.3383	0.3651	7.91	0.393	0.403	0.408	0.4013	0.2556	-36.32
11.25	0.302	0.297	0.291	0.2967	0.3528	18.91	0.321	0.378	0.357	0.3520	0.2129	-39.51
13.95	0.235	0.275	0.258	0.2560	0.2840	10.96	0.335	0.321	0.361	0.3390	0.1372	-59.52
15.75	0.213	0.224	0.253	0.2300	0.1947	-15.35	0.291	0.341	0.358	0.3300	0.0995	-69.86

拟合效果图如图 3 所示

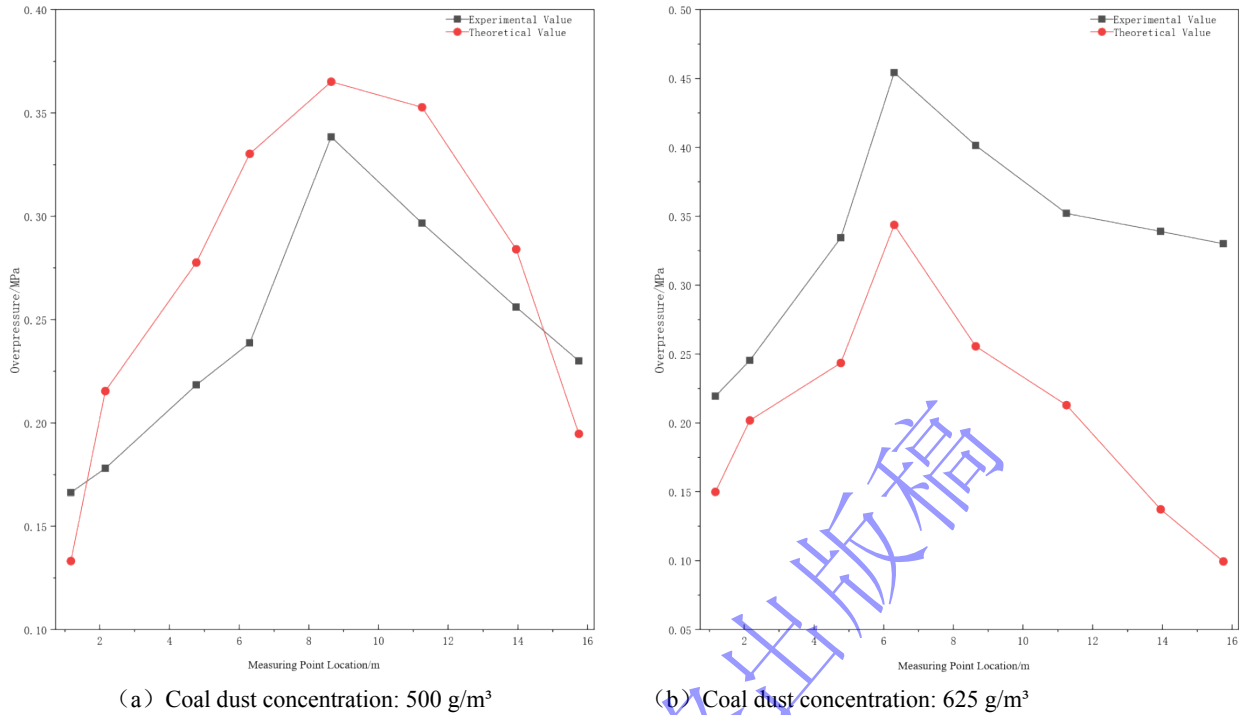


图3 拟合效果图

Fig.3 Fit in effect drawing

从图表中可以看出，随着测点位置的增加，煤尘爆炸超压呈现出“先增加—再减小”的整体趋势。这表明近场区域爆炸波尚未完全发展，煤尘层受冲击波压缩，静态应力快速积累，超压增大；超压达到峰值后，动态扩散逐渐占据主导，冲击波超压逐渐衰减，该趋势与气-固两相爆炸理论一致。本研究建立的煤尘爆炸超压传播模型对煤尘浓度为 500g/m³ 工况下煤尘爆炸超压的预测效果优于 625g/m³，分析认为可能与高浓度下二次扬尘效应或实验条件的微小波动（如：煤尘铺层不均匀）有关。这些因素在高浓度下可能被放大，导致实验值偏高，本模型基于理想化假设，未能包含上述随机效应，但模型总体预测效果较好。

在煤尘浓度为 500g/m³ 工况下的 8 个测点中，有 2 个测点的模型理论值小于实验值，其余测点模型理论值均大于实验值。该工况下，相对误差在测点位置 8.64m 处取最小值 7.91%，在测点位置 6.30m 处取最大值 38.37%。近场测点（1.17m~6.30m）理论值与实验值的相对误差为-19.97%~38.37%，远场测点（8.64m~15.75m）理论值与实验值的相对误差为-15.35%~7.91%，即模型对煤尘浓度 500g/m³ 工况下远场测点超压的预测效果高于近场测点，相对误差也波动较小。在煤尘浓度为 625g/m³ 工况下的 8 个测点理论值均小于实验值，该工况下，相对误差在测点位置 2.16m 处取得最小值-17.76%，在测点位置 15.75m 处取得最大值-69.86%。近场测点（1.17m~6.30m）理论值与实验值的相对误差为-17.76%~-31.62%，远场测点（8.64m~15.75m）理论值与实验值得相对误差为-36.32%~-69.86%，且随着远场测点（8.64m~15.75m）距离的增加相对误差也逐渐增大，相较于远场测点，模型对煤尘浓度 625 g/m³ 工况下近场测点超压的预测效果更好。

总体来看，虽个别数据误差较大，但整体趋势一致，超压理论值与实验值吻合较好，该模型具有较高可靠性。在建立模型时，爆炸混合物能量取值为混合物完全反应释放的能量，但在实际实验过程中由于热传递和实验条件限制，部分能量会以热能等形式散失到周围环境中，导致实际用于做功的能量减少；测点火焰传播速度对超压的影响较大，但在数据处理时，某测点的火焰速度是相邻两个测点距离间的平均速度，这与该测点的实际速度相比有所偏差，导致误差出现。合理推测，若能改进实验获取更为精确的爆炸混合物能量数据和火焰速度数据，相对误差能显著降低。

3 模型综合对比

目前,在对煤尘爆炸超压进行研究时,多采用小型管道实验或者数值模拟等方法获取超压数据,尚未有统一的公式对煤尘爆炸传播过程中各个测点的超压进行预测。在以往学者研究的瓦斯爆炸超压传播模型中,仅仅考虑了爆炸混合物能量、管道截面积、水力直径等静态约束对超压传播的影响,这类模型的本质是忽略时间导数项和对流项,对超压的预测高度依赖于初始和边界条件,无法捕捉超压的动态传播过程,不适用于湍流影响作用下的超压预测^{[23][24][25]}。在已有研究的基础上,本文建立的管道煤尘爆炸超压动静耦合模型通过火焰传播速度这一动态参数间接量化超压传播过程中煤尘分散度变化、挥发分析出速率改变、湍流加剧、气流扰动等因素对超压传播产生的集总影响,通过火焰速度捕获超压随时间和空间传播的动态变化过程,普适性和精确度都有所提升,正是模型的核心优势所在,如表 6 所示:

表 6 超压预测方法综合对比

Table 6 Comprehensive Comparison of Overpressure Prediction Methods

超压预测方法	适用范围	核心原理	对动态因素的处理	超压预测能力
数值模拟(如 Fluent)	煤尘、瓦斯爆炸超压	通过计算机求解描述燃烧化学反应并形成压力波的流体动力学控制方程	引入并耦合一系列物理模型,如 LES 模型、离散相模型等	可以提供详尽的超压时空演化过程,但操作门槛高、计算复杂
管道实验	煤尘、瓦斯爆炸超压	通过小型管道实验直接测定,必要时基于相似性原理进行预测	改变工况条件、改变压力传感器测点的布置,实验周期长、经济成本高	可以提供特定工况条件下特定位置的精确超压数据,但受限於测点布置密度,无法获取详尽数据、经济成本高
瓦斯爆炸超压传播数学模型	瓦斯爆炸超压	基于量纲分析,仅考虑影响瓦斯爆炸超压传播的静态因素,带入公式进行计算		超压预测精度较高,但高度依赖于初始条件、无法捕获超压动态传播过程,湍流影响较大的情况下不适用
管道煤尘爆炸超压传播的动静耦合模型	煤尘爆炸超压	基于量纲分析,综合考虑动静态双重因素,通过公式计算	通过火焰传播速度的变化反应动态演化过程	可解析超压动态传播过程,对超压进行预测,计算简单,可操作性强,精度较高

结论

- (1) 根据煤尘爆炸冲击波与火焰波之间的正反馈机制综合考虑动静态因素,采用量纲分析法建立了半封闭直线管道内煤尘爆炸超压的单向传播动静耦合模型。结果表明:爆炸混合物能量、测点与爆源距离、煤尘浓度、火焰传播速度、煤尘粒径是煤尘爆炸超压传播的主要影响因素,动静态因素共同影响着煤尘爆炸超压的传播,煤尘爆炸超压与火焰传播速度正相关,在实际的井下巷道中,应避免不必要的断面变化、以降低湍流火焰加速风险。
- (2) 模型验证结果表明,预测值与实验值误差较小,可依据管道的相关参数和煤尘爆炸后测点的火焰传播速度对测点超压进行较为可靠的估算。与数值模拟和管道实验等超压预测方式相比,建立的煤尘爆炸超压传播动静耦合模型可捕获超压传播的时空演化过程,通过火焰传播速度这一动态参数来间接量化湍流、气流扰动等因素对超压传播产生的影响,计算简便、操作门槛低。
- (3) 模型对煤尘爆炸超压的预测效果较好,但受限於数学表征模型的简化本质和当前检测技术水平,仍存在以下两点不足之处:首先,由于模型建立过程中多因素的天然耦合性,导致 E 、 c 、 d 的符号与理论预期不一致,模型的解释能力不足;其次,在本模型中,火焰传播速度在实际事故预评估中往往不易获得,因此,在缺乏先验信息时,模型更适用于事故反演与实验分析,而非完全无约束的现场盲预测,在后续研究应探索基于易测参数的火焰传播速度估算公式,以弥补这一局限性。

参考文献

- [1] 王克全. 煤尘与矿井特大爆炸伤亡事故的关系 [J]. 工业安全与防尘, 1998, (1): 25-29.
WANG K Q. Relationship between coal dust and casualties of serious explosion in coal mines [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 1998, (1): 25-29.
- [2] 景国勋, 杨书召. 煤尘爆炸传播特性的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35 (04): 605-608. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2010.04.023.
JING G X, YANG S Z. Experimental study on propagation characteristics of coal dust explosion [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(04): 605-608. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2010.04.023.
- [3] 李庆钊, 翟成, 吴海进, 等. 基于 20L 球形爆炸装置的煤尘爆炸特性研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 119-124. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.s1.031.
LI Q Z, ZHAI C, WU H J, et al. Study on explosion characteristics of coal dust based on 20L spherical explosion apparatus [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 119-124. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.s1.031.
- [4] 程磊, 景国勋, 杨书召. 煤尘爆炸冲击波传播规律及造成的伤害分区研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(03): 257-261. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2011.03.020.
CHENG L, JING G X, YANG S Z. Study on blast wave propagation law of coal dust explosion and its injury division [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2011, 30(03): 257-261. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2011.03.020.
- [5] 陈卉. 角联管网内煤尘爆炸冲击波传播规律研究 [D]. 太原理工大学, 2024. DOI: 10.27352/d.cnki.gylgu.2024.002256.
- [6] 景国勋, 孙跃, 班涛, 等. 非火焰区阻塞板对瓦斯爆炸压力的影响试验 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 312-318. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1205.
JING G X, SUN Y, Ban Tao, et al. Experimental study on the effect of obstruction plates in the non-flame zone on gas explosion pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 312-318. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1205.
- [7] 景国勋, 邵泓源, 吴昱楼, 等. 半封闭管道内瓦斯煤尘爆炸火焰传播特性试验 [J]. 安全与环境学报, 2020, 20(04): 1321-1326. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0424.
JING G X, SHAO H Y, WU Y L, et al. Experiment on the flame propagation characteristics of gas and coal dust explosion in a semi-confined pipe [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(04): 1321-1326. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0424.
- [8] 王博, 苟瑞君, 阚润哲. 煤尘粒径对瓦斯煤尘爆炸的影响研究 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(01): 79-83+89.
WANG B, GOU R J, KAN R Z. Influence of coal dust particle size on gas and coal dust explosion [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2019, 40(01): 79-83+89.
- [9] 王博. 煤矿瓦斯煤尘爆炸冲击波传播的影响因素研究 [D]. 中北大学, 2019.
- [10] 高建良, 梅京兰, 方迎香, 等. 点火条件对瓦斯-煤尘混合爆炸特性影响的数值模拟研究 [J]. 安全与环境学报, 2025, 25(07): 2545-2552. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.1897.
GAO J L, MEI J L, FANG Y X, et al. Numerical simulation study on the influence of ignition conditions on the explosion characteristics of gas-coal dust mixtures [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(07): 2545-2552. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.1897.
- [11] 张学博, 温一凡, 高建良. 不同爆炸条件下瓦斯-煤尘爆炸冲击波传播规律研究 [J]. 工矿自动化, 2025, 51(10): 104-113. DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025090068.
ZHANG X B, WEN Y F, GAO J L. Study on propagation law of gas-coal dust explosion shock wave under different explosion conditions [J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(10): 104-113. DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025090068.

- [12] 张迎新, 王佳伟, 唐露. 甲烷/煤尘混合爆炸及最大爆炸压力的预测模型 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(02): 171-179.
ZHANG Y X, WANG J W, TANG L. Methane/coal dust hybrid explosion and prediction model of maximum explosion pressure [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2024, 34(02): 171-179.
- [13] 黎体发, 张莉聪, 徐景德. 瓦斯爆炸火焰波与冲击波伴生关系的实验研究 [J]. 矿业安全与环保, 2005, (02): 4-6+81.
LI T F, ZHANG L C, XU J D. Experimental Study on the Associated Relationship Between Flame Wave and Shock Wave in Gas Explosion [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2005, (02): 4-6+81.
- [14] 王昊平. 管道内孔板障碍物对可燃气体爆炸特性的影响机制研究 [D]. 青岛科技大学, 2021. DOI: 10.27264/d.cnki.gqdhc.2021.000460.
- [15] 刘万光. 矿井瓦斯爆炸冲击波与通风动力耦合数值模拟 [J]. 煤炭与化工, 2024, 47(05): 102-105. DOI: 10.19286/j.cnki.cci.2024.05.023.
LIU W G. Numerical Simulation of Coupling Between Shock Wave and Ventilation Power in Mine Gas Explosions [J]. Coal and Chemical Industry, 2024, 47(05): 102-105. DOI: 10.19286/j.cnki.cci.2024.05.023.
- [16] 王文祺. 回采工作面瓦斯爆炸风门动态载荷研究 [D]. 河南理工大学, 2021. DOI: 10.27116/d.cnki.gjzgc.2021.000299.
- [17] 牛鑫. 瓦斯-沉积煤尘在复杂管网中爆炸特性研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2021. DOI: 10.27210/d.cnki.glnju.2021.000624.
- [18] Maček A. Transition from deflagration to detonation in cast explosives [J]. The Journal of Chemical Physics, 1959, 31(1): 162-167.
- [19] 王平. 凝聚相炸药燃烧转爆轰的实验研究与数值计算 [D]. 北京: 北京理工大学, 1992.
- [20] 陈雷. 瓦斯爆炸能量分布特征及热冲击破坏作用研究 [D]. 湖南科技大学, 2022. DOI: 10.27738/d.cnki.ghnkd.2022.000925.
- [21] 高智慧. 角联结构管网中瓦斯爆炸动力传播特性研究 [D]. 太原理工大学, 2022. DOI: 10.27352/d.cnki.gylgu.2022.000669.
- [22] 孟亦飞, 董铭鑫, 赵东风, 等. 大尺寸通风管网中障碍物对瓦斯爆炸冲击波传播特性影响的数值模拟 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(02): 99-104.
MENG Y F, DONG M X, ZHAO D F, et al. Numerical Simulation of the Effect of Obstacles on the Propagation Characteristics of Gas Explosion Shock Waves in Large-Scale Ventilation Pipe Networks [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(02): 99-104.
- [23] 许浪. 瓦斯爆炸冲击波衰减规律及安全距离研究 [D]. 中国矿业大学, 2015.
- [24] 程磊, 王蒙, 景国勋, 等. 管道与巷道瓦斯爆炸超压衰减关联模型 [J]. 煤炭学报, 1-13. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2025.00086.
CHENG L, WANG M, JING G X, et al. Correlation model of overpressure attenuation for gas explosion in pipeline and roadway [J]. Journal of China Coal Society, 1-13. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2025.00086.
- [25] 程磊, 王蒙, 景国勋, 等. 瓦斯爆炸超压和冲击气流速度衰减模型 [J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(08): 33-42.
CHENG L, WANG M, JING G X, et al. Attenuation models of overpressure and shock airflow velocity for gas explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(08): 33-42.
- [26] 王大龙, 周心权, 张玉龙, 等. 煤矿瓦斯爆炸火焰波和冲击波传播规律的理论研究与实验分析 [J]. 矿业安全与环保, 2007, (02): 1-3+89.
WANG D L, ZHOU X Q, ZHANG Y L, et al. Theoretical Research and Experimental Analysis on the Propagation Laws of Flame Wave and Shock Wave in Coal Mine Gas Explosions [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, (02): 1-3+89.
- [27] 段振伟. 受限空间煤尘爆炸火焰传播规律研究 [D]. 河南理工大学, 2013.

[28] 杨书召. 受限空间煤尘爆炸传播及伤害模型研究 [D]. 河南理工大学, 2010.

录用稿件，非最终出版稿