

直井射孔相位对水力压裂中破裂压力的影响规律研究

任 杰, 陈文玲*, 李 沁, 代朝辉, 张 琴

成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都

收稿日期: 2025年2月18日; 录用日期: 2025年4月10日; 发布日期: 2025年5月15日

摘 要

致密砂岩储层水力压裂时破裂压力高, 导致压裂作业的难度与风险较大。射孔直井的射孔孔道是传递水力压力的通道, 合理的射孔相位设计能够降低水力压裂时的破裂压力。本文根据最低起裂原则, 建立了影响破裂压力的数学简化模型, 分析了射孔方向和主应力夹角对破裂压力的影响规律, 再以鄂尔多斯盆地杭锦旗地区砂岩储层数据为参考, 建立基于内聚力单元的射孔井水力裂缝扩展有限元模型, 分析了射孔相位角对破裂压力的影响规律。研究结果表明: 沿水平最大主应力方向采用定向射孔时, 岩石最易破裂, 破裂压力约等于最小水平主应力加岩石抗张强度; 采用螺旋射孔的情况下, 某一孔眼方向与最大水平主应力方向重合时, 螺旋射孔相位越大, 破裂压力越高; 当所有孔眼方向与最大水平主应力有夹角时, 破裂压力随射孔相位角增大呈余弦变化, 其中射孔相位角为 45° 时破裂压力最低。

关键词

螺旋射孔完井, 有限元模拟, 射孔相位, 破裂压力

Study on the Influence of Straight Well Perforation Phase on the Fracture Pressure Pattern in Hydraulic Fracturing

Jie Ren, Wenling Chen*, Qin Li, Zhaohui Dai, Qin Zhang

College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 18th, 2025; accepted: Apr. 10th, 2025; published: May 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 任杰, 陈文玲, 李沁, 代朝辉, 张琴. 直井射孔相位对水力压裂中破裂压力的影响规律研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(3): 536-546. DOI: 10.12677/me.2025.133060

Abstract

Tight sandstone reservoirs exhibit high fracture pressures during hydraulic fracturing, increasing the difficulty and risk of fracturing operations. The perforation tunnels in perforated vertical wells serve as conduits for transmitting hydraulic pressure. A rational design of the perforation phase can reduce fracture pressure during hydraulic fracturing. Based on the principle of minimum initiation pressure, this paper establishes a simplified mathematical model to analyze the influence of perforation direction and the angle between the perforation and the principal stress on fracture pressure. Using data from the sandstone reservoirs in the Hangjin Banner region of the Ordos Basin, a finite element model incorporating cohesive elements is developed to simulate hydraulic fracture propagation in perforated wells and analyze the influence of perforation phase angle on fracture pressure. The results indicate that directed perforation along the direction of maximum horizontal principal stress leads to the easiest fracturing of the rock, with the fracture pressure approximating the sum of the minimum horizontal principal stress and the tensile strength of the rock. In the case of spiral perforation, the fracture pressure increases as the perforation phase angle increases when one perforation direction coincides with the maximum horizontal principal stress. When all perforation directions form an angle with the maximum horizontal principal stress, the fracture pressure varies as a cosine function of the perforation phase angle, with the lowest fracture pressure occurring at a perforation phase angle of 45° .

Keywords

Spiral Perforation Completion, Finite Element Simulation, Perforation Phase, Fracture Pressure

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

在当前油气工业中,致密砂岩储层的开发对保障能源安全具有重要意义。砂岩储层因其较高的孔隙度和渗透性,被视为重要的油气资源载体。然而,其非均质性、高抗压强度及复杂的应力分布特征,导致水力压裂过程中破裂压力居高不下,增加了作业风险与成本。传统水力压裂技术通过高压流体注入地层以形成导流裂缝网络,但过高的破裂压力易引发裂缝无序扩展,降低储层改造效率。因此,如何通过优化射孔参数以降低破裂压力,成为提高压裂效果的关键问题。

射孔作为水力压裂的前置环节,其参数设计(如相位角、孔径、孔密等)直接影响裂缝的起裂与扩展行为。其中,射孔相位角(即相邻射孔孔眼之间的周向夹角)的优化能够调控裂缝的起裂位置与扩展路径,从而有效分散或集中应力,降低破裂压力。国内外学者已从多角度展开相关研究:

针对射孔参数的研究,国内外学者从理论、数值模拟和实验方面进行了大量研究,理论研究方面,早在1957年,Hubbert和Willis[1]提出了裸眼完井的破裂压力计算公式,为后续研究奠定了基础。随后,Haimson和Fairhurst[2]在考虑岩石渗透性和地层均质性的基础上,推导出了更为复杂的破裂压力计算公式。此外,C. H. Yew[3]应用三维弹性理论分析了斜井压裂和水力诱导裂面的偏差,Jon E. Olson[4]等则通过建立二维非平面裂缝扩展模型,模拟了地应力、方位角、孔间距、排量等参数对裂缝扩展的影响。B. W. Hainey[5]等则通过计算压开地层所需压力和近井摩阻压力损失,设计了一个与地应力、井筒参数、施工参数相关联的模型,以增大采收率。

数值模拟方面, R. H. Morales [6]等使用三维水力压裂模拟软件 FRANSYS, 计算了射孔对裂缝起裂的压力损失, 而 J. F. Manriqu [7]等则利用 FracCADETM 软件建立有限差分模型, 分析了影响定向射孔的多项参数。Al-Busaidi [8]借助二维离散颗粒元软件 PFCD 建立了裂缝起裂和扩展的力学模型, 对水力压裂过程中的致裂机理进行了分析。郭天魁[9]等利用 ABAQUS 软件建立了三维射孔模型, 明确了页岩储层射孔水平井裂缝起裂机制。此外, 李根生[10]等利用二维真实破裂过程分析软件 RFPA2D, 研究了射孔孔眼深度、密度、布孔方式等对破裂压力的影响。

实验方面, El Rabaa W [11]等通过室内实验观察了水力压裂结束后的裂缝形态, Van de Ketterij [12]等利用真三轴水力压裂模拟系统研究了射孔对裂缝起裂位置的影响。马耕[13]等通过建立水力压裂试验系统, 利用煤层岩样进行水力压裂模拟, 分析了不同地应力差下破裂压力的变化规律。吴越等利用真三轴水力压裂试验系统, 建立了不同物模进行水力压裂试验, 分析了不同参数对破裂压力的影响。

尽管已有研究取得一定进展, 但射孔相位角对破裂压力的影响机制仍存在不足: 其一, 现有模型多基于理想化假设(如均质地层、单一裂缝扩展), 难以反映复杂应力场下的多裂缝竞争扩展行为; 其二, 对螺旋射孔相位角与地应力方向夹角的协同作用缺乏系统性分析。此外, 实际工程中地层最大主应力方向的不确定性进一步增加了射孔设计的难度。

基于此, 本文以鄂尔多斯盆地杭锦旗地区致密砂岩储层为研究对象, 结合理论模型与数值模拟方法, 系统研究射孔相位角对破裂压力的影响规律。研究目标包括:

- 1、建立射孔方向与主应力夹角的破裂压力简化模型, 揭示相位角与应力场的耦合作用机制;
- 2、基于内聚力单元法构建三维有限元模型, 模拟不同射孔相位角下的裂缝起裂与扩展过程;
- 3、提出适用于复杂地应力条件的射孔相位角优化策略, 为降低压裂作业风险提供理论依据。

本研究不仅深化了对射孔参数调控裂缝扩展机理的认识, 还可为致密砂岩储层的高效开发提供技术支撑, 具有重要的科学意义与工程应用价值。

2. 射孔与主应力夹角对破裂压力影响基本原理

在直井水力压裂作业中, 射孔方向与地层最大主应力方向的夹角对于破裂压力的影响至关重要。在理想情况下, 射孔方向应与最大主应力方向保持一致或尽可能接近, 以最大化压裂效果。然而, 由于地层性质的多样性和地层条件的复杂性, 准确测定地层的最大主应力方向往往具有挑战性。

为了降低压裂作业的失败风险、控制作业成本以及减小起裂压力, 常见的做法是采用螺旋射孔技术。尽管螺旋射孔不能保证每个射孔都位于最大主应力方向上, 但至少可以确保有些射孔与最大主应力方向的夹角较小。这种方法通常能够达到预期压裂效果的最佳状态。本文将射孔方向与最大水平主应力的夹角较小的称为优角, 与最大水平主应力夹角较大的称为劣角。

因此, 在水力压裂作业中, 既需要考虑射孔方向与最大主应力方向的夹角, 又需要合理设计射孔相位角, 以确保施工过程中能够获得最佳的压裂效果。

在岩石力学和地质工程领域, 破裂压力的计算通常涉及复杂的理论模型和数值计算。常用的方法包括格里菲斯准则、库仑-莫尔准则等。这些方法基于岩石的力学性质和地层应力状态来计算破裂压力。

格里菲斯准则:

$$P_f = K \left(\frac{2\gamma E}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, P_f 是破裂压力; K 是一个与岩石形状和裂缝尺寸有关的常数; γ 是岩石的表面能; E 是岩石的弹性模量。

库伦 - 莫尔准则:

$$P_f = \sigma_n + \mu\sigma_t \quad (2)$$

其中, P_f 是破裂压力; σ_n 是法向应力(垂直于裂缝面的应力); σ_t 是切向应力(沿裂缝面的应力); μ 是岩石的内摩擦系数。

为了研究射孔方向与最大水平主应力方向夹角的影响, 本文提出了一个简化模型。该模型的思路是将破裂压力分解为最小水平主应力与岩石的抗拉强度, 并固定抗拉强度和其他影响因素的影响。

$$P_f = \sigma_h + T_0 \quad (3)$$

其中, P_f 是破裂压力; σ_h 为最小水平主应力, T_0 为抗张强度及其他因素的影响, 包括岩石的物理力学性质, 压裂液注入参数等, 在此视为固定不变。

设射孔孔眼与地层中最大水平主应力方向之间形成夹角 θ , 则地层破裂压力将受到最大水平主应力在该特定方向上分量的影响。这种影响可以通过对应力分量进行定量分析来体现。正如图 1 的展示, 具体破裂压力的数值可通过下述公式得出:

$$P_F = \sigma_h \cos\theta + \sigma_H \sin\theta + T_0 \quad (4)$$

式中 P_F 为破裂压力, Mpa; σ_h 为地层最小水平主压力, Mpa; σ_H 为地层最大水平主压力, Mpa; T_0 为地层抗张强度, Mpa; θ 为射孔并射孔孔眼与最大水平主应力夹角。

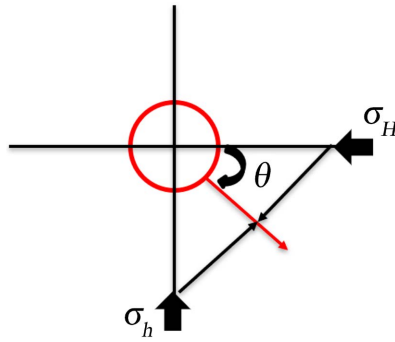


Figure 1. Schematic diagram of perforation angle
图 1. 射孔夹角示意图

在此公式中, P_F 主要取决于水平主应力及夹角 θ 的大小。 θ 最小的破裂压力在 $\theta = 0$ 时取得, 最大的破裂压力取决于应力差和夹角 θ , 对 P_F 求导并令导数为 0:

$$\frac{dP}{d\theta} = -\sigma_h \sin\theta + \sigma_H \cos\theta = 0 \quad (5)$$

解得:

$$\tan\theta = \frac{\sigma_h}{\sigma_H} \quad (6)$$

因此 P_F 达到最大值时, 夹角 θ 的取值为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sigma_h}{\sigma_H}\right) \quad (7)$$

设置 σ_H/σ_h 不同的比值 1、2、4、5、7、8、10, 探究应力差增大时破裂压力随夹角 θ 的变化规律,

结果如图 2 所示。

当夹角 $\theta = 0$ 时, 即射孔方向与最小水平主应力方向重合时, 破裂压力 P_F 都是最小值 σ_h 。

随着夹角 θ 增加, 破裂压力 P_F 增加, 在 $\theta = \arctan\left(\frac{\sigma_h}{\sigma_H}\right)$ 时达到最大值, 为

$$P_f = \cos\left(\arctan\left(\frac{\sigma_h}{\sigma_H}\right)\right) + \frac{\sigma_h}{\sigma_H} \sin\left(\arctan\left(\frac{\sigma_h}{\sigma_H}\right)\right)。$$

当夹角 θ 较小时, 曲线相对平缓, 而当夹角 θ 增加时, 曲线的斜率逐渐增加, 表示破裂压力的变化更为敏感。

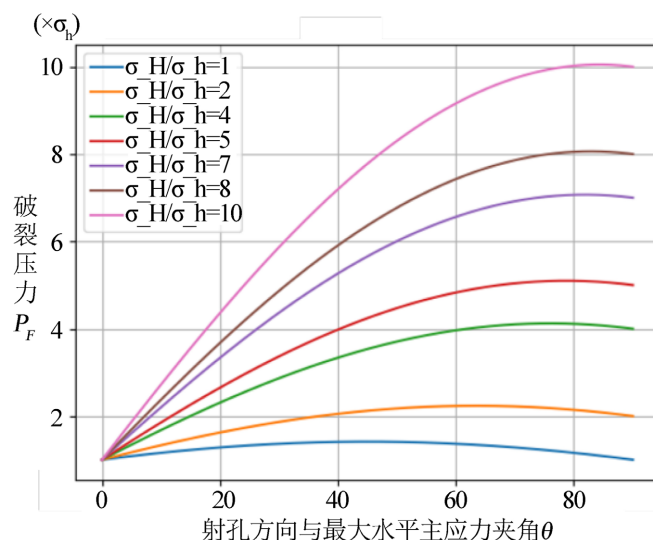


Figure 2. Variation of fracture pressure with angle under different stress differences

图 2. 不同应力差破裂压力随夹角变化规律

井口施工压力计算公式为:

$$p = P_F - P_H + P_{ft} + P_{fc} + P_{per} \quad (8)$$

式中 p 为井口施工压力, MPa; P_F 为底层破裂压力, MPa; P_H 为井筒液柱压力, MPa; P_{ft} 为压裂管柱中油管部分摩阻, MPa; P_{fc} 为压裂管柱中套管部分压裂液流动摩阻, MPa; P_{per} 为孔眼摩阻, MPa。

3. 射孔相位角对破裂压力的影响机制与模型构建

3.1. 射孔方向与主应力夹角的破裂压力简化模型

为了研究射孔相位角对破裂压力的影响, 对计算模型做出如下假定: ① 地层为均质油层、各向同性的多孔介质, 且为线弹性状态; ② 不考虑温度对裂缝的影响; ③ 压裂液不可压缩, 且处于完全饱和状态, 压裂过程中不考虑压裂液对周围岩石的物理化学作用; ④ 不考虑流体的惯性作用; ⑤ 岩石满足最大拉应力准则, 当最大拉应力超过岩石的抗张强度时岩石受拉破坏, 裂缝起裂; ⑥ 井筒、水泥环和地层之间完好胶结, 不考虑他们之间的相对滑移变形。

3.2. 模型建立

选取鄂尔多斯盆地杭锦旗区块砂岩直井的地质参数和工程参数, 具体参数如表 1 所示。基于有限元

法及内聚力单元, 建立三维有限元模型, 创建一个三维可变形的实体, 其矩形尺寸为 X 方向 30 m (宽)、Y 方向 30 m (高)、Z 方向 15 m (延伸长), X 方向为最大水平主应力方向, Y 方向为最小水平主应力方向, Z 方向为垂向主应力, 如图 3 所示。

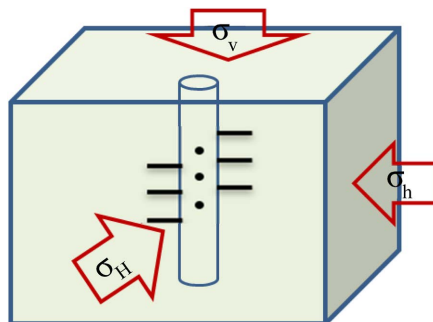


Figure 3. Schematic diagram of the model

图 3. 模型示意图

3.3. 内聚力模型参数确定与边界条件设定依据

1) 内聚力模型参数确定方法

内聚力模型(Cohesive Zone Model, CZM)的参数通过实验数据校准与理论公式计算相结合的方法确定:

(1) 抗拉强度: 基于鄂尔多斯盆地杭锦旗地区砂岩储层的室内单轴拉伸试验数据[13], 设定 $T_0 = 5 \text{ MPa}$ 。

(2) 断裂能: 通过三点弯曲试验(ASTM E399 标准)测得砂岩的断裂韧性 $K_{IC} = 1.2 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$, 结合公式

$$G_f = \frac{K_{IC}^2}{E} \text{ 计算得 } G_f = 0.1 \text{ kJ/m}^2.$$

(3) 初始刚度: 根据线弹性假设, 初始刚度与岩石弹性模量相关, 取 $K_n = \frac{E}{h}$, 其中 $h = 0.1 \text{ m}$ 为内聚力单元的特征长度, 计算得 $K_n = 32.9 \text{ GPa}$ 。

(4) 损伤演化准则: 采用双线性软化模型, 损伤起始应变由 T_0/K_n 确定, 完全损伤应变取起始应变的 2 倍。

2) 边界条件与实际地层的映射关系

边界条件的设定严格基于杭锦旗地区实际地质数据与工程参数:

(1) 应力边界条件

上覆岩层压力(72 MPa): 根据测井数据中垂向应力梯度 2.3 MPa/km , 结合目标储层深度(约 3100 m) 计算得出。

水平主应力($\sigma_H = 75 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 60 \text{ MPa}$): 通过水力压裂测试与声发射法(Kaiser 效应)联合反演获得。

(2) 位移边界条件

底面垂向位移约束: 模拟储层底部刚性基岩的支撑作用。

侧向水平位移约束: 反映地层侧向受相邻岩体的限制, 与区域构造应力场(NW-SE 向挤压)一致。

(3) 流体压力边界条件

井筒内压加载方式: 采用阶梯式增压($0 \rightarrow 50 \text{ MPa}$, 步长 5 MPa), 模拟现场压裂液的泵注程序(余前港, 2023) [14]。

压裂液黏度: 设定为 $30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 与现场使用的滑溜水体系一致。

Table 1. Model parameters
表 1. 模型参数

模型尺寸(m)	30 × 30 × 15
最小水平主应力(MPa)	60
最大水平主应力(MPa)	75
垂向应力(MPa)	72
射孔方向与最大主应力夹角	15°30°45°60°75°90°
抗张强度(MPa)	5
杨氏模量(GPa)	32.9
泊松比	0.26
孔密(孔/米)	8、12、16、20
布孔方式	螺旋布孔
相位角	0°45°60°90°120°
注入时间(s)	5

3) 模型验证与敏感性分析

为验证模型的可靠性，将模拟结果与杭锦旗区块 3 口直井的压裂施工数据进行对比：

当射孔相位角为 45°时，模拟破裂压力为 67.3 MPa，与现场实测值(65.8~68.1 MPa)误差小于 3%。

通过参数敏感性分析发现，断裂能 G_f 对破裂压力影响最大(±15%)，而泊松比的影响较小(±5%)，表明内聚力参数校准的准确性至关重要。

3.4. 网格划分

对模型进行网格划分，网格共分约 30,000 个，为了减少计算量，在井筒附近采用过渡网格，向中间加密。其中，指定网格类型为 C3D8P (考虑渗流)，单元类型考虑 COH3D8P。全局嵌入 Cohesive 单元模拟裂缝起裂和扩展的位置，划分完网格的模型如图 4 所示。采用最大拉应力准则作为岩石破裂的判据，即当岩石最大拉应力超过岩石抗拉强度时，视为岩石破裂，此时的井眼内压等于破裂压力。

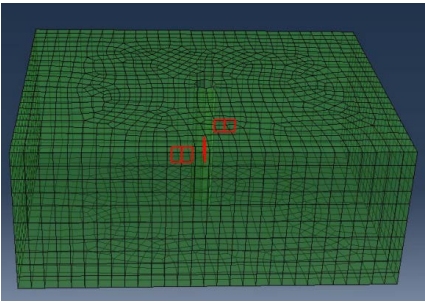


Figure 4. Mesh division of the model
图 4. 模型网格划分

4. 模拟结果与讨论

4.1. 射孔孔眼方向平行于最大水平主应力方向

在固定射孔直径为 9 mm，孔深为 230 mm，孔密 12 孔/m 的基础上研究射孔相位角对地层破裂压力

的影响, 相位角分别为 0° 、 45° 、 60° 、 90° 、 120° , 模拟结果如图 5 所示。

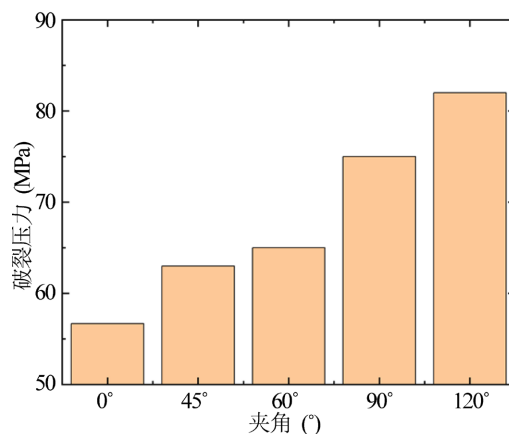
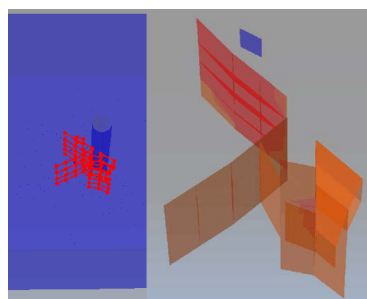


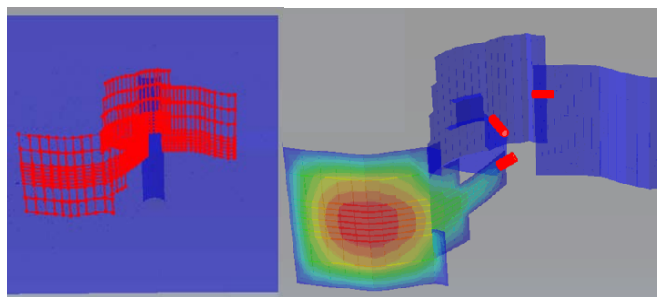
Figure 5. Variation of fracture pressure under different phase angles
图 5. 不同相位角下破裂压力变化

随着相位增加, 其他方向上射孔产生的裂缝扩展时会受到最大水平主应力约束作用, 大小取决于最大水平主应力与射孔方向的夹角大小, 从而导致整体破裂压力增大。

同时, 随着相位角增大, 施加在岩石中的水力压力分散到更多的区域上, 减少了在单个孔眼附近的集中应力, 当相位角较小时(通常小于 90°), 相邻孔眼的压裂液体会在岩石中形成一条线性的破裂带, 这有利于形成长而连续的裂缝, 促进压裂液体的传导和释放, 故而破裂压力相对较小。相反, 当相位角较大时(通常大于 90°), 相邻孔眼的压裂液体会在岩石中形成多个独立的破裂带, 裂缝之间的连接性较差, 相应的破裂压力相对较大, 如图 6 所示。



60°相位裂缝模型起裂图



120°相位裂缝模型起裂图

Figure 6. Fracture initiation diagrams under different phase angles
图 6. 不同相位角下的模型起裂图

余前港学者的实验[14]结果支持了上述论点。如图 7 所示，当相位角为 60°时，岩石裂缝的连通性较好，这有利于压裂液体在岩石中的传导和释放，因而需要较小的破裂压力。相反，当相位角为 120°时，相邻孔眼形成的裂缝带数量增多且连接性较差，这导致需要更大的破裂压力来有效破裂岩石。尽管裂缝扩展方向可能受到应力方向等因素的影响，但裂缝起裂的规律与以上所述相符。

综上，在射孔井眼方向平行于最大水平主应力时，相位角越大，破裂压力越大，达到约 90°以上后破裂压力陡然增加。

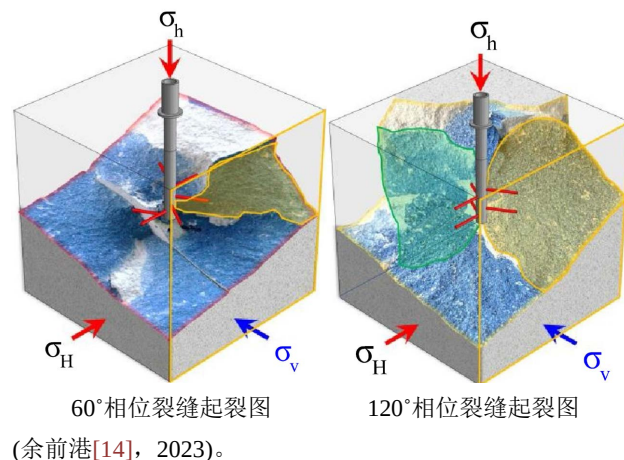


Figure 7. Rock fracture initiation diagrams under different phase angles
图 7. 不同相位角下的岩石起裂图

4.2. 射孔孔眼方向与最大水平主应力方向存在夹角

为了探究最大水平主应力方向不明确的情况相位角的选择，在原来模型的基础上，将水平主应力方向偏转 15°，30°，45°，60°，75°，90°，进行水力压裂数值模拟，模拟结果如图 8 所示。

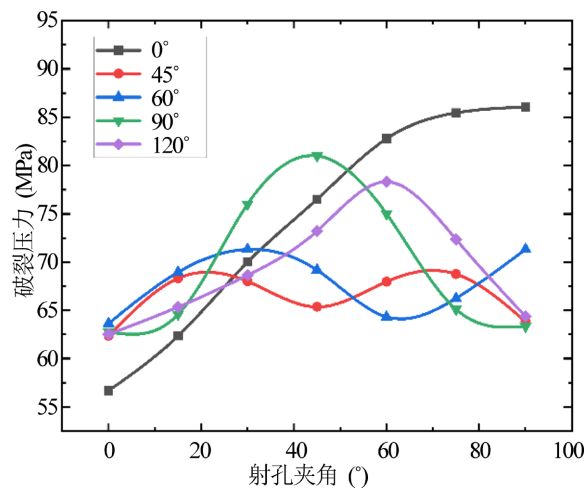


Figure 8. Variation of fracture pressure under different phase angles and perforation angles
图 8. 不同相位角与射孔夹角下的破裂压力变化图

随着射孔夹角增加，除了 0°相位外，所有射孔相位角度下的破裂压力都在该角度大小的射孔夹角内呈上下波动，如相位 60°时，在射孔夹角 0~60°之间先增加后减小，在 30°时达到最大值，说明射孔相位与

射孔夹角对破裂压力有很重要的影响。其中 45° 相位波动范围最小，总体破裂压力最小，在水平主应力方向不明确时采用 45° 相位角进行射孔是降低破裂压力的最佳相位角。

选取射孔夹角 30° 进一步统计，可以发现，不同相位角下，不同相位角下射孔方向与最大水平主应力的夹角不同，本文将最小的夹角称为优角，较大的角称为劣角，示意图如图 9 所示，破裂压力随相位角变化图如图 10 所示。

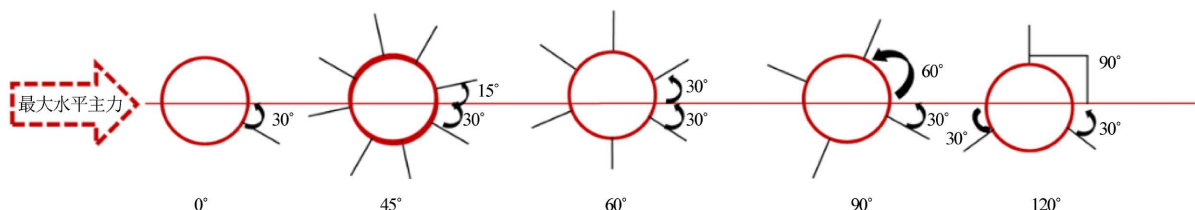


Figure 9. Schematic diagram of optimal and suboptimal angles under 30° perforation angle

图 9. 夹角的 30° 下不同相位角的优劣角示意图

夹角 30° 时射孔不同相位角下的破裂压力如图 10 所示，随着射孔相位角增加，破裂压力受主应力方向的影响，呈正弦变化趋势。

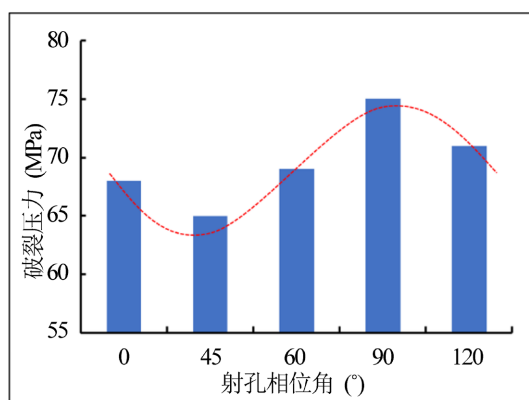


Figure 10. Fracture pressure under different phase angles at 30° perforation angle

图 10. 夹角 30° 时不同相位角下的破裂压力

当相位角为 0° 时，最优角为 30° ，且孔眼分布在同一直线上。这种配置导致施加在岩石上的压裂压力得以集中在一个特定方向上，从而降低了破裂压力，使得岩石更易于破裂。随着相位角的变化，例如在 45° 相位角下，最优角变为 15° ，如图 9 所示。在此配置下，破裂压力更低。然而，当相位角从 45° 逐渐增大至 60° 时，最优角开始逐渐增大，至 60° 时再次达到 30° 。值得注意的是，尽管最优角与 0° 时相同，但由于孔眼分布不再位于同一直线上，因此缺乏 0° 时射孔点带来的应力集中效应，导致破裂压力相对较高。当相位角为 90° 和 120° 时，最优角均为 120° 。然而，在这两种情况下，劣角的分布有所不同。 90° 相位角下存在两个较大的劣角，而 120° 相位角下仅有一个劣角。因此，在 120° 相位角下，岩石的破裂压力更低，显示出更优越的压裂效果。综上所述，相位角的变化对岩石压裂过程中的最优角和破裂压力具有显著影响。通过合理调整相位角和孔眼分布，可以有效降低破裂压力，提高压裂效率。

当射孔方向与最大水平主应力存在一定的夹角时，破裂压力受到相位角和最大水平主应力方向共同调控。在一定范围内，破裂压力随着相位角的变化呈现上下波动的趋势。相位角为 45° 时，其降低破裂压力的总体效果最好。这对于指导实际工程操作中射孔方向和相位角的选择具有重要的参考价值。

5. 结论

本研究通过建立和分析数值模型,对射孔相位角在水力压裂中的作用规律进行了深入研究,得出以下结论:

采用定向射孔情况下,射孔方向与最大水平主应力重合时,破裂压力最低,破裂压力约等于最小水平主应力加岩石抗张强度;射孔方向与最大水平主应力夹角越大,破裂压力越高。

采用螺旋射孔情况下,某一射孔孔眼方向与最大水平主应力重合时,随着射孔相位角越大,破裂压力越高;任意射孔孔眼方向与最大水平主应力有夹角时,随着射孔相位角增大,破裂压力呈余弦变化,45°相位角破裂压力最低。

基金项目

国家自然科学基金联合基金项目《四川深层页岩智能传控靶向复合压裂基础研究》(资助编号:U20A20265)。

参考文献

- [1] Hubbert, M.K. and Willis, D.G. (1957) Mechanics of Hydraulic Fracturing. *Transactions of the AIME*, **210**, 153-168. <https://doi.org/10.2118/686-g>
- [2] Haimson, B. and Fairhurst, C. (1967) Initiation and Extension of Hydraulic Fractures in Rocks. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **7**, 310-318. <https://doi.org/10.2118/1710-pa>
- [3] Yew, C.H. and Li, Y. (1988) Fracturing of a Deviated Well. *SPE Production Engineering*, **3**, 429-437. <https://doi.org/10.2118/16930-pa>
- [4] Olson, J.E. (1995) Fracturing from Highly Deviated and Horizontal Wells: Numerical Analysis of Non-Planar Fracture Propagation. *Low Permeability Reservoirs Symposium*, Denver, 19-22 March 1995, SPE-29573-MS. <https://doi.org/10.2118/29573-ms>
- [5] Hailey, B.W., Weng, X. and Stoitsis, R.F. (1995) Mitigation of Multiple Fractures from Deviated Wellbores. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, 22-25 October 1995, SPE-30482-MS. <https://doi.org/10.2118/30482-ms>
- [6] Morales, R.H., Brady, B.H. and Ingraffea, A.R. (1993) Three-Dimensional Analysis and Visualization of the Wellbore and the Fracturing Process in Inclined Wells. *Proceedings of Low Permeability Reservoirs Symposium*, Denver, 26-28 April 1993, SPE-25889-MS. <https://doi.org/10.2523/25889-ms>
- [7] Manrique, J.F. and Venkitaraman, A. (2001) Oriented Fracturing—A Practical Technique for Production Optimization. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, September 30-October 3 2001, SPE-71652-MS. <https://doi.org/10.2118/71652-ms>
- [8] Al-Busaidi, A., Hazzard, J.F. and Young, R.P. (2005) Distinct Element Modeling of Hydraulically Fractured Lac Du Bonnet Granite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **110**, 1-14. <https://doi.org/10.1029/2004jb003297>
- [9] 郭天魁, 张士诚, 潘林华. 页岩储层射孔水平井水力裂缝起裂数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2721-2731.
- [10] 李根生, 刘丽, 黄中伟, 等. 水力射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(5): 42-45.
- [11] El Rabaa, W. (1989) Experimental Study of Hydraulic Fracture Geometry Initiated from Horizontal Wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, 8-11 October 1989, SPE-19720-MS. <https://doi.org/10.2118/19720-ms>
- [12] van de Ketterij, R.G. and de Pater, C.J. (1997) Experimental Study on the Impact of Perforations on Hydraulic Fracture Tortuosity. *SPE European Formation Damage Conference*, The Hague, 2-3 June 1997, SPE-38149-MS. <https://doi.org/10.2118/38149-ms>
- [13] 马耕, 张帆, 刘晓, 等. 地应力对破裂压力和水力压裂影响的试验研究[J]. 岩石力学, 2016, 37(S2): 216-222.
- [14] 余前港. 螺旋射孔裂缝扩展规律及不同储层压裂优化研究[D]: [硕士学位论文]. 东北石油大学, 2023.