

库车坳陷巴什基奇克组裂缝密度的控制因素分析

年涛¹, 王贵文^{1,2*}, 肖承文³, 李瑞杰¹, 周磊³, 邓黎¹, 宋虹玉⁴

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3 中石油塔里木油田公司, 库尔勒 841000

4 中国石化出版社有限公司, 北京 100011

* 通信作者, wanggw@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-07-15

中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司《勘探工程技术攻关》项目“大北克深地区深层测井精细评价及裂缝性砂岩储层有效性研究”课题资助

摘要 基于露头、岩心、井壁成像测井和薄片的大量观察和统计,从岩性、沉积微相、成岩相、岩石力学层厚度、局部构造和古构造应力大小等方面系统分析了巴什基奇克组裂缝密度发育的控制因素。研究认为巴什基奇克组裂缝密度的大小同时受控于岩性、沉积微相、成岩相、单位岩石力学层厚度、局部构造和古构造应力等,且裂缝一般在细粉砂岩、水下分流河道、强压实相、薄的岩石力学层、距断层 1 km 以内的范围和较大的古构造应力作用下最为发育。裂缝密度变异系数计算结果表明单位岩石力学层厚度和构造应力对裂缝密度的大小影响最为明显,成岩相影响最弱。区域上古构造应力主要控制着裂缝的发育程度,裂缝密度自南天山向坳陷内部具有减弱的趋势。纵向上岩性、沉积微相、成岩相和岩石力学层厚度共同影响裂缝的发育程度。同时,巴什基奇克组主要发育剪裂缝,裂缝发育程度不受背斜构造主曲率的影响。

关键词 库车坳陷; 巴什基奇克组; 致密砂岩; 裂缝密度; 控制因素

0 引言

储层裂缝密度(未有特殊说明,文中裂缝密度都指的是裂缝线密度)具有较强的非均质性^[1-4]。不同地区裂缝密度往往具有较大差异;同一地区不同层位裂缝密度也不尽相同^[2]。裂缝密度的非均质性影响因素较多,包括储层的岩性、沉积微相、成岩相、层厚、局部构造和构造应力等。一般而言,砂岩裂缝密度较泥岩大,细粒砂岩密度较粗粒砂岩和砾岩大^[2,4-5];前三角洲亚相和深湖相等泥页岩沉积为主的环境裂缝密度发育小^[2];随着胶结成岩相向溶蚀相的转变,裂缝密

度可能会逐渐变小^[6];同时,多数研究认为裂缝的分布(裂缝间距)和岩石力学层的厚度呈负相关关系^[1,2,4,7],并以此来推测地下岩层中裂缝的密度^[7];而断层和褶皱等局部构造会使裂缝密度在局部发生显著增大^[2,8];当岩石超过自身的破坏强度时,应力越大,裂缝的密度往往越大^[9-10]。裂缝密度的非均质性研究对裂缝性储层射孔层的选择、产能的提高和水平井的设计等具有现实意义。

克拉苏构造带巴什基奇克组裂缝密度同样具有较强的非均质性。邻区裂缝发育程度差异较大(大北区块裂缝密度大于克深区块);邻井之间裂缝发育程度也

引用格式: 年涛, 王贵文, 肖承文, 李瑞杰, 周磊, 邓黎, 宋虹玉. 库车坳陷巴什基奇克组裂缝密度的控制因素分析. 石油科学通报, 2016, 03: 319-329

NIAN Tao, WANG Guiwen, XIAO Chengwen, LI Ruijie, ZHOU Lei, DENG Li, SONG Hongyu. Controlling factor analysis of fracture density in the Bashijiqike Formation, Kuqa Depression. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 319-329. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.027

会存在很大差异(如克深8-1和克深8-3);相邻的层位之间裂缝发育程度也可能相差甚远(如巴一段、巴二段和巴三段)。造成上述现象的因素很多,而从目前公开发表的文献看,研究者多集中在通过露头研究裂缝发育程度和层厚、岩性等单因素的响应关系^[4];或是仅仅分析了储层岩石的沉积属性(如岩性)和裂缝发育程度的相关关系^[11];更多的学者则是从构造(如断层)及其相关要素的角度分析裂缝发育程度的影响因素^[6,8,12-13]。系统的研究巴什基奇克组裂缝发育程度控制因素的报告仍然少见,且储层裂缝的发育程度可能是多因素叠合的结果。本次研究从岩性、沉积微相、成岩相、层厚、局部构造和构造应力等角度出发,探讨巴什基奇克组裂缝密度大小的控制因素,分析裂缝发育程度在区域和局部上的影响因素。

1 地质概况

库车坳陷位于塔里木盆地北部,北邻南天山造山带,南部过渡为塔北隆起^[14-16]。盆地先后经历了古生代末至早侏罗世的古前陆盆地阶段、中侏罗世至早白垩世盆地坳陷阶段、晚白垩至古近纪的弱收缩阶段和新近纪以后的类前陆盆地4个构造演化阶段^[14-15]。现今构造单元自北向南分别为北部单斜带、克依构造带、拜城和阳霞凹陷、秋里塔格构造带和南部斜坡带

(图1a)。盆地中生界包含多套致密砂岩地层,本次研究主要以下白垩统巴什基奇克组致密砂岩为例(图1b)。巴什基奇克组纵向上可细分为3个次一级的地层单元,其中底部巴三段发育扇三角洲沉积,巴一段和巴二段为辫状河三角洲沉积^[17-19]。地层在沉积后遭受了复杂的构造和成岩改造^[20],表现为致密砂岩的特征。覆压孔渗显示地层孔隙度在0.5%~5.5%之间,平均值为3.79%,渗透率在0.01~0.1 mD之间,平均值为0.02 mD。含裂缝岩心测试显示裂缝的存在使得巴什基奇克组地层渗透率提高1~3个数量级,而裂缝孔隙度仅为0.05%。由于该套地层是库车坳陷目前重要的含油气层段^[4],且已经相继发现了克拉2、大北1、大北201、克深2、克深5、克深8、克深9等一系列含油气圈闭,因此巴什基奇克组裂缝发育程度的控制因素分析具有重要的科研和生产指导意义。

2 裂缝密度的控制因素分析

在评价各控制因素对裂缝发育程度的影响时,样本(地层层段)的选择十分重要,即只有那些能够确定或大致确定在某一层段是某一个控制因素主要影响评价段裂缝发育程度时,才能将这些层段作为评价该控制因素的优选样本。

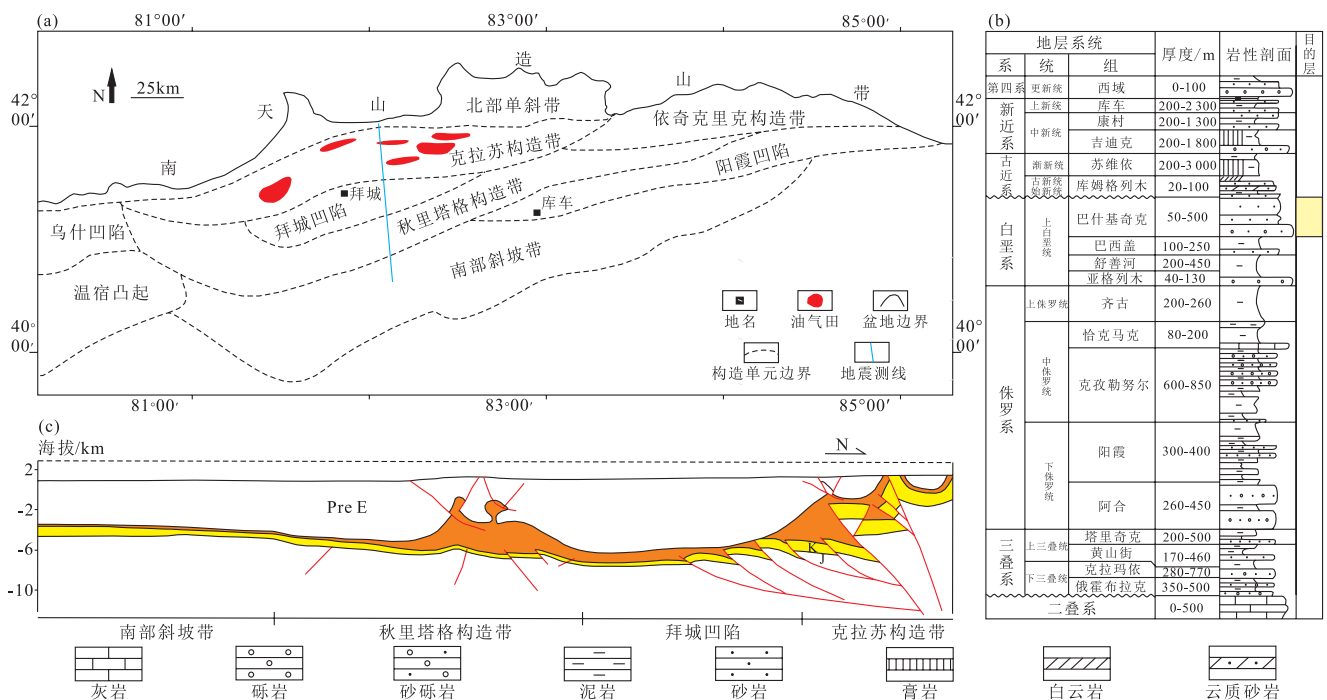


图1 库车坳陷构造单元划分及地层综合柱状图
Fig. 1 Tectonic unit divisions and stratigraphic diagram in the Kuqa Depression

2.1 裂缝和岩性的关系

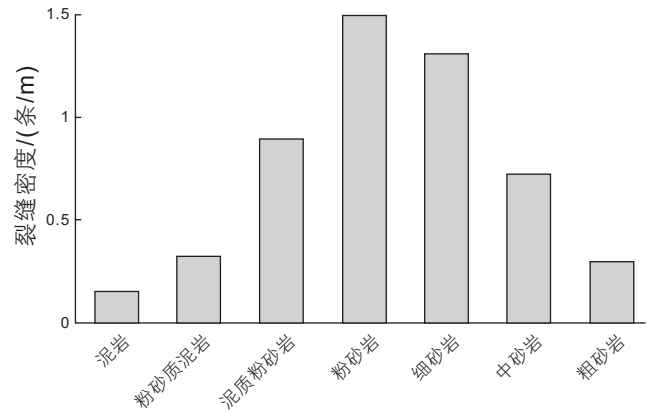
巴什基奇克组共取心 654.39 m, 其中大北地区取心 58.67 m、克深气田取心 299.13 m、克深新区取心 296.59 m。取心范围涵盖了巴什基奇克组顶部到底部的大部分深度段。选取同一构造带、相似成岩相和岩石力学层厚度、且距离断层较远的目标井, 按照岩性差异对巴什基奇克组岩心裂缝密度进行统计, 研究不同岩性背景下裂缝的发育程度。

大北地区巴什基奇克组主要包含泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩和粗砂岩, 砾岩少见。统计显示砂岩裂缝较泥岩更发育, 且以细砂和粉砂中裂缝密度最大, 裂缝线密度分别为 1.3 条/m 和 1.5 条/m, 泥岩中裂缝欠发育(图 2a)。克深气田裂缝发育程度整体较大北地区弱, 但是裂缝在不同岩性中的发育规律仍然较为一致, 且以细砂岩中最大(1.1 条/m), 次为粉砂岩, 泥岩中裂缝同样欠发育(图 2b)。克深新区裂缝发育程度和大北井区类似, 各岩性中裂缝密度也基本满足细、粉砂岩中最大(分别为 1.6 条/m 和 1.4 条/m), 泥岩中偏小(图 2c)。砂岩等强硬地层在受力时, 岩石更容易以破裂的方式释放应力; 而泥岩等软地层在相同的应力条件下容易吸收更多的应力而发生塑性变形。

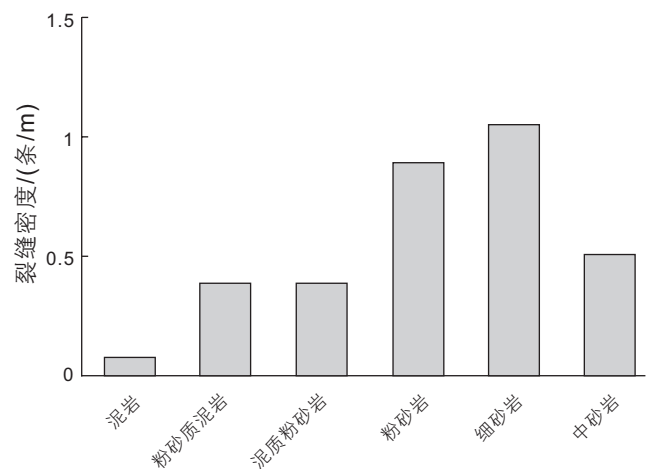
522 张铸体薄片的统计显示, 当石英和长石含量偏高时, 微裂缝(主要是构造缝和粒内缝)相对发育; 而当岩屑和填隙物含量偏高时, 微裂缝含量相对减弱(图 3)。粉砂质泥岩、含粉砂泥岩和泥岩中脆性矿物含量的统计也表明, 随着脆性矿物(长石、石英、灰质等)含量的增多, 裂缝面密度逐渐增大(图 4)。因此, 当砂岩中石英和长石等脆性矿物含量增多时, 岩石表现为更强的脆性特征, 裂缝发育程度就更高; 泥岩中脆性组分(钙质、云质等)增多时, 岩石同样表现出上述特征。相反, 如果岩石中泥质含量偏高, 裂缝则更多的表现为塑性变形, 裂缝发育的程度就会相应降低。

2.2 裂缝和沉积微相的关系

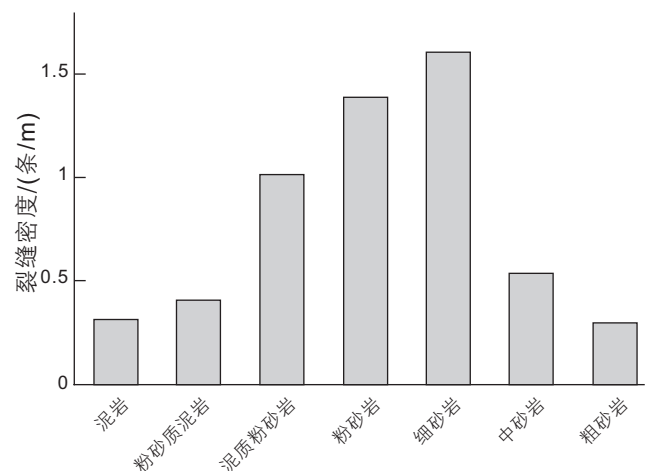
巴什基奇克组巴一段和巴二段以辫状河三角洲水下分流河道、河口沙坝和支流间湾为主要的沉积微相类型^[19]。其中, 水下分流河道和河口沙坝都以细砂岩为主, 粉砂岩次之, 支流间湾沉积褐色泥岩。由于取心资料相对成像测井而言较为有限, 因此本次研究基于岩心刻度井壁成像测井, 在此基础上利用井壁成像测井图像统计沉积微相和裂缝发育程度的关系。支流



a. 大北地区(岩心来自大北 6 口取心井)



b. 克深气田(岩心来自克深气田 12 口取心井)



c. 克深新区(岩心来自克深 5、6、8、9 井区取心井)

图 2 巴什基奇克组岩性与裂缝线密度统计直方图(统计结果未包含大北地区的网状缝)

Fig. 2 Histogram of lithology and fracture linear density in the Bashijiqike Formation(excluding netted fractures in the Dabei area)

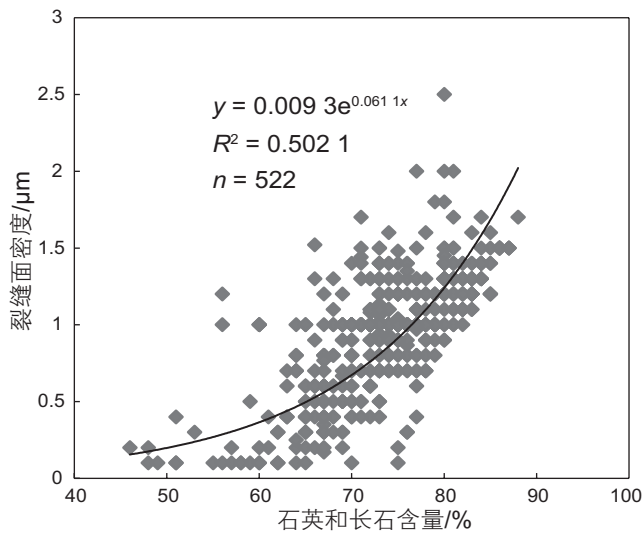


图3 砂岩中脆性组分和裂缝发育程度关系图
Fig. 3 Relationship between brittle components and degree of micro-fracture development

间湾在成像图像中易于识别, 图像为典型的低阻块状模式且自然伽马值偏高; 水下分流河道在河道底部发育定向的泥砾, 成像测井图像中表现为低阻暗斑; 当泥岩和上覆砂岩之间未见代表泥砾的低阻暗斑特征时, 上覆沉积砂体解释为河口沙坝(图5)。在其他因素基本一致的情况下通过对大北地区、克深气田和克深新区典型井78个图像特征统计发现水下分流河道裂缝发育程度最高, 河口坝次之, 支流间湾裂缝欠发育(图6)。水下分流河道和河口坝都以细砂为主, 同时砂体在沉积以后遭受了湖泊的改造, 裂缝整体发育。从本质上讲, 沉积微相本身就限定了岩性、粒度和岩石力学层厚度等影响裂缝发育程度的因素。

2.3 裂缝和成岩相的关系

成岩相是成岩环境和在该环境中形成的成岩矿物的综合^[21]。巴什基奇克组砂岩主要包含强压实相、钙质胶结相和溶蚀相等3种成岩相类型^[20,22-23]。强压实相是储层经历强烈的成岩压实作用所呈现的最终面貌。同生成岩、早成岩和中成岩早期的压实作用使得巴什基奇克组孔隙度迅速降低, 颗粒由点接触到点线接触、线接触。强压实相储层杂基含量普遍大于6.57%, 岩屑通常高于9%, 且强压实相主导储层成岩相, 储层物性通常较差, 孔隙度平均值只有2.24%, 渗透率平均值仅为0.003 mD^[22]。钙质胶结相(碳酸盐胶结相)主要用于描述碳酸盐胶结物对于储层的影响, 其含量和储层物性呈负相关关系。巴什基奇克组钙质胶结相

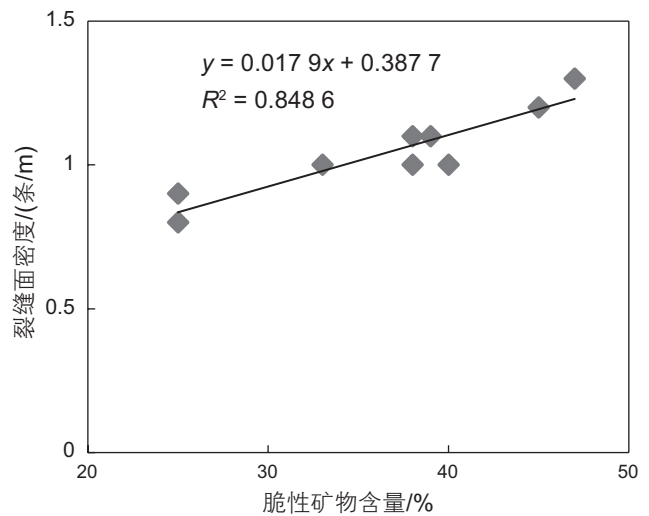


图4 裂缝面密度和脆性矿物含量关系图
Fig. 4 Relationship between brittle components and degree of fracture development

碳酸盐胶结物含量一般大于13%, 最高可达20%, 孔隙度小于6%。溶蚀相是指溶解作用对储层物性的影响。溶蚀相占主导地位的储层段, 其杂基含量通常较少, 长石和岩屑遭受溶蚀使得储层孔隙度一般大于5.3%, 渗透率大于0.13 mD。储层段占主导地位的成岩相类型直接影响其对应层段的岩石力学性质, 进而可能影响裂缝的发育程度。在砂岩岩石力学层厚度基本一致的前提下, 强压实相储层段裂缝的发育程度最高, 钙质胶结相其次, 溶蚀相裂缝发育程度最低。成岩演化序列表明受燕山晚期抬升暴露和大气淡水淋滤的作用, 大北地区巴什基奇克组自顶部不整合面开始往下, 溶蚀孔隙逐渐减少^[15], 距不整合面100 m孔隙度约为2%~4%, 100~250 m约为1%~2%, 大于250 m孔隙度小于1%, 储层的溶蚀作用向下减弱, 而压实作用自上而下逐渐增强, 距不整合面顶部开始成岩压实率由小于60%逐渐增大到大于80%。胶结作用自上而下也具有逐渐增强的趋势, 胶结率由小于30%增大到70%。井壁成像测井裂缝解释显示大北井区构造裂缝自巴什基奇克组顶部开始向下发育程度逐渐增强, 巴一段和巴二段裂缝发育程度总体弱于巴三段。裂缝线密度由小于1条/m逐渐增大到大于10条/m, 裂缝发育程度和溶解率、压实率和胶结率的变化大致相当(图7)。

2.4 裂缝和力学层厚度的关系

岩石力学层系指力学行为相近或一致的岩石单元,

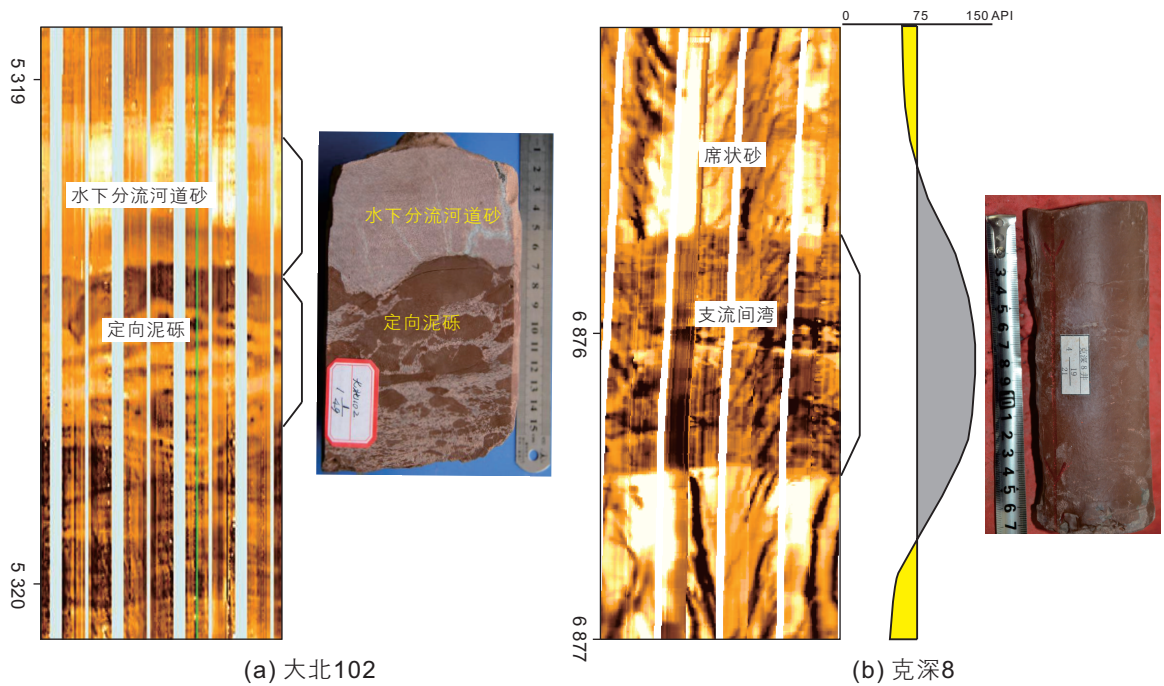


图5 井壁成像测井成因砂体识别示意图

Fig. 5 Sandstone identification with borehole well logging images

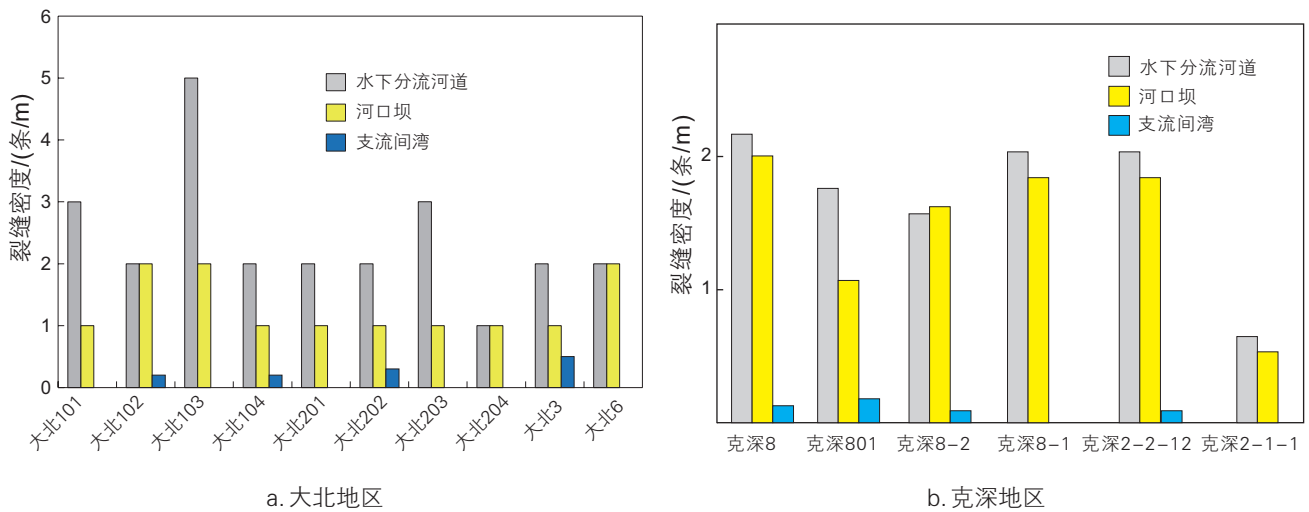


图6 巴什基奇克组裂缝发育程度和沉积微相关系

Fig. 6 Relationship between micro-facies and fracture development degree

一般在低渗透砂岩储层中和岩性层一致。在其他控制因素基本一致的情况下，通过巴什基奇克组岩心和井壁成像测井统计，显示裂缝密度也基本满足随单层厚度越大裂缝密度越小的规律(图8)。其中，单层岩石力学层顶底以泥岩和泥砾的出现为界。进一步选取巴什基奇克组岩心识别的41个岩石力学层，利用铸体薄片统计微裂缝的发育程度和岩石力学层厚度之间可能存在的关系，其中微裂缝主要为构造微裂缝和粒内缝。

统计结果显示裂缝面密度和单位岩石力学层厚度之间呈较好的指数关系(图9)。

2.5 裂缝和局部构造的关系

受地震资料品质的约束，研究区目前仅能识别二级断裂和部分三级断裂。大北地区发育6条近NE-SW的二级逆冲断裂；克深气田发育三条近EW向的二级断裂。选取岩性岩相、成岩相和岩石力学层厚度相似

的层段,统计断层和其邻井裂缝发育程度的关系,裂缝密度来源于井壁电成像测井。统计结果显示随着与断层的距离增大,裂缝密度逐渐降低;当井与断层的距离超过1 km时,断层对构造裂缝发育程度的影响减弱(图10)。

2.6 裂缝和构造应力的关系

基于岩石声发射求取最大有效古应力,研究应力和构造裂缝发育程度之间的关系。选取巴什基奇克组岩石组分、成岩强度和岩石力学层厚度相似、且与断层相距较远的钻井岩心,进行岩石声发射测量。研究

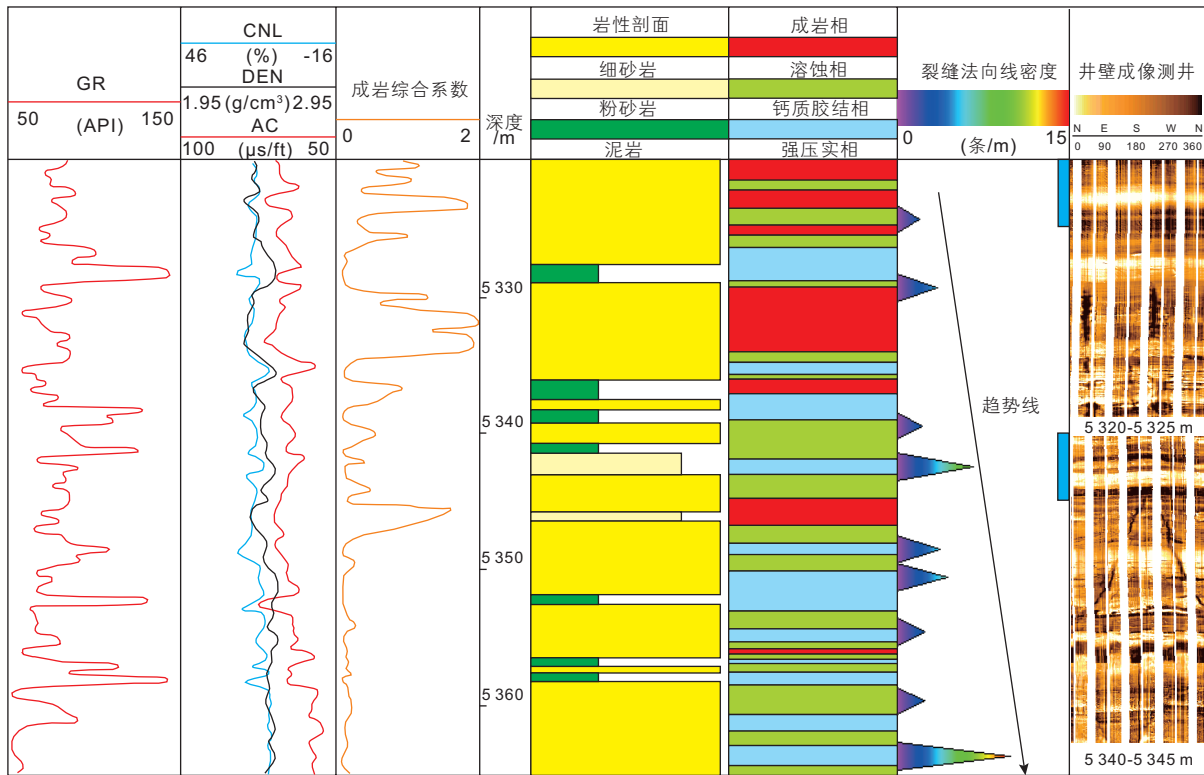


图7 大北102井裂缝和成岩相关关系图

Fig. 7 Relationship between diagenetic facies and fractures in well DB102

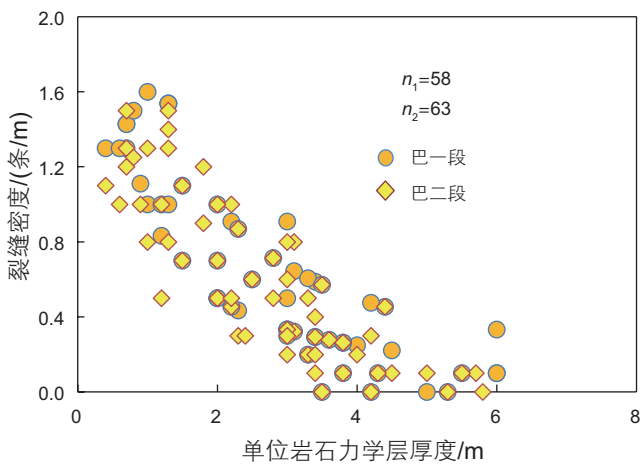


图8 巴什基奇克组单位岩石力学层厚度和裂缝密度交会图

Fig. 8 Crossplot of mechanical layer thickness and fracture density

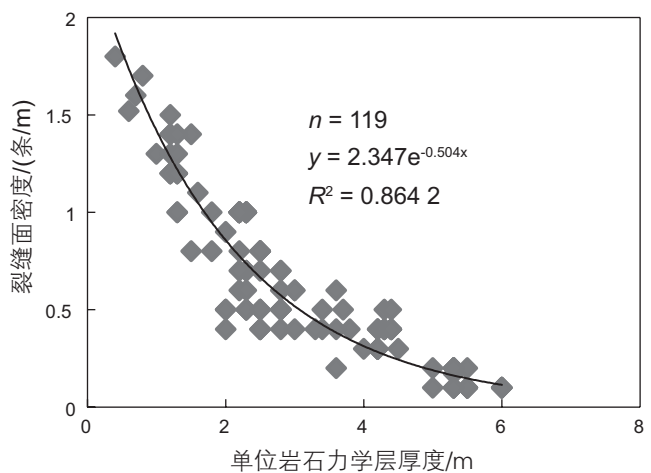


图9 巴什基奇克组单位岩石力学层厚度和微裂缝面密度交会图

Fig. 9 Crossplot of mechanical layer thickness and microfracture density

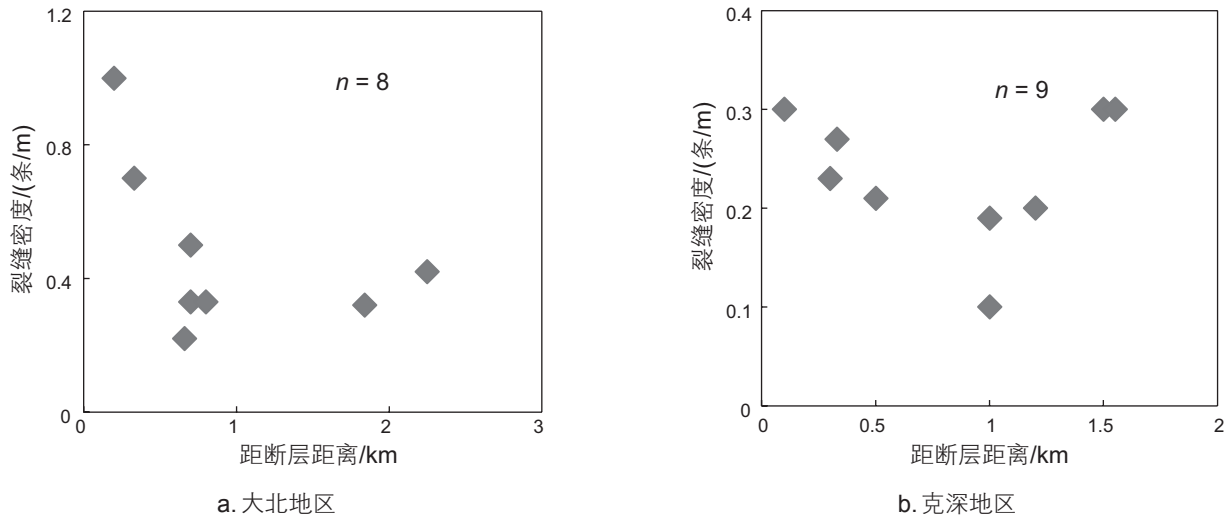


图 10 裂缝发育程度与断层距离的关系图

Fig. 10 Relationship between fault distance and fracture density

结果表明,最大古有效应力越大,构造裂缝密度越大;当应力低于 30 MPa 时,构造裂缝基本不发育。以大北地区和克深气田为例,巴什基奇克组自古近纪末开始一直处于较强的挤压构造背景,白垩系最大古有效应力介于 60~90 MPa 之间,其中大北 101 井为 83.6 MPa,大北 201 为 77.3 MPa,大北 202 为 74.8 MPa,大北 6 井为 68.7 MPa,克深 201 井为 85.6 MPa,克深 202 井为 81.2 MPa,在其他条件基本一致的情况下,古构造应力越强,裂缝发育程度越强(图 11)。由于库车坳陷构造应力来自南天山向南的构造挤压,往南构造应力强度呈减弱趋势,因此在其他影响因素相似的地层中,裂缝发育程度具有自北向南减弱的趋势。基于相似背斜露头巴什基奇克组砂岩中构造裂缝密度的统计以及对应采样点最大古应力的测量发现露头上古应力和裂缝密度及分维数也具有相同的变化规律,即古应力强的部位,裂缝密度大;反之,裂缝密度小^[14]。

3 各控制因素的权重分析

引入裂缝密度变异系数的概念^[24],进一步定量评价各控制因素对裂缝发育程度的影响强弱,裂缝密度变异系数可表示为:

$$V = \frac{\delta_f}{F_a} \quad (1)$$

$$\delta_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i - F_a)^2 / n} \quad (2)$$

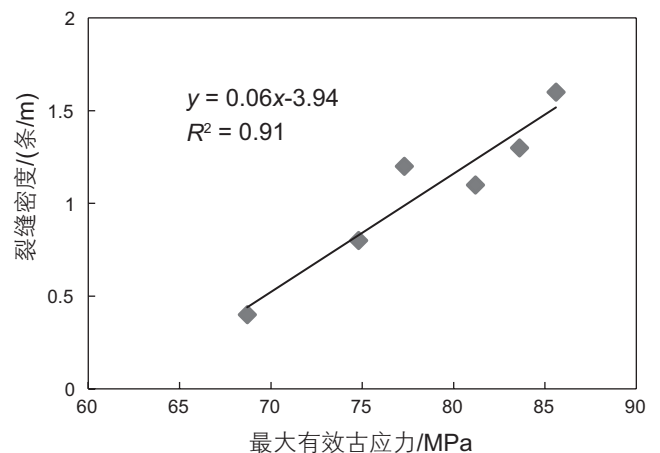


图 11 构造缝密度和最大有效古应力关系图(细砂岩)

Fig. 11 Relationship between maximum paleo-stress and structural fracture density

$$F_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (3)$$

其中, V 为裂缝密度变异系数,无量纲; δ_f 为某一变量的标准差; F_a 为所有样品的裂缝密度平均值; F_i 为第*i*个样品的裂缝密度; n 为样品个数。

裂缝密度变异系数是评价单个控制因素作用下裂缝密度离散程度的变量,当该值越大时,代表该控制因素下裂缝密度大小相差悬殊,那么该控制因素对于裂缝发育程度的影响就越大。

裂缝密度变异系数的计算结果显示巴什基奇克组裂缝密度的大小主要受单位岩石力学层厚度和构造应力的影响,其次是构造部位和岩性、岩相,而成岩相

的影响最弱(表1)。

4 讨论

4.1 区域上裂缝发育程度的控制因素

喜马拉雅期为巴什基奇克组的主要造缝期,单井裂缝解释结果显示该地层裂缝密度整体呈北高南低的特征(图12)。同时最大古构造应力从山前向前缘隆起逐渐减弱,其中大北井区构造应力略强于克深地区(图13)。古构造应力在区域上的展布特征和裂缝的发育特征基本一致,且大北地区发育大量的网状裂缝,裂缝密度整体大于克深地区,因此,可以推断最大古构造应力从区域上控制着巴什基奇克组致密砂岩裂缝的发育程度,是研究区裂缝区域发育特征的主要控制因素。同时库车坳陷沉积相带由山前的辫状河三角洲平原向坳陷中心过渡为前缘亚相,砂岩的粒度向南逐渐变细,但是裂缝密度整体上却逐渐变小(图12),因此,可以推断岩性和沉积相对于区域上裂缝的发育程度影响较弱。

4.2 纵向上裂缝发育程度的控制因素

通过裂缝和岩性的关系讨论可知不同类型的岩石裂缝发育程度不同。而露头、岩心和井壁成像测井显示巴什基奇克组以细、粉砂岩为主,垂向上砂体出现的频率大于95%,砂地厚度比也大于0.95,泥岩隔夹层分布较为有限。单剖面垂向序列上,泥岩隔夹层厚度一般为0.1 m,单层厚度多小于0.2 m,垂向出现频率为0~5条/m。横向上,小型者延伸几米到十余米,大者延展范围50~100 m。因此虽然岩性制约着裂缝的发育程度,但是巴什基奇克组相对单一的岩石类型使得裂缝在垂向上的发育对岩性和沉积微相的依赖相对较小。

前已述及,大北地区裂缝纵向上的发育程度和储层成岩相具有较好的一致性,但是对于克深地区上述分布规律较为模糊,即虽然自不整合面向下储层物性逐渐变差,储层的致密程度逐渐变高,但是从成像测井裂缝解释的结果来看,巴二段裂缝发育程度显著高于巴一段和巴三段,且巴一段大于巴三段。分析可知上述现象的原因主要是克深地区巴二段单砂层厚度明

表1 巴什基奇克组各控制因素的裂缝密度变异系数

Table 1 The variable coefficient of fracture density for the controlling factors in the Bashejiqike Formation

	岩性	沉积微相	成岩相	层厚	构造应力	构造部位
变异系数	0.45	0.44	0.26	1.29	0.98	0.81
影响强弱	4	5	6	1	2	3

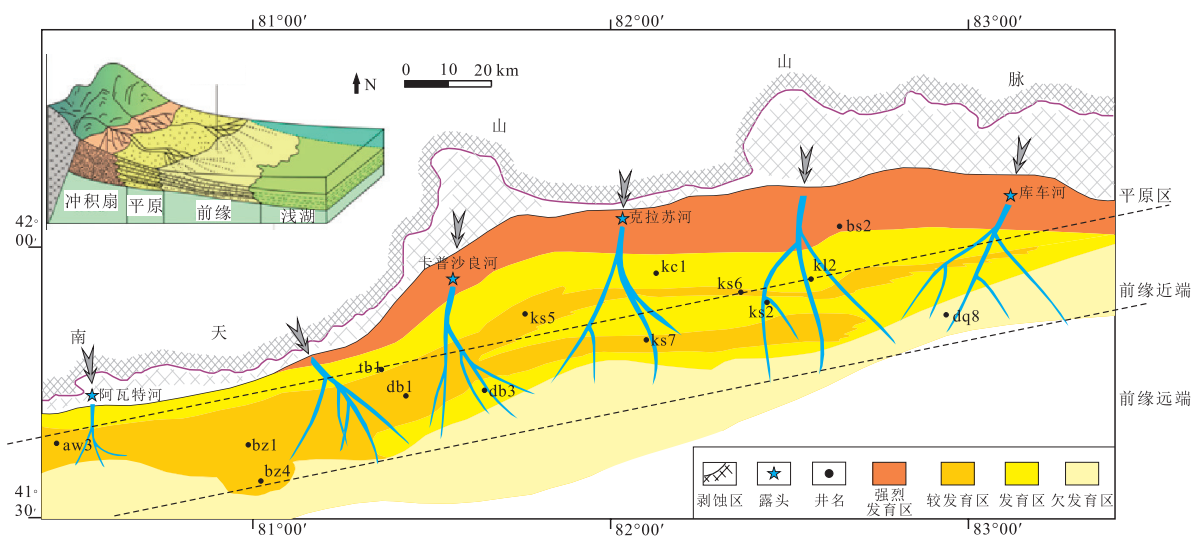


图12 沉积相和裂缝密度叠合图(并未全标注)

Fig. 12 Diagram showing the fracture intensity which is superimposed on the facies distribution map (wells are not all marked)

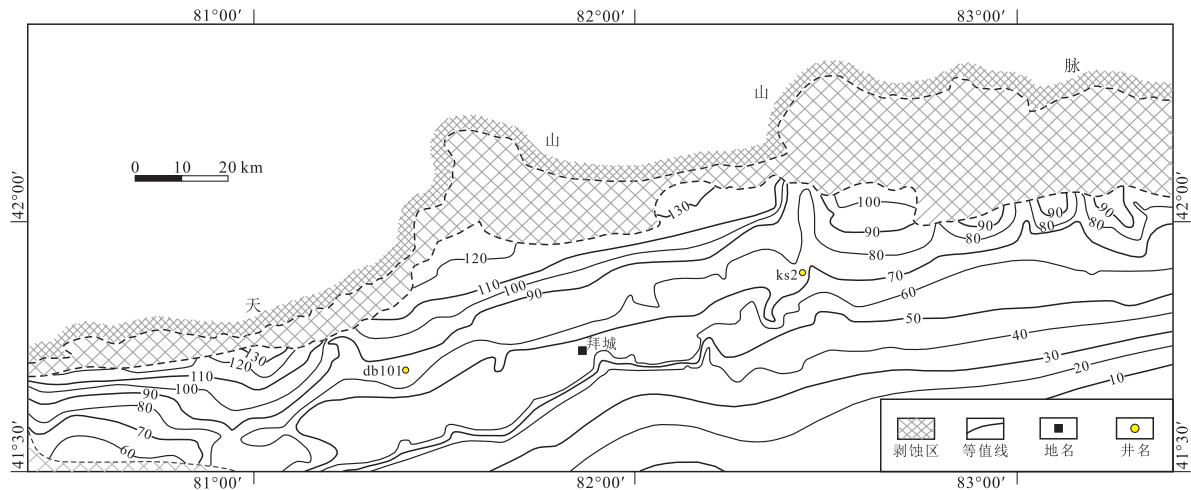


图 13 库车坳陷白垩系喜马拉雅期最大构造应力等值线图

Fig. 13 Contour map showing the Cretaceous maximum paleostress in the Kuqa Depression during the Himalayan period

显变小,一般小于 2.8 m,在构造应力的作用下较薄的地层更容易破裂;巴一段和巴三段复合砂体叠合厚度大,砂地比高,在相同应力作用下地层不易破裂。因此,虽然成岩相对于大北地区巴什基奇克组各岩性段裂缝的发育程度具有一定的影响,但是岩石力学层的存在会显著影响裂缝在纵向上的非均质性特征。

4.3 背斜形态对裂缝发育程度的影响

构造主曲率作为描述岩石弯曲变形的一个重要参数,可用于预测背斜中纵张裂缝的发育程度^[25-26]。然而从已有大量的野外和油田的研究实例来看,西部挤压盆地低渗透储层多是构造挤压作用下形成的剪切裂缝,张裂缝发育程度有限^[1]。克拉苏构造带隶属库车坳陷山前逆冲带,广泛发育EW和NE-SW向断背斜。露头 and 岩心观察显示目的层巴什基奇克组主要发育背斜相关裂缝^[13,14,27-28],即裂缝主要是在背斜发育过程中形成的,且以高角度剪裂缝为主,张性裂缝所占比例同样较小。因此虽然背斜构造控制着巴什基奇克组裂缝的形成,但是背斜形态(主要是构造主曲率)难以反映巴什基奇克组裂缝的真实发育程度。

5 结论

在单因素控制下对库车坳陷巴什基奇克组裂缝密度的大小进行分析,结果表明:

(1)巴什基奇克组裂缝的发育程度同时受控于岩性、沉积微相、成岩相、单位岩石力学层厚度、局部构造和古构造应力大小等;裂缝一般在细粉砂岩、水下分流河道、强压实相、薄的岩石力学层、距断层 1 km 以内的范围和较大的古构造应力作用下最为发育。

(2)裂缝密度变异系数计算结果表明单位岩石力学层厚度和构造应力对裂缝密度的大小影响最为明显,成岩相影响最弱。

(3)区域上古构造应力控制着裂缝密度的发育大小,整体上裂缝密度自南天山向坳陷内部具有减弱的趋势。纵向上岩性、沉积微相、成岩相和岩石力学层厚度同时影响裂缝的发育程度。

(4)由于巴什基奇克组以剪性裂缝为主,因此裂缝发育程度不受背斜形态(曲率)的影响。

参考文献

- [1] NELSON R A. Geological analysis of naturally fractured reservoirs[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985.
- [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. [ZENG L B. Fracture formation and distribution in the low-permeability sandstone reservoirs. Beijing: Science Press, 2008.]
- [3] LAUBACH S E, OLSON, J E, GROSS, M R. Mechanical and fracture stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 93(11): 1413-1426.
- [4] 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 W T, HOU G T, SUN X W, 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.]

- [5] 曾联波. 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 L B. Techniques of fracture analysis in the low permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.]
- [6] 巩磊, 曾联波, 杜宜静, 等. 构造成岩作用对裂缝有效性的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 540-545. [GONG L, ZENG L B, DU Y J, et al. Influence of structural diagenesis on fracture effectiveness: A case study of the Cretaceous tight sandstone reservoirs of Kuqa foreland basin[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(3): 540-545.]
- [7] NARR W. Fracture density in the deep subsurface: techniques with application to Point Arguello oil field [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(8): 1300-1323.
- [8] 李乐, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 逆断层对致密岩石构造裂缝发育的约束控制[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 466-473. [LI L, HOU G T, PAN W Q, et al. The constraints of reverse fault to the development of structural fractures in compacted rocks [J]. Chinese journal of Geophysics, 2011, 54(2): 466-473.]
- [9] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝分布的实验研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 1998, 13(3): 20-24. [ZENG L B. Experimental study of fractures distribution in low-permeability sandstone reservoir [J]. Journal of Xiangtan Mineral School, 1998, 13(3): 20-24.]
- [10] 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[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 827-835. [ZHANG H L, ZHANG R H, YANG H J, 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.]
- [11] 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 Z Y, TAO X Y, FAN P, 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.]
- [12] 高孝巧, 张达. 逆断层控制构造裂缝发育的力学机制模拟[J]. 地质力学学报, 2015, 21(1): 47-55. [GAO X Z, GAO D. Numerical simulation of structural fractures controlled by reverse fault[J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(1): 47-55.]
- [13] 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(50): 808-815. [SUN X W, HOU G T, YU X, 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(50): 808-815.]
- [14] 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 215-221. [LU H F, JIA D, CHEN C M, et al. Nature and timing of the Kuqa Cenozoic structures[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 1999, 6(4): 215-221.]
- [15] 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]. 石油地质, 2013, 2: 1-6. [NENG Y, XIE H W, SUN T R, et al. Structural characteristics of Keshen segmentation in Kelasu structural belt and its petroleum geological significance[J]. Petroleum Geology, 2013, 2: 1-6.]
- [16] JIA C Z. Characteristics of Chinese petroleum geology-geological features and exploration cases of stratigraphic, foreland and deep formation traps[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2012.
- [17] 贾进华. 库车前陆盆地白垩纪巴什基奇克组沉积层序与储层研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 133-143. [JIA J H. Depositional sequence and reservoir of Cretaceous Bashijiqike formation in Kuqa foraland basin[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(3): 133-143.]
- [18] 顾家裕, 方辉, 贾进华. 塔里木盆地库车坳陷白垩系辫状三角洲砂体成岩作用和储层特征[J]. 沉积学报. 2001, 19(4): 517-523. [GU J Y, FANG H, JIA J H. Diagenesis and reservoir characteristics of Cretaceous braided delta sandbody in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 517-523.]
- [19] 朱玉新, 郭庆银, 邵新军, 等. 新疆塔里木盆地库车坳陷北缘白垩系储层沉积相研究[J]. 古地理学报. 2000, 2(4): 58-65. [ZHU Y X, GUO Q Y, SHAO X J, et al. Study on reservoir sedimentary facies of the Cretaceous in the north of Kuqa depression, Tarim basin, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(4): 58-65.]
- [20] 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 R H, YANG H J, WANG J P, et al. The formation mechanism and exploration significance of ultra-deep, low-porosity and tight sandstone reservoirs in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Snica, 2014, 35(6): 1057-1069.]
- [21] 纪友亮. 油气储层地质学[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2009. [JI Y L. Petroleum reservoir geology[M]. Beijing: Press of China University of Petroleum, 2009.]
- [22] 杨宁. 低渗透碎屑岩岩石物理相测井识别方法及应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2013. [YANG N. Petrophysical facies logging identification and application of low permeability clastic rocks[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2013.]
- [23] 赖锦, 王贵文, 信毅, 等. 库车坳陷巴什基奇克组致密砂岩气储层成岩相分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 1019-1032. [LAI J, WANG G W, XIN Y, et al. Diagenetic facies analysis of tight sandstone gas reservoir of Bashijiqike formation in Kuqa Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 1019-1032.]
- [24] 杨学君. 大北气田低孔低渗砂岩储层裂缝特征及形成机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012. [YANG X J. Characteristics and origin of fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability, Dabei Gas Field[D]. Qingdao: China University of Petroleum

- (Huadong), 2012]
- [25] MURRAY, G H. Quantitative fracture study, Sanishpool, Mckeenzie county, NorthDakota[J]. AAPG Bulletin, 1968, 52(1): 57-65.
- [26] 曾锦光, 罗元华, 陈太源. 应用构造面主曲率研究油气藏裂缝问题[J]. 力学学报, 1982, 2(2): 202-206. [ZENG, J G, LUO Y H, CHEN, T Y. A method for the study of reservoir fracturing based on structural principal curvatures[J]. Acta Mechanica Sinica, 1982, 2(2): 202-206.]
- [27] 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知识[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增刊 I): 63-73. [ZHANG Z P, WANG Q C. Joint and shear fracture features and their implication for regional field transformation in the Kuqa depression[J]. Science in China SeriesD-Earth Sciences, 2004, 34 (supplement): 63-73.]
- [28] 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裂缝发育规律、控制因素与属性建模研究[J]. 岩石学报, 32(3): 865-876. [WANG Z Y, LIU C, ZHANG Y F, et al. A study of fracture development, controlling factor and property modelling of deep-lying tight sandstone in Cretaceous thrust belt K region of Kuqa Depression[J]. Acta Petrologica Sinica, 32 (3): 865-876.]

Controlling factor analysis of fracture density in the Bashijiqike Formation, Kuqa Depression

NIAN Tao¹, WANG Guiwen^{1,2}, XIAO Chengwen³, LI Ruijie¹, ZHOU Lei³, DENG Li¹, SONG Hongyu⁴

1 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Tarim Oilfield Company of PetroChina, Korla 841000, China

4 China Petrochemical Press, Beijing 434000, China

Abstract Based on outcrop observation, drill cores, borehole imaging interpretation and section description, the factors affecting the fracture density in the Kuqa Depression were rock lithology, sedimentary microfacies, diagenetic facies, mechanical stratigraphy thickness, local structures and tectonic stress. Generally, environments for well-developed fractures include fine sandstone, sub-sea channels, strongly compacted diagenetic facies, thinner mechanical layers, distance to faults less than 1km and high paleo-tectonic stress. Furthermore, the calculation of the variable coefficient of fracture density indicates that mechanical stratigraphy thickness and tectonic stress significantly affect fracture density in contrast with diagenetic facies. Regionally, the paleo-tectonic stress has mainly controlled fracture density which gradually decreases from the Southern Tianshan Orogen to the depression. Meanwhile, rock lithology, sedimentary microfacies, diagenetic facies and mechanical stratigraphy thickness have simultaneously controlled the fracture density in the vertical direction. Additionally, shear fracture is the main fracture type in the Bashijiqike Formation, thus the principal structure curvature is not related to fracture intensity.

Keywords Kuqa Depression; Bashijiqike Formation; tight sandstone; fracture density; controlling factors

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.027

(编辑 付娟娟)