

不同初始能量下瓦斯爆炸特性的数值模拟研究

郎 锐, 杨雅乔, 张子霜

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月11日; 录用日期: 2025年11月19日; 发布日期: 2025年11月26日

摘 要

为了研究煤矿巷道内瓦斯爆炸的危害性, 采用数值模拟的方法在200长的掘进巷道中进行模拟实验, 研究在不同初始能量下(不同瓦斯浓度、体积)对爆炸后果的影响。研究发现, 相同浓度下。体积越大能达到的爆炸超压和温度也最大, 火焰传播距离越长; 在相同最大当量比情况下, 200 m³时火焰传播距离是100 m³的两倍左右, 并且高温状态持续更久, 高压区域越远。

关键词

掘进工作面, 瓦斯爆炸, 超压, 爆炸温度, 动态热环境

Numerical Simulation Study on the Explosion Characteristics of Gas under Different Initial Energies

Rui Lang, Yaqiao Yang, Zishuang Zhang

College of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 11, 2025; accepted: November 19, 2025; published: November 26, 2025

Abstract

In order to study the hazards of gas explosions in coal mine roadways, a numerical simulation experiment was conducted in a 200-long tunneling roadway to investigate the influence of different initial energies (different gas concentrations and volumes) on the consequences of the explosion. The research found that at the same concentration. The larger the volume, the greater the explosive overpressure and temperature that can be achieved, and the longer the flame propagation distance. Under the same maximum equivalent ratio, the flame propagation distance at 200 m³ is approximately twice that at 100 m³, and the high-temperature state lasts longer, with the high-pressure area being farther away.

Keywords

Driving Face, Gas Explosion, Overpressure, Explosion Temperature, Dynamic Thermal Environment

Copyright © 2025 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

煤炭是中国重要的基础能源,在中国的一次能源消费格局中,煤炭所占比重约为 56%,大幅高出 27% 的世界平均水平。中国这种“以煤为主”的能源消费结构模式,和欧美国家“石油占据主导地位,煤炭、天然气作为辅助,水电、核电予以补充”的能源消费结构状况形成了极为鲜明的差异。随着新增产能逐步释放,全国煤炭产量保持增长,煤炭进口量显著增加。由此可以看出煤炭是我国最为依赖的同时也是最可靠的一次性能源,维持其长期的主导地位,保证煤炭的安全开采变得极其重要[1]。瓦斯作为煤炭形成过程中的伴生气体,具有易燃易爆性,在煤炭开采过程中会涌出与空气结合在通风不良时发生气体堆积到爆炸浓度一旦遇到点火源极易引发爆炸。1950 年到 2016 年间,我国煤矿行业重大事故共发生 294 起,死亡 16,223 人。其中瓦斯煤尘爆炸事故占绝大部分,是水灾、冒顶、火灾的七倍以上[2]。

数值模拟作为现在主流的研究方法,具备方便快捷且经济的优点。Wang 等人[3]采用 FLACS 建立了 200 m 长的管廊模型,针对气云体积、点火位置、顶部泄爆口三种因素进行数值模拟研究,实验结果发现,爆炸峰值压力、和压力振荡上升阶段的持续时间随气云体积的变化有显著差异。在密闭管道中点火设置在 1/4 管道长度时,峰值压力和振荡峰值分别达到最大值。张琼雅等[4]以真实燃气管道为参照,建立了真实比例大小的物理模型,分析各个参数对泄漏时燃气浓度的影响,验证了湍流模型在数值模拟中的准确性及可行性。李东方等[5]采用 FLACS 软件,基于层次分析法的受限空间瓦斯爆炸数值模拟研究,模拟结果表明瓦斯爆炸前火焰加速燃烧,温度升高,后期受壁面以及气流冲击燃烧速度减慢,温度下降。罗振敏等[6][7]通过 FLACS 软件模拟了瓦斯爆炸传播中的压力、温度和火焰的发展变化过程,发现各点温度在距离燃料区较近区域波动幅度小,在稍远的距离波动幅度大,而在距末端较近的距离,温度值较前面的监测点较小。Li 等人[8]研究发现基于 FLACS,研究了城市综合管廊天然气舱内的气体爆炸特性。当点火位置设置在 200m 长的管廊中部区域时超压最大能达到 2.5 MPa。田思雨[9]通过 FLACS 软件建立了煤矿事故的巷道网络模型,针对爆源附近的爆炸进行量化分析,对还原出事故的具体伤害过程有很大的帮助。

目前煤矿瓦斯爆炸的研究平台大多集中在小尺寸管道内,研究内容更多着重于爆炸超压、火焰速度等方面上,而在研究巷道中瓦斯爆炸后温度的动态变化方面较少。FLACS 用于气体通风、扩散、爆炸已经得到全尺寸验证并且已经广泛运用于石油化工行业。因此,本文运用模拟软件研究煤矿巷道中瓦斯爆炸传播过程,重点关注在不同气云量、不同气体浓度的情况下,爆炸压力、温度各参数的峰值以及变化情况,对煤矿巷道内爆炸减灾设施的有效利用和进一步研发提供依据,为后续研究在置障和煤尘耦合爆炸情况下提供技术参考,进一步提升煤矿应对瓦斯爆炸事故的减灾和救灾能力。

2. 数值计算方法

2.1. 数学模型

煤矿巷道中瓦斯爆炸传播是以冲击波的形式,其中涉及到传热传质、由于气体存在粘性由层流变化

为湍流等一系列复杂动力学现象,因此导致现有的瓦斯爆炸实验具有明显的尺寸效应[10],在进行模拟计算前做出以下合理的假设:

- (1) 整个反应处于常温常压状态下。
- (2) 瓦斯与空气已完全均匀混合,且满足气体理想状态方程。
- (3) 巷道模型内无障碍物,壁面为光滑刚性壁面。

瓦斯爆炸反应过程中,遵循以下守恒方程以及湍流方程,控制方程是表达瓦斯爆炸过程中温度、压力、密度、体积、物质的量变化的基础,如下列公式(1)到(5)所示[11],选取笛卡尔坐标系 j 方向为代表。

- (1) 理想气体状态方程:

$$p = \rho RT \quad (1)$$

式中 p 为压力, Pa; ρ 为密度, kgm^{-3} ; R 为气体常数, kmol^{-1} ; T 为温度, K。

- (2) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j) = \frac{\dot{m}}{V} \quad (2)$$

式中 t 为时间, s; β_v 为体积孔隙率, 无量纲数; ρ 为密度, kgm^{-3} ; x_j 是在 j 方向上的长度, m; β_j 是在 j 方向上的面孔隙率; u_j 是在 j 方向上的速度, ms^{-1} ; $\dot{m}$ 为单位时间质量的变化率, kgs^{-1} ; V 为控制单元体积, m^3 。

- (3) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_i u_j) = -\beta_v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \sigma_{ij}) + F_{o,i} + F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i \quad (3)$$

式中 u_i 是在 i 方向上的速度, ms^{-1} ; p 为压力, Pa; σ_{ij} 为应力张量, Nm^{-2} ; $F_{w,i}$ 为壁面在 i 方向上的流动阻力, Pa;

- (4) 湍流动能的输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \beta_v P_k - \beta_v \rho \varepsilon \quad (4)$$

- (5) 湍流动能耗散率的输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \beta_v P_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \beta_v \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中 β 为火焰模型; x_i 为在 i 方向上的长度。 μ_{eff} 为有效粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; k 为湍流动能, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; u_k 是 k 方向上的平均速度, ms^{-1} ; x_k 为在 k 方向的长度, m; δ_{ij} 为 Kronecker δ 函数; 式中 μ 为动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; C_μ 为 $k-\varepsilon$ 湍流模型中的常数; ε 为湍流动能耗散率, m^2s^{-3} 。

2.2. 几何模型

为了准确模拟煤矿掘进巷道内的爆炸过程,在 FLACS 软件中的 CASD 模块中建立长 200 米,内径 3.2×3.2 米,壁厚 0.4 米,如下图 1 所示。一端封闭一端敞开,更好的模拟掘进巷道。在巷道内每隔 10 米设置一个监测点,点火点设置于封闭端中心点。

2.3. 网格划分及模拟验证

在数值模拟计算中,网格的质量直接影响计算的结果,网格应该覆盖重点区域,本模型的在 x , y , z

轴上的网格区域分别为[-1,201]、[0,4]、[0,4]。能覆盖到巷道内所有区域保证后处理云图的完整性。网格的尺寸直接影响到计算结果的准确性和计算所需资源。根据 FLACS 使用手册规定,在气云核心区域网格边长不大于 $D/15$, D 为巷道模型最短一边的边长为 3.2 米,所有网格尺寸应该为 0.2 m,但网格太大太小都会对结果产生影响,所以网格独立性验证十分重要,选取三种网格大小 0.19 m、0.2 m、0.21 m,其结果如下图 2 所示,从中可以看出不同尺寸网格所对应超压峰值和发展历程基本一致,相对误差在 5%左右。网格尺寸过大和过细会影响计算精度,导致计算结果过高。结合手册规定选择 0.2 m 做以下模拟计算。

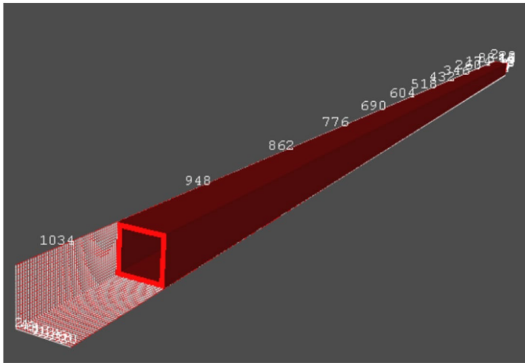


Figure 1. Roadway model
图 1. 巷道模型

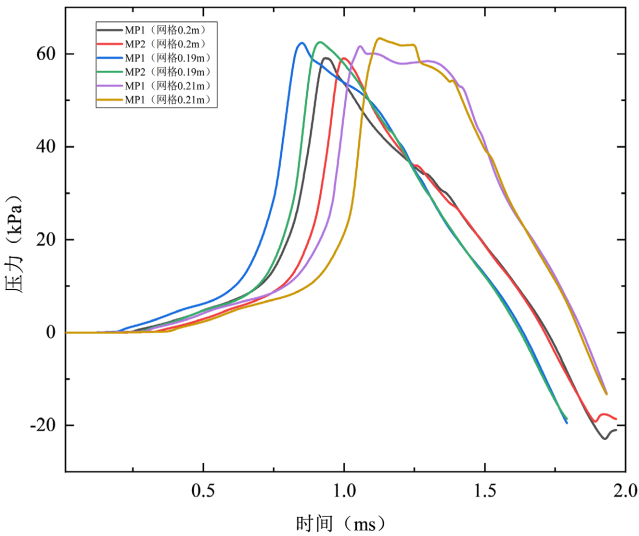


Figure 2. Verification of grid independence
图 2. 网格独立性验证

通过实验数据来验证数值模拟模型的可靠性是最有效的方法,本研究参考中国人民解放军陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室在室外开展的大型瓦斯爆炸试验,该装置截面为方形,测试段全长约 30 m,其几何特征与煤矿巷道极为相似,并且通过几何相似分析和雷诺数相似分析可以看出该模型与数值模型的匹配度[12],模拟参数如下表 1 所示,爆炸实验装置如下图 3 所示。

管道中各监测点的实验超压值和模拟超压值的对比如下表所示,其中相对误差均处于 10%以下,可这些误差可能因为实验本身的误差也有可能是数值模拟假设部分带来的误差。从实验角度来说,压力传感器的安装手法、位置以及传感器本身精度都可以带来系统误差,实验中的预混气体难以保证一定能达

到模拟中理想完全预混状态；从数值模拟角度来说，由于模型壁面假设的理想化，忽略了壁面摩擦力以及作为刚性壁面光滑绝热，然而实验管道壁面可能存在缝隙，在爆炸过程中会产生热耗散等能量损失。并且模拟将气体看作了理想气体忽略了黏性，但总的来说相对误差处于工程误差可接受范围 20%以内。如下表 2 所示，这说明使用的模拟参数能较好的还原出实验结果，证实其可靠性。

Table 1. Initial parameter table
表 1. 初始参数表

参数	设置数值
特征速度	0 m/s
相对湍流强度	0
湍流长度尺寸	0 m
温度	20℃
环境压力	100,000 Pa
CFLC	5
CFLV	0.5
点火源尺寸	0 m ³
点火时间	0 s



Figure 3. Explosion test system
图 3. 爆炸试验系统

Table 2. Relative error comparison table
表 2. 相对误差对比表

测点(m)	实验值(barg)	模拟值(barg)	相对误差(%)
0.5	10.856	10.076	7.18
1	10.408	9.615	7.62
1.5	10.115	9.316	7.90
2	9.970	9.08	8.93
2.5	9.658	8.892	7.93
3	9.677	8.887	8.16
3.5	9.948	9.136	8.16
4	10.408	9.453	9.18
4.5	11.03	9.991	9.42

综上所述, 本研究主要聚焦在气云当量比和气体体积问题上, 浓度梯度有 7.5%、9.5%、11.5%, 体积梯度有 100 m^3 、 200 m^3 。采用控制变量法, 分析浓度的影响时, 气体体积选择 200 m^3 ; 分析体积的影响时, 浓度统一用 9.5%。

3. 模拟结果分析

根据上述所建立的模型进行数值模拟计算, 选择 xy 平面的二维火焰发展变化图如下图 4(a)~(d)所示。

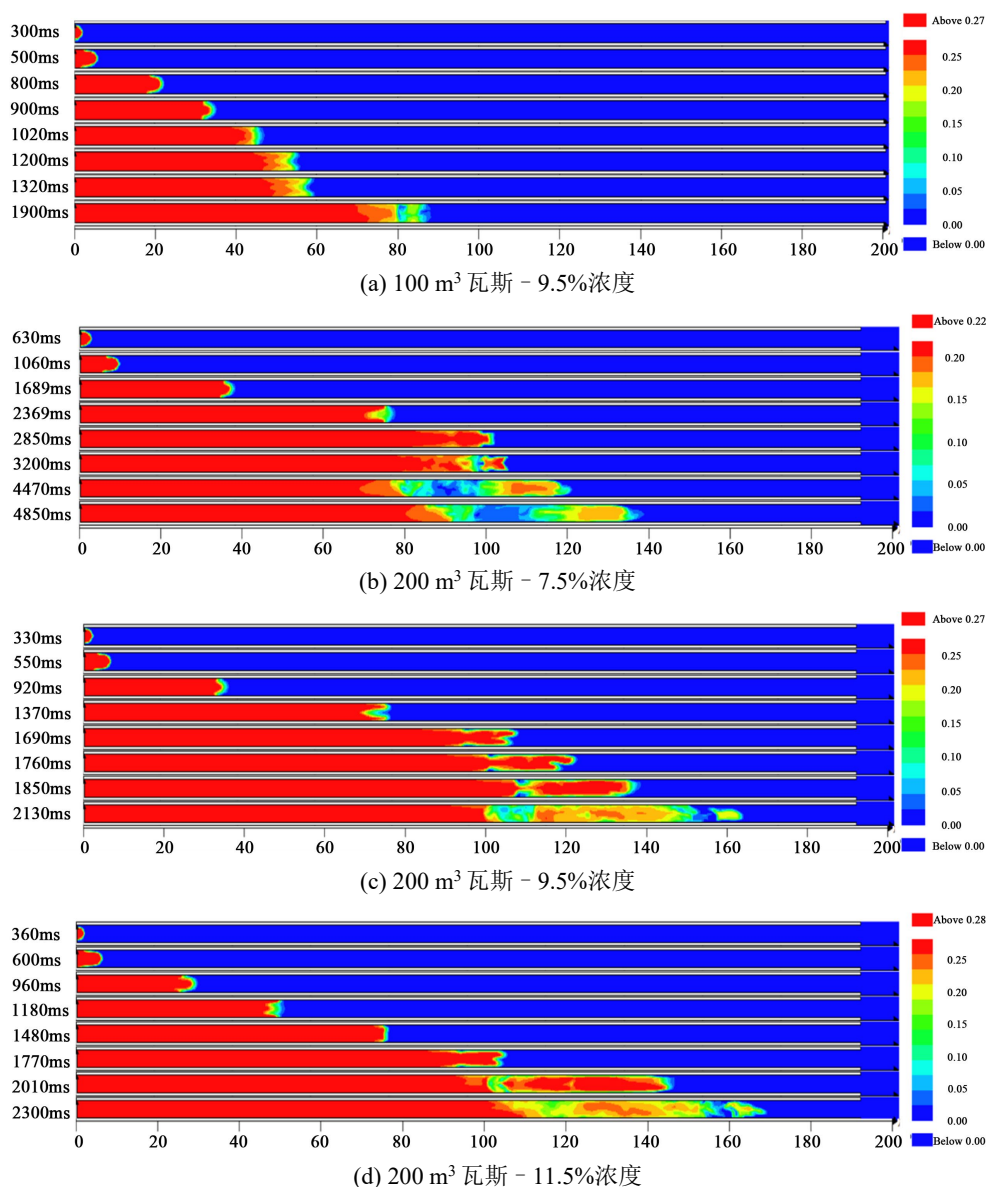


Figure 4. Flame propagation diagram of gas explosion

图 4. 瓦斯爆炸火焰传播图

由图 4 可以看出火焰传播的过程符合球形火焰、指形火焰、郁金香形火焰。在瓦斯和空气预混气体被点燃后, 火焰在巷道内向四周自由扩散, 此时传播速度较慢处于层流燃烧, 火焰继续加速, 受到膨胀气体的挤压和壁面摩擦力, 火焰呈现指形。后续受到流体不稳定性以及 R-T 不稳定性(Rayleigh-Taylor

instability)和 K-H 不稳定性(Kelvin-Helmholtz instabilities)等众多条件共同影响下, 火焰前沿出现褶皱, 壁面附件的反应速率快于中心位置, 火焰向郁金香形转变。其中在 200 m^3 时可以发现在火焰传播中期存在二次加速的现象。火焰不同瓦斯体积和浓度的最大火焰传播距离均不相同, 100 m^3 时最大传播距离 86 m 左右, 瓦斯浓度 11.5% , 体积 200 m^3 时最大距离可达到 170 m 左右。体积为 100 、 200 时分别对应气云长度 9.77 m 和 19.53 m 左右, 基本符合火焰传播长度约为气云长度的 $5\sim 8$ 倍。图 5 展示了爆炸火焰超压分布云图, 以 200 m^3 的 9.5% 浓度瓦斯为例, 代表了反应最猛烈的情况下超压的变化状况。另外提取出各监测点能达到的最大爆炸超压值, 如图 6(a)所示。

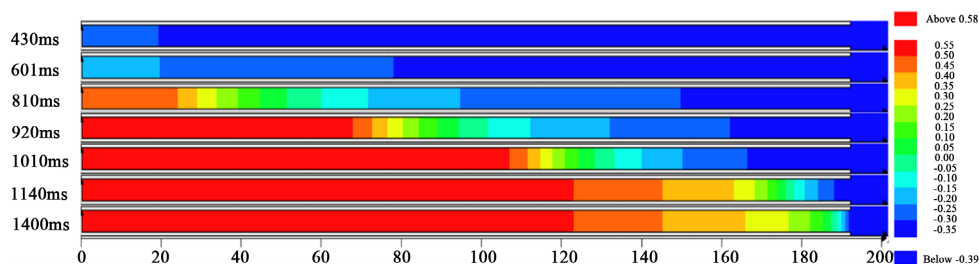


Figure 5. Overpressure distribution diagram

图 5. 超压分布图

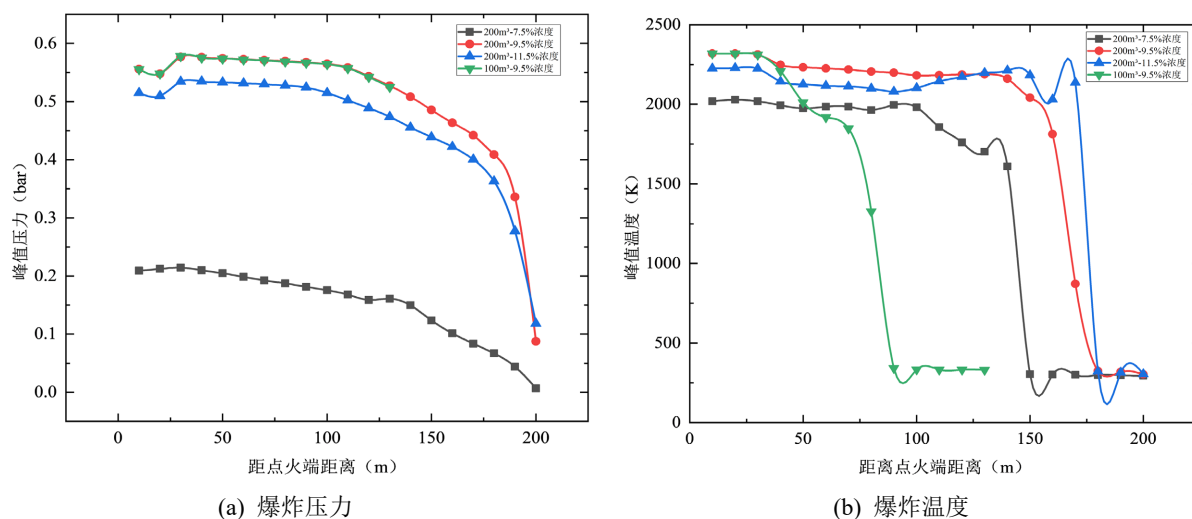


Figure 6. Graphs of explosion pressure and temperature of different volumes and concentrations varying with distance

图 6. 不同体积和浓度的爆炸压力和温度随距离变化图

由图 6(a)中可以看出当浓度均为 9.5% , 体积为 100 m^3 时的爆炸压力远远小于 200 m^3 , 其中在 200 m^3 时, 三种不同浓度的压力变化趋势均大致相同, 分别能达到的最大爆炸压力分别为 0.578 、 0.576 、 0.534 barg 出现短暂的下降后上升在逐渐下降。图 6(b)中展示出了几种工况下各监测点的温度变化曲线, 瓦斯体积 100 m^3 时温度峰值在 75 m 左右出现骤降, 从峰值 2318 k 下降到 332 k ; 瓦斯体积 200 m^3 时, 7.5% 浓度温度峰值分别从 2019 k 下降到 300 k , 9.5% 浓度温度峰值分别从 2319 k 下降到 323 k , 11.5% 浓度温度峰值分别从 2225 k 下降到 304 k 。通过火焰传播距离也能看出在火焰传播到最远后对应温度也开始骤降, 并且在爆炸传播后期, 均有温度二次上升的现象, 从压力云图和火焰传播图像也能看出。

如图 7 所示是提取出的各监测点温度随时间变化的动态曲线, 以此来反了瓦斯爆炸后爆炸邻近区域空气温度时空分布规律, 以 200 m^3 时瓦斯浓度 7.5% , 9.5% 为例, 巷道爆炸产生的热脉冲主要集中在爆源

附近的有限空间内。具体表现为在距爆源约 0~25 m 的区域, 气体温度在爆炸后前几秒迅速升高, 并在 5 s 内达到峰值。该区域内温度始终高于 580 K 的时间接近 40 s 左右, 这表明爆炸不仅是火焰经过的瞬间热辐射, 还有一定时间内的相对高温热环境也至关重要。与此同时这个温度已经足够造成巷道中煤、纸屑、松木等可燃物发生热解和自燃。随着距离增大, 温度衰减速度显著加快, 超过约 50 m 后温度几乎在短时间内迅速回落至环境温度 290 K 附近, 巷道远场的热危害远小于近场。由此可见, 爆炸热损伤风险主要发生在爆源周围几十米范围, 随着气体体积增大, 传播距离边远, 近场受到热损伤的区域必定更长。

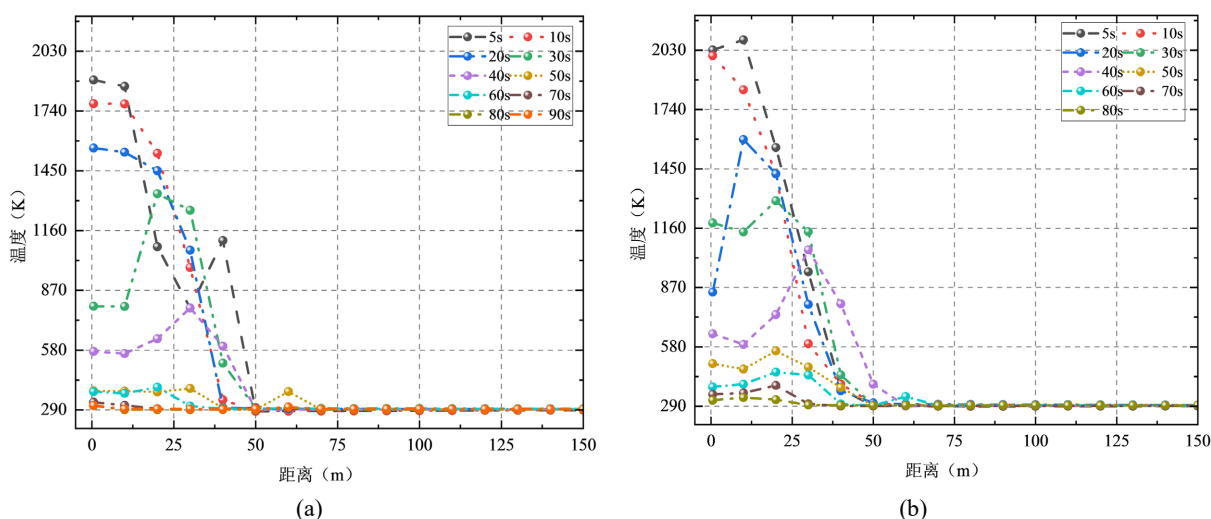


Figure 7. Dynamic temperature variation diagrams of each monitoring point in the tunnel

图 7. 巷道内各监测点的温度动态变化图

4. 结论

在本文中, 主要分析了大型巷道模型中瓦斯爆炸的传播特性, 后续研究重点是大型巷道内考虑障碍物, 瓦斯-煤尘混合爆炸时候瓦斯爆炸参数的动态变化规律。

1) 掘进工作面中瓦斯爆炸火焰传播过程遵循球形、指形、平面行、郁金香形, 其中瓦斯浓度 9.5% 时爆炸压力峰值都是最大的, 瓦斯体积无关, 但 200 m³ 时火焰传播距离是 100 m³ 的约两倍左右。

2) 相同体积下越接近最佳当量比爆炸温度峰值越高, 能达到 2320 k, 到骤降之前 200 m³, 9.5% 浓度情况下保持高温越久, 平均温度能到达 2210 k, 瞬间的高温以及持续一段时间的高温环境具备引燃爆源区域的可燃物。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2420724)。

参考文献

- [1] 刘具, 李新源, 孙旭东, 等. 煤炭企业安全生产高质量发展路径探索研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(6): 82-88.
- [2] 朱云飞, 王德明, 戚绪尧, 等. 1950-2016 年我国煤矿特重大事故统计分析[J]. 煤矿安全, 2018, 49(10): 241-244.
- [3] Wang, S., Li, Z., Fang, Q., Yan, H. and Liu, Y. (2022) Numerical Simulation of Overpressure Loads Generated by Gas Explosions in Utility Tunnels. *Process Safety and Environmental Protection*, **161**, 100-117. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.014>
- [4] 张琼雅. 城镇天然气管道泄漏扩散的 CFD 模拟及后果分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.

-
- [5] 李东方, 刘会彩, 张锦. 基于层次分析法的受限空间瓦斯爆炸数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(9): 108-111.
 - [6] 罗振敏, 吴刚. 密闭空间瓦斯爆炸数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(2): 1-4.
 - [7] 罗振敏, 苏彬, 程方明, 等. 基于 FLACS 的煤矿巷道截面突变对瓦斯爆炸的影响数值模拟[J]. 煤矿安全, 2018, 49(1): 183-186.
 - [8] Li, Z., Wu, J., Liu, M., Li, Y. and Ma, Q. (2019) Numerical Analysis of the Characteristics of Gas Explosion Process in Natural Gas Compartment of Utility Tunnel Using FLACS. *Sustainability*, **12**, Article 153. <https://doi.org/10.3390/su12010153>
 - [9] 田思雨. 柔性置障条件下甲烷爆炸传播过程的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 华北科技学院, 2020.
 - [10] 徐景德, 周心权, 吴兵. 矿井瓦斯爆炸传播的尺寸效应研究[J]. 中国安全科学学报, 2001(6): 49-53, 1.
 - [11] Gexcon, A.S. (2024) FLACS v24.1 User's Manual. Gexcon.
 - [12] Li, Z., Chen, L., Yan, H., Fang, Q., Zhang, Y., Xiang, H., *et al.* (2021) Gas Explosions of Methane-Air Mixtures in a Large-Scale Tube. *Fuel*, **285**, Article 119239. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119239>