

考虑应力干扰的页岩储层裂缝穿透准则

田冷¹, 肖聪¹, 刘明进², 顾岱鸿¹, 李翔龙¹, 宋广宇¹, 丁道权¹

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

摘要 根据页岩储层多裂缝应力干扰效应形成机理,建立了考虑水平有效地应力、裂缝尖端集中应力以及多缝干扰应力影响的页岩储层裂缝穿透准则。模型分析表明:考虑多缝应力干扰效应影响,压裂缝穿过天然裂缝的能力减弱,分段多簇压裂更有利于在页岩储层中形成复杂缝网结构。裂缝越长,裂缝间距越小,天然裂缝分布位置越靠近中间裂缝,缝内净压力越大,导致裂缝间的干扰应力越大。随着压裂缝与天然缝间逼近角的减小,在一定应力比和裂缝内摩擦系数范围内,压裂缝穿过天然裂缝能力减弱,超过一定范围后,压裂缝穿透天然裂缝的能力增强。高应力比条件,裂缝穿透能力基本不受逼近角影响。

关键词 页岩气;应力干扰;压裂;穿透准则;缝网压裂

大型水力压裂改造形成高导流裂缝网络是成功开发非常规页岩气藏的有效手段^[1-3]。Daneshy等^[4],Blanton等^[5]通过室内实验证明水力裂缝与天然裂缝作用机理复杂且应力差,逼近角、胶结强度等是影响水力裂缝与天然裂缝交叉行为的重要因素。国内外学者相继提出了许多判别准则预测水力压裂过程中天然裂缝的张开/剪切滑移行为,Warpinski等^[6],Renshaw等^[7],Gu等^[8]研究垂直裂缝面的交叉行为并提出相应准则。随后,程万等^[9]考虑裂缝倾角对裂缝交叉行为的影响,并提出相应准则。然而,以上准则都是基于单条水力裂缝扩展情况。页岩储层孔渗极低,仅靠单一压裂主缝很难取得预期的增产效果,因此,通常需要运用分段多级压裂或者分段多簇压裂等“缝网压裂”技术提高产能^[10,11]。多裂缝扩展情况,裂缝周围存在“应力影”(stress shadow)效应,其对裂缝的延伸与扩展具有一定的影响。Sneddon等^[12],Crouch等^[13]基于边界元理论提出位移不连续方法(DDM),给出无限缝高二维裂缝周围应力分布解析解,随后,Olson等^[14]通过添加修正因子延伸DDM到有限缝高的三维裂缝扩展情况,使其更符合实际情况。

基于前人穿透理论,本研究引入裂缝应力干扰影响,提出裂缝性页岩储层,多裂缝扩展情况,人工裂缝与天然裂缝穿透准则。分别分析裂缝同时扩展和先后扩展条件的裂缝穿透行为,以及水平地应力差、摩擦系数、裂缝长度、裂缝距离、天然裂缝相对位置等对裂缝穿透行为的影响。

1 压裂缝间应力干扰模型

页岩储层水平井分段压裂过程中,压开的人工裂缝在张开时会在裂缝的2个表面之间发生相互错动,这种错动称为位移不连续,错动的大小称为位移不连续量,张开的裂缝会在其壁面上产生载荷以平衡张开的岩块,同时产生诱导应力场。为了研究方便,建立如图1所示坐标系 (x, y) ,水平井筒方向沿 y 方向,分布 N 条水力裂缝(分段多级压裂),裂缝长度为 L_1, L_2, \dots, L_N ,或者每簇包括 M 条裂缝(分段多簇压裂),裂缝长度为 L_1, L_2, \dots, L_M 。将人工裂缝离散成 m 个边界单元,第 i 条裂缝的第 j 个边界单元的位移不连续量记为 D_x^{ij} 和 D_y^{ij} 。

1.1 应力边界条件

对于分段多级压裂,裂缝分布间距较大,此时相邻两条裂缝应力干扰影响较大,而远端裂缝应力干扰较小,可忽略其影响,因此,考虑前一条压裂缝对本压裂缝的影响,即裂缝条数取为 $N=2$;对于分段多簇压裂,每一段内部多簇裂缝间隔距离小,两种压裂缝之间应力干扰均要考虑裂情况,裂缝边界条件为

分段多级压裂

$$\tau_s^{ij} = 0, \sigma_n^{ij} = -p_N^{ij}, (i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

分段多簇压裂

$$\tau_s^{ij} = 0, \sigma_n^{ij} = -p_N^{ij}, (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中, τ_s^{ij} 为第 i 条裂缝的第 j 个边界单元上的剪应力,MPa; σ_n^{ij}

收稿日期:2015-03-30;修回日期:2015-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51024197)

作者简介:田冷,副教授,研究方向为非常规油气田开发,电子邮箱:tianleng2008@126.com;肖聪(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为非常规油气渗流理论,电子邮箱:18810907235@163.com

引用格式:田冷,肖聪,刘明进,等.考虑应力干扰的页岩储层裂缝穿透准则[J].科技导报,2016,34(2):167-172;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.027

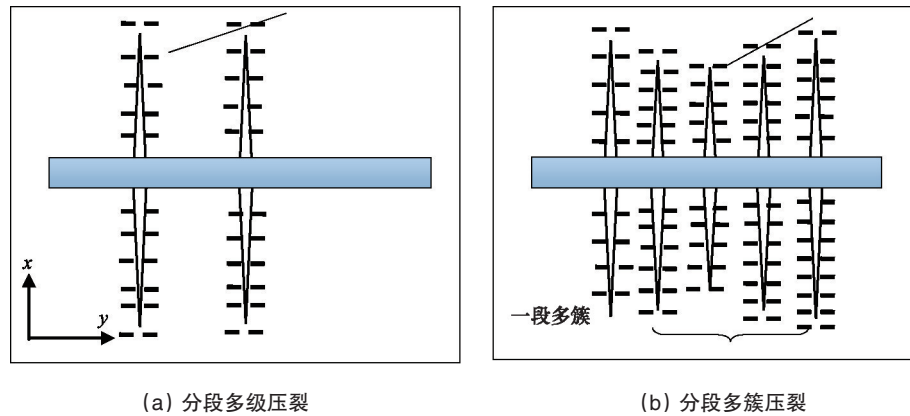


图1 页岩储层压裂缝及其离散示意

Fig. 1 Illustration of discretion of fractures

为第*i*条裂缝的第*j*个边界单元上的正剪应力,MPa; p_N^i 为第*i*条裂缝内的静压力,MPa。

裂缝内部受到压裂液压力的作用,为考虑裂缝内部流体压力不均匀分布影响,类似于PKN模型缝内压力分布原理,假设第*i*条人工裂缝内部压力分布表达式为

$$P_N^i(x,y) = P_0^i(1 - |x|/L_i)^{0.25} \quad (3)$$

1.2 多裂缝干扰应力模型

根据Olson方法,考虑裂缝有限高度条件,第*i*条裂缝的第*j*个边界单元的位移不连续量 D_n^{ij} 和 D_s^{ij} 在地层中任一点(*x*, *y*)处产生的诱导应力为

$$\begin{cases} \sigma_n(x,y) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{xx} D_n^{ij} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{yy} D_s^{ij} \\ \sigma_s(x,y) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{yx} D_n^{ij} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{xy} D_s^{ij}, (k=2 \text{ 或者 } M) \\ \tau(x,y) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{sx} D_{i,jn} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{sy} D_{i,js} \end{cases} \quad (4)$$

式中, A_{xx} 、 A_{xy} 、 A_{yx} 、 A_{yy} 以及 A_{sx} 、 A_{sy} 的表达式为

$$\begin{aligned} A_{xx} &= 2G[2f_{xy} + \bar{y}f_{yyy}], A_{yy} = 2G[-f_{xx} + \bar{y}f_{yyy}] \\ A_{yx} &= 2G[-\bar{y}f_{xyy}], A_{xy} = 2G[f_{yy} - \bar{y}f_{yyy}] \\ A_{sx} &= 2G[f_{yy} + \bar{y}f_{yyy}], A_{sy} = 2G[-\bar{y}f_{xyy}] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, f_{xy} 、 f_{xx} 、 f_{xyy} 、 f_{yyy} 分别是函数 $f(x,y)$ 的二阶和三阶偏导数。 $f(x,y)$ 的表达式为

$$f(x,y) = \frac{1}{4(1-\nu)\pi} \left[y \left(\arctan \frac{y}{x-a} - \arctan \frac{y}{x+a} \right) - (x-a) \ln \sqrt{(x-a)^2 + y^2} + (x+a) \ln \sqrt{(x+a)^2 + y^2} \right] \quad (6)$$

式中, G 为剪切模量,MPa; a 为裂缝离散边界单元的半长,m。

1.3 干扰应力模型求解

当将地层中任一点(*x*, *y*)取在裂缝离散边界单元的中点时,结合方程(4)~(6),可以形成 $N \times m$ (分段多级压裂)或者 $M \times m$ (分段多簇压裂)阶封闭的闭合线性方程组。再结合边界条件(1)和(2)从而求解出所有离散边界元的不连续位移 D_n^{ij} 和 D_s^{ij} ;最后根据求得的位移不连续量求出地层任意位置的

应力。

假设与天然裂缝交叉的水力裂缝尖端处的坐标为(x_F , y_F),则裂缝离散边界单元不连续位移量在此形成的应力为

$$\begin{cases} \sigma_{Fn} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{xx} D_n^{ij} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{yy} D_s^{ij} \\ \sigma_{Fs} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{yx} D_n^{ij} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{xy} D_{i,js}, (k=N \text{ 或者 } M) \\ \tau_F = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{sx} D_{i,jn} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{sy} D_{i,js} \end{cases} \quad (7)$$

则,水力裂缝干扰应力场作用在天然裂缝尖端,*y*轴方向上的最大应力为

$$\sigma_{inter,y} = \sigma_{Fn} \quad (8)$$

进一步,水力裂缝干扰应力场作用在天然裂缝上的正应力和剪应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_{inter,\beta n} = \frac{\sigma_{Fs} + \sigma_{Fn}}{2} + \frac{\sigma_{Fs} - \sigma_{Fn}}{2} \cos 2\beta + \tau \sin 2\beta \\ \sigma_{inter,\beta s} = \frac{\sigma_{Fs} + \sigma_{Fn}}{2} - \frac{\sigma_{Fs} - \sigma_{Fn}}{2} \cos 2\beta - \tau \sin 2\beta \\ \tau_{inter,\beta} = -\frac{\sigma_{Fs} - \sigma_{Fn}}{2} \sin 2\beta + \tau \cos 2\beta \end{cases} \quad (9)$$

2 页岩储层缝网压裂穿透准则建立

页岩气藏“缝网压裂”技术包括分段多级压裂和分段多簇压裂等。分段多级压裂过程,分段先后依次射孔,压裂缝先后依次延伸扩展,而分段多簇压裂过程,每一段多簇射孔,每簇压裂缝同时扩展(图1)。以页岩储层水平主应力(σ_H , σ_h)方向为坐标轴建立平面坐标系*x-y*,为分析裂缝延伸过程力学条件,做如下其他假设:

1) 压裂缝从井筒起裂,裂缝延伸方向平行于最大水平主应力方向 σ_H ,人工裂缝相互平行,人工裂缝和天然裂缝均为垂直缝;

2) 考虑井筒中的压力损失,分段多级压裂人工裂缝条数为*N*,分段多簇压裂每簇缝条数为*M*,近似假设各条人工裂缝中间流体净压力分别为 p^i ($i=1, 2, \dots, M$),且 $p^1 > p^2 > \dots > p^M$;

3) 考虑人工裂缝周围存在一条天然裂缝,并与其中一条人工裂缝交叉,天然裂缝与人工裂缝夹角为 θ 。

页岩气藏压裂过程,裂缝扩展主要受远场水平地应力(σ_H, σ_h)、裂缝尖端塑性区的集中应力及多裂缝干扰应力。因此,人工裂缝和天然裂缝交叉点总应力是以上3种应力的矢量叠加。根据Gu等^[8]以及程万等^[9]的理论,可以分别得到应力集中和远场水平地应力引起的水力裂缝尖端附近应力。

应力集中效应引起的水力裂缝尖端应力场作用在天然裂缝上的正应力和剪应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_{tip,\beta r} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \cos \frac{\beta}{2} - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \frac{\sin \beta}{2} \sin \frac{3\beta}{2} \cos 2\beta + \\ \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \frac{\sin \beta}{2} \cos \frac{3\beta}{2} \sin 2\beta \\ \sigma_{tip,\beta \beta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \cos \frac{\beta}{2} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \frac{\sin \beta}{2} \sin \frac{3\beta}{2} \cos 2\beta - \\ \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \frac{\sin \beta}{2} \cos \frac{3\beta}{2} \sin 2\beta \\ \tau_{tip,\beta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \frac{\sin \beta}{2} \sin \frac{3\beta}{2} \sin 2\beta + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} \frac{\sin \beta}{2} \cos \frac{3\beta}{2} \cos 2\beta \end{cases} \quad (10)$$

式中, K_I 为第一类强度因子, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; $\sigma_{tip,\beta r}$ 、 $\sigma_{tip,\beta \beta}$ 和 $\tau_{tip,\beta}$ 为柱坐标下三向主应力,MPa; r, β 分别为柱坐标下距离裂缝尖端距离和沿 x 轴正方向顺时针转过的角度,单位为m和($^\circ$)。

远场水平地应力场作用在天然裂缝上的正应力和剪应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_{remote,\beta r} = -\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\beta \\ \sigma_{remote,\beta \beta} = -\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\beta \\ \tau_{remote,\beta} = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\beta \end{cases} \quad (11)$$

综合考虑以上3种应力作用机制,根据3种应力线性叠加原理,得到裂缝尖端处, y 轴方向的总最大应力 σ_{max} 以及天然裂缝面上总的正应力 σ_n 和剪应力 τ_s 为

$$\begin{cases} \sigma_{max} = \sigma_{tip,y} |_{\alpha=0} + \sigma_{remote,y} |_{\alpha=0} + \sigma_{inter,y} \\ \sigma_n = \sigma_{tip,\beta \beta} + \sigma_{remote,\beta \beta} + \sigma_{inter,\beta \beta} \\ \tau_s = \tau_{tip,\beta} + \sigma_{remote,\beta \beta} + \tau_{inter,\beta} \end{cases} \quad (12)$$

人工裂缝穿过天然裂缝需要满足2个条件:1) 最大应力等于岩石抗张强度 T_0 ;2) 天然裂缝面上的剪切力小于剪切破坏的条件。即

$$\begin{cases} \sigma_{max} = T_0 \\ |\tau_s| < S_0 - \mu \sigma_n \end{cases} \quad (13)$$

由约束条件1)可以求得 $K = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}}$,带入约束条件2),从而得到考虑裂缝干扰条件的交叉准则。这里得到的是穿透准则的隐式形式。 K 式为

$$K = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_c}} = \sigma_h + T_0 - \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{xx} D_{i,jn} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m A_{xy} D_{i,jk} \right) \quad (14)$$

3 算例分析

综合式(13),式(14)给出了考虑页岩气缝网压裂条件裂缝应力干扰的穿透准则。以下分析所用的基础数据为:最大水平主应力 σ_H 为45 MPa,最小水平主应力 σ_h 为35 MPa,泊松比 ν 为0.25,杨氏模量 E 为25000 MPa,抗张强度 T_0 为10 MPa,抗剪强度 S_0 为8 MPa。为验证该模型的合理性,现将该准则与Gu准则、程万准则进行比较。

3.1 穿透准则模型对比

Renshaw等^[7]、Gu等^[8]、程万等^[9]针对单裂缝扩展情况,基于不同的岩石破坏条件,提出相应准则。Renshaw仅考虑天然裂缝与人工裂缝逼近角为 90° ,天然裂缝面上垂直于裂缝延伸方向上的最大张力作为岩石破坏条件;Gu延伸Renshaw准则到任意逼近角度,且考虑裂缝面上最大水平主应力作为岩石破裂条件;程万等考虑压裂缝延伸方向最大张力作为破裂条件,并考虑天然裂缝倾斜影响。沿用程万等提出的岩石破裂条件,同时考虑多裂缝应力干扰影响。当逼近角 $\theta=90^\circ$,各交叉准则如下:

$$\left. \begin{cases} \text{程万准则} & \frac{S_0 + \sigma_H}{T_0 + \sigma_h} > 0.35 + \frac{0.35}{\mu} \end{cases} \quad (15)$$

$$\left. \begin{cases} \text{Renshaw准则} & \frac{\sigma_H}{T_0 + \sigma_h} > \frac{0.35 + \frac{0.35}{\mu}}{1.06} \end{cases} \quad (16)$$

$$\left. \begin{cases} \text{本准则} & \frac{S_0 + \sigma_H}{T_0 + \sigma_h} > 0.35 + \frac{0.35}{\mu} + \frac{\sigma_{fs}}{\sigma_h} \end{cases} \quad (17)$$

得到以上3种准则的水平主应力比(σ_H/σ_h)与岩石摩擦系数 μ 之间关系(图2)。分析图2可知,考虑裂缝之间应力干扰影响,由于其他裂缝在裂缝尖端产生附加的压应力,使得人工裂缝穿过天然裂缝的能力变差。在高水平应力比条件下,裂缝交叉准则基本相同,说明高应力比条件下,压裂缝与天然裂缝的穿透行为主要受水平地应力的控制,其他相关因素影响较小。

3.2 影响因素分析

3.2.1 压裂方式

页岩气藏缝网压裂方式主要包括分段多级压裂和分段多簇压裂。其中分段多级压裂是依次先后压开水力裂缝,即先压裂缝会对后压裂缝产生干扰,而后压裂缝不会影响先压

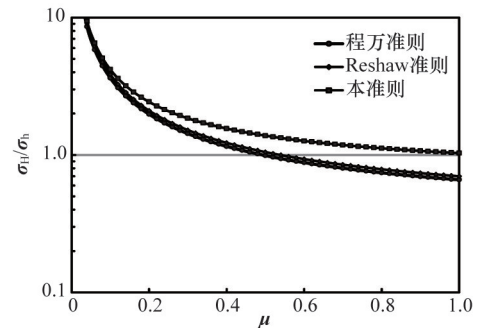


图2 各准则之间对比关系示意
Fig. 2 Comparison of different criteria

裂缝;分段多簇压裂是同时压开多条裂缝,裂缝延伸过程中相互干扰。

分析图3,分段多级压裂时,水力裂缝穿透天然裂缝的能力更强,并且在低应力差以及高的摩擦系数条件下,差异更加明显。分析其原理,分段多簇压裂时,所有裂缝之间相互干扰,裂缝尖端处产生的阻碍裂缝张开的附加应力更大,导致人工裂缝不易穿过天然裂缝,而是沿着天然裂缝发生转向,并在一定位置再次起裂延伸,这样可以沟通并开启更多的天然裂缝,从而形成缝网结构。这就是分段多簇压裂更易形成缝网的原因。

3.2.2 裂缝参数

分段多簇压裂有利于页岩储层压裂形成缝网结构,因此,下面主要针对分段多簇压裂条件,对相关裂缝参数进行分析。主要包括裂缝长度、裂缝间距、天然裂缝相对位置以及逼近角。

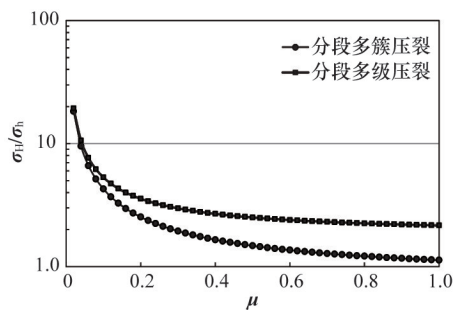


图3 压裂方式对穿透准则影响

Fig. 3 Impacts of fracturing pattern on crossing criterion

图4分析天然裂缝长度对穿透准则的影响。取裂缝长度 $L_f=50、100、150$ m。随着压裂缝长度的增大,穿透准则临界线上移,压裂缝穿过天然裂缝,而不沿着天然裂缝发生转向的能力提高。另一方面,人工裂缝长度代表了天然裂缝到井筒的距离,说明,井筒位置离裂缝发育带太近,并不利于形成缝网结构。

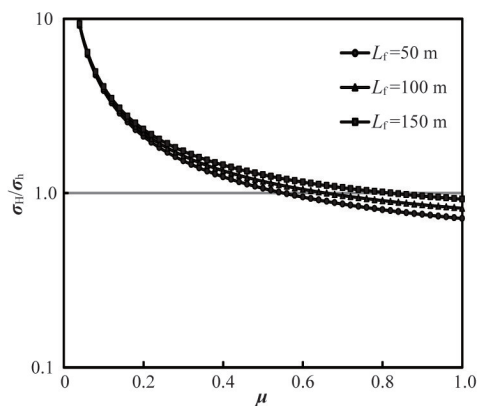


图4 水力裂缝长度对穿透准则影响

Fig. 4 Impacts of fracture length on crossing criterion

图5分析了人工裂缝间距对穿透准则的影响。取裂缝间距 $L=20、40、60$ m。随着压裂缝间距的增大,裂缝之间的干扰应力影响减弱,压裂缝尖端的诱导应力减小,穿透准则临界线下移,压裂缝趋向于沿着天然裂缝发生转向延伸,从而连接更多的天然裂缝。因此,分段多簇压裂,每段射孔密度越大,裂缝间距越小,越有利于形成缝网结构。

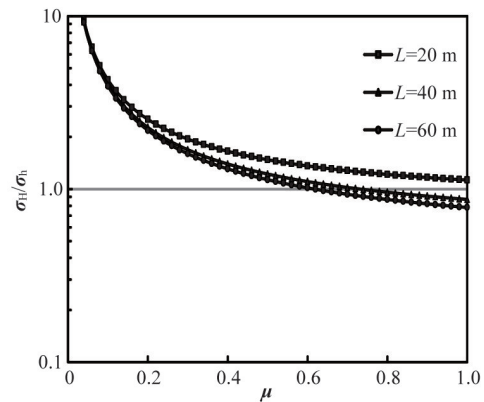


图5 水力裂缝间距对穿透准则影响

Fig. 5 Impacts of fracture distance on crossing criterion

图6分析了天然裂缝相对位置对穿透准则的影响。图6(a)取5条等长压裂缝,图6(b)取非等长裂缝(中间短,两边长)。分别假设外边裂缝(第1或者5条裂缝)、次边裂缝(第2或者4条裂缝)以及中间裂缝(第3条裂缝)与天然裂缝相交。可以得到,裂缝等长时,外边裂缝受其他裂缝干扰的影响最小,较内部裂缝更容易穿透天然裂缝,内部裂缝受应力干扰影响比较均匀。裂缝非等长情况,3种天然裂缝分布条件下,压裂缝穿透能力相同,这样在整个压裂范围(包括边缝),应力干扰影响均匀,更有利于形成缝网。

图7分析了压裂缝内部净压力对穿透准则的影响。取净压力 $p_0=2、4、6$ MPa。可以发现,随着缝内静压力的增加,压裂缝穿过天然裂缝的能力减弱,这有别于我们的常规认识,分析其原因,缝内压力增大,按照裂缝扩展原理,裂缝缝宽增大,裂缝不连续位移量增大,这样导致裂缝之间干扰应力增强,反而导致裂缝更难穿过天然裂缝。因此,高的净压力,一方面有利于增大裂缝宽度和导流能力,另一方面,有利于压裂缝沿天然裂缝延伸,形成复杂的裂缝网络。

图8分析逼近角对穿透准则的影响。取逼近角 $\theta=90^\circ、60^\circ、45^\circ、30^\circ$ 。可以发现,逼近角等于 90° ,裂缝穿透能力是最强的。随着逼近角的减小,在一定地应力比和裂缝摩擦系数范围内,压裂缝穿过天然裂缝能力减弱,超过一定范围后,压裂缝穿过天然裂缝的能力增强, $\theta=30^\circ$ 与 $\theta=30^\circ$,临界摩擦系数为0.4; $\theta=30^\circ$ 与 $\theta=45^\circ$,临界摩擦系数为0.6。对于高应力比条件,基本不受逼近角影响,裂缝穿透能力大致相同。

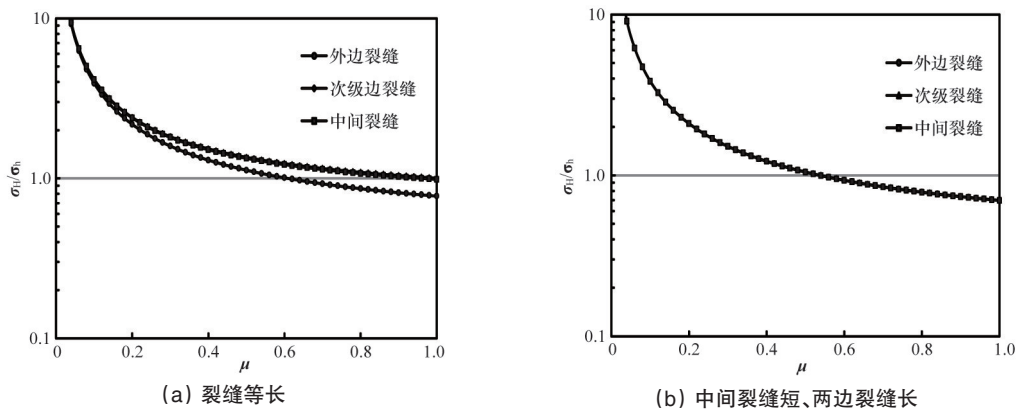


图6 天然裂缝相对位置对穿透准则影响

Fig. 6 Impacts of relative position of natural fractures on crossing criterion

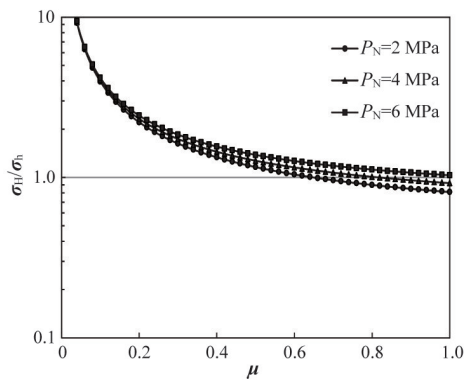


图7 水力裂缝净压力对穿透准则影响

Fig. 7 Impacts of net pressure on crossing criterion

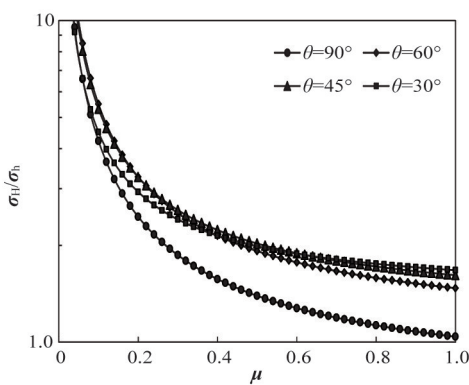


图8 逼近角对穿透准则影响

Fig. 8 Impacts of intersection angle on crossing criterion

4 结论

1) 建立了考虑远场地应力,裂缝尖端应力集中效应以及

缝间应力干扰效应的页岩储层裂缝穿透准则;

2) 通过与Renshaw准则,程万准则对比,考虑多缝扩展应力干扰效应影响,压裂缝穿过天然裂缝的能力减弱,有利于形成复杂缝网结构;

3) “缝网压裂”技术包括分段多级压裂和分段多簇压裂,基于提出的穿透准则分析,分段多簇压裂更有利于在裂缝发育型页岩储藏中形成缝网结构;

4) 裂缝长度,裂缝间距,天然裂缝相对位置,缝内净压力以及逼近角等参数影响压裂缝与天然裂缝的穿透行为。分析得到,裂缝长度越大,裂缝间距越小,天然裂缝分布越靠近中间裂缝,缝内净压力越大,压裂缝穿透天然裂缝能力减弱,有利于压裂缝开启天然缝,形成复杂缝网结构;与单缝扩展行为不同,由于受到多缝应力干扰的影响,随着逼近角的减小,在一定地应力比和裂缝摩擦系数范围内,压裂缝穿过天然裂缝能力减弱,超过一定范围后,压裂缝穿透天然裂缝的能力增强。高应力比条件,逼近角影响较小,裂缝穿透能力大致相同。

参考文献 (References)

[1] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.

[2] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 等. 非常规油气藏体积改造技术: 内涵、优化设计与实现[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 352-358.
Wu Qi, Xu Yun, Wang Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: Connotation, optimization design and implementation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 352-358.

[3] 赵金洲, 李勇明, 王松, 等. 天然裂缝影响下的复杂压裂裂缝网络模拟[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 68-73.
Zhao Jinzhou, Li Yongming, Wang Song, et al. Simulation of a complex fracture network influenced by natural fractures[J]. Natural Gas

- Industry, 2014, 34(1): 68-73.
- [4] Daneshy A A. Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness[C]. SPE European Spring Meeting, Amsterdam, Netherlands, May29-30, 1974.
- [5] Blanton T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[R]. SPE 10847, Presented at the SPE Unconventional Gas Recovery Symposium, Pittsburgh, Pennsylvania, 1982.
- [6] Warpinski N R, Teufel L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation (includes associated papers 17011 and 17074)[J]. Journal of Petroleum Technology, 1987, 39(2): 209-220.
- [7] Renshaw C E, Pollard D D. An experimentally verified criterion for propagation across unbounded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(3): 237-249.
- [8] Gu H, Weng X. Criterion for fractures crossing frictional interfaces at nonorthogonal angles[R]. Salt Lake City: ARMA, 2010.
- [9] 程万, 金衍, 陈勉, 等. 三维空间中水力裂缝穿透天然裂缝的判别准则[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 336-340.
Cheng Wan, Jin Yan, Chen Mian, et al. A criterion for identifying hydraulic fractures crossing natural fracture in 3D space[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 336-340.
- [10] 曾凡辉, 郭建春, 刘恒, 等. 致密砂岩气藏水平井分段压裂优化设计与应用[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 959-968.
Zeng Fanhui, Guo Jianchun, Liu Heng, et al. Optimization design and application of horizontal well staged fracturing in tight gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 959-968.
- [11] 陈作, 薛承瑾, 蒋廷学, 等. 页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 30-32.
Chen Zuo, Xue Chengjin, Jiang Tingxue, et al. Proposals for the application of fracturing by stimulated reservoir volume (SRV) in shale gas wells in China[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 30-32.
- [12] Sneddon I N. The distribution of stress in the neighborhood of a crack in an elastic solid[C]//Proceedings of Royal Society, Series A, London: 1946, 187: 229-260.
- [13] Crouch S L, Starfield A M. Boundary element methods in solid mechanics [M]. London: George Allen & Unwin Ltd, 1983.
- [14] Olson J E, Arash D T. Modeling simultaneous growth of multiple hydraulic fractures and their interaction with natural fractures[C]. SPE-119739-MS, SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Woodlands, Texas, January 19-21, 2009.

A crossing criterion of hydraulic fracture in shale gas reservoir with consideration of stress interference

TIAN Leng¹, XIAO Cong¹, LIU Mingjin², GU Daihong¹, LI Xianglong¹, SONG Guangyu¹, DING Daoquan¹

1. Petroleum Engineering College, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. School of Geoscience and Technology, Southwest University of Petroleum, Chengdu 610500, China

Abstract Based on the formation mechanisms of stress interference of multi-fractures induced by network fracturing in shale gas reservoirs, this paper establishes a crossing criterion with consideration of remote stress, stress intensity near the tip of fracture and stress interference of multi-fractures. The results of model analysis illustrate that the ability of hydraulic fractures to cross natural fractures decreases under impact of stress interference of multi-fractures; Meanwhile, the net fracture pressure was higher when the fracture was longer, the distance between fractures was shorter, and the natural fracture was closer to the intermediate fracture, leading to larger interference stress between fractures. With decrease of the intersection angle between the hydraulic fractures and natural fractures, the ability of the former to cross the latter decreased within a certain range of stress ratio and friction coefficient, and increased when the stress ratio and friction coefficient were beyond this range. The crossing ability is not affected by the intersection angle under high stress ratios. These results may provide references for practical fracturing stimulation of shale gas reservoirs.

Keywords shale gas; stress interference; fracturing; crossing criterion; network fracturing

(责任编辑 赵业玲)