

砂岩储层裂缝在水力压裂作用下扩展准则及其应用

谢 军,朱哲明*,胡 荣

(四川大学 建筑与环境学院,四川 成都 610065)

摘 要:为研究不同储层裂缝方向以及井网布置下的油田合理注水压力,基于多孔介质力学及断裂力学理论建立了含共线裂缝岩体储层裂缝的扩展模型及注水压力计算模型。结合头台油田扶余储层参数探讨了储层裂缝方位、注采井方位及裂缝距注水井距离对注水压力的影响规律。结果表明:在给定的注采井方位下,当裂缝与最大主应力方向平行时,注水压力最小,随着裂缝与最大主应力夹角的增大,注水压力也逐渐增大,当裂缝与最小主应力方向平行时压力最大;注水压力随注采井方位及裂缝距注水井距离的增大而增大。为避免油井出现暴性水淹及提高油田采收率,针对扶余储层给出了一个合理的注水压力范围值。研究结果与实际工程测井数据较吻合,对同类油田开发具有指导意义。

关键词:共线裂缝;水力压裂;地层压力;裂缝性油藏;应力强度因子

中图分类号:TE348

文献标志码:A

Propagation Criterion and Application of Sandstone Reservoir Fractures Under Hydraulic Fracturing

XIE Jun, ZHU Zheming*, HU Rong

(College of Architecture and Environment, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to investigate the rational injection pressure with different orientation of natural fractures and injection-production pattern, a reservoir fracture propagation model with collinear fractures was established on the base of porous medium mechanics and fracture mechanics, and a calculation method of injection pressures was presented. Fuyu reservoir properties were applied to discuss the influence rules of reservoir fractures azimuth, injection-production well azimuth and fracture distance on water injection pressure. The results showed that under the given injection-production well azimuth, if the natural fractures are parallel to the major principal stress, the injection pressure is minimum. As the angle between natural fractures and the minor principal stress increases, the injection pressure decrease accordingly. When the natural fractures are parallel to the minor principal stress, the injection pressure is maximum, and the injection pressure increases with the injection-production well azimuth and fracture distance increases. For the sake of preventing water channeling to production well and enhancing recovery, a rational injection pressure range was proposed according to Fuyu reservoir parameters. The results were identical with practical logging data, which has a guiding significance for similar oilfield development engineering.

Key words: collinear fractures; hydraulic fracturing; formation pressure; fractured reservoir; stress intensity factor

在低渗透裂缝性油气藏开发中,水力压裂作为提高油气田采收率的技术手段,在国内外得到了广泛应用^[1-3]。由于天然裂缝的抗张拉强度很低,在一定注水压力下,天然裂缝会首先起裂、扩展,并相

互连通,形成有效的渗流通道。裂缝的渗透系数是岩石基质渗透系数的几十甚至上百倍,因此这将极大地降低油气渗流阻力,增大储层的有效渗透系数,从而提高油气田采收率。但当注水压力超过一定阈

收稿日期:2015-02-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB732005);四川省科技计划项目资助(2014JY0002);油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助项目(PLN1202)

作者简介:谢 军(1985—),男,博士生.研究方向:油气田开发工程及岩土工程. E-mail:ambitiousxfeng@163.com

*通信联系人 E-mail:zhemingzhu@hotmail.com

值时,在注采井之间易形成贯通性裂缝,注入水沿裂缝快速窜流到油井而造成暴性水淹。低渗透裂缝性油气藏天然裂缝的密度、方位、几何特征及注水压力作用下的裂缝起裂、扩展是影响油气田注水开发效果的主要因素。

在低渗透裂缝性油藏开发中,工程师最关心如何确定裂缝起裂、扩展条件,并估算出注水压力的上下限,为油田的开发提供理论指导。目前国内外学者对水力压裂作用下井壁围岩破裂及天然裂缝的起裂、扩展做了大量研究。Hubbert等^[4]首次研究了水力压裂过程中构造应力对井壁破裂压力及水力裂缝扩展方向的影响。Zhu^[5]给出了2维受均布荷载作用下的共线裂缝扩展准则。王超等^[6]在考虑水压作用的基础上,结合Mises和D-P屈服准则建立了一种新的裂缝起裂、扩展准则,该准则在预测裂纹起裂角方面具有较高精度。苏玉亮等^[7]利用数值模拟方法分析了存在天然裂缝条件下的注水开采效果,并着重研究了天然裂缝的密度、方向及长度等性质对油藏开采效果的影响。Guo^[8]应用F-RFPA2D分析软件,研究了注水压力条件下的注水孔大小和形状、岩样强度及应力条件等对裂缝扩展形态的影响。Keshavarzi等^[9]首次利用扩展有限元法(extended finite element method, XFEM)对水力裂缝的扩展及与天然裂缝的相互作用进行分析。Zhou等^[10]采用三轴伺服机再现了水力压裂的全过程,研究了不同水平应力、天然裂缝角度及剪切强度对裂缝扩展的影响,指出原地应力和天然裂缝是控制水力裂缝几何形状的主要因素。

受构造时期应力场分布的影响,天然裂缝的发育往往具有一定的规律性,即同地质时期形成的裂缝相互平行或共线^[11]。如何依据天然裂缝的分布规律,合理选择井网布置方式及确定注水压力是当前油气田开发工程中的一个重要课题。目前,基于共线裂缝扩展下的注水压力还没有比较成熟的计算公式,作者基于断裂力学等理论研究了共线裂缝在水力压裂作用下的扩展机理并初步估算水力压裂作用下的注水压力,研究成果对工程应用具有一定实际意义。

1 裂缝性油藏计算模型

将储层岩体视为各向同性双重孔隙介质,满足混合物理论一般假定和连续性假定。考虑地层压力和渗流作用等对井壁围岩的影响,给出一个基于弹性理论和有效应力概念的注水井井壁周围应力场分

布模型,从而为储层裂缝的起裂、扩展分析提供理论支撑。

在不考虑温度应力的情况下,水力压裂过程中裂缝性油藏注水井周围岩体水平方向的总应力场可以看作以下几种应力场的叠加:1)原始地应力,即未扰动远场地应力场;2)井底液压产生的应力场;3)压裂液渗滤引起的应力场;4)孔隙及微裂缝稳定渗流场引起的应力场。

1.1 原始水平地应力

地应力是研究天然裂缝起裂、扩展的基础,古地应力场的方向决定了天然裂缝的发育方向。在注水压力作用下的现今地应力方向决定了裂缝的扩展方向,所以对地应力场的探究是研究压裂天然裂缝提高油田采收率至关重要的一项内容。现今地应力的大小和方向是天然裂缝起裂压力、起裂方位角,即起裂形态的重要参数。

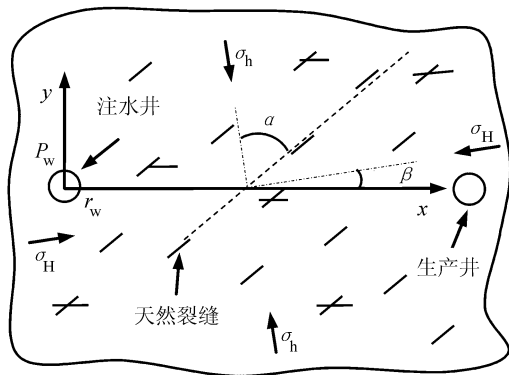


图1 裂缝性油藏天然裂缝分布图

Fig.1 Natural fractures distribution in fractured reservoir

由于水平应力只在注水井井筒周围 $3r_w \sim 5r_w$ (r_w 为注水井井筒半径) 内产生应力集中,而在远场不受影响,原水平最大、最小主应力的大小方向几乎无变化。根据平面应力坐标变换公式,将原坐标下的水平最大、最小地应力 σ_H 、 σ_h 转换到新坐标系 xy 下的分量表达式:

$$\sigma_x^s = \sigma_H \cos^2 \beta + \sigma_h \sin^2 \beta \quad (1)$$

$$\sigma_y^s = \sigma_H \sin^2 \beta + \sigma_h \cos^2 \beta \quad (2)$$

$$\tau_{xy}^s = (\sigma_H - \sigma_h) \sin \beta \cos \beta \quad (3)$$

式中, σ_H 、 σ_h 分别表示原水平地应力的最大、最小主应力, α 、 β 分别为天然裂缝与原最小主应力方向及注采井方向与原水平最大主应力方向的夹角。

1.2 井底流压

在压裂作业过程中,压裂液会对井壁附近地层产生内压。若把注水井筒周围地层看作是一个具有无限大的厚壁圆筒,根据弹性力学理论,在注水井井

筒柱坐标系下,由井筒内压引起的应力分量有:

$$\sigma_r^w = \frac{r_w^2}{r^2} P_w \quad (4)$$

$$\sigma_\theta^w = -\frac{r_w^2}{r^2} P_w \quad (5)$$

式中, P_w 为注水井井底液压, r_w 为注水井井筒半径, r 为地层任一点至井眼中心的径向距离。

1.3 压裂渗滤

随着注水井井底液压的增大,压裂液不断渗滤进入地层,从而改变原地应力状态。压裂液向井壁周围地层孔隙渗滤所产生的应力为:

$$\sigma_r^s = [\eta(1 - \frac{r_w^2}{r^2}) - \varphi](P_w - P_p) \quad (6)$$

$$\sigma_\theta^s = [\eta(1 + \frac{r_w^2}{r^2}) - \varphi](P_w - P_p) \quad (7)$$

式中: $\eta = \alpha_B(1 - 2\nu)/2(1 - \nu)$ 为孔弹性应力系数,其中, ν 岩石泊松比系数, α_B 岩石 Biot 系数; φ 为储层有效孔隙度; P_p 为地层孔隙压力。

由于井底液压和压裂液滤失引起的应力是建立在极坐标系的应力关系式,与注水压力 P_w 和半径 r 密切相关,现分别将式(4)和(6)、式(5)和(7)进行叠加:

$$\sigma_r^e = \sigma_r^w + \sigma_r^s \quad (8)$$

$$\sigma_\theta^e = \sigma_\theta^w + \sigma_\theta^s \quad (9)$$

为方便分析裂缝扩展问题,现将应力分量式(8)和(9)做积分均值处理,极坐标系下的应力换算为直角坐标系下的应力表达式。选取注水井周围 $2w \times 2l$ 的储层作为计算域,分析天然裂缝的扩展,模型如图 2 所示。

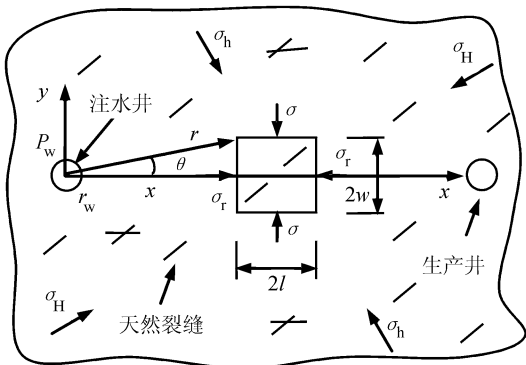


图 2 裂缝性储层计算几何模型

Fig.2 Geometric model of fractured reservoir

在计算域 $2w \times 2l$ 的边界上对式(8)~(9)做积分均值处理,从而得到直角坐标系 xy 的应力值, x, y 方向均值应力表达式为:

$$\bar{\sigma}_x^e = \frac{1}{2w} \int_{-w}^w (\sigma_r^e \cos \theta + \sigma_\theta^e \sin \theta) dy \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_y^e = \frac{1}{2l} \int_{x_0}^{x_0+2l} (\sigma_r^e \sin \theta + \sigma_\theta^e \cos \theta) dx \quad (11)$$

式中, x_0 为井眼中心至计算域左边界距离, w, l 分别为计算域的宽和长, θ 为任一点极角。

1.4 地层压力

地层压力也叫地层孔隙压力,指地层岩石孔隙(裂缝)所含流体承受的压力,在油气藏工程中通常称为地层压力,裂缝性油藏是一类具有裂缝和孔隙的双重多孔介质。Biot 在研究多孔弹性介质时对 Terzaghi 的公式做了进一步修正,提出了有效应力系数的概念。Wilson 等^[12]进一步提出了裂缝孔隙双重介质模型的有效应力模型,作者在此基础上考虑油田开发过程中注采井之间地层孔隙压力的降低,为方便分析,引入地层压降修正系数,建立如下有效应力表达式:

$$\sigma' = \sigma - (\alpha_o P_o + \alpha_f P_f) = \sigma - \alpha_B P(r) = \sigma - \lambda \alpha_B P_p \quad (12)$$

式中: σ' 为有效应力; σ 为总应力; P_o, P_f 分别为孔隙、裂缝中的流体压力; α_o, α_f 分别为孔隙、裂缝的有效应力系数; α_B 为裂缝性油藏岩体的 Biot 系数; $P(r)$ 为距注水井井眼中心 r 的地层压力; λ 为地层压降修正系数, $0 < \lambda < 1$ 。

1.5 井眼周围储层总有效应力

根据储层内上述 4 种应力场,给出其共同作用时的总应力状态,进而建立裂缝的起裂与扩展的判据。由叠加原理将式(1)~(3)及(10)~(12)叠加,可求得井眼周围储层总有效应力计算模型。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x^g + \bar{\sigma}_x^e - \lambda \alpha_B P_p = \\ &\sigma_H \cos^2 \beta + \sigma_h \sin^2 \beta - \lambda \alpha_B P_p + \\ &\frac{1}{2w} \int_{-w}^w (\sigma_r^e \cos \theta - \sigma_\theta^e \sin \theta) dy \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_y^g + \bar{\sigma}_y^e - \lambda \alpha_B P_p = \\ &\sigma_H \sin^2 \beta + \sigma_h \cos^2 \beta - \lambda \alpha_B P_p + \\ &\frac{1}{2l} \int_{x_0}^{x_0+2l} (\sigma_r^e \sin \theta + \sigma_\theta^e \cos \theta) dx \end{aligned} \quad (14)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\beta \quad (15)$$

由式(13)~(15)可知,原储层应力场已发生重分布。由弹性力学理论可求出应力重分布后储层岩石最大、最小主应力 σ_1, σ_3 及最大主应力方向 γ 。

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\} = \left\{ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \right\} \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \arctan \frac{-2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (17)$$

2 裂缝扩展准则

在低渗透裂缝性油藏中,通常发育数组按一定规律分布的天然裂缝^[1],在实际油田开发中会遇到多组天然裂缝的问题,因此油田开发中需重视对多裂缝特征的研究。

地质调查发现,低渗透裂缝性储层中的岩石,往往由几组平行的裂缝所切割。所以,可将岩体的裂缝假设为平行等缝宽的裂缝组进行研究,即视为储层岩体中存在着大量的共线裂缝。作者将排列成一组天然裂缝,即共线天然裂缝作为研究对象。为验证所提简化方法的可行性,选取图 2 计算域所示含 2 条共线裂缝在双向压应力作用下的注水压力,并同文献[13]中引用的测量数据结果进行对比,裂纹尺寸如图 3 所示。在此基础上结合已有的研究成果,提出在水力压裂作用下共线裂缝的扩展准则。

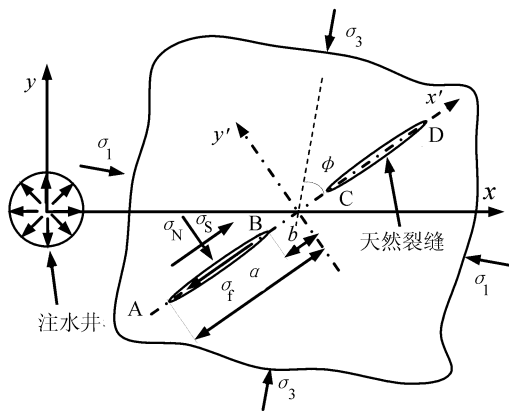


图3 含共线天然裂缝的储层

Fig. 3 Sketch of reservoir containing two collinear natural fractures

图3为含2条共线天然裂缝的储层计算模型,并假定该储层无限大,在无穷远处受压应力 σ_1 和 σ_3 的作用。将 x' 轴设定在裂缝的延长方向上,在压应力作用下,裂缝闭合,其表面承受着法向压力 σ_N 和摩擦 σ_f ,假设裂缝表面摩擦系数为 f ,裂缝与应力 σ_3 的夹角为 $\varphi(0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ)$ 。

共线双裂缝应力强度因子可表示为:

$$K_{\text{I}} - iK_{\text{II}} = \lim_{z \rightarrow x_{\text{T}}'} \frac{2S \sqrt{2\pi(z - x_{\text{T}}')}}{\sqrt{(z^2 - a^2)(z^2 - b^2)}} \left[z^2 - a^2 \frac{E(m)}{K(m)} \right] \quad (18)$$

式中, x_T' 是裂缝尖端的 $x'y'$ 坐标系下的横坐标(对于 A 点, $x_T' = a$)。

式(18)中, S 为一个纯虚数, 因此 $K_1 = 0$ 。式

(18)表明,在压应力作用下,裂缝一般处于闭合状态,且裂缝在扩展初期为纯Ⅱ型,但当裂缝扩展形成翼型裂缝后,其裂缝模型从纯Ⅱ转化为Ⅰ和Ⅱ混合型。由式(18)可得,在裂缝尖端A和B,无量纲应力强度因子 Y_{II} 可表示为:

$$Y_{\parallel}^A = \frac{K_{\parallel}}{K_0} = \frac{2Sa^{1.5}i}{\sigma_1(a-b)\sqrt{a+b}} \left[1 - \frac{E(m)}{K(m)} \right] \quad (19)$$

$$Y_{\text{II}}^{\text{B}} = \frac{-2Si}{\sigma_1(a-b) \sqrt{b(a+b)}} \left[b^2 - a^2 \frac{E(m)}{K(m)} \right] \quad (20)$$

其中:

$$K_0 = \sigma_1 \sqrt{\pi(a-b)} \quad (21)$$

$$S = -\frac{i}{4}[(\sigma_1 + \sigma_3)f + (\sigma_1 - \sigma_3)(f \cos 2\varphi + \sin 2\varphi)] \quad (22)$$

$$\frac{E(m)}{K(m)} = \frac{1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{i=1}^n \frac{2i-1}{2i} \right)^2 \cdot \frac{m^n}{2n-1}}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{i=1}^n \frac{2i-1}{2i} \right)^2 \cdot m^n} \quad (23)$$

式中: a 和 b 分别为裂缝尖端在 $x'y'$ 坐标系上的横坐标; $E(m)$ 、 $K(m)$ 分别为第 1 类和第 2 类椭圆积分的解, $m = 1 - b^2/a^2$ 。

单轴压应力作用下含共线双裂缝岩石,其临界压应力为 σ_u , 应力强度因子可表示为:

$$K_{\parallel} = Y_{\parallel} \sigma_{\parallel} / \sqrt{\pi(a-b)} \quad (24)$$

由式(19)~(20)可知,B端的应力强度因子大于A端,因此对于II型裂缝,应取B端的应力强度因子建立断裂准则。将式(20)代入式(24),则 K_{II} 绝对值为:

$$K_{\parallel} = \frac{\sqrt{\pi}(f + f \cos 2\varphi + \sin 2\varphi) \sigma_{\text{v}}}{2 \sqrt{(a-b)(a+b)b}} \left[b^2 - a^2 \frac{E(m)}{K(m)} \right] \quad (25)$$

在临界条件下,

$$K_{\parallel} = K_{\parallel C} \quad (26)$$

$$K_{\text{uc}} = \frac{\sqrt{\pi}(f + f \cos 2\varphi + \sin 2\varphi) \sigma_{\text{u}}}{2 \sqrt{(a-b)(a+b)b}} \left[b^2 - a^2 \frac{E(m)}{K(m)} \right] \quad (27)$$

当围压 σ_1, σ_3 作用于储层岩石时,该岩石的承载能力将增加,其临界压力由 σ_v 增加到 σ_1 ,则此条件下 K_{H} 可表示为:

$$K_{\parallel} = Y_{\parallel}^{\text{B}} \sigma_1 / \sqrt{\pi(a-b)} \quad (28)$$

将式(20)带入式(28),经整理,最后得 $K_{\parallel}$ 的绝对值为:

$$K_{II} = \frac{\sqrt{\pi} (\sigma_1 + \sigma_3)f + (\sigma_1 - \sigma_3)(f \cos 2\varphi + \sin 2\varphi)}{2 \sqrt{(a-b)(a+b)b}} \cdot \left[b^2 - a^2 \frac{E(m)}{K(m)} \right] \quad (29)$$

将式(27)、(29) 带入断裂扩展准则 $K_{II} \leq K_{IIc}$, 则有:

$$(\sigma_1 + \sigma_3)f + (\sigma_1 - \sigma_3)(f \cos 2\varphi + \sin 2\varphi) \geq \sigma_U (f + f \cos 2\varphi + \sin 2\varphi) \quad (30)$$

最后整理可得在双向压应力作用下含共线裂缝岩石的扩展准则为:

$$\sigma_1 \geq \sigma_U + \frac{f \tan \varphi - 1}{f \cot \varphi + 1} \sigma_3 \quad (31)$$

临界状态下扩展准则为:

$$\sigma_1 = \sigma_U + \frac{f \tan \varphi - 1}{f \cot \varphi + 1} \sigma_3 \quad (32)$$

将式(16)中的最大、最小主应力 σ_1 、 σ_3 及含裂缝的岩石单轴抗压强度 σ_U 和裂缝参数 αf 代入储层共线裂缝扩展准则式(32), 即可计算出临界条件下不同裂缝方位角及不同原地应力的注水压力。

最大、最小主应力 σ_1 、 σ_3 由式(17) 可得:

$$\sigma_1 = I + (A + C)P_w + (B + D)P_p + \sqrt{[J + (A - C)P_w + (B - D)P_p]^2 + K^2} \quad (33)$$

$$\sigma_3 = I + (A + C)P_w + (B + D)P_p - \sqrt{[J + (A - C)P_w + (B - D)P_p]^2 + K^2} \quad (34)$$

其中,

$$A = \frac{1}{4hw} \int_{-w}^w (1 - \eta)(\cos \theta - \sin \theta) \frac{r_w^2}{r^2} + (\eta - \varphi)(\cos \theta + \sin \theta) dy,$$

$$B = \frac{1}{4hw} \int_{-w}^w \eta(\cos \theta - \sin \theta) \frac{r_w^2}{r^2} - (\eta - \varphi)(\cos \theta + \sin \theta) dy,$$

$$C = \frac{1}{4l} \int_{x_0}^{x_0+2l} (1 - \eta)(\sin \theta - \cos \theta) \frac{r_w^2}{r^2} + (\eta - \varphi)(\sin \theta + \cos \theta) dx,$$

$$D = \frac{1}{4l} \int_{x_0}^{x_0+2l} \eta(\sin \theta - \cos \theta) \frac{r_w^2}{r^2} - (\eta - \varphi)(\sin \theta + \cos \theta) dx,$$

$$I = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h - 2\lambda\alpha_B P_p),$$

$$J = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\beta,$$

$$K = \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\beta.$$

将式(33)、(34)代入式(32)可求解临界注水压力。

经整理, 临界注水压力 P_w 可表示为:

$$P_w = \frac{\sqrt{S^2 - RT} - S}{R} \quad (35)$$

其中,

$$R = [(\chi + 1)^2 (A - C)^2 - (\chi - 1)^2 (A + C)^2],$$

$$S = (\chi + 1)^2 (A - C)[J + (B - D)P_p] - (\chi - 1)^2 (A + C)[I + (B + D)P_p] - (\chi - 1)(A + C)\sigma_U,$$

$$T = (\chi + 1)^2 \{ [J + (B - D)P_p]^2 + K^2 \} - \{ (\chi - 1)[I + (B + D)P_p] + \sigma_U \}^2,$$

$$\chi = \frac{f \tan(\alpha - \gamma) - 1}{f \cot(\alpha - \gamma) + 1}.$$

将储层岩石力学特征、天然裂缝方位角等参数带入式(35) 确定裂缝性油藏的合理注水压力范围。

3 工程应用及分析

3.1 储层描述

头台油田扶余储层属典型双重介质, 由裂缝系统和基质系统 2 部分组成。电镜扫描观察该储层微裂缝的视面密度为 0.302~0.936 条/cm², 为大微缝类型, 这一系统是研究的主要对象。该储层裂缝具有以下特征: 1) 侧列式: 主要分布在粉砂岩和泥质粉砂岩中, 缝长一般为 0.1~1.0 cm, 缝宽为 15~20 μm, 间距 30~70 μm; 2) 直线平行式: 主要分布在泥质粉砂岩及粉砂岩中, 缝长 0.3~0.7 cm, 缝宽为 20 μm; 3) “X”式: 主要分布在粉砂岩及细砂岩中, 缝长 0.1~0.9 cm, 缝宽 15~20 μm。

以研究直线平行微裂缝, 即共线裂缝为主要对象, 选取大庆头台油田茂 11 区扶余油层为研究对象, 储层中深为 1 343 m, 注水井井筒半径 0.12 m, 相关参数如表 1 所示。

表 1 储层计算参数^[13]

Tab.1 Reservoir parameters used in the calculation	
参数名称	参数值
原最大水平应力 σ_H /MPa	30.00
原最小水平应力 σ_h /MPa	20.00
储层孔隙压力 P_p /MPa	5.50
单轴抗压强度 σ_c /MPa	72.00
岩石泊松比 ν	0.25
Biot 系数 α_B	0.85
储层孔隙度 φ	0.12

其中, 式(32)及(35)中的参数 σ_U 不同于 Mohr-Coulomb 屈服准则中的岩土材料单轴抗压强度, 其值还取决于裂缝与最大主应力的夹角, $\sigma_U = \delta \sigma_c$, 其中, σ_c 为不含裂缝单轴抗压强度, δ 为与裂缝方位角 α 及裂缝密度有关的参数值, 经分析其取值范围为 0.86~0.92。

3.2 计算结果验证

图4展示了当 $\beta = 45^\circ$ 时,即原最大主应力方向与注采井方向呈 45° 时,注水压力 P_w 的理论计算值和实测值与裂缝方位角 α 的曲线变化关系。计算结果表明,所建立的共线裂缝扩展准则应用于油田注水压力的计算结果与实测数据具有较高的吻合度,且与已发表实测结果相吻合^[14-15],验证了式(35)的合理性、准确性。由于计算域只考虑了2条共线裂缝,而实际储层存在大量的侧列式、直线平行式及“X”式等微裂缝,因此计算结果较实测数据稍偏大,经验证计算值在误差范围内。

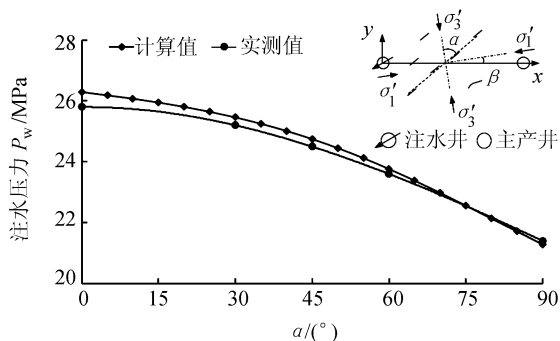


图4 注水压力 P_w 计算值与实测值比较

Fig.4 Comparison of calculated and measured water injection pressure P_w

3.3 裂缝扩展因素分析

3.3.1 裂缝方位

图5展示了天然裂缝距注水井井眼距离 $x_0 = 2r_w$ 时,注水压力 P_w 与储层裂缝方位角 α 的曲线变化关系。图5的曲线表明随着裂缝方位角的增大,注水压力呈递减趋势,且斜率不断增大。由图5可知,当 $\alpha = 0^\circ$ 时,即裂缝与最小主应力相平行,注水压力值最大;当 $\alpha = 90^\circ$ 时,即裂缝与最小主应力相垂直,注水压力最小,这与理论分析结果相吻合^[16]。

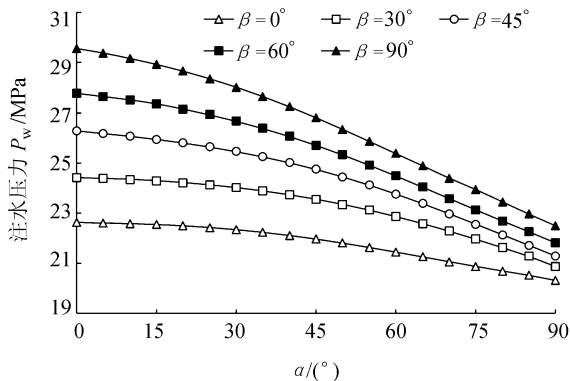


图5 注水压力 P_w 与裂缝方位角 α 的关系

Fig.5 Relationship between water injection pressure P_w and α

图5结果表明裂缝方位与原最大地应力方向越趋于平行,注水压力 P_w 越小。这主要是由于天然裂缝与原最大地应力方向一致时,裂缝的开度最大,注水进入地层后,首先沿最大主应力方向的裂缝注水,随着注水压力升高,最容易克服裂缝的延伸压力,因此相应的注水压力为最小。

3.3.2 注采井方位

图6为 $x_0 = 40r_w$ 时,注水压力 P_w 与注采井方位角 β 的关系曲线。图6表明:随着注采井方位角 β 的增大,注水压力 P_w 也相应的增大。 β 越小,即注采井连线方向与原水平最大主应力夹角越小,相应的沿最大主应力方向上的裂缝开启度越大,形成有效渗流通道的裂缝越多,注水压力越小。由图6可知,相比较于 $\alpha = 0^\circ$ 、 30° 、 45° 及 60° ,储层天然裂缝方位角 $\alpha = 90^\circ$ 时注水压力低了3.46 ~ 9.00 MPa,说明沿注采井方向的天然裂缝极易被压裂扩展,而其他角度的裂缝扩展启动压力较大。

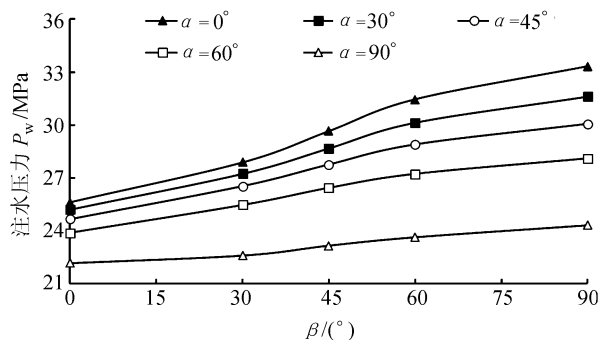


图6 注水压力 P_w 与注采井方位角 β 的关系

Fig.6 Relationship between water injection pressure P_w and β

3.3.3 裂缝与注水井距离

图7为 $\beta = 45^\circ$ 时,注水压力 P_w 与裂缝距注水井距离 x_0 的关系曲线。由图7可知,随着 x_0 的增大,注水压力也不断增大,说明距注水井距离越大,天然裂缝压裂发生扩展所需的注水压力也越大。此外,图7的注水压力曲线斜率逐渐趋于平稳表明,当注水压力超过基质与微缝的吸水启动压力,将使岩石颗粒发生相对位移,结构被破坏形成水力裂缝或超过储层裂缝扩展压力,使裂缝发生扩展,从而增大储层的渗透率和吸水能力,降低了远端裂缝的起裂和扩展压力。由图7可知,天然裂缝方位角 α 越大,其开裂扩展所需的注水压力越小,因此压裂工艺设计应尽量避免出现远端裂缝发生扩展而近端裂缝还未形成有效渗流通道的情况,同时也应防止注采井之间沿原最大主应力方向上的裂缝产生贯通,使油井发生暴性水淹。

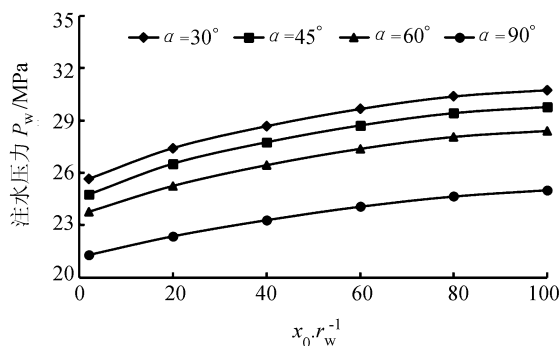


图 7 注水压力 P_w 与裂缝距注水井距离 x_0 的关系

Fig. 7 Relationship between water injection pressure P_w and x_0

3.4 合理注水压力的确定

裂缝性油藏开发实践表明,影响油田开发效果的因素主要有 2 个方面:一是储层裂缝参数,另一个是井网部署,同时需考虑注水压力是否会造成注采井之间裂缝贯通,形成窜流通道。综合图 5~7 的结果,注水压力为 20.32 MPa,裂缝几乎不起裂扩展,不能有效提高油藏采收率;当注水压力达 35.33 MPa 时,注水井周围的天然裂缝几乎都发生扩展延伸,此时注入水的波及系数最大,但油田开采成本也最高,甚至造成套管损坏、层间干扰及油井早期见水等现象。针对头台油田扶余储层线状注水井网部署方案,为提高油藏采收率并降低油井水淹的风险,经比较分析确定天然裂缝方位角 α 在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间对应的压力为合理注水压力,其工业采纳值为 24.02 ~ 25.94 MPa。

4 结 论

裂缝性油藏合理注水压力由储层物性、裂缝开启压力、岩石破裂压力及储层地应力共同决定。注水压力应最大限度地满足基质和微缝的吸水启动压力,并小于岩石的破裂压力及非注采井方向的裂缝开启压力。

1) 建立了共线裂缝扩展条件下的注水压力计算模型,并应用于实际工程,通过分析给出了一个合理的注水压力范围,为进一步指导油田注水开发的实施提供了参考。

2) 天然裂缝与最大水平主应力方向夹角越小,裂缝开启扩展所需的注水压力越小;此外,注水压力还和注采井方向与天然裂缝方向的夹角有关。研究成果与实际的油田测井数据有较高的吻合度,结合扶余储层岩石参数和分析结果,给出了该储层的合理注水压力范围为 24.02 ~ 25.94 MPa。

3) 应用断裂力学理论研究低渗透裂缝性油藏的注水压力目前属于比较新颖的方向,断裂力学理论能很好地解释裂缝起裂扩展现象,因此,借助断裂力学理论可有效解决水力压裂中遇到的诸多问题。结合多孔介质力学、渗流力学及断裂力学建立考虑多裂缝相互交叉、平行(共线)的裂缝扩展准则是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] Nassir M, Settari A, Wan R G. Prediction of stimulated reservoir volume and optimization of fracturing in tight gas and shale with a fully elasto-plastic coupled geomechanical model[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 2014, 19(5): 771-785.
- [2] Kim J, Moridis G J. Numerical analysis of fracture propagation during hydraulic fracturing operations in shale gas systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76: 127-137.
- [3] Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, et al. Unconventional theories and strategies for fracturing treatments of shale gas strata[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(6): 1-6. [谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 页岩储层压裂改造的非常规理论与技术构想[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(6): 1-6.]
- [4] Hubbert M K, Willis D G. Mechanics of hydraulic fracturing [J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1957, 210(6): 153-163.
- [5] Zhu Z M. An alternative form of propagation criterion for two collinear fractures under compression[J]. Mathematics and Mechanics of Solids, 2009, 14: 727-46.
- [6] Wang Chao, Zhu Zheming, Liu Hongjie. Study on predicting crack initiation angle[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(2): 28-35. [王超, 朱哲明, 刘宏杰. 裂纹起裂角预测方法研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2015, 47(2): 28-35.]
- [7] Su Yuliang, Wang Xia. Effect of natural fracture on the low permeability reservoir production characteristics [J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(6): 41-43. [苏玉亮, 王霞. 天然裂缝对油藏开采特征的影响[J]. 钻采工艺, 2006, 29(6): 41-43.]

- [8] Guo Baohua. Numerical analysis of hydraulic fracturing on single-holed rock specimens[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1965 – 1970.
- [9] Keshavarzi R, Jahanbakhshi R. Investigation of hydraulic and natural fracture interaction; Numerical modeling or artificial intelligence [C]//ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing. Brisbane: InTech, 2013.
- [10] Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a triaxial fracturing system in naturally fractured reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45(7): 1143 – 1152.
- [11] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs[M]. Texas: Gulf Publishing Company, 1985: 8 – 26.
- [12] Wilson R K, Aifantis E C. On the theory of consolidation with double porosity[J]. International Journal of Engineering Science, 1982, 20(9): 1009 – 1043.
- [13] Lin Hai. The research and application of reservoir fracture in Toutai oilfield[C]//The Development and Construction of Toutai Oilfield of Daqing. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 37 – 45. [林海. 头台油田储层裂缝研究及应用[C]//大庆头台油田开发与建设文集. 北京: 石油工业出版社, 2008: 37 – 45.]
- [14] Zhou Xingui, Zhang Linyan, Huang Chenjun. Estimation of formation breakdown pressure and fracture open pressure of Chang 63 low permeable reservoir in Huaqing area and development suggestions[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(7): 2812 – 2818. [周新桂, 张林炎, 黄臣军. 华庆探区长 63 储层破裂压力及裂缝开启压力估测与开发建议[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(7): 2812 – 2818.]
- [15] Chen Shuli, Dong Jing. A discussion on the reasonable injection pressure for the region of infilling wells[C]//The Development and Construction of Toutai Oilfield of Daqing. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 22 – 28. [陈淑利, 董静. 一类区块加密井区合理注水压力探讨[C]//大庆头台油田开发与建设文集. 北京: 石油工业出版社, 2008: 22 – 28.]
- [16] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs[M]. Houston: Gulf Professional Publishing, 2001.

(编辑 李轶楠)