文章编号：1006-6616（2010）03-0310-15

前陆冲断带构造应力场与裂缝发育关系

宋　勇[1]，冯建伟[2]，戴俊生[2]，刘　旭[1]，卞保力[1]，李　明[3]

（1. 中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院，新疆 克拉玛依　834000；
2. 中国石油大学（华东）地球资源与信息学院，山东 东营　257061；
3. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院海洋所南海室，辽宁 盘锦　124010）

摘　要： 针对前陆冲断带地层裂缝预测难的现状，在选择适合于研究区破裂准则的基础上，确立了造缝时期古地应力和现今地应力与裂缝参数之间的关系；通过构造特征研究确定了造缝时期古地应力的性质和方向，用断层和裂缝走向统计法、声速法、水力压裂法和声发射法计算了现今地应力的方向和大小；将古、今地应力场的数值模拟结果代入到裂缝参数计算模型中，计算出了乌夏前陆冲断带二叠系火山岩—沉积岩混杂地层裂缝的开度、密度、孔隙度和渗透率，并分析了分布趋势。研究表明，构造应力和岩性对裂缝发育起决定性作用，构造应力差异大的地区容易产生裂缝，且裂缝各项参数较大；靠近主断层的构造高部位裂缝发育程度较高；凝灰质和泥质含量越大，粒度越细，裂缝越发育。

关键词： 乌夏前陆冲断带；混杂地层；破裂准则；应力场；裂缝参数
中图分类号： TE122.2　　**文献标识码：** A

0　引言

据不完全统计，世界上裂缝性油藏的储量约占已探明总储量的一半[1]，因此，对裂缝性储集层进行研究有着非常重要的意义。由于致密性储集层中以构造裂缝为主，所以采用地质力学原理和方法，通过构造应力场数值模拟定量表征裂缝是裂缝预测的必然趋势。构造裂缝定量计算要解决的问题主要有：①裂缝的生成问题，即在什么样的应力作用下才能产生裂缝；②裂缝的方向和位置问题，即如何确定构造裂缝的方向和位置；③裂缝量化的参数，即如何确定裂缝的开度、密度等反映裂缝发育强度的参数。

众所周之，裂缝是岩石破裂的结果，其生成问题长久以来就是一个难题。国内外学者根据实际观察和试验测试，提出了基于岩石强度假说的五大系列破裂准则：单剪强度准则、双剪强度准则、三剪强度准则、应变能密度准则和最大张应力强度准则[2]，不仅解释了岩石受力破裂产生裂缝的机理，而且能对裂缝的方位作出判断，可以解决裂缝定量计算的前两个问题。对于裂缝定量计算的第三个问题，国内外学者结合岩石破裂准则、能量法以及多元统

收稿日期：2010-03-09
基金项目：国家科技重大专项（2008ZX05001）。
作者简介：宋勇（1978-），男，汉族，工程师，主要从事地震资料解释和石油地质研究。E-mail：UPC_ fengjw@yahoo.com.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

计法对裂缝开度和密度进行量化，取得了许多可喜的成果和借鉴经验[3]。Price 最早将岩石中裂缝数量与最初储存于岩石中的应变能联系起来，指出具有相对高值应变能的岩石要比相同厚度、具有低值应变能的岩石具有更多的裂缝[4]。中国学者文世鹏等[5]、曹春富等[6]、丁中一等[7]、陈波等[8]阐述了用有限元方法进行古应力数值模拟，使用莫尔—库仑破裂准则和格里菲斯破裂准则对应力计算结果进行判别，依据岩石破裂率和应变能密度对裂缝发育程度进行预测。不过他们给出的计算模型和计算方法还不足以将裂缝参数定量化，使用岩石破裂率的方法最多也只能做到裂缝预测的半定量化。虽然使用拟合的方法探讨了应变能密度和裂缝密度的定量化关系，但是由于缺乏理论依据，且拟合需要大量岩芯统计数据，其方法还有待进一步研究。谭成轩等[9]在三维构造应力场数值模拟的基础上，根据岩石破裂准则，岩石内各点单位体积的形变比能分别进行目标层构造裂缝发育程度与岩石破裂系数、应变能之间定量关系研究，探索应力场在裂缝研究中的思路方法。

由此可见，学者们普遍意识到构造应力场数值模拟的方法是实现油藏构造裂缝定量化描述的最有效途径，并作了许多探索。前人所做工作多集中于岩芯裂缝的描述，由于没有建立合理的力学模型，因而对油藏范围内裂缝的预测只能做到定性到半定量。此外，这些研究主要集中在火成岩或泥岩地层中，对于复杂岩性的地层涉足甚少，尤其是火山岩-沉积岩混杂地层中研究更少，关键在于缺少根据古今应力场的数值模拟来建立应力-应变与裂缝参数之间定量关系的系统手段和方法，难以准确计算研究区裂缝参数。

本文以准噶尔盆地乌夏前陆冲断带火山岩-沉积岩混杂地层为研究目标区，主要通过古今应力场的数值模拟结果来建立应力与裂缝参数之间的定量关系，最终计算研究区裂缝参数，预测二叠系裂缝参数的现今分布情况，并用测井和钻井资料验证这种关系的准确性，为勘探开发提供重要信息和依据。

1　研究区地质概况

乌夏前陆冲断带位于准噶尔盆地西北缘东北部（见图 1），自晚石炭世以来经历了海西、印支、燕山和喜马拉雅等多期构造运动，造成地层抬升剥蚀，形成了众多不整合[10]。沉积盖层除缺失大部分二叠系上乌尔禾组外，其他层系发育全，在石炭系之上自下而上依次发育了二叠系佳木河组（P_1j）、风城组（P_1f）、夏子街组（P_2x）、乌尔禾组（P_2w）以及三叠系、侏罗系和白垩系。

下二叠统由盆地方向向造山带前缘明显变厚，是在西北缘推覆挤压构造活动作用下，前陆盆地发育初期的充填产物，为一套火山岩和碎屑岩混积的含火山岩系地层（见图 2）。佳木河组可划分为上、中、下 3 个亚组，其中上亚组与下伏中亚组、上覆风城组均呈不整合接触。在平面上，从断裂带边界向盆地方向，地层岩性变化趋势从以火山岩为主，逐渐过渡到以碎屑岩为主，再过渡到纯碎屑岩；剖面上，地层由老到新，火山岩含量减少，碎屑岩含量增多，两种岩性交互出现。碎屑岩主要为泥岩、砂砾岩、细砾岩，火山岩主要以层状产出的火山岩为主，其间有少量浅成、超浅成侵入岩（次火山岩），地层厚度在 800 ~ 3000m。风城组为灰黑色泥质、凝灰质白云岩、白云质、凝灰质泥岩夹砂岩、粉砂岩、石灰岩薄层互层，为滞流海湾或潟湖沉积，该层是风城断裂背斜区的裂缝型高产储集层，分布范围略小于佳木河组范围，厚约 400 ~ 1400m。中二叠统沉积范围进一步扩大，以玛湖凹陷为沉积中心。总体上，沉积充填表现为由粗变细的旋回沉积。夏子街组岩性普遍较粗，主要为一套砾岩、

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 1 乌夏前陆冲断带地质简况

Fig. 1 Geological skeleton of Wuxia foreland thrust belt

砂砾岩、砂岩夹少量泥岩；下乌尔禾组分布于克-乌断裂、夏红北断裂下盘，岩性主要为灰绿色、灰色砂岩、灰绿色泥岩互层，泥质含量高，属山麓河流洪积-湖沼沉积，具有旋回性。

2 破裂准则选择

在乌夏前陆冲断带，拉张应力状态下一般用格里菲斯破裂准则，但该准则在压缩状态下对致密性火山岩-砂砾岩却不适用，因而改用两段式莫尔—库仑破裂准则。破裂判据采用下面的公式[7]：

① 当 $\sigma_3 \geqslant 0$ 时，用莫尔—库仑破裂准则：

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geqslant C_0 \cos\varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin\varphi \tag{1}$$

② 当 $\sigma_3 < 0$ 时，即拉张应力状态时，用格里菲斯破裂准则：

当 $(\sigma_1 + 3\sigma_3) > 0$ 时，破裂判据为：

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

$$\cos 2\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2(\sigma_1 + \sigma_3)} \tag{2}$$

当 $(\sigma_1 + 3\sigma_3) \leqslant 0$ 时，破裂判据简化为：

$$\sigma_3 = -\sigma_T, \theta = 0 \tag{3}$$

3 裂缝参数计算模型

3.1 古开度、古密度计算

根据弹性力学及断裂力学相关理论，岩石在应力作用下变形能够积聚应变能[11,12]，当岩石内应变能释放率等于产生单位面积裂缝表面所需能量（表面能密度）时即发生断裂。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

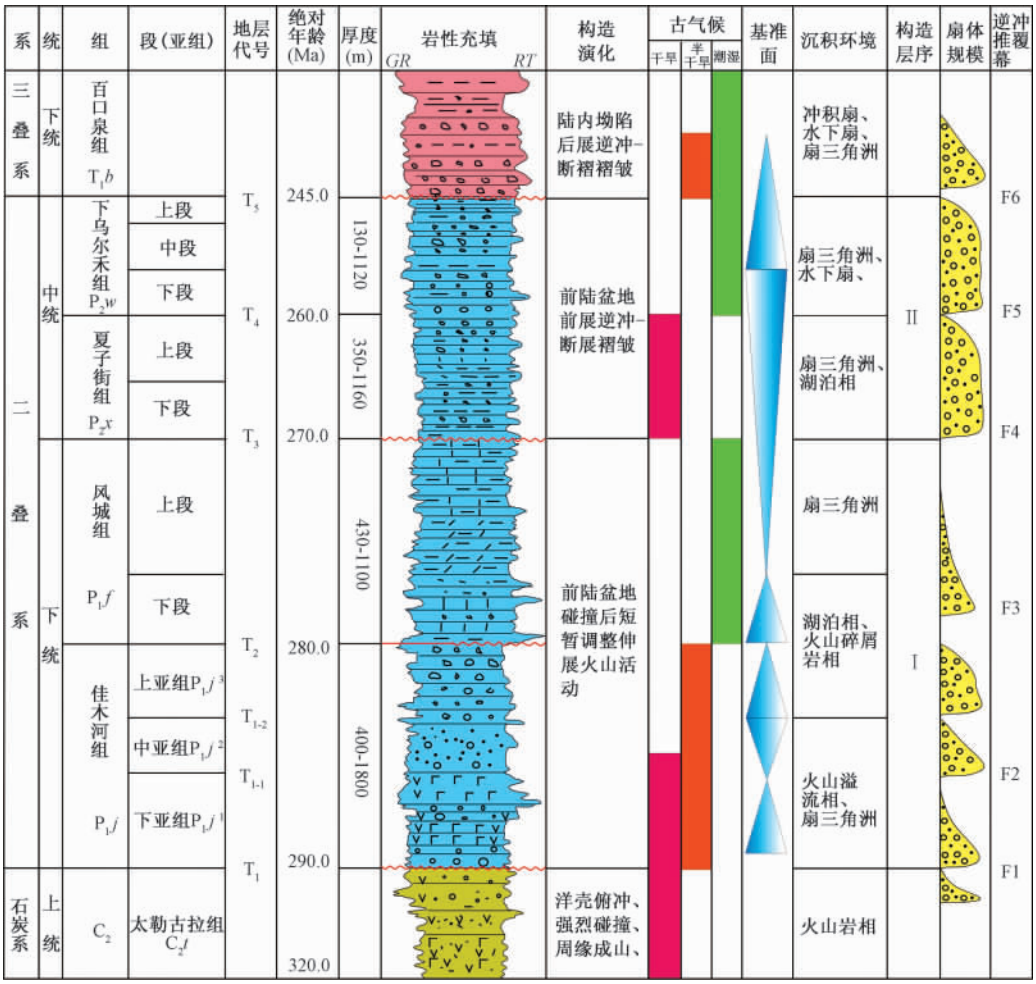

图 2　乌夏前陆冲断带二叠系沉积充填序列及构造层序划分

Fig. 2　Filling series and division of structural sequence of the Permian in Wuxia foreland thrust belt

建立一表征单元体用以表示弹性、脆性岩层中地应力的作用方式及岩石破裂后所产生裂缝的空间分布形态，并假设表征单元体为平行六面体，且沿 σ_1（最大主应力）、σ_2（中间主应力）、σ_3（最小主应力）方向边长分别为 L_1、L_2、L_3。岩石破裂时释放出的应变能一部分用来抵消新增裂缝表面积需要的能量，其余的则以弹性波的形式（断面能）释放出去。由于裂缝弹性波能量很小，忽略不计，根据能量守恒原理，单元体内释放的应变能等于新增裂缝表面积所需要的能量，从广义虎克定律出发得到裂缝的体积密度[13]。实际上地下岩石常处于三向压缩的复杂应力状态，这时确定的公式显然不具有通用性。岩石处于三向复杂压应力状态时，产生裂缝必须克服的弹性应变能密度不仅与岩石固有的力学性质有关，还与所处的应力状态有关。根据岩石物理测试结果，岩石三轴压缩曲线和单轴压缩曲线具有相似性，轴向应力为 $0.85\sigma_p$ 时出现前兆微裂缝，这时的应变能密度即是要产生裂缝必须克服的弹性应变能密度。由于乌夏前陆冲断带成缝期为挤压环境，没有张性应力出现，为三向挤压应力状态，使用莫尔—库仑破裂准则得到复杂应力状态下的裂缝体密度和线密度计算模型。

由于主应变状态下裂缝的开度大小由张应变决定[12]，对于混杂脆性地层材料，其张性应变达到一定值时开始出现裂缝（此时岩石还没有完全破裂），之后发生的张性应变主要由

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

微裂缝的开裂引起，根据裂缝线密度、体密度和裂缝开度之间的关系得到开度的计算模型。

$$\begin{cases} w_f = w - w_e = \dfrac{1}{2E}\left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - 0.85^2\sigma_P^2 + 2\mu(\sigma_2 + \sigma_3)0.85\sigma_P\right] \\ \sigma_P = \dfrac{2C_0\cos\varphi + (1 + \sin\varphi)\sigma_3}{1 - \sin\varphi} \\ E = E_0\sigma_P \\ D_{vf} = \dfrac{w_f}{J} \\ J = J_0 + \Delta J = J_0 + \sigma_3 b \\ D_{lf} = \dfrac{2D_{vf}L_1L_3\sin\theta\cos\theta - L_1\sin\theta - L_3\cos\theta}{L_1^2\sin^2\theta + L_3^2\cos^2\theta} \\ D_{lf}b = |\varepsilon_3| - |\varepsilon_0| \\ \varepsilon_0 = \dfrac{1}{E}(\sigma_3 - \mu(0.85\sigma_P + \sigma_2) \end{cases} \tag{4}$$

其中裂缝体积密度和线密度的关系取决于 θ 角，当 $\theta \neq 0$ 时，$D_{vf} \neq D_{lf}$，则有

$$\begin{aligned} &(\sigma_3 L_1\sin\theta + \sigma_3 L_3\cos\theta)b^2 + [(L_1\sin\theta + L_3\cos\theta)J_0 + \\ &(|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|)(L_1^2\sin^2\theta + L_3^2\cos^2\theta)\sigma_3 - 2w_f L_1 L_3\sin\theta\cos\theta]b + \\ &(|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|)(L_1^2\sin^2\theta + L_3^2\cos^2\theta)J_0 = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

当 $\theta = 0$ 时，$D_{vf} = D_{lf}$，则有

$$(|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|)\sigma_3 b + (|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|)J_0 = w_f b \tag{6}$$

式中 θ——裂缝破裂角（裂缝面长轴与最大主应力方向之间的交角，岩石力学参数实验测定），(°)；φ、C_0——内摩擦角和内聚力（来自岩石力学参数测试结果）；μ——泊松比，无量纲；σ_1、σ_2、σ_3——最大主应力、中间主应力、最小主应力，Pa；D_{vf}——裂缝体积密度，即裂缝体的总表面积与单元体体积之比，m^2/m^3；D_{lf}——裂缝真实线密度，条/m；σ_p——岩石在主应力 σ_3 作用下的破裂应力，Pa；L_1、L_3——沿主应力方向 σ_1、σ_3 的单元体长度，m；ε_1、ε_2、ε_3——最大主应变、中间主应变、最小主应变，无量纲；b——古应力场裂缝开度，m；J_0——零围压下的裂缝表面能，J/m^2；J——裂缝表面能，产生单位面积裂缝所需要能量，J/m^2；ΔJ——围压 σ_3 阻力产生的附加表面能，J/m^2；ϖ——应变能密度，J/m^3；ϖ_f——裂缝应变能密度，即新增裂缝所消耗的单位体积应变能，J/m^3；ϖ_e——产生裂缝必须克服的弹性应变能密度，J/m^3；w_f——裂缝应变能密度，J/m^3；

公式（5）、（6）分别为一元二次方程和一元一次方程，将实验测出的各参数代入，并根据古应力计算结果，即可求出古开度 b，将 b 反代入上面公式进一步求出 D_{vf}和 D_{lf}。

3.2 古孔隙度、古渗透率计算

根据古构造应力场作用有利于裂缝的形成，而现今地应力场不利于形成裂缝，只对已形成的裂缝进行改造这一思路，首先分析古应力场中裂缝孔隙度、裂缝渗透率和应力—应变的关系，然后再研究现今三向压应力环境下裂缝孔隙度和裂缝渗透率如何被应力场改造[8]。

对于多组裂缝，古孔隙度为：

$$\phi_{ft} = \sum_i^m b_i D_{vfi}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中　m——裂缝的组数；b_i——第 i 组裂缝的开度，m；D_{tfi}——第 i 组裂缝的体积密度，m^2/m^3；ϕ_{ft}——裂缝总孔隙度，小数。

流体在单一裂隙中的流动可以看成平行板间的流动，关键参数是裂隙开度、裂隙线密度或裂缝间距（裂隙间距和裂隙线密度互为倒数）。流体在裂缝面内的流动可以用平行板渗流来模拟[14]，对于多组裂缝，第 i 组裂缝在三个坐标轴方向的渗透率为（推导过程见文献[15]）：

$$\begin{bmatrix} k_{fX} \\ k_{fY} \\ k_{fZ} \end{bmatrix} = \frac{b^3 D_{lf}}{12} \begin{bmatrix} 1 - n_{f1}^2 \\ 1 - n_{f2}^2 \\ 1 - n_{f3}^2 \end{bmatrix} = \frac{b^3 D_{lf}}{12} \begin{bmatrix} 1 - (\cos\alpha_{11}\sin\theta + \cos\alpha_{31}\cos\theta)^2 \\ 1 - (\cos\alpha_{12}\sin\theta + \cos\alpha_{32}\cos\theta)^2 \\ 1 - (\cos\alpha_{13}\sin\theta + \cos\alpha_{33}\cos\theta)^2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

总的裂缝渗透率利用公式（7）计算，即：

$$\begin{bmatrix} k^T_{fX} \\ k^T_{fY} \\ k^T_{fZ} \end{bmatrix} = \sum_i^m \begin{bmatrix} k_{fXi} \\ k_{fYi} \\ k_{fZi} \end{bmatrix} = \sum_i^m \frac{b_i^3 D_{lfi}}{12} \begin{bmatrix} 1 - n_{f1i}^2 \\ 1 - n_{f2i}^2 \\ 1 - n_{f3i}^2 \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：α_{11}、α_{12}、α_{13}为主应力 σ_1 与三个坐标轴的夹角；α_{31}、α_{32}、α_{33}为主应力 σ_3 与三个坐标轴的夹角；m 为裂缝组数；（n_{f1i}，n_{f2i}，n_{f3i}）分别为第 i 组裂缝面单位法向量的三个分量；

需要注意的是，在利用式（8）计算渗透率时，一定要统一 b_i 和 D_{lfi}的量纲，若 b_i 的量纲为 m，D_{lfi}的量纲为 1/m，此时渗透率的单位为 m^2，如果要转变为 mD，则需乘以系数 10^{15}；当 b_i 的量纲为 μm，D_{lfi}的量纲为 1/μm，此时渗透率的量纲位 μm^2，如果要转变为 mD，则需乘以系数 10^3。

3.3　现今裂缝孔隙度、渗透率计算

乌夏前陆冲断带自晚石炭世末以来经历了晚海西运动、印支运动、燕山运动的继承发育，燕山末期最终覆盖定型。构造格局的形成分为 4 个阶段：前陆盆地短期伸展火山活动阶段（早二叠世）、前陆盆地前展逆冲—断展褶皱阶段（中晚二叠世）、陆内坳陷后展逆冲—断展褶皱阶段（三叠纪）、陆内坳陷压张转换阶段（侏罗纪—白垩纪）[12]。其中，海西运动和印支运动对二叠系裂缝的形成起决定性作用，侏罗纪及以后的构造运动对裂缝的影响较微弱，所以造缝时期最大主应力方向为北西—南东向，现今最大主应力方向为南北向[12]。

乌夏前陆冲断带二叠系现今埋深 3500m 左右，围压不到 60MPa，差应力较小，在这样的压应力状态下，岩石没有达到破裂极限，不可能产生新的裂缝。所以该油藏中裂缝主要由古应力场产生，裂缝体积密度、线密度不受现今地应力场影响；但是由于压缩作用，裂缝逐渐闭合，开度极大地减小。在经典光滑、平直、两块无限长平行板裂缝渗流模型中，渗透率 K 与裂缝开度 b 的三次方成正比，因而开度 b 对裂缝的渗流能力有显著的影响，能否正确预测直接决定油藏描述的有效性。现已明确 b 的大小受应力、应变控制，若不考虑裂缝壁内流体化学反应，则应力—应变和裂缝开度 b 成较好的函数关系。

正应力和剪应力对裂缝开度的影响可用下式计算[16]：

$$b_m = \frac{b_0}{1 + 9\sigma'_n/\sigma_{nref}} + \Delta b_S + b_{res} \tag{9}$$

上式中等号右边第一项反映法向正应力对裂缝开度的影响。其中 σ'_n——有效正应力，Pa；σ_{nref}——使裂缝开度降低 90% 的有效正应力，Pa；b_{res}——裂缝表面承受最大正应力时的裂缝开度，m，相当于“残余”开度；Δb_s——由剪切位移引起的开度增量，m。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现今地应力场下，火山岩与沉积岩混杂储集层不发生剪切位移，故（9）式第二项舍去，变为：

$$b_m = \frac{b_0}{1 + 9\sigma'_n/\sigma_{nref}} + b_{res} \tag{10}$$

上式中，σ_{nref}是与岩性有关的系数，残余隙宽 b_{res}就目前的技术还无法确定，因其很小，在模拟计算中取值为零。此外，σ'_n 为有效正应力（Pa），为裂缝面上的正应力 σ_n 与裂缝中的流体压力 P 之差，即：

$$\sigma'_n = \sigma_n - P \tag{11}$$

由于在法向量为 n 的任意斜截面上，沿 n 方向的正应力可用以下公式[17]计算：

$$\sigma_n = n \cdot \sigma \cdot n \tag{12}$$

式（12）中，σ 为应力张量，可表示为：

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \tag{13}$$

此外式（12）中，n 为裂缝面法向量，它可表示为：

$$n = (nf_1 i + nf_2 j + nf_3 k) \tag{14}$$

将（13）和（14）代入式（12）可得：

$$\begin{aligned} \sigma_n = {} & (\sigma_x nf_1 + \tau_{xy} nf_2 + \tau_{xz} nf_3) nf_1 + (\tau_{xy} nf_1 + \sigma_y nf_2 + \tau_{yz} nf_3) nf_2 + \\ & (\tau_{xz} nf_1 + \tau_{yz} nf_2 + \sigma_z nf_3) nf_3 \end{aligned} \tag{15}$$

这样现今地应力场下裂缝孔隙度和裂缝渗透率的计算公式应为：

孔隙度：

$$\phi_f = b_m D_{vf} \tag{16}$$

渗透率：

$$\begin{bmatrix} k_{fX} \\ k_{fY} \\ k_{fZ} \end{bmatrix} = \frac{b_m^3 D_{lf}}{12} \begin{bmatrix} 1 - n_{f1}^2 \\ 1 - n_{f1}^2 \\ 1 - nf_1^2 \end{bmatrix} = \frac{b_m^3 D_{lf}}{12} \begin{bmatrix} 1 - (\cos\alpha_{11}\sin\theta + \cos\alpha_{31}\cos\theta)^2 \\ 1 - (\cos\alpha_{12}\sin\theta + \cos\alpha_{32}\cos\theta)^2 \\ 1 - (\cos\alpha_{13}\sin\theta + \cos\alpha_{33}\cos\theta)^2 \end{bmatrix} \tag{17}$$

式中 b_m——现今应力场下裂缝开度，m。

3.4 考虑矿物充填后裂缝孔隙度及渗透率的计算

裂缝被矿物充填也会影响开度的有效性，矿物充填越饱满，裂缝有效开度越小。因此，裂缝被矿物充填时，要使用有效开度。本文采用矿物充填系数法来描述，矿物充填系数 C 表示矿物充填裂缝的程度，用充填矿物总体积占裂缝总体积大小来衡量。当矿物全部充满裂缝时，C 为 1；当矿物半充填裂缝时，C 为 0.5；当矿物充填部分占裂缝体积 1/4 时，C 为 0.25；当裂缝不被矿物充填时，C 为 0。

考虑矿物充填后，裂缝有效开度用下式计算：

$$b_{fe} = (1 - C) b_m \tag{18}$$

裂缝有效孔隙度：

$$\phi_{ef} = (1 - C) \phi_f \tag{19}$$

裂缝方向有效渗透率：

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{bmatrix} k_{fXe} \\ k_{fYe} \\ k_{fZe} \end{bmatrix} = (1-C)^3 \begin{bmatrix} k_{fX} \\ k_{fY} \\ k_{fZ} \end{bmatrix} = \frac{(1-C)^3 b_m^3 D_{lf}}{12} \begin{bmatrix} 1-(\cos\alpha_{11}\sin\theta+\cos\alpha_{31}\cos\theta)^2 \\ 1-(\cos\alpha_{12}\sin\theta+\cos\alpha_{32}\cos\theta)^2 \\ 1-(\cos\alpha_{13}\sin\theta+\cos\alpha_{33}\cos\theta)^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

4　实例分析

4.1　造缝期古地应力场数值模拟

应力场模拟主要采用有限单元方法。由于乌夏前陆冲断带广泛分布了多种岩石类型，纵向上为火山岩与正常沉积岩混杂地层，根据岩心分析资料及各地层主要岩性的力学参数，并考虑到岩性的差异，选取不同的力学参数，将研究区分为 5 种材料，与有限元法有关的材料特性参数主要包括弹性模量、泊松比和密度。参考前人各种岩石力学参数的取值情况，最终确定出与二叠系各组相符合的岩石特性参数（见表 1）。

表 1　乌夏前陆冲断带二叠系力学参数

Table 1　Mechanical parameters of Permian of Wuxia foreland thrust belt

名称	弹性模量（E）/MPa	泊松比（μ）	岩石密度/（g·cm^{-3}）
P_1j	28500	0.150	2.600
P_1f	27000	0.160	2.532
P_2x	24000	0.176	2.450
P_2w	23000	0.178	2.420
边框	22000	0.190	2.360

4.1.1　古应力大小、方向的确定及地质模型的建立

根据不同构造演化阶段产生不同走向的断裂系统以及最大主应力方向与共轭裂缝的锐角夹角的平分线方向相同的原则，早二叠世为北西西向，中晚二叠世为北西向，三叠纪与侏罗纪—白垩纪均为近南北向，造缝时期最大主应力方向为北西—南东向。同时，根据裂缝产生和发育的时间可以计算出该裂缝产生时期的埋藏深度，根据埋深可以估计出当时的重力应力，可以利用破裂准则反求最大主应力的原则，分析后发现，二叠系火山岩造缝期时，二叠系处于地表，根据 $F=\rho gh$ 的计算公式可以算出火山岩产生的垂向压力范围为 0 ~ 97.7MPa[18]。从裂缝的走向玫瑰花图中可以看出裂缝的剪裂角为 40°。根据二叠系的莫尔—库仑破裂准则最终求得最大主应力 σ_1 大于 486MPa。

在此基础上，在古应力场模拟时对南北方向反复加载，观察模型的变形结果，寻找变形结果接近于现今构造的加载方案。此项工作的前提是认为当变形后的模型与二叠系现今构造情况相吻合时，所加载的方式反映了二叠系末的受力情况。经过反复调试，拟合出接近于现今构造的加载方案，北西—南东 315°为最大主应力方向，大小为 500MPa；北东—南西向为中间主应力方向，大小为 150MPa；垂向为最小主应力方向，由自身重力产生。

然后，由构造平面图和剖面图可以建立三维有限元模型，采用各层的构造平面图将各层顶底构造图划分网格并读取网格节点坐标与深度的方法建立三维地质模型。从而，选取二叠系各组相符合的岩石特性参数，在 X、Y、Z 三个方向施加约束条件以满足有限元分析的要求，即模型没有总体的平移和转动，能够对模型进行运算求解，得到收敛解答。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.1.2 边界力作用方式

边界力包括水平构造力、重力、上覆岩层压力[17]。重力由岩层的密度和重力加速度计算，Ansys 程序自动产生。由于在裂缝形成期，岩层埋深较浅（<2000m），垂向应力主要由岩层自生容重产生，为压应力。这样在三维空间上，最大主应力为北西向，水平最小主应力变为中间主应力，与断层走向平行，垂向为最小主应力方向。若岩层密度按 2.36g/cm^3 计算，2000m 深度内由容重产生的水平主应力不超过 5.24MPa，计算公式为[18]：

$$\sigma_h = \sigma_z\left(\frac{\mu}{1-\mu}\right)^{1/n} \tag{21}$$

式中 σ_h——由重力应力场（自生容重产生）派生出来的水平应力；μ——泊松比，取 0.19；n——与非线性压缩有关的常数，一般岩石开采用 0.67[18]。

式（21）中的 σ_z 为垂向应力，约等于上覆岩层压力，即：

$$\sigma_z = \rho g H \tag{22}$$

式中 ρ——岩石密度，平均约 2.36×10^3kg/m^3；g——重力加速度，9.8m/s^2。

重力应力场在水平方向的派生应力叠加上构造应力不能导致平面上双向拉伸[19]。为模拟该期的应力场分布，在模型边界北东 45°施加了 150MPa 的压应力，南西 315°施加 500MPa 的压应力。

4.1.3 古应力模拟结果

模拟结果显示，乌夏前陆冲断带二叠纪末最大主应力方向为北西—南东向，风城组最大主应力在 514～604MPa 之间（见图 3），东部最大主应力值比西部大，表现出强烈的挤压特性；二叠系其他层组最大主应力大小分布特征与风城组类似。乌夏前陆冲断带二叠纪末古应力场最小主应力方向为垂向方向，应力大小的分布与现今构造形态存在对应性，构造高部位，即背斜顶部表现为低值区，而构造低部位出现高值区。风城组最小主应力在 140～168MPa 之间（见图 4），南部地区为应力高值区，在 120MPa 左右，应力值变化较大。其他层组古应力场最小主应力与此具有类似特征。

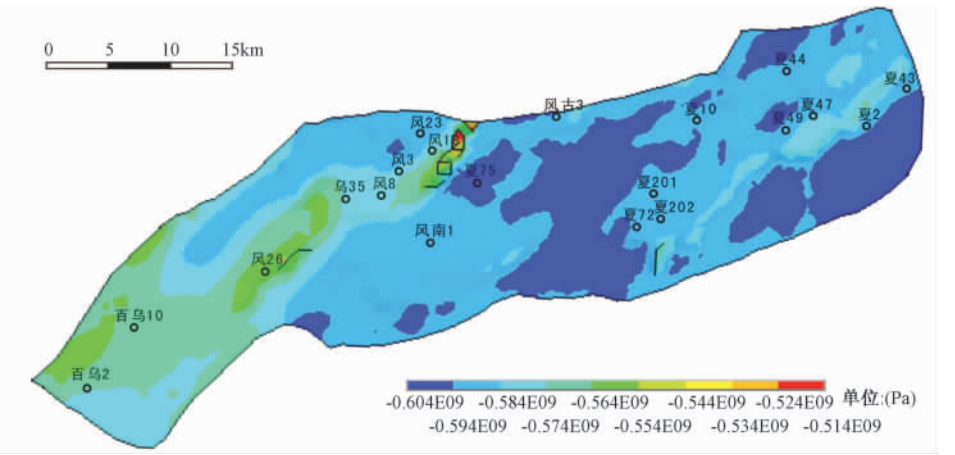

图 3 风城组古应力场最大主应力分布图（负值代表挤压）

Fig. 3 Distribution of maximum principal paleostress of Fengcheng Formation (negative representing compressing)

4.2 现今地应力场数值模拟

根据现今地应力测试结果，采取以上方法，经过反复调试，拟合出接近于现今构造应力

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

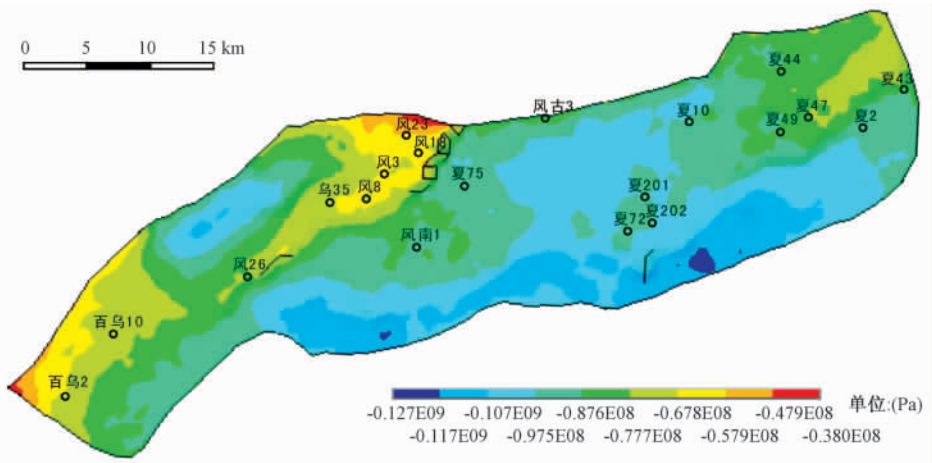

图 4　风城组古应力场最小主应力分布图（负值代表挤压）

Fig. 4　Distribution of minimum principal paleostress of the Fengcheng Formation

场分布的加载方案：垂向上加载自身重力，南北方向加载 70MPa，东西方向加载 30MPa。

最终模拟结果显示，受构造形态的控制，风城组现今应力场有明显的分带性，整体上来看南部比北部应力要高。风城组现今最大主应力方向为垂向，现今最大主应力在 70 ~ 145MPa 之间（见图 5），全区最大主应力差异较大，由于深度差异垂向上最大主应力随深度增加而减小，东部最大主应力值比西部要大，表现出强烈的挤压特性，二叠系其他层组最大主应力大小分布特征与风城组类似。风城组现今应力场最小主应力方向为东西方向，应力大小的分布与现今构造形态存在对应性，构造高部位，即背斜顶部表现为低值区，而构造低部位出现高值区。风城组现今最小主应力 22 ~ 39MPa 之间（见图 6），南部地区为应力高值区，在 35MPa 左右，应力值变化不大，其他层组古应力场最小主应力与此具有类似特征。

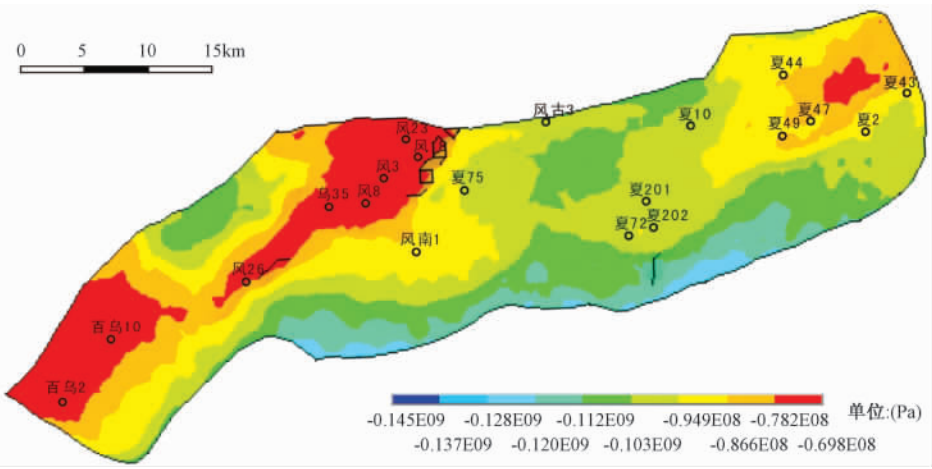

图 5　风城组现今应力场最大主应力分布图（负值代表挤压）

Fig. 5　Distribution of maximum principal current stress of the Fengcheng Formation

4.3　裂缝参数计算结果

将古、今地应力场的模拟结果代入裂缝计算模型中，计算出了乌夏前陆冲断带二叠系风城组的裂缝开度、密度、孔隙度、渗透率等参数（见图 7—图 11）。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

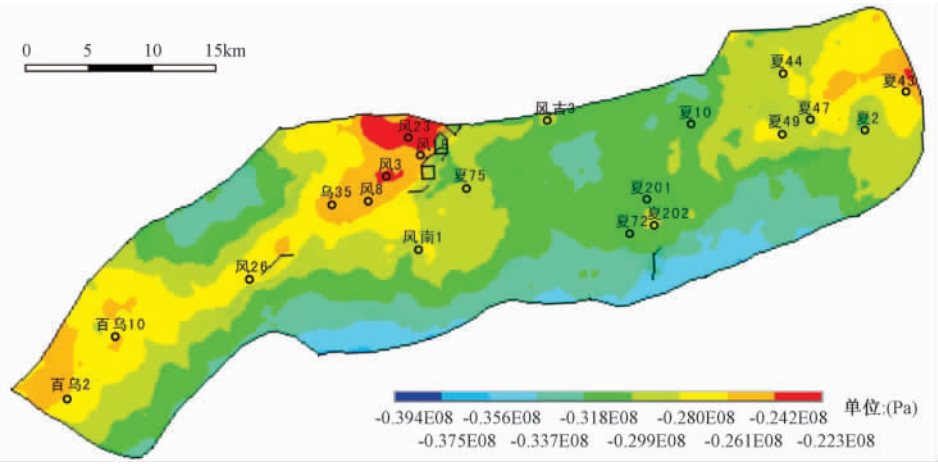

图 6 风城组现今应力场最小主应力分布图（负值代表挤压）

Fig. 6 Distribution of minimum principal current stress of the Fengcheng Formation

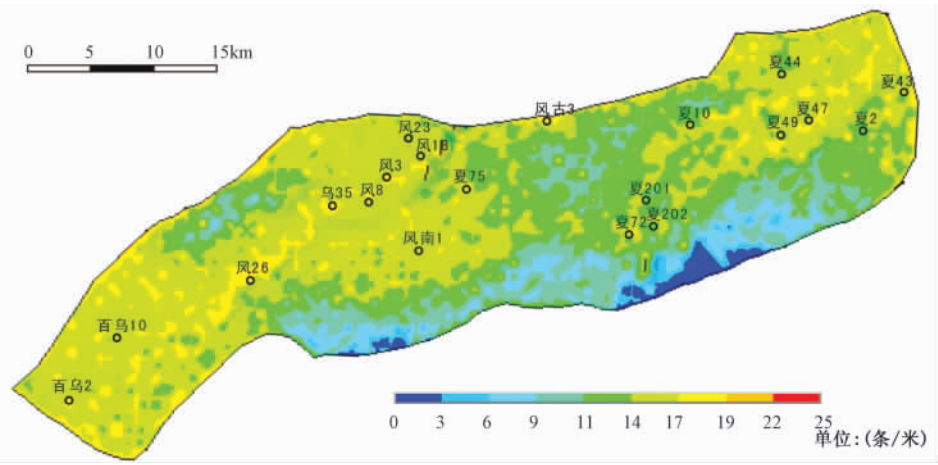

图 7 二叠系风城组现今裂缝线密度分布图

Fig. 7 Distribution of current fracture linear density of the Fengcheng Formation

从计算的结果看，风城组裂缝最为发育，分布也最为广泛，在乌夏前陆冲断带各位置均有发育。构造高点的裂缝密度较大，裂缝发育区裂缝线密度在 5 ~ 25 条/m 之间，整个研究区域裂缝线密度变化不大，均在 15 条/m 左右，裂缝低发育地区密度也在 5 条/m 以上（见图 7）。裂缝开度、孔隙度与渗透率参数分带性明显，裂缝开度为 0.04 ~ 0.4mm（见图 8、图 9），裂缝孔隙度为 0.2% ~ 0.8% 之间。风 18 井、百乌 10 井、夏 47 井附近属于裂缝孔隙度高值区，裂缝孔隙度均在 0.5% 以上，风南 1 井与夏 72 井附近次之，在 0.3% 左右。南北方向的裂缝渗透率稍大于东西向裂缝渗透率，明显大于垂向裂缝渗透率。裂缝发育区裂缝东西方向渗透率在 $30\times10^{-3}\sim200\times10^{-3}\,\mu m^2$（见图 10），南北方向渗透率与东西方向渗透率差别不大，也在 $30\times10^{-3}\sim200\times10^{-3}\,\mu m^2$ 之间，垂向方向渗透率在 $15\times10^{-3}\sim150\times10^{-3}\,\mu m^2$（见图 11），裂缝发育呈条带状分布特征明显。

总体看来，佳木河组裂缝发育程度稍小于风城组，平面分布特征基本相同，裂缝分布范围小于风城组，夏子街组裂缝发育程度明显小于佳木河组与风城组，平面上呈条带状分布，

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

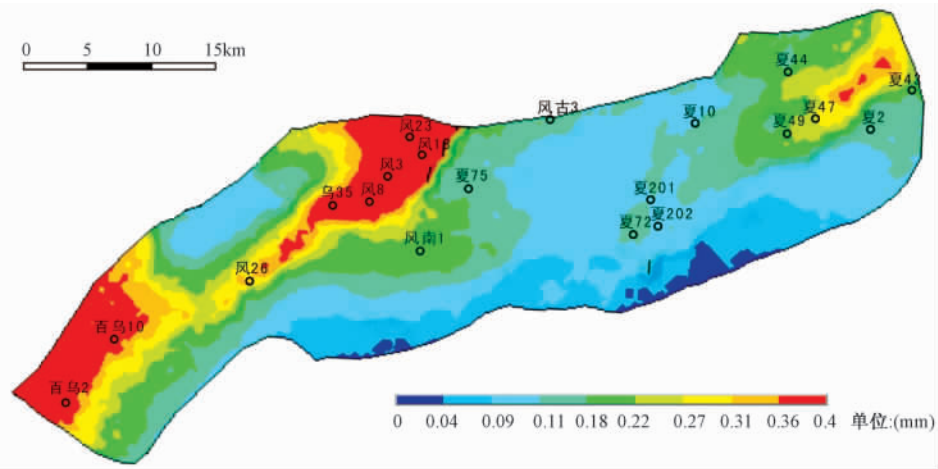

图 8　二叠系风城组现今裂缝开度分布图

Fig. 8　Distribution of current fracture aperture of the Fengcheng Formation

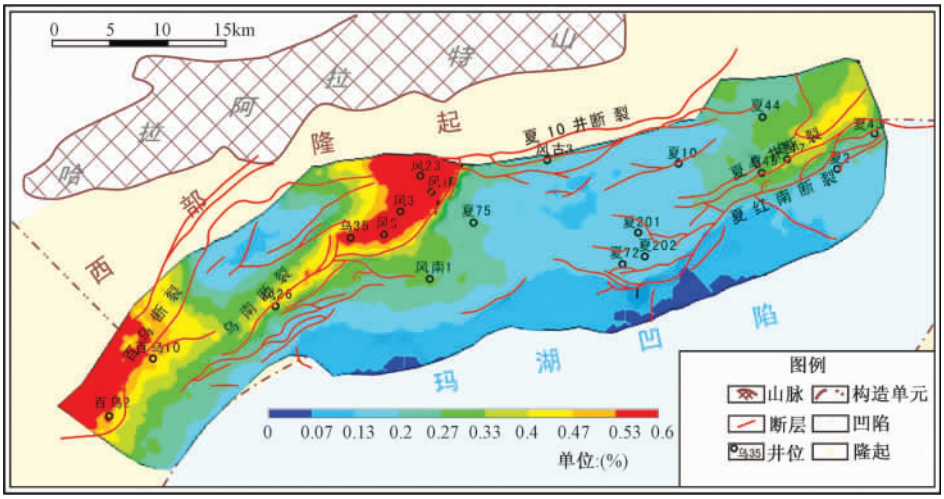

图 9　二叠系风城组组断裂与现今裂缝孔隙度分布图

Fig. 9　Distribution of porosities of current fractures and those of Fengcheng Formation

主要集中在大断层附近发育，乌尔禾组裂缝分布范围最小，但同样主要集中在大断层附近发育，也呈条带状展布，连裂缝参数值区间分布也与夏子街组十分相似，只是，乌尔禾组裂缝少量发育，发育程度明显小于佳木河组与风城组，稍小于夏子街组。

5　讨论与结论

在压缩状态下，准噶尔盆地乌夏前陆冲断带二叠系火山岩-沉积岩混杂地层破裂判据适用两段式莫尔—库仑准则。裂缝形成于古应力场背景下，若局部应力场达到破裂条件，则裂缝参数可通过应力、应变来计算。在现今应力场下，不能产生新的裂缝，裂缝体积密度和线密度保持不变，现今应力场主要影响裂缝的开度。由于裂缝开度在现今应力场作用下普遍减小，因而渗流能力和孔隙度大大降低。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

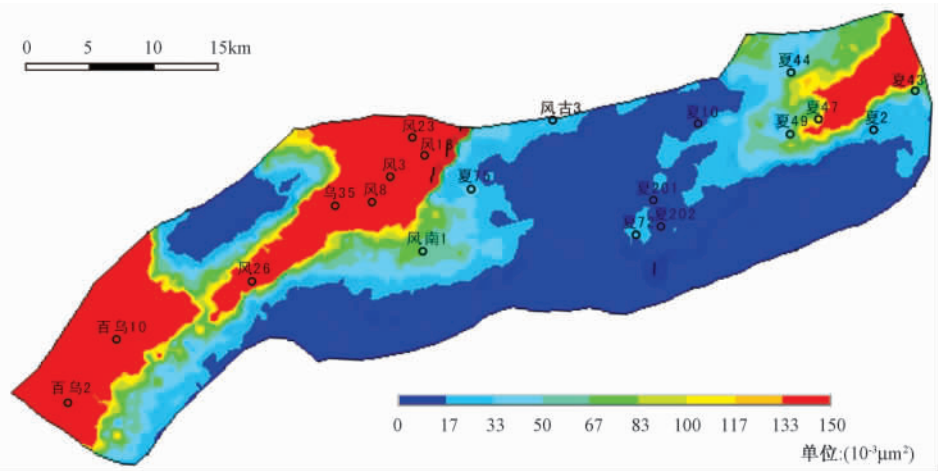

图 10 二叠系风城组组现今裂缝东西方向渗透率分图

Fig. 10 E-W distribution of current fracture permeability of Fengcheng Formation

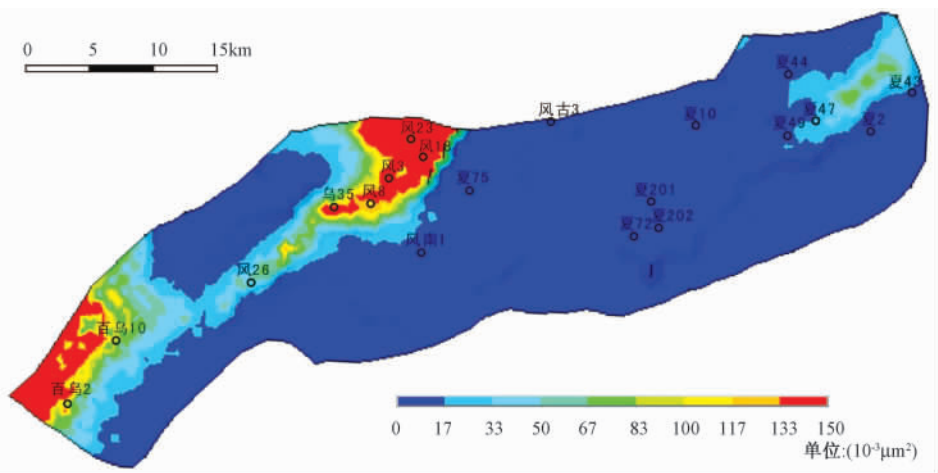

图 11 二叠系风城组现今裂缝垂向方向渗透率分布图

Fig. 11 Vertical distribution of current fracture permeability of Fengcheng Formation

计算的结果显示，乌夏前陆冲断带佳木河组、风城组裂缝整体发育，分布广泛，夏子街组、乌尔禾组裂缝局部发育，呈条带状分布。佳木河组裂缝发育区裂缝线密度在 5 ~ 20 条/m之间，裂缝孔隙度在 0.2% ~0.6% 之间；风城组裂缝发育区裂缝线密度在 5 ~25 条/m 之间，裂缝孔隙度在 0.2% ~0.8% 之间；夏子街组裂缝发育区裂缝线密度在 1 ~10 条/m 之间，裂缝孔隙度在 0.1% ~0.4% 之间；佳木河组裂缝发育区裂缝线密度在 1 ~10 条/m 之间，裂缝孔隙度在 0.05% ~0.20% 之间。

结合裂缝的成因机制及岩心观察统计结果[20]看，影响乌夏前陆冲断带二叠系裂缝形成和发育的主要因素为构造应力、岩性、层厚和粒度，其中构造应力和岩性对裂缝的产生和裂缝参数分布起决定性作用。主要表现在：岩性是控制风化裂缝发育的重要因素，火山岩风化裂缝较发育，而在砾岩、砂质砾岩等碎屑岩中少见风化裂缝，古地形影响着机械风化裂缝的分布，潮湿温暖的古气候易使岩石产生风化裂缝，地层出露地表的时间越长风化裂缝越发育；在深大断裂附近裂缝发育，距断层越远裂缝发育程度越低，但层内断层、短小断层发育

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的地方，裂缝并不发育，在背斜顶部裂缝发育程度明显较高，风城组裂缝主要集中在百乌断裂、乌南断裂与夏红南断裂附近发育，另外构造高部位的裂缝发育程度要比构造低部位高，可见，断裂对裂缝的影响比较复杂。

构造应力差异大的地区容易产生裂缝，且裂缝各项参数较大，凝灰质和泥质含量越大，粒度越细，裂缝越发育，如风南 1 井白云岩泥岩、凝灰岩较砂砾岩裂缝更为发育，风 23 井岩心裂缝集中发育在 3382.14 ~ 3384.14m 井段的凝灰岩发育区。

参 考 文 献

[1] Pollard D D. Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century [M]. Bull. Geol. Soc. Am. 100, 1988: 1811 ~ 1204.

[2] 李贺. 岩石断裂力学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988. 125 ~ 135, 177 ~ 183.
LI He. Rock fracture mechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1988. 125 ~ 135, 177 ~ 183.

[3] 郑亚东. 结构面力学性质的定量鉴定 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (3): 197 ~ 201.
ZHENG Ya-dong. Quantitative caracterization of mechanical properties of deformational zones [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (3): 197 ~ 201.

[4] Price N J. Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock [M]. Oxford: Pergamon Press, 1966. 221 ~ 240.

[5] 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, 1996, 20 (5): 17 ~ 24.
WEN Shi-peng, LI De-tong. Numerical simulation technology of reservoir fractures [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1996, 20 (5): 17 ~ 24.

[6] 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]. 特种油气藏, 1997, 4 (1): 24 ~ 28.
CAO Chun-fu, SUN Shao-chun, ZHANG Ji-chang. Quantitative fracture prediction of reservoir by finite element method [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 1997, 4 (1): 24 ~ 28.

[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] 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 Chong-lu. Numerical simulation technique for structural fractures in a reservoir: Case studies [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19 (4): 50 ~ 54.

[9] 谭成轩, 王连捷. 三维构造应力场数值模拟在含油气盆地构造裂缝分析中应用初探 [J]. 地球学报, 1999, 20 (4): 392 ~ 394.
TAN Cheng-xuan, WANG Lian-jie. An approach to the application of 3-D tectonic stress field numerical simulation in structural fissure analysis of the oil-gas-bearing basin [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20 (4): 392 ~ 394.

[10] 冯建伟, 戴俊生, 葛盛权. 准噶尔盆地乌夏断裂带构造演化及油气聚集 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2008, 32 (3): 23 ~ 27.
FENG Jian-wei, DAI Jun-sheng, GE Sheng-quan. Structural evolution and pool-forming in Wuxia fault belt of Junggar Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32 (3): 23 ~ 27.

[11] 胡传炘. 断裂力学及其工程应用 [M]. 北京: 北京工业出版社, 1989. 67 ~ 74.
HU Chuan-xin. Fracture mechanics and its engineering application [M]. Beijing: Beijing Industry Press, 1989. 67 ~ 74.

[12] 王维襄. 固体力学 [M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1984. 181 ~ 184.
WANG Wei-xiang. Solid Mechanics [M]. Wuhan: Wuhan University of Geology Press, 1984. 181 ~ 184.

[13] 王仁, 丁中一, 殷有泉. 固体力学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1979. 82 ~ 85, 124 ~ 141.
WANG Ren, DING Zhong-yi, YIN You-quan. Bases of Solid mechanics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979. 82 ~ 85, 124 ~ 141.

[14] Chen M, Bai M. Modeling stress-dependent permeability for anisotropic fractured porous rocks [J]. International Journal of

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Rock Mechanics and Mining Science, 1998, 35 (8): 1113 ~ 1119.

[15] 季宗镇，戴俊生，汪必峰，等. 构造裂缝多参数定量计算模型 [J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2010，34 (1)：24 ~ 28.
JI Zong-zhen, DAI Jun-sheng, WANG Bi-feng, et al. Multi-parameter quantitative calculation model for tectonic fracture [J]. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34 (1): 24 ~ 28.

[16] Hicks T W, Pine R J, Willis Richards J, et al. A hydro-thermo-mechanical numerical model for HDR geothermal reservoir evaluation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1996, 33 (5): 499 ~ 511.

[17] 程昌钧，王颖坚，马文华，等. 弹性力学 [M]. 北京：高等教育出版社，1999. 96 ~ 97.
CHENG Chang-jun, WANG Ying-jian, MA Wen-hua, et al. Elastic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 96 ~ 97.

[18] 张逸昆. 共轭剪切角的流变学意义 [J]. 地质力学学报，2007，13 (3)：214 ~ 216.
ZHANG Yi-kun. Rheologic implications of conjugate shear angles [J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13 (3): 214 ~ 216.

[19] 王平. 含油盆地构造力学原理 [M]. 北京：石油工业出版社，2001. 144 ~ 145.
WANG Ping. Principles of structure mechanics in oil-bearing basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. 144 ~ 145.

[20] 李明，戴俊生，冯建伟，等. 乌夏地区二叠系火山岩储集层裂缝特征 [J]. 新疆石油地质，2007，28 (4)：422 ~ 424.
LI Ming, DAI Jun-sheng, FENG Jian-wei, et al. Fracture Characteristic of Permian Volcanic Reservoir in Wu-Xia Area, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28 (4): 422 ~ 424.

RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURAL STRESS FIELD AND DEVELOPMENT OF FRACTURES IN FORELAND THRUST BELT

SONG Yong[1], FENG Jian-wei[2], DAI Jun-sheng[2], LIU Xu[1], BIAN Bao-li[1], LI Ming[3]

(1. *Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Karmy Oilfield Company, Karamy* 834000, *China*; 2. *Faculty of Geo-Resource and Information, China University of Petroleum (East China), Qingdao* 255666, *China*; 3. *Exploration and Development Research Institute, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin* 124010, *China*)

Abstract: Aiming at the difficulties in predicting the fractures in strata in thrust belt, by selecting the fracture criteria suitable for the Wuxia foreland thrust belts under study, this paper has defined a relation of mechanical parameters with the current stress field and the paleostress field during the formation of the fractures, Based on the study on the Permian reservoir fracture, we have finished a quantitative calculation for fracture aperture and other parameters and drawn a map of distribution of each formation. The results show that structural stress and lithology paly a crucial part in development of the fractures; generally the fractures with greater fractural parameters are relatively easy to form in the areas with evidently different structural stresses; and near the high part of principal faults more fractures are developed, and the strata are more tuffaceous and argillaceous, fine-grained, with more fractures developed.

Key words: Wuxia foreland thrust belt; strata of sedimentation and volcanic; fracture criteria; stress field; fracture parameters

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net