

文章编号: 0253-2697(2012)05-0841-05

# 裂缝性地层射孔井破裂压力计算模型

赵金洲 任 岚 胡永全 王 磊

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 四川成都 610500)

**摘要:**水力压裂是提高低渗透油气藏采收率的重要技术手段,准确地预测压裂井的破裂压力是水力压裂成功实施的关键步骤。目前的破裂压力计算模型基本都是针对均质地层,对于裂缝性地层破裂压力的预测计算一直是个非常复杂的问题。受地层天然裂缝的作用和影响,在裂缝性地层射孔井中水力裂缝可能会发生 3 种破裂模式,分别为沿孔眼壁面岩石本体破裂、沿天然裂缝剪切破裂和沿天然裂缝张性破裂。基于弹性力学和岩石力学理论,结合天然裂缝与孔眼相交的空间位置关系,考虑水力裂缝可能发生的 3 种破裂模式,建立了裂缝性地层射孔井的破裂压力计算模型。实例计算表明,所建立的计算模型能用于准确计算裂缝性地层射孔井的破裂压力,同时也能用于解释裂缝性地层近井地带多裂缝形成机理。

**关键词:**裂缝性地层;射孔井;破裂模式;破裂压力;天然裂缝;多裂缝

**中图分类号:** TE371

**文献标识码:** A

## A calculation model of breakdown pressure for perforated wells in fractured formations

ZHAO Jinzhou REN Lan HU Yongquan WANG Lei

(State Key Laboratory of Oil-Gas Reservoir Geology & Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Hydraulic fracturing is a significant stimulation technique to enhance hydrocarbon recovery from low-permeability reservoirs. The accurate prediction of breakdown pressure of fractured formations is a crucial step to make hydraulic fracturing success. Current calculation models of breakdown pressure are basically designed for homogeneous formations, and it has been a very complicated issue to predict breakdown pressure of fractured formations all the time. Affected by the intersection of natural fractures and perforations, three breakdown modes of hydraulic fractures may occur in perforated wells of fractured formations, namely breakdown along perforated rock bodies, shear breakdown and tension breakdown along natural fractures. Based on elasticity and lithomechanics theories and integrated with relation of natural fractures and perforations, we established a breakdown pressure calculation model for perforated wells in fractured formations by taking the above-mentioned three different breakdown modes into consideration. The calculation result shows that the established model can accurately calculate breakdown pressure of perforated wells in fractured formations and can also explain the extension mechanism of multi-fractures in areas adjacent to wellbore for perforated wells in fractured formations.

**Key words:** fractured formation; perforated well; breakdown mode; breakdown pressure; natural fracture; multi-fractures

破裂压力预测计算对水力压裂优化设计具有重要作用和影响,使得该问题也成为水力压裂理论研究的热点和难点问题。目前的破裂压力计算模型主要是针对均质地层建立的<sup>[1-11]</sup>,金衍等人<sup>[12-13]</sup>考虑裸眼完井条件,首次对裂缝性地层破裂压力进行了研究。事实上,裂缝性地层为了满足后期作业和生产措施的需要,基本以射孔完井为主。鉴于目前对裂缝性地层射孔井破裂压力研究存在的空白,建立了裂缝性地层射孔井的破裂压力计算模型,以期为优化裂缝性地层射孔井的压裂设计提供理论依据。

## 1 物理模型

为了建立裂缝性地层射孔井破裂压力计算的物理模型,作如下假设:①天然裂缝性地层采用射孔完井,天然裂缝面与射孔孔眼相交;②天然裂缝处在主发育带上,具有相同的走向和倾向;③考虑天然裂缝与本体岩石的力学性质存在一定的差异,假设天然裂缝为地层中的结构弱面;④不考虑套管与水泥环之间胶结程度对破裂压力的影响。基于以上假设条件,可得裂缝性地层射孔井破裂压力计算的物理模型如图 1 所示。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 51074138)、国家重大科技专项(2011ZX05014)和中央财政支持地方高校发展专项资金“石油与天然气工程国家一级学科”项目资助。

**第一作者:**赵金洲,男,1962年10月生,1982年毕业于西南石油学院采油工程专业,现为西南石油大学教授、博士生导师,主要从事油气田开采和增产新技术新理论的研究。Email:zhaojz@swpu.edu.cn

**通讯作者:**任 岚,男,1979年10月生,2011年获西南石油大学博士学位,现为西南石油大学讲师,主要从事油气田增产技术及理论方面的研究。Email:ren-ren@swpu.edu.cn

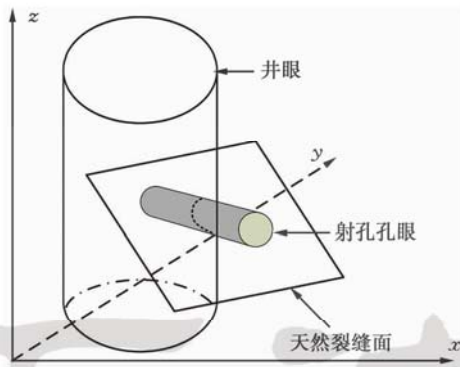


图1 天然裂缝与射孔孔眼相交的物理模型

Fig. 1 The physics model for the intersection between natural fracture and perforated tunnel

## 2 孔眼壁面主应力分布

受上覆岩层压实作用影响,地下埋藏的地层受到3个主应力作用。通常情况下,它们中的两个是相互垂直的水平应力,另一个是垂直应力。当井眼钻完后,原来支撑地应力的岩石被流体取代,这时将在近井区域出现应力集中。由于压裂液很容易流入水泥环与地层岩石之间的裂隙<sup>[14]</sup>,考虑井眼围岩受远场地应力和井底流体压力的联合作用,定义张应力为负,压应力为正,孔眼附近的井眼围岩所受的应力在极坐标系下表示为<sup>[15]</sup>

$$\sigma_r = \frac{r_w^2}{r^2} p_w + \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{r_w^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} - \frac{4r_w^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{r_w^2}{r^2} p_w + \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \left(\frac{r_w}{r}\right)^2 \cos 2\theta \quad (3)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - \frac{3r_w^4}{r^4} + \frac{2r_w^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (4)$$

$$\tau_{z\theta} = \tau_{rz} = 0 \quad (5)$$

式中: $\sigma_H$ 为水平最大地应力,MPa; $\sigma_h$ 为水平最小地应力,MPa; $\sigma_v$ 为上覆地层应力,MPa; $\sigma_r$ 为径向应力,MPa; $\sigma_\theta$ 为周向应力,MPa; $\sigma_z$ 为垂向应力,MPa; $\tau_{r\theta}$ 为剪切应力,MPa; $p_w$ 为井底流体压力,MPa; $r_w$ 为井眼半径,m; $r$ 为井眼极坐标半径,m; $\nu$ 为泊松比,无因次; $\theta$ 为径向上最大地应力方向逆时针旋转的极坐标角, $^\circ$ 。

井眼柱向应力分布能够用来分析裸眼井的起裂压力。但对于套管井,压裂液是通过射孔孔眼与地层相联,水力裂缝只能沿射孔孔眼壁面起裂,因此计算孔眼

壁面的应力分布就变得十分重要。假设射孔孔眼为一个小的裸眼井筒与井眼轴正交<sup>[6]</sup>,孔眼壁面在空间上分别受到水平方向上应力 $\sigma_\theta$ ,垂直方向上应力 $\sigma_z$ 和轴向上应力 $\sigma_r$ ,同时还包括相应的剪应力分量作用。像井眼应力转换一样,射孔孔眼围岩受力及应力转换如图2所示。

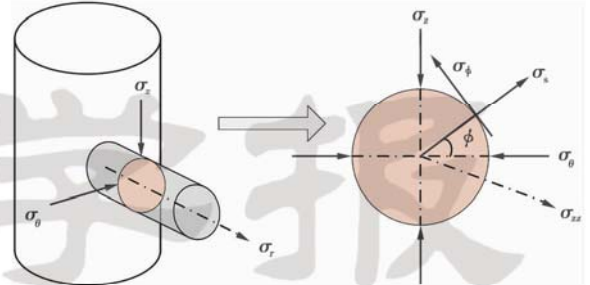


图2 孔眼围岩受力及应力转换

Fig. 2 The stresses acting on perforated tunnel surface and the transformation of stresses

考虑孔眼围岩像井筒围岩一样的应力集中,在井底流体压力和孔眼围岩应力作用下,同时考虑压裂液的渗流效应,很容易推导得到孔眼围岩受到的应力<sup>[16]</sup>。仅仅考虑作用距离为孔眼半径,则孔眼壁面上的径向应力 $\sigma_s$ 、周向应力 $\sigma_\phi$ 和轴向应力 $\sigma_{zz}$ 为

$$\sigma_s = p_w - \varphi(p_w - p_p) \quad (6)$$

$$\sigma_\phi = -p_w + (\sigma_\theta + \sigma_z) - 2(\sigma_\theta - \sigma_z) \cos 2\phi + \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{(1-\nu)} - \varphi\right](p_w - p_p) \quad (7)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_r - 2\nu(\sigma_\theta - \sigma_z) \cos 2\phi + \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{(1-\nu)} - \varphi\right](p_w - p_p) \quad (8)$$

$$\tau_{z\phi} = 2\tau_{r\theta} \sin \phi \quad (9)$$

$$\tau_{s\phi} = \tau_{szz} = 0 \quad (10)$$

式中: $p_p$ 为孔隙流体压力,MPa; $\varphi$ 为地层孔隙度,无因次; $\alpha$ 为有效应力系数,无因次; $\phi$ 为孔眼上主应力 $\sigma_\theta$ 方向逆时针旋转的极坐标角, $^\circ$ 。

式(6)~式(10)组成了孔眼孔壁上任意位置点的三维应力场,由于其中 $\tau_{s\phi}$ 和 $\tau_{szz}$ 为零,则 $\sigma_s$ 为其中的一个主应力,而切向应力 $\tau_{z\phi}$ 不为零。因此,周向应力 $\sigma_\phi$ 和轴向应力 $\sigma_{zz}$ 不是 $\phi$ - $z$ 平面的主应力, $\phi$ - $z$ 平面的主应力可以通过复合应力理论进行计算,可以得到孔眼孔壁上任意点的3个主应力为

$$\sigma_1 = \sigma_s \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_\phi + \sigma_{zz}) + \sqrt{(\sigma_\phi - \sigma_{zz})^2 + 4\tau_{z\phi}^2} \right] \quad (12)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_\phi + \sigma_{zz}) - \sqrt{(\sigma_\phi - \sigma_{zz})^2 + 4\tau_{z\phi}^2} \right] \quad (13)$$



主应力  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  是两个相互垂直应力  $\sigma_\phi$  和  $\sigma_{zz}$  在  $\phi$ - $zz$  平面内旋转一定的角度  $\gamma$  得到,旋转的角度  $\gamma$  正好使得的剪切力  $\tau_{z\phi}$  等于零。由平面复合应力理论可知,平面应力转换计算的旋转角度  $\gamma$  满足以下方程:

$$\tan 2\gamma = \frac{2\tau_{z\phi}}{\sigma_\phi - \sigma_{zz}} \quad (14)$$

求解该方程,可得满足该方程存在两个可能解:

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\phi}}{\sigma_\phi - \sigma_{zz}} \quad (15)$$

$$\gamma_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\phi}}{\sigma_\phi - \sigma_{zz}} \quad (16)$$

可以看出,  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  是  $\phi$ - $zz$  平面内两个主应力的方向,但角  $\gamma$  与主应力的对应关系还需进一步地分析。为了确定主应力与旋转角度的对应关系,引入最大拉伸应力判别的极值函数<sup>[9]</sup>

$$\sigma_{\max}(\gamma) = \frac{1}{2}(\sigma_\phi + \sigma_{zz}) + \frac{1}{2}(\sigma_\phi - \sigma_{zz})\cos 2\gamma + \tau_{z\phi}\sin 2\gamma \quad (17)$$

对式(17)求二阶导数得

$$F(\gamma) = -2(\sigma_\phi - \sigma_{zz})\cos 2\gamma - 4\tau_{z\phi}\sin 2\gamma \quad (18)$$

由于  $F(\gamma_1)$  和  $F(\gamma_2)$  的符号相反,但必有一个是  $F > 0$ ,而另外一个为  $F < 0$ 。可以证明,使得  $F > 0$  的  $\gamma_i$  为较大的主应力  $\sigma_2$  与应力  $\sigma_{zz}$  的夹角。

### 3 破裂压力计算模型

在水力压裂初期的起裂阶段,井底流体压力持续增加,压裂液将在孔眼壁面某位置产生起裂裂缝,但水力裂缝可能沿孔眼壁面的岩石本体破裂,也可能沿天然裂缝破裂。因此,本文破裂压力计算模型包括水力裂缝沿孔眼壁面岩石本体破裂、沿天然裂缝剪切破裂和沿天然裂缝张性破裂 3 种破裂模式。

#### 3.1 沿孔眼壁面岩石本体破裂

射孔孔眼壁面任意点的最大张应力为

$$\sigma(\phi) = \frac{1}{2}[(\sigma_{zz} + \sigma_\phi) - \sqrt{(\sigma_{zz} - \sigma_\phi)^2 + 4\tau_{z\phi}^2}] \quad (19)$$

水力裂缝的破裂点是  $\sigma(\phi)$  取最大值的位置,由于  $\sigma(\phi)$  是关于孔眼周向角  $\phi$  的函数,欲求  $\sigma(\phi)$  最大值,对  $\sigma(\phi)$  求导得

$$\frac{d\sigma(\phi)}{d(\phi)} = 0 \quad (20)$$

通过式(20)可以求得从孔眼壁面岩石本体破裂的孔眼周向角  $\phi_0$  和相应的最大张应力  $\sigma(\phi_0)$ 。根据弹性力学张性起裂准则,孔眼壁面的最大有效张应力小于岩石抗张强度时,岩石发生破裂:

$$\sigma(\phi_0) - \alpha p_p \leq -\sigma_t \quad (21)$$

式中:  $\sigma_t$  为岩石抗张强度,MPa。

#### 3.2 沿天然裂缝剪切破裂

Jaeger 提出了裂隙岩体的强度计算模型<sup>[17]</sup>。将天然裂缝考虑成相比基岩力学性质较弱的结构面,当作用在天然裂缝面上的剪切应力分量大于天然裂缝的抗剪切强度时,天然裂缝发生剪切破裂:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} \geq \frac{2(c + \mu\sigma_{\min})}{(1 - \mu\cot\beta)\sin 2\beta} \quad (22)$$

式中:  $\sigma_{\max}$  为作用在天然裂缝上的最大主应力,MPa;  $\sigma_{\min}$  为作用在天然裂缝上的最小主应力,MPa;  $c$  为天然裂缝内聚力,MPa;  $\mu$  为天然裂缝摩擦系数,无量纲;  $\beta$  为天然裂缝的外法线方向与最大主应力方向夹角,°。

由式(22)可知,天然裂缝发生剪切破裂除了与天然裂缝自身力学性质有关外,还与作用在天然裂缝上的最大主应力、最小主应力以及最大主应力与天然裂缝的夹角有关。为此,首先须要确定天然裂缝与作用在天然裂缝上主应力的相对位置关系,作如下假设:在大地坐标系(N, E, Sky)中,天然裂缝的走向为北偏东  $N_e$  度;天然裂缝倾角  $D_{ip}$  度;水平最大地应力方位为北偏东  $H_a$  度;孔眼方位为以水平最大地应力  $\sigma_{H1}$  方向为起点旋转  $\theta$ ;天然裂缝与孔眼壁面相交点为以主应力  $\sigma_\theta$  方向为起点旋转  $\phi$ 。

根据假设条件,可得在大地坐标系中天然裂缝面法线的方向矢量为

$$\mathbf{n}_1 = a_1\mathbf{i} + a_2\mathbf{j} + a_3\mathbf{k} \quad (23)$$

其中

$$a_1 = -\sin(D_{ip})\cos(N_e)$$

$$a_2 = \sin(D_{ip})\sin(N_e)$$

$$a_3 = \cos(D_{ip})$$

根据以上假设条件,天然裂缝与孔眼壁面相交点的主应力在地应力坐标系中的空间位置关系如图 3 所示,由此可以计算 3 个主应力的方向矢量。

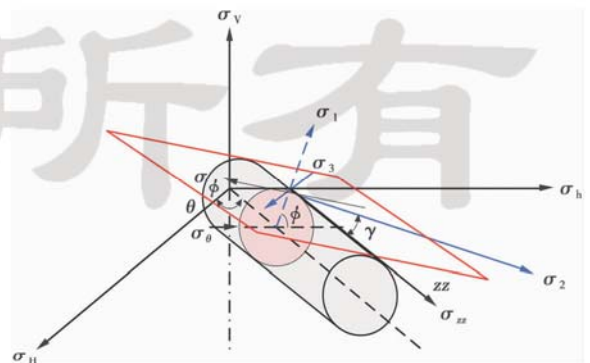


图 3 射孔孔眼壁面主应力在地应力坐标系中的空间位置关系  
Fig. 3 The spatial relationship of principal stresses of perforated tunnel wall in geostress coordinate system

由图 3 中孔眼壁面主应力  $\sigma_1$  的空间方位,可得到主应力  $\sigma_1$  在地应力坐标系中的方向矢量,但需要将地

应力坐标系下的方向矢量转换到大地坐标系下,结合坐标变换原理<sup>[18]</sup>,可得主应力 $\sigma_1$ 在大地坐标系下的方向矢量为

$$n_2(\sigma_1) = b_1(\sigma_1)\mathbf{i} + b_2(\sigma_1)\mathbf{j} + b_3(\sigma_1)\mathbf{k} \quad (24)$$

其中

$$b_1(\sigma_1) = \cos(H_a + \theta)\cos\phi$$

$$b_2(\sigma_1) = \sin(H_a + \theta)\cos\phi$$

$$b_3(\sigma_1) = \sin\phi$$

采用主应力 $\sigma_1$ 方向矢量的计算方法,可得主应力 $\sigma_2$ 在大地坐标系下的方向矢量为

$$n_2(\sigma_2) = b_1(\sigma_2)\mathbf{i} + b_2(\sigma_2)\mathbf{j} + b_3(\sigma_2)\mathbf{k} \quad (25)$$

其中

$$b_1(\sigma_2) = \sin(H_a + \Psi + \theta) \cdot$$

$$\sqrt{\cos^2\gamma + \sin^2\gamma\sin^2\phi}$$

$$b_2(\sigma_2) = -\cos(H_a + \Psi + \theta) \cdot$$

$$\sqrt{\cos^2\gamma + \sin^2\gamma\sin^2\phi}$$

$$b_3(\sigma_2) = -\cos\phi\sin\gamma$$

$$\Psi = \arctan \frac{\sin\phi\sin\gamma}{\cos\gamma}$$

同理,主应力 $\sigma_3$ 在大地坐标系下的方向矢量为

$$n_2(\sigma_3) = b_1(\sigma_3)\mathbf{i} + b_2(\sigma_3)\mathbf{j} + b_3(\sigma_3)\mathbf{k} \quad (26)$$

其中

$$b_1(\sigma_3) = \sin(H_a + \omega + \theta) \cdot$$

$$\sqrt{\sin^2\gamma + \cos^2\gamma\sin^2\phi}$$

$$b_2(\sigma_3) = -\cos(H_a + \omega + \theta) \cdot$$

$$\sqrt{\sin^2\gamma + \cos^2\gamma\sin^2\phi}$$

$$b_3(\sigma_3) = -\cos\phi\cos\gamma$$

$$\omega = \arctan\left(-\frac{\sin\phi\cos\gamma}{\sin\gamma}\right)$$

由于 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 之间的相对大小不能通过数学表达式进行逻辑判断,则它们中的任意一个都可能为最大主应力 $\sigma_{\max}$ ,因此天然裂缝面法线与最大主应力 $\sigma_{\max}$ 的夹角可统一表示为

$$\beta_i = \arccos \frac{|a_1b_1(\sigma_i) + a_2b_2(\sigma_i) + a_3b_3(\sigma_i)|}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \cdot \sqrt{b_1(\sigma_i)^2 + b_2(\sigma_i)^2 + b_3(\sigma_i)^2}} \quad (27)$$

式中: $i=1,2,3$ 。

对天然裂缝与孔眼壁面的相交点,在已知该点位置坐标情况下很容易通过式(11)一式(13)求得该点的主应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ ,通过相对大小关系可计算相交点的最大主应力和最小主应力为

$$\sigma_{\max} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (28)$$

$$\sigma_{\min} = \min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (29)$$

利用式(28)和式(29)计算最大主应力和最小主应力,

再结合式(27)计算最大主应力与天然裂缝面法线的夹角 $\beta_i$ ,代入式(22)即可判断天然裂缝剪切破裂发生的可能性。

### 3.3 沿天然裂缝张性破裂

当天然裂缝内的流体压力大于裂缝面所受的有效压应力时,水力裂缝沿天然裂缝发生张性破裂:

$$p_{nf} \geq \sigma_n - \alpha p_p \quad (30)$$

式中: $p_{nf}$ 为天然裂缝内流体压力,MPa; $\sigma_n$ 为作用在天然裂缝面上的正应力,MPa。

由天然裂缝与孔眼壁面相交点受到的三维主应力,可得到天然裂缝受到的正应力为

$$\sigma_n = \cos^2\beta_1\sigma_1 + \cos^2\beta_2\sigma_2 + \cos^2\beta_3\sigma_3 \quad (31)$$

将式(11)一式(13)、式(27)代入式(31)和式(30)可判断天然裂缝发生张性破裂的可能性。

### 3.4 破裂压力计算

对于裂缝性地层,虽然存在3种不同的破裂模式,但对于具体的特定井,水力裂缝的破裂模式和最终破裂压力完全取决于不同破裂模式下破裂压力的相对大小。假设沿岩石本体破裂压力为 $p_b$ ,沿天然裂缝剪切破裂压力为 $p_t$ ,沿天然裂缝张性破裂压力为 $p_T$ ,则裂缝性地层破裂压力为3种不同破裂模式下破裂压力的最小值为

$$p_f = \min(p_b, p_t, p_T) \quad (32)$$

式中: $p_f$ 为裂缝性地层破裂压力,MPa。

## 4 实例计算与讨论

基于所建立的破裂压力计算模型,选择位于松辽盆地的B59-X井进行分析计算。该井的油气层为火山岩,埋藏深度为1994.8~2013.0m;地层天然裂缝充分发育,根据岩心描述和成像测井得到天然裂缝走向为北偏东45°以及天然裂缝倾角约为20°;采用井壁崩落法得到该井储层水平最大地应力方位为北偏东72°。其他基本参数如表1所示。

表1 破裂压力计算输入基本数据

Table 1 Basic data for the calculation of breakdown pressure

水平最大地应力/MPa	47	水平最小地应力/MPa	39
上覆地层应力/MPa	50	孔隙流体压力/MPa	24
井眼半径/m	0.1	地层孔隙度	0.11
有效应力系数	0.85	岩石泊松比	0.22
岩石抗张强度/MPa	7	孔眼深度/m	0.5
天然裂缝内聚力/MPa	2	天然裂缝内摩擦角/(°)	16

计算可得岩石本体破裂压力 $p_b$ 为39.5MPa,沿天然裂缝剪切破裂压力 $p_t$ 为34.1MPa,沿天然裂缝张性破裂压力 $p_T$ 为30.1MPa。计算结果表明,水力裂缝将沿天然裂缝发生张性破裂。对该井进行了压裂测试,得到该井的实际破裂压力为29.2MPa,计算值



的相对误差为 3.1%,在工程误差许可范围内,证实了文中破裂压力计算模型的正确性和可靠性。

井眼周向上不同方位孔眼的破裂压力计算表明,在水平最大地应力方位孔眼的水力裂缝破裂压力为 30.56 MPa,水平最小地应力方位孔眼的水力裂缝破裂压力为 30.1 MPa。可见,两个极端方位的破裂压力差仅为 0.46 MPa,因此,该井水力压裂时水力裂缝将可能从不同井眼方位的孔眼起裂延伸。根据该井主压裂施工过程中水力裂缝延伸的微地震监测结果,绘出了延伸裂缝分布(图 4)。由图 4 可见,水力压裂施工诱发的近井原生裂缝充分发育,延伸方位分别为北偏东 58°~75°,北偏西 15°,北偏西 28°,可见近井地带具有多裂缝延伸特征,证实了破裂压力计算模型对 B59-X 井水力裂缝沿井眼不同方位孔眼起裂延伸推断的正确性。

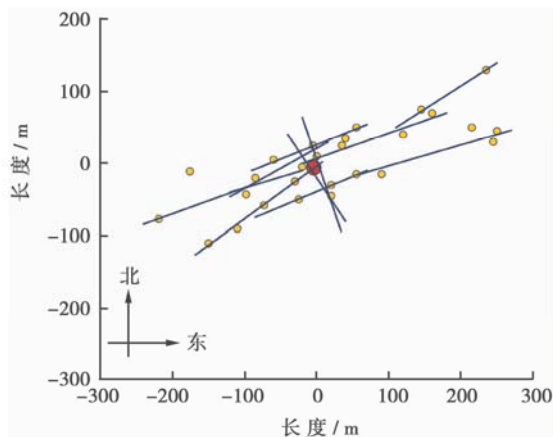


图 4 微地震监测压裂诱发的多裂缝延伸分布

Fig. 4 Distribution of multi-fractures based on micro-seismic monitor of hydraulic fracturing

## 5 结 论

(1) 基于裂缝性地层射孔井水力裂缝可能沿孔眼壁面岩石本体破裂、沿天然裂缝剪切破裂和沿天然裂缝张性破裂的 3 种不同破裂模式,建立了裂缝性地层射孔井的破裂压力计算模型。该计算模型实现了裂缝性地层射孔井破裂压力的定量计算,拓宽了复杂地层条件破裂压力研究领域。

(2) 所建立的破裂压力计算模型不但能精确计算裂缝性地层射孔井的破裂压力,还能用于解释裂缝性地层近井地带多裂缝延伸的物理现象。该计算模型为优化裂缝性地层射孔方案和水力压裂设计提供了理论基础。

### 参 考 文 献

- [1] Hubbert M K, Willis D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Trans AIME, 1957, 210: 153-163.
- [2] Haimson B, Fairhurst C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. SPEJ, 1967, 7(3): 310-318.
- [3] 李传亮,孔祥言. 油井压裂过程中岩石破裂压力计算公式的理论

研究[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(2): 54-56.

Li Chuanliang, Kong Xiangyan. A theoretical study on rock breakdown pressure calculation equations of fracturing process [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(2): 54-56.

- [4] Yew C H, Li Y. Fracturing of a deviated well[R]. SPE 16930, 1987.
- [5] Hossain M M, Rahman M K. Hydraulic fracture initiation and propagation; roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes[J]. J. Pet. Sci. Eng, 2000(27): 129-149.
- [6] Fallahzadeh S H, Shadizadeh S R, Pourafshary P. Dealing with the challenges of hydraulic fracture initiation in deviated-cased perforated boreholes[R]. SPE 132797, 2010.
- [7] Berhmann L A, Elbel J L. Effect of perforations on fracture initiation[J]. JPT, 1991, 43(5): 608-615.
- [8] van de Ketterij R G, de Pater C J. Experimental study on the impact of perforations on hydraulic fracture[R]. SPE 38149, 1997.
- [9] 陈勉, 陈治喜, 黄荣樽. 大斜度井水压裂缝起裂研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1995, 19(2): 30-35.  
Chen Mian, Chen Zhixi, Huang Rongzun. Hydraulic fracturing of highly deviated wells[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1995, 19(2): 30-35.
- [10] 罗天雨, 郭建春, 赵金洲, 等. 斜井套管射孔破裂压力及起裂位置研究[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 139-142.  
Luo Tianyu, Guo Jianchun, Zhao Jinzhou, et al. Study on fracture initiation pressure and fracture starting point in deviated wellbore with perforations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 139-142.
- [11] 张广清, 陈勉. 水平井水力裂缝非平面扩展研究[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 95-97.  
Zhang Guangqing, Chen Mian. Non-planar propagation of hydraulic fracture near horizontal wellbore[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 95-97.
- [12] 金衍, 张旭东, 陈勉. 天然裂缝地层中垂直井水力裂缝起裂压力模型研究[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 113-124.  
Jin Yan, Zhang Xudong, Chen Mian. Initiation pressure models for hydraulic fracturing of vertical wells in naturally fractured formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 113-124.
- [13] 金衍, 陈勉, 张旭东. 天然裂缝地层斜井水力裂缝起裂压力模型研究[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 124-126.  
Jin Yan, Chen Mian, Zhang Xudong. Hydraulic fracturing initiation pressure models for directional wells in naturally fractured formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 124-126.
- [14] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Chen Mian, Jin Yan, Zhang Guangqing. Rock mechanics of petroleum engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [15] Fjaer E, Holt R M, Raaen A M, et al. Petroleum related rock mechanics[M]. 2nd ed. Holland: Elsevier Publications, 2008: 145-147.
- [16] 郭建春, 辛军, 赵金洲, 等. 酸处理降低地层破裂压力的计算分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(2): 83-86.  
Guo Jianchun, Xin Jun, Zhao Jinzhou, et al. The calculation analysis of decreasing formation fracturing pressure by acidizing pretreatment[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(2): 83-86.
- [17] Jaeger J C, Cook N G W, Zimmerman R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- [18] 黄宣国. 空间解析几何[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2004.  
Huang Xuanguo. Spatial analytic geometry[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2004.

(收稿日期 2012-02-08 改回日期 2012-06-25 责任编辑 黄小娟)