

松散堆积体对瓦斯爆炸传播特性影响研究

黄书恒, 叶青, 贾真真

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4月15日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

为探究松散堆积体对瓦斯爆炸传播规律的影响, 利用Ansys Fluent建立管道瓦斯爆炸模型, 分析了不同空隙率、阻塞比及阻塞长径比条件下的瓦斯爆炸火焰传播与超压演化过程。结果表明: 空隙率较小时, 火焰在进入堆积区前的传播受到短暂抑制, 进入堆积区后, 火焰速度大幅提升, 且与空隙率呈负相关关系; 随空隙率增大, 超压峰值与升压速率均相应上升。随堆积体阻塞比增加, 火焰传播速度、超压峰值及升压速率均同步提高, 爆炸强度呈整体增强趋势; 同时, 超压峰值出现位置随阻塞比增大而前移, 升压速率的变化趋势与超压峰值保持一致。阻塞长径比对爆炸特性的影响呈现差异化特征: 随长径比增大, 火焰在堆积体内部的传播受到抑制, 在堆积区呈现先降低后升高的变化规律; 超压峰值与升压速率均随长径比增大而提高, 火焰通过堆积体后的最终速度亦随之增大。

关键词

安全工程, 瓦斯爆炸, 松散堆积体, 空隙率, 阻塞比, 阻塞长径比

Research on the Influence of Loose Accumulation Bodies on the Propagation Characteristics of Gas Explosions

Shuheng Huang, Qing Ye, Zhenzhen Jia

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

Received: April 15, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

To explore the influence of loose accumulation bodies on the propagation law of gas explosion, a pipeline gas explosion model was established by using Ansys Fluent, and the flame propagation and

overpressure evolution process under different porosity, blockage ratio and blockage length-to-diameter ratio conditions were analyzed. The results show that when the porosity is small, the flame propagation is temporarily inhibited before entering the accumulation area, and the flame speed increases significantly after entering the accumulation area, and is negatively correlated with the porosity. With the increase of porosity, the overpressure peak and pressure rise rate increase accordingly. With the increase of the blockage ratio of the accumulation body, the flame propagation speed, overpressure peak and pressure rise rate increase simultaneously, and the explosion intensity shows an overall strengthening trend. At the same time, the position where the overpressure peak appears moves forward with the increase of the blockage ratio, and the change trend of the pressure rise rate is consistent with that of the overpressure peak. The influence of the blockage length-to-diameter ratio on the explosion characteristics shows differentiated features: with the increase of the length-to-diameter ratio, the flame propagation in the accumulation body is inhibited, and the flame speed in the accumulation area shows a change rule of first decreasing and then increasing; the overpressure peak and pressure rise rate increase with the increase of the length-to-diameter ratio, and the final speed of the flame after passing through the accumulation body also increases.

Keywords

Safety Engineering, Gas Explosion, Loose Pile, Porosity, Blockage Ratio, Blockage Aspect Ratio

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

瓦斯爆炸作为煤矿最具破坏性的灾害之一,严重威胁井下的安全生产[1][2]。煤矿采空区内存在大量顶板垮落形成的松散岩石,这些不规则堆积岩石会改变爆炸流场结构,产生湍流加速效应,促使层流燃烧向湍流燃烧转变,加剧瓦斯爆炸的破坏程度。因此,深入探究采空区垮落岩石堆积体对瓦斯爆炸传播特性的影响机制,对科学评估采空区爆炸风险和制定防爆抑爆技术具有重要的工程实际意义。

针对障碍物对瓦斯爆炸传播的影响,国内外学者已开展大量研究。1982年, Moen 等[3]最先报道了在障碍物作用下,爆炸火焰的速度和压力会显著增加。Nguyen 等[4]研究了圆形、正方形和六边形障碍物对瓦斯爆炸火焰的影响,发现正方形障碍物条件下爆炸火焰传播速度最快。Wei C 等[5]通过实验对比方孔形和矩形障碍物对甲烷连续爆炸的影响,发现方孔障碍物通过中心射流效应显著提高了火焰速度。孟亦飞等[6]利用 Fluent 软件模拟不同障碍物条件下通风管网中的瓦斯爆炸传播规律,揭示了障碍物数量对爆炸冲击波的影响机制。乔征龙等[7]使用数值模拟法研究柔性障碍物对瓦斯爆炸的影响,发现柔性障碍物同样能提高爆炸危险性,但爆炸强度低于刚性障碍物。罗振敏等[8]研究发现圆柱体障碍物的存在加剧了管道瓦斯爆炸反应程度,且大幅缩短了爆炸反应时间。徐景德等[9]通过实验和数值模拟,对比研究不同数量障碍物对瓦斯爆炸的影响,揭示了障碍物数量对爆炸火焰的加速机制。2016年,郭丹彤等[10]最先从截面变化的角度探讨渐变截面对超压峰值的影响,发现截面变化会使爆炸超压增大,爆炸速度先减小后增大。在障碍物阻塞比与空间排列方面,潘鹏飞等[11]与余明高等[12]的研究表明,管道内的湍流强度和爆炸超压随阻塞比的增加表现出非线性变化。2014年,Na'inna 等人[13]首次利用自建的实验平台,研究了障碍物阻塞比对瓦斯爆炸强度的影响,发现高阻塞比条件下瓦斯爆炸强度更高。Wang X 等[14]运用数值模拟方法分析障碍物间距对瓦斯爆炸的影响,得出障碍物间距梯度与爆炸火焰传播速度和超压峰

值的关系。邓浩鑫[15]等探究障碍物间距及排列方式的耦合效应,发现错位排列或特定间距下的障碍物群能够形成持续的湍流扰动。

目前关于障碍物对瓦斯爆炸影响的研究,大多采用理想化的规则几何体(如球体、立方体、挡板等)或简单的阵列排布,而采空区内的松散堆积体具有不规则形状、棱角等特征,其内部的复杂空隙结构及阻塞比、阻塞长径比与规则障碍物存在显著差异。鉴于此,本文利用 Ansys Fluent 数值模拟软件,建立管道瓦斯爆炸数学物理模型,探究松散堆积体对爆炸流场结构、火焰传播速度及超压分布的影响规律。

2. 瓦斯爆炸数学物理模型

2.1. 瓦斯爆炸数学模型

瓦斯爆炸过程涉及湍流流动、传热反应及燃烧反应等系列复杂过程,在数值模拟过程中,复杂的现实情况可能导致计算量庞大,通过假设忽略一些次要因素来简化模拟过程。所作出的基本假设:预混气体为 9.5%浓度瓦斯,且混合均匀;预混气体和生成物视为理想气体;模型中壁面视为刚性绝热壁面,壁面不发生形变且不考虑壁面与气体间传热;瓦斯气体采用两步化学反应。

基于上述假设,瓦斯爆炸满足以下方程。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g \quad (1)$$

式中: x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 方向的坐标; u_i 、 u_j 分别为 i 、 j 方向的速度, m/s; p 为压力, Pa; ρ 为流体密度, kg/m³; μ 为动态粘滞系数, N·s/m²。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_t) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j e_t) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + s_h \quad (2)$$

式中: e_t 为反应总能量, J; λ 为导热系数; S_h 为化学反应源项, W·kg/(m³·mol)。

组分输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} \right) + R_i \quad (3)$$

式中: Y_i 为组分 i 的质量分数; D_i 为组分 i 的扩散系数; R_i 为组分 i 的化学反应净生成速率, kg/(m³·s)。

2.2. 数学模型可靠性验证

为验证数学模型在管道瓦斯爆炸研究中的可靠性,以前人在一个长 3 m, 截面 0.2 × 0.2 m 的管道中开展的瓦斯爆炸试验为基础[16], 构建出如图 1 所示的三维管道模型。各监测点均位于管道上壁面中心点处, 分别距点火源 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25 m。模型左端封闭, 右端开口, 在距管道左端 0~2.5 m 处填充浓度为 9.5% 的瓦斯混合气体。管道右端设置温度 1800 K, 半径为 10 mm 的点火区域, 其他区域初始温度为 300 K。使用尺寸为 1 mm 的网格对试验管道进行网格划分。

通过模拟得到瓦斯爆炸过程中各监测点的超压峰值, 与试验结果对比(图 2)发现, 模拟得到的超压峰值变化规律与试验结果一致, 相对误差为 1.2%~9.7%, 在工程可接受范围内, 但超压模拟值整体略高于试验值。造成该结果的原因是与实际爆炸试验相比, 数值模拟假定爆源气体为理想气体, 且将管道壁面设置为光滑恒温无摩擦, 实际试验中管道壁面会导热, 存在热损失。从结果来看, 能证明所选数学模型是可靠的。

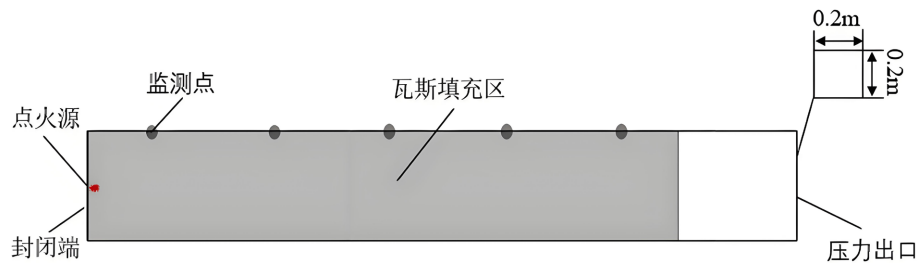


Figure 1. Geometric model of the test pipeline

图 1. 试验管道几何模型

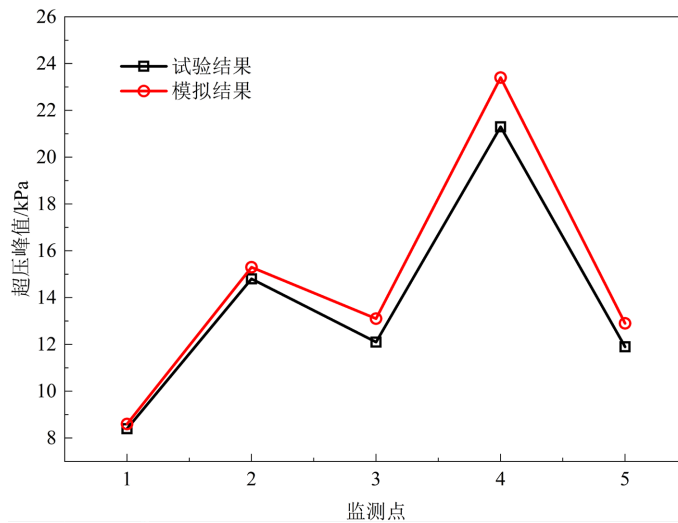


Figure 2. Comparison of simulation results with experimental results

图 2. 模拟结果与试验结果对比

2.3. 物理模型构建

本文将瓦斯爆炸空间假定为三维矩形管道，如图 3 所示。管道的长宽高分别设定为 $L = 1.6 \text{ m}$ 、 $W = 0.24 \text{ m}$ 和 $H = 0.2 \text{ m}$ 。为了模拟真实的采空区垮落岩石堆积形态，采用离散单元法软件 Rocky 构建三维岩石物理模型。

通过设定岩石颗粒的尺寸、形状、粒径级配及接触模型，模拟岩块从顶板自然垮落、碰撞、滚落直至堆积平衡的动力学过程，从而获得了具备不规则形状和棱角的岩石堆积体物理模型。

模拟计算域的边界条件设置如下：模型左端为封闭壁面，右端为压力出口，管道内部填充浓度为 9.5% 的甲烷-空气预混气体。为了获取爆炸传播过程中的关键流场参数，在模型纵截面中心处布置了 7

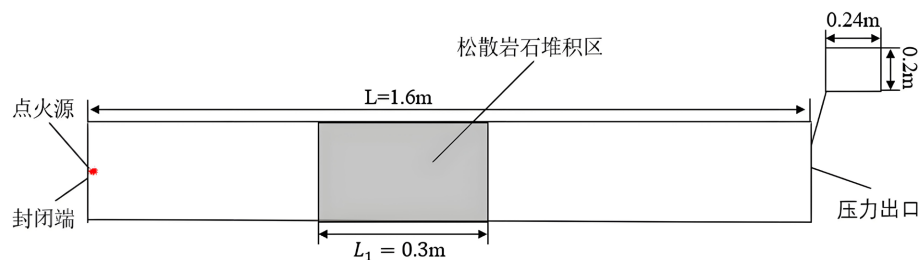


Figure 3. Geometric model of the explosion pipe

图 3. 爆炸管道几何模型

个测点，堆积区上方监测点均位于管道空隙处，不与堆积体障碍物和管道壁面接触。其横坐标分别为 0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.7 m、0.9 m、1.1 m、1.3 m，记录爆炸过程中各点处的温度、超压和气流速度数据。

2.4. 网格无关性验证

网格划分过程在 Fluent meshing 中进行，采用多面体和六面体网格相结合的方法，建立单元尺寸分别为 0.5、1、2、3、5 mm 的网格进行计算，研究网格尺寸对瓦斯爆炸的影响。不同网格尺寸下的爆炸超压峰值对比如图 4 所示。可以看出，随着网格尺寸减小，爆炸过程的超压峰值增大，且超压峰值的增大程度逐渐减小。当网格尺寸由 1 mm 减小至 0.5 mm 时，超压峰值相差最高为 6.43%，最小为 2.36%，此时爆炸超压峰值差距较小，网格尺寸的影响基本可以忽略，因此，综合考虑计算效率和可靠性，本文最终选择 1 mm 尺寸的网格对模型进行划分。

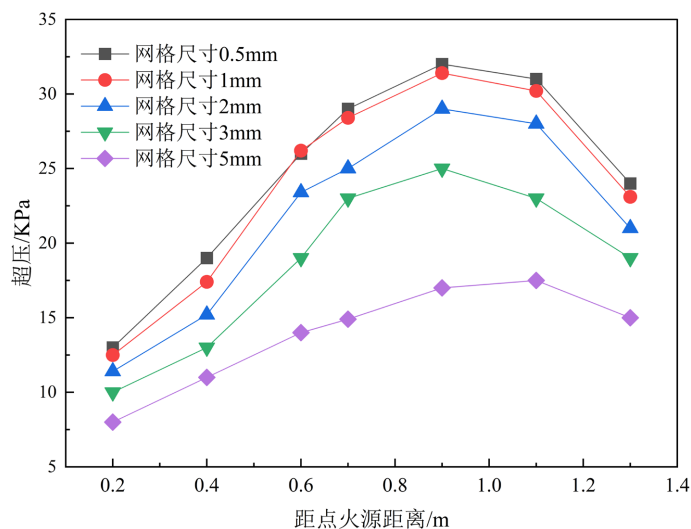


Figure 4. Distribution of the peak explosion overpressure along the pipeline under different grid sizes

图 4. 不同网格尺寸下爆炸超压峰值沿管道的分布

3. 结果与分析

3.1. 空隙率对瓦斯爆炸的影响

选用无障碍物对照组工况，40~60 mm (空隙率 0.541)、60~80 mm (空隙率 0.594)、80~100 mm (空隙率 0.625) 三种单一粒径，以及 60~100 mm 复合粒径 (空隙率 0.613) 四种堆积体工况进行爆炸模拟，分别记为工况 I 至 IV，研究结果如下：

图 5 为不同空隙率条件下瓦斯爆炸过程中的温度云图。分析可知，爆炸火焰锋面在接触堆积体障碍物后发生分流，由于障碍物上方空间受到挤压，火焰锋面在经过该区域后传播速度骤增。不同空隙率条件下，堆积体内部火焰形态出现明显差异，工况 I 堆积体内部空隙较小，火焰被迫进入狭窄通道，形成数量众多的细小射流，随着空隙率增大，堆积体内部空隙通道逐渐变宽，火焰锋面能以相对粗壮的射流通过堆积区。对于复合粒径工况，由于大小岩石随机堆积，其内部空隙尺寸分布极其不均，导致火焰锋面在堆积体内部传播速度产生巨大差异，高速射流和低速射流在空隙内交汇时发生碰撞，使得火焰锋面穿过堆积体区域时形态表现出不规则性。

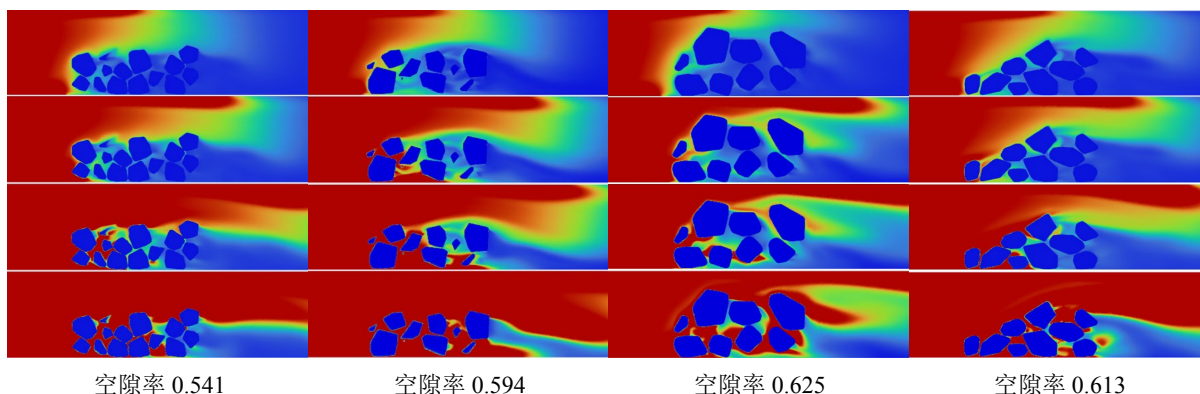


Figure 5. Temperature propagation patterns in loosely packed materials with different porosity
图 5. 不同空隙率松散堆积体的温度传播形态

图 6 为不同空隙率条件下距点火源长度的火焰速度变化结果。分析可知，在点火初期，较小空隙率条件下的火焰速度最低，这是由于空隙率较低时，堆积体对压力波的反射特性上更趋近于实体障碍物，其对前驱压力波的反射效果更为显著，从而短暂抑制了火焰加速；当火焰进入堆积区后，工况 I 由于空隙最窄、阻塞效应最强，未燃气体被迫以极高速度从障碍物上方绕射。在距点火源 0.7 m 处，工况 I 的火焰速度达到了 51.3 m/s，远高于其他工况；当火焰过堆积体障碍物进出口附近(距点火源 1.3 m 处)，工况 I 的最大速度达到了 135.5 m/s，较工况 II (90.6 m/s)、III (74.1 m/s)、IV (86.4 m/s)分别提升了约 49.6%、82.9%和 56.8%。

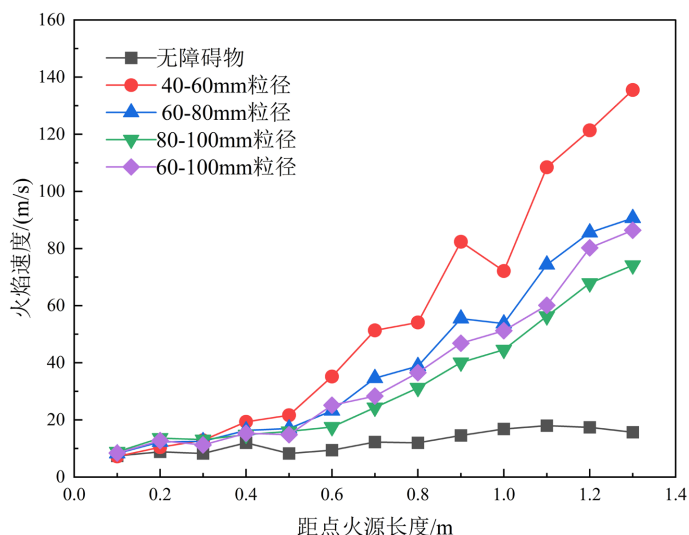


Figure 6. Variation in flame speed as a function of distance from the ignition source at different porosity levels

图 6. 不同空隙率下距点火源长度的火焰速度变化

图 7 为不同空隙率条件下各监测点爆炸超压与升压速率沿管道的分布情况。发现各工况下超压与升压速率均在堆积体后方距点火源 0.9 m 处达到峰值。整体爆炸超压表现为工况 III > 工况 IV > 工况 II > 工况 I。其中，空隙率最大的工况 III 产生了最大超压峰值 65.8 KPa，其最大升压速率达到了 3.95 Mpa/s。这是由于工况 III 具有最大的岩石粒径，内部空隙通道更为通畅，使得更多未燃气体能够直接通过堆积体区域，并在堆积体后方的涡流区与上方绕流气体发生强烈交汇。这种强烈的湍流混合作用加剧了燃烧反应与压力波叠加效应，从而在堆积体后方诱发了更强的爆炸超压。相比之下，小空隙率工况虽然局部区

域达到了更高的火焰速度,但通过堆积体区域的气流较少,其堆积区后方的爆炸强度低于大空隙率工况。

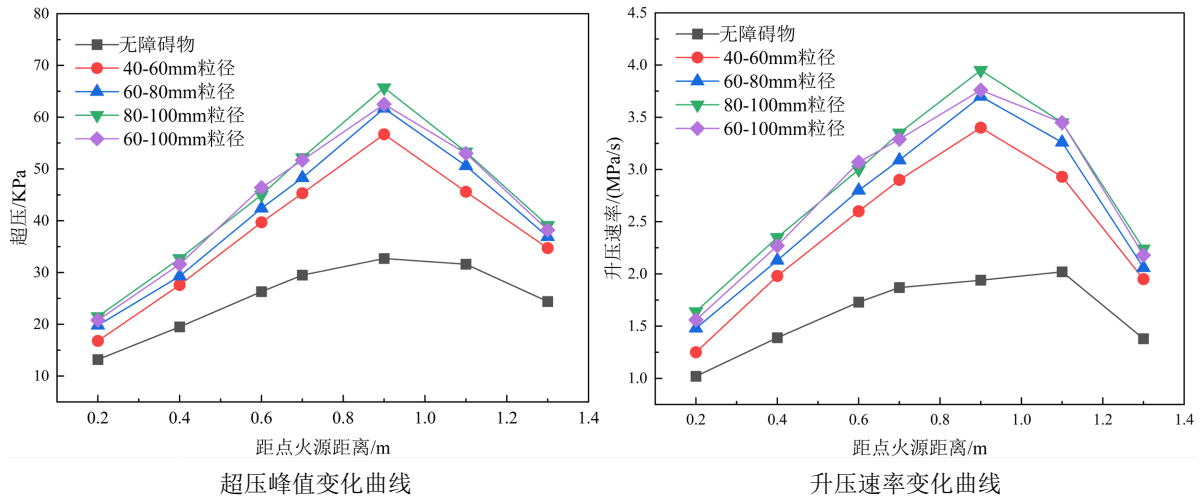


Figure 7. Peak overpressure and pressure rise rate at monitoring points during the explosion
图 7. 爆炸过程中监测点超压峰值与升压速率

图 8 给出了不同空隙率下堆积体区域的湍流动能分布云图及峰值变化, 由图可知, 空隙率最小的工况 I 湍动能峰值最高, 达到 $1874 \text{ m}^2/\text{s}^2$; 随着空隙率增大, 湍动能峰值明显降低, 工况 III 仅为 $942 \text{ m}^2/\text{s}^2$; 工况 II 和工况 IV 分别为 $1480 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $1279 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。其原因在于: 低空隙率下堆积体内部通道狭窄, 气体被迫以极高的速度绕流, 在堆积体表面和内部空隙中产生强烈剪切和涡旋, 因此产生了更高的湍动能; 而高空隙率下通道较宽, 流动更为顺畅, 局部剪切和涡流强度更低。对比图 7 可以发现, 工况 I 的湍动能峰值远高于工况 III, 但其超压峰值反而最低, 而工况 III 的超压峰值最高。其原因在于: 工况 I 的湍动能集中在堆积体内部的微小空隙中, 这些湍流尺度小、耗散快, 难以转化为后方压力波的有效驱动; 同时由于通道阻塞严重, 通过堆积体的未燃气体总量有限, 后方的湍流混合与压力叠加效应较弱。工况 III 湍动能主要集中在堆积体后方的大范围尾流区, 形成持续的大尺度涡旋, 从而显著增强燃烧反应最终产生更高的超压。工况 IV 因粒径分布不均, 湍动能分布呈现不规则性, 但总体趋势一致。

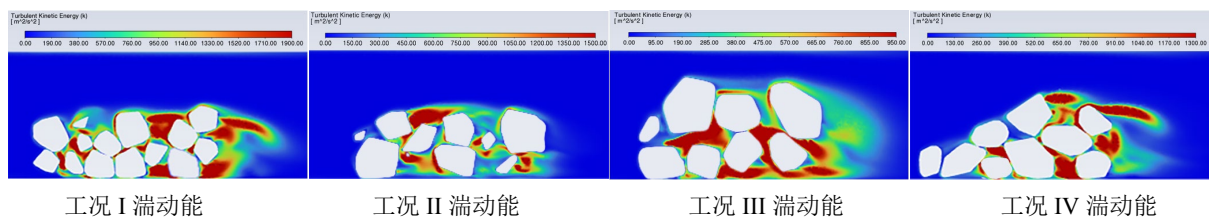


Figure 8. Turbulent kinetic energy of the flame passing through the packed zone at different void ratios
图 8. 不同空隙率下火焰通过堆积区时湍流动能

3.2. 阻塞比对瓦斯爆炸的影响

为研究阻塞比对瓦斯爆炸传播特性的影响, 选取无障碍物工况及阻塞比为 25%、50%、70%、90%的工况进行模拟, 研究结果如下:

图 9 为不同阻塞比条件下瓦斯爆炸过程中的温度云图, 由图可知, 阻塞比为 25%时, 堆积体障碍物对爆炸火焰的阻塞作用有限, 火焰前锋能够较为完整地堆积体上方通过, 障碍物后方未燃区域面积较小。阻塞比为 50%时, 火焰锋面在越过障碍物后出现了明显分流, 紧贴管道上方壁面及障碍物边界的火

焰锋面速度增大。这是由于阻塞比的增加导致流通截面积减小,未燃气体通过障碍物时流速和湍流强度增加,从而加速了火焰传播。阻塞比提升至70%后,火焰在通过堆积体区域时变形程度进一步增加,火焰迅速从堆积体上方自由空间传出,部分火焰以射流形式从堆积体内部通过,随后与上方火焰汇合。90%阻塞比条件下,堆积体障碍物占据了管道的大部分截面,火焰锋面在通过堆积体区域时受到强烈挤压,从堆积体内部空隙穿出并与上方火焰汇合。整体而言,随着阻塞比增加,火焰锋面的破碎程度和湍流强度均呈增强趋势,爆炸危险性相应提高。

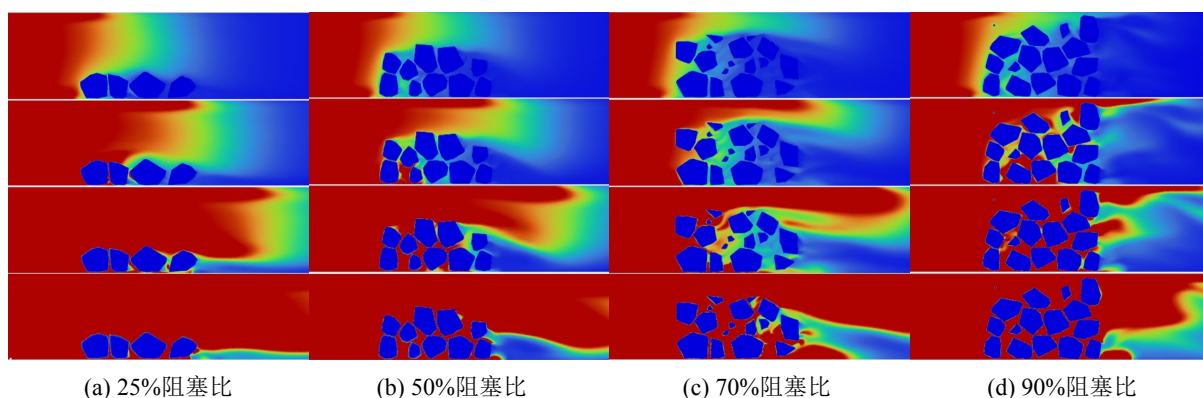


Figure 9. Temperature propagation patterns in loosely packed bodies with different blockage ratios
图 9. 不同阻塞比松散堆积体的温度传播形态

图 10 为不同阻塞比条件下距点火源长度的火焰速度变化结果。由图可知,爆炸初期各工况火焰速度增长较为平缓;当火焰进入堆积体区域后,受流通截面积减少的影响,未燃气体受到挤压,火焰传播速度迅速增加。在距点火源 0.7 m 处,无障碍物工况的火焰速度为 12.3 m/s,而阻塞比为 25%、50%、70%、90%工况的速度分别达到了 23.3 m/s、34.0 m/s、46.3 m/s 和 65.5 m/s。火焰通过堆积区后,在障碍物后方湍流作用下速度继续增长,无障碍物工况与 25%阻塞比工况在距点火源 1.2 m 处达到峰值,随后逐渐下降。在距点火源 1.3 m 的出口附近,25%阻塞比工况的速度为 37.2 m/s,而 50%、70%和 90%阻塞比工况分别达到 90.7 m/s、106.1 m/s 和 135.0 m/s,均远高于无障碍工况的 15.7 m/s。上述结果表明,堆积体阻塞

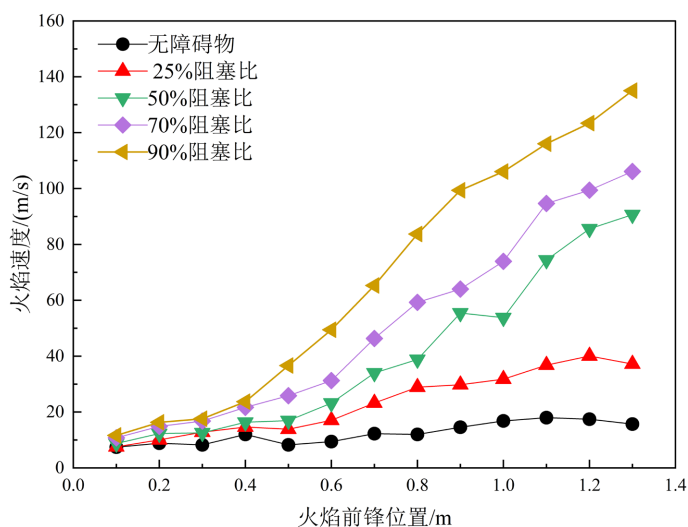


Figure 10. Variation in flame speed as a function of distance from the ignition source at different blockage ratios
图 10. 不同阻塞比下距点火源长度的火焰速度变化

比的增大对火焰传播速度具有明显的促进作用。

图 11 为不同阻塞比条件下各监测点爆炸超压与升压速率沿管道的分布情况。由图可知，不同阻塞比条件下，各监测点的爆炸超压峰值与升压速率均呈现先升高后降低的变化趋势。在火焰通过堆积区的过程中，流通截面积的减小使得爆炸压力迅速增加。在 0.7 m 处，无障碍工况超压为 29.1 KPa，而 50%、70%和 90%阻塞比工况分别达到 48.3 KPa、52.4 KPa 和 63.9 KPa。在距点火源 0.9 m 处，50%和 70%阻塞比工况的超压峰值分别上升至 61.3 KPa 和 65.1 KPa。90%阻塞比工况的超压峰值出现在 0.7 m 处，在 0.9 m 处已开始逐渐下降。其原因在于阻塞比较大时，大部分火焰与压力波通过堆积体内部空隙通道传播，仅少部分从障碍物上方通过，由于堆积体障碍物的阻塞作用，减少了未燃气体的运移，导致爆炸超压峰值位置发生前移。升压速率的变化趋势与超压峰值一致，都随阻塞比的增加而提高。随后受管道出口泄压作用影响，各工况的超压峰值及升压速率逐渐降低。

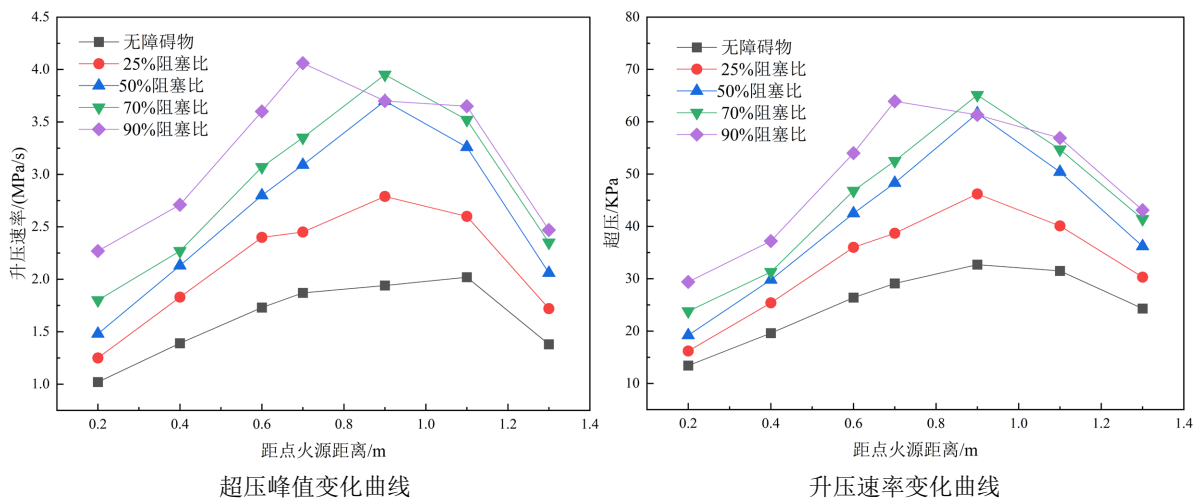


Figure 11. Peak overpressure and pressure rise rate at monitoring points during the explosion

图 11. 爆炸过程中监测点超压峰值与升压速率

图 12 给出了不同阻塞比下堆积体区域的湍动能分布云图及峰值变化，由图可知，阻塞比为 25%时，湍动能主要集中于障碍物顶端边界及后方一个小范围涡流区，峰值为 1000 m^2/s^2 。阻塞比升至 50%时，湍动能峰值增至 1430 m^2/s^2 。阻塞比为 70%时，峰值进一步升至 1850 m^2/s^2 ，障碍物内部及后方形成大范围强湍流区。阻塞比为 90%时，湍动能峰值达 2150 m^2/s^2 ，较 25%工况提升 115%，高湍流区覆盖障碍物顶端、内部空隙及整个后方尾流区。湍动能随阻塞比增大呈非线性增长，其原因在于阻塞比增大迫使气流通过更窄的流通截面，速度显著增加，边界层剪切和涡旋强度同步增强。强烈的湍流扰动促进了火焰与未燃气体的混合，加速燃烧反应，从而解释了图 11 中超压峰值和升压速率随阻塞比增大而升高的现象。

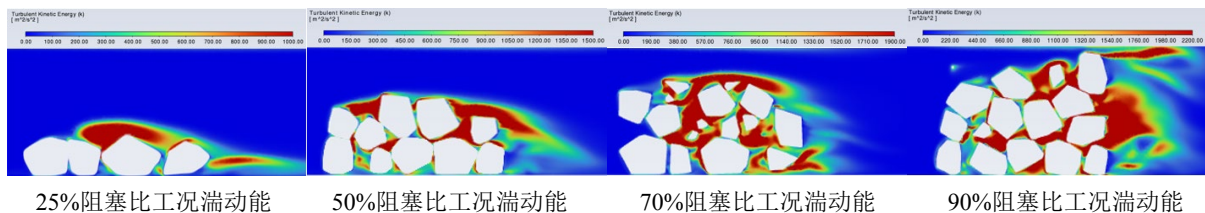


Figure 12. Turbulent kinetic energy of the flame as it passes through the accumulation zone under different blocking ratios

图 12. 不同阻塞比下火焰通过堆积区时湍流动能

3.3. 阻塞长径比对瓦斯爆炸的影响

阻塞长径比定义为堆积体障碍物沿管道轴向的阻塞长度与管道高度之比,通过改变阻塞长度来调节阻塞长径比。为研究阻塞长径比对瓦斯爆炸传播特性的影响,选取阻塞长度 0.15 m、0.3 m、0.6 m 的堆积体障碍物进行模拟,对应阻塞长径比为 0.75、1.5、3.0。研究结果如下:

图 13 为不同阻塞长径比条件下瓦斯爆炸过程中的温度云图,由图可知,当长径比为 0.75 时,堆积体障碍物沿管道轴向长度较短,火焰从堆积体上方自由空间与内部空隙通道传出的速度差异较小,两股火焰几乎同步推进,并在堆积体尾部交汇后形成统一的火焰锋面。长径比为 1.5 时,由于堆积体障碍物上方自由空间流通阻力较小,火焰推进速度明显快于进入堆积体内部的火焰,当上方火焰越过堆积体时,内部火焰仍在空隙通道中缓慢推进。长径比为 3.0 时,火焰在堆积体内部的传播明显受到抑制。大部分火焰接触障碍物后被迫向上方自由空间挤压,仅有少量火焰进入堆积体前端空隙中,且因流通阻力过大而无法继续深入,上方火焰到达管道出口附近时,堆积体内部仍未被火焰穿透。以上结果表明,在较大的阻塞长径比条件下,松散堆积体对火焰内部传播起到了明显的抑制作用。

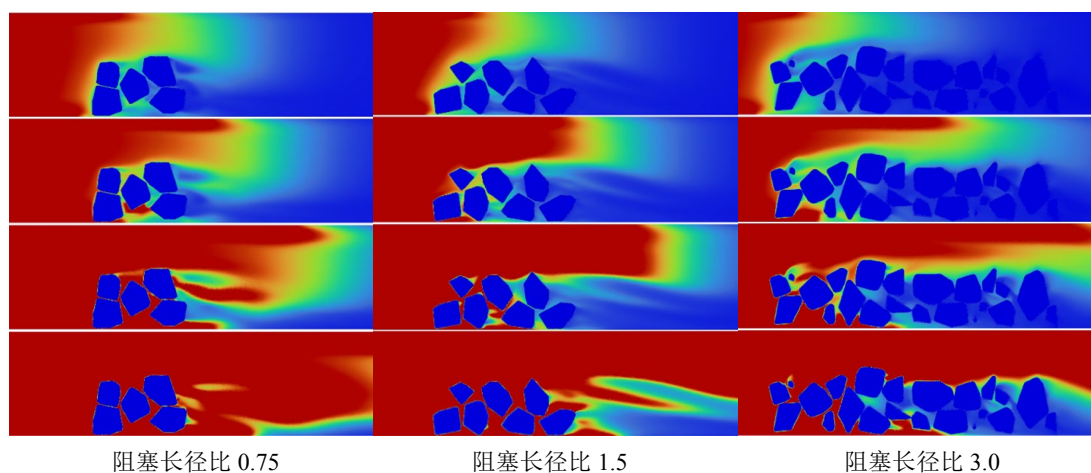


Figure 13. Temperature propagation patterns in loosely packed bodies with different blockage ratios
图 13. 不同阻塞比松散堆积体的温度传播形态

图 14 为不同阻塞长径比条件下距点火源长度的火焰速度变化结果。由图可知,在火焰传播初期,各工况速度差异较小。当火焰进入堆积体区域后,长径比对传播速度的影响逐渐显现。由于堆积体改变了气流的流动路径,使未燃气体在堆积体上方产生挤压,加快了火焰传播速度。当火焰传播到距点火源 0.9 m 处时,长径比为 0.75、1.5 和 3.0 工况的火焰速度分别为 62.3 m/s、55.4 m/s 和 68.4 m/s。在靠近管道出口的 1.3 m 处,各工况最终速度分别为 98.4 m/s、90.6 m/s 和 112.5 m/s。以上数据表明,长径比较大时,火焰与障碍物上方边界的相互作用距离更长,堆积体后方形成的湍流扰动更强,有利于火焰在尾流区进一步加速。

图 15 为不同阻塞长径比条件下各监测点爆炸超压与升压速率沿管道的分布情况。由图可知,火焰进入堆积体区域后,流通截面积减小使未燃气体受到强烈挤压,燃烧反应加剧,上述三种工况的超压分别上升至 46.2 KPa、48.6 KPa 和 53.1 KPa。火焰通过堆积体区域后,各工况超压在 0.9 m 处达到最大值,分别为 59.6 KPa、61.4 KPa 和 64.9 KPa。升压速率的变化趋势与超压分布基本一致,并随长径比增大而明显提高。在距点火源 0.7 m 处,各工况的升压速率分别达到 4.6 MPa/s、4.8 MPa/s 和 5.3 MPa/s;在距点火源 0.9 m 处,长径比 3.0 工况的升压速率峰值达到 6.8 MPa/s,高于其他工况。

图 16 给出了不同阻塞长径比下堆积体区域的湍动能分布云图及峰值变化,由图可知,阻塞长径比为

0.75 时，湍动能峰值为 $1070 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，高值区主要分布在堆积体内部及尾部附近。长径比增至 1.5 时，峰值升至 $1390 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，高湍流区沿轴向向后扩展。长径比 3.0 时，峰值达 $1760 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，较 0.75 工况提升约 65%。湍动能随长径比增大而增大，其原因在于：长径比增大延长了气流与堆积体上方边界及管道上壁面的相

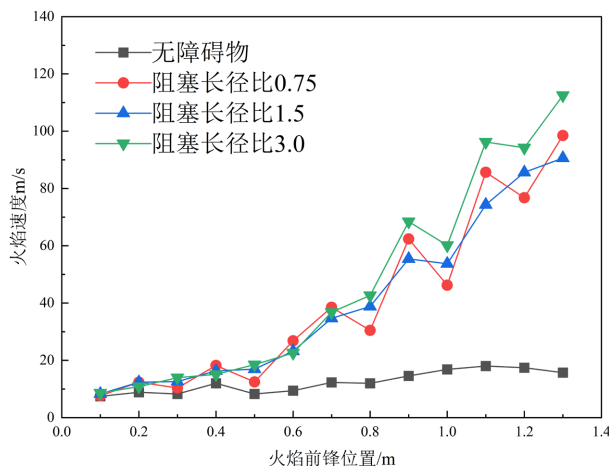


Figure 14. Variation in flame speed as a function of distance from the ignition source for different blockage aspect ratios
图 14. 不同阻塞长径比下距点火源长度的火焰速度变化

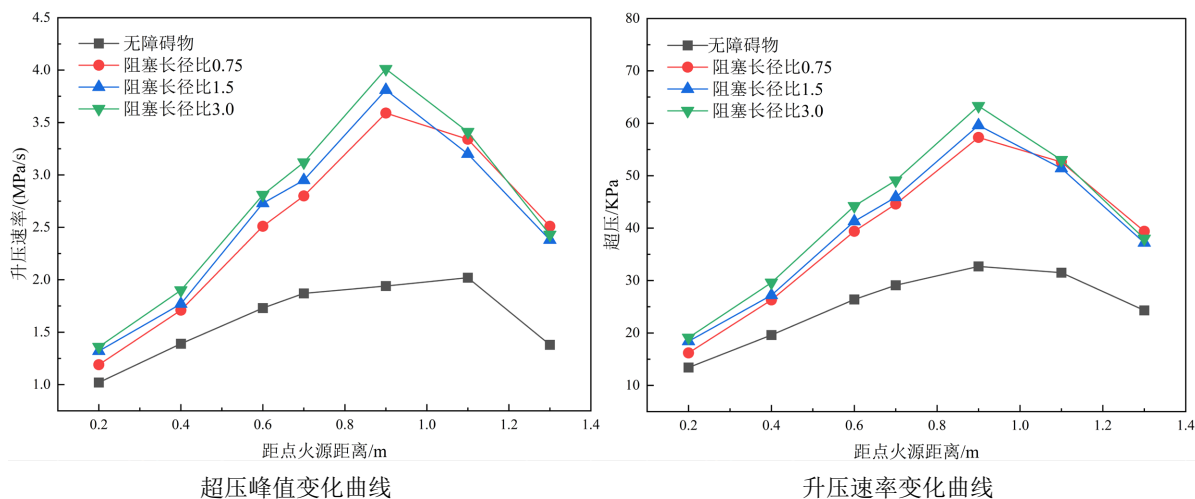


Figure 15. Peak overpressure and pressure rise rate at monitoring points during the explosion
图 15. 爆炸过程中监测点超压峰值与升压速率

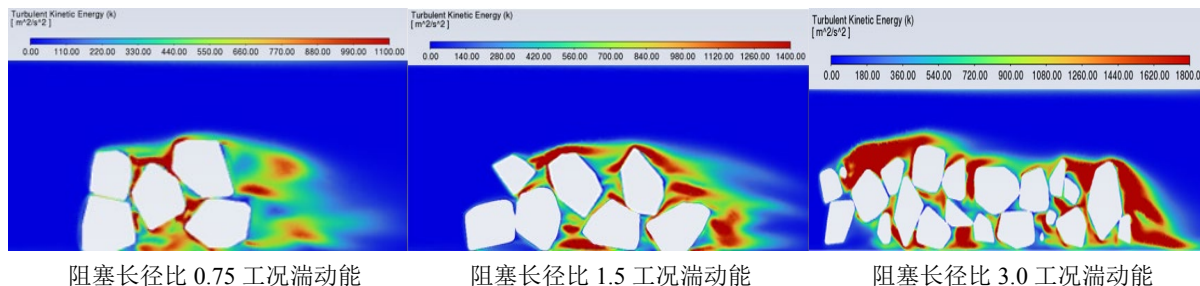


Figure 16. Turbulent kinetic energy of the flame passing through the packed zone under different blockage aspect ratios
图 16. 不同阻塞比下火焰通过堆积区时湍流动能

互作用距离, 气流在长距离的狭窄通道内持续加速, 导致尾流区湍流扰动范围扩大、强度提高。

4. 结论

本文利用 Ansys Fluent 软件进行了瓦斯爆炸数值模拟研究, 讨论了松散堆积体空隙率、阻塞比和阻塞长径比对瓦斯爆炸温度, 火焰传播速度, 超压峰值和升压速率的变化情况, 得出了以下结论。

1) 随着堆积体空隙率减小, 堆积体内部狭窄通道对火焰锋面的挤压与拉伸作用加剧, 导致火焰局部传播速度提高。堆积体空隙率增大时, 流体通过堆积体的阻力降低, 火焰在堆积体后方涡流区交汇, 导致爆炸超压峰值及升压速率升高。

2) 随着堆积体阻塞比增加, 管道内部有效流通截面积减少, 由此引发的流场扰动导致火焰传播速度、爆炸超压及升压速率均随阻塞比的增加而增大, 且爆炸强度的最大部位均位于堆积体后方的涡流区域。

3) 堆积体阻塞长径比增大时, 堆积体内部空隙对火焰的阻隔效应增强, 火焰在堆积体空隙内的传播受到抑制。长径比的增加同时延长了流体与障碍物上方边界及管道上壁面的作用距离, 导致堆积体后方区域的爆炸超压峰值和升压速率均随阻塞长径比的增大而提高。

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] 李敏, 王丹, 贺珊, 等. 煤矿瓦斯爆炸风险评估研究综述及进展[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2): 127-136.
- [2] 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.
- [3] Moen, I.O., Lee, J.H.S., Hjertager, B.H., Fuhre, K. and Eckhoff, R.K. (1982) Pressure Development Due to Turbulent Flame Propagation in Large-Scale Methane-Air Explosions. *Combustion and Flame*, **47**, 31-52.
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90087-6)
- [4] Nguyen, T., Strebinger, C., Bogin, G.E. and Brune, J. (2021) A 2D CFD Model Investigation of the Impact of Obstacles and Turbulence Model on Methane Flame Propagation. *Process Safety and Environmental Protection*, **146**, 95-107.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.023>
- [5] Wei, C., Yu, M., Li, H., Wang, J., Hu, G., Yao, Y., et al. (2026) Effect of Square-Aperture and Solid Rectangular Obstacles on Pressure Evolution and Flame Dynamics in Methane-Air Continuous Explosion. *Fuel*, **404**, Article 136405.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136405>
- [6] 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(2): 99-104.
- [7] 乔征龙, 马恒, 邓立军. 基于 Charlette 模型的柔性障碍物对瓦斯爆炸的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2420-2427.
- [8] 罗振敏, 吴刚. 圆柱体障碍物对密闭管道内瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(4): 189-194.
- [9] 徐景德, 周振兴, 张莉聪, 等. 障碍物数量对含尘瓦斯爆炸特性影响的试验和数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(1): 127-134.
- [10] 郭丹彤, 吕淑然. 受限空间障碍物截面变化对混合气体爆炸特性参数的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(2): 83-87.
- [11] 潘鹏飞, 谭迎新, 王志青. 条形障碍物对瓦斯爆炸特性影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(5): 71-76.
- [12] 余明高, 刘磊, 郑凯, 等. 障碍物与管道壁面间距比对瓦斯爆炸传播特性的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(5): 151-156.
- [13] Na'inna, A.M., Phylaktou, H.N. and Andrews, G.E. (2014) Effects of Obstacle Separation Distance on Gas Explosions:

The Influence of Obstacle Blockage Ratio. *Procedia Engineering*, **84**, 306-319.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.439>

- [14] Wang, X., Hao, Z., Ma, H. and Gao, K. (2025) Large Eddy Simulation Study on the Effect of Barrier Distance Gradient on Gas Explosion. *Arabian Journal of Chemistry*, **19**, Article 2942025. https://doi.org/10.25259/ajc_294_2025
- [15] 邓浩鑫, 温小萍, 王发辉, 等. 对称障碍物条件下瓦斯爆炸火焰与压力波耦合作用研究[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(1): 161-165.
- [16] 侯振海. 瓦斯(浓度)分布及点火位置对爆炸影响的实验与模拟研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2024.