

中文引用格式:邵昊,蔡毅,杨涛,等.页岩气在狭缝中燃爆超压及爆燃转爆轰特性研究[J].中国安全科学学报,2025,35(4):51-58.

英文引用格式:SHAO Hao, CAI Yi, YANG Tao, et al. Study on explosion overpressure and deflagration-to-detonation transition characteristics of shale gas in fractures[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4): 51-58.

页岩气在狭缝中燃爆超压及爆燃转爆轰特性研究*

邵昊^{1,2}副教授,蔡毅^{1,2},杨涛^{**3}教授,吴征艳^{1,2}副教授,胡焕^{1,2},姚志远^{1,2}

(1 中国矿业大学安全工程学院,江苏徐州 221116;2 中国矿业大学煤矿瓦斯治理国家工程研究中心,江苏徐州 221116;3 华北科技学院 矿山安全学院,河北廊坊 065201)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.04.1040

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFA0711800);国家自然科学基金面上项目资助(52274200);河北省杰出青年基金资助(E2023508019);中央高校基本科研业务费资助(3142021008)。

【摘要】为阐明页岩储层甲烷(CH_4)原位燃爆在狭缝内爆燃转爆轰(DDT)距离、最大爆炸压力(P_{\max})等传播特性,自主搭建多尺寸可调的三维平板狭缝燃爆试验系统,开展4种水力直径下的甲烷-氧气预混燃爆试验,并结合数值模拟研究高压状态下的页岩气燃爆特性。结果表明:甲烷-氧气预混气体在水力直径1.9~11.43 mm内可以维持燃爆自持传播; P_{\max} 与最大爆炸升压速率均与初始压力成正比,呈现线性增长的关系;在水力直径11.43 mm下甲烷-氧气预混气体 P_{\max} 接近理论爆轰压力,随着水力直径的减小, P_{\max} 与初始压力的倍率逐渐降低;初始压力与DDT距离间符合幂函数关系,提升初始压力或降低水力直径,均可缩短DDT距离,从而加快DDT的发生;高压条件下页岩气爆炸特性模拟结果表明,甲烷-氧气预混气体爆炸超压可达到330 MPa,能够对岩石裂隙充分压裂。

【关键词】页岩气; 甲烷(CH_4); 狭缝; 燃爆; 爆燃转爆轰(DDT)

Study on explosion overpressure and deflagration-to-detonation transition characteristics of shale gas in fractures

SHAO Hao^{1,2}, CAI Yi^{1,2}, YANG Tao³, WU Zhengyan^{1,2}, HU Huan^{1,2}, YAO Zhiyuan^{1,2}

(1 School of Safety Science Engineering Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 2 National Engineering Research Center for Coal Mine Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 3 School of Mining Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang Hebei 065201, China)

Abstract: To investigate the methane DDT distance and maximum explosion pressure (P_{\max}) in shale fractures, a multi-scale adjustable 3D planar slit detonation system was developed. Experiments with methane-oxygen premixed gas under 4 different hydraulic diameters, along with numerical simulations, were conducted to examine shale gas combustion under high pressure. Results show that methane-oxygen premixed gas can sustain self-propagating explosion within a hydraulic diameter range of 1.9 to 11.43 mm. Both P_{\max} and peak pressure rise rate increase linearly with initial pressure. Under a hydraulic diameter of

* 文章编号:1003-3033(2025)04-0051-08; 收稿日期:2024-12-05; 修稿日期:2025-02-27

** 通信作者:杨涛(1983—),男,山东济宁人,博士,教授,主要从事矿井瓦斯灾害防治及控制技术、煤矿动力灾害防治方面的研究。
E-mail: yangtao585@163.com。

11.43 mm, P_{\max} closely approaches theoretical detonation pressure. As the hydraulic diameter decreases, the P_{\max} -to-initial pressure ratio decreases. The initial pressure and the DDT distance follow a power-law relationship. Increasing the initial pressure or reducing the hydraulic diameter can shorten the DDT distance, thereby accelerating the DDT. The simulation shows that methane-oxygen premixed gas explosions can produce an overpressure of 330 MPa, capable of fully fracturing rock cracks.

Keywords: shale gas; methane; fractures; explosion; deflagration-to-detonation transition (DDT)

0 引言

甲烷原位燃爆压裂技术通过引爆页岩储层原位解吸的混合高压甲烷与氧气,产生高压气体和冲击波压裂页岩,扩展并沟通天然裂缝^[1-3],同时,清除缝内堵塞以降低气体流动阻力,提高储层页岩气的渗透能力及抽采效率^[4-5]。压裂前需要人工射孔或利用水力压裂形成初始狭缝^[6],由于初始狭缝宽度普遍在 10 mm 以内^[7-8],因此,研究在毫米级狭缝中页岩气的燃爆特性对丰富气体燃爆理论及指导现场改善压裂效果具有重要意义。

近年来,学者们对狭窄通道内发生的爆轰现象开展了研究。GAO Yan 等^[9]研究得到了适用于各种管道的爆轰胞格尺寸与水力直径在爆轰极限下的临界关系式。喻健良等^[10]观察到内径 12.7 mm 的圆管中爆轰波的传播行为与管道的初始压力有直接关系。FAY^[11]提出受边界层效应的影响,近极限条件下小尺度通道内的爆轰波速度往往低于理论预测值。GAO Yan 等^[12]发现, H_2-O_2-Ar 预混气体在圆管中的爆轰波传播随管径减小,壁面边界层效应变得更为显著,导致爆轰速度降低。ZHANG Bo 等^[13]的研究表明:不同当量比的 CH_4/O_2 混合气体在内

径为 36 mm 的圆管中,初始压力下降时混合气体爆轰敏感性降低,爆轰速度降低,且诱导区越长,速度亏损越多。对于小尺度通道内的爆轰波传播研究,WU Mingxun 等^[14]发现,不同内径管道爆轰波的传播模式不同,且内径为 0.5 mm 的微管存在爆轰波亏损及熄爆现象。PAN Zhenhua 等^[15]讨论了狭缝宽度和初始压力大小对爆轰波传播的影响。

现有研究多集中于狭窄通道小尺寸圆管低气压气体爆炸特性,关于爆炸超压的变化特性研究较少。笔者拟针对承压页岩气在狭缝中的爆炸超压、传播问题及初始压力对燃爆压裂的影响,设计搭建试验系统装置,并结合数值模拟方法,分析 CH_4/O_2 预混气体的狭缝燃爆特性,以为现场压裂工艺优化提供理论支撑。

1 页岩气狭缝燃爆试验系统与方法

1.1 岩气狭缝燃爆试验系统

图 1 为多尺寸可调三维平板狭缝燃爆试验系统装置,该装置包括平板狭缝管道系统、配气系统、高能电火花点火系统、高精度爆炸压力数据采集系统和高帧率高速摄影系统。

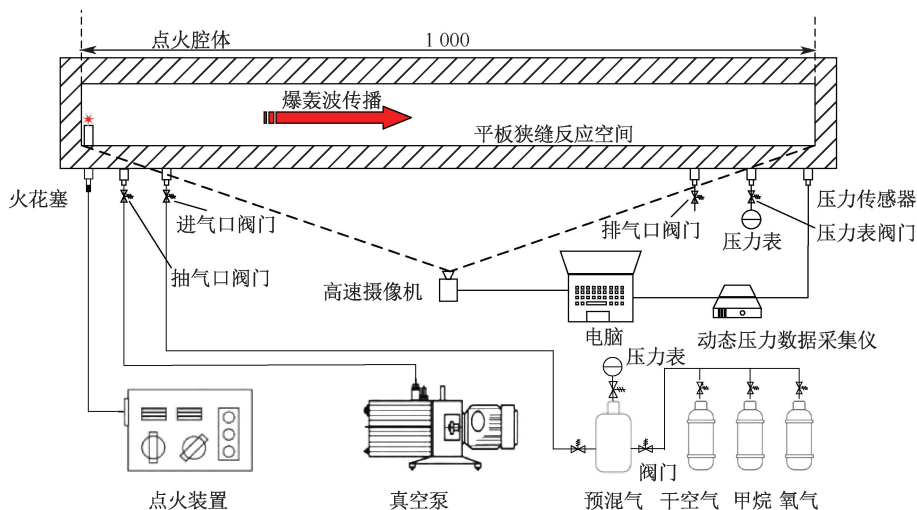


图 1 平板狭缝燃爆试验系统

Fig. 1 Schematic of flat-plate slit detonation experiment system

狭缝管道主体由前平板、后平板、垫片、防爆透明玻璃用螺栓紧固密封压合组成的密闭空间,矩形狭缝宽 W 为 20 mm,长 L 为 1 000 mm,狭缝高度 H 为变量,通过使用不同厚度的垫片调节。

管道的后平板上设置有 6 个圆形接口连接其他系统,火花塞接口与压力传感器接口位于反应区域两端。此外,还包括抽气口、进气口、排气口、以及压力表接口。接口布置位置如图 2 所示。其中,点火点距离左侧壁面 10 mm,压力传感器测点距右侧壁面 990 mm。对于点火口的设计,在前平板对应位置预留一个长和直径均为 20 mm 的电火花点火腔体,以便气体顺利起爆。

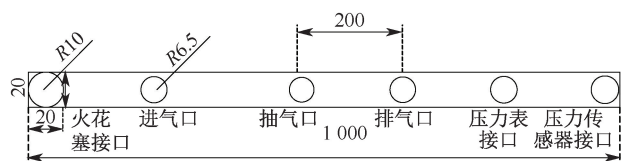


图 2 后平板通孔布置

Fig. 2 Arrangement of through-holes on rear plate

压力传感器量程 0 ~ 20 MPa,采集频率 400 kHz;动态数据采集系统有 8/16 个并行采集通道,通道最高采样频率可达 400 kHz;高速摄像机用于拍摄记录火焰在狭缝管道内的传播过程;高能点火装置,装置的工作电压设定为 $220 \pm 10\% V/50\text{Hz}$,工作电流 2.5 A,单次储能 20 J,火花频率 14 次/s;点火能量满足 CH_4/O_2 预混气体的最小点火能量需求。

1.2 页岩气狭缝燃爆试验方法

在爆轰试验中需要将矩形狭缝流道等效对应的水力直径 D_h (mm) [16] 作为核心参数:

$$D_h = 2WH / (W + H) \quad (1)$$

当 $H = 8, 5, 3$ 和 1 mm 时,对应的 D_h 分别为 11.43、8.00、5.22 和 1.90 mm。 CH_4/O_2 预混气体当量比 $\Phi = 1$ 、点火能量 20 J、初始温度 T_0 为 300 K,初始压力 P_0 为 0.01 ~ 0.3 MPa (绝)。

2 页岩气狭缝燃爆试验结果与分析

2.1 页岩气在狭缝中的燃爆超压特性参数

2.1.1 爆燃稳定传播临界压力的确定

表 1 为 CH_4/O_2 预混气体在不同 D_h 和 P_0 条件下的 3 次重复爆炸试验结果。可以看出, $D_h = 8.00$ 、11.43 mm 时,维持爆燃的临界压力 P_c 为 0.01 MPa; $D_h = 1.90$ 、5.22 mm 时, P_c 为 0.015 MPa。这说明随着 D_h 的减小, P_c 增大。由于 D_h 的减小提高狭缝的

边界层黏性与壁面摩擦力,进而增大爆轰波的速度与能量损失,只有增大 P_0 才能维持自持传播。

表 1 爆燃稳定传播临界压力统计

Table 1 Statistics of critical pressure for stable deflagration propagation

D_h/mm	1.90	5.22	8.00	11.43
P_c/MPa	0.015	0.015	0.01	0.01

2.1.2 初始压力对狭缝燃爆超压特性的影响

1) P_0 对 P_{\max} 的影响。图 3 为在 $D_h = 5.22$ mm、 $T_0 = 300$ K, $P_0 = 0.06$ 、0.1 和 0.18 MPa 下, CH_4/O_2 预混气体爆炸压力随时间变化的曲线。当 $P_0 = 0.06$ MPa 时, $P_{\max} = 0.843$ MPa,两者比例为 14.10;当 P_0 升至 0.10 和 0.18 MPa 时, P_{\max} 增大至 1.351 和 2.406 MPa,两者比例分别为 13.50 和 13.36。

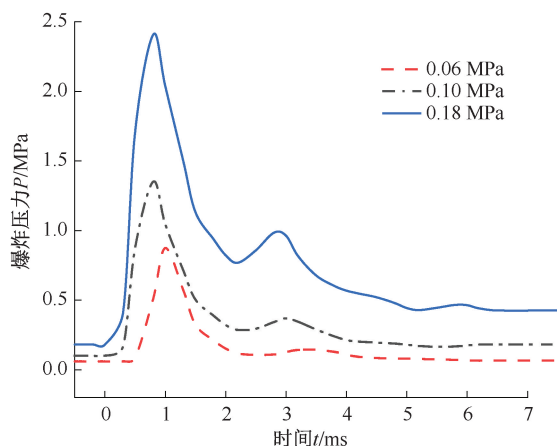


图 3 不同 P_0 下爆炸压力-时间曲线

Fig. 3 Explosion pressure-time curves under varied P_0

图 4 为试验测得的不同 D_h 、不同 P_0 时的最大爆炸压力 P_{\max} ,从中可以看出,随着 P_0 的增大, P_{\max} 呈线性增长趋势。这与文献[17-18]的研究结果一致。这是因为 P_0 的增大提高了 CH_4/O_2 预混气体密度,进而提升了活性分子数及分子间碰撞频率,为链式反应提供了更多的自由基;自由基的持续反应与可燃气体反应速率快速上升促进产生了更多热量和能量,燃爆与压力波耦合加速传播,增大作用在狭缝壁上的压力,从而使可燃气体的 P_{\max} 增大。

2) P_0 对爆炸最大升压速率 $(dP/dt)_{\max}$ 的影响。图 5 为 $D_h = 5.22$ mm、 $T_0 = 300$ K, $P_0 = 0.06$ 、0.1 和 0.18 MPa 下, dP/dt 随时间变化的曲线。可以看出,不同 P_0 下 dP/dt 变化趋势大致相同,初期经平稳阶段后在 1 ms 内 dP/dt 快速增大至最大值,之后骤降并震荡回升,最终变化速率稳定为 0; P_0 为 0.06、0.10 和 0.18 MPa 时,最大爆炸升压速率

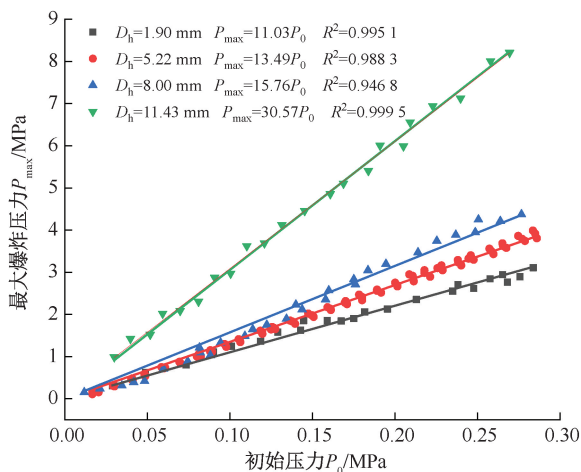


图4 4个 D_h 下不同 P_0 的 P_{\max} 拟合直线

Fig. 4 Linear fitting of P_{\max} versus P_0 under four D_h

$(dP/dt)_{\max}$ 分别为 2 132.5、3 535.0 和 6 486.0 MPa/s。

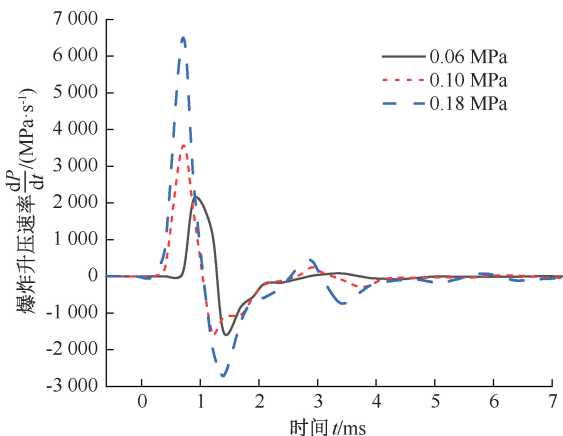


图5 不同 P_0 下 dP/dt 随时间的变化

Fig. 5 Temporal evolution of dP/dt under varied P_0

图6为 $D_h = 5.22$ mm 时试验测得的不同 P_0 时的 $(dP/dt)_{\max}$, 其拟合关系式为:

$$(dP/dt)_{\max} = 51.69 + 3\,500P_0 \quad (2)$$

因此, CH_4/O_2 预混气体爆炸参数 $(dP/dt)_{\max}$ 和 P_{\max} 均与 P_0 呈现线性增大的关系。 P_0 越高, 爆炸强度越强, 页岩压裂效果越好。

2.1.3 水力直径对燃爆参数的影响

图4为不同 D_h 和 P_0 下的 P_{\max} 曲线, 可以看出, 相同 P_0 不同 D_h 下, P_{\max} 与 P_0 的倍率不同, 且随着 D_h 减小, 倍率也随之减小。 $\Phi = 1$ 时, CH_4/O_2 预混气体爆轰压力 P_{CJ} 约是 P_0 的 32 倍^[17]。当 $D_h = 11.43$ mm 时, P_{\max} 接近 P_{CJ} , 为 30.57 倍 P_0 , 爆炸压力损失较小。当 D_h 减小时, 爆炸压力损失增大, 说明 D_h 减小会抑制爆炸。由于 $(dP/dt)_{\max}$ 与 P_{\max} 正

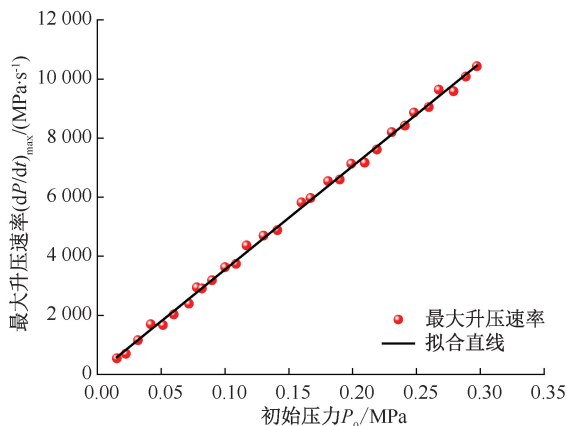


图6 不同 P_0 时的 $(dP/dt)_{\max}$

Fig. 6 $(dP/dt)_{\max}$ under varied P_0

相关, D_h 减小也会导致 $(dP/dt)_{\max}$ 明显下降。

无量纲化处理 D_h , 令无量纲化参数 $D_h^* = (D_h - D_{h, \min}) / (D_{h, \max} - D_{h, \min})$ 。图7为 P_{\max}/P_0 随 D_h^* 的变化, 其拟合关系式为 $P_{\max}/P_0 = 11.008 + 0.223 \exp(D_h^* / 0.268)$, $R^2 = 0.996$ 。由 L 和爆轰波平均传播速度 V (1 250 m/s) 可得 $(dP/dt)_{\max}$ 的出现时间 Δt 为 0.8 ms; 又 $(dP/dt)_{\max} = 2(P_{\max} - P_0) / \Delta t$, 有:

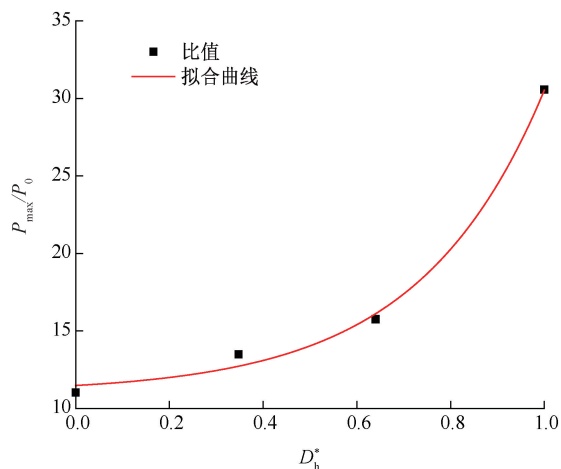
$$(dP/dt)_{\max} = 25\,025P_0 + 1\,172.5P_0 \exp(D_h^* / 0.268) \quad (3)$$


图7 P_{\max}/P_0 随 D_h^* 值的变化

Fig. 7 Variation of P_{\max}/P_0 with D_h^*

2.2 页岩气狭缝燃爆的 DDT 距离研究

2.2.1 DDT 距离的确定

由于试验条件和观测方法的限制, 所得的爆燃转爆轰 (Deflagration-to-Detonation Transition, DDT) 距离^[19-20] 多为近似值。根据 Zel'dovich-von Neumann-Döring 理论模型^[21], DDT 过程中火焰锋面与前导压力波耦合向前传播, 此时火焰的传播速度

会突然急速上升,因此,可以通过观测火焰传播速度及火焰锋面的变化来确定爆轰波的起爆位置。通过高速摄像拍摄火焰传播图像以计算爆轰波的传播速度,并与CJ(Chapman-Jouguet)理论速度 V_{CJ} 对比,将火焰速度为 $0.8V_{CJ}$ 所对应的火焰传播位置作为DDT距离^[10]。

图8和图9分别为 $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $D_h = 5.22 \text{ mm}$ 时的火焰传播图像及与其对应的速度分布。由图8可知:每张火焰传播图中火焰前锋距离的变化,框内位置火焰由指形火焰进一步拉伸为尖端火焰,火焰锋面距离急剧增大,推断发生了DDT。由图9可明显观察到火焰速度快速上升并逐渐降低至稳定值的过程。当火焰传播速度达到 $0.8V_{CJ}$ 时,DDT发生,并最终形成稳定的爆轰波,该位置到点火端的距离为DDT距离,DDT距离为475 mm。

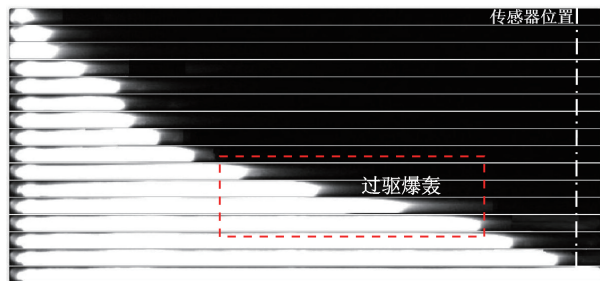


图8 3mm狭缝中 P_0 为0.1 MPa的火焰传播图像

Fig. 8 Flame propagation images in 3 mm slit with P_0 of 0.1 MPa

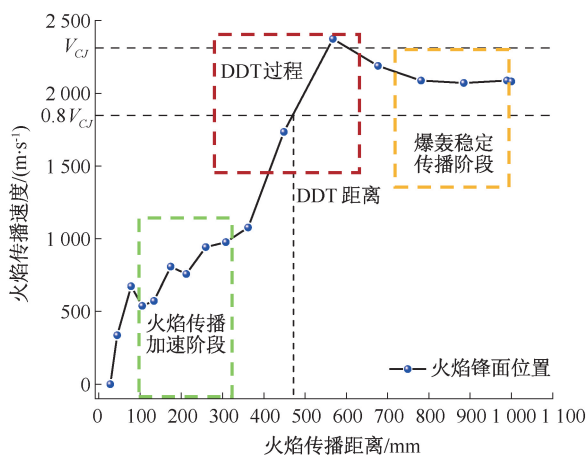


图9 3mm狭缝中 P_0 为0.1 MPa的火焰速度分布

Fig. 9 Flame velocity distribution in 3 mm slit with P_0 of 0.1 MPa

2.2.2 初始压力对DDT距离的影响

图10为不同 P_0 下4种 D_h 的 CH_4/O_2 预混气体的DDT距离,从中可以看出,相同 D_h 下,随着 P_0

的增加,DDT距离 L_{DDT} 减小,但减小趋势逐渐放缓。这是因为增大 P_0 意味着提高预混气物质的量,从而增加气体燃爆的反应速率及释放的热量,进而促使DDT发生,缩短预混气的 L_{DDT} 。 L_{DDT} 与 P_0 的拟合曲线符合 $L_{\text{DDT}} \propto P_0^{-m}$ (指数 m 的取值与预混气的爆轰敏感程度相关),这与文献^[22]的结论一致。图10中拟合曲线 m 的取值范围为 $0.38 \sim 1.04$, D_h 越小, m 值越大,说明相同条件下在狭缝管道中更容易产生爆轰波。

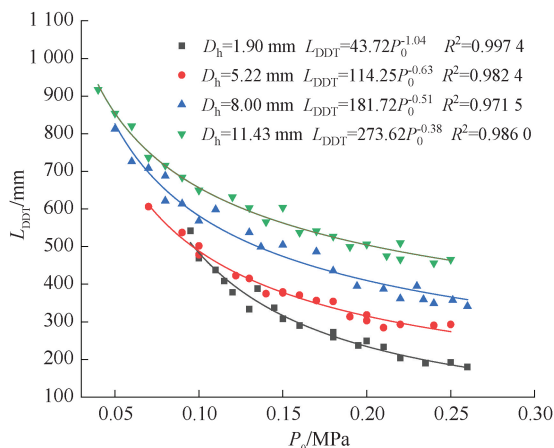


图10 不同 P_0 下4种 D_h 的DDT距离

Fig. 10 DDT distances of four D_h values under different P_0

根据DDT过程火焰加速理论^[23],在狭缝管道中边界层效应更加明显,在边界层黏性力的作用下燃爆火焰被拉伸为抛物线形状,加大了火焰面积,提升了火焰传播的速度;快速传播的火焰产生压力激波,在边界层的影响下压力激波与火焰发生耦合产生超音速爆轰波,导致狭缝管道中DDT距离更小,时间也更短。

2.2.3 水力直径对DDT距离的影响

图11为不同 P_0 下DDT距离随 D_h 的变化,在 P_0 为 $0.04 \sim 0.25 \text{ MPa}$ 范围内,DDT距离随 D_h 的增大呈线性增加趋势,拟合关系为 $L_{\text{DDT}} = xD_h + y$, x 、 y 为拟合常数,取值范围分别为 $12.12 \sim 31.5$ 和 $132.7 \sim 715.4$ 。

综合上述分析可知:在同一狭缝尺寸下可以通过提升 P_0 来缩短DDT距离,降低狭缝尺寸也会导致DDT距离减小,从而加快DDT的发生,使页岩气燃爆压力达到最大效果。

2.3 高压环境下页岩气狭缝燃爆过程数值模拟

受安全性限制,通常只能进行低压气体燃爆试验,而井筒内的页岩气通常可以达到数十兆帕。为

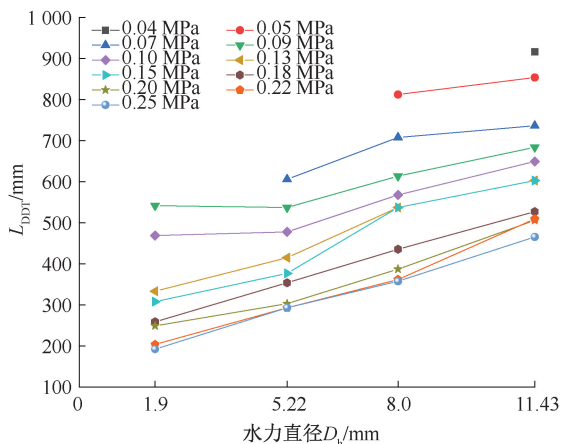


图 11 不同 D_h 对 DDT 距离的影响

Fig. 11 Effect of different D_h on DDT distance

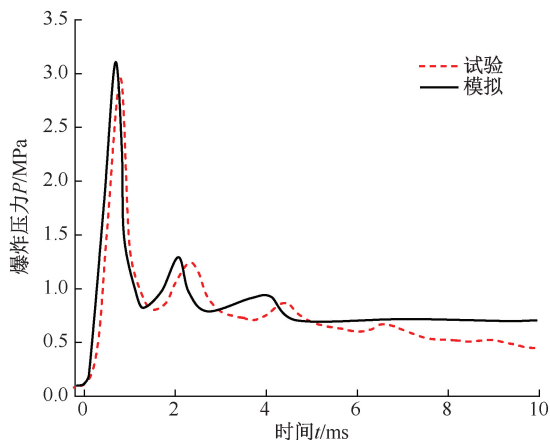


图 12 燃爆模拟与试验的压力时间曲线对比

Fig. 12 Comparison of pressure-time curves between explosion simulation and experiment

深入研究高压条件下页岩气在狭缝的燃爆特性,使用 ANSYS Fluent 流体动力学软件^[24-25],采用剪切应力运输模型,模拟从稳定燃烧到爆轰全过程。

2.3.1 数值模拟模型的建立

利用二维模型仿真分析页岩气在狭缝中的爆炸过程, L 取 1 000 mm, H 取 8 mm。网格划分采用 0.1 mm 四边形网格。采用甲烷氧化的 21 组分 25 步反应模型^[26],并选择涡耗散概念模型计算。压力修正方程采用压力隐式分裂算法求解^[24]。时间上采用一阶隐式离散,空间上对流项和扩散项分别采用二阶迎风格式和二阶中心差分格式。

初始条件为:狭缝内充满 CH_4/O_2 预混气体,其 Φ 为 1;初始压力值设定为 0.1、1、5、10 MPa;初始温度 T 取 300 K;初始混合气体静止,即 $v(t_0) = 0 \text{ m/s}$;在模型的左侧中心设定一个半球形区域作为引爆源,其半径为 2 mm,温度设定为 2 000 K,点燃时该区域内甲烷和氧气完全反应以启动爆炸。

边界条件为:狭缝管道为两端封闭的空间,没有进出口边界;考虑到可燃气体的爆炸过程非常短暂,壁面散失的热量可忽略不计,因此,将狭缝壁面设定为无滑移、无渗透的绝热壁面边界条件。

2.3.2 数值模拟模型的验证

图 12 为 $D_h = 5.22 \text{ mm}$ 、 $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 的 CH_4/O_2 预混气体燃爆模拟与试验的压力时间曲线对比。可以发现, P_{max} 出现的时间和曲线变化大致相同,其中 P/P_0 和最大爆轰速度的模拟值与试验误差分别为 4.8% 和 7.5%,说明模拟结果合理。

2.3.3 数值模拟结果分析

表 2 为其他初始条件和边界条件不变, $P_0 = 0.1、1、5、10 \text{ MPa}$ 时的爆轰压力与温度、DDT 距离、

dP/dt 及爆轰波传播速度的模拟结果。可以看出,随着 P_0 的提升,爆轰压力也随之增大,二者间呈正相关。 dP/dt 随着 P_0 的增大线性快速增强。当 P_0 增大至 10 MPa 时,狭缝中爆轰压力为 330 MPa,远大于页岩储层中页岩的破断压力(约 100 MPa)^[8]。因此,通过在狭缝中投放高压氧气,页岩气原位燃爆技术可形成巨大的爆炸超压与压裂效果。

表 2 不同 P_0 下燃爆特性参数的模拟结果

Table 2 Simulation results of explosion characteristics under different P_0

P_0/MPa	爆轰压力/MPa	爆轰温度/K	DDT 距离/mm	$\frac{dP}{dt} / (\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	爆轰波传播速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0.1	3.08	4 160	440	7 700	2 145
1.0	31	4 220	263	77 500	2 256
5.0	160.5	4 500	140	401 250	2 468
10.0	330	4 623	110	828 960	2 500

3 结论

1) 页岩气在狭缝内爆炸的最大爆炸压力与最大爆炸升压速率均与初始压力成正比关系;狭缝的水力直径越小,爆炸压力损失越大,维持爆轰波稳定传播所需要的临界压力越大。

2) 在相同水力直径下,页岩气在狭缝内爆炸的 DDT 距离与初始压力间符合幂函数关系,DDT 距离随初始压力增大而减小;在相同初始压力下,降低狭缝尺寸也可缩短 DDT 距离。

3) 页岩气在狭缝内的燃爆过程模拟结果表明:爆轰压力及升压速率随初始压力提升而增强,当 P_0 提升至 10 MPa 时,狭缝中爆轰压力为 330 MPa。

参 考 文 献

- [1] 翟成, 曲占庆, 邓守春, 等. 页岩储层甲烷原位燃爆压裂理论与技术研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(3):435-455.
ZHAI Cheng, QU Zhanqing, DENG Shouchun, et al. Strategic conception and research progress of methane in-situ deflagration fracturing technology in shale reservoirs [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2024, 53(3):435-455.
- [2] 翟成, 王宇, 刘厅, 等. 不同燃爆载荷作用下页岩破裂特性及孔裂隙结构改性规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12):4 269-4 283.
ZHAI Cheng, WANG Yu, LIU Ting, et al. Fracture characteristics and pore structure evolution law of shale under different methane explosive fracturing loads[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2023, 48(12):4 269-4 283.
- [3] 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.
JIA Zhenzhen, YE Qing, YANG Zhuohua. Damage characteristics of roadway wall under dynamic-static loads by gas explosion impact and geostress[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10):116-123.
- [4] 余旭, 王宇, 翟成, 等. 高温-动态冲击作用下页岩微纳米孔隙结构演化特征[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10):137-146.
YU Xu, WANG Yu, ZHAI Cheng, et al. Evolutionary characteristics of shale micronano pore structures under high-temperature dynamic impact [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 33(10):137-146.
- [5] 王宇, 翟成, 唐伟, 等. 循环冲击载荷作用下页岩动力学响应及能量耗散特征[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(6):76-89.
WANG Yu, ZHAI Cheng, TANG Wei, et al. Dynamic response and energy dissipation characteristics of shale under cyclic impact loadings [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(6):76-89.
- [6] 牟恭雨, 罗宁, 申涛, 等. 聚能射流侵彻页岩储层损伤裂隙形成机制[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(3):85-101.
MU Gongyu, LUO Ning, SHEN Tao, et al. Mechanism of damage-induced fracture formation in shale reservoir penetrated by shaped charge jet[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(3):85-101.
- [7] 李东传, 陈奕君, 邹雪岩. 聚能射孔对注聚影响试验研究[J]. 采油工程, 2022(4):58-61.
LI Dongchuan, CHEN Yijun, ZOU Xueyan. Experimental study on the effect of shaped charge perforating on polymer flooding[J]. Oil Production Engineering, 2022(4):58-61.
- [8] 高岳, 王涛, 严子铭, 等. 页岩气高效开采中钻井完井和水力压裂的关键力学问题[J]. 力学学报, 2022, 54(8):2 248-2 268.
GAO Yue, WANG Tao, YAN Ziming, et al. Key mechanical problems of well drilling and completion and hydraulic fracture in highly efficient extraction of shale gas[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(8):2 248-2 268.
- [9] GAO Yan, NG H D, LEE J H S. Minimum tube diameters for steady propagation of gaseous detonations[J]. Shock Waves, 2014, 24(4):447-454.
- [10] 喻健良, 高远, 闫兴清, 等. 初始压力对爆轰波在管道内传播的影响[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(4):413-417.
YU Jianliang, GAO Yuan, YAN Xingqing, et al. Effect of initial pressure on propagation of detonation wave in round tube[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(4):413-417.
- [11] FAJ J A. Two-Dimensional gaseous detonations: velocity deficit[J]. Physics of Fluids, 1959, 2(3):283.
- [12] GAO Yan, ZHANG Bo, NG H D, et al. An experimental investigation of detonation limits in hydrogen-oxygen-argon mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(14):6 076-6 083.
- [13] ZHANG Bo, LIU Hong, YAN Bingjian. Investigation on the detonation propagation limit criterion for methane-oxygen mixtures in tubes with different scales[J]. Fuel, 2019, 239:617-622.
- [14] WU Mingxun, WANG Chanyu. Reaction propagation modes in millimeter-scale tubes for ethylene/oxygen mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2):2 287-2 293.
- [15] PAN Zhenhua, QI Jun, PAN Jianfeng, et al. Fabrication of a helical detonation channel; effect of initial pressure on the

- detonation propagation modes of ethylene/oxygen mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 192:1-9.
- [16] 徐正坦. 流体力学[M]. 北京:化学工业出版社, 2020:275.
- [17] 胡斌斌. 小尺度管道中甲烷-氧气爆炸特性实验研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
HU Binbin. Experimental study on explosion characteristics of methane-oxygen in small scale pipeline[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [18] 曹小龙. 甲烷/气相助燃剂燃爆特性及其燃爆致裂页岩的机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
CAO Xiaolong. Research on explosion characteristics of methane/gaseous phase combustion promoters and mechanism of fracturing shale by explosion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [19] MEHR S H, CICCARELLI G. DDT run-up distance in an obstructed tube[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 255: DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.112906.
- [20] YANG Zixin, YUE Ye, TAO Li, et al. Experimental study of DDT run-up distance and detonation wave velocity deficit for stoichiometric hydrogen-oxygen mixture in micro spiral channels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49(2):253-263.
- [21] KITANO S, FUKAO M, SUSA A, et al. Spinning detonation and velocity deficit in small diameter tubes [J]. *Proceedings of The Combustion Institute-PROC COMBUST INST*, 2009, 32(2): 2 355-2 362.
- [22] YANG Zixin, YUE Ye, HUO Jiepeng, et al. Experimental investigation on the DDT run-up distance and propagation characteristics of detonation wave in a millimeter-scale spiral channel filled with hydrogen-air mixture[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 51(2):713-726.
- [23] 刘丹丹. 细管道中氢-空气混合物火焰加速与爆燃转爆轰数值模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2022.
LIU Dandan. Numerical Simulation of flame acceleration and deflagration-to-detonation of hydrogen-air mixture in narrow channels [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [24] ZHANG Yang, ZHANG Qi. Flow process and energy release of hydrogen in fluorine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(5):2 044-2 054.
- [25] WANG Weijian, YE Qing, JIA Zhenzhen. Numerical investigation of dual-source gas explosion dynamics in h-type tunnels under varied enclosed situations [J]. *Energy Science & Engineering*, 2024, 12(11):15 078-15 091.
- [26] SMITH G P, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. GRI-Mech 3.0[EB/OL]. [2024-06-10]. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>.

作者简介: 邵昊 (1982—)男,山东滨州人,博士,副教授,主要从事气体/粉尘爆炸机制及防治技术、矿井热动力灾害防治技术等方面的研究。E-mail: shaohao@cumt.edu.cn。

