

库车坳陷迪那气田古近系裂缝发育的多样性与差异性

袁静¹,曹宇¹,李际²,董道涛¹,杨蓉³,李春堂⁴,昌伦杰⁵,杨俊生¹

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛266580; 2. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院,新疆克拉玛依834000; 3. 中国石化胜利油田森诺胜利工程有限公司,山东东营257000; 4. 中国石化华北分公司勘探开发研究院,河南郑州450000; 5. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院,新疆库尔勒841000]

摘要:以岩心观察和薄片鉴定为基础,辅以扫描电镜、粘土矿物X-衍射、流体包裹体、油层物性分析等手段,结合区域地质研究成果,系统研究塔里木盆地库车坳陷迪那气田古近系低渗-特低渗砂岩储层裂缝的多样性和差异性。结果表明:宏、微观裂缝主要为构造裂缝,其余依次为溶蚀裂缝、成岩裂缝和超压裂缝。构造裂缝分为剪切裂缝、扩张裂缝和震裂缝3种主要类型(以剪切裂缝为主)和3个发育期次;其中对储集烃类最为有效的裂缝形成于晚喜马拉雅期(上新世末期,即2.6~1.81 Ma)的构造挤压作用;溶蚀裂缝、成岩裂缝与超压裂缝与油气注入引起的溶蚀作用、粘土矿物脱水收缩、强烈构造挤压、快速深埋及流体增压造成的地层超压有关,主要形成时间为库车末期至西域期(2 Ma至现今)。裂缝发育的差异性主要受岩石类型、沉积相带、单层厚度和与主控断层距离的控制。位于气田中部的水下分流河道以粉细砂岩为主,裂缝最发育,单井产能高。裂缝线密度与单层厚度呈“座椅”式负相关,随着与主控断层距离增大而减小;泥岩裂缝线密度小于0.4条/m,且与单层厚度无关。

关键词:构造裂缝;溶蚀裂缝;成岩裂缝;超压裂缝;裂缝特征;低渗砂岩储层;迪那气田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Diversities and disparities of fracture systems in the Paleogene in DN gas field, Kuqa Depression, Tarim Basin

Yuan Jing¹, Cao Yu¹, Li Ji², Dong Daotao¹, Yang Rong³, Li Chuntang⁴, Chang Lunjie⁵, Yang Junsheng¹

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Experiment Testing Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China;

3. Sino-Shengli Engineering Co., Ltd., SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257000, China;

4. Exploration and Development Institute, SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450000, China;

5. Exploration and Development Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Kuerle, Xinjiang 841000, China]

Abstract: The diversities and disparities of fracture systems in low- and ultra-low-permeability sandstone reservoirs in the Paleogene in DN gas field of Kuqa Depression, Tarim Basin, were scrutinized through a combination of analytic means such as core and thin section observation, SEM, as well as analyses of clay mineral XRD, fluid inclusion, and physical properties of oil-bearing formations, with regional geological understanding. The results show that the fracture systems are dominated by tectonic fractures, followed successively by dissolution fractures, diagenetic fractures, and overpressured fractures. The tectonic fractures have 3 types (shear fractures, extension fractures, and seismic-related fractures) and 3 development stages. It was the late Himalayan stage (i. e. the end of Pliocene, 2.6 – 1.81 Ma) when certain tectonic compression process generated the most favorable fractures for hydrocarbon accumulations. The formation of the other three kinds of fractures, i. e. the dissolution fractures, diagenetic fractures, and overpressured fractures, is suggested to be happening during the period from the late Kuqa to Xiyu (2Ma-present) and associated with dissolution by hydrocarbon charging, shrinkage by dehydration of clay minerals, and a formation overpressure by intensive tectonic compression, rapid burial processes and pressurized fluids. The disparities of the fracture systems are mainly controlled by rock types, sedimentary facies belts, the single layer thickness and the distance to major controlling faults. The underwater distributary

收稿日期:2016-06-29;修订日期:2017-08-25。

第一作者简介:袁静(1972—),女,教授,储层沉积学和储层地质学。E-mail: drjyuan@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05003-04);中国石油科技创新基金项目(2016D-5007-0105);中国石油重大科技专项(2010E-2103)。

channels in the central part of the gas field are dominated by silty and fine sandstone where the fractures are highly developed and well productivity is high. The linear density of fractures are found to be negatively related to the thickness of single layers (a s-shaped correlation), and decreases as the distance to the major controlling faults increases. The linear density of fractures in mudstone is less than 0.4 lines per meter and is observed to have no connection with single layer thickness.

Key words: tectonic fracture, dissolution fracture, diagenetic fracture, overpressured fracture, fracture characteristic, low-permeability sandstone reservoir, DN gas field, Tarim Basin

迪那气田是塔里木盆地继克拉 2 气田发现之后又一新的重大发现,地质储量超过千亿方^[3-1],不仅进一步证实了库车前陆盆地属于富气盆地,也使塔里木油田天然气年产能稳步超过 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。前期研究表明,迪那气田古近系砂岩储层总体上为低孔、低渗-特低渗,裂缝对储层的渗透性和产能有较大贡献^[1-4]。

近年来,学者们对迪那气田从地质特征与沉积储层特征、储层形成机制^[1-3],成藏机制、成藏机理及成藏年代、异常高压形成及其与油气成藏的关系^[4-6],构造裂缝发育特征、分布评价、表征建模及其与产能关系^[7-9]等角度开展了研究,但尚无关于迪那气田古近系裂缝的多样性发育和地质因素对其差异性影响的报道。本文以迪那古近系(特)低渗透砂岩气藏为研究对象,精细观察8口取心井343.6 m岩心、371块岩石样品薄片、统计分析百余块样品的扫描电镜图像、油层物性数据和数十块样品的X-衍射、包裹体分析测试成果,综合运用钻井、录井、测井等技术手段,揭示裂缝类型、成因和发育期次的多样性,并研究岩性、单层厚度、沉积微相和与主控断层距离等地质因素对裂缝发育影响的差异性,以期为进一步认识该区油气富集规律,促进高效开发提供地质认识支持。

1 地质概况

迪那气田位于塔里木盆地北部库车前陆盆地秋里塔格构造带东部迪那 - 东秋构造区带上, 东南邻阳霞凹陷, 西接拜城凹陷 (图 1)。秋里塔格构造带呈近东西向展布, 其东段发育两条北倾的逆冲大断裂, 一条是发育并定型于喜山期的迪那北断裂; 另一条是在燕山期开始发育, 喜马拉雅末期定型的东秋里塔格断裂, 为控制迪那构造的主控断层。

迪那地区自下而上发育白垩系、古近系、新近系和第四系。本文研究目的层古近系自下而上发育库姆格列木群(E_2 , 划分为3个砂层组)和苏维依组(E_1 , 划分为5个砂层组), 已完钻井均在其中获得工业油气流, 钻厚334~408 m, 与下伏白垩系呈角度不整合接触。迪那地区古近系发育于大型扇三角洲前缘部分和滨浅湖环境, 以退积旋回为主。扇三角洲平原亚相仅在迪那东北部地区发育, 向西南方向很快相变为扇三角洲前缘亚相; 滨浅湖环境则主要发育砂滩和泥滩微相, 主要分布于迪那西部地区。

钻井揭示和测井解释表明,迪那气田古近系储层

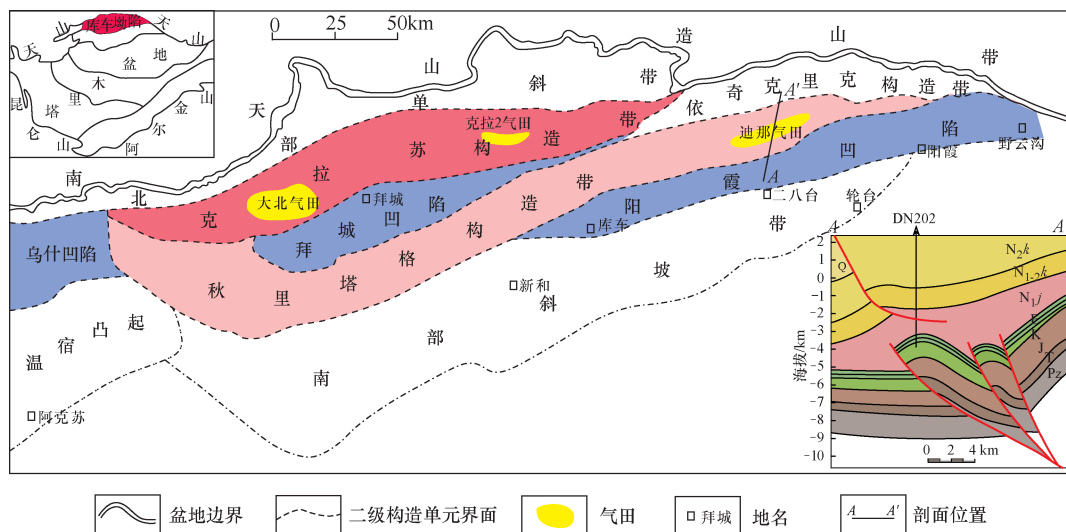


图1 塔里木盆地库车坳陷次级构造单元划分以及迪那气田位置分布示意图

Fig. 1 Tectonic units of Kuqa Depression and the location of DN gas field, Tarim Basin

岩石类型主要为褐色粉砂岩、细砂岩、中砂岩,其次为杂色、褐色含砾中细砂岩、细砾岩等,粗砂岩相对不发育。

岩心测试和测井解释物性统计结果表明:迪那气田古近系砂岩基质物性差,孔隙度平均值为7.2%,渗透率平均值为 $0.211 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低孔、低渗-特低渗砂岩储层;裂缝孔隙度很小可忽略,裂缝渗透率相对较高,平均值为 $15.252 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。裂缝使岩心样品的渗透率显著提高,可见裂缝对该区储层渗透能力贡献巨大,对油气的渗流规律和产能起主导作用。

2 裂缝的多样性发育

2.1 裂缝的主要类型

综合运用岩心和岩石薄片观察、微电阻成像测井(FMI)解释等裂缝识别方法对迪那气田古近系储层裂缝进行了识别、描述与分析统计,结果表明:研究区储层面孔率平均值仅为1.1%,储集空间属于裂缝-孔隙型,其中孔隙占总面孔率的77.14%,细小且多孤立,裂缝占总面孔率的22.86%。根据裂缝发育规模可将其分为宏观裂缝和微观裂缝,根据裂缝成因可将其分为构造裂缝和非构造裂缝。构造裂缝可进一步分为剪切裂缝、扩张裂缝和震裂缝;非构造裂缝可分为溶蚀裂缝、成岩裂缝和超压裂缝。宏观裂缝主要为构造裂缝,微观裂缝也以构造裂缝最多,占全部裂缝的46.8%;溶蚀裂缝约占27.5%,成岩裂缝约占18.8%,超压裂缝约占6.9%。

2.2 构造裂缝基本特征及发育期次

2.2.1 基本特征

1) 剪切裂缝

研究区剪切裂缝产状稳定,缝面平直光滑,延伸长,可超过整盒岩心(1 m)观察尺度。裂缝或张开(图2a,b),或被硬石膏、方解石类晶体(半)充填(图2c,图3c),或切穿硬石膏胶结物(图3a),裂缝面上常有擦痕(图2b)。形成剪切裂缝的应力都是压应力^[10-11],理论上剪切裂缝以共轭方式产出(图2a),且两组共轭剪切裂缝对称地位于最大主压应力方向(σ_1)两侧,与 σ_1 之间的剪裂角为 $45^\circ - \gamma/2$ (其中 γ 为岩石的内摩擦角)^[12];然而岩石强烈的非均质性可抑制其中一组共轭剪切裂缝发育,而只留下另一组,此时只能看到一组与 σ_1 呈一定夹角的裂缝^[13],且常成组

出现呈雁行式排列(图2b,图3b)。此外,迪那地区剪切裂缝的分布受岩层性质控制明显,基本限制在(粉)砂岩层内发育,仅少数可穿越岩性界面,但延伸至泥岩内数厘米后即消失(闭合)(图2c)。

此外,研究区古近系还发育一类裂缝面与纹层小角度斜交的近水平剪切裂缝,在岩心上呈马蹄型,具有一定的等间距性,通常呈张开状态(图2d),在中、粗砂岩中尤其发育。此类裂缝主要与构造挤压作用下断层的逆冲或层间滑动所引起的剪切作用有关^[13]。

2) 扩张裂缝

扩张裂缝产状不稳定,或为高角度斜交缝(图2e—g),或顺岩层界面分布(图3f);延伸较短、裂缝面粗糙不平整、开度变化较大,有时呈断续透镜状(图2f);可有分支(图2g),壁面可见沥青质(图4d),但多被方解石、硬石膏等充填(图2e—g,图3e),可被张开的剪切裂缝切割(图2e)。扩张裂缝是岩石在构造挤压应力背景下沿最小主应力(σ_3)发生相对扩张而形成的裂缝^[13],即形成扩张裂缝的应力也是压应力。研究区剪切裂缝和扩张裂缝的普遍发育与其处于近南北向挤压应力场的构造背景相适应。岩样测试表明,扩张裂缝通常出现在围压较小的情况下^[13],表明其主要在埋深较浅条件下形成,在迪那气田这样没有经历过抬升剥蚀的地区,应为较早期形成的裂缝。

3) 震裂缝

震裂缝成因于同沉积断裂地震作用,是地震时沉积层振动、液化共同作用的结果。其主要发育于未固结砂泥岩界面附近,无定向或垂直于层面向下延伸(图2h),裂缝纵剖面宽2~15 mm,目前基本闭合或被方解石及上下围岩的同生砂泥沉积物充填。

2.2.2 产状特征

综合岩心观察、成像测井和岩石单轴压缩测试手段对迪那地区古近系宏观构造裂缝进行识别与描述。在进行岩心观察时,先假定正北方向,测量裂缝倾向和倾角,与成像测井比对后将假定的倾向归位,确定出其真实倾斜方位角集中于NNW和SSE,且以前者为主,即构造裂缝走向主要为NEE-SWW向。一般地,已存在的断层与其附近伴生的裂缝应力场一致,且裂缝走向趋于同断层走向平行或共轭。研究区裂缝走向的上述特征表明该区南界东秋里塔格断层对构造裂缝发育具有主控作用。对岩石裂缝倾角进行统计,结果表明研究区构造裂缝以 $45^\circ \sim 75^\circ$ 的高角度斜交缝和 $75^\circ \sim 90^\circ$ 的垂直缝为主,倾角小于 45° 的水平缝和低角度斜交缝很少发育;成像测井识别出的高导缝的倾角大多



图2 迪那气田古近系裂缝宏观特征

Fig. 2 Macroscopic characteristics of the fractures in the Paleogene in DN gas field

a. 褐灰色细砂岩,高角度共轭剪切裂缝及其成像测井图像,DN205H井,埋深5 320.03 m, E_1^{5-2} ;b. 灰色粉砂岩,雁列式高角度剪切裂缝,半-未充填,DN22井,埋深4 922.7 m, E_1^{5-2} ;c. 灰褐色粉细砂岩向上过渡为泥质粉砂岩,被硬石膏全充填的垂直剪切裂缝自砂岩向泥质粉砂岩渐止,DN205H井,埋深5 328.72 m, E_2^{1-1} ;d. 灰色细砂岩,近水平剪切裂缝及其成像测井图像,DN22井,埋深4 924.6 m, E_1^{5-2} ;e. 灰色粉砂岩,张开的剪切裂缝(晚)切割被方解石充填的扩张裂缝(早),DN22井,埋深4 886.83 m, E_1^{4-2} ;f. 灰色粉砂岩,断续分布的扩张裂缝,开度有变化,被方解石充填,DN202井,埋深4 955.97 m, E_1^{3-5} ;g. 灰色粉砂岩,向下分支的扩张裂缝方解石半充填,DN204井,埋深5 188.2 m, E_1^{4-5} ;h. 灰褐色粉砂岩,被泥质充填的同沉积期震裂缝,DN205H井,埋深5 127.1 m, E_1^{3-4} ;i. 灰色中细砂岩,网络状超压裂缝,DN201井,埋深4 865.03 m, E_1^{3-1} 。

为 $50^\circ \sim 90^\circ$,峰值在 $70^\circ \sim 80^\circ$,即主要为高角度斜交缝和垂直缝;岩石单轴压缩测试则表明研究区砾岩-粉砂岩内摩擦角为 $21.82^\circ \sim 40.49^\circ$,计算可得剪切裂缝与水平面夹角为 $58^\circ \sim 64.5^\circ$,亦为高角度斜交缝;3种技术手段对裂缝倾角的识别结果一致,在开发实践中可以据此产状特征采取相应工艺以达到高效增产目的。

2.2.3 裂缝发育期次和序列

根据裂缝充填情况、充填物特征和切割关系定性推断研究区裂缝发育期次,结合区域构造演化历史研究成果和烃类包裹体测试数据定量分析研究区裂缝形成期次和序列。

1) 发育期次

岩心和薄片观察表明,研究区构造裂缝大致可分为 3 个发育期次:第 1 期为被同沉积泥质充填的裂缝(图 2h);第 2 期为被硬石膏、方解石和沥青质全充填-半充填的裂缝;第 3 期是高角度斜交-垂直于层面的未充填-半充填裂缝,切割第 2 期裂缝(图 2e)或切穿硬石膏胶结物(图 3a),主要为剪切裂缝,见共轭式产出。

前人^[14-16]研究表明,迪那地区在古近系沉积后经历了 3 期主要的构造事件:第 1 期为早期喜马拉雅期(23.8Ma),古近系处于(准)同沉积期,受近南北向挤压。第 2 期为中喜马拉雅期(中新世吉迪克-康村期,23.8~5.32 Ma),受较强的近南北向挤压。第 3 期为晚喜马拉雅期(上新世库车期,5.32~1.81 Ma),遭受更强烈的近南北向挤压,天山山体强烈抬升,研究区地

层快速沉陷。喜马拉雅末期(库车晚期,2.6~1.81 Ma)是库车坳陷挤压最强烈的时期,迪那构造雏形在该时期形成并在西域早期(0.7 Ma)最终成型。

迪那气田油气来源于阳霞凹陷侏罗系煤系烃源岩^[4]。古近纪时侏罗系源岩未成熟-低成熟($R_o < 0.6\%$),至新近纪中新世末期进入生凝析油高峰期(R_o 约为 0.9%~1.0%),上新世至第四纪(3 Ma 至现今)的快速埋藏使侏罗系烃源岩 R_o 达到 1.0%~1.4%,进入生凝析油气阶段。研究区苏维依组砂岩中烃类包裹体均一温度测试结果(表 1)^[5]表明:烃类包裹体均一温度分布具有 95~107.3℃和 124.8~145.7℃两个峰值区,且以后者为主。其中,石英颗粒内裂缝和方解石胶结物内包裹体均一温度均值为 95~107.3℃;次生石英裂缝内包裹体均一温度均值为 124.8~

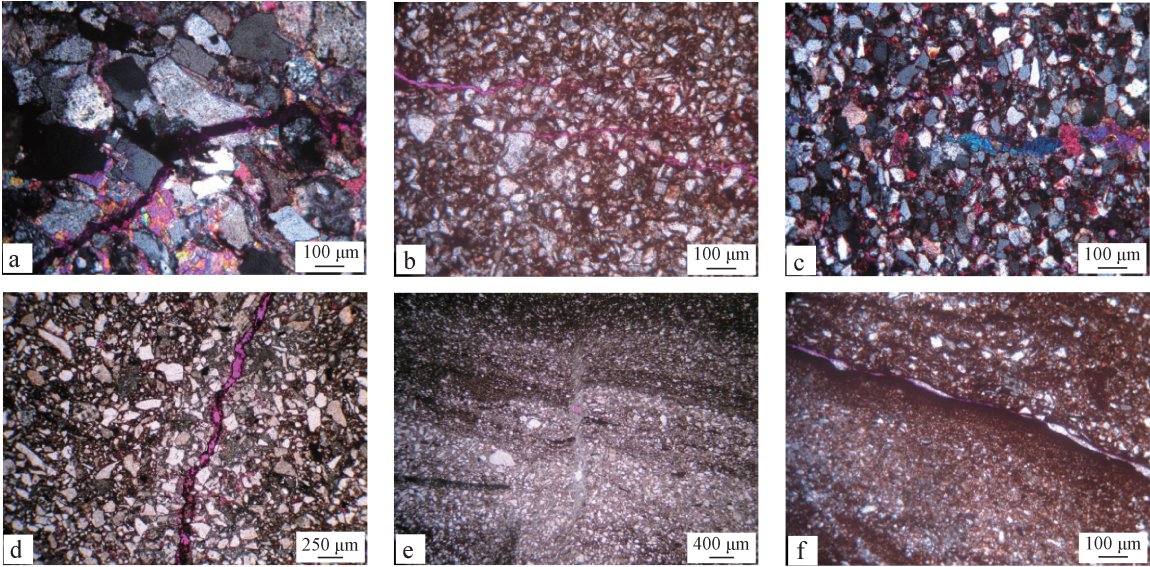


图 3 迪那气田古近系构造裂缝微观特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of the tectonic fractures in the Paleogene in DN gas field

a. 细砂岩,剪切缝晚于硬石膏形成, DN2-17 井,埋深 5 219 m, E_2^{-9} , 正交光; b. 泥质粉砂岩,雁列式构造缝, DN201 井,埋深 4 851.25 m, E_1^{-3} , 单偏光; c. 粉砂岩,高角度裂缝被方解石(早)和硬石膏(晚)半充填, DN204 井,埋深 5 014.47 m, E_1^{-1} , 正交光; d. 粉砂岩,高角度拉张缝(单偏光), DN11 井,埋深 5 584.03 m, E_1^{-3} , 单偏光; e. 粉细砂岩,拉张缝内残余晶间孔, DN22 井,埋深 4 885.52 m, E_1^{-2} , 单偏光; f. 泥质粉砂岩,低角度拉张缝被方解石半充填, DN202 井,埋深 4 847.76 m, E_1^{-1} , 单偏光

表 1 迪那气田烃类包裹体测试数据(据文献[5],修改)

Table 1 Testing data of hydrocarbon inclusions in DN gas field (modified after the reference[5])

样品号	深度/m	岩性	赋存状态	大小/ μm	气液比/%	均一温度/℃	均一温度平均值/℃	成岩阶段	形成时期
201-1	4 795.3	砂岩	次生石英裂缝	1~5	6~8	113.5~145.8	135.7	中成岩 A2	库车末-西域早期
201-2	4 798.2	砂岩	次生石英裂缝	1.5~7	6~15	112.8~147.8	134.6	中成岩 A2	库车末-西域早期
201-3	4 859.3	砂岩	方解石胶结物	3~4	5~10	95.3~118.0	102.3	中成岩 A1	库车期
			石英裂缝	3~9	5~10	95.0~125.3	107.3		
201-4	4 885.6	砂岩	方解石胶结物	3~8	5~8	87.9~107.9	98.4	中成岩 A1	库车期
			石英裂缝	3	8	95.0	95.0		
201-5	4 905.7	砂岩	次生石英裂缝	2~5	7~8	142.8~148.7	145.5	中成岩 A2	库车末-西域早期
201-6	4 977.5	砂岩	次生石英裂缝	2~4	8~10	142.8~151.2	145.7	中成岩 A2	库车末-西域早期
201-7	4 988.0	砂岩	次生石英裂缝	3~5	8	104.0~145.6	124.8	中成岩 A2	库车末-西域早期

145.7 °C。结合研究区埋藏史研究成果^[4]可知,捕获95~107 °C 烃类包裹体的裂缝形成于上新世库车期(5~3.5 Ma),捕获125~145 °C 包裹体的裂缝形成于上新世末至更新世,即库车末至西域早期(2.6~1 Ma)。

2) 发育序列

综合上述认识,认为迪那地区古近系储层共发育以下3期主要的构造裂缝。

第1期:中新世(23.8 Ma)之前,迪那地区虽受早喜山运动影响,但总体比较稳定,古近系埋藏较浅,尚未固结成岩,也未形成有效圈闭,且侏罗系源岩未成熟-低成熟,断裂地震形成的裂缝被同沉积泥质充填(图3h),未捕获烃类包裹体。

第2期:中新世末期(约10~5 Ma),塔里木板块南缘强烈碰撞,在库车坳陷内部产生较强烈的构造挤压,最大主应力(σ_1)水平分布,呈NNW-SSE向^[15-16],形成大量的剪切裂缝(图2c)和扩张裂缝(图2e),此时古近系顶界埋深2500~3000 m,储层进入中成岩A1亚期,硬石膏、方解石和液态烃类(半)充填该期裂缝(图3c),捕获95~105 °C 烃类包裹体,为研究区第一期对储集油气有效的构造裂缝。

第3期:上新世末(2.6~1.81 Ma)库车坳陷整体遭受更加强烈的NWW-SEE向挤压^[15-16],形成了研究区内最重要的一期构造裂缝,包括大量NNW-SSE向剪切裂缝和NW-SE扩张裂缝,切穿第2期裂缝(图2e)和硬石膏、方解石胶结物(图3a),此时古近系快速深埋至大于4500 m,进入中成岩A2亚期,次生石英裂缝中捕获124.8~145.7 °C 烃类包裹体,是研究区第二期对储集油气有效的构造裂缝,伴随烃类充注进入储层的有机酸可将裂缝溶蚀扩大。

2.3 非构造裂缝基本特征及成因

2.3.1 溶蚀裂缝

溶蚀裂缝可以是先成裂缝进一步溶蚀呈串珠状扩大(图4a)或是充填物被部分或全部溶蚀形成,也可以是活跃流体沿岩石薄弱处渗流、溶蚀而成并与构造缝和孔隙连通,交织成网络状孔-缝复合渗流系统(图4b)。

作为形成溶蚀裂缝的关键作用,大规模的溶蚀往往发生于有机酸伴随油气进入储层时期。中新世末期到上新世早期,阳霞侏罗系烃源岩成熟,有机酸伴随液态烃注入,发生溶蚀作用,但此时裂缝体系规模小,连通性欠佳,因此流体不够活跃,未能形成有效溶蚀,裂缝多被方解石、硬石膏等充填,且充注的烃类发生沥青化;库车晚期至西域早期,迪那构造业已成型,强烈挤

压形成的裂缝体系规模大,连通性好,侏罗系烃源岩产物呈气液两相沿裂缝体系注入,但此时有机酸含量降低,前期形成的碳酸盐和硬石膏胶结物并未得到充分溶蚀,整体上溶蚀作用并不强烈。成岩演化定量分析表明,迪那区古近系砂岩储层中溶蚀作用仅使孔隙度平均值增加3.78%。

2.3.2 成岩裂缝

迪那气田古近系砂岩储层的成岩裂缝主要为成岩收缩裂缝(简称收缩缝)和颗粒压裂缝(压裂缝)。

1) 收缩缝

收缩缝一般沿岩性分界面分布,在均质层中多呈不规则线状(可分支)、网状产出。研究区常见在泥岩或泥质条带内部及砂-泥岩岩性界面处的收缩缝(图4c)。在砂岩中较大(粗砂、砾级)的刚性颗粒与填隙物接触处因差异性体积收缩也会发育此类收缩缝,可称为贴粒缝(图4d),有些贴粒缝被后期成岩矿物充填(图4e)。迪那气田古近系伊/蒙混层比在埋深4820 m附近急速从大于40%降低至30%以下,表明粘土矿物发生快速转化(即粘土矿物成岩失水),此深度对应上新世末期(库车期末期,约2 Ma),因此认为迪那气田古近系收缩缝主要是形成于该时期。

2) 压裂缝

压裂缝是碎屑岩受到纵向或侧向应力时颗粒接触点处因承受较大压强发生破碎(裂)而形成的颗粒内部缝(粒内缝)、颗粒边缘缝(粒缘缝)或贯穿若干个刚性颗粒的穿粒缝。它们通常优先沿长石解理面(图4f)、石英微裂纹或其他薄弱面产生(后期可溶蚀扩大),一般局限在某个颗粒内或某几个颗粒边缘,规模较小,宽度较窄,延伸较短,无统一方向,常以颗粒接触点为中心呈辐射状向颗粒内部消减。迪那地区古近系砂岩中压裂缝的发育程度与岩石粒级、碎屑颗粒成分及填隙物含量密切相关。压裂缝多发育于扇三角洲水下分流河道中的颗粒支撑粗砂岩和含砾砂岩中,被压裂的主要为长石、石英和刚性岩屑;且在颗粒支撑者中比杂基支撑者中更为发育。这是因为颗粒支撑的中粗碎屑岩因其颗粒支撑点较少,颗粒接触点上的压强比杂基支撑者和细砂岩、粉砂岩等高出几个数量级^[17],易使粗颗粒局部受力超过破裂强度而发生破裂,形成压裂缝;杂基支撑的岩石中杂基相当于缓冲应力的塑性介质,使颗粒承受的应力减小而不易发生破裂。粒内缝、粒缘缝和穿粒缝可以沟通孤立的粒内及粒间微孔,使(特)低渗砂岩储层中的各类储集空间相互连通,提高储层有效孔隙度和渗透率,显著改善储层物性。

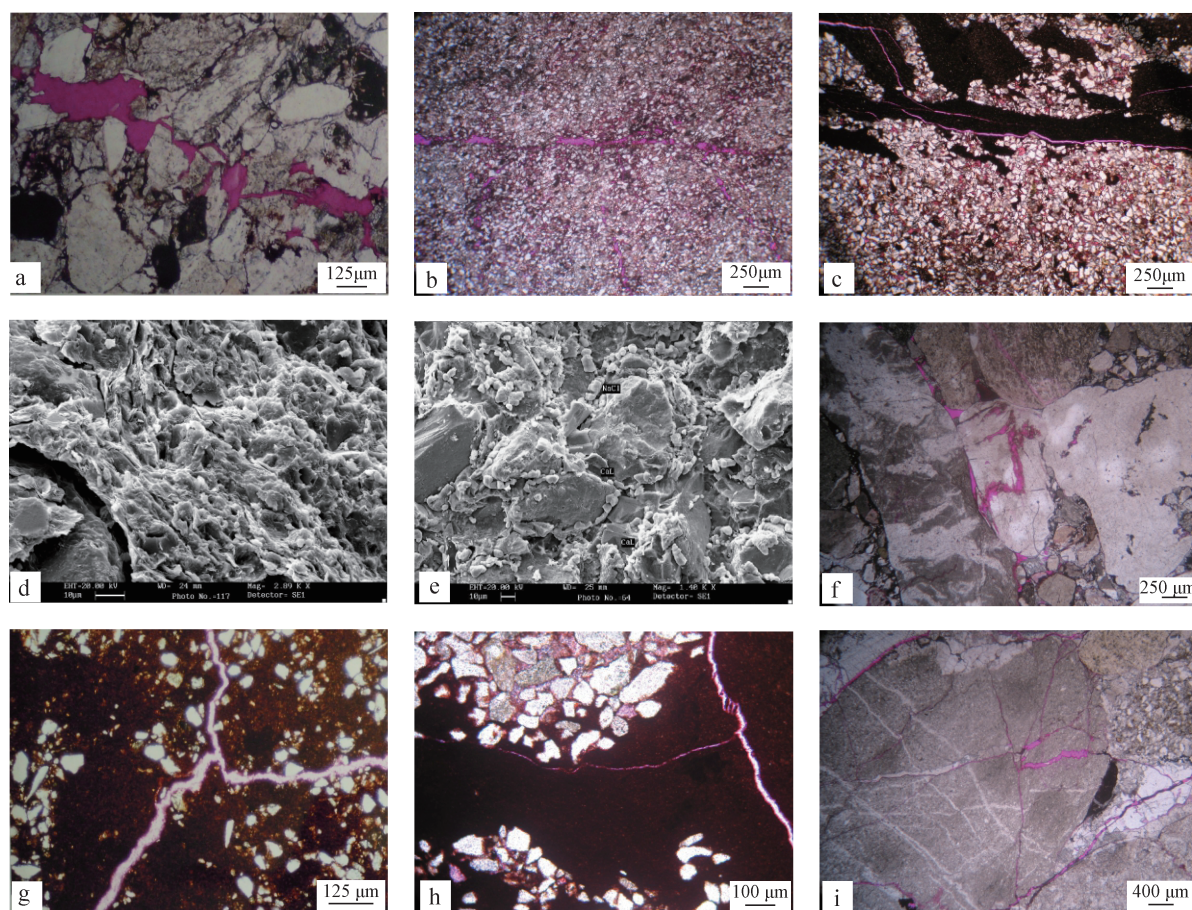


图4 迪那气田古近系非构造裂缝微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of the non-tectonic fractures in the Paleogene in DN gas field

a. 中细砂岩,溶蚀裂缝呈串珠状,DN201井,埋深4 862.41 m, E_1^{3-1} ;b. 粉砂岩,溶蚀裂缝呈网络状,DN202井,埋深4 846.57 m, E_1^1 ;c. 泥质粉砂岩,收缩缝,DN204井,埋深5 191.32 m, E_1^{4-5} ;d. 泥质粉砂岩,贴粒缝宽3~10 μm ,DN22井,埋深4 929.6 m, E_2^1 ;e. 粉砂岩,贴粒缝被方解石和氯化钠晶体充填,DN201井,埋深4 792.93 m, E_1^{1-2} ;f. 粗砂岩,长石粒内压裂缝,DN201井,埋深4 859.31 m, E_1^{2-3} ;g. 铁泥质粉砂岩,放射状超压裂缝缝见溶蚀现象,DN22井,埋深4 930.50 m, E_2^1 ;h. 泥质粉砂岩,超压裂缝,DN204井,埋深5 189.64 m, E_1^{4-5} ;i. 含砾砂岩,超压裂缝,DN201井,埋深4 863.33 m, E_1^{3-1}

2.3.3 超压裂缝

岩心和微观观察表明,迪那地区古近系砂岩储层发育超压裂缝。超压裂缝较扩张裂缝的规模更小,延伸更短,但张开度可能较大,宽度一般为0.2~1 mm,长度一般为毫米级至厘米级。无固定形态和延展方向,在均质岩层中呈近对称放射状(图4g),未彻底拉开的裂缝两壁之间可以雁行式透镜状相连(图4h),或呈无规则线状或分支状延伸,在颗粒内部形成网络状或炸裂状裂缝(图2i,图4i)。

前人研究表明,异常高压流体可使岩石内形成扩张裂缝^[14],即超压裂缝。当孔隙流体压力超过上覆岩层静压力的85%时,即可导致流体压裂上覆岩层,形成超压裂缝^[18]。喜马拉雅末期迪那地区遭受的强烈水平构造挤压形成异常高压流体^[19-20],压力系数为2.06~2.29^[4],足以使岩石破裂而产生超压裂缝。该

时期也是迪那气田成藏关键期,天然气形成并运移至储层过程中伴随流体增压,也有助于超压裂缝的形成^[21-22]。这些与水平挤压形成构造锥形和油气充注同时期形成的超压裂缝可以成为有效的储集空间和渗流通道。受异常高压的形成和保存具有压力不断积累、释放,再积累、再释放的特点的控制,超压裂缝呈间隔性开启和闭合。开启和闭合的过程多次反复,不仅使大量油气从烃源岩中排出注入储层^[11],还可促使构造裂缝“复活”而重新成为渗流通道。

3 裂缝的差异性发育

关于影响裂缝发育的主要因素,已有很多学者专文论述;本文主要讨论岩石类型、沉积微相、单层厚度、层位和与主控断层距离对迪那气田古近系裂缝差异性发育的影响。

3.1 在不同岩石类型中的差异性发育

对岩心宏观裂缝发育状况进行统计发现,迪那地区古近系裂缝在不同岩石类型中的发育程度差异性显著,其中以粉砂岩和细砂岩裂缝最为发育,线密度分别为1.18和0.93条/m(图5a)。这是因为在相同应力和环境条件下,粒度越细,抗压强度越低,越易破裂形成裂缝^[23-24]。微观观察发现,各类储集岩石中,砂砾岩和砾岩微裂缝占面孔率百分比最大,分别达到45%和35%(图5b),且主要是超压裂缝和成岩裂缝(图5d,图5e);由于岩性相对均匀、致密,粉砂岩和细砂岩主要发育构造裂缝(图5c);此外,细砂岩和粉砂岩中的成岩裂缝(特别是收缩缝)也较为发育(图5e),与其泥质含量高脱水收缩明显有关;溶蚀裂缝则主要发育于结构成熟度较高、利于流体在其中渗流并对其溶蚀改造的细砂岩、粗砂岩中(图5f)。

3.2 在不同沉积微相中的差异性发育

不同沉积微相由于其主要岩石类型不同,裂缝发育程度差异性明显。统计发现,迪那地区古近系扇三角洲相裂缝发育程度强于湖泊相。在扇三角洲相中,各主要微相中的裂缝线密度由大到小依次为水下分流河道、河口砂坝、分流间湾、水上分流河道、席状砂。裂缝孔隙度和裂缝渗透率也大致为此顺序。苏维依组扇三角洲水下分流河道砂体较库姆格列木群更为发育,因此其裂缝更为发育。统计各沉积微相岩石类型发现,以扇三角洲前缘水下分流河道细砂岩和粉砂岩最为发育,占单位地层厚度的50%以上,其次为砂砾岩和砾岩,泥岩含量很少,结合前文关于裂缝在不同岩石类型中的差异性发育的分析,很好地解释了该微相裂

缝最为发育的原因。

此外,前人研究业已表明,当其他条件不变时,裂缝密度越大,单位体积内油气渗流通道越多,渗流能力越强^[25]。迪那气田中部地区主要发育扇三角洲水下分流河道砂体,因此其中的裂缝比东部扇三角洲平原亚相和西部湖泊相更为发育,并对单井产能具有积极影响,如位于气田中部的DN2-6, DN2-7, DN2-12, DN2-14和DN2-26等井单井产能均在 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上,普遍高于其他地区。

3.3 在不同单层厚度岩层中的差异性发育

学者们普遍认为在一定的范围内,裂缝线密度与岩层单层厚度呈较明显的负相关关系,即当其他岩石参数和所受应力条件相同时,薄层中的裂缝较发育^[9,16,26-27],这与不同层厚中裂缝尖端应力集中情况不同有关^[28]。本次研究根据测井解释数据,将全区所有井目的层储层单层厚度四舍五入为整米统计其裂缝线密度,结果表明,平均裂缝线密度与储层单层厚度的关系可用三次函数关系定量表达

$$y = -0.0018x^3 + 0.0021x^2 - 0.2148x + 1.1646 \quad (1)$$

式中: y 为裂缝线密度,条/m; x 为岩层单层厚度,m;两者相关系数 $R^2 = 0.9038$ 。

具体来说,平均裂缝线密度与储层单层厚度呈“座椅”式负相关(图6a):裂缝线密度在单层厚度为1~4 m时从大于1.0条/m迅速降低至0.7条/m;单层厚度为4~8 m时稳定在约0.7条/m;单层厚度为8~12 m时又从0.7条/m急速降低,厚度大于11 m的岩层裂缝甚少发育。该关系与前人认为当单层厚度超过2.5 m或3.0 m后,裂缝密度基本上不变的认识不同^[28-29]。

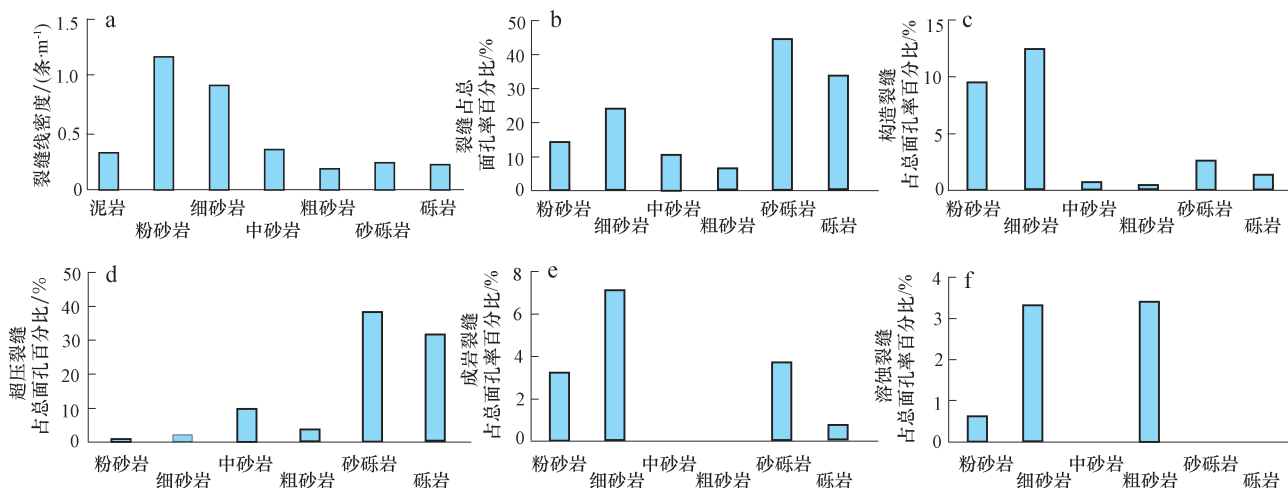


图5 迪那气田古近系不同岩性中裂缝发育程度及发育类型

Fig. 5 Development degree and types of fractures in different lithologies of the Paleogene in DN gas field

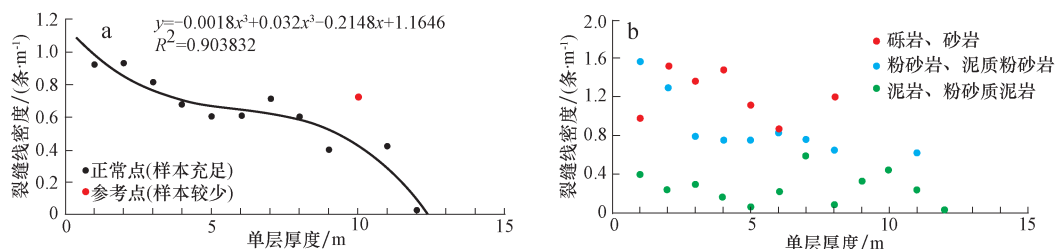


图6 迪那气田裂缝线密度与岩层单层厚度关系

Fig. 6 Relationship of linear fracture density and single layer thickness of DN gas field

研究区普遍发育砂泥岩夹互层,对厚层泥岩及夹于其中粉砂岩、泥质粉砂岩的裂缝发育统计表明,裂缝在厚度为1~3 m的砂质薄层中密集发育,且基本限制在砂质岩层内。另外,与前人认识^[30]不同,本次研究发现泥岩和粉砂质泥岩的裂缝线密度基本在0.4条/m以下,且与其单层厚度(<12 m)无关(图6b),表明不论岩层厚薄,泥岩均对裂缝发育具有显著的限制能力,可作为有效的隔夹层。

3.4 在不同层位中的差异性发育

在同一地区,裂缝在不同层位中的差异性发育其实是各层位间岩石类型、沉积微相、单层厚度、埋藏深度等差异的综合体现。测井综合解释表明,研究区苏维依组各砂组平均裂缝线密度在0.39~0.69条/m,总体为0.53条/m,库姆格列木群各砂组平均裂缝线密度为0.2~0.63条/m,总体为0.41条/m。由此可知,苏维依组比库姆格列木群裂缝更为发育。由于苏维依组和库木克列姆群埋藏深度差别不大(一般<400 m),其裂缝发育程度的差异主要是因为苏维依组与库姆格列木群相比,单层厚度多在3~7 m、以粉细砂岩为主体岩石类型、扇三角洲前缘亚相水下分流河道更为发育,其中裂缝最为发育的 E_1^5 砂组和 E_1^{1-2} 砂层组也因此成为迪那气田的主力产层。

3.5 在与主控断层不同距离处的差异性发育

统计迪那气田取心井目的层中段到主控断层东秋里塔格断层的距离及其平均裂缝参数关系发现:随着与主控断层距离渐远,裂缝发育程度渐弱(图7)。这是由于断层两盘地质体的相对运动在断层附近造成应力扰动,使应力沿断层集中,引起裂缝密集发育;随着与断层距离增大,应力减弱,裂缝发育程度亦随之减弱^[31]。研究区裂缝发育程度与主控断层距离的负相关关系反映了主控断层对其发育的宏观控制作用。

4 结论

1) 迪那气田古近系低渗-特低渗透砂岩储层储

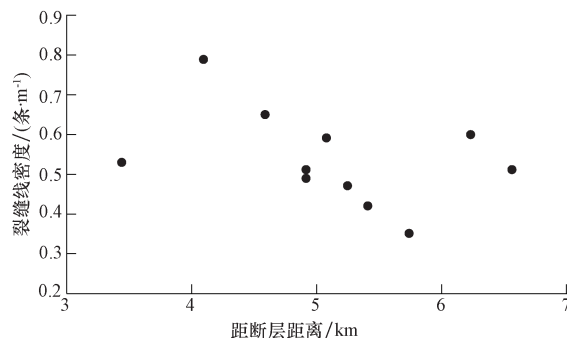


图7 迪那气田裂缝线密度与主控断层距离关系

Fig. 7 Relationship of linear fracture density and its distance to the major controlling fault in DN gas field

集空间为裂缝-孔隙型。裂缝对流体渗流起主导作用,主要为构造裂缝,其次为溶蚀裂缝、成岩裂缝和超压裂缝等非构造裂缝。构造裂缝以剪切裂缝为主。

2) 研究区有效的剪切裂缝形成于晚喜马拉雅期(上新世末期,即2.6~1.81 Ma)的构造挤压作用;溶蚀裂缝、成岩裂缝、超压裂缝分别与油气注入引起的溶蚀作用、粘土矿物脱水收缩、强烈挤压、快速深埋和流体增压形成的地层超压有关,主要形成于库车末期至西域期(2 Ma至现今)。各类裂缝与油气充注时间匹配良好,是形成现今迪那千亿方大气田的重要条件。

3) 岩石类型、沉积相带、岩层厚度和与主控断层距离是控制研究区裂缝差异性发育的主要因素。粉砂岩和细砂岩中裂缝(主要为构造裂缝)最发育;砂砾岩和砾岩中微裂缝(主要为超压裂缝和成岩裂缝)最为发育;各沉积微相中以主体位于气田中部地区的水下分流河道裂缝最为发育,提高了单井产能;裂缝线密度与单层厚度呈“座椅”式负相关;泥岩和粉砂质泥岩中很少发育裂缝且发育程度与单层厚度无关,表明不论岩层厚薄,泥岩均对裂缝发育具有显著的限制能力;与库姆格列木群相比,单层厚度多在3~7 m、以粉细砂岩为主体岩石类型、扇三角洲前缘亚相水下分流河道更为发育的苏维依组裂缝更为发育而成为迪那气田主力产层。裂缝发育程度随着与主控断层距离增大而减弱,反映了主控断层对其发育的宏观控制作用。

参 考 文 献

- [1] 马玉杰,谢会文,蔡振忠,等.库车坳陷迪那2气田地质特征[J]. 天然气地球科学,2003,14(5):371-374.
Ma Yujie, Xie Huiwen, Cai Zhenzhong, et al. The geology feature of Dina 2 gasfield, Kuiche Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(5): 371-374.
- [2] 杨帆,孙玉善,谭秀成,等.迪那2气田古近系地渗透储集层形成机制分析[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):39-42.
Yang Fan, Sun Yushan, Tan Xiucheng, et al. Formation mechanism of Paleogene low permeability reservoir in Dina 2 Gasfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 39-42.
- [3] 颜文豪,李建明,王冬梅,等.库车坳陷迪那2气田地质特征与沉积储层研究[J]. 天然气地球科学,2009,20(1):86-93.
Yan Wenhao, Li Jianming, Wang Dongmei, et al. Geologic characteristics and sedimentary reservoir of Dina 2 Gasfield in Kuiche Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(1): 86-93.
- [4] 朱光有,杨海军,张斌,等.塔里木盆地迪那2大型凝析气田的地质特征及其成藏机制[J]. 岩石学报,2012,28(8):2479-2492.
Zhu Guangyou, Yang Haijun, Zhang Bin, et al. The geological feature and origin of Dina 2 large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2479-2492.
- [5] 孙冬胜,金之钧,吕修祥,等.库车前陆盆地迪那2气田成藏机理及成藏年代[J]. 石油与天然气地质,2004,25(5):559-564.
Sun Dongsheng, Jin Zhijun, Lü Xiuxiang, et al. Reservoiring mechanism and finalization period of Dina 2 Gasfield in Kuqa Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(5): 559-564.
- [6] 张凤奇,王震亮,赵雪娇,等.库车坳陷迪那2气田异常高压成因机制及其与油气成藏的关系[J]. 石油学报,2012,33(5):739-747.
Zhang Fengqi, Wang Zhenliang, Zhao Xuejiao, et al. Genetic mechanism of overpressure and its relationship with hydrocarbon accumulation in Dina-2 gasfield, Kuqa depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 739-747.
- [7] 吴永平,朱忠谦,肖香姣,等.迪那2气田古近系储层裂缝特征及分布评价[J]. 天然气地球科学,2011,22(6):989-995.
Wu Yongping, Zhu Zhongqian, Xiao Xiangjiao, et al. Fracture feature of tertiary reservoir and distribution evaluation in Dina 2 Gasfield [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 989-995.
- [8] 吴永平,昌伦杰,陈文龙,等.裂缝表征及建模在迪那2气田的应用[J]. 断块油气田,2015,22(1):78-81.
Wu Yongping, Chang Lunjie, Chen Wenlong, et al. Application of fracture characterization and modeling in Dina 2 Gas Field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(1): 78-81.
- [9] 刘春,张惠良,韩波,等.库车坳陷大北地区深部碎屑岩储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学,2009,20(4):504-512.
Liu Chun, Zhang Huiliang, Han Bo, et al. Reservoir characteristics and control factors of deep-burial clastic rocks in Dabai zone of Kuiche sag [J]. Nature Gas Geosciences, 2009, 20(4): 504-512.
- [10] Olson Jon E, Laubach S E, Lander R H. Natural fracture characterization in tight gas sandstones; integrating mechanics and diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1535-1549.
- [11] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs [M]. Texas: Gulf Publishing Company, 1985: 8-26.
- [12] 朱志澄,宋鸿林.构造地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1990: 141-156.
Zhu Zhicheng, Song Honglin. Structural geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1990: 141-156.
- [13] 曾联波,漆家福,王永秀.低渗透储层构造裂缝的成因及其形成地质条件[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.
- [14] 张明利,谭成轩,汤良杰,等.塔里木盆地库车坳陷中生代构造应力场分析[J]. 地球学报,2004,25(6):615-619.
Zhang Mingli, Tan Chengxuan, Tang Liangjie, et al. An analysis of the Mesozoic-Cenozoic tectonic stress field in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(6): 615-619.
- [15] 贾承造.中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社,1997.
Jia Chengzao. Structure characteristics and hydrocarbon of Tarim Basin [M]. Beijing: Publishing House of Oil Industry, 1997.
- [16] 张仲培,王清晨,王毅,等.库车坳陷脆性构造序列及其对构造古应力的指示[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2006,31(3):309-316.
Zhang Zhongpei, Wang Qingchen, Wang Yi, et al. Brittle structure sequence in the Kuqa Depression and its implications to the tectonic paleostress [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(3): 309-316.
- [17] 王洪辉,陆正元.四川盆地中西部上三叠统砂岩非构造裂缝储层[J]. 石油与天然气地质,1998,19(1):35-41.
Wang Honghui, Lu Zhengyuan. Nontectonic fractured sandstone reservoirs of upper Triassic in middle-west Sichuan Basin [J]. Oil and Gas Geology, 1998, 19(1): 35-41.
- [18] Zeng Lianbo. Microfracturing in the Upper Triassic Sichuan Basin tight-gas sandstones: tectonic, overpressure, and diagenetic origins [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(12): 1811-1825.
- [19] 林承焰,梁昌国,任丽华,等.碎屑岩潜山沉积相及其与裂缝发育的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(4):1-6.
Lin Chengyan, Liang Changguo, Ren Lihua, et al. Sedimentary facies and relation to degree of fracture development of clastic buried hills [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(4): 1-6.
- [20] Murray G H. Quantitative fracture study [J]. AAPG Bulletin, 1968, 52(1): 57-65.
- [21] Fall A, Eichhub P, Bodnar R J, et al. Natural hydraulic fracturing of tight-gas sandstone reservoirs, Piceance Basin, Colorado [J]. GSA Bulletin, 2015, 127(1/2): 61-75.
- [22] Payne D F, Tuncay K, Park A, et al. A reaction-transport-mechanical approach to modeling the interrelationships among gas generation, overpressuring, and fracturing: implications for the Upper Cretaceous natural gas reservoirs of the Piceance Basin, Colorado [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(4): 545-565.
- [23] 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 clastic rock in east Kuqa [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 603-610.
- [24] Baytok S, Pranter M J. Fault and fracture distribution within a tight-gas sandstone reservoir: Mesaverde Group, Mamm Creek Field, Piceance Basin, Colorado [J]. USA Petroleum Geoscience, 2013, 19: 203-222.
- [25] 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 Zhenyu, Tao Xiayan, Fan Peng, et al. Distribution rule of fractures and their effect on deliverability in sandstone reservoirs, Dabai gas field, Kuqa foreland basin[J]. PGRE, 2014, 21(2): 51-56.
- [26] Narr W. Fracture density in the deep subsurface: Techniques with application to Point Arguello oil field[J]. AAPG Bull, 1991, 75(8): 1300-1323.
- [27] 张震, 鲍志东. 松辽盆地朝阳沟油田储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 166-172.
- Zhang Zhen, Bao Zhidong. Development characteristics and controlling factors of reservoir fractures in Chaoyangou Oilfield, Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 166-172.
- [28] 赵文韬, 侯贵廷, 张居增, 等. 层厚与岩性控制裂缝发育的力学机理研究: 以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 1047-1058.
- Zhao Wentao, Hou Guiting, Zhang Juzeng, et al. Study on the development law of structural fractures of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(6): 1047-1058.
- [29] 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(1): 1735-17450.
- Wang Junpeng, Zhang Ronghu, Zhao Jilong, et al. Characteristics and evolution 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(1): 1735-1745.
- [30] 戴俊生, 冯建伟, 李明, 等. 砂泥岩间互地层裂缝延伸规律探讨[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 2011, 18(2): 277-283.
- Dai Junsheng, Feng Jianwei, Li Ming, et al. Discussion on the extension law of structural fracture in sand-mud interbed formation[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences (Beijing); Peking University), 2011, 18(2): 277-283.
- [31] 孟召平, 彭苏萍, 傅继彤. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 102-106.
- Meng Zhaoping, Peng Suping, Fu Jitong. Study on control factors of rock mechanics properties of coal-bearing formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 102-106.

(编辑 董立)

“第七届油气成藏机理与油气资源评价国际学术研讨会” 在石大顺利召开

“第七届油气成藏机理与油气资源评价国际学术研讨会”于2017年10月21-22日在中国石油大学(北京)召开。

本次大会由中国石油学会石油地质专业委员会、中国地质学会石油地质专业委员会、国家自然科学基金委员会地球科学部、中国石油大学(北京)和油气资源与探测国家重点实验室联合主办,由页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室、中国科学院地质与地球物理研究所等单位协办,并由中国石油大学(北京)和油气资源与探测国家重点实验室承办。大会由王铁冠院士担任指导委员会主任,贾承造院士担任组织委员会主任,金之钧院士担任学术委员会主任。

大会开幕式由赵文智院士主持,张来斌校长代表承办单位致欢迎辞,贾承造院士代表大会组织委员会致开幕辞。张来斌向所有参加本次国际学术研讨会的代表表示热烈欢迎,并表示国际学术研讨会已成为展示油气成藏机理和资源评价研究成果和开展国内外学术交流的重要窗口,值此中国石油大学(北京)进入“双一流”大学学科建设之际,希望参会代表能就共同关心的学术问题展开交流和讨论。贾承造院士在致辞中强调非常规油气成藏理论研究的新进展可能会使常规石油天然气地质学在圈闭、储集层、盖层、资源分布、富集规律等基本理论概念方面产生重大突破,推动油气地质基础研究向全过程生烃、全类型储集层、全成因机制、全种类油气资源转变。非常规油气革命不仅具有油气资源大幅增加的经济意义,而且将为石油天然气地质学理论带来重大革新,具有重要科学意义。

参加本次国际学术研讨会的代表超过300人,包括国内外其中国外代表来自美国德克萨斯大学、俄克拉荷马大学、犹他大学、路易斯安那大学、密苏里大学和英国帝国理工学院等著名大学和知名科研单位。国内代表来自中国石油大学(北京)、中国地质大学(北京)、中国矿业大学(北京)等高等院校,以及中国石油勘探开发研究院、中石化石油勘探开发研究院、长庆油田分公司、胜利油田分公司、西南油气田分公司等油田公司和科研院所。大会共收到论文(摘要)146篇,30名中外学者做了大会报告,49名代表在4个分会场做了专题报告,另有30位专家学者和研究生做了展板展示。大会共评选出22位青年学者分获优秀报告奖和优秀展板奖。

大会闭幕式由王铁冠院士主持,金之钧院士代表大会学术委员会做了会议总结。金之钧表示,参会代表在两天的会议期间紧紧围绕大会主题“从常规到非常规——油气成藏研究的理论突破与技术进展”进行了深入交流和探讨,主要在深层和古老层系领域、致密油气和页岩油气成藏与地质评价、油气成藏机理和油气成藏实验研究与资源评价新方法、新技术等方面取得了重要进展,而且油气成藏机理研究新方法和新技术的出现成为本次大会的亮点。尽管目前国际油价比较低迷,但在未来相当长的一段时间内,石油和天然气仍将在我国的一次能源结构中占主导地位。在接下来的几年里,石油生成的有机和无机相互作用以及深部页岩油气研究将可能成为重点研究领域。

(供稿 余一欣)