

# 哥伦比亚 Ombu 区 Kc 组裂缝描述和地质建模

王伟

(中国石化 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

**摘要:** 裂缝对改善低渗透碎屑岩储层物性有非常重要的作用, 裂缝发育规律和控制因素的研究直接影响着开发方案部署和油藏开发效果。在盆地分析和储层研究基础上, 利用层序地层和地质统计学方法, 分析了 Kc 组裂缝与区域构造应力、沉积相和岩性的关系。受区域压扭作用影响, 区域上发育东北和北西方向两组影响裂缝的地应力, 形成了以东北方向为主的高角度裂缝。不同沉积相带和不同岩性储层裂缝发育也有差异, 扇中和扇缘亚相裂缝较扇根亚相发育、砂岩较砾岩裂缝发育。在这种地质认识基础上, 建立了裂缝三维地质模型。

**关键词:** 裂缝; 前陆盆地; 近岸水下扇; 非均质性

中图分类号: TE121.2      文献标志码: A      文章编号: 1000-8527(2012)01-0139-06

## Fracture Description and Geological Modeling of Kc Formation in Ombu District, Columbia

WANG Wei

(Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

**Abstract:** Fractures play a very important role in the improvement of low-permeability clastic reservoir properties. A research of the fracture patterns and controlling factors has a direct effect on the planning of the development program and reservoir development. On the basis of basin analysis and reservoir studies, both the relationship between fracture of the Kc Formation and regional tectonic stress cracks, and the relationship between sedimentary facies and lithology are studied through sequence stratigraphy and geological statistical analysis. The research findings reveal that there are NE and NW direction stresses that influence fracture in the work area, which form high-angle fractures of NE direction. Different facies and lithology also affect fracture development. Fractures in middle fan and fringe fan facies are more developed than those in root fan, and fractures in sandstone are more developed than those in conglomerate. On the basis of geological understanding, fracture network model is established.

**Key words:** fracture; foreland basin; subaqueous fan; heterogeneity

### 1 地质概况

Ombu 区位于 Yari 次盆地西北部(属 Putumayo 盆地的一部分), 地处哥伦比亚西南部, 面积 299 km<sup>2</sup>。Yari 次盆地西部和北部为科迪勒拉山系(图 1), 东北部与 Llanos-Barinas 盆地相邻, 东部为 Macarena-Chiribiquete 隆起, 南界以 Caqueta 低隆

起同 Putumayo 主体盆地分隔开。该盆地是古生代克拉通边缘基础上发展和形成的次安第斯山前陆盆地之一<sup>[1-3]</sup>, 经历了克拉通边缘盆地—裂谷盆地—前陆盆地 3 个演化阶段。

研究区位于 Yari 次盆地西部的前缘深拗陷, 沿东部的边界断层形成背斜圈闭, 是区内主要的油气富集区。区内自上而下钻遇的地层为古近系

收稿日期: 2011-09-10; 改回日期: 2011-10-12; 责任编辑: 孙义梅。  
作者简介: 王伟, 男, 硕士, 工程师, 1981 年出生, 石油地质学专业, 主要从事地质研究和油气藏勘探开发工作。  
Email: kinvey@163.com。

Arryan(*Ea*)、Mirador 组(*Em*)碎屑岩,白垩系 Conglomerate 组(*Kc*)碎屑岩(图 2),下伏地层和基底。从区域地质资料看<sup>[1-3]</sup>,盆地烃源岩为上

白垩统浅海相页岩和碳酸盐岩,油气在早古近纪开始生成,白垩系顶部 *Kc* 组碎屑岩为区内主要储层。*Kc* 沉积时期本区发育多期冲积扇和近岸水下扇,平面和纵向上的相变非常快,储层非均质性较强。*Kc* 沉积后区域地层抬升遭受剥蚀,地层埋藏史复杂,也增加了储层的非均质性研究的难度。

2 储层物性

根据岩心和录井资料分析,*Kc* 组岩性以灰白-灰绿色砂砾岩(图 3)为主,岩性致密,均呈块状,岩石组分差异大、颗粒大小不均,分选和磨圆均较差。局部发育砂岩层,为灰绿色含砾中-细砂岩,分选较好,见斜层理和递变纹层。该段发育的砂岩为长石岩屑砂岩,岩心也较为致密,镜下见强烈的压实和胶结作用(灰质和硅质胶结)。整套地层厚度平均 38 m 左右,岩心测试表明(图 4),*Kc* 储层孔隙度多在 15% 以下,渗透率多小于  $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属低孔低渗储层,然而 5 口井的 DST

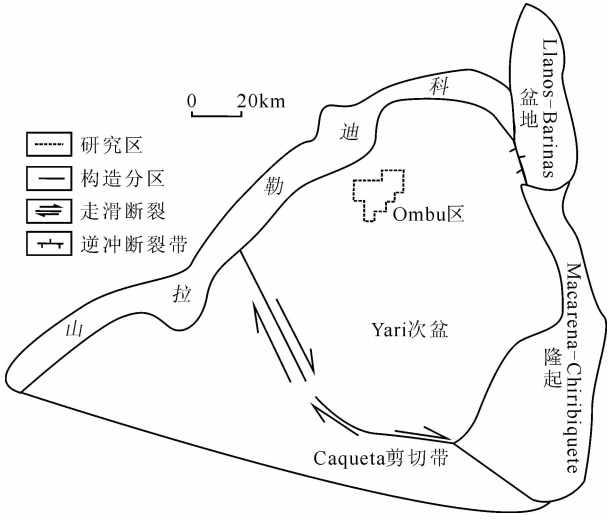


图 1 研究区构造位置图

Fig. 1 Structure location of the study area

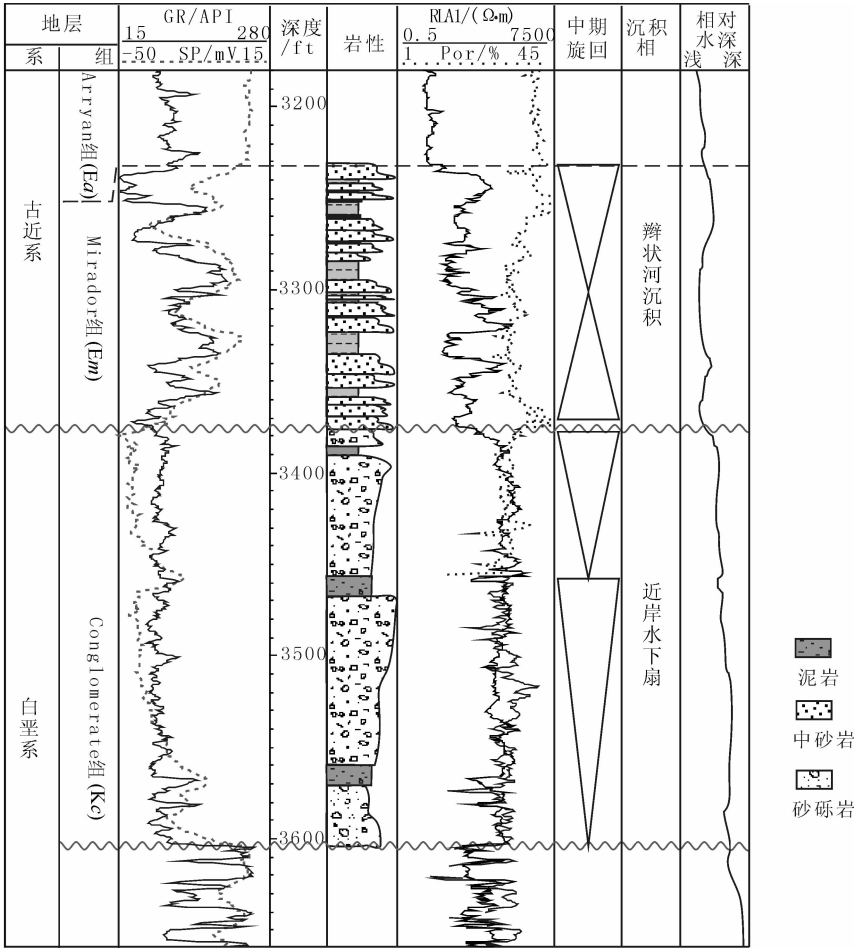


图 2 A1 井单井综合分析图

Fig. 2 Comprehensive analysis chart of well A1



图 3 B2 井中 Kc 层砂砾岩  
Fig. 3 Conglomerate of Kc in well B2

测试结果显示储层渗透性相当好，测试渗透率一般在  $4\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  左右，最大可达  $8\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，这显示裂缝极大地改善了储层物性。

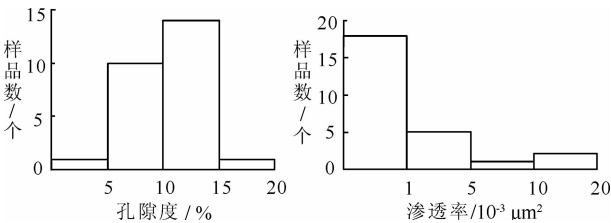


图 4 岩心物性分析直方图  
Fig. 4 Histogram analysis of core properties

### 3 裂缝发育规律和影响因素

从成因上看，裂缝有开启缝、半开启缝和充填缝 3 种<sup>[4-6]</sup>。利用岩心和 FMI 资料对本区发育的裂缝进行观察统计，区内主要发育开启缝和半开启裂缝，仅见几条全充填缝。裂缝长度可达 10 ~ 30 cm，宽度一般在 3 mm 左右，充填物多为方解石，部分裂缝有油浸现象。

依据裂缝发育的规模和长度可以分为 3 类：(1)微裂缝，一般小于 0.1 m，仅能在岩心上观察到，一般不影响储层渗流能力；(2)中等裂缝，0.5 ~ 3 m，是常见且较发育的裂缝，但其发育程度受岩性、地层厚度等条件的影响，可以通过 FMI 资料观察到；(3)大裂缝，可长达数十米，一般可从露头观察到，是优良的渗流通道。由于大裂缝的描述相当困难，而且通过岩性和 FMI 能获取的储层有效裂缝数据主要为中等裂缝，因此，将其作为研究和建模的主要对象。

#### 3.1 区域断裂作用

构造应力场是岩石产生形变和裂缝的根本原因<sup>[4-8]</sup>，结合 FMI 资料，统计、制作了区内主要钻井的局部主应力方向和裂缝发育玫瑰花图。结果表明，天然裂缝发育方向受局部主应力方向的

控制，临近断层的井(E8, C5, 距断层 100 m 内)局部主应力方向和裂缝方向同断层走向垂直；距断层较远的井(A1, B2, 距断层 100 m 范围外)局部应力方向和裂缝方向同临近断层走向平行(图 5)，这表明断裂系统的发育影响着裂缝的分布和发育特征。

从成因机理上来说，本区临近造山带一侧，受区域挤压应力作用。断层附近的岩层受到来自两侧岩体的共同挤压，垂直于断层走向的断面受力最大，容易产生裂缝。而在离断层有一定距离的位置处，岩体受到来自两侧断层的挤压作用，局部受力最大的部位是两侧断层的中间位置，形成平行于两侧断层走向的裂缝。

#### 3.2 岩性

##### 3.2.1 岩性分布规律

Kc 沉积时期区域上发育多期近岸水下扇体，强烈的构造运动使得扇体呈现多物源的沉积特点，岩性变化强烈，储层非均质性较强。从钻井资料看，不同井钻遇的沉积部位不同岩性差异也较大。扇根部位的井砾石含量高、颗粒粗，扇中和扇缘部位的井砂岩含量高、颗粒相对较细。不同期次的砂砾岩体在纵向上相互叠置，平面上也呈现出复杂的变化特征。

为了落实沉积相展布特征和岩性变化规律，依据测井上的旋回特征将 Kc 组分为上、下两期(Kc<sub>1</sub> 和 Kc<sub>2</sub>)：Kc<sub>2</sub> 呈现水进的层序特征<sup>[5]</sup>；Kc<sub>1</sub> 则呈现水退的层序特征(图 6)。从剖面上看，扇根范围较大，扇中和扇缘发育范围较小，符合该时期近岸、陡坡的构造背景，也同岩心、录井资料吻合，即该套地层以较粗的砂砾岩沉积为主，局部发育砂泥岩。

##### 3.2.2 裂缝和岩性的关系

应用 FMI 和岩心资料识别、统计了区内钻井的裂缝分布，统计表明，位于扇根的井以砂砾岩

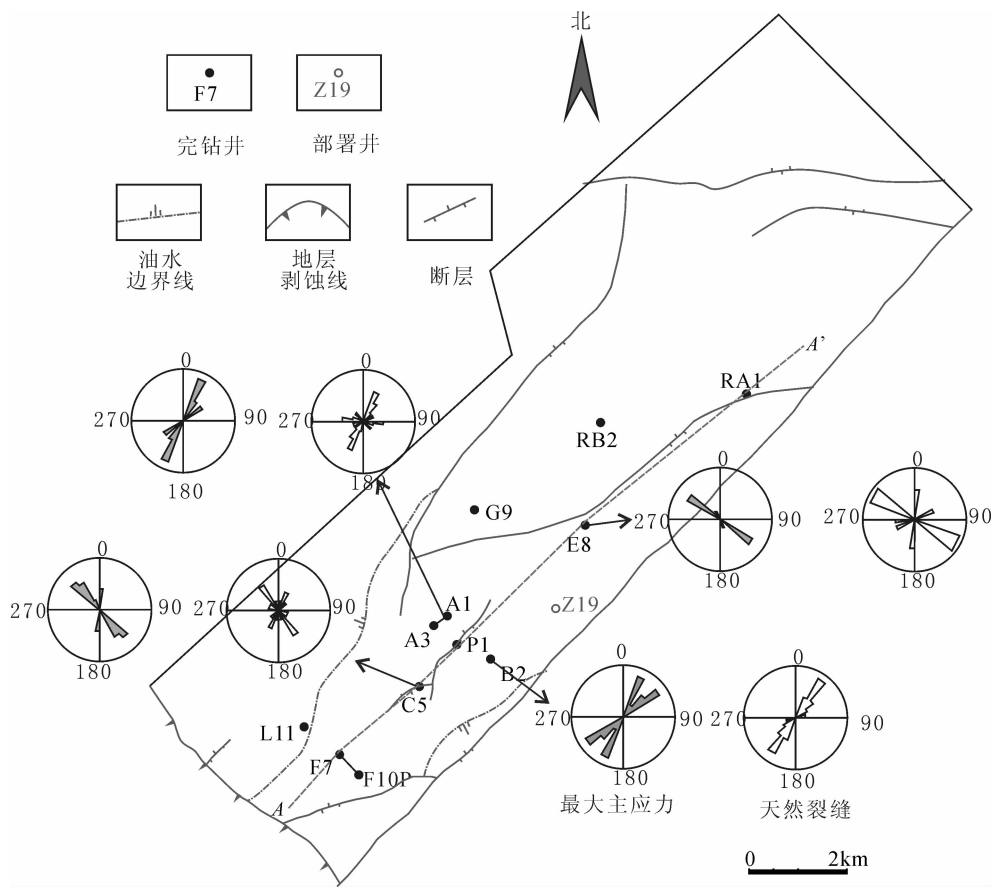


图 5 局部主应力和天然裂缝发育规律

Fig. 5 Local principle stress and natural fracture development

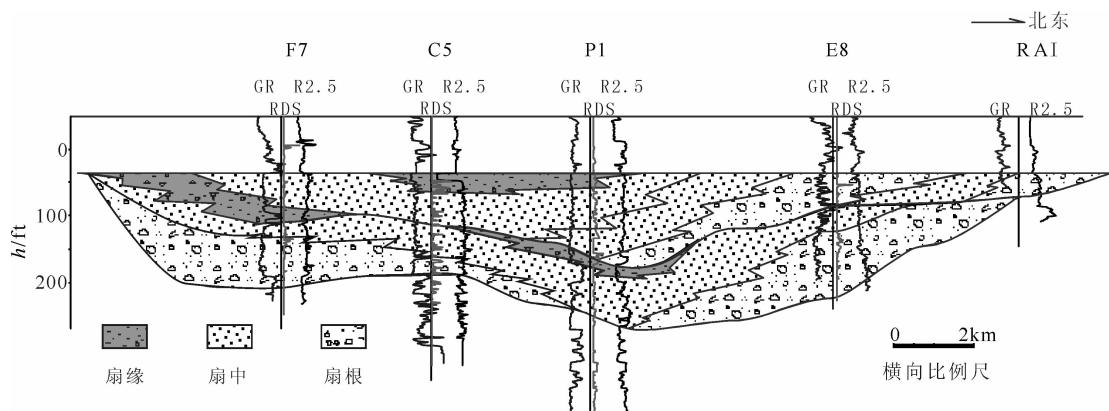


图 6 F7 - RAI 连井剖面相和裂缝发育规律(剖面位置见图 5, AA')

Fig. 6 Facies and fracture development section from well F7 to well RAI

沉积为主，裂缝密度 0.22 条/m，不甚发育；位于扇中和扇缘的井以砂泥岩沉积为主，裂缝密度 0.48 ~ 0.6 条/m，较为发育。

有 FMI 资料的井较少，因此，需充分利用常规测井资料描述裂缝<sup>[8]</sup>。当地层中不发育裂缝时，深、浅侧向电阻率应该是基本重合的；而有裂缝沟通的地层，由于渗透性的影响导致泥浆不同程

度的侵入，深、浅电阻率体现出幅度差异。以此为基础，用 FMI 刻度常规测井的方法分析裂缝发育段在常规测井曲线上的特征，构建适合本区的裂缝强度指示曲线  $RDS = \lg(RT) - \lg(RXO)$ ，对照 FMI 发现当 RDS 值大于 0.2 时为裂缝发育段。FMI 刻度常规曲线后的结果也进一步反映了 FMI 所揭示的规律，即岩性影响裂缝发育。

其他地区的统计<sup>[6-9]</sup>也表明: 岩石颗粒越大, 则裂缝密度越小、间距越大、延伸越长、切穿岩层能力越强; 岩石颗粒越小, 则裂缝密度越大、间距越小、延伸越短、切穿岩层能力越差。裂缝一般延伸至岩石相变界面终止, 很少跨越不同岩性界面。此外, 裂缝发育程度同岩层厚度也有一定关系, 如 E8 井地层厚度较薄, 沉积相带同 C5 井类似, 但 E8 井裂缝密度可达 0.54 条/m, 较 C5 井的 0.21 条/m 高。

3.2.3 机理分析

当作用的外力超过岩石的强度极限时, 岩石内部结构就会遭受破坏形成破裂面。不同岩石的强度极限值不同, 同一种岩石在不同条件(温度、压力等)下的强度极限值也会有很大差异<sup>[15-17]</sup>。模拟实验表明<sup>[10]</sup>, 相同的温度压力条件下, 干燥砂岩样品的孔隙度要大于砾岩。粒度小的砂岩, 颗粒表面积大, 在承受相同压力的情况下不易发生变形, 抗压能力强。而粒度较粗的岩石颗粒间的接触面积小, 容易发生形变, 抗压能力低。孔隙度残留大意味着岩石骨架能承受较大的外力作用, 抗压能力较强。

据胡玲的研究结果<sup>[9]</sup>(表 1), 干燥条件下砂岩的抗压强度(87.1 MPa)要高于砾岩(86.5 MPa), 但是潮湿条件下岩石的抗压能力大幅降低, 而且砾岩的抗压强度(54.8 MPa)反而要高于砂岩(53.1 MPa)。这表明在地下有流体的条件下, 砾岩不易发生破裂形成裂缝。

表 1 砂岩和砾岩在不同条件下的抗压强度(据胡玲<sup>[9]</sup>)  
Table 1 Compressive strength of sandstone and conglomerate under different conditions

岩石类型	干燥条件下的 抗压强度/MPa	潮湿条件下的 抗压强度/MPa
砂岩	87.1	53.1
砾岩	86.5	54.8

流体的存在会降低岩石的弹性极限, 提高其韧性, 使岩石容易发生变形, 因此, 在潮湿条件下砂岩和砾岩的抗压强度都有不同程度的降低。当岩石孔隙中存在流体时, 渗流能力越强孔隙中的流体就越容易被排出, 反之则不易被排出。依据笔者的模拟实验, 相同的温压条件下, 砂岩的渗透率要小于砾岩, 因此, 砂岩孔隙中残余的流体也相应地较砾岩多, 导致岩石中的孔隙压力相应较大。岩层中的孔隙压力增大就会使岩石屈服

强度降低, 易于变形。

4 裂缝模型的建立

在裂缝性碎屑岩储层中, 流体存在于基质和裂缝两个相互连接的系统中, 需建立双孔双渗模型, 其难点在于裂缝网格模型的建立。裂缝建模的思路为: 通过 FMI、岩心、露头 and 区域资料获取裂缝的产状、密度等基础信息, 然后通过 FMI 刻度常规曲线确定裂缝在三维空间的发育规律——可以等值线或属性体的方式对裂缝进行约束, 建立裂缝的骨架模型; 最后, 通过统计分析、测试等资料确定裂缝的开度、有效渗透率等信息, 建立裂缝的属性模型。

由于 FMI 资料井有限, FMI 刻度常规曲线得到的裂缝发育强度曲线增加了数据来源, 可以直接应用于井间裂缝发育强度模型的插值计算, 获得较为准确的裂缝强度模型。而在裂缝网格建立的过程中, 还应考虑断层距离、地层曲率、沉积相和岩性等因素的影响, 将这些作为裂缝模型的约束条件, 提高模型精度。

在裂缝物性模型建立过程中, 裂缝孔隙度与基质岩石孔隙度有一定关系。一般基质孔隙是主要的储集空间, 基质孔隙度越大, 裂缝孔隙度在总的储集空间中所占的比例就越小。一般来说, 当低渗透砂岩储层总孔隙度小于 10% 时, 裂缝最大孔隙度小于基质孔隙度的 0.1 倍, 当储层总孔隙度大于 10% 时, 裂缝最大孔隙度小于储层孔隙度的 0.04 倍, 当储层总孔隙度小于 5% 时, 裂缝孔隙才可以作为一种有效的储集空间存在<sup>[4-7]</sup>。Kc 组储层平均孔隙度在 10% 以上, 根据 FMI 资料统计的裂缝孔隙度在 0.1% ~ 0.4%, 平均 0.35%, 符合该统计规律。裂缝孔隙度同基质孔隙度相比可以忽略不计, 将基质孔隙度作为总体孔隙度。在建立裂缝网络格架(图 7)之后, 设定裂缝的渗透率和开度, 这些参数应充分结合岩心、FMI、油层测试等资料给定, 然后建立裂缝属性模型。

裂缝属性模型是建模的最终结果, 检验模型精确有效的标准主要有两个: 一是裂缝模型本身符合目前已知的地质认识, 二是裂缝属性模型能够应用于数值模拟并进行相应拟合。本次建模应用了所有 FMI 资料井的裂缝信息, 并利用 FMI 刻度常规测井曲线建立了裂缝发育强度模型, 符合现有地质资料和认识。在裂缝网格模型的基础上

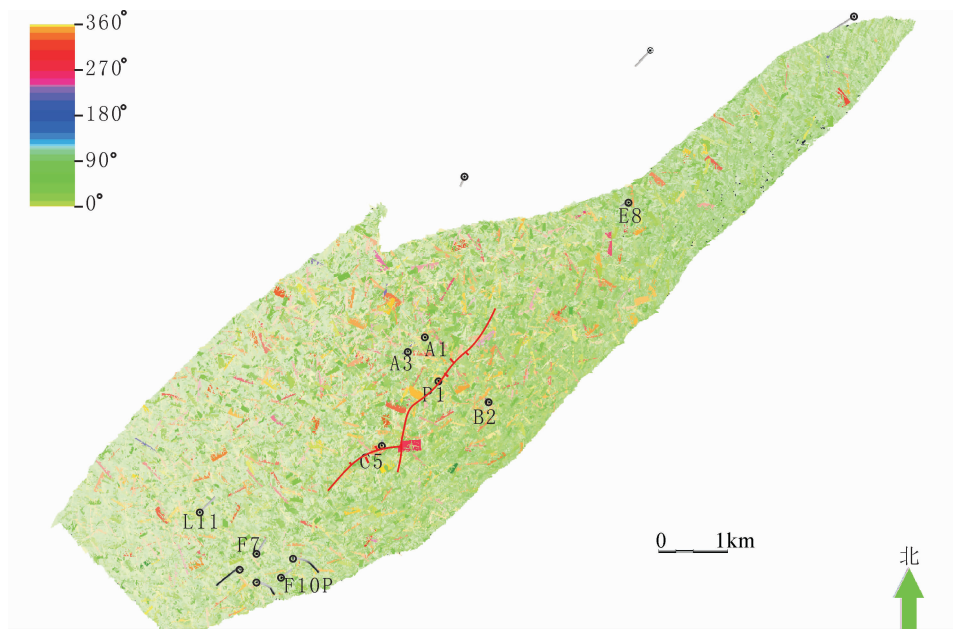


图7 裂缝骨架模型(色标显示裂缝走向)

Fig. 7 Fracture network model(Different color shows the direction of fractures)

建立了裂缝属性模型并输出应用于数值模拟,与实际井的生产动态数据进行了拟合,拟合效果良好,表明模型有效实用。

此外,对于裂缝性碎屑岩储层,随着开发的深入,在应力作用下裂缝的渗透性能和岩体的变形参数都会发生变化,在应用于数模时还应考虑渗透率张量和变形场等因素<sup>[11]</sup>,进行适当的调整。

## 5 结 论

(1)研究区 Kc 为近岸水下扇沉积,扇根砂砾岩体发育,扇中和扇缘发育程度较低。储层非均质性强,裂缝是改善储层渗流性能的主要因素。

(2)区域上主要有两组互相垂直的地应力发育,即平行边界大断层的北东方向应力和垂直于边界大断层的北西方向应力。

(3)区域构造应力和沉积相展布特征影响裂缝的发育和分布,断层周缘 100 m 范围内,发育垂直断层走向的裂缝,断层 100 m 范围以外发育平行断层走向的裂缝。扇根砂砾岩裂缝发育程度较低,扇中和扇缘细粒沉积裂缝较发育。

(4)应用 FMI 刻度常规测井曲线取得裂缝发育强度曲线,建立裂缝强度模型,并充分考虑断层、地层曲率、沉积和岩性等因素,最终建立精确的裂缝模型。

## 参考文献:

[1] Dengo C A, Covey M C. Structure of the eastern Cordillera of

Colombia [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1993, 77(8): 1315-1337.

[2] Carlos A Vargas, Luís G Pujades, Luis Montes. Seismic structure of South-Central Andes of Colombia by tomographic inversion [J]. Geofísica Internacional, 2007, 46(2): 117-127.

[3] Marksteiner R, Aleman A M. Petroleum systems along the fold belt associated to the Marañon-Oriente-Putumayo foreland basins [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1996, 80(8): 1311-1327.

[4] 王志章. 裂缝性油藏描述及预测 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 18-58.

[5] 王伟. 东营凹陷青坨子凸起馆陶组沉积相演化特征及相模式 [J]. 石油与天然气学报, 2009, 31(3): 167-170.

[6] 陆克政. 构造地质学教程 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1999: 53-56.

[7] 孙业恒, 时付更, 王成峰, 等. 低渗透砂岩油藏储集层双孔双渗模型的建立方法 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 79-82.

[8] 陈庆, 张立新. 准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩岩性岩相特征与裂缝分布关系 [J]. 现代地质, 2009, 23(2): 305-309.

[9] 胡玲. 显微构造概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 137-141.

[10] 王伟. 碎屑岩储层物性影响因素量化研究 [D]. 东营: 中国石油大学, 2007: 30-40.

[11] 丁文龙, 漆立新, 吕海涛, 等. 利用 FMI 资料分析塔河油田南部中-下奥陶统储层构造应力场 [J]. 现代地质, 2009, 23(5): 852-855.