

巷道空间内瓦斯爆炸冲击波传播的数值模拟

朱邵飞,叶青*,李贺,贾真真,沈子鹤,杨卓华

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为研究在巷道空间里瓦斯爆炸冲击波的传播特性,采用 ANSYS/LS-DYNA 程序的流固耦合算法,建立巷道瓦斯爆炸物理模型,对巷道空间里瓦斯爆炸过程进行数值模拟,得到瓦斯爆炸过程中冲击波变化云图,并拟合了冲击波衰减变化规律.研究表明:瓦斯爆炸冲击波经历了从球面到平面冲击波的发展过程,最终冲击波逐渐衰减为常压状态,但在受限空间内瓦斯爆炸冲击波遇壁面会发生反射与叠加,因此要合理的设置泄压口;爆炸冲击波超压与距离成非线性关系,即爆炸冲击波超压与距离的平方根成反比.研究结果对瓦斯爆炸传播事故的预防和灾害控制有一定的指导作用.

关键词:巷道空间;瓦斯爆炸冲击波;数值模拟;超压

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2019)03-0023-08

Numerical Simulation Study on Shock Wave Propagation of Gas Explosion in Roadway Space

Zhu Shaofei, Ye Qing, Li He, Jia Zhenzhen, Shen Zihe, Yang Zhuohua

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the propagation characteristics of gas explosion shock waves in roadway spaces, the physical model of roadway gas explosion is established by using the fluid-solid coupling algorithm of ANSYS/LS-DYNA program. The numerical simulation of gas explosion in roadway space is carried out. The cloud of shock wave change during gas explosion are obtained. The law of shock wave attenuation is fitted. Research shows that shock wave of gas explosion undergoes with the development process from spherical to plane shock wave, and finally the shock wave gradually attenuates to the atmospheric pressure, but the shock wave of gas explosion will be reflected and superimposes in the confined space, the impact on the closed end is the greatest, so it is necessary to set the pressure relief port reasonably. The overpressure of explosion shock wave has a nonlinear relationship with distance x , that is, the overpressure of explosion shock wave is inversely proportional to the square root of distance. The research results have a certain guiding role in the prevention and disaster control of gas explosion accidents.

Keywords: roadway space; gas explosion; shock wave; overpressure

我国是煤炭资源大国,也是以煤炭为主要能源的国家,煤炭生产在国民经济发展中占有举足轻重的地位.然而,在地下空间煤炭开采过程中发生的灾难事故也是惊人的,特别重大瓦斯爆炸事故导致众多人员伤亡、巷道设备严重破坏和巨大财产损失,造成不良的社会影响.与地上开放环境相比,地下巷道空间是一个相对封闭的系统,因受到巷道壁面限制影响,瓦斯爆炸冲击波在封闭空间不断传播、反射,导致壁面结构承受的超压峰值明显提高,其作用时间也大大延长,给巷道及其内部人员造成更为严重的破坏和杀伤后果.近年来,在煤炭开采过程中瓦斯爆炸事故时有发生,因此应加强矿井瓦斯管理、健全瓦斯监测,以确保

收稿日期:2019-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704111;51374003);湖南省教育厅科研基金资助项目(18A187;18C0328)

*通信作者,E-mail: cumtyeqing@126.com

安全生产.

矿井瓦斯爆炸灾害预防是个技术难题,也是非常复杂的科学问题^[1].因此有必要针对掘进工作面和巷道空间的瓦斯爆炸传播规律进行深入研究,以满足煤矿安全生产需求.对于在受限空间内部爆炸的规律,国内外学者进行了很多的研究.Kravtsov等^[2]研究了管道内部甲烷气体爆炸的传播规律和动力响应特征,得出由于介质的可变性,爆炸过程中的变化取决于湍流因素;Q.Bao等^[3]研究瓦斯浓度和泄放压力对室内瓦斯爆炸过程中超压瞬态的影响;陈长坤等^[4]研究了在爆炸载荷下,爆炸中心正对壁面位移最大,位移呈周期性变化,冲击波的多次反射和叠加是造成能量损失的主要原因;徐景德等^[5]以实验为基础,对瓦斯爆炸进行了数值模拟和理论分析,冲击波在封闭条件下,压力变化有着显著区别,强烈的反复拉伸效应造成更大的破坏效应;刘中宪等^[6]研究了地下管廊在燃气爆炸荷载作用下,管廊的损伤破坏具有局部性和弱传递性;宋娟等^[7]研究了在地下受限空间爆炸后,受周围介质的影响,产生的爆炸流场较复杂,但随着传播距离的变化,衰减曲线趋于一致;左哲等^[8]研究了受限空间内天然气爆炸过程中,爆炸温度直接影响爆炸压力的变化,小尺寸空间会加速压力的增大;杨旭等^[9]研究了爆炸冲击作用下,拼装桥墩剪切破坏逐渐演变为节段间相对位移;孙冰等^[10]研究了锚杆洞室在爆炸应力波作用下,刚开始出现一个应变峰值,在受到壁面的反射后,会出现第二次应变峰值;江丙友等^[11]运用 AutoReaGas 软件模拟了瓦斯爆炸冲击波在首尾相连的巷道中的传播变化规律,相向传播的两个冲击波会发生叠加响应,使超压峰值变大;朱传杰等^[12]研究了管道内瓦斯爆炸振荡特征和特征参数的变化规律,封闭系统中瓦斯爆炸呈现明显的振荡特征.当前国内外对受限空间内爆炸过程进行了大量研究,主要是以数值模拟研究为主,大多是将爆炸载荷直接加载结构上以此分析冲击波对结构破坏效应.本文则采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,研究了受限空间里瓦斯爆炸过程中爆炸冲击波的传播规律及冲击波超压与距离变化关系.以为巷道结构抗爆设计和安全性研究提供理论参考.

1 数学模型

1.1 控制方程

ANSYS/LS-DYNA 采用 Lagrangian 描述增量法,在空间直角坐标系中,瓦斯爆炸的守恒方程为^[13]连续方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

能量方程:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} + w \frac{\partial e}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}; \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}. \end{cases} \quad (3)$$

状态方程:

$$p = p(\rho, T) = \rho RT. \quad (4)$$

式中: p 为压力; t 为时间; x, y, z 为直角坐标系参数; u, v, w 分别为三个坐标方向的速度; ρ 为流体密度; T 为温度; R 为气体常数; e 为比能, $e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho(u^2 + v^2 + w^2)}{2}$ (γ 为气体指数,为常数).

1.2 基本假设

瓦斯爆炸过程是急速复杂的化学、物理反应过程,为了便于计算,忽略其化学反应的中间产物.假设是在标准大气压下,只存在瓦斯爆炸热源,忽略其他温度的影响.另外,忽略了传播过程中的热传导、对流,巷道壁面的粗糙程度等因素.

表3 空气材料参数

材料	$\rho_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_0/(\text{Pa})$	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E/(\text{J}/\text{m}^3)$
空气	1.29	-1×10^5	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^5

3 数值模拟结果与分析

3.1 瓦斯爆炸冲击波传播规律

瓦斯爆炸是瞬间将化学能转化为热能和动能的过程,同时产生高温高压的爆轰气体,进而急速压缩周围的空气,使压强和密度等跳跃式升高,迫使空气产生高速位移,在空气的前端会产生一个压缩状态下的冲击空气层,在传播过程对巷道结构建筑和人身安全造成巨大的威胁。

为了研究瓦斯爆炸下其传播规律及其破坏作用,给出爆炸冲击波变化云图,瓦斯爆炸后在不同时刻下爆炸冲击波变化如图3所示.爆炸发生后巷道内爆炸冲击波压力急剧上升,气体体积迅速膨胀,随后爆炸冲击波以超音速进入空气并向四周传播,爆炸压力达到峰值.由于受到巷道壁面的限制,会在爆炸流场中形成一个向下滑移的流面,冲击波经历了从球面到平面冲击波的发展过程,最终形成均匀的平面冲击波.从图3中可得封闭端受到冲击压力最大,因此要合理的设置泄压口.实际上,瓦斯爆炸的全部能量几乎都变成爆炸波能量,爆炸产物最初以极高的速度沿爆炸波阵面向前传播.冲击波压缩未反应的气体,形成较大的附加压缩,冲击波速度越大,超压值就越大,引起的破坏效应越大,由此可知瓦斯爆炸的破坏效应主要体现在传播阶段。

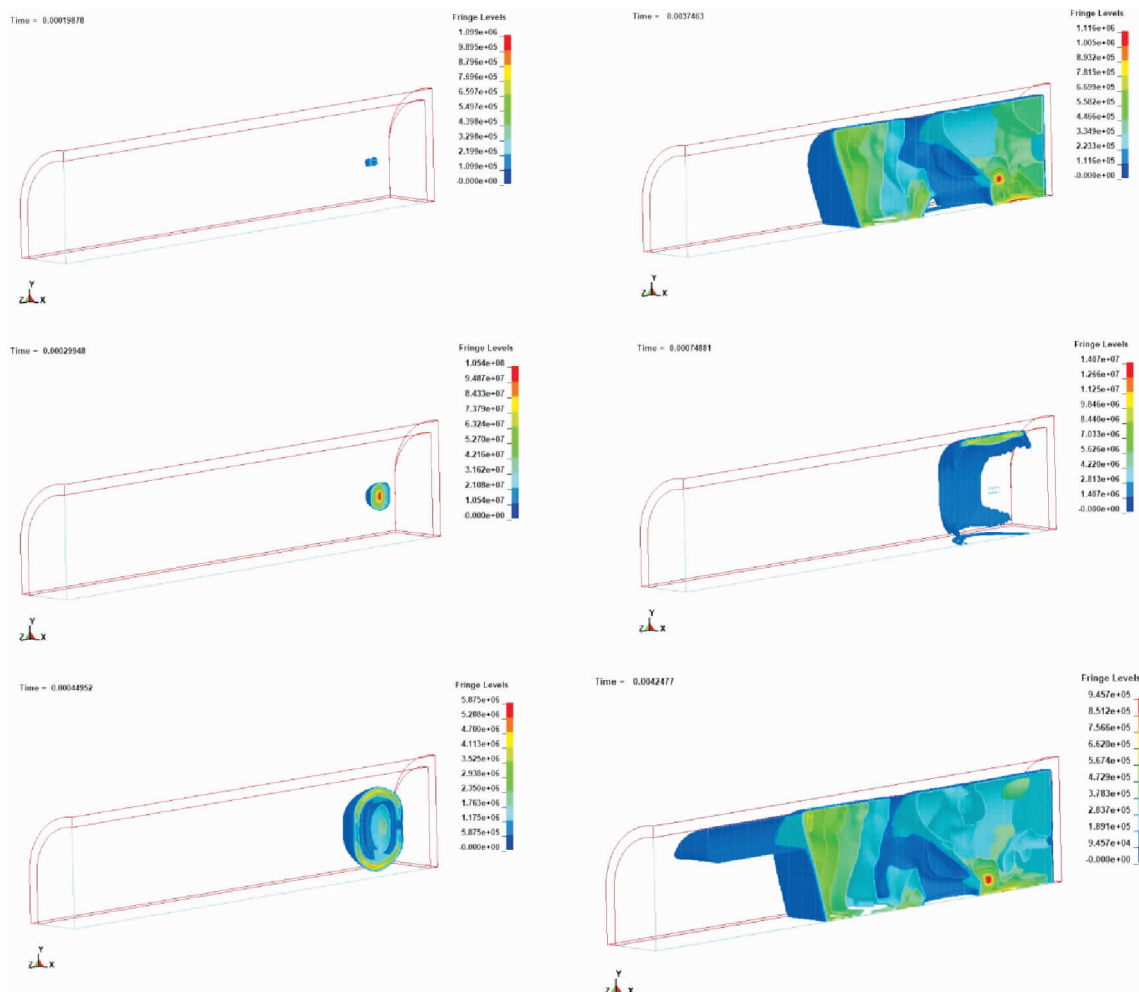


图3 冲击波波阵面变化趋势

可知在受限空间里爆炸冲击波,并非以球状稳定传播,而是爆炸冲击波在传播过程中不断发生变化,

不同方向的传播变化规律有所不同.由于一端封闭,另一端开口,在这种情况下瓦斯爆炸释放冲击波能量向四周传播,一部分能量通过壁面的反射、对流、热辐射散失.另一部分能量通过压缩波做功变成动能,对巷道建筑和人身安全造成巨大威胁.封闭端瓦斯爆炸冲击波在传播过程中,冲击波会被迅速压缩和加热,进而形成湍流.极大促进了瓦斯爆炸的威力,甚至能达到巨大破坏的爆轰状态.

在数值计算模型中,选取一系列测点来观察瓦斯爆炸过程中不同位置的超压变化特点,图 4 为数据测点图,1~5 点为每隔 0.5 m 选取一个数据测点,6~10 点为每隔 0.6 m 选取一个数据测点,11~15 点为每隔 1.5 m 选取一个数据测点.各点在不同时刻下的超压变化曲线如图 5 所示.从图 5 中可知,各个测点的发展趋势基本相同,测点的冲击波压力瞬间达到峰值,之后逐渐衰减,最后趋近于常压.1~5 测点在瓦斯爆炸后,1 为最大超压,之后测点依次达到超压值.6~10 测点冲击波加载到封闭端巷道壁面上超压达到小幅升高,之后受到壁面反射后达到更大的超压峰值.11~15 测点冲击波超压值在传播过程中逐渐减小.

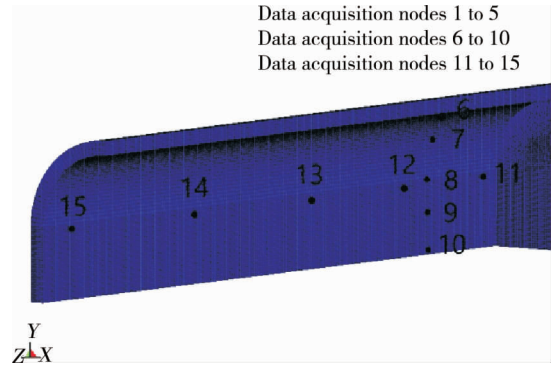


图 4 数据测点

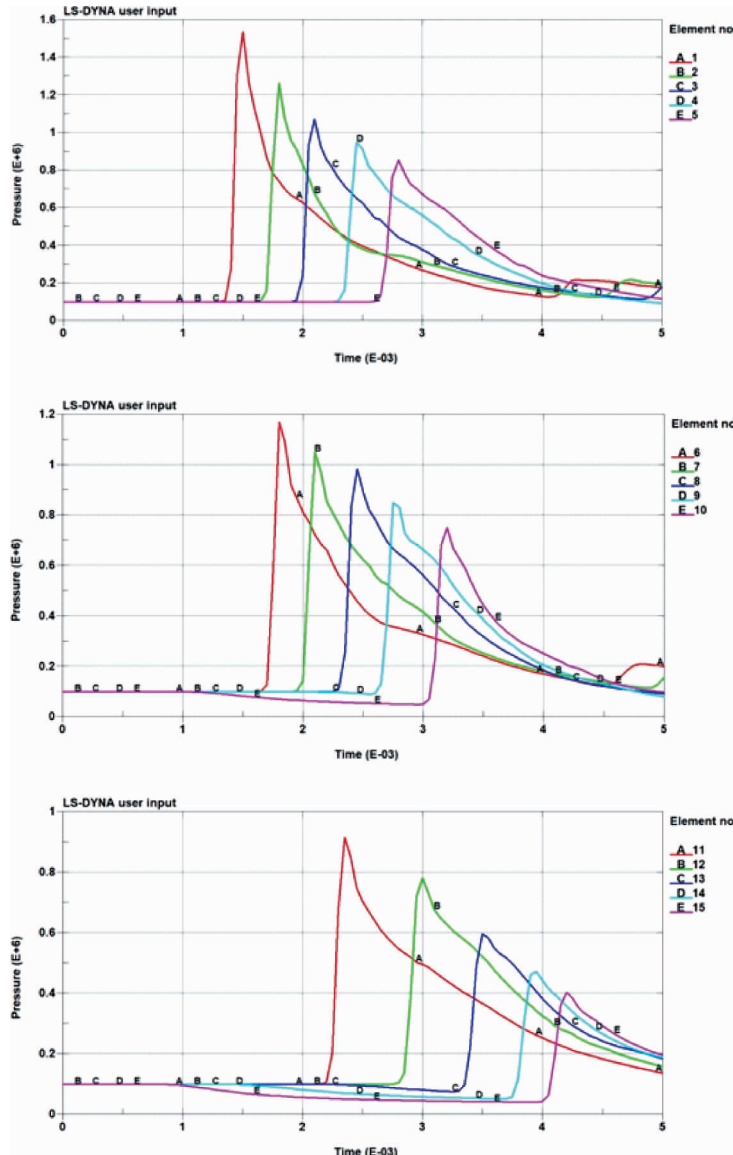


图 5 测点超压时程曲线

3.2 爆炸冲击波超压衰减规律拟合

当瓦斯爆炸冲击波超压达到某一临界值,就会对巷道建筑和人身安全造成一定的伤害.通常会采用超压准则来评判,即爆炸破坏由冲击波超压大小及持续时间来评判破坏程度.往往会忽略距离大小的影响.为了较准确的进行瓦斯爆炸后损伤评估,对瓦斯爆炸冲击波衰减的变化规律进行量化分析,因此拟合冲击波超压和距离的衰减规律,从而更加准确的为瓦斯爆炸事故进行损伤评估.

根据冲击波基本关系式^[21]:

$$P_1 = P_0 + \frac{2\rho_0 D^2}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2}\right) u_1 = \frac{2D}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2}\right) \rho_1 = \frac{\rho_0(k+1)}{k-1+c_0^2 D^{-2}}; \quad (5)$$

$$M = s\Delta x \rho_1 = s x \rho_0; \quad (6)$$

$$d(Mu_1) = s(p_a - p_0) dt = s(Ap_1 - p_0) dt. \quad (7)$$

式中: P_1 为冲击波参数压力; P_0 为空气压力; ρ_0 为密度; D 为冲击波阵面的速度, $D = \frac{dx}{dt}$; k 为空气压缩系数; c_0 为空气声速波; M 为薄层的质量; s 为巷道截面积; 在瓦斯爆炸时,质量都集中在波阵面为 Δx 的薄层内; ρ_1 为密度; x 为长度; u_1 为波阵面上的气流速度; p_a 为冲击波内部压强, A 为常数,令 $P_a = AP_1$.三式联立可得

$$d\left[sx\rho_0 \frac{2D}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2}\right)\right] = s\left(Ap_0 + \frac{2A\rho_0 D^2}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2}\right) - p_0\right) dt. \quad (8)$$

式中: $p_0 = \rho_0 c_0^2/k$, 整理得

$$-dx = \frac{x + c_0^2 x}{D(1-A) \left[1 - \frac{c_0^2}{D^2} + \frac{k+1}{k} \frac{c_0^2}{D^2}\right]} dD. \quad (9)$$

爆炸冲击波为强冲击波 $c_0^2/D^2 \rightarrow 0$, $p_1 - p_0 \approx p_1$, 式(5)可简化为

$$\frac{(1-A) dx}{x} = -\frac{dD}{D}. \quad (10)$$

对式(10)积分可得

$$D = Bx^{-(1-A)}. \quad (11)$$

式中: B 为积分常数.

在理想状态下,瓦斯爆炸膨胀做功等于波阵面运动的动能和空气内能,可得

$$W = \frac{1}{2} M u_1^2 + \frac{1}{k-1} s x p_a. \quad (12)$$

式(5)和式(12)联立可得

$$W = 2s\rho_0 \left[\frac{1}{(k+1)^2} + \frac{A}{k^2-1} \right] B^2 x^{-2(1-A)+1}. \quad (13)$$

在不考虑能量损失的条件下,瓦斯膨胀做功的能量为常数,与 x 无关,所以可得 A 为 0.5.

$$B = \sqrt{[(k-1)(k+1)^2 W] [(3k-1) s \rho_0]^{-1}}. \quad (14)$$

把式(13)代入式(10)可得爆炸冲击波超压为

$$\Delta p = \frac{4k}{(k+1)c_0} \left[\frac{(k-1)(k+1)W}{(3k-1)s\rho_0} \right]^{1/2} x^{-1/2}. \quad (15)$$

从式(15)可得到可简化为

$$\Delta p = Cx^{-1/2}. \quad (16)$$

由式(16)可知:爆炸冲击波超压 Δp 与距离 x 成非线性关系.即爆炸冲击波超压与距离的平方根成反比.

爆炸冲击波超压与距离变化数据进行了拟合,根据测点的超压值分析,通过后处理 LS-PREPOST 导

出爆炸超压峰值与距离的数据,如图6为爆炸超压与距离数据的拟合图,可以看出,爆炸冲击波超压与比例距离的曲线变化中最符合幂函数模型的变化规律.通过对照分析,总体上吻合程度很好.从而得到了超压峰值随距离变化的衰减规律.这与文献[22]中相关结论相似.

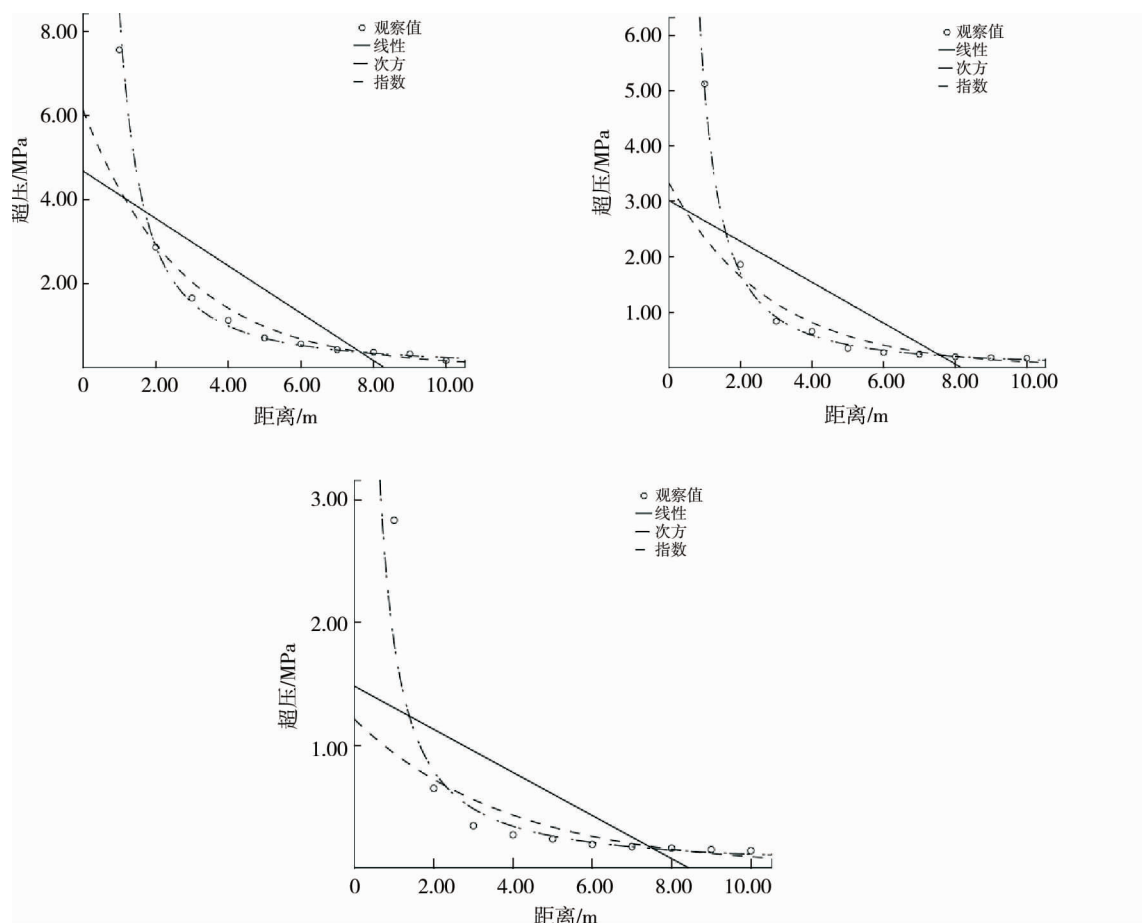


图6 拟合曲线

4 结论

1) 瓦斯爆炸后,冲击波经历了从球面到平面冲击波的发展过程,最终冲击波逐渐衰减为常压状态.

2) 在受限空间内瓦斯爆炸冲击波遇壁面会发生反射与叠加,在封闭端受到的冲击最大,应采取合适的阻爆隔爆措施,以减少瓦斯爆炸带来的破坏.

3) 在一定距离内,爆炸冲击波超压 Δp 与距离 x 成非线性关系,冲击波超压与距离的变化呈幂函数的变化规律,模拟结果与理论分析结果相吻合,从而更加准确的为瓦斯爆炸事故进行损伤评估.

参考文献:

- [1] 叶青,林柏泉.受限空间瓦斯爆炸传播特性[M].徐州:中国矿业大学出版社,2012.
- [2] Kravtsov A N, Zdebski J, Svoboda P, et al. Numerical analysis of explosion to deflagration process due to methane gas explosion in underground structures[C]// Military Technologies (ICMT), 2015 International Conference on. IEEE, 2015: 1-9.
- [3] Bao Q, Fang Q, Zhang Y, et al. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures[J]. Fuel, 2016, 175: 40-48.
- [4] 陈长坤,陈杰,史聪灵,等.天然气爆炸荷载作用下地下管廊动力响应规律研究[J].铁道科学与工程报,2017,14(9): 1907-1914.
- [5] 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(北京),2002.

- [6] 刘中宪,王治坤,张欢欢,等.燃气爆炸作用下地下综合管廊动力响应模拟[J].防灾减灾工程学报,2018,38(4):624-632.
- [7] 宋娟,李术才,张敦福,等.地下空间爆炸冲击波传播规律研究[J].地下空间与工程报.2016,12(2):560-566.
- [8] 左哲,姚志强,高进东,等.受限空间内天然气爆炸反应过程模拟分析[J].天然气工业,2015,35(6):131-137.
- [9] 杨旭,张于晔,张宁,等.爆炸冲击作用下预制节段拼装桥墩的动态响应与损伤分析[J].爆炸与冲击,2019,39(3):144-151.
- [10] 孙冰,袁登,曾晟,等.爆破荷载作用下洞室锚杆受力特征实验研究[J].防灾减灾工程学报,2017,37(2):302-307.
- [11] 江丙友,林柏泉,朱传杰,等.瓦斯爆炸冲击波在采煤工作面巷网中传播特性的数值模拟[J].煤炭学报,2011(6):968-972.
- [12] 朱传杰,林柏泉,江丙友,等.瓦斯爆炸在封闭管道内冲击振荡特征的数值模拟[J].振动与冲击,2012,31(16):8-12.
- [13] 伍堂锐,叶青,柳伟.煤岩体巷道壁面钻孔减震吸能性能研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(4):81-86.
- [14] Jia Z H, Ye Q. Numerical Simulation on Thermal Shock Stress of Gas Explosion on Duct Wall with Different Thermal Conductivities[J]. COMPENDIUM · paperASIA, 2018, 10(4):34-38.
- [15] Ye Q, Jia Z H. Effect of the bifurcating duct on the gas explosion propagation characteristics[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2014, 50(4):424-428.
- [16] Ye Q, Jia Z H, Zheng C S. Study on Hydraulic - controlled Blasting Technology for Pressure Relief and Permeability Improvement in a Deep Hole[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017 (159):433-442.
- [17] 张秀华,张宇,段忠东,等.爆炸荷载作用下钢柱的动力响应与影响因素分析[J].防灾减灾工程学报,2014,34(1):73-77.
- [18] 李志鹏,吴顺川,严琼,等.隧道瓦斯爆炸数值分析与爆源类型确定研究[J].振动与冲击,2018,37(14):94-101.
- [19] 李江华,叶义成,姚团,等.邻近矿柱浅孔落矿不耦合装药爆破损伤控制的数值模拟研究[J].矿冶工程,2016,36(6):13-17.
- [20] 田力,范其华.多层框架结构在其地下室内部爆炸冲击下的连续倒塌机理研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(1):46-53.
- [21] 李翼祺,马素贞.爆炸力学[M].北京:科学出版社,1992.
- [22] 程五一,刘晓宇,王魁军,等.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.