

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

严轩辰, 陈晨, 刘鑫鹏, 钱方

(吉林大学建设工程学院, 超硬材料国家重点实验室, 复杂条件钻进技术开放研究实验室, 吉林 长春 130026)

摘要:对采取的吉林省农安油页岩矿石进行了物理力学性能实验研究, 获得了油页岩在平行于层理和垂直于层理两个方向上的抗压强度、抗拉强度、弹性模量和泊松比等力学数据。计算得到了毕奥特系数、平均压力和最小主应力等参数。确定了水力压裂中的裂隙开启、延伸压力及宽度等参数。

关键词:油页岩; 物理力学性能; 水力压裂参数

中图分类号: P584; TD83 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2012)02-0009-03

Physical and Mechanical Properties of Oil Shale in Nong'an and the Calculation of Relevant Parameters in Hydraulic Fracturing Design/YAN Xuan-chen, CHEN Chen, LIU Xing-peng, QIAN Fang (College of Construction Engineering, Jilin University, State Key Laboratory of Superhard Materials, Open Research of Complex Conditions Drilling Laboratory Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Through the experiment of physical and mechanical properties, the mechanical data of compressive strength, the tensile strength, the elasticity modulus, Poisson's ratio of oil shale in Nong'an mining site were obtained in both horizontal and vertical bedding direction. The Biot coefficient, the average pressure and minimum principal stress and other parameters were calculated. The parameters of crack opening, extending pressure and the width in hydraulic fracture were determined.

Key words: oil shale; physical and mechanical properties; parameter of hydraulic fracturing

0 前言

全球油页岩储量丰富, 是重要的后备能源, 各国都在积极开展油页岩开发技术的研究。油页岩原位开采(裂解)是非常有前景的开发技术, 但裂解后的油气需要运移的通道以减少输送阻力^[1]。为了在油页岩中产生水平出油通道, 我们考虑采用水力压裂技术。水力压裂是提高油气井产量的有效手段之一, 它的目的是在地层中压开一条具有一定方向和几何形状的裂缝, 并充填支撑剂以提高裂缝的导流能力。水力压裂技术成功与否除了和压裂液、支撑剂有关外, 地应力和岩石力学性质也起着非常重要的作用^[2]。

本文对吉林省农安油页岩进行力学性能研究, 确定油页岩水平层理和垂直层理两个方向上的物理力学性能基本参数, 从而计算得出水力压裂中裂隙开启、延伸压力及宽度等参数。

1 实验过程

1.1 油页岩物理力学性能测试实验

根据《中华人民共和国地质矿产部岩石物理力学性质试验规程》(DY-94)^[3], 钻取了标准岩样, 分别进行了新鲜油页岩单轴抗压强度及变形实验和弱面抗剪切实验以及抗拉强度实验。实验装置及过程如图1和图2所示。

1.2 油页岩物理力学性能实验结果



图1 单轴抗压强度及变形实验

收稿日期: 2011-12-08

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、超硬材料国家重点实验室、复杂条件钻进技术开放研究实验室资助

作者简介: 严轩辰(1988-), 男(汉族), 江苏南通人, 吉林大学硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事油页岩大体积破碎和极地冰钻研究工作, 吉林省长春市西民主大街6号, yanxuanchen@126.com。



图2 抗拉强度实验

通过对新鲜油页岩标准试样的强度实验及数据处理,按标准方法,计算得到油页岩在平行于层理和垂直于层理两个方向上的抗压强度(如表1)、抗拉强度(如表2)、抗剪强度、法向应力(如表3)、弹性模量和泊松比等基本力学原始数据。

表1 油页岩抗压强度

| 试样编号 | 破坏荷载/kN | 抗压强度/MPa | |
|-------|---------|----------|-------|
| | | 单值 | 平均值 |
| 水平层理1 | 28.9 | 15.64 | |
| 水平层理2 | 35.3 | 19.27 | 17.14 |
| 水平层理3 | 30 | 16.51 | |
| 垂直层理1 | 21.5 | 11.88 | |
| 垂直层理2 | 15.8 | 8.59 | 10.90 |
| 垂直层理3 | 22.4 | 12.23 | |

表2 油页岩的抗拉强度

| 试样编号 | 破坏荷载 P/kN | 抗拉强度/MPa | |
|-------|-----------|----------|------------|
| | | 单值 | 平均值 |
| 水平层理1 | 2.56 | 0.70 | |
| 水平层理2 | 4.30 | 1.17 | 0.98 |
| 水平层理3 | 4.0 | 1.07 | |
| 垂直层理1 | 1.90 | 0.50 | 0.46 |
| 垂直层理2 | 1.24 | 0.34 | (垂直层理方向施加) |
| 垂直层理3 | 1.96 | 0.53 | |
| 垂直层理1 | 0.34 | 0.09 | 0.41 |
| 垂直层理2 | 1.8 | 0.50 | (平行层理方向施加) |
| 垂直层理3 | 2.4 | 0.65 | |

表3 油页岩抗剪强度和法向应力

| 试样编号 | 垂直荷载 P/kN | 法向应力/MPa | 抗剪强度/MPa |
|-------|-----------|----------|----------|
| 水平层理1 | 3.40 | 1.85 | 3.62 |
| 水平层理2 | 5.16 | 2.81 | 5.37 |
| 水平层理3 | 5.40 | 2.96 | 2.70 |
| 水平层理4 | 2.85 | 1.56 | 3.20 |
| 平均值 | 4.20 | 2.30 | 3.72 |
| 垂直层理1 | 4.82 | 2.64 | 4.01 |
| 垂直层理2 | 6.70 | 3.64 | 5.07 |
| 垂直层理3 | 6.56 | 3.58 | 7.84 |
| 垂直层理4 | 4.12 | 2.26 | 3.79 |
| 平均值 | 5.55 | 3.03 | 5.18 |

1.3 油页岩物理力学性能实验结果分析

通过对农安油页岩在水平层理和垂直层理方向上的参数对比,发现无论在哪个方向上,油页岩强度为 $\sigma_{\text{抗压}} > \sigma_{\text{抗剪}} > \sigma_{\text{抗拉}}$,并且其抗压强度大于抗拉强度20倍。水平层理方向的抗压强度、抗拉强度都大于垂直层理方向的相应参数;而垂直层理方向的泊松比和弹性模量均大于水平层理方向的相应参数。在选取农安油页岩水力压裂方向时,因为垂直层理方向强度低,所以应尽量选择垂直层理方向原位破碎。实验结果如图3所示。

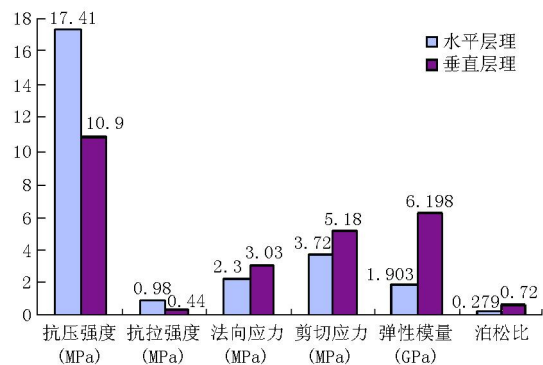


图3 农安油页岩物理力学性能实验结果

实验得出油页岩的抗拉强度低,满足文献[4]提供的水力压裂计算公式。水力压裂所需的最小主应力 σ_3 可根据单向抗拉实验得出:在单轴压缩条件下, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = \sigma_{\text{抗拉强度}}$,即油页岩在水平层理和垂直层理方向上的最小主应力 σ_3 为0.98和0.44 MPa^[5]。根据计算公式得到水力压裂中的毕奥特系数,裂隙开启、延伸压力及宽度等参数。

2 水力压裂基本参数的计算

2.1 裂隙开启、延伸压力及宽度方程

假设地层厚度均为 h , 饱和流体的地层初始饱和压力为 p_i 。

2.1.1 裂隙开启压力 $p_{i\infty}$

$$p_{i\infty} = (\sigma_3 - \eta p_{ir}) / (1 - \eta) \quad (1)$$

$$\eta = 1 - [Ap_e / (1 + \varepsilon)]$$

$$Ap_e = \alpha(1 - 2\mu) / (1 - \mu)$$

$$\varepsilon = (\alpha h \sqrt{\pi} + \sqrt{\alpha^2 h^2 \pi + 16}) / 4$$

$$\alpha = 30.808 \sqrt{\varphi \mu C / (kt)}$$

式中: σ_3 ——最小主应力; η ——效率因子; p_{ir} ——油页岩岩层平均压力; μ ——泊松比; α ——毕奥特系数; φ ——内摩擦角; C ——岩石特性极限粘结力, $C = \sigma_0 / E$; E ——弹性模量; k ——弹性抗力系数, $k =$

$E/(1 + \mu)r$; r ——钻孔水力压裂半径,取 100 cm;
 t ——压裂时间。

2.1.2 裂隙裂缝延伸压力 p_{ip}

此压力为裂缝扩展延伸时所需的井底压力。当裂隙尖端应力强度因子 K_i 大于地层岩石的临界应力强度因子 K_{ic} 时,裂缝失稳扩展。

$$K_i \geq K_{ic} \quad (2)$$

根据断裂力学理论:

$$K_i = \frac{1}{\sqrt{\pi L_1(t)}} \int_{-L_1(t)}^{L_1(t)} \Delta p(x) \left[\frac{L_1(t) + x}{L_1(t) - x} \right]^{\frac{1}{2}} dx \quad (3)$$

2.1.3 裂缝宽度方程

$$W(x, t) = \frac{2h(1 - \mu^2)}{E(1 - \eta)} [p_i(x, t) - p_{i\infty}] \quad (4)$$

2.2 以农安油页岩为例,确定水力压裂参数

2.2.1 农安油页岩相关参数

油页岩岩层埋深 235 m,地下水水位为 -6.06 m,油页岩岩层厚度 h 为 5 m,密度是 2000 kg/m³,体积模量是 36 GPa,剪切模量是 20 GPa,内摩擦角 φ 为 25°,粘聚力 c 为 15 GPa^[6]。油页岩物理力学性质见图 3。

2.2.2 农安油页岩裂隙开启、延伸压力及宽度等参数确定

根据上述方程和相关数据,计算得到农安油页岩水力压裂,裂隙开启压力:

$$p_{i\infty} = \frac{98000(1 + 22\alpha + \sqrt{5\alpha^2 + 1}) - (1 + 1.6\alpha\sqrt{5\alpha^2 + 1})p_{iv}}{0.6\alpha} \quad (5)$$

裂缝宽度:

$$W(x, t) = \frac{9.1(1 + 22\alpha + \sqrt{5\alpha^2 + 1})}{0.6\alpha E} [p_i(x, t) - p_{i\infty}] \quad (6)$$

油页岩岩层平均压力 p_{iv} 的计算公式:

$$P_{iv} = p_0 + G_p D$$

式中: p_0 ——自重应力; D ——埋藏深度; G_p ——地层压力, $G_p = \rho g$; ρ ——岩石密度; g ——重力加速度。

可以根据文献[7]提供的 $P_s - \sqrt{t}$ 曲线确定 $p_i(x, t)$ (t ——自停泵开始计算的时间)。

假设在裸眼油页岩地层中钻进,上覆岩层为砂页岩地层,按泵后 1 s 计算,毕奥特系数 α 是分别取 0.65 和 0.68^[8]。泵压选择 7 ~ 21 MPa,排量为 0.4 ~ 2 L/min。把假设条件代入式(5)和式(6)中,计算结果见表 4。它表示不同条件下的裂隙开启压力和裂缝宽度。

表 4 不同条件下油页岩的裂隙开启压力和裂缝宽度

| 岩性 | 毕奥特系数 | 埋深/m | 裂隙开启压力/MPa | 裂缝宽度/m |
|-----|-------|------|------------|--------|
| 油页岩 | 0.65 | 200 | 6.2 | 0.69 |
| | | 300 | 4.0 | 0.74 |
| | | 400 | 1.9 | 0.79 |
| | 0.68 | 200 | 6.1 | 0.69 |
| | | 300 | 4.0 | 0.74 |
| | | 400 | 2.0 | 0.79 |

从表 4 计算结果可以预期,水力压裂油页岩效果明显,效率高,客观上满足规模化开采油页岩的需要。水力压裂试验台正在设计研发中。

3 结论

(1) 实验确定农安油页岩在水平层理和垂直层理方向上的物理力学性能参数,包括抗压强度、抗拉强度、抗剪切强度等。从而计算得到了泊松比,弹性模量等岩石力学参数。

(2) 对比农安油页岩在水平层理和垂直层理上物理力学性能,无论哪个方向,油页岩的强度为 $\sigma_{抗压} > \sigma_{抗剪} > \sigma_{抗拉}$ 。水平层理方向抗压强度和抗拉强度大于垂直层理方向的相应参数;而垂直层理方向的抗剪切强度、弹性模量和泊松比大于水平层理方向的相应参数。在选取水力压裂的方向时,应尽量选择垂直层理方向破坏,因为垂直方向强度低。

(3) 以农安油页岩为例,毕奥特系数 α 分别取 0.65 和 0.68,以停泵后 1 s 时进行计算,在 200 ~ 400 m 的埋藏深度,裂隙开启压力为 2 ~ 6 MPa,裂缝宽度在 700 ~ 800 mm 之间。结果表明,使用不同的毕奥特系数,得出的裂隙开启压力和裂缝宽度相差不大。

参考文献:

- [1] 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):26-28.
- [2] 张保平,申卫兵,单文文. 岩石弹性模量与毕奥特(Blot)系数在压裂设计中的应用[J]. 石油钻采工艺,1996,18(3):60-65.
- [3] DY-94,中华人民共和国地质矿产部岩石物理力学性质试验规程[S].
- [4] 张荣力,何国伟,李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.
- [5] 齐伟. 岩体力学[M]. 吉林长春:吉林人民出版社,2000. 45-60.
- [6] 刘忠春,陈俊国,吴迪祥. 确定地层最小主应力及临界应力强度因子的新方法[J]. 大庆石油学院学报,1993,17(1):50-59.
- [7] 刘建中,刘翔鹤. 用封闭压力确定最小水平主应力[J]. 地震研究,1994,17(4):370-376.
- [8] 路保平,林永学,张传进. 水化对泥页岩力学性质影响的实验研究[J]. 地质力学学报,1999,5(1):65-70.