

文章编号: 1006-6616 (2015) 01-0047-09

# 逆断层控制构造裂缝发育的力学机制模拟

高孝巧<sup>1</sup>, 张 达<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 在探讨逆断层对构造裂缝控制作用的基础上, 应用 Comsol 有限元软件, 模拟不同水平作用力、不同岩性、不同断层倾角和距断层面远近等因素影响下断层及其周边区域的应力、应变情况, 并分析了不同控制因素下构造裂缝发育的规律。模拟结果表明, 构造裂缝的发育程度随施加的水平应力作用增大而线性增大; 岩石破裂前产生的应变变量可用来描述岩石的脆性, 抗压强度对岩石破裂起主导作用, 而岩石的抗剪强度与岩石破裂发育有一定的相关性; 逆断层倾角存在一个临界角度, 使构造裂缝发育最为强烈; 逆断层控制裂缝发育, 距离断裂面越远裂缝发育程度越低, 并存在一个发育程度骤减的范围, 称为“断裂控制带”, 该断裂控制带的形成和分布应该与断裂的性质、规模、断距及岩石力学参数等有关。

**关键词:** 逆断层; 数值模拟; 构造应力场; 构造裂缝

**中图分类号:** P553

**文献标识码:** A

## 0 引言

断裂应力场是派生裂缝产生的主要原因<sup>[1]</sup>, 断层活动成因裂缝一般表现为张剪性或压剪性, 裂缝的走向、分布位置等通常与断层的活动性质有关。从弹性力学及断裂力学的角度分析, 可确定断层及其伴生裂缝的成因机制。由逆断层而产生的构造裂缝称为逆断层相关裂缝, 在断层附近, 由于断层活动造成的应力扰动作用, 沿断裂带具有明显的应力集中现象, 裂缝明显发育, 相应的裂缝带称为逆断层控制裂缝带。通过构造变形及形成机制的动力学研究, 可探索构造变形与应力状态之间的关系以及构造变形形态和空间分布特征。从构造力学和应力场角度研究构造裂缝形成的力学机制, 对构造裂缝预测具有重要意义<sup>[2~3]</sup>。

有限元数值模拟方法在构造应力场的定量研究中已较为成熟, 近年来国内外学者多采用构造应力场数值模拟方法预测构造裂缝<sup>[4~6]</sup>。

前人的研究表明, 采用数值模拟技术研究构造应力场是十分有效的。Bertoluzza 等<sup>[7]</sup>采用有限元方法从理论上分析了不同拉分盆地内的应力场分布, 并分析了 Collio 和 Pramollo 拉分盆地的动力学形成机制; 王红罡<sup>[8]</sup>用有限元方法反演了潜山区的构造应力场分布; 佟彦明<sup>[9]</sup>利用

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“武夷山植被覆盖区勘查模型研究与控矿要素探查”(12120113089600); “福建龙岩马坑一大田汤泉铁矿整装勘查区关键基础地质研究”(12120114028701)

作者简介: 高孝巧 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向构造模拟及成矿预测。E-mail: gaioxq@cugb.edu.cn

ANSYS 的平面线弹性模型模拟, 确定了胶莱盆地在莱阳期的动力学机制并加以验证; 孙宏斌等<sup>[10]</sup>利用有限元法模拟方法, 提出了葵花岛构造在模拟应力场情况下裂隙发育最有利的地区; 侯贵廷<sup>[11]</sup>采用分形分析方法对构造裂隙进行了分析。近年来, 裂隙定量研究比较重视不同类型构造裂隙分布规律的数学建模, 以研究各类构造, 如逆断层控制裂隙的发育<sup>[12~14]</sup>。

逆断层控制裂隙发育情况的实际野外测量易受到野外露头或现实等因素的影响, 如无法考虑施加水平应力作用的改变或断层倾角的改变以及不同岩性对构造裂隙发育的影响等。本文利用有限元数值模拟方法, 以逆断层控制的构造裂隙地质模型为基础, 从更广泛角度探讨逆断层控制裂隙的发育及分布规律, 定量分析各种因素对逆断层控制裂隙发育的影响。

## 1 研究方法及模型建立

岩石破裂的判断准则可采用 Von Mises 准则<sup>[15]</sup>。根据计算破裂率圈出裂隙不同发育程度的区域。裂隙破裂率计算公式如下:

$$I = \sigma_s / [\sigma_s] \quad (1)$$

式中:  $I$  为裂隙破裂率;  $\sigma_s$  为 Von Mises 应力, MPa;  $[\sigma_s]$  为 Von Mises 有效应力, MPa。

当  $I \geq 1$  时, 认为岩石已经达到破裂状态,  $I$  值越大破裂程度越高。 $I < 1$  为裂隙不发育区;  $I$  值 1~4 为裂隙发育区;  $I > 4$  为裂隙最发育区<sup>[16]</sup>。岩石介质在应力场作用下发生破裂, 因此只需计算出其应力、有效应力和应变的值, 便可圈定构造裂隙范围。对于一定岩石介质, 其有效应力大小是确定的, 因而可通过岩石所受的实际应力大小来判定裂隙发育情况。

本文主要通过有限元数值模拟方法研究逆断层各种因素对构造裂隙的控制作用。主要步骤包括: 根据逆断层的地质构造格架进行简化, 进而建立几何模型; 通过力学实验测定模拟所需的岩石力学参数; 确定应力作用方向, 设定力学边界条件; 根据几何模型、岩石力学物性参数及边界条件建立力学模型; 利用 Comsol 软件对模型进行计算求解, 得到构造应力场图; 采用控制变量法, 对影响构造裂隙发育的各种因素进行探讨, 从而定量分析各个因素对逆断层控制裂隙发育的影响。

### 1.1 地质模型

将逆断层视为连续体介质, 并对介质赋予不同的岩石力学性质进行探讨。构造裂隙的形成属于岩石的脆性破裂, 破裂后具有明显的应力下降, 因此地质体按线弹性处理, 采用薄板模型的线弹性理论计算。地质模型见图 1。



图 1 逆断层地质模型

Fig. 1 The geological model of reverse fault

### 1.2 几何模型

本文采用二维平面模拟, 将地质模型简化为具有一定厚度的平面薄板模型, 不考虑垂向应力的影响。由于模型比较简单, 无需对模型进行局部的网格细化, 采用一键式自动网格划分方式。

### 1.3 力学模型

数值模拟采用平面模型进行计算。模拟过程中，对模型的右端施加水平应力，使断层上下盘具有一定的运动趋势。分析加载过程中断层上下盘区域应力分布情况，进而揭示断层区域构造裂缝的发育及分布规律。Reynolds 等<sup>[17]</sup>通过大量的野外测量发现，除个别应力集中区外，大陆内部差应力值的大小一般不超过 50 MPa。所以本次模拟过程中，施加的水平应力大小在 0 ~ 50 MPa 之间。模型左端的 2 个端点设为垂向上的固定约束（见图 2）。

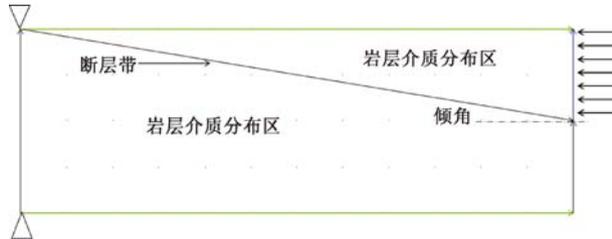


图 2 逆断层的平面力学模型

Fig. 2 The plane mechanical model of reverse fault

## 2 逆断层区域应力大小数值模拟

采用图 2 的力学模型，求解域为逆断层整个区域（上、下断盘及断层面）。模型介质为灰岩，密度  $\rho$  取  $1950 \text{ g/cm}^3$ ；弹性模量  $E$  取  $64.3 \text{ GPa}$ ；泊松比  $\mu$  取  $0.2736$ ；逆断层角度为  $10^\circ$ ；水平应力  $12 \text{ MPa}$ 。采用平面应力模块对其进行求解，单元类型均采用拉格朗日二次单元，进行稳态分析<sup>[18]</sup>。模拟结果见图 3—图 6。

根据图 3—图 6，逆断层上盘、端盘末端应力值较大，为张应力发育区，其应变值也相对较大，可形成有效的裂缝系统；逆断层下盘应力值较小，应变值也相对较小，不易发育有效裂缝，这与胡明等<sup>[1]</sup>的研究结论相一致。在断层面附近应力值较大，越远离断层面位置，应力值、应变值都减小，最大应力为  $13.25 \text{ MPa}$ 、最大应变值为  $0.207 \text{ cm}$ 。可见，数值模拟真实反应了逆断层区域的应力、应变分布情况。

## 3 逆断层对构造裂缝的控制因素

使用 Comsol 软件模拟逆断层区域的应力、应变，模型参数包括岩性、岩石的力学性质、

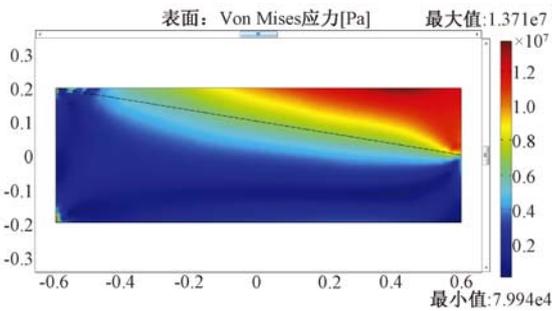


图 3 应力分布

Fig. 3 The distribution of stresses

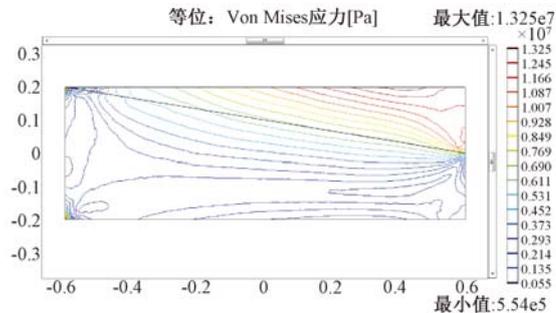


图 4 应力等值线

Fig. 4 The equipotential lines of stresses

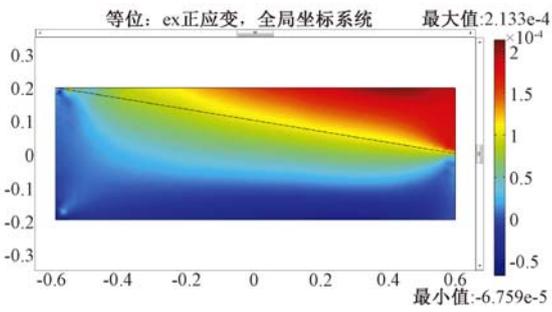


图5 应变分布

Fig. 5 The distribution of strains

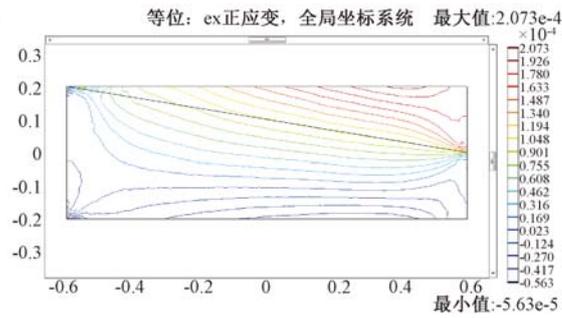


图6 应变等值线

Fig. 6 The equipotential lines of strains

施加的水平应力、逆断层的角度等。将这些参数分别作单一变量，进行应力、应变分布的探讨，分析参数变化对逆断层控制的构造裂缝发育的影响。

### 3.1 水平应力的影响

通过改变施加的水平应力，统计不同水平应力下逆断层区域的应力、应变情况，定量分析施加的水平应力值对构造裂缝发育的影响。模拟中，固定左端两个端点 Y 方向位移，逆断层的倾角为 10°，岩层为灰岩，施加的水平应力值分别为 10，12，15，20，30，40 MPa。模拟结果见表 1、图 7。

表 1 不同水平应力作用下最大应力、应变值

Table 1 The maximum stress and strain values under different horizontal stresses

水平应力/MPa	最大应力/MPa	最大应变/cm
10	10.82	0.1726
12	13.25	0.2070
15	17.05	0.2590
20	21.64	0.3453
30	33.80	0.5187
40	43.29	0.6906

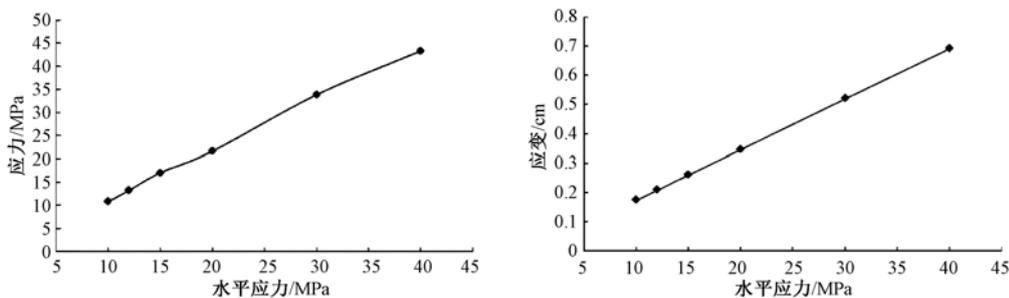


图7 不同水平应力作用下最大应力和应变分布

Fig. 7 Distributions of the maximum stress and strain values under different horizontal stresses

由图 7 可知，不同水平应力作用下，逆断层区域内的应力和应变呈线性变化，即随着水平应力的逐渐增大，张裂缝发育程度呈线性增加。

### 3.2 岩性介质的影响

不同岩性具有不同的岩石变形行为，岩石脆性越大，裂缝越发育。通过改变岩层的物性

参数, 统计在不同岩性下, 逆断层整个区域的应力、应变情况, 定量分析施加水平应力后岩性对构造裂缝发育的影响。模拟中, 固定左端两个端点  $Y$  方向位移, 逆断层的倾角为  $10^\circ$ , 岩性介质分别为: 灰岩、白云岩、灰质白云岩, 岩石力学参数见表 2<sup>[19~20]</sup>。施加 12 MPa 的水平应力时, 模拟结果见表 3、图 8。

表 2 不同岩石岩石力学参数

Table 2 The mechanics parameters of different rocks

岩性	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	杨氏模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗剪强度/MPa
白云岩	2450	51.26	0.335	49.00	5.2
灰质白云岩	2250	72.68	0.205	70.74	0.7
灰岩	1950	64.30	0.274	104.92	10.0

表 3 不同岩性下最大应力、应变值

Table 3 The maximum stress and strain values under different lithology

岩性	最大应力/MPa	最大应变/cm
白云岩	13.07	0.2577
灰质白云岩	13.14	0.1826
灰岩	13.25	0.2070

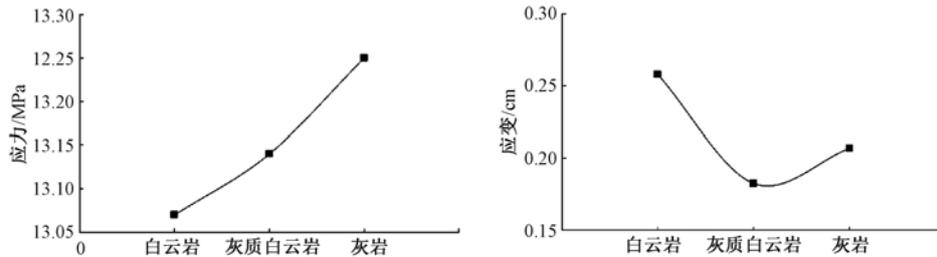


图 8 不同岩性条件下最大应力和最大应变分布

Fig. 8 Distributions of the maximum stress and strain values under the different lithology

由图 8 可知, 应力值大小关系: 白云岩 < 灰质白云岩 < 灰岩; 应变大小关系: 灰质白云岩 < 灰岩 < 白云岩。岩石的脆性可以用岩石破裂前产生的应变变量描述<sup>[21]</sup>, 应变变量越小, 脆性越大。而岩石加载破坏前应变量的大小主要取决于杨氏模量  $E$  和抗剪强度  $C$  (与  $E$  成反比, 与  $C$  成正比)。根据图 8 可得, 三种岩石的脆性关系由大到小为: 白云岩 < 灰岩 < 灰质白云岩。白云岩较灰岩抗剪强度小、应力值小、应变量大, 而实际的地质环境观测中灰岩的破裂程度普遍比白云岩高, 这表明抗压强度对岩石破裂起主导作用, 而岩石的抗剪强度对岩石的破裂发育有一定的相关性。曾联波等<sup>[22]</sup>对川西南部上三叠统砂岩的研究发现, 岩石的抗压强度越大, 裂缝越难发育。

### 3.3 断层倾角的影响

改变逆断层的角度, 并施加固定水平应力, 统计逆断层整个区域的应力、应变情况, 定量分析断层倾角对构造裂缝发育的影响。模拟中, 固定左端两个端点  $Y$  方向位移, 岩层为灰岩。逆断层的倾角分别为  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ , 施加 12 MPa 的水平应力时, 模拟结果见表 4、图 9。由图 9 可知, 不同逆断层倾角下, 断层区域具有不同的应力和应变分布, 当逆断层角度为  $20^\circ$  时, 应力、应变值最大, 即逆断层在倾角为  $20^\circ$  时, 裂缝最发育。

表4 不同断层倾角下最大应力、应变值

Table 4 The maximum stress and strain values under different fault dips

断层倾角/(°)	最大应力/MPa	最大应变/cm
10	13.25	0.2070
15	13.96	0.1956
20	35.76	0.2489
25	23.61	0.1701
30	27.59	0.1908

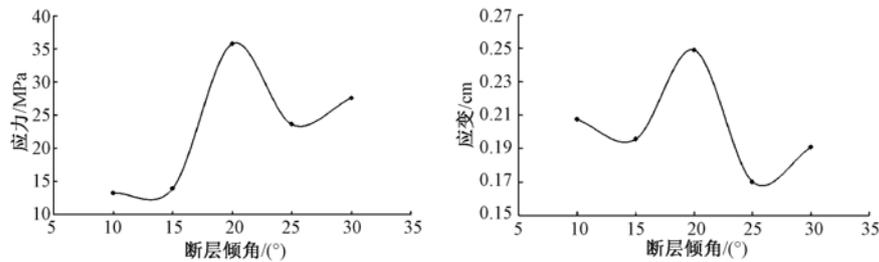


图9 不同倾角下最大应力和最大应变分布

Fig. 9 Distributions of the maximum stress and strain values under the different fault dips

### 3.4 距断层面距离的影响

通过数值模拟及其后处理分析不同构造部位的应力、应变情况（见图10），定量分析其对构造裂缝发育的控制。模拟中，固定左端两个端点 $Y$ 方向位移，逆断层的倾角为 $10^\circ$ ，岩层为灰岩。施加12 MPa的水平应力时，模拟结果见图11。

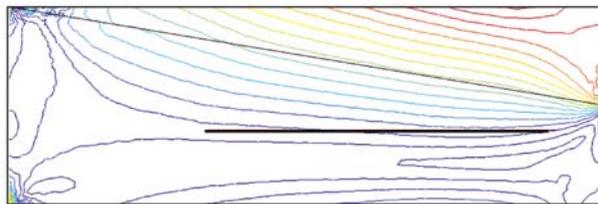


图10 断层面附近的截面

Fig. 10 The section of the reverse fault plane

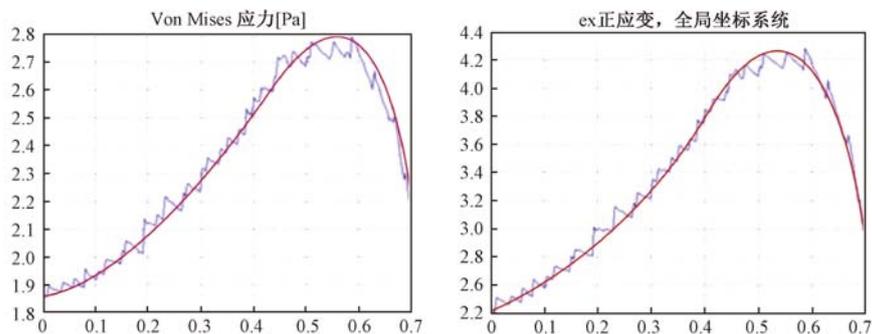


图11 距离断层带不同位置应力及应变分布

Fig. 11 The distribution of the stress values in different positions from fault plane

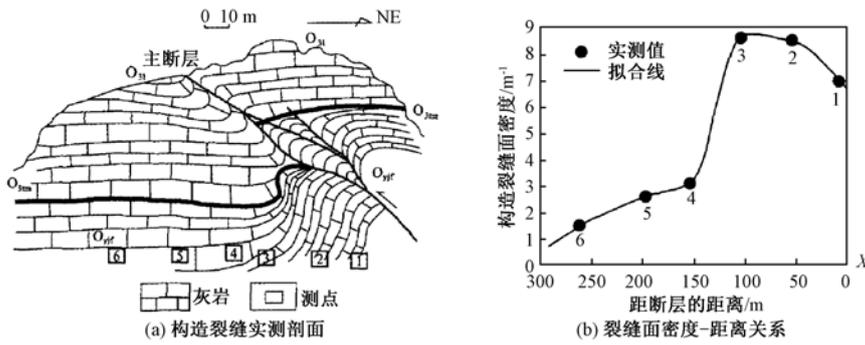


图 12 一间房南逆断层剖面和裂缝面密度-距断层距离关系<sup>[23]</sup>

Fig. 12 Profile of structural fracture measurement in southern YJF reverse fault and the distribution of fracture density

根据图 11 可得，整体上，距离断层带越近裂缝发育越显著，距离断裂越远，裂缝发育程度逐渐降低。逆断层对裂缝发育的控制存在一个骤降的临界点。这个临界点的存在可能与断裂性质、断裂规模及岩性有关，其对裂缝分布规律的数学建模和探讨断裂对裂缝密度的控制范围具有重要作用。对此带的认识可为构造裂缝的地震解释、反演等提供重要的参数。在这个临界点范围内，断层控制的裂缝高度发育，称为“断裂控制的裂缝带”，而临界点外区域裂缝发育程度较低，称为“区域控制的裂缝”。李乐等<sup>[23]</sup>对塔里木盆地西北缘柯坪—巴楚地区内一间房逆断层引起的构造裂缝密度进行了实测统计（见图 12），其结果与本文数值模拟结果（见图 11）相吻合，说明模拟真实反应了逆断层区域内应力、应变情况及其对构造裂缝的控制作用。

### 4 讨论与结论

利用数值模拟研究逆断层控制构造裂缝发育的力学机制，可以克服野外地质观测统计的局限性和地质演化过程的不可恢复性，进而对构造裂缝进行较好的预测。本文从构造力学和应力场角度，模拟研究逆断层控制裂缝发育的力学机制，同时，验证了前人基于野外地质观测的统计分析结论。自然界存在的逆断层特征各具不同，但总体上都是由区域应力、岩性介质、不同断层倾角等参数控制，通过控制单一变量法探讨各参数对逆断层发育的影响，较好地探索了逆断层控制裂缝发育的因素及分布规律，为裂缝发育的圈定提供了理论依据。

模拟研究结果表明，构造裂缝的发育程度随施加的水平应力作用增大而线性增大；脆性岩石更易发生破裂，岩石的脆性可以用岩石破裂前产生的应变描述，抗压强度对岩石破裂起主导作用，而岩石的抗剪强度对岩石的破裂发育有一定的相关性；逆断层倾角存在一个临界角度，此角度下逆断层对构造裂缝控制发育最为强烈。

逆断层对构造裂缝的控制作用有明显的规律性：整体上距断裂越近，构造裂缝面发育程度高；距断裂带越远，裂缝发育程度逐渐降低。逆断层存在一个裂缝发育骤降的临界距离（距断层带的临界距离），在此范围内的发育的裂缝为“断裂带控制的裂缝带”。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 胡明, 秦启荣, 陈继明, 等. 断层应力效应分析及其在裂缝性储层研究中的作用 [J]. 新疆石油地质, 1992, 13 (3): 280 ~ 284.

- HU Ming, QIN Qi-rong, CHEN Ji-ming, et al. Faulting stress analysis and its effect on the study of fractured reservoirs [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1992, 13 (3): 280 ~ 284.
- [ 2 ] 万天丰, 任之鹤. 中国中、新生代板内变形速度研究 [J]. *现代地质*, 1999, 13 (1): 83 ~ 92.  
WAN Tian-feng, REN Zhi-he. Research on the intraplate deformation velocity of china in Meso-Cenozoic [J]. *Geoscience*, 1999, 13 (1): 83 ~ 92.
- [ 3 ] 童亨茂. 储层裂缝描述与预测研究进展 [J]. *新疆石油学院学报*, 2004, 16 (2): 9 ~ 13.  
TONG Heng-mao. Description and prediction of reservoir fractures networks [J]. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 2004, 16 (2): 9 ~ 13.
- [ 4 ] 操成杰. 川西北地区构造应力场分析与应用 [D]. 西安: 西北大学, 2001.  
CAO Cheng-jie. Analysis and application of tectonic stress field in the northwest Sichuan Basin [D]. Xi'an: Northwestern University, 2001.
- [ 5 ] 张乐, 姜在兴, 郭振廷. 构造应力与油气成藏关系 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 18 (1): 31 ~ 35.  
ZHANG Le, JIANG Zai-xing, GUO Zhen-ting. Relationship between structural stress and hydrocarbon bearing pool formation [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18 (1): 31 ~ 35.
- [ 6 ] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008.  
LIU You-rong, TANG Hui-ming. Rockmass mechanics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008.
- [ 7 ] Bertoluzza L, Perotti C R. A finite-element model of the stress field in strike-slip basins: Implication for the Permian tectonics of the southern Alps (Italy) [J]. *Tectonophysics*, 1997, 280 (1/2): 185 ~ 197.
- [ 8 ] 王红罡, 吕炳全, 徐国强, 等. 胜利油田埕北30潜山裂缝系统的地应力有限元法分析 [J]. *上海地质*, 2003, (2): 26 ~ 30.  
WANG Hong-gang, LIU Bing-quan, XU Guo-qiang, et al. Finite element analysis on paleotectonic stress of hill seaming system in Chenbei 30 of Shengli Oilfield [J]. 2003, (2): 26 ~ 30.
- [ 9 ] 佟彦明. 胶莱盆地莱阳期古构造应力场分析及模拟 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26 (1): 6 ~ 9.  
TONG Yan-ming. The paleotectonic stress field at Laiyang stage in Jiaolai Basin and the simulation [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daging*, 2007, 26 (1): 6 ~ 9.
- [ 10 ] 孙宏斌, 陈汉林, 程晓敢, 等. 辽河盆地葵花岛构造裂隙发育的有限元模拟 [J]. *地质科学*, 2004, 39 (2): 199 ~ 205.  
SON Hong-bin, CHEN Han-lin, CHENG Xiao-gan, et al. Finite element simulation of fracture development in the kuihuadao structure, Liaohe Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39 (2): 199 ~ 205.
- [ 11 ] 侯贵廷. 裂缝的分形分析方法 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 1994, 2 (4): 299 ~ 305.  
HOU Gui-ting. Fractal description of reservoir heterogeneity [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1994, 2 (4): 299 ~ 305.
- [ 12 ] 姚姚, 唐文榜. 深层碳酸盐岩岩溶风化壳洞缝型油气藏可检测性的理论研究 [J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38 (6): 623 ~ 629.  
YAO Yao, TANG Wen-bang. Theoretical research on the detectability of Karst fracture and cavern pools [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38 (6): 623 ~ 629.
- [ 13 ] 景建恩, 魏文博, 梅忠武, 等. 裂缝型碳酸盐岩储层测井评价方法——以塔河油田为例 [J]. *地球物理学进展*, 2005, 20 (1): 78 ~ 82.  
JING Jian-en, WEI Wen-bo, MEI Zhong-wu, et al. Method of Well-logging interpretation for fracture reservoirs of carbonate rock-A case study in Tahe oil-field [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20 (1): 78 ~ 82.
- [ 14 ] 彭建兵, 陈立伟, 黄强兵, 等. 地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51 (6): 1826 ~ 1834.  
PENG Jian-bing, CHEN Li-wei, HUANG Qiang-bing, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground fissure expansion mechanism [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51 (6): 1826 ~ 1834.
- [ 15 ] 王平, 崔建忠. 金属塑性成形力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.  
WANG Ping, CUI Jian-zhong. The metal plastic forming mechanics [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [ 16 ] 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 Shi-peng, LI De-tong. Numerical simulation technology for structural fracture of reservoir [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1996, 20 (5): 17 ~ 24.
- [ 17 ] Reynolds S D, Coblenz D D, Hillis R R. Tectonic forces controlling the regional intraplate stress field in continental Australia: Results from new finite element modeling [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107 (B7): 2131.

- [18] William B J Zimmerman. Multiphysics Modeling With Finite Element Method [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2006.
- [19] 胡大林, 魏伟, 闫志刚. 白云岩砌体抗剪强度试验 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23 (2): 43~49.  
HU Da-lin, WEI Wei, YAN Zhi-gang. Shear strength of stone masonry [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23 (2): 43~49.
- [20] 水利水电科学研究院, 水利水电规划设计总院, 水利水电情报研究所, 等. 岩石力学参数 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1991.  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, The institute of Hydropower Planning & Design, The Institute of Water Resources and Hydropower Intelligence. Rock mechanics parameters [M]. Beijing: Structural Use of Concrete Press, 1991.
- [21] 蔡国刚, 童亨茂. 太古宇潜山不同岩石类型裂缝发育潜力分析——以辽河西部凹陷为例 [J]. 地质力学学报, 2010, 16 (3): 260~270.  
CAI Guo-gang, TOGN Heng-mao. Analysis on fracture potential for different types of rocks in archaic buried hill: A case study of Liaohe Western sag [J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16 (3): 260~270.
- [22] 曾联波, 李跃纲, 张贵斌, 等. 川西南部上三叠统须二段低渗透砂岩储层裂缝分布的控制因素 [J]. 中国地质, 2007, 34 (4): 622~627.  
ZENG Lian-bo, LI Yue-gang, ZHANG Gui-bin, et al. Controlling factors for fracture distribution in the low-permeability sandstone reservoir of the second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the south of western Sichuan [J]. Geology in China, 2007, 34 (4): 622~627.
- [23] 李乐, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 逆断层对致密岩石构造裂缝发育的约束控制 [J]. 地球物理学报, 2011, 54 (2): 466~473.  
LI Le, HOU Gui-ting, PAN Wen-qing, et al. The constraints of reverse fault of the development of structural fractures in compacted rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (2): 466~473.

## NUMERICAL SIMULATION OF STRUCTURAL FRACTURES CONTROLLED BY REVERSE FAULT

GAO Xiao-qiao<sup>1</sup>, ZHANG Da<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the research on development of structural fractures that controlled by reverse fault, this study has simulated the distribution of the stress, strain and the development rules of fractures under the different conditions of horizontal forces, lithological characters, fault dip and the different distances to fault location in the fault zone by using COMSOL finite element software. It is shown by the simulation results that the development degree of structure fractures increases linearly with the increase of horizontal forces. The strain generated before rock failure can be used to describe the brittle properties of rock. Compressive strength is the main factor that makes rocks rupture and the shear strength of rock has relationship with the development of rock fracture. There is a critical angle in reverse fault dip and it can make the fracture strongest developed. The fracture density decreases as the distance from the reverse fault increases and there is a damage region controlled by reverse fault where the fracture density decreases sharply. This region is closely related to the mechanics, scale, displacement of the reverse fault and rock mechanics parameters.

**Key words:** reverse fault; numerical simulation; structure stress field; structural fracture