

罗宁, 柴亚博, 李鹏龙, 等. 甲烷/氧气燃爆下页岩应力波衰减及损伤规律研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(6): 858-869. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024902

LUO Ning, CHAI Yabo, LI Penglong, et al. Stress wave attenuation and damage patterns of shale under methane/oxygen explosion[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(6): 858-869. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024902

甲烷/氧气燃爆下页岩应力波衰减及损伤规律研究

罗宁¹, 柴亚博¹, 李鹏龙¹, 杨梦迪², 杨忠州², 廖禹成¹, 曹小龙¹, 张浩浩¹

1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏徐州 221116;
2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 陕西西安 710077

摘要: 基于甲烷原位燃爆压裂页岩试验获得燃爆关键参数(燃爆压力、燃爆速度、峰值升压时间)的变化规律, 通过无量纲分析得到页岩储层应力波衰减规律, 结合有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立不同工况模型, 分析燃爆对页岩产生的裂缝条数以及页岩损伤演化等规律。结果表明, 甲烷与氧气发生燃爆时的压力约为初始压力的 30 倍, 峰值升压时间为 85 μs ; 页岩储层内应力波峰值应力与比距离之间为指数关系; 提高加载速率可以在燃爆孔周边形成多条裂缝; 与裸眼完井相比, 套管的存在使井壁附近压力变小, 沿着初始裂缝方向出现 I 型裂纹扩展, 扩展后的射孔长度增加 47%。

关键词: 甲烷; 页岩; 燃爆压裂; 数值模拟

中图分类号: TD 83; TE 37

文献标志码: A 文章编号: 2096-2193(2024)06-0858-12

Stress wave attenuation and damage patterns of shale under methane/oxygen explosion

LUO Ning¹, CHAI Yabo¹, LI Penglong¹, YANG Mengdi², YANG Zhongzhou²,
LIAO Yucheng¹, CAO Xiaolong¹, ZHANG Haohao¹

1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;

2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China

Abstract: Methane in-situ explosion fracturing of shale is a revolutionary technology that utilizes the methane analyzed from shale reservoirs and the input combustion aids to carry out explosion reactions, thereby forming a three-dimensional fracture network in in-situ fracturing of shale reservoirs. This study conducted explosion experiments to investigate the variation patterns of key parameters of explosion (i. e. explosion pressure, explosion speed, rise time of peak pressure). We obtained the attenuation patterns of stress wave in shale reservoir through dimensionless analysis. We used the finite element software ANSYS/LS-DYNA to establish models of different working conditions for analyzing the number of cracks and damage evolution patterns of shale caused by explosion. Results show that: 1) The pressure during the methane/oxygen explosion is about 30 times the initial pressure. The rise time of peak pressure is 85 μs . 2) Peak stress of the stress wave and the specific distance in the shale reservoir under the explosion load are exponentially related. 3) The increase in loading rate could form multiple

收稿日期: 2024-05-07 修回日期: 2024-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0711800); 国家自然科学基金(12372373, 12072363); 中国西电集团重点研发(K222301-01); 中国矿业大学研究生创新计划(2023WLJCRCZL044)

作者简介: 罗宁(1980—), 男, 安徽淮北人, 博士, 教授, 主要从事爆炸冲击动力学效应及深地岩石动力学等方面的研究工作。E-mail: nluo@cumt.edu.cn

cracks around the explosion hole. 4) Compared with open hole completion, the presence of casing reduces the pressure near the wellbore wall, causing type I cracks to extend along the initial fracture direction. The perforation length after extension increases by 47% compared to the original length.

Key words: methane; shale; explosion fracturing; numerical simulation

“碳中和”战略的实施将使我国能源结构发生重大转变,页岩气的战略开发对能源格局的改变具有重要意义^[1]。页岩气储层具有大面积连续成藏、低孔、低渗等特性,采用先进的改造工艺才能实现页岩气的商业性开发^[2]。近年来,科技部提出利用页岩储层内解析出的甲烷与投入的助燃剂实施燃爆反应,从而实现原位压裂页岩储层形成三维立体缝网络来达到改善储层、高效开采页岩气的目的^[3]。这项变革性技术与传统压裂方法不同,涉及的关键科学问题包括助燃剂与甲烷的燃爆反应特性以及燃爆过程对页岩产生的高应变率效应等。

翟成等^[4]通过自主搭建的 100 MPa 燃爆管道开展完井页岩试样的燃爆载荷冲击压裂实验,结果表明,燃爆载荷的提高会促进多条径向裂缝协同起裂,有利于构建粉碎区小、裂隙区范围大的裂缝体系,冲击波和气楔扩缝效应是裂缝起裂-扩展的主控因素。柴亚博等^[5]基于甲烷燃爆压力曲线开展不同工况下页岩储层裂缝网络发育特征研究,结果表明初始地应力对裂缝网络发育具有明显影响,燃爆压裂能够有效减小燃爆破碎面积,更有利于形成更多、更长的径向裂缝。于慧等^[6]通过建立流-固耦合模型分析了超临界二氧化碳气体在储层裂缝中的运移机理,并总结出裂缝扩展特征。俞海玲^[7]通过相似材料研究了高压气体预裂爆轰作用致裂煤岩体过程中气体产物膨胀驱动裂纹扩展的规律,并采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟了爆炸预裂过程中煤层的受力情况,由于产气剂爆炸作用于岩石上的时间延长,裂纹更加容易发育扩展。吴飞鹏等^[8]开展了不同峰值压力、加载速率下冲击破岩压裂试验,研究发现,页岩动态强度与升压速率的正相关性弱于纯应力冲击,随着升压速率增大,裂缝条数及复杂程度增加,裂缝面剥离碎裂现象增强。HU 等^[9]通过研究煤层 CO₂ 相变致裂增透技术,将气体膨胀做功以爆炸当量的形式转化成 TNT 的质量,进而利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟煤岩体的破坏情况。杨立云等^[10]基于有限元方法研究了爆生气体驱动双共线 I 型裂纹的起裂和

扩展行为,并建立相应断裂准则。DEGHAN 等^[11]制作花岗岩试样并采用铜管避免爆生气体渗入裂缝,在爆炸应力波的作用下,孔附近产生了径向裂纹。MA 等^[12]基于 ANSYS/LS-DYNA,通过改变爆炸加载速率研究爆炸后的裂纹扩展模式发现,合适的加载速率可以产生多条裂缝。

综上所述,目前大多数研究集中于固体炸药以及二氧化碳膨胀压裂岩石的实验研究,而针对气体燃爆压裂岩石的理论分析及应用研究为数不多。因此,利用自主搭建的燃爆管系统,通过可燃气体的燃爆试验确定燃爆加载曲线关键参数,基于无量纲分析获得应力波衰减规律;利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟了甲烷/气相助燃剂下不同完井方式页岩的燃爆压裂效果。

1 可燃气体燃爆试验

1.1 试验原理与方法

在助燃剂选取方面,基于气态物质易扩散、混合均匀等特点,选择气相助燃剂与甲烷进行燃爆特性测试。由于氧气化学性质比较活泼,在自然界中大部分的元素都能与其反应,一般充当助燃性物质,是一种经济易得的常见强氧化剂^[13],因此选择氧气作为助燃剂与甲烷进行燃爆反应,通过实验结果获取甲烷-氧气燃爆下峰值压力和升压速率 2 个特征参数,并基于实验燃爆压力曲线拟合出后续页岩储层压裂数值模拟中使用的加载曲线。

燃爆管道示意图如图 1 所示。燃爆管道长度为 3 m、内径为 100 mm,采用 PCB 压力传感器(型号 113B24,响应频率 500 kHz,量程 0~120 MPa,输出电压 0~5 V)记录测试段内爆炸波压力。传感器的测量头部采用耐高温胶带保护,以防测量出现负值压力。燃爆管测试段安装 6 个压力传感器,压力传感器间距为 14 cm。根据爆炸波到达相邻传感器的时间,可获得爆炸波的传播速度。采用道尔顿分压法配置预混气体,并在预混罐内静置 24 h,使气体充分混合。试验前,首先使用真空泵将整个燃爆管道抽真空至 -0.1 MPa,关闭真

空泵后打开进气阀门通道,使预混罐内气体进入燃爆管道内,通过电子压力表控制进气量来达到设定

的8个试验初始压力,分别为0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.2、2.4 MPa。

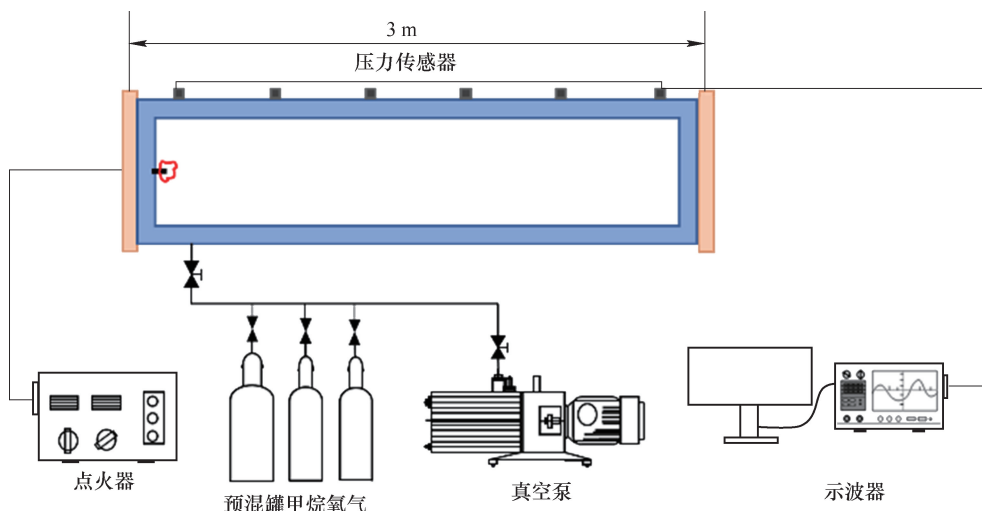


图1 燃爆管道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the explosion tube

1.2 试验结果与分析

图2为甲烷/氧气燃爆典型压力时程曲线,燃爆过程产生的高温、高压是造成传感器振荡的主要原因。

因素。由于末端反射等原因,取前3个传感器的测量值作为试验数据。

甲烷/氧气燃爆压力的平均值与初始压力拟合

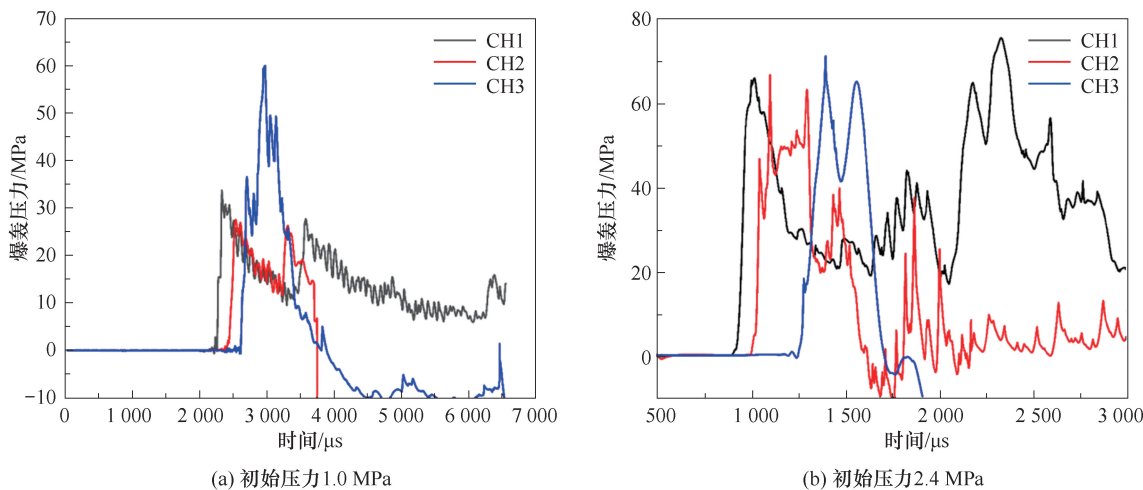


图2 甲烷/氧气燃爆典型压力时程曲线

Fig. 2 Typical pressure-time curve in methane/oxygen explosion

结果如图3(a)所示。可以看出,燃爆压力随着初始压力的升高逐渐增大,主要是由于初始压力的升高,增加了初始混合物的密度,进而导致前驱冲击波获得足够多的能量,从而产生燃爆压力。燃爆压力与初始压力呈现出明显的线性关系,拟合函数关系为: $y = 29p_0 + 0.36$ 。

甲烷/氧气燃爆压力与燃爆速度关系如图3(b)

所示,将测量的速度与CHEMKIN程序^[14]计算的CJ理论速度进行比较,结果表明,燃爆速度随着初始压力的增加而显著增加,实际测量的爆速接近CJ理论值。在初始压力为0.7 MPa时,其速度相对波动较大,但是所有测量的速度均在 $0.95 v_{CJ}$ 范围内,此时可以认为边界层效应不占据主导,对爆炸波的传播速度影响较小。

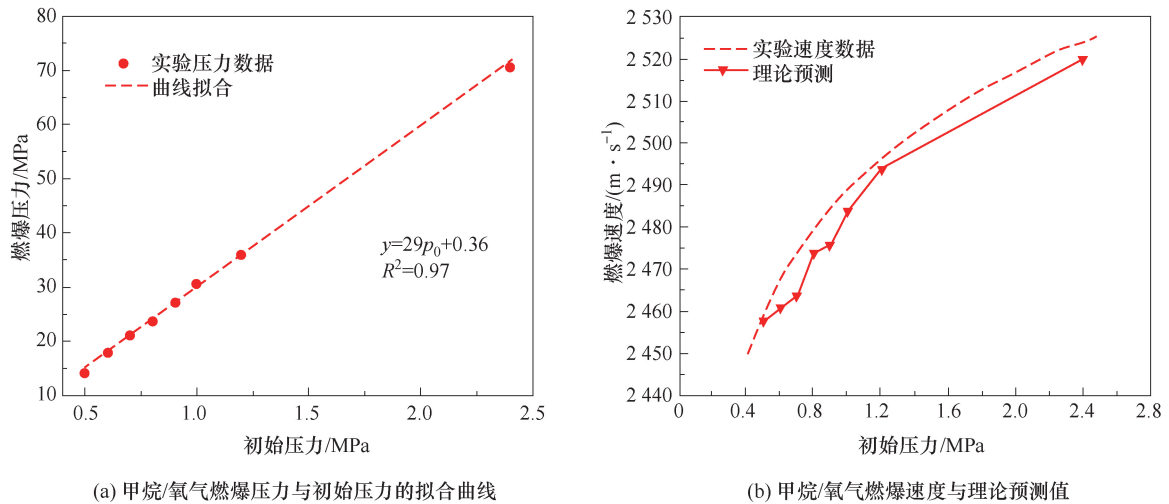


图3 甲烷/氧气燃爆压力与燃爆速度

Fig. 3 Explosion pressure and velocity in methane/oxygen explosion

峰值压力的上升时间取决于爆炸特性,图4(a)为典型的升压时间曲线,平均升压时间为85 μs。采用Jong压力时程曲线^[15]作为燃爆加载曲线,载荷曲线的表达式为

$$p_b(t) = 4p_b(e^{-\beta t/\sqrt{2}} - e^{-\sqrt{2}\beta t}) \quad (1)$$

$$\beta = -\sqrt{2}\ln(1/2)/t_r \quad (2)$$

式中, $p_b(t)$ 为炮孔壁面的压力; p_b 为峰值压力; t 为时间; β 为根据压力上升到峰值的时间确定的阻尼

因子; t_r 为峰值升压时间。

因此,选择爆炸载荷峰值有效值为100 MPa,升压时间为85 μs来保证结果的可靠性。根据观察到的周期 T ,解得相应的角频率 $\omega = 2\pi/T$,而角频率 $\omega = \frac{\beta}{\sqrt{2}}$ 。因此爆炸压力的持续时间为 $t_{db} = 2\frac{\sqrt{2}}{\beta}$ 。得到阻尼因子 β 为0.024,持续时间 $t_{db} = 773 \mu s$,燃爆压力加载曲线如图4(b)所示。

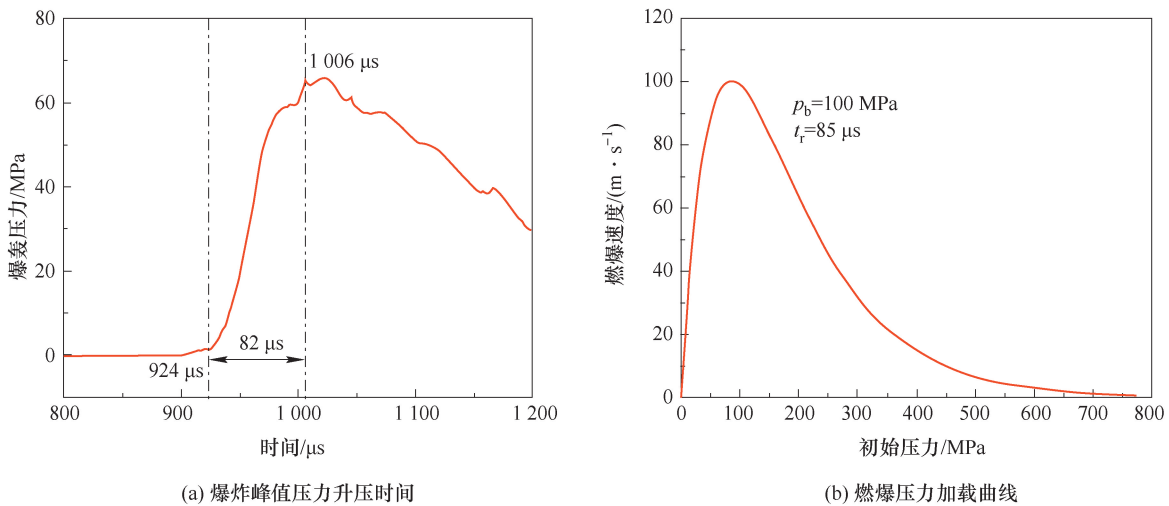


图4 甲烷/氧气燃爆升压时间与加载曲线

Fig. 4 Rise time and loading curve in methane/oxygen explosion

2 页岩储层应力波衰减规律

随着燃爆冲击载荷传播距离的增加,冲击波会逐渐衰减为应力波。应力波瞬时性及高峰值特性会有所衰减,波形相较于冲击波趋于平缓,上升时间明显短于下降时间,因此呈现衰减缓慢、作用时

间长、作用范围广的特点。岩石内应力波传播特征参数主要包括应力峰值 σ_{max} 、作用时间 t_s 、应力波比冲量 I_0 以及应力波比能 e_0 等。

应力峰值 σ_{max} 随传播距离的增加呈现明显减小的变化趋势,利用量纲分析得到岩石中爆炸应力峰值参数的一般变化规律。爆炸应力波峰值 X 是

爆炸能量 E 、传播距离 S 、岩石密度 ρ 以及岩石波速 c 的函数,即

$$X = f(E, r, \rho, c) \quad (3)$$

令无量纲量 $\pi_1 = S \left(\frac{\rho c^2}{E} \right)^{\frac{1}{3}}$, 则式(3)无量纲函数形式为 $\pi = f(\pi_1)$ 。

对于应力峰值 σ_{\max} , 令无量纲量 $\pi = \frac{\sigma_{\max}}{\rho c^2}$, 则可得

$$\frac{\sigma_{\max}}{\rho c^2} = f \left[S \left(\frac{\rho c^2}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (4)$$

分别定义无量纲应力峰值 σ^* 和距离 S^* 为

$$\sigma^* = \frac{\sigma_{\max}}{\rho c^2}$$

$$S^* = S \left(\frac{\rho c^2}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

参考相关研究成果^[16]可知,无量纲应力峰值 σ^* 和距离 S^* 之间存在近似指数型关系:

$$\sigma^* = a S^{*-b} \quad (6)$$

式中, a 为待定常数; b 为衰减系数。

由于 S^* 并非无量纲量, 因此需替换为真正的无量纲量, 假设比距离 $r^* = \frac{r}{r_b}$, 则无量纲量 σ^* 和 r^* 之间关系表示为

$$\sigma^* = a r^{*-b} \quad (7)$$

压力作用时间可由燃爆加载曲线特征决定, 即

$$t_s = t_{db} = \frac{2t_r}{-\ln \frac{1}{2}} \quad (8)$$

3 不同完井方式燃爆压裂数值模拟

3.1 岩石力学参数及验证

对采集于江西省九江市庐山的页岩进行基本力学参数测量, 其密度 $\rho = 2\ 625\ \text{kg/m}^3$, 单轴抗压强度 $f_c = 120\ \text{MPa}$, 弹性剪切模量 $G = 8.93\ \text{GPa}$, 岩石的波速 $c_p = 3\ 850\ \text{m/s}$ 。其他参数依据 RHT 本构模型部分参数计算确定^[17], 有些参数难以确定, 可以使用 RIEDEL 等^[18]在混凝土本构中采用的值。由于实际岩石为多孔材料, 采用均质材料建模难以避免误差, 这些参数仍需通过数值模拟结合试验进行调整。图 5 为试验与数值模拟结果对比, 可见试样的两端由于应力集中产生近似三角形破碎区, 在试样中心由于拉伸破坏产生沿着加载方向的损伤

裂纹, 造成试样断裂成两块。数值结果表明, RHT 本构模型可以准确地描述页岩在动态作用下的破坏行为, 并用于后续不同完井方式燃爆压裂数值模拟中, 具体页岩 RHT 本构参数见表 1。

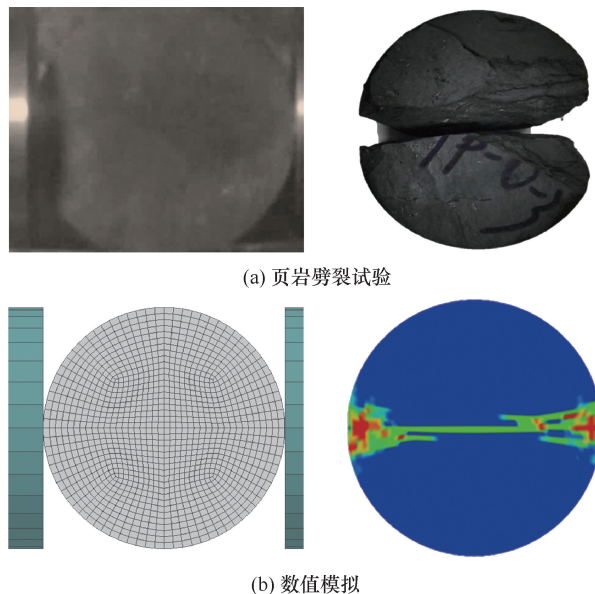


图 5 页岩巴西劈裂试验与数值模拟对比

Fig. 5 Comparison between Brazilian splitting test and numerical simulation of shale

表 1 页岩 RHT 本构参数

Table 1 RHT constitutive parameters of shale

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 625	A_1 / GPa	38.90	G_c^*	0.78
f_c / MPa	120	A_2 / GPa	65.37	G_t^*	0.53
G / GPa	8.93	A_3 / GPa	39.95	X_1	0.50
A	1.895	T_1 / GPa	38.90	D_1	0.04
N	0.558	$p_{\text{lock}} / \text{GPa}$	6.00	D_2	1.00
β_c	0.010 5	$p_{\text{crush}} / \text{MPa}$	80.00	A_f	1.62
β_t	0.014 3	B	0.010 5	N_f	0.60

3.2 裸眼完井燃爆压裂数值模拟

通过设置不同升压速率, 对比分析裸眼完井燃爆压裂页岩产生的裂缝条数以及燃爆压力的变化规律。假定甲烷/氧气发生瞬时爆炸, 不考虑沿待压裂长度方向的应力变化, 将模型简化为平面应变问题。采用三维实体单元将岩体划分为一层网格, 并对网格施加法向位移约束, 对周向网格施加无反射边界条件, 模拟中采用边长为 3 m 的方形岩体和半径为 0.05 m 的裸眼井(图 6)。设置 4 种工况进行数值模拟:

工况 1, 上升时间保持在 $85\ \mu\text{s}$ 恒定, 峰值压力 $p_0 = 50\ \text{MPa}$, 加载速率 $588\ \text{MPa/ms}$;

工况 2, 上升时间保持在 85 μs 恒定, 峰值压力 p_0 为 100 MPa, 加载速率 1 176 MPa/ms;

工况 3, 上升时间保持在 40 μs 恒定, 峰值压力 p_0 为 100 MPa, 加载速率 2.5 GPa/ms;

工况 4, 上升时间保持在 45.8 μs 恒定, 峰值压力 p_0 为 1 000 MPa, 加载速率 21.83 GPa/ms。

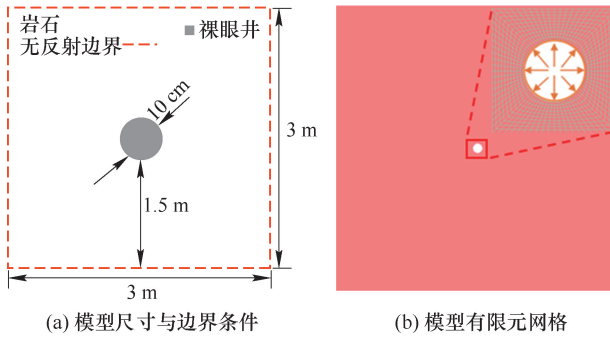


图 6 裸眼井几何模型与有限元模型

Fig. 6 Open-hole geometric model and finite element model

图 7 为不同加载速率下页岩损伤云图^[19]。可见, 当孔内加载速率为 588 MPa/s 时, 在孔周产生短粗裂纹; 随着爆炸压力的升高, 加载速率达到 1 176 MPa/s 时, 裂纹长度充分发育, 燃爆孔周边出现多条长裂纹。对于同一个升压时间, 爆炸压力的增加有利于裂纹的扩展延伸。当加载速率继续增加到 2.5 GPa/s 时, 孔周边出现多条短裂纹; 当燃爆加载速率达到爆炸速率 21.83 GPa/s 时, 虽然出现多条长裂纹, 但是燃爆孔周边出现大面积的损伤压实区域, 压实现象的出现将不利于页岩气的开

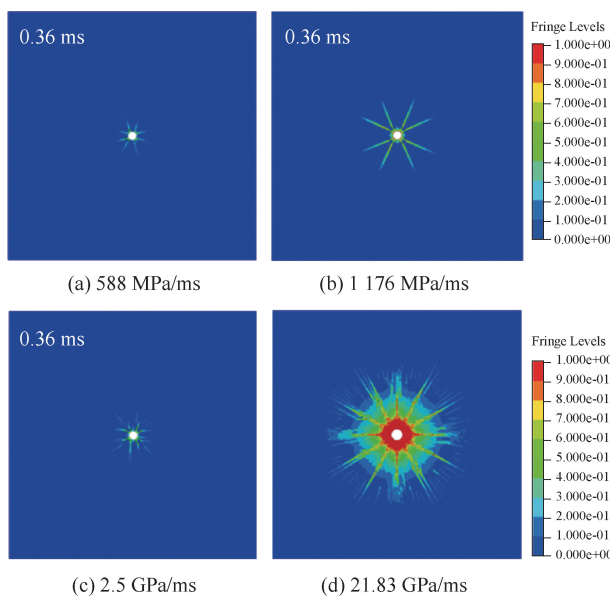


图 7 不同加载速率下页岩损伤云图

Fig. 7 Damage nephogram of shale under different loading rates

采。炸药爆炸作用时间一般认为是 1×10^{-6} s, 会在孔周形成非常大的破碎区, 能量也大幅度用于过度破碎岩石, 过度破碎极易在井周引起应力笼效应^[20], 虽然爆炸压力巨大, 但是压裂的效果不能够满足页岩气的实际开采过程。燃爆试验以及数值模拟结果表明, 甲烷/氧气在燃爆过程中的升压时间较爆炸产生的压力时间长, 压力易控、适中, 同时可以产生多条长裂缝, 有利于页岩气的开采。

不同载荷波形产生的损伤裂缝扩展形式明显不同, 工况 1~工况 3 在井周附近产生多个径向裂纹, 但没有产生过度的破碎区域; 工况 4 的加载速率与固体炸药相似, 爆炸在井周产生严重的破碎区。载荷加载速率与井周破坏模式之间的关系表明, 当加载速率过低时, 会产生少量且延伸较短的裂纹; 当加载速率过高时, 井周附近会形成破碎区和密集裂缝, 这与炸药爆炸破碎岩石相类似; 合适的加载速率不仅可以在井周形成多条裂缝, 并且能够有效延伸裂缝长度。产生多个裂纹所需的加载速率, 在半经验公式计算的范围内^[21], 即

$$\frac{P_0 c_p}{16 \pi D} < \dot{P} < \frac{P_0 c_p}{\pi D} \quad (9)$$

式中, \dot{P} 为爆炸加载速率; p_0 为爆炸峰值压力; c_p 为岩石中的波速; D 为燃爆孔直径。

根据式(9)计算, 甲烷与氧气的爆炸加载速率处于合适的范围, 即采用氧气与甲烷反应适用于在页岩中产生多条扩展裂缝。初始起裂的井周辐射状裂缝条数对于后续裂缝的发育以及延伸具有重要意义, Grady 公式^[22]可以预测爆炸产生的裂缝数量。径向裂纹数目表达式如下:

$$n = 2 \pi R \left(\frac{\rho \dot{\epsilon} c}{6 K_{IC}} \right)^{2/3} \quad (10)$$

式中, R 为燃爆孔半径; ρ 为岩石密度; c 为应力波速; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; K_{IC} 为 I 型断裂韧度。

应变率可以表示为^[23]

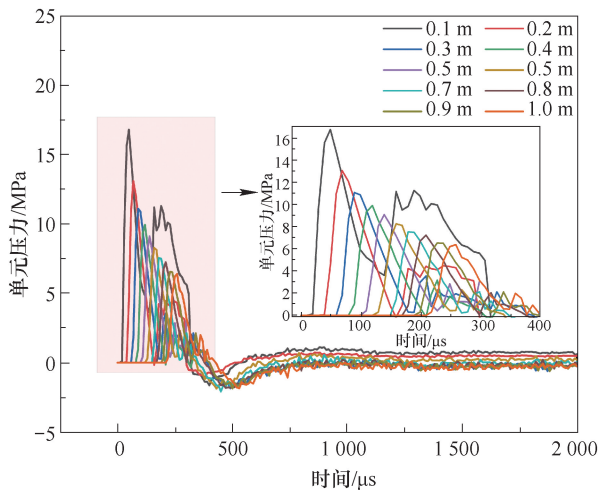
$$\dot{\epsilon} = \frac{P_{\max}}{E t_r} (1 + \nu) \quad (11)$$

式中, P_{\max} 为孔壁峰值压力; t_r 为对应于峰值压力上升时间; E 和 ν 分别为岩石的弹性模量和泊松比。

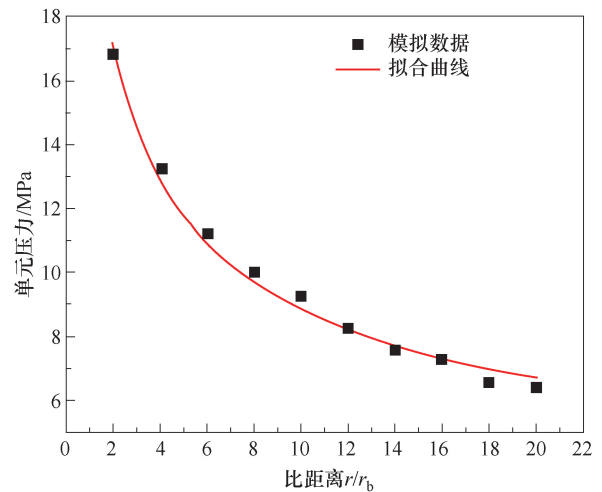
将工况 2、工况 3 的参数代入式(10), 断裂韧度 K_{IC} 取 $0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ^[24-25], Grady 公式理论计算的甲烷/助燃剂燃爆裂纹数目为 11 条裂缝, 数值模拟结果为 8 条裂缝, 与理论计算值存在一定差距。Grady 公式的预测结果高估了燃爆产生的裂缝数量, 这与其他学者的研究结果一致^[26]。

由于采用对称建模,通过提取岩石模型水平方向距离裸眼井中心孔圆心 0.1~1 m 内 10 个特征

单元上的压力时程曲线加以分析,探究甲烷燃爆载荷下页岩储层应力波传播衰减规律(图 8)。



(a) 压力-时间



(b) 峰值压力-比距离

图 8 特征单元压力时程曲线与压力衰减

Fig. 8 Pressure-time curve and pressure decay of characteristic element

由图 8(a)可知,压力时程曲线可以分为 2 个阶段。第 1 个阶段,岩石受到迅速增加的压力载荷作用,使得单元主要承受压应力作用;第 2 阶段单元由受压转变为受拉状态,随着应力波由孔周向外传播和衰减,拉伸力振荡一段时间后也逐渐消失。

以各特征单元峰值压力为纵坐标,以比距离为横坐标,绘制峰值压力随比距离的衰减图形,并将峰值压力与比距离关系进行拟合,如图 8(b)所示。结果表明峰值压力与比距离呈现指数衰减的关系:

$$\sigma_{\max} = 22.76 \left(\frac{r}{r_b} \right)^{-0.41} \quad (12)$$

其衰减系数为 0.41,衰减规律数学表达形式与理论模型一致。

3.3 套管完井燃爆压裂数值模拟

在实际页岩开采过程中,为了维持井壁稳定性,一般采用套管完井,井周的初始裂缝可以由射孔枪聚能射流侵入形成。在甲烷/气相助燃剂燃爆荷载的作用下,套管的存在势必会吸收掉一部分爆炸能量,导致作用于岩石上的燃爆压力产生衰减。因此建立射孔裸眼完井和射孔套管完井 2 种数值模型,通过加载甲烷/氧气的燃爆压力波形对其进行研究。套管采用描述金属大变形的 *MAT_JOHNSON_COOK 材料^[27],套管与页岩之间设置可分离的绑定接触,绑定强度为 1 MPa^[28]。完井几何与有限元模型如图 9 所示^[19]。

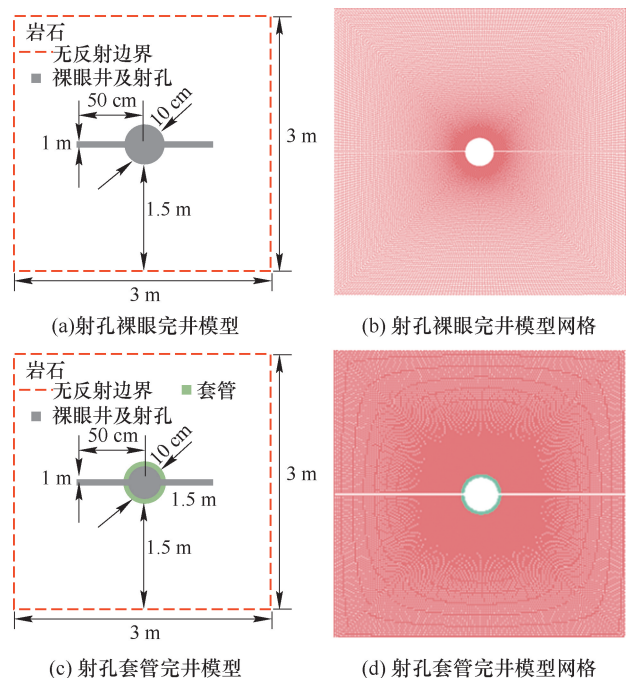


图 9 完井几何模型与有限元模型

Fig. 9 Geometric model and finite element model of cased hole

图 10(a)(b)为射孔裸眼完井在燃爆作用下的环向应力以及损伤云图^[19]。初始时刻,载荷作用在气体燃爆孔内壁面,在燃爆孔垂直方向出现比较大的环向应力集中,损伤云图也显示初始时刻燃爆孔周围出现损伤并沿着竖向方向发育,之后垂直方向的环向应力持续增大,同时裂缝也得到充分扩展。在初始裂缝方向,120 μs 时应力波传播到裂缝尖端,环向应力为压缩应力,裂缝

扩展受到抑制, 随着应力波的传播, 裂纹周边的环向应力变成了拉伸应力, 裂纹开始有所扩展; 随着裂纹的环向应力增加, 沿着裂缝方向的损

伤有所增加, 但是能量过多应用于井周产生损伤, 持续衰减的拉伸应力难以有效延伸裂缝长度。

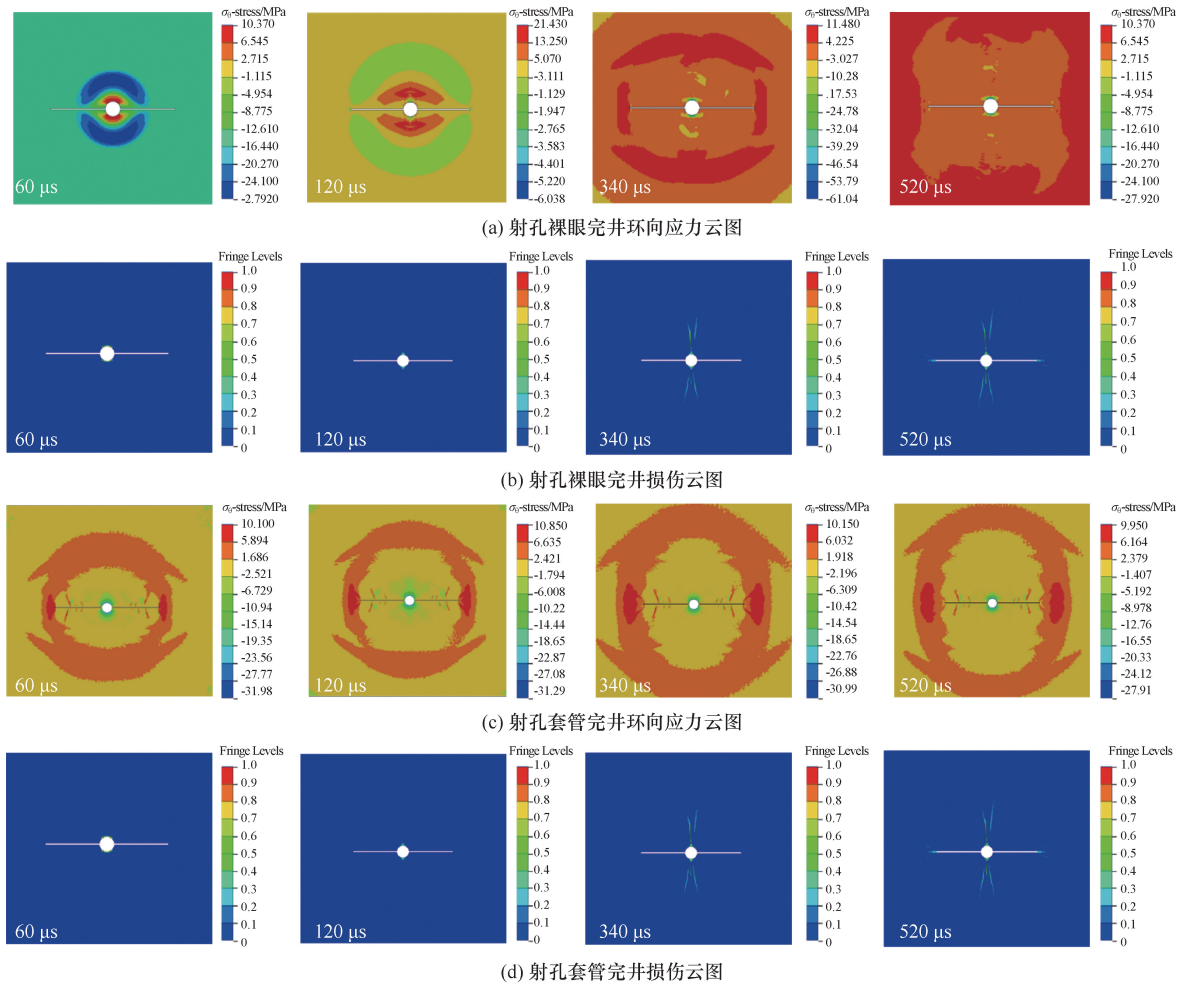


图 10 岩石环向应力与损伤云图

Fig. 10 Nephogram of circumferential stress and damage of rock

图 10(c) (d) 为射孔套管完井燃爆压裂岩石的环向应力和损伤云图^[19]。初始时载荷作用在气体燃爆孔套管内壁面, 应力波开始向外传播, 由于套管的存在吸收了一定的能量, 井壁附近的环向应力较小, 井壁未出现明显的损伤。从环向应力云图来看, 109 μs 时应力波传播到裂缝尖端, 裂缝壁面附近出现压缩应力, 裂纹发育受到抑制。随着压力波的继续传播, 环向应力为拉伸应力, 裂纹开始向外扩展。360 μs 左右裂缝尖端出现明显的拉应力集中区域, 沿着裂缝方向的损伤继续增加至 520 μs。与岩石-射孔模型的应力云图相对比, 套管-岩石-射孔模型在预制裂缝方向出现明显的拉应力集中现象, 而在垂直方向并未出现, 即套管的存在使井壁得到一定程度的保护, 裂纹最终的发育路径为一条直线。

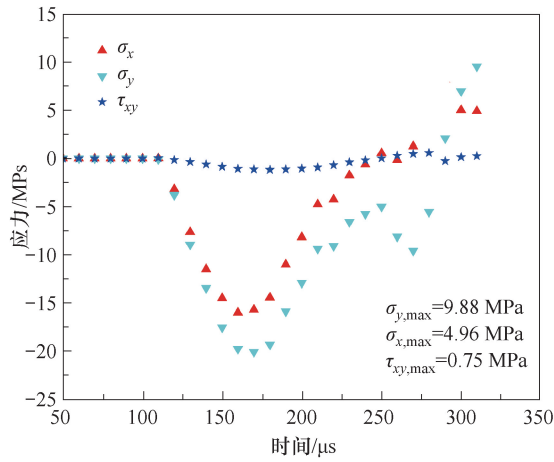
为了分析损伤裂纹在燃爆加载波下扩展过程

应力的变化情况, 选取裂纹萌生以及最终扩展位置特征单元的应力 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 进行分析, 如图 11、图 12 所示。从特征单元的应力时程曲线可以看到, 裂纹一开始受到压缩应力作用, 抑制了裂纹发育, 随后转变为拉伸应力。如图 11(a) 所示, 在套管预制裂纹扩展路径上, 应力 σ_y (9.88 MPa)、 σ_x (4.96 MPa) 起主要作用, 剪切应力 τ_{xy} (0.75 MPa) 对损伤裂纹扩展影响不大。

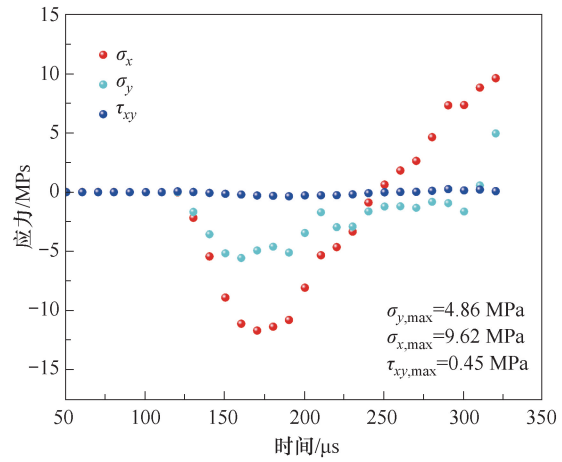
裂纹末端垂直方向单元环向应力时程曲线如图 13 所示。裂缝向外延伸扩展时动态应力减小, 切应力始终比主应力小 1 个数量级, 在损伤裂纹扩展过程中作用较小, 裂纹扩展模式为 I 型断裂, 扩展后的射孔长度较原来的长度增加了 47%。无套管预制裂纹扩展路径上的应力变化情况与套管变化趋势相一致。从应力时程曲线来看, 含套管岩石在预制裂缝方向的拉伸应力稍大于无套管岩石的

拉伸应力。这主要是因为套管吸收了部分能量阻碍井周裂纹发育,同时在切缝方向产生较大的拉伸

应力集中,产生与切缝药包类似的聚能爆炸效果^[29]。



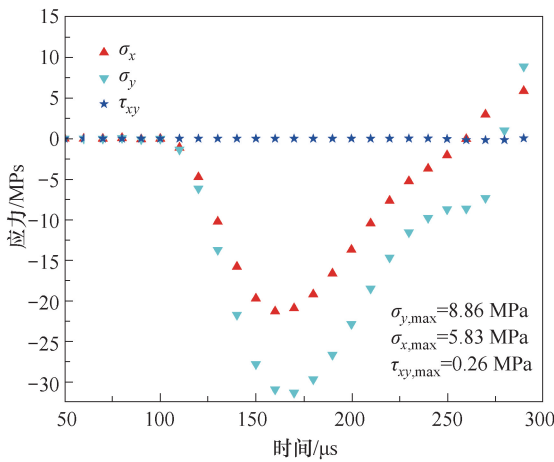
(a) 含套管裂纹尖端应力



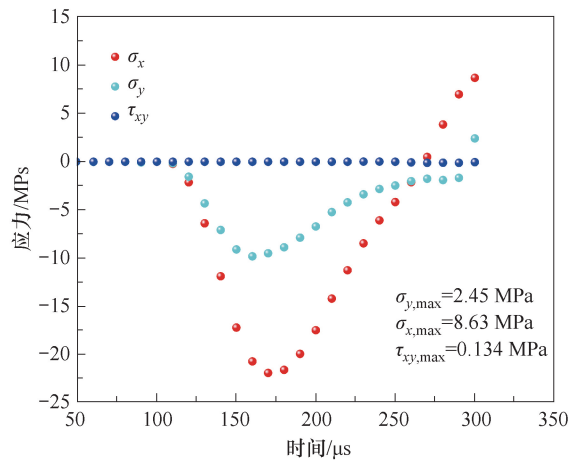
(b) 含套管裂纹末端应力

图 11 含套管特征单元应力

Fig. 11 Stress of characteristic element with casing



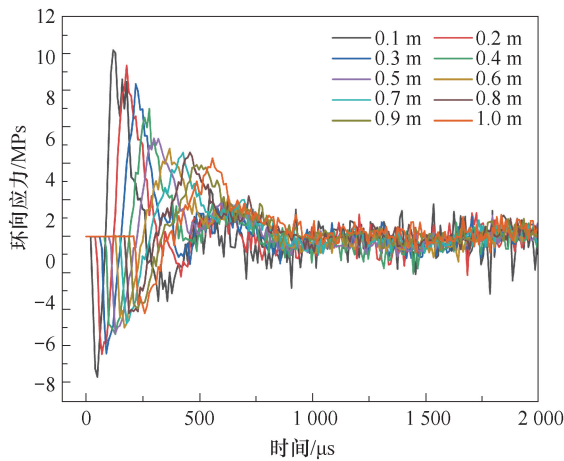
(a) 无套管裂纹尖端应力



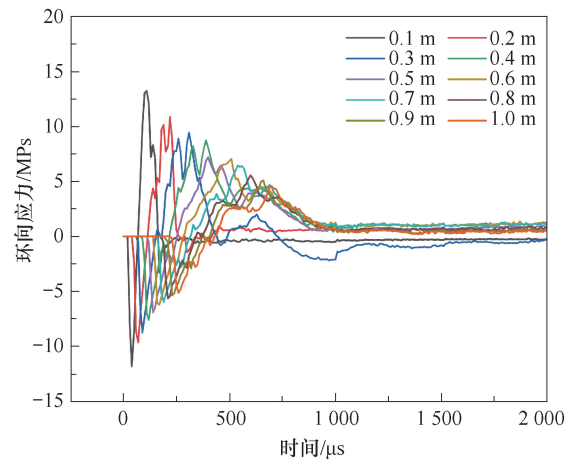
(b) 无套管裂纹末端应力

图 12 无套管特征单元应力

Fig. 12 Stress of characteristic element without casing



(a) 含套管环向应力



(b) 无套管环向应力

图 13 垂直方向单元环向应力时程曲线

Fig. 13 Circumferential stress variation of vertical elements

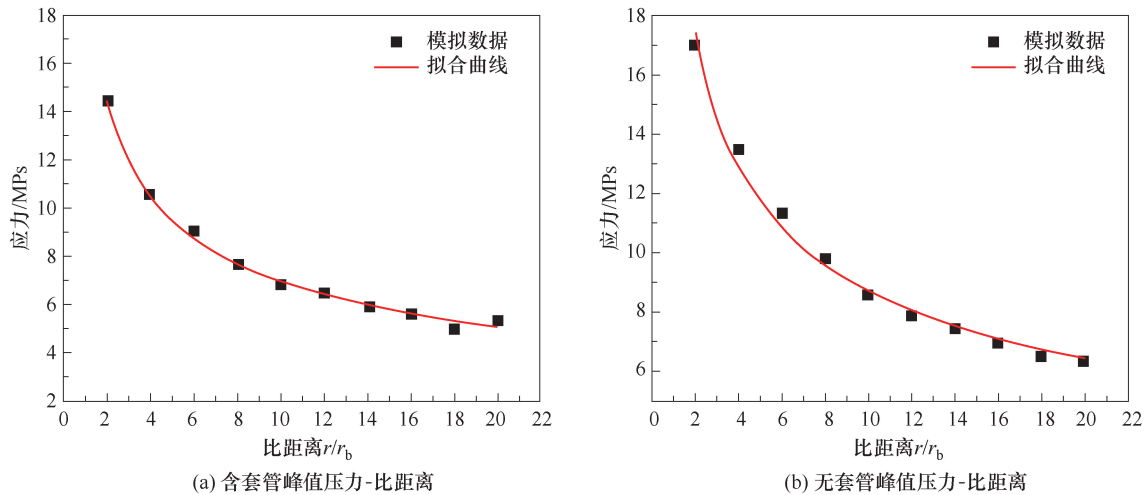


图 14 垂直方向单元峰值压力衰减变化

Fig. 14 Peak pressure decay law of element in the vertical direction

由图 14 可知,提取 2 种模型垂直方向间隔距离 10 cm 单元的压力进行拟合,射孔裸眼完井与射孔套管完井下,峰值压力与比距离都呈现指数衰减的关系,分别表示为

$$\begin{aligned}\sigma_{Lmax} &= 23.49 \left(\frac{r}{r_b}\right)^{-0.43} \\ \sigma_{Tmax} &= 19.84 \left(\frac{r}{r_b}\right)^{-0.45}\end{aligned}\quad (13)$$

无套管井壁周围的压力衰减与单孔燃爆衰减趋势相似,同一位置单元上的压力基本相同,由于套管的存在井壁周围的压力出现不同程度的下降,由三者拟合后的曲线指数可以发现,拟合的衰减系数基本在 0.45 左右,这与申涛^[30]的研究结果一致,即认为衰减系数与岩石自身性质相关。同时提取特征单元上的应力,整体变化趋势仍然为特征单元先受到压缩应力,随后转变为拉伸应力,在垂直方向由于套管变形吸收了能量,导致相应位置的拉应力出现下降,拉伸应力小于岩石的动态拉伸强度,井周裂缝难以得到扩展,井壁的完整性得到一定程度的防护。

4 结论

对甲烷与氧气进行燃爆试验获得了关键性参数,结合有限元软件进行了甲烷/氧气燃爆压裂页岩数值模拟,分析了燃爆压裂过程中页岩的损伤演化过程以及压力、应力衰减规律。

(1) 甲烷/氧气燃爆压力约为初始压力的 30 倍,燃爆速度与理论值相接近,表明边界层效应在高压下不占据主导作用,几乎不影响爆炸波速度。同时,峰值升压时间为 85 μs ,以此确定的燃爆加载

曲线参数阻尼因子 β 为 0.024,持续时间 $t_{db} = 773 \mu\text{s}$ 。

(2) 爆炸压力的增加有利于裂缝的扩展延伸,加载速率提高后,在燃爆孔周边可以形成多条短裂缝。当加载速率达到 1 176 MPa/s 时,裂缝长度得到充分发育,燃爆孔周边出现多条长裂纹,相较于传统的炸药爆炸,甲烷/氧气的燃爆过程压力持续较大,有利于页岩气的开采。

(3) 甲烷/氧气燃爆载荷下,峰值压力与比距离拟合关系呈现指数衰减,符合理论模型。裸眼完井、射孔裸眼完井、射孔套管完井条件下衰减拟合系数分别为 0.41、0.43、0.45。

(4) 套管的存在使得载荷首先作用于套管内壁面,井壁附近压力较小,未出现明显的损伤。套管完井在初始裂缝方向,拉应力出现明显的集中现象,裂纹沿着初始方向出现 I 型裂纹延伸,扩展后的射孔长度较原来的长度增加了 47%。

参考文献

- [1] 云箭,钟宁宁,王嘉麟,等. 低碳背景下促进我国页岩气产业化的对策研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(1): 64-70.
YUN Jian, ZHONG Ningning, WANG Jialin, et al. Measures to promote shale gas large-scale development under low-carbon background in China[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(1): 64-70.
- [2] 张瀚澎,任大忠,张荣军,等. 苏里格致密砂岩气藏流体微观分布规律及影响因素[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 744-757.

- ZHANG Hanpeng, REN Dazhong, ZHANG Rongjun, et al. Microscopic distribution of fluid in Sulige tight sandstone gas reservoir and its influencing factors [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(6): 744-757.
- [3] 罗宁, 柴亚博, 张浩浩, 等. 页岩储层原位解析甲烷高效利用及多级聚能燃爆压裂方法, ZL202310460288. X[P]. 2024-05-07.
- LUO Ning, CHAI Yabo, ZHANG Haohao, et al. In situ analysis of shale reservoirs and efficient utilization of methane and multi-stage focused energy combustion and fracturing methods, ZL202310460288. X[P]. 2024-05-07.
- [4] 翟成, 王宇, 刘厅, 等. 不同燃爆载荷作用下页岩破裂特性及孔隙结构改性规律 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4269-4283.
- 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 China Coal Society*, 2023, 48(12): 4269-4283.
- [5] 柴亚博, 罗宁, 张浩浩, 等. 甲烷燃爆载荷下页岩裂缝网络发育特征与定量分析 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4308-4321.
- CHAI Yabo, LUO Ning, ZHANG Haohao, et al. Development characteristics and quantitative analysis of shale fracture network under methane explosion load [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4308-4321.
- [6] 于慧, 崔振东, 丁航航, 等. 基于二维裂缝扩展的二氧化碳注入砂岩透镜体封存模拟 [J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(6): 601-607.
- YU Hui, CUI Zhendong, DING Hanghang, et al. Simulation of CO₂ injection into sandstone lens sealing based on 2D crack expansion [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 5(6): 601-607.
- [7] 俞海玲. 高压气体预裂爆轰作用致裂煤岩机理及应用研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- YU Hailing. Study on mechanism and application of coal and rock cracking caused by presplitting detonation of high pressure gas [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [8] 吴飞鹏, 赵志强, 薛海洁, 等. 甲烷燃爆压裂冲击下页岩动态破裂响应规律实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4284-4296.
- WU Feipeng, ZHAO Zhiqiang, XUE Haijie, et al. Experimental study on the dynamic fracture response law of shale under the impact of methane combustion fracturing [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4284-4296.
- [9] HU G Z, HE W R, SUN M. Enhancing coal seam gas using liquid CO₂ phase-transition blasting with cross-measure borehole [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 60: 164-173.
- [10] 杨立云, 董鹏翔, 王启睿, 等. 爆生气体驱动双共线 I 型裂纹的扩展行为 [J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(4): 538-547.
- YANG Liyun, DONG Pengxiang, WANG Qirui, et al. Propagation behavior of two collinear mode I cracks driven by explosive gas [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(4): 538-547.
- [11] DEGHAN BANADAKI M M, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 40: 16-25.
- [12] MA G W, AN X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(6): 966-975.
- [13] 聂百胜, 宫婕, 王晓彤, 等. 深部流态化开采中原位煤粉爆轰发电技术构想 [J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(3): 271-279.
- NIE Baisheng, GONG Jie, WANG Xiaotong, et al. Technological conception of in situ pulverized coal combustion and explosion power generation based on the deep fluidization mining [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(3): 271-279.
- [14] ZHANG B, SHEN X B, PANG L, et al. Detonation velocity deficits of H₂/O₂/Ar mixture in round tube and annular channels [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(43): 15078-15087.
- [15] YILMAZ O, UNLU T. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 266-278.
- [16] 高矗, 孔祥振, 方秦, 等. 混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(12): 68-80.
- GAO Chu, KONG Xiangzhen, FANG Qin, et al. Numerical study on attenuation of stress wave in concrete subjected to explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(12): 68-80.
- [17] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in situ stresses [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 66: 19-33.
- [18] RIEDEL W, KAWAI N, KONDO K I. Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(2): 283-293.

- [19] 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. Study on combustion and explosion characteristics of methane/gas combustion improver and its mechanism of shale cracking by combustion and explosion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [20] 谢燮. 低渗油田“层内爆炸”增产技术的小尺度模拟实验研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2000.
XIE Xie. Small-scale simulation experimental study on stimulation technology of “in-layer explosion” in low permeability oilfield [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [21] CUDERMAN J F, NORTHROP D A. A propellant-based technology for multiple-fracturing wellbores to enhance gas recovery: application and results in Devonian shale[J]. SPE Production Engineering, 1986, 1(2): 97-103.
- [22] GRADY D E. Fragmentation of solids under impulsive stress loading[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1981, 86(B2): 1047-1054.
- [23] BONORA N, RUGGIERO A, TESTA G, et al. Dynamic Crack Tip Opening Displacement (DCTOD) as governing parameters for material fragmentation [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 500(11): 112009.
- [24] 李成孝, 张渊通, 安晨. 单侧开半圆孔 PMMA 试件 I 型和 I-II 混合型裂纹动态扩展及数值模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(5): 490-501.
LI Chengxiao, ZHANG Yuantong, AN Chen. Study on the dynamic propagation and numerical simulation of mode I and mixed mode I-II cracks in PMMA specimens with unilateral semicircular holes[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(5): 490-501.
- [25] 李德建, 祁浩, 李春晓, 等. 含层理面煤试样的巴西圆盘劈裂实验及数值模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(2): 150-159.
LI Dejian, QI Hao, LI Chunxiao, et al. Brazilian disc splitting tests and numerical simulations on coal samples containing bedding planes[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(2): 150-159.
- [26] HAJIBAGHERPOUR A R, MANSOURI H, BAHAAAD-DINI M. Numerical modeling of the fractured zones around a blasthole [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103535.
- [27] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
SHI Dangyong, LI Yuchun, ZHANG Shengmin. Explicit dynamic analysis based on ANSYS/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [28] 郭慧娟, 罗淮东, 王红艳, 等. 金属丝电爆炸冲击波对水泥环完整性的影响[J]. 石油机械, 2020, 48(1): 33-39.
GUO Huijuan, LUO Huaidong, WANG Hongyan, et al. Effect of shock waves generated by wires electrical exploding on the cement sheath integrity[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1): 33-39.
- [29] YANG R S, WANG Y B, XUE H J, et al. Dynamic behavior analysis of perforated crack propagation in two-hole blasting[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2012, 5: 254-261.
- [30] 申涛. 切缝药包岩石定向断裂控制爆破机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
SHEN Tao. Study on controlled blasting mechanism of directional fracture of rock with slotted charge [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

(责任编辑:陈骏)