

# “二元法”在构造裂缝定量预测中的应用

## ——以松辽盆地青一段泥页岩为例

吴林强<sup>1</sup>, 刘成林<sup>2</sup>, 张涛<sup>1</sup>, 郭洪周<sup>1</sup>, 徐晶晶<sup>1</sup>, 蒋成竹<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249)

**摘要:** 松辽盆地青山口组一段是一套重要的烃源岩层, 也是盆地主要的裂缝性油藏和页岩油藏发育层。裂缝不仅是油气运移的主要通道, 也是重要的储集空间, 裂缝分布规律的评价对盆地今后页岩油和裂缝性油藏的勘探开发具有重要的指导意义。利用 ANSYS 与 Suffer 联合建模并采用 Petrel 软件对研究区岩石力学参数进行三维随机模拟的方法, 对松辽盆地古近纪末期的应力场进行了三维数值模拟。结果表明, 研究区最大主应力的变化范围为 24 ~ 147 MPa, 最小主应力变化范围为 3.8 ~ 114.4 MPa; 扶余隆起带附近为最大主应力低值区, 大庆长垣附近为最大主应力高值区; 最小水平主应力的应力低值区和高值区的分布与最大水平主应力大致相同。在此基础上, 采用二元法对裂缝密度作了定量的预测, 预测值与实测值吻合度较高。预测结果显示, 齐家—古龙凹陷、大庆长垣以及梨树—德惠等地裂缝相对较为发育, 是下一步勘探的重点。

**关键词:** 青一段; 有限元法; 应力场数值模拟; 裂缝定量预测

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

## THE APPLICATION OF TWO FACTOR METHOD IN QUANTITATIVE PREDICTION OF TECTONIC FRACTURES: A CASE STUDY OF SHALE IN QING-1 MEMBER, SONGLIAO BASIN

WU Linqiang<sup>1</sup>, LIU Chenglin<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, GUO Hongzhou<sup>1</sup>, XU Jingjing<sup>1</sup>,  
JIANG Chengzhu<sup>1</sup>

(1. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Qing-1 member of Qingshankou Formation in the Songliao Basin is an important hydrocarbon source formation and also the main development layer for fractured reservoir and shale oil reservoir. Fractures act not only as major pathways but also as important reservoir space. The evaluation of distribution pattern of fractures is instructive to the exploration and development of shale oil as well as fractured oil reservoirs. With finite element software ANSYS and Suffer to jointly model and by using software Petrel to simulate the rock mechanics parameters in three dimensional stochastically, the 3-D numerical simulation of plaeo stress field in late Paleogene is performed. The results show that the maximum principal stress in the study area varies from 24 to 147 MPa, and the minimum principal stress

varies from 3.8 to 114.4 MPa. The area near Fuyu uplift zone is the low maximum principal stress area, while the area near Daqingchangyuan is the high maximum principal stress area. The distribution of the minimum horizontal principal stress in the low and high stress areas is approximately the same as that of the maximum horizontal principal stress. Based on the simulation, fracture density is predicted quantitatively through two factor method, with a relatively high reliability and coincidence rate of the measured one. The results show that the density in the Qijia-Gulong Depression, Daqingchangyuan and the Lishu-Dehui Depression is higher than other areas, which means they are the key exploration areas.

**Key words:** Qing-1 member; finite element method; numerical simulation of stress field; fracture quantitative prediction

## 0 引言

随着勘探时间的推移,以背斜油气藏占主导地位的常规性油气藏越来越难发现,而裂缝性油气藏、泥页岩油气等非背斜油气藏在勘探发现中所占的比例越来越大。据统计,在中国的油气资源总量中,低渗透裂缝性油气藏约占33%,是中国非常重要的油气资源类型<sup>[1]</sup>。在裂缝性储层中,构造缝是主要的裂缝类型之一,其发育特征受外因(构造应力场)和内因(岩石的力学性质)联合控制。因此,若能对构造缝形成关键时期的古构造应力场进行三维数值模拟,不仅可以对裂缝的发育程度进行判断,也可以对其特征参数进行相应的预测<sup>[2-3]</sup>。

松辽盆地作为中国最大的含油气盆地,其生油层青一段的泥页岩有机质含量高达3.67%<sup>[4]</sup>,主要分布于中央坳陷区和东南隆起区内,分布面积广、厚度大,具有巨大的生烃潜力。由于青一段生成的油气仅有很小一部分能运移到相邻的储层中去,剩下的大部分未能排出,若裂缝大量发育时,这些油气便能聚集在裂缝中,形成裂缝性油气藏。文章以松辽盆地青一段泥页岩为研究对象,在利用声发射实验、测井曲线对岩石力学参数进行拟合的基础上,采用有限元软件 ANSYS 和 Sufer 联合建模并利用 Petrel 软件对岩石力学参数进行了三维随机模拟,从而对构造裂缝形成关键时期的古构造应力场进行了三维数值模拟,同时结合岩石破裂准则、能量法,利用二元法对构造裂缝的密度进行了定量预测。

## 1 地质背景

松辽盆地是中国东部大型中生代具有断拗

双重结构的复合沉积盆地,也是国内陆相油气资源最丰富的盆地之一。盆地平面上具菱形形状,长轴呈北北东向展布,长约750 km,宽约350 km,总面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据其基底性质和盖层的区域地质特征,可进一步将盆地划分为六个一级构造单元,即西部斜坡区、西南隆起区、中央坳陷区、东南部隆起区、东北隆起区和北部倾没区(见图1)。

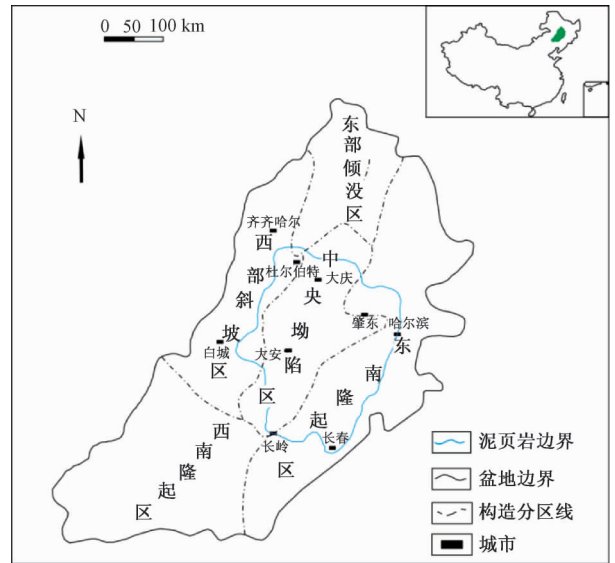


图1 松辽盆地地理位置及二级构造单元分布图<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Location and secondary structural unit division map of the Songliao Basin<sup>[5]</sup>

研究区内中生代地层由上侏罗统火石岭组,下白垩统沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组,上白垩统青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组组成(见图2)。青山口组沉积时期,松辽湖盆急剧拗陷,湖盆扩张,沉积范围比较大,在松南地区,与下伏泉头组地层呈整合—平行不整合接触。青山口组为湖相沉积,青一段属于一套水进式沉积,而青二、三段则属于明显的水退

式回旋回沉积。青一段沉积时期, 松辽湖盆的发育进入极盛时期, 湖水扩张, 来自于西南与西北方向的物源向东、北东一带延伸, 形成三角洲沉积。岩性为一套灰色、深灰色泥岩、油页岩与灰白色粉、细砂岩互层, 底部 10 ~ 30 m 黑色泥岩夹劣质油页岩是盆地地层对比的主要标志层。富含介形类化石, 并含少量叶肢介、鱼化石碎片, 厚 60 ~ 164 m。

底层系统				厚度 /m	年龄 /Ma	岩性剖面	岩性描述	
界	系	统	组					
新生界		第四系	Q	110	2			
		新近系	泰康组	Nr	200	6		表层黄土, 中下部灰白色砂质粘土互层
			大安组	Nd	>200	25		
		古近系	依安组	Ey	>250	65		
中生界	白垩系	上统	明水组	K <sub>2</sub> m <sub>2</sub>	>400	68.5		紫红色泥岩夹灰绿色砂岩, 下部见两层黑色砂岩
			四方台组	K <sub>2</sub> s	>300	73		灰绿紫红色泥岩, 夹灰色中厚砂岩, 底部黑色油页岩
		嫩江组	K <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	>650	77.4			
			K <sub>2</sub> n <sub>2</sub>	>650	84		灰白色砂岩与紫红色泥岩互层	
		姚家组	K <sub>2</sub> y <sub>1</sub>	>200	88.5		灰绿灰黑色泥岩, 夹灰白色粉砂岩, 底部黑色泥岩夹劣质油页岩	
		青山口组	K <sub>2</sub> q <sub>1</sub>	>500	97			
			K <sub>2</sub> q <sub>2</sub>	>500	100			
		下统	泉头组	K <sub>2</sub> q <sub>3</sub>	>800	112		上部紫红色泥岩夹灰白色砂岩, 下部紫褐色、紫红色泥岩夹灰色砂岩、粉砂岩
			K <sub>2</sub> q <sub>4</sub>	>800	116			
		登娄库组	K <sub>2</sub> d <sub>1</sub>	>1250	119			
			K <sub>2</sub> d <sub>2</sub>	>1250	124		灰褐色及灰黑色泥岩, 粉砂质泥岩及夹灰白色厚层状砂岩互层	
			K <sub>2</sub> d <sub>3</sub>	>1250	124		底部杂色砂砾岩层	
		普城组	K <sub>2</sub> p	>1250	132			
		沙河子组	K <sub>2</sub> sh	>1100	144		上部鞍山玄武岩流纹岩及泥质砂岩、砂砾岩、中部灰白色砂岩、深灰色泥岩夹煤层, 底部鞍山玄武岩及角砾岩、凝灰岩	
火石岭组	K <sub>2</sub> h	>1100	148					

图2 松辽盆地地层综合柱状图<sup>[6]</sup>

Fig. 2 Stratigraphy histogram of the Songliao Basin<sup>[6]</sup>

## 2 “二元法”简介

目前, 基于应力场数值模拟的构造裂缝预测方法主要有岩石破裂法和能量法两种<sup>[7]</sup>。前者主要是根据岩石破裂准则, 计算出岩石发生破裂的地方, 然后将它们与地震资料得到的构造形态及岩芯中得到的裂缝密度数据相结合, 以预测远离钻井的裂缝密度; 后者主要是基于相对较高应变能的岩石比同样厚度但较低应变能的岩石有更多的裂缝这一原理, 求出相应的岩石应变能, 从而达到对裂缝的预测。然而, 单独用岩石破裂法或单独用能量法来对地层裂缝密度进行预测都存在一定的不足与局限<sup>[7]</sup>。由于构造裂缝的发育程度

是由破裂值和能量值共同来决定的, 破裂值代表了裂缝发育的可能性, 能量值代表了发育能力的大小; 当破裂值较低, 没有达到使岩石发生宏观上明显剪破裂的某个临界值时, 裂缝发育程度主要由破裂值决定, 但当破裂值达到临界值后, 岩石已发生宏观上明显的剪破裂, 此时裂缝发育程度主要由能量值决定。因此, 可以利用将能量值和破裂值相结合的方法——二元法来预测构造裂缝的发育范围和发育程度, 由已知到未知, 对裂缝进行定量预测。

## 3 青一段应力场三维数值模拟

### 3.1 地质模型的建立

应力场数值模拟首先要建立研究区的三维地质模型。此次研究的对象是松辽盆地青一段泥页岩, 通过分析研究区青山口组沉积以来的构造演化特征, 根据地质模型建立原则, 利用青一段泥页岩平面分布图和下伏地层泉头组顶部构造图建立青一段三维有限元模型。其建模步骤是先将泉头组顶部构造图及其断层带在泥页岩分布范围内向上作等厚延伸, 厚度为 70 m; 导入青一段埋深等值线图, 联合 Suffer 软件, 利用布尔操作得到青一段的三维有限元模型。模型东西向长为 263 km, 南北向宽 540 km (见图 3)。

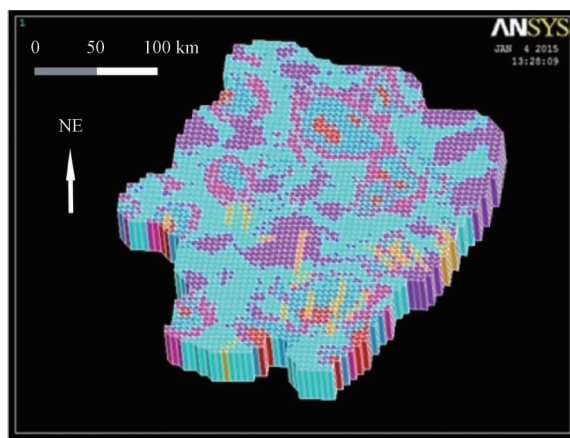


图3 青一段三维力学模型 (不同颜色涵义说明见表1)

Fig. 3 3-D mechanical model of Qing-1 member  
(The meaning of different colors is shown in Table 1)

### 3.2 岩石力学参数的确定与网格划分

在实际模拟过程中, 岩石力学参数正确的选取是应力场数值模拟过程中非常重要的一个环节<sup>[8]</sup>。泥页岩储层具有非均质性强的特点, 而传统的三维构造应力场模拟由于受软件和建模方法

的限制, 一直存在岩石力学参数单一、不足以反映储层非均质性等方面的问题。为了更好地体现岩石力学参数的非均质性, 提高模拟的准确度, 研究采用 ANSYS 与 Suffer 联合建模并采用 Petrel 软件对松辽盆地青一段泥页岩的岩石力学参数进行三维随机模拟, 最终确定三维模型的力学参数。

在岩石力学参数的三维随机模拟中, 首先需要提取横波时差来计算岩石力学参数。据张晋言等<sup>[9]</sup>对泥页岩特征的测井评价研究显示, 公式(1)对泥页岩地层具有较好的适用性:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_p}{\left(1 - 1.15 \frac{(1/\rho) + (1/\rho)^3}{e^{1/\rho}}\right)^{3/2}} \quad (1)$$

其中  $\Delta t_s$  和  $\Delta t_p$  分别为横、纵波时差,  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ;  $\rho$  为地层密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

横波时差提取以后, 根据地层岩石的密度  $\rho$ 、纵波时差  $\Delta t_p$  测井数据, 可计算出相应的参数。

(1) 泊松比  $\mu$

泊松比是指岩石横向应变与纵向应变的比, 计算公式为:

$$\mu = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \quad (2)$$

(2) 杨氏模量  $E$

杨氏模量是张应力与张应变之比, 其计算公式为:

$$E = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \frac{\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \times 10^6 \quad (3)$$

(3) 抗张强度  $\sigma_t$

抗张强度是指岩石被拉伸直至破坏时所需的最小应力值,  $\text{Mpa}$ ; 其大小影响地层破裂压力, 与储层压裂参数密切相关, 近似表示为:

$$\sigma_t = (0.0045E(1 - V_{sh}) + 0.008EV_{sh})/12 \quad (4)$$

其中,  $E$  代表杨氏模量;  $V_{sh}$  代表地层的泥岩含量, %。

(4) 内聚力  $C$  与内摩擦角  $\varphi$

内聚力  $C$  也称为黏聚力,  $\text{MPa}$ ; 是指岩石内部相邻各部分之间的内在相互吸引力。常用经验公式为:

$$C = \frac{0.00544 \times 10^{12} \rho^2}{\Delta t_p^4} \left(\frac{1 + \mu}{1 - \mu}\right)^2 (1 - 2\mu)(1 + 0.78V_{sh}) \quad (5)$$

内摩擦角  $\varphi$  是岩石本身的摩擦特性, 其值等于强度包络线与水平线之间的夹角, ( $^\circ$ ); 表达式为:

$$\varphi = 90^\circ - \frac{360}{\pi} \arctan(1/\sqrt{4.73 - 0.098\Phi}) \quad (6)$$

其中,  $\Phi$  为地层的孔隙度, %。

利用上述的相关公式, 在选取了松辽盆地 100 多口井数据的基础上, 编写相应的程序代码, 对研究区青一段杨氏模量、泊松比、抗拉强度、内聚力和内摩擦角进行了计算, 并以所计算的力学参数曲线作为硬数据输入, 以研究区有限的测试资料、岩心资料、测井数据等作为约束条件, 选择序贯高斯模拟方法, 随机模拟得到青一段岩石力学参数的三维空间数据场, 最终确定了三维地质体的力学性质 (见图 3、表 1)。

表 1 不同地质体材料属性数据表

Table 1 Property table for different geological materials					
材料编号	模拟对象	岩石模量 $E/\times 10^3 \text{ MPa}$	泊松比 $\mu$	岩石密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	颜色
1		17.5	0.33	2.3	深紫色
2		30	0.35	2.4	深蓝色
3		30	0.33	2.3	浅蓝色
4		25	0.33	2.4	粉红色
5	目的层	20	0.33	2.3	蓝色
6		15	0.32	2.36	紫色
7		7	0.30	2.6	浅紫色
8		40	0.32	2.5	红色
9		35.0	0.33	2.2	深黄色
10	断层	12	0.4	2.3	土黄色
11	边框	20	0.33	2.3	蓝色

断层的存在对应力场分布有着重要的影响, 断层带附近往往是应力集中的地方。文中把断层作为一个软弱带来处理, 取经过断层的单元的弹性模量为围岩的 60%, 同时对泊松比作适当增大处理, 并适当增加泊松比 (一般情况增加 0.02)<sup>[10-11]</sup>。

最后, 在充分考虑岩石之间的物性差异的基础上, 采用 10 节点结构实体, 以人工划分的方法对地质体进行三维网格的划分, 最终共得到 56539 个单元, 平均  $1 \text{ km}^2$  上有 147 个节点, 远远满足  $1 \text{ km}^2$  上 3~5 个输出点的要求<sup>[12]</sup>。

3.3 古构造应力场确定

(1) 青一段构造裂缝形成的关键时期

陈志德等<sup>[13]</sup>将松辽盆地自青山口组沉积以来的区域构造应力场演化划分为三期: 嫩江组末期、明水组末期和古近纪末期。罗笃清、张莉等<sup>[14-15]</sup>认为中白垩世末期松辽盆地进入构造反转阶段, 在该阶段的第三期 (古近纪末期), 受强烈的北西—南东向水平挤压或者扭压作用, 松辽盆地北部发育大庆长垣等正反转构造, 并控制了松辽盆地构造裂缝的组系、方位、产状、力学性质等参数。孙庆和等<sup>[16]</sup>认为头台地区扶余油层早期由构造作

用和成岩作用产生的裂缝因次生矿物的充填而成为无效缝,对油气的运聚不具有促进作用。而古近纪末期构造作用产生的裂缝因其环境不利于方解石等矿物的形成而成为有效缝,这说明古近纪末期是青山口组有效裂缝发育的关键时刻。

### (2) 构造缝形成时期应力场方向的确定

古近纪末期,太平洋板块的运动方向发生转变,在大约 50~40 Ma 前后由北北西变为北西西向。在此期的构造应力场的作用下,松辽盆地形成数量众多、走向近南北的褶皱(如大庆长垣)<sup>[17]</sup>,大庆长垣褶曲构造走向大约为北东 10°左右,两翼倾角近水平,据此可以推断出大庆长垣在形成时期处于近东

西向挤压的应力场,其中最大水平主应力  $\sigma_H$  走向为北西 280°,倾角 1°~2°;最小水平主应力  $\sigma_h$  的走向为东南 10°,与长垣构造的轴向一致。

### (3) 古应力大小测定

凯塞尔效应表明,岩石的声发射活动能够“记忆”岩石所受过的最大应力。因此,利用声发射凯塞尔效应实验可以测量野外曾经承受过的最大压应力<sup>[13, 18]</sup>。在研究中,对松辽盆地扶余地区 ZK0036 井 702.5 m 和 820.6 m 处进行了取样,并利用围压下声发射法并对其进行了凯塞尔实验,实验数据由中国地震局地质研究所测定。测试结果显示古近纪末期的构造运动应力值大约为 65~98 MPa(见图 4)。

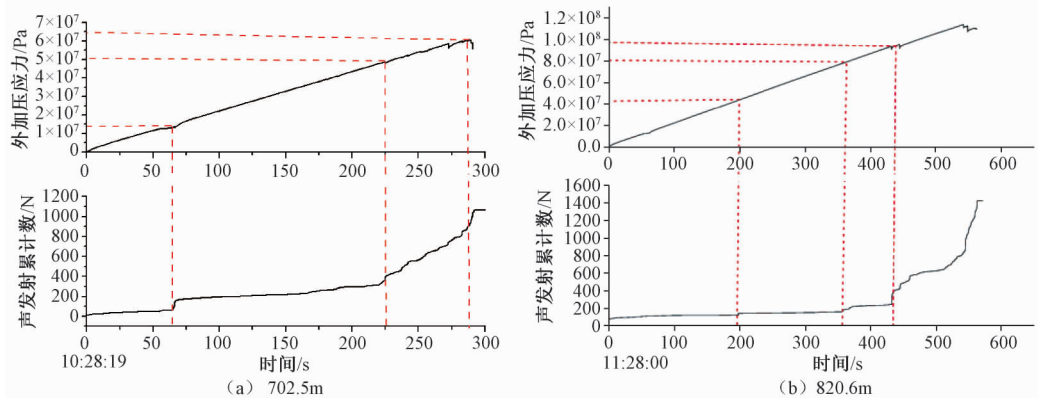


图 4 扶余地区 ZK0036 井青山口组样品声发射实验测试结果

Fig. 4 Acoustic emission test results of the samples of Qingshankou Formation from the well ZK0036 in Fuyu

由于利用声发射实验所测得的应力值均不包括流体孔隙压力值,该值一般用静水压力值来估算<sup>[13]</sup>。通过流体孔隙压力校正,最终确定 ZK0036 井所记录的古近纪末期构造运动最大主应力约为 90~100 MPa,并以此作为边界所施加应力的检验条件。经过反复调试,拟合出接近于古近纪末期构造背景及检验条件的加载方案,方案如下:最大水平主应力  $\sigma_H$  大小为 150 MPa;最小水平主应力  $\sigma_h$  大小为 80 MPa;重力  $\sigma_v$  可由岩石密度和重力加速度求得,由 ANSYS 软件自动产生。

水平应力在纵向上是随深度增加的,参考国家地震局收集整理中国东部辽河、胜利、华北等油田大量水力压裂地应力测量资料<sup>[19]</sup>,最终确定最大水平主应力梯度  $\sigma_H = 0.033$  MPa/m;最小水平主应力梯度  $\sigma_h = 0.021$  MPa/m。

### 3.4 应力场数值模拟结果

结果显示,研究区最大主应力的变化范围为 24~147 MPa,最小主应力变化范围为 3.8~114.4 MPa(见图 5)。整体上,研究区中部扶余隆

起带附近为最大主应力低值区,而大庆长垣附近为最大主应力高值区。最小水平主应力与最大水平主应力的应力高值区和应力低值区大致相同;所不同的是,最小水平主应力在断层带附近变化不明显。

## 4 裂缝的定量预测

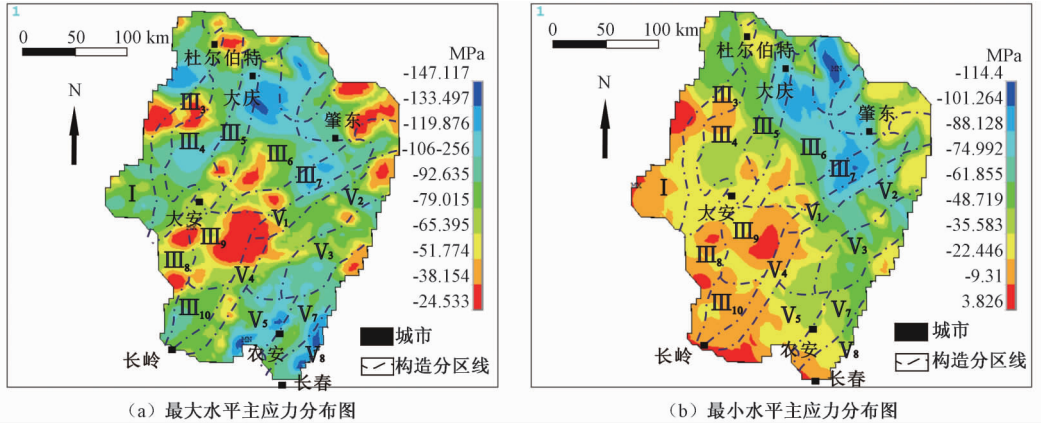
### 4.1 破裂准则的简介

在应力场数值模拟的基础上,利用格里菲斯准则和莫尔-库伦准则对岩石破裂程度进行计算<sup>[20]</sup>。其中,格里菲斯准则能判断岩石中能否产生张破裂及其产状;而莫尔-库伦准则能判断剪破裂是否产生及其产状。

#### (1) 三维格里菲斯准则

格里菲斯破裂理论认为,在三维轴应力的作用下,当岩石发生脆性破裂时,三维轴应力应满足:

第 1 种情况:当  $\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0$  时(压应力为



I—西部斜坡区; II—中央凹陷区; III<sub>1</sub>—黑鱼泡凹陷; III<sub>3</sub>—龙虎泡—红岗阶地; III<sub>4</sub>—齐家—古龙凹陷; III<sub>5</sub>—大庆长垣; III<sub>6</sub>—三肇凹陷; III<sub>7</sub>—朝阳沟阶地; III<sub>8</sub>—长岭凹陷; III<sub>9</sub>—扶新隆起带; III<sub>10</sub>—双坨子阶地; IV—东北隆起区; V—东南隆起区; V<sub>1</sub>—长春岭背斜带; V<sub>2</sub>—宾县—王府凹陷; V<sub>3</sub>—青山口背斜; V<sub>4</sub>—登楼库背斜; V<sub>5</sub>—钓鱼岛隆起; V<sub>6</sub>—杨大城子背斜; V<sub>7</sub>—梨树—德惠凹陷; V<sub>8</sub>—扶余隆起

图5 松辽盆地青一段应力场数值模拟结果 (图中负值表示压应力)

Fig. 5 The results of the numerical simulation of tectonic stress field of Qing-I member in the Songliao Basin (the negative values represent the compressive stress)

正, 张应力为负)

$$\sigma_T = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}{24(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)} \quad (7)$$

$\sigma_1$  为最大主应力, MPa;  $\sigma_2$  为垂直主应力, MPa;  $\sigma_3$  为最小主应力, MPa;  $\sigma_T$  为岩石单向拉伸试验的抗拉强度, MPa。

如果  $\sigma_T$  大于或等于抗张强度, 岩石发生破裂。

第2种情况: 当  $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$  时, 格里菲斯准则的表达式为

$$\sigma_T = -\sigma_3 \quad (8)$$

张破裂系数可表达为<sup>[21-22]</sup>:

$$\eta = \frac{\sigma_T}{\sigma_{Tc}} \quad (9)$$

其中,  $\eta$  为张破裂系数;  $\sigma_{Tc}$  为岩石的张破裂强度, MPa; 可通过实验测试得到。

### (2) 莫尔—库伦破裂准则

根据莫尔—库伦理论, 当岩石受剪切破裂时, 破裂面所受的正应力  $\sigma_n$  和剪应力  $\tau_n$  之间的关系有:

$$\tau_n = C + \sigma_n \tan \Phi \quad (10)$$

$C$  为岩石的剪切强度 (或粘聚力), MPa;  $\Phi$  为岩石的内摩擦角, ( $^\circ$ ); 这两个参数均由实验测试得到。当上式满足时, 岩石即发生剪切破裂。剪破裂系数可表达为:

$$R = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \Phi}{C \cos \Phi} \quad (11)$$

$R$  为剪破裂系数, 无量纲量。

当  $R \geq 1$  时, 岩石发生剪破裂。

通过应力场的三维数值模拟, 可以得到各单元节点的应力值, 利用上述的破裂准则即可求出张破裂和剪破裂的分布情况 (见图6)。

然而, 破裂准则虽能判断岩石是否发生破裂, 但只能定性的表示裂缝发育的可能性。为了定量预测裂缝的发育程度, 引入地层破裂评价指标 ( $Fy$ ) 作为裂缝发育的综合指标<sup>[23]</sup>, 其定义为:

$$Fy = \eta \times a + R \times b \quad (12)$$

公式中  $a$ 、 $b$  分别为张裂缝和剪裂缝的贡献率。根据野外统计数据, 最终确定张裂缝和剪裂缝的贡献率分别为 41.15%, 58.85%, 因此  $Fy$  可表示为:

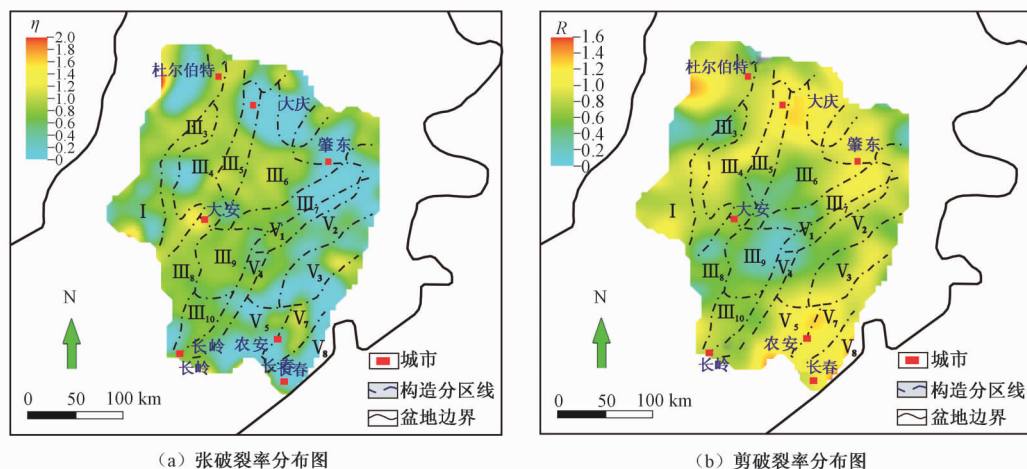
$$Fy = \eta \times 41.5\% + R \times 58.85\% \quad (13)$$

当  $Fy \geq 1$  时, 岩石受力已达到破裂状态,  $Fy$  值越大, 裂缝系统愈发育; 当  $Fy < 1$  时, 岩石受力未到破裂状态, 裂缝不发育。

### 4.2 岩石变形能量

研究表明, 裂缝发育程度不仅与破裂率有关, 还与岩石中累积的应变能大小有较好的对应关系<sup>[24]</sup>。单位体积内的应变能在二维平面内可由最大和最小主应力表示:

$$W = (\sigma_1^2 + \sigma_3^2)/2E - (\sigma_1\sigma_3)\mu/2E \quad (14)$$



(a) 张破裂率分布图

(b) 剪破裂率分布图

I—西部斜坡区；II—中央凹陷区；III<sub>1</sub>—黑鱼泡凹陷；III<sub>3</sub>—龙虎泡—红岗阶地；III<sub>4</sub>—齐家—古龙凹陷；III<sub>5</sub>—大庆长垣；  
III<sub>6</sub>—三肇凹陷；III<sub>7</sub>—朝阳沟阶地；III<sub>8</sub>—长岭凹陷；III<sub>9</sub>—扶新隆起带；III<sub>10</sub>—双坨子阶地；IV—东北隆起区；  
V—东南隆起区；V<sub>1</sub>—长春岭背斜带；V<sub>2</sub>—宾县—王府凹陷；V<sub>3</sub>—青山口背斜；V<sub>4</sub>—登楼库背斜；V<sub>5</sub>—钓鱼岛隆起；  
V<sub>6</sub>—杨大城子背斜；V<sub>7</sub>—梨树—德惠凹陷；V<sub>8</sub>—扶余隆起

图6 松辽盆地青一段张破裂率和剪破裂率分布图

Fig. 6 The contour map of tensile fracture rate and shear fracture rate of Qing-1 member in the Songliao Basin

其中， $W$ 为应变能， $J$ ； $E$ 为岩石的杨氏模量，MPa； $\mu$ 为岩石的泊松比； $\sigma_1$ 为最大主应力，MPa； $\sigma_3$ 为最小主应力，MPa。

岩石的应变能可以反映出构造裂缝的发育程度，从而有效弥补单独利用地层破裂指标 $F_y$ 判断裂缝发育程度的不足。

#### 4.3 “二元法”预测裂缝密度

单独用地层破裂评价指标 $F_y$ 或单独用能量值 $W$ 来对地层裂缝密度 $\beta$ 进行预测都存在一定的不足与局限<sup>[7]</sup>。因此，可以利用将能量值和破裂值相结合的方法来预测构造裂缝的发育范围和发育程度，由已知到未知，对裂缝进行定量预测。其拟合公式为：

$$\beta = A_1 F_y^2 + A_2 W^2 + A_3 F_y + A_4 W + A_5 (F_y \geq 1) \quad (15)$$

$$\beta = A_1 F_y^2 + A_2 F_y + A_3 (F_y < 1) \quad (16)$$

公式中 $\beta$ 表示裂缝密度预测值，条/m； $F_y$ 为地层破裂评价指标； $W$ 为岩石形变能量值， $J$ ； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 分别为比例系数，由单井裂缝密度资料用多元线性回归法拟合得到。利用研究区岩心观测数据对上式进行了拟合并求得相应的比例系数，最终确定研究区裂缝预测公式：

$$\beta = 0.00135 F_y^2 + 0.14815 W^2 - 0.0098 F_y - 0.0323 W + 0.0168 (F_y \geq 1) \quad (17)$$

$$\beta = 0.01761 F_y^2 - 0.01871 F_y + 0.01953 (F_y < 1) \quad (18)$$

根据上述公式，对大情字井地区黑52等5口井进行了预测与对比（见表2），结果显示预测值与岩心观测值之间的误差范围为6.90%~30.42%，平均误差为18.94%，除黑62井外，其他井的相对误差都小于25%的一般评判标准<sup>[25]</sup>。

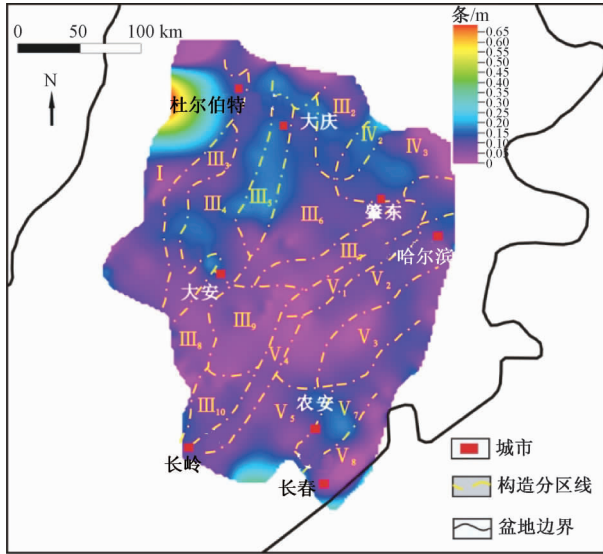
表2 岩心观测密度与预测值之间误差分析

Table 2 Error analysis between the predictive density and that derived from cores

井号	岩心裂缝密度 / (条/m)	预测结果 / (条/m)	绝对误差 / (条/m)	相对 误差/%
黑52	0.0849	0.0700	0.0149	17.56
黑57	0.0088	0.0100	0.0012	15.00
黑62	0.0719	0.0500	0.0219	30.42
黑68	0.0408	0.0380	0.0028	6.90
海7	0.0104	0.0130	0.0026	24.80

利用公式17、18对研究区青一段的裂缝发育情况进行定量预测（见图7），结果显示研究区裂缝最为发育的地方为杜尔伯特以西的西部斜坡区，裂缝密度最高可达0.65条/m，且该区裂缝密度等值线密集，密度在平面上变化剧烈，造成的原因可能是该区岩心在平面上的强烈非均质性，或者是复杂的构造特征使得应力在该处发生搅动集中，具体原因有待进一步探讨。其次最为发育的地区是研究区最南端，钓鱼岛隆起的南部地区，裂缝密度可达0.25条/m左右。整体来看，研究区裂缝相对较为发育的地区，裂缝密度大部分集中在

0.15 条/m 左右, 这些地区有齐家—古龙凹陷南部、大庆长垣、肇东东北部、绥棱背斜带与明水阶地交界处、农安附近的梨树一德惠凹陷、钓鱼岛隆起南端等六个地区, 这与之前研究区剖面所显示的纵向评价结果基本一致。其他大部分地区裂缝密度较小, 小于 0.5 条/m。



I—西部斜坡区; II—中央凹陷区; III<sub>1</sub>—黑鱼泡凹陷;  
 III<sub>3</sub>—龙虎泡—红岗阶地; III<sub>4</sub>—齐家—古龙凹陷;  
 III<sub>5</sub>—大庆长垣; III<sub>6</sub>—三肇凹陷; III<sub>7</sub>—朝阳沟阶地;  
 III<sub>8</sub>—长岭凹陷; III<sub>9</sub>—扶余隆起带; III<sub>10</sub>—双坨子阶地;  
 IV—东北隆起区; V—东南隆起区; V<sub>1</sub>—长春岭背斜带;  
 V<sub>2</sub>—宾县—王府凹陷; V<sub>3</sub>—青山口背斜; V<sub>4</sub>—登楼库背斜;  
 V<sub>5</sub>—钓鱼岛隆起; V<sub>6</sub>—杨大城子背斜; V<sub>7</sub>—梨树一德惠凹陷;  
 V<sub>8</sub>—扶余隆起

图7 松辽盆地青一段泥页岩裂缝密度预测图  
 Fig.7 Predicted shale fracture density of Qing-I member in the Songliao Basin

## 4 结论

(1) 松辽盆地青一段泥页岩裂缝以构造缝为主, 受古近纪末期的水平挤压或者扭压作用应力场控制, 裂缝形成关键时期的最大主压应力走向为南东 100°左右。

(2) 应力场数值模拟结果显示, 研究区存在三个最大主应力低值区: 龙虎泡—红岗阶地、扶余隆起带和研究区北东角肇东、哈尔滨附近; 存在两个应力高值区: 大庆往南的三肇凹陷、长春和农安附近的德惠凹陷。最小主应力在研究区最西部的西部斜坡区达到最小值, 在大庆东部达到

最大值。最小主应力与最大主应力的应力高值区和应力低值区大致相同。

(3) 裂缝预测结果显示, 杜尔伯特以西的西部斜坡区是泥岩裂缝性油藏的优势发育区; 而齐家—古龙凹陷南部、大庆长垣、肇东东北部、宾县—王府凹陷西部以及农安附近的梨树一德惠凹陷等五个地区具有较好的裂缝发育条件, 能为油气的聚集提供良好的储集空间, 是下一步勘探的重点区域。

## 参考文献/References

[1] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39 (2): 129 ~ 136.  
 JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration & Development, 2012, 39 (2): 129 ~ 136. (in Chinese with English abstract)

[2] 孙贻铃, 王秀娟, 周永炳. 三肇凹陷扶杨油层岩石力学参数特征 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20 (4): 19 ~ 21.  
 SUN Yiling, WANG Xiujian, ZHOU Yongbing. Rock mechanical parameter characteristic of fuyang reservoir in sanzhaohao depression [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20 (4): 19 ~ 21. (in Chinese with English abstract)

[3] 冯薇澍. 松辽盆地齐家—古龙凹陷青一段泥页岩油气资源潜力评价 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.  
 FENG Weishu. Songliao basin Qijia-Gulong section of shale oil and gas resource potential evaluation [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013. (in Chinese with English abstract)

[4] Price L C. Basin richness and source rock disruption: a fundamental relationship [J]. Journal of Petroleum Geology, 1994, 17 (1): 15 ~ 38.

[5] 舒良树, 慕玉福, 王伯长. 松辽盆地含油气地层及其构造特征 [J]. 地层学杂志, 2003, 27 (4): 340 ~ 347.  
 SHU Liangshu, MU Yufu, WANG Baichang. The oil-gas-bearing strata and the structural features in the songliao basin, Ne China [J]. Journal of Stratigraphy, 2003, 27 (4): 340 ~ 347. (in Chinese with English abstract)

[6] 郭东鑫, 唐书恒, 解慧, 等. 松辽盆地油页岩勘探开发有利区预测 [J]. 西安科技大学学报, 2012, 32 (1): 57 ~ 62.  
 GUO Dongxin, TANG Shuheng, XIE Hui, et al. Favorable areas prediction for oil shale exploration and exploitation in Songliao basin [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2012, 32 (1): 57 ~ 62. (in Chinese with English abstract)

[7] 丁中一, 钱祥麟, 霍红, 等. 构造裂缝定量预测的一种新方法——二元法 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19 (1): 1 ~ 7, 14.  
 DING Zhongyi, QIAN Xianglin, HUO Hong, et al. A new method for quantitative prediction of tectonic fractures—two-factor



- method [J]. *Oil & Gas Geology*, 1998, 19 (1): 1~7, 14. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈运平, 赵崇斌, 林舸. 深部岩石力学性质及其在大陆构造变形过程研究中的作用 [J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32 (3): 276~284.  
CHEN Yunping, ZHAO Chongbin, LIN Ge. Mechanical properties of deep earth rocks and their roles in the investigation of continental deformation processes [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32 (3): 276~284. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张晋言, 孙建孟. 利用测井资料评价泥页岩油气“五性”指标 [J]. *测井技术*, 2012, 36(2): 146~153.  
ZHANG Jinyan, SUN Jianmeng. Log evaluation on shale hydrocarbon reservoir [J]. *Well Logging Technology*, 2012, 36 (2): 146~153. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周灿灿. 柏各庄地区构造样式及储层构造裂缝识别与预测 [D]. 广州: 中国科学院研究生院 (广州地球化学研究所), 2003.  
ZHOU Cancan. Studies on the structure mode of baigezhuang region and the identification and prediction of structure fracture of reservoirs [D]. Guangzhou: Guangzhou Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2003. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘广峰, 陆红军, 何顺利. 有限元法开展油气储层地应力研究综述 [J]. *科学技术与工程*, 2009, 9 (24): 7430~7435.  
LIU Guangfeng, LU Hongjun, HE Shunli. Application of finite element analysis in reservoir in-situ stress research [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9 (24): 7430~7435. (in Chinese with English abstract)
- [12] 穆龙新, 赵国良. 储层裂缝预测研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.  
MU Longxin, ZHAO Guoliang. Study on reservoir fracture prediction [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [13] 陈志德, 蒙启安, 万天丰, 等. 松辽盆地古龙凹陷构造应力场弹-塑性增量法数值模拟 [J]. *地学前缘*, 2002, 9 (2): 483~492.  
CHEN Zhide, MENG Qi'an, WAN Tianfeng, et al. Numerical simulation of tectonic stress field in gulong depression in songliao basin using elastic-plastic increment method [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9 (2): 483~492. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张莉, 岳乐平, 杨亚娟, 等. 反转构造盆地裂缝特征—以松辽盆地大庆三肇地区为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23 (4): 361~365, 367.  
ZHANG Li, YUE Leping, YANG Yajuan, et al. Fracture features of reversed basin: taking sanzhaio area of songliao basin for example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23 (4): 361~365, 367. (in Chinese with English abstract)
- [15] 罗笃清, 姜贵周. 松辽盆地中新代构造演化 [J]. *大庆石油学院学报*, 1993, 17 (1): 8~16.  
LUO Duqing, JIANG Guizhou. Tectonic evaluation of mesozoic-cenozoic in Songliao basin northeast China [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1993, 17 (1): 8~16. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙庆和, 陈发景, 李长禄, 等. 大庆头台地区扶余油层无效缝的形成与分布 [J]. *地学前缘*, 2000, 7 (4): 391~402.  
SUN Qinghe, CHEN Fajing, LI Changlu, et al. Formation and distribution of invalid fractures in Fuyu reservoir of Toutai area of the Daqing [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (4): 391~402. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李娟, 舒良树. 松辽盆地中、新生代构造特征及其演化 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2002, 38 (4): 525~531.  
LI Juan, SHU Liangshu. Mesozoic-cenozoic tectonic features and evolution of the Song-Liao Basin, NE China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2002, 38 (4): 525~531. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王宏图, 鲜学福, 尹光志. 声发射凯塞尔效应岩体地应力测试的研究 [J]. *煤炭学报*, 1997, 22 (5): 486~489.  
WANG Hongtu, XIAN Xuefu, YIN Guangzhi. Study on crustal stress measurement of rock mass by the kaiser effect of acoustic emission in rock [J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22 (5): 486~489. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李志明, 张金珠. 地应力与油田勘探开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.  
LI Zhiming, ZHANG Jinzhu. Earth stress and oilfield exploration and development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [20] 陈超. 边台油田潜山油藏天然裂缝预测方法研究 [D]. 大庆: 大庆石油大学, 2006.  
CHEN Chao. Prediction method for biantai buried hill reservoir fractures [D]. Daqing: Daqing Petroleum University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [21] 文世鹏, 李德同. 储层构造裂缝数值模拟技术 [J]. *石油大学学报 (自然科学版)*, 1996, 20 (5): 17~24.  
WEN Shipeng, LI Detong. Numerical simulation technology of reservoir structural fracture [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1996, 20 (5): 17~24. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈波, 田崇鲁. 储层构造裂缝数值模拟技术的应用实例 [J]. *石油学报*, 1998, 19 (4): 50~54.  
CHEN Bo, TIAN Chonglu. Numerical simulation technique for structural fractures in a reservoir: case studies [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19 (4): 50~54. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王连捷, 王红才, 王薇, 等. 油田三维构造应力场、裂缝与油气运移 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23 (23): 4052~4057.  
WANG Lianjie, Wang Hongcai, Wang Wei, et al. Relation among three dimensional tectonic stress field, fracture and migration of oil and gas in oil field [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23 (23): 4052~4057. (in Chinese with English abstract)
- [24] Price N J. Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock [M]. London: Pergamon Press, 1966, 176.
- [25] 尤广芬. 储层裂缝预测的三维有限元数值模拟研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2010.  
YOU Guangfen. Reservoir fracture prediction of three-dimensional finite element numerical simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)