

深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律

曾联波¹, 巩磊², 宿晓岑², 毛哲¹

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 东北石油大学 环渤海能源研究院, 河北 秦皇岛 066004]

摘要:天然裂缝是深层-超深层致密储层的有效储集空间和主要渗流通道,影响着致密储层油气的运移、富集、单井产能、开发方式及开发效果。通过对近年来致密储层裂缝研究成果总结和文献综述,分析了深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律。将致密储层天然裂缝分为大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝和微尺度裂缝4个级别。不同尺度裂缝分布具有幂律分布的特点,裂缝尺度越大,数量越少;裂缝尺度越小,数量越多。大、中尺度裂缝主要起渗流作用,小尺度裂缝主要起渗流和储集作用,而微尺度裂缝主要起储集作用。在地层埋藏过程中的应力体制演化决定了不同时期天然裂缝的类型、产状及其力学性质;构造应力大小、岩石力学层的力学性质和厚度差异控制了多尺度裂缝的形成分布及其发育程度。构造变形导致不同构造部位的局部应力和应变分布产生差异,增强了裂缝发育的非均质性。逆冲断层通过控制其上盘地层变形控制了“裂缝域”的分布规律;走滑断层的组合样式、活动方式和岩石力学层共同控制了相关裂缝的三维空间展布。裂缝形成演化过程中的开启-闭合规律决定了裂缝的储集空间,记录了裂缝有效性的演化历史。

关键词:断裂带结构;有效性演化;天然裂缝;多尺度裂缝;致密储层;深层-超深层

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs: Distribution and development

ZENG Lianbo¹, GONG Lei², SU Xiaocen², MAO Zhe¹

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Bohai Rim Energy Research Institute, Northeast Petroleum University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China]

Abstract: Natural fractures serve as effective storage spaces and primary seepage pathways in deep to ultra-deep tight reservoirs, affecting the hydrocarbon migration and enrichment, single-well productivity, and exploitation methods and outcomes of the reservoirs. Based on the summary of latest research results and literature review on fractures in tight reservoirs, this study delves into the distribution characteristics and developmental patterns of natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs. The results show that the natural fractures are of large, meso, small, and micro scales, following a power law distribution. In other words, a larger scale corresponds to a smaller number of fractures, and vice versa. Large- and meso-scale fractures primarily facilitate seepage; small-scale ones mainly enable seepage and storage; and micro-scale ones principally serve as storage spaces. The type, occurrence, and mechanical properties of the natural fractures formed across different periods are determined by the evolution of stress regime during stratigraphic burial. The formation, distribution, and developmental degree of multi-scale fractures are subjected to the magnitude of tectonic stress, the mechanical properties of rock mechanical stratigraphy, and the thickness differences in mechanical layers. Structural deformation results in varied local stress and strain distribution at different structural locations, increasing fracture heterogeneity. Thrust faults control the distribution of faulted fracture zones by controlling the deformation of strata on the hanging walls. The combination style and movement mode of strike-slip faults, along with rock mechanical stratigraphy, jointly dictate the three-dimensional spatial distribution of related fractures. Furthermore, the crack-seal patterns of the fractures during formation and evolution determine their storage spaces and record the evolutionary history of their effectiveness.

收稿日期:2023-08-17;修回日期:2023-12-10。

第一作者简介:曾联波(1967—),男,博士、教授,裂缝性储层与非常规油气储层形成、分布及预测技术研究。E-mail: lbzeng@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目(U21B2062);黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2022D006)。

Key words: fault zone structure, effectiveness evolution, natural fracture, multi-scale fracture, tight reservoir, deep to ultra-deep reservoir

引用格式:曾联波,巩磊,宿晓岑,等. 深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 1-14. DOI: 10. 11743/ogg20240101.

ZENG Lianbo, GONG Lei, SU Xiaocen, et al. Natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs: Distribution and development[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 1-14. DOI: 10. 11743/ogg20240101.

深层-超深层是近年来油气勘探开发的重要领域,中国在塔里木、四川等盆地取得了重要进展,展现了良好的勘探开发潜力^[1-4]。深层-超深层的储层成岩作用强烈,储层基质物性差,孔隙度多小于10%,渗透率普遍小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以致密储层为主,储层的孔喉结构复杂,天然裂缝普遍发育,储层非均质性强,油气差异富集复杂,勘探开发难度大。

在多期构造变形作用以及多阶段强烈成岩作用下,深层-超深层致密储层往往发育有不同类型、不同成因的天然裂缝系统^[5-7]。这些多尺度天然裂缝系统影响着有效储层形成、油气成藏和开发效果^[8-9]。天然裂缝的存在可以大大提高储层的渗透率,改善储层渗透性能,甚至可以为储层提供有效的储集空间,成为裂缝性储集层^[10]。但是,受破坏性成岩作用(胶结作用)及强烈构造作用的影响,天然裂缝在地下可能呈完全被充填或闭合状态,丧失有效性,起到渗流屏障的作用,从而分割储层,破坏储层的横向连续性和连通性,阻碍大规模储层的形成,并影响注水开发效果^[11-12]。天然裂缝作为一种不连续构造,即使被充填以后,其强度也会低于母岩的破裂强度,在后期注水压裂过程中,水力裂缝会沿天然裂缝延伸方向进行扩展,形成复杂缝网,从而达到高产^[13]。但当开启性天然裂缝的垂向延伸距离过大时,有可能会造成天然气的散失,对致密气藏的保存不利^[14]。因此,天然裂缝是致密储层重要的储集空间和主要渗流通道,控制了油气的运移、聚集、保存和单井产能,同时也影响着压裂裂缝扩展方式和压裂效果^[15-17]。越来越多的油气开发实践表明,裂缝发育程度是致密储层能否获得高产及稳产的关键地质因素^[18-20]。

通过储层天然裂缝的综合评价,可以帮助深入认识天然裂缝的形成演化过程、开启-闭合机制及其对流体渗流的贡献程度,并通过对天然裂缝的分布预测,进而为寻找致密储层油气“甜点”区提供重要指导,并能为压裂施工、注水排采及井网优化等方面提供合理建议^[21-23]。本文通过对近年来的裂缝文献综述和对致密储层裂缝研究成果总结,分析了深层-超深层致密砂岩和致密碳酸盐岩储层天然裂缝的发育特征和多尺度性分布特征,讨论了影响天然裂缝形成和演化过程

及其控制因素,探讨了天然裂缝的有效性及其演化规律,有利于认识致密储层多尺度裂缝发育规律及其作用和指导致密油气的勘探与开发。

1 深层-超深层天然裂缝的特殊性

相对于中-浅层,深层-超深层储层在地质历史时期的演化过程中,普遍经历了深埋藏、强压实、高温高压、高矿化度流体活动以及复杂的成岩作用,储层发生了不同程度致密化,相比常规储层具有更强的非均质性及各向异性,形成了不同级次的岩石力学界面。这些不同级次的岩石力学界面控制了不同尺度天然裂缝的形成和分布,使得深层-超深层天然裂缝具有多尺度性特征^[24-27],不同尺度和规模的天然裂缝对致密储层所起的作用明显不同。同时,这些致密储层又经历了多期次、多性质的构造运动,不同性质的应力状态和应力大小决定了裂缝的类型、产状和发育程度,这些使得深层-超深层致密储层中的天然裂缝具有多成因、多期次、多性质、多产状等特征。深层-超深层致密储层盆地往往经历了强烈的构造变形,如塔里木盆地库车前陆盆地逆冲构造变形、顺托果勒地区走滑构造变形等,形成了多种复杂的构造样式,在不同类型的构造中天然裂缝发育特征和分布规律千差万别,而同一类构造不同构造部位天然裂缝的发育特征也存在较大的差异,这都强烈增加了致密储层天然裂缝分布的复杂性^[28-30]。天然裂缝形成以后,又经历了多期次成岩胶结和活化张开,从而影响着裂缝的有效性及其演化,进一步使有效裂缝的分布复杂化,影响深层-超深层储层质量的差异分布^[31-33]。

2 深层-超深层天然裂缝的多尺度性

受岩石力学层影响,致密储层中的天然裂缝具有多尺度性特征^[34]。根据观测手段、裂缝规模及裂缝与岩石力学界面的空间配置关系,将致密储层中的天然裂缝划分为微尺度裂缝、小尺度裂缝、中尺度裂缝和大尺度裂缝4个级别(表1)。

微尺度裂缝的发育受矿物颗粒和纹层控制,包括

表1 不同尺度裂缝分布特征(据曾联波等^[6]修改)Table 1 Distribution of fractures at various scales (modified after Zeng et al. ^[6])

裂缝尺度	分布特征	裂缝类型	延伸长度	开度	贡献
微尺度裂缝	受纹层或矿物颗粒控制,裂缝规模小,密度大,需借助微观分析	穿粒缝、粒内缝、粒缘缝	毫米级	< 40 μm	储集空间
小尺度裂缝	在单一岩石力学层内发育,裂缝延伸受岩石力学界面限制	层控裂缝	厘米-分米级	40 ~ 100 μm	渗流通道、储集空间
中尺度裂缝	在多套岩石力学层内发育,可跨越多套岩石力学层性质差异较小的岩石力学层,裂缝延伸受泥岩夹层限制	穿层裂缝	米-数十米级	百微米级	渗流通道
大尺度裂缝	在多套岩石力学层内发育,表现为断层型裂缝,两侧地层具有明显的位移,甚至发育有小型断层核	小断层	数十米级-百米级	毫米-厘米级	渗流通道

发育在矿物颗粒内部的粒内缝(图1a)、发育在矿物颗粒边缘的粒缘缝以及穿越多个颗粒的穿粒缝(图1b)。粒内缝主要表现为石英的裂纹缝或长石的解理缝,它们在石英或长石等矿物颗粒内发育,没有切过矿物颗粒边缘。此类裂缝的规模小,密度大,其开度一般小于1 μm 。粒内缝主要发育在相互接触的颗粒之中,岩性越粗、岩石中杂基含量越少,这类裂缝越发育。分布在长石颗粒中的解理缝多数具有溶蚀现象,而石英中的裂缝溶蚀现象少见。粒缘缝主要分布在矿物的颗粒之间,沿着矿物颗粒边缘分布,其形成同样与强烈的机械压实和压溶作用有关。粒内缝和粒缘缝规模小,延伸短,与储层基质孔隙处于同一数量级,因而它们可以划分在基质孔隙系统中。穿粒缝主要是指切穿矿物颗粒发育的微粒缝,穿粒缝的规模比粒内缝和粒缘缝大,延伸长度可达厘米级,开度主要分布在1 ~ 40 μm 。穿粒缝主要在纹层内部发育,不受矿物颗粒限制,通常穿越数个矿物颗粒以上(图1b),主要起储集空间和沟通粒间孔的作用。

小尺度裂缝主要发育在同一岩石力学层内部,裂缝延伸受岩石力学界面限制,一般近垂直于岩层分布(图1c)。裂缝开度在40 ~ 100 μm ,纵向延伸长度厘米至分米级。根据小尺度裂缝与岩石力学界面的接触关系,可将小尺度裂缝划分为非层控型、一端层控型和完全层控型。非层控型裂缝发育在单个岩石力学层内部,裂缝两端均不接触岩石力学界面,裂缝规模较小,高度小于岩石力学层厚度。一端层控型是指裂缝顶端或底端被岩石力学界面限制,裂缝高度也小于岩石力学层厚度,但规模相比层内裂缝大。完全层控裂缝发育在单个岩石力学层内部,贯穿同一套岩石力学层,裂缝两端延伸受上、下岩石力学层界面控制,裂缝高度与岩石力学层厚度相同。

中尺度裂缝可切穿多套岩石力学性质差异较小的地层,在垂向上主要受到泥岩等塑性夹层的限制,表现

为穿层裂缝(图1d)。中尺度裂缝规模远大于受单套岩石力学层控制的小尺度裂缝,在平面上和纵向上延伸长度为米级至十米级,地下开度百微米级。中尺度裂缝可以在成像测井上识别,表现为高导缝或高阻缝。

大尺度裂缝表现为断层型裂缝,具有较陡倾角,常与岩石力学层面呈高角度斜交,裂缝规模较大,裂缝面两侧具有明显的位移,甚至具有明显的断层核,并伴随发育高密度的小尺度裂缝(图1e)。大尺度裂缝在油藏范围内发育,可切割多套岩石力学性质差异较大的岩石力学层,裂缝延伸主要受厚层泥岩隔层限制。大尺度裂缝延伸较长,开度较大,延伸长度为数十米级至百米级,地下开度为数毫米至厘米级。

已有研究表明,天然裂缝的规模越大,其数量越少;相反,天然裂缝的规模越小,其数量越多^[35]。露头 and 薄片上裂缝参数统计结果表明,不同尺度裂缝的长度及开度在整体上服从幂律分布的特点(图2),但其呈幂律分布的具体参数因不同地区、不同构造背景而有所差异。根据不同尺度裂缝的幂律分布特点,可以实现多尺度裂缝的三维地质建模。

3 地层埋藏过程中的应力状态及裂缝演化

岩石中裂缝的形成与所受到的应力状态密切相关^[36]。其中,3个主应力状态决定了裂缝的产状及其力学性质,构造应力大小(最大和最小差应力大小)决定了裂缝规模和裂缝强度。受区域构造和地层埋藏深度的影响,不同构造时期的应力状态和大小发生变化,形成的裂缝类型、产状和发育程度不同。不同时期的古应力状态控制了裂缝的演化。

地壳中的应力状态可以用垂向主应力(σ_v)、水平最大主应力(σ_{Hmax})和水平最小主应力(σ_{Hmin})来表示^[37]。依据 σ_v 、 σ_{Hmax} 和 σ_{Hmin} 相互之间的大小关系,地

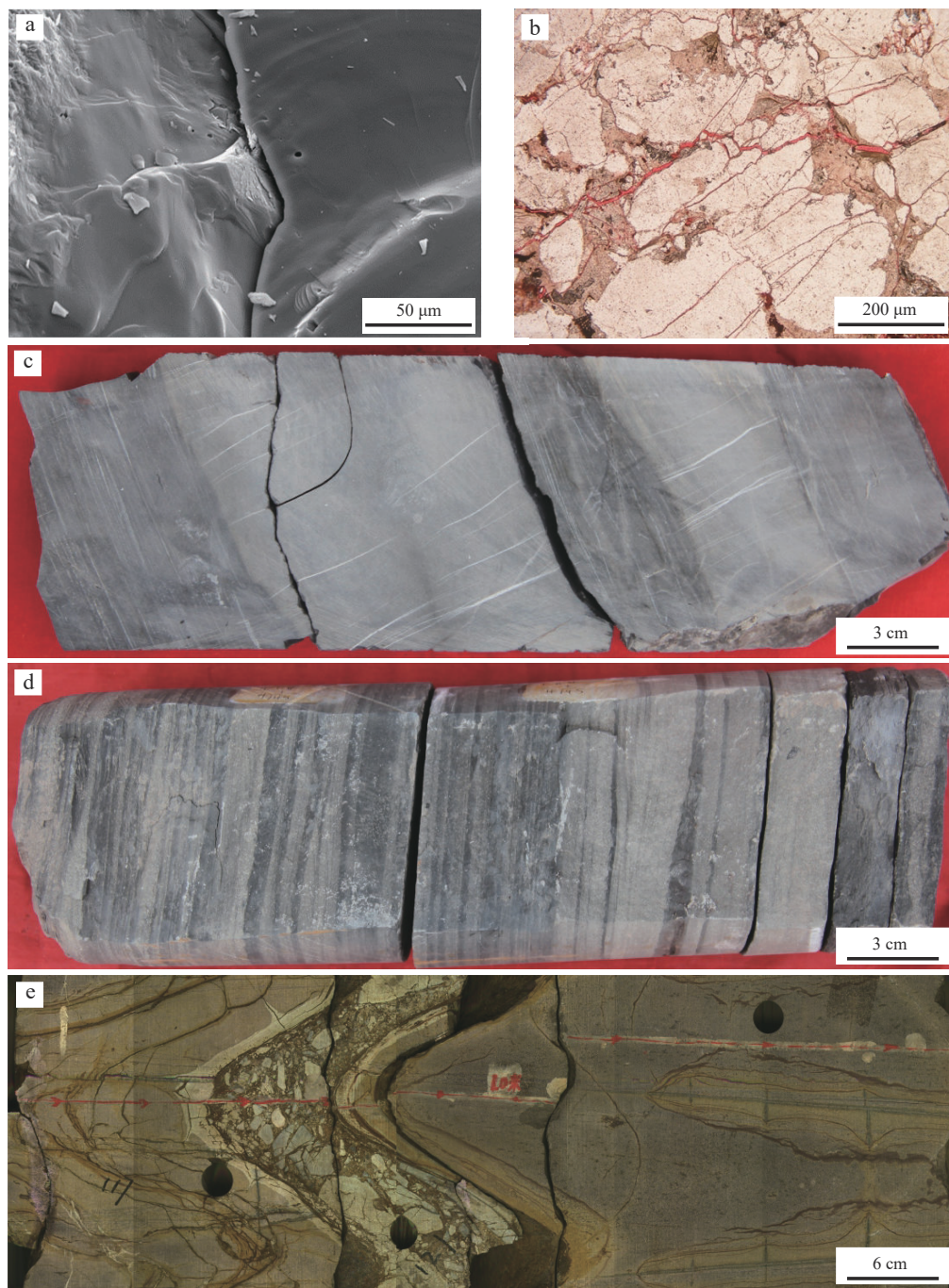


图1 致密储层不同尺度裂缝发育特征

Fig. 1 Characteristics of fractures at various scales in tight reservoirs

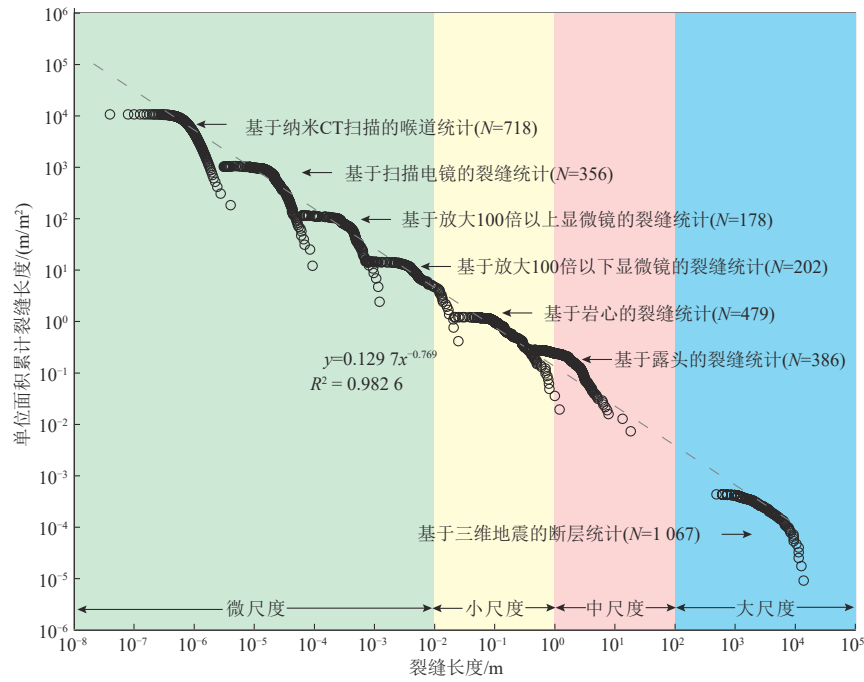
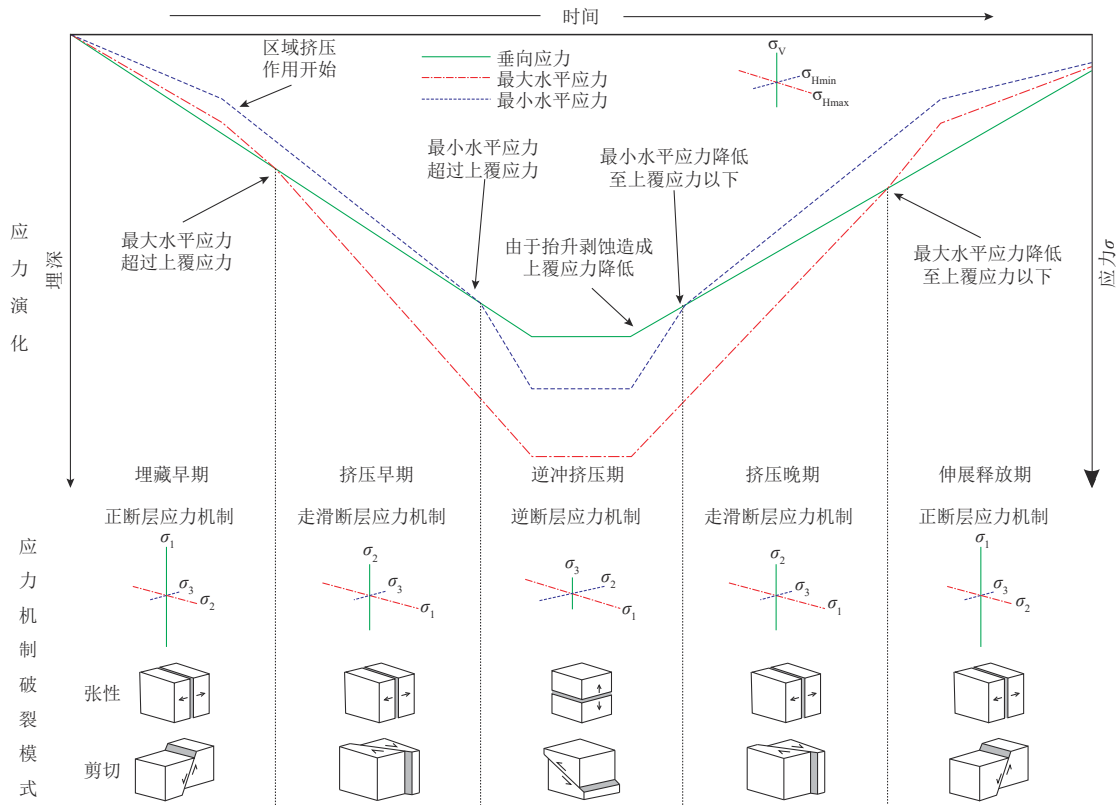
a. 微尺度裂缝(粒内缝),细砂岩,DB101井,埋深4 986.25 m,扫描电镜照片;b. 微尺度裂缝(穿粒缝),细砂岩,KS2井,埋深5 326.47 m,铸体薄片照片,单偏光;c. 小尺度裂缝,粉砂岩与泥岩互层,L102井,埋深4 218.37 m,岩心照片;d. 中尺度裂缝,粉砂岩与泥岩互层,YN5井,埋深4 968.35 m,岩心照片;e. 大尺度裂缝,细砂岩,PC34井,埋深4 538.65 m,360°岩心扫描照片

层中的应力状态存在3种应力机制,即①正断型应力机制, $\sigma_v > \sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin}$; ②走滑型应力机制, $\sigma_{Hmax} > \sigma_v > \sigma_{Hmin}$ 和③逆断型应力机制, $\sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin} > \sigma_v$ 。

在地层的沉积和埋藏阶段,地应力主要由上覆地层应力产生,在没有区域应力影响条件下,垂向主应力(σ_v)为最大主应力(σ_1),此时为正断型应力机制(图3)。

最大主应力是直立的,最小主应力和中间主应力是水平的($\sigma_1 = \sigma_v > \sigma_2 = \sigma_{Hmax} > \sigma_3 = \sigma_{Hmin}$)。在这种应力体制下,可以形成高角度剪切裂缝(倾角约 60°)和近直立张性裂缝(图3)。

随着水平挤压应力的增加,水平最大主应力(σ_{Hmax})超过垂向主应力(σ_v) ($\sigma_1 = \sigma_{Hmax} > \sigma_2 = \sigma_v > \sigma_3 =$

图2 不同尺度裂缝密度分布规律(据徐翔^[35]修改)Fig. 2 Density distribution of fractures at various scales (modified after Xu^[35])图3 不同演化阶段应力体系转变及伴生裂缝系统(据Ferrill等^[36]修改)Fig. 3 Transformation of stress regime at different evolutionary stages and associated fracture system (modified after Ferrill et al.^[36])

σ_v : 垂向应力; σ_{Hmax} : 最大水平应力; σ_{Hmin} : 最小水平应力; σ_1 : 最大主应力; σ_2 : 中间主应力; σ_3 : 最小主应力

σ_{Hmin}), 此时最大主应力和最小主应力都是水平的, 中间主应力是垂直的, 形成走滑型应力机制。在这种应

力体制下, 主要形成近垂直的剪切裂缝和张性裂缝(图3)。在深埋藏和构造挤压作用下, 致密储层中往

往会形成异常高压,当孔隙流体压力超过最小主应力时,就有可能形成拉张裂缝(即最小有效主应力为负值时形成的张性裂缝)。

随着水平挤压应力的进一步增加或构造抬升造成上覆应力降低,垂向主应力(σ_v)将转变为最小主应力($\sigma_1=\sigma_{Hmax}>\sigma_2=\sigma_{Hmin}>\sigma_3=\sigma_v$),此时,最大主应力和中间主应力是水平的,最小主应力是垂直的,即为逆断层型应力机制。在这种应力体制下,主要形成低角度剪切裂缝(倾角约 30°)和近水平张性裂缝(图3)。

然后,如果水平挤压应力开始减小,由于泊松效应,水平最小主应力也随之减小。当水平最小主应力减小至垂向主应力时($\sigma_1=\sigma_{Hmax}>\sigma_2=\sigma_v>\sigma_3=\sigma_{Hmin}$),地层中的应力状态又转变为走滑型应力机制。随着水平挤压应力的进一步降低,垂向主应力变为最大主应力($\sigma_1=\sigma_v>\sigma_2=\sigma_{Hmax}>\sigma_3=\sigma_{Hmin}$),地层中的应力状态转变为正断层型应力机制(图3)。

异常高压是致密储层裂缝形成的重要驱动力,对致密储层裂缝的形成和分布具有重要影响^[38-40]。当差应力较大时,地层中异常流体压力的存在引起岩石内部的有效应力下降,使应力莫尔圆向左移动,并与破裂包络线相交,从而有利于剪切裂缝的形成(图4)。根据裂缝线密度与地层压力系数统计发现^[15],二者之间具有较好的正相关关系,这说明异常高压的存在使裂缝更容易形成。当差应力较小时,随着孔隙流体压力的不断增加,可以使最小有效主应力由挤压状态变成拉张应力状态,使岩石容易发生拉张破裂,形成超压裂缝,并常被方解石、沥青等充填形成拉张裂缝脉群(图4)。因此,挤压逆冲构造带中的挤压应力状态可

以通过流体介质转变为拉张应力状态,从而可以在挤压应力环境中形成与异常高压有关的拉张裂缝,这就是在挤压逆冲构造带不仅广泛发育剪切裂缝,而且还发育拉张裂缝的主要原因。

裂缝形成时期的古应力大小,决定了裂缝的尺度。构造应力越大,能干性力学层与非能干性力学层的力学性质和厚度差异越大,才能限制裂缝的扩展,此时容易形成大尺度裂缝;构造应力越小,较小的能干性力学层与非能干性力学层的力学性质和厚度差异,即可限制裂缝的扩展,此时容易形成小尺度裂缝。因此,在伸展构造环境下(如中国东部渤海湾盆地),致密储层中主要发育中-高角度穿层剪切裂缝和层内张开裂缝。在构造相对稳定的弱挤压环境下(如中国鄂尔多斯盆地),致密储层中主要发育近垂直穿层剪切裂缝和层内张开裂缝。在强构造挤压环境下(如中国库车和川西前陆盆地),致密储层中主要发育低角度穿层剪切裂缝、顺层剪切裂缝、近水平层理缝和超压裂缝。

4 逆冲断层相关裂缝分布规律

前陆盆地深层-超深层致密储层天然裂缝的形成演化受逆冲断层的控制^[42]。断层往往不是一个简单的离散“平面”,而是岩石多种次级变形类型在空间形成的三维地质体;典型的次级变形包括:次级断层、裂缝、脉体、断层泥、角砾带、断层透镜体和形变较小的断层破碎带^[43]。平面上,裂缝发育程度统计表明:在断层核周围,尤其是断层端部、交叉点以及叠覆区,裂缝密度大、间距小^[44]。断层端部通常是应力应变的集中

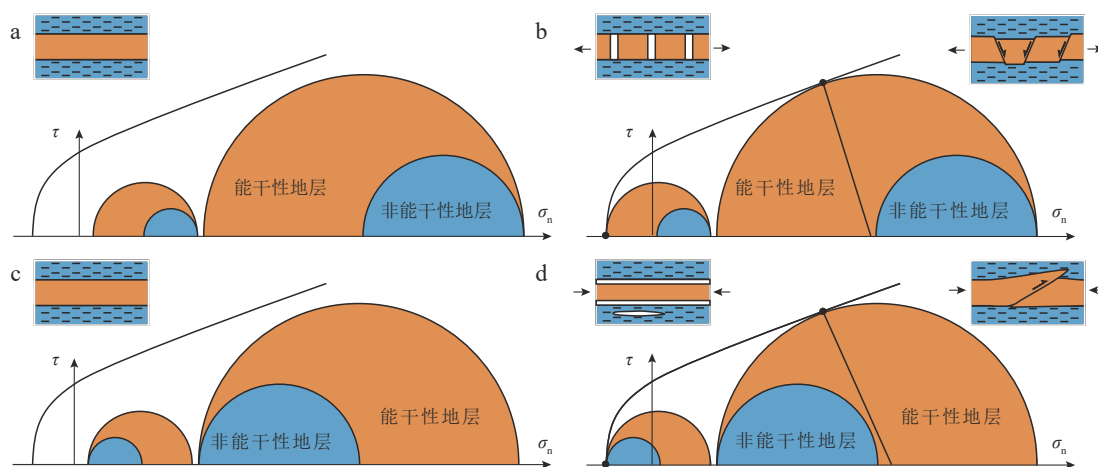


图4 孔隙流体压力促进裂缝形成示意图(据Bons等^[41]修改)

Fig. 4 Schematic diagram showing fracture formation driven by pore-fluid pressure (modified after Bons et al. ^[41])

a. 正断层应力体制下未破裂岩石中的应力状态;b. 超压条件下应力莫尔圆左移,促进张性裂缝(近直立张性裂缝)和剪切裂缝(正断层)形成;c. 逆断层应力体制下未破裂岩石中的应力状态;d. 超压条件下应力莫尔圆左移,促进张性裂缝(近水平)和剪切裂缝(逆断层)形成

τ :剪应力; σ_n :正应力

区,有利于断层相关裂缝的形成,而且不同类型(Ⅲ型和Ⅱ型)断层端部裂缝的发育特征存在显著差异。在Ⅲ型断层端部,可能会形成与主断面大角度斜交的雁列状张裂缝,也可以形成具有共轭特征的同向或反向的剪切裂缝。在Ⅱ型断层端部的伸展侧通常会出现与主断面大角度斜交,具有张性特征的翼裂缝或马尾状构造。在Ⅱ型端部和Ⅲ型端部之间的过渡区,裂缝兼具两类端部裂缝发育特征^[44]。

剖面上,许多断层或断层带的结构可以简化为“二元结构”(图5a),即中部的断层核及其两侧的破碎带^[45-46]。断层核是强变形区,也是裂缝较为发育的区域。断层核形变较大时,表现为断层泥、角砾岩、碎裂岩或超碎裂岩等典型结构,岩石原始结构和早期裂缝会被强烈掩盖或破坏。断层核两侧的破碎带是相对的弱变形区,常见裂缝及其中充填的脉体。大断层的破碎带也可能包含次级断层,它们可具有自己的破碎带。破碎带往往是明显的裂缝发育区,随着与断层距离的增加,裂缝密度会呈幂律递减^[47]。当裂缝密度与区域裂缝密度相一致时,标志着破碎带的结束(图5b)。破碎带宽度与断层位移呈正比,即断层位移越大,其破碎带宽度也越大。但在位移较高时(几百米位移后),破

碎带宽度增长速率降低^[48-49]。另外,根据统计还发现,虽然在断层的上盘和下盘均具有随着距断层距离的增大,裂缝的线密度明显降低的趋势,但是在断层两侧,裂缝发育程度也不一样,整体来说,断层上盘裂缝的发育程度要明显大于下盘裂缝的发育程度,这是因为断层上盘往往是活动盘,应力扰动作用更明显。此外,根据发育的构造部位,断层形态和组合样式将破碎带可进一步划分为围岩破碎带、端部破碎带、转折破碎带、接触破碎带、连接破碎带等(图5c)^[46]。

断层相关褶皱对裂缝的控制作用主要体现在岩层的几何形态对裂缝方位的影响和变形对岩石破裂的控制程度^[50-52]。根据不同构造位置地层变形历史以及裂缝发育特征,断层相关褶皱中主要发育5类裂缝域(A—E)(图6)。A类裂缝域主要发育区域性高角度裂缝,其裂缝分布受古应力场和构造活动期次共同控制,多分布于远离断层相关褶皱的原状地层中。B—E类裂缝域还发育有同褶皱变形相关裂缝。其中,B类裂缝域中主要发育层间滑动型裂缝(通常表现为与层理斜交或顺层的剪切裂缝)和顺层挤压型裂缝(与背斜枢纽或边界断层大角度斜交的高角度剪切裂缝),其次逆断层派生裂缝(以剪切裂缝为主,与断层走向平行或小

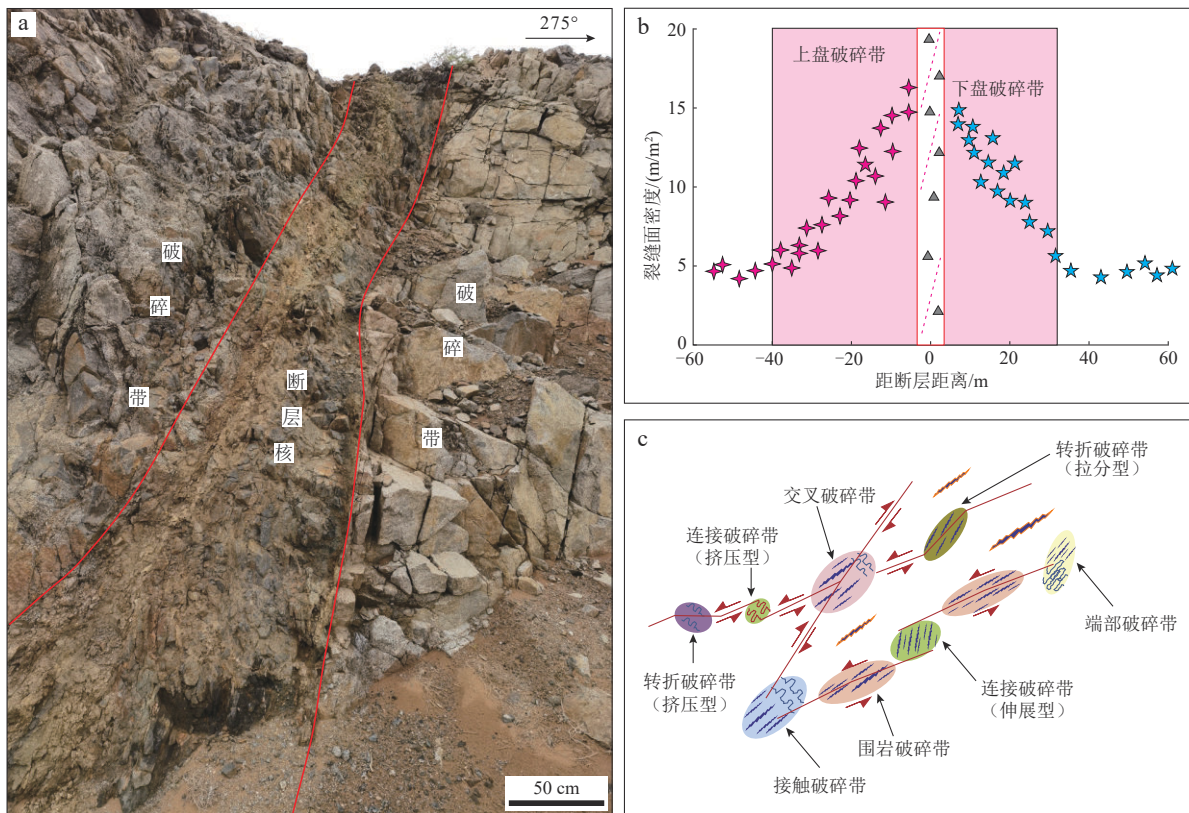


图5 断裂带结构特征及伴生裂缝分布规律

Fig. 5 Structural characteristics of a fault zone and the distribution pattern of associated fractures

a. 断裂带内部结构示意图; b. 断层伴生裂缝系统分布规律; c. 破碎带类型示意图(据毛哲^[42]修改)

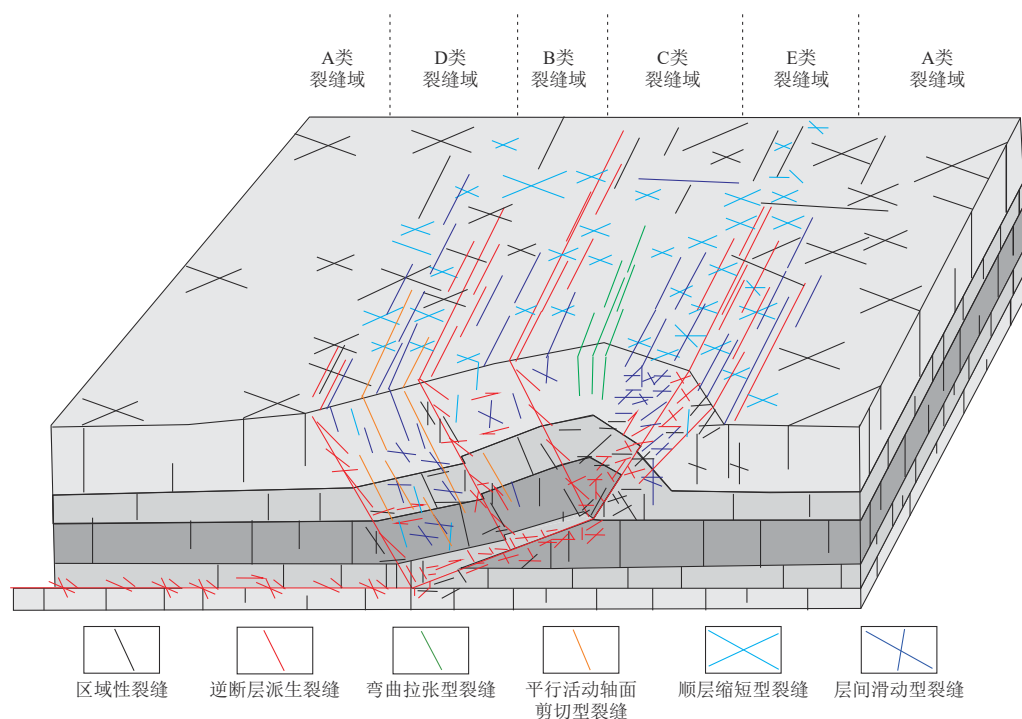


图6 断层传播褶皱的“裂缝域”分布模式(据毛哲^[42]修改)

Fig. 6 Distribution pattern of fracture domains in fault-propagation folds (modified after Mao^[42])

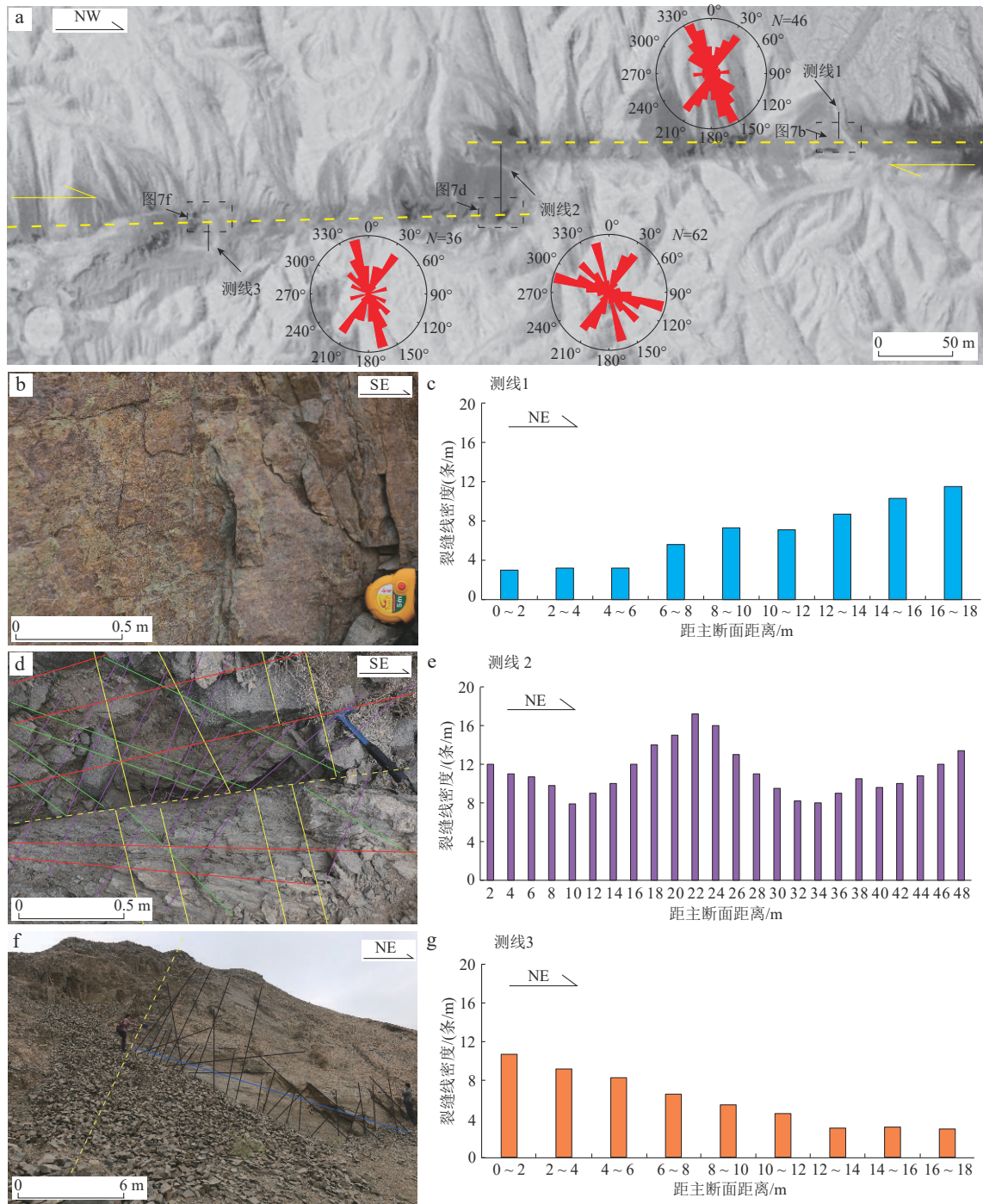
角度斜交),其内部地层未经过活动轴面改造,地层主要发生轻微旋转或破裂变形,主要分布于褶皱后翼和枢纽之间。C类裂缝域主要发育弯曲拉张型裂缝,其次是层间滑动型裂缝和顺层挤压型裂缝,弯曲拉张型裂缝集中分布在转折端等高曲率区域,受塑性滑脱层影响可能具有分层特点。D类裂缝域受断层倾角、塑性地层以及构造挤压强度影响较大,主要分布在褶皱后翼经过下活动轴面的地层中,主要发育平行活动轴面剪切型裂缝、层间滑动型裂缝和顺层挤压型裂缝。当能干层占比较高、构造挤压强烈时,活动轴面平行剪切相关裂缝可进一步发展为后翼的反冲断层,并发育大量逆断层派生裂缝。E类裂缝域同样受断面产状和地层岩性组合影响,分布于褶皱前翼三角剪切区内,主要发育逆断层派生裂缝、层间滑动型裂缝和顺层挤压型裂缝。从A—E类裂缝域,裂缝发育程度整体呈增加的趋势。在构造变形强烈的断层传播褶皱中,C类裂缝域裂缝发育强度可能超过D类和E类裂缝域。

5 走滑断层相关裂缝分布规律

走滑断层是含油气盆地中普遍发育的一种构造类型,对深层-超深层致密储层天然裂缝的发育规律具有明显的控制作用^[42]。在致密储层(尤其是深层-超深层致密碳酸盐岩储层中)走滑断层活动形成的伴生

裂缝是油气等流体运移的主要通道和重要储集空间,控制着优质储层和甜点的分布。近年来,塔里木盆地超深层碳酸盐岩油气勘探实践表明,走滑断层相关的缝洞储层控制了油气的富集规律^[53-54]。露头区裂缝表征证实^[42],走滑断裂带同样具有“二元”核带结构(图7),其断层核内裂缝极其发育,岩石角砾化严重,渗流能力强,同时也极易被马牙状或块状方解石等矿物半充填或全充填。断层破碎带内,随着与主断面距离的增加,裂缝发育程度总体逐渐降低,而次级断层的发育会造成局部裂缝发育程度异常增加。此外,晚期的走滑活动可改造早期被充填的断层核和破碎带,并在断层核内形成新的大规模透镜体和滑动面,使其再次成为流体的优势渗流通道。

走滑断层相关裂缝以剪切裂缝为主,主要包含R、R'、Y和P剪切裂缝,张裂缝(T)发育相对较少,且主要在主断面周围发育。根据露头区和砂箱物理模拟结果来看,R剪切裂缝与T张裂缝最先形成,其次是R'剪切裂缝,P和Y剪切裂缝形成相对较晚。从不同构造位置来看,在纯走滑段,与断面小角度斜交的R剪切裂缝是优势裂缝,裂缝集中在主断面附近。在叠接挤压段,R剪切裂缝、Y剪切裂缝和P剪切裂缝相对发育,裂缝集中分布在边界断层周围,优势裂缝走向与主断面平行或小角度斜交;在次级断层与主断层相交处,走向与主断面大角度斜交的裂缝相对发育。在拉分段内,主

图7 走滑断层相关裂缝分布(据毛哲^[42]修改)Fig. 7 Distribution of fractures associated with strike-slip faults (modified after Mao^[42])

(a图中黄色虚线为走滑断层,黄色箭头为走滑方向;d图中黄色虚线为走滑断层,紫色为早期裂缝,绿色实线表示R剪切裂缝,黄色实线表示R'剪切裂缝,红色实线表示P剪切裂缝;f图中黄色虚线为走滑断层,黑色实线表示裂缝(未分类),蓝色实线为测线3。)

要发育于走滑方向大角度斜交的张裂缝与剪切裂缝。在板内小规模走滑断层中,主位移带在拉分段和边界处最先形成。在张扭性走滑断层中,主位移带形成时间更早,断陷区规模更大,使得断控储层具有更好的连通性。此外,小规模走滑反转,减小了叠接挤压端和转折拉分段的规模,不利于断控储层的形成。

走滑断层的组合样式和主位移带是影响走滑断层伴生裂缝系统发育强度和破碎带宽度的主要因素。走滑断层的叠接段和转折段是裂缝发育强度和破碎带宽度最大的部位,其次是在纯走滑段(图7)。在主位移带形成之前,走滑断层伴生裂缝系统发育强度和破碎带宽度与断距呈线性关系迅速增加,而且叠接段和转折段挤

压区内形成的裂缝密度和破碎带宽度要大于转折拉段拉分区、叠接段拉分区和纯走滑段。随着主位移带的形成,裂缝密度和破碎带宽度增速变缓,并趋于稳定。

6 天然裂缝有效性及演化

天然裂缝对致密储层的贡献大小取决于裂缝的有效性及其演化。在地层围压条件下,天然裂缝处于开启状态或是仍然保留一定的有效空间,能提供流体的储集空间和流体流动的通道是有效裂缝,反之则为无效裂缝^[31, 40]。根据天然裂缝中充填矿物比例,可以将天然裂缝分为完全充填胶结物的脉体和部分充填或未充填的开放式裂缝。完全充填的脉体结构为无效裂缝,部分充填或未充填裂缝为有效裂缝。天然裂缝的有效性决定了天然裂缝对致密储层的贡献和对油气产能力的影响,有效裂缝可以作为致密储层的储集空间和流体流动通道,无效裂缝阻止流体的流动,起到渗漏屏障的作用。

裂缝的有效性主要受裂缝的形成时间、胶结作用、溶蚀作用、后期构造作用、异常高压流体、地应力状态等因素的影响^[40]。致密储层充填裂缝的有效性主要受构造岩作用的控制^[55],尤其是裂缝开启速率和矿物充填速率(裂缝中充填物宽度与充填时间的比值)的竞争关系决定了裂缝的有效性。当裂缝开启速率小于矿物充填速率时,造成裂缝完全充填而丧失有效性;当裂缝开启速率大于矿物充填速率时,在裂缝两壁之间形成局部充填和半充填的裂缝,半充填和局部充填的裂缝对有效应力的变化不敏感,具备抵抗天然裂缝闭合的能力,故

保持一定程度的开度和有效性。单条裂缝的不同部位开度存在显著差异,随着裂缝开度的减小,裂缝充填程度增加,并会形成裂缝充填过渡结构——矿物桥^[55]。裂缝成岩作用,即裂缝和围岩的矿物沉淀和溶解过程决定裂缝中矿物充填速率和充填程度。与同一组开度较大的裂缝相比,开度较小的裂缝充填程度较高。与处于较浅深度的裂缝相比,具有相同成岩作用背景的较深处地层裂缝通常充填程度更高,深度较大区域裂缝成岩作用更为活跃,导致矿物充填速率较大^[32]。在硅质胶结成岩相中,裂缝被石英充填的比例较大,而在方解石胶结相中,裂缝被方解石充填的比例则更大。被石英胶结的裂缝往往是半充填的,自形石英颗粒以桥的形式连接两条裂缝壁或孤立的悬挂在裂缝壁上,剩余大量的裂缝孔隙度。而方解石、石膏等矿物充填的裂缝往往是全充填的,充填矿物以块状或纤维状充满整条裂缝。早期裂缝的充填程度均高于晚期形成的裂缝。裂缝形成甚至是被充填以后,还常会发生溶蚀作用,形成沿裂缝分布的溶蚀孔洞,后期的溶蚀作用越强烈,裂缝的有效性就越好。异常高压和晚期构造抬升剥蚀作用,可以使早期充填裂缝重新破裂,使裂缝的有效性变好^[31]。

致密储层充填的天然裂缝演化会多次出现张开和胶结物沉淀过程,形成裂缝开启-闭合构造,是在力学和成岩作用下裂缝内胶结物沉淀过程中反复破裂作用的产物,记录了裂缝的演化历史。利用高分辨率扫描电镜与阴极发光(CL-SEM)联用系统识别裂缝矿物桥附近的开启-闭合结构(图8),结合矿物切割限制关系和流体包裹体测温,根据裂缝中晶体光学的基本特征

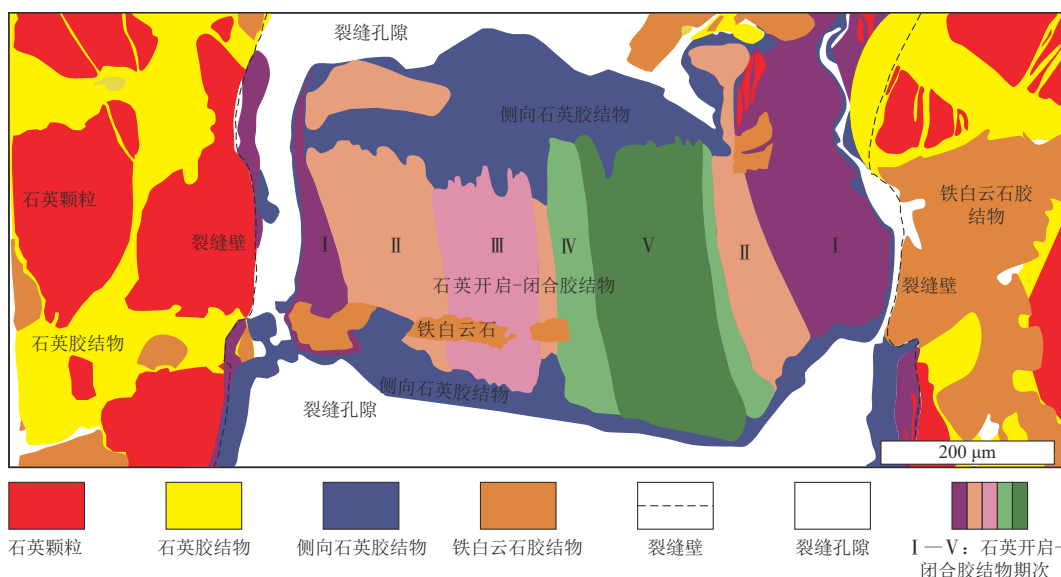


图8 基于CL-SEM观察结果绘制的天然裂缝形成演化过程(据Becker等^[56]修改)

Fig. 8 Formation and evolution map of natural fractures plotted based on observations of scanning electron microscope-cathodoluminescence (SEM-CL) images (modified after Becker et al. ^[56])

和晶体几何学生长方式的数值模拟,能够确定裂缝中石英和白云石晶体的生长模式和内部结构,从而表征裂缝的储集空间^[56]。开启-闭合构造、矿物桥和裂缝孔隙度反映了裂缝生长和胶结物沉淀之间的竞争。矿物桥的形成反映了裂缝张开速率和胶结物积聚速率之间的竞争。绝大多数裂缝从来没有达到超过胶结物沉淀的临界尺寸或开度,因此,裂缝停止生长,变得封闭。沉积物沉淀速率远远落后于裂缝扩展速率时,会形成宽的张开的裂缝,这些裂缝的缝壁上往往会有一层薄的石英、方解石等胶结矿物(图9)。

致密储层无充填裂缝的有效性受裂缝张开度的控制,与地应力关系密切。当裂缝方向与现今最大水平主应力方向近平行,裂缝开度较大,渗透率高,连通性和有效性好;裂缝方向与现今最大水平主应力方向近垂直的裂缝,由于受到垂直于裂缝面的较大的正应力作用,开度较小,渗透率低,连通性和有效性变差^[34]。如果在一个地区的致密储层中发育多组裂缝,平行于现今最大水平主应力方向的天然裂缝通常为致密储层

的主要渗流方向,是致密储层油藏井网布置的主要地质依据。例如,在库车前陆盆地北部克拉苏构造带的巴什基奇克组致密砂岩储层中,发育有近南北向、北西-南东向、北东-南西向和近东西向4组裂缝^[33],在近南北向现今最大主应力作用下,近南北向裂缝有效性最好,渗透率平均为 $145.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其次为北西-南东向和北东-南西向裂缝,其渗透率分别为 $110.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $112.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而与现今最大主应力垂直的近东西向裂缝最小,渗透率仅为 $43.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。对于半充填的裂缝来说,即使裂缝不平行于现今地应力最大主应力方向,充填的矿物可以起到支撑作用,保持裂缝处于开启状态,可以作为重要的渗流通道。不同倾角的裂缝有效性存在差异,高角度裂缝的有效性好于低角度裂缝。

7 结 论

1) 深层-超深层致密储层天然裂缝具有多尺度性。不同尺度裂缝分布具有幂律分布的特点,裂缝尺

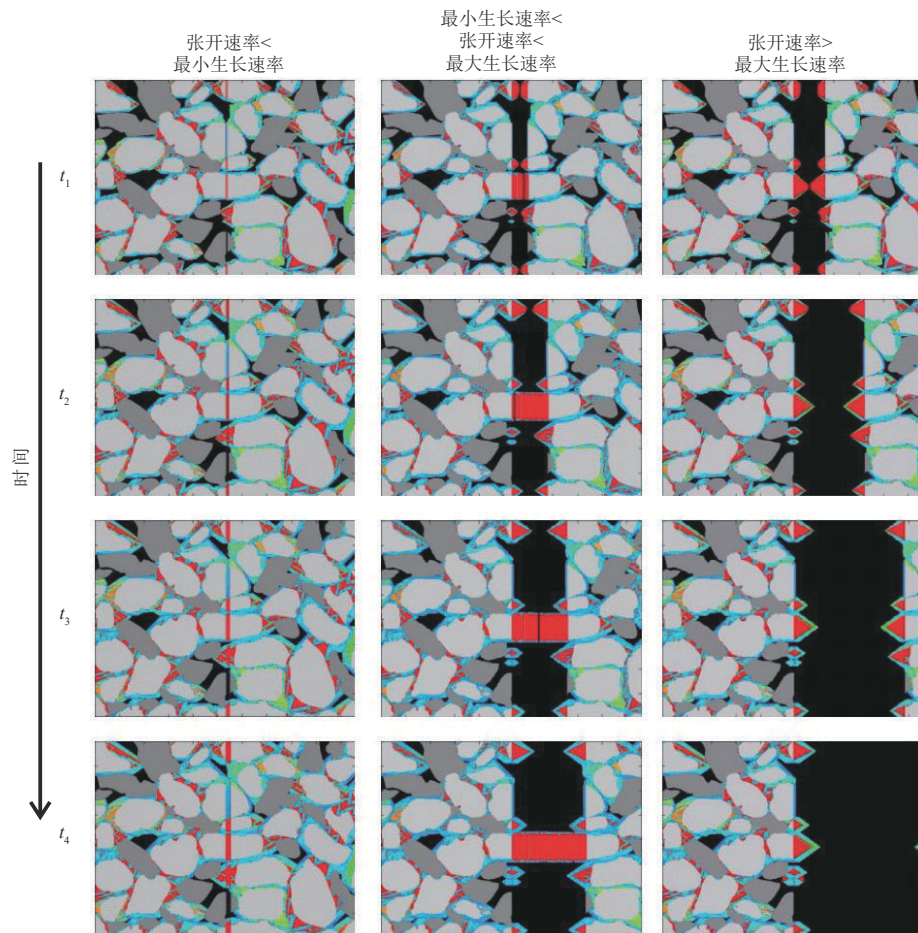


图9 数值模拟获得的裂缝张开速率与晶体生长速率关系示意图(据 Lander 和 Laubach^[57]修改)

Fig. 9 Schematic diagram showing the ratios of fracture opening rate to crystal growth rate obtained through numerical simulations (modified after Lander and Laubach^[57])

度越大,数量越少;裂缝尺度越小,数量越多。大、中尺度裂缝主要起渗流作用,小尺度裂缝起渗流和储集作用,而微-纳米尺度裂缝主要起储集作用。

2) 不同时期的古应力状态控制了裂缝的演化。应力体系演化决定了不同盆地类型和不同时期天然裂缝的类型和产状。构造应力大小、力学层性质差异和非能干性地层厚度控制了天然裂缝的多尺度性。异常高压是致密储层裂缝形成的重要驱动力,它促进了剪切裂缝和超压裂缝的形成。

3) 断层是控制致密储层裂缝分布的重要因素。断裂带具有“二元”核带结构,即断层核和破碎带。破碎带是裂缝密集发育带,随着与断层距离的增加,裂缝密度会呈幂律递减。破碎带宽度与断层位移呈正比。不同类型破碎带(裂缝域)的裂缝性质、类型、发育强度和破碎带宽度具有很大差异,取决于断层的力学性质、形态和组合样式等因素。

4) 裂缝的有效性主要受裂缝的形成时间、胶结作用、溶蚀作用、后期构造作用、异常高压流体、地应力状态等因素的综合影响。构造成岩作用的决定了裂缝的充填程度,现今地应力状态和裂缝产状控制了裂缝的开启性。

参 考 文 献

- [1] 汪如军, 赵力彬, 张永灵. 基于最小耗能原理的库车坳陷超深致密砂岩裂缝定量预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 23-35.
WANG Rujun, ZHAO Libin, ZHANG Yongling. Quantitative fracture prediction of ultra-deep tight sandstone in Kuqa Depression based on principle of minimum energy consumption [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 23-35.
- [2] 杨斌, 张浩, 刘其明, 等. 超深层裂缝性碳酸盐岩力学特性及其主控机制[J]. 天然气工业, 2021, 41(7): 107-114.
YANG Bin, ZHANG Hao, LIU Qiming, et al. Mechanical property and main control mechanism of ultra-deep fractured carbonate rocks[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(7): 107-114.
- [3] 张月, 韩登林, 杨铨晔, 等. 超深层碎屑岩储层裂缝充填流体迁移规律——以库车坳陷克深井区白垩系巴什基奇克组为例[J]. 石油学报, 2020, 41(3): 292-300.
ZHANG Yue, HAN Denglin, YANG Chengye, et al. Migration law of fracture filling fluid in ultra-deep clastic reservoirs: A case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen well block, Kuqa Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(3): 292-300.
- [4] 高帅, 巩磊, 刘小波, 等. 松辽盆地北部深层致密火山岩气藏天然裂缝分布特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 503-512.
GAO Shuai, GONG Lei, LIU Xiaobo, et al. Distribution and controlling factors of natural fractures in deep tight volcanic gas reservoirs in Xujiaweizi area, northern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 503-512.
- [5] 吕文雅, 曾联波, 陈双全, 等. 致密低渗透砂岩储层多尺度天然裂缝表征方法[J]. 地质论评, 2021, 67(2): 543-556.
LYU Wenya, ZENG Lianbo, CHEN Shuangquan, et al. Characterization methods of multi-scale natural fractures in tight and low-permeability sandstone reservoirs [J]. Geological Review, 2021, 67(2): 543-556.
- [6] 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.
- [7] 巩磊, 程宇琪, 高帅, 等. 库车前陆盆地东部下侏罗统致密砂岩储层裂缝连通性表征及其主控因素[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2475-2488.
GONG Lei, CHENG Yuqi, GAO Shuai, et al. Fracture connectivity characterization and its controlling factors in Lower Jurassic tight sandstone reservoirs of eastern Kuqa foreland basin [J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2475-2488.
- [8] GONG Lei, LIU Kouqi, JU Wei. Editorial: Advances in the study of natural fractures in deep and unconventional reservoirs [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1096643.
- [9] LIU Guoping, ZENG Lianbo, ZHU Rukai, et al. Effective fractures and their contribution to the reservoirs in deep tight sandstones in the Kuqa Depression, Tarim Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 124: 104824.
- [10] ZENG Lianbo, SU Hui, TANG Xiaomei, et al. Fractured tight sandstone oil and gas reservoirs: A new play type in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(3): 363-377.
- [11] GONG Lei, LIU Bo, FU Xiaofei, et al. Quantitative prediction of sub-seismic faults and their impact on waterflood performance: Bozhong 34 oilfield case study [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 172: 60-69.
- [12] LOHR T, KRAWCZYK C M, TANNER D C, et al. Prediction of subseismic faults and fractures: Integration of three-dimensional seismic data, three-dimensional retrodeformation, and well data on an example of deformation around an inverted fault [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(4): 473-485.
- [13] GALE J F W, LAUBACH S E, OLSON J E, et al. Natural fractures in shale: A review and new observations [J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(11): 2165-2216.
- [14] FU Yingkun, DEHGHANPOUR H. How far can hydraulic fractures go? A comparative analysis of water flowback, tracer, and microseismic data from the Horn River Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 115: 104259.
- [15] 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.
- [16] LEE H P, OLSON J E, SCHULTZ R A. Interaction analysis of propagating opening mode fractures with veins using the Discrete Element Method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 103: 275-288.
- [17] ZENG Lianbo, GONG Lei, GUAN Cong, et al. Natural fractures and their contribution to tight gas conglomerate reservoirs: A case study in the northwestern Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210: 110028.
- [18] 宿晓岑, 巩磊, 付晓飞, 等. 鄂尔多斯盆地三边地区延长组7段致密砂岩储层裂缝分布特征及有效性评价[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2601-2613.
- SU Xiaocen, GONG Lei, FU Xiaofei, et al. Fracture distribution characteristics and effectiveness evaluation of tight sandstone reservoir of Chang 7 member in Sanbian area, Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2601-2613.
- [19] LYU Wenya, ZENG Lianbo, ZHOU Sibin, et al. Natural fractures in tight-oil sandstones: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(10): 2343-2367.
- [20] 吴安彬, 罗群, 代兵, 等. 海相高演化页岩裂缝方解石脉成因机制及指示意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3): 25-35.
- WU Anbin, LUO Qun, DAI Bing, et al. Genetic mechanism and indicative significance of fracture calcite veins in marine high-evolution shale[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(3): 25-35.
- [21] 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.
- [22] 吕文雅, 苗凤彬, 张本键, 等. 四川盆地剑阁地区须家河组致密砾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.
- [23] 巩磊, 曾联波, 李娟, 等. 南襄盆地安棚浅、中层系特低渗储层裂缝特征及其与深层系裂缝对比[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(5): 778-784.
- GONG Lei, ZENG Lianbo, LI Juan, et al. Features of fractures in shallow-to mid-depth reservoirs with ultra-low permeability and their comparison with those in deep reservoirs in Anpeng oilfield, the Nanxiang Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(5): 778-784.
- [24] 赵向原, 游瑜春, 胡向阳, 等. 基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”建模方法——以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 213-225.
- ZHAO Xiangyuan, YOU Yuchun, HU Xiangyang, et al. Classified-staged-grouped 3D modeling of multi-scale fractures constrained by genetic mechanisms and main controlling factors: A case study on biohermal carbonate reservoir of the Upper Permian Changxing Fm. in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 213-225.
- [25] 司学强, 彭博, 庞志超, 等. 储集层多尺度裂缝特征及控制因素——以准噶尔盆地南缘侏罗系—白垩系为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(4): 731-741.
- SI Xueqiang, PENG Bo, PANG Zhichao, et al. Characteristics and controlling factors of multi-scale fractures in reservoir: A Jurassic-Cretaceous case from the southern margin of Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(4): 731-741.
- [26] 刘俊州, 韩磊, 时磊, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术——以川西XC地区为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 747-754.
- LIU Junzhou, HAN Lei, SHI Lei, et al. Seismic prediction of tight sandstone reservoir fractures in XC area, western Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 747-754.
- [27] 董少群, 吕文雅, 夏东领, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝三维地质建模方法[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 627-637.
- DONG Shaoqun, LYU Wenya, XIA Dongling, et al. An approach to 3D geological modeling of multi-scaled fractures in tight sandstone reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 627-637.
- [28] JU Wei, ZHONG Yu, LIANG Yan, et al. Factors influencing fault-propagation folding in the Kuqa Depression: Insights from geomechanical models[J]. *Journal of Structural Geology*, 2023, 168: 104826.
- [29] HANSBERRY R L, KING R C, HOLFORD S P, et al. How wide is a fault damage zone? Using network topology to examine how fault-damage zones overprint regional fracture networks[J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 146: 104327.
- [30] LAO Haigang, WANG Yongshi, MENG Ningning, et al. Architectural characteristics and evolution sequences of different types of faults in extensional basins—evidence collected from cores in the Dongying Depression[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 132: 105199.
- [31] ZENG Lianbo, TANG Xiaomei, WANG Tiecheng, et al. The influence of fracture cements in tight Paleogene saline lacustrine carbonate reservoirs, western Qaidam Basin, northwest China[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(11): 2003-2017.
- [32] LAUBACH S E, LANDER R H, CRISCENTI L J, et al. The role of chemistry in fracture pattern development and opportunities to advance interpretations of geological materials[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 1065-1111.
- [33] 巩磊, 曾联波, 杜宜静, 等. 构造成岩作用对裂缝有效性的影响——以库车前陆盆地白垩系致密砂岩储层为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(3): 514-519.
- GONG Lei, ZENG Lianbo, DU Yijing, et al. Influences 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 & Technology*, 2015, 44 (3): 514–519.
- [34] MI Lijun, FAN Hongjun, FAN Tinggen, et al. Development characteristics of multi-scale fracture network systems in metamorphic buried hills [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1108032.
- [35] 徐翔. 四川盆地东南部海相页岩多尺度裂缝及对含气性影响研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- XU Xiang. Research on multi-scale fractures and their influences on gas-bearing properties in marine shales in the southeastern Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [36] FERRILL D A, SMART K J, CAWOOD A J, et al. The fold-thrust belt stress cycle: Superposition of normal, strike-slip, and thrust faulting deformation regimes [J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 148: 104362.
- [37] 鞠玮, 牛小兵, 冯胜斌, 等. 页岩油储层现今地应力场与裂缝有效性评价——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例 [J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(5): 931–940.
- JU Wei, NIU Xiaobing, FENG Shengbin, et al. The present-day in-situ stress state and fracture effectiveness evaluation in shale oil reservoir: A case study of the Yanchang Formation Chang 7 oil-bearing layer in the Ordos Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(5): 931–940.
- [38] 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.
- [39] FU Xiaofei, GONG Lei, SU Xiaocen, et al. Characteristics and controlling factors of natural fractures in continental tight-oil shale reservoir [J]. *Minerals*, 2022, 12(12): 1616.
- [40] GONG Lei, WANG Jie, GAO Shuai, et al. Characterization, controlling factors and evolution of fracture effectiveness in shale oil reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 203: 108655.
- [41] BONIS P D, ELBURG M A, GOMEZ-RIVAS E. A review of the formation of tectonic veins and their microstructures [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 43: 33–62.
- [42] 毛哲. 塔里木盆地北部逆冲构造和走滑构造相关裂缝发育模式 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- MAO Zhe. Development model of fractures related to thrust and strike-slip structures in the northern Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.
- [43] PEACOCK D C P, DIMMEN V, ROTEVATN A, et al. A broader classification of damage zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2017, 102: 179–192.
- [44] KIM Y S, PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Fault damage zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(3): 503–517.
- [45] KIM Y S, SANDERSON D J. The relationship between displacement and length of faults: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68(3/4): 317–334.
- [46] PEACOCK D C P, SANDERSON D J, ROTEVATN A. Relationships between fractures [J]. *Journal of Structural Geology*, 2018, 106: 41–53.
- [47] JOHRI M, DUNHAM E M, ZOBACK M D, et al. Predicting fault damage zones by modeling dynamic rupture propagation and comparison with field observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(2): 1251–1272.
- [48] CHOI J H, EDWARDS P, KO K, et al. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 152: 70–87.
- [49] FAULKNER D R, JACKSON C A L, LUNN R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(11): 1557–1575.
- [50] 祖克威, 曾联波, 巩磊. 断层相关褶皱概念模型中的裂缝域 [J]. *地质科学*, 2013, 48(4): 1140–1147.
- ZU Kewei, ZENG Lianbo, GONG Lei. Fractures domains in conceptual models of fault-related folds [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(4): 1140–1147.
- [51] MAO Zhe, ZENG Lianbo, LIU Guangdi, et al. Controls of fault-bend fold on natural fractures: Insight from discrete element simulation and outcrops in the southern margin of the Junggar Basin, Western China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 138: 105541.
- [52] 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.
- [53] 冯军. 走滑断层形成演化主控因素物理模拟研究及应用 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- FENG Jun. Physical analog modeling of main controlling factors of Strike-Slip fault formation and evolution and its application [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.
- [54] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力 [J]. *石油学报*, 2019, 40(11): 1296–1310.
- HAN Jianfa, SU Zhou, CHEN Lixin, et al. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11): 1296–1310.
- [55] LAUBACH S E, EICHHUBL P, HILGERS C, et al. Structural diagenesis [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32 (12): 1866–1872.
- [56] BECKER S P, EICHHUBL P, LAUBACH S E, et al. A 48 m. y. history of fracture opening, temperature, and fluid pressure: Cretaceous Travis Peak Formation, East Texas Basin [J]. *GSA Bulletin*, 2010, 122(7/8): 1081–1093.
- [57] LANDER R H, LAUBACH S E. Insights into rates of fracture growth and sealing from a model for quartz cementation in fractured sandstones [J]. *GSA Bulletin*, 2015, 127(3/4): 516–538.

(编辑 张亚雄)