

文章编号:1673-5005(2012)03-0014-06

## 砂泥岩间互地层破裂准则选取及在裂缝穿透性评价中的应用

卢虎胜<sup>1</sup>, 张俊峰<sup>2</sup>, 李世银<sup>3</sup>, 邹军<sup>4</sup>, 刘爱武<sup>5</sup>

- (1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中石油青海油田 边远油田开发公司, 青海 海西州 816400;  
3. 中国石油塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 4. 中国石油川庆钻探工程有限公司  
对外合作和市场开发处, 四川 成都 610051; 5. 中石化江汉油田分公司 勘探开发研究院, 湖北 武汉 430223)

**摘要:** 针对目前存在的多种岩石破裂准则, 以某油气田裂缝性砂泥岩储层为例, 在岩心裂缝观察和岩石力学试验的基础上, 通过数理统计和公式推导的方法, 建立适用于地下低渗透砂岩和泥岩间互地层的破裂判断准则, 并基于构造应力场与裂缝参数之间的定量关系模型, 实现砂泥互层时裂缝穿透程度定量评价。结果表明: 在压缩状态下, 砂泥岩间互地层破裂判据适用两段式莫尔-库仑准则, 但在拉张应力状态下, 莫尔-库仑准则不适用, 改用格里菲斯准则; 砂、泥岩力学参数存在差异, 同样受力变形条件下, 裂缝先在砂岩中产生, 再向泥岩中垂向延伸扩展, 并发生一定产状的变化; 泥岩厚度为 5 m 是裂缝能否穿透的临界值, 多数裂缝会终止于砂泥岩界面处; 相同的受力条件下砂岩越薄越容易产生裂缝, 泥岩厚度达到 20 m 时砂岩厚度的变化对砂岩裂缝延伸进泥岩中的发育程度和裂缝密度影响很小。

**关键词:** 砂泥岩间互层; 构造应力; 裂缝密度; 破裂准则

**中图分类号:** TE 122.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.003

### Best selection among crack criterions to sandstone-mudstone formation and its application to fracture penetration ability evaluation

LU Hu-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Jun-feng<sup>2</sup>, LI Shi-yin<sup>3</sup>, ZOU Jun<sup>4</sup>, LIU Ai-wu<sup>5</sup>

- (1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. Ouling Oilfield Developing Company of Qinghai Oilfield, PetroChina, Haixizhou 816400, China;  
3. Communication Company of Tarim Basin Oilfield of Xinjiang, Korla 841000, China;  
4. External Cooperation and Marketing Department of Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, PetroChina, Chengdu 610051, China;  
5. Exploration and Development Research Institute of Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Wuhan 430223, China)

**Abstract:** Based on the present rock crack criterions, cores observation and rock mechanic tests, a new effective rock failure criterion for interbedded sand and mud stone formation in a certain fractured oil and gas field was developed through the method of mathematical deduction. The penetration degree of fractures in mudstone was evaluated based on the quantitative model between tectonic stress and fracture parameters. The results show that for the compressed conditions, multibowl Coulomb-Mohr criterion will be selected to study the formation, but for the tensile conditions, Griffith criterion should be selected. With obvious difference in mechanical properties of sandstone and mudstone, fractures will form in sandstone firstly, then extend into mudstone in vertical direction with variable occurrence. The critical thickness of mudstone is 5 m whether fracture could penetrate the mudstone, and most of fractures will end at the lithologic interface. For the same conditions, the thinner sandstone is easy to generate fractures. When the sandstone thickness reaches 20 m, the thickness variation of sandstone has little influence on fracture's development and penetration degree among mudstone.

**Key words:** interbedded sand and mud stone formation; tectonic stress; fracture density; crack criterions

收稿日期: 2011-10-26

基金项目: 国家科技重大专项课题(2008ZX05001)

作者简介: 卢虎胜(1970-), 男(汉族), 甘肃甘谷人, 博士研究生, 主要从事储层地质及开发地质研究。

岩石受力后发生破裂,从而产生裂缝,裂缝继续扩展、连通则形成断裂,裂缝的形成长期以来一直是个难题,国内外专家、学者根据实际观察和试验测试结果,提出了众多基于岩石强度假说的破裂准则,概括起来有6大系列<sup>[1]</sup>。其中,比较常用的准则是最大正应力准则、最大正应变准则、最大剪应力准则、八面体剪应力准则、库仑-摩尔准则和格里菲斯准则,不同的破裂准则对具有不同力学性质的岩石材料在不同的受力状态下的适用性不同。最大正应力准则是认为材料的破坏只取决于最大正应力的绝对值,试验证明这种破裂准则只适用于单向应力状态以及脆性岩石在某些应力状态(两向)下受拉的情况,对于复杂应力状态则不适用<sup>[2]</sup>;最大正应变准则是认为材料的破坏取决于最大正应变,试验证明该理论与脆性材料的破坏情况大致相符,对于塑性材料则不适用;最大剪应力理论对于塑性材料的破坏可以给出满意的结果,但对于脆性材料不适用,而且该理论没有考虑到中间主应力的影响;八面体剪应力理论对于塑性材料的应用与试验结果很符合,克服了最大剪应力理论没有考虑到中间主应力影响的缺点,是目前塑性力学中常用的一种理论。其中,尤以描述岩石宏观破裂的库仑-莫尔广义单剪准则和描述岩石微观破裂的格里菲斯广义最大张应力准则使用最广泛。有学者对格里菲斯准则修正而提出了考虑中间主应力的三维格里菲斯准则,不过修正的格里菲斯理论在压应力时才有实际意义,很接近于库仑-莫尔理论<sup>[2]</sup>,且只有当压缩拉伸强度比近于8或12时理论与试验结果才吻合较好。但两者又各自存在适用条件,尤其对于地下具有复杂力学性质和应力状态的低渗透砂岩和泥岩间互地层的破裂不能简单地用一个准则加以判断<sup>[1]</sup>。针对上述问题,笔者以某油气田裂缝性储层为例,在岩心观察和岩石力学试验的基础上对破裂准则进行优选,建立适用于地下低渗透砂泥岩间互地层的破裂判断准则,并通过有限元分析和数学推导建立应力场与构造裂缝参数之间的定量关系,进而研究裂缝性储层中砂泥互层时砂岩中裂缝在泥岩中的延伸性和穿透性。

## 1 破裂准则的优选

### 1.1 破裂准则的适用条件

库仑认为材料破坏的临界条件是某一截面上所受剪应力等于该面上内聚力(单剪强度)加上正应力产生的内摩擦力<sup>[3]</sup>。库仑判据可用下述公式表示:

$$|\tau| = C_0 + \sigma'_n \tan \varphi \text{ 或 } |\tau| = C_0 + \mu \sigma'_n. \quad (1)$$

式中, $\tau$ 为临界剪应力,MPa; $\sigma'_n$ 为考虑流体孔隙压力影响的有效正应力,MPa; $C_0$ 为材料的内聚力,MPa; $\varphi$ 为材料的内摩擦角,(°)。内聚力 $C_0$ 是当 $\sigma'_n = 0$ 时的抗剪强度,且定义 $\mu = \tan \varphi$ ,为内摩擦系数。

莫尔采用假设的方式认为当剪切破坏沿某平面发生时,作用在该平面上的正应力和剪切力之间的关系与材料性质有关,表达式为

$$\tau = f(\sigma). \quad (2)$$

该式代表一条曲线,该曲线是通过试验得到不同条件下的莫尔圆,并绘出莫尔包络线,即为莫尔准则,破坏面的角度可以直接通过垂直莫尔包络线来确定<sup>[3]</sup>。

莫尔-库伦强度理论以剪切破坏为判据,认为材料内某一点的破坏只取决于最大主应力 $\sigma_1$ 和最小主应力 $\sigma_3$ ,而与中间主应力 $\sigma_2$ 无关,算是一种等效的最大剪应力模式,是目前岩石力学中用得最多的强度条件,且适用于压力不大时的情况,其中岩石破裂的方向可用破裂角 $\theta$ 描述,即 $\theta = 45^\circ - \varphi/2$ ,为裂缝面与最小主应力之间的夹角。

格里菲斯假设认为,材料的破坏取决于受力情况和先前存在的微裂隙,在这些微裂隙周围或端部会产生局部应力集中现象,当达到材料的抗张强度后裂缝开始扩展并相互贯通,最终引起材料的完全破坏<sup>[4]</sup>。按照格里菲斯强度理论,岩石在平面应力状态下的破裂准则为

$$\begin{aligned} & \text{当 } \sigma_1 + 3\sigma_2 > 0 \text{ 时,} \\ & (\sigma_2 - \sigma_1)^2 = 8(\sigma_2 + \sigma_1)\sigma_T, \end{aligned} \quad (3)$$

即

$$\sigma_T = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)^2}{8(\sigma_2 + \sigma_1)}, \quad \cos(2\beta) = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\sigma_2 + \sigma_1)}. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{当 } \sigma_1 + 3\sigma_2 \leq 0 \text{ 时,} \\ & \sigma_2 = -\sigma_T, \quad \sin(2\beta) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\sigma_T$ 为岩石单向拉伸试验的抗拉强度,MPa; $\beta$ 为椭圆裂缝长轴与主压应力轴 $\sigma_2$ 之间的夹角,(°);破裂角 $\theta = \beta$ 。

若发生新的破裂,新生裂缝方向应指向椭圆裂痕边界的法线方向。用 $\psi$ 表示新裂缝与原裂缝长轴之间夹角,据上述破裂准则(4)与(5)可分别得到下面两式:

$$\psi = -2\beta, \quad (6)$$

$$\psi = 0. \quad (7)$$

新生裂缝与原椭圆裂缝长轴之间夹角为 $2\beta$ ,负号表示新生裂缝方向位于沿着主压应力轴顺时针转 $\beta$ 角的方向上。式(7)说明新产生的裂缝会沿着原椭圆型裂缝延伸扩展。

对于三维问题,格里菲斯破裂准则<sup>[56]</sup>可表达为当 $\sigma_1+3\sigma_3>0$ 时,

$$(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2=24\sigma_T(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3),$$

$$\cos(2\theta)=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2(\sigma_1+\sigma_3)}. \quad (8)$$

当 $\sigma_1+3\sigma_3\leq 0$ 时,

$$\theta=0, \sigma_3=-\sigma_T. \quad (9)$$

格里菲斯破裂准则能够从裂缝的微观形成机制出发,并经过精细严谨的公式推导获得,不仅理论基础扎实,而且成为了断裂力学中的经典内容。但是,格里菲斯理论的前提是张性破裂为主,因此是一种等效的最大张应力理论。

### 1.2 力学参数试验

本次研究设计了单轴和三轴压缩试验,在三向应力条件下测试岩心的弹性模量、泊松比、峰值强度(表1),求出岩心的内聚力和内摩擦角。对于同一组岩心,通过在不同围压条件下进行三轴试验,记录轴向应变、径向应变随轴向载荷的变化规律,得到岩心的全应力-应变曲线<sup>[7-8]</sup>(图1)。进一步对每块岩心的全应力-应变曲线进行分析处理得出岩石的弹性模量、泊松比和峰值强度。对于每一组岩心,根据相应的围压和峰值强度,可确定出岩心内聚力和内摩擦角,第二组岩心内聚力为27.41 MPa,内摩擦角为41.12°,最终绘制岩心的应力摩尔圆(图1)。

表1 某油气田岩心的岩石力学参数

Table 1 Core's mechanical parameters in an oilfield

岩心号	岩性	围压 $\delta$ /MPa	峰值强度 $\sigma_p$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$
1-1	含砾中砂岩	0	64.22	7.48	0.12
1-2	中砂岩	0	48.13	6.67	0.13
1-3	中砂岩	0	51.65	5.31	0.12
1-4	粉砂岩	0	87.15	11.78	0.15
1-5	粉砂岩	0	120.36	18.42	0.16
1-6	粉砂岩-泥岩	0	95.40	7.83	0.13
1-7	粉砂岩-泥岩	0	93.33	16.64	0.18
1-8	粉砂岩	0	84.59	10.06	0.14
1-9	粉砂岩	0	63.34	6.59	0.15
2-1	粉砂岩-泥岩	30.0	261.80	19.26	0.17
2-2	泥质粉砂岩	20.0	222.80	16.43	0.16
2-3	粉砂岩-泥岩	40.0	318.83	25.42	0.24
2-4	泥岩	59.6	394.13	35.50	0.27
2-5	泥岩	60.5	455.61	33.20	0.25
2-6	细砂岩	61.1	289.37	10.18	0.29
2-7	砂岩	64.3	269.79	10.69	0.28
2-8	砂岩	65.4	323.85	28.52	0.33
2-9	砾岩	66.3	373.47	36.33	0.31
2-10	泥岩	66.4	264.87	22.87	0.37

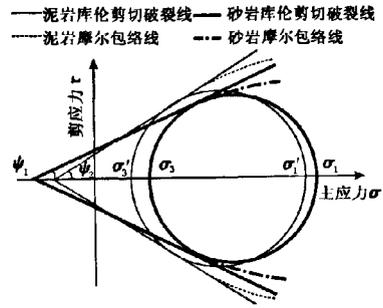


图1 砂泥互层剪切破裂摩尔圆(据戴俊生修改,2011)

Fig.1 Mohr's circle of interbedded stratum

(After Dai Junsheng, 2011)

### 1.3 裂缝产生机制

地下存在的砂岩可认为属于完全弹性岩石,纯泥岩一般认为属于弹塑性岩石。实践证明,随着钙质或硅质含量的增加,泥岩会朝着弹性方向发展,且随着温度的升高,泥岩会异常地由塑性向弹性转变。在正常条件下(常温、常压),砂岩和泥岩不仅岩石力学参数明显不同,如砂岩弹性模量大,泊松比小,而泥岩弹性模量小,泊松比大,且地应力分布状态也存在显著差异,因此在异常条件(高温、高压)下,两者力学参数差异性会减小,地应力分布状态接近各向同性。可以认为泥岩属于韧性岩石,由于在受力变形条件相同情况下,韧性岩石的内摩擦角往往要小于脆性岩石的内摩擦角,即泥岩的剪裂角( $\psi_2$ )要大于砂岩的剪裂角( $\psi_1$ )。从砂泥岩互层剪切摩尔圆图解上可以看出,此时泥岩产生裂缝比砂岩难,即砂岩会先产生裂缝,再向泥岩中延伸,或者裂缝消失于岩性界面处,或者顺界面平行扩展。

当最小主应力位于垂直方向,最大主应力位于水平方向时,产生的裂缝走向会与最大主应力方向垂直。砂泥互层时,在砂泥接触面附近由于裂缝产生的先后性,砂岩首先产生剪破裂,随着应力的释放会导致泥岩的垂向应力与水平压力即最小主应力与最大主应力迅速变小。从应力摩尔圆图解中可以看出,由于最小主应力( $\sigma_3$ )的减小量大于最大主应力( $\sigma_1$ )的减小量,实线摩尔圆会迅速扩大到虚线位置,并与泥岩库仑剪切破裂线相切相交,这时泥岩中产生了剪裂缝。由于泥岩的剪裂角大于砂岩的剪裂角,当砂岩中产生的裂缝延伸到泥岩中时会发生一定产状的变化(图2)。

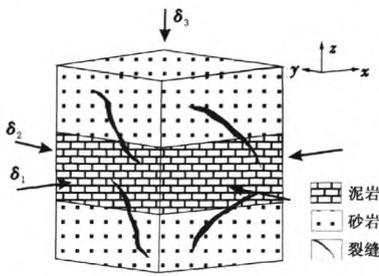


图2 砂泥互层裂缝延伸示意图

Fig. 2 Extending sketch of interbedded stratum

1.4 破裂准则优选

低渗透储层中构造裂缝往往以多种不同的形态出现,既有张性裂缝,也有共轭剪切裂缝,还有介于二者之间的张剪裂缝<sup>[9-10]</sup>,在计算出3个主应力大小和方向后,通过油田实际岩石破裂准则的建立可以判断岩石中产生裂缝的力学性质及其产状。因此,实际应用中要综合运用张裂缝准则和剪裂缝准则,尤其在砂泥岩互层的地层中<sup>[8]</sup>。在压应力状态下,砂泥岩间互地层破裂判据适用两段式莫尔-库仑准则,判断是否可以产生剪裂缝以及剪切裂缝的产状;在拉张应力状态下,莫尔-库仑准则不适用,改用格里菲斯准则,判断是否可以产生张性裂缝以及张裂缝的产状。

2 实际应用

2.1 研究方法

研究主要采用应力场数值模拟法,以FLAC3D软件为平台,以有限单元理论为依据。FLAC3D有限元分析软件采用了显式拉格朗日算法和混合-离散分区技术,能够非常准确地模拟土质、岩石和其他材料的三维结构受力特性并进行塑性流动分析。其优点是无需形成刚度矩阵,仅需较小的内存空间便可求解大范围的三维变形问题。因此,基于岩石物理测试结果,以岩石破裂准则为约束,先行判断岩石是否达到破裂条件,定量计算出每个单元的张破裂指数和剪破裂指数,然后对其分别进行变量标准化,并参考岩心观察结果进行相加得到单元的总破裂指数。然后根据破裂判断结果,以应力导致能量积聚为依据,以裂缝应变能密度为纽带,遵守能量守恒定律,通过公式推导建立应力-应变和裂缝参数(裂缝密度)之间的定量关系<sup>[11]</sup>,计算出裂缝的密度值和开度,最后对裂缝的发育程度进行综合评价。该软件优点是能够考虑岩性、厚度、构造以及地应力等内外地质因素,适用于不同地质背景下低渗透砂泥岩

互层构造裂缝的综合评价。

2.2 应用效果

为了研究砂岩裂缝产生后在泥岩中的延伸性和穿透性,首先建立砂泥岩互层地质模型和力学参数模型,以不同厚度的泥岩为基础,上下各加相同厚度的砂岩,并根据岩石力学试验,为砂岩与泥岩选取了不同的力学参数(表2),然后对模型的周边进行固定和加力,并注重约束边界力(包括水平构造力、重力、上覆岩层压力)的施加,通过网格划分,最终模拟出裂缝参数的三维分布情况。

为了研究砂岩厚度对裂缝在泥岩中的延伸性和穿透性的影响程度,以相同厚度的泥岩为基础,上下各加不同厚度的砂岩,并对模拟结果进行比较分析。分别取泥岩厚度为2、5、10和20m,砂岩厚度分别取为5、10、20和50m建立多个不同的模型(图3)。

表2 某油气田砂泥岩互层应力场模拟所需力学参数  
Table 2 Mechanical parameters for stress-field numerical simulation in an oilfield

岩性	泊松比 $\mu$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
砂岩	0.1874	37.46	2.644
泥岩	0.1740	35.69	2.692

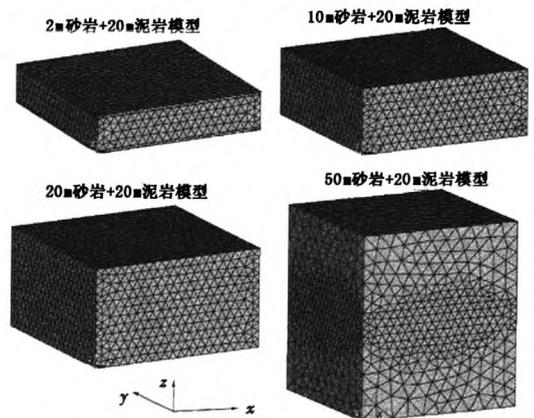


图3 泥岩厚度20m、不同砂岩厚度的地质模型

Fig. 3 Models of varied sandstone thickness and mudstone thickness 20 m

由裂缝破裂指数和裂缝密度模拟结果可知(图4),不仅砂岩、泥岩厚度的变化影响裂缝的发育程度,砂泥岩厚度比也具有同样影响程度。随着砂泥岩厚度比的不断增加,砂岩中裂缝的发育程度具有逐渐减小的趋势,砂泥岩厚度比5/20、10/20、20/20和50/20分别对应最大裂缝破裂指数0.984、0.763、0.601和0.454,说明互层情况下砂岩厚度相对越小,裂缝越发育。由裂缝密度分布图可知,砂岩

裂缝密度普遍大于泥岩裂缝密度。当泥岩厚度为 5 m 时,泥岩裂缝密度开始出现局部零区带,随着泥岩厚度的增大,密度为零区范围也增大。当泥岩厚度小于 5 m 时,泥岩裂缝密度基本不发育零区,且砂泥岩接触界面处裂缝密度较大。裂缝开度分布也具有相似的特征,即砂岩中的裂缝开度也大于泥岩中裂缝开度。应力场下裂缝破裂指数的分布和裂缝线密度的分布具有较好的相关性,砂岩中的裂缝密度会

比泥岩中的大。通过对砂泥岩互层模型进行拆分可以更清楚地看到,当泥岩厚度为 5 m 时,虽然其上下表面裂缝密度值约为 3,但其内部却开始出现了密度为零的区域,说明泥岩厚度为 5 m 是一个界限,大于这个值时砂岩中产生的裂缝会消失于岩性界面处或者沿着岩性界面平行扩展,裂缝在泥岩中延伸长度大部分约为 2 m。

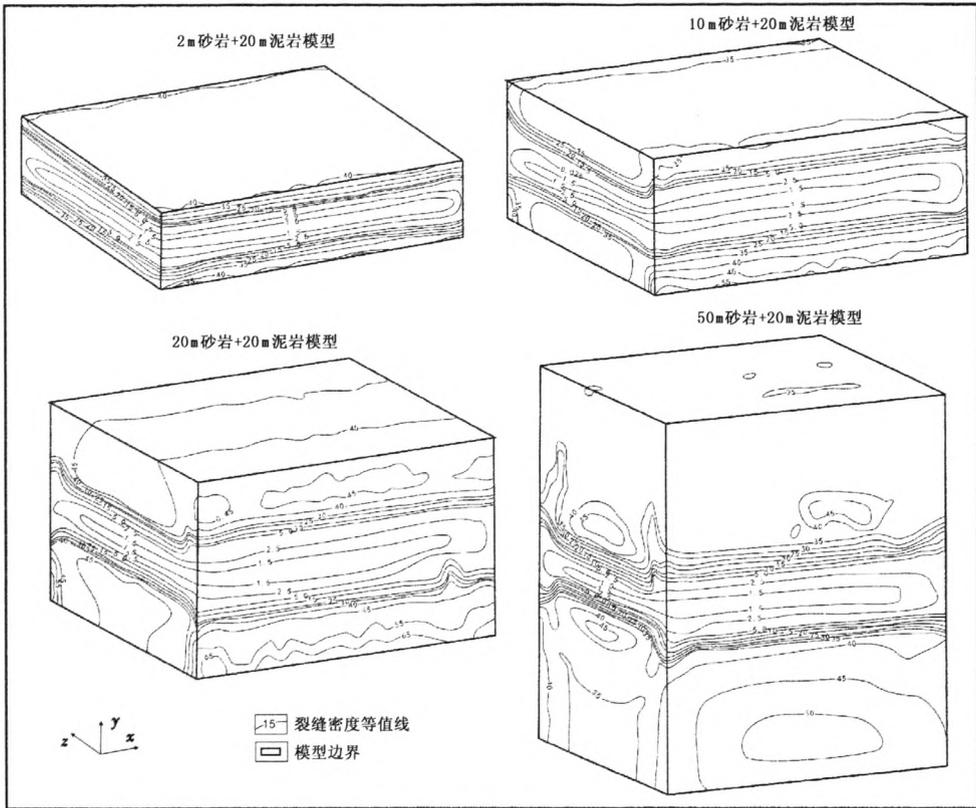


图 4 4 种砂泥岩间互地层模型的裂缝密度数值模拟结果

Fig. 4 Simulation results of fracture density under paleo-stress field for four kinds of interbedded strata

在一定的受力范围内当泥岩厚度达到 20 m 时,砂岩厚度不管如何变化,泥岩中裂缝密度皆为零。因此,尽管砂岩厚度的变化会对砂岩裂缝的发育程度和密度有一定影响,但对砂岩裂缝在泥岩中垂向延伸性和穿透性几乎没有影响,即当泥岩厚度达到一定值时,砂岩裂缝在泥岩中的垂向延伸性基本不受砂岩厚度的控制和影响。

### 3 结论

(1) 低渗透砂泥岩间互地层中,当最小主应力  $\sigma_3$  小于 0 时,岩石处于广义拉张状态,岩石以张剪性和张性破裂为主,宜使用格里菲斯最大等效张应

力准则对裂缝产生情况进行判别;当最小主应力  $\sigma_3$  大于或等于 0 时,岩石处于广义压缩状态,岩石以压剪性破裂为主,宜使用库仑-莫尔等效最大剪应力准则对裂缝产生情况进行判别,且适用直线式库仑-莫尔准则。

(2) 砂岩的泊松比小、弹性模量大,而泥岩的泊松比大、弹性模量小。同样受力变形条件下,裂缝首先在砂岩中产生,再向泥岩中垂向延伸扩展,裂缝在延伸到泥岩中时会发生一定产状的变化。

(3) 当泥岩厚度大于 5 m 时,砂岩裂缝恰好无法穿透泥岩,大多数终止于砂泥岩界面处,裂缝在泥岩中的延伸长度大多数约为 2 m;相同的受力条件

下,砂岩越薄越容易产生裂缝,泥岩厚度达到20 m时,砂岩厚度的变化对砂岩裂缝在泥岩中的发育程度和裂缝密度影响很小。

#### 参考文献:

- [1] PRICE N J. Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock [M]. Oxford, England: Pergamon Press, 1966;221-240.
- [2] 王军,戴俊生,冯建伟,等. 乌夏断裂带二叠系火山岩碎屑岩混杂地层裂缝预测[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):19-24.  
WANG Jun, DAI Jun-sheng, FENG Jian-wei, et al. Fracture prediction of Permian volcanic-clastic rock formation in uxia fault belt [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(4): 19-24.
- [3] 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 (Edition of Natural Science), 1996,20(5):17-24.
- [4] 戴俊生,汪必峰,马占荣. 脆性低渗透砂岩破裂准则研究[J]. 新疆石油地质,2007,28(4):393-395.  
DAI Jun-sheng, WANG Bi-feng, MA Zhan-rong. Research on cracking principles of brittle low-permeability sands [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007,28(4): 393-395.
- [5] 俞茂宏. 双剪强度理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998:195-197.
- [6] 管月稳,俞茂宏,王思敬. 岩石的非线性统一破裂准则[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1435-1441.  
ZAN Yue-wen, YU Mao-hong, WANG Si-jing. Nonlinear unified strength theory of rock and its application in rock mass engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(10):1435-1441.
- [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.  
DING Zhong-yi, QIAN Xiang-lin, 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.
- [8] 戴俊生,冯建伟,李明,等. 砂泥岩间互地层裂缝延伸规律探讨[J]. 地学前缘,2011,18(2):277-283.  
DAI Jun-sheng, FENG Jian-wei, LI Ming, et al. Discussion on the extension law of structural fracture in sand-mud interbed formation [J]. Earth Science Frontier, 2011,18(2):277-283.
- [9] 曹春富,孙绍春,张吉昌. 利用有限元法定量预测储层构造裂缝[J]. 特种油藏,1997,4(1):24-28.  
CAO Chun-fu, SUN Shao-chun, ZHANG Ji-chang. Quantitative prediction of structural fractures of metamorphic rock reservoir by finite element [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1997,4(1):24-28.
- [10] CHEN M, BAI M. Modeling stress-dependent permeability for anisotropic fractured porous rocks [J]. Rock. Mech. Min. Sci., 1998,35(8):1113-1119.
- [11] 戴俊生,徐建春,孟召平,等. 有限变形法在火山岩裂缝预测中的应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(1):1-3.  
DAI Jun-sheng, XU Jian-chun, MENG Zhao-ping, et al. Prediction of volcanic rock fissure with finite deformation method [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(1):1-3.
- (编辑 徐会永)
- 
- (上接第13页)
- [10] 杨守业,李从先,张家强. 苏北滨海平原冰后期古地理演化与沉积物物源研究[J]. 古地理学报,2000,2(2):66-72.  
YANG Shou-ye, LI Cong-xian, ZHANG Jia-qiang, et al. Palaeogeographic evolution of Coastal Plain and provenance study of postglacial sediments in North Jiangsu Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2000,2(2): 66-72.
- [11] 胡宗全,朱筱敏,彭勇民. 准噶尔盆地西北缘车排子地区侏罗系物源及古水流分析[J]. 古地理学报,2001,3(3):49-54.  
HU Zong-quan, ZHU Xiao-min, PENG Yong-min. A-nalysis of provenance and palaeocurrent direction of Jurassic at Chepaizi region in northwest edge of Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2001,3(3):49-54.
- [12] 杨少春,孟祥梅,陈宁宁,等. 准噶尔盆地车排子地区新近系沙湾组沉积特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):20-25.  
YANG Shao-chun, MENG Xiang-mei, CHEN Ning-ning, et al. Depositional characteristics of Shawan formation in Neogene of Chepaizi area, Junggar Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(2):20-25.
- (编辑 徐会永)