

瓦斯爆炸超压和冲击气流速度衰减模型*

程磊^{1,2}, 王蒙¹, 景国勋^{1,2}, 张俊展¹

(1.河南理工大学, 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)

摘要: 为降低瓦斯爆炸对煤矿作业人员和煤炭安全开采的巨大威胁, 对巷道中不同体积的瓦斯-空气混合气体爆炸超压和冲击气流速度随传播距离衰减的规律进行了深入研究。首先, 根据量纲分析法和能量相似律, 综合考虑巷道中瓦斯爆炸超压、冲击气流速度随传播距离衰减的影响因素, 建立了超压和冲击气流速度随传播距离衰减的无量纲式。其次, 对大尺寸巷道中的实验数据进行回归分析, 得到了超压、冲击气流速度的衰减模型及二者之间的关系式。最后, 对所建立的衰减模型和关系式进行验证。结果表明: 混合气体能量、气体积聚量、测点距离、水力直径和巷道截面积是超压、冲击气流速度衰减的主要影响因素; 超压、冲击气流速度均与混合气体聚积量正相关, 起始超压和冲击气流速度越大, 衰减越迅速; 衰减模型理论值与试验值的相对误差及关系式理论值与试验值的相对误差均控制在10%左右, 数据整体吻合度较高, 验证了其可靠性, 能够更简洁直观的描述瓦斯爆炸传播规律, 实现对超压、气流速度的快速计算。

关键词: 瓦斯爆炸; 冲击波超压; 冲击气流速度; 量纲分析法; 衰减规律

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Gas explosion overpressure and impact airflow velocity attenuation model

CHENG Lei^{1,2}, WANG Meng¹, JING Guoxun^{1,2}, ZHANG Junzhan¹

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

2 Henan Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to reduce the great threat of gas explosion to coal mine operators and coal safety mining, the law of explosion overpressure and impact airflow velocity attenuation with the propagation distance of different volumes of gas-air mixed gas in roadway was deeply studied. Firstly, based on dimensional analysis, factors affecting the single-direction propagation attenuation of gas explosion overpressure in roadway were comprehensively considered, such as mixed gas energy, gas accumulation amount, measuring point distance and related parameters of roadway, and a dimensionless formula of single-direction propagation attenuation of gas explosion overpressure in roadway was obtained. Based on the regression analysis of the experimental data of gas explosion overpressure in large-size roadway, the mathematical model of unidirectional overpressure propagation attenuation in roadway was established, and the mathematical model of bidirectional overpressure propagation attenuation in roadway was established according to the law of energy similarity. According to the analysis process of influencing factors of single-direction propagation attenuation of gas explosion overpressure in roadway, a dimensionless formula of single-direction propagation attenuation of impact airflow velocity in roadway was obtained. Through regression analysis of experimental data of gas explosion impact airflow velocity in large-size roadway, a mathematical model of single-direction propagation attenuation of impact airflow

*收稿日期: 2024-04-11; 修回日期: 2024-06-07;

基金项目: 国家自然科学基金—河南联合基金重点资助项目(U1904210);

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

通信作者: 王蒙 (1999—), 女, 硕士. E-mail: 3374889736@qq.com

velocity in roadway was established. According to the law of energy similarity, the mathematical model of the bidirectional propagation attenuation of the impact airflow velocity in the roadway was established. Secondly, according to the establishment process of the mathematical model of the unidirectional and bidirectional propagation attenuation of overpressure and impact airflow velocity in the roadway, the impact airflow velocity was included as one of the influencing factors in the consideration of the unidirectional propagation attenuation of gas explosion overpressure in the roadway in addition to the mixed gas energy, gas accumulation amount, measuring point distance and relevant parameters of the roadway. Based on the energy similarity law, the overpressure - airflow velocity relation of overpressure propagation attenuation in roadway was established. According to the establishment process of the overpressure - airflow velocity relation of the single and bidirectional propagation attenuation of gas explosion overpressure in roadway, the airflow velocity relation of the single and bidirectional propagation attenuation of the impact airflow velocity in roadway was established. Finally, the attenuation model and the mathematical relationship between overpressure and impact airflow velocity were verified. The results show that the energy of gas mixture, gas accumulation amount, the distance of measuring point, the hydraulic diameter and the cross-sectional area of roadway are the main factors affecting the attenuation of overpressure and impact airflow velocity. Both overpressure and impact airflow velocity are positively correlated with the amount of mixed gas accumulation. The greater the initial overpressure and impact airflow velocity, the faster the attenuation. The relative errors between the theoretical value and the test value of the attenuation model and the relative errors between the theoretical value and the test value of the relation are controlled at about 10%, and the overall consistency of the data is high, which verifies the reliability of the model and the mathematical relation, and can describe the law of gas explosion propagation more simply and intuitively, and realize the rapid calculation of overpressure and impact airflow velocity.

Keywords: gas explosion; impact wave overpressure; impact airflow velocity; dimensional analysis; attenuation law

近年来,随着煤矿开采深度的不断增加,煤矿瓦斯抽采工作难度和易燃气体浓度超标风险也相应增加,导致瓦斯爆炸事故风险较高,而爆炸产生的超压和冲击气流往往会造成人员伤亡。因此对于瓦斯爆炸超压和冲击气流传播规律的研究变得尤为重要。

在爆炸超压传播规律的研究方面,徐景德^[1]研究了参与爆炸的瓦斯量、瓦斯气体浓度和火源个数及分布位置对瓦斯爆炸传播规律的影响;朱云飞等^[2]和罗振敏等^[3]研究了瓦斯气体浓度等特征参数、通风条件的改变对瓦斯爆炸传播规律的影响;高智慧等^[4]研究了角联网络结构中的瓦斯爆炸传播特性,证明了角联网络对冲击波超压的衰减作用大于并联网络对超压的衰减作用。随着机器学习的迅速发展,Qiming等^[5]通过气体种类、浓度等特征参数,利用机器学习技术预测瓦斯爆炸超压。程磊等^[6]和曲志明等^[7]研究发现爆炸冲击波波阵面上的最大超压与传播距离和巷道断面积的平方根成反比,与瓦斯的初始爆炸能量的平方根成正比;Jiang等^[8]和刘佳佳等^[9]研究了爆炸超压与传播距离之间的关系,张强等^[10]推导了理想状态下超压与传播距离之间的关系方程。程五一等^[11]分析得到爆炸超压与煤层瓦斯压力存在非线性关系、与突出强度存在线性关系。Baker^[12]、Henrych^[13]和M.A.Sadovakyi^[14]拟合了超压经验公式,并有学者对部分经验公式进行了修正^{[15],[16]}。在爆炸超压的传播规律方面进行了大量研究,但基于主要影响因素建立衰减模型的研究较少。

在爆炸冲击气流传播规律的研究方面,Florea^[17]通过实验验证了气体爆炸事件的真实动力学效应;许浪^[18]分析瓦斯爆炸冲击气流在巷道中衰减的影响因素建立了冲击气流衰减模型;杨书召等^[19]采用理论推导的方法建立了冲击气流衰减模型;吴爱军等^[20]分析得到了瓦斯爆炸超压与冲击气流、突出的膨胀能量成正比,与通风巷道的截面面积呈反比的关系。上述研究主要是对超压、气流速度的传播规律进行研究,但从超压、冲击气流速度传播过程衰减影响因素出发建立传播规律的数学模型和超压与冲击气流速度之间关系式的研究较少。

本文采用量纲分析法和能量相似律,通过分析巷道中瓦斯爆炸超压和气流速度随传播距离衰减的影响因素,建立不同体积的瓦斯-空气混合气体爆炸超压和冲击气流随距离衰减的数学模型,同理建立超压与冲击气流速度之间的关系式。本文提出的模型和关系式能够更简洁、直观地表达超压、冲击

气流速度随距离衰减的规律，实现巷道内超压、冲击气流速度的快速计算。

1 瓦斯爆炸冲击波超压衰减模型

1.1 超压衰减模型物理建模

当瓦斯爆炸超压在巷道中单一方向传播，衰减影响因素分析如下：

(1) 爆炸混合物能量 E ：

$$E = E_{CH_4} \times c_{CH_4} \times \rho_{CH_4} \times V \quad (1)$$

式中： E ——爆炸混合物能量； E_{CH_4} ——每千克瓦斯完全燃烧放出的热量（55MJ/kg）^[15]；

c_{CH_4} ——瓦斯体积浓度； ρ_{CH_4} ——瓦斯密度； V ——混合气体积聚量。

(2) 爆炸混合气体积聚量 V 。

(3) 巷道截面积 S 和水力直径 d_B ：

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

(4) 测点与爆源距离 R 。

(5) 爆炸前空气初始状态参数 P_0 、 ρ_0 ：

$$\begin{aligned} P_0 &= 10^5 \text{ Pa} \\ \rho_0 &= 1.29 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (3)$$

(6) 巷道粗糙系数 β ，取值见表 1、2^[18]。

表 1 巷道有支护情况下粗糙系数值

Table 1 Roughness coefficient value of roadway with support

巷道情况（有支护）		粗糙性系数	
巷道断面形状	巷道特点	支护情况	
		取值范围	
圆形	巷道通常较为流线型、表面相对光滑	混凝土衬砌或者钢拱架	0.015-0.02
方形	巷道可能需要额外支护、角部容易产生应力集中	混凝土衬砌、钢拱架以及地层锚杆	0.03-0.04
梯形	巷道可能需要考虑上底和下底之间的高度差	混凝土衬砌、钢拱架以及局部性的加固措施	0.02-0.04
半圆形	巷道相对较为流线型、表面相对光滑	混凝土衬砌或者钢拱架	0.015-0.02
三心	巷道形状相对复杂	根据实际情况采用不同的加固措施，如钢拱架、锚杆等	0.03-0.05

表 2 巷道无支护情况下粗糙系数值

Table 2 Roughness coefficient value of roadway without support

巷道情况（无支护）		粗糙性系数
不同巷道断面形状及特点	掘进方式	取值范围
①圆形：岩石稳定的情况下常见，有助于均匀分布应力，减小对岩石的影响	沿岩石走向掘进	0.016-0.02
②椭圆形：适用于一些需要调整巷道高度和宽度比例的情况	垂直岩石走向掘进：	0.033-0.038
③方形或矩形：在一些隧道工程中常见，易于设计和施工，同时能够提供相对均匀的应力分布	与岩石崩落方向相反	

④梯形：某些特殊情况下使用，以满足特定的工程设计或采矿要求	与岩石崩落方向一致	0.022-0.028
⑤其他不规则形状：根据实际需要，以适应具体的地质和工程要求	具有不平的底板和溜口的巷道	0.05-0.065

1.2 超压衰减模型物理建模

根据分析得到的巷道内超压衰减影响因素，建立瓦斯爆炸超压随距离单向衰减的无量纲式为：

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

式(4)中9个变量中包含长度[L]、时间[T]、质量[M]3个基本量纲，所以应选择3个变量作为独立变量，且应满足各变量的量纲不同并包含全部基本量纲^[22]。本文所建立的超压衰减模型，主要在已知巷道相关参数的情况下，实现对某一测点超压的快速计算。因此，计算R、P₀、ρ₀3个变量的量纲指数行列式如下：

$$\left. \begin{array}{l} \dim R = [L]^1 [T]^0 [M]^0 \\ \dim P_0 = [L]^{-1} [T]^{-2} [M]^1 \\ \dim \rho_0 = [L]^{-3} [T]^0 [M]^1 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 1 \\ -3 & 0 & 1 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (5)$$

式中：[L]、[T]、[M]分别为长度、时间和质量三个基本量纲。

由式(5)可知，R、P₀、ρ₀3个变量相互独立，依据各物理量间关系列出6个（n-3=9-3=6）无量纲π值，依据量纲一致性原理，确定除β（β为无量纲量）外各π项指数，具体如式(6)~(10)所示：

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{P}{R^{a_1} P_0^{b_1} \rho_0^{c_1}} \\ &\Rightarrow L^{-1} T^{-2} M^1 = L^{a_1} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{b_1} (L^{-3} M)^{c_1} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow a_1 = 0, b_1 = 1, c_1 = 0 \\ \pi_2 &= \frac{E}{R^{a_2} P_0^{b_2} \rho_0^{c_2}} \\ &\Rightarrow L^2 T^{-2} M^1 = L^{a_2} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{b_2} (L^{-3} M)^{c_2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow a_2 = 3, b_2 = 1, c_2 = 0 \\ \pi_3 &= \frac{V}{R^{a_3} P_0^{b_3} \rho_0^{c_3}} \\ &\Rightarrow L^3 = L^{a_3} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{b_3} (L^{-3} M)^{c_3} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow a_3 = 3, b_3 = 0, c_3 = 0 \\ \pi_4 &= \frac{S}{R^{a_4} P_0^{b_4} \rho_0^{c_4}} \\ &\Rightarrow L^2 = L^{a_4} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{b_4} (L^{-3} M)^{c_4} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Rightarrow a_4 = 2, b_4 = 0, c_4 = 0$$

$$\begin{aligned}\pi_5 &= \frac{d_B}{R^{a_5} P_0^{b_5} \rho_0^{c_5}} \\ \Rightarrow L &= L^{a_5} (L^{-1} T^{-2} M^1)^{b_5} (L^{-3} M)^{c_5} \\ \Rightarrow a_5 &= 1, b_5 = 0, c_5 = 0\end{aligned}\quad (10)$$

粗糙性系数 $\pi_6 = \beta$ ，则无量纲式为：

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = f\left(\frac{P}{P_0}, \frac{E}{R^3 P_0}, \frac{V}{R^3}, \frac{S}{R^2}, \frac{d_B}{R}, \beta\right) = 0 \quad (11)$$

根据各无量纲量之间的关系，可明确表示为：

$$\frac{P}{P_0} = f\left(\frac{E}{R^3 P_0}, \frac{V}{R^3}, \frac{S}{R^2}, \frac{d_B}{R}, \beta\right) \quad (12)$$

井巷中瓦斯爆炸的相似条件为无量纲量，因此 $\left(\frac{E}{R^3 P_0}\right)$ 、 $\left(\frac{V}{R^3}\right)$ 、 $\left(\frac{S}{R^2}\right)$ 、 $\left(\frac{d_B}{R}\right)$ 对应相等，超压

P 和初始大气压 P_0 相等，且 P_0 、 ρ_0 为定值，可简写为：

$$P = f\left(\frac{E}{R^3}, \frac{V}{R^3}, \frac{S}{R^2}, \frac{d_B}{R}, \beta\right) \quad (13)$$

不同无量纲数 π 的乘积和乘方仍为无量纲数，令^[23]：

$$\pi_1 = \pi_2 \pi_3^{-1} \pi_4 \pi_5^{-2} \pi_6 = \left(\frac{E}{R^3}\right) \left(\frac{R^3}{V}\right) \left(\frac{S}{R^2}\right) \left(\frac{R^2}{d_B^2}\right) (\beta) \quad (14)$$

由式 (4) ~ (10) 各项之间的函数关系，按泰勒指数展开得：

$$P = A \left(\frac{E}{R^3}\right)^{a_1} \left(\frac{R^3}{V}\right)^{a_2} \left(\frac{S}{R^2}\right)^{a_3} \left(\frac{R^2}{d_B^2}\right)^{a_4} (\beta)^{a_5} \quad (15)$$

式中： A 、 $a_1 \sim a_5$ 分别为待求参数，其余各值含义同前。

1.3 冲击波超压衰减模型回归分析

将式 (15) 两边取对数，转换为线性模型：

$$\log P = \log A + a_1 \cdot \log\left(\frac{E}{R^3}\right) + a_2 \cdot \log\left(\frac{R^3}{V}\right) + a_3 \cdot \log\left(\frac{S}{R^2}\right) + a_4 \cdot \log\left(\frac{R^2}{d_B^2}\right) + a_5 \cdot \log(\beta) \quad (16)$$

令：

$$y = \log P, \quad a = \log A \quad x_1 = \log\left(\frac{E}{R^3}\right) \quad x_2 = \log\left(\frac{R^3}{V}\right) \quad x_3 = \log\left(\frac{S}{R^2}\right) \quad x_4 = \log\left(\frac{R^2}{d_B^2}\right) \quad x_5 = \log(\beta)$$

则得到的多元线性回归方程为：

$$y = a + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 \quad (17)$$

式中： a 为回归方程中的常数项，其余各值含义同前。

以重庆煤科院巷道试验数据为基^{[18][15]}，试验巷道断面 7.2 m²、长 896 m，半圆拱形大尺寸有支护巷道。巷道相对较为流线型、表面相对光滑，粗糙系数在 0.015~0.02 范围内取值，瓦斯浓度为 9.5%，分别进行瓦斯空气混合体积 100、200 m³ 的爆炸试验，原始试验数据如表 3、4 所示。

表 3 瓦斯爆炸超压原始试验数据

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

Table 3 The original experiment data of overpressure in gas explosion (KPa)

距离 R/m 体积/m ³		30	40	60	80	100	120	140	160
100	NO.1	171	180	136	167	151	139	128	118
	NO.2	167	168	163	145	137	131	129	126
	NO.3	159	161	163	130	125	138	130	121
200	NO.1	295	288	286	269	261	258	250	237
	NO.2	324	311	302	284	270	261	256	249
	NO.3	308	285	265	264	255	248	243	242

表 4 瓦斯爆炸气流速度原始试验数据

Table 4 The original experiment data of impact airflow in gas explosion (m/s)

距离 R/m 体积/m ³		30	40	60	80	100	120	140	160
100	NO.1	292.6	236.2	203	194.5	174.6	173.2	149.1	125
	NO.2	298	258.1	239.1	198	166.2	154.2	130.1	115.2
	NO.3	294.9	287.8	297.6	173.6	164.6	141.5	144.2	134.6
200	NO.1	491	377.9	270.9	239.4	219.7	202.5	182.3	174.5
	NO.2	450.6	361.5	268.8	246.2	222.2	219.7	202.1	179.7
	NO.3	427.9	309.6	299.7	257.3	227.5	215	108.8	166

由 1.1 节计算 100、200 m³ 混合气体爆炸能量 E 分别为 $3.55 \times 10^7 \text{ J}$ 、 $7.11 \times 10^7 \text{ J}$ ，水力直径 $d_B = \sqrt{4 \times 7.2 / \pi}$ ，据式 (17) 将表 3 数据整理得到超压衰减公式回归分析基础数据，如表 5 所示。

表 5 超压衰减公式回归分析基础数据

Table 5 The basic data of regression analysis on overpressure attenuation model

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
3.1192	2.4314	-2.0969	1.0298	-1.7570	2.2330
2.7444	2.8062	-2.3468	1.2796	-1.7570	2.2553
2.2161	3.3345	-2.6990	1.6318	-1.7570	2.1335
1.8413	3.7093	-2.9488	1.8817	-1.5570	2.2227
1.5506	4.0000	-3.1427	2.0755	-1.7570	2.1790
1.3131	4.2375	-3.3010	2.2339	-1.7570	2.1430
1.1122	4.4384	-3.4349	2.3678	-1.7570	2.1072
0.9382	4.6124	-3.5509	2.4838	-1.7570	2.0719
3.1192	2.4314	-2.0969	1.0298	-1.7570	2.2227
2.2161	3.3345	-2.6990	1.2796	-1.7570	2.2122
1.8413	3.7093	-2.9488	1.6318	-1.7570	2.1139
1.5506	4.0000	-3.142	1.8817	-1.7570	2.0969
1.3131	4.2375	-3.3010	2.0755	-1.7570	2.1399
1.1122	4.4384	-3.4349	2.2339	-1.7570	2.1139
0.9382	4.6124	-3.5509	2.3678	-1.7450	2.0828
3.4203	2.1303	-2.0969	2.4838	-1.7570	2.4698
3.0454	2.5051	-2.3468	1.0298	-1.7570	2.4595
2.5172	3.0334	-2.6990	1.2796	-1.7570	2.4564
2.1424	3.4082	-2.9488	1.6318	-1.7570	2.4298
1.8516	3.6990	-3.1427	1.8817	-1.7550	2.4166
1.6141	3.9365	-3.3010	2.0755	-1.7570	2.4116
1.4132	4.134	-4.4349	2.2339	-1.7570	2.3979
1.2393	4.3113	-3.5509	2.3678	-1.7570	2.3747
3.4203	2.1303	-2.0969	2.4838	-1.7570	2.5105

表 5 超压衰减公式回归分析基础数据 (续表)

Table 5 The basic data of regression analysis on overpressure attenuation model (continued table)

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
3.0454	2.5051	-2.3468	1.0298	-1.7570	2.4928
2.5172	3.0334	-2.6690	1.2796	-1.7447	2.4800
2.1424	3.4082	-2.9488	1.6318	-1.7570	2.4533
1.8516	3.6990	-3.1427	1.8817	-1.7570	2.4314
1.6141	3.9365	-3.3010	2.0755	-1.7570	2.4166
1.4132	4.1374	-3.4349	2.2339	-1.7570	2.4082
1.2393	4.3113	-3.5509	2.3678	-1.7570	2.3962
3.4203	2.1303	-2.0969	2.4838	-1.7570	2.4886
3.0454	2.5051	-2.3468	1.0298	-1.7570	2.4548
2.5172	3.0334	-2.6990	1.2796	-1.7570	2.4232
2.1424	3.4082	-2.9488	1.6318	-1.7570	2.4216
1.8516	3.6990	-3.1427	1.8817	-1.7570	2.4065

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

1.6141	3.9365	-3.3010	2.0755	-1.7570	2.4065
1.4132	4.1374	-3.4349	2.2339	-1.7570	2.3856
1.2393	4.3113	-3.5509	2.3678	-1.7570	2.3838

本文通过 regress 函数实现超压衰减公式回归分析基础数据的多元线性回归分析，通过残差图寻找异常点（残差的置信区间不包括 0 的数据点）进行剔除，直至残差图上所有的置信区间均包括 0 为止，残差图如图 1 所示：

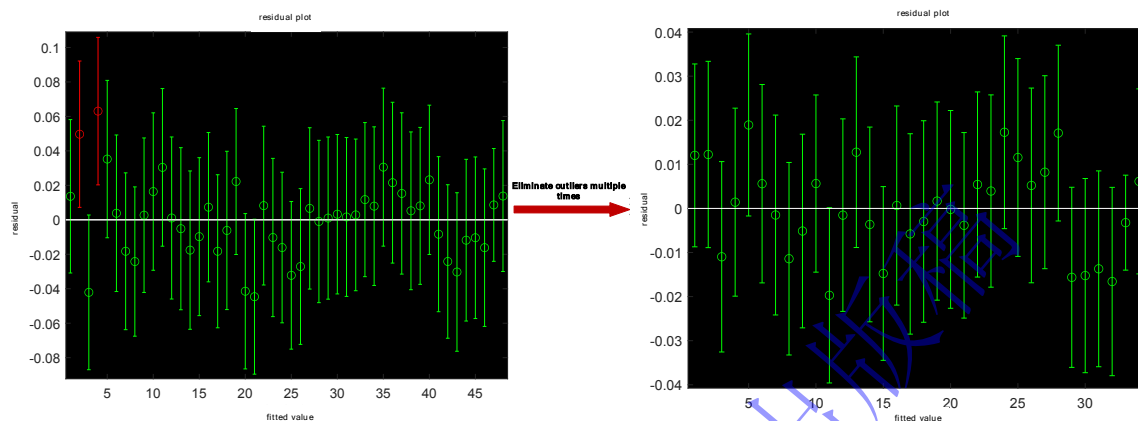


图 1 超压回归模型残差图分析

Fig.1 Residual diagram analysis of overpressure regression model

最终获得的回归模型共包含实验数据点 34 个，各参数估计值如下：

$$a = 0, a_1 = 0.5618, a_2 = -0.3468, a_3 = 0, a_4 = 1.2805, a_5 = 0$$

a 、 $a_1 \sim a_5$ 的置信区间分别为 $[0 \ 0]$ ， $[0.5539 \ 0.5697]$ ， $[-0.3873 \ -0.3062]$ ， $[0 \ 0]$ ， $[1.2094$

$1.3515]$ ， $[0 \ 0]$ ，相关系数 $R_1=0.9841$ 接近 1，故回归模型 $y = 0.56x_1 - 0.35x_2 + 1.28x_4$ 成立，得到

巷道中爆炸超压的单向衰减模型为：

$$P = \left(\frac{E}{R^3} \right)^{0.56} \left(\frac{R^3}{V} \right)^{-0.35} \left(\frac{R^2}{d_B^2} \right)^{1.28} \quad (18)$$

1.4 冲击波超压衰减模型验证

利用煤炭科学研究总院重庆研究院进行的大巷道纯瓦斯爆炸实验数据对式 (18) 进行验证，将气体体积聚量、测点距离等代入式 (18)，将理论值与试验值进行对比分析并计算了相对误差，以验证所推公式的可靠性和准确性，结果见表 6 和图 2^[18]。通过表 6 可知，超压与混合气体聚积量正相关，公式理论值与试验平均值间的相对误差控制在 10% 以内；图 2 (a) 中，由于试验系统等因素影响导致 3 组重复性试验数据间波动幅度较大，但曲线整体趋势一致，拟合曲线与试验值曲线吻合度较高。

表 6 瓦斯爆炸超压理论数据和试验数据

Table 6 The theoretical data and experimental data of overpressure in gas explosion (KPa)

距离 R/m		10	30	40	60	80	100	120	140	160
100	NO.1	120	171	180	136	167	151	139	128	118
	NO.2	160	167	168	163	145	137	131	129	126
	NO.3	156	159	161	163	130	125	138	130	121
试验平均值		145.3	165.7	169.7	154	147.3	137.7	136	129	121.7
公式理论值		167.2	163.6	155.8	145.4	138.5	133.3	129.3	125.9	123.1
相对误差 (%)		9.8	-1.3	-8.1	5.6	6.0	-3.2	-5.0	-2.4	1.2
NO.1		423	295	288	286	269	261	258	250	237

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

200	NO.2	450	324	311	302	284	270	261	256	249
	NO.3	350	308	285	265	264	255	248	243	242
试验平均值		407.7	309	294.7	284.3	272.3	262	255.7	249.7	242.7
公式理论值		370.6	307.5	292.8	273.3	260.3	250.6	242.9	236.6	231.3
相对误差 (%)		-9.1	-0.5	-0.6	-3.9	-4.4	-4.4	-5.0	-5.3	-4.7

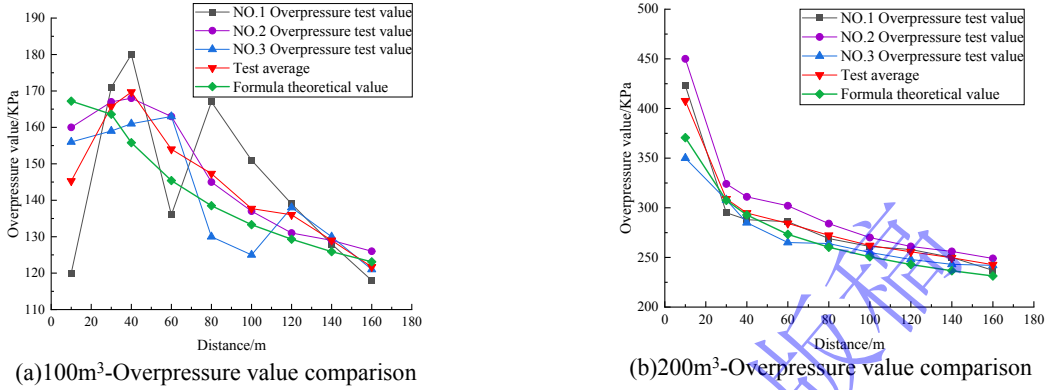


图 2 超压理论数据和试验数据对比

Fig.2 The comparison of overpressure for the gas explosion theoretical and experimental data

利用能量相似律 [Error! Reference source not found.](#), 爆炸超压在巷道中双向传播时, 则有 $E' = E / 2$ (E' 为双向传播的爆炸能量), 代入式 (18), 得到瓦斯爆炸超压随距离双向衰减的模型为:

$$P = 0.7 \cdot \left(\frac{E}{R^3} \right)^{0.56} \left(\frac{R^3}{V} \right)^{-0.35} \left(\frac{R^2}{d_B^2} \right)^{1.28} \quad (19)$$

2 瓦斯爆炸冲击气流速度衰减模型

2.1 气流速度衰减模型物理建模

上述研究分别得到了瓦斯爆炸超压的单、双向衰减模型, 建立冲击气流速度随传播距离衰减的无量纲式为:

$$\frac{u}{\sqrt{P_0 / \rho_0}} = \xi \left(\frac{E}{P_0 R^3}, \frac{R^3}{V}, \frac{S}{R^2}, \frac{d_B}{R}, \beta \right) \quad (20)$$

式中: u 为气流速度, 其余各值含义同前。

类比超压的衰减模型, 上式可进一步变化为:

$$u = B \left(\frac{E}{R^3} \right)^{b_1} \left(\frac{R^3}{V} \right)^{b_2} \left(\frac{S}{R^2} \right)^{b_3} \left(\frac{R^2}{d_B^2} \right)^{b_4} (\beta)^{b_5} \quad (21)$$

式中: B 、 $b_1 \sim b_5$ 分别为待求参数, 其余各值含义同前。

通过表 4 实验数据, 计算得到冲击气流速度随距离单向衰减的模型为:

$$u = \left(\frac{E}{R^3} \right)^{0.49} \left(\frac{R^3}{V} \right)^{0.041} \left(\frac{S}{R^2} \right)^{-0.41} \quad (22)$$

2.2 气流速度衰减模型验证

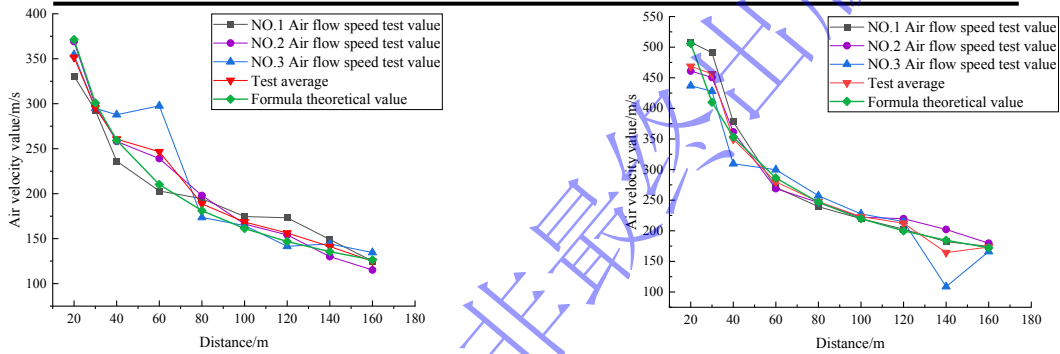
类比式 (18) 的验证过程, 验证式 (22), 将理论值与其他试验值进行对比分析并计算相对误差, 以验证所推公式的可靠性和准确性, 结果见表 7 和图 3。通过表 7 可知, 冲击气流速度与混合气体聚

积量正相关；理论值与试验平均值的相对误差均控制在 10%左右，总体数据吻合度较高，说明式 (18)、(22) 均具有可靠性。

表 7 瓦斯爆炸气流速度理论数据和试验数据

Table 7 The theoretical data and experimental data of impact airflow in gas explosion (m/s)

距离 R/m	20	30	40	60	80	100	120	140	160	
体积/m ³										
100	NO.1	330.7	292.6	236.2	203	194.5	174.6	173.2	149.1	125
	NO.2	369.1	298	258.1	239.1	198	166.2	154.2	130.1	115.2
	NO.3	354.6	294.9	287.8	297.6	173.6	164.6	141.5	144.2	134.6
	试验平均值	351.5	295.2	260.7	246.6	188.7	168.5	156.3	141.3	124.9
公式理论值	371.3	300.9	259.3	210.2	181.1	161.3	146.8	135.5	126.4	
相对误差 (%)	5.6	1.9	-0.5	-14.8	-4.0	-4.3	-6.1	-4.1	1.2	
200	NO.1	508	491	377.9	270.9	239.4	219.7	202.5	182.3	174.5
	NO.2	461	450.6	361.5	268.8	246.2	222.2	219.7	202.1	179.7
	NO.3	437	427.9	309.6	299.7	257.3	227.5	215	108.8	166
	试验平均值	468.7	456.5	349.7	279.8	247.6	223.1	212.4	164.4	173.4
公式理论值	505.8	410.0	353.2	286.3	246.7	219.7	199.9	184.6	172.2	
相对误差 (%)	7.9	-10.2	1.0	2.3	-0.4	-1.5	-5.9	12.3	-0.7	



(a)100m³-Comparison of airflow velocity values (b)200m³-Comparison of airflow velocity values

图 3 气流速度理论数值和试验数据对比

Fig.3 Comparison of theoretical values and experimental data of airflow velocity

类比式 (19)，冲击气流速度双向衰减模型为：

$$u = 0.7 \cdot \left(\frac{E}{R^3}\right)^{0.49} \left(\frac{R^3}{V}\right)^{0.041} \left(\frac{S}{R^2}\right)^{-0.41} \quad (23)$$

3 超压与气流速度关系式推导

3.1 超压-气流速度关系式推导

当瓦斯爆炸发生时，空气流速与压力（超压）之间存在密切关系，研究这一关系对于深入了解和预防瓦斯爆炸具有关键意义。

伯努利定律描述了空气流速与压力的关系，然而，伯努利定律未考虑瓦斯爆炸过程中激波的产生和非等温过程。因此，在推导超压和气流速度随距离衰减模型的基础上，建立超压-冲击气流速度关系式，过程如下：

由 1.1 节，外加冲击气流速度 u 的无量纲式为：

$$\varphi \left(\frac{P}{P_0}, \frac{E}{R^3 P_0}, \frac{V}{R^3}, \frac{S}{R^2}, \frac{d_B}{R}, \frac{u}{\sqrt{P_0/\rho_0}}, \beta \right) = 0 \quad (24)$$

非线性模型为：

$$P = C \left(\frac{E}{R^3} \right)^{c_1} \left(\frac{R^3}{V} \right)^{c_2} \left(\frac{S}{R^2} \right)^{c_3} \left(\frac{R^2}{d_B^2} \right)^{c_4} (u)^{c_5} (\beta)^{c_6} \quad (25)$$

式中： C 、 $c_1 \sim c_6$ 为待求系数，其余各值含义同前。

将式(25)两边取对数，转换为线性模型，可得：

$$\begin{aligned} \log P = \log C + c_1 \cdot \log \left(\frac{E}{R^3} \right) + c_2 \cdot \log \left(\frac{R^3}{V} \right) + c_3 \cdot \log \left(\frac{S}{R^2} \right) \\ + c_4 \cdot \log \left(\frac{R^2}{d_B^2} \right) + c_5 \cdot \log(u) + c_6 \cdot \log(\beta) \end{aligned} \quad (26)$$

令：

$$\begin{aligned} y = \log P, \quad \epsilon = \log C \quad x_1 = \log \left(\frac{E}{R^3} \right) \quad x_2 = \log \left(\frac{R^3}{V} \right) \\ x_3 = \log \left(\frac{S}{R^2} \right), \quad x_4 = \log \left(\frac{R^2}{d_B^2} \right) \quad x_5 = \log(u) \quad x_6 = \log(\beta) \end{aligned}$$

则多元线性回归方程为：

$$y = c + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4 + c_5 x_5 + c_6 x_6 \quad (27)$$

式中： c 为回归方程中的常数项，其余各值含义同前。

根据表3、4中的实验数据进行回归分析，残差图如图4。

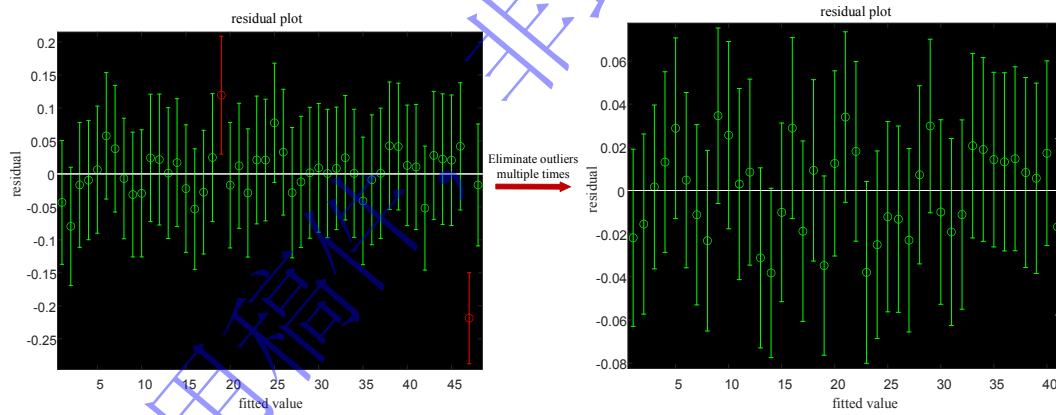


图4 超压-气流速度回归模型残差图分析

Fig.4 Residual diagram analysis of overpressure-airflow velocity regression model

最终获得的回归模型共包含实验数据点40个，参数估计值如下：

$$c = 0, \quad \epsilon_1 = 0.5061 \quad c_2 = -0.3813 \quad c_3 = 0, \quad c_4 = 1.2790 \quad c_5 = 0.1002 \quad c_6 = 0$$

相关系数 $R_2 = 0.9847$ ，接近1，故回归模型 $y = 0.51x_1 - 0.38x_2 + 1.28x_4 + 0.1x_5$ 成立，爆炸单向传播的超压-气流速度关系式为：

$$P = \left(\frac{E}{R^3} \right)^{0.51} \left(\frac{R^3}{V} \right)^{-0.38} \left(\frac{R^2}{d_B^2} \right)^{1.28} (u)^{0.1} \quad (28)$$

则爆炸双向传播的超压-气流速度关系式为：

$$P = 0.7 \cdot \left(\frac{E}{R^3}\right)^{0.51} \left(\frac{R^3}{V}\right)^{-0.38} \left(\frac{R^2}{d_B^2}\right)^{1.28} (u)^{0.1} \quad (29)$$

上述模型可由某点已知的气流速度值，计算该点超压值。

3.2 气流速度-超压关系公式推导

根据 3.1 节，建立气流速度-超压无量纲式为：

$$\zeta(u, E, V, S, d_B, P, \beta, R, P_0, \rho_0) = 0 \quad (30)$$

通过各无量纲量之间的关系可以得到：

$$u = D \left(\frac{E}{R^3}\right)^{d_1} \left(\frac{R^3}{V}\right)^{d_2} \left(\frac{S}{R^2}\right)^{d_3} \left(\frac{R^2}{d_B^2}\right)^{d_4} (P)^{d_5} (\beta)^{d_5} \quad (31)$$

式中： D 、 $d_1 \sim d_5$ 为待求系数，其余各值含义同前。

爆炸单向传播的气流速度-超压关系式为：

$$u = \left(\frac{E}{R^3}\right)^{0.40} \left(\frac{R^3}{V}\right)^{0.23} \left(\frac{R^2}{d_B^2}\right)^{0.013} (P)^{0.30} \quad (32)$$

则爆炸双向传播的气流速度-超压关系式为：

$$u = 0.76 \cdot \left(\frac{E}{R^3}\right)^{0.40} \left(\frac{R^3}{V}\right)^{0.23} \left(\frac{R^2}{d_B^2}\right)^{0.013} (P)^{0.30} \quad (33)$$

上述模型可由某点已知的超压值，计算该点气流速度值。

3.3 超压与气流速度关系式验证

将表 4 中气流速度值和其他相关数据代入式 (28) 进行验证，数据对比结果见表 8，数据趋势对比见图 5。

表 8 超压-气流速度理论数据与试验数据

Table 8 The theoretical data and experiment data of overpressure-airflow velocity (KPa)

距离 R/m 体积/m ³		30	40	60	80	100	120	140	160
100	NO.1	170.45	161.65	152.27	146.90	141.80	138.87	134.50	130.23
	NO.2	170.77	163.09	154.78	147.16	141.10	137.27	132.68	129.17
	NO.3	170.59	164.87	158.21	145.24	140.96	136.01	134.06	131.19
	公式平均值	170.60	163.20	155.09	146.43	141.29	137.38	133.75	130.20
	试验平均值	165.7	169.7	154	147.3	137.7	136	129	121.7
	相对误差 (%)	2.9	-3.8	0.7	-0.6	2.6	1.0	3.7	7.0
200	NO.1	332.66	313.97	290.44	277.94	268.88	261.40	254.32	249.52
	NO.2	329.82	312.58	290.22	278.72	269.19	263.54	256.96	250.25
	NO.3	328.12	307.77	293.39	279.95	269.82	262.97	241.53	248.28
	公式平均值	330.20	311.44	291.35	278.87	269.30	262.64	250.94	249.35
	试验平均值	309	294.7	284.3	272.3	262	255.7	249.7	242.7
	相对误差 (%)	6.8	5.6	2.4	2.4	2.5	2.5	0.5	2.5

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

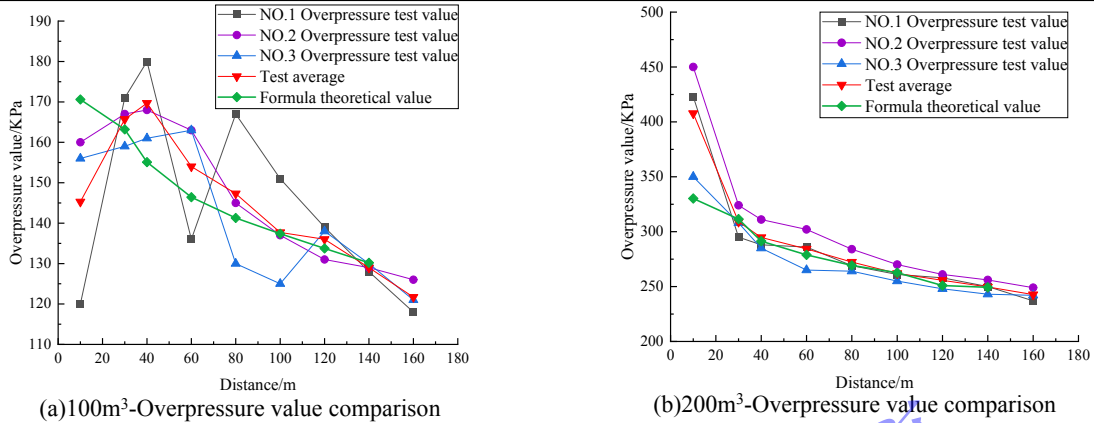


图5 超压-气流速度理论数据与试验数据对比

Fig.5 The comparison of overpressure-airflow velocity for the gas explosion theoretical and experimental data

采用验证式的 (28) 方法, 将表 3 中超压值和其他相关数据代入式 (32) 进行验证, 数据对比结果见表 9, 数据趋势对比见图 6。

表 9 气流速度-超压理论数据与试验数据

Table 9 The theoretical data and experiment data of airflow velocity and overpressure (m/s)

距离 R/m 体积/m ³		30	40	60	80	100	120	140	160
100	NO.1	309.17	273.15	206.37	190.96	166.31	148.53	134.48	123.02
	NO.2	306.98	267.56	217.90	183.04	161.52	145.91	134.79	125.47
	NO.3	302.49	264.16	217.90	177.14	157.14	148.20	135.11	123.95
	公式理论值	306.21	268.29	214.06	183.71	161.66	147.55	134.79	124.15
	试验平均值	295.2	260.7	246.6	188.7	168.5	156.3	141.3	124.9
	相对误差 (%)	3.7	2.9	-13.2	-2.6	-4.1	-5.6	-4.6	-0.6
200	NO.1	409.65	353.85	290.19	247.87	220.49	201.17	184.95	170.62
	NO.2	421.34	362.10	294.97	251.94	222.74	201.87	186.27	173.17
	NO.3	414.99	352.74	283.62	246.48	218.96	198.80	183.38	171.69
	公式理论值	415.33	356.23	289.59	248.76	220.73	200.61	184.87	171.83
	试验平均值	456.5	349.7	279.8	247.6	223.1	212.4	164.4	173.4
	相对误差 (%)	-9.0	1.9	3.5	0.5	-1.1	-5.6	11	-0.9

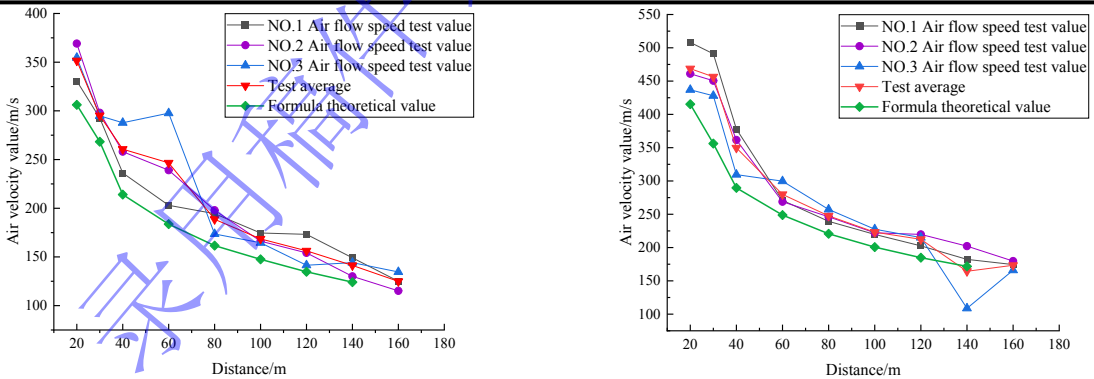


图6 气流速度-超压理论数据与试验数据对比

Fig.6 The comparison of airflow velocity-overpressure for the gas explosion theoretical and experimental data

由表 8 和图 5 可知, 理论值与试验值的相对误差控制在 7% 以内, 总体数据间吻合程度较高, 验证了式 (28) 的可靠性; 同理, 根据表 9 和图 6, 验证了式 (32) 的可靠性。由表 8、9 和图 5、6 综合分析可知, 混合气体聚积量对超压、冲击气流速度产生显著影响, 聚积量越大, 超压、冲击气流速度衰减越迅速。综上, 式 (28)、(29)、(32)、(33) 在描述超压和气流速度传播规律、计算超压和气流速度方面均具有可靠性。

4 结论

(1) 通过超压、冲击气流速度衰减模型可知，混合气体能量、气体积聚量、测点距离、水力直径和巷道截面积是超压、冲击气流速度随距离衰减的主要影响因素。

(2) 通过将衰减模型、关系式的理论值与试验值对比可知，超压、冲击气流速度均与混合气体聚积量正相关，起始超压、冲击气流速度越大，衰减越迅速。

(3) 衰减模型理论值与试验值的相对误差及关系式理论值与试验值的相对误差均控制在 10%左右，总体数据吻合度较高，可依据巷道相关参数实现对巷道内某一测点超压、冲击气流速度的快速计算。

(4) 该衰减模型和关系式在井下作业人员安全距离计算、伤害评估研究等方面同样具有适用性，但由于当前试验条件及数据资源有限，在后续的研究中将考虑改变实验条件获得更丰富的试验数据进行相关模型的验证和修正，以提高模型的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 徐景德. 矿井瓦斯爆炸冲击波传播规律及影响因素的研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2002: 31-33.
XU J D. The study on gas explosion wave propagation law and affected factors in mine [D]. Beijing, China: China University of Mining and Technology, 2003: 31-33.
- [2] 朱云飞, 王德明, 赵安宁, 等. 尺度直巷中瓦斯爆炸传播规律及影响因素研究 [J]. 煤炭技术, 2023, 42(9): 169-172. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2023.09.033.
ZHU Y F, WANG D M, ZHAO A N, et al. Investigation on Propagation and Influence Factors of Gas Explosions in Large-scale Straight Tunnels [J]. Coal Technology, 2023, 42(9): 169-172. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2023.09.033.
- [3] 罗振敏, 刘利涛, 王涛, 等. C_2H_6 、 C_2H_4 、CO 与 H_2 对甲烷爆炸压力及动力学特性影响 [J]. 工程科学学报, 2022, 44(3): 339-347. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.22.002.
LUO Z M, LIU L T, WANG T, et al. Effect of C_2H_6 , C_2H_4 , CO and H_2 on the explosion pressure and kinetic characteristics of methane [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2022, 44(3): 339-347. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.22.002.
- [4] 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]. China Work Safety Science and Technology, 2022, 18(8): 72-78. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.08.011.
- [5] QIMING X, GUOHUA C, SHEN S, et al. Prediction of venting gas explosion overpressure based on a combination of explosive theory and machine learning [J]. Expert Systems With Applications, 2023, 234. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121044.
- [6] 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(3): 257-261. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2011.03.020.
CHENG L, JING G X, YANG S Z. Research on spreading law and damage area of shock wave of coal dust explosion [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2011, 30(3): 257-261. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2011.03.020.
- [7] 曲志明, 周心权, 王海燕, 等. 瓦斯爆炸冲击波超压的衰减规律 [J]. 煤炭学报, 2008(4): 410-414. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2008.04.012.
QU Z M, ZHOU X Q, WANG H Y, et al. Overpressure attenuation of shock wave during gas explosion [J]. Journal of China Coal Society, 2008(4): 410-414. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2008.04.012.
- [8] JIANG B, TANG M, SHI S. Multiparameter acceleration characteristics of premixed methane/air explosion in a semi-confined pipe [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.06.012.
- [9] 刘佳佳, 张扬, 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): 182-194. 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): 182-194. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0018.
- [10] 张强, 孙玉荣, 王晓勇, 等. 煤与瓦斯突出冲击波传播规律的研究 [J]. 矿业安全与环保, 2007(5): 21-23. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4495.2007.05.008.
ZHANG Q, SUN Y R, WANG X Y, et al. Study on propagation law of shock wave from coal and gas outburst [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2007(5): 21-23. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4495.2007.05.008.
- [11] 程五一, 刘晓宇, 王魁军, 李祥. 煤与瓦斯突出冲击波阵面传播规律的研究 [J]. 煤炭学报, 2004(1): 57-60. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2004.01.013.
CHENG W Y, LIU X Y, WANG K J, LI X. Study on regulation about shock-wave-front propagating for coal and gas

- outburst t [J]. Journal of China Coal Society, 2004(1): 57-60. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2004.01.013.
- [12] BAKER W E. Engineer Design Handbook: Explosion In Air Part One[M]. JIANG KE, translate, Beijing, 1982.
- [13] J HENRYCH. The dynamic of explosion and its use[M]. XIONG Jian-guo, translated. Beijing: Science Press, 1987.
- [14] SADOVSKYI M A. Mechanical Action Of Air Shock Waves Of Explosion, Based On Experimental Data[M]. Moscow: Izd Akad Nauk SSSR, 1952: 1-2.
- [15] 李宝岩, 戴智涵. 大当量 TNT 自由空气爆炸数值模拟研究[C]. 第 26 届全国结构工程学术会议, 2017: 96-100.
LI B Y, DAI Z H. Numerical Simulation of large equivalent TNT free Air Explosion [C]. The 26th National Conference on Structural Engineering, 2017: 96-100.
- [16] 姚成宝, 王宏亮, 张柏华, 等. TNT 空中爆炸冲击波传播数值模拟及数值影响因素分析[J]. 现代应用物理, 2014, 5(1): 39-44. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6223.2014.01.008.
YAO C B, WANG H L, ZHANG B H, et al. Numerical simulation of shock wave propagation and analysis of numerical influencing factors of TNT aerial explosion [J]. Modern Applied Physics, 2014, 5(1): 39-44. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6223.2014.01.008.
- [17] DANIEL F G, EMILIAN G, IOAN V N, et al. Release of overpressures in computational simulations of air-methane explosions[J]. MATEC Web of Conferences, 2022, 373. DOI: 10.1051/mateconf/202237300043.
- [18] 许浪. 瓦斯爆炸冲击波衰减规律及安全距离研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
XU L. Study on attenuation law and safety distance of shock wave of Gas explosion [D]. Xuzhou, China: China University of Mining and Technology, 2015.
- [19] 杨书召, 景国勋, 贾智伟. 矿井瓦斯爆炸冲击气流伤害研究 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1354-1358. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2009.10.011.
YANG S Z, JING G X, JIA Z W. Injury study on impact current of gas explosion in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1354-1358. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2009.10.011.
- [20] 吴爱军, 承林. 煤与瓦斯突出冲击波传播规律研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 852-857.
WU A J, CHENG L. Research on propagation of shock waves from coal and gas outburst [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40(6): 852-857.
- [21] 王海燕, 曹涛, 周心权, 等. 煤矿瓦斯爆炸冲击波衰减规律研究与应用 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 778-782. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2009.06.012.
WANG H Y, CAO T, ZHOU X Q, et al. Research and application of attenuation law about gas explosion shock wave in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 778-782. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2009.06.012.
- [22] 张景松, 杨春敏. 流体力学: 流体力学与流体机械 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [23] 李贺龙, 王浩, 诸洲, 等. 基于量纲分析的戈壁地区爆破振动衰减模型 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 11947-11953. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2023.23.28.11947.
LI H L, WANG H, ZHU Z, et al. Blasting vibration attention model of in Gobi region based on dimensional analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 11947-11953. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2023.23.28.11947.