裂缝密度约束的离散裂缝网络建模方法与实现

董少群^{1,2)},曾联波^{1,2)},曹菡³⁾,XU Chaoshui⁴⁾,王圣娇^{1,2)}

1)油气资源与探测国家重点实验室,中国北京,102249;

2)中国石油大学(北京)地球科学学院,中国北京,102249;

3) 中国科学院遥感与数字地球研究所,中国北京,100094;

4)阿德莱德大学土木、环境和采矿工程学院,澳大利亚阿德莱德,5005

内容提要:如何高效地用多种类型资料(如地震、测井、岩芯等)所得到的裂缝信息对离散裂缝网络建模至关重 要。为此本文提出一种裂缝密度约束的离散裂缝网络建模方法,将多种裂缝先验信息转换为裂缝密度,通过密度约 束裂缝网络模型。方法对裂缝位置的确定方法进行改进,从编程的角度对二维和三维实现进行了分析,同时讨论了 方法的适用性及参数设定。为验证方法效果,实例分析部分选用鄂尔多斯盆地延河剖面附近的一井区数据进行裂 缝建模,并与实际生产资料进行比对,结果表明该方法所建立的裂缝模型与实际生产数据吻合。

关键词:离散裂缝网络;裂缝密度;裂缝建模;测井;参数设定

裂缝是致密储层的有效储集空间和主要渗流通 道,影响致密油气藏的井网部署与注水开发效果,裂 缝分布规律研究及三维模型建立是致密油气藏开发 的重要地质依据(Dong Shaoqun et al.,2018)。

近年来,大量基于裂缝几何形态的建模方法相 继引入,大致可以分为五类(董少群等,2018):①基 于空间剖分的裂缝建模(Dershowitz,1984; Ivanova, 1995);②离散裂缝网络建模(Baecher, 1983; Dershowitz and Einstein, 1988; Nakaya et al., 2003; 于青春等,2003;宋晓晨等,2004; Nakaya and Nakamura,2007;Xu Chaoshui and Dowd,2010;郑 松青等,2011;郎晓玲等,2013; Ivanova et al., 2014; Alghalandis,2017);③基于变差函数的裂缝 建模(Dowd et al.,2007; Koike et al.,2012,2015); ④基于多点地质统计学的裂缝建模(Dowd et al., 2007; Chugunova et al.,2017;张烈辉等,2017);⑤ 基于分形特征进行迭代的裂缝建模(Acuna and Yortsos,1995; Zhou Zhiwei et al.,2016; Fan Dian and Ettehadtavakkol,2017)。

其中离散裂缝网络(Discrete Fracture Networks, DFN)建模最为常用,该类方法包括以 Baecher 模型

(Long J et al., 1982; Baecher, 1983)为代表的离散 裂缝网络建模和 GEOFRAC 建模(Ivanova, 1995; Ivanova et al., 2014),而文献中提及的 DFN 多为以 Baecher 模型为代表的离散裂缝网络建模,它是一种 基于示性点过程的随机建模方法。点过程确定裂缝 的中心位置,示性过程确定点的属性,如裂缝形状、 倾角、倾向、开度等属性(Xu Chaoshui and Dowd, 2010)。

DFN 最早应用于岩石工程等领域,后被用于油 气储层裂缝建模。在建立油气储层 DFN 模型时,常 采用多学科、多资料协同的方式,综合利用露头、岩 芯、地震、测井、钻井、生产资料等。DFN 建模时约 束条件可以为由测井解释的裂缝密度建模得到的裂 缝密度三维地质模型(彭仕宓等,2011;即晓玲和郭 召杰,2013),也可以为由地震属性获得的裂缝密度 体数据(彭仕宓等,2011)。油气储层裂缝建模时, 如何利用好这些约束条件对建模效果十分重要,为 此本文提出一种裂缝密度约束的离散裂缝网络建模 方法,对裂缝位置的确定方法进行改进,结合实例从 编程实现的角度对二维和三维实现进行了介绍,同 时讨论了方法的适用性及参数设定。为验证方法效

注:本文为石油化工联合基金项目(编号:U1663203)与国家科技重大专项(编号:2017ZX05013004)的成果。

收稿日期:2018-01-19;改回日期:2018-05-14;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.020

作者简介:董少群,男,1988年生,博士,主要从事裂缝建模、裂缝预测及油藏描述的研究。Email:dshaoqun@163.com。通讯作者:曾联波, 男,1967年生。教授、博士生导师。主要从事裂缝形成、分布及预测,应力场分析与应用和低渗透油田开发地质方面的科研与教学工作。 Email:lbzeng@sina.com。

果,实例分析部分选用鄂尔多斯盆地(窦文超等, 2016)延河剖面附近的一井区延长组地层进行裂缝 建模,并与实际生产资料进行了比对。

1 裂缝密度约束的二维离散裂缝网络

1.1 裂缝位置

点过程中确定裂缝位置的随机过程包括泊松过 程(Chiles and de Marsily, 1993)、Cluster 过程(Xu Chaoshui and Dowd, 2010)、Cox 过程(Xu Chaoshui and Dowd, 2010)及马尔科夫过程(Mardia et al., 2007)等。其中泊松过程最为常用,所用分布函数 为均匀分布,其概率密度函数为

$$f(x,y) = 1/Ar \tag{1}$$

其中,(*x*,*y*)为裂缝中心的坐标,*x*,*y*为研究区内的连续随机变量,*Ar*为研究区面积。

实际应用中常用裂缝密度平面模型对所建立的 裂缝模型进行约束。根据测量维度和采样维度,裂 缝密度可以划分为多种,具体定义见表1(Niven, 2013),其中P10为裂缝线密度。P10可以通过裂缝 测井解释结果计算得到(图1),图中0表示无裂缝, 1表示有裂缝。通过计算可以得出P10与裂缝单井 解释的网格粗化结果成正比,比例系数为测井曲线 采样间隔h。

井位坐标为(x,y),L1 为裂缝建模目的层层厚,则 P(x,y)为井点处的裂缝密度。此时,裂缝密度约 束下的裂缝中心位置的确定步骤如下:

(1)将裂缝密度平面模型进行极差正规化,归 一化后的裂缝密度为

$$P'(x_i, y_i) = \frac{P(x_i, y_i) - \min(P)}{\max(P) - \min(P)};$$

(2)利用泊松过程生成裂缝中心位置(x,y),x,y 为独立的、且均服从均匀分布的随机数;

(3)利用井点处 P10 通过二维插值计算步骤



图 1 裂缝单并测井解释网格粗化结果与裂缝线密度 Fig. 1 The upscale of fractures interpreted by well logs and fracture density P10

(2)中生成的裂缝中心位置处对应的概率密度值
 P'(x,y),若P'(x,y)>rand,则生成的裂缝中心位置
 有效,否则无效, rand 为区间[0,1]上的随机数;

(4)当不满足终止条件时,重复步骤(2)、(3), 否则终止。

常用的终止条件有:有效裂缝数大于预设条数 N_{max},整个研究区的裂缝密度(P20或 P21)大于预 设阈值。

裂缝密度约束的二维离散裂缝建模的原理和实 现将结合以下实例进行介绍,该实例中使用的裂缝 密度平面图由理论模型产生,模型是两个二维正态 分布的叠加,两个正态分布均值均为(0.5,0.5),方 (0.0138 0.013) 分 差 矩 阵 别 0.013 0.013 0.0138 - 0.013 按照步骤(1)极差正规化 0 - 0.013 0.013 后的裂缝密度平面图如所示。随后依据步骤(2)、 (3)可随机生成的一个裂缝中心位置,(图2,红色圆 点),坐标为(0.478,0.245)。重复步骤(2)、(3)直 至满足终止条件,即可生成二维离散裂缝网络模型

表1裂缝密度、	强度、孔	,隙度参数
---------	------	-------

Table 1 Parameters of fracture density, intensity and porosity

		裂缝测量维度				
		0	1	2	3	
采	1	P10:单位长度上裂缝的条数	P11:单位长度上裂缝的长度			一维
样 维	2	P20:单位面积上裂缝的条数	P21:单位面积上裂缝的长度	P22:单位面积上裂缝的面积		二维
度	3	P30:单位体积中裂缝的条数		P32:单位体积中裂缝的面积	P33:单位体积中裂缝的体积	三维
		密度		强度	孔隙度	





中的所有裂缝的中心位置。

1.2 裂缝长度

对于裂缝长度,常用的分布函数有指数分布 (Baecher,1983; Kulatilake et al.,2003)、对数正态分 布(Zhang Lianyang and Einstein,2000; Zadhesh et al.,2014)及伽马分布(Noroozi et al.,2015)等。本 文选用较常用的指数分布,其概率密度函数、累积概 率密度函数见式(2)、(3),对应图像见图3,该分布 函数均值为 $1/\lambda$,即 λ 值越大,裂缝平均长度越小, 概率密度函数形状越陡(图3a)。

示性过程中,裂缝长度的确定通过随机过程获 得,其确定步骤如下:

(1)获取一个分位数 r,r 为区间[0,1]上的随机数,且服从均匀分布;

(2)将累计概率密度函数中纵坐标为 r 的点的 横坐标作为裂缝长度(x)。

若概率密度函数中λ=1,当分位数为0.6时,

确定的裂缝长度为 0.92(图 3b)。

$$f(x + \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x \ge 0\\ 0 & x < 0 \end{cases}$$
(2)

$$F(x \mid \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & x \ge 0\\ 0 & x < 0 \end{cases}$$
(3)

1.3 裂缝走向

描述裂缝走向常用的分布函数有均匀分布、 von-Mises 分布,本文选用最常用的 von-Mises 分布 描述裂缝走向,其概率密度分布及累计概率分布函 数见式(4)、(5)。

$$f(\varphi \mid \mu, \kappa) = \frac{\mathrm{e}^{\kappa \cos (\varphi - \mu)}}{2\pi I_0(\kappa)}$$
(4)

$$F(\varphi \mid \mu, \kappa) = \frac{\int_{0}^{\varphi} e^{\kappa \cos(t-\mu)} dt}{2\pi I_0(\kappa)}$$
(5)

其中 φ 为裂缝走向, μ 和 κ 为反映裂缝走向的参数, I_0 为修正贝塞尔函数, $i_0(\kappa) = \sum_{i=0}^{+\infty} \frac{\kappa^{2i}}{2^{2i} (i!)^2}$ 。

von-Mises 的概率密度分布函数、累计概率密度 分布函数图像见图 4。 μ 和 1/ κ 的作用近似于正态 分布中的均值和方差。 κ 越大裂缝走向 φ 的方差越 小,概率密度函数曲线形态越陡(图 4a)。

μ为曲线对称轴的位置,对应一组裂缝的主要 走向。μ = π/4,裂缝走向呈北东向(图 5a—c),μ = π/2,裂缝呈东西走向(图 5d)。1/κ反映裂缝的离 散程度,1/κ = 1对应玫瑰花图(图 5a)的离散程度要 明显高于 1/κ = 1/10对应玫瑰花图(图 5c,d)的离 散程度。



确定裂缝位置后,需要通过累计概率分布函数

图 3 指数分布(a:概率密度函数;b:累计函数)

Fig. 3 Exponential distribution(a:Probability density function; b:Cumulative probability density function)



图 4 von-Mises 分布(a:概率密度函数;b:累计概率分布函数图)

Fig. 4 von-Mises distribution (a: Probability density function; b: Cumulative probability density function)



图 5 不同 μ,κ 的裂缝走向玫瑰花图: (a)—(c) $\mu=\pi/4$, $\kappa=1,5,10$; (d) $\mu=\pi/2$, $\kappa=10$ Fig. 5 Rose diagrams of fracture orientations with different: (a)—(c) $\mu=\pi/4$, $\kappa=1,5,10$; (d) $\mu=\pi/2$, $\kappa=10$

(式(5))获得裂缝的走向,其生成步骤与 1.2 节中 确定裂缝长度的方法类似,先确定 0~1 之间的随机 分位数 r,然后通过累计概率密度函数确定裂缝走 向。累计概率密度函数的参数 $\kappa = 10$,当获得随机 分位数 r = 0.8 后,便可获得对应的走向为 1.84(图 4b)。

1.4 裂缝端点坐标

裂缝中心坐标(x,y)、裂缝长度 L、裂缝走向 φ 可确定一条线段作为二维裂缝,但编程实现时,最直 接使用的不是上述参数,而是裂缝两端点的坐标。 通过计算,可以获得 A、B 两点(图 6)坐标分别为 $A(x - L\sin\varphi/2, y - L\cos\varphi/2)$ 和

 $B(x + L\sin\varphi/2, y + L\cos\varphi/2)_{\circ}$

1.5 实例模拟

实例模拟选用图 2 中的裂缝密度平面图作为约 束,生成两组裂缝,一组为 NEE—SWW 方向,一组 为 NWW—SEE 方向。两组裂缝参数(λ,k,μ,N_{max}) 分别为(1,50,1.12,20)及(1,50,2.02,20),其中 N_{max}为1.1节步骤(4)中预设的裂缝条数。其最终 实现效果见图7。无约束模型产生的裂缝位置完全 随机(图7a),与图2中的裂缝密度无对应关系,图2 中裂缝密度高的地方反而没有裂缝。裂缝密度约束 的离散裂缝网络模型(图7b),其裂缝网络中裂缝与



图 6 二维离散裂缝网络中裂缝产生示意图(a:点过程 确定裂缝中心的位置;b:示性过程确定裂缝的属性) Fig. 6 Schematic diagram of planar discrete fracture network modeling (a:fracture center determination by point process; b:fracture properities determination by marked process)





图 2 中的裂缝密度有较好的对应关系。图中红色圆 点为裂缝中心,黑色线段代表裂缝。

2 裂缝密度约束的三维离散裂缝网络

裂缝密度约束的离散裂缝网络建模的三维实现 与其二维实现类似,但略有不同。三维裂缝形状不 再是简单的线段,而是圆形、椭圆形或多边形,且有 倾向、倾角等属性。倾向、倾角等属性常用 Fisher 分 布(Xu Chaoshui et al.,2010)描述,但实际应用中裂 缝走向和倾角相对倾向和倾角更容易获得。因此本 节对其进行简化,分别模拟走向和倾角,然后通过数 学变换将走向转换为倾向,该方法适用于高角度裂 缝网络建模。

2.1 裂缝位置

裂缝位置由泊松过程和裂缝密度模型约束共同 决定。泊松过程即从研究区内获取随机数(*x*,*y*,*z*), *x*,*y*,*z* 为彼此独立、且均服从均匀分布的连续随机变 量,概率密度函数见式(6)。随机过程确定裂缝中 心位置后,由裂缝密度模型决定该点的有效性。

$$f(x, y, z) = 1/Vol \tag{6}$$

其中 Vol 为研究区体积。

在生成三维裂缝密度模型时,需要先分层建立 三维网格模型,按照 1.1 节中的方法将测井解释的 裂缝数据在每个网格中进行粗化,可得到每个网格 中近似的 P10 值,随后通过序贯高斯随机模拟将其 进行三维扩展。定义第 *i* 个网格的中心位置为 (*x_i*, *y_i*, *z_i*),对应的 P10 为 P_i,利用已知点 (*x_i*, *y_i*, *z_i*),对应的 P10 为 P_i,利用已知点 (*x_i*, *y_i*, *z_i*, *P_i*)通过插值方法即可求出上述产生的 裂缝中心位置(*x*, *y*, *z*)处对应的 P10。最后按照下 述说明产生三维模型中裂缝的中心,具体步骤如下: (1)将裂缝密度平面图进行极差正规化,归一 化后裂缝密度为

 $P'(x_i, y_i, z_i) = \frac{P(x_i, y_i, z_i) - \min(P)}{\max(P) - \min(P)};$

(2)利用泊松过程生成裂缝中心(x,y,z),x、y、z 为独立的、且均服从均匀分布的随机数;

(3)利用(x_i , y_i , z_i , P_i)插值算法计算步骤(2) 中生成的裂缝中心位置(x, y, z)处的概率密度值 P'(x, y, z),若P'(x, y, z)>rand,则生成的裂缝中心 位置有效,否则无效, rand 为区间[0,1]上的随机 数;

(4)当不满足终止条件时,重复步骤(2)、(3),否则终止。

常用的终止条件有:有效裂缝数大于预设裂缝 条数 N_{max},整个研究区 P30 大于预设阈值,整个研究 区 P32 大于预设阈值等。

以下三维模型的介绍结合实例展开,所用的裂 缝密度体模型由理论模型产生,该模型从正态分布 中获得。通过蒙特卡洛随机模拟得到裂缝中心位 置,并将研究区 x、y、z 方向分别划分为 15、30、20 格,统计每个网格中的点数,作为对应网格的近似裂 缝密度(图 8)。所用正态分布均值为(0.5, 0.5,

	(0.014	0	0)		
0.5),协方差矩阵为	0	0.013	0	0	地
	0	0	0.001		

质模型见图 8a,密度为 0 的部分被过滤掉。其对应 的裂缝密度散点云图见图 8b,图中三维网格中心 (x_i, y_i, z_i)代替整个网格,散点的颜色和大小同时 表示对应网格中裂缝密度 P_i。通过散点云可以较 明显的看出该密度模型从中间到四周变小的近似椭



图 8 裂缝密度 P10 的三维模型(a:P10 的地质模型;b:P10 的散点云图) Fig. 8 Stereo model of fracture density P10 (a:geology model of P10;b:point cloud of P10)

球体。

2.2 裂缝形状

裂缝形状也与裂缝如何生长和停止有关,其形成过程受很多因素影响,如岩性、结晶结构、应力场、 岩石力学性质、围岩构造等。裂缝常会在岩石中由缺陷的部位进行生长,最开始为圆形或椭圆形,在层状系统中,当遇到层边界时,裂缝倾向于横向生长, 变成大致垂直于岩层的近似矩形(Gringarten, 1998)。

裂缝模型中为了便于后续分析及数值模拟,通 常将其简化为规则的、凸的几何形状,如 Baecher 模 型中的圆形。实际应用中越来越多的学者和商业软 件选择凸多边形来表征三维裂缝,因为实际裂缝形 状更接近于多边形。为了简化说明,本文对于三维 裂缝面用较为简单的凸四边形表征。其实现如所 示,在虚线矩形中随机生成四个点(0.5, r₁)、(r₂, 0.5)、(-0.5, r₃)、(r₂,-0.5),r₁、r₂、r₃、r₄为区间 [-0.5,0.5]上的随机数。储层裂缝建模时,通常裂 缝长度明显大于裂缝的高度,此时产生凸多边形的 虚线矩形将变为 x 轴方向明显大于 y 轴方向的矩 形,虚线矩形长宽的具体大小根据裂缝的长度和高 度统计结果而定。

上述过程产生的多边形只是 x,y 轴所在面上的 一个二维凸四边形,如果要变成空间中任意位置具 有任意倾角和走向的裂缝面,还需要对其进行旋转 和平移操作,旋转操作将在 2.3 节中介绍,平移操作 将在 2.4 节中介绍。

2.3 裂缝倾向、倾角

将裂缝面(图9)转换成中心在原点处具有任意 倾角和走向的裂缝面,需要两个步骤:①先将其绕轴 旋转,使得裂缝面的倾角变为(图 10b);②再将其绕 轴旋转,使得裂缝面的走向变为(图 10c)。

上述旋转过程通过式(7)中的矩阵运算获得。

 $(x_r, y_r, z_r, 1)^{T} = R_z R_x (x, y, z, 1)^{T}$ (7) 其中(x, y, z)为多边形裂缝面上的点, (x_r, y_r, z_r) 为 旋转后裂缝面上的点, R_x 为绕轴旋转的旋转矩阵, R_z 为绕 z 轴旋转的旋转矩阵。通过上述过程可以 将 2.2 节中产生的裂缝多边形的顶点进行旋转,使 其变成倾角为 θ 、方位角为 φ 。



图 9 裂缝多边形 Fig. 9 Fracture polygon



图 10 裂缝多边形旋转过程(a:原始多边形;b:绕 x 轴转后;c:绕 z 轴转后) Fig. 10 Rotation process of fracture polygon (a:original polygon; b:after the rotation around x axis; c: after the rotation around z axis)

$$R_{z} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 & 0\\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(9)

式中, θ 为裂缝倾角, $\theta \in [0, \pi/2], R_x$ 可以使裂缝 面沿右手定则绕 x 轴旋转 $\theta(\mathbb{B} 10(\mathbf{b}))$ 。 φ 为裂缝 走向, $\varphi \in [0, \pi], R_z$ 可以使裂缝面沿右手定则绕 z 轴旋转 $\pi/2 - \varphi$ 。倾向、倾角可以确定唯一的裂缝, 走向、倾角则对应两条裂缝。野外露头统计裂缝数 据时,走向要比倾向更容易获取,例如平面露头上裂 缝常呈现出来的只是一条线,不易获得倾向。当式 (8)、(9)中旋转角 $\theta \in [0, \pi/2], \varphi \in [0, \pi]$ 时,生 成的裂缝倾向只能偏东,即倾角范围为 $[0, \pi], 但$ 通过随机过程给定 θ 符号后,则可使倾角范围为 $\varphi \in [0, 2\pi]$,此处实际为通过走向和给定倾角符号 来实现倾向的一种近似方案。

三维建模时,裂缝走向所使用的分布函数上文 已介绍(参考1.3节)。裂缝倾角可使用的分布函 数有正态分布、均匀分布等。其中极值分布是一种 与裂缝倾角分布较为吻合的一种函数,其概率密度 函数及其累计概率密度函数见式(10)、(11)。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} a(x) e^{-a(x)}$$
(10)

$$F(x) = 1 - e^{-a(x)}$$
(11)

式中 $a(x) = e^{\frac{x-\mu}{\sigma}}, \mu, \sigma$ 作用与正态分布函数中的均 值和方差作用相近, μ 对应裂缝主要的倾角大小, σ 反映倾角分布的变化程度。

2.4 裂缝面顶点坐标

2.3 节介绍了如何将裂缝面原型(图 10a)通过 旋转变换成原点处具有任意倾向、倾角的裂缝面 (图 10c),此时的裂缝多边形与离散裂缝模型中的 裂缝多边形只差一个平移过程,平移过程将原点处 裂缝面移动到 2.1 节中生成的对应裂缝中心位置 处。平移可以通过式(12)中的矩阵运算完成。

 $(x',y',z',1)^{T} = \mathbf{R}_{T}(x_{r},y_{r},z_{r},1)^{T}$ (12) 式中,右上角标 T 表示矩阵转置;

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{0} \\ 0 & 1 & 0 & y_{0} \\ 0 & 0 & 1 & z_{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为平移矩阵。 (x_0, y_0, z_0) 为 2.1 节中生成的裂缝 的中心位置,(x', y', z')为平移后裂缝面上任意点 的坐标。

图 10c 中裂缝面的平移过程如图 11 所示。

2.5 实例模拟

实例选用图 8 中的裂缝密度立体模型作为约



Fig. 11 Translation process of fracture polygon

束,生成两组高角度裂缝,倾角为均匀分布,范围为 $\theta \in [1.40,1.57]$ 。一组裂缝为 SE—NW 方向,所 需参数 $H,\kappa,\mu,N_{max} = (0.15,10,0.79,30), H$ 为中 虚线正方形的边, N_{max} 为设定的裂缝条数。另一组 为 SW—NE 方向, $H,\kappa,\mu,N_{max} = (0.15,10,2.36,$ 30)。其最终实现效果如图 12 所示。图中灰色多边形为孤立裂缝,相同颜色的彩色多边形表示彼此相交的裂缝。由不同角度显示的同一无约束裂缝模型(图 12a、b),和不同角度显示的裂缝密度约束的同一裂缝模型(图 12c、d)看出:前者分布较为均匀,与图 8 中裂缝密度模型没有对应关系,图 8 中裂缝密度高的位置反而没有裂缝生成。后者与图 8 中裂缝密度模型有较好的对应关系,更符合先验认识。

3 鄂尔多斯盆地某井区实例分析

本节选用鄂尔多斯盆地(封从军等,2017)中部 某井区延长组地层对上述方法进行试验。研究区东 西约6km,南北约6.3km,目的层厚度约35~48m, 普遍发育高角度构造裂缝(赵向原等,2015),研究 区内共6口井。图13为裂缝密度极差正规化后的 模型。

研究区距延河剖面较近,裂缝建模时使用的参数主要通过该剖面露头统计获得。延河剖面中王家 川、董家河、后张家滩、谭家河附近均有长6油层组 的岩层出露。本区裂缝建模参数采用类比法,选用 露头裂缝参数估算研究区目的层的裂缝模型参数。 笔者对延河剖面中上述位置的长6油层组的出露岩 层的裂缝产状进行了统计,共获得约1200组裂缝数 据,包括走向、倾角、高度、长度等。露头显示目的层 大量发育高度角裂缝。

通过露头观察可发现长 6 地层发育多组裂缝, 主要走向为近东西向、近南北向、北北东向、北东东 向、南东东向等方向的裂缝,使用 von-Mises 函数拟 合其分布,得到式(4)中的参数 μ 分别为 1.52、



图 12 三维离散裂缝网络模型实例(a、b 同一个无约束裂缝模型,模型显示角度不同; c、d 为同一个裂缝密度约束的裂缝模型,模型显示角度不同)

Fig. 12 Examples of stereo discrete fracture network model ((a and b are the same DFN model without density control observed from different perspectives; c and d are the same DFN model with density control observed from different perspectives))





3.11、0.49、1.05、2.18,参数 κ 均取 30。裂缝倾角 使用极值分布函数拟合其分布,计算得到式(10)中 参数μ、σ 分别为 1.55 和 0.03。裂缝长度、高度均 用指数分布函数的形式进行概率密度估计,拟合所 得参数λ分别为 0.2 和 1.4。裂缝长度对应的λ为 0.2,表示裂缝长度均值为 5 m。使用上述参数对研 究区目的层进行三维裂缝建模,裂缝模型如图 14 所 示。灰色裂缝多边形表示裂缝与其他裂缝不连通, 同一种彩色的多边形表示彼此连通。从图中可以看 出模型中 W1、W2、W3、W4 井附近相比 W5、W6 井 附近而言,裂缝较为发育。

为了验证模型的有效性,将模型中井点裂缝密 度与实际生产数据进行对比分析。井点裂缝密度以 统计井轨迹附近的裂缝数量作为一种近似表征,具 体参数为井点为中心的矩形范围内的裂缝数量,矩 形边长为300 m。W1~W6 井附近的裂缝数量依次 为57、69、41、38、25 和30。每口井对应的日产液量 依次为1.14 t、1.98 t、1.32 t、0.88 t、0.13 t和0.56



Fig. 14 Stereo discrete fracture network model for specific layer in the Yanchang formation in the middle of Ordos basin

t。从两者的交会图(图 15)可以看出,裂缝模型中 井点附近的裂缝数量与该井的日产液量呈较好的正 相关关系,其相关系数约为 0.81。裂缝密度高,储 层连通性好,对应产液量高。所建裂缝模型与实际 生产数据有较好的对应关系,证明了该方法的有效 性。

4 讨论

本文系统分析了裂缝密度约束的二维和三维离 散裂缝网络建模方法及其实现,在建模过程中,主要 采用裂缝密度约束的示性点过程进行实现。本方法 在具体实现过程中可以充分利用已有裂缝信息,通 过裂缝密度控制不同尺度裂缝发育的概率。



图 15 裂缝模型中井点附近裂缝条数与生产数据交会图 Fig. 15 Crossplot of number of fracture near the wellpath in the fracture model and the production data of the corresponding well

1311

二维离散裂缝网络建模方法主要适用于薄层沉 积岩裂缝建模,该类裂缝基本都贯穿顶底,而且裂缝 为高角度裂缝,倾角近似 90°。当目的层较厚或为 多个岩石力学层(如砂泥薄互层)的组合时,此类方 法会导致过度估计裂缝网络的连通性,建模误差较 大。此时,分层建模可有所缓解,但目前如何分层是 一个难点,也是一个热点。例如裂缝地层学中基于 长度、密度和方位等多项露头可观测属性参数,对地 层单元进行划分(Laubach et al.,2009;邓西里等, 2015),岩石力学地层学(Mechanical Stratigraphy)中 通过地层抗张强度、弹性劲度、层厚和界面强度等控 制裂缝发育特征的岩石力学性质将地层划分为独立 而又连续的岩石力学单元(Ameen et al.,2009)。

基于裂缝密度约束的三维离散裂缝网络建模方法的约束条件可以根据实际资料情况变动,如可以采用裂缝密度平面分布图进行约束。利用泊松过程随机产生三个随机数x,y,z,此时不再使用 P'(x,y,z)>rand 判断裂缝位置的有效性,而是使用 P'(x,y)>rand 判断其有效性,此类方法也存在二维模型的不足,即当目的层较厚或为多个岩石力学层(如砂泥薄互层)的组合时误差较大。

DFN 模型中所涉及的裂缝走向、倾角、长度、高 度等参数可以通过野外露头观察、成像测井解释、岩 芯观察、应力场模拟、地震解释、遥感数据解释、三维 激光扫描解释、无人机测量解释等获得。实际应用 过程中,常通过河岸两侧的出露地层对裂缝高度、倾 向、倾角、长度等进行直接测量,对不便测量的露头 常采用三维激光扫描(Casini et al.,2016)、无人机获 取三维露头点云数据,通过自动或手动解释裂缝,进 而获得裂缝统计结果。裂缝倾角、长度等参数也可 以通过成像测井(Özkaya,2003)或岩芯资料获得。

裂缝的属性参数(走向、倾向、倾角、长度、高度 等)本文只介绍了单一分布函数,也有学者使用多 种属性联合的分布函数,如 Fisher(式(13))为裂缝 方位与倾角的联合密度函数(Wettstein et al., 2012)。联合分布与单一分布各有优缺点,联合分 布函数可更多地反映裂缝自身的相关性,但并不是 每个地区数据都符合该类模型,而且在统计实际数 据时,单一分布函数更易获取数据,模型实用性更 强。

$$f(\theta, \varphi) = \frac{\kappa}{4\pi \sin(h\kappa)} \sin\theta \cdot \exp\{\kappa [\cos\theta_0 \cos\theta + \sin\theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0)]\}$$
(13)

式中: θ_0 、 φ_0 为裂缝优势产状对应的参数, θ 及 θ_0 为裂缝面法线与铅垂线的夹角, φ 与 φ_0 裂缝面法线在 平面投影与北方的夹角, κ 描述裂缝产状的发散程 度。

值得注意的是,露头获得的裂缝走向、倾角信息 存在采样不充分、不均匀、测量不准等种种问题。因 此使用统计结果时,必须结合多方面信息综合分析。 要将其结果应用于离散裂缝网络建模必须要进行校 正,目前很多学者也针对这类问题进行了研究 (Huang Lei et al.,2016)。

5 结论

本文在离散裂缝网络建模的基础上,提出了改进的裂缝密度约束的离散三维裂缝网络建模方法, 在确定裂缝位置时考虑了由测井数据识别的裂缝密 度信息。裂缝建模步骤为:①使用泊松过程产生裂 缝原始位置,并用裂缝密度对其有效性进行判断;② 利用指数分布、指数正态分布等分布产生裂缝长度、 高度;③通过 von-Mises 分布等分布确定裂缝走向, 并通过数学将其转换为倾向;④由二值对数正态分 布等分布确定裂缝倾角。文章从编程实现的角度对 该方法原理及其上述建模步骤的实现结合二维和三 维实例进行了详细分析,并对该模型的适用性及模 型中参数的设定进行了讨论。通过鄂尔多斯盆地中 部某井区延长组长 6 地层的实际应用,显示该方法 建立的裂缝三维模型与实际生产资料吻合。

致谢:野外露头数据统计过程中得到了徐翔、吕 文雅、陆诗磊、梁丰等的帮助,审稿专家和编辑对本 文提出了宝贵意见和建议,在此深表谢意!

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 邓西里,李佳鸿,刘丽,任康绪. 2015. 裂缝性储集层表征及建模方 法研究进展. 高校地质学报, 21(2): 306~319.
- 董少群,曾联波, Xu Chaoshui, 曹菡, 王圣娇, 吕文雅. 2018. 储层裂 缝随机建模方法研究进展. 石油地球物理勘探, 53(3): 625~641.
- 窦文超,刘洛夫,吴康军,徐正建.2016.基于压汞实验研究低渗储 层孔隙结构及其对渗透率的影响——以鄂尔多斯盆地西南部三 叠系延长组长7储层为例.地质论评,62(2):502~511.
- 封从军,张敏,李达明,赵兴辉. 2017. 鄂尔多斯盆地西南地区延长组 长7段致密砂岩储层岩性测井识别.地质论评,63(增刊):79~ 80.

郎晓玲, 郭召杰. 2013. 基于 DFN 离散裂缝网络模型的裂缝性储层 建模方法. 北京大学学报(自然科学版), 49(6): 964~972.

彭仕宓,索重辉,王晓杰,郎晓玲.2011. 整合多尺度信息的裂缝性

储层建模方法探讨.西安石油大学学报(自然科学版),26(4): 1~8.

- 宋晓晨,徐卫亚.2004.裂隙岩体渗流模拟的三维离散裂隙网络数值 模型(I):裂隙网络的随机生成.岩石力学与工程学报,23 (12):2015~2020.
- 于青春,大西有三.2003. 岩体三维不连续裂隙网络及其逆建模方法.地球科学,28(5):522~526.
- 张烈辉, 贾鸣, 张芮菡, 郭晶晶. 2017. 裂缝性油藏离散裂缝网络模型与数值模拟. 西南石油大学学报(自然科学版), 39(3): 121~127.
- 赵向原,曾联波,刘忠群,吕文雅,周思宾,刘国平,杜萧笙,李剑. 2015. 致密砂岩储层中钙质夹层特征及与天然裂缝分布的关系. 地质论评,61(1):163~171.
- 郑松青,张宏方,刘中春,牟雷.2011.裂缝性油藏离散裂缝网络模型.大庆石油学院学报,35(6):49~54.
- Acuna J A, Yortsos Y C. 1995. Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient. Water Resources Research, 31(3): 527~540.
- Alghalandis Y F. 2017. ADFNE: Open source software for discrete fracture network engineering, two and three dimensional applications. Computers & Geosciences, 102: 1~11.
- Ameen M S, Smart B G D, Somerville J M C, Hammilton S, Naji N A. 2009. Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (a case study: ArabD reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia). Marine and Petroleum Geology, 26(4): 430~444.
- Baecher G B. 1983. Statistical analysis of rock mass fracturing. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 15(2): 329 ~348.
- Casini G, Hunt D W, Monsen E, Bounaim A. 2016. Fracture characterization and modeling from virtual outcrops. AAPG Bulletin, 100(1): 41~61.
- Chiles J P, de Marsily G. 1993. Stochastic Models of Fracture Systems and Their Use in Flow and Transport Modeling. Oxford: Academic Press; 169~236.
- Chugunova T, Corpel V, Gomez J P. 2017. Explicit fracture network modelling: from multiple point statistics to dynamic simulation. Mathematical Geosciences, 49(4): 541~553.
- Deng Xili, Li Jiahong, Liu Li, Ren Kangxu. 2015&. Advances in the study of fractured reservoir characterization and modeling. Geological Journal of China Universities, 21(2): 306~319.
- Dershowitz W S. 1984. Rock joint systems. Massachusetts Institute of Technology, Doctoral dissertation.
- Dershowitz W S, Einstein H H. 1988. Characterizing rock joint geometry with joint system models. Rock Mechanics and Rock Engineering, 21(1): 21~51.
- Dong Shaoqun, Zeng Lianbo, Dowd P, Xu Chaoshui, Cao Han. 2018. A fast method for fracture intersection detection in discrete fracture networks. Computers and Geotechnics, 98: 205~216.
- Dong Shaoqun, Zeng Lianbo, Xu Chaoshui, Cao Han, Wang Shengjiao, Lyu Wenya. 2018&. Some progress in reservoir fracture stochastic modeling research. Oil Geophysical Prospecting, 53(3): 625~641.
- Dou Wenchao, Liu Luofu, Wu Kangjun, Xu Zhengjian. 2016&. Pore structure characteristics and its effect on permeability by mercury injection measurement: An example from Triassic Chang 7 reservoir, southwest Ordos Basin. Geological Review, 62(2): 502~511.
- Dowd P A, Xu Chaoshui, Mardia K V, Fowell R J. 2007. A comparison of methods for the stochastic simulation of rock fractures. Mathematical Geology, 39(7): 697~714.

- Fan Dian, Ettehadtavakkol A. 2017. Semi-analytical modeling of shale gas flow through fractal induced fracture networks with microseismic data. Fuel, 193: 444~459.
- Feng Congjun, Zhang Min, Li Daming, Zhao Xinghui. 2017#. Lithology identification of tight sandstone reservoir: Chang 7 member of Upper Triassic Yanchang Formation, southwestern Ordos Basin, China. Geological Review. (b04): 79~80.
- Gringarten E. 1998. Geometric modeling of fracture networks. Doctoral dissertation, Stanford University.
- Huang Lei, Tang Huiming, Tan Qinwen, Wang Dingjian, Wang Liangqing, Ez Eldin M A M, Li Changdong, Wu Qiong. 2016. A novel method for correcting scanline-observational bias of discontinuity orientation. Scientific reports, 6.
- Ivanova V M. 1995. Three-dimensional stochastic modeling of rock fracture systems. Master dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Ivanova V M, Sousa R, Murrihy B, Einstein H H. 2014. Mathematical algorithm development and parametric studies with the GEOFRAC three-dimensional stochastic model of natural rock fracture systems. Computers & Geosciences, 67: 100~109.
- Koike K, Liu Chunxue, Sanga T. 2012. Incorporation of fracture directions into 3D geostatistical methods for a rock fracture system. Environmental Earth Sciences, 66(5): 1403~1414.
- Koike K, Kubo T, Liu Chunxue, Masoud A, Amano K, Kurihara A, Matsuoka T, Lanyon B. 2015. 3D geostatistical modeling of fracture system in a granitic massif to characterize hydraulic properties and fracture distribution. Tectonophysics, 660: 1~16.
- Kulatilake P H, Um J, Wang M, Escandon R F, Narvaiz J. 2003. Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA. Engineering Geology, 70(1): 131~155.
- Lang Xiaoling, Guo Zhaojie. 2013&. Fractured reservoir modeling method based on discrete fracture network model. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 49(6): 964~972.
- Laubach S E, Olson J E, Gross M R. 2009. Mechanical and fracture stratigraphy. AAPG Bulletin, 93(11): 1413~1426.
- Long J, Remer J S, Wilson C R, Witherspoon P A. 1982. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. Water Resources Research, 18(3): 645~658.
- Mardia K V, Nyirongo V B, Walder A N, Xu Chaoshui, Dowd P A, Fowell R J, Kent J T. 2007. Markov Chain Monte Carlo implementation of rock fracture modelling. Mathematical Geology, 39 (4): 355~381.
- Nakaya S, Yoshida T, Shioiri N. 2003. Percolation conditions in binary fractal fracture networks: Applications to rock fractures and active and seismogenic faults. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B7).
- Nakaya S, Nakamura K. 2007. Percolation conditions in fractured hard rocks: A numerical approach using the three-dimensional binary fractal fracture network (3D-BFFN) model. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B12).
- Niven E B. 2013.Geostatistics for Naturally Fractured Reservoirs. Doctoral dissertation, University of Alberta.
- Noroozi M, Kakaie R, Jalali S E. 2015. 3D Geometrical—stochastical modeling of rock mass joint networks: case study of the right bank of Rudbar Lorestan Dam plant. Journal of Geology and Mining Research, 7(1): 1~10.
- Peng Shimi, Suo Chonghui, Wang Xiaojie, Lang Xiaoling. 2011&. A modeling method for fractured reservoirs using multi-scale

information. Journal of Xi' an Shiyou University (Natural Science Edition), 26(4): 1~8.

- Song Xiaochen, Xu Weidong. 2004&. Numerical model of threedimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks (I): Generation of fracture network. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(12): 2015~2020.
- Wettstein S J, Wittel F K, Araújo N A, Lanyon B, Herrmann H J. 2012. From invasion percolation to flow in rock fracture networks. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 391(1): 264~277.
- Xu Chaoshui, Dowd P. 2010. A new computer code for discrete fracture network modelling. Computers & Geosciences, 36(3): 292~301.
- Yu Qingchun, Ohnishi Y. 2003&. Three-Dimensional Discrete Fracture Network Model and Its Inverse Method. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 28(5): 522~526.
- Zadhesh J, Jalali S E, Ramezanzadeh A. 2014. Estimation of joint trace length probability distribution function in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks. Arabian Journal of Geosciences, 7(6): 2353 ~ 2361.
- Zhang Lianyang, Einstein H H. 2000. Estimating the intensity of rock discontinuities. International Journal of Rock Mechanics and Mining

Sciences, 37(5): 819~837.

- Zhang Liehui, Jia Ming, Zhang Ruihan, Guo Jingjing. 2017&. Discrete fracture network modeling and numerical simulation of fractured reservoirs. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 39(3): 121~127.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Liu Zhongqun, Lyu Wenya, Zhou Sibin, Liu Guoping, Du Xiaosheng, Li Jian. 2015&. Characteristics of calcareous interbeds and their impact on distribution of natural fractures in tight sandstone reservoirs. Geological Review, 61(1): 163~171.
- Zheng Songqing, Zhang Hongfang, Liu Zhongchun, Mu Lei. 2011&. Discrete fracture network model for fractured reservoirs. Journal of Daqing petroleum institute, 35(6): 49~54.
- Zhou Zhiwei, Su Yuliang, Wang Wendong, Yan Yi. 2016. Integration of microseismic and well production data for fracture network calibration with an L-system and rate transient analysis. Journal of Unconventional Oil & Gas Resources, 15: 113~121.
- Özkaya S I. 2003. Fracture length estimation from borehole image logs. Mathematical Geology, 35(6): 737~753.

Principle and Implementation of Discrete Fracture Network Modeling Controlled by Fracture Density

DONG Shaoqun^{1,2)}, ZENG Lianbo^{1,2)}, CAO Han³⁾, XU Chaoshui⁴⁾, WANG Shengjiao^{1,2)}

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China;
 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China;

3) Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100094, China;

4) School of Civil, Environmental and Mining Engineering, University of Adelaide, Adelaide, 5005, Australia

Objectives: Distribution of fracture is crucial for the development of tight reservoir. Discrete fracture network modeling is the commonest method for fracture modeling. During the oil and gas reservoir exploration and development, many types of data (such as seismic, logging and core) can be obtained to calculate the fracture density as the constraint condition of discrete fracture network modeling. How to make good use of these constraints is important for making an effective fracture model. So a method of discrete fracture network fracture constrained by fracture density is introduced.

Methods: Based on discrete fracture network modeling using marked point process, the proposed method tries to improve the fracture position determination algorithm. The implementation is revising the pointing process controlled by fracture density. The fracture density constraint in this paper is obtained by sequential Gaussian simulation using logging data and the stress field numerical model. This paper introduces the implementation of the method in 2D and 3D from the respect of programming implementation. In the meanwhile, the applicability of the method and parameters setting of the method are discussed, too.

Results: In order to verify the efficiency of the method, the case study chooses a practical well block near Yanhe profile to implement fracture modeling. The results show that the fracture model is in good agreement with the actual production data.

Conclusions: From the result that the fracture model built by the proposed method agreed with the actual production data, the conclusion is drawn that the proposed method is suitable for fracture modeling in the tight reservoir.

Keywords: discrete fracture network, fracture density, fracture modeling, well log, parameter determination

Acknowledgements: This study is supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) and China Petroleum& Chemical Corporation (Sinopec) (No. U1663203), and Major State Basic Research Development Program of China (No. 2017ZX05013004). We appreciate the help from XU Xiang, LÜ Wenya, LU Shilei and LIANG Feng for outcrop data measurement. We thank the reviewers and editors of this article for their valuable suggestions

First author: DONG Shaoqun, male, born in 1988. Phd candidate. Mainly engaged in the research about fracture modeling, fracture prediction and reservoir characterization. Email:dshaoqun@163.com

Corresponding author: ZENG Lianbo, Male, born in 1967. Professor and doctoral tutor. Mainly engaged in the research and teaching about formation, distribution and prediction of fracture, stress field analysis and application, and development geology in low permeability oilfield. Email:lbzeng@sina.com

Manuscript received on: 2018-01-09; Accepted on: 2018-05-14; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi:10.16509/j.georeview.2018.05.020

GEOLOGICAL REVIEW

Vol. 64 No. 5 2018

CONTENTS

Scholarly Discussion

Crustal Density Imaging of Yangtze Craton and Formation of the Yanshanian Granitites in South China
Discovery of Vitric Dunite (Meimechite) in Southern Beishan Mountain, and Its Petrological and Geochemical Characteristics
The North-South Differentiation on the Marine Feature in the Southwest Tarim Basin during Middle-Late of the Late Cretaceous
GUO Xianpu, DING Xiaozhong, ZHAO Ziran, LI Jianfeng(1086
Detrital Zircon U-Pb Age, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Meta-sandstones form Boyang-Yuanlong
Area in The LI Yifei, LUO Jinhai, XU Huan, YOU Jia, CHEN Guanxu(1102
Discussion on the Original Sedimentary Relationship between Suganhu Area and Northern Qaidam Basin during Jurassic Period
Discussion for Classification-designation System of Mixed Siliciclastic -Carbonate Sediments and the Implication for Their
Reservoir Prediction-A Case Study of Mixed Sediments from Bohai Sea Area
YE Maosong, XIE Xinong, XU Changgui, DU Xiaofeng, SONG Zhangqiang, DU Xuebin(1130
Seismic Survey Result of Ninghe Area and Charactertistics of Tongcheng Fault in Shallow Lateral Structure
YIN Haiquan, HE Qinglong, WANG Shengwen, XU Yujian, CHANG Ming(1140
Diagenetic and Metamorphic Characteristics of the Laoshan Gneissic Monzogranite in the Bengbu Uplift and Its Tectonic
Implications
Geochemical Characteristics and Its Tectonic Significance of Neoarchean Metamorphic Intrusions in Urad Zhongqi Area, Inner
MongoliaGAO Junfeng, GU Yanchun(1179
Study on Influencing Factors of Soil Salinity in South Coast of Laizhou Bay, Shandong, Based on Geographically Weighted
Regression Model
Application of Thermal Inferred Hyperspectral Remote Sensing in Ore Exploration
LIU Dechang, QIU Junting, YAN Bokun, TIAN Feng(1199
Characteristics and Genetic Model of the Basin Type Geothermal Water Recourses in Basalt Area of Changbai Mountain
······ YAN Baizhong,XIAO Changlai,LIANG Xiujuan,JIANG Haiyang(1215
¹⁰ Be Exposure Ages of the Boulder in Lanmaqiang (Wall for Blocking Horses) , Fota Valley, Mengshan National Geopark
ZHANG Zhigang, MEI Jing, ZHANG Mengyuan, WANG Lizhi (1224