

# 致密砂岩储层构造裂缝特征及地质建模 ——以塔里木盆地库车坳陷大北12气藏为例

王珂<sup>1</sup>, 张荣虎<sup>1</sup>, 李宝刚<sup>2</sup>, 王俊鹏<sup>1</sup>, 宋丙慧<sup>3</sup>, 曾庆鲁<sup>1</sup>, 张知源<sup>1</sup>, 黄箐璇<sup>1</sup>

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院;

3 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院

**摘要** 以塔里木盆地库车坳陷大北12气藏为例,基于岩心、薄片、成像测井等资料表征了构造裂缝的类型与产状,分析了构造裂缝的影响因素及形成期次,分别采用随机和确定性建模方法建立了小尺度和大尺度裂缝模型,二者叠加得到总裂缝模型。结果表明:①在燕山运动和喜马拉雅运动近NS向的构造挤压背景下形成的大北12背斜型气藏,其目的层白垩系巴什基奇克组致密砂岩的宏观裂缝以近NS向的直立和高角度裂缝为主,剪切裂缝和张性裂缝均有发育;微观构造裂缝也可沟通基质孔隙,提高储层的连通性。②在岩性相同的前提下,构造裂缝密度随单层厚度增大而减小,且减小幅度也随之降低;单层平均厚度相近时,构造裂缝密度与距断层距离呈良好的负相关;细砂岩中的裂缝密度最高。③大北12气藏发育3期构造裂缝,其中形成于喜马拉雅中期和晚期的第2、3期有效裂缝是天然气高效富集成藏的关键因素。④背斜型油气藏核部的构造裂缝密度低,但张开度、渗透率高,通常具有较高的单井产能;翼部的构造裂缝密度高,但张开度和渗透率低,可采用压裂措施提高产能。该成果可为裂缝属性等效模型建立及气藏数值模拟提供数据基础,服务于气藏开发。

**关键词** 致密砂岩气藏;构造裂缝;随机裂缝建模;确定性裂缝建模;库车坳陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## 0 前言

致密砂岩是含油气盆地中一类重要的油气储集体,泛指孔隙度低于10%、空气渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (或原地渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )的砂岩<sup>[1-2]</sup>。在致密砂岩储层中,由于基质物性差,难以形成高效的油气渗流系统,因此构造裂缝是改善储层物性、提高油气产能的关键因素<sup>[3]</sup>。系统开展构造裂缝的表征与地质建模,对裂缝性致密砂岩储层甜点预测、井位部署以及油气藏开发方案制定与优化等均具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

库车坳陷是塔里木盆地的主力天然气源区,是我国“西气东输”工程的重要资源保障,目前已发现克拉一克深、博孜一大北、迪北一吐孜、迪那2、中秋1、吐东2等多个大中型天然气藏或凝析气藏,累计探明天然气地质储量超 $1.5 \times 10^{12} \text{m}^3$ <sup>[6-8]</sup>。勘探开发实践表明,库车坳陷已发现的气藏以构造型为主,

局部为构造-地层复合型,含气层位涵盖侏罗系、白垩系、古近系,储层类型以致密砂岩储层为主。大北12气藏是近年来在库车坳陷克拉苏构造带新发现的规模天然气藏,天然气探明地质储量近 $550 \times 10^8 \text{m}^3$ 。与克拉苏构造带已发现的克深2、克深8、博孜1等气藏一样,大北12气藏的主要含气层系为白垩系巴什基奇克组裂缝性致密砂岩储层,并且构造裂缝的发育程度是决定气井产能高低的重要因素<sup>[9-10]</sup>。目前亟需开展构造裂缝特征的系统分析与分尺度的裂缝地质建模,以推动大北12气藏的精细开发。因此,本文以库车坳陷大北12气藏白垩系巴什基奇克组致密砂岩为例,对构造裂缝的类型与产状、影响因素、形成期次开展系统分析,并结合露头裂缝模式、单井裂缝数据和地震资料,开展分尺度的构造裂缝地质建模,以期为该气藏的开发井位部署和开发方案制定及优化提供地质依据,同时也为其他天然气藏的构造裂缝研究提供参考。

收稿日期:2023-02-07; 改回日期:2023-02-25

本文受中国石油“十四五”上游领域前瞻性基础性课题“前陆冲断带下组合规模储层形成机理与有效性评价技术研究”(编号:2021DJ0302)资助

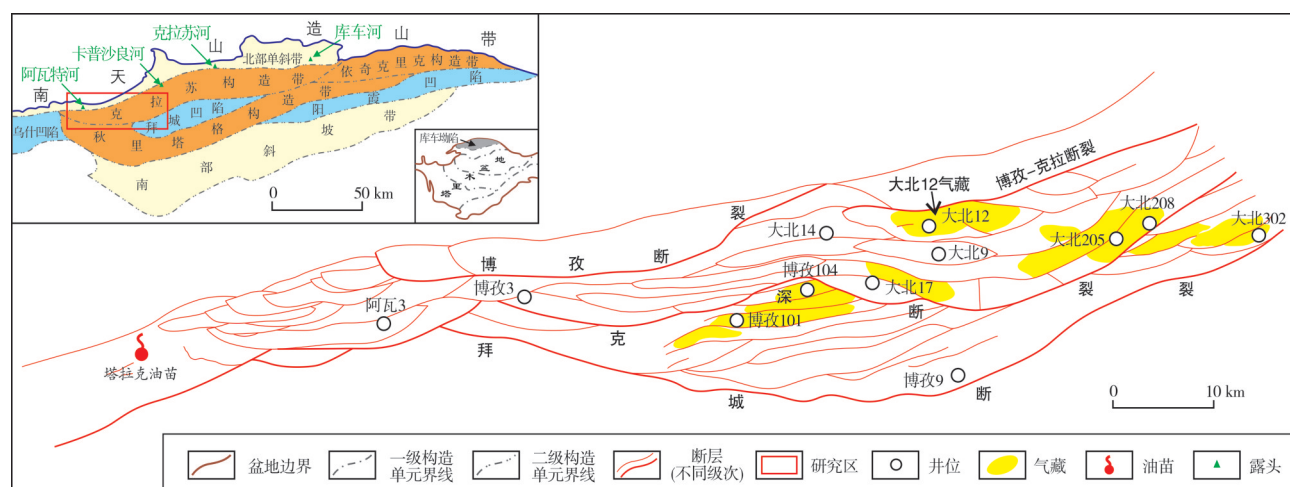
**第一作者:**王珂,博士,高级工程师,主要从事构造裂缝表征与地质建模研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号 中国石油杭州地质研究院;E-mail: wangk\_hz@petrochina.com.cn

## 1 地质背景

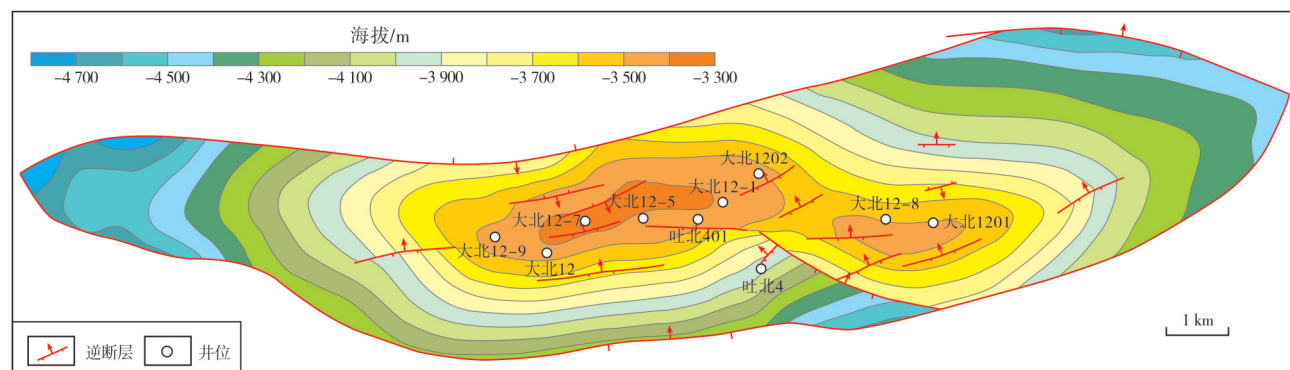
库车坳陷位于塔里木盆地北缘,是一个自晚海西期开始发育,经历多次构造运动叠加,在古生代被动大陆边缘基础之上发育起来的中新生代前陆坳陷,东西长约550 km,南北宽30~80 km,总面积约为 $3.7\times 10^4$  km<sup>2</sup>,由北部单斜带、乌什凹陷、克拉苏构造带、依奇克里克构造带、拜城凹陷、秋里塔格构造带、阳霞凹陷和南部斜坡带8个二级构造单元组成<sup>[11]</sup>(图1a)。前人研究表明,库车坳陷的油气主要来源于三叠系和侏罗系的烃源岩,自上而下包括中侏罗统恰克马克组、克孜勒努尔组,下侏罗统阳霞组,上三叠统塔里奇克组、黄山街组,其中恰克马克组和黄山街组烃源岩为湖相泥岩,克孜勒努尔组、阳霞组和塔里奇克组烃源岩为煤系地层<sup>[12]</sup>。

大北12气藏位于克拉苏构造带西部的博孜—

大北地区,是由一条北倾逆冲断层和一条南倾反冲断层所夹持的背斜型气藏(图1b),钻揭地层自上而下分别为第四系,新近系库车组、康村组、吉迪克组,古近系苏维依组、库姆格列木群,白垩系巴什基奇克组、巴西改组、舒善河组。其中,白垩系巴什基奇克组为主要含气目的层,埋深5 300~6 000 m,岩性以中厚层红褐色细砂岩为主,夹薄层粗砂岩、中砂岩、(泥质)粉砂岩和(粉砂质)泥岩,是一套辫状河三角洲-扇三角洲前缘沉积。岩心物性测试表明,大北12气藏巴什基奇克组砂岩的基质孔隙度平均约为4.3%,基质空气渗透率中值约为 $0.150\times 10^{-3}$  μm<sup>2</sup>,属于典型的致密砂岩储层。受燕山运动影响,库车坳陷在晚白垩世整体抬升剥蚀,造成上白垩统整体缺失,下白垩统也遭受不同程度的剥蚀,与上覆古近系库姆格列木群膏盐岩呈角度不整合接触,二者构成了良好的储盖组合,是天然气得以聚集保存的重要条件<sup>[12-13]</sup>。



(a) 库车坳陷博孜—大北地区断裂体系及气藏分布



(b) 大北12气藏白垩系巴什基奇克组顶面构造图

图1 塔里木盆地库车坳陷博孜—大北地区断裂体系及大北12气藏构造图

Fig.1 Fault system in Bozi-Dabei area and structural map of Dabe-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin



## 2 构造裂缝特征

### 2.1 构造裂缝的类型与产状

大北12气藏的岩心裂缝以直立和高角度裂缝为主,剪切裂缝和张性裂缝均有不同程度的发育。剪切裂缝的缝面平直,当裂缝倾角较大时,裂缝在纵向上延伸较远,可切穿多块岩心,开度一般小于1 mm,多数在0.5 mm以下,且沿裂缝的延伸方向较稳定(图2a)。张性裂缝的缝面凹凸不平,延伸距离有

限,开度一般在1 mm以上,且在裂缝的延伸方向上变化较大(图2b)。岩心裂缝的充填物以白色方解石为主,少数裂缝中也可见灰黑色有机质充填。裂缝两壁被浸染成灰白色,主要与酸性流体与岩石的相互作用有关(图2a,2b)。铸体薄片上的微观构造裂缝通常沿矿物颗粒边缘延伸,未见明显的充填,部分裂缝可切穿胶结物或矿物颗粒(图2c—2e)。微观构造裂缝的开度一般在20~30  $\mu\text{m}$ ,可沟通基质孔隙,提高储层的连通性,增加储层的渗透率<sup>[14]</sup>。

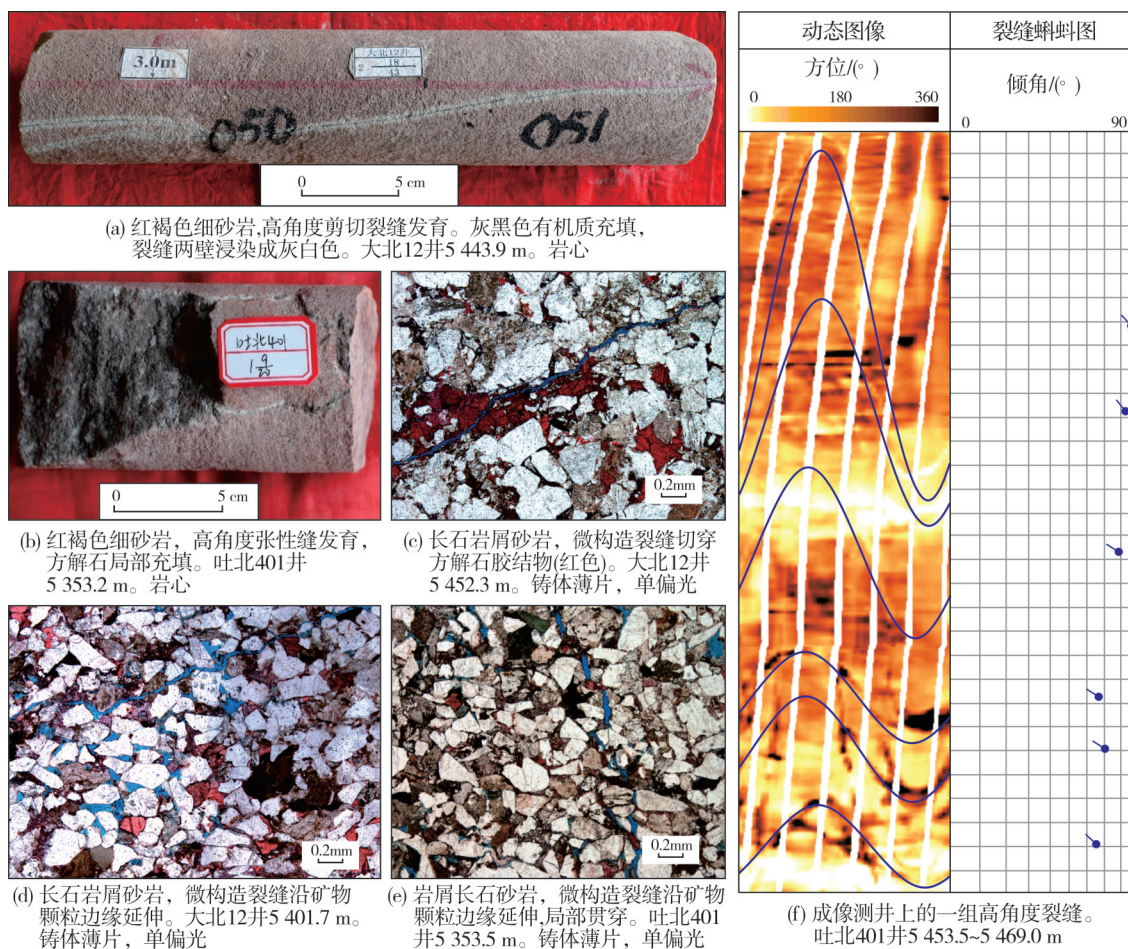


图2 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏巴什基奇克组典型构造裂缝

Fig. 2 Typical structural fractures in Bashiijiike Formation of Dabe-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin

在成像测井图像上,构造裂缝通常表现为正弦曲线,其中高导缝(主要为未充填缝)表现为暗色曲线,高阻缝(主要为充填缝)表现为亮色曲线。在大北12气藏8口井成像测井解释出的422条裂缝中,高阻缝仅有125条,占总裂缝数量的29.6%,高导缝有297条,占总裂缝数量的70.4%。根据裂缝正弦曲线的数量与几何形态,可定量获取裂缝

的密度、倾向、倾角等信息<sup>[15]</sup>。在成像测井图像上,大北12气藏的构造裂缝主要呈平行式和斜列式分布,偶见垂向共轭式(图2f)。裂缝优势走向为近NS向(图3a),与库车坳陷的区域水平最大应力方位一致<sup>[16-17]</sup>;裂缝倾角多大于50°(图3b),即以高角度裂缝和直立裂缝为主,与岩心反映出的裂缝倾角类型一致。

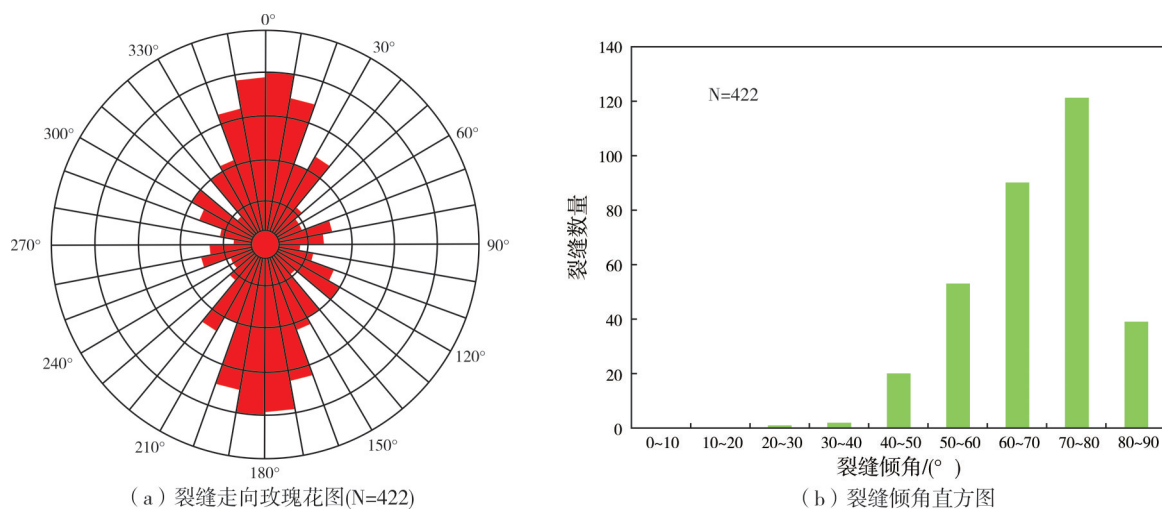


图3 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏成像测井裂缝产状

Fig. 3 Occurrence of fractures interpreted by imaging logging in Dabe-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin

## 2.2 构造裂缝的影响因素

大北12气藏的构造裂缝发育程度受单层厚度、距断层距离及岩性等因素的影响。从概率角度分析,在岩性相同的条件下,单层厚度越大,构造应力作用下岩石破裂点出现的位置就越分散,裂缝间距越大,裂缝密度(单位长度内裂缝的条数)越低。随

着单层厚度的增加,裂缝密度的减小幅度会逐渐降低,当单层厚度大于一定值时,裂缝密度与单层厚度不再具有明显的相关性<sup>[15]</sup>。根据研究区8口井的成像测井裂缝解释结果,对巴什基奇克组细砂岩的单层厚度与裂缝密度进行了统计。结果表明,细砂岩中构造裂缝的密度随着单层厚度的增大而减小,且减小幅度也随之降低(图4a)。

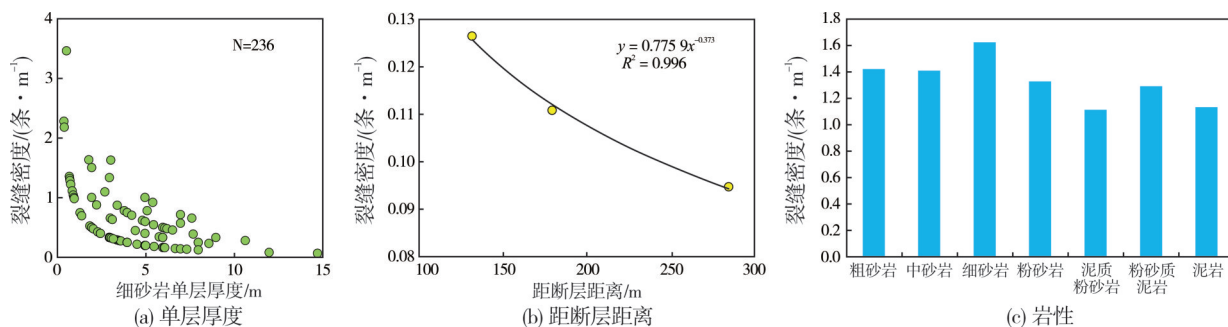


图4 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏构造裂缝的影响因素

Fig. 4 Influence factors of structural fractures in Dabe-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin

断层往往是构造应力集中区,一般越靠近断层,构造裂缝发育程度越高<sup>[9,18]</sup>。统计发现,在不考虑单层平均厚度差异的情况下,大北12气藏单井构造裂缝密度与距断层距离不具有明显的相关性;但在单层平均厚度相近的情况下,构造裂缝密度与距断层距离表现出良好的负相关。如表1及图4b所示,大北12-1井、大北12-5井和大北12-7井的单层平均厚度都在2.1~2.4 m,随着距断层距离的增大,构造裂缝密度逐渐减小。

前人研究认为:砂岩的脆性较强,在受到构造

应力作用时更易产生破裂,并且砂岩粒径越小、越致密,构造裂缝越发育,因此在同一地区,细砂岩、粉砂岩等细粒砂岩中的裂缝最发育,其次为中砂岩、粗砂岩和泥质粉砂岩;泥岩一般表现为强塑性,尤其是在深埋高温高压条件下塑性更强,在受到构造应力作用时,岩石应变能优先以泥岩塑性变形的形式释放,产生裂缝的应变能减少,因而粉砂质泥岩和泥岩中的裂缝一般欠发育<sup>[15,19]</sup>。对单层厚度为0.4~1.0 m的岩层与其中发育的裂缝密度进行统计后发现:大北12气藏细砂岩的裂缝密度最高,为



1.62条/m;其次为粗砂岩和中砂岩,裂缝密度为1.42条/m;粉砂岩及以下粒度岩性的裂缝密度较低,一般在1.35条/m以下(图4c)。

表1 大北12气藏巴什基奇克组单层平均厚度、距断层距离与裂缝密度

Table 1 Average thickness of single layer, distance to fault and fracture density of Bashijiqike Formation in Dabe-12 gas reservoir

井名	单层平均厚度/m	距断层距离/m	成像测井裂缝密度/(条·m <sup>-1</sup> )
大北12-1	2.39	285.0	0.09
大北12-5	2.15	131.9	0.13
大北12-7	2.19	179.7	0.11
大北12-8	2.62	253.4	0.26
大北12-9	3.52	644.9	0.24
大北1202	4.17	187.2	0.12
大北12	1.46	255.2	0.55
吐北401	1.22	173.5	0.36

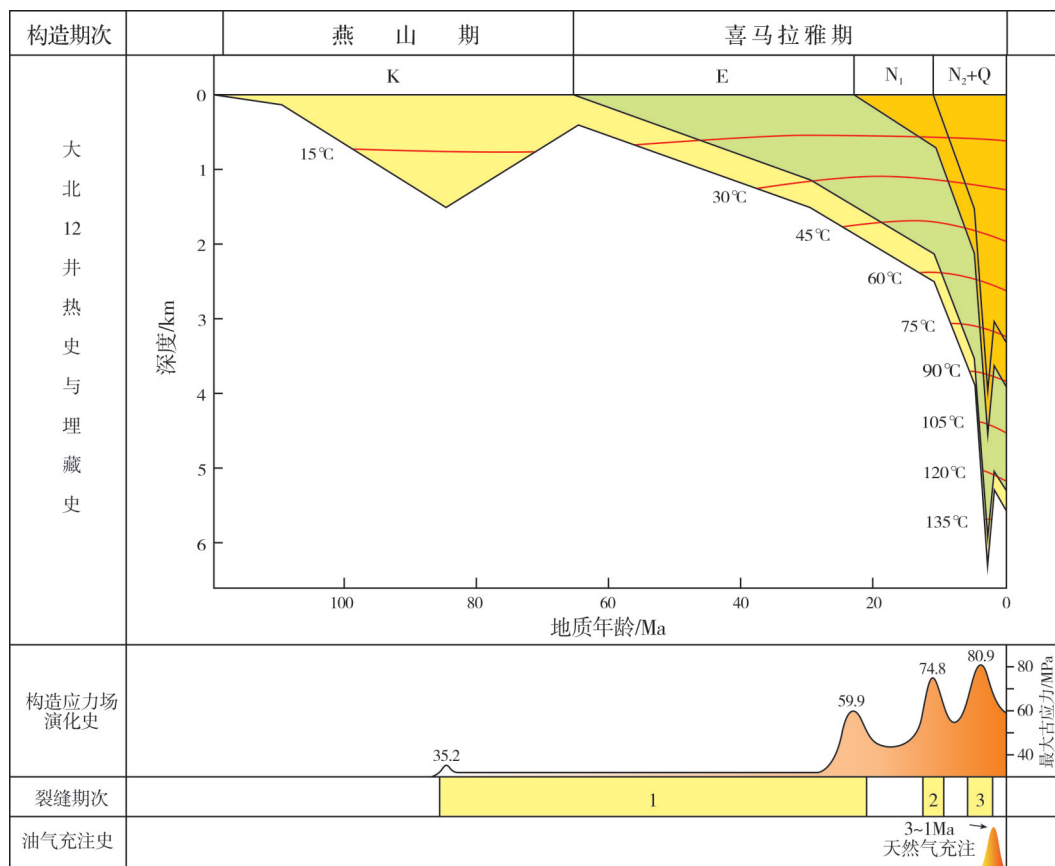
## 2.3 构造裂缝的形成期次

构造裂缝的形成期次往往与主要的构造运动

期次对应。并且一般情况下,构造裂缝形成越早,经历的胶结作用时间就越长,充填程度越高,而形成较晚的构造裂缝充填程度通常较低或未被充填,并可见晚期裂缝切穿或终止于早期充填裂缝的现象<sup>[20-21]</sup>。库车坳陷白垩纪以来主要经历了燕山运动和喜马拉雅运动,结合库车坳陷区域构造演化史以及构造裂缝的产状、充填程度、交切关系等(图2),认为大北12气藏巴什基奇克组的构造裂缝可分为3期(图5)。

第1期构造裂缝形成于燕山晚期—喜马拉雅早期(白垩纪末—古近纪)的近NS向弱伸展及期间短暂的弱挤压环境,库车坳陷中生界的水平最大古构造应力约为35~60 MPa<sup>[16]</sup>,主要形成近EW向的张性裂缝和近NS向的剪切裂缝,多数被有机质、方解石等充填,在成像测井图像上表现为高阻亮色正弦曲线。

第2期构造裂缝形成于喜马拉雅中期(新近纪康村组沉积期)的近NS向中等挤压环境,库车坳陷



注:最大古应力为库车坳陷中生界数据,引自文献[16]。

图5 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏构造裂缝形成期次

Fig. 5 Formation sequence of structural fractures in Dabe-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin

中生界的水平最大古构造应力约为 75 MPa<sup>[16]</sup>,该时期大北 12 气藏主要形成近 NS 向剪切裂缝,以方解石半充填和未充填为主,裂缝有效性较好,在成像测井图像上多表现为高导暗色正弦曲线。

第 3 期构造裂缝形成于喜马拉雅晚期(新近纪库车组沉积期—第四纪)的近 NS 向强烈挤压环境,库车坳陷中生界的水平最大古构造应力可达 80 MPa<sup>[16]</sup>,该时期大北 12 气藏主要形成近 NS 向剪切裂缝和背斜长轴上的近 EW 向张性裂缝,基本为未充填缝,裂缝有效性好,在成像测井图像上表现为高导暗色正弦曲线。

在上述 3 期构造裂缝中,裂缝形成时间越晚,地层经受的古构造应力越强,因而形成的裂缝数量越多。第 1 期构造裂缝数量最少,主要包括少量近 EW 向的张性裂缝和近 NS 向的剪切裂缝;第 2 期构造裂缝以近 NS 向的剪切裂缝为主,数量中等,有一定程度的充填;第 3 期构造裂缝数量最多,以近 NS 向的剪切裂缝为主,背斜长轴上因地层弯曲拱张而形成的近 EW 向张性裂缝数量相对有限。因此,大北 12 气藏的构造裂缝走向总体以近 NS 向为主,近 EW 向的裂缝较少(图 3a)。前述高阻缝和高导缝的发育数量及其形成时间的分析也表明:早期形成的裂缝多为无效裂缝,且数量相对较少;晚期形成的裂缝多为有效裂缝,数量相对较多。同时,第 2 期和第 3 期有效裂缝的形成时间略早于天然气大规模充注成藏的时间(3~1 Ma)<sup>[22]</sup>(图 5),这是大北 12 气藏得以高效富集成藏的关键因素。

### 3 构造裂缝地质建模

根据构造裂缝的规模和识别方法,将大北 12 气藏的构造裂缝分为小尺度裂缝和大尺度裂缝 2 类。小尺度裂缝是指可通过岩心、成像测井等单井井筒资料识别的构造裂缝,相当于前述的宏观裂缝,其纵向延伸长度为厘米级到米级,规模上相当于在地表露头所能观察到的大部分裂缝,因而可借助与井下构造具有相似构造背景及构造样式的露头裂缝发育模式指导井下小尺度裂缝地质建模。大尺度裂缝是指在岩心和成像测井上很少见到而只能依靠地震资料识别的构造裂缝,多数为微断裂尺度(大北 12 气藏 8 口井的成像测井仅识别出 28 条微断裂,平均每口井约 3.5 条),延伸长度通常在十米级到千米级。

### 3.1 小尺度裂缝建模

小尺度裂缝是构造裂缝网络的主体部分,主要采用随机方法开展建模<sup>[5]</sup>。首先将单井成像测井裂缝解释结果、露头背斜裂缝发育模式(图 6)所反映的构造裂缝定性分布规律,以及断层、岩性、层厚等因素与构造裂缝的定量-半定量关系作为约束条件,采用分组克里金模拟方法建立裂缝密度体(图 7)。需要注意的是,图 6 中的库车河背斜不发育大型的逆冲断层,而大北 12 气藏为逆冲断层和反冲断层夹持的断背斜。

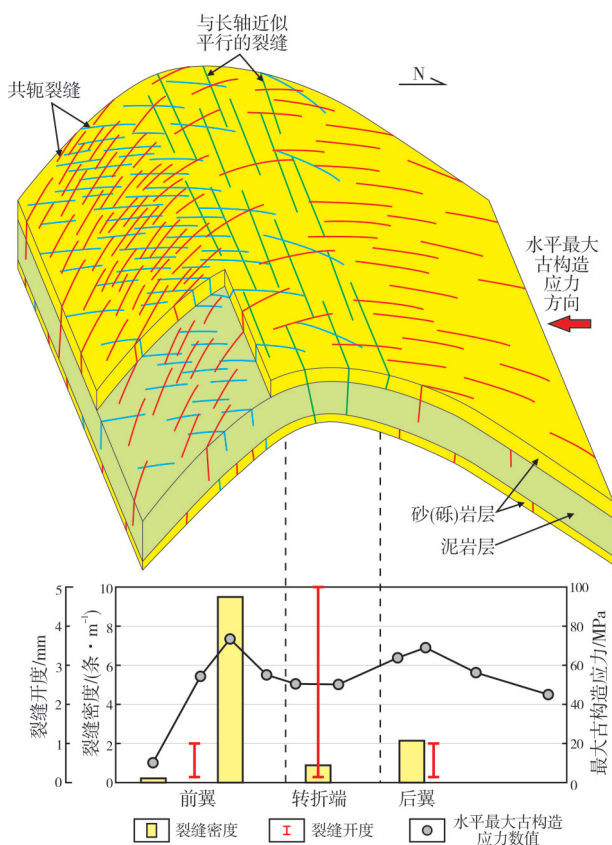


图 6 库车坳陷库车河露头背斜裂缝发育模式  
(露头位置见图 1a)

Fig. 6 Fracture development mode of Kuqa River anticline within Kuqa Depression (outcrop position is shown in Fig. 1a)

前人研究表明,克拉苏构造带边界逆冲断层控制的裂缝密集发育带宽度约为 0.4 km<sup>[23-24]</sup>,对此在建模中应予以考虑。最后采用 Bingham 产状分布模型,对裂缝进行随机模拟,生成小尺度裂缝片,得到大北 12 气藏的小尺度裂缝模型(图 8)。小尺度裂缝片的生成包括以下主要步骤:①确定裂缝的中心点位置  $p(x, y, z)$ ,即利用井点裂缝密度作硬数据,裂缝密



度体作软数据,模拟裂缝的中心点位置;②根据裂缝长度的统计值(均值和方差)模拟裂缝长度 $d$ ,根据裂缝倾向的统计值(倾向的均值和方差)模拟裂缝倾向

$\varphi$ ;③根据倾角统计的倾角值和方差,用高斯模拟计算出该条裂缝的倾角 $\alpha$ ,这样就得到一条中心点位置为 $p(x, y, z)$ 、长度为 $d$ 、倾向为 $\varphi$ 、倾角为 $\alpha$ 的裂缝片。

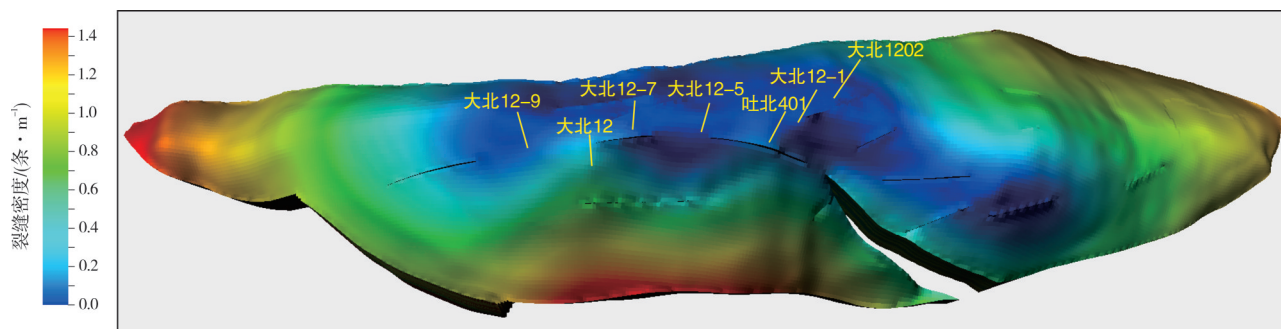
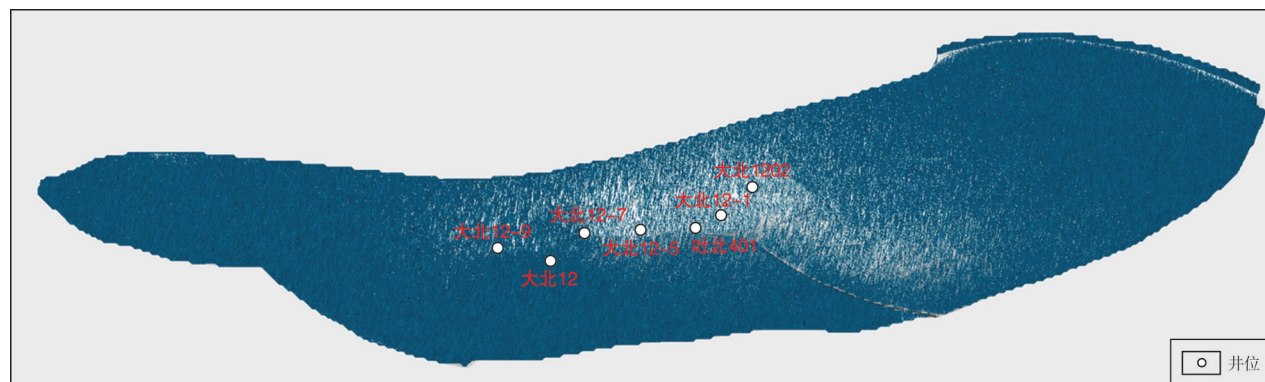


图7 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏小尺度裂缝密度体

Fig. 7 Density data volume of small scale fractures in Dabe-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin



注:青色色块表示裂缝片。

图8 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏小尺度裂缝模型

Fig. 8 Small scale fracture model of Dabe-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin

在大北12气藏小尺度裂缝建模过程中,采用了表1中6口井的成像测井裂缝解释数据,剩余的大北12-8井和大北12-9井作为验证井。大北12-8井成像测井解释的裂缝密度为0.26条/m,模型提取的裂缝密度为0.29条/m;大北12-9井成像测井解释的裂缝密度为0.24条/m,模型提取的裂缝密度为0.20条/m。总体上符合程度较高,表明所建裂缝模型具有一定的可靠性。

### 3.2 大尺度裂缝建模

大尺度裂缝主要是利用高分辨率本征相干体和蚂蚁追踪技术进行识别,其位置和形态基本上都是确定的,不需要随机生成,只需提取每条裂缝的密度、倾角、倾向及长度等信息,按照确定性建模方法直接生成大尺度裂缝离散模型<sup>[5]</sup>。由于地震数据

体的中低频对地震资料的分辨率影响很大,因此首先对原始的叠后数据体进行了高通滤波处理,滤除10 Hz以下的数据,处理后的地震资料对断层和裂缝的分辨率得到明显改善,计算得到的相干体对断层和裂缝的响应特征也非常清晰,通过多次反复调整相关参数得到蚂蚁体属性(图9)。最后,利用蚂蚁体属性提取裂缝片,采用确定性建模方法建立大北12气藏的大尺度裂缝模型(图10)。

在小尺度裂缝随机模型和大尺度裂缝确定性模型建立完成后,将二者叠加即可得到大北12气藏的总裂缝地质模型(图11)。该模型可为下一步裂缝属性等效模型建立及气藏数值模拟提供数据基础,进而指导开发井位部署与开发方案制定与优化。

从构造裂缝特征分析与建模结果来看,大北12

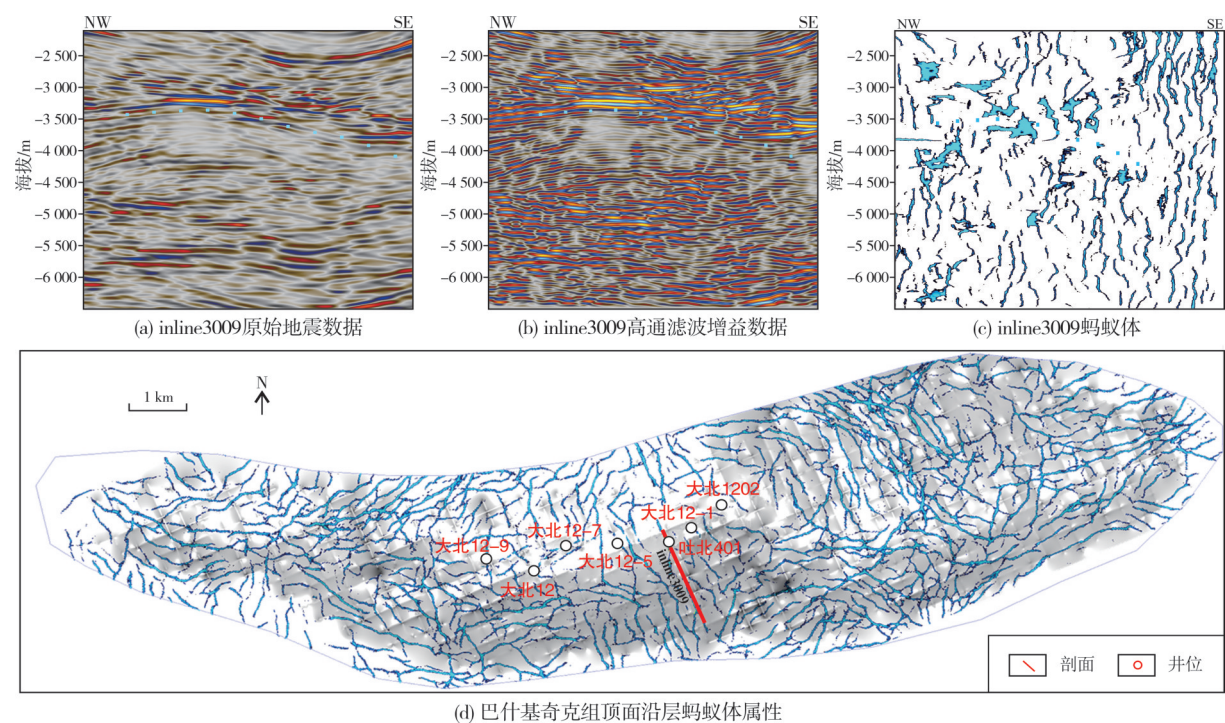


图9 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏蚂蚁体属性

Fig.9 Ant tracking attribute of Dabei-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin

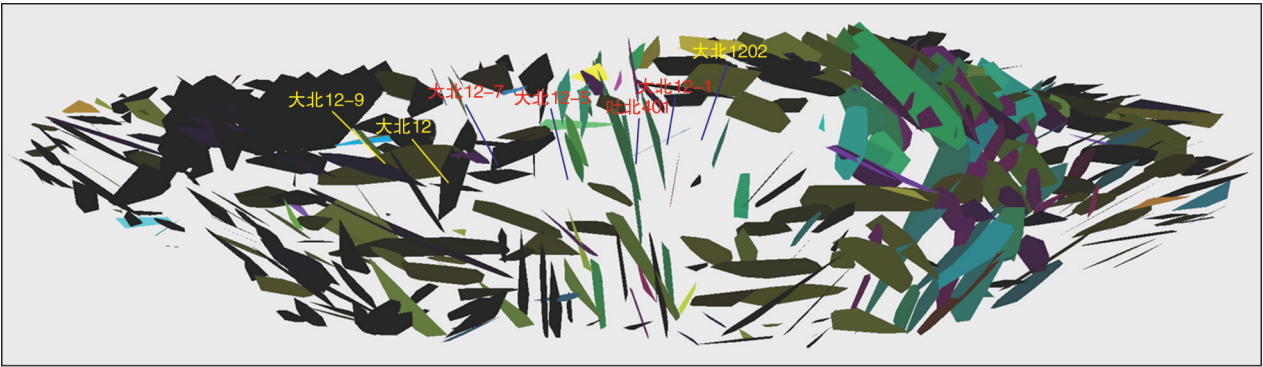


图10 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏大尺度裂缝模型

Fig.10 Large scale fracture model of Dabei-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin

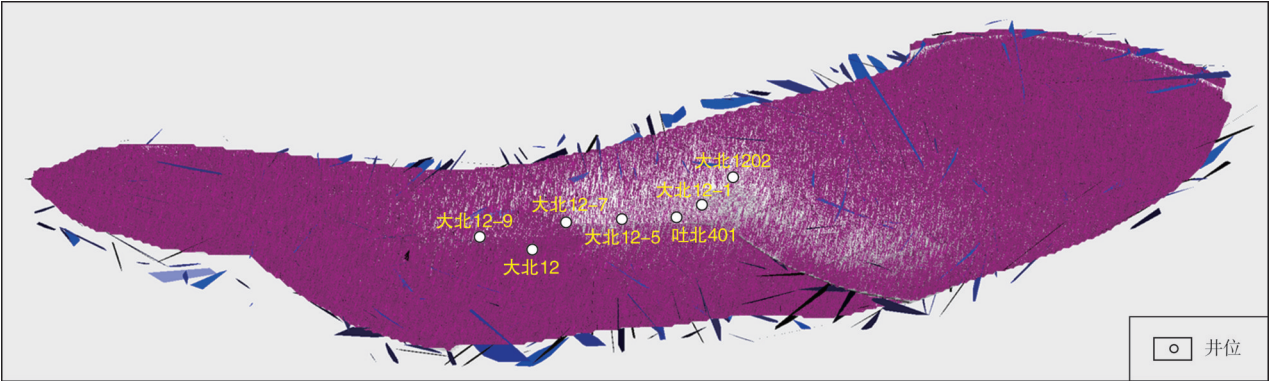


图11 塔里木盆地库车坳陷大北12气藏总裂缝模型

Fig.11 Total fracture model of Dabei-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin



气藏背斜核部的构造裂缝密度要低于翼部,但由于背斜的弯曲拱张作用,背斜核部的构造裂缝张开度和渗透率比翼部要高,因此背斜核部的单井产能一般要高于翼部。例如,大北1201井和大北1202井分别位于核部和翼部,均采用5 mm油嘴常规测试,其中大北1201井获折日产气 $12.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,而大北1202井获折日产气 $8.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。背斜翼部构造裂缝密度高但张开度小,因此采用压裂措施可有效提高产能。例如,大北1202井采用压裂措施后,5 mm油嘴获折日产气 $23.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,产能提高约1.6倍。

## 4 结 论

(1)塔里木盆地库车坳陷大北12气藏是在燕山运动和喜马拉雅运动近NS向的构造挤压背景下形成的背斜型气藏。大北12气藏白垩系巴什基奇克组致密砂岩的宏观裂缝以直立和高角度的裂缝为主,裂缝优势走向为近NS向。在岩性相同的条件下,构造裂缝密度随单层厚度增大而减小,且减小幅度也随之降低;在单层平均厚度相近的情况下,单井的构造裂缝密度与距断层距离呈良好的负相关;细砂岩中的裂缝密度最高,其次为粗砂岩和中砂岩,粉砂岩及以下粒度岩性的裂缝密度较低。

(2)大北12气藏巴什基奇克组致密砂岩发育3期构造裂缝,其中第2期、第3期有效裂缝分别形成于喜马拉雅中期、晚期,略早于天然气大规模充注成藏的时间,这是大北12气藏得以高效富集成藏的关键因素。

(3)构造裂缝特征、地质建模及产能数据综合反映出的规律为:大北12气藏背斜核部的构造裂缝密度低于翼部,但张开度和渗透率要高于翼部,因此背斜核部的单井产能一般要高于翼部,翼部可采用压裂措施提高产能。

(4)以单井裂缝数据、相似露头构造裂缝发育模式以及构造裂缝发育影响因素为约束条件,采用随机方法建立小尺度裂缝模型,并与利用地震蚂蚁体属性建立的大尺度裂缝模型叠加得到总裂缝模型,这是稀井网条件下致密砂岩油气藏裂缝建模行之有效的方法,可为裂缝性油气藏数值模拟提供良好的数据基础。同时,该方法所包含的思路和技术也适用于裂缝性碳酸盐岩、火成岩和变质岩类油气藏的裂缝地质建模,具有很好的普适性。

## 参 考 文 献

- [1] 戴金星,倪云燕,吴小奇.中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J].石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.  
DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Petroleum exploration and development, 2012, 39(3): 257-264.
- [2] 李建忠,郭彬程,郑民,等.中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(4):607-615.  
LI Jianzhong, GUO Bincheng, ZHENG Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China [J]. Natural gas geoscience, 2012, 23(4): 607-615.
- [3] 杨海军,张荣虎,杨宪彰,等.超深层致密砂岩构造裂缝特征及其对储层的改造作用:以塔里木盆地库车坳陷克深气田白垩系为例[J].天然气地球科学,2018,29(7):942-950.  
YANG Haijun, ZHANG Ronghu, YANG Xianzhang, et al. Characteristics and reservoir improvement effect of structural fracture in ultra-deep tight sandstone reservoir: a case study of Keshen Gas-field, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural gas geoscience, 2018, 29(7): 942-950.
- [4] 林承焰,李辉,马存飞,等.致密砂岩储层天然裂缝建模方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(5):21-33.  
LIN Chengyan, LI Hui, MA Cunfei, et al. Modeling method of natural fractures in tight sandstone reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2019, 43(5): 21-33.
- [5] 董少群,吕文雅,夏东领,等.致密砂岩储层多尺度裂缝三维地质建模方法[J].石油与天然气地质,2020,41(3):627-637.  
DONG Shaoqun, LÜ Wenya, XIA Dongling, et al. An approach to 3D geological modeling of multi-scaled fractures in tight sandstone reservoirs [J]. Oil & gas geology, 2020, 41(3): 627-637.
- [6] 朱光有,杨海军,张斌,等.塔里木盆地迪那2大型凝析气田的地质特征及其成藏机制[J].岩石学报,2012,28(8):2479-2492.  
ZHU Guangyou, YANG Haijun, ZHANG Bin, et al. The geological feature and origin of Dina 2 large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Acta petrologica sinica, 2012, 28(8): 2479-2492.
- [7] 杜金虎,田军,李国欣,等.库车坳陷秋里塔格构造带的战略突破与前景展望[J].中国石油勘探,2019,24(1):16-23.  
DU Jinhui, TIAN Jun, LI Guoxin, et al. Strategic breakthrough and prospect of Qiulitag structural belt in Kuqa Depression [J]. China petroleum exploration, 2019, 24(1): 16-23.
- [8] 杨海军,李勇,唐雁刚,等.塔里木盆地克拉苏盐下深层大气田的发现[J].新疆石油地质,2019,40(1):12-20.  
YANG Haijun, LI Yong, TANG Yangang, et al. Discovery of Kela-su subsalt deep large gas field, Tarim Basin [J]. Xinjiang petroleum geology, 2019, 40(1): 12-20.
- [9] 冯建伟,孙建芳,张亚军,等.塔里木盆地库车坳陷断层相关褶皱对裂缝发育的控制[J].石油与天然气地质,2020,41(3):543-557.  
FENG Jianwei, SUN Jianfang, ZHANG Yajun, et al. Control of

- fault-related folds on fracture development in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2020, 41(3): 543–557.
- [10] 史超群, 王佐涛, 朱文慧, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带大北地区超深储层裂缝特征及其对储层控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(12): 1687–1699.
- SHI Chaoqun, WANG Zuotao, ZHU Wenhui, et al. Fracture characteristic and its impact on reservoir quality of ultra-deep reservoir in Dabei region, Kelasu tectonic belt, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural gas geoscience*, 2020, 31(12): 1687–1699.
- [11] 王珂, 杨海军, 李勇, 等. 塔里木盆地库车坳陷北部构造带地质特征与勘探潜力[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 885–905.
- WANG Ke, YANG Haijun, LI Yong, et al. Geological characteristics and exploration potential of the northern tectonic belt of Kuqa Depression in Tarim Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 2021, 42(7): 885–905.
- [12] 王招明, 李勇, 谢会文, 等. 库车前陆盆地超深层大油气田形成的地质认识[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(1): 37–43.
- WANG Zhaoming, LI Yong, XIE Huiwen, et al. Geological understanding on the formation of large-scale ultra-deep oil-gas field in Kuqa foreland basin [J]. *China petroleum exploration*, 2016, 21(1): 37–43.
- [13] 刘春, 张荣虎, 张惠良, 等. 致密砂岩储层微孔隙成因类型及地质意义: 以库车前陆冲断带超深层储层为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(2): 150–159.
- LIU Chun, ZHANG Ronghu, ZHANG Huiliang, et al. Genetic types and geological significance of micro pores in tight sandstone reservoirs: a case study of the ultra-deep reservoir in the Kuqa foreland thrust belt, NW China [J]. *Acta petrolei sinica*, 2017, 38(2): 150–159.
- [14] 刘春, 张荣虎, 张惠良, 等. 库车前陆冲断带多尺度裂缝成因及其储集意义[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(3): 463–472.
- LIU Chun, ZHANG Ronghu, ZHANG Huiliang, et al. Genesis and reservoir significance of multi-scale natural fractures in Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum exploration and development*, 2017, 44(3): 463–472.
- [15] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 115–120.
- ZENG Lianbo. Formation and distribution of reservoir fractures in low-permeability sandstones [M]. Beijing: Science Press, 2008: 115–120.
- [16] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中生代构造应力场及其油气运聚效应[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2004, 34(增刊1): 98–106.
- ZENG Lianbo, TAN Chengxuan, ZHANG Mingli. Tectonic stress field and its effect on hydrocarbon migration and accumulation in Mesozoic and Cenozoic in the Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Science in China (series D: earth science)*, 2004, 34(S1): 98–106.
- [17] 郑淳方, 侯贵廷, 詹彦, 等. 库车坳陷新生代构造应力场恢复[J]. *地质通报*, 2016, 35(1): 130–139.
- ZHENG Chunfang, HOU Guiting, ZHAN Yan, et al. An analysis of Cenozoic tectonic stress fields in the Kuqa Depression [J]. *Geological bulletin of China*, 2016, 35(1): 130–139.
- [18] 袁静, 曹宇, 李际, 等. 库车坳陷迪那气田古近系裂缝发育的多样性与差异性[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(5): 840–850.
- YUAN Jing, CAO Yu, LI Ji, et al. Diversities and disparities of fracture systems in the Paleogene in DN gas field, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Oil & gas geology*, 2017, 38(5): 840–850.
- [19] 蒋有录, 李明阳, 王良军, 等. 川东北巴中—通南巴地区须家河组致密砂岩储层裂缝发育特征及控制因素[J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1525–1537.
- JIANG Youlu, LI Mingyang, WANG Liangjun, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoir fractures of the Xujiahe Formation in the Bazhong–Tongnanba area, Northeast Sichuan [J]. *Acta geologica sinica*, 2020, 94(5): 1525–1537.
- [20] 范存辉, 秦启荣, 李虎, 等. 四川盆地元坝中部断褶带须家河组储层构造裂缝形成期次[J]. *石油学报*, 2017, 38(10): 1135–1143.
- FAN Cunhui, QIN Qirong, LI Hu, et al. Formation stages of structural fractures of Xujiahe Formation in the fault-fold belt of central Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Acta petrolei sinica*, 2017, 38(10): 1135–1143.
- [21] 张月, 韩登林, 杨铖晔, 等. 超深层碎屑岩储层裂缝充填流体迁移规律: 以库车坳陷克深井区白垩系巴什基奇克组为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(3): 292–300.
- ZHANG Yue, HAN Denglin, YANG Chengye, et al. Migration law of fracture filling fluid in ultra-deep clastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiike Formation in Keshen well block, Kuqa Depression [J]. *Acta petrolei sinica*, 2020, 41(3): 292–300.
- [22] 高文杰, 李贤庆, 张光武, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带深层致密砂岩气藏储层致密化与成藏关系[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(2): 226–235.
- GAO Wenjie, LI Xianqing, ZHANG Guangwu, et al. The relationship research between densification of reservoir and accumulation of the deep tight sandstone gas reservoirs of the Kelasu tectonic zone in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural gas geoscience*, 2018, 29(2): 226–235.
- [23] 屈海洲, 张福祥, 王振宇, 等. 基于岩心-电成像测井的裂缝定量表征方法: 以库车坳陷ks2区块白垩系巴什基奇克组砂岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 425–432.
- QU Haizhou, ZHANG Fuxiang, WANG Zhenyu, et al. Quantitative fracture evaluation method based on core-image logging: a case study of Cretaceous Bashijiike Formation in ks2 well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum exploration and development*, 2016, 43(3): 425–432.



- [24] 王珂, 杨海军, 张惠良, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征与有效性: 以塔里木盆地库车坳陷克深8气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 719–729.
- WANG Ke, YANG Haijun, ZHANG Huiliang, et al. Characteris-

tics and effectiveness of structural fractures in ultra-deep tight sandstone reservoir: a case study of Keshen-8 gas pool in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Oil & gas geology, 2018, 39(4): 719–729.

编辑:董庸

## Characteristics and geological modeling of structural fractures in tight sandstone reservoir: taking Dabei-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin as an example

WANG Ke, ZHANG Ronghu, LI Baogang, WANG Junpeng, SONG Binghui,  
ZENG Qinglu, ZHANG Zhiyuan, HUANG Qingxuan

**Abstract:** The characterization and geological modeling are of great significance to exploration and development of fractured tight sandstone gas reservoir. Taking the Dabei-12 gas reservoir in Kuqa Depression of Tarim Basin as an example, the types and occurrence, influence factors and formation sequence of structural fractures were characterized based on core, rock thin section, imaging logging and other data. Then, the small scale and large scale fracture model of the Dabei-12 gas reservoir were established by stochastic and deterministic fracture modeling method respectively, and a total fracture model was established by superimposition of the two models. The results show that: (1) The Dabei-12 gas reservoir, an anticlinal gas reservoir which formed under the background of NS tectonic compression due to the Yanshanian movement and Himalayan movement, is located in the Bozi-Dabei area of Kelasu structural belt, Kuqa Depression. The target layer of the Dabei-12 gas reservoir is the tight sandstone of Lower Cretaceous Bashijiqike Formation. The macroscopic fractures in the Dabei-12 gas reservoir are mainly vertical or with high dip angle, and shearing and tensile fractures are both developed to some extent. The microscopic fractures can also connect matrix pores and therefore enhance the connectivity of reservoir. (2) Under the geological background of Dabei-12 gas reservoir, the development extent of structural fractures is related to average thickness of single layer in condition of same lithology, and distance to fault and lithology in condition of same or similar thickness of single layer. Taking fine sandstone in the Dabei-12 gas reservoir as an example, the density of structural fractures in fine sandstone decreases with the increase of thickness of single layer, and so does the decreasing amplitude. In condition of similar thickness of single layer, the density of structural fractures shows good negative correlation with the distance to faults. As to different lithology in the same condition, the fine sandstone has the highest density of structural fractures, the coarse sandstone and medium sandstone take the second place, while siltstone and finer lithology have low density. (3) There are 3 periods of structural fractures in the Dabei-12 gas reservoir, which are the Late Yanshanian period (Late Cretaceous–Paleogene), the Middle Himalayan period (Neogene Kancun period), and the Late Himalayan period (Neogene Kuqa period–Quaternary) respectively. The second and third period fractures formed at the Middle and Late Himalayan periods are the critical factor of efficient accumulation of natural gas. (4) The hinge of an anticlinal reservoir has structural fractures with low density but high aperture and permeability, and therefore has always high production. The wings of a faulted-anticlinal reservoir have structural fractures with high density but low aperture and permeability, and fracturing measures should be taken to improve production. This study can provide data foundation for the establishment of fracture property equivalent model and gas reservoir numerical simulation, and then serve for the development of gas reservoir.

**Key words:** tight sandstone gas reservoir; structural fracture; stochastic fracture modeling; deterministic fracture modeling; Kuqa Depression

**WANG Ke,** First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in characterization and geological modeling of structural fractures. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China