

doi:10.6056/dkyqt201604023

# 暂堵转向压裂机理有限元分析

李玮, 纪照生

(东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

基金项目: 黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划项目“深部裂缝性凝灰岩层水力劈裂机理的分形研究”(1254G002)

**摘 要** 暂堵转向压裂技术是低渗透油气田开发后期增产挖潜的新手段、新方向。文中采用有限元分析方法研究暂堵转向压裂机理, 确定转向裂缝起裂位置, 分析起裂压力影响因素。研究结果表明: 纤维暂堵转向压裂起裂点不唯一, 当最小水平应力较大时, 裂缝更倾向于从井筒起裂, 反之, 裂缝更倾向于从初始裂缝中部起裂; 破裂压力存在一个区间, 当岩石破裂压力在这个区间时, 转向裂缝从初始裂缝中部起裂, 当岩石破裂压力高于或者低于这个区间时, 转向裂缝从井筒起裂; 井筒起裂点的起裂压力随着最小水平应力的增大而减小, 初始裂缝中部起裂点的起裂压力随着最小水平应力的增大而增大, 2 个位置的起裂压力均和地层弹性模量无关。该研究对认识暂堵转向压裂机理以及提高缝网改造效率具有重要的理论价值和现实意义。

**关键词** 转向压裂; 有限元; 起裂点; 起裂压力

中图分类号: TE357.1<sup>+</sup>1

文献标志码: A

## Finite element analysis of temporary plugging and fracturing mechanism

LI Wei, JI Zhaosheng

(College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** Temporary plugging and fracturing technology is a new method and a new direction of increasing production and potential in the late period of low-permeability oil and gas field development. Finite element analysis method was used to study the mechanism of temporary plugging and steering fracturing, determine the initial fracturing position, and analyze the influencing factors of fracturing pressure. The results show that the initial fracturing point of fiber plugging and steering fracturing is not unique. When the minimum horizontal stress is larger, the fracture is more inclined to crack from the wellbore; on the contrary, the fracture is more inclined to crack from the middle part of the initial fracture; fracturing pressure has an interval; when the rock breaking pressure falls in the interval, the steering fracture cracks from the wellbore; when the rock breaking pressure is higher or lower than the interval, the steering fracture cracks from the middle part of the initial fracture; the initiation pressure of the initiation point on the wellbore decreases with the increase of the minimum horizontal stress, while the initiation pressure of the initiation point in the middle of the initial crack increases with the increase of minimum horizontal stress; the two fracturing pressures have nothing to do with the elastic modulus of formation. The study has an important theoretical and practical significance to recognizing the mechanism of temporary plugging, steering fracturing and improving the efficiency of the network transformation.

**Key words:** steering fracturing; finite element; initiation point; initiation pressure

暂堵转向压裂技术是低渗透油气田开发后期增产挖潜的新手段、新方向<sup>[1]</sup>。该技术已经应用于大庆、新疆、长庆等油田, 在提高单井产量及油田采收率方面效果显著<sup>[2-6]</sup>。国内学者对暂堵转向压裂技术进行了一定的研究, 但主要集中在暂堵转向压裂施工工艺、封堵剂材料优选、转向压裂裂缝扩展轨迹等方面, 对转向压裂裂缝起裂机理的研究较少<sup>[7-10]</sup>。笔者以纤维暂堵转向压裂为例, 建立了裂缝半堵的力学模型, 采用有限元分析

方法研究暂堵转向压裂裂缝起裂机理, 确定暂堵转向压裂裂缝起裂位置, 分析暂堵转向压裂裂缝起裂影响因素。

收稿日期: 2015-12-27; 改回日期: 2016-05-15。

作者简介: 李玮, 男, 1979 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事高效钻井破岩、水力压裂、钻井优化等方面的理论与技术研究工作。

E-mail: cyyping@sina.com。

引用格式: 李玮, 纪照生. 暂堵转向压裂机理有限元分析[J]. 断块油气田, 2016, 23(4): 514-517.

LI Wei, JI Zhaosheng. Finite element analysis of temporary plugging and fracturing mechanism [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(4): 514-517.

1 纤维暂堵转向压裂机理

纤维暂堵转向分支缝压裂技术，是借鉴纤维在钻井和固井过程中堵漏的成功经验而提出的一种新型暂堵转向压裂技术<sup>[11-13]</sup>。该技术是将纤维暂堵剂加入到含有支撑剂的携砂液中，形成纤维暂堵液。根据压裂施工程序，纤维暂堵液被注入到初始裂缝中，纤维和支撑剂在缝端架桥，从而形成网架结构。这种网架结构对初始裂缝端部进行封堵，避免缝端封堵部位在重复压裂时起裂延伸，从而开启新的分支缝<sup>[14-15]</sup>。

现场施工中的初始裂缝纤维暂堵分为初始裂缝全堵和半堵 2 种情况。为了描述这种技术的典型性，以纤维暂堵初始裂缝半堵施工为例进行研究。

2 物理模型和力学模型

图 1 为初始裂缝被纤维和支撑剂半堵的物理模型。支撑剂弹性支撑段被柔性支撑的暂堵段所封堵，在重复压裂中被隔离，所以，分支缝的起裂位置只能在井眼和初始裂缝未堵段。在重复压裂时，未堵段会重新打开，部分压裂液会渗透到弹性支撑段，但注入量十分有限，不会压开初始裂缝的端部。

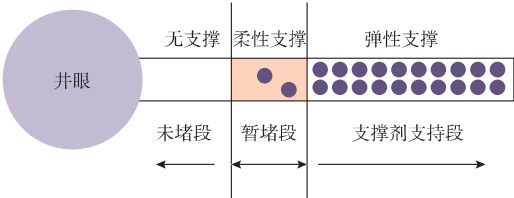


图 1 物理模型

图 2 为三维力学模型。从图可以看出：压裂地层所受作用力分别为垂向应力  $\sigma_v$ 、最大水平应力  $\sigma_H$  和最小水平应力  $\sigma_h$ ；井筒两侧对称分布 1 对初始裂缝，具有一定宽度的裂缝表示无支撑和柔性支撑段，没有宽度的裂缝表示弹性支撑段；在压裂过程中，无支撑和柔性支撑段还受到钻井液柱的压力  $p_w$  作用。

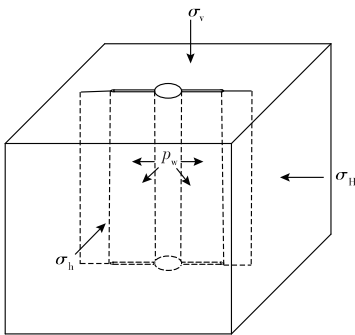


图 2 三维力学模型

3 暂堵转向压裂有限元分析

3.1 模型建立

3.1.1 几何模型及网格划分

考虑边界效应对计算结果的影响，采用双体耦合技术，建立有限元分析几何模型。根据研究问题的属性，物理场选用多孔弹性模块。图 3 为裂缝暂堵几何模型的网格划分。

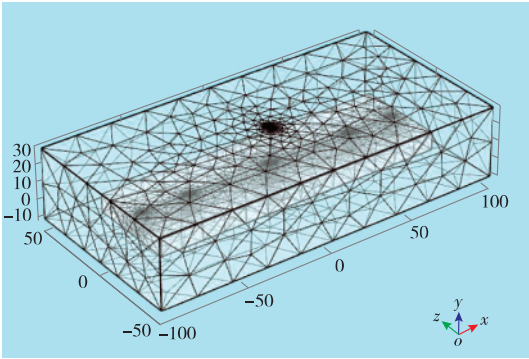


图 3 裂缝暂堵几何模型网格划分

3.1.2 载荷和约束

作用于计算模型上的载荷和约束包括：1)作用在地层外边界的最大、最小水平应力和垂向应力。2)作用在孔眼内壁以及裂缝无支撑和柔性支撑段的液柱压力。3)作用于地层无穷远处的原始孔隙压力( $p_p$ )。4)计算模型底面不允许有沿垂向的刚性位移，即在模型的底面施加轴向位移为 0 的约束。

3.1.3 基本参数

井眼几何参数来源于井身结构设计参数，弹性模量( $E$ )等力学参数通过现场数据获得(见表 1)。表中， $r_o$  为井眼直径， $L$  为裂缝长度， $W_b$  为裂缝宽度。

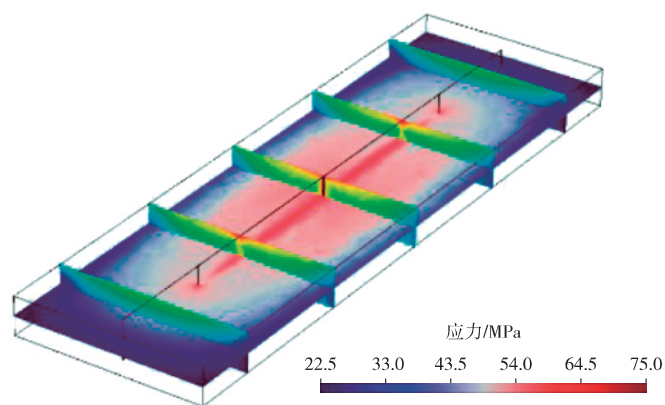
表 1 封堵裂缝几何参数和力学参数

参数	数值	参数	数值
$r_o/\text{m}$	0.215 9	$\sigma_H/\text{MPa}$	30
$L/\text{m}$	6	$\sigma_h/\text{MPa}$	20, 22, 24, 26, 28
$W_b/\text{m}$	0.005	$p_w/\text{MPa}$	20, 25, 30, 35, 40
$p_p/\text{MPa}$	18	$E/\text{GPa}$	5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0
$\sigma_v/\text{MPa}$	36		

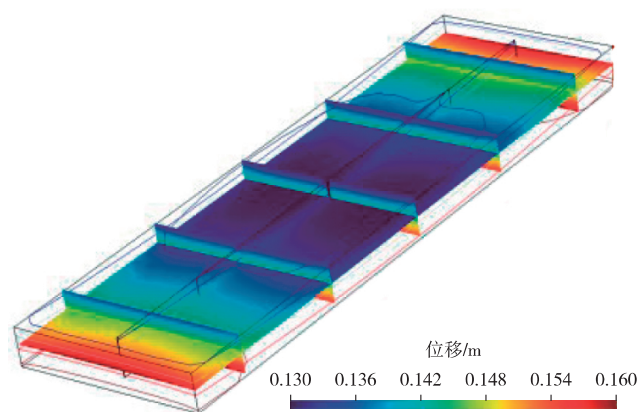
3.2 有限元分析结果

在各种应力作用下，井眼围岩会发生应力集中现象，也会发生一定规律的位移和变形。图 4 为井眼应力、井眼位移和变形的切片图。在井眼液柱压力的作用下，模型模拟出了经典的水力压裂椭圆形裂缝，进而从

侧面证明了有限元模型对现实封堵裂缝仿真分析的正确性。



a 井眼应力



b 井眼位移和变形

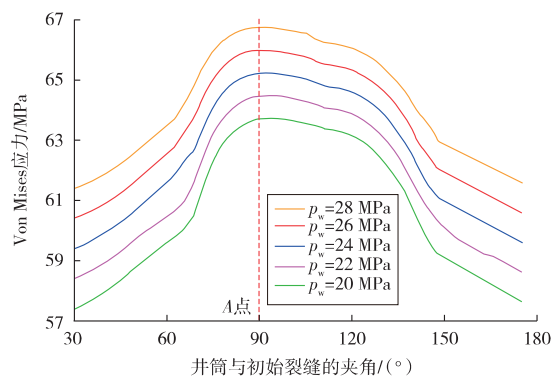
图 4 井眼应力、井眼位移和变形切片

为了确定裂缝周围应力集中的大小,确定起裂位置,因此,建立了裂缝边线上和井眼边线上的 Von Mises 应力分布图(见图 5)。考虑到对称性,裂缝边线仅取单翼边线,以弹性支撑段起始端作为起点(弹性支撑段起始端距井筒 50 m);井眼边线仅取井眼边线的 1/2,以初始裂缝起裂点为起点。

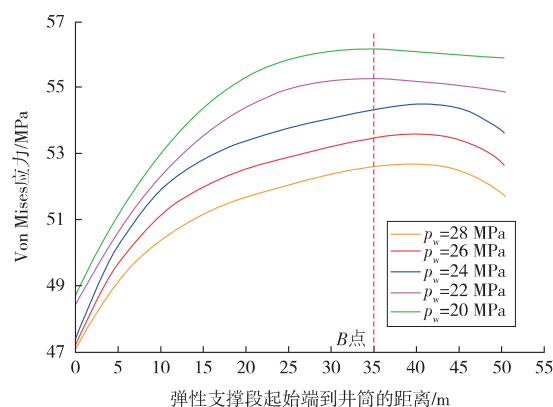
图 5a 为井筒 Von Mises 应力分布图。由图可知,在井筒上与初始裂缝呈  $90^\circ$  方向附近产生应力极大值,为可能的转向起裂点,记作起裂点 A。图 5b 为裂缝 Von Mises 应力分布图。由图可知,在初始裂缝中距离井筒大约 15 m 部位也出现应力极大值,所以,在转向压裂中,距离井筒 15 m 附近为可能的起裂点,记作起裂点 B。

为进一步分析起裂点 A、B 的应力集中情况,确定起裂点起裂的先后顺序,因此提取起裂点 A、B 的 Von Mises 应力,并对起裂点 A、B 的 Von Mises 应力做差(定义为有效应力差),绘制出有效应力差与净压力的

关系曲线(见图 6)。



a 井筒



b 裂缝

图 5 不同  $p_w$  时井筒和裂缝的 Von Mises 应力分布

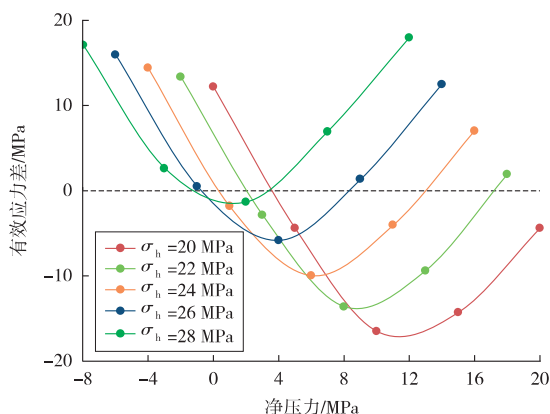
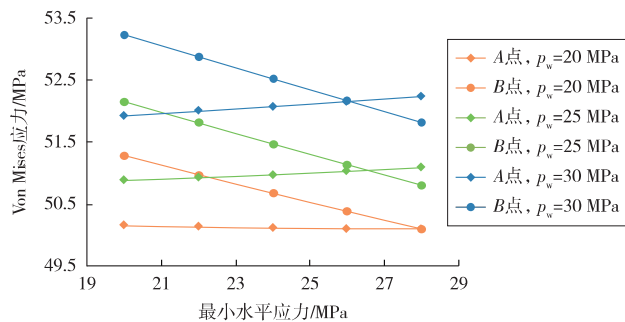


图 6 不同  $\sigma_h$  时有效应力差与净压力的关系

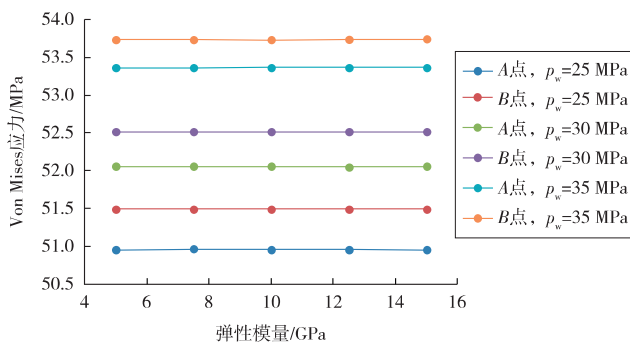
由图 6 可知:当其他参数不变时,在虚线(有效应力差为 0)上部,起裂点 A 优先起裂,在虚线下部,起裂点 B 优先起裂;对同一净压力下,最小水平应力越大,分支缝越倾向于从起裂点 A 起裂,反之,倾向于从起裂点 B 起裂;当最大、最小水平应力均不变时,存在某个压力区间,当岩石破裂压力落在这个区间时,转向裂

缝从起裂点  $B$  起裂,当岩石破裂压力高于或者低于这个区间时,转向裂缝从起裂点  $A$  起裂。

为确定新裂缝起裂压力的影响因素,采用单一变量扫描法,分别对不同最小水平应力和不同弹性模量下  $A, B$  点的 Von Mises 应力进行分析,结果见图 7。



a 不同最小水平应力



b 不同弹性模量

图 7  $\sigma_h$  和  $E$  不同时起裂点 Von Mises 应力变化情况

从图 7a 可以看出:在其他条件相同时,井筒上应力薄弱点  $A$  的 Von Mises 应力随着最小水平应力的增大而增大,应力集中明显,起裂压力减小;裂缝中部应力薄弱点  $B$  的 Von Mises 应力随着最小水平应力的增大而减小,应力集中减弱,起裂压力增大。这是因为初始裂缝诱导的应力在裂缝中部体现得更明显,而井筒上的应力集中更多的是由原始地应力造成的。

从图 7b 可以看出,弹性模量与起裂压力的关系是,井筒上应力薄弱点  $A$  和裂缝中部应力薄弱点  $B$  的 Von Mises 应力随着弹性模量的变化,起裂压力不变。这与材料应力集中产生的原因有关。

## 4 结论

1)纤维暂堵转向压裂裂缝起裂点不唯一,井筒上垂直于初始裂缝方向的位置可以起裂,初始裂缝中距离井筒 15 m 附近也可以起裂。

2)最大水平应力不变时, $A, B$  这 2 个起裂点优先起裂的情况与最小水平应力有关。当最小水平应力较大时,裂缝更倾向于从井筒起裂;反之,裂缝更倾向于从初始裂缝中部起裂。

3)2 个起裂点优先起裂情况与破裂压力有关。存在一个压力区间,当岩石破裂压力落在这个区间时,转向裂缝从初始裂缝中部起裂;当岩石破裂压力高于或者低于这个区间时,转向裂缝从井筒起裂。

4)最大水平应力不变时,井筒上起裂点的起裂压力随着最小水平应力的增大而减小,初始裂缝中部起裂点的破裂压力随着最小水平应力的增大而增大。2 个位置的起裂压力均和地层弹性模量无关。

## 参 考 文 献

- [1] 李玮,闫铁,毕雪亮.基于分形方法的水力压裂裂缝起裂扩展机理[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(5):87-91.
- [2] 李根生,黄中伟,牛继磊,等.地应力及射孔参数对水力压裂影响的研究进展[J].中国石油大学学报(自然科学版),2005,29(4):142-148.
- [3] 冯虎,徐志强,徐延涛.塔里木油田超深超高压气藏的成功改造[J].断块油气田,2014,21(6):819-822.
- [4] 张广清,陈勉,赵艳波.新井定向射孔转向压裂裂缝起裂与延伸机理研究[J].石油学报,2008,29(1):116-119.
- [5] 蔡志凤.朝阳沟油田注水井化学自适应暂堵转向酸化技术研究[D].大庆:东北石油大学,2013.
- [6] 刘洪,胡永全,赵金洲,等.重复压裂气井诱导应力场模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(23):4022-4027.
- [7] 尹辉,刘进军,郭娇娇,等.控水转向压裂技术在高含水裂缝性油藏开发中的应用:以火烧山油田 H1238 井为例[J].新疆石油地质,2014,35(3):352-355.
- [8] 邹国庆,熊勇富,袁孝春,等.低孔裂缝性致密储层暂堵转向酸压技术及应用[J].钻采工艺,2014,37(5):66-68.
- [9] 刘雨,艾池.多级压裂诱导应力作用下天然裂缝开启规律研究[J].石油钻探技术,2015,43(1):20-26.
- [10] 杨建委,郑波.纤维暂堵转向酸压技术研究及其现场试验[J].石油化工应用,2013,32(12):34-38.
- [11] 时玉燕,刘晓燕,赵伟,等.裂缝暂堵转向重复压裂技术[J].海洋石油,2009,39(2):60-64.
- [12] 杜宗和,李佳琦,聂洪力.缝内二次转向压裂技术探索[J].新疆石油地质,2013,34(3):349-353.
- [13] 黄源琳,郭建春,苗晋伟,等.转向压裂工艺研究及应用[J].油气井测试,2008,17(4):53-54,57.
- [14] 赵婷,李恩耀.转向压裂技术在采油一厂的应用[J].新疆石油科技,2011,21(4):28-33,44.
- [15] 白延锋,王美强,刘春杰,等.转向压裂技术在老油田后期开发中的研究与应用[J].石油化工应用,2011,30(11):4-6.

(编辑 史晓贞)