

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

王珂^{1,2,3}, 杨海军², 张惠良³, 李勇², 张荣虎³, 杨学君², 王俊鹏³

(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: 构造裂缝特征分析及有效性评价对库车坳陷克深8气藏致密砂岩储层有利区预测和开发措施的制定具有重要意义。综合利用岩心、成像测井和单井产能等资料, 明确了克深8气藏构造裂缝的基本特征与形成序列, 分析了构造裂缝发育的影响因素, 最后对构造裂缝平面上和纵向上的有效性进行了评价, 并提出了开发措施建议。结果表明: 克深8气藏的构造裂缝以直立缝和高角度缝为主, 部分裂缝被硬石膏、白云石和渗流砂颗粒充填, 上新世库车组沉积期形成的第3期构造裂缝是克深8气藏最重要的一期构造裂缝; 构造裂缝发育程度受断层、岩性、岩层厚度和沉积微相等因素的影响。背斜高部位的构造裂缝有效性好, 是天然气的高产区, 现今水平最大主应力方位与构造裂缝优势走向呈大角度相交时, 会显著降低构造裂缝的有效性; 不整合面对构造裂缝有效性的控制主要集中在距不整合面下方约70 m的范围内。对克深8气藏巴什基奇克组储层的开发措施应以压裂为主, 并且优先开发第3砂层组, 其次为第4砂层组及以下地层, 最后考虑第1、第2砂层组。

关键词: 形成序列; 构造裂缝; 超深层; 致密砂岩储层; 库车坳陷; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Characteristics and effectiveness of structural fractures in ultra-deep tight sandstone reservoir: A case study of Keshen-8 gas pool in Kuqa Depression, Tarim Basin

Wang Ke^{1,2,3}, Yang Haijun², Zhang Huiliang³, Li Yong², Zhang Ronghu³, Yang Xuejun², Wang Junpeng³

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

Abstract: Characteristics analysis and effectiveness evaluation of structural fractures are of great significance to predict favorable tight sandstone reservoir and to select development strategy in Keshen-8 gas pool, Kuqa Depression, Tarim Basin. We analyzed the basic characteristics and forming sequence of the structural fractures, and the factors influencing their growth through such data as core, image logging and single well productivity. In the end, the planar and vertical effectiveness of structural fractures was evaluated, and some suggestions for development were given. The results show that (1) the structural fractures, partly filled with anhydrites, dolomites and seepage sand particles, are mainly upright or have a high dip angle. The third-phase structural fractures developed during the deposition of the Pliocene Kuqa Formation are the most important ones for gas preservation in Keshen-8 gas pool. (2) Faults, lithology, stratum thickness and sedimentary microfacies function to control the development of structural fractures. Structural fractures on the upper part of anticline are highly effective, but their effectiveness would decrease dramatically when their dominant orientation intersects with the direction of present maximum principal stress at a large angle. (3) The controlling effect of unconformity on structural fracture effectiveness is limited within 70 m to the unconformity. The Bashijiqike Formation reservoirs in Keshen-8 gas pool should be produced primarily through hydraulic fracturing, and top priority should be given to the 3rd sand unit in development, followed by the 4th sand unit and its underlying reservoirs, and the 1st and 2nd sand units being the last ones.

Key words: formation sequence, structural fracture, ultra-deep, tight sandstone reservoir, Kuqa Depression, Tarim Basin

收稿日期: 2017-08-23; 修订日期: 2018-04-19。

第一作者简介: 王珂(1987—), 男, 博士、工程师, 储层地质与构造地质。E-mail: wangk_hz@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05003-001-002, 2016ZX05001-002-003, 2017ZX05001-002)。

在深层($>4\,500\text{ m}$)—超深层($>5\,000\text{ m}$)碎屑岩储层中,由于强烈的成岩压实作用和胶结作用,储层变得极为致密,即使存在溶蚀作用和异常流体高压,其基质孔隙度一般也不超过10%,渗透率不超过 $1.0\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,难以构成高效的渗流系统,因此构造裂缝是改善储层物性和提高油气产能的重要因素^[1-4]。中国东西部诸多裂缝性致密砂岩油气藏的勘探开发实践表明,构造裂缝虽然对于提高致密砂岩储层孔隙度贡献较小(一般 $<0.5\%$),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),表明构造裂缝对油气的开发具有重要影响^[5-10]。因此,致密砂岩储层构造裂缝的相关研究受到国内外地质学家的普遍重视。前人通过岩心、野外露头、成像测井、地震数据和试井数据等多种资料和曲率法、构造应力场数值模拟法、分形分维法等多种方法对致密砂岩储层构造裂缝的成因演化、分布规律和影响因素进行了大量研究,有效指导了裂缝性油气藏的勘探工作^[3-13]。然而对于已进入开发阶段的油气藏,仅仅明确构造裂缝的分布规律已难以满足实际生产需求,还需要对构造裂缝的有效性进行评价,从而为开发措施的制定与调整提供更有利的地质依据^[14]。

构造裂缝的有效性主要包括裂缝的张开程度和充填程度两个方面^[14-15]。完全充填的构造裂缝通常为无效裂缝,无效裂缝不但无法提高储层的储集空间和渗流能力,反而会起到渗流屏障的作用;未被完全充填的裂缝一般为有效裂缝,有效开度(未被充填的开度)越大,裂缝对提高储层储集空间和渗流能力的贡献就越大。因此,系统评价构造裂缝的有效性,对致密砂岩储层“甜点”的预测及开发措施的制定具有重要指导作用。虽然前人针对构造裂缝的有效性开展了大量研究,但总体而言,该项研究仍处于探索和发展阶段^[15]。

克深8气藏是塔里木盆地库车坳陷的一个大型裂缝性致密砂岩气藏,其主力含气层系白垩系巴什基奇组为典型的裂缝性致密砂岩储层,构造裂缝对天然气的开发具有重要影响^[16],系统开展储层构造裂缝特征分析及有效性评价,对该气藏的高效开发具有一定的指导意义。因此,本文利用岩心、成像测井以及单井无阻流量等资料,分析克深8气藏巴什基奇组构造裂缝的特征、形成序列和影响因素,并对平面有效性和纵向有效性进行评价,明确有效裂缝的有利分布区,期为该气藏的开发提供一定的地质依据。

1 地质背景

克深8气藏位于塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造

带上(图1),是克深区带的众多高效气藏之一,北部为克深2气藏,南部为克深9气藏,整体表现为一个呈近东西向长条形展布的长轴背斜(图2),天然气资源丰富,总地质储量约为 $1\,600\times 10^8\text{ m}^3$ 。

克深8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($E_{1-2}km$)和白垩系巴什基奇组(K_1bs),部分井钻至白垩系卡普沙良群(K_1kp)的巴西改组(K_1bx)。克深8气藏具有优质的生储盖组合,天然气主要来源于中下侏罗统和中上三叠统的湖沼相泥岩和煤系地层,平均厚度约为600 m,具有强大的生烃能力;主要含气层系为下白垩统巴什基奇组的致密砂岩储层,是一套以粉砂岩、细砂岩为主的辫状河三角洲前缘和扇三角洲前缘沉积^[17],平均厚度约为320 m;巴什基奇组上覆地层为古近系库姆格列木群的膏盐层,平均厚度约为510 m,是一套优质的区域性盖层。研究区侏罗系—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^[18],造成巴什基奇组与上覆库姆格列木群($E_{1-2}km$)呈角度不整合接触,与下伏下白垩统卡普沙良群的巴西改组(K_1bx)整合接触。巴什基奇组储层埋深大于6 700 m,且具有超高温、超高压、超低孔渗的“三超”特征,按照沉积旋回和岩性组合将其自上而下划分为7个砂层组,其中第1—第5砂层组为辫状河三角洲前缘亚相,第6—第7砂层组为扇三角洲前缘亚相。储集空间以残余原生粒间孔和粒间溶蚀扩大孔为主,岩心实测基质孔隙度为4%~8%,基质渗透率约为 $0.001\times 10^{-3}\sim 0.1\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$ 。岩心观察及成像测井解释显示,克深8气藏巴什基奇组构造裂缝十分发育,试井解释渗透率为 $5\times 10^{-3}\sim 116\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,远高于基质渗透率,表明构造裂缝的存在极大地改善了储层的渗流能力,是控制该气藏高产的重要因素。

2 构造裂缝特征与形成序列

2.1 构造裂缝特征

岩心观察表明,克深8气藏的构造裂缝以直立缝(倾角 $\geq 75^\circ$)和高角度缝($45^\circ\leq$ 倾角 $<75^\circ$)为主(图3),分别占总裂缝数量的59.5%和40.4%,低角度缝($15^\circ\leq$ 倾角 $<45^\circ$)和水平缝(倾角 $<15^\circ$)几乎不发育,仅占总裂缝数量的0.1%;构造裂缝的开度一般在0.1~1.5 mm,最大可达3.0 mm。构造裂缝的整体充填程度不高,根据研究区8口取心井的统计,构造裂

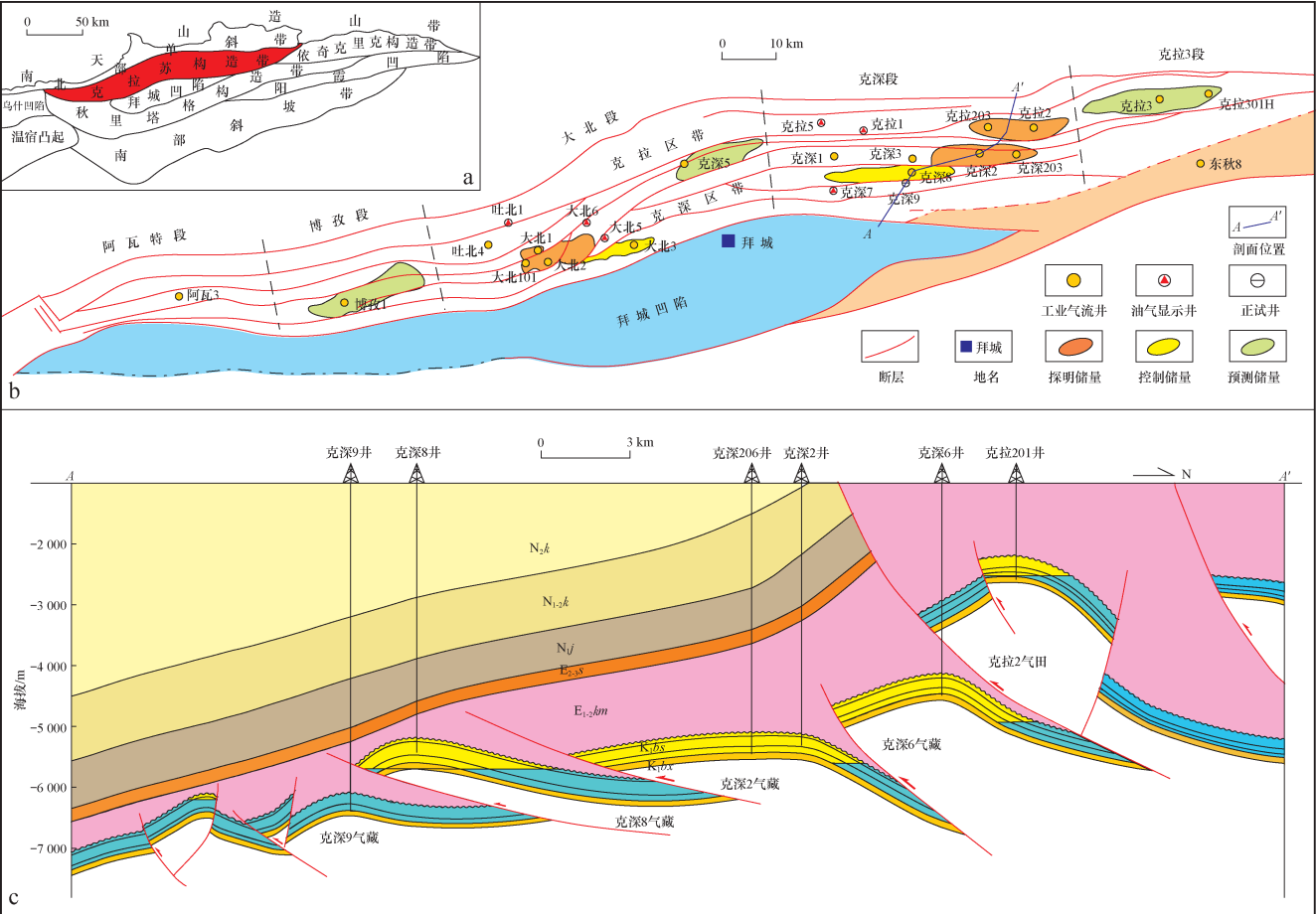


图1 库车坳陷克深8气藏构造位置与气藏剖面
Fig.1 Structural location and gas pool profile of Keshen-8 gas pool,Kuqa Depression
a. 库车坳陷构造单元;b. 克深8气藏构造位置;c. 克深8气藏地层剖面

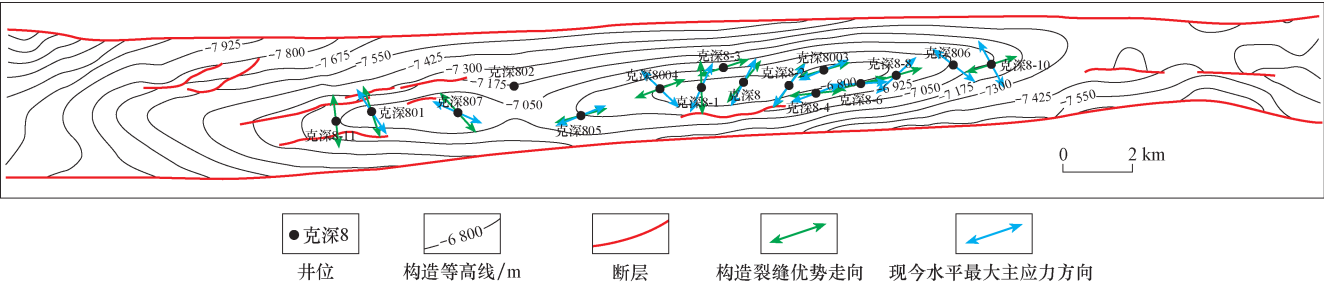


图2 库车坳陷克深8气藏巴什基奇克组顶面构造
Fig.2 Top structure of K_{1bs} in Keshen-8 gas pool,Kuqa Depression

缝的平均充填率约为27%,充填物主要为硬石膏和少量白云石,部分充填裂缝重新裂开,并且与未充填缝共存,表明该区至少发育2期构造裂缝(图3c)。

微观构造裂缝通常切穿岩石颗粒和胶结物,缝宽为0.02~0.1 mm,早期形成的裂缝通常被硬石膏和白云石等矿物或渗流砂颗粒充填(图3)。部分裂缝在库姆格列木群沉积前形成,其中的硬石膏和白云石充填物可能形成于古近系库姆格列木群沉积期,此时的沉积环境为偏碱性水的盐湖沉积,溶解有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 等离子的地层水进入裂缝,随着地层水

pH值、矿化度、温度和压力等环境值的变化逐渐形成硬石膏和白云石充填物;部分裂缝形成于库姆格列木群沉积之后,则可能是基质孔隙中先存的硬石膏、白云石胶结物后期发生溶解并再次在裂缝中沉淀形成。渗流砂充填主要形成于同沉积期,岩石在尚未完全固结时产生裂缝,新沉积的松散砂质颗粒进入裂缝中,并随着埋藏压实作用保存至今。在后期构造应力和异常流体高压作用下,早期充填的裂缝可能沿裂缝走向或渗流砂颗粒边缘重新裂开,再次成为有效裂缝(图4c,d)。



图3 库车坳陷克深8气藏巴什基奇克组岩心构造裂缝

Fig. 3 Structural fractures in cores from K_1bs in Keshen-8 gas pool, Kuqa Depression

a. 克深802井,埋深7 235.9 m,高角度张性裂缝,硬石膏和白云石全充填;b. 克深8003井,埋深6 778.5 m,高角度张性裂缝,硬石膏和白云石全充填;c. 克深802井,埋深7 236.5 m,一条高角度全充填张性裂缝重新裂开和一条高角度无充填剪切裂缝,代表了至少2期构造裂缝;d. 克深8-8井,埋深6 863.5 m,直立剪切裂缝,硬石膏和白云石半充填;e. 克深8井,埋深6 738.4 m,直立剪切裂缝,无充填;f. 克深8-11井,埋深7 369.5 m,多条直立剪切裂缝,无充填;g. 克深8-11井,埋深7 371.6 m,直立剪切裂缝,无充填;h. 克深8004井,埋深7 008.4 m,直立剪切裂缝,无充填;i. 克深8004井,埋深6 998.9 m,直立张性裂缝,无充填;j. 克深8-8井,埋深6 864.7 m,直立张性裂缝,无充填

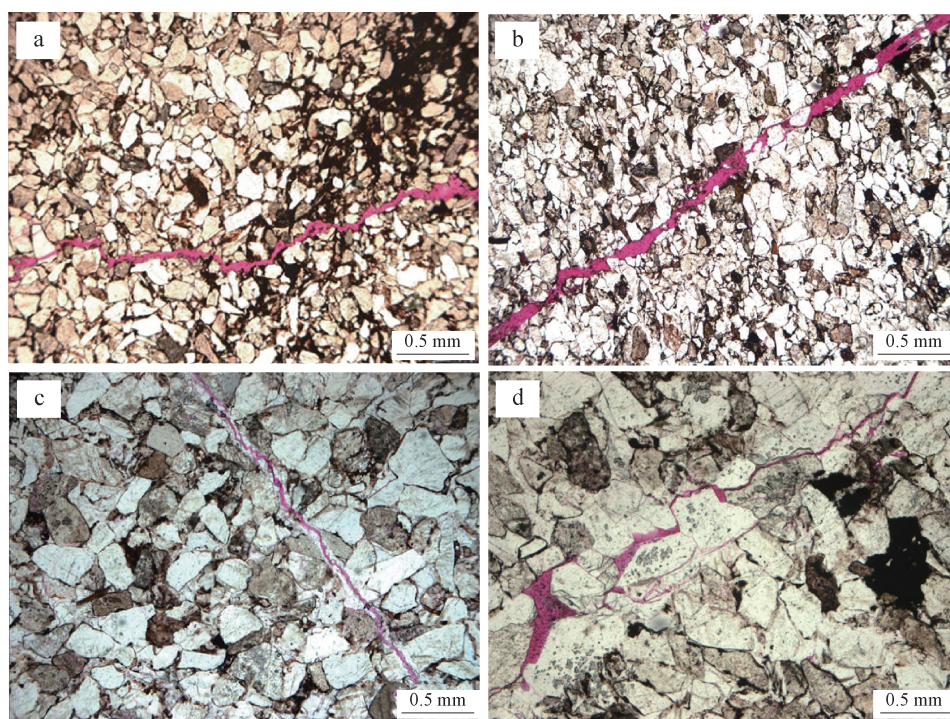


图4 库车坳陷克深8气藏巴什基奇克组微观构造裂缝

Fig. 4 Microscopic structural fractures of K_1bs in Keshen-8 gas pool, Kuqa Depression

a. 克深8井,埋深6 873.6 m,岩屑长石砂岩,缝宽约0.1 mm;b. 克深801井,埋深7 227.3 m,岩屑长石砂岩,缝宽约0.1 mm;c. 克深802井,埋深7 235.1 m,沿早期裂缝重新裂开,原缝宽约0.05 mm,新缝宽约0.02 mm;d. 克深8004井,埋深7 004.2 m,沿早期渗流砂充填物颗粒重新裂开,原缝宽约0.25 mm,新缝宽约0.02 mm

构造裂缝在 FMI 成像测井图像上主要表现为平行式组合和斜交式组合,并且常切穿层理面(图5),平均线密度为 0.2~1.2 条/m。综合岩心观察及成像测井解释结果表明,克深8气藏的构造裂缝按走向可分为两组,一组与背斜长轴近似平行,主要分布在背斜长轴东西两侧,以张性裂缝为主,另一组与背斜长轴呈大角度相交或近于垂直,主要分布在背斜长轴中部,以剪切裂缝为主(图2),代表了两种不同力学成因的构造裂缝类型。

2.2 构造裂缝形成序列

构造裂缝的形成通常与主要的构造运动期次相对应,构造演化史分析表明克深地区自中生代以来主要经历了4期构造运动,即晚白垩世—早古新世的燕山运动、晚渐新世—早中新世的喜马拉雅早期运动、晚中新世—早上新世的喜马拉雅中期运动和晚上新世—第四纪的喜马拉雅晚期运动。对于经受多期次构造运动的地区,由于各个期次的构造应力场状态一般具有差异性,因此不同期次的构造裂缝的产状和形态也有明显不同。伸展应力环境下通常形成张开度相对较大的张性裂缝,挤压环境下通常以张开度相对较小的剪切裂缝为主。早期裂缝往往经历多次胶结作用,具有较高的充填程度,并且会限制后期裂缝的形成与扩展。

因此,根据岩心构造裂缝的产状、形态、交切限制关系和充填程度差异等特征,结合区域构造应力场演化,认为克深8气藏主要发育3期构造裂缝(图6)。第1期构造裂缝形成于白垩纪末期和古近纪的近南北向伸展作用,期间有短暂的近南北向挤压作用,水平最大有效构造应力约为 35.2~59.9 MPa^[19],主要形成一些近东西向的张性裂缝及少量近南北向的剪切裂缝,裂缝开度大、充填程度高,多数为无效裂缝(图3a,b),但少数

无效裂缝在后期构造应力和异常流体高压作用下重新裂开成为有效裂缝(图3c);第2期构造裂缝形成于中新世康村组沉积期,这一时期克深8气藏经受近南北向的挤压作用,水平最大有效构造应力约为 74.8 MPa^[19],主要形成近南北走向的剪切裂缝,裂缝开度较小,通常为半充填缝,保留了一定的流体渗流能力(图3d);第3期构造裂缝形成于上新世库车组沉积期,库车坳陷整体经受南天山的强烈逆冲推覆挤压,克拉苏构造带的叠瓦冲断构造样式最终定型,这一时期的水平最大有效构造应力可达 80.9 MPa^[19],形成了大量近南北向的剪切裂缝(图3e—h)。同时由于挤压作用使背斜发生强烈弯曲变形,在背斜长轴上形成大量近东西向的拉张裂缝(图3i,j),这一期的构造裂缝延伸长度大,且基本上未被充填,具有较强的流体渗流能力。并且,第3期构造裂缝与天然气的充注具有良好的匹配关系,其形成时期与天然气大量持续充注的时期相吻合^[20],是克深8工业规模性气藏最终形成的重要因素之一(图4),也是第3期构造裂缝基本未被充填的一个重要原因。

3 构造裂缝影响因素

断层往往是构造应力的相对集中区,因此越靠近断层,构造裂缝相对越发育^[2]。从克深8气藏构造裂缝与距断层距离的关系来看(图7a),断层对构造裂缝的控制主要局限在 0.5 km 范围内,当距断层距离大于 0.5 km 时,构造裂缝受断层的影响已不明显。

岩石类型方面,由于砂岩的脆性较强,在受到构造应力作用时更易产生破裂,因此构造裂缝发育程度一般要高于塑性泥岩,但在钙质、硅质等脆性组分含量较高时,泥岩也可能具有与砂岩相当甚至高于砂岩的构造裂缝发育程度;砂岩越致密、基质孔隙度越低,构造

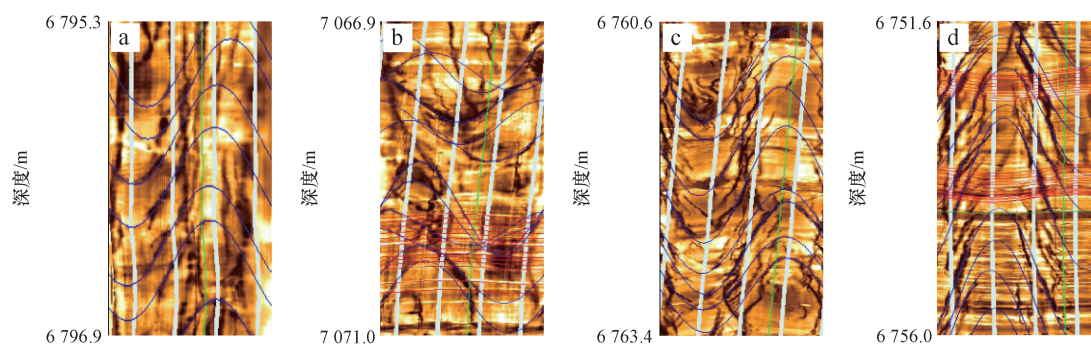


图5 库车坳陷克深8气藏巴什基奇克组成像测井裂缝特征

Fig. 5 Fracture characterization of K₁bs in Keshen-8 gas pool with image logs, Kuqa Depression

- a. 克深8井,一组平行裂缝;b. 克深801井,一组斜交裂缝,切穿层理面(红色曲线);c. 克深8-1井,一组平行裂缝;
d. 克深8-2井,一组平行裂缝,切穿层理面(红色曲线)

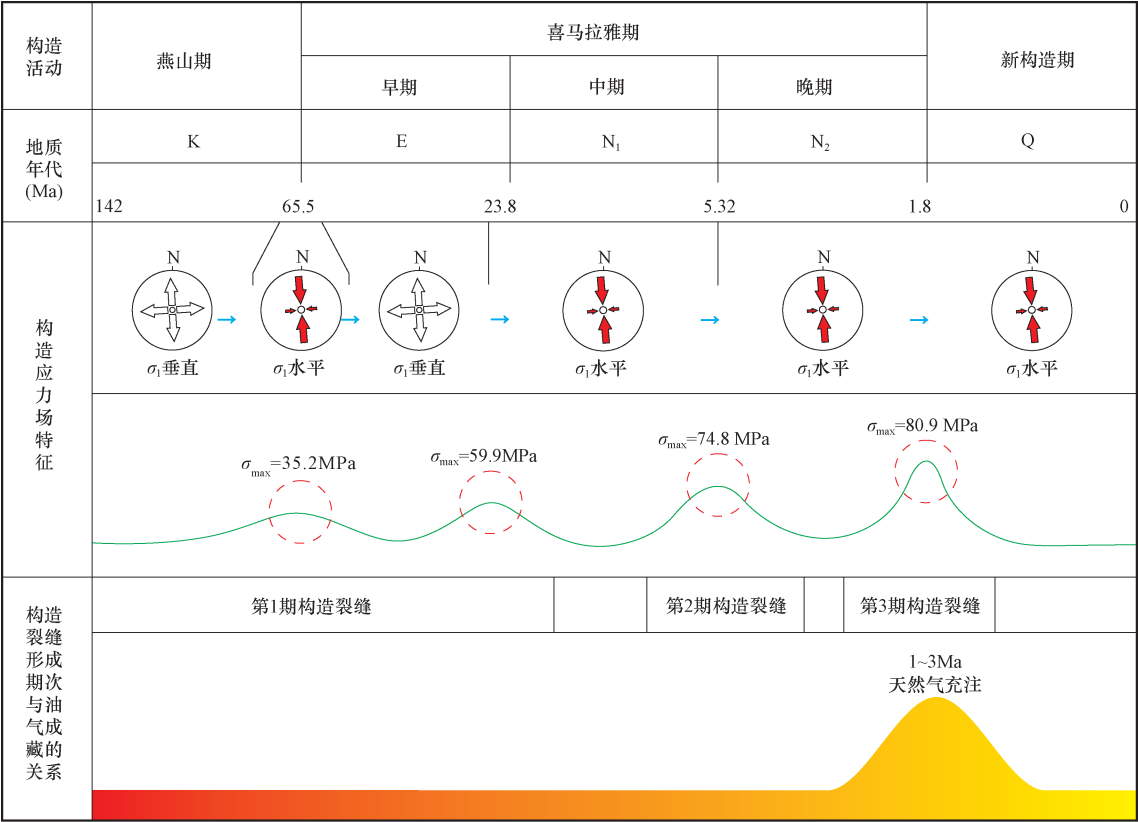


图 6 库车坳陷克深 8 气藏构造裂缝形成序列

Fig. 6 Formation sequence of structural fractures in Keshen-8 gas pool, Kuqa Depression

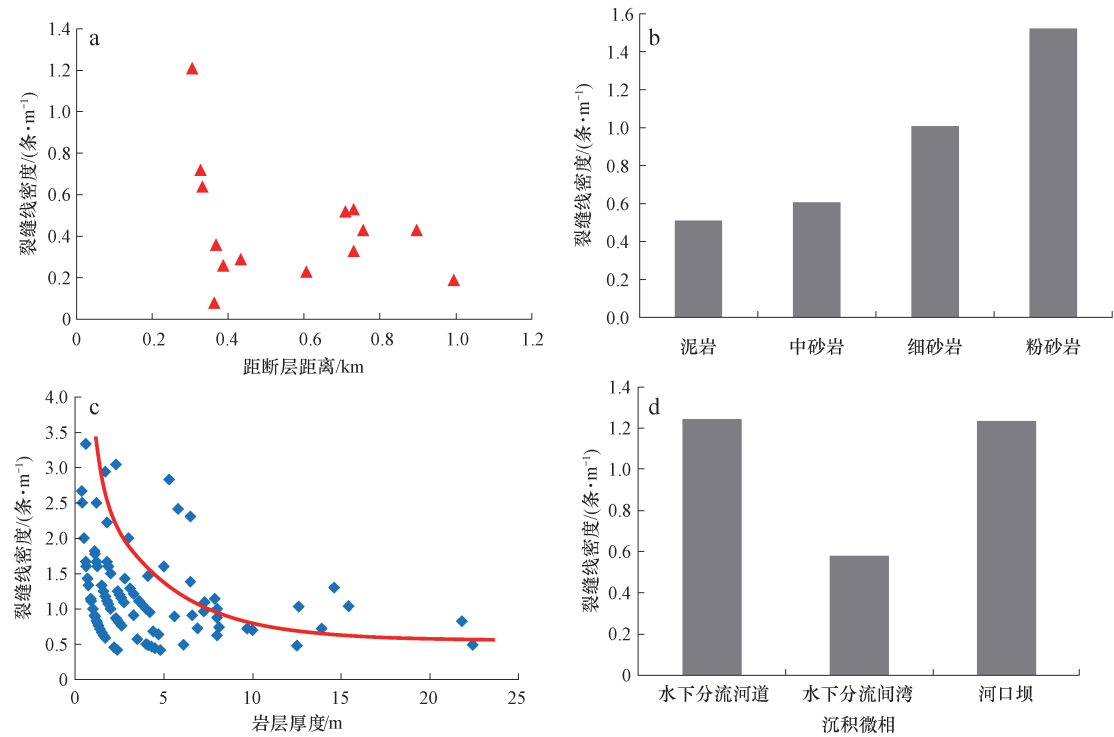


图 7 库车坳陷克深 8 气藏构造裂缝影响因素

Fig. 7 Influential factors for developing structural fractures in Keshen-8 gas pool, Kuqa Depression

a. 距断层距离; b. 岩性; c. 岩层厚度; d. 沉积微相

裂缝通常越发育^[2]。统计克深8气藏不同岩性的构造裂缝线密度表明,粉砂岩中构造裂缝最发育,线密度约为1.52条/m,其次为细砂岩和中砂岩,线密度分别为1.01条/m和0.61条/m,泥岩中的构造裂缝线密度最低,仅约0.51条/m(图7b)。

在岩性一致且处于同一构造应力环境的前提下,岩层厚度越小则构造应力相对越集中,岩石发生破裂的概率也就越大,构造裂缝的发育程度越高,相反岩层厚度越大,构造裂缝的发育程度相对越低,但当岩层厚度大于一定值时,构造裂缝与岩层厚度之间不再具有明显的相关关系^[21-22]。克深8气藏不同厚度岩层的构造裂缝线密度统计(图7c)表明,构造裂缝线密度随岩层厚度增大而逐渐减小,当岩层厚度大于7.5 m时,二者之间的相关性已不明显。

克深8气藏巴什基奇克组的沉积微相包括水下分流河道微相、水下分流间湾微相和河口坝微相,其中水下分流河道和河口坝以砂岩为主,构造裂缝线密度较高,约为1.24条/m;而水下分流间湾主要为泥岩,构造裂缝线密度较低,仅约0.58条/m(图7d)。

4 构造裂缝有效性

4.1 平面有效性

由于背斜高部位变形强烈,储层岩石的破裂程度高,因而背斜高部位的构造裂缝线密度整体高于背斜翼部(图8a);构造裂缝主要形成于喜马拉雅运动晚期(上新世库车组沉积期),此时伴随着天然气的强充注,使背斜高部位的地层水向下驱替,避免了地层水矿物的大量析出并充填裂缝,因此背斜高部位的构造裂缝充填程度相对较低,而背斜翼部靠近气水界面,在一定程度上仍受地层水的影响,因此构造裂缝的充填程度整体上略高于背斜高部位(图8b);背斜高部位的强烈变形使构造裂缝的开度相对较大,并且充填程度低,使得构造裂缝的有效开度整体上高于背斜翼部(图8c),因此背斜高部位是天然气的高产区,单井无阻流量 $397 \times 10^4 \sim 523 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而翼部产能相对较差,单井无阻流量 $272 \times 10^4 \sim 328 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

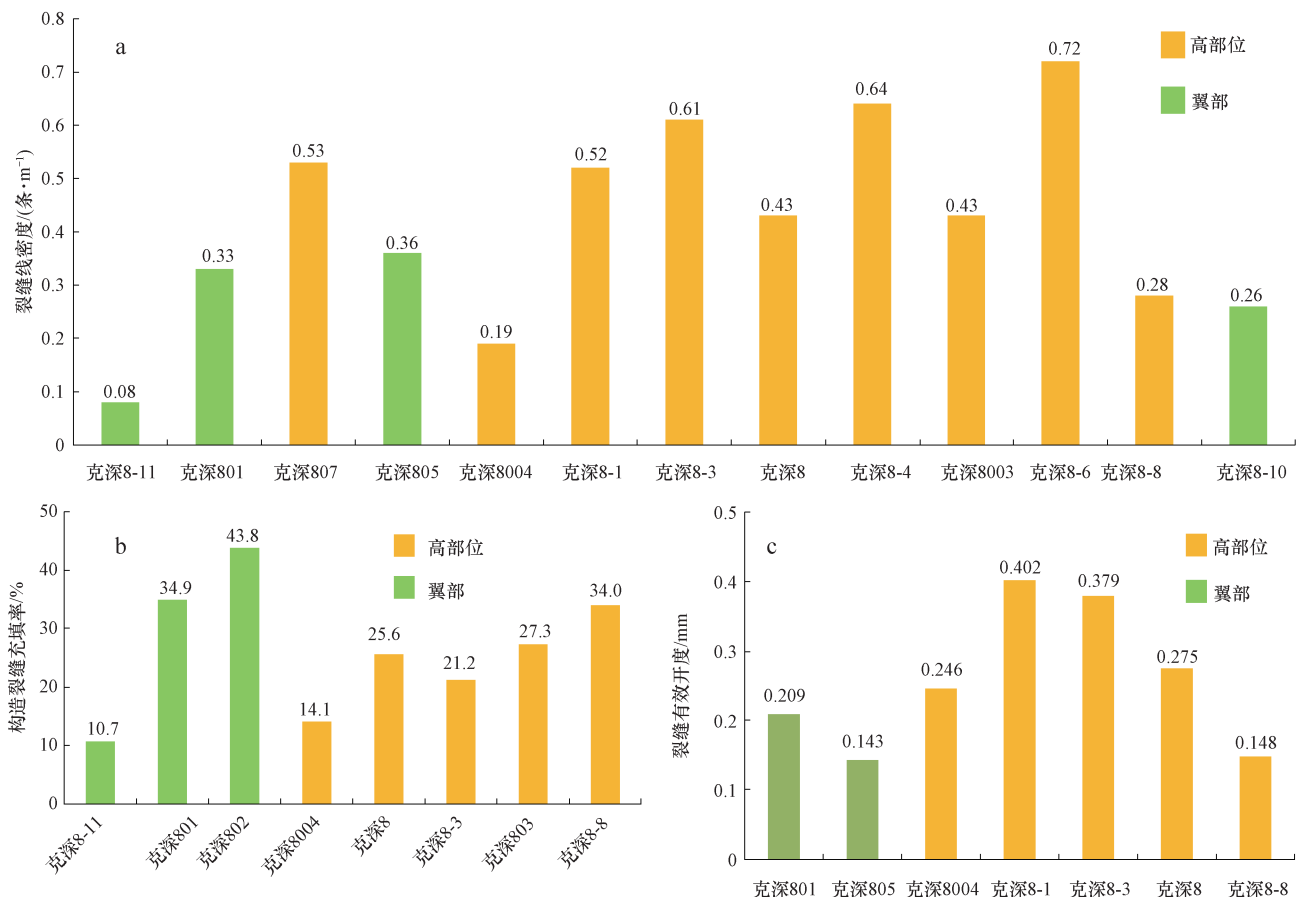


图8 库车坳陷克深8气藏单井构造裂缝线密度及有效性

Fig. 8 Linear density and effectiveness of structural fractures in single well of Keshen-8 gas pool, Kuqa Depression

a. 裂缝线密度(成像测井); b. 裂缝充填率(岩心); c. 裂缝有效开度(成像测井)

构造裂缝的优势走向与现今水平最大主应力方向的关系也是影响构造裂缝有效开度的一个重要因素。克深8气藏多数井的构造裂缝优势走向与现今水平最大主应力方向近似平行或呈小角度相交,但少数井呈大角度相交或近于垂直(图2),造成构造裂缝的有效开度降低。例如克深8004井,其构造裂缝充填率为14%,而与其相近的克深8井可达26%,约为前者的两倍,但由于克深8004井构造裂缝优势走向与现今水平最大主应力方向呈大角度相交,造成构造裂缝的有效开度仅为0.246 mm,略低于克深8井的0.275 mm。再如克深8-10井,该井未取心,因此无法通过岩心观察确定构造裂缝的充填率,但根据所处的构造线位置(-7050 m)推断,可能与克深801井和克深8-11井相近,约为10%~35%,与邻近的克深8-8井大致相当,甚至可能更低;并且其构造裂缝的线密度与克深8-8井也基本相同(图8a)。但测试数据表明克深8-8井的无阻流量为 $502 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而克深8-10井仅为 $282 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,虽然该井未采用成像测井解释出构造裂缝有效开度,但从上述数据推断应低于克深8-8井,由图2可见,该井构造裂缝的优势走向与现今水平最大主应力方向呈大角度相交,表明现今构造挤压应力降低了克深8-10井构造裂缝的有效性。

4.2 纵向有效性

由于目的层巴什基奇克组 and 上覆古近系膏盐层之间不整合面的存在,使储层上部距不整合面一定范围内形成大量的硬石膏和白云石。巴什基奇克组沉积期形成的方解石胶结物也随着埋深增大而向白云石转化^[23]。这些硬石膏和白云石可以直接充填于早期裂缝,也可以在后期地层水作用下发生溶解,并在裂缝中再次沉淀胶结,从而形成现今所观察到的硬石膏和白云石充填物。因此构造裂缝充填率主要受储层硬石膏和白云石含量的影响,二者具有较好的吻合性(图9),高充填率和硬石膏、白云石含量的层段主要集中于距不整合面下方约70 m的范围内。由此可见,不整合面对构造裂缝有效性的控制主要为距不整合面下方约70 m的范围,在该范围内,构造裂缝的充填程度较高,有效性差,不利于天然气在储层中的渗流。

构造裂缝的连井剖面(图10)表明,储层上部(第1、第2砂层组)的构造裂缝主要发育在背斜高部位的井,翼部的井中相对不发育,横向连续性不好,并且处于不整合面控制的高充填率段,裂缝有效性差,产能较低。储层中部(第3砂层组)的构造裂缝在不同构造部位均比较发育,横向连续性最好,充填程度也相对较

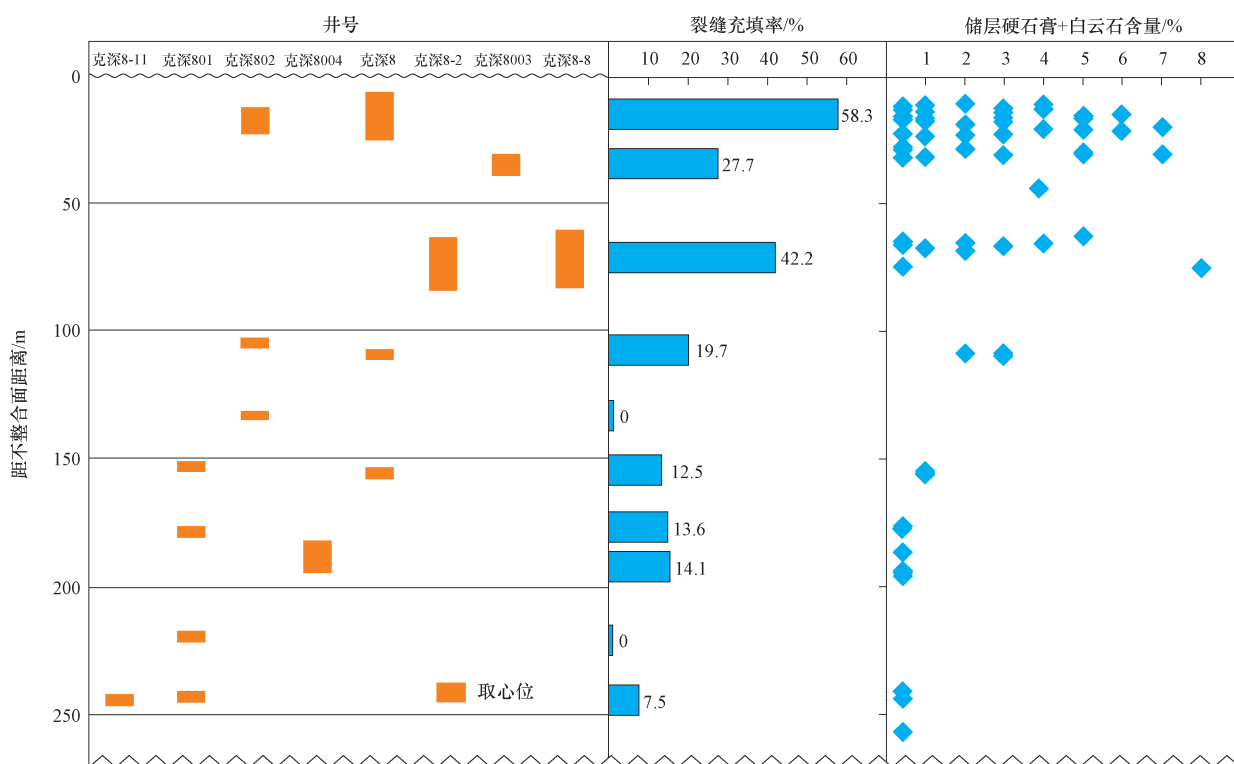


图9 库车坳陷构造裂缝充填率纵向变化特征与储层硬石膏和白云石含量关系

Fig. 9 Relationship between vertical variation of structural fracture filling ratio and contents of anhydrite and dolomite in reservoirs, Kuqa Depression

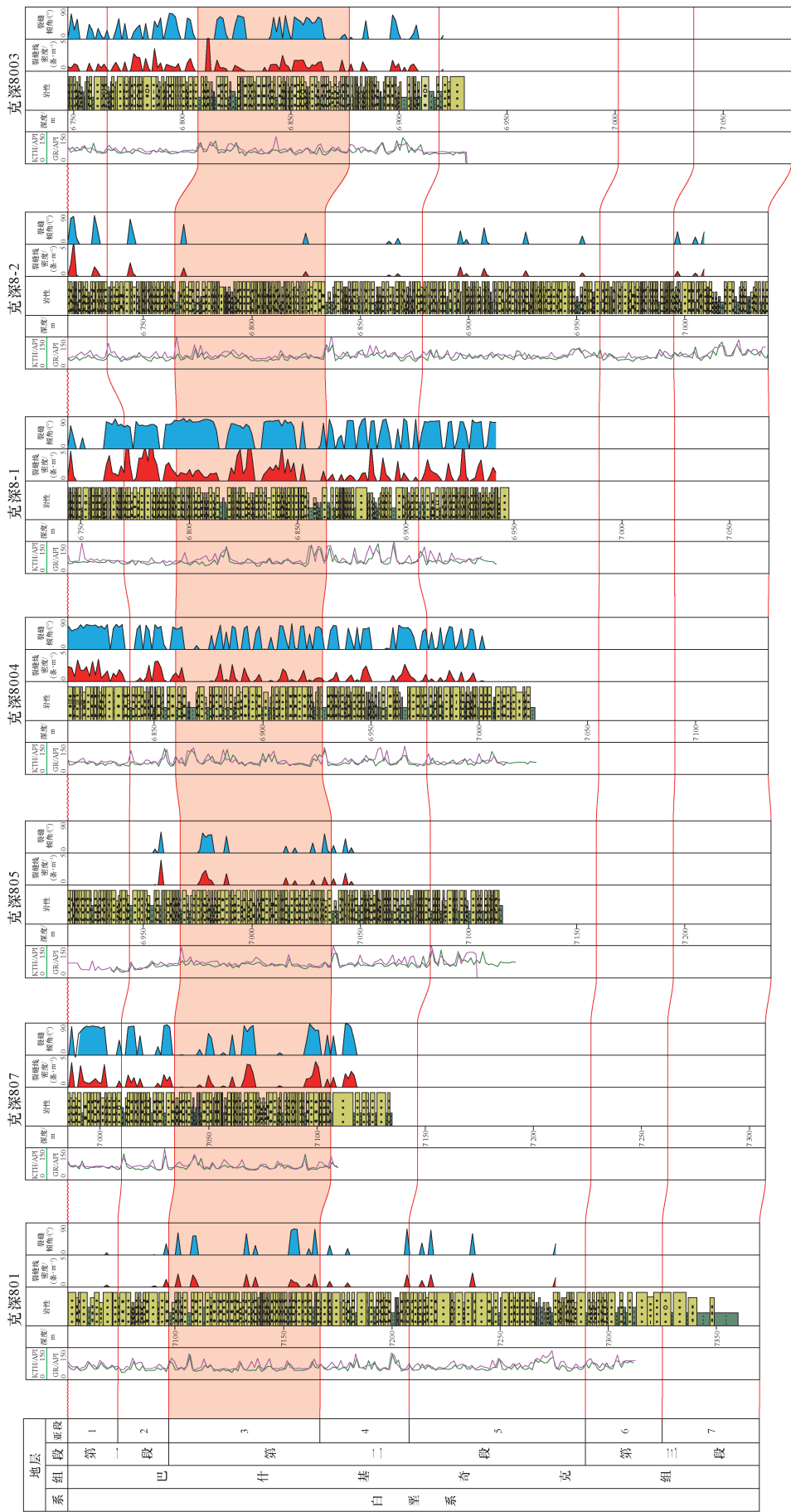


图10 库车坳陷克深8气藏构造裂缝连井剖面
Fig. 10 Well-tie cross-section of structural fractures in Keshen-8 gas pool, Kuqa Depression

低,形成平面上连片分布的储层“甜点”区,现有开发数据也表明该段地层的产能明显优于其他层段,因此储层中部(第3砂层组)是克深8气藏开发中的重点层位。储层下部(第4砂层组及以下地层)与储层上部有相似之处,构造裂缝主要发育在背斜高部位而翼部相对不发育,横向连续性也较差,裂缝充填率低但开度较小,自然产能相对不高。

由于硬石膏和白云石为难溶矿物,也不易与酸发生反应,因此即使采取酸化措施,提产效果也十分有限。例如在某井厚约47 m的某段地层采用5 mm油嘴测试,完井常规日产量约为 $30.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,酸化后日产量仅提高到 $31.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。而压裂作业可使开启裂缝开度增大、紧闭裂缝和部分充填裂缝张开,从而增大裂缝的开度渗透率,提高天然气的产能。例如在某井厚约22 m的某段地层采用10 mm油嘴测试,完井常规日产量几乎为0,体积压裂后日产量提高到 $104.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。因此,对巴什基奇克组储层的开发措施应以压裂为主,并且优先开发第3砂层组,其次为第4砂层组及以下地层,最后考虑第1、第2砂层组。

5 结论

1) 克深8气藏的构造裂缝以直立缝和高角度缝为主,线密度为0.2~1.2条/m,开度为0.1~1.5 mm,部分构造裂缝被硬石膏、白云石或渗流砂颗粒充填,平均充填率约为27%;成像测井图像上主要表现为平行式组合和斜交式组合,上新世库车组沉积期形成的第3期构造裂缝有效性最高,并且与天然气充注期吻合,是克深8工业规模性气藏最终形成的重要因素。

2) 断层对构造裂缝的控制主要局限在0.5 km范围内,距断层越近,构造裂缝越发育;不同岩性构造裂缝发育程度粉砂岩>细砂岩>中砂岩>泥岩;当岩层厚度小于7.5 m时,构造裂缝线密度与岩层厚度成反比;构造裂缝在水下分流河道和河口坝微相发育程度较高,在水下分流间湾欠发育。

3) 背斜高部位构造裂缝线密度高,并且充填程度低,有效开度大,因此裂缝有效性好,是天然气的高产区;现今水平最大主应力方位与构造裂缝优势走向呈大角度相交时,会显著降低构造裂缝的有效性。

4) 不整合面对构造裂缝有效性的控制主要集中在距不整合面下方约70 m的范围,在该范围内构造裂

缝的充填程度较高,有效性差;第3砂层组的构造裂缝横向连续且有效性好,硬石膏和白云石充填物限制了酸化效果,因此对巴什基奇克组储层的开发措施应以压裂为主,并且优先开发第3砂层组,其次为第4砂层组及以下地层,最后考虑第1、第2砂层组。

参 考 文 献

- [1] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs (second edition) [M]. Houston: Gulf Professional Publishing, 2001: 1 - 321.
- [2] 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: 1 - 169.
Zeng Lianbo. Formation and distribution of reservoir fractures in low-permeability sandstones [M]. Beijing: Science Press, 2008: 1 - 169.
- [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: 1 - 187.
Zeng Lianbo, Ke Shizhen, Liu Yang. Study methods of fractures in low-permeability oil-gas reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 1 - 187.
- [4] Ameen M S, Mac Pherson 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] Zeng L, Li X. 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.
- [6] 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 Xiaojun. Simulation of fracture parameters in the 3rd sand unit of the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohokou oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 250 - 254, 259.
- [7] 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 Hongqi, Liu Shiqiong, Liu Jing. Study on the fracture characteristics of complex tight formation [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(4): 62 - 68.
- [8] 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 Yijun, Li Jinbu, Yang Renchao, 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.
- [9] 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 Junpeng, Zhang Ronghu, Zhao Jilong, 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.
- [10] 王俊鹏, 张惠良, 张荣虎, 等. 裂缝发育对超深层致密砂岩储层的改造作用——以塔里木盆地库车坳陷克深气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 77–88.
- Wang Junpeng, Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, et al. Enhancement of ultra-deep tight sandstone reservoir quality by fractures: A case study of Keshen gas field in Kuqa Depression, tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 77–88.
- [11] 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(6): 928–933, 939.
- Feng Zhendong, Dai Junsheng, Deng Hang, et al. Quantitative evaluation of fractures with fractal geometry in Kela-2 gas field[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6): 928–933, 939.
- [12] 黄继新, 彭仕宓, 王小军, 等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. *石油学报*, 2006, 27(6): 65–69.
- Huang Jixin, Peng Shimi, Wang Xiaojun, et al. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(6): 65–69.
- [13] 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 Bashijiqike formation in ks2 well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 425–432.
- [14] 曾联波, 巩磊, 祖科威, 等. 柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J]. *地质学报*, 2012, 86(11): 1809–1814.
- Zeng Lianbo, Gong Lei, Zu Kewei, et al. Influence factors on fracture validity of the Paleogene reservoir, western Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(11): 1809–1814.
- [15] 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 Xiangyuan, Hu Xiangyang, Zeng Lianbo, et al. Evaluation on the effectiveness of natural fractures in reef-flat facies of Changxing Fm in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 37(2): 52–61.
- [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 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): 469–478.
- [17] 马玉杰, 张荣虎, 唐雁刚, 等. 塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇克组岩相古地理[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(3): 249–256.
- Ma Yujie, Zhang Ronghu, Tang Yangang, et al. Lithofacies paleogeography of Cretaceous Bashijiqike formation in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(3): 249–256.
- [18] 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.
- [19] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中新世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(Suppl. 1): 98–106.
- [20] 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 Zhaoming. Formation mechanism and enrichment regularities of Kelaasu subsalt deep large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(2): 153–166.
- [21] 赵文韬, 侯贵廷, 孙雄伟, 等. 库车东部碎屑岩层厚和岩性对裂缝发育的影响[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 603–610.
- Zhao Wentao, Hou Guiting, Sun Xiongwei, et al. Influence of layer thickness and lithology on the fracture growth of elastic rock in east Kuqa[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 603–610.
- [22] 王珂, 张惠良, 张荣虎, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征及影响因素——以塔里木盆地克深2气田为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(6): 715–727, 742.
- Wang Ke, Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, et al. Characteristics and influencing factors of ultra-deep tight sandstone reservoir structural fracture: a case study of Keshen-2 gas field, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(6): 715–727, 742.
- [23] 于炳松, 赖兴运, 高志前. 克拉2气田砂岩储层中成岩方解石-白云石的平衡及其对储层质量的影响[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(3): 339–345.
- Yu Bingsong, Lai Xingyun, Gao Zhiqian. The equilibrium between calcite and dolomite during diagenesis in sandstone reservoir in Kela 2 gas field and the influence to quality of reservoir[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(3): 339–345.