

汪清油页岩物理力学性质及裂缝起裂压力的研究

沈国军^{1,2,3}, 陈晨^{1,2,3}, 高帅⁴, 张晗^{1,2,3}, 陈勇^{1,2,3}, 张颖^{1,2,3}

(1.吉林大学建设工程学院,吉林 长春 130026; 2.油页岩地下原位转化与钻采技术国家地方联合工程实验室,吉林 长春 130026; 3.自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室,吉林 长春 130026; 4.山东省地矿工程勘察院,山东 济南 250014)

摘要:本文主要探究了吉林省汪清地区油页岩的物理力学性质及裂缝起裂压力。首先用 DNS300 型电子万能试验机对油页岩进行了物理力学性质的实验研究,分析并得到了油页岩的各项基本物理力学性质参数的取值范围。其中在垂直层理方向:油页岩的抗压强度范围是 21~30 MPa;抗拉强度范围是 1.1~3 MPa;弹性模量范围是 7.1~9.9 GPa;泊松比范围是 0.21~0.27;剪切模量是 3.4 GPa。在平行层理方向:抗压强度范围是 13~17 MPa;抗拉强度范围是 0.3~0.6 MPa;弹性模量范围是 1.2~1.6 GPa;泊松比范围是 0.31~0.36;剪切模量是 0.5 GPa。依据实验结果,选取合适参数,理论计算了汪清油页岩的裂缝起裂压力,并通过真三轴水力压裂装置进行了油页岩水力压裂实验,表明汪清油页岩裂缝起裂压力为 5.34 MPa。根据理论计算与实验结果,建议汪清油页岩现场水力压裂实验的起裂压力控制在 4~6 MPa。

关键词:汪清油页岩;物理力学性质;水力压裂实验;裂缝起裂压力

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)09-0001-04

Research on Wangqing Oil Shale Physical and Mechanical Properties and Hydraulic Fracturing Pressure/SHEN Guo-jun^{1,2,3}, CHEN Chen^{1,2,3}, GAO Shuai⁴, ZHANG Han^{1,2,3}, CHEN Yong^{1,2,3}, ZHANG Ying^{1,2,3} (1.College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2.National and Local Joint Engineering Laboratory of Oil Shale Underground Local Transformation and Drilling Technology, Changchun Jilin 130026, China; 3.Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China; 4. Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Ji'nan Shandong 250014, China)

Abstract: This paper mainly studied the physical and mechanical properties and the breakdown pressure of oil shale in Wangqing of Jilin Province. Firstly, the physical and mechanical properties of oil shale were studied with DNS300 electronic universal testing machine and the range of these parameters was obtained by analysis. In the vertical bedding direction, the compressive strength of oil shale is 21~30MPa, the tensile strength is 1.1~3MPa, the elastic modulus is 7.1~9.9GPa, the Poisson's ratio is 0.21~0.27 and the shear modulus is 3.4GPa. In the parallel bedding direction, the compressive strength is 13~17MPa, the tensile strength is 0.3~0.6MPa, the elastic modulus is 1.2~1.6GPa, the Poisson's ratio is 0.31~0.36 and the shear modulus is 0.5GPa. According to the experiment results, the breakdown pressure of Wangqing oil shale was calculated theoretically by selecting the appropriate parameters. Then the hydraulic fracturing experiments of oil shale were carried out by using true tri-axial hydraulic fracturing device, the results show that the breakdown pressure of Wangqing oil shale is 5.34MPa. On the basis of the theoretical calculation and experiment results, it is suggested that the breakdown pressure of the hydraulic fracturing experiment in the site of Wangqing oil shale should be controlled in 4~6MPa.

Key words: Wangqing oil shale; physical and mechanical properties; hydraulic fracturing experiment; breakdown pressure of hydraulic fracturing

0 引言

21 世纪以来随着工业化的速度不断加快,包括石油资源在内的一次性能源需求日益增大。到

2018 年为止,由于持续增长的消耗量,能源储量供不应求,因此全世界都在大力开发新的能源以适应社会经济的快速发展。全球油页岩资源储量巨大,

收稿日期:2018-04-11; 修回日期:2018-07-26

基金项目:吉林省科技发展计划—重点科技攻关项目“油页岩原位体积压裂工艺研究”(编号:20160204011SF)

作者简介:沈国军,男,汉族,1995 年生,吉林大学在读硕士研究生,地质工程专业,从事油页岩原位开采技术研究,吉林省长春市西民主大街 938 号,shenguojun1995@sina.com。

通信作者:陈晨,男,汉族,1965 年生,教授,博士生导师,从事岩土工程钻凿技术与计算机模拟、油页岩地下原位钻采研究,吉林省长春市西民主大街 938 号,chenchen@jlu.edu.cn。

可很好的作为石油资源的代替品。评估显示,中国油页岩储量非常巨大,居世界第二位,主要分布吉林、辽宁、广东三省。如果能尽快将它们变成可大规模生产使用的资源,对中国未来的经济发展是非常有利的。如何低成本而高效率的开发这些油页岩资源自然就成了我国新能源战略的重要部分^[1-6]。

在先导实验中,通常采用水力压裂技术来使油页岩产生裂隙,以便提高油页岩井的油气产量。在水力压裂后,油页岩的裂隙通道大幅度增加,这有助于提高油气的开采效率^[7]。研究表明,油页岩的抗压强度、抗拉强度等物理力学性质是影响水力压裂的重要因素。此外,地应力和岩石力学性质也在水力压裂技术中扮演着重要的角色^[8]。

本文将通过对吉林省汪清地区油页岩进行物理力学性质实验,归纳出了油页岩物理力学性质的特点,获得了汪清地区油页岩物理力学性质参数的取值范围,并计算了油页岩的裂隙开启压力。然后通过油页岩进行水力压裂实验,确定了汪清油页岩的裂缝开启压力。

1 汪清油页岩的物理力学性质实验研究

1.1 油页岩的物理力学性质的相关参数测试实验

岩石强度特征等力学性质在工程设计中起着重要作用^[9]。油页岩的抗拉强度、抗压强度、弹性模量、泊松比、剪切模量,抗剪强度等物理力学性质在水力压裂力学分析中扮演着重要的角色,因此获取油页岩的物理力学性质参数对于油页岩压裂实验至关重要。

通过试验机给一定尺寸的油页岩样品施加一个垂直载荷,使其发生压缩破坏。此时,试验机显示出岩石的最大破坏载荷,用最大载荷即可计算得到单轴抗压强度^[10]。

岩石抗拉强度测试方法有多种,其中最常用的一种是巴西圆盘法^[11],本实验即采用此方法来测试油页岩抗拉强度。

本次实验采用六组汪清地区的油页岩试样,油页岩试样的尺寸[直径/mm、高度/mm]分别是:①[49.78,99.53];②[48.58,98.36];③[49.58,100.50];④[50.00,101.72];⑤[49.20,98.78];⑥[49.22,98.86]。

1.2 实验过程

本次实验采用 DNS300 型电子万能试验机,测试过程如图 1~3 所示。



图 1 垂直层理方向单轴压缩变形实验



图 2 平行层理方向单轴压缩变形实验



图 3 劈裂抗拉强度实验

1.3 实验结果

通过实验测出的油页岩物理力学性质参数数值见表 1、表 2。

表 1 汪清油页岩抗压强度

加载方向	样品编号	单轴抗压强度/MPa	均值/MPa
垂直层理	H-1	29.65	25.62
	H-2	21.34	
	H-3	25.86	
平行层理	C-1	14.48	14.88
	C-2	13.19	
	C-3	16.96	

通过计算,得到弹性模量、泊松比及剪切模量等物理力学性质参数,见表 3。

1.4 实验结果分析

油页岩物理力学性质测试实验结果见图 4。

表 2 汪清油页岩抗拉强度

加载方向	样品编号	抗拉强度/MPa	均值/MPa
垂直层理	H-1	1.31	1.81
	H-2	3.01	
	H-3	1.10	
平行层理	C-1	0.44	0.44
	C-2	0.60	
	C-3	0.29	

表 3 汪清油页岩弹性模量、泊松比及剪切模量

方向	样品编号	弹性模量/GPa	泊松比	均值		剪切模量/GPa
				弹性模量/GPa	泊松比	
垂直层理	H-1	7.08	0.27	8.4	0.23	3.41
	H-2	9.90	0.21			
	H-3	8.23	0.22			
平行层理	C-1	1.40	0.34	1.4	0.34	0.52
	C-2	1.19	0.36			
	C-3	1.60	0.31			

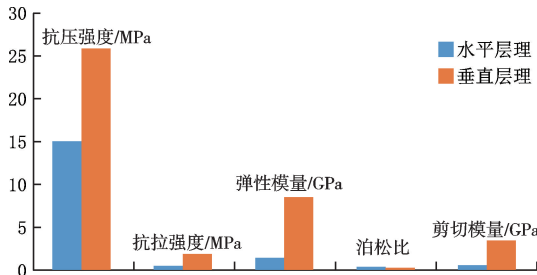


图 4 汪清油页岩物理力学性质实验结果

通过测试汪清油页岩的物理力学性质的相关参数,得到了汪清油页岩垂直层理和水平层理方向上的一系列物理力学性质的实验参数。首先将抗压强度和抗拉强度进行了对比,发现无论在哪个方向上抗压强度都远远大于抗拉强度,抗压强度至少超过了抗拉强度的 10 倍,这说明油页岩是一种抗压性质较好的矿物。其次,发现油页岩垂直层理方向的抗压强度、抗拉强度、弹性模量和剪切模量要远远大于水平层理方向的抗压强度、抗拉强度、弹性模量和剪切模量,垂直层理方向的泊松比要小于水平层理方向的泊松比。

由此实验得出汪清油页岩一些物理力学性质参数的取值范围,见表 4。

表 4 汪清油页岩物理力学性质的最大值、最小值

取值范围	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	剪切模量/GPa
最大值(垂直层理)	30	3.0	9.9	0.27	3.4
最小值(垂直层理)	21	1.1	7.1	0.21	3.4
最大值(水平层理)	17	0.6	1.6	0.36	0.5
最小值(水平层理)	13	0.3	1.2	0.31	0.5

由表 4 知,在垂直层理方向:油页岩的抗压强度

范围是 21~30 MPa;抗拉强度范围是 1.1~3 MPa;弹性模量范围是 7.1~9.9 GPa;泊松比范围是 0.21~0.27;剪切模量是 3.4 GPa。在平行层理方向:抗压强度范围是 13~17 MPa;抗拉强度范围是 0.3~0.6 MPa;弹性模量范围是 1.2~1.6 GPa;泊松比范围是 0.31~0.36;剪切模量是 0.5 GPa。

2 裂缝起裂压力的计算

2.1 裂缝起裂压力的计算方程

根据严轩辰、刘鑫鹏等人的研究,建议采用以下公式来计算裂缝起裂压力。

$$P_{i\infty} = (\sigma_3 - \eta P_{iv}) / (1 - \eta)$$

$$\eta = 1 - [A_{pe} / (1 + \epsilon)]$$

$$A_{pe} = \alpha(1 - 2\mu) / (1 - \mu) \quad (1)$$

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

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

式中: $P_{i\infty}$ ——裂缝起裂压力,MPa; σ_3 ——最小主应力,MPa; η ——效率因子; P_{iv} ——油藏平均压力,MPa; α ——毕奥特系数; h ——地层厚度, m; p_0 ——自重应力, Pa; G_p ——地层压力,MPa, $G_p = \rho g$, g 为重力加速度; D ——埋藏深度, m^[12-14]。

2.2 汪清油页岩裂缝起裂压力的参数确定

在裸眼油页岩地层中钻进,上覆岩层为砂页岩地层。毕奥特系数取 0.65^[15]; μ 取 0.29; $\eta = 0.90$; $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$; $h = 4 \text{ m}$; 类比桦甸油页岩, σ_3 取 4 MPa^[16]; 代入式(1)计算,得到在大约 190 m 埋深处的油页岩层裂缝起裂压力约为 4.81 MPa。

3 汪清油页岩的水力压裂实验研究

3.1 水力压裂物理模拟实验系统构造及其作用

采用自主研发的真三轴水力压裂物理模拟实验系统进行油页岩水力压裂实验,此实验装置能够模拟地层所受到的各种地应力条件^[12],其基本原理如文献^[12]所述,水力压裂设备见图 5。

3.2 油页岩水力压裂实验结果

本文将制作完成的油页岩样品进行水力压裂实验,实验给定的三向围压为计算得出的原始地应力,共一组实验进行压裂。实验过程中的泵压变化如表 5、图 6 所示。

由表 5、图 6 知:油页岩的起裂压力为 5.34 MPa,与计算出的裂缝起裂压力差距不大。因此对

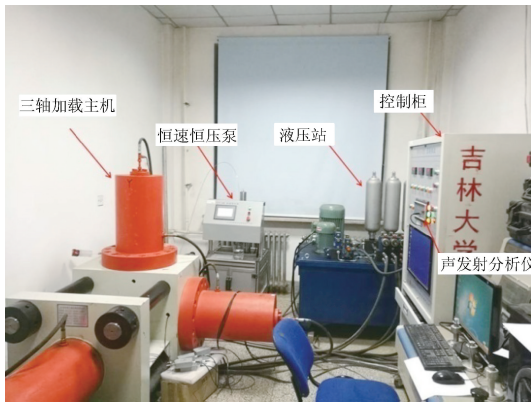


图5 水力压裂设备示意图

表5 油页岩水力压裂实验中泵压变化

时间/min	压力/MPa	时间/min	压力/MPa	时间/min	压力/MPa
0	0.12	18	2.71	36	2.50
2	0.17	20	2.64	38	2.48
4	0.53	22	2.60	40	2.46
6	1.29	24	2.54	42	2.45
8	4.04	26	2.54	44	2.46
10	5.34	28	2.53	46	2.45
12	3.40	30	2.54	48	0.12
14	3.04	32	2.52		
16	2.77	34	2.50		

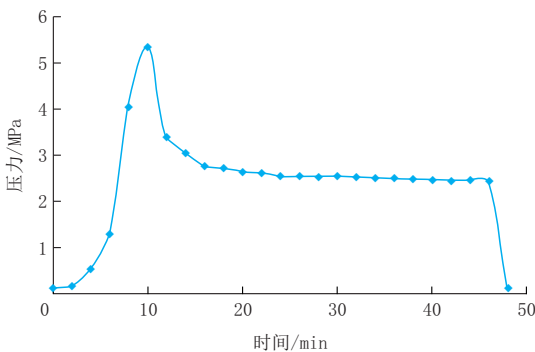


图6 油页岩水力压裂过程中泵压变化

汪清油页岩做现场水力压裂实验时,建议压力范围控制在4~6 MPa。

4 结论

(1)实验确定了汪清油页岩在水平层理和垂直层理方向上的抗压强度、抗拉强度、剪切模量、弹性模量、泊松比等物理力学性质的参数。根据实验结果还得到,在垂直层理方向:油页岩的抗压强度范围是21~30 MPa;抗拉强度范围是1.1~3 MPa;弹性模量范围是7.1~9.9 GPa;泊松比范围是0.21~0.27;剪切模量范围是3.4 GPa。在平行层理方向:

抗压强度范围是13~17 MPa;抗拉强度范围是0.3~0.6 MPa;弹性模量范围是1.2~1.6 GPa;泊松比范围是0.31~0.36;剪切模量是0.5 GPa。

(2)首先将抗压强度和抗拉强度进行了对比,发现在任何方向上抗压强度都远远大于抗拉强度,至少超过了抗拉强度的10倍。其次,对比垂直层理和水平层理方向上的物理力学性质参数,发现垂直层理方向的抗压强度、抗拉强度、剪切模量和弹性模量要远远大于水平层理方向的相关参数,而泊松比恰好相反。在进行水力压裂时,应尽量选择水平方向作为压裂方向。

(3)在190 m左右的埋深处,裂缝起裂压力大约为4.81 MPa。通过油页岩水力压裂实验,确定汪清油页岩的裂缝起裂压力为5.34 MPa。因此对汪清油页岩做现场水力压裂实验时,建议压力范围控制在4~6 MPa。

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] 国土资源部油气资源战略研究中心.世界油气资源信息手册(2008)[M].北京:地质出版社,2009.
- [3] 钱家麟,尹亮.油页岩—石油的补充能源[M].北京:中国石化出版社,2008.
- [4] 国土资源部,国家发展和改革委员会,财政部.新一轮全国油气资源评价成果简介[R].2009.
- [5] 侯吉礼,马跃,李术元,等.世界油页岩资源的开发利用现状[J].化工进展,2015,(5):1183-1190.
- [6] 刘招君,董清水,叶松青,等.中国油页岩资源现状[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,(6):869-876.
- [7] 严轩辰.农安和桦甸油页岩力学性质及其水力压裂与破碎关键参数研究[D].吉林长春:吉林大学,2012.
- [8] 张保平,申卫兵,单文文.岩石弹性模量与毕奥特(Biot)系数在压裂设计中的应用[J].石油钻采工艺,1996,18(3):60-65.
- [9] 赵文.岩石力学[M].湖南长沙:中南大学出版社,2010.
- [10] 高帅.油页岩水平井水力压裂裂缝起裂与延伸机理研究[D].吉林长春:吉林大学,2017.
- [11] 邓华锋,李建林,朱敏,等.圆盘厚径比对岩石劈裂抗拉强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,(4):792-798.
- [12] 严轩辰.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.
- [13] YAN Xuanchen, CHEN Chen, LIU Xinpeng, et al. Physical and mechanical parameters of borehole hydraulic mining of Nong'an oil shale[J].Oil Shale,2012,29(3):237-247.
- [14] 刘鑫鹏.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.
- [15] 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.
- [16] 王维.油页岩水力压裂数值模拟及实验研究的确定[D].吉林长春:吉林大学,2014.