

农安油页岩水力压裂模拟及实验研究

王聪¹, 陈晨¹, 孙友宏¹, 王维², 洪建俊¹, 高帅¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 大庆油田有限责任公司采油工程研究院, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 裂隙的数量和尺寸会影响油页岩原位开采的成本与效率, 开采前需对油页岩进行水力压裂来建立或扩展裂隙, 而压裂过程中的破裂压力是一个重要的参数。以农安矿区油页岩为研究对象, 数值计算了其射孔完井下的水力压裂的破裂压力并采用真实破裂过程分析软件(二维渗流分析版)对水力压裂过程进行数值模拟, 得到油页岩破裂压力。同时对该矿区油页岩压裂进行了实验对比, 验证了数值模拟的有效性。对比结果表明模拟值、实验值较计算值均偏大。

关键词: 油页岩; 水力压裂; 破裂压力; 数值模拟; 农安油页岩矿区

中图分类号: TE357 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)11-0007-05

Simulation of Oil Shale Hydraulic Fracturing in Nong'an and the Experimental Study/WANG Cong¹, CHEN Chen¹, SUN You-hong¹, WANG Wei², HONG Jian-jun¹, GAO Shuai¹ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Production Engineering Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing Heilongjiang 163000, China)

Abstract: The cost and efficiency of in-situ mining of oil shale are affected by the number and size of cracks, it is necessary to build or expand fissures before hydraulic fracturing of oil shale and the fracturing pressure is an important parameter in the fracturing process. This paper takes the Nong'an oil shale as the research object, the numerical calculation of fracturing process of hydraulic fracturing process under perforation completion and numerical simulation was made on hydraulic fracturing process with 2D seepage analysis version of realistic fracturing process analysis software; the fracture pressure of oil shale was obtained. The experimental comparison was carried out on oil shale fracturing in Nong'an mining area; the validity of the numerical simulation was verified. The comparison results show that both the simulation and the experimental values are larger than the calculated ones.

Key words: oil shale; hydraulic fracturing; fracture pressure; numerical simulation; Nong'an oil shale mining area

0 引言

随着国民经济发展对资源需求量的增加, 传统油气资源已经很难满足我国经济的发展。油页岩作为一种非常重要的替代能源, 越来越受到人们的关注。目前, 油页岩的开发方式主要有地面干馏和原位开采两种方式, 与地面干馏相比, 原位开采具有节省露天开采费用、降低地面植被破坏程度和占地面积少等优点, 原位开采原理为: 通过不同的加热方式直接加热地下油页岩层, 当油页岩在地下原位加热到一定温度时将进行裂解, 生成油(气), 最后将生成的油(气)通过生产井开采至地表^[1]。但油页岩储层基质的渗透率很低, 同样存在成本及其开采时效问题。所以提高油页岩层的渗透性对油页岩的

开采极为必要。

水力压裂技术是提高低渗油气层渗透性的重要手段之一。其原理是当地面高压泵组将高粘液体以大大超过地层吸收能力的排量注入井中, 液压在井底附近超过井壁附近地应力及油页岩抗张强度的压力后, 即在地层中形成裂缝。随着带有支撑剂的液体注入裂缝中, 裂缝逐渐向前延伸。这样在地层中形成了足够长度、一定宽度及高度的填砂裂缝。从而提高目的层的渗透率, 使油气能够通畅流入开采井中, 起到增产增注的作用。在此过程中破裂压力的预测对成功进行压裂作业具有重要的意义。

本文针对农安油页岩在水力压裂过程中的破裂压力进行了数值模拟及实验研究, 为今后对油页岩

收稿日期: 2015-07-19

基金项目: 国家潜在油气资源(油页岩勘探开发利用)产学研用合作创新项目(编号: 22109P224424)

作者简介: 王聪, 男, 汉族, 1989年生, 在读硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事水力压裂方面的研究工作, 吉林省长春市西民主大街938号, awhero@126.com。

通讯作者: 陈晨, 男, 汉族, 1965年生, 教授, 博士生导师, 从事教学与地质工程、基础工程设计、施工与数值模拟方向研究工作, 吉林省长春市西民主大街938号, chenchen@jlu.edu.com。

的水力压裂及其开采提供参考和设计依据。

1 农安油页岩水力压裂数值模拟

1.1 农安油页岩基本力学参数及条件设定

本文基于 RFPA 软件(真实破裂过程分析软件)系列中的 2D 渗流版对农安油页岩水力压裂进行数值模拟。

研究对象为农安油页岩,其基本力学参数^[6]为:均质度 2 m,弹性模量均值 $E_0 = 1.903$ GPa,抗压强度均值 $\sigma_0 = 17.41$ MPa,内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$,压拉比 C/T (材料抗压强度与抗拉强度比值) = 1.57,泊松比 $\mu = 0.279$,粘聚力 1.7 MPa,残余强度系数 $\xi = 0.1$,渗透系数 $K = 0.00001$ m/d。

水压加载方式为:单步增量值为 0.1 MPa(即 10 m 水柱),逐渐加载至试样完全破裂,液体密度为 1000 kg/m^3 。

边界条件为:模型的 4 个边的渗流边界荷载设定中水头的初始值及增量值均为零。

破裂压力值的判定:根据凯瑟尔效应,由声发射图来确定破裂压力值。

当材料受外部荷载时,其内部会发射出一系列断续的短脉冲群的声现象,会产生声波,使变形能转化为弹性振动,即发出声响,这种现象称为声发射^[12]。

RFPA 软件中白色声发射圆代表当前所在步由于剪切破坏引起的声发射情况,红色声发射圆代表当前所在步由于拉伸破坏引起的声发射,黑色声发射圆代表所有步的累积声发射,声发射圆的直径大小代表着声发射能量的大小,如图 1 所示。

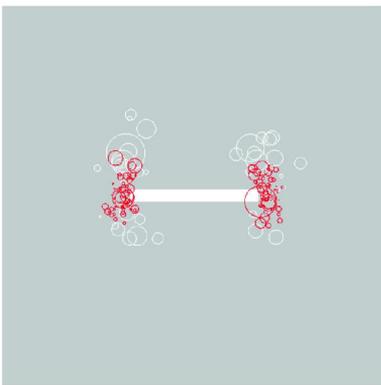


图 1 声发射图示

地层破裂是由于井内压裂液压力增大到一定程度时,井周岩石所受周向应力由压缩应力变为拉伸

应力,当拉伸应力大到足以克服岩石的抗拉强度即破裂。因此,水压致裂时岩石主要发生拉伸破坏。

1.2 水力压裂数值模拟

1.2.1 数值模拟

根据农安油页岩物理力学性质,油页岩埋深约 70 m,油页岩上覆岩层为泥岩,其天然密度平均值为 2.42 g/cm^3 ^[5]。计算其地应力的理论值并施加边界载荷。

地应力一般由垂向地应力和最大水平方向地应力及最小水平方向地应力 3 个分量组成。其中垂向地应力由 σ_v 表示,最大水平方向地应力由 σ_H 表示,最小水平方向地应力由 σ_h 表示。垂直地应力可由岩体自重产生的地应力表示。

井壁上总的周向应力主要由 3 部分组成,井筒及原地应力引起的周向应力、压裂液在井筒内形成周向应力以及压裂液渗入地层引起的周向应力。设井筒内压为 p_i (见图 2)。

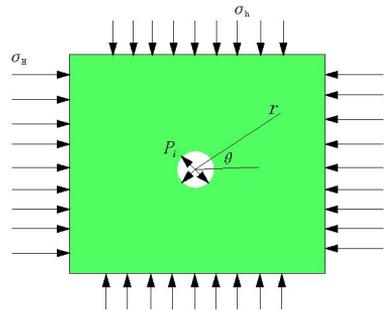


图 2 井壁围岩力学模型

(1) 井筒以及原地应力引起的周向应力。

水平最大地应力 σ_H 引起的周向应力:

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

式中: R ——井眼半径; r ——极坐标半径; θ ——极坐标角。

水平最小地应力引起的周向应力:

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

因此井筒以及原地应力引起的周向应力:

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

在井壁处, $r = R$,因此由(3)式可得:

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) \quad (4)$$

当 $\theta = 0^\circ$ 及 180° 时, $\sigma_{\theta \min} = 3\sigma_h - \sigma_H$ 。

当 $\theta = 90^\circ$ 及 270° 时, $\sigma_{\theta \max} = 3\sigma_H - \sigma_h$ 。

(2)井筒内压形成的周向应力可由(5)式表达:

$$\sigma_{\theta} = -\frac{R^2}{r^2}p_i \quad (5)$$

因此井壁处($r=R$)的周向应力:

$$\sigma_{\theta} = -p_i \quad (6)$$

(3)井内流体压力增大时,一部分钻井液将进入井壁地层,假设井壁地层为孔隙介质,流体流动满足达西定律,则钻井液的径向渗流在井壁周围产生的附加周向应力为:

$$\sigma_{\theta} = \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \varphi \right] (p_i - p_p) \quad (7)$$

式中: α ——有效应力系数(Biot系数); ν ——泊松比; φ ——孔隙度; p_p ——原始地层孔隙压力。

因此井壁上总的周向应力可以采用叠加原理,为上述3个周向应力之和。

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_h - \sigma_H - p_i + \delta \left[\frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \varphi \right] (p_i - p_p) \quad (8)$$

井壁有渗透时, $\delta=1$,井壁不渗透时, $\delta=0$ 。

天然的油页岩其渗透率为0.0001~0.000001 mD,其孔隙度也极低。为了简化计算,将油页岩认为是非渗透性岩石,因此,认为油页岩钻孔井壁不渗透, $\delta=0$ 。式(8)可写为:

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_h - \sigma_H - p_i \quad (9)$$

由抗张强度破裂准则可以知道地层的破裂是由于井内压裂液压力过大导致油页岩所受的周向结构应力超过油页岩的抗拉强度而造成的,即:

$$\sigma_{\theta} = -S_t \quad (10)$$

式中: S_t ——岩石抗拉强度。

由式(9)和式(10)可以得到油页岩在裸眼完井方式进行水力压裂时其破裂压力的表达式:

$$p_f = p_i = 3\sigma_h - \sigma_H + S_t \quad (11)$$

由于油页岩矿层段下入了套管,油页岩层是通过射孔孔眼与井筒连通的。压裂液沿井筒进入射孔孔眼,然后通过孔眼把油页岩层压开。每个单独的射孔孔眼就相当于裸眼完井方式下的1个井眼。在所有的孔眼中,与最小水平主应力垂直或与最大水平主应力平行的孔眼最容易产生垂直裂缝^[9]。

$$\sigma_{\theta} = -\frac{R^2}{r^2}p_i + \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \quad (12)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cos(2\theta) \quad (13)$$

式中: σ_z ——井壁周围岩石在垂直方向上的应力。

若令 $h_D = \frac{R}{r} = \frac{R}{R+h}$,其中 h 为射孔深度,则 h_D

区间可取为0~1,将 h_D 以及 σ_H 和 σ_h 表达式代入式(11)中,则可得到射孔深度为 h 处孔眼壁面出现破裂所需要的注入压力为:

$$p_f = \left[\frac{3(\sigma_H + \sigma_h)}{2} (1 + h_D^2) - \left(\frac{3}{2} - 2\nu h_D^2 + \frac{9}{2} h_D^4 \right) \cdot (\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) + S_t - \sigma_v \right] / (1 + 3h_D^2) \quad (14)$$

其中 θ 为射孔孔眼的方位角,由式(14)可见,当 $\theta=0$ 时,破裂压力最低,即对于常规随机射孔完井而言,与最大水平地应力方向平行($\theta=0$)的孔眼中最容易产生垂直裂缝,此时有:

$$p_f = \left[\frac{3(\sigma_H + \sigma_h)}{2} (1 + h_D^2) - \left(\frac{3}{2} - 2\nu h_D^2 + \frac{9}{2} h_D^4 \right) \cdot (\sigma_H - \sigma_h) + S_t - \sigma_v \right] / (1 + 3h_D^2) \quad (15)$$

由此可知射孔完井方式下,油页岩地层破裂压力与射孔参数、地应力和岩石力学参数等有关。考虑到 h_D 的变化范围,当 $h_D=1$ ($h=0$)射孔孔眼的根部(孔眼与井壁的交界处)位置,式(15)取极小值。因此最终可得到油页岩层垂直井射孔完井条件下地层破裂压力的计算公式为:

$$p_f = \frac{9\sigma_h - 3\sigma_H + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) + S_t - \sigma_v}{4} \quad (16)$$

农安埋深约70 m油页岩垂直方向地应力可简化为上覆岩层压力,可由下式求得:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \int_0^H \rho(H) dH \\ &= \bar{\rho}gH \\ &= 2.42 \times 10^3 \times 10 \times 70 \\ &= 1.694 \text{ MPa} \end{aligned}$$

泥岩地层中最小水平地应力的梯度平均为22.62 kPa/m。

由此可以求得最小水平地应力的大小:

$$\sigma_h = 22.62 \times 70 = 1.58 \text{ MPa}$$

当产生垂直裂缝时, $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$,因此, σ_H 的范围为1.58~1.694 MPa。

射孔完井方式下,由式(16)可以求得: $p_f = 2.12 \sim 2.19 \text{ MPa}$ 。

设定数值模型尺寸为:10 m×10 m,单元划分规模为500×500个基单元。为了简化模型,忽略套管及水泥环对压裂效果的影响,建立如图3所示数值模型,横切钻孔井眼,钻孔直径为300 mm,射孔直径

为 20 mm,射孔深度为 300 mm。

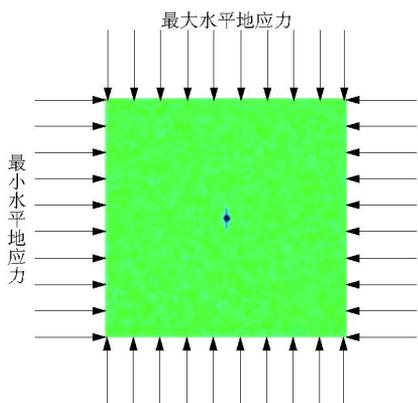


图 3 油页岩水力压裂数值模型

按照以上计算的农安油页岩矿区水平方向地应力的理论计算值施加边界载荷,其中最大水平地应力取值 1.65 MPa,最小水平地应力取值 1.58 MPa。

模拟结果:射孔完井油页岩水力压裂破裂压力为 2.3 MPa。并根据以上公式数值求解破裂压力值为 $p_f = 2.15 \text{ MPa}$ 。

图 4 为压裂后的剪应力云图,由图可以发现裂缝是沿着最大水平地应力方向发展,裂缝的起裂位置位于射孔孔眼终端处。

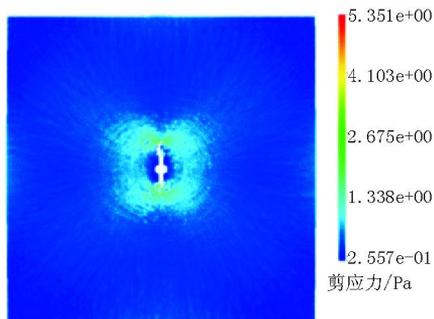


图 4 油页岩水力压裂后最大剪应力云图

图 5 为压裂后的声发射图,由图可以发现声发射能量集中区域位于裂缝附近,在裂缝尖端处有多处红色大圆表明此处拉伸破坏强烈。

1.2.2 模型尺寸的影响

为了检验模型的大小对于模拟结果的影响,分别改变其模型尺寸为 300 mm × 300 mm、500 mm × 500 mm,700 mm × 700 mm,900 mm × 900 mm,1100 mm × 1100 mm。射孔直径设定为 10 mm,边界载荷为:垂直地应力取值 5 MPa,最大水平方向地应力取值 3 MPa。得到了破裂压力随模型尺寸变化关系

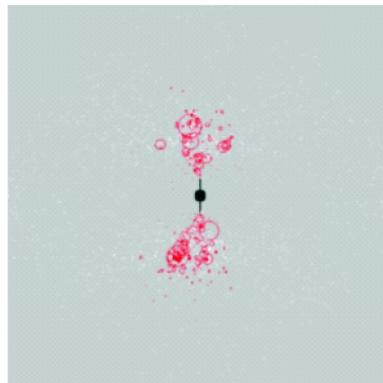


图 5 油页岩水力压裂后声发射图

曲线图(见图 6)。由图 6 可知,模型尺寸由 300 mm 变化到 1100 mm 时,其破裂压力基本没有变化。由此可以,破裂压力是不受模型尺寸影响的。

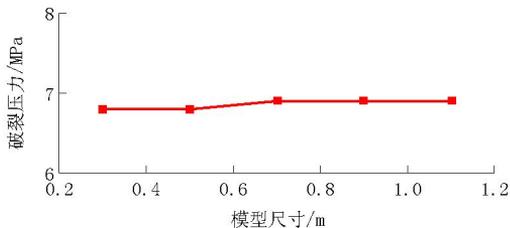


图 6 破裂压力随模型尺寸变化关系曲线图

2 油页岩试样压裂实验

本文采用自制油页岩水力压裂试验台对农安油页岩试样进行水力压裂实验,实验台包含围压加载系统、水压加载系统、数据采集系统及试样制备系统。主要由水力压裂装置、超薄千斤顶、手动泵、压力校验系统(含高压齿轮泵)、试样浇筑模具等部件组成,如图 7 所示。其中水力压裂装置由水力压裂侧板,顶板,四爪连接件及底座组成,一共包含 4 个侧板,1 个顶板,1 个底座及 5 个四爪连接件。整个实验装置采用销作为连接紧固件,便于安装和拆卸。整个装置采用四爪连接件将立方体六个面进行连接,实现了力的自锁。该装置主要提供试样室和三个方向上的模拟地应力。



图 7 水力压裂实验台

由于难以获得大体积油页岩,且油页岩切割时易发生大体积破碎,故采取混凝土包裹不规则形状的油页岩来制备油页岩压裂试样。

图8为采用混凝土包裹油页岩的结构示意图,图9为试样实物图。

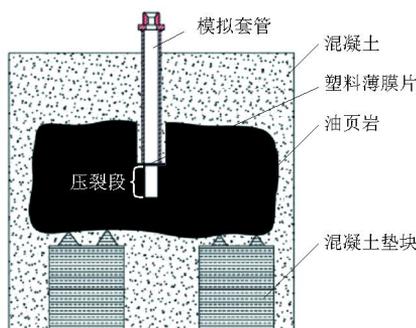


图8 油页岩压裂试样示意图



图9 油页岩试样的制作过程

实验过程:加工取样油页岩,制作油页岩试样,养护72 h后,将试样放入油页岩压裂试验台中,同时在3个方向上施加模拟地应力载荷,分别为: $\sigma_v = 1.69 \text{ MPa}$, $\sigma_H = 1.65 \text{ MPa}$, $\sigma_h = 1.58 \text{ MPa}$ 。开启压力校验装置,开始向模拟套管中泵入压裂液,同时压力校验系统实时采集管路中的压力数值。待模拟套管中的高压液体将试样压开,压力数值由峰值降落逐渐趋于平稳后停泵。

制作3个试样编号为1、2、3,3个试验所得的破裂压力分别为2.46、2.50、2.41 MPa。

与计算值存在差异是因为在模拟时,首先为了加快计算速度在模拟条件中设置单步增加量为0.1 MPa,单步增加量设置较大会产生一定的误差;其次理论计算时将油页岩认为非渗透性岩石从而完全忽略了孔隙水压力的影响,在数值模拟时虽然渗透系数较低但还是存在一定渗透,因此也会产生一定的误差。在其完井条件下,数值模拟忽略套管及水泥环对压裂效果的影响这导致水压直接作用在井眼周围,从而改变射孔孔壁附近地层应力状态,因此会产生一定的误差。

实验所选油页岩在开采及运输过程中都会导致

其内部力的变化,因此会产生一定误差。

3 结论

本文采用真实破裂过程分析软件二维渗流分析版对农安油页岩矿区水力压裂进行数值模拟并进行了实验研究,得出以下结论。

(1)射孔完井油页岩水力压裂破裂压力计算结果为2.15 MPa,模拟结果为2.3 MPa,实验结果均值为2.46 MPa。将模拟结果与农安油页岩矿区水力压裂的理论计算值、实验模拟值进行对比分析发现,该数值模拟具有有效性,压裂模拟值实验值均比计算值高,其中射孔井破裂压力模拟值比计算值高0.15 MPa,相对差7%。实验值比其结果高0.31 MPa,相对差为14.4%。在进行压裂施工时应给予考虑。

(2)自制实验台不仅可以用于混凝土试样的压裂实验,还可以进行其他岩石样品的模拟压裂实验,也可以进行其他压裂相关实验对裂缝扩展等压裂相关研究,为水力压裂设计及现场施工提供相关参考和设计依据。

参考文献:

- [1] 钱家麟,王剑秋,李术元.世界油页岩开发利用动态[J].中外能源,2008,13(1):11-15.
- [2] 陈晨,孙友宏.油页岩开采模式[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):26-29.
- [3] Zhao Gui-jie, Chen Chen, Dong Xue-jiao. Application of FLAC3D for Simulation of the Borehole Hydraulic Mining of Nong'an Oil Shale[J]. Oil Shale, 2014, 31(3): 278-288.
- [4] 刘鑫鹏,陈晨,严轩辰,等.吉林省桦甸地区油页岩物理力学性能及裂隙开启压力的确定[J].中国矿业,2013,22(1):83-85.
- [5] 彭真明,梁国胜,王伟,等.砂、泥岩互层透镜体模型正演及分析[J].物探化探计算技术,2001,23(2):101-104.
- [6] 严轩辰,陈晨,刘鑫鹏,等.农安油页岩物理力学性能及其水力压裂设计中的相关参数计算[J].探矿工程(岩土钻掘工程) 2012,39(2):9-11.
- [7] 唐春安,赵文.岩石破裂全过程分析软件系统 RPPA-2D[J].岩石力学与工程学报,1997,16(5):507-508.
- [8] Yan Xuan-Chen, Chen Chen, Liu Xin-Peng. Physical and Mechanical Parameters of Borehole Hydraulic Mining of Nong'an Oil Shale[J]. Oil Shale, 2012, 29(3): 237-247
- [9] 唐春安,王述红,傅宇芳.岩石破裂过程数值实验[M].北京:科学出版社,2003.
- [10] 黄中伟,李根生,牛继磊,等.水力射孔参数对油水井压裂影响的数值试验[J].石油机械,2006,34(2):1-3.
- [11] 陈忠辉,谭国焕,杨文.不同围压作用下岩石损伤破坏的数值模拟[J].岩土工程学报,2001,23(5):576-580.
- [12] 万国香,王其胜,李夕兵.应力波作用下岩石声发射实验研究[J].振动与冲击,2011,30(1):116-120.