Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1510-1522
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146150

煤矿巷道瓦斯爆炸后的热损伤分析研究

曹丰麟[1,2*]，杜坤键[1,2]，乔　源[1,2]，邓　莉[1,2]

[1]重庆科技大学安全工程学院，重庆
[2]重庆市油气生产安全与风险控制重点实验室，重庆

收稿日期：2026年9月14日；录用日期：2026年10月15日；发布日期：2026年11月6日

摘　要

煤矿巷道瓦斯爆炸后的产物输运与热暴露仍缺乏系统认识。采用FLACS建立200 m长、4 m × 4 m的一端封闭、一端敞开直巷模型，设置7.5%、9.5%、11.5%甲烷浓度和5、10、15 m填充长度，分析燃烧产物、超压及温度时程。结果表明，浓度效应呈非线性：10 m填充时，9.5%工况最大正超压约51 kPa，11.5%工况产物前缘达101 m；0.5~20 m峰值温度为2000~2300 K，填充长度增加使热扰动扩展至80~90 m。峰值超压、峰值温度与累计热暴露的排序并不一致，可为理想化直巷热环境分区提供依据。

关键词

瓦斯爆炸，煤矿巷道，FLACS，爆炸超压，气相热暴露

Thermal Damage Analysis Following Gas Explosions in Coal Mine Roadways

Fenglin Cao[1,2*], Kunjian Du[1,2], Yuan Qiao[1,2], Li Deng[1,2]

[1]School of Safety Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing
[2]Chongqing Key Laboratory of Oil and Gas Production Safety and Risk Control, Chongqing

Received: September 14, 2026; accepted: October 15, 2026; published: November 6, 2026

Abstract

The transport of combustion products and the associated thermal exposure following gas explosions in coal mine roadways remain insufficiently understood. In this study, FLACS was used to establish a 200 m long straight-roadway model with a cross-section of 4 m × 4 m, with one end closed and the other open. Methane concentrations of 7.5%, 9.5%, and 11.5% and gas filling lengths of 5, 10, and 15 m were considered to investigate the evolution of combustion products, explosion

*通讯作者。

文章引用: 曹丰麟, 杜坤键, 乔源, 邓莉. 煤矿巷道瓦斯爆炸后的热损伤分析研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1510-1522. DOI: 10.12677/me.2026.146150

overpressure, and temperature histories. The results reveal a nonlinear effect of methane concentration. At a filling length of 10 m, the maximum positive overpressure reached approximately 51 kPa under the 9.5% methane condition, whereas the combustion-product front propagated to 101 m under the 11.5% methane condition. Peak temperatures within 0.5~20 m ranged from approximately 2000 to 2300 K. Increasing the gas filling length extended the thermally disturbed region to approximately 80~90 m. Moreover, the rankings of peak overpressure, peak temperature, and cumulative thermal exposure differed among the investigated conditions. These findings provide a basis for thermal-environment zoning in idealized straight coal mine roadways.

Keywords

Gas Explosion, Coal Mine Roadway, FLACS, Explosion Overpressure, Gas-Phase Thermal Exposure

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

煤矿巷道内甲烷–空气混合气爆炸涉及燃烧释能、压力波传播及高温产物输运，其影响受到可燃气体分布和空间约束的共同控制。Zhu 等对不同结构巷道的研究表明，空间受限程度、可燃混合气体积及拥塞条件共同影响爆炸超压与火焰覆盖范围[1]。Liang 等进一步指出，爆炸后高温产物随非定常流动往复迁移，温度场与产物分布持续演化[2]。因此，对巷道爆炸后果的表征不仅需要考虑瞬时压力峰值，还应关注高温作用的持续时间及空间范围。

甲烷浓度与瓦斯填充长度是影响爆炸响应的重要初始参数，但二者的作用并不等同。在断面和初始热力状态固定时，浓度变化同时改变燃料含量及燃料–氧化剂配比，填充长度变化则改变预混气体积及其轴向分布。Zhu 等发现，可燃混合气体积与空间约束对超压存在竞争作用[1]；Gu 等结合缩尺试验与数值模拟，分析了甲烷浓度和气体体积对隧道爆炸超压及温度场的影响，并指出试验中的气体稀释会改变浓度效应[3]。这些研究说明，浓度和气量的影响必须结合具体几何与混合条件讨论，不能简单归结为燃料增加导致危险性单调增强。

热量传递是解释爆炸后温度演化及限定数值预测适用性的关键。Lei 等通过 20 L 球形装置的模拟与试验对比发现，忽略热损失会高估爆炸压力峰值，辐射和对流换热对压力衰减具有重要影响[4]。针对全尺度巷道，Liang 等比较了绝热与考虑换热的计算结果，发现绝热条件下预测的远端温度及高温产物分布范围更大[2]。已有研究因而已覆盖爆炸热效应及其换热机制，采用绝热模型开展参数分析时，应将结果限定为特定边界条件下的相对比较，而非实际巷道热影响范围的直接预测[5]。

气相热暴露与围岩热损伤还需在评价层面加以区分。Tomás 等对岩石高温试验的综合分析表明，岩石性质变化受到岩性、最高温度、温度梯度、受热时间及冷却方式等因素共同影响[6]。气体温度并不等于材料内部温度，仅凭气相温度峰值或温度–时间积分，无法确定围岩裂纹扩展、强度退化或结构失稳[7] [8]。因此，在未求解气固换热和材料响应的条件下，气相温度历程适合用于比较工况间的热暴露差异，并为后续材料热响应分析提供待重点考察的空间位置和工况。

基于上述研究，本文关注统一几何与边界条件下不同爆炸响应指标之间的差异，而非重复讨论浓度或气量是否影响爆炸强度。具体研究问题包括：甲烷浓度与填充长度变化时，峰值超压、峰值温度和累积热暴露的工况排序是否一致；填充长度增加主要体现为局部峰值提高，还是高温持续时间延长及影响

范围扩展；上述差异主要出现在哪些轴向区段。对这些问题的分析有助于识别单一峰值指标未能反映的时空差异，为爆炸后气相热环境的分区比较提供依据。

本文采用 FLACS 建立长 200 m、净断面 4 m × 4 m 的一端封闭、一端敞开直巷模型，设置甲烷体积分数 7.5%、9.5%和 11.5%，以及瓦斯填充长度 5、10 和 15 m，形成九组组合工况。通过燃烧产物质量分数分布及轴向测点的压力、温度时程，分析产物区演化、超压传播和高温持续特征，并结合超温持续时间与温度－时间积分指标比较气相热暴露的轴向分布。研究采用无通风、无障碍物、均匀预混及刚性绝热壁面假设，所得指标用于工况间的相对比较，不作为实际结构热损伤的直接判据。

2. FLACS 数值模型建立

FLACS 已用于受限空间和大尺度巷道爆炸模拟[9] [10]，为研究煤矿巷道内瓦斯爆炸火焰、超压及高温环境的传播规律，本文采用 FLACS 建立三维巷道瓦斯爆炸数值模型。根据实际巷道空间特征对几何结构进行合理简化，设置不同甲烷体积分数和瓦斯充气长度，并沿巷道轴向布置温度、压力及速度监测点。通过网格无关性分析验证模型的可靠性，在此基础上获得不同工况下的火焰传播、超压变化及温度时间历程，为后续围岩热暴露与热损伤评价提供数据基础。

2.1. 物理模型与基本假设

建立长度为 200 m、净断面为 4 m × 4 m 的三维等截面直巷模型，如图 1 所示。巷道长径比为 50，具有典型狭长受限空间特征。爆炸传播方向取巷道纵轴方向，采用距点火源的轴向距离描述火焰、压力波及高温产物的空间演化。

为突出甲烷浓度和充气长度的影响，计算域内不设置分岔、断面突变、支护构件及管线等障碍物。该简化排除了局部拥塞和几何变化引起的附加湍流[11]，因此所得结果仅适用于理想化等截面直巷，不宜直接外推至实际高拥塞巷道。

甲烷－空气预混区紧邻封闭端并充满整个巷道断面，其甲烷体积分数分别为 7.5%、9.5%和 11.5%，轴向长度分别为 5、10 和 15 m，预混区外为空气。点火源位于距封闭端 0.51 m 处的断面中心，即坐标 (0.51, 2.00, 2.00) m。除甲烷浓度和充气长度外，各工况的几何尺寸、点火条件、初始状态及边界条件均保持一致。

巷道围护结构视为静止、刚性且不可变形的实体边界，不考虑爆炸荷载引起的围岩变形、破坏及其与气相流场的耦合作用。

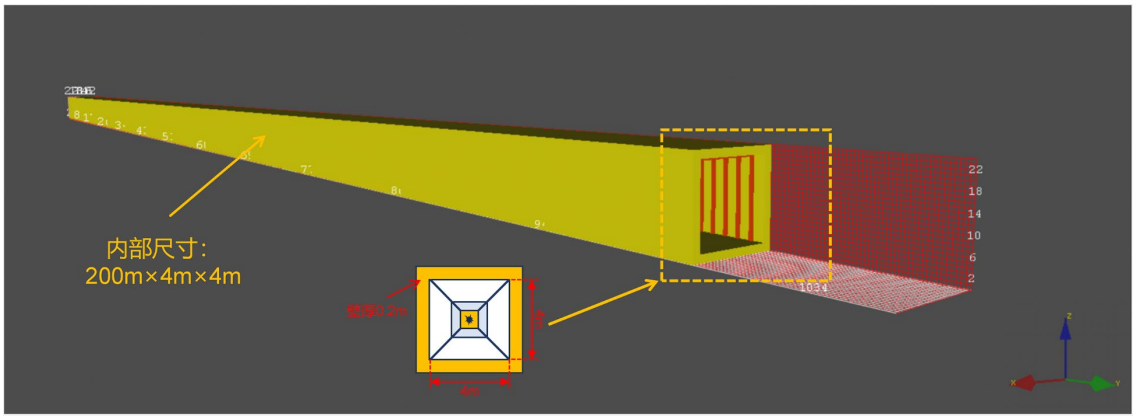


Figure 1. Schematic diagram of the numerical model
图 1. 数值模型示意图

2.2. 初始条件与边界条件

初始温度、压力及湍流条件会影响爆炸极限和压力响应[12] [13]，所以计算域内气体初始状态设为静止，初始速度、相对湍流强度和湍流长度尺度均设为 0，环境温度和压力分别为 293.15 K 和 100 000 Pa。该设置用于排除背景风流与初始湍流的影响，研究结论仅适用于无通风条件下的静止预混气体环境。

瓦斯区紧邻巷道封闭端并充满 4 m × 4 m 巷道断面。甲烷体积分数分别为 7.5%、9.5%和 11.5%，轴向充气长度分别为 5、10 和 15 m，瓦斯区外为空气。点火前甲烷–空气混合物视为均匀预混，不考虑浓度梯度和组分分层。数值点火位置设在距封闭端 0.51 m 处的断面中心，即坐标(0.51, 2.00, 2.00) m，点火时刻为 0 s。

巷道封闭端、侧壁、顶板和底板均设置为刚性不可渗透绝热壁面，近壁流动采用标准壁面函数处理。敞开端外侧设置缓冲计算域，+X 方向外边界采用 PLANE_WAVE 条件，其余外边界采用 EULER 条件，以降低压力波的非物理反射。如表 1 所示，瞬态计算采用自适应时间步长，CFLC 和 CFLV 分别取 5 和 0.5；计算终止时间根据工况设为 90~140 s，场变量每 0.05 s 输出一次，记录压力、温度、速度和燃烧产物质量分数。

Table 1. Table of initial and boundary conditions
表 1. 初始条件与边界条件表

参数	设置值
初始温度	293.15 K
初始压力	100,000 Pa
CFLC	5
CFLV	0.5
计算终止时间	90~140 s
结果输出间隔	0.05 s

2.3. 工况设计

为分别考察瓦斯填充长度和甲烷浓度对爆炸传播及热环境演化的影响，本文采用双因素三水平全因子方案设计数值模拟工况。因素一为瓦斯填充长度，分别设置为 5、10 和 15 m，瓦斯填充长度或可反应区长度影响释能总量、火焰传播距离和超压[14] [15]；因素二为甲烷体积分数，分别设置为 7.5%、9.5%和 11.5%。两个因素的不同水平依次组合，共形成 9 个计算工况。全因子设计能够在固定填充长度条件下比较甲烷浓度的影响，同时可在固定甲烷浓度条件下分析填充长度的作用，从而建立后续火焰传播、超压分布和热暴露特征的统一对比框架。

巷道净断面面积为 16 m^2，因此 5、10 和 15 m 填充长度所对应的瓦斯–空气预混区域体积分别为 80、160 和 240 m^3。填充长度增加不会改变预混气体的局部浓度，但会扩大燃料区域体积并增加系统内的甲烷总量，因而主要影响爆炸能量供给规模、高温持续时间及作用范围。通过保持甲烷浓度不变并依次改变填充长度，可以识别燃料总量变化对火焰传播距离和热损伤范围的控制作用。

甲烷体积分数设置为 7.5%、9.5%和 11.5%，分别对应贫燃、近化学计量和富燃预混状态。浓度变化直接改变单位体积预混气体中的燃料含量及燃料–氧化剂配比，进而影响燃烧速率、温度水平和压力增长过程。通过保持瓦斯填充长度不变并比较三种浓度，可以分析混合气体反应状态对爆炸强度及温度–时间历程的影响，并检验热效应是否在接近化学计量浓度时达到较高水平。具体工况如下表 2 所示。

Table 2. Test conditions for roadway simulation experiments
表 2. 巷道模拟实验工况表

工况编号	填充长度/m	预混区体积/m³	甲烷体积分数/%
L5-C7.5	5	80	7.5
L5-C9.5	5	80	9.5
L5-C11.5	5	80	11.5
L10-C7.5	10	160	7.5
L10-C9.5	10	160	9.5
L10-C11.5	10	160	11.5
L15-C7.5	15	240	7.5
L15-C9.5	15	240	9.5
L15-C11.5	15	240	11.5

2.4. 测点布置与输出参数

为获得瓦斯爆炸参数沿巷道轴向的传播规律，在巷道中心线上布置 21 个监测点，如表 3 所示。各测点的横向和竖向坐标均为 2 m，以排除测点高度及横向位置差异对工况对比的影响。MP1 设置在距封闭端 0.5 m 处，用于记录点火源附近的初始燃烧响应；MP2 设置在 10 m 处，此后沿巷道轴向每隔 10 m 设置一个监测点，直至敞开端。该布置同时覆盖近源燃烧区、爆炸参数传播区和出口泄压区，可用于分析火焰、高温燃烧产物及压力波随传播距离的变化。

Table 3. Monitoring points for the roadway simulation experiment
表 3. 巷道模拟实验监测点

监测点	距封闭端距离/m	监测点	距封闭端距离/m	监测点	距封闭端距离/m
MP1	0.5	MP8	70	MP15	140
MP2	10	MP9	80	MP16	150
MP3	20	MP10	90	MP17	160
MP4	30	MP11	100	MP18	170
MP5	40	MP12	110	MP19	180
MP6	50	MP13	120	MP20	190
MP7	60	MP14	130	MP21	200

各监测点连续输出静压、气体温度及速度等瞬态参数。其中，压力时程用于提取正超压峰值、负压峰值、峰值到达时间及压力振荡特征；温度时程用于确定峰值温度、高温持续时间和累计热暴露程度；速度结果用于辅助解释压力波传播、高温产物输运及出口泄放过程。燃烧产物质量分数等场变量则用于识别燃烧产物区前缘及其空间演化，使火焰传播、压力响应和热暴露分析具有统一的时空参照。

3. 结果与讨论

3.1. 火焰传播特征分析

图 2 展示了瓦斯填充长度为 10 m 时，不同甲烷浓度下燃烧产物质量分数的演化。三种工况均经历局

部燃烧、产物区快速轴向扩展及后期输运稀释阶段。点火后约 450 ms，燃烧产物集中于封闭端附近，前缘呈较规则弧形；随后产物区沿巷道扩展，前缘逐渐出现褶皱和局部凸起。约 2250 ms 后，产物区出现前缘回缩、界面破碎及低质量分数条带扩散，表明流场逐步由燃烧推进转入产物输运与稀释阶段。

甲烷浓度为 7.5%时，产物区前缘在 1350 和 3151 ms 分别推进至约 12 和 71 m，至 4950 ms 连续分布范围回缩至约 61 m。该工况处于贫燃状态，受燃料含量限制，其产物区表现出推进速度较低、传播距离较短及后期衰减明显的特征。

甲烷浓度为 9.5%时，产物区扩展显著加快，前缘在 901、1350 和 1801 ms 分别到达约 16、54 和 72 m，并于 2251 ms 扩展至约 90 m。此后高质量分数产物区逐渐回缩。由于该浓度接近甲烷－空气混合物的化学计量浓度，燃料与氧化剂配比较有利于快速反应，因此早期轴向扩展最为显著。

甲烷浓度为 11.5%时，早期产物区推进略慢于 9.5%工况，但后期持续性较强。其前缘在 1351 和 1800 ms 分别达到约 42 和 70 m，2251 ms 时局部条带延伸至约 101 m，并伴随明显的非对称变形和多尺度卷曲。后期 50~80 m 范围内仍可观察到不规则产物条带，可能与富燃混合气进入空气区后的掺混及局部反应有关，但该机理尚需结合甲烷、氧气和反应速率场进一步验证。

结果表明，甲烷浓度对燃烧产物传播具有非线性影响：9.5%工况主导早期快速扩展，11.5%工况表现出更远的局部传播和更强的后期非定常性，而 7.5%工况的整体传播能力最弱。

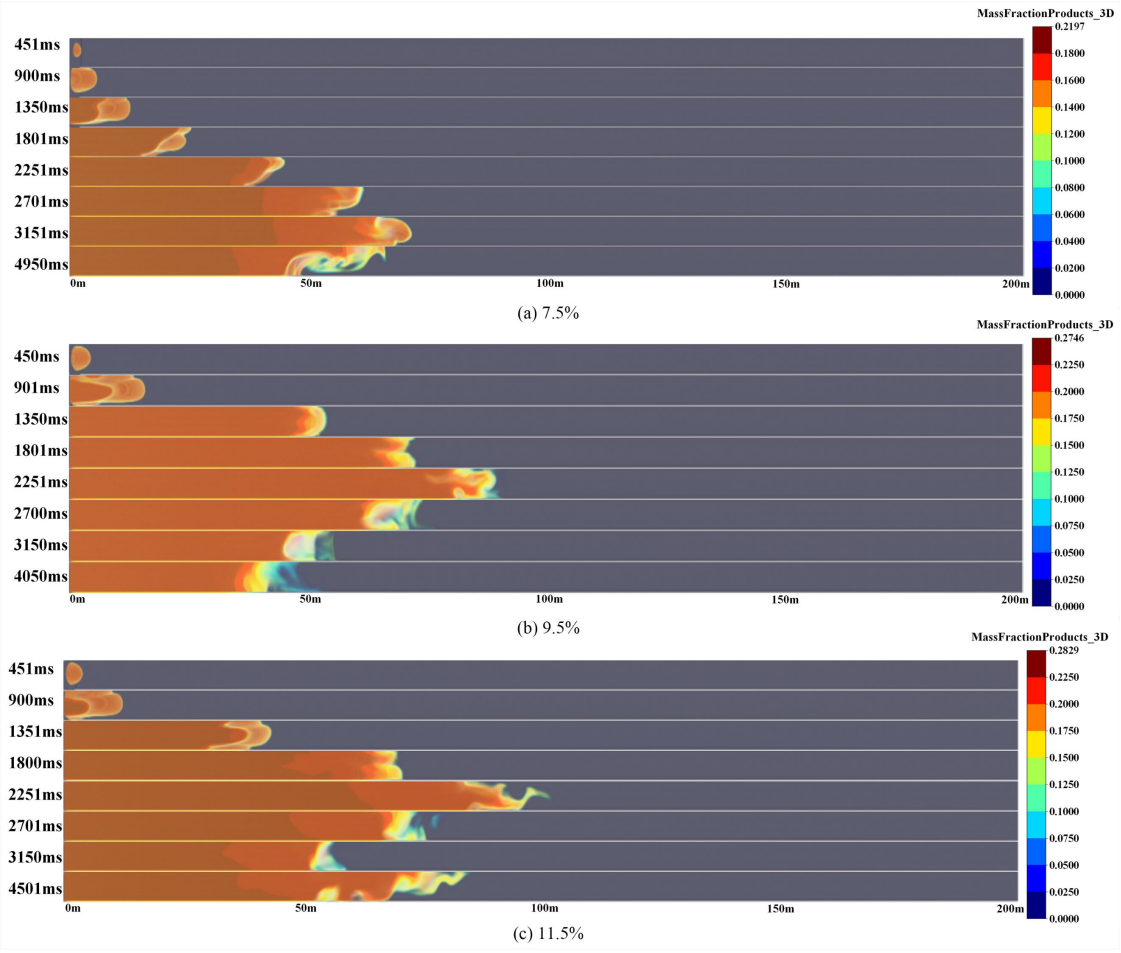
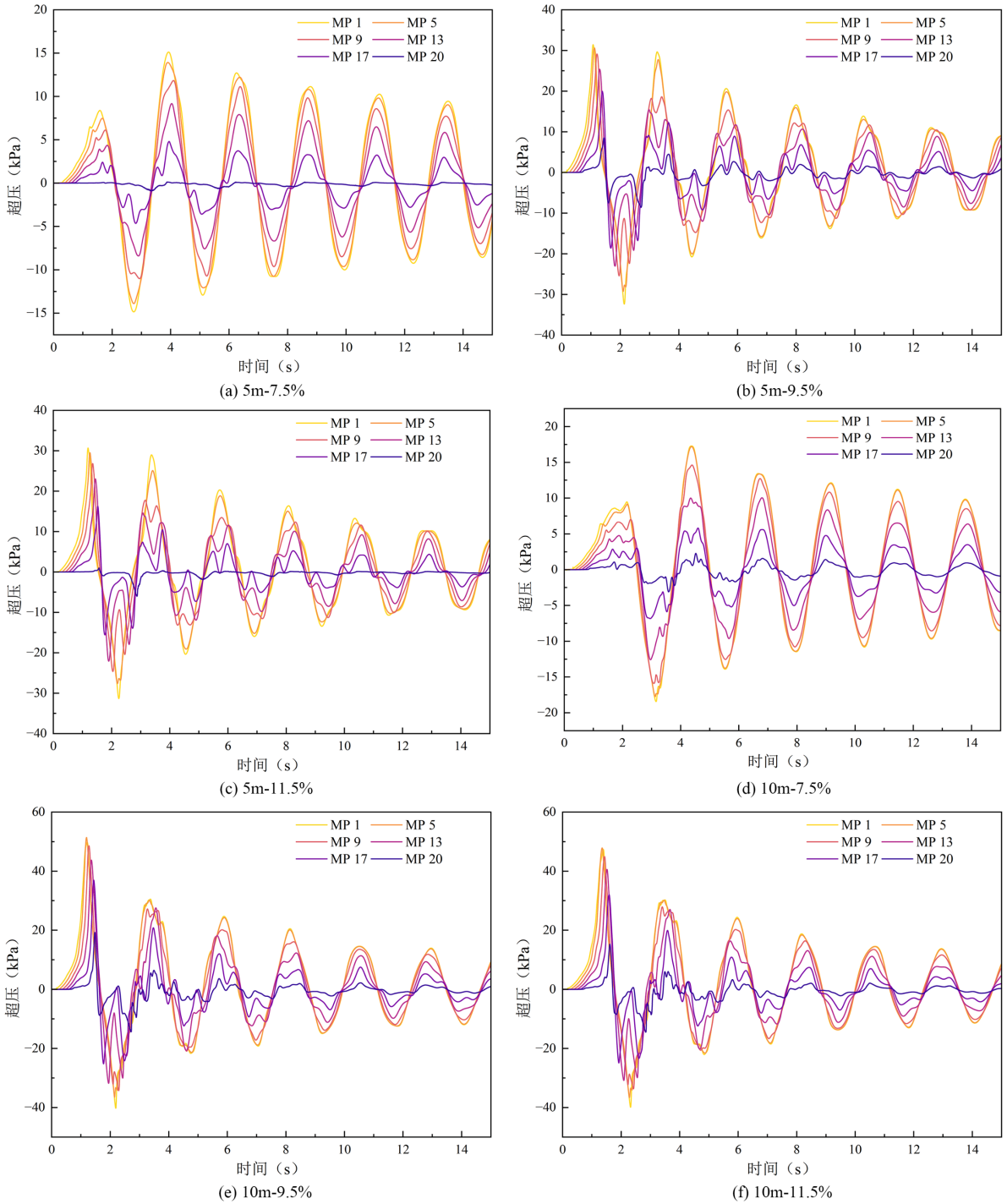


Figure 2. Spatiotemporal evolution of mass fractions of combustion products at different methane concentrations
图 2. 不同甲烷浓度下燃烧产物质量分数的时空演化

3.2. 瓦斯爆炸后超压的影响规律

图 3 给出了不同甲烷浓度和瓦斯填充长度下各测点的超压时程。各工况均表现为正压快速上升、负压回落及周期性衰减振荡。该过程依次受燃烧膨胀、敞开端泄压以及封闭端反射波与稀疏波相互作用控制。相邻主要压力峰间隔约为 2.2~2.4 s，与长度为 200 m 的一端封闭、一端敞开巷道的低阶纵向声学周期处于同一量级，表明后期压力振荡受到巷道边界条件的显著影响。



(a) 5m-7.5%　(b) 5m-9.5%

(c) 5m-11.5%　(d) 10m-7.5%

(e) 10m-9.5%　(f) 10m-11.5%

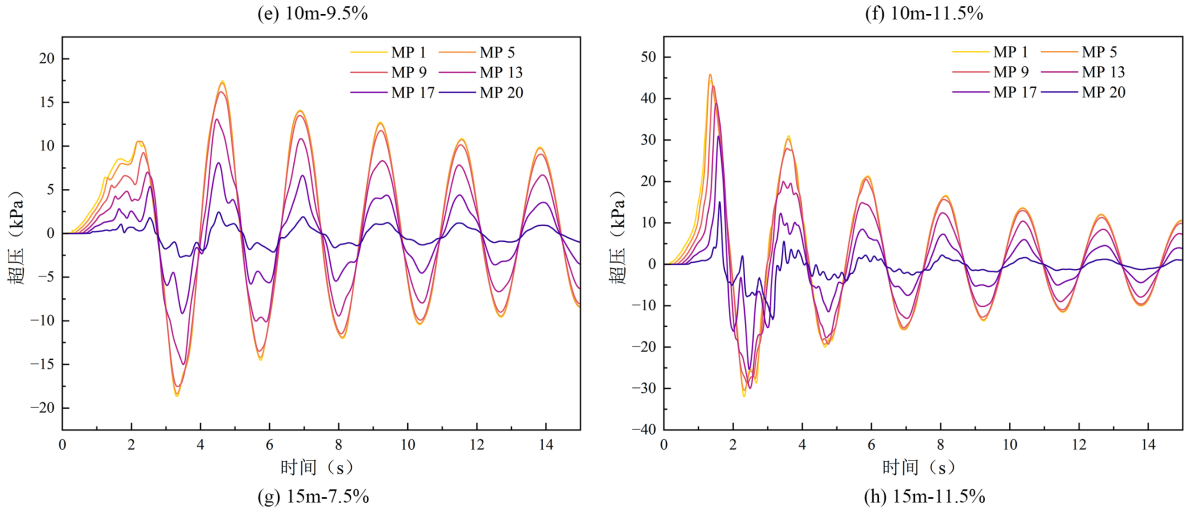


Figure 3. Overpressure-time history curves at various measurement points for different gas-filled lengths and methane concentrations

图 3. 不同瓦斯填充长度和甲烷浓度下各测点超压时程曲线

压力幅值总体随传播距离增加而减小，近点火端的 MP1 和 MP5 测点响应最强，MP9 和 MP13 次之，MP17 以后明显衰减，敞开端附近的 MP20 仅呈小幅波动。各测点峰值出现时间依次滞后，反映了压力扰动由封闭端向敞开端传播并在壁面耗散和出口泄压作用下衰减的过程。因此，高幅值交变压力主要集中于巷道近点火端及中前段。

瓦斯填充长度为 5 m 时，7.5%、9.5%和 11.5%工况的最大正超压分别约为 15、31 和 30 kPa，相应最小表压约为−15、−33 和−32 kPa。填充长度为 10 m 时，三种浓度的最大正超压分别约为 17、51 和 48 kPa，最小表压分别约为−18、−41 和−40 kPa。甲烷浓度由 7.5%增至 9.5%时压力响应显著增强，而进一步增至 11.5%后峰值未继续升高，说明浓度效应具有非线性。接近化学计量浓度的 9.5%混合气反应速率较高，压力释放更集中；11.5%工况受富燃条件下氧化剂不足的限制，其瞬时峰值略低。

填充长度的影响同样呈非线性。在 7.5%浓度下，填充长度由 5 m 增至 10 和 15 m 时，最大正超压仅由约 15 kPa 增至 17~18 kPa；在 11.5%浓度下，最大正超压由 5 m 时的 30 kPa 增至 10 m 时的 48 kPa，但在 15 m 时降至约 45 kPa。增加填充长度虽然提高了可燃混合气总量，但峰值压力还受燃烧速率、释能历时和敞开端泄压共同控制。由于缺少 15 m、9.5%工况数据，目前无法确定该浓度下超压随填充长度的完整变化趋势。

各工况的负压幅值与正超压处于相近量级，表明巷道爆炸荷载具有显著的正负压交替特征。结构安全评价不应仅依据最大正超压，还应综合考虑最小表压、正负压冲量及循环次数。现有结果表明，9.5%~11.5%工况的压力响应明显强于 7.5%工况，填充长度由 5 m 增至 10 m 通常会强化超压，但现有 8 组数据尚不足以判断所有浓度在 15 m 填充长度下的危险性排序。

3.3. 瓦斯爆炸热环境下矿井结构热损伤评估

瓦斯爆炸产生的高温燃烧产物可在巷道内持续输运，使围岩和支护结构同时承受温度强度与作用时间的影响。基于各测点气相温度时程，本文首先分析热暴露的空间分布，再采用温度－时间积分指标表征不同工况的潜在热损伤程度。由于计算采用绝热壁面且未求解固体导热，所得结果反映气相热暴露风险，不能直接等同于围岩或支护材料的实际损伤。

3.3.1. 热暴露风险评估

图 4 给出了不同甲烷浓度和瓦斯填充长度下各测点的温度时程。九组工况均表现为近点火端温度快速升高并随轴向距离增加而衰减。0.5~20 m 范围内峰值温度约为 2000~2300 K，远端温度曲线则由连续高温平台逐渐转变为间歇性脉动，表明热暴露风险同时受峰值温度、高温持续时间和高温产物输运距离控制。

填充长度为 5 m 时，主要热暴露范围约为 0~30 m，9.5%工况近场峰值较高，而 11.5%工况在 20~40 m 范围内的高温持续时间较长。填充长度增至 10 m 后，持续热暴露区扩展至约 50 m，11.5%工况可延伸至约 60 m。填充长度为 15 m 时，0~60 m 范围内维持较高温度，70 m 附近仍存在持续升温，80~90 m 测点出现延迟热响应。由此可见，填充长度主要控制高温持续时间和轴向影响范围。

甲烷浓度对热暴露的影响呈非线性。9.5%工况通常具有较高的瞬时温度峰值，而 11.5%工况在较长填充条件下表现出更强的下游持续升温。因此，浓度效应不能仅由峰值温度判断，还需结合累计超温时间：

$$\tau_{\mathrm{T}}(x)=\int_{0}^{t_{\mathrm{end}}} H\left[T_g(x,t)-T\right]\mathrm{d}t$$

式中，H 为 Heaviside 函数。该指标能够将温度强度和作用时间统一起来，并为 3.3.2 节的热损伤定量计算提供依据。

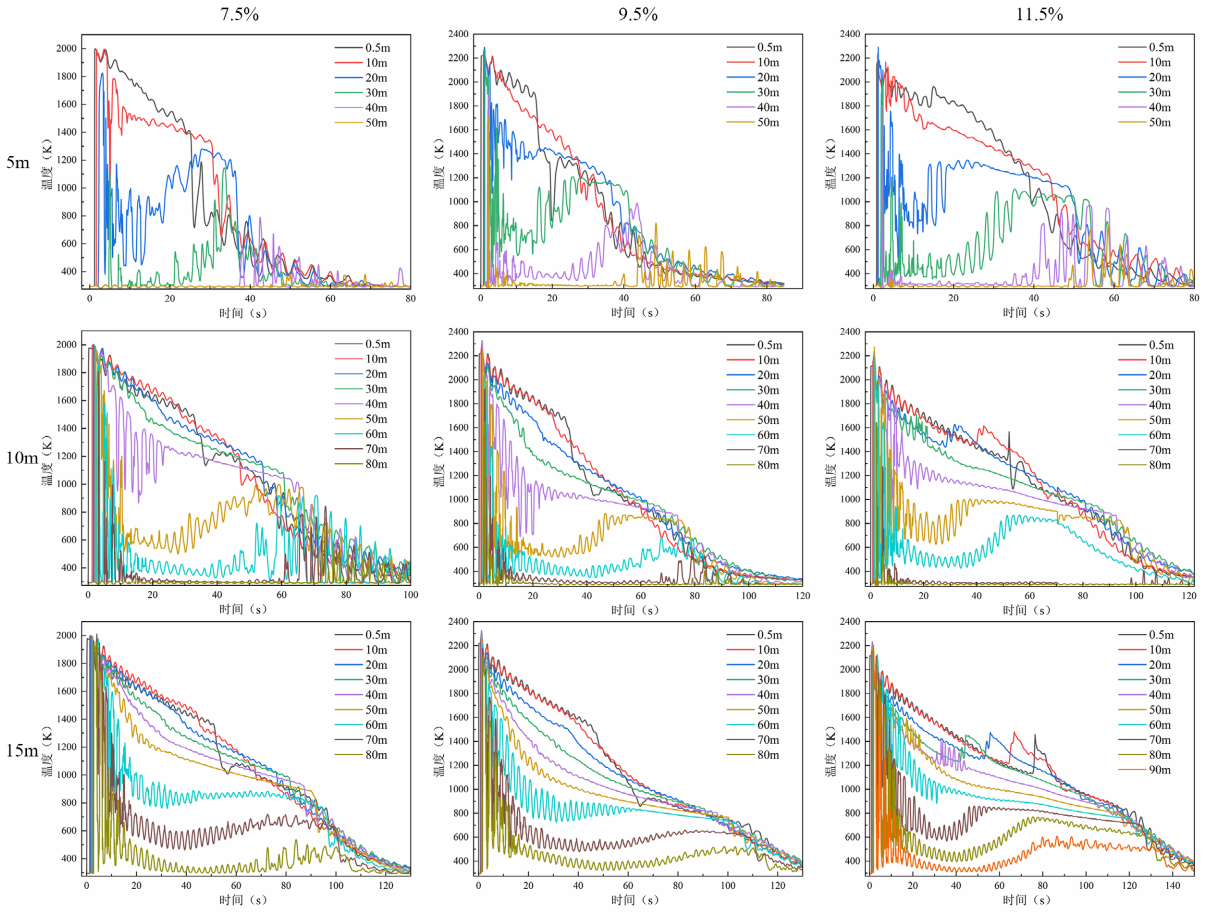


Figure 4. Temperature-time history curves at various measurement points for different gas-filled lengths and methane concentrations

图 4. 不同瓦斯填充长度和甲烷浓度下各测点温度时程曲线

3.3.2. 热损伤分析

围岩热损伤的本质为温度驱动的时间累积过程，其演化规律可由 Arrhenius 型热激活模型描述。经典 Arrhenius 热损伤模型将损伤变量定义为温度－时间历程的积分函数：

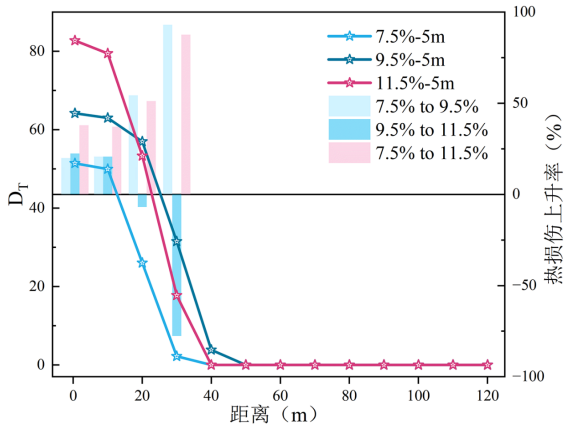
$$\Omega = \int_0^t A \exp\left(-\frac{E_a}{RT(t)}\right) \mathrm{d}t$$

该模型最早由 Henriques (1947)提出，已被广泛用于描述材料在高温作用下的不可逆损伤累积过程。其核心特征在于损伤速率对温度呈指数敏感性。

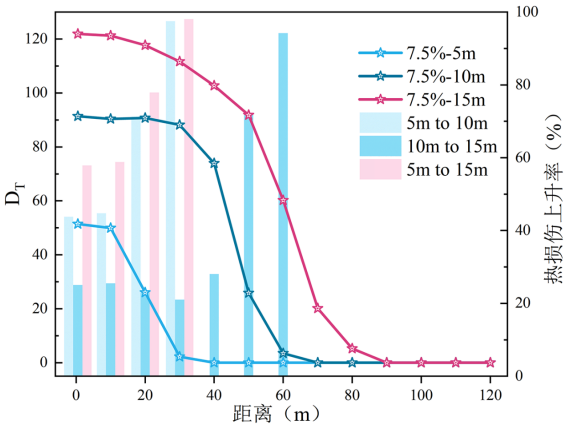
在瓦斯爆炸条件下，温度通常处于 300℃以上的高温区间，此时指数项对温度变化高度敏感，可将其近似转化为阈值控制形式，即：当温度超过临界值 T_0 时，损伤开始显著累积，而低于该温度时损伤可忽略。在此基础上，可将 Arrhenius 模型简化为温度超阈值部分的时间积分形式，从而得到工程可用表达：

$$D_T = \int_{T \geq T_0} \left(\frac{T(t) - T_0}{T_0}\right) \mathrm{d}t$$

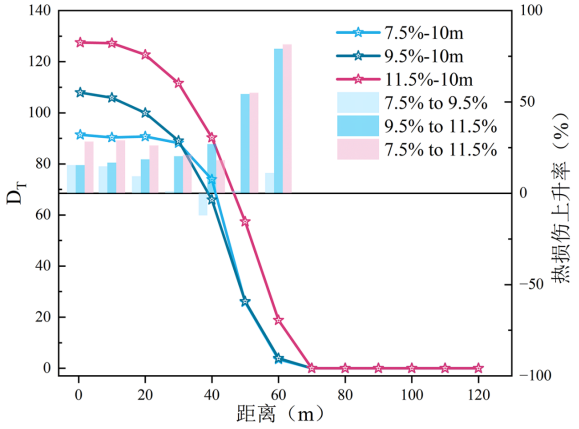
该表达在保留温度－时间耦合作用的同时，显著降低了模型计算复杂度。因此，本文采用的 T-t 判据可视为 Arrhenius 热损伤模型在爆炸瞬态高温条件下的等效表达，其物理基础与热激活损伤理论保持一致，可用于围岩热损伤空间分布的定量分析。该线性化处理适用于爆炸高温区间的工程近似分析，其精度依赖于温度区间范围。



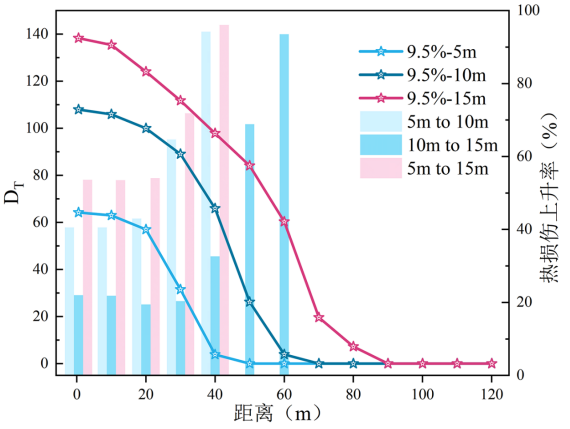
(a) 5 m填充长度不同甲烷浓度的D_T分布



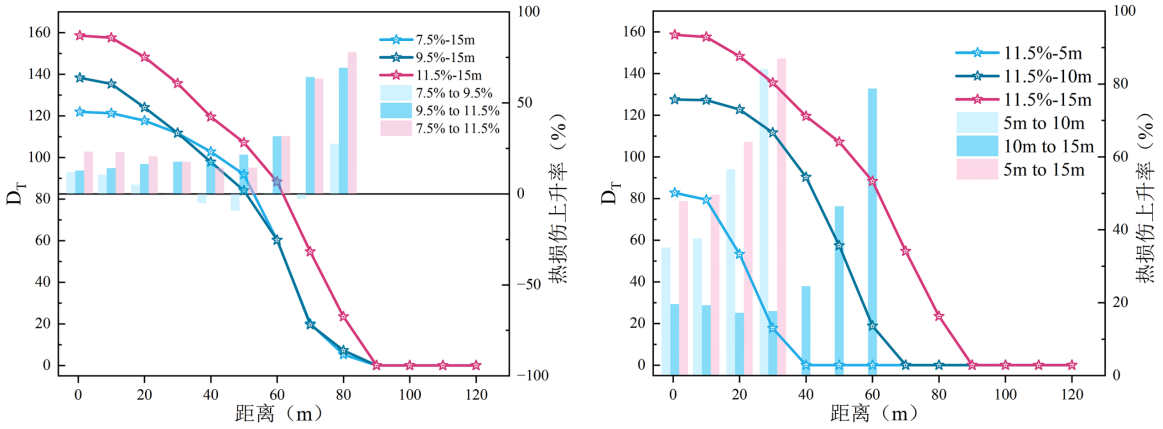
(b) 7.5%甲烷浓度不同填充长度的DT分布



(c) 10 m填充长度不同甲烷浓度的D_T分布



(d) 9.5%甲烷浓度不同填充长度的DT分布



(e) 15 m填充长度不同甲烷浓度的D_T分布　　(f) 11.5%甲烷浓度不同填充长度的DT分布

Figure 5. Axial distribution of the cumulative gas-phase thermal exposure index DT under different gas-filled lengths and methane concentrations

图 5. 不同瓦斯填充长度和甲烷浓度下累计气相热暴露指标 DT 的轴向分布

图 5 表明，DT 沿巷道轴向总体呈现近源高值、快速衰减和远端趋零的分布特征。0~30 m 范围内指标维持较高水平，约 30~70 m 为主要衰减区，70~100 m 范围内逐渐接近零。该分布与高温产物沿巷道输运和稀释的过程一致，反映了爆炸热环境的有效作用距离。

在固定填充长度下，D_T 总体表现为 11.5%工况较高、9.5%次之、7.5%最低，但 7.5%增至 9.5%产生的增量通常大于 9.5%增至 11.5%的增量，说明浓度效应存在边际递减。浓度主要改变近中场热暴露强度，而其对传播范围的影响相对有限。

在固定浓度下，填充长度由 5 m 增至 10 和 15 m 后，D_T 曲线整体向远端移动，热作用边界约由 40 m 扩展至 60 和 90 m。相较于浓度变化，填充长度增加对累计热暴露范围的影响更显著，说明可燃混合气总量和高温产物滞留时间是控制远场热风险的重要因素。

参数增量主要集中在 20~60 m 范围内。近源区虽然热暴露水平最高，但不同工况间差异相对较小；中距离区域处于热作用衰减阶段，对浓度和填充长度变化最敏感；远端指标接近零。工程防护中应区分高风险区与高敏感区：0~30 m 应重点提高材料耐热能力，20~60 m 则需关注工况变化引起的损伤边界迁移。

4. 结论

采用 FLACS 建立 200 m 长、4 m × 4 m 净断面的一端封闭、一端敞开巷道模型，研究甲烷浓度和瓦斯填充长度对燃烧产物传播、超压及气相热暴露的影响，主要结论如下。

(1) 燃烧产物演化经历局部形成、轴向扩展和输运稀释三个阶段，浓度效应呈非线性。10 m 填充条件下，9.5%工况在 900~1800 ms 内推进较快，2251 ms 时产物区前缘达到约 90 m；11.5%工况同期局部前缘延伸至约 101 m，后期输运持续性更强；7.5%工况最大可见扩展距离约为 71 m。早期推进优势与后期最大扩展范围的浓度排序并不一致。

(2) 超压时程呈正压上升、负压回落及交替衰减振荡，主要周期约为 2.2~2.4 s，幅值总体沿程减小。现有 8 组工况中，7.5%工况最大正超压约为 15~18 kPa，10 m、9.5%工况达到最高值约 51 kPa。负压幅值与正超压处于相近量级，动力载荷评价应同时考虑正负压及循环作用。

(3) 气相热暴露呈近源持续高温、中段衰减和远场间歇升温的空间分布，0.5~20 m 测点峰值约为 2000~2300 K。填充长度由 5 m 增至 10 和 15 m 时，主要热暴露范围分别由约 40~50 m 扩展至 50~60 m 和

60~70 m，远端热扰动可达 80~90 m。增加填充长度主要延长高温历时并扩大热作用范围。

(4) 瞬时温度峰值与累计热暴露的浓度排序并不完全一致。9.5%工况通常具有较高峰值，11.5%工况在较长填充条件下下游持续升温更明显，但 5 m 填充时 20~30 m 处的累计热暴露指标 D_T 以 9.5%工况较高。(D_T)总体沿程衰减，其衰减终点随填充长度增加由约 40~50 m 推进至约 90 m，参数变化引起的增量主要集中于 20~60 m。因此，热效应不能概括为随甲烷浓度单调增强。

(5) 上述结论限于无通风、无障碍物、均匀预混及刚性绝热壁面的理想化巷道。气相温度和 D_T 仅表征相对热暴露，不能直接证明围岩或支护结构发生损伤。后续需结合材料热物性、气固传热计算及试验标定，建立热暴露与实际结构损伤之间的定量关系。

基金项目

1. 重庆市研究生科研创新项目(CYS260940)；
2. 重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2520802)。

参考文献

[1] Zhu, Y., Wang, D., Shao, Z., Xu, C., Li, M. and Zhang, Y. (2021) Characteristics of Methane-Air Explosions in Large-Scale Tunnels with Different Structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **109**, Article ID: 103767. https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103767

[2] Liang, Y., Lei, B., Song, S., Xiao, J., Kuznetsov, M. and Jordan, T. (2023) Numerical Analysis of the Distribution of Combustion Products from Methane Explosions in a Full-Scale Tunnel Using All-Speed CFD Code GASFLOW-MPI. *Energy Sources*, *Part A*: *Recovery*, *Utilization*, *and Environmental Effects*, **45**, 7105-7121. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2219228

[3] Gu, L., Nie, Z., Li, Y., Wang, Z., Huang, C. and Chen, X. (2026) Characteristics of Overpressure and Thermal Effects of Methane-Air Explosions in Tunnels. *Fuel*, **421**, Article ID: 139036. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.139036

[4] Lei, B., Xiao, J., Kuznetsov, M. and Jordan, T. (2022) Effects of Heat Transfer Mechanism on Methane-Air Mixture Explosion in 20 L Spherical Device. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **80**, Article ID: 104864. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104864

[5] Ye, Q., Wang, G.G.X., Jia, Z. and Zheng, C. (2017) Experimental Study on the Influence of Wall Heat Effect on Gas Explosion and Its Propagation. *Applied Thermal Engineering*, **118**, 392-397. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.084

[6] Tomás, R., Benavente, D., Martínez-Ibáñez, V. and Garrido, M.E. (2025) How Do High Temperatures Affect Rock Properties? A Comprehensive Review of Experimental Thermal Effects and Underlying Mechanisms. *Engineering Geology*, **357**, Article ID: 108323. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108323

[7] Wu, L., Huang, Y., Li, J., Wang, G., Li, Y., Li, X., et al. (2025) Macro- and Micro-Mechanical Response and Damage Mechanism of Sandstone under High-Temperature Conditions. *International Journal of Mining Science and Technology*, **35**, 265-274. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.01.004

[8] Martínez-Ibáñez, V., Garrido, M.E., Hidalgo Signes, C. and Tomás, R. (2021) Micro and Macro-Structural Effects of High Temperatures in Prada Limestone: Key Factors for Future Fire-Intervention Protocols in Tres Ponts Tunnel (Spain). *Construction and Building Materials*, **286**, Article ID: 122960. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122960

[9] Hansen, O.R., Hinze, P., Engel, D. and Davis, S. (2010) Using Computational Fluid Dynamics (CFD) for Blast Wave Predictions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23**, 885-906. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.07.005

[10] Zhu, Y., Wang, D., Shao, Z., Zhu, X., Xu, C. and Zhang, Y. (2020) Investigation on the Overpressure of Methane-Air Mixture Gas Explosions in Straight Large-Scale Tunnels. *Process Safety and Environmental Protection*, **135**, 101-112. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.12.022

[11] Zhang, Q., Pang, L. and Liang, H.M. (2011) Effect of Scale on the Explosion of Methane in Air and Its Shockwave. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **24**, 43-48. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.08.011

[12] 高娜, 张延松, 胡毅亭. 温度、压力对甲烷-空气混合物爆炸极限耦合影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 453-458.

[13] Sun, S., Qiu, Y., Xing, H. and Wang, M. (2020) Effects of Concentration and Initial Turbulence on the Vented Explosion Characteristics of Methane-Air Mixtures. *Fuel*, **267**, Article ID: 117103. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117103

[14] Jiang, B., Lin, B., Shi, S., Zhu, C. and Zhai, C. (2011) Numerical Analysis on Propagation Characteristics and Safety Distance of Gas Explosiona. *Procedia Engineering*, **26**, 271-280. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2168

[15] Ajrash, M.J., Zanganeh, J. and Moghtaderi, B. (2017) Deflagration of Premixed Methane-Air in a Large Scale Detonation Tube. *Process Safety and Environmental Protection*, **109**, 374-386. https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.035