

超深层致密砂岩储层构造裂缝分布特征及其成因

——以塔里木盆地库车前陆冲断带克深气田为例

王珂^{1,2}, 张荣虎^{1,2}, 王俊鹏^{1,2}, 孙雄伟³, 杨学君³

(1. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油 勘探开发研究院 塔里木盆地研究中心, 新疆 库尔勒 841000;

3. 中国石油 塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:综合采用岩心、薄片及成像测井等资料,对塔里木盆地克深气田巴什基奇克组超深层致密砂岩储层构造裂缝的基本特征与形成序列进行了分析,在此基础上讨论了裂缝产状、力学性质、密度、开度、充填性和充填物的差异性分布及其成因,最后探讨了不同气藏应采取的储层改造措施和有利勘探目标。结果表明:克深气田主要发育3期构造裂缝,各个气藏之间构造裂缝具有明显差异性,主要受构造变形时间和成岩孔隙水介质环境控制。北部克深5和克深6气藏为早期缓慢挤压变形,主要形成与背斜长轴近似的直立或高角度张性裂缝;中部克深2气藏变形时间稍晚,近NS走向剪切裂缝和近EW走向张性裂缝共存,并且前者略占优势;南部克深8和克深9气藏变形时间最晚,主要形成近NS走向的直立剪切裂缝。自北向南,主差应力与岩石抗压强度的比值先增大后减小,裂缝密度随之先增大后减小,同时裂缝优势走向与现今水平最大主应力之间由大角度相交逐渐变为近似平行,并且裂缝形成时间越来越晚,充填率逐渐降低,因此裂缝有效开度逐渐增大。巴什基奇克组沉积期的水体总体呈咸化状态,北部克深5、克深6和克深2区块为淡水-半咸水介质成岩环境,裂缝充填物主要为方解石,储层改造措施应以酸化为主;南部克深8和克深9区块为偏碱性水成岩环境,裂缝充填物主要为硬石膏和白云石,储层改造措施应以压裂为主。克深8气藏的构造裂缝有效性最好,其次为克深2和克深9气藏,克深5和克深6气藏较低。克深18、克深19、克深20和克深24号构造的裂缝可能比较发育,可作为克深气田下一步勘探的重点目标。

关键词:形成序列;构造变形;裂缝充填物;构造裂缝;致密砂岩储层;超深层;前陆冲断带;克深气田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Distribution and origin of tectonic fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs: A case study of Keshen gas field, Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin

Wang Ke^{1,2}, Zhang Ronghu^{1,2}, Wang Junpeng^{1,2}, Sun Xiongwei³, Yang Xuejun³

(1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. Research Center of Tarim Basin, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China;

3. Tarim Oilfield Branch Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Observations of cores and thin sections combined with logging data interpretation were used to analyze the basic properties and forming sequence of tectonic fractures in the ultra-deep tight sandstone reservoirs of the Bashijiqike Formation in Keshen gas field. The differences in the fracture properties, including occurrence, mechanical characteristics, density, aperture, filling and fills, were then studied and the causes for the differences were also investigated to select suitable reservoir stimulation measures and determine exploration targets for the field. The results show that the fractures were developed in 3 stages (early, middle and late) in Keshen gas field and constitute reservoirs of distinctive characteristics due to the control of tectonic deformation stage and aqueous diagenesis environment. The Keshen-5 and -6 gas reservoirs in the north of the field are dominated by vertical fractures or high-angle tensile fractures which are nearly parallel to the long axis of the anticline under the effect of slow tectonic deformation at the early stage;

收稿日期:2019-02-25;修订日期:2021-01-22。

第一作者简介:王珂(1987—),男,博士、高级工程师,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, 2017ZX05001-002);中国石油天然气股份有限公司科技重大专项(2019B-0303);国家重点研发计划(2019YFC0605501)。

the Keshen-2 gas reservoir in the center was under the influence of the middle deformation stage and contains both near NS-trending shearing fractures and near EW-trending tensile fractures with the former being relatively superior in number; the Keshen-8 and -9 gas reservoirs in the south of the field is dominated by vertical shearing fractures of nearly NS trending under deformation of the late stage. In general, from the north to the south, both the major differential stress to rock compressive strength ratios and the fracture density show a rise-fall tendency; meanwhile, the dominant strike of fractures gradually runs parallel to the present major principal stress from a high-angle intersection along with shrinking fracture forming time, which in turn reduces filling rate and results in greater effective aperture. In addition, the Bashijiqike Formation (K_1bs) was deposited in a saline water as a whole; the Keshen-5, -6, and -2 blocks in the north of the field were formed in a fresh-brackish setting with fractures mainly filled by calcites, making acidification a suitable reservoir stimulation choice; and the Keshen-8, and -9 blocks in the south of the field were formed in an alkaline-prone water setting with fractures primarily filled with anhydrite and dolomite, making fracturing a more applicable stimulation option. The Keshen-8 block ranks first in terms of tectonic fracture effectiveness, followed by the Keshen-2 and -9 blocks, and then by the Keshen-5 and -6 gas pools. The Keshen-18, -19, -20, and -24 blocks are suggested to have well-developed tectonic fractures and shall be targeted in future exploration.

Key words: forming sequence, tectonic deformation, fill, tectonic fracture, tight sandstone reservoir, ultra-deep formation, foreland thrust belt, Keshen gas field, Tarim Basin

致密砂岩储层泛指渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 且孔隙度小于 10% 的砂岩储层, 当其中具有工业规模性天然气聚集时则成为致密砂岩气藏^[1]。致密砂岩气的勘探已有近百年的历史, 工业开采历史超过 65 a^[2]。中国致密砂岩气勘探潜力巨大, 是近年来天然气增储上产的重要领域。目前在鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系、四川盆地上三叠统须家河组、渤海湾盆地古近系沙河街组、塔里木盆地库车坳陷侏罗系和白垩系等均已发现工业规模性的致密砂岩气藏, 总有利区面积达 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地质资源量 $17.4 \times 10^{12} \sim 25.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 可采资源量为 $8.8 \times 10^{12} \sim 12.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[3-4]。由于致密砂岩储层基质孔渗低, 难以形成高效的渗流系统, 因此构造裂缝通常是改善这类储层物性的重要因素^[5-7]。研究表明, 构造裂缝所提供的渗透率可高出基质渗透率 1~3 个数量级甚至更高^[8-11]。对于致密砂岩储层, 构造裂缝研究的最终目的是在构造裂缝发育类型、成因机制以及控制因素分析的基础上, 明确构造裂缝在空间上的分布规律, 从而寻找天然气的有利区^[12-17]。

前陆冲断带是全球沉积盆地中一类重要的含油气构造, 通常发育成排成带的大型构造圈闭群, 与前渊凹陷优质生烃灶纵向叠置, 复杂断裂系统沟通, 喜马拉雅期形成并保存的前陆冲断带易形成大型构造油气田群, 在中国准噶尔盆地西北缘、塔里木盆地库车坳陷、塔西南地区和四川盆地西部, 加拿大西加盆地、伊朗扎格罗斯盆地、美国沃希托盆地及委内瑞拉东委盆地等均发育前陆冲断型油气田^[18-19]。由于构造变形规模

大、演化阶段复杂, 前陆冲断带通常大量发育构造裂缝, 并且具有多期次叠加的特点, 其成因和分布规律一直是研究的热点与难点^[20-23]。

克深气田是在塔里木盆地库车前陆冲断带上探明的万亿立方级大型天然气田, 由多个近 EW 走向的断背斜气藏组成, 目前仍有新的气藏圈闭在不断发现^[24]。该气田的主力含气层系下白垩统巴什基奇克组为典型的超深层致密砂岩储层, 基质孔渗较差, 仅靠基质孔隙难以形成高效的渗流系统, 构造裂缝对储层物性有显著的改造作用^[25-27]。岩心和成像测井资料表明, 各个断背斜气藏间的构造裂缝发育特征具有明显差异性, 这种差异性是导致气藏间天然气产能差异的重要因素。明确构造裂缝的差异分布特征及其成因, 对继续寻找有利天然气圈闭, 拓宽勘探领域具有重要意义。因此本文综合岩心、薄片及成像测井等资料, 分析库车前陆冲断带克深气田致密砂岩储层构造裂缝的类型与形成序列, 在此基础上探讨不同断背斜气藏之间构造裂缝的差异性分布及其成因, 从而明确构造裂缝的分布规律, 以期对克深气田新的天然气圈闭勘探提供一定的参考, 同时为其他前陆冲断带致密砂岩储层构造裂缝的研究提供借鉴。

1 地质背景

库车前陆冲断带位于塔里木盆地的北缘, 是一个自晚海西期开始发育, 经历了多次构造运动叠加, 在古生代被动大陆边缘基础之上发育起来的中新生

的剧烈隆升,产生了近NS向的强烈挤压推覆作用,在膏盐层下形成了多个断背斜气藏^[31](图1),其中克深5、克深6、克深2、克深8和克深9气藏已逐步转入开发阶段,克深10、克深13和克深24等气藏处于预探和评价阶段。

克深气田巴什基奇克组沉积期的物源主要来自北部的南天山造山带,早期为冲积扇-扇三角洲-滨浅湖沉积体系,中晚期为辫状河-辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系,垂向上多期砂体叠置、平面上多个扇体相连,从而形成了规模巨大的砂体^[32]。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,下白垩统巴什基奇克组也遭受一定程度的剥蚀,造成其与下伏地层下白垩统卡普沙良群巴西改组(K_1bx)整合接触,与上覆地层库姆格列木群($E_{1-2}km$)呈角度不整合接触^[33]。克深气田巴什基奇克组埋深5 500~8 500 m,厚度260~310 m,岩性以红褐色细砂岩、粉砂岩、中砂岩和薄层泥岩为主。砂岩主要为岩屑长石砂岩,其次为长石岩屑砂岩;储集空间包括残余原生粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、微孔隙和微裂缝等;岩心实测基质孔隙度一般为1.5%~5.5%,基质渗透率一般 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu m^2$ 。岩心及成像测井等资料显示,巴什基奇克组构造裂缝发育,属于超深层低孔裂缝性致密砂岩储层。

2 构造裂缝基本特征

克深气田具有丰富的岩心、成像测井和天然气产量等资料,本文共利用5个气藏39口井的取心(其中发育裂缝总计1791条)、44口井的目的层段成像测井和61口井的天然气产量数据(表1),对构造裂缝的类型、特征及差异性进行分析。

按照倾角不同,可将构造裂缝分为直立缝($\theta \geq 75^\circ$)、高角度缝($45^\circ \leq \theta < 75^\circ$)、低角度缝($15^\circ \leq \theta <$

45°)和水平缝($0^\circ \leq \theta < 15^\circ$)4类,其中 θ 为裂缝倾角^[9]。岩心观察表明(图2),克深气田的构造裂缝以直立缝和高角度缝为主,剪切裂缝和张性裂缝均有不同程度的发育。剪切裂缝的裂缝面平直,延伸较远,可切穿层理面,部分剪切裂缝具有微小断距,开度通常小于0.5 mm,一般为未充填或少量充填;张性裂缝的裂缝面弯曲,延伸范围有限,开度一般在0.5~1 mm,个别可达2~3 mm,多被方解石、硬石膏和白云石等矿物充填,其中的方解石充填物有时可见酸性地层水溶蚀形成的小型孔洞。构造裂缝多发育在粉砂岩和细砂岩中,并且通常终止于砂泥岩界面,少见透入泥岩的裂缝。在泥岩中多发育规模较小的张裂缝,偶见直立的剪切裂缝。由于泥岩多以薄夹层形式出现在多套砂岩之间,其中的裂缝数量有限,因此对构造裂缝总体发育程度的贡献率较低。

微观构造裂缝多切穿胶结物和部分颗粒,缝宽从10~100 μm 不等,沿裂缝可发生长石等矿物的局部溶蚀,早期渗流砂或方解石、硬石膏和白云石等矿物充填的构造裂缝在后期构造应力和异常高压流体作用下易沿颗粒边缘或原有裂缝面重新裂开(图3)。由于开度通常较小,因此微观构造裂缝对提高储层渗透率贡献十分有限,主要起储集空间的作用,并且可以切穿基质颗粒,连通基质孔隙,从而改善储层孔隙结构^[23,34]。

构造裂缝在成像测井图像上表现为正弦曲线,发育平行式、斜交式、共轭式和网状式等组合类型(图4)。根据正弦曲线的几何形态,可获取裂缝的倾向、倾角等产状信息,并根据公式(1)计算裂缝的线密度^[33,35]。

$$D = N/H \quad (1)$$

式中: D 为裂缝线密度,条/m; H 为井段长度,m; N 为成像测井识别的裂缝数量,条。

3 构造裂缝的形成序列

构造裂缝形成于构造应力作用,因此构造裂缝的形成期次通常与构造运动具有较好的对应关系,各期次构造运动背景下的构造应力场不同,所形成的构造裂缝在产状和力学性质等特征上也会有明显差异,并且一般来说,构造裂缝形成越早,充填程度越高,常被后期形成的构造裂缝切割和错断^[22-23]。参考前人对库车坳陷构造变形的地质分析及物理模拟成果^[36-38],利用最新的地震解释剖面,运用平衡剖面技术恢复了库车坳陷中部剖面(过克深2井)的构造演化史(图5)。再结合构造应力场演化史、储层沉积埋藏史^[39-40]以及

表1 克深气田巴什基奇克组构造裂缝参数及天然气产量数据来源

Table 1 Statistics of tectonic fracture parameters and natural gas production data of the K_1bs in Keshen gas field

资料类别	克深5	克深6	克深2	克深8	克深9
取心/口	5	4	19	8	3
岩心总长度/m	152.95	80.36	341.54	97.17	50.31
岩心裂缝数/条	299	210	840	227	215
目的层段成像测井/口	5	4	19	12	4
天然气产量数据/口	7	4	30	16	5

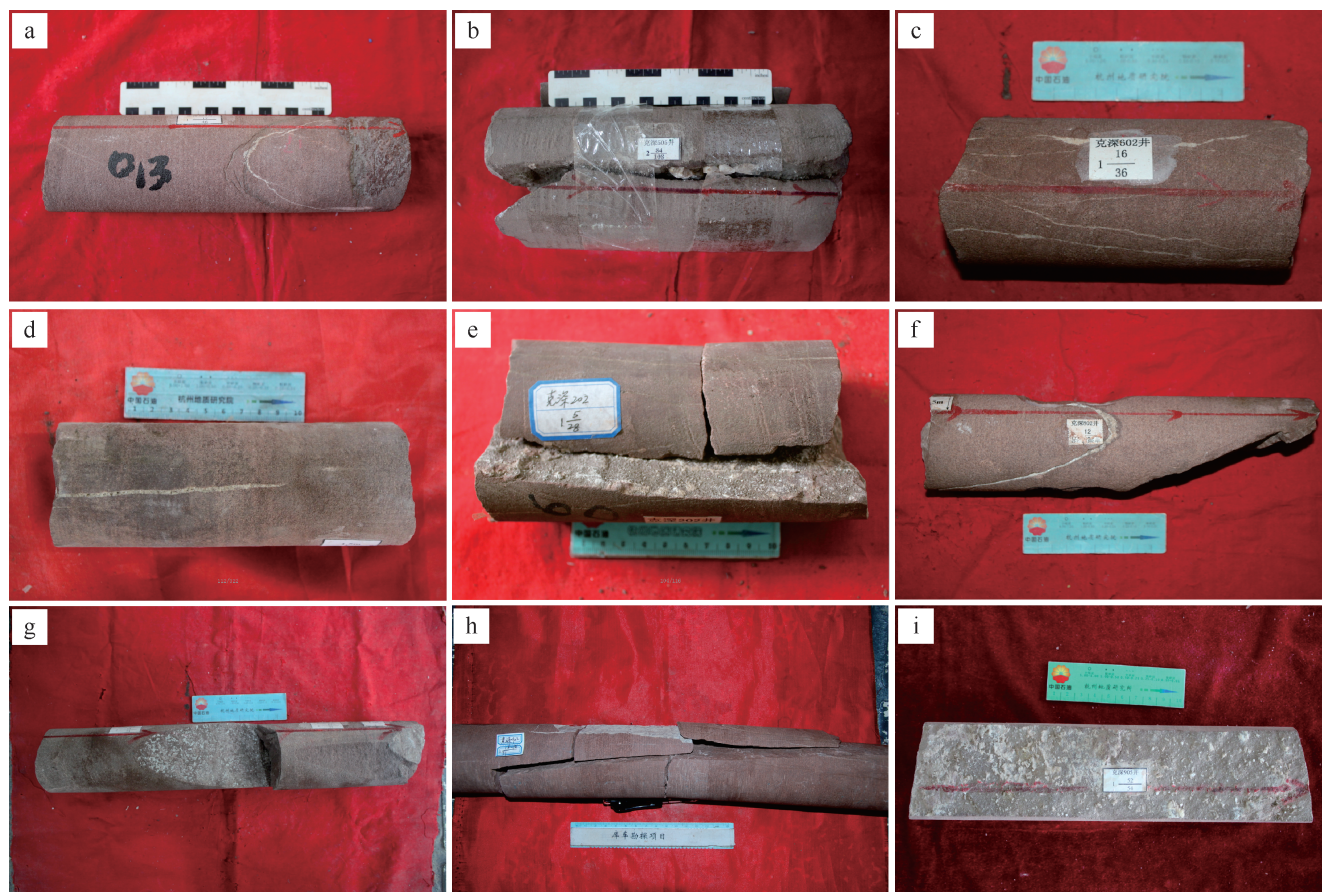


图2 克深气田巴什基奇克组典型构造裂缝岩心照片

Fig. 2 Typical tectonic fractures in cores of K_1bs in Keshen gas field

a. 克深503井,埋深6 895.7 m,高角度张性缝,方解石充填;b. 克深505井,埋深6 773.9 m,直立张性缝,方解石半充填;c. 克深602井,埋深6 009.4 m,密集的直立张性缝,方解石充填;d. 克深2-1-5井,埋深6 723.2 m,直立张性缝,方解石充填,方解石发生局部溶蚀形成小型孔洞;e. 克深202井,埋深6 765.8 m,直立剪切缝,方解石微量充填;f. 克深802井,埋深7 236.6 m,高角度张性缝,硬石膏充填;g. 克深8-8井,埋深6 879.0 m,高角度剪切缝,硬石膏微量充填;h. 克深902井,埋深7 974.3 m,未充填的高角度剪切缝和硬石膏充填的直立张性缝相交;i. 克深905井,埋深7 486.7 m,直立剪切缝,硬石膏和白云石少量充填

构造裂缝的产状、力学性质、交切关系和充填程度等特征和裂缝充填物碳氧同位素测温结果(表2),认为克深气田巴什基奇克组的构造裂缝可分为3期^[9,39-43]。

第1期构造裂缝形成于白垩纪末期—新近纪吉迪克组沉积期的近NS向伸展作用及短暂的挤压抬升(燕山运动—喜马拉雅早期运动),该时期的水平最大主应力为35.2~59.9 MPa,主要形成少量近EW走向的张性裂缝和近NS走向的剪切裂缝,已被方解石、硬石膏或白云石等矿物完全充填成为无效裂缝(克深2气藏裂缝方解石充填物形成温度为89~91℃),但少数可在后期构造应力和异常流体高压作用下沿原裂缝面重新裂开成为有效裂缝;第2期构造裂缝形成于新近纪康村组沉积期—库车组沉积早期的近NS向挤压作用(喜马拉雅中期运动),该时期水平最大主应力约74.8 MPa,主要形成一定数量的近NS走向的剪切裂

缝,一般为半充填,保留了一定的渗流能力(克深2气藏裂缝方解石充填物形成温度为106~109℃);第3期构造裂缝形成于新近纪库车组沉积晚期—第四纪西域组沉积期的近NS向强烈挤压推覆作用(喜马拉雅晚期运动),该时期水平最大主应力约80.9 MPa,地层在推覆挤压应力作用下发生强烈弯曲,伴随着大量逆冲断层的形成,克深地区的叠瓦冲断构造最终定型,在此构造应力背景下发育2种成因的构造裂缝,一种是挤压应力直接产生的近NS走向剪切裂缝,另一种是背斜弯曲变形产生的近EW走向张性裂缝,多为未充填、少量充填或半充填(克深2气藏裂缝方解石充填物形成温度为122~129℃),该期构造裂缝数量较多,并且其形成时间与天然气的大量充注期吻合^[24,44-45],是克深气田工业规模性气藏最终形成的关键因素(图6)。

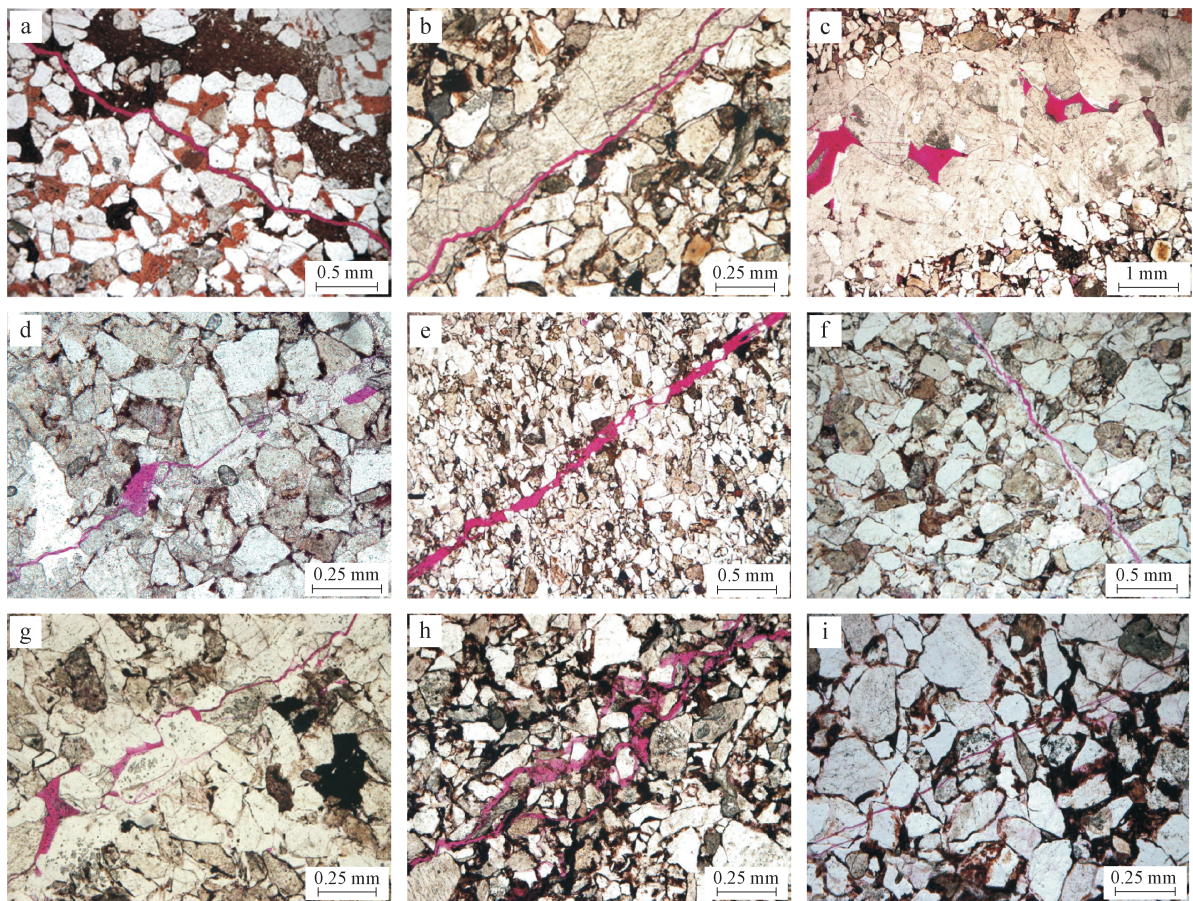


图3 克深气田巴什基奇克组微观构造裂缝

Fig. 3 Tectonic microfractures of K_1bs in Keshen gas field

a. 克深501井,埋深6 746.6 m,构造裂缝切穿胶结物和部分颗粒,缝宽约50 μm ;b. 克深506井,埋深6 567.7 m,沿早期白云石充填裂缝重新裂开,缝宽约25 μm ;c. 克深6井,埋深5 618.1 m,白云石充填构造裂缝,缝宽约3 mm,发育白云石晶间孔隙;d. 克深201井,埋深6 706.7 m,构造裂缝切穿颗粒,缝宽约10 μm ,沿裂缝发生局部颗粒溶蚀;e. 克深801井,埋深7 227.3 m,构造裂缝切穿颗粒,缝宽约100 μm ;f. 克深802井,埋深7 235.1 m,早期白云石充填构造裂缝重新裂开,缝宽约40 μm ;g. 克深8004井,埋深7 004.2 m,早期渗流砂充填构造裂缝重新裂开,裂缝绕过颗粒,缝宽约10 μm ;h. 克深902井,埋深7 928.0 m,沿构造裂缝发生溶蚀,缝宽约25 μm ;i. 克深904井,埋深7 849.1 m,构造裂缝切穿颗粒,缝宽约10 μm

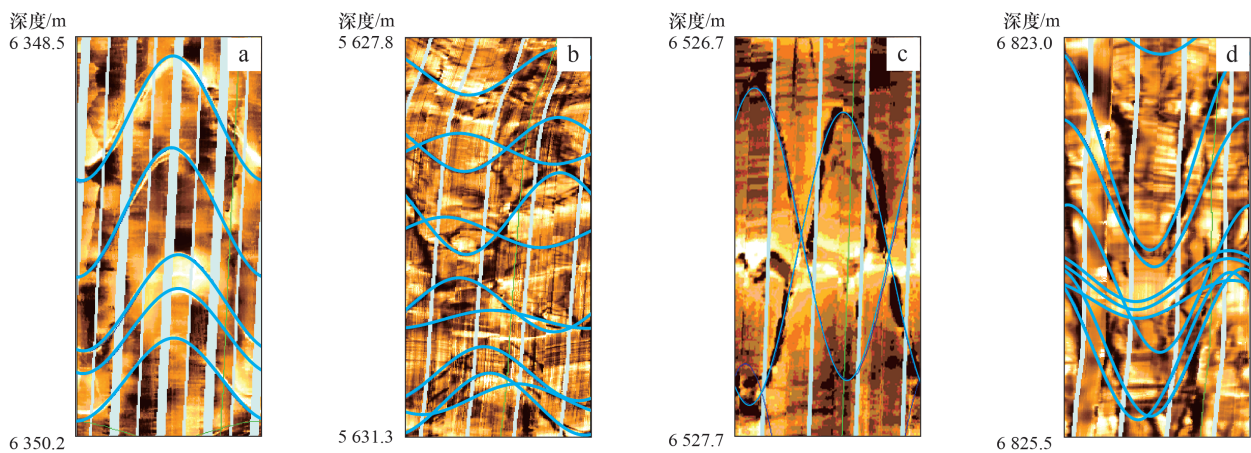


图4 克深气田巴什基奇克组成像测井构造裂缝组合类型

Fig. 4 Assemblage types of tectonic fractures on image logs of K_1bs in Keshen gas field

a. 克深501井,1组平行裂缝;b. 克深6井,网状裂缝;c. 克深201井,1组共轭裂缝;d. 克深8井,2组裂缝斜交

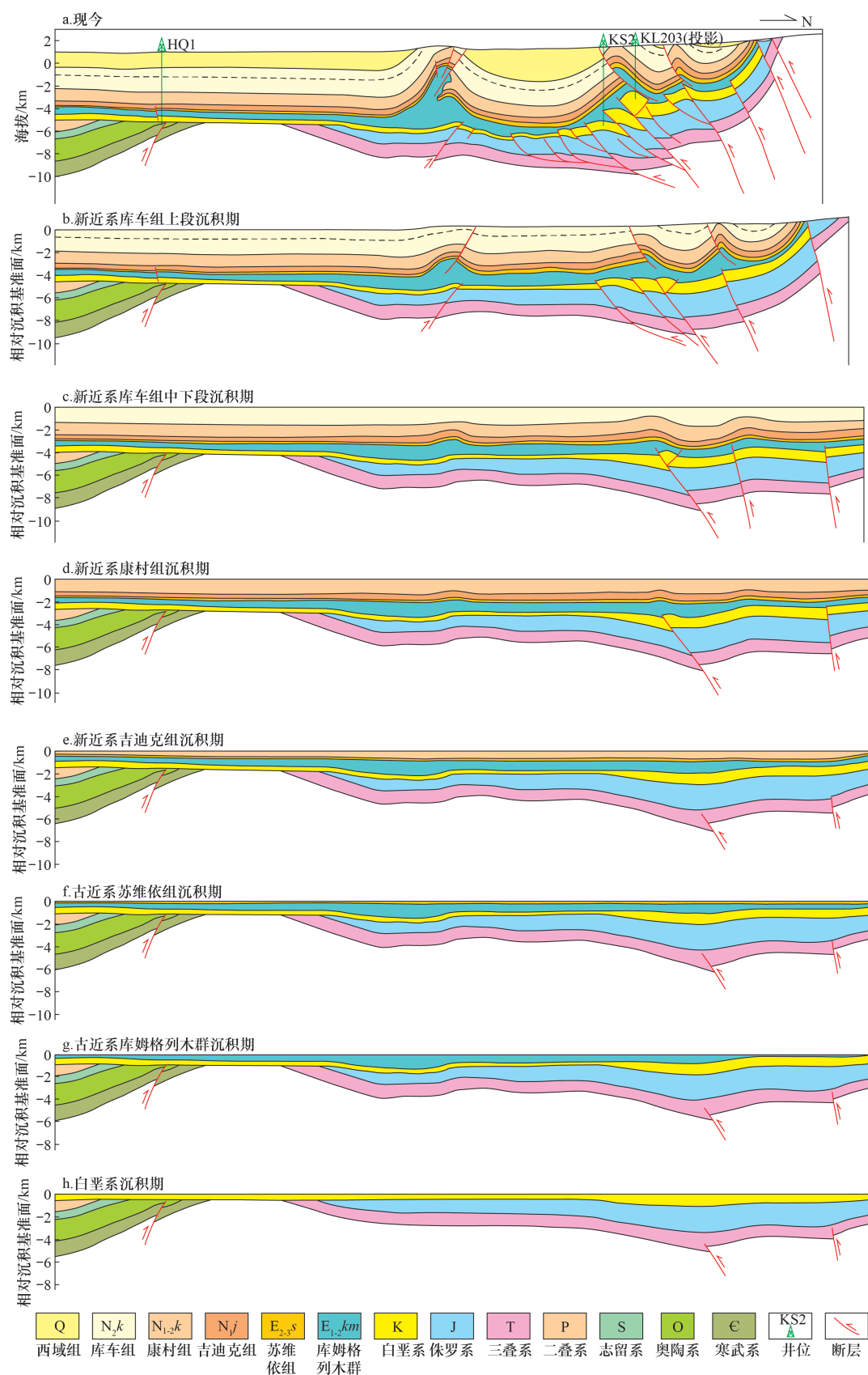


图5 库车坳陷中部白垩纪—第四纪构造演化

Fig. 5 Tectonic evolution of the Cretaceous-Quaternary in central Kuqa Depression

表 2 克深 2 气藏巴什基奇组构造裂缝充填物碳氧同位素特征

Table 2 C-O isotopes of tectonic fracture fills in K₁bs of Keshen-2 gas pool

井号	块号/样号	岩性	$\delta^{13}\text{C(PDB)}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O(PDB)}/\text{‰}$	形成温度/℃	Z 值	裂缝期次
克深 202	1-3/28	棕褐色细砂岩	-3.777	-16.428	128.4	111.4	第 3 期
克深 202	2-14/19	棕褐色细砂岩	-2.760	-15.094	106.5	114.1	第 2 期
克深 202	2-15/19	棕褐色细砂岩	-2.887	-15.262	109.1	113.8	第 2 期
克深 202	2-17/19	棕褐色细砂岩	-3.475	-16.080	122.4	112.2	第 3 期
克深 201	1-26/28	浅褐色细砂岩	-3.493	-16.217	124.8	112.1	第 3 期
克深 2-2-4	3-17/59(全)	褐色细砂岩	-2.876	-14.041	91.0	114.4	第 1 期
克深 205	1-14/25	红褐色细砂岩	-2.446	-13.937	89.5	115.3	第 1 期

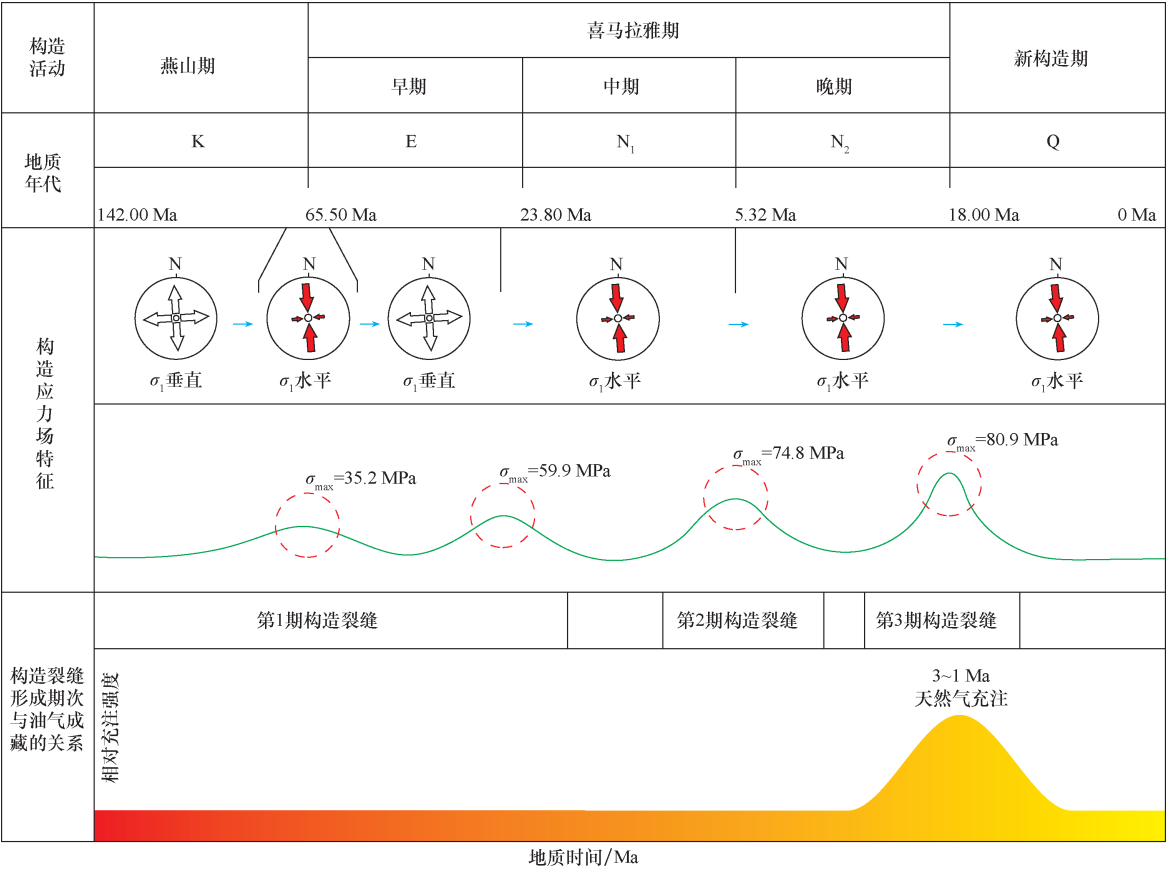


图 6 克深气田巴什基奇组构造裂缝形成序列(最大古构造应力 $\sigma_{\max}$ 采用库车坳陷的数据,据曾联波等^[39])

Fig.6 Forming sequence of tectonic fractures of K₁bs in Keshen gas field ($\sigma_{\max}$ is derived after reference[39])

4 构造裂缝差异分布及成因

利用岩心裂缝观察及成像测井裂缝解释结果,结合单井无阻流量数据,发现构造裂缝的产状、力学性质、密度、有效开度、充填性和充填物等方面在不同气藏之间具有明显的差异性(表 3)。由于白垩纪—古近纪的构造运动较弱,形成的第 1 期构造裂缝数量很少,对不同气藏之间构造裂缝的差异性影响较小,因此起控制作用的主要为新近纪康村组沉积期以后的构造运动。

4.1 产状和力学性质差异性

从构造位置来看,克深 5 气藏位于克深气田和大北气田之间的构造转换带,除了受到近 NS 向的构造应力分量外,还受到 NE-SW 向的左旋剪切应力分量^[46],从而导致局部构造应力场复杂化,裂缝产状多变。根据成像测井的解释结果发现,克深 5 气藏西南部的构造裂缝优势走向和现今水平最大主应力方位均为近 EW 向,中部渐变为 NW-SE 向,东南部又渐变为近 NS 向。

表3 克深气田不同气藏之间巴什基奇克组构造裂缝差异性

Table 3 Differences in tectonic fractures of gas reservoirs in K₁bs of Keshen gas field

参数/气藏	克深5	克深6	克深2	克深8	克深9
走向	近 EW、NW-SE、 近 NS	近 EW 为主	近 NS、近 EW、 NW-SE	近 NS、近 EW	近 NS 为主
倾角	高角度为主(49.7%), 其次为直立(28.7%) 和低角度-水平 (21.6%)	高角度为主(55.3%), 其次为直立(26.3%) 和低角度-水平 (18.4%)	直立为主(48.9%), 其次为高角度(34.2%) 和低角度-水平 (16.9%)	直立为主(59.5%), 其次为高角度(40.4%) 和低角度-水平 (0.1%)	直立为主(60.0%),其次 为高角度(37.9%)和低 角度-水平(2.1%)
力学性质	张性为主(71.2%), 其次为剪切(28.8%)	张性为主(66.7%), 其次为剪切(33.3%)	剪切为主(79.5%), 其次为张性(20.5%)	剪切为主(86.8%), 其次为张性(13.2%)	剪切为主(89.1%),其次 为张性(10.9%)
线密度/(条·m ⁻¹)	0.2~0.4	0.1~0.5	0.4~2.3	0.2~1.2	0.2~0.4
有效开度/mm	0.1~0.2	0.1~0.5	0.1~1.0	0.1~1.5	0.1~1.2
充填率/%	70	68	63	27	26
充填物	方解石为主	方解石为主	方解石为主	硬石膏及少量白云石	硬石膏及少量白云石
单井无阻流量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	80~350	90~220	110~530	320~900	100~440

由表3可见,除克深5气藏外,构造裂缝的优势走向自北向南由以近EW向为主(克深6气藏)过渡为近EW向和近NS向共存,其间还有少量NW-SE向的裂缝(克深2和克深8气藏),再过渡为以近NS向为主(克深9气藏);倾角自北向南逐渐增大,由以高角度缝为主(克深5和克深6气藏)过渡为以直立缝为主(克深2、克深8和克深9气藏),并且直立缝的比例逐渐增大;力学性质由以张性裂缝为主(克深5和克深6气藏)过渡为以剪切裂缝为主(克深2、克深8和克深9气藏),并且剪切裂缝的比例自北向南逐渐增大。构造裂缝的这种分布规律主要与不同气藏的构造挤压变形时间和变形速率差异有关。

克深气田所在的克拉苏冲断带属于典型的前展式冲断构造^[47-49],在吉迪克组沉积期以前整体发生微弱变形,南部和北部的变形没有明显的差异性。吉迪克组沉积期以后,不同部位的变形开始出现差异。北部靠近南天山造山带的地区挤压变形时间相对较早(图5),在新近系康村组沉积期就已开始变形,此时变形速率相对较慢,地层发生蠕变弯曲形成背斜构造,产生的构造裂缝以近似平行于背斜长轴(近EW向)的张性裂缝为主,在长轴轴线上为直立缝,翼部为高角度缝。另外伴随着逆冲断层的推覆滑移,还产生了一定数量的断层伴生低角度-水平缝,通常为剪切性质,主要发育在翼部和断层附近,呈近EW向。在新近系库车组沉积期以后的快速挤压推覆时,早期的张性裂缝和低角度-水平缝在一定程度上限制了近NS向剪切裂缝的形成,并且随着背斜的进一步弯曲,又会形成新的近EW向直立或高角度张性裂缝,造成北部的克深6气藏以高角度缝和张性裂缝为主,直立缝和剪切裂

缝相对较少,克深5气藏局部构造应力场虽然较复杂,但整体变形过程与克深6气藏相似,因此构造裂缝的倾角和力学性质也与克深6气藏相近,只是在气藏内部走向变化较大。

中部地区(克深2气藏)在新近系库车组沉积早中期开始变形收缩,因此构造裂缝的形成时间略晚于克深5和克深6气藏,并且在部分近EW向的张性裂缝和低角度-水平缝形成之后或近于同时,即受到库车组沉积晚期的快速挤压推覆,早期裂缝对该时期剪切裂缝的限制作用有限,从而造成近EW向和近NS向裂缝共存,并且以近NS向占优势的局面。同时,成像测井解释结果表明近NS向的剪切裂缝以直立为主,因此克深2气藏直立缝的比例略有增大。此外还发育NW-SE向裂缝,仅在背斜倾没端的个别井中发育,可能与局部构造应力方位的变化有关。

南部地区(克深8和克深9气藏)靠近前渊带,直到新近系库车组沉积晚期—第四纪西域组沉积期才陆续发生挤压变形(图5),此时强烈的挤压推覆作用使地层弯曲出现背斜形态之前即产生大量的近NS向剪切裂缝,限制了后期因背斜弯曲变形产生的张性裂缝和断层相关低角度-水平缝的发育,因此克深8和克深9气藏的构造裂缝整体上以近NS向的剪切裂缝为主,直立缝比例与克深2气藏相比进一步增大,仅在背斜长轴的部分井中发育近EW向的张性裂缝,低角度-水平缝基本不发育。

4.2 密度差异性

前人研究表明,构造裂缝密度受构造应力、储层岩性、岩石力学性质、岩层厚度、沉积微相等诸多因素的

影响^[16,33,50-52]。克深气田巴什基奇克组为一大型的辫状河(扇)三角洲前缘朵体,平面上分布稳定^[53],因此对于克深气田的不同气藏而言,储层岩性、岩层厚度和沉积微相等因素差异较小,影响构造裂缝密度差异性的主要因素为构造应力及储层岩石力学性质的差异^[54-57]。

克深气田自北向南储层埋深逐渐增加,主差应力随之逐渐增大,但埋深增加同时也造成储层压实作用增强,岩石抗压强度增大。其中主差应力为水平最大主应力与水平最小主应力的差值,岩石抗压强度为岩石破坏时单位面积上的应力值,反映了岩石在受挤压应力时抵抗破坏的能力。上述参数可利用测井资料,通过以下方程组计算^[58-60]:

$$\begin{cases} \sigma_h = \sigma_x + \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_v + \frac{1-2\mu}{1-\mu}\alpha p_p \\ \sigma_H = \sigma_y + \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_v + \frac{1-2\mu}{1-\mu}\alpha p_p \\ \sigma_v = \int_0^Z \rho(Z)g dZ \\ \mu = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \\ E = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \cdot \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \\ \sigma_d = \sigma_H - \sigma_h \\ S = E[0.008V_{sh} + 0.0045(1 - V_{sh})] \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_h, σ_H 和 σ_v 分别为水平最小主应力、水平最大主应力和垂向主应力,MPa; σ_x, σ_y 分别为 x 方向、 y 方向上的构造应力分量,MPa; μ 为岩石泊松比,无量纲; α 为 Biot 系数,无量纲; p_p 为地层压力,MPa; Z 为地层深度,m; $\rho(Z)$ 为上覆岩层密度,是与地层深度 Z 有关的函数, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; Δt_p 和 Δt_s 分别为纵波时差和横波时差, $\mu\text{s/m}$; E 为岩石杨氏弹性模量,MPa; ρ_b 为岩石骨架密度, kg/m^3 ; σ_d 为主差应力,MPa; S 为岩石抗压强度,MPa; V_{sh} 为岩石泥质百分含量,小数。

相关数据的计算与统计表明,克深气田主差应力与岩石抗压强度的比值与裂缝线密度有良好的正相关性,自北向南具有先增大后减小的趋势,其中克深2气藏主差应力与岩石抗压强度的比值最高,因此构造裂缝密度最大(图7)。

4.3 有效开度差异性

构造裂缝的现今有效开度与裂缝初始开度、裂缝走向和现今应力方位的关系以及裂缝充填率等因素有

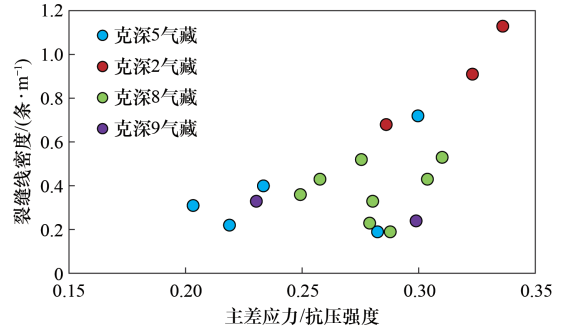


图7 克深气田巴什基奇克组主差应力/抗压强度与裂缝密度的关系

Fig. 7 Relationship between deviator stress/compressive strength ratios and fracture density of K₁bs in Keshen gas field

关。北部的克深6和克深5气藏以张性裂缝为主,裂缝的初始开度较大,但其中克深6气藏的构造裂缝优势走向与现今水平最大主应力方位近似垂直,裂缝容易受压闭合,并且充填率较高,而克深5气藏的构造裂缝优势走向虽然与现今水平最大主应力方位近似平行,裂缝不易受压闭合,但同样具有较高的充填率,因此这2个气藏的构造裂缝有效开度相对较低(0.1~0.5 mm);南部的克深8和克深9气藏以剪切裂缝为主,裂缝初始开度相对较小,但其优势走向与现今水平最大主应力方位近似平行,构造裂缝的开度不会因现今构造应力挤压明显减小,并且充填率较低,因此构造裂缝有效开度较大(0.1~1.5 mm)(表3);中部克深2气藏的构造裂缝一部分走向与现今水平最大主应力方位近似平行,另一部分近似垂直,并且充填率中等,因此构造裂缝有效开度也为中等大小(0.1~1.0 mm)。

4.4 充填率和充填物差异性

岩心观察结果表明,克深气田北部克深5、克深6气藏和中部克深2气藏的裂缝充填物以方解石为主,充填率可达60%~70%;南部克深8和克深9气藏的裂缝充填物以硬石膏和少量白云石为主,充填率仅约26%~27%(表3)。

构造裂缝充填物的差异性主要受成岩孔隙水介质环境控制。克深气田巴什基奇克组储层的优质层段主要集中在中上部,是一套以细砂岩和粉砂岩为主的辫状河三角洲沉积体系,物源主要来自北部的南天山造山带(图8)。总体上,巴什基奇克组沉积期以炎热干旱气候为主,沉积水体呈咸化状态。但由于研究区北部地势较高,水体相对较浅,再加上靠近山区,气候相对偏湿,古克拉苏河的季节性淡水持续注入^[61],降低了水体盐度,使得巴什基奇克组沉积期整体上为淡水—

半咸水介质成岩环境,因此在储层中形成了大量淡水-半咸水成因的方解石胶结物。当这些方解石胶结物在构造裂缝形成以后发生溶解-再沉淀作用时,即在裂缝两壁形成现今岩心上所观察到的方解石充填物。Keith等总结了区分侏罗纪以来海相成因灰岩和淡水成因灰岩的经验公式^[62-63]:

$$Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50) \quad (3)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为碳同位素和氧同位素,均为PDB标准,‰。当 Z 大于120时为海相成因灰岩, Z 小于120时为淡水成因灰岩。

根据构造裂缝方解石充填物的碳氧同位素数据计算得出的 Z 值为111.4~115.3(表2),小于120但与120十分接近,表明克深气田构造裂缝中的方解石充填物确应形成于淡水-半咸水介质成岩环境。

研究区南部地势较低,水体相对较深,同时缺乏淡水注入,整体表现为偏碱性水成岩环境,水体盐度较高,储层中的胶结物主要为硬石膏和白云石^[64](图9)。

裂缝充填性的差异性主要与构造裂缝的形成时间有关。研究区所在的大北-克深地区,白垩系巴什基

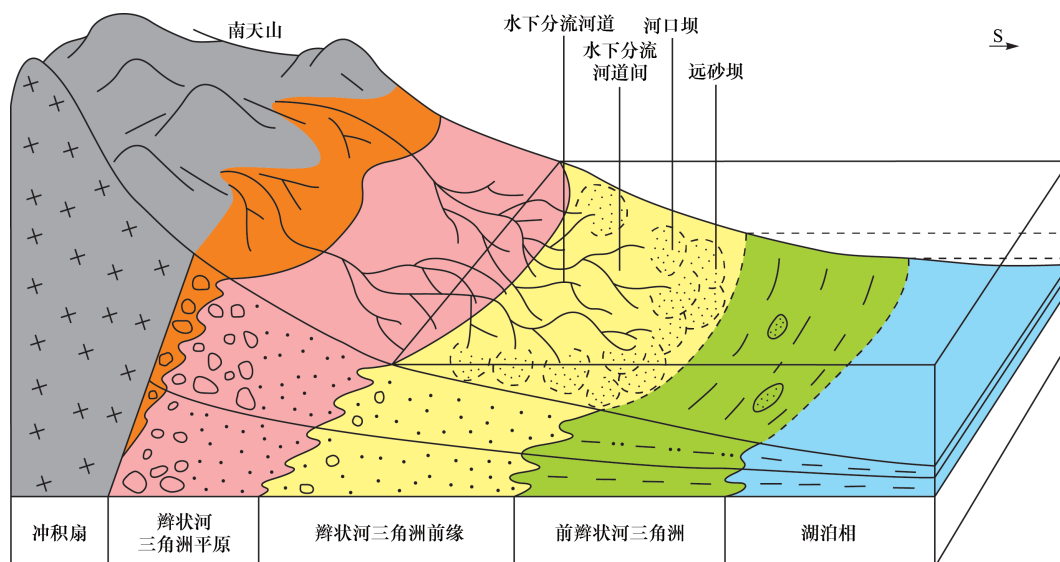


图8 库车前陆冲断带巴什基克组辫状河三角洲沉积模式

Fig. 8 Depositional pattern of braided river delta facies of K_1bs in Kuqa foreland thrust belt

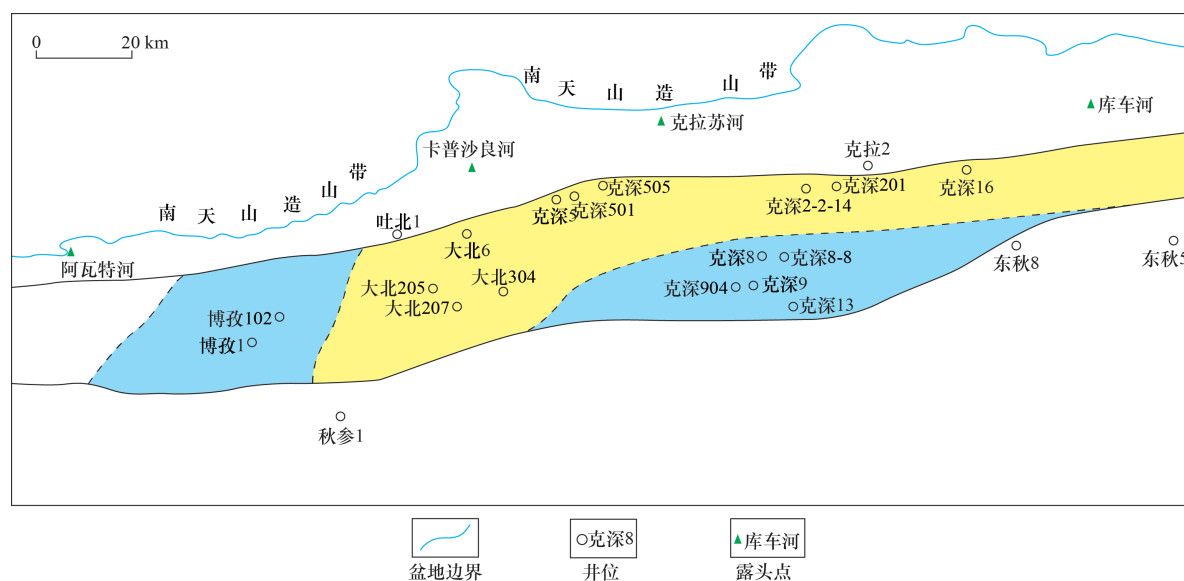


图9 库车前陆冲断带博孜一大北-克深地区巴什基克组沉积期成岩环境与胶结物类型(据文献^[64]修改)

Fig. 9 Diagenetic settings and cement types of the K_1bs in Bozi-Dabei-Keshen areas of Kuqa foreland thrust belt

黄色区域为淡水-半咸水介质成岩环境,主要方解石胶结;蓝色区域为偏碱性水介质(盐湖)成岩环境,白云石、硬石膏、岩盐等胶结

奇克组共经历了古近系-新近系康村组沉积早期($>6\text{ Ma}$)、康村组沉积晚期-库车组沉积早期($6\sim5\text{ Ma}$)和库车组沉积晚期($3\sim2\text{ Ma}$)3期主要的胶结作用^[65]。如前文所述,在燕山晚期-喜马拉雅期的前展式逆冲推覆作用下,研究区北部克深5和克深6气藏的构造裂缝在康村组沉积期便开始产生,因此完整经历了上述3期胶结作用,形成了大量的方解石充填物,充填率约70%;中部克深2气藏的构造裂缝形成于库车组沉积早中期,只经历了后两期胶结作用,充填物仍以方解石为主,充填率降至60%左右;南部克深8和克深9气藏的构造裂缝形成于库车组沉积晚期,只经历了最后一期胶结作用,因此在构造裂缝中只形成了少量的硬石膏和白云石充填物,充填率仅30%左右(表3)。

5 讨论

综合构造裂缝的产状、密度、有效开度、充填性和充填物等进行定性评价后认为,克深8气藏的构造裂缝密度和有效开度较大,并且充填率低,整体有效性最好,因此天然气无阻流量也最高($320\times10^4\sim900\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$),克深5和克深6气藏的构造裂缝密度和有效开度均较低,并且充填率高,整体有效性较差,因此天然气无阻流量仅分别为 $80\times10^4\sim350\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 和 $90\times10^4\sim220\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,克深2和克深9气藏的构造裂缝整体有效性中等,无阻流量分别为 $110\times10^4\sim530\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 和 $100\times10^4\sim440\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ (表3)。构造裂缝充填物的差异性决定了不同气藏采取的储层改造措施也应有所不同,克深5、克深6和克深2气藏的构造裂缝充填物以易于与酸发生反应的方解石为主,因此酸化可有效改善裂缝的有效性,提高产量,例如克深205井6890~6976 m采用6 mm油嘴求产,酸化前日产量仅约 $3\times10^4\text{ m}^3$,酸化后(未压裂)提高到 $41\times10^4\text{ m}^3$;克深8和克深9气藏的构造裂缝充填物以硬石膏和白云石为主,不易与酸发生反应,并且本身含量也较低,酸化改造提产效果十分有限,例如克深8-3井6953~7062 m采用5 mm油嘴求产,酸化前日产量 $30.2\times10^4\text{ m}^3$,酸化后仅提高到 $31.1\times10^4\text{ m}^3$,因此对于克深8和克深9气藏的储层改造应以压裂为主,例如克深805井6959~7087 m采用6 mm油嘴求产,体积压裂前日产量几乎为0,体积压裂后提高到 $44\times10^4\text{ m}^3$ 。

克深气田的勘探目前正逐渐向前渊带和东西两侧推进,根据上述规律推测,在克深9气藏南部靠近

前渊带的地区,直立剪切构造裂缝的比例应有所增大,而构造裂缝密度、充填率和有效开度均应有所降低,整体发育程度要低于克深9气藏,天然气产量相应下降。从靠近前渊带的克深13井岩心来看,直立剪切裂缝的比例可达80%以上,除少数高角度裂缝被硬石膏和白云石充填外,其余裂缝均未被充填,有效开度 $0.1\sim1.0\text{ mm}$,但成像测井解释的构造裂缝线密度仅约0.06条/m,加砂压裂后的无阻流量仅约 $50\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,这表明前述构造裂缝的分布规律预测是符合实际地质情况的。因此,根据冲断带内各个冲断片的相对位置及圈闭规模推测,与克深2、克深8和克深9气藏处于相同断片的克深18、克深19、克深20和克深24号构造的裂缝整体有效性较高,具有较大的勘探潜力,可作为克深气田下一步勘探的重点目标。

6 结论

1) 克深气田主要发育3期构造裂缝,以直立缝和高角度缝为主;不同气藏之间的构造裂缝发育特征具有明显的差异性,主要受构造变形时间和成岩孔隙水介质环境控制。

2) 北部克深5和克深6气藏靠近造山带,在早期缓慢挤压变形背景下,形成的裂缝以与背斜长轴近似平行的直立或高角度张性裂缝为主;中部克深2气藏变形时间稍晚,表现出近NS走向剪切裂缝和近EW走向张性裂缝共存,并且前者略占优势的特征,直立缝的比例有所增加;南部克深8和克深9气藏变形时间最晚,在强烈的挤压推覆作用下,形成的裂缝整体上以近NS走向的剪切裂缝为主,直立缝比例进一步增加。

3) 克深气田的裂缝密度主要受控于构造应力和岩石力学性质,主差应力与岩石抗压强度的比值自北向南总体上先增大后减小,克深2气藏该比值最大,因此裂缝密度最高。

4) 北部克深5和克深6气藏的裂缝优势走向与现今水平最大主应力呈大角度相交且充填率高,裂缝有效开度较小;中部克深2气藏一部分裂缝的优势走向与现今水平最大主应力近似平行,一部分近似垂直,充填率中等,因此裂缝有效开度中等大小;南部克深8和克深9气藏裂缝的优势走向与现今水平最大主应力近似平行且充填率低,裂缝有效开度较大。

5) 巴什基奇克组沉积期的水体总体呈咸化状态。北部克深5、克深6和克深2区块地势较高,水体相对较浅,加上古克拉苏河的季节性淡水持续注入,形成了淡水-半咸水介质成岩环境,因此裂缝充填物主要为

淡水-半咸水成因的方解石,储层改造措施应以酸化为主;南部克深8和克深9区块地势较低,水体相对较深,同时缺乏淡水注入,表现为偏碱性水成岩环境,形成的裂缝充填物主要为硬石膏和白云石,储层改造措施应以压裂为主。自北向南,裂缝形成时间越来越晚,所经历的胶结作用越来越弱,因此裂缝充填率逐渐降低。

6) 克深8气藏的构造裂缝整体有效性最好,其次为克深2和克深9气藏,克深5和克深6气藏的构造裂缝整体有效性较差;根据冲断片的相对位置及圈闭规模,推测克深18、克深19、克深20和克深24号构造的裂缝有效性较高,具有较大的勘探潜力,可作为克深气田下一步勘探的重点目标。

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] 魏新善,胡爱平,赵会涛,等. 致密砂岩气地质认识新进展[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(1): 11-20.
Wei Xinshan, Hu Aiping, Zhao Huitao, et al. New geological understanding of tight sandstone gas[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1): 11-20.
- [3] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [4] 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. 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[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 719-729.
- [5] 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.
- [6] 丁文龙,王兴华,胡秋嘉,等. 致密砂岩储层裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(7): 737-750.
Ding Wenlong, Wang Xinghua, Hu Qiujia, et al. Progress in tight sandstone reservoir fractures research [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(7): 737-750.
- [7] 吕文雅,苗凤彬,张本键,等. 四川盆地剑阁地区须家河组致密砂岩储层裂缝特征及对天然气产能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 484-491, 557.
Lyu Wenya, Miao Fengbin, Zhang Benjian, et al. Fracture characteristics and their influence on natural gas production: A case study of the tight conglomerate reservoir in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Jian'ge area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 484-491, 557.
- [8] Zeng Lianbo, Li Xiangyang. 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.
- [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] 姜振学,李峰,杨海军,等. 库车坳陷迪北地区侏罗系致密储层裂缝发育特征及控藏模式[J]. 石油学报, 2015, 36(S2): 102-111.
Jiang Zhenxue, Li Feng, Yang Haijun, et al. Development characteristics of fractures in Jurassic tight reservoir in Dibe area of Kuqa Depression and its reservoir-controlling mode[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(S2): 102-111.
- [11] 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 Weibin, Zhou Xingui, Li Shizhen, 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.
- [12] 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 Guiting, Feng Shengbin, 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.
- [13] 丁文龙,曾维特,王濡岳,等. 页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 63-74.
Ding Wenlong, Ceng Weite, Wang Ruyue, et al. Method and application of tectonic stress field simulation and fracture distribution prediction in shale reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 63-74.
- [14] 王濡岳,丁文龙,龚大建,等. 渝东南-黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征与主控因素[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 832-845, 877.
Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, et al. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation, southeastern Chongqing-northern Guizhou area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7): 832-845, 877.
- [15] 吕文雅,曾联波,刘静,等. 致密低渗透储层裂缝研究进展[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 74-83.

- Lü Wenya, Zeng Lianbo, Liu Jing, et al. Fracture research progress in low permeability tight reservoirs[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(4): 74–83.
- [16] 朱喜, 张庆莲, 侯贵廷. 新疆柯坪—巴楚地区碳酸盐岩构造裂缝发育的控制因素及油气勘探意义[J]. 地质学报, 2017, 91(6): 1181–1191.
- Zhu Xi, Zhang Qinglian, Hou Guiting. The controlling factor study of development of carbonatic rock fractures in the Kelpin-Bachu area, Xinjiang and its petroleum exploration significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(6): 1181–1191.
- [17] 曾联波, 吕鹏, 屈雪峰, 等. 致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 449–454.
- Zeng Lianbo, Lyu Peng, Qu Xuefeng, et al. Multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability and geological conditions of their development[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 449–454.
- [18] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进步[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1156–1166.
- Zhang Guangya, Ma Feng, Liang Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1156–1166.
- [19] Macqueen R W, Leckie D A. 前陆盆地和褶皱带[M]. 黄忠范, 译. 北京: 石油工业出版社, 2001: 1–498.
- Macqueen R W, Leckie D A. Foreland basins and fold belts [M]. Translated by Huang Zhongfan. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 1–498.
- [20] Casini G, Gillespie P A, Verges J, et al. Sub-seismic fractures in foreland fold and thrust belts: Insight from the Lurestan Province, Zagros Mountains, Iran [J]. Petroleum Geoscience, 2011, 17(3): 263–282.
- [21] Awdal A H, Braathen A, Wennberg O P, et al. The characteristics of fracture networks in the Shiranish Formation of the Bina Bawi Anticline; comparison with the Taq Taq field, Zagros, Kurdistan, NE Iraq [J]. Petroleum Geoscience, 2013, 19(2): 139–155.
- [22] 孙雄伟, 侯贵廷, 于璇, 等. 库车前陆冲断带低渗砂岩的裂缝发育模式[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(5): 808–815.
- Sun Xiongwei, Hou Guiting, Yu Xuan, et al. Model for the fracture development of the sand with low-permeability in the foreland faulted fold belt[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(5): 808–815.
- [23] 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.
- [24] 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 Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 153–166.
- [25] 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 Huiliang, Zhang Ronghu, Yang Haijun, et al. Characterization 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 19–32.
- He Dengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, et al. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa Depression, Tarim Basin: A clue from new shot seismic data[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 19–32.
- [29] 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 Huiliang, Zhang Ronghu, Yang Haijun, 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.
- [30] 赖锦, 王贵文, 郑新华, 等. 大北地区巴什基奇克组致密砂岩气储层定量评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2285–2298.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Zheng Xinhua, et al. Quantitative evaluation of tight gas sandstone reservoirs of Bashijiqike Formation in Dabai gas field[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6): 2285–2298.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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, 36(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, 36(6): 715–727, 742.
- [34] 曾联波, 李跃纲, 王正国, 等. 耶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 Lianbo, Li Yuegang, Wang Zhengguo, et al. Distribution of microfractures in ultralow permeability sandstone reservoirs of the second Member of Xujiache Formation ($T_{3,2}$) in Qiongsi Structure [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(6): 45–47.
- [35] 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.
- [36] 漆家福, 雷刚林, 李明刚, 等. 库车坳陷克拉苏构造带的结构模型及其形成机制[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 49–56.
- Qi Jiafu, Lei Ganglin, Li Minggang, et al. Analysis of structure model and formation mechanism of Kelasu structure zone, Kuqa Depression [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 49–56.
- [37] 尹宏伟, 王哲, 汪新, 等. 库车前陆盆地新生代盐构造特征及形成机制: 物理模拟和讨论[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(2): 308–317.
- Yin Hongwei, Wang Zhe, Wang Xin, et al. Characteristics and mechanics of Cenozoic salt-related structures in Kuqa foreland basins: Insights from physical modeling and discussion [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(2): 308–317.
- [38] 谢会文, 李勇, 漆家福, 等. 库车坳陷中部构造分层差异变形特征和构造演化[J]. *现代地质*, 2012, 26(4): 682–690.
- Xie Huiwen, Li Yong, Qi Jiafu, et al. Differential structural deformation and tectonic evolution in the middle part of Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Geoscience*, 2012, 26(4): 682–690.
- [39] 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中新世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(S1): 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 Sciences)*, 2004, 34(S1): 98–106.
- [40] 张荣虎, 杨海军, 王俊鹏, 等. 库车坳陷超深层低孔致密砂岩储层形成机制与油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2014, 35(6): 1057–1069.
- Zhang Ronghu, Yang Haijun, Wang Junpeng, et al. The formation mechanism and exploration significance of ultra-deep, low-permeability and tight sandstone reservoirs in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1057–1069.
- [41] 曾联波. 库车前陆盆地喜马拉雅运动特征及其油气地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(2): 175–179.
- Zeng Lianbo. Characteristics and petroleum geological significance of Himalayan orogeny in Kuqa foreland basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 175–179.
- [42] 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(S1): 63–73.
- Zhang Zhongpei, Wang Qingchen. 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.
- [43] 于璇, 侯贵廷, 能源, 等. 库车坳陷构造裂缝发育特征及分布规律[J]. *高校地质学报*, 2016, 22(4): 644–656.
- Yu Xuan, Hou Guiting, Neng Yuan, et al. Development and distribution characteristics of tectonic fractures in Kuqa Depression [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2016, 22(4): 644–656.
- [44] 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 Jingzhou, Dai Jinxing. Accumulation timing and history of Kuqa petroleum system, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 314–319.
- [45] 赵孟军, 王招明, 张水昌, 等. 库车前陆盆地天然气成藏过程及聚集特征[J]. *地质学报*, 2005, 79(3): 414–422.
- Zhao Mengjun, Wang Zhaoming, Zhang Shuichang, et al. Accumulation and features of natural gas in the Kuqa foreland basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(3): 414–422.
- [46] 王勇. 大北-克拉苏构造带转换带形成演化及其控藏机理[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
- Wang Yong. The formation, evolution and reservoir-controlling-mechanism of relay zone in structure zone of Dabai-Kelasu [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.
- [47] 杨明慧, 金之钧, 吕修祥, 等. 塔里木盆地库车褶皱冲断带的构造特征与油气聚集[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 19(4): 1–4.
- Yang Minghui, Jin Zhijun, Lu Xiuxiang, et al. Structural characteristics and hydrocarbon accumulation of Kuqa fold-thrust belts, Talimu Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2004, 19(4): 1–4.
- [48] 余海波, 漆家福, 杨宪彰, 等. 塔里木盆地库车坳陷中生代原型盆地分析[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(6): 644–653, 666.
- Yu Haibo, Qi Jiafu, Yang Xianzhang, et al. Analysis of Mesozoic prototype basin in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(6): 644–653, 666.
- [49] 高志勇, 崔京钢, 冯佳睿, 等. 埋藏压实-侧向挤压过程对库车坳陷深层储层物理性质的改造机理[J]. *现代地质*, 2017, 31(2): 302–314.
- Gao Zhiyong, Cui Jinggang, Feng Jiarui, et al. Modification mechanism of physical properties of deeply-buried sandstone reservoir due to the burial compaction and lateral extrusion in Kuqa Depression [J]. *Geoscience*, 2017, 31(2): 302–314.
- [50] 刘冬冬, 张晨, 罗群, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组致密储层裂缝发育特征及控制因素[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(4): 36–47.
- Liu Dongdong, Zhang Chen, Luo Qun, et al. Development characteristics and controlling factors of natural fractures in Permian Lucaogou Formation tight reservoir in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(4): 36–47.
- [51] 年涛, 王贵文, 肖承文, 等. 库车坳陷巴什基奇克组裂缝密度的控制因素分析[J]. *石油科学通报*, 2016, 1(3): 319–329.

- Nian Tao, Wang Guiwen, Xiao Chengwen, et al. Controlling factor analysis of fracture density in the Bashijiqike Formation, Kuqa Depression[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(3): 319–329.
- [52] 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.
- [53] 张荣虎, 刘春, 杨海军, 等. 库车坳陷白垩系超深层储集层特征与勘探潜力[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(4): 423–429.
- Zhang Ronghu, Liu Chun, Yang Haijun, et al. Characteristics and exploration potential of ultra-deep Cretaceous reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(4): 423–429.
- [54] 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 Lianbo, Qi Jiafu, Wang Yongxiu. Origin type of tectonic fractures and geological conditions in low-permeability reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 52–56.
- [55] 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 Wenlong, Fan Tailiang, Huang Xiaobo, 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.
- [56] 丁文龙, 尹帅, 王兴华, 等. 致密砂岩气储层裂缝评价方法与表征[J]. *地学前缘*, 2015, 22(4): 173–187.
- Ding Wenlong, Yin Shuai, Wang Xinghua, et al. Assessment method and characterization of tight sandstone gas reservoir fractures[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(4): 173–187.
- [57] 巩磊, 高铭泽, 曾联波, 等. 影响致密砂岩储层裂缝分布的主控因素分析——以库车前陆盆地侏罗系—新近系为例[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(2): 199–208.
- Gong Lei, Gao Mingze, Zeng Lianbo, et al. Controlling factors on fracture development in the tight sandstone reservoirs: A case study of Jurassic-Neogene in the Kuqa foreland basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(2): 199–208.
- [58] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 145–167.
- Li Zhiming, Zhang Jinzhu. In-situ stress and petroleum exploration and development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 145–167.
- [59] 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 Baoping, Bao Hongzhi. Advances in calculation methods for rock mechanics parameters[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2005, 33(5): 44–47.
- [60] 周文, 闫长辉, 王世泽, 等. 油气藏现今地应力场评价方法及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 7–47.
- Zhou Wen, Yan Changhui, Wang Shize, et al. Evaluation methods and application on current in-situ stress field in oil-gas reservoirs [M]. Beijing: Geology Press, 2007: 7–47.
- [61] 张荣虎, 王俊鹏, 马玉杰, 等. 塔里木盆地库车坳陷深层沉积微相古地貌及其对天然气富集的控制[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(4): 667–678.
- Zhang Ronghu, Wang Junpeng, Ma Yujie, et al. The sedimentary microfacies, paleogeomorphology and their controls on gas accumulation of deep-buried cretaceous in Kuqa Depression, Tarim Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(4): 667–678.
- [62] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(10): 1787–1816.
- [63] 宋士顺, 马锋, 刘立, 等. 大庆长垣扶余油层砂岩中方解石胶结物的碳、氧同位素特征及其成因[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 255–261.
- Song Tushun, Ma Feng, Liu Li, et al. Features and genesis of carbon-oxygen isotopes in calcite cement from sandstone in oil-bearing Fuyu Layer of Daqing Placanticline[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 255–261.
- [64] 高志勇, 王晓琦, 李建明, 等. 库车坳陷克拉苏构造带白垩系储层孔喉组合类型定量表征与展布[J]. *石油学报*, 2018, 39(6): 645–659.
- Gao Zhiyong, Wang Xiaoqi, Li Jianming, et al. Quantitative characterization and distribution of pore throat assemblages of Cretaceous reservoir in the Kelasu tectonic belt, Kuqa Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(6): 645–659.
- [65] 袁静, 杨学君, 袁凌荣, 等. 库车坳陷 DB 气田白垩系砂岩胶结作用及其与构造裂缝关系[J]. *沉积学报*, 2015, 33(4): 754–763.
- Yuan Jing, Yang Xuejun, Yuan Lingrong, et al. Cementation and its relationship with tectonic fractures of Cretaceous Sandstones in DB gas field of Kuqa Sub-basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 754–763.

(编辑 梁慧)