

# 多因素约束下的致密砂岩气藏离散裂缝特征及地质模型研究

冯建伟<sup>1</sup>, 昌伦杰<sup>2</sup>, 孙致学<sup>1</sup>, 赵力彬<sup>2</sup>, 吴永平<sup>2</sup>, 郑欣<sup>2</sup>, 孟凡超<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中石油塔里木油田勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000)

**摘要:**根据地震、测井、野外、岩心和薄片观察解释结果,从断裂成因机制出发,围绕天山前KX气藏开发需要,重新划分裂缝类型,界定尺度范围,划分裂缝期次,建立裂缝发育地质模式;分析构造、沉积、开发与裂缝参数的相关性,优选裂缝发育主控因素,采用“熵权赋值法”构建三维裂缝发育强度地质模型;采用确定法、序贯高斯插值法建立大、中、小尺度缝离散模型,最终构建气藏裂缝属性模型。结果表明:山前KX地区致密砂岩构造裂缝系统具有明显的多尺度性、期次性和多样性,它们符合断层-褶皱-裂缝共生演化系统;多因素权重约束下的多尺度建模方法适合于致密砂岩DFN裂缝模型建立,断层、大裂缝适合优选确定性建模方法,中、小尺度裂缝适合优选序贯高斯模拟方法,地质模型与实际井点数据和开发动态数据吻合度高,可直接应用于双介质渗流数值模拟和气藏防水方案的优化。

**关键词:**多重因素;致密砂岩;离散裂缝;储层地质模型

**中图分类号:**TE 121.2 **文献标志码:**A

**引用格式:**冯建伟,昌伦杰,孙致学,等.多因素约束下的致密砂岩气藏离散裂缝特征及地质模型研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):18-26.

FENG Jianwei, CHANG Lunjie, SUN Zhixue, et al. Geological model and characteristics of discrete fracture network in tight sandstone gas reservoir constrained by multi-factors[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 18-26.

## Geological model and characteristics of discrete fracture network in tight sandstone gas reservoir constrained by multi-factors

FENG Jianwei<sup>1</sup>, CHANG Lunjie<sup>2</sup>, SUN Zhixue<sup>1</sup>, ZHAO Libin<sup>2</sup>,  
WU Yongping<sup>2</sup>, ZHENG Xin<sup>2</sup>, MENG Fanchao<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Branch, Korla 841000, China)

**Abstract:** As important flow channels in tight sandstone reservoirs, fracture networks have complicated distribution characteristics and are controlled by multiple geological factors, which have restricted the modeling of fractured sandstone reservoirs. Based on seismic, geological, logging and thin sections data in the KX area, scale limits for fractures or faults were revised and re-evaluated in terms of from fracture mechanics and scale features. The formation periods of fractures were inferred by means of structural evolution history and fluid inclusions tests in order to establish geological model for fractures. Then relationships between the fracture parameters and tectonics, lithology, physical properties were analyzed in detail, and the main controlling factors for distribution of fracture parameters were concluded and optimized. A set of fault-fold-fracture symbiotic systems at different scales were then established. By using entropy weight theory, each factor was assigned relative weights in the above analyses, through which the single fracture intensity curve of every well and 3-D fracture intensity model were built. Finally a complete discrete fracture network model (DFN) for different scales is found using four key techniques, including using determination approach to build large-scale fracture model; and using SGCS to interpolate or build middle and

收稿日期:2015-07-06

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(14CX05016A,15CX05007A);国家自然科学基金面上项目(41572124)

作者简介:冯建伟(1979-),男,副教授,博士,博士后,研究方向为石油地质学。E-mail:linqu\_fengjw@126.com。

small-scale fracture model. The results show that fractures of tight sandstone in the KX area have obvious multi-scale and multi-stage characteristics. The optimized modeling method restricted by multiple geological factors is effective for establishing a discrete fracture model, offers feasible improvement over traditional DFN constructions, and provides a reliable geologic basis for progressive optimization and adjustment of tight sandstone reservoir development scheme.

**Keywords:** multi-factors; tight sandstone; discrete fracture network; reservoir geological model

中国致密砂岩气分布范围广,目前已在四川、鄂尔多斯、柴达木及塔里木等多个盆地实现了勘探的突破<sup>[1]</sup>,储集岩中天然裂缝的发育程度、特征参数及空间分布规律成为影响该类油气藏开发效果的关键因素<sup>[2-3]</sup>,实现储层中天然裂缝的几何形状、属性参数的定量表征与多尺度裂缝的三维空间建模成为模拟开发动态、优化该类油气藏开发方案的核心问题,是国内外学者与机构研究的重点。由于致密砂岩气藏往往埋藏深度大、岩性变化快、储层非均质性强,裂缝的发育有着极强的随机性和非均质性,加上中国所处的特殊大地构造位置,中生代构造应力场的演化具有多期变化的特点<sup>[4]</sup>,不同构造期次应力场的变化和叠加,直接决定着区域裂缝的形成与否,断层、褶皱的发育、规模也不同程度的控制着局部裂缝的形成和分布规律,从而造成了对裂缝建模和预测上的极大困难。要解决这个问题,关键是要搞清复杂裂缝系统的主要控制因素,并进行裂缝参数的有效模型建立,但目前还没有相应完备、有效、

通用的手段方法。许多专家学者采用地质力学法、构造应力场模拟法、曲率法、地质统计法、地震属性法、测井解释法对复杂构造区进行裂缝预测和建模<sup>[5-8]</sup>,并以此为基础进行裂缝参数的量化表征研究。先进的离散裂缝建模(DFN技术)近年来取得长足发展<sup>[9-11]</sup>,限于随机建模的不确定性和裂缝发育的多尺度特征,离散裂缝建模方法对于井间区域的裂缝预测和连通性关系的处理受到限制,模拟结果也具有多解性。笔者针对致密砂岩中构造裂缝的多尺度及多成因特点,需要整合包括露头、岩心、测井、地震、试井及开发动态等多域信息对天然裂缝的特征参数及空间分布进行定量预测与建模,以天山山前库车坳陷 KX 裂缝性致密气藏为研究对象,阐述天然裂缝描述、控制因素、特征参数量化表征、离散裂缝模型构建以及模型可靠性评价的一体化思路及关键技术,为进入深度开发阶段的裂缝性油藏综合治理方案的制定提供直接依据。

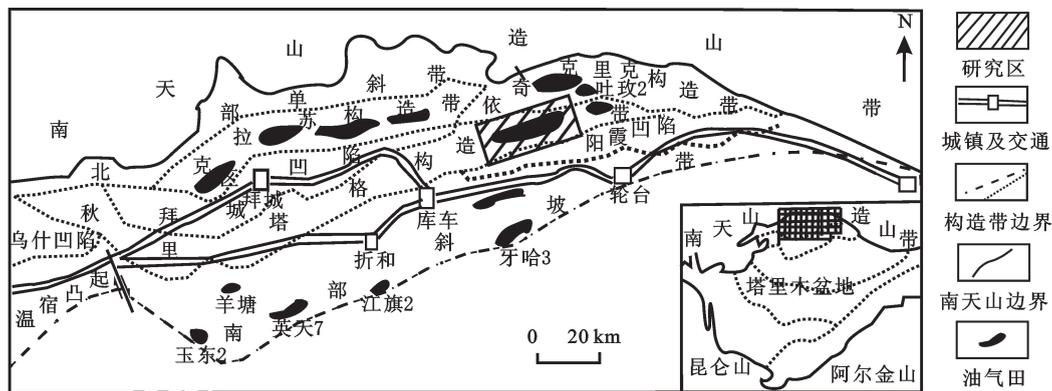


图1 KX 研究区地质概况

Fig. 1 Geological survey of study area in KX area

## 1 研究区地质简况

KX 气田位于塔里木盆地北部库车前陆盆地秋里塔格构造带东部(图1),主要受北界迪北断裂和南界东秋里塔格断裂控制,两条断裂走向均为北东东向,从三叠系断至新近系吉迪克组,在地层深部两条断裂合为一体,形成一完整近东西向展布的长轴背斜。主要产气目的层古近系自下而上发育库姆格列木群、苏

维依组,两者进一步均可细分为第一、第二、第三岩性,每段厚度都分布在 79.4 ~ 135.5 m。总体上,古近系上部以褐色粉砂岩、细砂岩为主,中部发育砾岩、含砾砂岩,夹薄层泥岩、粉砂质泥岩,底部发育一套厚度为 12 ~ 14 m 且分布稳定的褐色泥岩、粉砂质泥岩,与下伏白垩系呈角度不整合接触。从沉积上看,KX 气田位于一大型扇三角洲的前缘部分,以扇三角洲前缘亚相为主,微相以水下分流河道为主,分流河道间、席

状砂次之。储层埋藏深度均大于4 500 m,成岩作用强烈,储集空间类型主要包括裂缝和孔隙,其中,孔隙以次生孔为主,裂缝类型主要包括构造缝(以剪切缝为主)、成岩缝(以收缩缝为主)、溶蚀缝和粒内-粒缘缝,镜下薄片及生产分析表明,构造缝是影响储层质量及油井产能的主要因素。

## 2 裂缝系统级别划分

前人多依据力学成因将构造缝划分为剪裂缝、张裂缝、压裂缝3种基本类型<sup>[12-13]</sup>。本文中在前人分类的基础上,首先考虑裂缝成因机制将裂缝划分为构造缝和非构造缝,构造缝进一步划分为区域缝、局部缝和复合裂缝3种主要类型。局部构造缝是在构造运动中后期由构造运动的伴生或派生应力作用而形成或改造而成的裂缝,其产状和特征与所处的位置有关,又可进一步分为局部伴生缝、局部派生缝,其中复合型裂缝是晚期局部应力场改造早期区域缝,使其进一步剪切产生平滑断层、或使其张开形成张性缝,其中有重张缝和追踪张开缝。对于裂缝分级标准,目前还缺少一个统一的分类依据。油田

上多将开度作为划分裂缝规模大小的基本依据,划分为3个级别,即大裂缝(开度大于1.0 mm)、中裂缝(开度为0.5~1.0mm)、小裂缝(开度小于0.5 mm)<sup>[14]</sup>,本次研究从岩心和野外露头观测结果出发,同时参考现行裂缝分类划分标准<sup>[37]</sup>,同时考虑几何形态和对流动贡献的差异、成因机制类型或与构造应力场的关系,将其划分为大尺度缝、中尺度缝和小尺度缝3种尺度类型。大尺度缝为具有明显断距的次级断层或低级序断层,平面上分布稳定,延伸距离一般大于1 000 m,纵向上断穿不同地层,主要受控于区域应力场;中尺度缝是指断距不明显的小断层或穿层的大裂缝,受泥质或岩盐隔层限制明显,延伸距离一般为10~1 000 m,主要受控于次级派生应力场或区域应力场,穿层大裂缝和小断层的区别在于前者常常表现为共轭“X”型,后者多为产状与主断层斜交或近于垂直;小尺度缝是指受次级断层或大型裂缝控制发育的层内裂缝,受多泥质或岩盐夹层限制,延伸距离一般小于10 m,同时受到储层非均质性、岩层厚度、物性、岩相等多因素的约束,也是岩心观察的主要对象(表1)。

表1 致密砂岩储层裂缝分级标准

Table 1 Classification Criteria for fractures in tight sandstone

裂缝级别	裂缝长度/m	裂缝开度/mm	应力条件	流态	其他
大尺度缝	>1 000	>1	区域应力场	非线性流	具有明显断距的次级或低级序断层
中尺度缝	10~1 000	0.5~1	局部应力场	非线性流	断距不明显的小断层或穿层的大裂缝,受隔层控制
小尺度缝	<10	<0.5	派生应力场	线性流为主	层内裂缝,受多夹层控制

## 3 大尺度缝(低级序断层)特征

对全区地震解释解释出的233条断层,采用“里德尔剪切模式-倾角测井-地层对比”组合法验证了断层的可靠性,考虑双孔双渗地质建模实际运算量,在综合考虑断穿层位、距井距离、断距大小及对气井动态影响4个原则的基础上,最终保留了114条建模断层,其中I级2条,II级26条,III、IV级86条,并进行了特征分析。其中II级断层走向位于70°~80°之间,长度位于3 246.53~23 540 m之间,平均长度为6 483.74 m,分形维数为1.175,相关系数达到0.98,分布规律符合乘幂关系,有效影响范围估计达到100~200 m;III、IV级断层走向位于70°~80°,长度位于363.85~4 703.93 m,平均长度为902.8 m,分形维数为1.241 4,相关系数达到0.92,分布规律符合乘幂关系,影响范围估计达到40~100 m。

## 4 中尺度和小尺度缝特征

### 4.1 野外露头裂缝

根据对天山南缘地质露头(索罕村剖面)7个采样点(178条裂缝)的统计结果(图2)显示,古近系、白垩系裂缝走向以NE、NEE为主,NW次之,以高角度、直立共轭剪切缝为主,张剪缝次之,总体上属于区域裂缝系统,代表了地质历史时期存在的NNW向稳定挤压应力环境;早期裂缝充填程度高,晚期裂缝基本未充填,充填物以方解石为主,少量泥质充填;断层(大尺度缝)对裂缝的控制明显,体现在上、下两盘附近密度大,远离断层则迅速降低(图3(b));中尺度缝与小尺度缝近平行或部分斜交发育,两者受局部应力场的控制作用明显,如在褶皱前翼或核部密度大,后翼密度小,中和层位置密度最低。为了离散裂缝模型建立的需要,分尺度统计了裂缝参数的分布规律,中尺度缝和小尺度缝皆为高

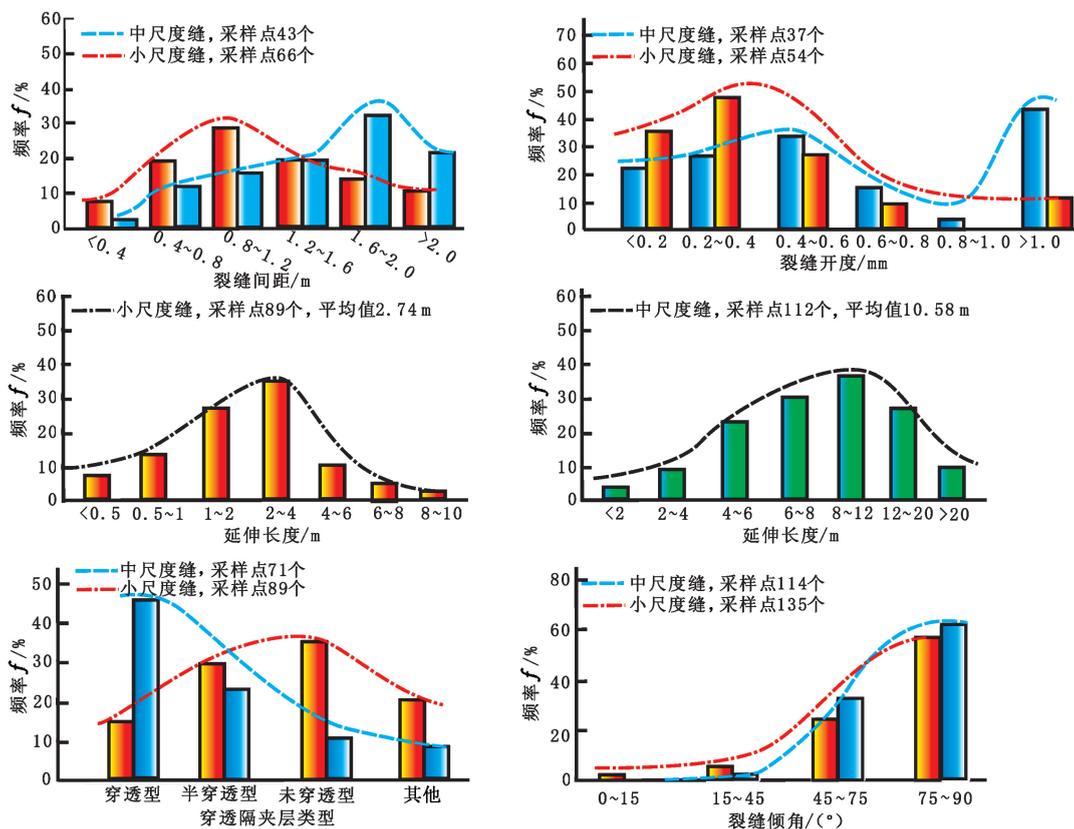


图 2 天山南缘索罕村野外剖面裂缝参数分布特征

Fig. 2 Fracture characteristics of Suohancun at front of Tianshan mountain

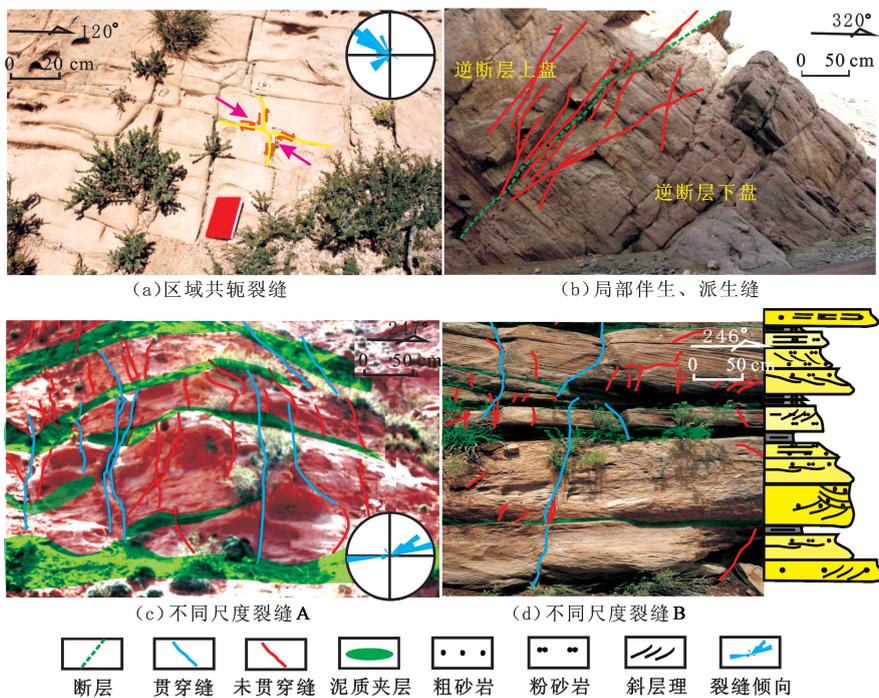


图 3 天山南缘索罕村野外剖面裂缝发育模式

Fig. 3 Fracture development modes of Suohancun at front of Tianshan mountain

角度缝和直立缝,倾角为 45° ~ 90°,且前者稍大于后者,这主要由于库车坳陷在喜山期变形期间,目的

层埋藏深度大于 4 000 m,高围压条件促成了兼具剪切性质的高角度裂缝的大量发育,较大规模裂缝又

控制形成了一部分低角度或顺层滑脱的次级裂缝,如中尺度缝的延伸长度主要位于6~20 m,平均长度为10.58 m,小尺度缝主要位于1~6 m,平均长度为2.74 m。裂缝开度统计呈现出0.2~0.6 mm和大于1.0 mm两个高值区,前者与小尺度缝高值区基本吻合,说明裂缝规模或延伸长度越大,开度并不一定越大,尤其对于处于闭合状态下的剪切缝,而张性缝相对来说往往开度较大;相比较而言,中尺度缝间距主要集中在1.2~2 m,小尺度缝则主要在0.4~1.2 m,前者明显大于后者,说明在同等应变能条件下,较大规模的裂缝产生时消耗的能量更多。另外,观察统计发现,厚层均质砂岩中以规则共轭剪切缝发育为主(图3(a)),含软弱夹层的砂岩中则发育一定数量的张性缝或岩性界面缝,正反映了在地层未发生较大变形时地层结构是裂缝发育类型的重要控制因素,研究区属于扇三角洲前缘相沉积,泥质夹层发育频率高(图3(c)),厚层砂岩中厚度超过5 cm的泥质夹层即可挡住小尺度裂缝的延伸,大于20 cm的夹层可挡住中尺度裂缝的延伸(图3(d)),在统计的77条中尺度缝中,穿透缝占46.5%,未穿透缝仅占12%,统计的89条小尺度缝中,穿透缝仅占15.5%,未穿透缝则占38%,呈明显的反比关系,说明较大规模裂缝更容易刺穿夹层。结合前人研究,泥岩在深层高温围压条件具有明显的塑性变形特征,其剪破裂角也明显大于砂岩,因此造成了部分裂缝延伸转向或终止,未能穿透夹层或直接消失在塑性夹层内。

#### 4.2 岩心 CT 扫描裂缝

应用工业高精度 CT 扫描技术(分辨率为20  $\mu\text{m}$ ),在不损坏岩心的情况下直观反映内部裂缝的发育、充填及变化规律等。共选取裂缝相对发育层段20.21 m,岩性涵盖粗砂岩、中粗砂岩、中砂岩、中细砂岩、细砂岩、粉细砂岩、粉砂岩、杂砂岩、泥砾粗砂岩、泥质中砂岩、泥质细砂岩、泥质粉砂岩。其中位于背斜前翼的KX2-11井扫描岩心岩性包括细砂岩、粉细砂岩、泥质粉细砂岩、粉砂质泥岩,主要发育平行缝、共轭缝、网状缝和多期叠合缝等类型,岩性均一的厚层砂岩内常发育平行缝和单一缝,靠近泥岩的砂岩内常发育网状缝,当早期裂缝充填程度低且最大压应力或最小张应力与裂缝面低角度斜交时,则裂缝继续错动形成多期叠合缝类型,总体上该井裂缝相对发育,以未充填的高角度一直立缝为主。根据对4口井岩心CT扫描统计的结果显示,研究区储集层中主要发育砂岩平行-共轭剪切缝、层状砂岩张-压共生缝、砂泥岩界面网状缝等多种模式,

其中砂泥岩界面网状缝尤其发育,又可以根据对夹层的穿透情况,进一步划分为界面转换缝、界面滑脱缝和界面终止缝,主要表现为裂缝有的直接切穿泥岩夹层,有的延伸至岩性界面处消失,有的呈弧形斜切入泥岩后成为滑脱缝,有的则发生力学性质的转换,如剪切缝在砂泥岩界面处由于“应变不协调效应”而派生出张性缝或张剪缝。当然,并不是所有的砂泥岩界面处都会产生转换缝,当砂层、泥岩层呈突变接触或冲刷面形式出现时,则裂缝不转向,直接终止或穿透,当砂岩、泥岩呈渐变形式出现时,裂缝发生弧形转向,泥岩夹层一般表现为泥砾或泥质条带的形式,厚度大于5 cm时可挡住研究区的小尺度缝延伸,厚度大于8 cm时可挡住中尺度缝延伸,这一点与野外观察结果非常吻合。另外,砂泥岩地层产状近于水平时,挤压应力首先在砂岩内集中,产生裂缝,后延伸入泥岩内且剪裂角逐渐增大,破裂面呈弧形斜切入泥岩内,地层产状近直立或大于45°时应力首先使泥岩发生屈服塑性变形,达到剪切强度时几乎与砂岩同时产生裂缝。可见,储层内部泥质隔夹层对裂缝密度、发育规模及延伸长度均有重要影响,岩性或岩相是离散裂缝建模的重要约束因素。

综合对比KX地区21口井古近系成像测井识别和CT扫描结果,裂缝以65°~88°的高角度缝、直立缝为主,水平缝和低角度缝不发育,裂缝开度主要分布在0~0.2 mm,最大可大于1 mm,裂缝充填程度主要位于40%~60%,以钙质半充填为主(图4)。整体上西部除个别井点外,裂缝密度总体偏低,而东部则裂缝密度总体较高,纵向上,E5(苏三段)、E72—E78(库二段)、E1—E2(苏一段)裂缝密度依次较大,E3—E4(苏二段)稍差,E8(库三段)和K钻遇井少,靠近泥岩隔层附近,裂缝密度下降;裂缝方位总体呈NNW—SSE向,NW—SE向次之。

## 5 裂缝发育主控因素分析及离散裂缝模型建立

### 5.1 裂缝发育主控因素分析

KX气田位于天山南缘的克拉苏构造带上,构造运动强烈,受晚燕山运动、喜山运动和第四纪新构造运动影响明显,是裂缝产生的最直接驱动力,断层和褶皱又是影响和改变局部应力场的关键因素,岩性、泥质夹层、物性从内部制约着裂缝是否产生或几何形态。结合前人研究及裂缝包裹体测试结果,推断构造裂缝的形成大致有3个期次:第1期为同沉积泥质充填裂缝(闭合,无效),第2期为硬石膏、方

解石充填裂缝(半充填、全充填),第 3 期为高角度开启裂缝(未充填、半充填)<sup>①</sup>。其中,第 1 期发育在早期喜马拉雅运动早期,第 2 期发育在喜马拉雅运动—造山运动晚期,这个时期是 KX 构造雏形奠定的关键期,构造活动强度大,第 3 期发育在喜山运动末期。根据岩石声发射测试结果以及裂缝走向与褶皱轴部、断层走向的关系,喜山运动最大主应力为 NNW 向,控制了 NEE 走向断层和长轴背斜的发育以及 NNW 走向剪切裂缝的发育,晚喜山运动和新构造运动促进了 KX 背斜的隆起、定型,改变了顶部应力场的分布状态,派生出等效扩张应力,控制产生了两组 NNE 和 NE 走向张剪缝的发育,呈“X”共轭

状态与背斜枢纽近似平行,同时沿最大主应力方向产生垂直枢纽的扩张裂缝或走滑调节断层,对早期剪切裂缝和断层系统进行叠加改造。另外,在很大程度上,KX 地区的强烈挤压运动会派生相应的走滑剪切应力,在北部断层附近以右旋剪切为主,在南部断层附近,以左旋剪切为主,如在 KX3 井南部位置,发育局部左旋剪切运动,产生了明显的负花状构造。总体上,KX 构造属于典型的顶部地堑型背斜,裂缝发育演化过程符合断层—褶皱—裂缝共生演化系统,即裂缝早期受断层控制,晚期受断层、褶皱共同控制,为各种类型构造裂缝的发育,尤其是张性缝的发育提供了有利条件(图 5)。

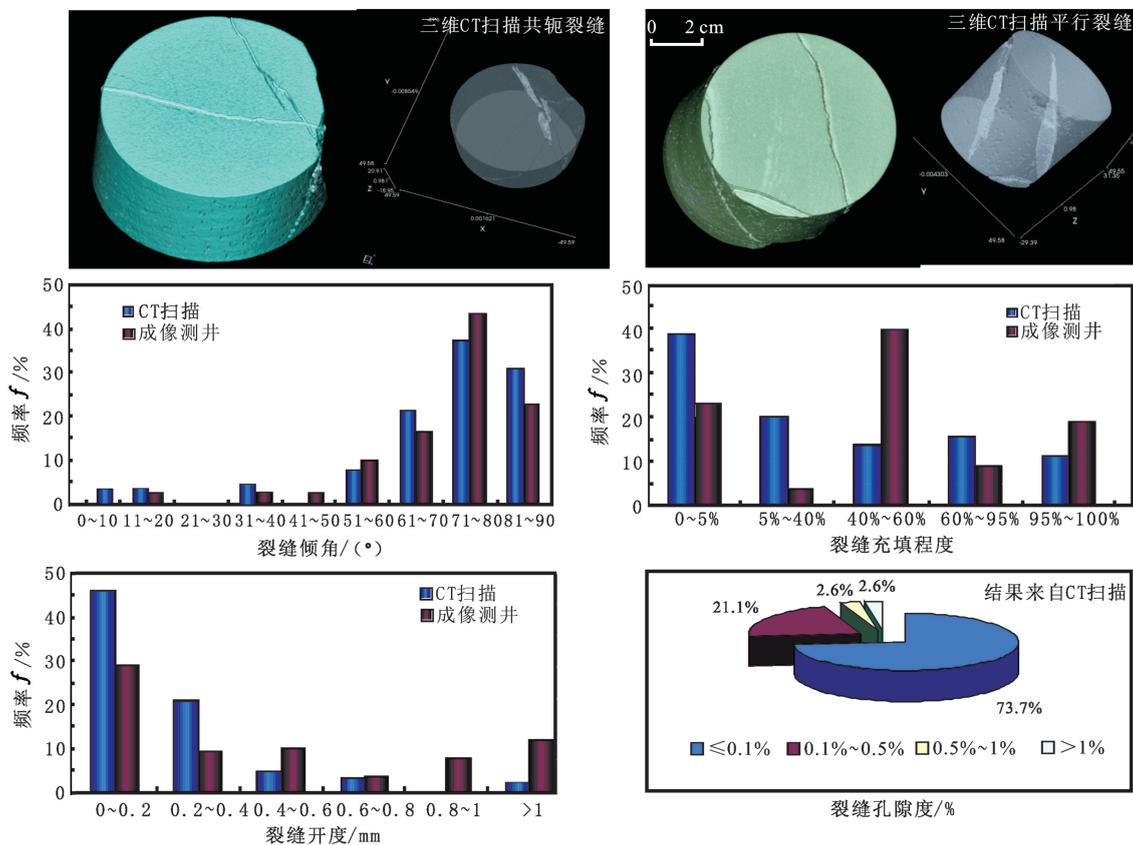


图 4 KX 地区岩心 CT 扫描及裂缝参数分布特征

Fig. 4 Fracture parameters distribution from CT scanning in well KX area

从试油试采、岩心和露头观察及各种分析检测来看,KX 地区储层天然裂缝发育除受构造应力直接控制外,还受到岩层本身各种地质因素的影响。如深层三轴近等围压条件下,裂缝发育程度主要受应力强度控制,即均方根差异应力

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \bar{\sigma})^2 + (\sigma_2 - \bar{\sigma})^2 + (\sigma_3 - \bar{\sigma})^2}{3}}$$

与抗剪强度  $\tau_m$  之间

的关系,而应力强度在背斜两翼主要受断层控制影响,在背斜顶部主要受地层弯曲程度控制影响;现今裂缝开度和渗透性也受应力强度的影响程度大,应力强度主方向与裂缝面夹角  $\theta$  越大,裂缝开度或渗透率越小,反之,与裂缝面夹角越小,开度或渗透率越大;断层距离与裂缝密度、裂缝渗透率呈负相关对数关系,距离断层越近,裂缝越发育、渗透性越好,II 级断

①塔里木油田内部报告《迪那 2 气田低孔渗裂缝性储层描述与预测》。

层距离控制裂缝发育范围可达 1 000 ~ 1 050 m,控制有效范围仅为 100 ~ 200 m,Ⅲ、Ⅳ级断层控制裂缝发育范围可达 500 ~ 550 m,控制有效范围仅为 40 ~ 100 m;断层垂向断距越大,裂缝密度、裂缝渗透率越大,两者呈正对数关系,但断距大于 40 m 时,这种关系不再明显;扇三角洲前缘河道沉积尽管储层非均质性较强,但杂基含量低,脆性程度高,因此砂砾岩和含砾粉砂岩中裂缝最为发育,其次是泥质粉砂岩和细砂岩,中粗砂岩、泥岩中裂缝不发育,其中砂砾岩、砾岩中的粒缘、粒内缝较发育;地层砂岩含量、储层物性间接影响着 KX 地区裂缝的发育,基质孔隙度一般为 6.5%

~10.5%,即中等—较差储层裂缝相对更发育,砂岩含量在 20% ~ 40% 和 65% ~ 90% 范围内,裂缝相对更发育;同一岩性地层内,单层厚度越大,裂缝发育有降低趋势,厚层泥岩中砂岩厚度分布在 1 ~ 3 m 时,裂缝发育,密度最大,故岩性互层频率分布在 15% ~ 25%,裂缝相对最发育;裂缝延伸长度与泥岩隔夹层出现的频率呈负相关关系,随着泥岩隔夹层频率增大,裂缝延伸长度变小,而裂缝的平均间距则与泥质含量呈负相关关系,这说明随着岩性变细,泥质含量增多,裂缝平均间距变小,可能是横向上的应力传递与泥质含量的多少有关,即与岩石的塑性有关。

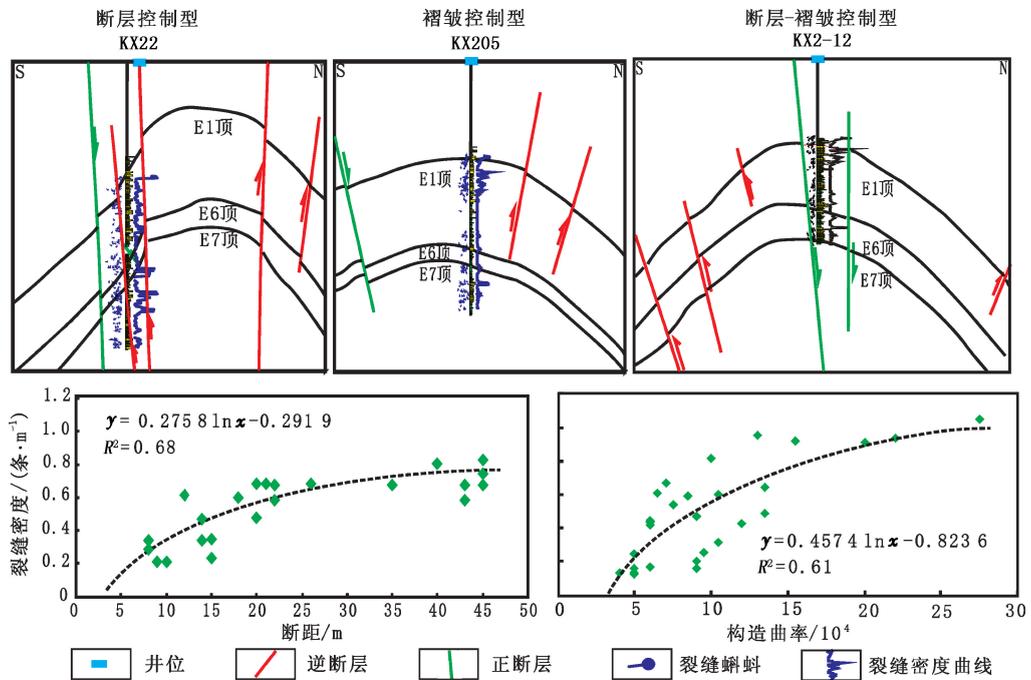


图 5 KX 气田断层、褶皱控制裂缝发育关系

Fig. 5 Relational graph between fractures development and faults, folds distribution in KX gas field

最终,按照各种地质因素对裂缝发育的控制程度,结合专家打分结果,确定了 KX 气藏各项因素的权重系数,并按照权重大小依次排序,优选出研究区裂缝主控因素,参考试油试采、试井解释等动态资料,建立研究区储层段构造裂缝发育的主控因素及指标体系,为离散裂缝网络地质模型的构建提供多种约束策略下的定量约束。由表 2 可知,构造应力、断层和曲率仍然是控制裂缝发育的重要因素。

### 5.2 离散裂缝网络地质模型构建

储层基质模型是离散裂缝模型构建基础<sup>[15-16]</sup>,采用经典的三步建模法构建基质模型,并以此为约束建立离散裂缝网络地质模型。首先,基于裂缝发育主控因素,以动态资料为刻度,构建多重约束策略下的裂缝发育强度属性体(地应力、断层、构造曲

率、岩相等参数),从平面与纵向三维空间对裂缝发

表 2 KX 气田裂缝主控因素及权重系数

Table 2 Main controlling factors and their weight coefficients for fractures of KX gas field

裂缝影响系数	裂缝密度/(条·m <sup>-1</sup> )	裂缝开度/mm	裂缝渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	权重系数
构造应力	0.86	0.84	0.82	0.30
断层距离	0.78	0.74	0.83	0.15
垂向断距	0.88	0.73	0.85	0.15
构造曲率	0.80	0.82	0.81	0.15
岩性及厚度	0.72	0.65	0.65	0.10
砂岩百分含量	0.81	0.64	0.77	0.05
储层物性	0.85	0.64	0.72	0.05
岩性互层频率	0.70	0.63	0.67	0.05

育富集区域进行定量表征。其次,应用确定性与随机性建模方法相结合的思路,构建储层中不同尺度离散裂缝网络模型,对地震解释的主断层体系,可直

接作为确定性结果,搭建构造框架,对低级序断层识别结果,提取三维空间展布形态,由于存在一定的不确定性,需要结合钻井、测井、地层对比以及注采对应关系、注示踪剂等动态监测等资料对解释结果进一步标定从而降低多解性,采用确定性方法建立中尺度裂缝模型,对于不同组系的小尺度裂缝,以井点裂缝发育程度为条件数据,以裂缝发育强度属性体为约束,采用随机建模方法分组系构建天然裂缝离散网络模型(图6),实现KX气田多尺度裂缝三维空间展布的定量化与可视化。最后,根据岩心观察、薄片鉴定、成像测井及深浅双侧向的幅度差计算出

不同组系裂缝的开度,然后,优选Oda-Block算法和上述统计公式相结合的方法,依据裂缝长度、宽度等特征参数,建立不同组系裂缝孔隙度、渗透率等属性参数模型。储层中天然裂缝成因、产状、组系及充填程度均不同,直接导致每条裂缝具有不同的属性参数。上述裂缝属性建模方法是基于理想简化提出的初步解决方法,其赋值结果具有多解性和不确定性,通过分析裂缝属性参数与气井产能、试井解释等动态资料,对结果进行修正,可为油藏数值模拟提供可接受的属性参数地质模型。

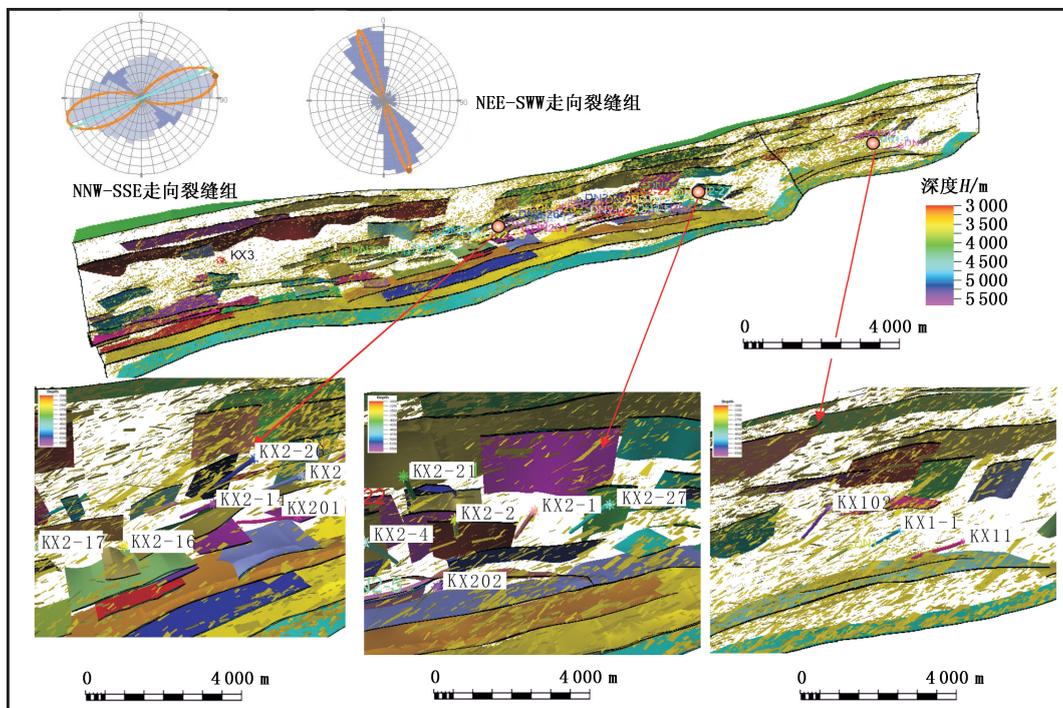


图6 KX气藏离散裂缝网络地质模型

Fig.6 DFN model in space of KX gas reservoir

## 6 模型可靠性评价

求取KX气藏纵向38个小层裂缝发育强度,与岩心统计及测井解释值相对误差小于10%,吻合度大于92%。裂缝离散模型中,平均裂缝长度为2.404 m,裂缝开度最大为0.59 mm,平均值为0.15 mm,裂缝倾角主要位于 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ,平均值为 $74.16^{\circ}$ ,裂缝倾向也主要有两个优势方向,与野外和岩心统计结果吻合程度高,达到90%以上,符合裂缝基本地质情况。另外,以KX地质模型计算的28口气井生产井段裂缝发育强度曲线,绘制气井无阻流量与生产井段裂缝强度值相关关系图,除个别井外(KX202井、KX2-23井),两者具有较好的对数关系,即裂缝强度曲线高值段对应较强的钻井液漏失及较高无阻流量或裂缝发

育对产能具有较明显的影响,说明KX气藏离散裂缝地质模型具有较高的可靠性。由于断层及裂缝均为高角度,钻遇断层或距离断层较近的井存在见水风险。如KX2-8井距北倾正断层约40 m,处于断层对裂缝的影响范围之内,试井解释结果却表明垂向渗透率为平面渗透率的5倍,存在底水沿裂缝及断层突进风险;KX2-5井过井断层为南倾较大规模断层,周围控制产生了一系列网状裂缝,试井解释结果表明垂向渗透率为平面渗透率的16.8倍,出水风险较高,与裂缝模拟结果相吻合。

## 7 结论

(1) 基于成因机制分析将裂缝划分为构造缝和非构造缝,构造缝进一步划分为区域缝、局部缝和复

合裂缝3种主要类型,局部构造缝又可进一步分为局部伴生缝、局部派生缝;再次按照裂缝的尺度性,考虑其几何形态和对流动贡献的差异,将其划分为大尺度缝、中尺度缝和小尺度缝3种尺度,其中中、小尺度缝是气藏开发研究的重点。

(2)构造应力场是裂缝产生的直接驱动力,断层、褶皱是影响和改变局部应力场的关键因素,岩性、泥质夹层、物性从内部影响和改变着裂缝的分布几何形态,通过计算不同因素与裂缝参数的相关性,获得它们对裂缝发育的贡献或权重,以此来约束建立不同组系裂缝强度属性体。

(3)优选幂分布模型表征气藏裂缝参数特征,优选 Bingham 模型表征裂缝组系空间分布规律,采用确定建模法建立大尺度缝离散模型,采用序贯高斯模拟法插值建立中小尺度缝离散模型,优选 Oda-Block 裂缝属性算法,构建气藏裂缝孔隙度、渗透率及形状因子等属性模型,结果与实际井点数据和开发动态数据吻合度高。

#### 参考文献:

[1] 张国生, 赵文智, 杨涛, 等. 我国致密砂岩气资源潜力、分布与未来发展地位[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 87-92.  
ZHANG Guosheng, ZHAO Wenzhi, YANG Tao, et al. Resource evaluation, position and distribution of tight sandstone gas in China[J]. Chinese Engineering Science, 2012, 14(6): 87-92.

[2] WALLS J D. Tight gas sands-permeability, pore structure and clay[J]. Journal of Petroleum Technology, 1982, 34: 2707-2714.

[3] JONE Olson, STEPHENE Laubach, ROBERT H Lander. Natural fracture characterization in tight gas sandstones; integrating mechanics and diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1535-1549.

[4] 万天丰. 古构造应力场[M]. 北京: 地质出版社, 1988.

[5] FISCHER M P, WILKERSON M S. Predicting the orientation of joints from fold shape: results of pseudo-three-dimensional modeling and curvature analysis[J]. Geology, 2000, 28(1): 15-18.

[6] 周新桂, 操成杰, 袁嘉音. 储层构造裂缝定量预测与油气渗流规律研究现状和进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 398-404.  
ZHOU Xingui, CAO Chengjie, YUAN Jiayin. The research actuality and major progresses on the quantitative forecast of reservoir fractures and hydrocarbon migration law[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(3): 398-404.

[7] 王珂, 戴俊生, 冯建伟, 等. 塔里木盆地克深前陆冲断

带储层岩石力学参数研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 25-33.

WANG Ke, DAI Junsheng, FENG Jianwei, et al. Study on reservoir mechanical parameters in foreland thrust belt of Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(5): 25-33.

[8] 宋璠, 苏妮娜, 冯建伟, 等. 基于摩擦效应的砂岩裂缝密度定量预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 1-8.

SONG Fan, SU Nina, FENG Jianwei, et al. Quantitative prediction of fracture density based on friction effect[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 1-8.

[9] GEIER Joel. Discrete feature model (DFM) user documentation[M]. Marviken: SKI, 2008.

[10] JAFFRÉ J, MNEJJA M, ROBERTS J E. A discrete fracture model for two-phase flow with matrix-fracture interaction[J]. Procedia Computer Science, 2011, 4: 967-973.

[11] 薛艳梅, 夏东领, 苏宗富, 等. 多信息融合分级裂缝建模[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 58-61.

XUE Yanmei, XIA Dongling, SU Zongfu, et al. Fracture modeling at different scales based on convergent multi-source information[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(2): 58-61.

[12] 陆克政. 构造地质学教程[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.

[13] 周文. 裂缝性油气储集层评价方法[M]. 成都: 四川科技出版社, 1998.

[14] 姚晓, 周保中, 赵元才, 等. 国内油气田漏失性地层固井防漏技术研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(6): 45-48.

YAO Xiao, ZHOU Baozhong, ZHAO Yuancai, et al. Leak resistance techniques of thief zone cementing in domestic oil and gas[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(6): 45-48.

[15] 聂永生, 田景春, 魏生祥, 等. 裂缝三维地质建模的难点与对策[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 39-41.

NIE Yongsheng, TIAN Jingchun, WEI Shengxiang, et al. Difficulties and treatments in three-dimensional geological modeling of fractural reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 39-41.

[16] CHRISTOPHER E Wilson, ATILLA Aydin, MOHAMMAD Karimi-Fard, et al. From outcrop to flow simulation: constructing discrete fracture models from a IDAR survey[J]. AAPG Bulletin, 2012, 95(11): 1883-1905.

(编辑 徐会永)