Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1435-1445
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146143

Hans汉斯

泄爆口位置与多孔材料孔密度对综合管廊甲烷爆炸的影响

杜坤键[1,2*]，曹丰麟[1,2]，乔　源[1,2]，邓　莉[1,2]

[1]重庆科技大学安全科学与工程学院，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19日；发布日期：2026年11月3日

摘　要

为探究泄爆口多孔材料对综合管廊甲烷爆炸传播的影响，在舱室与顶部泄爆夹层构成的可视化管道中，以9.5%甲烷－空气预混气体为研究对象，比较200、600 mm两种泄爆口位置及无多孔材料、10PPI、20PPI三种配置下的火焰形态、传播速度和四测点正超压峰值。结果表明：泄爆口由600 mm前移至200 mm后，同一材料配置下的速度峰值及各测点正超压峰值均降低。20PPI材料对夹层火焰外溢的限制较明显，其在200、600 mm位置的夹层压力峰值分别为1.05、3.43 kPa，较同位置无材料工况降低71.93%、90.96%。但材料配置变化并未使所有指标同步改善；200 mm位置的最低速度峰值出现在无多孔材料工况，最低四测点峰值均值出现在10PPI工况。以降低夹层正超压和限制夹层可见火焰传播为主要目标时，200 mm位置配置20PPI材料表现较好；主体舱室与夹层的控制目标应分别考虑。

关键词

综合管廊，多孔材料孔密度，甲烷，泄爆，火焰传播速度

Effect of Explosion Vent Location and Porous Material Pore Density on Methane Explosion in Utility Tunnels

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

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

Received: September 14, 2026; accepted: October 19, 2026; published: November 3, 2026

*通讯作者。

文章引用: 杜坤键, 曹丰麟, 乔源, 邓莉. 泄爆口位置与多孔材料孔密度对综合管廊甲烷爆炸的影响[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1435-1445. DOI: 10.12677/me.2026.146143

Abstract

To investigate the influence of porous materials at explosion vents on methane explosion propagation in utility tunnels, experiments were conducted using a visualized duct assembly consisting of a main chamber and a top venting interlayer. A 9.5% methane-air premixed gas was used as the test medium. The study compared flame morphology, propagation velocity, and peak positive overpressures at four measurement points across two vent locations (200 mm and 600 mm) and three material configurations (no porous material, 10 PPI, and 20 PPI). The results indicate that shifting the vent location from 600 mm to 200 mm reduced both the peak velocity and the peak positive overpressures at the measurement points for any given material configuration. The 20 PPI material significantly restricted flame spillover from the interlayer; peak interlayer pressures were 1.05 kPa and 3.43 kPa at the 200 mm and 600 mm locations, respectively—reductions of 71.93% and 90.96% compared to the no-material cases. However, changes in material configuration did not lead to simultaneous improvements across all metrics; the lowest peak velocity at the 200 mm location occurred in the no-material case, while the lowest average peak overpressure across the four measurement points was observed with the 10 PPI material. When the primary objectives are to reduce interlayer positive overpressure and limit visible flame propagation within the interlayer, the 20 PPI material at the 200 mm location performs best; control objectives for the main chamber and the interlayer should be considered separately.

Keywords

Utility Tunnel, Porous Material Pore Density, Methane, Explosion Venting, Flame Propagation Velocity

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

城市综合管廊发生燃气爆炸后，火焰与压力可沿狭长舱室及连通部位传播。舱室结构、泄压边界和内部设施共同影响载荷分布，因此需兼顾主体舱室减压与泄放路径中的火焰控制[1] [2]。

泄爆效果受开口面积、位置及开启条件影响。Yu 等[3]发现增大侧向泄爆面积可延长火焰传播时间并降低超压，宋双林等[4]指出泄爆位置会改变火焰峰值速度。Xu 等[5]及 Zhao 等[2]分别从泄压开口设计和管道传播条件出发，说明泄压路径需要与燃烧发展相匹配。泄爆夹层虽可提供压力释放空间，也可能成为火焰继续传播并影响相邻舱室的通道，因而不能仅依据主体管道指标评价泄爆效果。

多孔材料可通过孔道分割、孔壁换热和流动耗散抑制火焰及压力扰动[6] [7]。Duan 等[8]及段玉龙等[9]表明，孔结构和厚度会改变火焰穿透、衰减及后续燃烧。Wu 等[10] [11]对管廊多孔介质及铁镍材料的研究，以及 Cao 等[12]对吸能材料孔结构组合的研究，进一步说明材料参数与布置形式共同影响抑制效果。

多孔材料也会阻碍排流，其换热耗散与流动阻力可能对局部载荷产生不同影响。金属丝网泄爆射流火焰研究[13]、多孔材料连通容器试验[14]及管廊多孔结构研究[15]提示，应将材料与流动边界整体评价。

本文在可视化管道中，比较 200、600 mm 泄爆口位置及无材料、10PPI 和 20PPI 三种配置，以火焰形态、传播速度和四测点压力分析，并提出面向夹层火焰与压力控制的选择。

2. 实验装置与方法

2.1. 实验装置与几何结构

实验平台由可视化管道、配气系统、点火装置、压力采集系统及高速图像采集系统组成，如图 1 所示。主体管道由三节等长舱室连接而成，每节长 1000 mm、内部截面为 100 mm × 100 mm，总长 3000 mm；透明管壁厚 20 mm。主体管道两端以钢板封闭，第一、第二舱室之间设置 PVC 薄膜。顶部泄爆夹层长 3000 mm、宽 100 mm、高 40 mm，通过各舱室顶部泄爆口与主体管道相连。

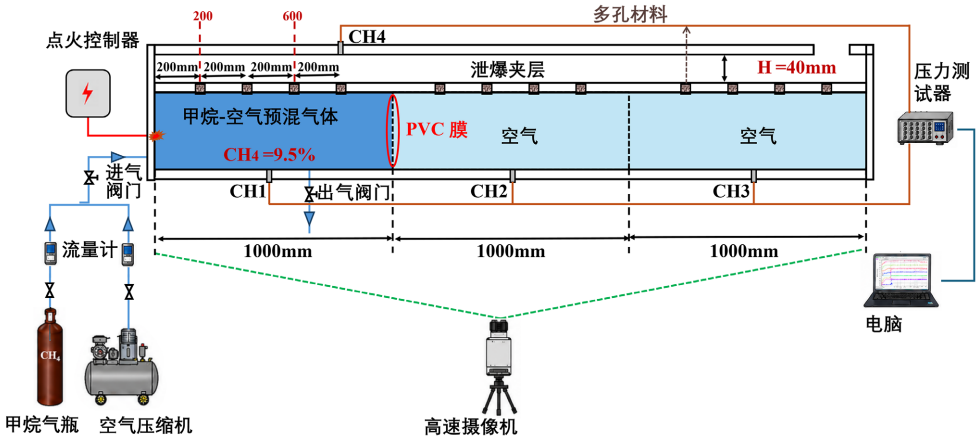


Figure 1. Experimental platform
图 1. 实验平台

甲烷和空气经流量计按设定比例混合，浓度为 9.5%，由舱室一进气阀门通入，并通过排气阀门置换原有气体。每次试验持续配气 8 min，关闭进、排气阀后静置 30 s，随后触发点火并记录压力与火焰图像。各工况至少重复 3 次；每次试验后复位装置、检查连接密封并更换相应薄膜，以保持工况之间的操作一致性。

2.2. 工况设置

实验采用体积分数为 9.5%的甲烷－空气预混气体，以泄爆口位置和多孔材料孔密度为变量，形成表 1 所列六组工况。材料设置为无多孔材料、10PPI 和 20PPI，分别记为 N、P10 和 P20，后缀 200 或 600 表示泄爆口位置。布置示意见图 2。各组保持主体管道、泄爆夹层及单个开口尺寸一致，以便在同位置比较材料差异，并在同材料配置下比较位置差异。

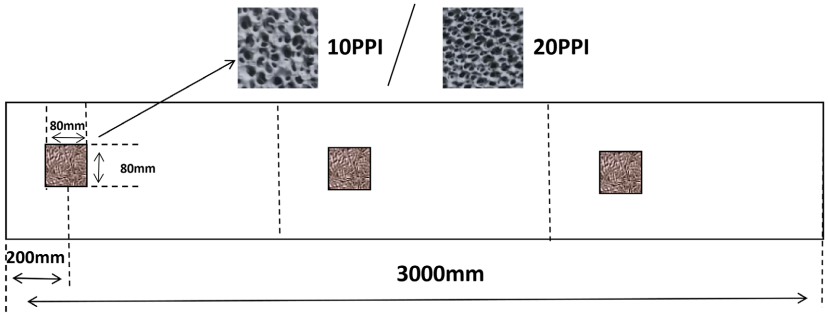


Figure 2. Schematic of vent and porous material with a 200 mm layout as an example
图 2. 泄爆口与多孔材料示意以 200 mm 布置为例

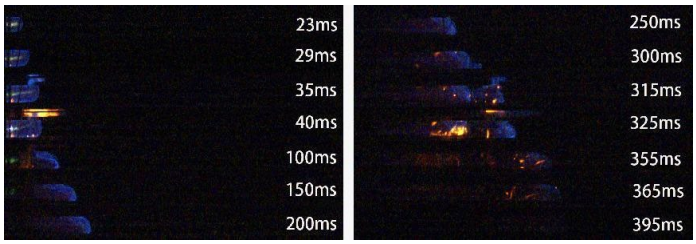
Table 1. Experimental conditions
表 1. 实验工况表

序号	泄爆口位置/mm	材料配置
N200	200	无多孔材料
P10-200	200	10PPI
P20-200	200	20PPI
N600	600	无多孔材料
P10-600	600	10PPI
P20-600	600	20PPI

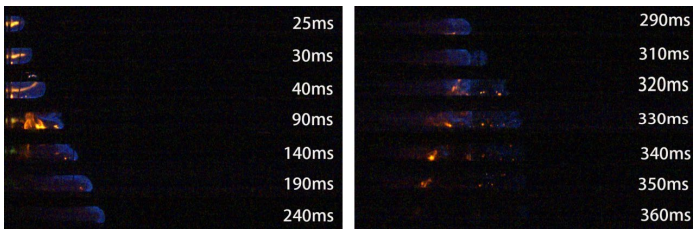
3. 结果与讨论

3.1. 火焰传播形态分析

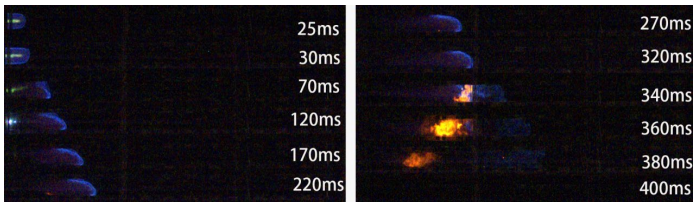
200 mm 布置的火焰序列见图 3。三组工况的火焰前锋均较早到达泄爆口，随后经历较长的缓慢推进阶段。无多孔材料时火焰可直接进入夹层；安装 10PPI 材料后，外溢范围有所减弱；20PPI 材料对夹层内连续可见火焰的限制更明显。但各组仍可观察到泄爆口附近火焰及舱内后续燃烧。600 mm 布置的火焰序列见图 4。由于到达首个泄爆口前的传播距离较长，火焰能够经历更充分的轴向发展。无材料工况在夹层内出现较大范围的可见火焰，并伴随快速下游传播；10PPI 工况仍存在明显外溢。20PPI 材料限制了夹层内持续火焰的发展，但泄爆口附近及主体管道内仍有局部火焰，说明其主要优势是减弱经夹层的传播。



(a) N200



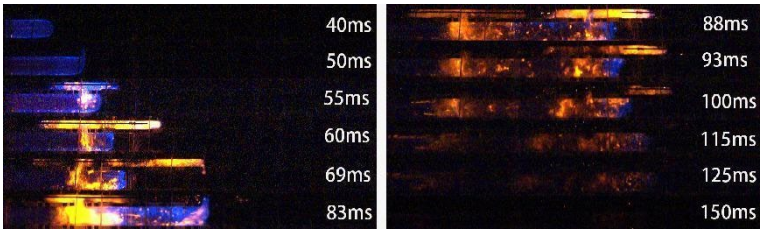
(b) P10-200



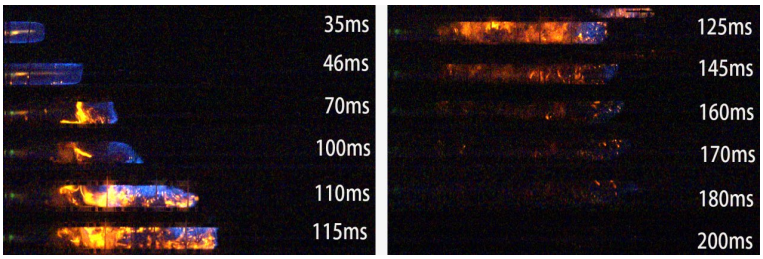
(c) P20-200

Figure 3. Flame propagation under different material configurations for the 200 mm layout
图 3. 200 mm 布置下不同材料配置的火焰传播图

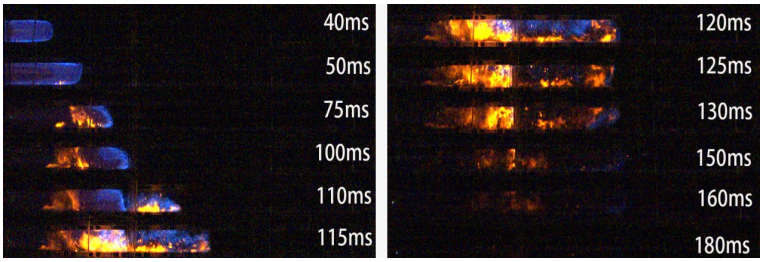
位置变化对主要传播阶段的持续时间影响明显。无多孔材料条件下，200 mm 工况约在 250 ms 到达第一、第二舱室间 PVC 薄膜附近，而 600 mm 工况约为 69 ms；两组安装多孔材料时，200 mm 布置的薄膜附近传播阶段同样明显晚于 600 mm 布置。火焰总可见持续时间还受到残余燃烧和局部外溢影响，因此不作为独立的抑爆优劣指标。主体与夹层的传播差异还需结合速度和压力分析。



(a) N600



(b) P10-600



(c) P20-600

Figure 4. Flame propagation under different material configurations for the 600 mm layout
图 4. 600 mm 布置下不同材料配置的火焰传播图

3.2. 火焰传播速度分析

图 5 为 200 mm 位置的速度曲线。三种材料配置均在前期加速后进入低速波动阶段，并在后期出现第二次明显加速。该过程可能与舱间连通状态变化及局部压差调整有关，但现有结果尚未建立薄膜破坏时刻与速度峰值的对应关系，因此不能将后期加速直接归因于薄膜破坏。安装多孔材料后中间传播阶段较为平缓，但全程速度峰值并未低于无材料工况。这一差异表明，前锋平稳程度与最大瞬时速度应分别评价。

N200、P10-200 和 P20-200 的全程速度峰值分别为 16.08、24.39 和 21.86 m/s。20PPI 较 10PPI 降低 10.37%，但两种材料配置分别比无材料工况高 51.68%和 35.95%。无材料条件下主体火焰可经泄爆口较直接地排入夹层，其较低的轴向峰值速度并不代表夹层传播也受到同等抑制。材料引入的排流阻力及舱间连通状态变化可能影响主体管道的后期加速，但其各自贡献尚不能由现有结果分离。

图 6 为 600 mm 位置的速度曲线。与 200 mm 布置相比，各工况在更短时间内出现显著加速，峰值也

明显提高。N600 存在突出的瞬时高速传播，安装多孔材料后这一过程受到抑制；20PPI 较 10PPI 的峰值更低。速度峰值与材料配置的对应关系在该位置表现得较为一致。

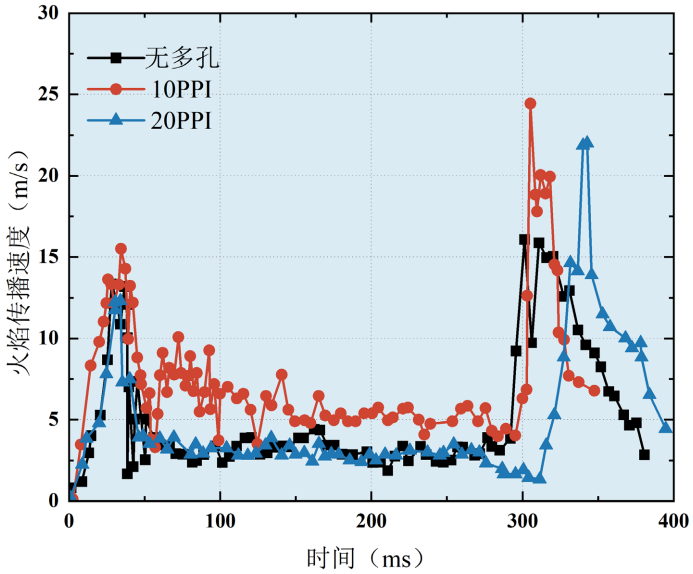


Figure 5. Flame propagation velocity for different material configurations at the 200 mm position

图 5. 200 mm 位置不同材料配置的火焰传播速度

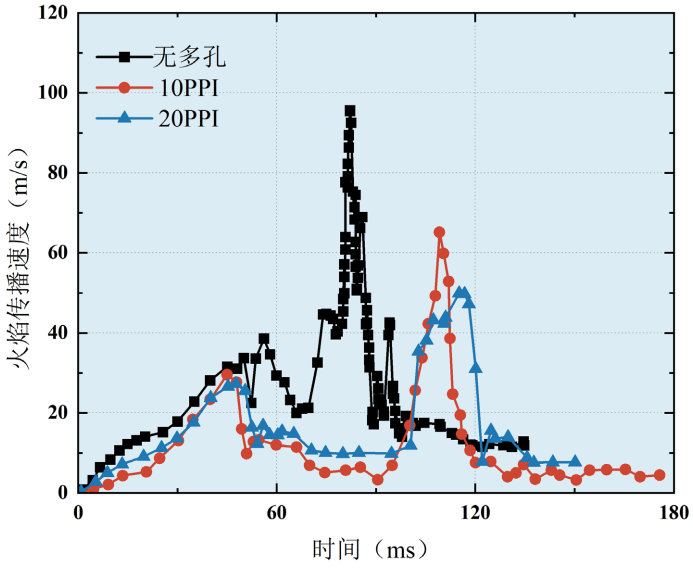


Figure 6. Flame propagation velocity for different material configurations at the 600 mm position

图 6. 600 mm 位置不同材料配置的火焰传播速度

N600、P10-600 和 P20-600 的速度峰值依次为 94.54、65.10 和 49.68 m/s；与同位置无材料工况相比，10PPI 和 20PPI 分别降低 31.14%和 47.45%，20PPI 较 10PPI 进一步降低 23.69%。在火焰到达泄爆口前发展较充分的条件下，多孔材料对外溢火焰及后续传播的限制更加明显，夹层内火焰减弱也与速度峰值降低相对应。

Table 2. Peak flame velocity at different vent positions
表 2. 不同泄爆口位置下的火焰速度峰值

材料配置	200 mm 位置 V_{max}/(m/s)	600 mm 位置 V_{max}/(m/s)	600 mm 位置 V_{max}/(m/s)
无多孔材料	16.08	94.54	82.99
10 PPI	24.39	65.10	62.53
20 PPI	21.86	49.68	56.00

由表 2 可见，三种材料配置在 200 mm 布置下的速度峰值均低于 600 mm 布置，降幅为 56.00%~82.99%。在本实验范围内，首个泄爆口距点火端较近时，火焰到达开口前的轴向传播距离缩短，各配置对应的速度峰值也较低。20PPI 相对 10PPI 均降低峰值，但相对无材料工况的变化方向在两种位置间并不一致，表明材料配置的影响具有泄爆位置依赖性。上述差异可能与排流阻力、侧向泄放及火焰发展阶段共同有关。

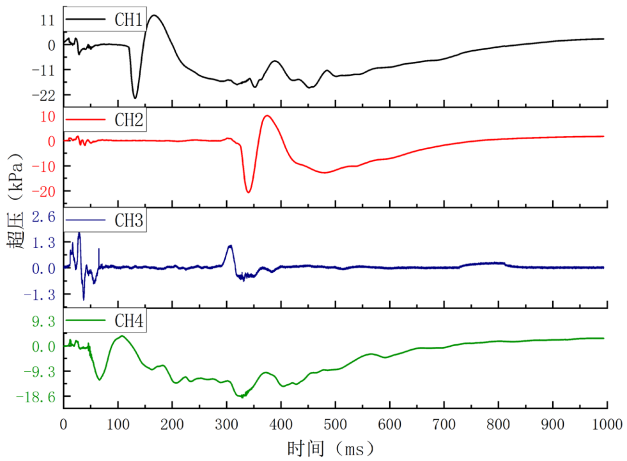
3.3. 爆炸超压分析

压力响应具有明显的分区特征。图 7、图 8 选取无材料与 20PPI 配置，分别展示 200、600 mm 位置的四通道压力历史。各通道出现不同程度的正负压力交替，峰值发生时刻并不一致。本文以各测点最大正超压为压力控制的主要评价指标，负压响应仅作现象描述，不据此评价完整的正负压载荷。主体舱室测点和夹层测点反映的是不同位置的局部响应，不能仅凭某一通道的波动推断整个装置载荷。

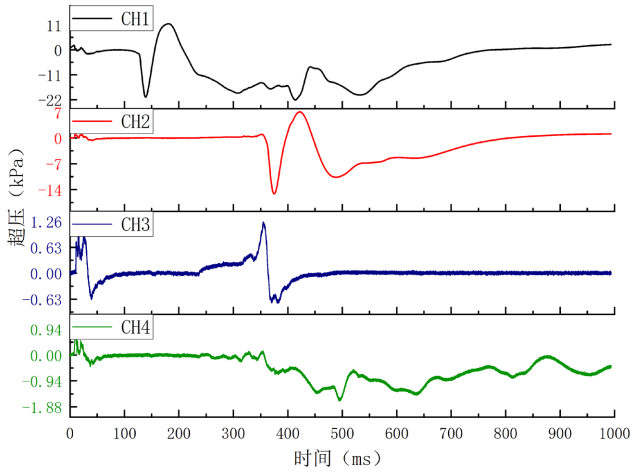
200 mm 布置下，四通道的正压峰值总体较低，后期压力随残余燃烧衰减和气体交换逐步回归环境压力附近。安装 20PPI 材料后，夹层 CH4 的正压增长明显受到限制，而主体舱室仍保留与火焰推进及薄膜破坏相联系的压力变化。说明多孔材料对夹层压力的改善，并不要求各舱室压力波形同步下降。

600 mm 布置下，N600 的夹层压力波动突出，CH4 正超压峰值达到 37.93 kPa，高于三个主体舱室测点。图 4 同时显示该工况夹层内存在较大范围的可见火焰，因此夹层是该配置下需要重点关注的区域。20PPI 材料使 CH4 峰值降低至 3.43 kPa，但舱室一 CH1 仍为 18.73 kPa，表明夹层正超压峰值降低后，四测点中的最大正超压出现在主体舱室。

所有工况的正超压峰值列于表 3，四测点均值为各通道正超压峰值的算术平均。相同材料配置下，200 mm 位置各通道峰值均低于 600 mm 位置，与火焰峰值速度的整体变化一致。该结果表明，200 mm 布置在本装置内对应较低的测点正超压峰值；改变材料配置时，峰值变化则具有明显的空间差异。

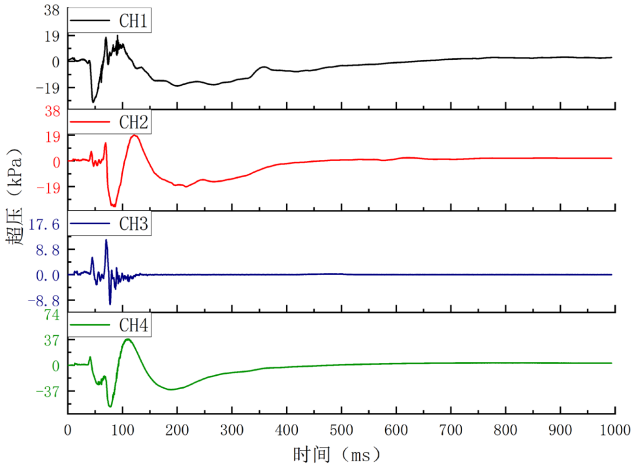


(a) N200

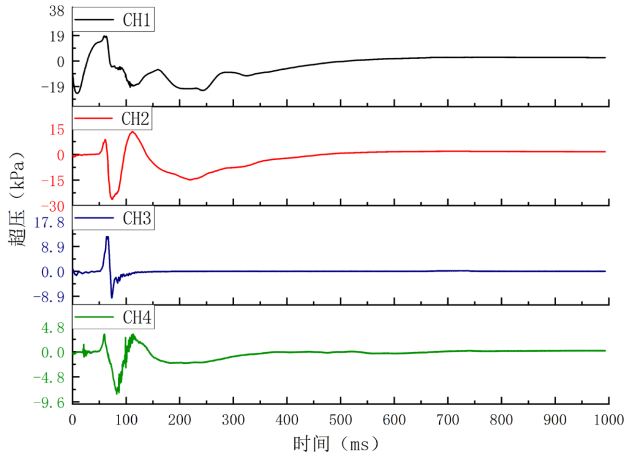


(b) P20-200

Figure 7. Overpressure under the 200 mm layout
图 7. 200 mm 布置下的超压图



(a) N600



(b) P20-600

Figure 8. Overpressure under the 600 mm layout
图 8. 600 mm 布置下的超压图

Table 3. Positive peak overpressure of each channel for six working conditions
表 3. 六组工况的各通道正超压峰值

工况	CH1/kPa	CH2/kPa	CH3/kPa	CH4/kPa	四测点峰值均值/kPa
N200	12.89	10.04	1.84	3.74	7.13
P10-200	9.22	2.42	2.73	2.52	4.22
P20-200	11.56	7.13	1.25	1.05	5.25
N600	19.04	19.04	12.16	37.93	22.04
P10-600	16.96	11.53	11.10	13.84	13.36
P20-600	18.73	13.40	12.48	3.43	12.01

在 200 mm 位置，P10-200 的 CH1、CH2 及四测点均值分别为 9.22、2.42 和 4.22 kPa，均低于 P20-200；P20-200 的 CH3、CH4 则分别降至 1.25、1.05 kPa，低于 P10-200 和 N200。两种材料在不同区域体现出不同优势：10PPI 有利于降低前两舱室峰值及四测点均值，20PPI 更有利于降低第三舱室和夹层峰值。因此，不能将 20PPI 表述为 200 mm 位置下所有压力指标的最优配置。

在 600 mm 位置，P20-600 的四测点均值为 12.01 kPa，低于 P10-600 的 13.36 kPa，但这一改善主要来自 CH4 的大幅下降。P20-600 的 CH1、CH2 和 CH3 均高于 P10-600，且 CH3 为 12.48 kPa，略高于 N600 的 12.16 kPa。若采用四测点中的最大正超压作为判据，P10-600 与 P20-600 分别为 16.96 和 18.73 kPa，排序又与均值不同。这进一步说明，均值、最大局部载荷和夹层压力不能相互替代。

Table 4. Reduction effect of interlayer pressure compared with the no-material condition at the same position
表 4. 相对于同位置无材料工况的夹层压力降低效果

泄爆口位置/mm	10PPI 夹层峰值/kPa	10PPI 降低率/%	20PPI 夹层峰值/kPa	20PPI 降低率/%
200	2.52	32.62	1.05	71.93
600	13.84	63.51	3.43	90.96

表 4 显示，两种位置下 20PPI 对夹层正超压峰值的控制均优于 10PPI。200 mm 位置的最低残余夹层峰值为 1.05 kPa；600 mm 位置 20PPI 的相对降低率更高，但残余峰值为 3.43 kPa。相对降幅同时取决于无材料基准的大小，因此 90.96%的较高降低率不能据此解释为 600 mm 布置具有更低的夹层风险。比较时应同时保留基准值、残余峰值与降低率。

3.4. 泄爆与多孔材料作用机制

泄爆口前移主要改变了火焰首次受到侧向泄放影响时的发展状态。200 mm 布置使火焰在较短轴向距离后即接近泄爆口，压力与部分燃烧产物能够向夹层转移，后续主体前锋经历较长的缓慢推进阶段。600 mm 布置则允许火焰在舱室一内发展更长距离，因而更易出现快速传播和较高峰值。图像、表 2 速度峰值及表 3 各通道压力在位置比较上的一致性，支持了这一解释。相关泄爆位置研究同样强调了点火位置与泄压路径的关系[2]-[4]。

多孔材料可能通过孔道分割、孔壁换热及流动耗散影响经泄爆口的火焰传递。已有研究表明，火焰进入孔道后受到分割，气体与孔壁接触有利于热量传递，曲折流道及局部收缩扩张则增加流动耗散[6]-[9]。本试验中，20PPI 相对 10PPI 对应较低的 CH4 峰值和较弱的夹层连续可见火焰，与上述抑制作用的解释一致。

多孔材料引入的流动阻力也可能改变经开口的排流，使部分主体测点的压力降低幅度减小。20PPI 相

较 10PPI 具有较低的夹层正超压峰值，而部分主体测点峰值较高，这一空间差异与排流受限和火焰传递减弱同时存在的解释相符。舱间连通状态变化还可能影响局部压差及火焰运动，但本文未同步确定薄膜破坏时刻，也未直接测量材料两侧压差及温度，因此上述机制属于结合观测结果与文献提出的解释，尚不能认定某一因素起主导作用。相关研究亦表明，多孔材料的作用受布置位置、厚度和流动条件共同影响[16]-[18]。

4. 结论

(1) 泄爆口位置决定了火焰受到侧向泄放影响时的发展状态。同一材料配置下，泄爆口由 600 mm 前移至 200 mm 后，主体火焰速度峰值降低 56.00%~82.99%，四测点正超压峰值均下降。200 mm 布置缩短了火焰到达首个开口前的轴向传播距离，并在本试验范围内对应较低的速度与正超压峰值。该结果不代表负压响应及完整压力载荷均得到改善。

(2) 20PPI 材料对夹层火焰传播和正超压的限制优于 10PPI。其在 200、600 mm 位置的 CH4 峰值分别为 1.05、3.43 kPa，较同位置无材料工况降低 71.93%、90.96%。

(3) 200 mm 位置的最低速度峰值为无材料工况的 16.08 m/s，最低四测点峰值均值为 10PPI 工况的 4.22 kPa；20PPI 则具有最低的 CH3、CH4 峰值。600 mm 位置 20PPI 虽降低了均值，但部分主体测点峰值高于 10PPI，说明孔密度增加不等于所有局部载荷均降低。

(4) 材料配置应依据主体舱室与夹层的控制目标进行选择。在 200 mm 位置，10PPI 配置具有较低的主体测点最大正超压，20PPI 配置则具有较低的夹层正超压峰值。以降低夹层正超压和限制夹层可见火焰传播为主要目标时，200 mm 位置配置 20PPI 材料表现较好，但现有结果不足以将其认定为所有评价指标下的综合最优配置。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2520809)。

参考文献

[1] 吴建松, 蔡继涛, 赵亦孟, 等. 城市综合管廊燃气爆炸传播特性实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(6): 987-993.

[2] Zhao, Y., Wu, J., Zhou, R., Cai, J., Bai, Y. and Pang, L. (2022) Effects of the Length and Pressure Relief Conditions on Propagation Characteristics of Natural Gas Explosion in Utility Tunnels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **75**, Article 104679. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104679

[3] Yu, M., Wan, S., Zheng, K., Guo, P., Chu, T. and Wang, C. (2018) Effect of Side Venting Areas on the Methane/Air Explosion Characteristics in a Pipeline. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **54**, 123-130. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.03.010

[4] 宋双林, 刘磊, 田富超, 等. 不同泄爆位置对甲烷/空气爆炸特性的影响[J]. 煤矿安全, 2023, 54(11): 48-54.

[5] Xu, Y., Huang, Y., Li, J. and Ma, G. (2021) A Risk-Based Optimal Pressure Relief Opening Design for Gas Explosions in Underground Utility Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **116**, Article 104091. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104091

[6] Nie, B., He, X., Zhang, R., Chen, W. and Zhang, J. (2011) The Roles of Foam Ceramics in Suppression of Gas Explosion Overpressure and Quenching of Flame Propagation. *Journal of Hazardous Materials*, **192**, 741-747. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.083

[7] 贾宝山, 金珂, 胡如霞, 等. 受限空间内多孔介质材料对瓦斯爆炸特性的抑制作用[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(5): 473-476.

[8] Duan, Y., Wang, S., Yang, Y., Li, Y. and Zheng, K. (2021) Experimental Study on Methane Explosion Characteristics with Different Types of Porous Media. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **69**, Article 104370. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104370

[9] 段玉龙, 王硕, 贺森, 等. 多孔材料下气体爆炸转扩散燃烧的特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(9): 113-121.

[10] Wu, J., Zhao, Y., Zhou, R., Cai, J., Bai, Y. and Pang, L. (2022) Suppression Effect of Porous Media on Natural Gas Explosion in Utility Tunnels. *Fire Safety Journal*, **128**, Article 103522. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103522

[11] Wu, J., Li, Z., Cai, J., Zhao, Y., Zhou, R. and Pang, L. (2022) Experimental Analysis of Suppression Effects of Crosswise Arranged Porous Iron-Nickel Materials on the Natural Gas Explosion in Utility Tunnels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **77**, Article 104775. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104775

[12] Cao, J., Wu, J., Zhao, Y., Cai, J., Bai, Y. and Pang, L. (2023) Suppression Effects of Energy-Absorbing Materials on Natural Gas Explosion in Utility Tunnels. *Energy*, **281**, Article 128262. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128262

[13] Wang, Z., Lu, Y., Cao, X., Yu, Y., Jiang, J., Jiao, F., *et al*. (2021) Wire-Mesh Inhibition of Jet Fire Induced by Explosion Venting. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **70**, Article 104408. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104408

[14] Zhuang, C., Wang, Z., Zhang, K., Lu, Y., Shao, J. and Dou, Z. (2020) Explosion Suppression of Porous Materials in a Pipe-Connected Spherical Vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **65**, Article 104106. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104106

[15] 王皓楠, 戚承志, 陈昊祥, 罗伊. 多孔结构对地下综合管廊燃气爆炸的抑制效应[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(2): 164-171.

[16] Duan, Y., Wang, S., Yang, Y. and Li, Y. (2021) Experimental Study on Explosion of Premixed Methane-Air with Different Porosity and Distance from Ignition Position. *Combustion Science and Technology*, **193**, 2070-2084. https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1727900

[17] Duan, Y., Long, F., Huang, J., Jia, H., Bu, Y. and Yu, S. (2022) Effects of Porous Materials with Different Thickness and Obstacle Layout on Methane/Hydrogen Mixture Explosion with Low Hydrogen Ratio. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 27237-27249. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.065

[18] 贺云龙, 张玉铎, 袁必和, 等. 丝瓜络对甲烷/空气预混气体的阻火抑爆性能[J]. 高压物理学报, 2021, 35(6): 204-211.