

巷道壁面瓦斯爆炸破坏特征及防护数值模拟

刘翀瑞, 叶青, 贾真真, 汤锦涛, 黄文科, 伍铮

湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月30日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

针对矿井瓦斯爆炸导致巷道产生严重破坏的情况, 本文建立了巷道瓦斯爆炸冲击破坏模型, 并验证了该模型的可靠性。瓦斯爆炸对巷道壁面的破坏特征: 巷道内瓦斯爆炸瞬间, 封闭端壁面最先受到损伤, 并且损伤位置为壁面中心位置, 随着瓦斯爆炸冲击的持续作用, 反应封闭端损伤破坏区域不断扩大, 损伤破坏程度也不断加深。损伤破坏位置由封闭端向开口端发展, 越靠近封闭端损伤破坏程度越严重些。安装泡沫防护材料后, 巷道壁面超压测值较小, 超压加载频率降低, 壁面得到了较好的防护。同时, 泡沫防护材料延缓了爆炸作用对壁面的冲击, 冲击速度绝大部分都消耗在了防护壁面上。泡沫铝对瓦斯爆炸冲击载荷有较大的反射和衰减作用。研究结果能为瓦斯爆炸巷道壁面损伤破坏评估及防护提供参考。

关键词

瓦斯爆炸, 巷道壁面, 破坏特征, 爆炸防护, 泡沫铝

Numerical Simulation of Gas Explosion Destruction Characteristics and Explosion Protection on Roadway Wall Surfaces

Chongrui Liu, Qing Ye, Zhenzhen Jia, Jintao Tang, Wenke Huang, Zheng Wu

School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: March 10, 2026; accepted: April 30, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Arming at the severe destruction of roadway caused by mine gas explosions, the impact destruction model caused by gas explosion in roadway is established and the reliability is verified. Destructive characteristics of gas explosion on roadway walls are as follows: At the moment of a gas explosion

in a roadway, the enclosed end wall is the first to suffer damage, and the damage occurs at the center of the wall. With the continuous impact of the gas explosion, the damaged and destroyed area at the sealed end continuously expands, and the degree of damage and destruction also continuously deepens. The damage and destruction progress from the closed end towards the open end. The closer it is to the closed end, the more severe the damage and destruction is. After installing foam protective materials, the measured overpressure values on the roadway wall are smaller, the frequency of overpressure loading decreases, and the wall is better protected. At the same time, the foam protective material delays the explosion impact on the wall, most of the impact velocity dissipates on the protective wall. Foam aluminum has a significant reflection and attenuation effect on the impact load of gas explosion. The research results can provide a reference for the assessment and protection of wall destruction in gas explosion in roadway.

Keywords

Gas Explosion, Roadway Wall, Destruction Characteristics, Explosion Protection, Aluminum Foam

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤矿瓦斯爆炸产生的高温、高压冲击波，对井下巷道环境及作业人员构成严重威胁。在爆炸冲击波的作用下，爆源附近人员伤亡概率很大，同时巷道内构筑物及煤岩壁面也通常会发生一定程度的损坏变形或者塌陷，极大增加了救援难度，导致生命与财产损失的进一步扩大。为掌握瓦斯爆炸对巷道的破坏特征并有效防控事故，国内外学者依托实验管道开展了大量试验研究，取得了丰富成果。例如：Kurduymov等[1]研究了管道中火焰的传播过程，指出管壁与火焰之间的粘性作用会形成压差，持续推动火焰向前传播；贾真真等[2]通过模拟巷道瓦斯爆炸过程，研究了巷道壁的动力响应与应力变化，发现冲击波在壁面反复反射叠加，导致爆炸载荷出现高压峰值并延长持续时间；张天阔[3]采用理论分析、实验与模拟相结合的方法，系统研究了瓦斯爆炸冲击波对通风构筑物的破坏特性，研究发现应力集中区域主要分布于风门约束端、风窗中心及其周边，不同壁面材料在冲击载荷下的动态响应存在显著差异。陈雷等[4]基于工程热力学、爆炸空气动力学等理论，分析了瓦斯爆炸反应机制、冲击波传播规律及其对巷道壁的破坏效应；叶青等[5]运用 ALE 流固耦合算法，模拟了隧道内瓦斯爆炸冲击波传播特征及其对衬砌结构的应力影响。史浩镛[6]利用试验与数值模拟相结合的方法探究了瓦斯爆炸冲击波对巷道结构的损伤破坏特性，发现梯形巷道及混凝土支护最易受损。邓照玉等[7]通过 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟，揭示了瓦斯爆炸冲击波作用下巷道壁面边缘与中心区域损伤最严重、冲击波反射叠加导致超压振荡、以及应力持续加载引发准静态破坏的损伤机理，为巷道抗爆结构设计提供了理论参考。贾真真等[8]利用数值模拟的方法揭示了在高地应力与瓦斯爆炸耦合动静载荷作用下巷道壁面动力响应与损伤特性，发现巷道隅角处初始损伤最严重、顶板动力响应最强、且地应力在加剧初始损伤的同时会削弱冲击波传播的复杂损伤机制。滕洋洲等[9]利用数值模拟的方法探究了巷道内双爆源瓦斯爆炸冲击波对巷道壁面的破坏特性，发现双爆源瓦斯爆炸下巷道轴向出现两次压力峰值、冲击波碰撞导致压力非线性剧增、且顶板损伤最严重。李淑娟等[10]运用 ANSYS/LS-DYNA 建立了附有 6 种不同面积的调节风窗的风门模型，并模拟瓦斯爆炸冲击作用下的风门动力响应特性，测定了风门的位移、等效应力、塑性应变等参数。

Xue [11]基于流固耦合模型和有限元算法，通过分析结构的压力、位移、速度、和有效应力，阐明了

瓦斯爆炸后隧道结构的动力响应, 结果表明, 随着瓦斯泄漏量的增加和气云尺寸的减小, 爆炸压力、冲击波的传播速度以及作用在隧道上的有效应力均增大。Li [12]利用 LS-DYNA 软件重现了隧道内瓦斯爆炸事故的发生过程, 通过与真实事故现场的比较, 探讨了瓦斯爆炸的强度及爆炸冲击波在隧道中的传递规律以及隧道内衬砌的动力响应和受力特性。Yang [13]进行了煤样在不同温度下的单轴压缩试验, 探讨了受热时煤的断裂演变规律, 研究了高温条件下煤的孔隙结构演变规律, 结果表明: 温度升高会使煤岩的破坏模式发生改变, 由劈裂破坏转为劈裂-拉联合破坏和剪切-拉联合破坏。李志鹏[14]采用LS-DYNA 软件对隧道中的瓦斯爆炸过程进行了模拟, 并对其结构失效机制进行了分析。Wang 等[15]结合 LES 与 WENO 方法研究爆炸波的传播, 发现瓦斯爆炸的主要破坏效应是由高速气流和冲击波的高压造成。

综上所述, 国内学者对瓦斯爆炸冲击巷道壁面的破坏特性进行了相应研究, 巷道壁面在瓦斯爆炸荷载作用下会造成损伤和破坏, 如果瓦斯爆炸非常强烈, 甚至会导致整个爆炸巷道坍塌。目前对于巷道壁面抗爆措施研究还比较少, 因此针对现有研究的不足, 本文利用 LS-DYNA 数值模拟软件, 建立巷道瓦斯爆炸的冲击破坏模型, 系统分析瓦斯爆炸超压、壁面位移、速度、等效应力动态参数, 以揭示瓦斯爆炸热冲击作用下巷道壁面的破坏特性, 在巷道内壁安置一定厚度的泡沫铝层, 利用泡沫铝材料的防护特性, 分析防护效果, 从而为矿井抗爆设计与灾害防控提供理论依据。

2. 研究方法

2.1. 数学模型

巷道中的瓦斯爆炸冲击波在受限空间内传播, 满足直角坐标系中流体动力学的守恒方程: 质量守恒方程、能量守恒方程、动量守恒方程及状态方程。

1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\beta_v \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_j \rho u_j)}{\partial x_j} = \frac{m'}{V} \quad (1)$$

式中: β_v 为定义体积孔隙度; ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; x_j 、 β_j 、 u_j 分别是控制单元在 j 方向的长度、面孔隙度和速度; m' 为单位时间内质量的变化率, kg/s ; V 为控制体积, m^3 。

2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\beta_v \rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_j \rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \beta_v \frac{\partial P}{\partial x_j} = \frac{\partial(\beta_j \sigma_{ij})}{\partial x_j} + F_{o,i} + \beta_v F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i \quad (2)$$

式中: u_i 、 u_j 分别为 i 和 j 方向上的平均速度, m/s ; P 为压力, Pa ; σ_{ij} 为应力张量, N/m^2 ; $F_{o,i}$ 和 $F_{w,i}$ 分别是由壁面和障碍物在 i 方向上的流动阻力, Pa ; ρ_0 为初始密度, Kg/m^3 ; g_i 为 i 方向上重力加速度的分量。其中 $F_{o,i}$ 和 σ_{ij} 的具体表达式为:

$$F_{o,i} = -\rho \frac{\partial \beta}{\partial x_i} u_i |u_i| \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k_e + \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

式中: x_i 是 i 方向上控制单元的长度, m ; β 为火焰模型中的转换因子; μ_{eff} 为流动介质的有效黏度, 其公式如式(5)所示, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; k_e 为湍流动能, m^2/s^2 ; u_k 和 x_k 分别是 k 方向上的速度和长度, m/s ; m 。

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中： μ 为动力黏度，Pa·s； C_μ 为湍流模型的控制参数，取 0.09； ε 为动能的耗散速率， m^2/s^3 。

3) 能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_E \frac{\partial E}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial p}{\partial x_j}(\rho u_j) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

式中： E 为比内能，J/kg； Γ_E 为湍流耗散系数； τ_{ij} 为微元表明黏性应力分量，N。

4) 状态方程：

$$p = p(\rho, T) = \rho RT \quad (7)$$

式中： p 为压力，Pa； ρ 为流体密度， kg/m^3 ； T 为温度，K； R 为气体常数。

2.2. 物理模型

2.2.1. 有限元模型的建立

根据巷道几何模型的轴对称性，将建立四分之一的巷道内瓦斯爆炸模型进行相应的数值模拟研究，既便于观察巷道内部壁面情况又减少了计算量。本次数值模拟所采用的巷道几何参数为：巷道外半径 $R = 1 \text{ m}$ ，巷道内半径 $R = 0.8 \text{ m}$ ，巷道共长 10.2 m ，巷道壁面厚 0.2 m 。物理模型如图 1 所示。巷道一端封闭，另一端为开口，巷道内密闭端填充长度为 5 m 、浓度为 9.5% 瓦斯预混气体，巷道内空气与瓦斯预混气体之间用薄膜隔开，空气填充长度为 5 m 。点火位置为 $(0,0,2)$ 。本文中所用材料的模型和参数均采用统一单位制 (kg/m^3) 。LS-DYNA 兼有拉格朗日(Lagrange)算法、欧拉(Euler)算法和 ALE (A Arbitrary_Lagrange_Euler) 算法。气体爆炸数值模拟方法通常有 TNT 当量法和气体填充法，本次选择 TNT 当量法。

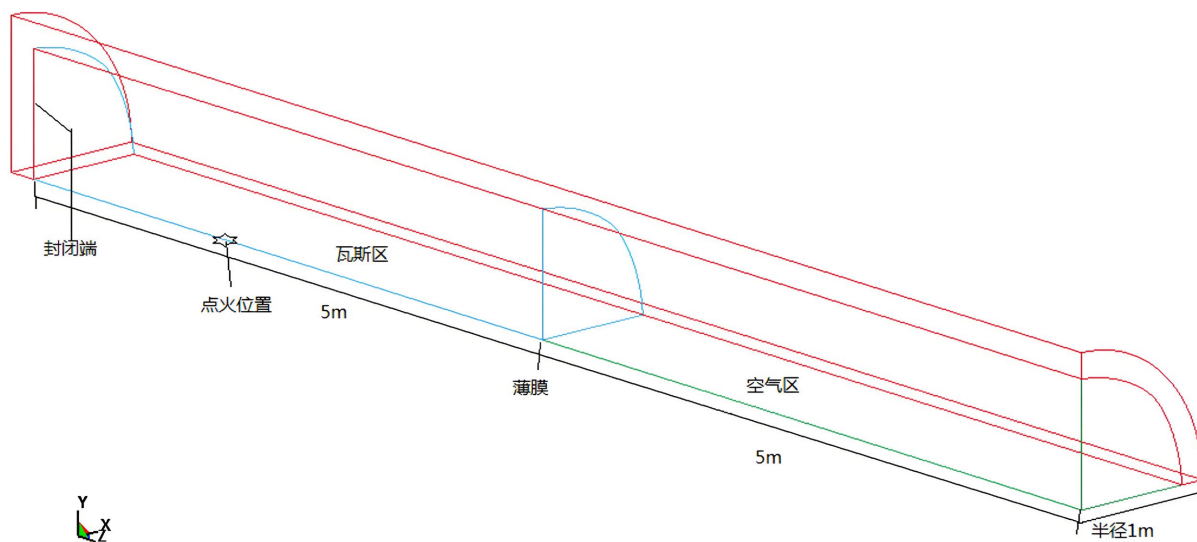


Figure 1. Physical model of roadway

图 1. 巷道物理模型

2.2.2. 网格划分

建立物理模型后，需要对实体模型进行网格划分，对巷道瓦斯空气采用六面体单元网格划分；瓦斯气体和空气采用 Euler 网格模拟，巷道壁面采用 Lagrange 网格模拟。单元长度控制为 0.05 m ，划分网格后的有限元模型如图 2 所示，瓦斯爆炸巷道物理模型共划分为 $171,700$ 个单元，能满足本文研究需要。

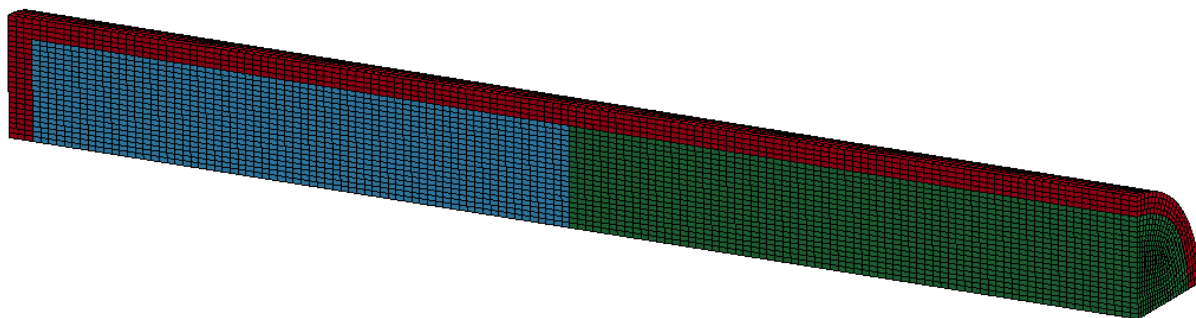


Figure 2. The finite element model after meshing

图 2. 划分网格后的有限元模型

2.3. 定义单元类型与材料模型

1) 空气本构模型

通常在数值模拟中将空气设置为理想气体，标准状态下空气的初始状态参数： $P = 0.1 \text{ MPa}$ ， $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ， $T = 298 \text{ K}$ ，由于冲击波波面较薄，所以传播过程中热交换以及与巷道壁面之间的摩擦可忽略不计；瓦斯爆炸可按理想气体膨胀来研究爆炸后冲击波；瓦斯爆炸冲击波的膨胀假设是绝热过程，根据 Gama 准则一般采用线性多项式的状态方程来描述其性能。

2) 空气材料模型及状态方程

空气采用 NULL 材料模型以及 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程加以描述。

3) 瓦斯气体材料模型及状态方程

瓦斯气体采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型以及 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程加以描述，气体参数如表 1 所示。

Table 1. Air and gas parameters

表 1. 瓦斯和空气参数

		*Mat_Null								
		RO						PC	MU	
空气		1.29						0.00	0.00	
瓦斯		1.234						0.00	0.00	
		*EOS_Linear_polynomial								
		C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	V ₀	E ₀
空气		0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	1.0	2.5×10^5
瓦斯		0.0	0.0	0.0	0.0	0.274	0.274	0.0	1.0	3.408×10^6

4) 巷道壁面材料参数

由于巷道壁面损伤破坏后单元自动消失，不利于监测巷道壁面相关参数，因此本次基础巷道模型的壁面采用刚性材料模型，此模型在 LS-DYNA 中的关键字为 *MAT_RIGID。选用的材料如表 2 所示。

由于建立的基础模型壁面材料为刚性材料，而巷道能够填充的瓦斯混合气体又有限，所以巷道内发生瓦斯爆炸发生后巷道壁面不会出现损伤破坏的迹象，为了得到巷道壁面在相同情况下的损伤破坏分布，对巷道壁面材料进行重新设置，降低了材料的密度、弹性模量、抗压强度、抗拉强度以及抗剪强度。在保持其它设置不变的情况下进行了巷道壁面损伤破坏特征数值模拟。

Table 2. Material parameters of roadway wall
表 2. 巷道壁面材料参数

*MAT_RIGID							
MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
1	0.78E04	2.06E11	0.27	0.0	0.0	0.0	0.0
CMO	CON1	CON2					
1.0	7.0	7.0					
LOC	A2	A3	V1	V2	V3		
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

在 ANSYS/LS-DYNA 程序中, 通常使用关键字 *MAT_ADD_EROSION 来定义材料的破坏准则, 利用该关键字中的参数进行有效控制, 通过设置单元失效的临界值来确定, 在瓦斯爆炸模拟过程中一旦某条件超过临界值时, 软件程序就判定该单元失效, 该单元在计算模型中将被自动删除从而反应壁面材料损伤破坏效果。在关键字 *MAT_ADD_EROSION 中, 除了失效时间设置不受限制外, 其他各种失效模式, 只能够应用于单点积分 2D 或 3D 体单元中。表 3 为该关键字的控制参数的相关信息:

Table 3. *MAT_ADD_EROSION parameters
表 3. *MAT_ADD_EROSION 参数

参数类别	说明
MID	材料编号
EXCL	排除参数, 后面的失效参数设置成这个排除参数时, 该失效准则便不再参与计算
MXPRES	最大失效压力(压缩为正)
MNEPS	最小失效主应变
MNPRES	最小正压力(压缩为正)
SIGP1	最大失效主应力
SIGVM	失效等效应力
MXEPS	最大失效主应变
EPSSH	失效切应变
SIGTH	极限应力
IMPULSE	失效力冲量
FAILTM	失效时间, 当求解时间超过该时间时, 材料被移除

5) 泡沫铝材料模型及状态方程

泡沫铝采用 LS-DYNA 材料库中的 63 号材料模型, 即 MAT_CRUSHABLE_FOAM。该模型假设材料为各向同性, 其弹性模量由所定义的应力 - 应变曲线在弹性阶段的斜率确定。在单向压缩条件下, 材料的泊松比取为 0; 在拉伸状态下, 材料的强化行为与弹性 - 理想塑性材料相似。材料模型的相关参数取值如表 4 所示, 其应力 - 应变曲线如图 3 所示[16]。

6) 沙漏控制

如果使用全积分算法会耗费大量 CPU 时间, 通过在模型中采用单点积分可以有效的节约 CPU 时间,

但是很易造成沙漏的零能模式，此时就需对沙漏进行必要的控制。对于实体单元 SOLID164 沙漏控制，K 文件设置如表 5 所示。

Table 4. Material parameters of aluminum foam
表 4. 泡沫铝材料参数

*MAT_CRUSHABLE_FOAM							
MID	RO	E	PR	LCID	TSC	DAMP	FAIL
101	405.0	1.5E8	0.0	15	1.5E6	0.15	1

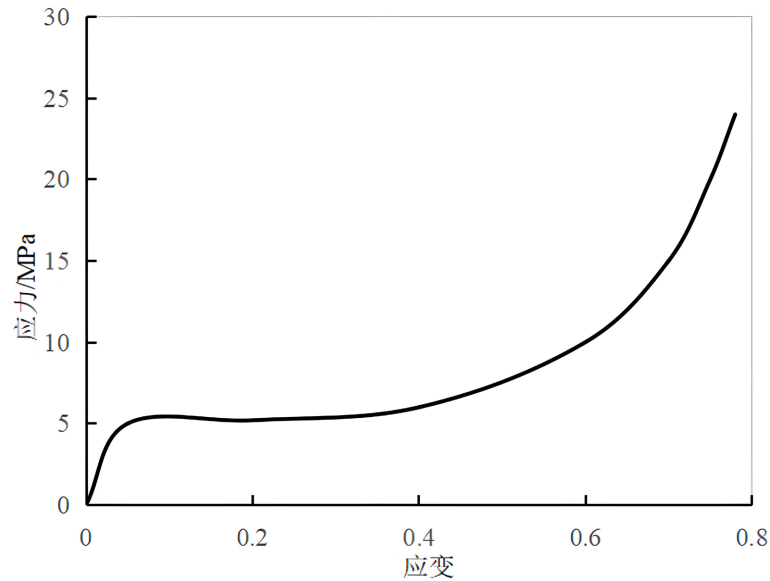


Figure 3. Stress-strain curve of aluminum foam material
图 3. 泡沫铝材料应力 - 应变曲线

Table 5. Hourglass control
表 5. 沙漏控制

*HOURGLASS							
HGID	IHQ	QM	IBQ	Q1	Q2	QB	QW
1	1	1E-05					

7) 点火位置

在 K 文件中模型点火位置设置如表 6 所示。

Table 6. Ignition position setting
表 6. 点火位置设置

*INITIAL_DETONATION				
PID	X	Y	Z	LT
2	0.0	0.0	2.0	0.0

8) 时间控制

求解终止时间设置为 0.05s，时间步长控制为 0.67。

2.4. 基本假设

瓦斯爆炸是一种极其迅速复杂的化学反应，其爆炸过程中所涉及大量的中间和瞬间产物，在本文中忽略其化学反应的中间过程。为了简化计算，对模型做出了一些基本假设如表 7 所示：

Table 7. Basic assumptions of model
表 7. 模型基本假设

编号	基本假设
(1)	巷道内只有瓦斯爆炸热源存在，巷道再无其它热源。
(2)	设置巷道壁面光滑，设置管道厚度沿环向和长度分布均匀并稳定。
(3)	模型设置一端密闭，另一端开口且无反射边界条件。
(4)	初始温度和压力分别为 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ， $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 。不考虑对流换热和热辐射效应，管道内壁面上有热流输入。
(5)	常温常压下瓦斯初始状态如浓度、温度和压力均匀分布。
(6)	忽略化学反应的中间过程。

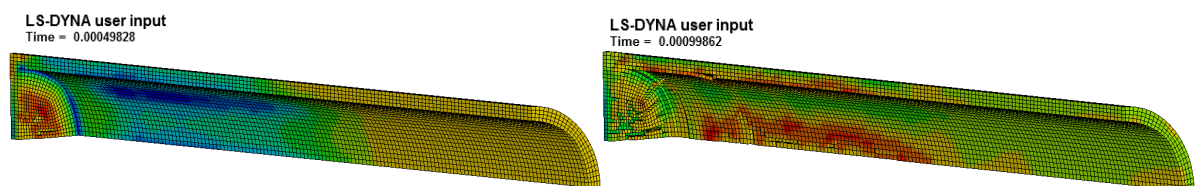
3. 数值模拟与结果分析

3.1. 巷道壁面损伤破坏特征验证

图 4 为巷道壁面损伤破坏情况，由图 4 可以得到，巷道内瓦斯爆炸瞬间，封闭端壁面最先受到损伤，并且损伤位置为壁面中心位置。说明了瓦斯爆炸主要沿轴向传播，传播能量也主要集中在轴向上，此时瓦斯爆炸冲击波超压强度已经超过巷道封闭端壁面某些单元的承受能力，程序判定该单元失效，该单元在模型中被自动删除。封闭端壁面损伤破坏特征与封闭端壁面超压、位移、速度、等效应力分析一致，与封闭端壁面超压、位移、速度、等效应力云图响应一致。

随着瓦斯爆炸的反应封闭端损伤破坏区域不断扩大，损伤破坏程度也不断加深，封闭端中心位置最里层单元损伤破坏后，紧接着第二层壁面开始遭到损伤。封闭端整个壁面都受到不同程度的损伤破坏，尤其在壁面交界圆周处损伤破坏较严重，出现撕裂和穿壁现象。这是由于交界处应力集中，同时受到轴向和 Z 向载荷共同作用所致，由此也可以得到：封闭端壁面损伤研究非常重要，在管道设计和瓦斯爆炸防护时应充分考虑瓦斯爆炸的传播特性，重点对损伤破坏严重区域如交界处、壁面中心位置进行设计改进和防护加强。

与此同时，在轴向壁面上，一些应力比较集中的地方开始产生损伤，不过相对于封闭端壁面损伤程度较轻。随着瓦斯爆炸的不断进行，损伤区域逐渐变大，损伤破坏位置由封闭端向开口端发展，越靠近封闭端损伤破坏程度越严重些。不过壁面损伤破坏区域不会一直沿开口方向扩展，在瓦斯区，壁面基本受到不同程度损伤破坏，但是在空气区，损伤破坏逐渐减弱。最终由于瓦斯气体耗竭瓦斯爆炸能量衰减，壁面不会再受到损伤破坏。整个过程和文献分析的壁面超压、速度、位移、有效应力时程规律相一致[2][8]，符合壁面超压、速度、位移、有效应力云图分布规律，壁面损伤破坏也和大平煤矿瓦斯爆炸事故调查报告的破坏程度和范围的结论一致，因此建立的模型是有效可靠的。



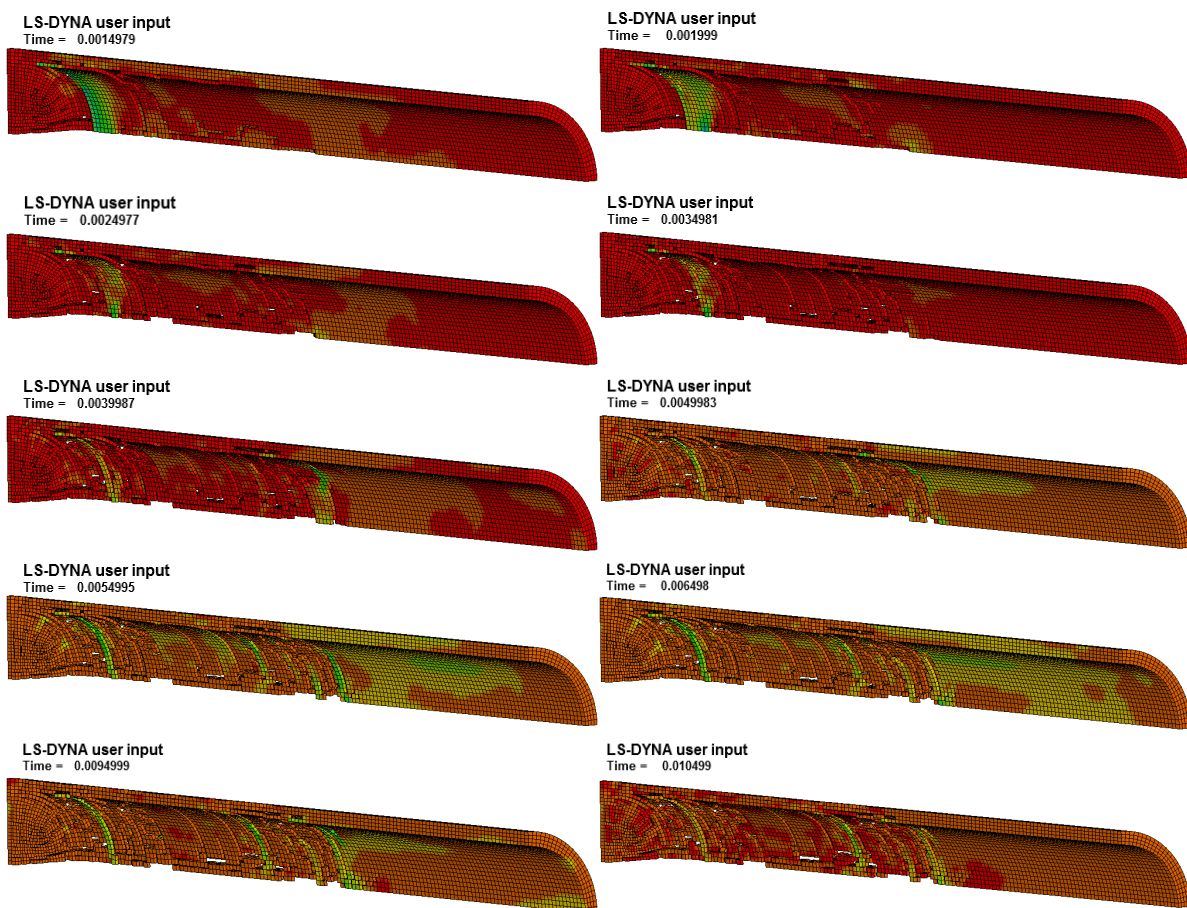


Figure 4. Damage-destruction characteristics of wall
图 4. 壁面损伤破坏特征

3.2. 防护巷道壁面的数值模拟分析

3.2.1. 巷道壁面防护材料

泡沫铝材料具有各向同性，较高的阻尼减振作用和较好的冲击吸能能力，同时还具有耐腐蚀和高吸能效率等特性，瓦斯爆炸冲击荷载在冲击泡沫铝材料的同时将消耗一部分能量转化为多孔材料的变形能，从而减小直接加载到壁面上的瓦斯爆炸冲击波能量，可以有效的保护巷道壁面。

在 LS-DYNA 中嵌入有适用于模拟泡沫铝的材料模型，如蜂窝结构模型、可压缩泡沫结构模型等。本文采用各向同性硬化的可压缩泡沫模型，主要描述泡沫铝在压缩条件下的本构行为，通常假设拉压对称、塑性应变(体积塑性应变和偏量塑性应变)控制屈服面的演化。

3.2.2. 壁面防护巷道模型

图 5 为巷道壁面泡沫铝安置情况，分别对封闭端铺设厚度 0.15 m 的泡沫铝层和对轴向壁面铺设厚度 0.1 m 的泡沫铝层的巷道进行数值模拟，分析其防护性能。

如图 6 所示在基础巷道和壁面防护巷道壁面设置相应测点，其中 a 测点为 41605 号单元，坐标位置为(0,0,0.2)；b 测点为 25729 号单元，坐标位置为(0,1,2.5)，c 测点为 36097 号单元，坐标位置为(0,1,7.5)。

3.2.3. 防护效果分析

封闭端 a 测点在防护前和防护后的超压、应力、速度、位移规律如图 7 所示，其中 FH-a 表示防护后

的 a 测点变化规律。封闭端 b、c 测点在防护前和防护后的超压、应力、速度、位移规律如图 8 所示，其中 FH-b、FH-c 表示防护后的 b、c 测点变化规律。

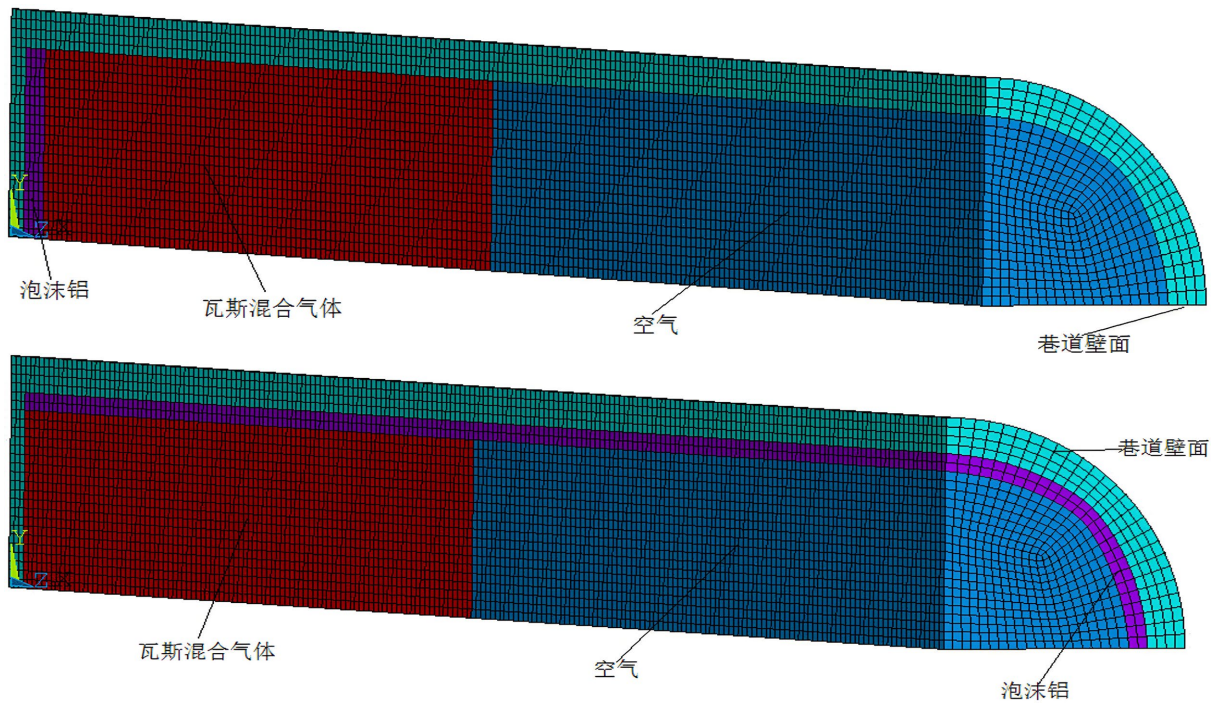


Figure 5. Wall protection settings
图 5. 壁面防护设置

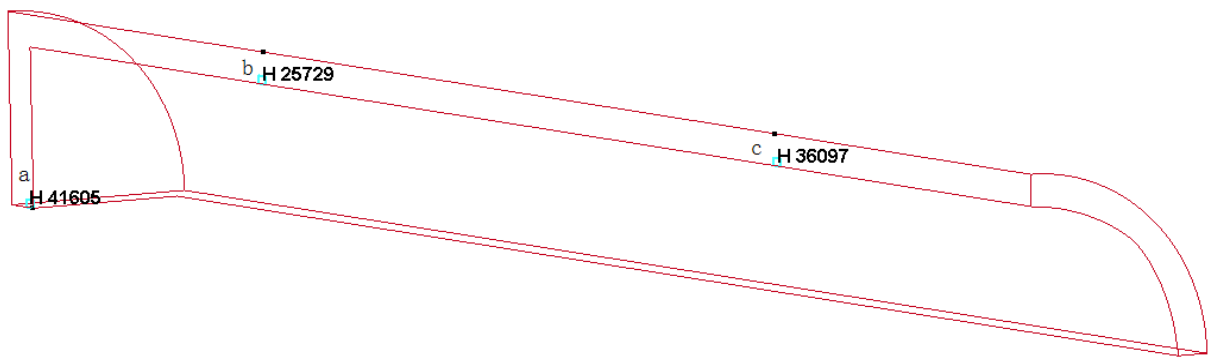
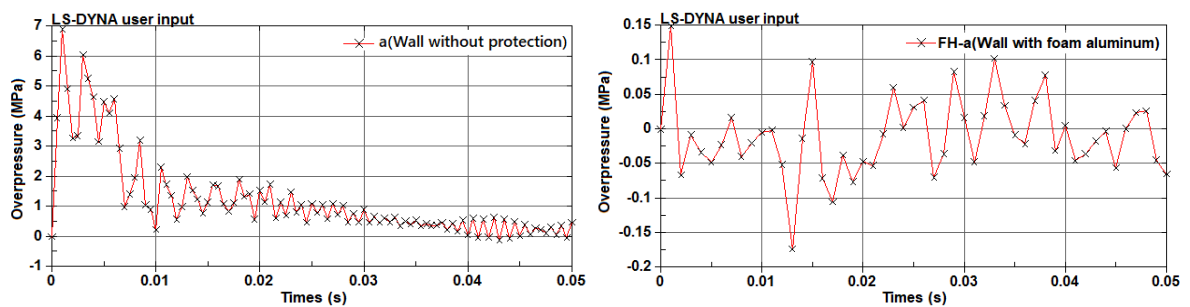


Figure 6. Measurement point settings
图 6. 测点设置



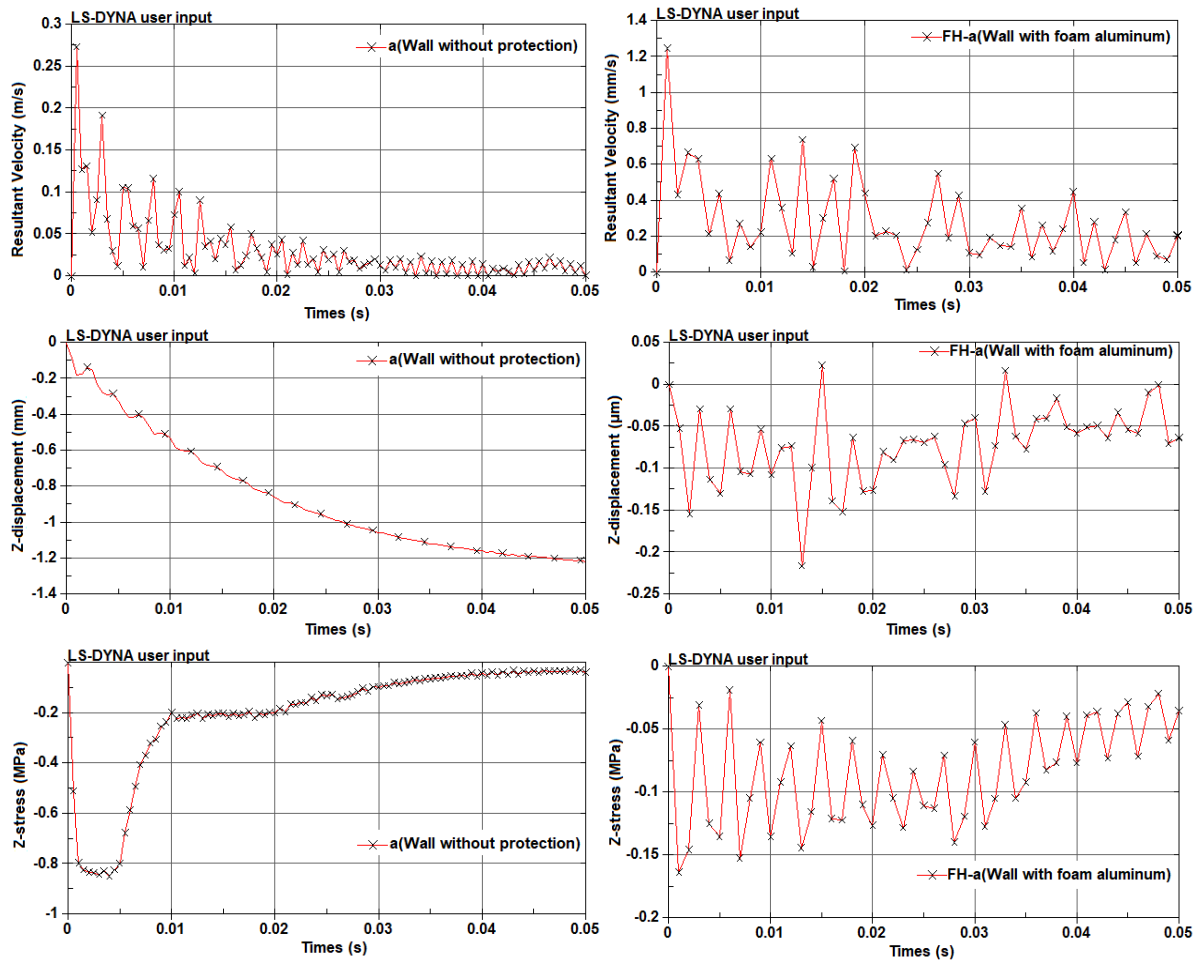


Figure 7. Comparison of time history curve of measuring point a
图 7. a 测点时程曲线对比

1) 超压分析

图 7 中, 通过比较 a 测点的超压时程曲线可以得到, 封闭端在防护前超压测值迅速达到 6.85 MPa, 然后逐渐衰减, 防护后超压测值明显衰减, 最大超压测值仅为 0.17 MPa, 降幅达到 97.51%。并且此超压测值出现的时间明显向后推移了。图 8 中, 通过比较 b、c 测点的超压时程曲线可以得到, 轴向壁面在防护前 b 测点超压最大值为 5.91 MPa, c 测点超压最大值为 3.1 MPa; 防护后, b 测点超压最大值为 0.48 MPa, c 测点超压最大值为 0.46 MPa, 降幅均达到 85%以上。此外由于防护层的存在, 绝大部分冲击波和反射冲击波都作用在了泡沫铝防护体上, 因此巷道壁面超压测值较小, 超压加载频率降低, 壁面得到了较好的防护。

2) 速度分析

图 7 中由 a 测点的速度对比分析可以得到, 壁面未设置泡沫铝前, 封闭端 a 测点速度最大值达到了 0.274 m/s, 增加泡沫铝防护措施后, a 测点速度最大值为 0.00125 m/s, 速度降低了 99.5%, 速度传播频率也有所降低。对于巷道轴向壁面上的 b、c 测点, 由图 8 中速度时程曲线对比图可得, 进行防护前 b 测点最大速度 0.154 m/s, c 测点最大速度 0.101 m/s; 进行防护后, b 测点速度最大值仅为 0.0103 m/s, c 测点速度最大值为 0.0154 m/s。速度分别降低了 93.3%和 84.7%。由于有泡沫铝材料的防护, 瓦斯爆炸产生的冲击波荷载不能够直接作用于壁面, 而爆炸荷载峰值随着时间推移迅速降低, 因此延缓了爆炸作用对壁面的冲击, 冲击速度绝大部分都消耗在了防护壁面上。

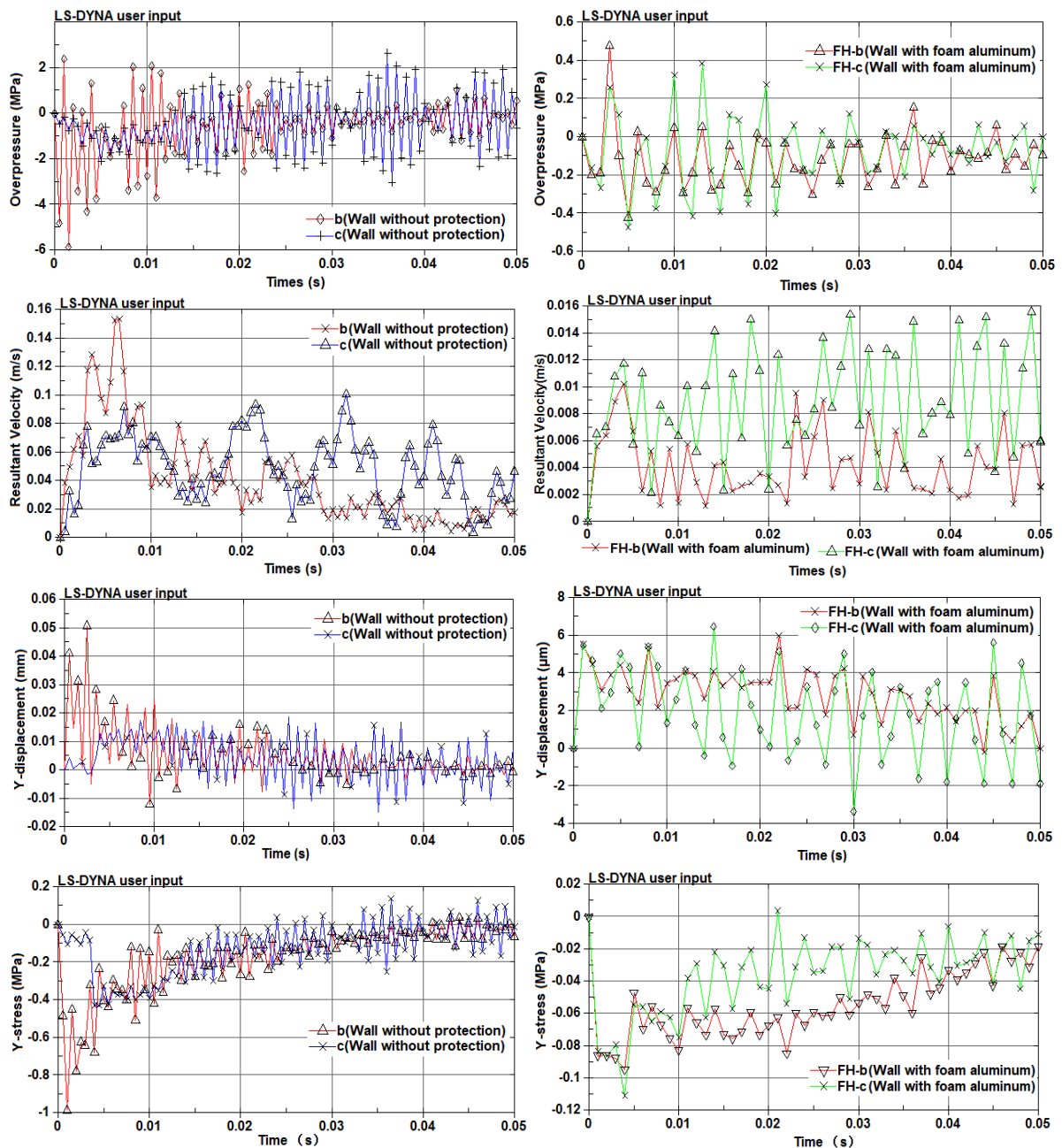


Figure 8. Comparison of time history curve of measuring point b and c
 图 8. b 和 c 测点时程曲线对比

3) 位移分析

图 7 中由 a 测点的位移对比分析可以得到，位移随时间变化趋势有较大区别，普通巷道中，封闭端位移量呈阶梯状逐渐增加，最大位移量有 $1.2\text{E}-3\text{ m}$ ，经过防护了的巷道位移量变化较为波动，但位移量减少了许多。图 8 中 b、c 测点位移时程图可以看出，b 测点位移减小到 $6.01\text{E}-06\text{ m}$ ，c 测点位移减小到 $6.5\text{E}-06\text{ m}$ ，位移量分别降低了 88.1%和 65.4%。由于泡沫铝材料有较大的变形能力和吸能作用。当瓦斯爆炸冲击波波阵面到达泡沫铝材料的界面时，防护壁面在变形过程中吸收了部分爆炸能量，起到了缓冲的效果，传递给壁面的载荷有限，最终壁面位移量降低有效保护了壁面损伤破坏程度。

4) 应力分析

图 7 中由 a 测点在 Z 方向的应力对比分析可以得到, 防护后的应力由防护前的 0.847 MPa 降低到 0.163 MPa。降幅达到 80.75%。同样地, 图 8 中 b、c 测点在 Y 方向应力在防护后也有所降低, b 测点应力由 0.984 MPa 降到 0.0945 MPa, 降幅达到 90.39%, 效果显著。c 测点应力由 0.428 MPa 降低到防护后的 0.11 MPa, 降幅达到 74.29%。由于泡沫铝对瓦斯爆炸冲击载荷有较大的反射和衰减作用。当部分爆炸冲击载荷透过防护层在壁面交界面时, 产生应力波, 由于壁面材料的弹性模量较大也就是阻抗较大, 因此, 在交界面处的瓦斯爆炸应力波绝大部分被反射, 所以巷道壁面应力载荷强度已经大为降低, 减轻了对巷道壁面结构造成的损伤破坏。

总的来说, 泡沫铝的各种防爆特性有利于壁面结构的整体强度, 提高壁面结构的整体抗爆性能。与无防护层壁面结构相比, 设置防护后壁面的整体损伤破坏显著减小。

4. 结论

本文运用 LS-DYNA 数值模拟了瓦斯爆炸对巷道壁面破坏特性及防护特性, 得出如下结论:

1) 巷道内瓦斯爆炸瞬间, 封闭端壁面最先受到损伤, 并且损伤位置为壁面中心位置, 随着冲击的持续作用, 反应封闭端损伤破坏区域不断扩大, 损伤破坏程度也不断加深, 损伤破坏位置由封闭端向开口端发展, 越靠近封闭端损伤破坏程度越严重些。

2) 添加泡沫铝防护材料后, b 测点和 c 测点超压最大值降幅均达到 85% 以上。绝大部分冲击波和反射冲击波都作用在了泡沫铝上, 瓦斯爆炸产生的冲击波荷载不能够直接作用于壁面, 而爆炸荷载峰值随着时间推移迅速降低, 因此延缓了爆炸作用对壁面的冲击, 冲击速度绝大部分都消耗在了防护壁面上。

3) 当瓦斯爆炸冲击波波阵面到达泡沫铝材料的界面时, 防护壁面在变形过程中吸收了部分爆炸能量, 起到了缓冲的效果, 传递给壁面的载荷有限, 最终壁面位移量降低有效保护了壁面损伤破坏程度。

4) 当部分爆炸冲击载荷透过防护层在壁面交界面时, 产生应力波, 由于壁面材料的弹性模量较大也就是阻抗较大, 因此, 在交界面处的瓦斯爆炸应力波绝大部分被反射, 所以巷道壁面应力载荷强度已经大为降低, 减轻了对巷道壁面结构造成的损伤破坏。

基金项目

国家自然科学基金项目“煤矿采空区垮落煤岩体堆积体区域瓦斯爆炸热冲击动力演化机制及作用模型”(编号: 52574241)、“瓦斯爆炸冲击-地应力动静载荷下巷道壁面煤岩体损伤破坏特性及能量耗散研究”(编号: 52574242)。

参考文献

- [1] Kurdyumov, V.N. and Matalon, M. (2013) Flame Acceleration in Long Narrow Open Channels. *Proceedings of the Combustion Institute*, **34**, 865-872. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.07.045>
- [2] Jia, Z.Z., Ye, Q. and Li, H. (2023) Damage Assessment of Roadway Wall Caused by Dynamic and Static Load Action of Gas Explosion. *Processes*, **11**, Article 580. <https://doi.org/10.3390/pr11020580>
- [3] 张天阔. 管网瓦斯爆炸冲击波破坏特性研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- [4] 陈雷. 瓦斯爆炸能量分布特征及热冲击破坏作用研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
- [5] 陈雷, 叶青. 瓦斯爆炸对隧道衬砌应力影响的数值模拟[J]. 矿业工程研究, 2021, 36(3): 40-47.
- [6] 史浩镨. 瓦斯爆炸冲击波作用下巷道损伤破坏特性研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2024.
- [7] 邓照玉. 瓦斯爆炸对巷道壁面损伤破坏的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5): 1792-1798.
- [8] 贾真真, 叶青, 杨卓华. 瓦斯爆炸冲击-地应力动静载荷下巷道壁面损伤特性[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(10): 116-123.

-
- [9] 滕洋洲, 叶青, 贾真真. 双爆源瓦斯爆炸对巷道冲击破坏特性的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2): 196-202.
- [10] Li, S.J., Jia, Z.Z. and Ye, Q. (2023) Study on Dynamic Response of Damper under Gas Explosion Impact. *Sustainability*, **15**, Article 3356. <https://doi.org/10.3390/su15043356>
- [11] Xue, Y., Chen, G., Zhang, Q., Xie, M. and Ma, J. (2021) Simulation of the Dynamic Response of an Urban Utility Tunnel under a Natural Gas Explosion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **108**, Article 103713. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103713>
- [12] Li, Z.P., Wu, S.C., Cheng, Z.Q. and Jiang, Y. (2018) Numerical Investigation of the Dynamic Responses and Damage of Linings Subjected to Violent Gas Explosions Inside Highway Tunnels. *Shock and Vibration*, **2018**, 1-20. <https://doi.org/10.1155/2018/2792043>
- [13] Yang, Y., Zheng, K., Li, Z., Li, Z., Si, L., Hou, S., *et al.* (2019) Experimental Study on Pore-Fracture Evolution Law in the Thermal Damage Process of Coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **116**, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.ijmms.2019.03.004>
- [14] 李志鹏, 吴顺川, 严琼, 蒋一波. 瓦斯剧烈爆炸隧道衬砌损伤数值模拟与机理分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 167-177.
- [15] Wang, C., Zhao, Y. and Addai, E.K. (2017) Investigation on Propagation Mechanism of Large Scale Mine Gas Explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **49**, 342-347. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.07.011>
- [16] 张煜航, 武晓东, 庄大杰, 等. 泡沫铝填充半球壳结构动力学特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 65-73.