

# 水平井分段多簇压裂模拟分析

焦子曦, 杨 洋\*

四川大学, 四川 成都

Email: \*3161696087@qq.com

收稿日期: 2021年8月2日; 录用日期: 2021年9月7日; 发布日期: 2021年9月26日

---

## 摘 要

在致密油气资源开采时, 水平井分段多簇压裂技术已经成为储层改造的关键技术。但现场生产测试结果表明簇间距较小时, 缝间应力干扰将影响多条裂缝的均匀发育。针对缝间应力干扰使各簇射孔产生的裂缝流量分配不均导致多条裂缝发育不均衡的问题, 基于CZM模型与伯努利方程建立了考虑射孔孔眼摩阻的三维多裂缝同时起裂延伸数值模型。模拟结果表明, 射孔孔眼摩阻存在一个阈值, 当超过阈值后能够有效削弱缝间应力干扰的影响, 有助于流量均匀分配给各簇裂缝, 提高储层改造效果。

## 关键词

水平井, 多簇压裂, 孔眼摩阻, 黏聚力模型

---

---

\*通信作者。

# Numerical Simulation of the Multi-Stage Fracturing in a Horizontal Well

Zixi Jiao, Yang Yang\*

Sichuan University, Chengdu Sichuan

Email: \*3161696087@qq.com

Received: Aug. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Sep. 7<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 26<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In the exploitation of tight oil and gas resources, multiple-fracture treatments in horizontal wellbores have become a key technology for reservoir reconstruction. However, according to the field production test results, when the cluster spacing is small, the stress-shadow will affect the uniform growths of multiple hydraulic fractures. Aiming at the problem of uneven partitioning of flow rate into each fracture generated by each cluster perforating caused by the stress-shadow, the development of multiple fractures is unbalanced. Based on the cohesive zone model (CZM) and Bernoulli's equation, a three-dimensional multi-fracture simultaneous initiation considering the perforation friction is established. The simulation results show that there is a threshold for perforation friction. When exceeding the threshold, the influence of stress-shadow can be effectively weakened, which helps to distribute the flow evenly to each cluster of fractures and improve the effect of reservoir reconstruction.

## Keywords

Horizontal Well, Multi-Stage Fracturing, Perforation Friction, Cohesive Zone Model

Copyright © 2021 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

近年来, 水平井分段压裂技术已成为有效开发非常规油气资源的一种关键技术[1]。为了能够经济有效地开采致密储层中的油气资源, 压裂时首先在每个压裂段内布置多簇射孔孔眼, 随后泵入压裂液, 从而达到能够同时形成多条裂缝的目的。然而, 较多的压裂测试结果显示, 并非所有射孔簇都形成了有助于增产的有效裂缝[2]。相关研究表明, 多裂缝起裂却并未同步扩展的原因主要有: 储层的非均质性、多裂缝间的干扰、压裂液流量分配不均匀等[3]。

针对各压裂段内裂缝扩展不均匀的问题, 国内外学者开展了一系列研究, 探讨能够有效降低缝间干扰的影响, 促进流量均匀分配至各裂缝的方法。赵金洲等[4] [5] [6]研究发现, 随着簇间距变小, 缝间干扰程度增加, 导致中间裂缝缝宽、缝长减小。因此, 施工时增大簇间距能够有效削弱缝间干扰的影响。Peirce [7]通过研究提出, 布置非均匀的射孔簇能够有助于各个裂缝均匀发育。但由于该方法受限于施工

工艺以及成本,在实际工程中不能过度使用。Wu 等[3] [8] [9] [10]认为射孔参数能够改变流体进入各裂缝的流动阻力,达到实现合理流量分配的目的,进而能够降低缝间干扰的影响。近年来,通过设置合理的射孔方案促使多裂缝能够均匀扩展的技术,在工程中越来越受到关注。

数值模拟作为研究水力压裂一种有效的方法,能够帮助现场工程师选择适合于多裂缝均匀延伸的射孔参数。郭建春[11] [12]等建立了二维模型探究了裂缝间应力场、裂缝数量、裂缝间距等因素对多条裂缝发育的影响,但他们在模型中指定了作用在水力裂缝内的净液压力,难以考虑水力压裂中流体的动态分配。

本文根据射孔压降获得流量动态分配的规律,建立了三维水平井分段多簇压裂裂缝扩展有限元数值模型。在此基础上,通过设置相同的簇间距重点研究不同射孔参数对多裂缝扩展的影响,为优化分段多簇压裂设计提供参考。

## 2. 多裂缝同步起裂扩展数值模型

### 2.1. 模型建立

压裂段内多簇裂缝同步起裂扩展是一个复杂的过程,在建立数值模型时做出了以下假设:1) 储层是一个无限大弹性体,压裂时压裂段内设置的每簇射孔仅产生一个裂缝面。2) 由于国内非常规储集层的地应力差普遍较大,两侧裂缝扩展时的扭曲现象会受到极大的抑制力,每簇射孔压裂生成的裂缝都为平直裂缝[13]。3) 压裂液为不可压缩牛顿流体,流体在裂缝内的流动方式符合泊肃叶平板流动,管道与地层注入点的连接处充满流体。

水力压裂是一个涉及流体流动与岩石变形耦合的过程,并受压裂液性质、储层性质、施工设计等因素影响。本文通过 ABAQUS Standard 有限元分析软件,利用 CZM 模型建立多裂缝同步起裂扩展模型。多孔弹性介质储层(如图 1)由 C3D8P 单元模拟,上下部分为隔层,中间部分为储层,连接井筒的三角形为射孔位置。射孔簇处预设 Cohesive 单元(厚度为零)以模拟裂缝的起裂延伸(如图 2),其中上下部分为隔层,中间部分为储集层。另外,为了能够在三维模型中讨论射孔与井筒参数对多裂缝同步起裂扩展的影响,井筒中使用管流单元 fp3d2,射孔簇使用连接单元 fpc3d2。

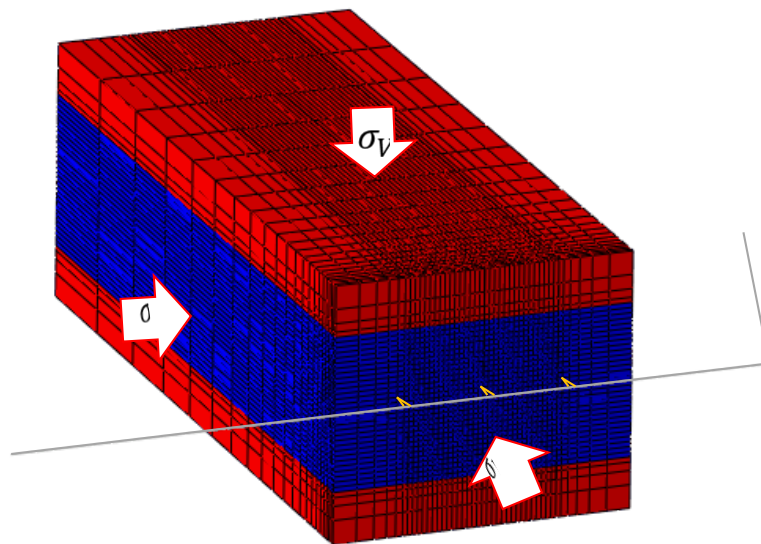


Figure 1. Calculation model

图 1. 计算模型

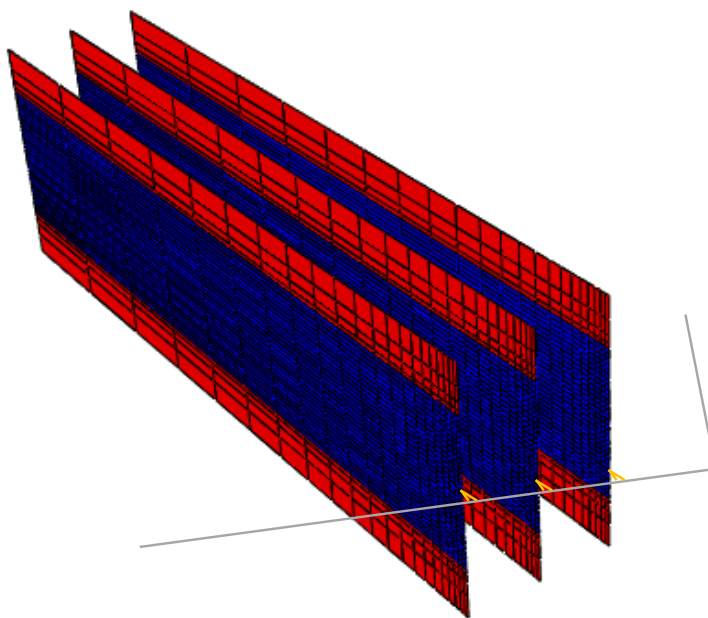


Figure 2. Cohesive element to simulate hydraulic fractures  
图 2. 模拟水力裂缝的 cohesive 单元

## 2.2. 裂缝与储层的流体流动模型

### 2.2.1. 流动方程

假设流体为不可压缩牛顿流体, 流体在 Cohesive 单元内的流动由切向流动与法向流动组成。切向流动代表压裂液在裂缝中流动, 法向流动代表压裂液向地层滤失。流体在裂缝内的切向流动满足立方定律:

$$q = -\frac{w^3}{12\mu} \nabla p \quad (1)$$

式中:  $q$  表示切向流流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\nabla p$  表示 Cohesive 单元长度方向的压力梯度;  $w$  表示裂缝宽度,  $\text{m}$ ;  $\mu$  表示压裂液黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

流体在裂缝内的法向流动满足如下关系式

$$\begin{cases} q_t = c_t (p_f - p_t) \\ q_b = c_b (p_f - p_b) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $q_t, q_b$  分别代表上、下表面的法向体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $c_t, c_b$  分别代表上、下表面的滤失系数,  $\text{m}^3/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ ;  $p_f$  代表 Cohesive 单元中的流体压力,  $\text{Pa}$ ;  $p_t, p_b$  代表裂缝上、下表面处的孔隙压力,  $\text{Pa}$ 。

### 2.2.2. 流量分配

在水平井分段多簇压裂过程中, 由于一个压裂段内布置了多个射孔簇, 当泵入压裂液后, 多簇裂缝将同步起裂扩展。在这个过程中总流量为泵入各裂缝的压裂液流量之和, 其表达式为

$$Q_{to} = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (3)$$

Crump [14]提出井底压力并非是各裂缝缝口处的压力, 由于本文主要讨论射孔参数对裂缝延伸的影响, 因此不考虑流动摩阻, 此时各簇裂缝对应的井底压力相同, 有

$$P_w = P_m + P_f \quad (4)$$

式中:  $p_w$  代表井底压力, MPa;  $p_m$  代表裂缝缝口处的压力, MPa;  $p_f$  代表射孔压降损失, MPa。

当压裂液从井筒通过射孔进入裂缝时, 射孔就像一个节流阀, 使压裂液在此处产生一个局部压力损失。Crump [9] [14]等基于伯努利方程, 把射孔压降损失表示为

$$p_f = 0.807249 \times \frac{\rho}{N^2 D_p^4 C^2} Q_i^2 \quad (5)$$

式中:  $Q_i$  代表每条裂缝中分配的压裂液的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $D_p$  代表射孔孔眼直径, m;  $\rho$  代表压裂液密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C$  代表射孔孔眼壁面受冲蚀的修正系数, 无因次;  $N$  代表每个射孔簇内设的射孔数量。在水平井分段多簇压裂过程中, 一个压裂段内通常布置 2~5 簇射孔, 每簇射孔的孔眼数量为 6~32 个, 孔径通常为 6~15 mm, 簇间距一般为 10~30 m。  $C$  反映了射孔孔眼形状对射孔摩阻的影响, 当孔眼完好时,  $C$  一般为 0.5~0.6, 当孔眼被完全磨蚀后,  $C$  一般取 0.95 [15]。

### 2.3. CZM 模型

CZM 模型模拟裂缝时, 裂缝的起裂和扩展行为由牵引 - 分离准则描述。当裂缝承受外力荷载时, 应力达到阈值前随张开/剪切位移线性增长, 当应力达到阈值后, 应力逐渐减小, 此时界面开始出现损伤。

由于单元上下表面同时存在拉应力与剪应力, 因此 CZM 模型的起裂与扩展过程需要同时考虑上下表面的法向应力与切向应力的影响。本文采用二次名义应力牵引 - 分离准则(如图 3)来模拟裂缝的起裂[16]。当裂缝起裂时, 二次相互作用函数值为 1, 其表达式如下

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (6)$$

式中:  $t_n^0, t_s^0, t_t^0$  分别代表 Cohesive 单元法向、第 1 切向和第 2 切向的临界应力, Pa;  $t_n, t_s, t_t$  分别代表 Cohesive 单元法向、第 1 切向和第 2 切向的当前应力, Pa;  $\langle \rangle$  是 Macauley 括弧(当  $t_n \geq 0$  时,  $\langle t_n \rangle = 0$ ; 当  $t_n < 0$  时,  $\langle t_n \rangle = 0$ )。

裂缝起裂后通过断裂能理论对损伤进行评估。引入 Benzeggagh-Kenane 断裂准则描述起裂后裂缝的发育情况[17]。这里认为沿不同切向方向的断裂能相同, 断裂能的表达式如下

$$G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left\{ \frac{G_s + G_t}{G_n + G_s + G_t} \right\}^\eta = G^C \quad (7)$$

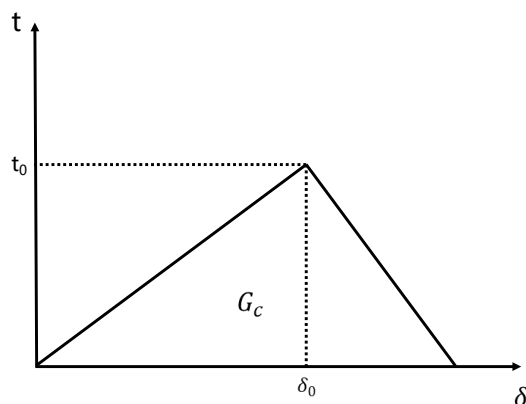
式中:  $G_n^C$  代表 I 型临界断裂能;  $G_s^C$  代表 II 型临界断裂能;  $G_n, G_s, G_t$  分别代表法向、第 1 切向、第 2 切向的断裂能;  $\eta$  是材料参数。

当 cohesive 单元破裂时,  $G_C = G_n + G_s + G_t$ 。

### 3. 多裂缝同时起裂扩展模拟

本文建立的模型未考虑储层非均质性的影响, 因此仅取一半模型研究多簇裂缝的起裂扩展过程。储层模型的高度为 30 m, 长度为 160 m, 宽度为 60 m, 上下隔层的高度都设置为 10 m, 裂缝仅在储层中起裂扩展。压裂段内设置 3 簇射孔, 簇间距均为 15 m。通过井筒向储集层注入压裂液, 使多簇裂缝同时起裂扩展。储层力学参数和地质条件如表 1 和表 2 所示[3] [18]。

压裂过程中射孔参数不同会造成射孔簇压降不同, 从而影响多簇裂缝起裂扩展过程中的流量动态分配。随着长时间大量压裂液不断泵入, 孔眼的形态会发生改变, 这里忽略这种变化。



**Figure 3.** Traction-separation criterion for Cohesive element

**图 3.** Cohesive 单元牵引 - 分离准则

**Table 1.** Reservoir parameters of multi-fracture simultaneous initiation and propagation numerical simulation model

**表 1.** 多裂缝同时起裂延伸数值模拟模型储集层参数

参数	数值
杨氏模量(GPa)	45
泊松比	0.2
最小水平主应力(MPa)	30.68
最大水平主应力(MPa)	37.58
垂向应力(MPa)	55
储层厚度(m)	30
施工排量(m <sup>3</sup> /s)	0.1
压裂液黏度(mPa·s)	10
压裂液密度(g/cm <sup>3</sup> )	1

**Table 2.** Interlayer parameters of multi-crack simultaneous initiation and propagation numerical simulation model

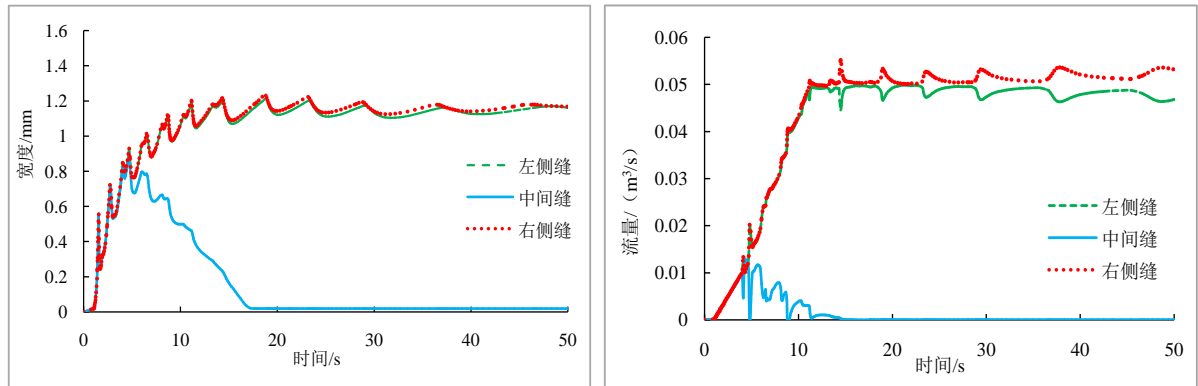
**表 2.** 多裂缝同时起裂延伸数值模拟模型隔层参数

参数	数值
最小水平主应力(MPa)	35.68
最大水平主应力(MPa)	39.58
垂向应力(MPa)	55
储层厚度(m)	10
杨氏模量(GPa)	90
泊松比	0.3

### 3.1. 缝间干扰

当三簇射孔的射孔数量均为 32, 孔径均为 15 mm 时, 射孔的摩阻在裂缝起裂扩展过程中的影响可忽略不计, 此时多裂缝同时起裂扩展的过程主要受到缝间应力干扰的影响。压裂液泵入时三簇裂缝同时起裂, 经过一段时间后由于两侧裂缝张开时给中间裂缝施加了额外的压应力, 中间裂缝在缝间压力干扰的

影响下逐渐停止扩展(如图4)。由于簇间距较小时中间裂缝难以延伸,无法分配到足够的压裂液。增大簇间距虽然能够削弱缝间应力干扰的影响,但是水平井分段压裂中密切割与井间距的合理分配同样是储层改造的关键[19],因此通过调整施工参数通过设置合理的射孔参数形成足够的压降,使多簇裂缝在适当的簇间距下都能形成较大的有效裂缝体积是优化水平井分段压裂设计的有效途径。

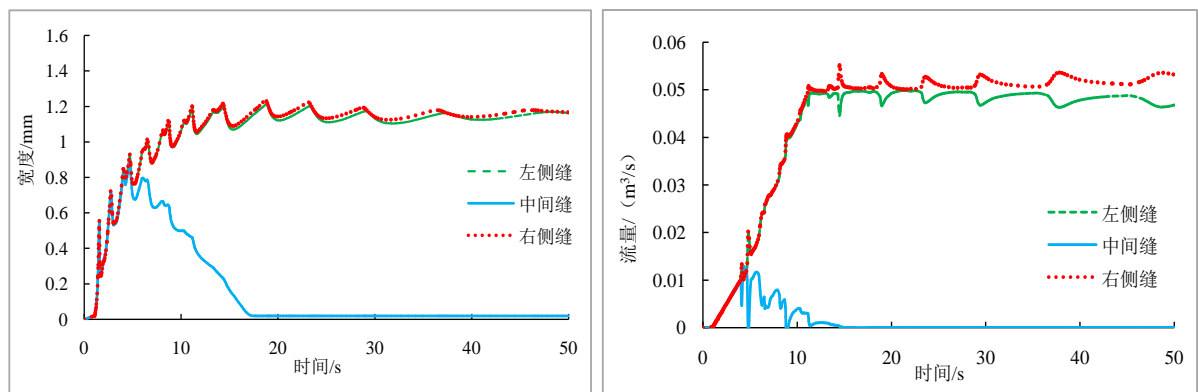


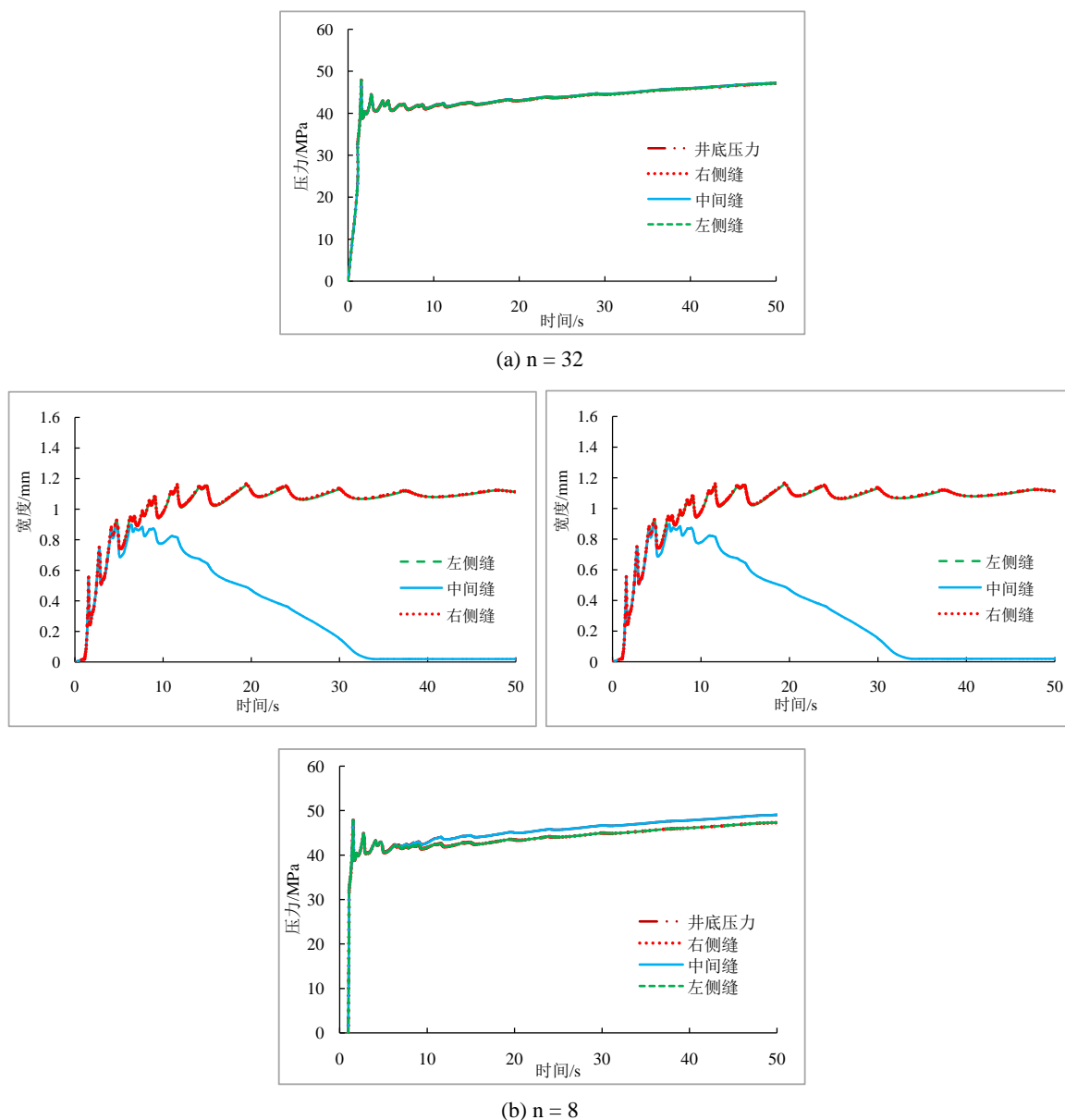
**Figure 4.** The variation of fracture width and flow rate with injection time without considering the effect of perforating friction

**图 4.** 不考虑射孔摩阻影响时裂缝宽度、流量随注液时间的变化

### 3.2. 射孔数量

如图5,当三簇裂缝的射孔直径均为15 mm时,通过设置不同的射孔数量来改变射孔簇压降。随着射孔数量减小,孔眼摩阻压降会逐渐增大,中间裂缝受缝间压力干扰影响减小,有助于各条裂缝同步扩展。如图所示,当孔眼数量为32时,由于孔眼摩阻很小难以对流量动态分配造成影响,此时中间裂缝虽然能够起裂但是随着两侧裂缝发育,中间裂缝受到的缝间应力干扰增大,其分配的流量在注液15 s时降低为 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,裂缝宽度在注液18 s时降低为 $0.02 \text{ mm}$ 接近于完全闭合且在随后的注液过程中没能重新张开。当孔眼数量减少为8时,中间裂缝的分配的流量在注液30 s时降低为 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,在注液18 s时分配的流量为 $0.0038 \text{ m}^3/\text{s}$ ,仍然能够维持裂缝扩展。裂缝在注液18 s时的宽度为 $0.519 \text{ mm}$ ,是孔眼数量为32时中间裂缝在注液18 s时宽度的26倍,中间裂缝在注液30 s时闭合。当孔眼数量为32时,在两侧裂缝的射孔簇处产生了 $0.108 \text{ MPa}$ 的压降,当孔眼数量为8时,在两侧裂缝的射孔簇处产生了 $1.705 \text{ MPa}$ 的压降。这表明:随着孔眼数量减少,射孔簇处由于射孔孔眼摩阻增大产生愈加明显的压降,有利于削弱缝间应力干扰对各条裂缝流量分配的影响,使中间裂缝逐渐能够在起裂后继续发育。





**Figure 5.** The variation of fracture width, fracturing fluid flow rate, bottom hole pressure and fracture pressure with time with different perforation number

**图 5.** 射孔数量不同时裂缝宽度、压裂液流量、井底压力及各裂缝缝口压力随时间的变化

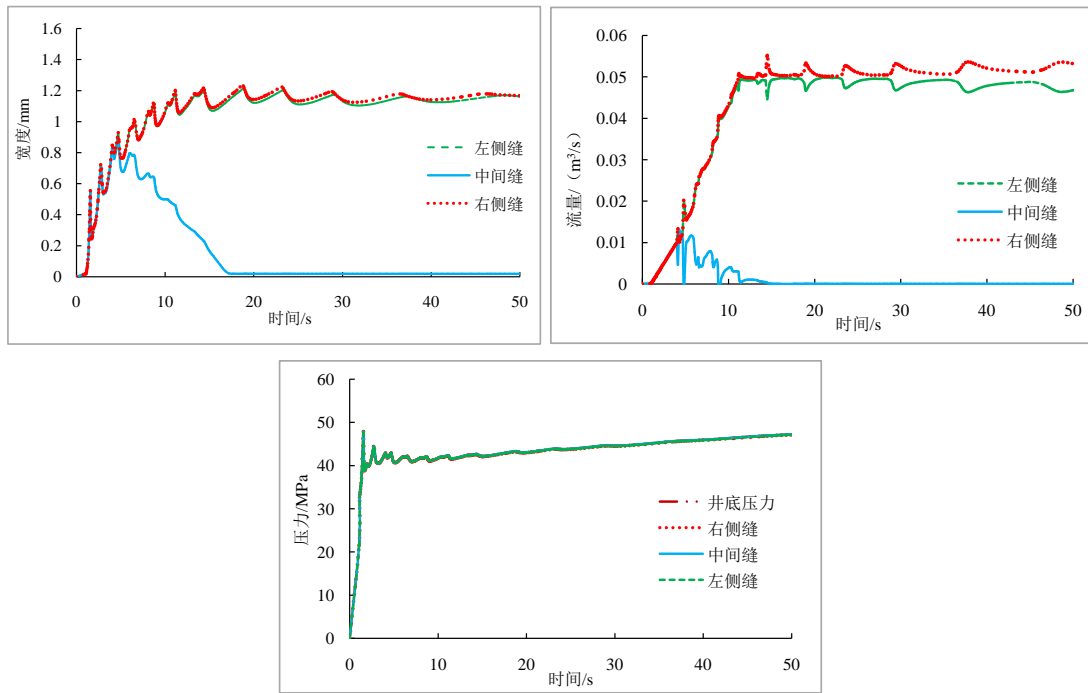
### 3.3. 射孔孔眼直径

设置三簇射孔的射孔数量均为 32, 此时通过改变射孔孔眼直径同样能够通过增大各簇射孔的射孔摩阻削弱缝间应力干扰的影响使各条裂缝更均匀地发育。

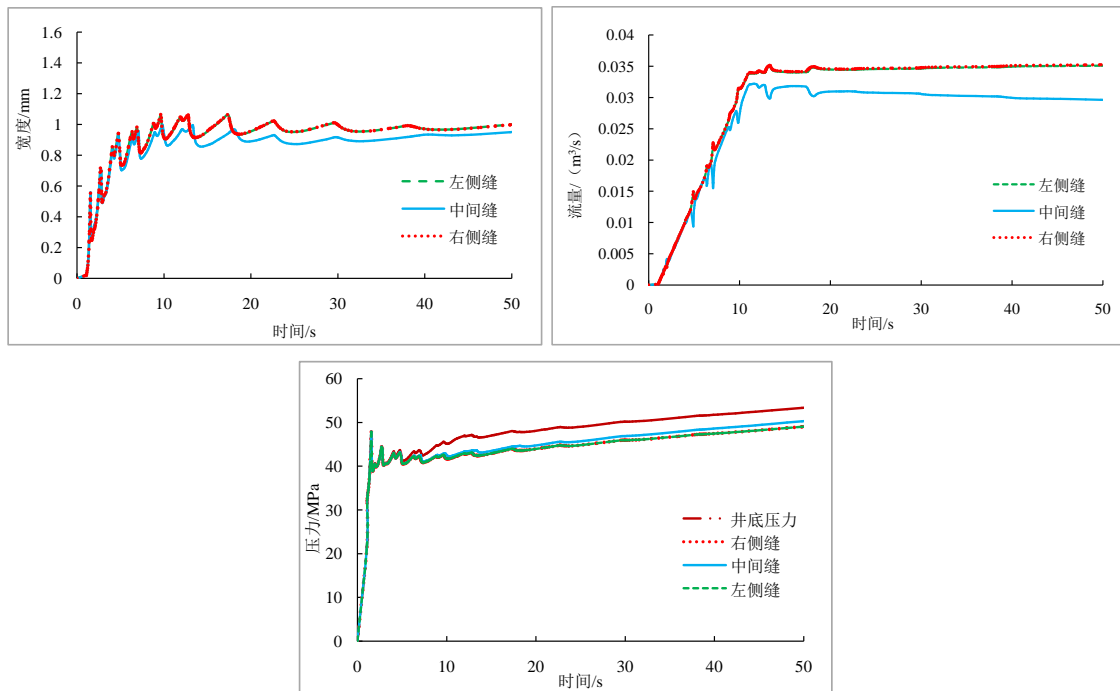
由图 6 可以看出, 当射孔孔眼直径为 15 mm 时, 由于射孔数量较多, 此时由于缝间应力干扰的影响, 中间裂缝分配的流量在注液 15 s 时降低为  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ , 中间裂缝的宽度在注液 18 s 时降低为  $0.02 \text{ mm}$ 。当射孔孔眼直径为 5 mm 时, 由于孔眼摩阻达到了阈值, 此时进入各条裂缝的流量分配由射孔参数主导, 极大的削弱了缝间应力干扰的影响, 中间裂缝在注液 50 s 时仍在继续延伸, 此时中间裂缝的分配的流量为  $0.296 \text{ m}^3/\text{s}$ , 两侧裂缝分配的流量为  $0.352 \text{ m}^3/\text{s}$ 。裂缝在 18 s 时的宽度为  $0.969 \text{ mm}$ , 是射孔孔眼直径为 15



mm 时中间裂缝宽度的 48 倍。注液 50 s 时中间裂缝的宽度为 0.951 mm，与注液 18 s 时的宽度几乎一致，此时两侧裂缝长度为 31 m，中间裂缝长度为 28 m，实现了多条裂缝的同步扩展。



(a)  $D_p = 15$  mm



(b)  $D_p = 5$  mm

**Figure 6.** The variation of fracture width, fracturing fluid flow, bottom hole pressure and fracture pressure with time with different hole diameters

**图 6.** 孔眼直径不同时裂缝宽度、压裂液流量、井底压力及各裂缝缝口压力随时间的变化

## 4. 讨论

在施工工程中为了保证产量, 不能过度缩小簇间距, 此时较大的缝间应力干扰将导致分段多簇压裂中间射孔簇难以形成有效裂缝体积。通过设置合理的射孔参数, 增大射孔摩阻, 当射孔摩阻达到一定阈值后, 流量分配将由缝间应力干扰主导转变为射孔摩阻主导, 更有利于各条裂缝同步扩展。在注液 50 s 时, 几乎在不存在射孔摩阻影响即孔眼数量为 32, 射孔孔眼直径为 15 mm 的情况下, 井底压力为 47.315 MPa, 中间裂缝几乎没有扩展。在孔眼摩阻对缝间应力干扰有一定的削弱的情况即射孔数量为 8, 射孔孔眼直径为 15 mm 的情况下, 井底压力为 49.135 MPa, 中间裂缝在扩展一定距离后闭合。在各条裂缝的动态流量分配由缝间应力干扰主导转为射孔摩阻主导, 即射孔数量为 32, 射孔孔眼直径为 5 mm 的情况下, 井筒压力为 53.516 MPa, 各条裂缝都能够同步扩展。对比在上述三种情况下的井筒压力能够发现当射孔摩阻增大时, 施工压力明显升高, 此时裂缝继续扩展需要更高的泵压, 增加了施工的难度。因此在设置射孔参数时同样需要考虑现场的实际施工能力。

## 5. 结论

1) 本文基于 CZM 模型以及能够描述射孔孔眼摩阻的伯努利方程建立了三维水平井分段压裂多裂缝同步起裂扩展的有限元数值模拟模型, 发现随着射孔数量减少或直径减小, 各簇裂缝的射孔摩阻增大, 将有利于各簇裂缝均匀发育。

2) 设置射孔摩阻时存在一个阈值, 在没有达到阈值之前, 缝间干扰对流量动态分配的影响较大, 射孔摩阻难以使裂缝均匀发育。但是达到阈值后, 射孔摩阻能够有效削弱缝间应力干扰的影响, 使各簇裂缝流量的动态分配有利于各簇裂缝的均匀发育。

3) 随着射孔摩阻增大, 施工难度将逐渐增加, 因此需要根据现场施工条件设置射孔参数, 得到合理的水平井分段多簇压裂设计方案。

## 参考文献

- [1] 吴奇, 胥云, 王腾飞, 等. 增产改造理念的重大变革——体积改造技术概论[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 7-12.
- [2] Miller, C.K., Waters, G.A. and Rylander, E.I. (2011) Evaluation of Production Log Data from Horizontal Wells Drilled in Organic Shales. *The North American Unconventional Gas Conference and Exhibition*, The Woodlands, June 2011, SPE-144326-MS. <https://doi.org/10.2118/144326-MS>
- [3] Wu, K. and Olson, J. (2016) Mechanisms of Simultaneous Hydraulic-Fracture Propagation from Multiple Perforation Clusters in Horizontal Wells. *SPE Journal*, **21**, 1000-1008. <https://doi.org/10.2118/178925-PA>
- [4] 赵金洲, 陈曦宇, 刘长宇, 等. 水平井分段多簇压裂缝间干扰影响分析[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 533-538.
- [5] 李勇明, 陈曦宇, 赵金洲, 等. 水平井分段多簇压裂缝间干扰研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 76-83.
- [6] Shin, D.H. and Sharma, M.M. (2014) Factors Controlling the Simultaneous Propagation of Multiple Competing Fractures in a Horizontal Well. Pearson/Prentice Hall, London. <https://doi.org/10.2118/168599-MS>
- [7] Peirce, A. and Bungler, A. (2014) Interference Fracturing: Nonuniform Distributions of Perforation Clusters That Promote Simultaneous Growth of Multiple Hydraulic Fractures. *SPE Journal*, **20**, 384-395. <https://doi.org/10.2118/172500-PA>
- [8] 赵金洲, 陈曦宇, 李勇明, 等. 水平井分段多簇压裂模拟分析及射孔优化[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 117-124.
- [9] 李扬, 邓金根, 刘伟, 等. 水平井分段多簇限流压裂数值模拟[J]. 断块油气田, 2017, 24(1): 69-73.
- [10] 周彤, 张士诚, 陈铭, 等. 水平井多簇压裂裂缝的竞争扩展与控制[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(4): 469-478.
- [11] 郭建春, 李根, 周鑫浩. 页岩气藏缝网压裂裂缝间距优化研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3123-3129.
- [12] Cheng, Y. (2009) Boundary Element Analysis of the Stress Distribution around Multiple Fractures: Implications for

- the Spacing of Perforation Clusters of Hydraulically Fractured Horizontal Wells. *Eastern Regional Meeting. SPE Eastern Regional Meeting*, Charleston, 23-25 September 2009, SPE-125769-MS. <https://doi.org/10.2118/125769-MS>
- [13] Bungler, A.P., Zhang, X. and Jeffrey, R. (2012) Parameters Affecting the Interaction among Closely Spaced Hydraulic Fractures. *SPE Journal*, **17**, 292-306. <https://doi.org/10.2118/140426-PA>
- [14] Crump, J.B. and Conway, M.W. (1986) Effects of Perforation-Entry Friction on Bottom Hole Treating Analysis. *Journal of Petroleum Technology*, **40**, 1041-1048. <https://doi.org/10.2118/15474-PA>
- [15] 李勇明, 等. 射孔孔眼磨蚀对分段压裂裂缝扩展的影响[J]. 天然气工业, 2017, 37(7): 52-59.
- [16] Camanho, P.P. and Dávila, C.G. (2002) Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials.
- [17] Benzeggagh, M.L. and Kenane, M. (1996) Technology, Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus. *Composites Science and Technology*, **56**, 439-449. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(96\)00005-X](https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00005-X)
- [18] Roussel, N.P., Manchanda, R. and Sharma, M.M. (2012) Implications of Fracturing Pressure Data Recorded during a Horizontal Completion on Stage Spacing Design. *The SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, The Woodlands, 6-8 February 2012, SPE-152631-MS. <https://doi.org/10.2118/152631-MS>
- [19] 胥云, 雷群, 陈铭, 等. 体积改造技术理论研究进展与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 874-887.