

# 多级压裂裂缝诱导应力优化计算模型研究

祝铭辰

(中国石化华东油气分公司泰州采油厂地质研究所, 江苏 泰州 225300)

**摘要:**非常规储层多级压裂过程中,诱导应力是影响压裂效果的重要因素。现有的多级压裂的诱导应力计算模型,将各条裂缝看成独立的个体,并没有考虑裂缝间的相互影响的问题。由于裂缝净压力产生的诱导应力会改变地应力,而改变的地应力反过来又会影响到裂缝净压力,据此,建立了多级压裂裂缝诱导应力的修正模型。通过 COMSOL 有限元软件模拟计算,表明修正后的模型具有较高的准确性。以致密砂岩水平井 P1 井为例,将计算数据与微地震监测数据进行对比,其差值结果均小于 10 m,吻合度较高,为多级压裂设计以及压裂裂缝形态评价提供了科学依据。

**关键词:**多级压裂 诱导应力 计算模型 修正 净压力

**中图分类号:**TE357 **文献标志码:**A

## An optimization model for induced stress of fractures in multistage fracturing

ZHU Mingchen

(Institute of Geology, Taizhou Oil Production Plant, East China Branch of SINOPEC, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** In the process of multistage fracturing of unconventional reservoirs, induced stress is an important factor affecting the effect of fracturing. In the existing calculation models for induced stress of multistage fracturing, each fracture is independent, and the mutual influence between each fractures has been ignored. The induced stress generated by net pressure of fracture will change the crustal stress, which will affect the net pressure conversely. Therefore, it was established the modified model for induced stress of fractures in multistage fracturing. The results coming from COMSOL show that the modified model has higher accuracy. It is also shown that the modified model has higher accuracy by contrasting the result of calculation with the result of microseismic - event cloud. Taking horizontal well P1 in tight sandstone as an example, the coincidence is high with the D - value less than 10 m. This can provide scientific basis for multistage fracturing design and the evaluation of fracture shape.

**Key words:** multistage fracturing; induced stress; calculation model; modified; net pressure

大规模储层改造需要在储层中压开多条裂缝,为了科学指导压裂设计以及压裂后评估,探索多级压裂诱导应力的计算模型就显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。现有多级压裂裂缝诱导应力计算模型都是单一裂缝诱导应力的简单叠加,本研究考虑裂缝间的相互影响,对多级压裂各裂缝净压力值进行修正,从而建立多级压裂裂缝的诱导应力计算模型。

### 1 单一垂直裂缝诱导应力计算模型

假设无限大储层中存在有一条垂直的对称双翼裂缝(见图1),该裂缝可简化为一条长为 $2h$ 的直线状裂纹(可以当做短半轴趋向于零的椭圆的极限情

形),裂纹穿透板厚,作用于裂纹面上的压力为 $P_{\text{net}}$ 。

此问题属于弹性力学范畴,需要联立弹性力学的平衡微分方程、几何方程及物理方程求解。西南石油大学根据弹性力学的半逆解法<sup>[4-5]</sup>求得图1坐标系下的解析解为

$$\sigma_{az} = -P_{\text{net}} \frac{r \sin \theta \sin \left[ \frac{3}{2}(\theta_1 + \theta_2) \right]}{h} \left( \frac{h^2}{r_1 r_2} \right)^{\frac{3}{2}} -$$

收稿日期:2019-02-22;改回日期:2019-06-03。

作者简介:祝铭辰(1993—),助理工程师,从事采油工程与地质的研究,E-mail:zmc1993\_love@163.com。

$$P_{\text{net}} \left[ \frac{r \cos(\theta - \frac{1}{2}\theta_1 - \frac{1}{2}\theta_2)}{(r_1 r_2)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{ay} = P_{\text{net}} \frac{r \sin \theta \sin[\frac{3}{2}(\theta_1 + \theta_2)]}{h} \left( \frac{h^2}{r_{12}} \right)^{\frac{3}{2}} - P_{\text{net}} \left[ \frac{r \cos(\theta - \frac{1}{2}\theta_1 - \frac{1}{2}\theta_2)}{(r_1 r_2)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{ax} = \nu(\sigma_{ay} + \sigma_{az}) \quad (3)$$

式中,  $\sigma_{ax}$ 、 $\sigma_{ay}$ 、 $\sigma_{az}$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的诱导应力, MPa;  $P_{\text{net}}$  为裂缝净压力, MPa;  $h$  为裂缝半缝高, m;  $\nu$  为储层泊松比, 无因次。

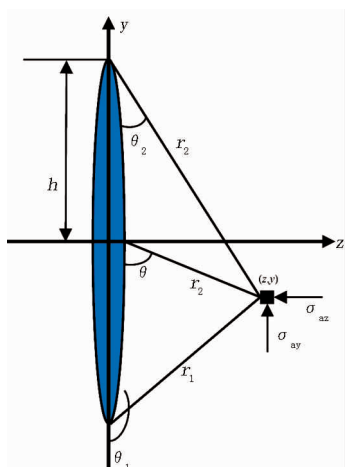


图1 单一垂直裂缝诱导应力场

## 2 多级压裂裂缝诱导应力计算模型

假设裂缝均为垂直且相互平行的裂缝, 多级压裂裂缝的物理模型可以简化为图2所示<sup>[6]</sup>。

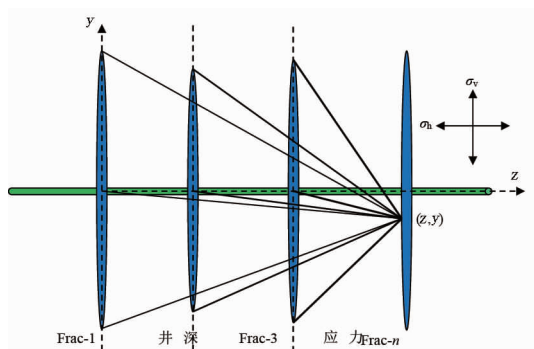


图2 多级压裂裂缝物理模型

取其中任意一条裂缝作为研究对象, 该裂缝周围垂直于裂缝面方向的地应力变为

$$\sigma_h' = \sigma_h \Sigma \sigma_{az} \quad (4)$$

式中,  $\sigma_h'$  为考虑诱导应力影响的主应力, MPa。而净压力、水平最小主应力以及裂缝内液体压

力之间存在以下关系

$$\sigma_h + P_{\text{net}} = P_L \quad (5)$$

式中,  $P_L$  为裂缝内液体压力, MPa。

因此, 裂缝壁面净压力会产生诱导应力改变地应力的大小, 而改变的地应力同时又会反过来使裂缝的净压力发生改变。考虑地应力与净压力的相互作用, 式(5)可以写成

$$\sigma_h' = T_{\text{net}} = P_L \quad (6)$$

在一定的时间内我们可以认为裂缝内的液体压力是不变的, 因此联立式(5)和式(6)并将式(4)带入, 可得

$$\Sigma \sigma_{az} + T_{\text{net}} = P_{\text{net}} \quad (7)$$

式中,  $T_{\text{net}}$  为修正后的净压力, MPa。

令

$$A = \frac{r \sin \theta \sin[\frac{3}{2}(\theta_1 + \theta_2)]}{h} \left( \frac{h^2}{r_{12}} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{r \cos(\theta - \frac{1}{2}\theta_1 - \frac{1}{2}\theta_2)}{(r_1 r_2)^{\frac{1}{2}}} - 1 \quad (8)$$

则式(1)可简化为

$$\sigma_{az} = -P_{\text{net}1} A \quad (9)$$

考虑如图2所示的裂缝系统, 设  $n$  条裂缝的原始净压力分别为  $P_{\text{net}1}$ 、 $P_{\text{net}2}$ 、 $\dots$ 、 $P_{\text{net}n}$ ,  $n$  条裂缝的修正净压力分别为  $T_{\text{net}1}$ 、 $T_{\text{net}2}$ 、 $\dots$ 、 $T_{\text{net}n}$ ,  $A_{ij}$  为第 Frac- $i$  对 Frac- $j$  产生诱导应力的系数。根据式(7)所示的平衡条件, 可以列出矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} 0 & A_{21} & A_{31} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & 0 & A_{32} & \dots & A_{n2} \\ A_{13} & A_{23} & 0 & \dots & A_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & A_{2n} & A_{3n} & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{\text{net}1} \\ T_{\text{net}2} \\ T_{\text{net}3} \\ \dots \\ T_{\text{net}n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{net}1} \\ P_{\text{net}2} \\ P_{\text{net}3} \\ \dots \\ P_{\text{net}n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

使用迭代法解矩阵方程即可以得到各条裂缝的修正净压力值, 再根据叠加原理, 多级压裂裂缝诱导应力计算模型。

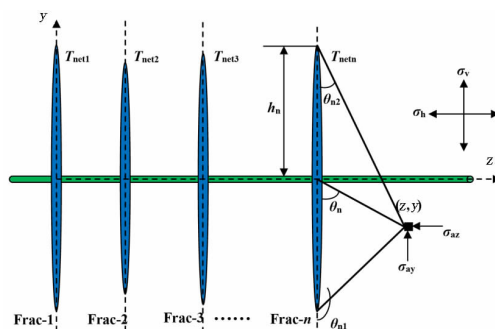


图3 多级压裂裂缝诱导应力分布

根据二维垂直单缝诱导应力计算,可得第  $n$  条水力裂缝在  $z-y$  平面内诱导应力大小为:

$$\sigma_{azn} = -T_{netn} \frac{r_n \sin \theta_n \sin \left[ \frac{3}{2}(\theta_{n1} + \theta_{n2}) \right]}{h_n} \left( \frac{h_n^2}{r_{n1} r_{n2}} \right)^{\frac{3}{2}} - T_{netn} \left[ \frac{r_n \cos \left( \theta_n - \frac{1}{2} \theta_{n1} - \frac{1}{2} \theta_{n2} \right)}{(r_{n1} r_{n2})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right] \quad (11)$$

$$\sigma_{ayn} = T_{netn} \frac{r_n \sin \theta_n \sin \left[ \frac{3}{2}(\theta_{n1} \theta_{n2}) \right]}{h_n} \left( \frac{h_n^2}{r_{n1} r_{n2}} \right)^{\frac{3}{2}} - T_{netn} \left[ \frac{r_n \cos \left( \theta_n - \frac{1}{2} \theta_{n1} - \frac{1}{2} \theta_{n2} \right)}{(r_{n1} r_{n2})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right] \quad (12)$$

$$\sigma_{axn} = \nu(\sigma_{ayn} + \sigma_{azn}) \quad (13)$$

式中,  $\sigma_{axn}$ 、 $\sigma_{ayn}$  和  $\sigma_{azn}$  为先压开第  $n$  条裂缝产生的诱导应力的正应力分量, MPa;  $T_{netn}$  为第  $n$  条裂缝修正净压力, MPa。

根据矢量的叠加原理,先压的  $n$  条裂缝在点  $(z, y)$  处产生的诱导应力的总和可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma_{az} = \sum_{i=1}^n \sigma_{azi} \\ \sigma_{ay} = \sum_{i=1}^n \sigma_{ayi} \\ \sigma_{ax} = \nu \left( \sum_{i=1}^n \sigma_{azi} + \sum_{i=1}^n \sigma_{ayi} \right) \end{cases} \quad 5 \quad (14)$$

### 3 与有限元方法计算结果对比

假设地层中存在两条平行裂缝,两条裂缝缝高为 60 m,壁面净压力为 15 MPa,相距 100 m,地层的泊松比为 0.32。根据圣维南定理<sup>[7-8]</sup>,当地层尺寸超过裂缝尺寸的 6~7 倍之后,可以忽略边界对所研究区域应力分布的影响。因此,选取地层大小为边长 600 m 的正方形。利用 COMSOL 软件,建立起的有限元模型及求解结果见图 4。

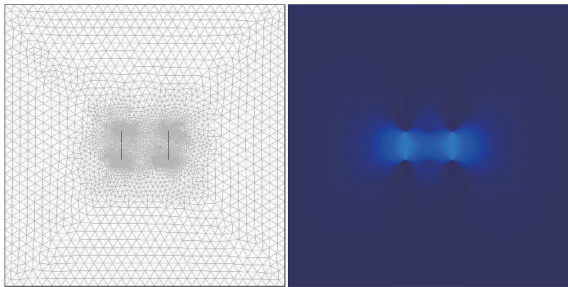


图4 有限元模型及计算结果

两条裂缝在最小水平主应力上的诱导应力大小的模拟结果,计算结果及未修正公式计算结果见

图 5。

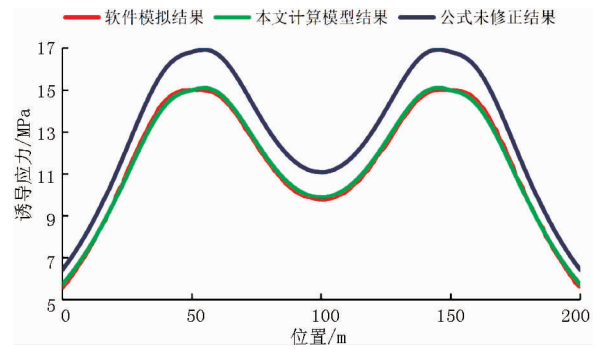


图5 结果对比

从图 5 中很明显可以看出,使用软件模拟的结果与本文中对各裂缝壁面净压力进行优化的公式计算结果较为吻合,而未修正公式的计算结果则与其余两种方法的计算结果有较大的偏差。从而可以说明修正公式的计算具有较高的正确性。

### 4 计算结果与微地震监测数据对比

水平井分段多级压裂实现了储层在长、宽、高方向上的立体改造。现场常规的监测裂缝改造区域的方法是微地震监测法,然而由于其成本较高,不可能保证每一口大型压裂井都进行微地震监测工作。显然,如果裂缝发生了转向就有可能使缝网向垂直于主裂缝的方向扩展,增加改造范围。本节通过使用优化的多级压裂裂缝诱导应力的计算模型,计算了 P1 井裂缝的转向区域,评价裂缝的改造范围,并与微地震监测数据对比,以验证模型的准确性。

#### 4.1 诱导应力对地应力场的影响

在考虑压裂人工裂缝诱导应力影响下,地应力场可以看成是由原地应力场和水力裂缝的诱导应力场叠加,如图 6 所示。

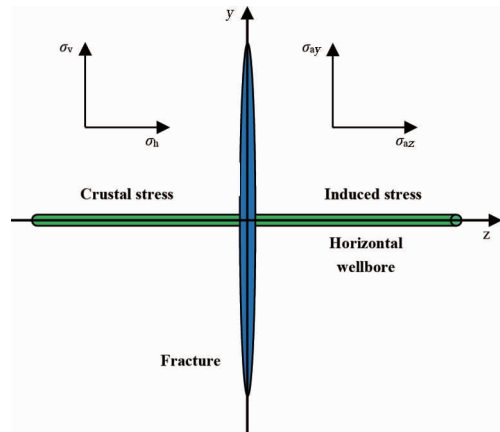


图6 水力裂缝形成后的应力场

据叠加原理,初始裂缝产生后井筒周围的复合

地应力场为:

$$\begin{cases} \sigma_v' = \sigma_v + \sigma_{ay} \\ \sigma_H' = \sigma_H + \sigma_{ax} \\ \sigma_h' = \sigma_h + \sigma_{az} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\sigma_v'$ 、 $\sigma_H'$ 、 $\sigma_h'$  为垂向、最大和最小水平主应力方向上的复合应力, MPa;

$\sigma_{ay}$ 、 $\sigma_{ax}$ 、 $\sigma_{az}$  为垂向、水平最大主应力和水平最小主应力方向上的诱导应力, MPa。

#### 4.2 裂缝的转向条件

水力压裂裂缝总是垂直于最小主应力的方向延伸, 当最小水平主应力和最大水平主应力方向发生反转时, 则可以认为裂缝发生了转向, 即转向条件为

$$\sigma_H' < \sigma_h' \quad (16)$$

水平井多级压裂过程中, 第一级压裂之前由于井筒周围原地应力方向并没有改变, 因此第一级压裂的主裂缝方向是垂直于最小水平主应力的方向的。在之后的压裂过程中, 由于地层中已经存在了压裂裂缝, 因此会在原始水平地应力上附加一个由前几级压裂裂缝产生的诱导应力, 在这种情况下, 水平地应力就可能发生改变。同样的情况, 当前压裂裂缝也会对地应力产生影响。

将公式(15)代入式(16)得

$$\sigma_H + \sigma_{ax} < \sigma_{az} - \sigma_{ax} \quad (17)$$

从式(18)可以看出, 当原始水平地应力差小于诱导应力差时, 裂缝即达到了转向条件。

#### 4.3 P1 井计算结果实例

P1 井是致密砂岩中一口分段压裂水平井, 共分 16 段进行压裂, 为计算压裂的横向改造范围, 对压裂过程进行了如下适当的简化:

- (1) 每一簇射孔孔眼处都能产生一条主裂缝;
- (2) 各级压裂时, 每一簇射孔孔眼处的主裂缝同时形成;
- (3) 主裂缝延伸至最大缝高之后才开始形成缝网。

对 P1 井各段进行计算, 很明显当垂直于压裂主裂缝上的某处的压裂时的诱导应力差大于原始的地应力差时, 则该区域属于被改造的范围。其中第十二级的计算结果如图 7 所示。

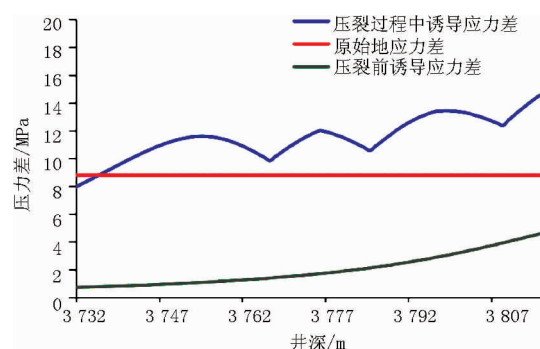


图 7 第十二级压裂诱导应力差计算结果

蓝色线在红色线以上的部分即为压裂在沿着井眼方向的改造范围, 对全井进行计算, 结果见表 1。

表 1 计算结果与监测结果对比

级数	范围/m	计算改造范围/m	微地震监测范围/m	差值/m
第 16 级	3 430 ~ 3 502	62	57	5
第 15 级	3 502 ~ 3 585	55	48	7
第 14 级	3 585 ~ 3 659	81	77	4
第 13 级	3 659 ~ 3 732	83	73	10
第 12 级	3 732 ~ 3 818	73	—	
第 11 级	3 818 ~ 3 886	53	56	3
第 10 级	3 886 ~ 3 952	76	86	10
第 9 级	3 952 ~ 4 025	114	121	7
第 8 级	4 025 ~ 4 100	77	71	6
第 7 级	4 100 ~ 4 190	60	66	6
第 6 级	4 190 ~ 4 285	145	148	3
第 5 级	4 285 ~ 4 370	124	131	7
第 4 级	4 370 ~ 4 450	97	95	2
第 3 级	4 450 ~ 4 535	101	98	3

可见计算数据与微地震数据吻合较好, 说明优化后的诱导应力计算模型有较高的现场应用价值。

(下转至第 86 页)

### 3 结论

随钻探边工具基于电阻率反演方法,是能够深探测地层边界的随钻测井前沿技术,能大幅度提高产层钻遇率,准确定位油气层的井眼轨迹。通过将其应用于精确评价地层构造特征、钻后评价储量复算,扩展随钻探边技术的应用范畴,在东海稀疏井网背景下的低渗气藏中取得较好的效果,为处理构造解释成图、油气藏精细描述、精细储层建模提供帮助,具有较高的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 吴键,胡向阳,李红东,等. 随钻测井探边技术在水平井地质导向中的应用[J]. 钻采工艺,2014,37(03):26-30.
- [2] 张炳军,冯春珍,杨大千,等. 地层评价随钻测井系统在长庆油田的应用[J]. 测井技术,2014,38(02):221-227.
- [3] 王谦,苏波,李震,等. 随钻地质导向在 S7-59H 井中的应用[J]. 断块油气田,2016,23(02):252-257.
- [4] 吴意明,熊书权,李楚吟,等. 探边工具 AziTrak 在开发井地质导向中的应用[J]. 测井技术,2013,37(05):547-551.
- [5] 黄伟,杜林徽. 直罗油田水平井地质导向技术研究及应用[J].

. 化工设计通讯,2018,44(10):57-58.

- [6] 王松坡,刘云阳. Periscope 随钻测井技术在 H844 井的应用[J]. 内蒙古石油化工,2017,43(08):69-71.
- [7] 宋建虎,高晓飞,孙言啟. AziTrak 深方位电阻率边界探测工具在水平井中的应用[J]. 录井工程,2013,24(01):37-41+87.
- [8] 吴意明,郝以岭,熊书权. 边界探测技术在水平井随钻地质导向中的应用[J]. 海洋石油,2013,33(02):89-93+118.
- [9] GRAHAM RAEPER. Optimized well placement increases reserves, case studies from UK and Norway[R]. Bergen: SPE,2007.
- [10] 胡旭飞,范宜仁,吴非,等. 随钻方位电磁波测井多参数快速反演[J]. 地球物理学报,2018,61(11):4690-4701.
- [11] 刘欢,徐锦绣,高文博,等. 基于解释单元的水淹层原始电阻率反演及应用[J]. 地球物理学进展,2019,34(01):144-150.
- [12] 张婷婷,张胜,夏竹,等. 水平井层面构造恢复技术在构造成图校正中的应用[C]//SPG/SEG 北京 2016 国际地球物理会议电子文集. 北京:中国石油学会石油物探专业委员会(SPG)、国际勘探地球物理学家学会(SEG),2016:94-97.
- [13] 刘书强,周海燕,商明,等. 方位密度中子(ADN)成像测井技术及应用[J]. 新疆石油地质,2007(06):775-776.

(编辑 韩 枫)

(上接第 80 页)

### 5 结论

(1)多级压裂裂缝引起的诱导应力不能看作各裂缝所引起诱导应力的简单叠加,应该考虑裂缝之间的相互影响。裂缝净压力引起的诱导应力会改变地应力,从而又会影响裂缝的净压力。据此,可以对各条裂缝的净压力进行修正。得到每条裂缝的净压力之后根据叠加原理可以求得诱导应力分布。

(2)修正模型的计算结果与 COMSOL 有限元软件模拟结果吻合较好,精度较未修正模型有明显提高。

(3)以 P1 井为例使用修正模型计算出的结果与微地震监测结果吻合较好。

(4)多级压裂裂缝诱导应力修正模型的建立为今后多级压裂的设计与优化以及评价压裂裂缝形态提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] RUTLEDGE J T, PHILLIPS W S. Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton

Valley gas field, east Texas[J]. GEOPHYSICS, 2003, 68(2):441-452.

- [2] 唐述凯,李明忠,蔡民辉,等. 重复压裂前诱导应力影响新裂缝转向规律[J]. 断块油气藏,2017,24(4):557-560.
- [3] 倪小明,李阳,赵永超,等. 不同压裂方式诱导应力特征及对缝网改造的影响[J]. 煤炭科学技术,2018,46(6):29-33.
- [4] 邓燕. 重复压裂压新缝力学机理研究[D]. 成都:西南石油大学,2005.
- [5] 尹建. 水平井分段压裂诱导应力场研究与应用[D]. 成都:西南石油大学,2014.
- [6] 刘雨. 多级压裂诱导应力对天然裂缝开启影响研究[D]. 大庆:东北石油大学,2014.
- [7] 陈惠发,AF 萨里普. 弹性与塑性力学[M]. 北京:中文建筑工业出版社,2004:22-35.
- [8] 刘鸿文. 材料力学[M]. 第五版. 上海:高等教育出版社,2011:63-82.

(编辑 韩 枫)