

超深层致密砂岩储层构造裂缝定量表征与分布预测 ——以塔里木盆地库车坳陷克深 5 气藏为例

王 珂^{1,2,3}, 张惠良³, 张荣虎³, 王俊鹏³, 孙雄伟², 杨学君²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000;
3. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘 要:综合采用岩芯及薄片观察、岩芯 CT 扫描及成像测井解释等方法,对塔里木盆地库车坳陷克深 5 气藏的构造裂缝进行了定量表征,在此基础上分析了构造裂缝的成因与有效性,并基于构造应力场数值模拟法对构造裂缝的空间分布规律进行了预测。结果表明:克深 5 气藏的构造裂缝以高角度和直立裂缝为主,岩芯裂缝开度为 0~0.4 mm,多被方解石充填,微观裂缝包括矿物颗粒的穿粒缝和破裂纹,开度为 20~30 μm ;单井纵向上具有构造裂缝密集发育段和不发育段相间分布的特征;克深 5 气藏主要发育白垩纪、古近纪和新近纪—第四纪 3 期构造裂缝,其中第 3 期构造裂缝是克深 5 区块工业规模气藏形成的关键因素之一;古构造应力场决定了构造裂缝的组系特征和数量,沿边界断层的左旋剪切应力造成了构造应力方位和构造裂缝走向由背斜西南部的近 EW 向过渡为东北部的近 SN 向;现今构造应力场不产生新的构造裂缝,但会降低先存裂缝的有效性;背斜高部位的构造裂缝线密度较低,但开度、孔隙度和渗透率等较高,单井平均天然气产能相应也较高,纵向上随深度增加,构造裂缝线密度增大而有效开度减小;不整合面对构造裂缝有效性的控制作用主要局限在距不整合面约为 70 m 的范围内。

关键词:致密砂岩;构造裂缝;构造应力场;定量表征;分布预测;超深层;库车坳陷;塔里木盆地
中图分类号:P618.130.2;TE122.2 **文献标志码:**A

Quantitative Characterization and Distribution Prediction of Structural Fracture in Ultra-deep Tight Sandstone Reservoir

—A Case Study of Keshen5 Gas Pool in Kuqa Depression of Tarim Basin

WANG Ke^{1,2,3}, ZHANG Hui-liang³, ZHANG Rong-hu³, WANG Jun-peng³,
SUN Xiong-wei², YANG Xue-jun²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;
2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, Xinjiang, China; 3. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: Combined with core and thin section observation, CT scan, image logging interpretation, the characteristics of structural fracture of Keshen5 gas pool in Kuqa depression of Tarim Basin were quantitatively characterized; the origin and validity of structural fracture were analyzed; and the spatial distribution regularity of structural fracture was predicted by numerical simulation of tectonic stress field. The results show that the structural fractures of Keshen5 gas pool are mostly high dip angle or upright ones and highly filled by calcite, in which the apertures

收稿日期:2017-06-29

基金项目:国家科技重大专项项目(2016ZX05003-001-002,2016ZX05001-002-003)

作者简介:王 珂(1987-),男,山东郓城人,中国石油杭州地质研究院工程师,理学博士,博士后,
E-mail: wangk_hz@petrochina.com.cn。

distribute at 0-0.4 mm; microscopic fractures, in which the apertures mostly distribute at 20-30 μm , include grain-crossed fracture and mineral grain crack; in vertical, intensively developed sections and undeveloped sections of structural fracture have the regularity of interphase distribution; there are three periods of structural fractures formed in Cretaceous, Paleogene and Neogene-Quaternary, respectively, in which the 3rd period of structural fracture is one of the key factors for industrial gas pool finally formed in Keshen5 area; palaeo-tectonic stress field determines the system characteristics and quantity of structural fractures, and the levorotatory shearing stress along boundary faults results in that the direction of tectonic stress and structural fractures changes from $\sim\text{EW}$ at southwest to $\sim\text{SN}$ at northwest of the anticline; present tectonic stress field generally would not form new fractures, but affects the effectiveness of pre-exist fractures; the high position of anticline has low linear density of structural fracture, but high aperture, porosity and permeability, therefore, the average gas production capacity of single well is also high correspondingly; in vertical, with the deepening of depth, the linear density of structural fracture increases while the effective aperture decreases, which means that the integrated development extent reduces; the controlling effect of unconformity on structural fracture validity is restricted within about 70 m.

Key words: tight sandstone; structural fracture; tectonic stress field; quantitative characterization; distribution prediction; ultra-deep; Kuqa depression; Tarim Basin

0 引言

在致密砂岩、碳酸盐岩、火成岩等低渗透储层中,构造裂缝是改善储层物性、提高油气产能的重要因素^[1-9]。中国东、西部诸多裂缝性砂岩油气藏的勘探开发实践表明,构造裂缝对于提高致密砂岩储层孔隙度贡献较小(一般低于0.5%),但可以使储层渗透率呈数量级式的增大(1~3个数量级,甚至更高)^[10-17],这表明构造裂缝对油气开发具有重要影响,因此,构造裂缝的相关研究受到国内外地质学家的普遍重视,学者们从不同角度探讨了构造裂缝的成因机理、分布规律及其在油气开发中的应用^[18-27]。

随着中国油气勘探领域向深部拓展,深层—超深层低渗透储层构造裂缝逐渐成为研究热点^[28]。巩磊等对比了南襄盆地安棚油田中浅层与深层构造裂缝特征,认为中浅层和深层构造裂缝具有相同的成因类型、分布特征、控制因素和发育规律,但深层构造裂缝发育程度要高于中浅层,古构造应力场控制了构造裂缝的成因类型、组系、产状及力学性质,储层岩性、物性、层厚等储层内部因素影响不同组系和层位构造裂缝的发育程度^[29];王俊鹏等对库车坳陷克深2气藏白垩系超深层致密砂岩储层构造裂缝进行了研究,认为构造裂缝主要受古构造应力控制,同时还受到地层原始岩性组构、岩层厚度和埋藏深度等因素影响,构造裂缝对储层次生溶蚀改造起到

了渗流通道的作用,高渗流区主要分布在背斜高部位和断层附近^[14,30-31];王振宇等分析了库车坳陷大北气田深层白垩系致密砂岩储层构造裂缝分布规律及其对产能的影响,认为构造裂缝对渗透率的提升有2~4个数量级,并且构造裂缝开度是产能的必要非充分条件,在后期开发过程中通过酸压改造可使充填缝和闭合缝重新开启,从而提高单井产能^[32]。

构造裂缝的分布预测主要包括曲率法、分形分维法、地震属性法和构造应力场数值模拟法等。曲率法多适用于因地层弯曲形成的纵张裂缝预测,对剪切裂缝的预测效果较差^[33];分形分维法要求研究区的次级断层较发育,一方面受控于研究区本身的断层发育情况,另一方面受控于地震资料的品质和解释精度^[34];地震属性法理论上可以较好地预测构造裂缝的空间分布,但同样受控于地震资料的品质^[35];构造应力场数值模拟法是从构造裂缝的成因机制出发而发展起来的一种方法,其主要步骤是通过建立研究区的有限元地质模型,结合区域构造背景确定边界约束条件和应力载荷,进行构造应力场的数值模拟,然后根据库伦-莫尔剪切破裂准则和格里菲斯张性破裂准则,以单井实测数据为约束,建立构造裂缝参数与构造应力之间的关系式,进而利用该关系式对构造裂缝的空间分布进行预测^[3]。通过在中国东、西部多个油气田的应用表明,构造应力场数值模拟法是目前预测构造裂缝空间分布的一种有

效方法^[36-41]。

克深 5 气藏是塔里木盆地库车坳陷大北(大宛齐北)—克深(克拉苏盐下深层)地区继大北气田和克深 2 气藏之后的又一重点勘探领域,具有埋深大、储层基质物性差、构造裂缝发育的特点。为了提高开发井的部署成功率,并为开发方案的制定与调整提供地质依据,有必要对该气藏的构造裂缝进行定量表征与分布预测。克深 5 气藏所在的大北—克深地区为南天山造山带向南推覆形成的叠瓦冲断构造,自中生代以来经历了多期构造运动,构造裂缝的成因和空间分布复杂,而针对此种构造背景下的构造裂缝特征尚无较系统的研究和较成熟的认识,不宜直接利用背斜型油气藏的已有经验或模式分析构造裂缝的成因、有效性和空间分布规律。因此,本文在以岩芯、薄片、成像测井为基础进行构造裂缝定量表征的基础上,分析克深 5 气藏构造裂缝的成因机

制与有效性,并基于构造应力场数值模拟法对构造裂缝的分布进行预测,探索构造裂缝的空间分布规律,以期对该气藏的勘探开发提供一定地质依据,同时为其他相似构造背景下的油气藏构造裂缝研究提供参考。

1 区域地质背景

克深 5 气藏位于塔里木盆地库车坳陷克拉苏—依奇克里克构造带的中西部,是大北—克深地区继大北气田和克深 2 气藏之后新发现的盐下超深层千亿立方级大型天然气藏。克深 5 气藏是连接克深区带大北段和克深段的纽带(图 1),其构造形态简单,是一个整体呈 NE70°—SW250°走向的长轴背斜,南、北两侧被 2 条 NW 倾向的区域性断裂切割(图 2),其形成与演化主要受控于中生代燕山运动和新生代喜马拉雅运动。

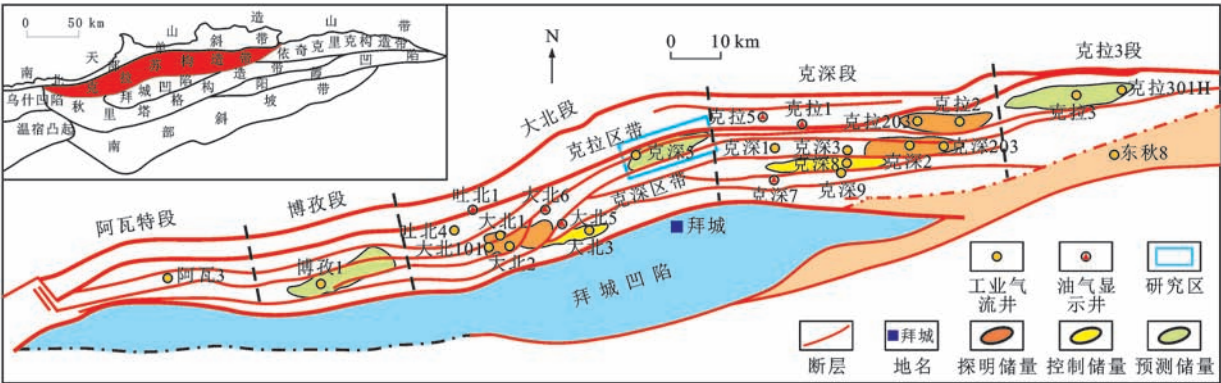


图 1 塔里木盆地库车坳陷克深 5 气藏构造位置

Fig. 1 Tectonic Location of Keshen5 Gas Pool in Kuqa Depression of Tarim Basin

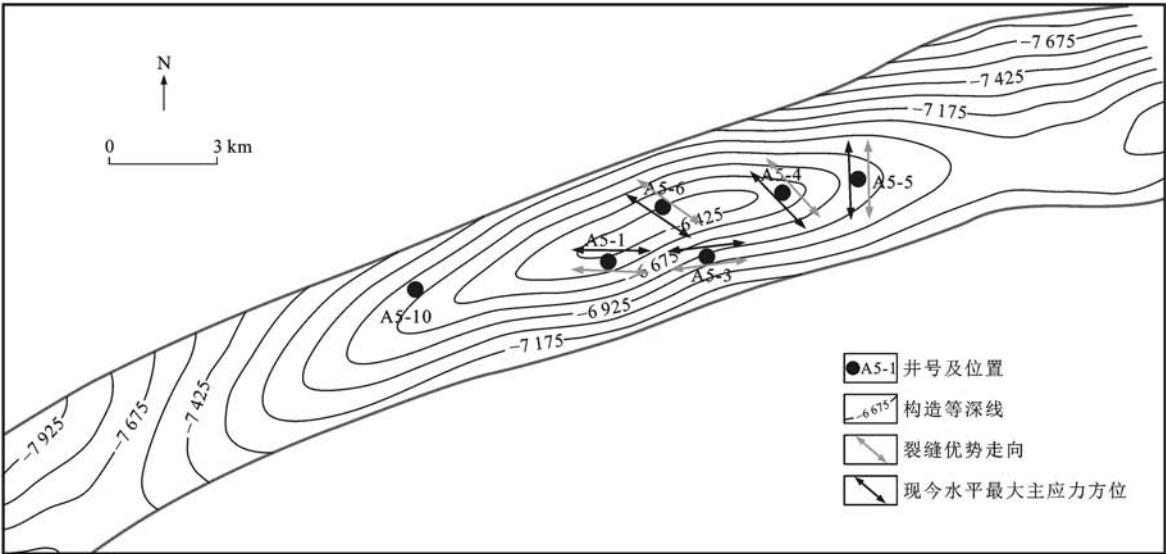


图 2 克深 5 气藏构造形态

Fig. 2 Structural Configuration of Keshen5 Gas Pool

克深5气藏钻遇地层自上而下依次为第四系(Q),新近系库车组(N_2k)、康村组($N_{1-2}k$)、吉迪克组(N_{1j}),古近系苏维依组($E_{2-3}s$)、库姆格列木群($E_{1-2}km$)和下白垩统巴什基奇克组(K_1bs),部分井钻至下白垩统巴西改组(K_1bx)。勘探目的层系为下白垩统巴什基奇克组,埋深超过6200 m,最深约8000 m。研究区侏罗系一下白垩统为连续沉积,晚白垩世的构造抬升剥蚀使研究区普遍缺失上白垩统,下白垩统也遭受一定程度的剥蚀^[42],造成下白垩统巴什基奇克组与上覆地层古近系库姆格列木群呈角度不整合接触,与下伏地层下白垩统巴西改组呈整合接触。下白垩统巴什基奇克组储层的主要岩性为粉—细砂岩、泥质粉—细砂岩和薄层泥岩的互层,总厚度约为240 m,自上而下可划分为巴一段、巴二段和巴三段3个岩性段,其中巴一段和巴二段为辫状河三角洲前缘沉积,巴三段为扇三角洲前缘沉积。岩芯物性测试表明,储层基质孔隙度为0.5%~7.0%,平均约为3.0%,基质渗透率为0.0025~0.0500 mD,平均约为0.0180 mD,属于典型的超深层低孔致密砂岩储层。岩芯、成像测井及开发数据均表明,克深5气藏的构造裂缝十分发育。全直径岩芯物性测试数据显示,含裂缝岩样的渗透率最高可达36.0 mD,与基质渗透率相比提高了3.4个数量级,表明构造裂缝对克深5气藏天然气的开发具有重要影响。

2 构造裂缝特征与形成时期

2.1 类型与特征

岩芯观察结果表明,克深5气藏的构造裂缝以高角度缝和直立缝为主[图3(a)~(c)],部分取芯段发育密集的网状裂缝[图3(d)]。构造裂缝主要发育在粉砂岩和细砂岩中,泥岩中的构造裂缝发育程度较低,在砂泥岩界面处可见砂岩裂缝终止于界面[图3(c)]。构造裂缝开度不均,一般分布在0~0.4 mm,少数可在1.0 mm以上。构造裂缝的整体充填程度较高,多数为方解石完全充填或半充填,仅部分直立缝未被充填。根据充填程度与构造裂缝形成时期的一般规律^[43-45],结合区域构造应力场演化特征^[46-47],认为充填程度较高的构造裂缝通常为早期(白垩纪—古近纪)形成,而未被充填的构造裂缝应为晚期(新近纪库车期—第四纪西域期)形成。

微观裂缝主要包括2种类型:一种是切穿多个矿物颗粒的穿粒缝[图3(e)],反映构造应力作用一般较强;另一种是矿物颗粒破裂纹[图3(f)],局限

于矿物颗粒内部,终止于矿物边缘,反映构造应力作用较弱,可能形成于上覆岩层重力或水平构造应力产生的局部破裂作用^[48]。微观裂缝开度也不均一,从几微米到几十微米均有出现,但多数集中在20~30 μm 。

2.2 单井纵向分布

从成像测井解释结果来看,构造裂缝在纵向上呈现密集发育段和不发育段相间分布的特点。以A5-1井为例(图4),该井可划分出5个构造裂缝密集发育段,间距为15.0~25.0 m,平均为18.5 m,构造裂缝线密度为0.32~0.47 条 $\cdot\text{m}^{-1}$,平均为0.37 条 $\cdot\text{m}^{-1}$ 。

构造裂缝的这种相间发育特征不仅表现在纵向(剖面)上,也表现在横向(平面)上。从库车地区索罕露头区下白垩统巴什基奇克组建模IV砂体构造裂缝发育模式(图5)来看,构造裂缝呈现出网状密集带和栅状稀疏带相间分布的特征,网状密集带的构造裂缝平均长度小、间距小、密度大,发育一定数量的穿层裂缝,栅状稀疏带的构造裂缝平均长度大、间距大、密度小,穿层裂缝比例略大于网状密集带。

综上所述,构造裂缝在储层三维空间内可能具有密集发育区和相对欠发育区相间分布的特征。其成因可能是岩石在某处受力形成大量裂缝以后,在一定范围内形成应力释放区,造成在该应力释放区附近一定距离内的岩石中裂缝相对欠发育;另一种观点认为,这可能与构造应力的“纵波传递效应”有关,构造应力从造山带向盆地方向以及纵向上并不是呈简单线性变化,而是呈现出高应力区和低应力区交替的规律^[49-50]。上述观点目前只是推测,构造裂缝的这种疏密相间分布特征是否普遍存在,其力学成因机制如何以及受何种因素控制,还需要在大量钻井资料、野外露头构造裂缝数据和岩石力学实验的基础上开展进一步研究。

另外,从成像测井解释结果可得到构造裂缝的优势走向(图2)。构造裂缝优势走向整体上由背斜西南部的近EW向顺时针过渡为背斜东北部的近SN向,这一分布特征主要受古构造应力场的控制。

2.3 形成时期

构造裂缝形成时期的确定可采用构造裂缝的切割关系、充填物成分与充填程度、充填物包裹体测温、充填物碳氧同位素测定、石英ESR测年、岩石声发射实验等方法^[44,51-54],本文主要采用构造裂缝充填物碳氧同位素测定,结合构造演化史确定克深5气藏构造裂缝的形成时期。

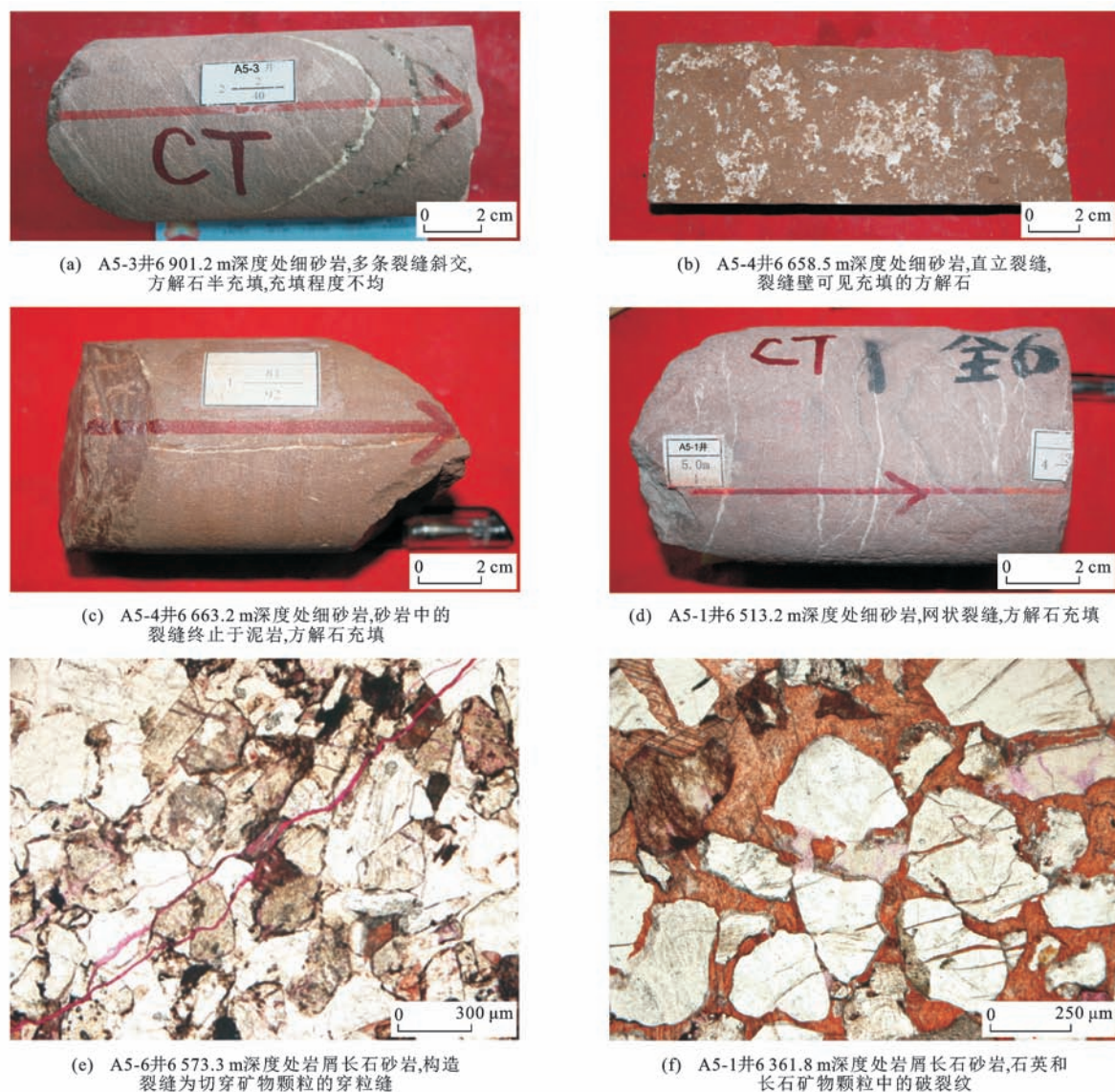


图3 克深5气藏构造裂缝及显微照片

Fig. 3 Photomicrographs and Structural Fractures of Keshen5 Gas Pool

当构造裂缝形成以后,矿化地层水侵入裂缝并在裂缝壁上沉淀出方解石等结晶矿物,这些矿物中的氧同位素值($\delta^{18}\text{O}$)可指示其形成时的温度和水介质条件,根据其形成温度,并结合单井沉积埋藏史,便可确定构造裂缝的形成时期。依据氧同位素测定形成温度的方程为^[51,54]

$$t = 31.9 - 5.55(\delta_0 - \delta_w) + 0.7(\delta_0 - \delta_w)^2 \quad (1)$$

式中: t 为方解石充填物形成时的温度; δ_0 为方解石充填物氧同位素值; δ_w 为方解石充填物形成时的水介质氧同位素值。

在克深5气藏选取6个样品进行构造裂缝方解石充填物碳氧同位素测定(表1),结果显示大部分样品的形成温度在85.0℃~95.0℃之间,少数样品的形成温度为38.2℃,结合单井沉积埋藏史

(图6),笔者认为大部分构造裂缝应形成于古近纪早期,少数形成于白垩纪晚期。需要注意的是,由于部分构造裂缝未被充填,无法进行充填物碳氧同位素测定,所以这些构造裂缝的形成时期需参考区域构造演化史来确定。构造演化史表明库车地区自白垩纪以来共经历了4次主要的构造运动,即燕山晚期运动(白垩纪)、喜马拉雅早期运动(古近纪—新近纪)、喜马拉雅中期运动(新近纪)和喜马拉雅晚期运动(新近纪—第四纪)^[55-57],其中由碳氧同位素确定的两期构造裂缝大致与前两期构造运动相对应。未充填的构造裂缝一般形成较晚,往往切割早期充填裂缝或沿早期充填裂缝延伸(图7),因此,未充填的构造裂缝很可能就是喜马拉雅中期和晚期运动作用下的产物,这两期构造运动所处的地质时期较为接

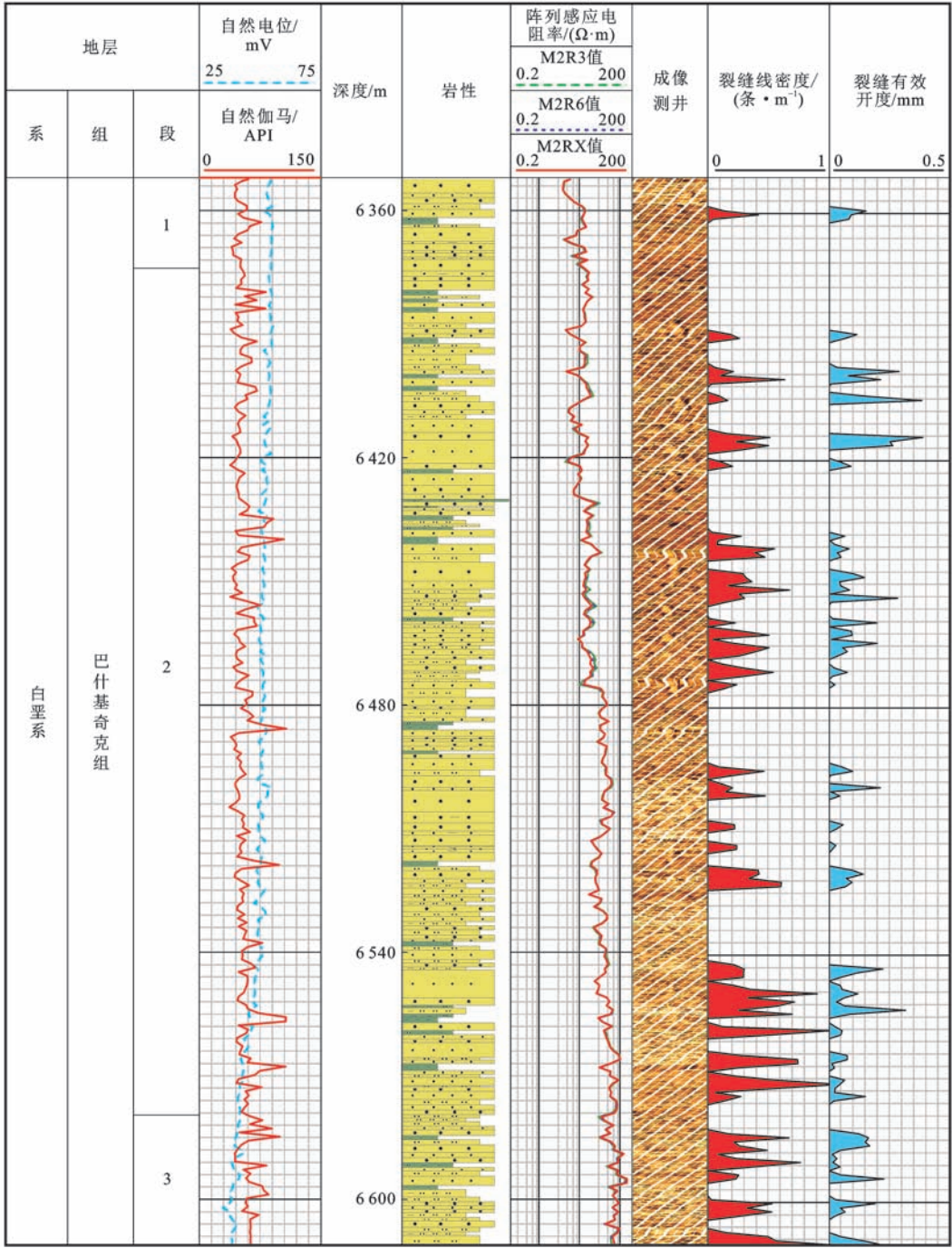


图 4 A5-1 井下白垩统巴什基奇克组构造裂缝发育柱状图
Fig. 4 Structural Fracture Development of K₁bs in Well A5-1

近,因而在此构造运动背景下形成的构造裂缝可划分为一期。

综上所述,克深 5 气藏主要发育 3 期构造裂缝,分别为白垩纪形成的第 1 期、古近纪形成的第 2 期和新近纪—第四纪形成的第 3 期构造裂缝,其中前两期构造裂缝充填程度较高,有效性较差,而第 3 期构造裂缝基本未被充填,有效性好,是储层中主要的渗流通道,并且其形成时期与主要的天然气充注成

藏期吻合^[58-59],是克深 5 区块工业规模气藏形成的关键因素之一。

3 构造裂缝预测模型与力学建模

3.1 定量预测模型

现今所观察到的构造裂缝通常是在古构造应力场作用下形成的。古构造应力场的应力方位决定了构造裂缝的组系特征,同时现今构造应力场一般不

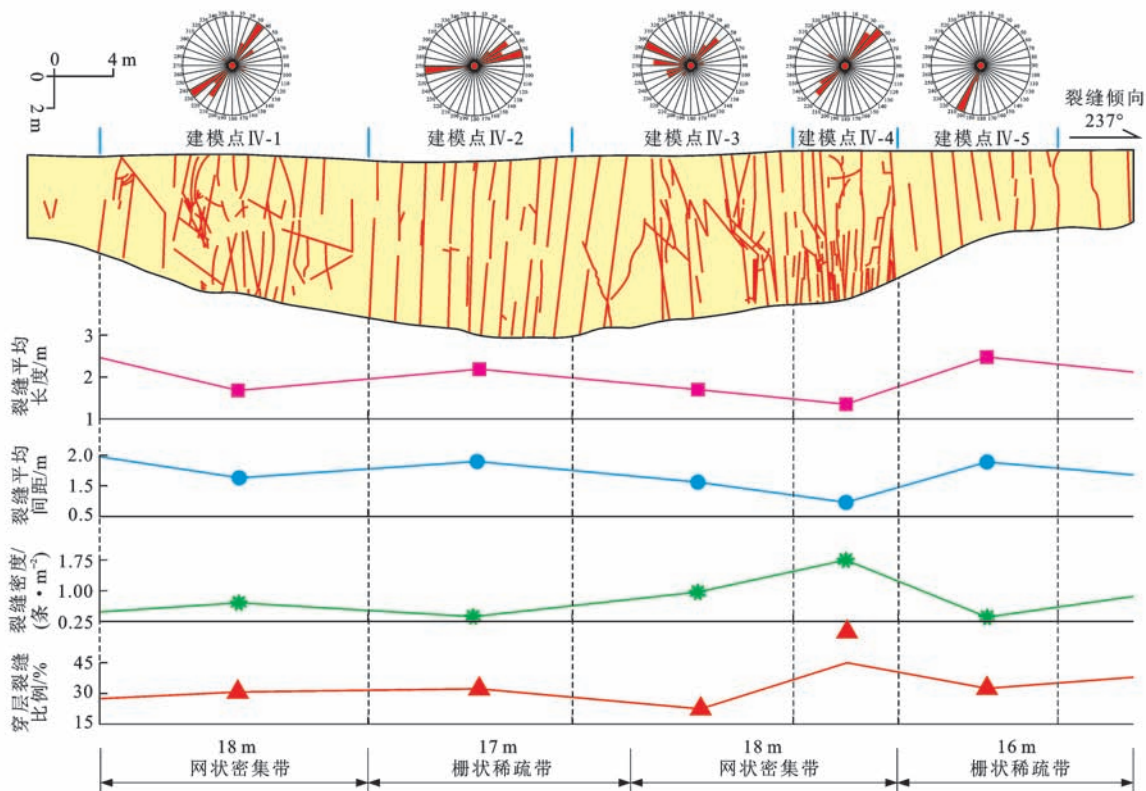


图5 库车地区索罕露头区下白垩统巴什基奇克组建模Ⅳ砂体构造裂缝发育模式

Fig. 5 Development Pattern of Structural Fracture in Ⅳ Modeling Sand Body of K₁bs of Suohan Outcrop in Kuqa Area

表1 克深5气藏构造裂缝方解石充填物
碳氧同位素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of C-O Isotope in Calcite Fillings of
Structural Fracture in Keshen5 Gas Pool

井号	深度/ m	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ 值/ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ 值/ ‰	形成 温度/℃	地质 时期
A5-1	6 369.1	褐色中砂岩	-2.62	-14.11	91.9	古近纪
A5-1	6 513.2	细砂岩	-2.60	-14.24	93.8	古近纪
A5-1	6 516.4	褐色细砂岩	-2.50	-14.23	93.6	古近纪
A5-3	6 901.0	细砂岩	0.16	-9.01	38.2	白垩纪
A5-4	6 658.5	细砂岩	-2.28	-13.66	85.7	古近纪
A5-6	6 572.0	细砂岩	-1.32	-13.82	87.9	古近纪

注： $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都是参照国际标准 V-PDB 计算的。

再大量产生新裂缝^[3]，因此，古构造应力大小基本决定了构造裂缝的数量。

克深5气藏构造裂缝的优势走向表现为由背斜西南部的近EW向过渡为东北部的近SN向(图2)。这一分布规律有2种可能的成因：一种是古构造应力场本身的复杂性导致了构造裂缝走向的差异；另一种是古构造应力方位相对单一，但在不同地质时期发生了偏转，从而形成了不同走向的构造裂缝。库车地区中生代以来的构造应力场具有较好的

继承性^[56-57]，因此，现今构造应力场特征可以在一定程度上反映裂缝形成时期古构造应力场的特征。从现今构造应力场的应力方位(采用钻井诱导缝走向和井壁崩落方位确定)分布来看(图2)，水平最大应力的方位与构造裂缝的走向基本一致，在不同部位也具有明显差异性，即不同方向的水平最大主应力是同时存在的，而非不同地质时期的应力偏转造成的，因此，构造裂缝走向分布具有明显差异性的成因应属于第一种，即古构造应力场本身的复杂性造成了构造裂缝优势走向的分布差异。

从克深5气藏所处的构造位置来看(图1)，其恰好处于克深区块和博孜一大北区块的连接处，具有部分构造调节带的性质，因此，该气田除受到NNW—SSE向的最大挤压构造应力外，还可能受到沿边界断层的左旋剪切应力作用，使构造应力场复杂化，从而导致不同部位的构造裂缝走向出现明显差异^[46]。

从定量的角度来看，构造裂缝密度与古构造应力场具有一定的数学关系。冯建伟等通过建立表征单元体裂缝模型，结合岩石破裂准则，利用岩石力学中的表面能和应变能相关理论，推导出在三向挤压构造应力状态下的构造裂缝体积密度和线密度的求

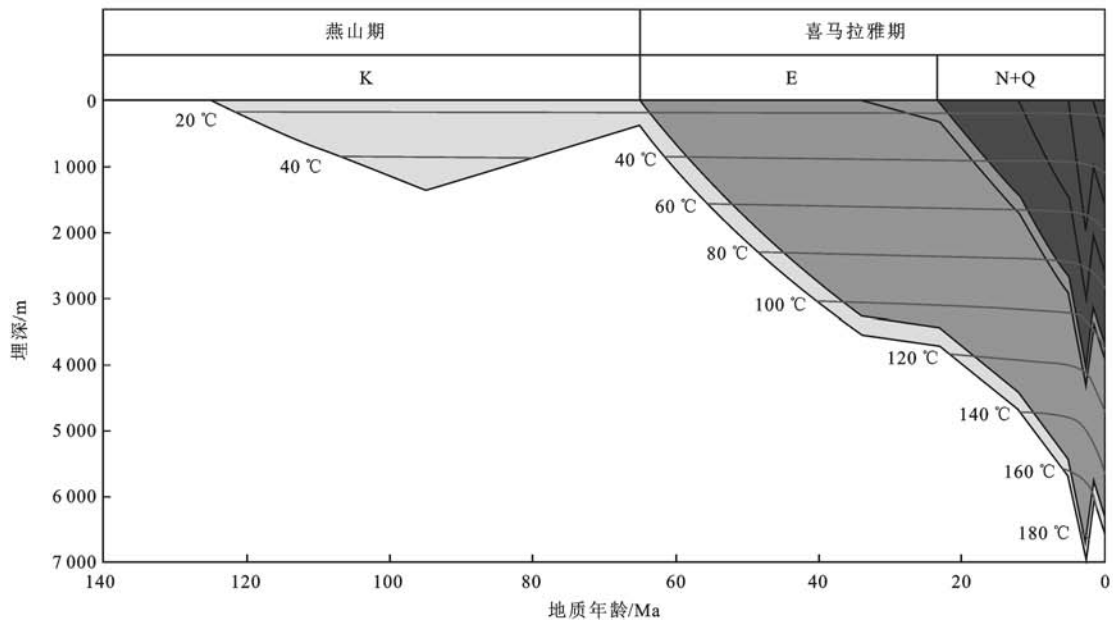
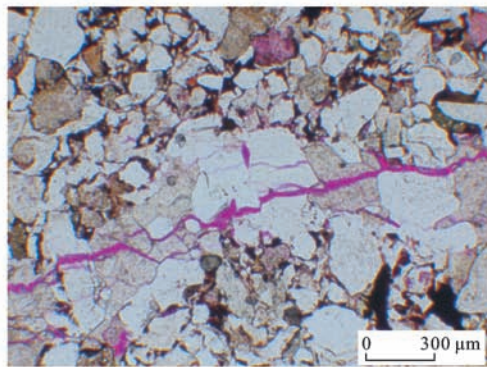


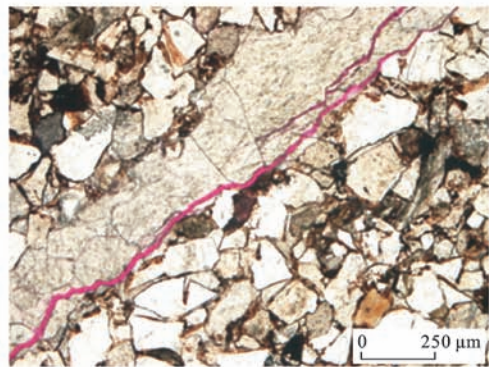
图 6 A5-1 井下白垩统巴什基奇克组储层埋藏史
Fig. 6 Reservoir Burial History of K_1bs in Well A5-1



(a) A5-1井6 506.5 m深度处细砂岩,晚期未充填裂缝切割早期充填裂缝



(b) A5-1井6 506.0 m深度处岩屑长石砂岩,后期开启构造裂缝沿早期充填裂缝延伸



(c) A5-6井6 567.7 m深度处岩屑长石砂岩,后期开启构造裂缝沿早期充填裂缝延伸

图 7 克深 5 气藏构造裂缝切割关系

Fig. 7 Cutting Relationship of Structural Fractures in Keshen5 Gas Pool

解方程组^[39,60]。该方程组为

$$\begin{cases} D_{vf} = \frac{\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_2 \epsilon_2 + \sigma_3 \epsilon_3 - 0.5 \sigma_d^2 - \mu \sigma_d (\sigma_2 + \sigma_3)}{2E [J_0 + \sigma_3 (|\epsilon| - |\epsilon_0|) / D_{lf}]} \\ D_{lf} = \frac{2D_{vf} L_1 L_3 \sin \theta \cos \theta - L_1 \sin \theta - L_3 \cos \theta}{L_1^2 \sin^2 \theta + L_3^2 \cos^2 \theta} \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_{vf} 为构造裂缝体积密度; D_{lf} 为构造裂缝线密度; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大、中间和最小有效主应力; ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 分别为最大、中间和最小主应变; σ_d 为产生前兆微裂缝时的单轴压缩应力值; μ 为岩石泊松比; E 为杨氏弹性模量; J_0 为零围压下的裂缝表面能;

ϵ 为当前应力状态下的最大张应变; ϵ_0 为最大弹性张应变; L_1 、 L_3 分别为沿 σ_1 、 σ_3 方向的表征单元体长度; θ 为岩石破裂角。

新构造期的构造应力作用相对较弱,在中国大陆板块内部没有发生强烈的构造变形^[3],因此,在现今构造应力条件下,主应力值及应力差一般相对古构造应力场较小。根据岩石破裂的库伦-摩尔剪切破裂准则或格里菲斯张性破裂准则,地层岩石一般不会发生明显的宏观破裂,同时在已形成的构造裂缝处还存在应力释放作用,因此,一般认为在不发生强烈构造运动的前提下,现今构造应力场不再产生新的构造裂缝,即构造裂缝密度基本不变^[3]。

尽管现今构造应力场不改变构造裂缝密度,但会对先存构造裂缝的有效性产生影响。由于应力挤压作用,已有的构造裂缝会出现一定程度的闭合,使裂缝开度减小,渗流性能降低。现今构造应力场改造作用下的构造裂缝参数计算模型为^[39,60]

$$\begin{cases} b_m = b(1-C)/(1+9\sigma'_n/\sigma_{nref}) \\ b = (|\epsilon| - |\epsilon_0|)/D_{lf} \\ \varphi = b_m D_{vf} \\ [K_X, K_Y, K_Z] = b_m^3 D_{lf} [\cos^2\theta, 1, \sin^2\theta]/12 \end{cases} \quad (3)$$

式中: b_m 为现今构造应力场作用下的构造裂缝开度; b 为古构造应力场作用下的构造裂缝初始开度; C 为构造裂缝充填系数,在 0~1 之间; σ'_n 为作用在裂缝面上的现今有效正应力; σ_{nref} 为使构造裂缝开度降低 90% 的有效正应力,对于低渗透致密砂岩,一般取 30 MPa; φ 为构造裂缝孔隙度; K_X 、 K_Y 、 K_Z 分别为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方向上的构造裂缝渗透率。

3.2 力学建模

首先依据构造数据,利用 ANSYS 有限元软件建立克深 5 气藏下白垩统巴什基奇克组的地质模型,然后将表 2 所示的岩石力学参数加载到地质模型中并划分网格,将应力边界条件施加到网格化的地质模型上,从而完成力学模型的建立。

对于岩石力学参数的获取,首先利用测井资料,采用式(4)计算出单井动态岩石力学参数^[61],然后根据动静态校正公式(式(5)),计算出可用于数值模拟的静态岩石力学参数^[62]。在利用式(6)计算出单井现今构造应力后^[63],通过数值模拟反演,确定现今构造应力场数值模拟的边界应力载荷。对于古构造应力载荷,由于通常所用的声发射法确定的古构造应力仅是地质历史时期中经受的最高应力值,而构造裂缝的形成是古构造应力与时间共同作用的结果,所以声发射法确定的古构造应力不能直接用于

构造裂缝的数值模拟,须引入等效古构造应力的概念^[64]。基于古构造应力场和现今构造应力场下构造裂缝密度基本不变这一假设^[3],结合区域构造应力场背景,通过不断反演确定一组等效古构造应力,使采用式(2)计算出的构造裂缝线密度与现今单井实测值基本一致,将这组等效古构造应力作为古构造应力场数值模拟的应力边界载荷。

$$\begin{cases} E_d = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \cdot \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \\ \mu_d = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \\ C_d = 0.00544\rho_b^2 \left(\frac{1+\mu_d}{1-\mu_d} \right)^2 (1-2\mu_d) \cdot \\ \quad (1+0.78V_{sh})/\Delta t_p^4 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} E_s = 0.8762E_d - 12.963 \\ \mu_s \approx \mu_d \\ C_s = 2.61C_d \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_h = \sigma_x + \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_v + \frac{1-2\mu}{1-\mu}P_p \\ \sigma_v = \int_0^Z \rho(Z)g dZ \\ \sigma_H = \sigma_y + \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_v + \frac{1-2\mu}{1-\mu}P_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_d 为动态杨氏弹性模量; μ_d 为动态泊松比; C_d 为动态抗剪强度; V_{sh} 为泥质质量分数; ρ_b 为岩石密度; Δt_p 和 Δt_s 分别为纵波时差和横波时差; E_s 为静态杨氏弹性模量; μ_s 为静态泊松比; C_s 为静态抗剪强度; σ_h 、 σ_v 和 σ_H 分别为水平最小主应力、垂向主应力和水平最大主应力; σ_x 和 σ_y 分别为 x 方向和 y 方向上的构造应力分量; μ 为地层泊松比; P_p 为地层压力; Z 为地层深度; $\rho(Z)$ 为上覆岩层密度,是与地层深度 Z 有关的函数; g 为重力加速度。

克深 5 气藏古构造应力场和现今构造应力场具有很好的继承性,因此,水平最大主应力的方位取各井测井解释的平均值,均设定为 NNW339°。水平最大主应力来自于南天山的推覆挤压,因此,在模型的东南边界施加 NNW339°—SSE159°的位移约束,在西北边界施加水平最大主应力,在底部边界施加垂直方向的位移约束。上覆岩层重力可根据储层埋藏史(图 6),通过设定模型埋深、岩石密度和重力加速度($9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),由软件自动施加;其他边界设定为自由边界,并施加水平最小主应力(表 2)。

4 构造裂缝空间分布规律

将建立的力学模型在 ANSYS 软件中进行运算求解,进行古构造应力场及现今构造应力场的数值

表 2 岩石力学参数与应力边界条件

Tab. 2 Rock Mechanical Parameters and Stress Boundary Conditions

类别	岩石力学参数			位移约束			应力载荷		
	杨氏弹性模量	泊松比	抗剪强度	底部边界	南东边界	其他边界	顶部边界	西北边界	东北、西南边界
古构造应力场数值模拟	30.7 GPa	0.25	116.1 MPa	垂直方向	NNW339°—SSE159°方向	无	上覆岩层重力	670 MPa	42 MPa
现今构造应力场数值模拟								171 MPa	145 MPa

模拟,然后根据构造裂缝定量预测模型[式(2)、(3)],对构造裂缝的空间分布进行数值模拟预测。

4.1 平面分布规律

克深 5 气藏构造裂缝的平面预测结果见图 8。将成像测井解释与数值模拟得到的构造裂缝线密度对比后发现(表 3),除 A5-4 井偏差值(0.13 条·m⁻¹)较大外,其余井的偏差值均小于 0.1 条·m⁻¹,表明数值模拟结果与成像测井解释结果具有较好的一致性。背斜高点(A5-6、A5-4 井)的构造裂缝线密度虽然较低,但裂缝开度、孔隙度和渗透率等物性参数较高,平均米产气指数可达 763 m³·d⁻¹·m⁻¹·MPa⁻¹;而背斜翼部构造裂缝线密度虽然较高,但裂缝开度、孔隙度和渗透率均较低,其中 A5-1、A5-3、A5-5 井平均米产气指数约为 240 m³·d⁻¹·m⁻¹·MPa⁻¹,A5-10 井仅约为 32 m³·d⁻¹·m⁻¹·MPa⁻¹(图 8)。构造裂缝的平面数值模拟结果与成像测井解释结果

以及单井产能对应较好,可以在一定程度上反映构造裂缝的实际分布规律。因此,根据图 8 所反映出的构造裂缝分布特征,认为在 A5-6 井和 A5-4 井附近区域进行开发井位部署,有较大概率获得高产天然气。

表 3 构造裂缝线密度成像测井解释与数值模拟结果对比

Tab. 3 Comparison of Structure Fracture Density by Image Logging and Numerical Simulation

井号	成像测井解释构造裂缝线密度/(条·m ⁻¹)	数值模拟构造裂缝线密度/(条·m ⁻¹)	偏差值/(条·m ⁻¹)
A5-1	0.40	0.44	0.04
A5-3	0.53	0.47	0.06
A5-4	0.29	0.42	0.13
A5-5	0.38	0.45	0.07
A5-6	0.40	0.43	0.03

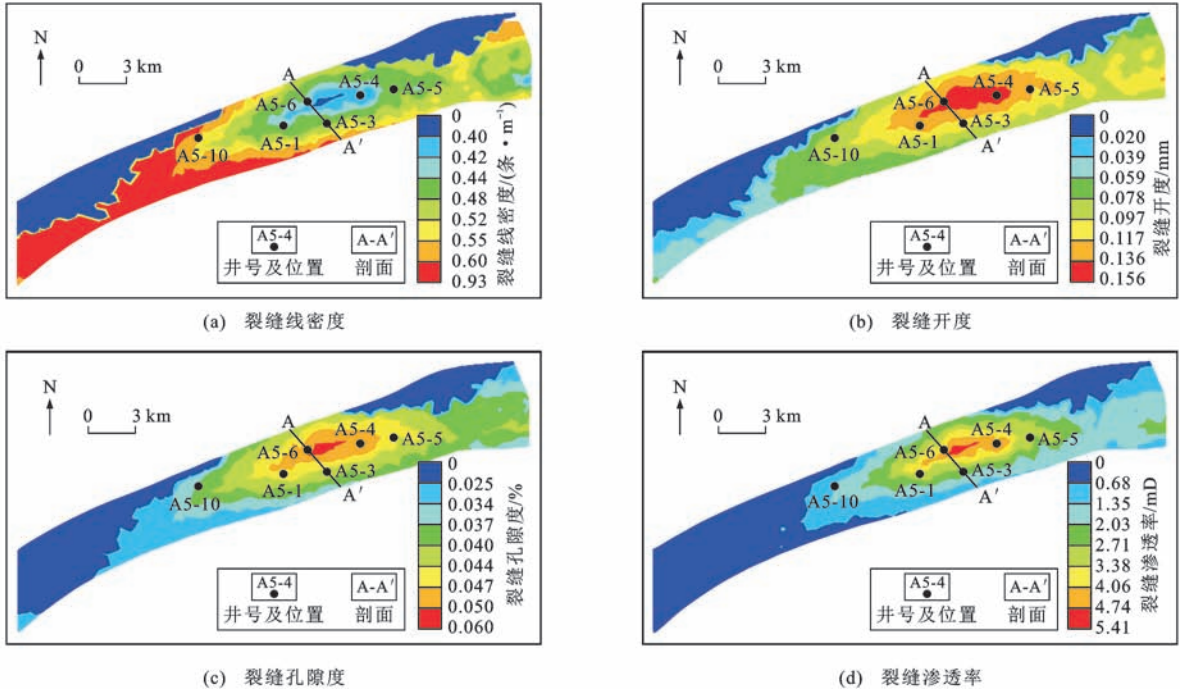
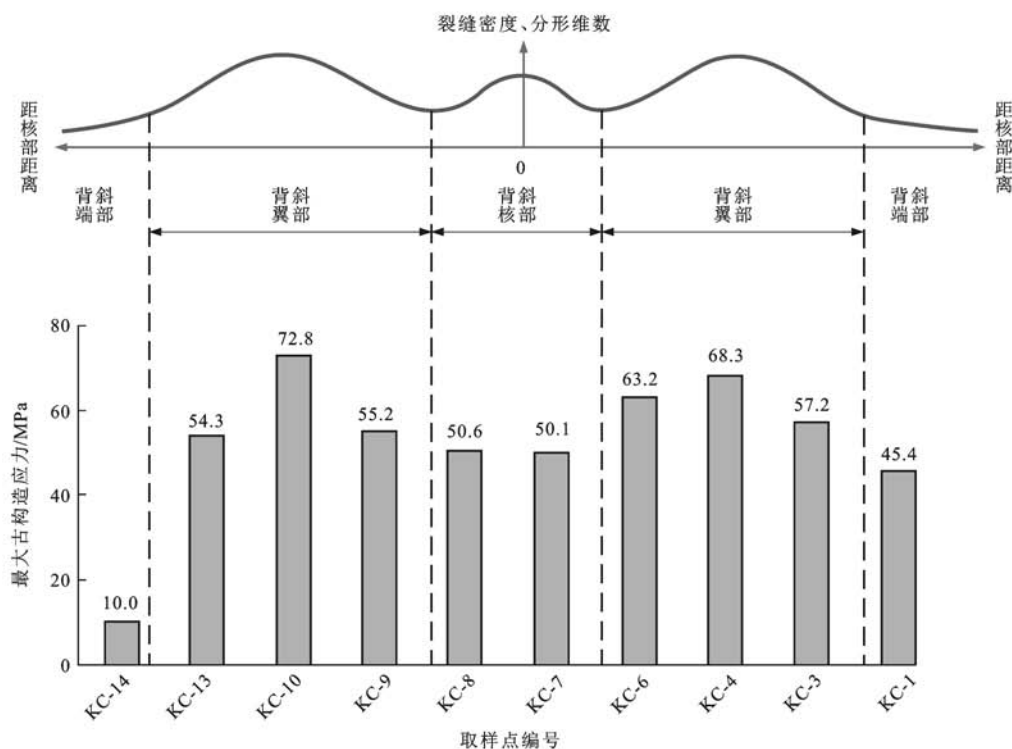


图 8 克深 5 气藏构造裂缝平面预测结果

Fig. 8 Planar Prediction Results of Structural Fracture in Keshen5 Gas Pool

对于背斜型油气藏,由于核部弯曲变形最强,所以构造裂缝密度也最大^[65]。但从野外露头的构造裂缝实测、古构造应力声发射实验结果以及构造应力场和构造裂缝的数值模拟结果^[28,30-31]来看,在库车前陆冲断带上发育的包括克深5气藏在内的逆冲推覆背斜构造几乎均具有核部应力低、构造裂缝密

度小,翼部应力高、构造裂缝密度大的特征(图9),表明在前陆挤压逆冲推覆构造背景下的背斜构造裂缝分布规律与一般的背斜有较大差异,不宜直接采用经典的背斜构造裂缝发育模式分析构造裂缝的分布,而需要有针对性地系统开展此种构造背景下的构造裂缝地质建模,以便更好地指导油气勘探。



图件引自文献[39]

图9 库车前陆冲断带逆冲推覆背斜构造裂缝模型

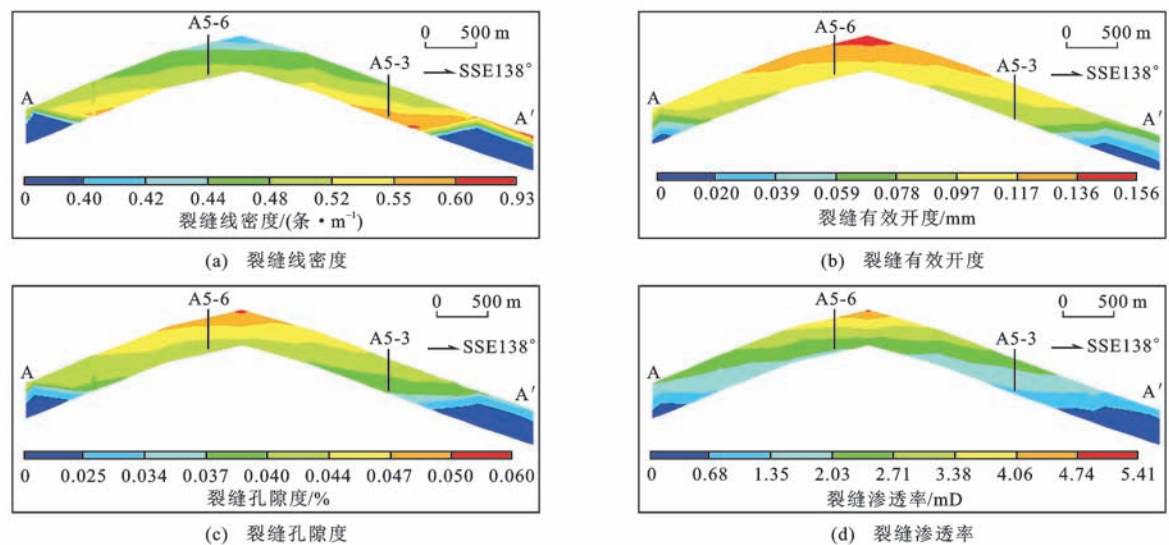
Fig. 9 Structural Fracture Model of Thrust Nappe Anticline in Kuqa Foreland Thrust Belt

4.2 纵向分布规律

构造裂缝在纵向上的分布规律主要体现在构造裂缝参数与深度之间的关系。随着深度增加,构造裂缝线密度逐渐增大(图4、10),表明构造裂缝的数量有所增加,主要与构造应力随深度增加而增大有关。构造裂缝有效开度随深度增加整体减小(图4、10),主要受控于背斜弯曲派生的外弧附加张性应变和内弧附加挤压应变^[66],但在目的层顶部距不整合面约70 m的范围内(6 350~6 420 m),随着深度增加,构造裂缝有效开度呈局部增大趋势(图4),这可能与目的层和上覆地层古近系库姆格列木群之间的不整合面有关。

由于不整合面的存在,在大气淡水的淋滤作用下,使储层中大量沉淀方解石。这些方解石在后期酸性地层水作用下发生溶解并在构造裂缝中重新结晶沉淀,从而使构造裂缝充填程度增大,有效开度降低。理论上认为,越靠近不整合面,方解石含量也越

高,构造裂缝充填程度越高,有效开度越低。对各井取芯段岩芯构造裂缝充填率与距不整合面距离进行统计后发现(图11):在距不整合面约70 m的范围内,构造裂缝的充填率较高,均在60%以上,部分取芯段可达100%;在距不整合面距离大于70 m的地层中,构造裂缝充填率相对较低,一般在50%以下。A5-1井不同深度储层的全岩X射线衍射方解石含量统计结果表明,储层基质中的方解石含量较高的层段也主要集中在距不整合面约70 m的范围内(6 350~6 420 m),与构造裂缝有效开度局部增大和构造裂缝高充填率层段的深度范围基本一致。在该范围内,储层基质中的方解石含量平均为9.6%,最高可达25%,而距不整合面70 m范围之外的储层基质方解石含量平均约为5.9%,最高仅为8%。因此,不整合面对克深5气藏构造裂缝有效性的控制作用主要局限在距不整合面约70 m的范围内。



剖面位置见图 8

图 10 克深 5 气藏构造裂缝纵向预测结果

Fig. 10 Vertical Prediction Results of Structural Fracture in Keshen5 Gas Pool

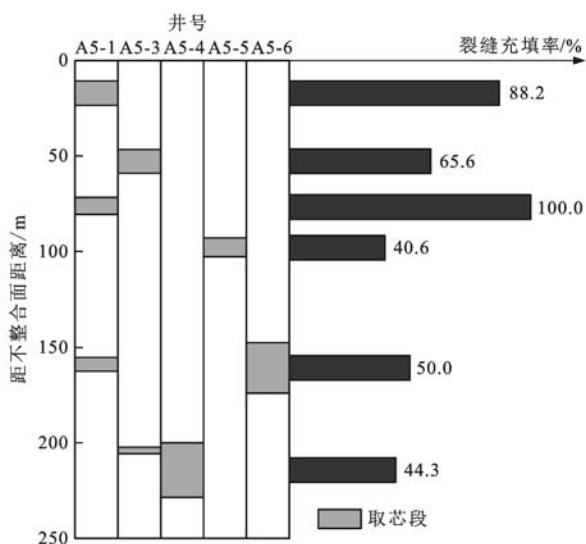


图 11 克深 5 气藏构造裂缝充填率与距不整合面距离的关系

Fig. 11 Relationships Between Structural Fracture Filling Extent and Distance to Unconformity of Keshen5 Gas Pool

综上所述,在不采取改造措施的前提下,储层中部的构造裂缝发育程度和有效性具有较好的匹配关系,是克深 5 气藏下白垩统巴什基奇克组储层的最优质层段,开发数据也显示储层中段的完井常规天然气产量明显高于其他层段。但由于构造裂缝充填物主要为方解石,易与酸反应发生溶蚀,所以采取酸化措施后提产效果较明显,尤其是储层上部裂缝充填程度较高的层段,方解石含量较高,酸化产生的溶蚀空间较大,仍可成为相对高产层段。例如, A5-3 井在 6 845~6 872 m 深度(主要为巴一段)酸化后,

无阻流量可由完井常规的 $8.4 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 提高至 $47.1 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。因此,酸化应作为克深 5 气藏下白垩统巴什基奇克组的重点改造措施之一。

5 结 语

(1)塔里木盆地库车坳陷克深 5 气藏的构造裂缝以高角度和直立裂缝为主,岩芯裂缝开度一般分布在 0~0.4 mm,整体充填程度较高,充填物主要为方解石;微观裂缝主要包括矿物颗粒的穿粒缝和破裂纹,开度主要集中在 20~30 μm 。纵向上构造裂缝呈现密集发育段和不发育段相间分布,平均间距约为 18.5 m,密集发育段平均裂缝线密度约为 0.37 条·m⁻¹。构造裂缝发育可分为 3 期,分别形成于白垩纪、古近纪和新近纪—第四纪,其中第 3 期构造裂缝基本未被充填,有效性好,并且与天然气充注成藏期吻合,是克深 5 区块工业规模气藏形成的关键因素之一。

(2)古构造应力场决定了构造裂缝的组系特征和数量,克深 5 气藏具有部分构造调节带的性质,沿边界断层的左旋剪切应力造成了构造应力方位和构造裂缝走向由背斜西南部的近 EW 向过渡为背斜东北部的近 SN 向;现今构造应力场一般不再产生新的构造裂缝,但会影响先存构造裂缝的有效性,应力挤压作用会使先存构造裂缝开度减小,渗流性能降低。

(3)基于构造应力场数值模拟法的构造裂缝分布预测结果表明:平面上背斜高部位的构造裂缝线

密度较低,但开度、孔隙度和渗透率等较高,在该部位的钻井具有较高的天然气产能;纵向上随深度增加,构造裂缝线密度整体增大,有效开度整体减小。构造裂缝高充填率、有效开度局部增大和储层基质高方解石含量的层段均集中在距不整合面约 70 m 的范围内,因此,不整合面对构造裂缝有效性的控制作用主要局限在该范围内。

参考文献:

References:

- [1] 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.
ZENG Lian-bo. Formation and Distribution of Reservoir Fractures in Low-permeability Sandstones[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] 穆龙新, 赵国良, 田中元, 等. 储层裂缝预测研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
MU Long-xin, ZHAO Guo-liang, TIAN Zhong-yuan, et al. Study on Reservoir Fracture Prediction[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [3] 曾联波, 柯式镇, 刘 洋. 低渗透油气储层裂缝研究方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
ZENG Lian-bo, KE Shi-zhen, LIU Yang. Study Methods of Fractures in Low-permeability Oil-gas Reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [4] AMEEN M S, MACPHERSON K, AL-MARHOON M I, et al. Diverse Fracture Properties and Their Impact on Performance in Conventional and Tight-gas Reservoirs, Saudi Arabia: The Unayzah, South Haradh Case Study[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(3): 459-492.
- [5] 戴俊生, 王宇坤, 冯建伟, 等. 和田河气田奥陶系碳酸盐岩裂缝特征及形成期次[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(2): 133-136.
DAI Jun-sheng, WANG Yu-kun, FENG Jian-wei, et al. Characteristics and Formation Periods of Fractures in Ordovician Carbonate Rocks in Hetianhe Gas Field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(2): 133-136.
- [6] 赵向原, 胡向阳, 曾联波, 等. 四川盆地元坝地区长兴组礁滩相储层天然裂缝有效性评价[J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 52-61.
ZHAO Xiang-yuan, HU Xiang-yang, ZENG Lian-bo, et al. Evaluation on the Effectiveness of Natural Fractures in Reef-flat Facies Reservoirs of Changxing Fm in Yuanba Area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 52-61.
- [7] 周 鹏, 唐雁刚, 尹宏伟, 等. 塔里木盆地克拉苏构造带克深 2 气藏储层裂缝带发育特征及与产量关系[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 135-145.
- [8] 巩 磊, 高 帅, 吴佳朋, 等. 徐家围子断陷营城组火山岩裂缝与天然气成藏[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(2): 283-290.
GONG Lei, GAO Shuai, WU Jia-peng, et al. Natural Gas Accumulation and Fractures in Volcanic Rocks of Yingcheng Formation in Xujiaweizi Fault Depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(2): 283-290.
- [9] 牛海瑞, 杨少春, 汪 勇, 等. 准噶尔盆地车排子地区火山岩裂缝形成期次分析[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 74-81.
NIU Hai-rui, YANG Shao-chun, WANG Yong, et al. Analysis on the Formation Periods of Fractures of Volcanic Reservoirs in Chepaizi Area, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(1): 74-81.
- [10] ZENG L B, LI X Y. Fractures in Sandstone Reservoirs with Ultra-low Permeability: A Case Study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(4): 461-477.
- [11] 刘肖军. 苏北盆地桥河口油田阜二段第三砂层组裂缝参数模拟计算[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 250-254, 259.
LIU Xiao-jun. Simulation of Fracture Parameters in the 3rd Sand Unit of the Paleogene Fu-2 Member in the Qiaohekou Oilfield[J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(2): 250-254, 259.
- [12] 刘红岐, 刘诗琼, 刘 静. 复杂致密储层裂缝特征研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(4): 62-68.
LIU Hong-qi, LIU Shi-qiong, LIU Jing. Study on the Fracture Characteristics of Complex Tight Formation[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(4): 62-68.
- [13] 李义军, 李进步, 杨仁超, 等. 苏里格气田东二区致密砂岩储层裂缝与含气性的关系[J]. 天然气工业, 2012, 32(6): 28-30.
LI Yi-jun, LI Jin-bu, YANG Ren-chao, et al. Relationship Between Gas Bearing Capacity and Reservoir Fractures of Tight Sand Reservoirs in the Eastern Block 2 of the Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6): 28-30.
- [14] 王俊鹏, 张荣虎, 赵继龙, 等. 超深层致密砂岩储层裂

- 缝定量评价及预测研究:以塔里木盆地克深气田为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1735-1745.
- WANG Jun-peng, ZHANG Rong-hu, ZHAO Ji-long, et al. Characteristics and Evaluation of Fractures in Ultra-deep Tight Sandstone Reservoir: Taking Keshen Gasfield in Tarim Basin, NW China as an Example[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1735-1745.
- [15] 王鹏威, 陈筱, 庞雄奇, 等. 构造裂缝对致密砂岩气成藏过程的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 185-191.
- WANG Peng-wei, CHEN Xiao, PANG Xiong-qi, et al. The Controlling of Structure Fractures on the Accumulation of Tight Sand Gas Reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 185-191.
- [16] 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): 469-478.
- LIU Chun, ZHANG Rong-hu, ZHANG Hui-liang, 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): 469-478.
- [17] 刘卫彬, 周新桂, 李世臻, 等. 构造裂缝对低孔低渗储层的影响作用研究: 以东濮凹陷沙三段为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(11): 1993-2004.
- LIU Wei-bin, ZHOU Xin-gui, LI Shi-zhen, et al. The Influences of Tectonic Fractures on Low-porosity and Low-permeability Sandstone Reservoirs: A Case Study of the Third Member of Shahejie Formation in Dongpu Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(11): 1993-2004.
- [18] VAN GOLF-RACHT T D. 裂缝油藏工程基础[M]. 陈钟祥, 金玲年, 秦同洛, 译. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- VAN GOLF-RACHT T D. Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering[M]. Translated by CHEN Zhong-xiang, JIN Ling-nian, QIN Tong-luo. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [19] CMEXOB E M. 裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法[M]. 陈定宝, 曾志琼, 吴丽芸, 译. 北京: 石油工业出版社, 1985.
- CMEXOB E M. Fundamental Theory and Method of Fractured Reservoir Exploration[M]. Translated by CHEN Ding-bao, ZENG Zhi-qiong, WU Li-yun. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985.
- [20] NELSON R A. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs[M]. 2nd ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2001.
- [21] 曾联波, 漆家福, 王永秀. 低渗透储层构造裂缝的成因类型及其形成地质条件[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 52-56.
- ZENG Lian-bo, QI Jia-fu, WANG Yong-xiu. Origin Type of Tectonic Fractures and Geological Conditions in Low-permeability Reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 52-56.
- [22] 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 Xin-gui, CAO Cheng-jie, YUAN Jia-yin. 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.
- [23] 周新桂, 张林炎, 范昆. 含油气盆地低渗透储层构造裂缝定量预测方法和实例[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 328-333.
- ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan, FAN Kun. Methods for Quantitative Prediction of Tectonic Fractures in Compact Reservoirs in Petroliferous Basins and a Case Study[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 328-333.
- [24] 侯贵廷, 潘文庆. 裂缝地质建模及力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- HOU Gui-ting, PAN Wen-qing. Fracture Geological Modeling and Its Mechanism[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [25] 能源, 李勇, 徐丽丽, 等. 克拉苏构造带盐下超深层断背斜裂缝带发育模式及预测方法[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(1): 61-68.
- NENG Yuan, LI Yong, XU Li-li, et al. Patterns of Fracture Zone in the Deep Subsalt Layer of Kelasu Structural Belt and Prospecting Method[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(1): 61-68.
- [26] 刘春, 张荣虎, 张惠良, 等. 塔里木盆地库车前陆冲断带不同构造样式裂缝发育规律: 证据来自野外构造裂缝露头观测[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 52-61.
- LIU Chun, ZHANG Rong-hu, ZHANG Hui-liang, et al. Fracture Development of Different Structural Styles in Kuqa Foreland Thrust Belt: From Outcrop Observation of Structural Fracture[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(1): 52-61.
- [27] 樊建明, 屈雪峰, 王冲, 等. 鄂尔多斯盆地致密储集层天然裂缝分布特征及有效裂缝预测新方法[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 740-748.
- FAN Jian-ming, QU Xue-feng, WANG Chong, et al.

- Natural Fracture Distribution and a New Method Predicting Effective Fractures in Tight Oil Reservoirs of Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 740-748.
- [28] 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等. 构造裂缝发育型砂岩储层定量评价方法及应用: 以库车前陆盆地白垩系为例[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 827-835.
- ZHANG Hui-liang, ZHANG Rong-hu, YANG Hai-jun, et al. Quantitative Evaluation Methods and Applications of Tectonic Fracture Developed Sand Reservoir: A Cretaceous Example from Kuqa Foreland Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 827-835.
- [29] 巩磊, 曾联波, 李娟, 等. 南襄盆地安棚浅、中层系特低渗储层裂缝特征及其与深层系裂缝对比[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(5): 778-784.
- GONG Lei, ZENG Lian-bo, LI Juan, et al. Features of Fractures in Shallow- to Mid-depth Reservoirs with Ultra-low Permeability and Their Comparison with Those in Deep Reservoirs in Anpeng Oilfield, the Nanxiang Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2012, 33(5): 778-784.
- [30] 赵继龙, 王俊鹏, 刘春, 等. 塔里木盆地克深 2 区块储层裂缝数值模拟研究[J]. *现代地质*, 2014, 28(6): 1275-1283.
- ZHAO Ji-long, WANG Jun-peng, LIU Chun, et al. Reservoir Fracture Numerical Simulation of Keshen2 Block in Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 2014, 28(6): 1275-1283.
- [31] 王振宇, 刘超, 张云峰, 等. 库车坳陷 K 区块冲断带深层白垩系致密砂岩储层裂缝发育规律、控制因素与属性建模研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(3): 865-876.
- WANG Zhen-yu, LIU Chao, ZHANG Yun-feng, et al. A Study of Fracture Development, Controlling Factor and Property Modeling of Deep-lying Tight Sandstone in Cretaceous Thrust Belt K Region of Kuqa Depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(3): 865-876.
- [32] 王振宇, 陶夏妍, 范鹏, 等. 库车坳陷大北气田砂岩气层裂缝分布规律及其对产能的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(2): 51-56.
- WANG Zhen-yu, TAO Xia-yan, FAN Peng, et al. Distribution Rule of Fractures and Their Effect on Deliverability in Sandstone Reservoirs, Dabei Gas Field, Kuqa Foreland Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(2): 51-56.
- [33] 吴胜和. 储层表征与建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- WU Sheng-he. Reservoir Characterization and Modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [34] 冯阵东, 戴俊生, 邓航, 等. 利用分形几何定量评价克拉 2 气田裂缝[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(54): 928-933, 939.
- FENG Zhen-dong, DAI Jun-sheng, DENG Hang, et al. Quantitative Evaluation of Fractures with Fractal Geometry in Kela-2 Gas Field[J]. *Oil and Gas Geology*, 2011, 32(54): 928-933, 939.
- [35] 戴俊生, 冯阵东, 刘海磊, 等. 几种储层裂缝评价方法的适用条件分析[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(4): 1234-1242.
- DAI Jun-sheng, FENG Zhen-dong, LIU Hai-lei, et al. Analysis for the Applicable Conditions of Several Methods of Reservoir Fracture Evaluation[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(4): 1234-1242.
- [36] 周新桂, 张林炎. 塔巴庙地区上古生界低渗透储层构造裂缝及其分布定量预测[J]. *天然气地球科学*, 2006, 16(5): 575-580.
- ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan. Basic Characteristics and Quantitative Prediction of Natural Fracture System in the Upper Paleozoic Tight Sand Reservoirs in Tabamiao Area, North Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 16(5): 575-580.
- [37] 周新桂, 张林炎, 屈雪峰, 等. 沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测[J]. *石油学报*, 2009, 30(2): 195-200.
- ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan, QU Xue-feng, et al. Characteristics and Quantitative Prediction of Distribution Laws of Tectonic Fractures of Low-permeability Reservoirs in Yanhewan Area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 30(2): 195-200.
- [38] 丁文龙, 樊太亮, 黄晓波, 等. 塔里木盆地塔中地区上奥陶统古构造应力场模拟与裂缝分布预测[J]. *地质通报*, 2011, 30(4): 588-594.
- DING Wen-long, FAN Tai-liang, HUANG Xiao-bo, et al. Upper Ordovician Paleo Tectonic Stress Field Simulating and Fracture Distribution Forecasting in Tazhong Area of Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(4): 588-594.
- [39] 冯建伟, 戴俊生, 马占荣, 等. 低渗透砂岩裂缝参数与应力场关系理论模型[J]. *石油学报*, 2011, 32(4): 664-671.
- FENG Jian-wei, DAI Jun-sheng, MA Zhan-rong, et al. The Theoretical Model Between Fracture Parameters and Stress Field of Low-permeability Sandstones[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 32(4): 664-671.
- [40] 鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 库车坳陷依南—吐孜地区下侏罗统阿合组砂岩构造裂缝分布预测[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 592-602.

- JU Wei, HOU Gui-ting, HUANG Shao-ying, et al. Structural Fracture Distribution and Prediction of the Lower Jurassic Ahe Formation Sandstone in the Yinan-Tuzi Area, Kuqa Depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 592-602.
- [41] 鞠 玮, 侯贵廷, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地庆城—合水地区延长组长 6₃ 储层构造裂缝定量预测[J]. *地学前缘*, 2014, 21(6): 310-320.
- JU Wei, HOU Gui-ting, FENG Sheng-bin, et al. Quantitative Prediction of the Yanchang Formation Chang-6₃ Reservoir Tectonic Fracture in the Qingcheng-Heshui Area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 310-320.
- [42] 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 Rong-hu, ZHANG Hui-liang, 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.
- [43] 曾联波, 李跃纲, 王正国, 等. 川西南部须二段低渗透砂岩储层裂缝类型及其形成序列[J]. *地球科学*, 2007, 32(2): 194-200.
- ZENG Lian-bo, LI Yue-gang, WANG Zheng-guo, et al. Type and Sequence of Fractures in the Second Member of Xujiache Formation at the South of Western Sichuan Depression[J]. *Earth Science*, 2007, 32(2): 194-200.
- [44] 任丽华, 林承焰. 构造裂缝发育期次划分方法研究与应用: 以海拉尔盆地布达特群为例[J]. *沉积学报*, 2007, 25(2): 253-260.
- REN Li-hua, LIN Cheng-yan. Classification Methods for Development Period of Fractures and Its Application: A Case Study from Budate Group of Hailaer Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(2): 253-260.
- [45] 金 强, 毛晶晶, 杜玉山, 等. 渤海湾盆地富台油田碳酸盐岩潜山裂缝充填机制[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(4): 454-462.
- JIN Qiang, MAO Jing-jing, DU Yu-shan, et al. Fracture Filling Mechanisms in the Carbonate Buried-hill of Futai Oilfield in Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4): 454-462.
- [46] 张仲培, 王清晨. 库车坳陷节理和剪切破裂发育特征及其对区域应力场转换的指示[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2004, 34(增 1): 63-73.
- ZHANG Zhong-pei, WANG Qing-chen. Development of Joints and Shear Fractures in Kuqa Depression and Its Implication to Regional Stress Field Switching[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2004, 34(S1): 63-73.
- [47] 能 源, 谢会文, 孙太荣, 等. 克拉苏构造带克深段构造特征及其石油地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2013, 18(2): 1-6.
- NENG Yuan, XIE Hui-wen, SUN Tai-rong, et al. Structural Characteristics of Keshen Segmentation in Kelasu Structural Belt and Its Petroleum Geological Significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(2): 1-6.
- [48] 曾联波, 李跃纲, 王正国, 等. 邛西构造须二段特低渗透砂岩储层微观裂缝的分布特征[J]. *天然气工业*, 2007, 27(6): 45-47.
- ZENG Lian-bo, LI Yue-gang, WANG Zheng-guo, et al. Distribution of Microfractures in Ultralow Permeability Sandstone Reservoirs of the Second Member of Xujiache Formation in Qiongsi Structure[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(6): 45-47.
- [49] 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等. 超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储集层表征与评价: 以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 158-167.
- ZHANG Hui-liang, ZHANG Rong-hu, YANG Hai-jun, et al. Characteristic and Evaluation of Ultra-deep Fracture-pore Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kelasu Tectonic Zone in Kuqa Foreland Basin, Tarim, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 158-167.
- [50] 曾庆鲁, 张荣虎, 卢文忠, 等. 基于三维激光扫描技术的裂缝发育规律和控制因素研究: 以塔里木盆地库车前陆区索罕村露头剖面为例[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(3): 397-409.
- ZENG Qing-lu, ZHANG Rong-hu, LU Wen-zhong, et al. Fracture Development Characteristics and Controlling Factors Based on 3D Laser Scanning Technology: An Outcrop Case Study of Suohan Village, Kuqa Foreland Area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(3): 397-409.
- [51] 周 文, 张银德, 闫长辉, 等. 泌阳凹陷安棚油田核三段储层裂缝成因、期次及分布研究[J]. *地学前缘*, 2009, 16(4): 157-165.
- ZHOU Wen, ZHANG Yin-de, YAN Chang-hui, et al. Genesis, Stages and Distribution of the Fractures in H₃ Reservoir in Anpeng Oil Field, Miyang Sag[J].

- Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 157-165.
- [52] 白 斌, 邹才能, 朱如凯, 等. 川西南部须二段致密砂岩储层构造裂缝特征及其形成期次[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1841-1846.
- BAI Bin, ZOU Cai-neng, ZHU Ru-kai, et al. Characteristics and Formation Stage-times of Structural Fractures in Tight Sandstone Reservoir of the 2nd Member of Xujiahe Formation in Southwestern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1841-1846.
- [53] 白 斌, 邹才能, 朱如凯, 等. 四川盆地九龙山构造须二段致密砂岩储层裂缝特征、形成时期与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2013, 33(4): 526-535.
- BAI Bin, ZOU Cai-neng, ZHU Ru-kai, et al. Characteristics, Timing and Controlling Factors of Structural Fractures in Tight Sandstones of the 2nd Member of Xujiahe Formation in Jiulong Mountain Structure, Sichuan Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 33(4): 526-535.
- [54] 张 冲, 刘鸿博, 姚 勇, 等. 普光气田飞仙关组储集层裂缝特征及期次[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 521-525.
- ZHANG Chong, LIU Hong-bo, YAO Yong, et al. Fracture Characteristics and Formation Period of Feixianguan Reservoir in Puguang Gas Field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5): 521-525.
- [55] 汤良杰. 略论塔里木盆地主要构造运动[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2): 108-114.
- TANG Liang-jie. An Approach to Major Tectogenesis of Tarim Basin[J]. Experimental Petroleum Geology, 1997, 19(2): 108-114.
- [56] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中新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 1): 98-106.
- ZENG Lian-bo, TAN Cheng-xuan, ZHANG Ming-li. 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 Sciences, 2004, 34(S1): 98-106.
- [57] 汤良杰, 贾承造. 塔里木叠合盆地构造解析和应力场分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- TANG Liang-jie, JIA Cheng-zao. Tectonic and Stress Field Analysis of Tarim Superimposed Basin[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [58] 赵靖舟, 戴金星. 库车油气系统油气成藏期与成藏史[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 314-319.
- ZHAO Jing-zhou, DAI Jin-xing. Accumulation Timing and History of Kuche Petroleum System, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 314-319.
- [59] 王招明. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 153-166.
- WANG Zhao-ming. Formation Mechanism and Enrichment Regularities of Kerasu Subsalt Deep Large Gas Field in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 153-166.
- [60] 季宗镇, 戴俊生, 汪必峰. 地应力与构造裂缝参数间的定量关系[J]. 石油学报, 2010, 33(1): 68-72.
- JI Zong-zhen, DAI Jun-sheng, WANG Bi-feng. Quantitative Relationship Between Crustal Stress and Parameters of Tectonic Fracture[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 33(1): 68-72.
- [61] 路保平, 鲍洪志. 岩石力学参数求取方法进展[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 44-47.
- LU Bao-ping, BAO Hong-zhi. Advances in Calculation Methods for Rock Mechanics Parameters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 44-47.
- [62] 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 Jun-sheng, FENG Jian-wei, et al. Research on Reservoir Rock Mechanical Parameters of Keshen Foreland Thrust Belt in Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2014, 38(5): 25-33.
- [63] 谢 刚. 用测井资料计算最大和最小水平应力剖面的新方法[J]. 测井技术, 2005, 29(1): 82-83, 89.
- XIE Gang. A New Method to Calculate the Maximum and Minimum Horizontal Stress Using Log Data[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(1): 82-83, 89.
- [64] 王 珂, 戴俊生, 张宏国, 等. 裂缝性储层应力敏感性数值模拟: 以库车坳陷克深气田为例[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 123-133.
- WANG Ke, DAI Jun-sheng, ZHANG Hong-guo, et al. Numerical Simulation of Fractured Reservoir Stress Sensitivity: A Case from Kuqa Depression Keshen Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 123-133.
- [65] GHOSH K, MITRA S. Structural Controls of Fracture Orientations, Intensity, and Connectivity, Teton Anticline, Sawtooth Range, Montana[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(8): 995-1014.
- [66] LI Y, HOU G T, HARI K R, et al. The Model of Fracture Development in the Faulted Folds: The Role of Folding and Faulting[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, DOI:10.1016/j.marpetgeo.2017.05.025.