

## 脆性岩储层裂缝定量预测的尝试

宋惠珍

**摘要**：本文由四部分内容组成：(1)根据格里菲斯强度理论，讨论了脆性岩层在应力场(约定张为正)作用下，格里菲斯强度理论的一种破裂准则表示式及其在储层裂缝分析中的应用；(2)给出碳酸盐岩储层古应力场定量分析的三种数学力学模型和计算方法以及古裂缝定量预测可靠程度；(3)提出储层有效张应力概念及描述潜在张裂缝的方法；(4)提供某油田碳酸盐岩储层张裂缝的预测图及其以后通过钻井的检验。

**关键词**：格里菲斯强度理论；古应力和古裂缝；储层有效张应力；储层张裂缝预测  
**分类号**：O346.1；TE1；P618.130.22 **文献标识码**：A

## A ATTEMPT OF QUANTITIVE PREDICTION OF NATURAL CRACK ON BRITTLE ROCK RESERVOIR

SONG Huizhen

*Institute of Geology, Seismological Bureau of China, Beijing 100029*

**Abstract**： This paper consists of four parts:(1)According to the Griffith theory of brittle strength the formulae of a criterion of failure were derived by author under the stress field (convention is that the tensile stress is positive) and applied them to analysis of the natural crack for reservoir;(2)Three numerical models and computative method of the quantitative analysis for paleo-stress as well as a method of the quantitative prediction for paleo-natural crack were given in the reservoir of the carbonate rock;(3)A concept of effect tensile stress was presented a description of the natural tensile crack was provide for reservoir;(4)To provide a predicted tensile crack distribution map for reservoir of the carbonate rock and test it through drilling holes.

**Key words**： Griffith theory of brittle strength;paleo-stress field and paleo-natural crack; effect tensile stress of reservoir;prediction of natural tensile crack of reservoir

### 0 引言

碳酸盐岩储层评价的一个关键问题是对裂缝发育程度和优势走向的估计。现今油田对裂缝储层储量估算主要依据钻井岩心裂缝观测资料和测井技术特别是成像测井方法解释的裂缝资料。显然，由少数井筒裂缝情况推广到整个储层，其可靠性较低。国内外大量岩心裂缝资料提供了一个基本事实是碳酸盐岩储层以构造裂缝占优势，或者

说对油、气、水储存空间起主要作用的是构造裂缝。由此出发，作者将格里菲斯强度理论与脆性岩储层构造应力分析相结合，确定储层潜在张裂缝方位及发育强度，给出碳酸盐岩储层潜在张裂缝定量预测的一种途径，通过某油田酸化试井和钻井检验，证实这种尝试可以应用于脆性岩储层裂缝预测。

## 1 脆性岩储层潜在裂缝判别

### 1.1 格里菲斯强度理论的一种破裂准则表示式

格里菲斯强度理论已被用于阐明脆性岩石的破裂机制<sup>[1]</sup>。格里菲斯强度理论主要包含三点内容：(1)材料内部存在许多杂乱的细微裂痕，形状类似扁平状椭圆，其长短轴分别为 $2a$ 和 $2b$ ，轴比很小；(2)相邻裂痕之间不存在相互影响；(3)忽略材料特性的局部变化。假设构造裂缝形成之前，碳酸盐岩储层材料符合格里菲斯强度模型。可在椭圆裂痕局部坐标 $x$ - $y$ 平面内按弹性理论计算裂痕周边上的切向应力(图1)。由图1可知，作用于椭圆裂痕周边材料上的正应力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 及剪应力 $\tau_{xy}$ ，与主应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 有下列关系(约定张为正，即代数值 $\sigma_1 > \sigma_2$ )：

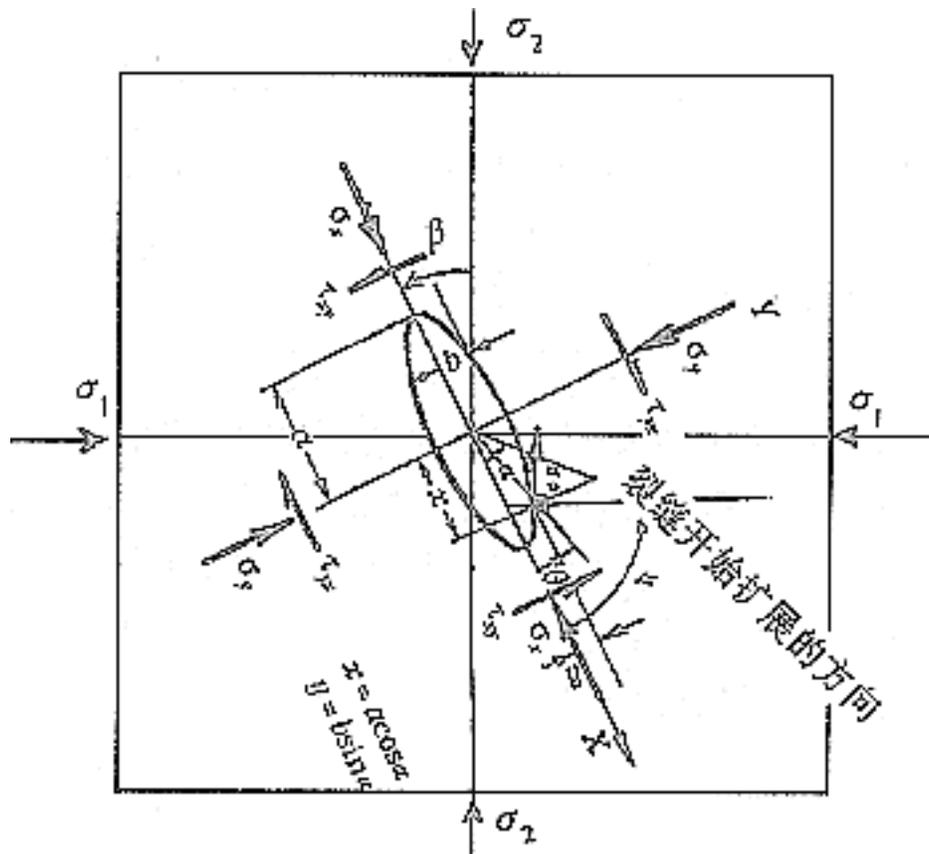


图1 岩石中微裂痕受力及裂痕周围材料上的应力

Fig.1 A stress field applied to microcrack and its surrounding material in rock

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\beta \quad (2)$$

$$x = 1 + 2^{-} y \quad (3)$$

式(1)和式(2)中  $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  以及  $\beta$  的意义见图1。经过一套数学推导与简化, 则得裂痕周边切向应力的近似表示式:

$$\sigma_\alpha = \frac{2(\sigma_y \cdot m + \tau_{xy} \cdot \alpha)}{m^2 + \alpha^2} \quad (4)$$

式(4)中  $m = \frac{b}{a}$  为椭圆裂痕轴比,  $\alpha$  为偏心角, 其与局部坐标系关系见图1。式(4)指出, 椭圆裂痕周边切向应力  $\sigma_\alpha$  是偏心角  $\alpha$  的函数。若产生新的裂缝, 势必从椭圆周边  $\sigma_\alpha$  的最大值处开始, 即从  $\frac{\partial \sigma_\alpha}{\partial \alpha} = 0$  所对应的偏心角  $\alpha$  处开始。通过解驻值方程  $\frac{\partial \sigma_\alpha}{\partial \alpha} = 0$ , 并用主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  表示, 得下列公式:

$$m\sigma_\alpha = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\beta \pm \left[ \frac{1}{2}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) + \frac{1}{2}(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)\cos 2\beta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式(5)指出, 当岩石在某一确定的应力场  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  作用下,  $m$  值仅随  $\beta$  而变化。在众多椭圆裂痕中, 必然有  $m$  为极值的裂痕, 其位置由  $\beta$  确定。通过解驻值方

程  $\frac{\partial(m\sigma_\alpha)}{\partial \beta} = 0$ , 获得两组解:  $\sin 2\beta = 0$  的方位计算式对应四个  $m$  的驻值, 它们

分别是  $2\sigma_1; 0; 2\sigma_2; 0$ 。显然, 4个驻值中的最大极值是  $2\sigma_1$ ;  $\cos 2\beta = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\sigma_1 + \sigma_2)}$

的方位计算式对应两个  $m$  的驻值, 它们分别是  $m = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{4(\sigma_1 + \sigma_2)}$  和

$m = \frac{(3\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_1 + 3\sigma_2)}{4(\sigma_1 + \sigma_2)}$ 。显然, 极大值必定是下列3种情况之一:

$$m = 2\sigma_1 \quad (6)$$

$$m\sigma_a = -\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)2}{4(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (7)$$

$$m\sigma_a = \frac{(3\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_1 + 3\sigma_2)}{4(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (8)$$

分两种情况讨论：

(1)  $\sigma_2 + 3\sigma_1 > 0$ ，极大值是：

$$m\sigma_a = -\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{4(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (9)$$

对应的裂痕方位 计算式是：

$$\cos 2\beta = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (10)$$

(2)  $\sigma_1 + 3\sigma_2 > 0$ ，极大值是：

$$m = 2\sigma_1 \quad (11)$$

对应的裂痕方位 计算式是：

$$\sin 2\beta = 0 \quad (12)$$

根据岩样单向受拉破坏时的应力状态，即  $\sigma_2 = 0$ ， $\sigma_1 = \tau$  ( $\tau > 0$ )，显然满足式(11)，可直接从式(11)确定岩石的局部抗拉强度  $[m]$ ：

$$[m] = 2\tau \quad (13)$$

当极大值  $m$  达到岩石的局部抗拉强度  $[m]$  时，其对应的椭圆裂痕(方位为  $\beta$ )将产生新的破裂裂缝。将式(13)中的  $[m]$  分别代入式(9)和式(11)，即得格里菲斯强度理论的一种破裂准则表达式：

(1)  $\sigma_2 + 3\sigma_1 > 0$

破裂准则： $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 8(\sigma_1 + \sigma_2)\tau = 0$

$$\cos 2\beta = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (14)$$

$$(2) \quad \sigma_1 + 3\sigma_2 = 0$$

破裂准则： $\sigma_1 = T$

$$\sin 2\beta = 0 \quad (15)$$

根据式(14)与式(15)，在主应力  $\sigma_1 - \sigma_2$  坐标平面中可画出格氏理论的强度曲线CDEF (图2)。图2指出，岩石受力后是否发生破坏，取决于其主应力 ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) 在图2中的坐标位置是否落在破裂区内。而新产生的裂缝方向应指向椭圆裂痕边界处的法线方向。以  $\varphi$  表示新裂缝与原裂痕长轴之间夹角(图1)，通过简单的数学运算，可获得计算新裂缝倾角  $\varphi$  的基本公式：

$$\tan \varphi = - \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\beta}{4\sigma_T} \quad (16)$$

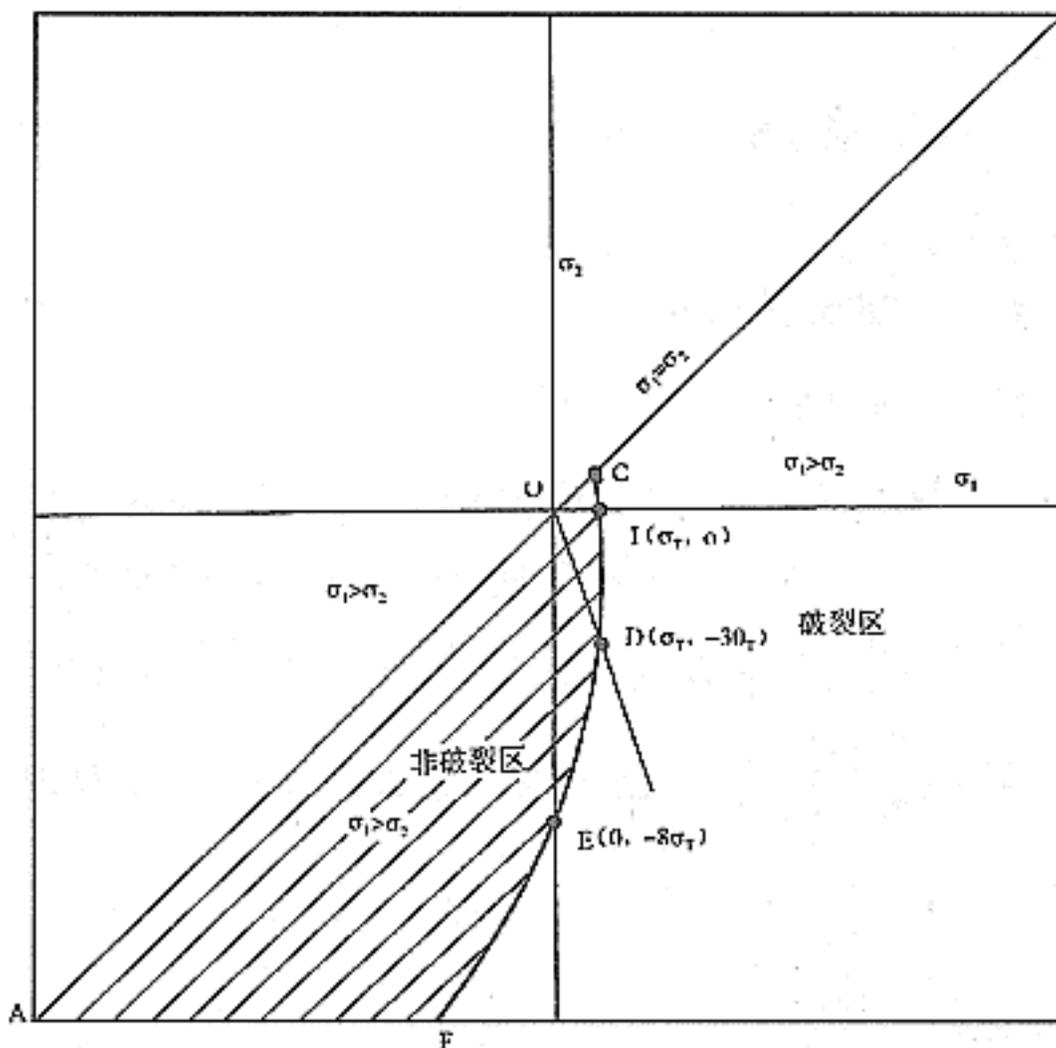


图2 格里菲斯断裂准则图解

Fig.2 Geometrical diagram of the Griffith criterion of failure

当第一种破裂情况发生时，即把式(14)代入式(16)，得 $\psi = -2\beta$ ；这时新裂缝方向与原裂痕长轴夹角为 $2\beta$ ，且自长轴起顺时针旋转 $2\beta$ 角(图3)。当第二种破裂情况发生时，即把式(15)代入式(16)，得 $\psi = 0$ ；这时新裂缝沿原椭圆裂痕长轴延伸。

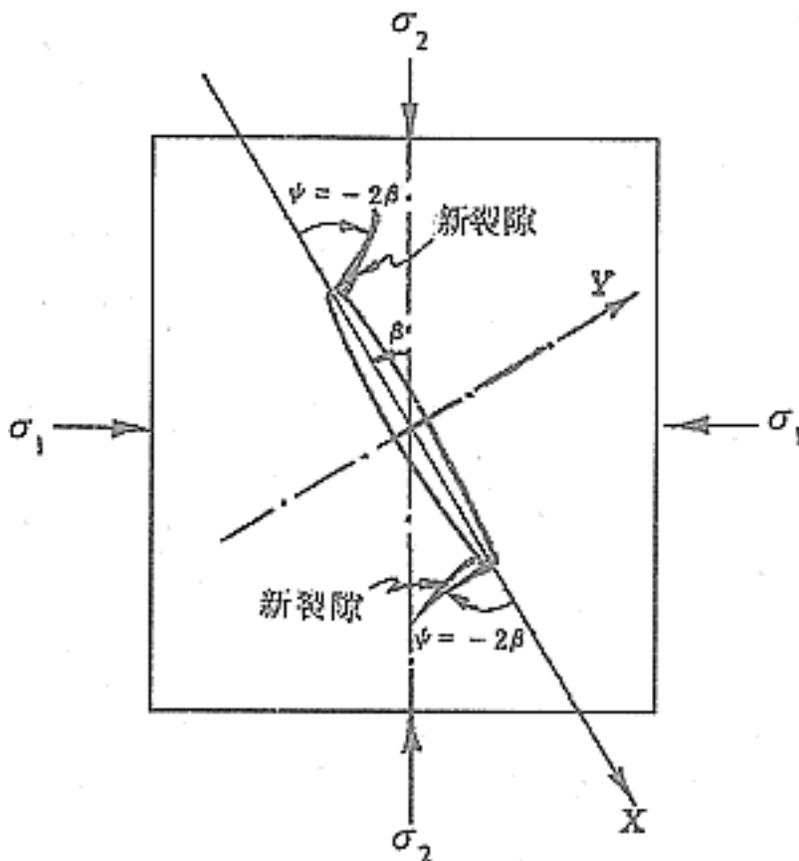


图3 椭圆裂痕端部开始破裂扩展方向

Fig.3 Orientation of initial fracturing extension at the ends of elliptical crack

由以上讨论可以得出，当岩石局部应力场加强时，椭圆裂痕长轴与最大主压应力 $\sigma_2$ 轴之间关系匹配合适时，在椭圆裂痕端部将会产生较大的切向拉应力，在此切向拉应力作用下，一旦达到岩石局部抗拉强度 $[m]$ ，则将产生裂缝的扩展 $[2]$ 。

当储层局部应力场性质和梯度变化较大时，新产生的裂缝方向和规模就会差别很大，表面看上去杂乱无章，如通常岩心裂缝观测到的情况那样，实际这些裂缝遵循岩石破裂机制而发展。

## 1.2 格氏断裂准则(14)与(15)在储层裂缝分析中的应用

前一节给出的断裂准则式(14)与式(15)，并非能直接用于储层裂缝预测，首先碰到的问题是岩石的局部抗拉强度 $\sigma_T$ 未知，其次是储层应力场的计算，后者在下面一节将

详细讨论。现在从另一个角度分析式(14)与式(15)，当岩层的应力场  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  可以获得，而  $\tau$  未知时，则可视  $\tau$  为  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的函数；这样一来，这里(下同)讨论的  $\tau$  已不代表岩石的局部抗拉强度，而是决定于应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的变量。由此出发，虽然岩层局部抗拉强度未知，但由式(14)与式(15)给出了各个局部受拉应力的状态，而  $\tau$  值正是表征这种拉张状态的参数。为确切描述储层张裂缝，本文定义  $\tau$  为“有效张应力”。如果忽略岩层材料局部抗拉强度的变化，则“有效张应力”  $\tau$  值越高，越容易发生张破裂或张破裂扩展。由于无法获得储层各个局部岩石材料的抗拉强度，不能给出确切的破裂临界值，仅能借助实验室实验资料，假设一个参考临界值，给出储层的可能裂缝发育区和优势方向，或称潜在裂缝发育区和优势方向。因此，本文定义的“有效张应力”  $\tau$  是描述储层潜在张裂缝的一个特征参数，非同于一般张应力概念或抗张强度概念。

## 2 储层古应力场和古裂缝定量分析方法

### 2.1 储层古构造地质模型与其相对应的数值模型

本文需要定量计算储层应力场。首先应建立力学数学模型及地质模型<sup>[3]</sup>。至今，已发现的油气构造均是在沉积盆地的古隆起及其斜坡部位，包括背斜、穹隆、断背斜、复合皱曲等构造<sup>[4]</sup>。若不考虑储层厚度因素，用薄板模型模拟构造面的应力和变形较为适宜。若储层厚度或深度影响不能忽略，则用厚壳模型或三维模型模拟更好。总之，储层构造地质模型是根据储层应力计算的力学数学模型而定。根据作者对几个油田储层应力和裂缝的研究，认为下面3种模型可以采纳<sup>[5]</sup>：

2.1.1 储层古构造的板模型 若不考虑储层厚度对裂缝发育程度的影响，用薄板弯曲近似理论分析储层古构造面的变形与应力，是一个简单易操作的方法。在这种情况下，根据对弯曲板的基本假定<sup>[6,7]</sup>，正应力  $\sigma_z$  及剪应力  $\tau_{zx}$  和  $\tau_{zy}$  可忽略不计，并略去次要应变分量  $\epsilon_z$ 、 $\epsilon_{zx}$ 、 $\epsilon_{zy}$ ，即  $\epsilon_z=0$ ， $\epsilon_{zx}=0$ ， $\epsilon_{zy}=0$ ；于是薄板弯曲问题简化为平面问题，其本构方程为：

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \\ \gamma_{xy} &= \frac{2}{E}(1 + \nu)\tau_{xy}\end{aligned}\quad (17)$$

式(17)与平面应力方程相同。但影响应力的变形量不同。因为薄板小挠度问题的几何方程为：

$$\epsilon_x = K_x z, \quad \epsilon_y = K_y z, \quad \gamma_{xy} = 2K_{xy} z$$

$$K_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad K_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad K_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (18)$$

式中 $K_x$ 及 $K_y$ 分别表示中性面在平行于zx面和yz面内的曲率； $K_{xy}$ 是中性面沿x、y方向的扭率；z是薄板顶面距中性面的距离。将式(18)代入式(17)，解出应力分量：

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y &= -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy} &= -\frac{Ez}{1+\nu} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)是用挠度w表示的应力分量。所以薄板弯曲问题的应力分量虽然与平面应力问题在形式上一样，但薄板弯曲应力性质决定于薄板的曲率和扭率。显然，计算储层构造面上应力状态，需要给出储层面的空间构造，包括构造面埋深等值线、断层、岩性等要素。图4是某油田三叠系沉积前奥陶系顶界埋深及构造图。式(19)中的应力分量，采用趋势面法、有限差分法、有限单元法均可，但最简便的还是趋势面法。

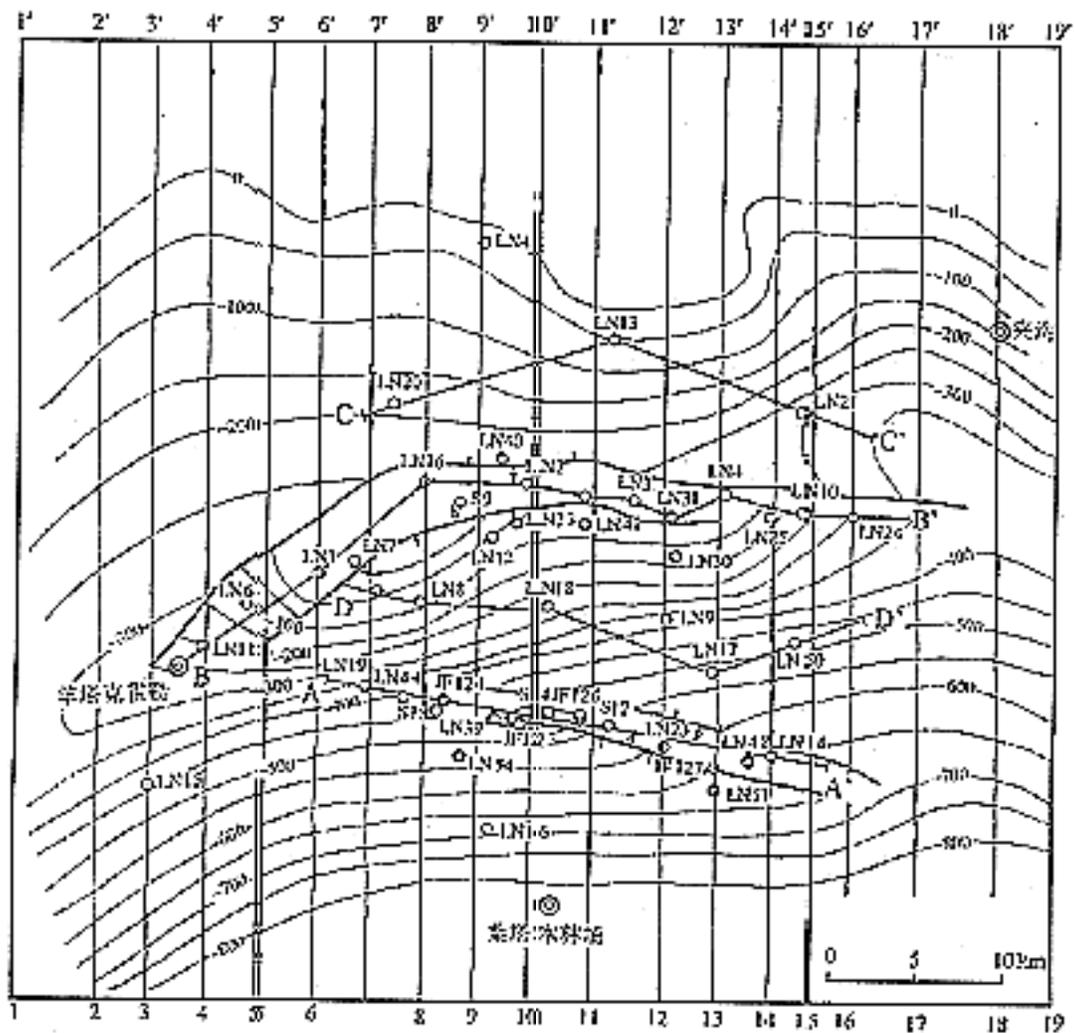


图4 某油田三叠系沉积前奥陶系顶界埋深及剖面线位置图

Fig.4 Deep-seated contour and tectonical map of Ordovician carbonatite 's top before Triassic deposit in some oil field

2.1.2 储层古构造的壳单元模型与组合单元模型 若考虑储层厚度变化和断层运动方式对储层裂缝影响，同时又考虑储层不同构造层面裂缝发育差异性，用厚壳模型模拟较为合适。这种情况选用适于分析厚壳和可变厚度壳单元模型，属于等参单元，由8个中面节点组成。每一个节点有5个自由度，3个位移，2个转动。为考虑基底断裂甚至穿壳断裂构造运动作用，采用组合单元模型更好，即由3个基本单元模型(即壳单元、梁单元、三维实体单元)组成一个标准组合单元模型(图5)，称其为组合单元模型。梁单元在组合单元模型中有两点意义：(1)传递体力或重力载荷；(2)使壳单元和三维实体单元之间的公共节点位移协调。壳单元模型和组合单元模型要求有三维构造地质模型，包括储层构造面、断层产状、非储层构造、岩性等要素。图6是某油田三叠系沉积前的2个剖面构造图，其位置分别与图4中9-9'和10-10'剖面线对应，图6中粗实线是断层线，实心圆表示壳单元中面上节点，节点编号和单元编号省略。

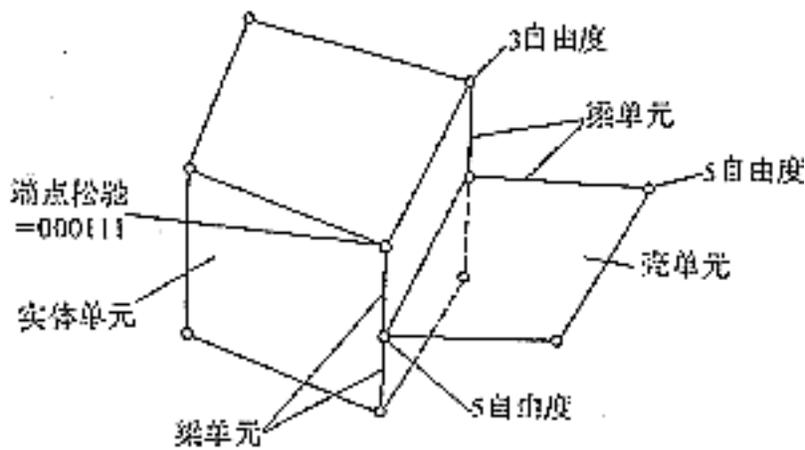


图5 组合单元示意图

Fig.5 Sketch of combination element model

2.1.3 储层古构造的三维有限单元模型 当储层较厚或构造非常复杂时，采用三维有限单元模型较为合适，且易操作、易推广，但当处理储层构造上的一些复合褶曲时，极大的增加了计算机时和数据处理工作量。所需求的储层构造地质模型与组合单元模型一样，只是去掉壳单元和梁单元，单元划分均按三维八节点六面体等参单元要求。

## 2.2 储层古裂缝定量分析方法

根据储层已有的资料和对储层裂缝预测的要求，选择储层应力场计算模型，即前面提出的3种模型之一或全采用，进行计算机模拟和数值分析；获得储层主应力场之后，利用破裂准则式(14)和式(15)给出储层“有效张应力” $\tau$ 分布图；按 $\tau$ 值分类，确定储层潜在张裂缝发育区。同时，据式(14)和式(15)，分别给出相对应的方位角 $\theta$ 。若 $\theta$ 是从式(14)得到，则裂缝扩展角 $\varphi = -2\theta$ ，根据图1与图3指出的关系，自 $\sigma_2$ 轴分别反时针和顺时针旋转 $\theta$ 角，得到2个原椭圆裂痕长轴位置(可能有2个椭圆裂痕也可能有1个)，再分别从2个椭圆长轴顺时针旋转 $2\theta$ 角，即追踪到裂缝扩展轨迹，称为潜在裂缝扩展轨迹。若 $\theta$ 是从式(15)得到，则裂缝沿原椭圆裂缝长轴扩展，自 $\sigma_2$ 轴分别反时针和顺时针旋转 $\theta$ ，便找到2个可能新产生的裂缝位置。对场内每个局部应力点处都进行上述处理后，便获得裂缝发育区的裂缝方向分布图。

## 3 某油田碳酸盐岩储层裂缝预测及其检验

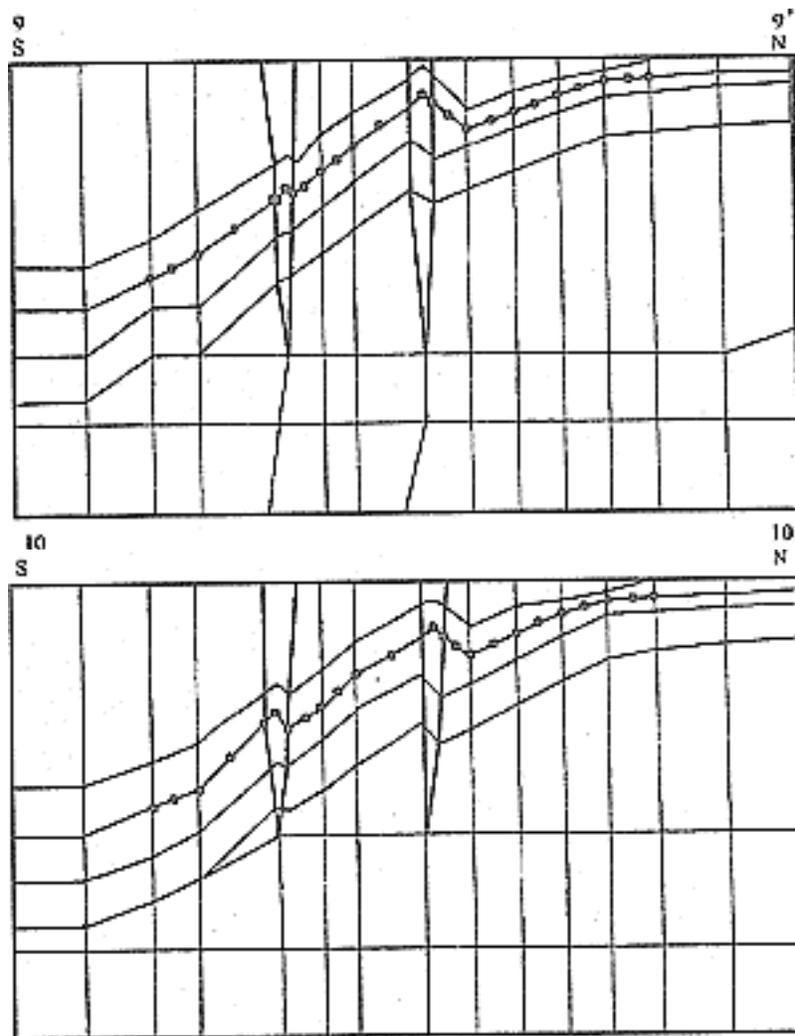


图6 某油田三叠系底界古构造与  
有限单元网格叠加图  
Fig.6 Two of profile map before Triassic  
deposit in some oil field

### 3.1 裂缝发育区带划分

利用上述3种储层应力场计算模型和格氏破裂准则，对某油田奥陶系碳酸盐岩储层顶部100m厚度内的裂缝进行了计算与分析，给出了裂缝发育分区分类图(图7)。其中级裂缝为裂缝最发育区带，它是由3种模型和方法计算的“有效张应力” $\tau$ 值的公共高值区；级裂缝为裂缝比较发育区带，它是由3种模型和方法计算的“有效张应力” $\tau$ 值的比较高值区或级 $\tau$ 值区；级裂缝为裂缝发育程度较低区带，是由3种模型和方法计算的“有效张应力” $\tau$ 的公共较低值区域。下面将从两个方面说明预测情况：

(1)内部符合检验结果 内部符合检验分成两个时段，本文预测图是1994年12月提交。后来在1996—1997年对老井进行酸化处理，原来的低产井或干井，经酸化后上升为高产井，例如LN11井、LN4井、LN10井、LN30井、LN54井、JF127井、LN48井等7口井(图7中用实心圆表示的井位)。因此，这里用当前的生产情况评价这张预测图，比

1994年12月刚完成时，更客观些。

截止1994年12月某油田钻穿该层位38口井中，高产能(包括油、气、水)井大部分落在 级和 级裂缝发育区，低产能井井位基本落在 级裂缝发育区。预测与产能完全不符合的有LN54井，符合较差的有JF127井、LN17井、LN50井、LN24井、LN25井，约占16%。也就是说，预测与产能的符合率约占84%。若用最新资料，即经酸化后高产井(只包括油和气)有15口井，有6口井落在 级裂缝发育区，它们是LN11井、LN1井、LN4井、LN8井、LN18井、JF123井，有4口井位于 级裂缝发育区，即LN10井、LN30井、JF126井、LN14井，合起来约占67%，位于 级裂缝区的高产井有LN48井、JF127井、LN44井，落在裂缝不发育区的高产井有LN54井和LN17井，合起来约占33%。

由上述可知，本文从裂缝成因研究出发，提出的裂缝发育分区，与产能符合率达84%，与高产井符合率达67%，是相当令人满意的，因为实际上裂缝预测符合率只能高于84%，例如LN12井和LN5井裂缝被泥质充填。完全属于预测误差的井有LN54井、LN17井、JF127井和LN44井，这些井位的构造以及网格化在模型中处理较粗糙，造成计算误差。

(2)新钻井检验 裂缝预测报告完成之后，有关单位在该油田桑塔木断垒北坡和轮南断垒南坡分别钻了LG1井和LG2井，在桑塔木断垒2号构造上打一口水平井JF128(图7中五角星代表的井位)，后者定井位时，我们的预测意见是主要参考资料之一，至今JF128井继续稳产高产，该井位定在预测的 级裂缝发育区内。LG1井和LG2井分别定在我们预测的 级和 级区。

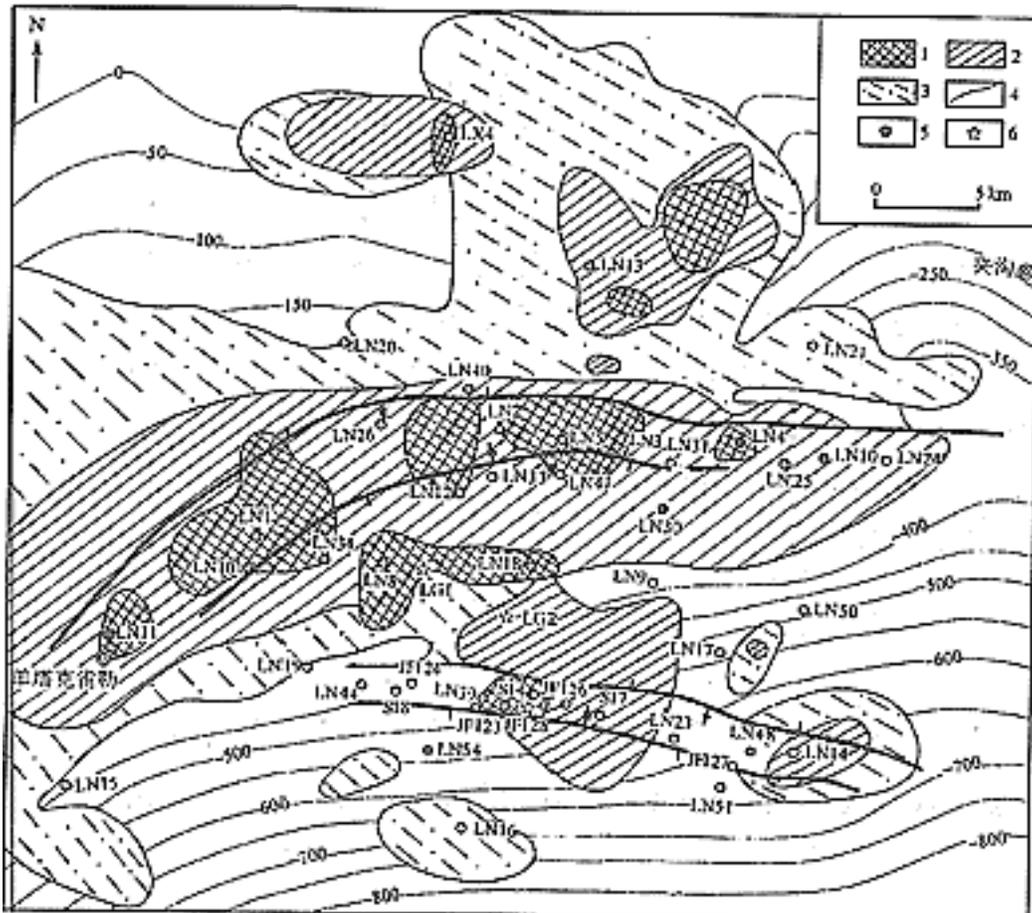


图7 某油田奥陶系碳酸盐岩储层裂缝预测  
Fig.7 Map of crack prediction within 100 m of Ordovician  
carbonatite's top in some oil field

1. 级裂缝 ; 2. 级裂缝 ; 3. 级裂缝 ; 4.储层顶界埋深 ; 5.酸化后高产井 ; 6.新铝高产井

### 3.2 裂缝方向

3种模型和方法估算的裂缝方向比较分散,不易于表示在一张图上,由于没有可靠资料检验,这里不再讨论和展示裂缝方向预测结果。

本文的图4资料由欧阳健提供,图6和图7分别由任金卫、孙君秀、黄辅琼、曾海容、兰印刚提供。新钻井和酸化后的高产井资料由肖承文提供。此外,欧阳健、贾承造对该课题研究曾给予很大支持,这里一并致谢。

作者简介:宋惠珍(1935-),女,研究员,博士生导师,主要从事数值模型、地震应力场计算、断层力学计算、地震危险性分析、油气储层应力场计算、储层构造裂缝定量研究。

作者单位:国家地震局地质研究所,北京 100029

### 参考文献

- [1] 华东水利学院和成都科学技术大学.岩石力学 [M].北京:水利电力出版社, 1986, 49~56.
- [2] 宋惠珍,袁岩光.1976年唐山7.8级地震震源过程的研究 [J].地震地质, 1988, 10(4): 98~108.
- [3] 纳尔逊R A.天然裂缝性储集层地质分析 [M].柳广第,朱筱敏译.北京:石油工业出版社, 1991.
- [4] 贾承造.中国塔里木盆地构造特征与油气 [M].北京:石油工业出版社, 1997, 291~306.
- [5] 童晓光,梁狄刚,贾承造.塔里木盆地石油地质研究新进展 [M].北京:中国科学出版社, 1996, 188~195.
- [6] 黄克智,等.板壳理论 [M].北京:清华大学出版社, 1987.
- [7] 曾锦光,等.应用构造面主曲率研究油气藏裂缝问题 [J].力学学报, 1982, (2).

收稿日期:1998-04-12