

# 汪清、农安和桦甸油页岩物理力学性质及 裂缝起裂压力对比分析研究

陈晨<sup>1,2,3</sup>, 沈国军<sup>1,2,3</sup>, 张颖<sup>1,2,3</sup>, 高帅<sup>4</sup>, 张晗<sup>1,2,3</sup>, 王亚斐<sup>1,2,3</sup>

(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、农安和桦甸地区油页岩物理力学性质的关键参数和裂缝起裂压力的取值范围及其分布特点。首先对汪清、农安、桦甸三地油页岩的抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比参数取值范围进行了对比分析, 发现三地油页岩的抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比范围是相近的, 由此得到吉林省油页岩抗压强度的范围是 9~30 MPa, 均值是 15.35 MPa; 抗拉强度的范围是 0.3~3 MPa, 均值是 0.95 MPa; 弹性模量的范围是 0.22~9.9 GPa, 均值是 3.1 GPa; 泊松比的范围是 0.2~0.5, 均值是 0.33。随后, 计算了三地油页岩在不同埋藏深度下的裂缝起裂压力, 发现在相同埋藏深度下, 汪清、农安、桦甸三地油页岩裂缝起裂压力是依次减小的; 并且随埋藏深度的增加, 裂缝起裂压力近似线性增大。最后, 得到吉林省油页岩在不同埋藏深度下的裂缝起裂压力: 当埋藏深度  $d=200$  m 时, 起裂压力范围是 0.5~2.3 MPa; 当  $d=400$  m 时, 起裂压力范围是 1.0~4.5 MPa; 当  $d=600$  m 时, 起裂压力范围是 1.6~6.8 MPa; 当  $d=800$  m 时, 起裂压力范围是 2.1~9.0 MPa; 因此, 对吉林省油页岩进行水力压裂开采时, 建议压力范围控制在 0.5~9 MPa。

**关键词:** 汪清、农安、桦甸油页岩; 物理力学性质; 裂缝起裂压力

**中图分类号:** TD83; P584 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)03-0001-06

## Comparative analysis of physical and mechanical properties and fracture initiation pressure of oil shale in Wangqing, Nong'an and Huadian

CHEN Chen<sup>1,2,3</sup>, SHEN Guojun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ying<sup>1,2,3</sup>, GAO Shuai<sup>4</sup>,

ZHANG Han<sup>1,2,3</sup>, WANG Yafei<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of In-situ Conversion, Drilling and Exploitation Technology for Oil Shale, 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, Jinan Shandong 250014, China)

**Abstract:** This paper mainly explores the key physical and mechanical parameters, and fracture initiation pressure range and distribution characteristics of oil shale in the Wangqing, Nong'an and Huadian areas of Jilin Province. Comparison and analysis of compressive strength, tensile strength, elastic modulus and Poisson's ratio of oil shale in Wangqing, Nong'an and Huadian lead to the finding that the ranges of compressive strength, tensile strength,

**收稿日期:** 2018-11-05; **修回日期:** 2019-02-20 **DOI:** 10.12143/j.tkgc.2019.03.001

**基金项目:** 吉林省科技发展计划一重点科技攻关项目“油页岩原位体积压裂工艺研究”(编号: 20160204011SF, 2016-2018)

**作者简介:** 陈晨, 男, 汉族, 1965 年生, 副院长, 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等工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, chenchen@jlu.edu.cn。

**通信作者:** 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工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, shenguojun1995@sina.com。

**引用格式:** 陈晨, 沈国军, 张颖, 等. 汪清、农安和桦甸油页岩物理力学性质及裂缝起裂压力对比分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(3): 1-6.

CHEN Chen, SHEN Guojun, ZHANG Ying, et al. Comparative analysis of physical and mechanical properties and fracture initiation pressure of oil shale in Wangqing, Nong'an and Huadian[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(3): 1-6.

elastic modulus and Poisson's ratio of oil shale are similar in Wangqing, Nong'an and Huadian of Jilin Province. The results show that the range of compressive strength of Jilin oil shale is 9 to 30MPa, and the average value is 15.35MPa; the range of tensile strength is 0.3 to 3MPa, and the average value is 0.95MPa; the range of elastic modulus is 0.22 to 9.9GPa, and the average value is 3.1GPa; the range of Poisson's ratio is 0.2 to 0.5, and the average value is 0.33. Calculation of the fracture initiation pressure of oil shale at different burial depth indicates that the fracture initiation pressures of Wangqing, Nong'an and Huadian oil shale decrease in turn at the same burial depth. With the increase of burial depth, the fracture initiation pressure almost increases linearly. At last, the fracture initiation pressure of Jilin oil shale under different burial depth is found as: when  $d=200\text{m}$ , the range of the fracture initiation pressure is 0.5 to 2.3MPa; when  $d=400\text{m}$ , the range of the fracture initiation pressure is 1.0 to 4.5MPa; when  $d=600\text{m}$ , the range of the fracture initiation pressure is 1.6 to 6.8MPa; and when  $d=800\text{m}$ , the range of the fracture initiation pressure is 2.1 to 9.0MPa. Therefore, it is recommended that the pressure range should be controlled at 0.5 to 9MPa for the fracture initiation pressure of Jilin oil shale.

**Key words:** Wangqing, Nong'an and Huadian oil shale; physical and mechanical properties; fracture initiation pressure

## 0 引言

21世纪以来,随着工业化的速度不断加快,能源的消耗量也在日益的增大。到2018年,由于持续增长的消耗量,能源储量已经供不应求。作为能源的重要组成部分,石油也日益被大量消耗,世界各地的石油储量在急速的减少。因此各国都在积极寻找新的和石油功用相似的能源来代替石油,以作为社会工业发展的动力。在替代石油的各种资源中,油页岩具有其它资源不可比拟的优势,而且全球油页岩资源储量巨大,如果能将其合理开采使用,将会减少因资源短缺而对社会发展带来的负面效应。调查显示,中国油页岩储量非常巨大,居世界第二位,主要分布在吉林、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。而如何低成本、高效率的提取这些油页岩资源中的页岩油自然就成为了我国新能源战略中的关键课题<sup>[1-13]</sup>。

在先导实验中,通常采用水力压裂技术来使油页岩产生裂缝,这对提高油气的开采效率有很大帮助<sup>[14]</sup>。研究表明,油页岩的抗压强度、抗拉强度等物理力学性质以及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<sup>[15]</sup>。

从2011年到2018年,严轩辰、刘鑫鹏等<sup>[14,16-18]</sup>陆续通过实验测量得到了吉林省农安、桦甸等地的油页岩物理力学性质及水力压裂关键参数的取值范围。本文对比了吉林省汪清、农安、桦甸三地的油页岩,总结得到了吉林省油页岩物理力学性质的取值范围。随后,计算了汪清、农安、桦甸三地油页岩的裂缝起裂压力,归纳出了吉林省油页岩裂缝起裂压力的取值范围和分布特点。

## 1 汪清、农安、桦甸油页岩的物理力学性质对比分析

岩石强度特征等力学性质在工程设计中起着重要作用<sup>[19]</sup>。由于油页岩的抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比是油页岩进行水力压裂实验的必备物理力学性质参数,因此获取油页岩的物理力学性质关键参数是油页岩水力压裂实验的前提条件。根据严轩辰、刘鑫鹏等人的研究,分析得到了汪清、农安、桦甸三地油页岩物理力学性质关键参数的取值范围。

### 1.1 抗压强度和抗拉强度

通过实验测出的汪清、农安油页岩抗压强度、抗拉强度数值见表1~5。

表1 汪清油页岩单轴抗压强度

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

表2 汪清油页岩单轴抗拉强度

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

表 3 农安油页岩单轴抗压强度<sup>[14,16-17]</sup>

**Table 3 Uniaxial compressive strength of Nong'an oil shale**

加载方向	样品编号	单轴抗压强度/MPa	均值/MPa
垂直层理	V-1	11.88	10.90
	V-2	8.59	
	V-3	12.23	
平行层理	H-1	15.64	17.44
	H-2	19.27	
	H-3	16.51	

表 4 农安油页岩单轴抗拉强度<sup>[14,16-17]</sup>

**Table 4 Uniaxial tensile strength of Nong'an oil shale**

加载方向	样品编号	抗拉强度/MPa	均值/MPa
垂直层理	V-1	0.50	0.46
	V-2	0.34	
	V-3	0.53	
平行层理	H-1	0.70	0.98
	H-2	1.17	
	H-3	1.07	

表 5 汪清、农安油页岩抗压、抗拉强度对比

**Table 5 Comparison of compressive strength and tensile strength between Wangqing and Nong'an oil shale**

地区	加载方向	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
汪清	水平	14.88	1.81
	垂直	25.62	0.44
	均值	20.25	1.13
农安	水平	17.44	0.98
	垂直	10.90	0.46
	均值	14.17	0.72

由表 1~5 可知,汪清油页岩的抗压强度的范围是 13~30 MPa(取实验数据近似值作为该地区油页岩物理力学性质的取值范围,下同),均值是 20.25 MPa;抗拉强度的范围是 0.3~3 MPa,均值是 1.13 MPa。农安油页岩的抗压强度的范围是 9~19 MPa,均值是 14.17 MPa;抗拉强度的范围是 0.3~1.2 MPa,均值是 0.72 MPa。但是,汪清油页岩水平层理方向的抗压强度小于垂直层理方向的抗压强度,农安油页岩水平层理方向的抗压强度大于垂直层理方向的抗压强度。

桦甸油页岩的抗压强度、抗拉强度数值如表 6 所示。

表 6 桦甸油页岩抗压强度、抗拉强度<sup>[18]</sup>

**Table 6 Compressive strength and tensile strength of Huadian oil shale**

取值	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
最大值	19.21	1.52
最小值	8.83	0.76
均值	11.63	0.99

由表 6 知,桦甸油页岩的抗压强度的范围是 9~19 MPa,均值是 11.63 MPa;抗拉强度的范围是 0.8~1.5 MPa,均值是 0.99 MPa。对比桦甸油页岩,得到吉林省汪清、农安、桦甸三地油页岩的抗压强度、抗拉强度范围是相近的,由此推得吉林省油页岩的抗压强度的范围是 9~30 MPa,均值是 15.35 MPa;抗拉强度的范围是 0.3~3 MPa,均值是 0.95 MPa。如图 1、图 2 所示。

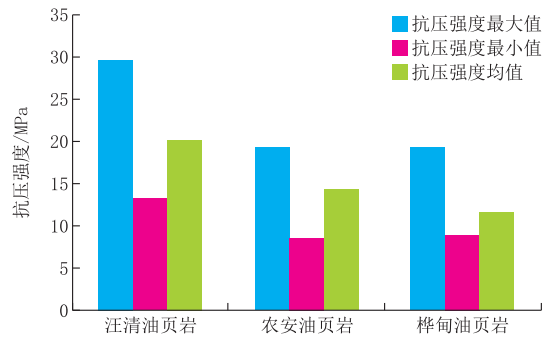


图 1 汪清、农安、桦甸三地油页岩抗压强度最大值、最小值、均值  
Fig.1 Maximum, minimum and average compressive strength of oil shale in three areas of Wangqing, Nong'an and Huadian

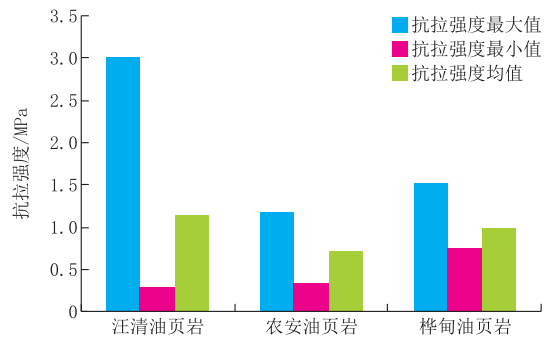


图 2 汪清、农安、桦甸三地油页岩抗拉强度最大值、最小值、均值  
Fig.2 Maximum, minimum and average tensile strength of oil shale in three areas of Wangqing, Nong'an and Huadian

## 1.2 弹性模量和泊松比

通过计算,得到弹性模量、泊松比等物理力学性质关键参数,如表 7~9 所示。

表 7 汪清油页岩弹性模量、泊松比

**Table 7 Elastic modulus and Poisson's ratio of Wangqing oil shale**

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

表8 汪清、农安油页岩弹性模量和泊松比对比<sup>[14,16-17]</sup>

Table 8 Comparison of elastic modulus and Poisson's ratio of Wangqing and Nong'an oil shale

地区	弹性模量/GPa			泊松比		
	水平	垂直	均值	水平	垂直	均值
汪清	1.4	8.4	4.9	0.34	0.23	0.29
农安	1.9	6.2	4.1	0.28	0.48	0.38

表9 桦甸油页岩弹性模量和泊松比<sup>[18]</sup>

Table 9 Elastic modulus and Poisson's ratio of Huadian oil shale

取值	弹性模量/GPa	泊松比
最大值	0.39	0.35
最小值	0.22	0.27
均值	0.29	0.30

由表7~9知,汪清油页岩弹性模量的范围是1.4~9.9 GPa,均值是4.9 GPa;泊松比的范围是0.21~0.36,均值是0.29。农安油页岩弹性模量的范围是1.9~6.2 GPa,均值是4.1 GPa;泊松比的范围是0.28~0.48,均值是0.38。桦甸油页岩弹性模量的范围是0.22~0.39 GPa,均值是0.29 GPa;泊松比的范围是0.27~0.35,均值是0.31。对比发现,汪清、桦甸和农安三地油页岩的泊松比范围较为接近,但是桦甸油页岩弹性模量较小。由于裂缝起裂压力随弹性模量的增大而增大<sup>[15]</sup>,因此可以判断桦甸油页岩的裂缝起裂压力是较小的。同时可得到,吉林省油页岩的弹性模量的范围是0.22~9.9 GPa,均值是3.1 GPa;泊松比的范围是0.2~0.5,均值是0.33。如图3、图4所示。

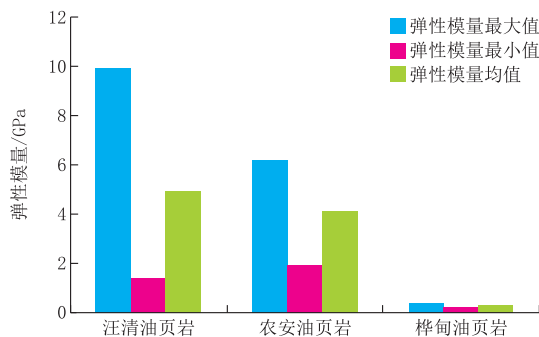


图3 汪清、农安、桦甸三地油页岩弹性模量最大值、最小值、均值  
Fig.3 Maximum, minimum and average elastic modulus of oil shale in three areas of Wangqing, Nong'an and Huadian

## 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(1)<sup>[16-18]</sup>来计算裂缝起裂压力。

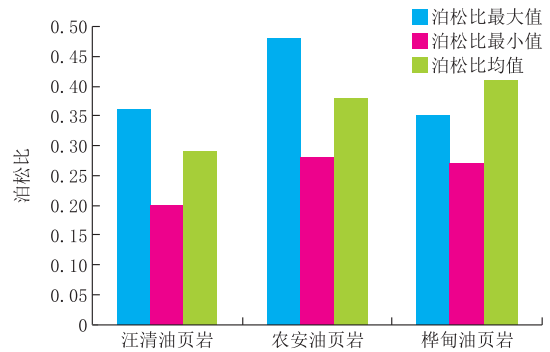


图4 汪清、农安、桦甸三地油页岩泊松比最大值、最小值、均值  
Fig.4 Maximum, minimum and average Poisson's ratio of oil shale in three areas of Wangqing, Nong'an and Huadian

$$\begin{cases} P_{i\infty} = (\sigma_3 - \eta P_{iv}) / (1 - \eta) \\ \eta = 1 - A_{pe} / (1 + \epsilon) \\ A_{pe} = \alpha (1 - 2\mu) / (1 - \mu) \\ \epsilon = (ah\sqrt{\pi} + \sqrt{a^2 h^2 \pi + 16}) / 4 \\ P_{iv} = p_0 + G_p d \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{i\infty}$ ——裂缝起裂压力, MPa;  $\sigma_3$ ——最小主应力, MPa;  $\eta$ ——效率因子;  $P_{iv}$ ——油藏平均压力, MPa;  $\alpha$ ——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,  $G_p = \rho g$ ;  $\rho$ ——密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$ ——重力加速度,  $\text{N}/\text{kg}$ ;  $d$ ——埋藏深度, m。

### 2.2 汪清、农安、桦甸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,上覆岩层为砂泥岩地层,毕奥特系数取0.65<sup>[20]</sup>;汪清油页岩上覆地层主要由细砂岩、粉砂岩、砂质页岩、泥质页岩及油页岩组成<sup>[21]</sup>,其最小水平地应力梯度可取均值20.09  $\text{kPa}/\text{m}$ <sup>[22]</sup>,  $\rho = 2150 \text{ kg}/\text{m}^3$ <sup>[23]</sup>,  $\mu$ 取0.29,  $\eta = 0.90$ ;农安油页岩上覆岩层为泥岩,天然平均密度  $\rho = 2420 \text{ kg}/\text{m}^3$ <sup>[24]</sup>,最小水平地应力的平均梯度是22.62  $\text{kPa}/\text{m}$ <sup>[22]</sup>,  $\mu$ 取0.38,  $\eta = 0.94$ ;桦甸油页岩上覆岩层为砂岩,天然平均密度  $\rho = 2150 \text{ kg}/\text{m}^3$ <sup>[18]</sup>,最小水平地应力的平均梯度是19.23  $\text{kPa}/\text{m}$ <sup>[18]</sup>,  $\mu$ 取0.31,  $\eta = 0.90$ ;  $h = 4 \text{ m}$ ;根据文献<sup>[25]</sup>,计算得到最小主应力  $\sigma_3$ 。将以上各参数代入式(1)计算,得到裂缝起裂压力参数如表10所示。根据表10,画出图5。

由表10、图5知,在相同埋藏深度下,汪清、农安、桦甸三地油页岩裂缝起裂压力是依次减小的;并且随埋藏深度的增加,裂缝起裂压力近似线性增大。同时,得到吉林省油页岩在不同埋藏深度下的裂缝

表 10 汪清、农安和桦甸三地油页岩在不同埋深条件下的裂缝起裂压力

Table 10 Fracture initiation pressure of oil shale at different burial depths in three areas of Wangqing, Nong'an and Huadian

埋藏深度/ m	起裂压力/MPa		
	汪清	农安	桦甸
200	2.25	1.09	0.53
400	4.51	2.18	1.07
600	6.76	3.27	1.60
800	9.02	4.36	2.14

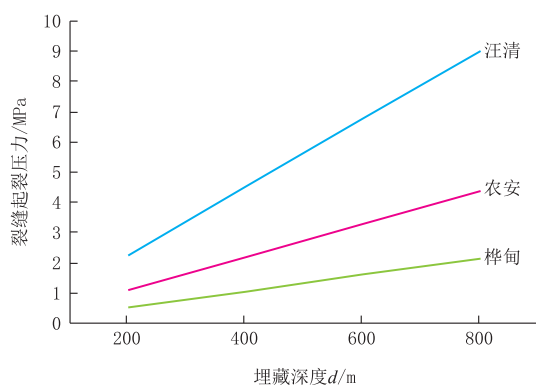


图 5 汪清、农安、桦甸三地油页岩不同埋藏深度下的裂缝起裂压力变化

Fig.5 Variation of hydraulic fracturing pressure of oil shale at different burial depths in three areas of Wangqing, Nong'an and Huadian

起裂压力:当  $d=200$  m 时,起裂压力范围是 0.5~2.3 MPa;当  $d=400$  m 时,起裂压力范围是 1.0~4.5 MPa;当  $d=600$  m 时,起裂压力范围是 1.6~6.8 MPa;当  $d=800$  m 时,起裂压力范围是 2.1~9.0 MPa。由此可知,在近地面范围内,吉林省油页岩裂缝起裂压力较小,因此进行大规模水力压裂开采是可行的,并给出压力范围为 0.5~9.0 MPa。

### 3 结论

(1)文章首先通过分析汪清、农安、桦甸三地油页岩的物理力学性质关键参数,得到了各项力学性质关键参数的取值范围。其中,汪清油页岩抗压强度的范围是 13~30 MPa,均值是 20.25 MPa;抗拉强度的范围是 0.3~3 MPa,均值是 1.13 MPa。农安油页岩抗压强度的范围是 9~19 MPa,均值是 14.17 MPa;抗拉强度的范围是 0.3~1.2 MPa,均值是 0.72 MPa。桦甸油页岩抗压强度的范围是 9~19 MPa,均值是 11.63 MPa;抗拉强度的范围是 0.8~1.5 MPa,均值是 0.99 MPa。汪清油页岩弹性模量的范围是 1.4~9.9 GPa,均值是 4.9 GPa;泊松比的范围是 0.21~0.36,均值是 0.29。农安油

页岩弹性模量的范围是 1.9~6.2 GPa,均值是 4.1 GPa;泊松比的范围是 0.28~0.48,均值是 0.38。桦甸油页岩弹性模量的范围是 0.22~0.39 GPa,均值是 0.29 GPa;泊松比的范围是 0.27~0.35,均值是 0.31。

(2)对比汪清、农安、桦甸三地油页岩在水平层理方向的抗压强度、抗拉强度、弹性模量和泊松比,发现吉林省汪清、农安、桦甸三地油页岩的抗压强度、抗拉强度范围是相近的。由此推得,吉林省油页岩的抗压强度范围是 8~30 MPa,均值是 15.35 MPa;抗拉强度范围是 0.2~3 MPa,均值是 0.95 MPa。但是,汪清油页岩水平层理方向的抗压强度小于垂直层理方向的抗压强度,农安油页岩水平层理方向的抗压强度大于垂直层理方向的抗压强度。同时发现,汪清、桦甸和农安三地油页岩的泊松比范围较为接近,但是桦甸油页岩弹性模量较小。其中,油页岩的弹性模量的范围是 0.29~6.2 GPa,均值是 3.1 GPa;泊松比的范围是 0.2~0.5,均值是 0.33。

(3)在相同埋藏深度下,汪清、农安、桦甸三地油页岩裂缝起裂压力是依次减小的;并且随埋藏深度的增加,裂缝起裂压力近似线性增大。同时,得到吉林省油页岩在不同埋藏深度下的裂缝起裂压力:当  $d=200$  m 时,起裂压力范围是 0.5~2.3 MPa;当  $d=400$  m 时,起裂压力范围是 1.0~4.5 MPa;当  $d=600$  m 时,起裂压力范围是 1.6~6.8 MPa;当  $d=800$  m 时,起裂压力范围是 2.1~9.0 MPa。可以知道,吉林省油页岩在近地面范围内裂缝起裂压力较小,因此进行大规模水力压裂开采技术是可行的,并且建议压力范围控制在 0.5~9.0 MPa。

### 参考文献(References):

- [1] A O. Oil shale as a power fuel[J]. Oil Shale, 2005,22(S4): 367-368.
- [2] Dyni J.R. Geology and resources of some world oil-shale deposits[J]. Oil Shale, 2003,20(3):193-252.
- [3] Jiang X.M., Han X.X., Cui Z.G. Progress and recent utilization trends in combustion of Chinese oil shale[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2007,33(6):552-579.
- [4] 刘磊,金晶,赵庆庆,等.中国及世界一次能源消费结构现状分析[J].能源研究与信息,2014,(1):7-11.
- [5] LIU Lei, JIN Jing, ZHAO Qingqing, et al. Study on the structure of China and world primary energy consumption[J]. Energy Research and Information, 2014,(1):7-11.
- [6] 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.
- QIAN Jialin, YIN Liang. Oil shale: petroleum alternative [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2008.
- [6] 陈晨,张祖培,王森.吉林油页岩开采的新模式[J].中国矿业,2007,16(5):55-57.
- CHEN Chen, ZHANG Zupei, WANG Miao. The new model of mining oil shale in Jilin Province[J]. China Mining Magazine, 2007,16(5):55-57.
- [7] 闫澈,姜秀民.中国油页岩的能源利用研究[J].中国能源,2000,(9):22-26.
- YAN Che, JIANG Xiumin. Study on utilization of oil shale resources in China[J]. Energy of China, 2000,(9):22-26.
- [8] 牛继辉,陈殿义.国外油页岩的地下转化开采方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):1027-1030.
- NIU Jihui, CHEN Dianyi. The existing state about underground mining methods of the oil shale[J]. Journal of Jilin University (Geosciences), 2006,36(6):1027-1030.
- [9] 孟庆涛.油页岩资源评价方法研究[D].吉林长春:吉林大学,2007.
- MENG Qingtao. Study on oil shale resource evaluation method [D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2007.
- [10] 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.
- CHEN Chen, SUN Youhong. Mining mode for oil shale[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(10):26-28.
- [11] 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.
- HOU Jili, MA Yue, LI Shuyuan, et al. Development and utilization of oil shale worldwide[J]. Progress in Chemical Industry, 2015,(5):1183-1190.
- [12] 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),2006,36(6):869-876.
- LIU Zhaojun, DONG Qingshui, YE Songqing, et al. The situation of oil shale resources in China[J]. Journal of Jilin University (Geosciences), 2006,36(6):869-876.
- [13] 沈国军,陈晨,高帅,等.汪清油页岩物理力学性质及裂缝起裂压力的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(9):1-4.
- SHEN Guojun, CHEN Chen, GAO Shuai, et al. Research on Wangqing oil shale physical and mechanical properties and hydraulic fracturing pressure [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(9):1-4.
- [14] 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.
- YAN Xuanchen. Research on mechanical properties of oil shale in Nong'an and Huadian and key parameters of hydraulic fracturing fragmentation[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2012.
- [15] 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.
- ZHANG Baoping, SHEN Weibing, SHAN Wenwen. Application of elastic modulus and Biot coefficient rock in fracturing design[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 1996,18(3):60-65.
- [16] 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.
- YAN Xuanchen, CHEN Chen, LIU Xinpeng, et al. Physical and mechanical properties of oil shale in Nong'an and the calculation of relevant parameters in hydraulic fracturing design [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(2):9-11.
- [17] 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.
- [18] 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.
- LIU Xinpeng, CHEN Chen, YAN Xuanchen, et al. Determination of physical and mechanical properties and crack opening pressure in Huadian area, Jilin Province[J]. China Mining Magazine, 2013,22(1):83-85.
- [19] 赵文.岩石力学[M].湖南长沙:中南大学出版社,2010.
- ZHAO Wen. Rock mechanics[M]. Changsha Hunan: Central South University Press, 2010.
- [20] 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.
- LU Baoping, LIN Yongxue, ZHANG Chuanjin. Laboratory study on effect of hydration to shale mechanics[J]. Journal of Geomechanics, 1999,5(1):65-70.
- [21] 郎伟民,于文祥,张贵春.吉林省汪清油页岩矿床地质特征及找矿标志[J].吉林地质,2012,30(3):59-61,65.
- LANG Weimin, YU Wenxiang, ZHANG Guichun. Geological features and prospecting criteria of Wangqing oil shale deposit, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2012,30(3):59-61,65.
- [22] 万仁溥.采油工程手册(上册)[M].北京:石油工业出版社,2000.
- WAN Renpu. Oil production engineering handbook (Volume 1) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [23] 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.
- GAO Shuai. Study on crack and extension mechanism of oil shale hydraulic fracturing in horizontal well[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2017.
- [24] 彭真明,梁国胜,王纬,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.
- PENG Zhenming, LIANG Guosheng, WANG Wei, et al. Forward modeling and analysis for the model of this sand-mud interbed lens[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2001,23(2):101-104.
- [25] 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.
- WANG Wei. Numerical simulation and experimental research on the oil shale hydraulic fracturing[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2014.