

文章编号: 1006-6616 (2014) 04-0372-07

# 岩石力学参数对裂缝发育程度的影响

岳喜伟, 戴俊生, 王珂

(中国石油大学地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 弹性模量 ( $E$ )、泊松比 ( $\mu$ ) 及密度 ( $\rho$ ) 是岩石的重要力学参数, 当其他条件一致时, 在一定程度上影响着裂缝的发育。以塔里木盆地某气田为研究区, 在造缝期古应力场分析的基础上, 利用储层裂缝数值模拟技术, 计算得到储层裂缝孔隙度; 再以裂缝孔隙度为指标, 分析岩石力学参数对裂缝发育程度的影响。研究结果表明, 裂缝孔隙度随弹性模量的增加而增大, 同等应力条件下, 弹性模量越大, 裂缝孔隙度越高, 破裂程度越大; 泊松比小于 0.2 时, 裂缝孔隙度随泊松比增加而逐渐下降; 泊松比超过 0.2 后, 裂缝孔隙度随泊松比增加而逐渐增大; 岩石密度对裂缝孔隙度的影响不大, 基本上可以忽略。

**关键词:** 弹性模量; 泊松比; 密度; 裂缝孔隙度; 数值模拟

**中图分类号:** TU454

**文献标识码:** A

储层构造裂缝是油气田勘探开发的重要研究内容。储层中的裂缝, 既可以作为油气储集空间, 又可以作为油气运移通道, 同时有利于油气的开采<sup>[1]</sup>。影响裂缝发育的主要因素有岩性、成岩因素、构造作用、构造部位 (断层、褶皱)、地应力强度、层厚、深度等<sup>[2-7]</sup>, 另外构造应力场以及地层条件下的岩石力学性质对裂缝发育的影响尤为重要<sup>[8]</sup>。能够表明岩石基本力学性质的岩石力学参数有抗压强度、抗剪强度、弹性模量 ( $E$ )、泊松比 ( $\mu$ ) 等。岩石力学参数可以揭示地质历史时期裂缝成因类型、空间分布和裂缝形成的力学机理, 一定程度上反映了裂缝的发育程度<sup>[9-10]</sup>。不同类型、不同环境下的岩石具有不同的岩石力学参数<sup>[11-12]</sup>, 在同等条件下岩石裂缝的发育情况必然会有所不同。关于岩石力学参数对裂缝发育影响的研究并不多见。在各项岩石力学参数中, 弹性模量 ( $E$ ) 和泊松比 ( $\mu$ ) 是 2 个表征岩石力学性质的重要力学参数<sup>[13]</sup>; 另外岩石密度 ( $\rho$ ) 是表示岩石物理性质的一项重要参数, 随着深度增加岩石密度有增大的趋势<sup>[14]</sup>。因此本文选用弹性模量、泊松比及岩石密度等 3 个重要参数, 以塔里木盆地某气田为背景, 利用 ANSYS 有限元软件并结合储层裂缝数值模拟技术, 研究岩石力学参数对裂缝发育的影响。

## 1 造缝期古应力场

研究区位于塔里木盆地库车坳陷北部克拉苏构造带中部, 是在喜马拉雅晚期构造运动背

收稿日期: 2014-08-05

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05042-001); “中西部前陆盆地构造地质、储层特征有利区评价”(2011ZX05003-04)

作者简介: 岳喜伟 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事构造地质学研究。E-mail: yxw08016103@163.com

景下发育起来的背斜构造(见图1)。主要含气层系为下白垩统巴什基奇克组,岩性以细砂岩、泥质细砂岩和泥岩为主。

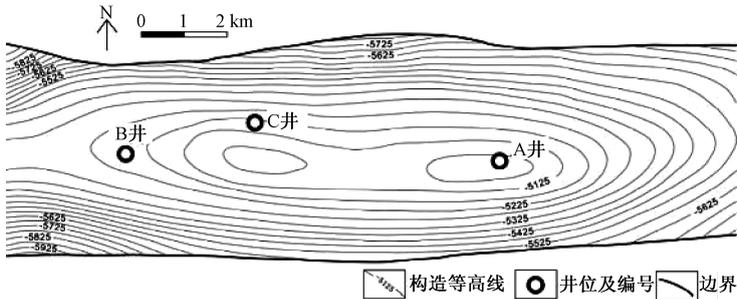


图1 塔里木盆地某气田巴什基奇克组顶面构造图

Fig. 1 The top structure map of Bashiqiqike Formation in a gas field, Tarim Basin

库车坳陷自中生代以来经历了多次大的构造运动,其中以喜马拉雅晚期构造运动最为强烈。喜马拉雅晚期构造运动使天山强烈挤压缩短,大幅隆升并向盆地内逆冲<sup>[17]</sup>。在这次构造运动期间,该地区大多数区域断层开始形成,地层发生局部至强烈弯曲。由裂缝的形成机制可知,裂缝的形成往往与断层形成相伴生,或者与强烈的构造变形期相吻合,因此认为研究区主要造缝时期应是喜马拉雅晚期。受印度洋板块和欧亚板块的强烈碰撞挤压作用,库车坳陷自中生代以来主要经受近南北向的构造挤压<sup>[15]</sup>,地应力方向基本保持近南北向不变。本文研究区位于库车坳陷中部,应力状态与区域应力场基本一致;结合裂缝成像测井解释结果以及该区的断层发育情况(近东西向),判断本区造缝期最大主应力方向为近南北向。

根据研究区构造演化史及地层变形史可大致推算古应力。逆断层形成时,最大主应力方向为水平,孙宗颀<sup>[17]</sup>研究认为在逆断层形成时期,水平最大主应力可以达到很高的数值,3000 m深度上下,大约是垂向主应力的7~8倍。根据构造演化史判断研究区目的层在喜马拉雅期的埋深应为3500~4000 m,据此可以估算出垂向主应力,进而计算出研究区喜马拉雅期的水平最大主应力为535~624 MPa。由于在古、今应力状态下裂缝的密度基本保持不变,因此可以线密度约束古应力。在上述应力区间内,不断改变主应力的大小,施加在基于研究区巴什基奇克组顶面构造图所建立的三维地质模型上,并根据应力与储层裂缝之间的定量关系,计算出不同应力状态下的储层裂缝线密度,并与测井解释裂缝线密度进行对比。当用某个古应力值计算出的裂缝线密度与现今测井解释裂缝线密度最为接近时,则认为此时的古应力取值是合适的。经过不断试验加载,最终确定本区的水平最大主应力为566 MPa。水平最小主应力在地质历史时期中变化较小,可按现今最小主应力取值80 MPa,根据以上结果即确定了地质模型的加载方式(见图2)。

## 2 岩石力学参数对裂缝发育的影响

研究区目的层测井解释杨氏模量平均为62 GPa,测井解释泊松比平均为0.25。为了分析弹性模量( $E$ )、泊松比( $\mu$ )及密度( $\rho$ )对裂缝发育的影响,本文结合测井解释岩石力学参数,选取适当的值,设计了以下3种数值模拟方案:

①保持泊松比为0.25,密度为2600 kg/m<sup>3</sup>不变,杨氏模量从30 GPa逐渐增加到70 GPa,步长2 GPa,研究弹性模量对裂缝发育的影响。

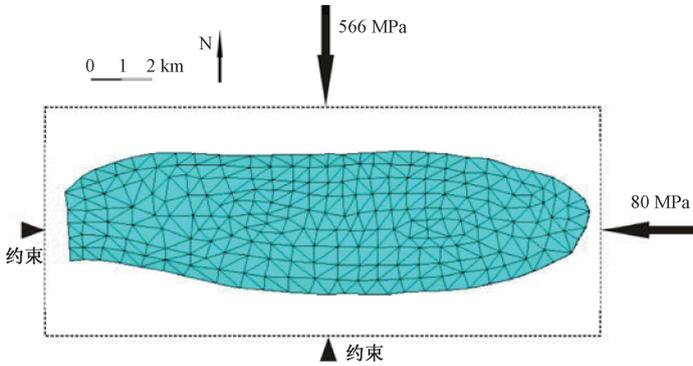


图2 古应力边界载荷施力方式

Fig. 2 Diating method of paleo-stress field boundary loading

②保持杨氏模量 45 GPa, 密度  $2600 \text{ kg/m}^3$  不变, 泊松比从 0.10 逐渐增加到 0.48, 步长 0.02, 研究泊松比对裂缝发育的影响。

③保持杨氏模量 45 GPa, 泊松比 0.25 不变, 密度从  $2200 \text{ kg/m}^3$  逐渐增加到  $2800 \text{ kg/m}^3$ , 步长 30, 研究密度对裂缝发育的影响。

裂缝孔隙度是评价裂缝性储层的重要参数, 体现着裂缝的发育程度和分布范围, 与岩石受构造应力作用产生的破裂程度关系密切<sup>[17]</sup>; 另外裂缝孔隙度在一定程度上量化反映了裂缝的有效性, 可以为油藏动态模拟提供较可靠的参数<sup>[18]</sup>。因此本文以裂缝孔隙度作为评价指标分析岩石力学参数对裂缝发育的影响。依据上述 3 种方案, 分别对地质模型赋予不同的岩石力学参数, 根据所确定的造缝期古应力场并结合裂缝数值模拟技术对地质模型进行加载, 模拟得到研究区储层裂缝孔隙度。

### 2.1 弹性模量对裂缝发育的影响

岩石弹性模量是岩石力学最基本的参数之一, 弹性模量的大小与岩体地应力状态之间存在密切关系, 这已被众多研究者所认识<sup>[19-20]</sup>, 而构造应力又是裂缝产生的根本原因, 应力变化必然会对裂缝的发育产生影响。本文根据裂缝数值模拟所得到的孔隙度数据, 拟合出研究区 A、B、C 三井点的裂缝孔隙度随弹性模量变化的曲线图 (见图 3)。

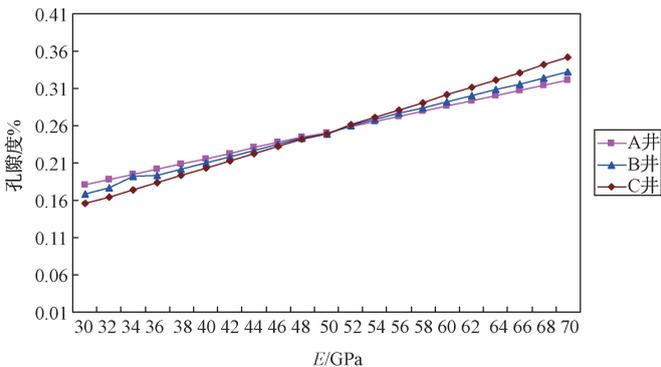


图3 裂缝孔隙度随弹性模量变化曲线

Fig. 3 Curve diagram of fracture porosity changes with modulus of elasticity

由拟合曲线可以看出裂缝孔隙度随弹性模量的增加而增大, 不同井点的裂缝孔隙度变化

速率不同, 差异的产生主要是因为构造位置不同。弹性模量越大, 表明岩石的弹脆性特征越强, 在受到同等应力条件时更容易产生破裂, 形成大量裂缝。本区测井解释 B 井目的层杨氏模量平均约为 62 GPa, 模拟所得孔隙度为 0.3%, 裂缝较为发育。通过对岩心观察分析, 发现 A 井泥质细砂岩比细砂岩 (含泥砾) 裂缝发育, 测井解释得到的泥质细砂岩弹性模量为 59.9 GPa, 细砂岩 (含泥砾) 弹性模量为 59.2 GPa; B 井泥质细砂岩比泥岩裂缝发育, 经过岩石力学实验所测得的泥质细砂岩弹性模量为 129.7 GPa, 泥岩弹性模量为 49.27 GPa, 对比结果也在一定程度上反映了图 3 所示曲线关系。

## 2.2 泊松比对裂缝发育的影响

大多数岩石的泊松比在 0.1~0.4<sup>[21]</sup>。受岩性、岩石矿物组成、微结构面等多种因素影响, 不同岩性地层的泊松比差异明显。根据裂缝数值模拟所得孔隙度数据, 拟合出 A、B、C 等 3 井点的裂缝孔隙度随泊松比变化的曲线图 (见图 4)。

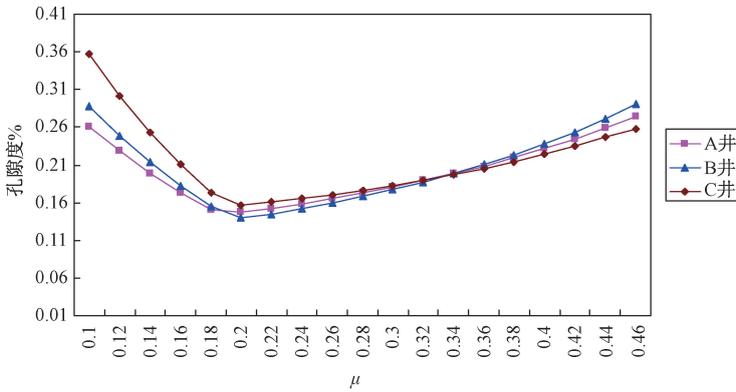


图 4 裂缝孔隙度随泊松比变化曲线

Fig. 4 Curve diagram of fracture porosity changes with Poisson's ratio

由拟合曲线可以看出, 裂缝孔隙度在泊松比为 0.2 时出现了极小值, 向两侧随着泊松比的减小和增大, 裂缝孔隙度均逐渐增加。在 0.1~0.2 区间孔隙度的变化率较大, 在 0.2~0.4 区间孔隙度变化率相对较小。本区 B 井测井解释平均泊松比在 0.25 左右, 对应图 4 中裂缝孔隙度约为 0.16%。由于模型赋予的弹性模量为 45 GPa, 比实际要小, 造成裂缝孔隙度相对较小。通过岩心观察, 发现 A 井泥质细砂岩比细砂岩 (含泥砾) 裂缝发育, 岩石力学实验测得的泥质细砂岩泊松比为 0.1、细砂岩 (含泥砾) 泊松比为 0.22; B 井泥质细砂岩比泥岩裂缝发育程度高, 经过岩石力学参数实验测得的泥质细砂岩泊松比为 0.11、泥岩泊松比为 0.13。这一结果也从一定程度上反映了图 4 所示曲线关系。

## 2.3 密度对裂缝发育的影响

通过裂缝数值模拟所得裂缝数据, 拟合得到 A、B、C 三井点的裂缝孔隙度随密度变化的曲线图 (见图 5), 拟合曲线显示, 岩石密度对裂缝孔隙度影响不大, 基本上可以忽略。

以上分析说明, 只要其他参数不变, 不论岩石密度如何变化都不会对裂缝发育产生影响。此外弹性模量和泊松比的匹配关系对裂缝发育的影响也很明显, 岩石泊松比小于 0.2 时, 泊松比越小, 弹性模量越大, 同等情况下越有利于裂缝的发育; 岩石泊松比大于 0.2 时, 泊松比越大, 弹性模量越大, 同等情况下越有利于裂缝的发育。但弹性模量和泊松比这两个参数哪个对裂缝发育的影响更大、更显著, 还需做进一步研究。

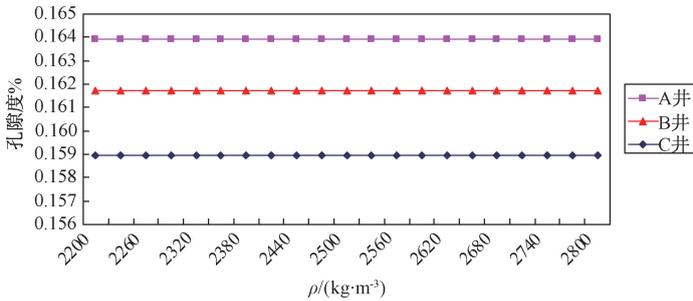


图5 裂缝孔隙度随密度变化曲线图

Fig. 5 Curve diagram of fracture porosity change with density

### 3 结论

裂缝孔隙度随弹性模量的增加而增大,弹性模量越大,表明岩石的弹脆性特征越强,在受到同等应力条件时更容易产生破裂,形成大量裂缝。泊松比小于0.2时,裂缝孔隙度随泊松比增加而逐渐下降;泊松比超过0.2后,裂缝孔隙度随泊松比增加而逐渐增大。岩石密度对裂缝孔隙度的影响不大,基本上可以忽略。

以上结论只是在考虑单一变量情况下所得到的,为研究储层裂缝发育情况提供了另一种思路。并不能完全揭示岩石力学参数对裂缝发育的影响,今后还需更深入的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 王珂,戴俊生,王贵文.等库车坳陷克拉A气田储层裂缝走向异常成因[J].西安石油大学学报:自然科学版,2012,27(5):12~15.  
WANG Ke, DAI Jun-sheng, WANG Gui-wen. Genesis of abnormal reservoir fracture strike in Kela-A gasfield, Kuqa depression [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27 (5): 12 ~ 15.
- [2] 杨玲,胡明.东营凹陷太古界储层裂缝发育控制因素及油气勘探方向[J].特种油气藏,2010,17(2):35~37.  
YANG Ling, HU Ming. Controlling factors of Archeozoic reservoir fractures development and hydrocarbon prospecting direction in Dongying depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17 (2): 35 ~ 37.
- [3] 赵伦,李建新,李孔绸,等.复杂碳酸盐岩储集层裂缝发育特征及形成机制——以哈萨克斯坦让纳若尔油田为例[J].石油勘探与开发,2010,37(3):304~309.  
ZHAO Lun, LI Jian-xin, LI Kong-chou, et al. Development and genetic mechanism of complex carbonate reservoir fractures; A case from the Zanarol Oilfield, Kazakhstan [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (3): 304 ~ 309.
- [4] 巩磊,曾联波,张本键,等.九龙山构造致密砾岩储层裂缝发育的控制因素[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(6):6~11.  
GONG Lei, ZENG Lian-bo, ZHANG Ben-jian, et al. Control factors for fracture development in tight conglomerate reservoir of Jiulongshan structure [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2012, 36 (6): 6 ~ 11.
- [5] 张震,鲍志东.松辽盆地朝阳沟油田储层裂缝发育特征及控制因素[J].地学前缘,2009,16(4):167~170.  
ZHANG Zhen, BAO Zhi-dong. Development characteristics and controlling factors of reservoir fractures in Chaoyangou oilfield, Songliao Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (4): 166 ~ 172.

- [6] 王发长, 穆龙新, 赵厚银. 吐哈盆地巴喀油田特低渗砂岩油层裂缝分布特征 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (2): 54~57.  
WANG Chang-fa, MU Long-xin, ZHAO Hou-yin. Distribution of the fracture within the low permeability sandstone reservoir of Baka oilfield, Tuha Basin, Northwest China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30 (2): 54~57.
- [7] BLENKINSOP T G. Relationships between faults, extension fractures and veins, and stress [J]. Journal of Structural Geology, 2008, 30 (5): 622~632.
- [8] 夏在连, 刘树根, 时华星, 等. 中伊朗盆地地层条件下裂缝性储层岩石力学性质实验分析 [J]. 石油实验地质, 2008, 30 (1): 86~92.  
XIA Zai-lian, LIU Shu-gen, SHI Hua-xing, et al. Experimental analysis of the rock mechanical properties of the fractured reservoir under formation conditions in the Central Iran Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2008, 30 (1): 86~92.
- [9] 刘之的, 汤小燕, 于红果, 等. 基于岩石力学参数评价火山岩裂缝发育程度 [J]. 天然气工业, 2009, 29 (11): 20~26.  
LIU Zhi-di, TANG Xiao-yan, YU Hong-guo, et al. Evaluation of fracture development in volcanic rocks based on rock mechanical parameters [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (11): 20~26.
- [10] 金燕, 张旭. 测井裂缝参数估算与储层裂缝评价方法研究 [J]. 天然气工业, 2002, 22 (增刊): 64~67.  
JIN Yan, ZHANG Xu. Research on log fracture parameter estimation and reservoir fracture e-valuation method [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22 (Supp.): 64~67.
- [11] 徐春华, 唐春荣, 李德同. 火烧山油田储层岩石力学特征与裂缝分布 [J]. 新疆石油学院学报, 2000, 12 (4): 10~14.  
XU Chun-hua, TANG Chun-rong, LI De-tong. Huoshaoshan oilfield reservoir rock-mechanics property and the distribution of fracture [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2000, 12 (4): 10~14.
- [12] Meng Z, Zhang J, Peng S. Influence of sedimentary environments on mechanical properties of clastic rocks [J]. Environmental geology, 2006, 51 (1): 113~120.
- [13] Starfield A M, Cundall P A. Towards a methodology for rock mechanics modeling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25 (33): 99~106.
- [14] Peng Suping, Zhang Jincai. Engineering geology for underground rocks [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007: 13~14.
- [15] 汤良杰. 略论塔里木盆地主要构造运动 [J]. 石油实验地质, 1997, 19 (2): 108~114.  
TANG Liang-jie. An approach to major tectogenesis of Tarim basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 1997, 19 (2): 108~114.
- [16] 孙宗祺, 张国报, 张景和. 在地质断层构造中地应力状态演变研究 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27 (1): 102~105.  
SUN Zong-qi, ZHANG Guo-bao, ZHANG Jing-he. Study of in-situ stress state evolution in geologic fault structure [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27 (1): 102~105.
- [17] 秦启荣, 张烈辉, 刘莉萍, 等. 裂缝孔隙度数值评价技术 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (2): 47~51.  
QIN Qi-rong, ZHANG Lie-hui, LIU Li-ping, et al. Numerical evaluation techniques of fracture porosity [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24 (2): 47~51.
- [18] 刘莉萍. 川中公山庙构造沙一段储层裂缝预测及裂缝孔隙度数值评价 [D]. 成都: 西南石油学院, 2004.  
LIU Li-ping. Fracture prediction and fracture porosity numerical evaluation in  $E_1$  reservoir of Gongshanmiao structure, central Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004.
- [19] 秦向辉, 谭成轩, 孙进忠, 等. 地应力与岩石弹性模量关系试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (6): 1689~1694.

QIN Xiang-hui, TAN Cheng-xuan, SUN Jin-zhong, et al. Experimental study of relation between in-situ crustal stress and rock elastic modulus [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (6): 1689 ~ 1694.

[20] 陶珍宇, 朱焕春, 高延法, 等. 岩石力学的地质与物理基础 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.

TAO Zhen-yu, ZHU Huan-chun, GAO Yan-fa, et al. Geological and physical basis of rock mechanics [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1996.

[21] 张年学, 盛祝平, 李晓, 等. 岩石泊松比与内摩擦角的关系研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30 (增1): 2659 ~ 2609.

ZHANG Nian-xue, SHENG Zhu-ping, LI Xiao, et al. Study of relationship between Poisson's ratio and angle of internal friction for rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30 (Supp. 1): 2659 ~ 2609.

## INFLUENCE OF ROCK MECHANICS PARAMETERS ON DEVELOPMENT OF FRACTURE

YUE Xi-wei, DAI Jun-sheng, WANG Ke

(Faculty of Earth Science and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China)

**Abstract:** Elasticity Modulus, Poisson Ratio and density are key mechanical parameters of rocks. They have effect on development of fracture with other conditions unchanged. The study area of this paper is a gasfield in Tarim Basin. Based on the analysis of palaeo-stress field, we calculate the porosity of reservoir fracture through numerical simulation technique. Then we use the fracture porosity as index, and analyze the rock mechanics parameters influence on fracture development. The results show that with the elasticity modulus increasing, the fracture porosity increase, the larger the elasticity modulus the easier for rocks to rupture under the same stress; and when the Poisson Ratio is less than 0.2, with the Poisson Ratio increasing, the fracture porosity decrease; the Poisson Ratio is larger than 0.2, with the Poisson Ratio increasing, the fracture porosity increase. In addition, fracture porosity is not affected by rock density and can be ignored.

**Key words:** elasticity modulus; Poisson Ratio; density; fracture porosity; numerical simulation