

DOI:10.12017/dzjx.2022.004

鄂尔多斯盆地南部延长组长7油组页岩层系天然裂缝发育特征及主控因素*

李彦录^{1,2} 陆诗磊¹ 夏东领³ 吕文雅¹梁丰¹ 唐磊¹ 李睿琦¹ 王磊飞²

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249; 2. 中国石油长庆油田分公司 西安 710018;

3. 中国石化石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要 利用地表露头、岩心、薄片和测井资料,对鄂尔多斯盆地南部长7油层组陆相页岩层系天然裂缝的成因类型、发育特征和主控因素进行研究。按地质成因,鄂尔多斯盆地南部长7油层组页岩层系的天然裂缝可以分为构造裂缝和成岩裂缝两大类,其中构造裂缝主要包括剪切裂缝和张性裂缝;成岩裂缝主要包括层理缝、页理缝和收缩裂缝。不同岩性中的天然裂缝发育情况明显不同,致密砂岩中以构造裂缝为主,层理缝仅在粉砂岩和局部细砂岩中发育;页岩和凝灰岩中页理缝、层理缝和构造裂缝均比较发育。不同类型的天然裂缝主控因素明显不同,构造裂缝的发育主要受岩性和岩石力学层层厚控制;砂岩中层理缝的发育主要受碳质纹层、粘土矿物转化程度等因素控制;凝灰岩中层理缝的发育主要受刚性玻璃脱玻化作用的控制;页岩中页理缝的发育主要受纹层、TOC含量和黄铁矿含量的控制。

关键词 天然裂缝 发育特征 主控因素 页岩油 长7油层组 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 0563-5020(2022)01-073-15

页岩油是目前国内外油气勘探开发的潜在热点领域(邹才能等, 2013)。据美国能源信息署(EIA)(Nikkinen and Rothovius, 2019)评估,全球页岩油可采地质储量达469亿吨,我国中生代陆相页岩处于生油高峰或生气高峰初期,地质条件较为优越,有望成为页岩油勘探开发的新领域,初步预测可采页岩油资源量约为 44.8×10^8 t(邹才能等, 2013; Jussi and Timo, 2019)。和常规油气相比,页岩油气生、储同源,其优质储层分布是页岩油气富集的关键地质因素。天然裂缝是页岩油气储层的重要储集空间和主要渗流通道(高金栋等, 2018),影响页岩储层质量以及页岩油气的富集和单井产能(朱如凯等, 2019)。因此,开展页岩天然裂缝研究,对指导页岩油气勘探与开发具有重要意义。

* 国家科技重大专项(编号: 2017ZX05049006-001)、国家自然科学基金项目(编号: 42002135)、中石油战略合作科技专项(编号: ZLZX2020-02)和中国石油大学(北京)拔尖人才科研启动基金项目(编号: 2462017YJRC057)资助。

李彦录,男,1981年生,博士研究生,资源与环境专业。E-mail: lylu01_cq@petrochina.com.cn

吕文雅,女,1990年生,博士,副教授,地质资源与地质工程专业。本文通讯作者。E-mail: wylwenwen@163.com
2021-08-12收稿,2021-10-17改回。

目前,国内外学者对致密低渗透砂岩储层天然裂缝的形成机理和主控因素开展了大量研究(Laubach et al., 2004; 周新桂等, 2006; 曾联波等, 2007; 周文等, 2008; Zeng and Li, 2009; 戴俊生等, 2011; 鞠玮等, 2014; 丁文龙等, 2015; Fall et al., 2015; 巩磊等, 2018; Lü et al., 2019; 吕文雅等, 2020),但对页岩天然裂缝的研究相对较薄弱(Gong et al., 2021)。与海相页岩储层相比,陆相页岩储层单层厚度薄、互层频繁、平面展布小,非均质性强(琚宜文等, 2016)。目前页岩天然裂缝的研究主要是针对海相页岩的构造裂缝,而对陆相页岩的天然裂缝研究,尤其是页理缝的成因及其分布规律研究尚处探索阶段(吴志均等, 2003; 丁文龙等, 2011, 2012; 黄金亮等, 2016),制约了对页岩天然裂缝发育规律的深入认识。因此,深入研究陆相页岩天然裂缝的分布特征,对陆相页岩油勘探开发具有重要指导作用。

鄂尔多斯盆地延长组长7页岩油资源丰富,为典型的陆相页岩储层(杨华等, 2013)。前人对鄂尔多斯盆地长7油层组的裂缝发育特征进行了初步研究,认为长7油层组富有机质页岩中构造裂缝以高角度剪切裂缝为主(唐小梅等, 2012),大多被方解石充填(王芮等, 2014),剪切裂缝既可与水平裂缝和低角度裂缝以及纹层界面构成裂缝网络,也可从页岩段贯穿至砂岩段(耳闯等, 2016)。目前对长7页岩层系天然裂缝的发育特征和主控因素的研究尚不够深入,需开展进一步研究。

本文以鄂尔多斯盆地南部泾河和洛河区块为例(图1),利用地表露头、岩心、薄片、电镜和测井等资料,对长7油层组页岩层系天然裂缝的成因类型、分布特征及其主控因素进行分析,对深入认识陆相页岩天然裂缝的分布规律具有指导意义。

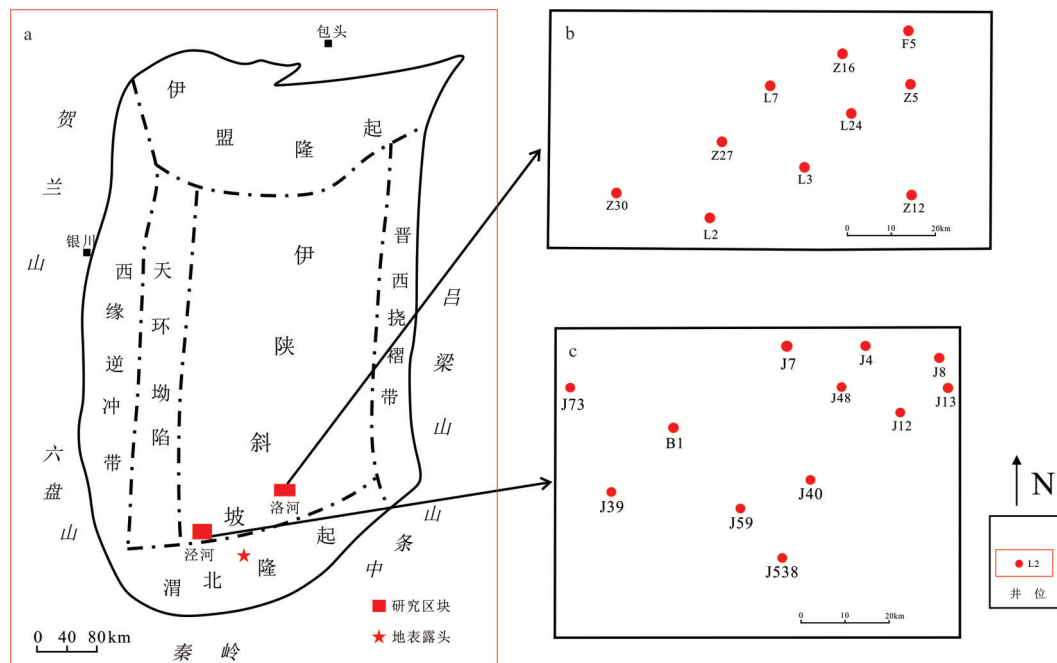


图1 鄂尔多斯盆地构造单元、研究区及井位图

Fig. 1 The maps of tectonic unit, study area and well location in the Ordos Basin

1 地质概况

鄂尔多斯盆地面积约 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是我国第二大含油气沉积盆地，包括渭北隆起、伊盟隆起、天环凹陷、伊陕斜坡、西缘前陆冲断带及晋西挠褶带等6个次级构造单元(杨华等, 2006)，其中研究区位于伊陕斜坡南部的洛河和泾河地区。鄂尔多斯盆地南部构造简单，为西倾单斜构造，地层倾角小于 1° ，坡降 7 m/km 左右，断层和褶皱不太发育(李德生, 2004)。

上三叠统延长组是鄂尔多斯盆地的主要含油层系，延长组从上到下共分为长1~长10共10个油层组(图2)，经历了湖盆的形成、发育、扩张、萎缩，乃至消亡的演化全过程(杨俊杰, 2002)。其中长7油层组是湖盆发育到鼎盛时期沉积的烃源岩层，主要发育湖泊辫状河三角洲—湖相沉积体系，具有自生自储的特点(杨华等, 2010)。长7地层总厚度 $90 \sim 170 \text{ m}$ ，自上而下可分为长7₁、长7₂、长7₃小层，每层厚度 $30 \sim 60 \text{ m}$ ，其中

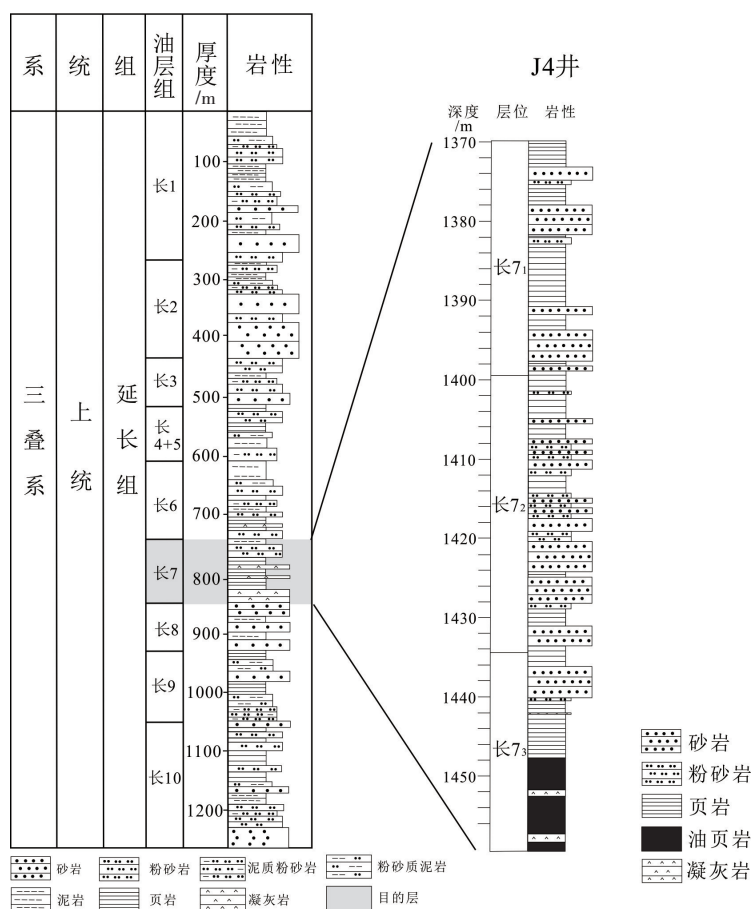


图2 鄂尔多斯盆地南部延长组地层柱状图及J4井岩性柱状图

(据 Li et al., 2020; Lu et al., 2021 修改)

Fig. 2 Stratigraphic histogram of Yanchang Formation and lithologic histogram of well J4 in the southern Ordos Basin (modified from Li et al., 2020; Lu et al., 2021)

长 7_3 是主要页岩目的层段,为半深湖相沉积,发育有著名的“张家滩”页岩。长 7_3 主要沉积粒径小于 $62.5\ \mu\text{m}$ 的细粒沉积物,发育页岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、致密细砂岩以及凝灰岩等岩性(图2; Li et al., 2020; Lu et al., 2021),具有低孔、低渗的特点,页岩和凝灰岩中纹层发育(邱欣卫等, 2009)。由于沉积环境变换快,上述细粒沉积物频繁交互沉积,形成了复杂的岩性组合。

2 天然裂缝的成因类型与特征

天然裂缝是指由于构造变形作用或物理成岩作用形成的、在储层岩石中天然存在的不连续面(Nelson, 1985)。按照地质成因,鄂尔多斯盆地南部地区长7油层组页岩层系天然裂缝可以分为构造裂缝和成岩裂缝两大类(曾联波, 2008),其中构造裂缝主要发育有剪切裂缝和张性裂缝两种类型;成岩裂缝主要发育有层理缝、页理缝和收缩裂缝3种类型。在砂岩、凝灰岩和页岩中,天然裂缝类型及发育特征存在明显的差异。

2.1 构造裂缝

构造裂缝是指由于构造应力作用而形成的天然裂缝(Nelson, 1985; 曾联波, 2008),在长7油层组的页岩和砂岩夹层中广泛发育。按照力学性质,长7油层组构造裂缝又可分为剪切裂缝和张性裂缝,以剪切裂缝为主(曾联波, 2008)。按照剪切裂缝的倾角,又可以进一步分为高角度剪切裂缝和低角度剪切裂缝两类。

(1) 剪切裂缝

1) 高角度剪切裂缝

高角度剪切裂缝是长7页岩层系中最发育的一种天然裂缝类型,在研究区主要表现为倾角大于 80° 的剪切裂缝,在不同岩性中广泛发育,与鄂尔多斯盆地自印支期以来受到多期水平挤压构造应力作用有关(曾联波等, 2007)。高角度剪切裂缝大多数垂直于岩层面发育,形态平直,产状稳定,常具有擦痕等缝面特征(图3a~图3d)。根据岩心、野外剖面(图4)和成像测井(图5)资料,长7油层组主要发育有近E-W向、NW-SW向、近N-S向和NW-SE向4组高角度剪切裂缝,其中NE-SW向和近E-W向裂缝最发育,且裂缝的有效性好,而近N-S向和NW-SE向裂缝的发育程度相对较差(图6)。

根据地表露头、岩心和薄片上高角度剪切裂缝的相互切割关系,并结合裂缝充填物的包裹体分析和区域构造应力场分布特征,得出高角度剪切裂缝主要在燕山期和喜马拉雅期形成(曾联波等, 2007; 高帅等, 2015; Gong et al., 2019; 宿晓岑等, 2021)。燕山期在NWW-SEE向水平构造挤压应力作用下,形成了近E-W向和NW-SE向两组高角度剪切裂缝;喜马拉雅期在NNE-SSW向水平构造挤压应力作用下,形成了NE-SW和近N-S向两组高角度剪切裂缝。

2) 低角度剪切裂缝

低角度剪切裂缝主要表现为滑脱裂缝。滑脱裂缝受控于挤压构造应力,在应力作用下,由近水平的剪切作用形成(曾联波, 2008)。滑脱裂缝的缝面光滑,大部分滑脱裂缝缝面可以观察到摩擦镜面,这类裂缝基本上无充填(图3e)。不同岩性下的滑脱裂缝其发育特征略有不同。粉砂岩中的滑脱裂缝倾角相对较大,大多数倾角在 20° 以上;



图3 鄂尔多斯盆地南部长7油层组不同岩性中的构造裂缝

- a. 高角度剪切裂缝, J12井, 细砂岩, 1 274.17 ~ 1 275.32 m; b. 高角度剪切裂缝, J8井, 粉砂岩, 1 213.54 ~ 1 213.69 m; c. 高角度剪切裂缝, B1井, 凝灰岩, 1 445.86 ~ 1 446.02 m; d. 高角度剪切裂缝, L2井, 页岩, 943.09 ~ 943.24 m; e. 低角度剪切裂缝, L2井, 页岩, 927.63 ~ 927.67 m; f. 拉张裂缝, J4井, 粉砂岩, 1 448.46 ~ 1 448.62 m (井位如图1b和图1c所示)

Fig. 3 Tectonic fractures in different lithologies of Chang 7 oil formation in the southern Ordos Basin (see Fig.1b and Fig.1c for well locations)

页岩中滑脱裂缝的倾角相对较小, 大多数倾角在 20° 以内, 其发育程度通常与页理缝有良好的伴生关系。

剪切裂缝的产状和规模在不同岩性中不完全相同。在细砂岩中, 主要发育高角度剪切裂缝, 且剪切裂缝倾角主要在 80° 以上, 而低角度剪切裂缝不发育; 这类岩性的剪切裂缝规模相对较大, 裂缝延伸较远, 裂缝延伸高度一般在 $30 \sim 70$ cm, 最大可达 1 m以上。在粉砂岩和凝灰岩中, 除了发育高角度剪切裂缝以外, 还发育一类倾角为 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的中低角度剪切裂缝; 这两类岩性中的剪切裂缝规模明显变小, 裂缝的延伸高度一般为 $10 \sim 20$ cm。在页岩中, 除了发育高角度剪切裂缝以外, 同样还发育低角度剪切裂缝, 而且剪切裂缝的倾角和延伸高度更小; 这类岩性中的低角度剪切裂缝主要是倾角小于 20° 的顺层滑脱裂缝, 裂缝高度均在 10 cm以内, 裂缝面上擦痕甚至阶步特征明显。

(2) 张性裂缝

张性裂缝包括拉张裂缝和扩张裂缝。扩张裂缝是岩石在挤压应力作用下垂直于最小主应力方向发生相对扩张而形成的裂缝，它通常和剪切裂缝共生；而拉张裂缝的形成至少需要最小主应力是张应力(Zeng et al., 2016)。由于研究区断层与褶皱不发育，拉张裂缝的形成与研究区生排烃时期的异常流体超压作用有关。扩张裂缝的规模相对较大，延伸较远；而拉张裂缝规模小、延伸较短，通常呈中间宽两端变窄的透镜状分布(图3f)。研究区张性裂缝普遍发育程度较差，仅在个别井局部粉砂岩中观察到，通常被方解石等矿物充填。由于张性裂缝高度小、连通性差，而且大部分被矿物充填，其对油气储集和渗流的意义较小。

2.2 成岩裂缝

成岩裂缝是指储层在沉积和成岩过程中由于压实压溶等地质作用产生的天然裂缝(曾联波, 2008)。不同岩性中成岩裂缝类型也不完全相同，砂岩中的成岩裂缝主要为层理缝，而页岩中的成岩裂缝主要包括页理缝和收缩裂缝。

(1) 层理缝

层理是砂岩中的力学薄弱面(鞠玮等, 2020)，在成岩过程中，由于压实压溶等地质作用，沿砂岩的层理面形成的裂缝，称之为层理缝(曾联波, 2008)。宏观上，层理缝沿部分层理分布，平行于层理的方向，具有断续、弯折、分叉等现象。在不同岩性中，层理缝的形态、分布特征、开度以及成因并不完全相同。研究区层理缝在细砂岩中分布较为局限，主要在粉砂岩和凝灰岩中大量发育。层理缝的地下开度一般小于 $60\ \mu\text{m}$ ，主要分布在 $30\ \mu\text{m}$ 内，层理缝密度为数条/m至数十条/m，对油气储



图4 鄂尔多斯盆地南部旬邑露头长7油层组页岩高角度构造裂缝

Fig. 4 High-dip angle tectonic fractures in shales of Chang 7 oil formation in Xunyi outcrop in the southern Ordos Basin

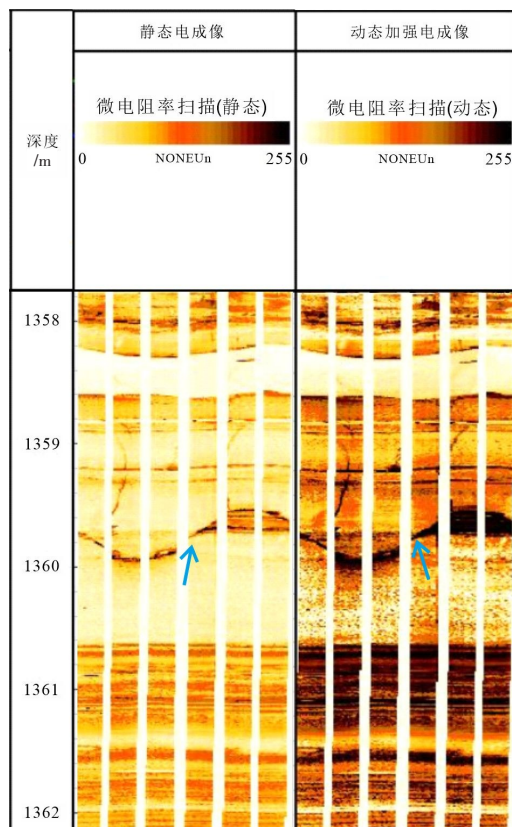


图5 J13井成像测井中的构造裂缝(井位图如图1c所示，箭头指示裂缝)

Fig. 5 Tectonic fractures in image logs of well J13 (see Fig.1c for well location, the arrows indicate fractures)

集和渗流具有重要意义。

细砂岩中的层理缝通常与矿物的定向排列方向一致，其开度变化较大，很少有矿物充填，在岩心上可见原油沿层理缝渗出(图7a)。根据镜下观察，层理缝主要在粘土和有机质含量相对较高的细砂岩中局部发育，尤其是胶结方式多为基底式或孔隙式胶结的杂砂岩。矿物存在微弱的定向排列，填隙物类型以粘土为主，层理缝只发育在粘土杂基和胶结物处，绕开了所有矿物颗粒，缝面弯曲不平，呈张性裂缝的特点，开度最大可达几百微米，部分层理缝有明显的溶蚀现象(图7b)，其有效性好。层理缝主要在成岩过程中由于压实压溶等地质作用形成，但后期的构造抬升剥蚀通常使这些层理缝发生横向扩展和延

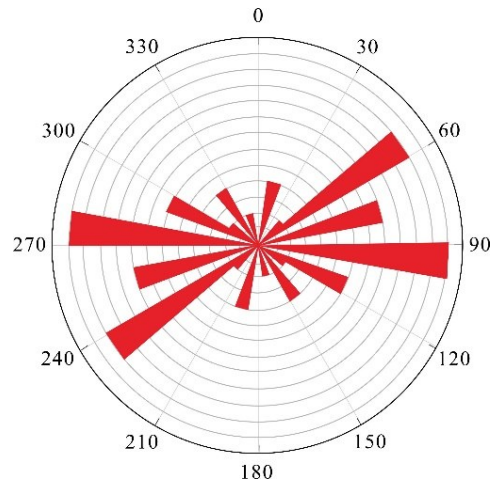


图6 鄂尔多斯盆地南部长7油层组裂缝走向玫瑰花图(据成像测井, $N = 34$)

Fig. 6 Rose map of fracture strike in Chang 7 oil formation in the southern Ordos Basin (obtained from image logs, $N = 34$)

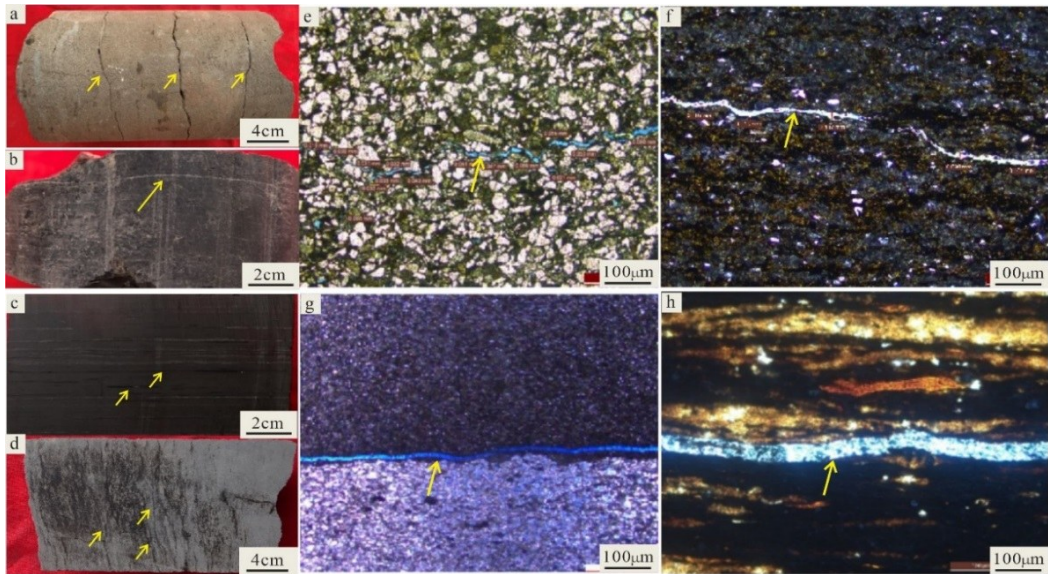


图7 鄂尔多斯盆地南部长7油层组不同岩性中的层理缝和页理缝照片

a. 岩心上细砂岩层理缝, J7井, 1 394.72 ~ 1 394.86 m; b. 岩心上粉砂岩层理缝, L2井, 970.29 ~ 970.34 m; c. 岩心上页岩页理缝, B1井, 1 438.44 ~ 1 438.52 m; d. 岩心上凝灰岩层理缝, B1井, 1 445.99 ~ 1 446.05 m; e. 薄片细砂岩层理缝, J7井, 1 394.72 m; f. 薄片凝灰岩层理缝, B1井, 1 445.99 m; g. 薄片粉砂岩层理缝, L2井, 970.29 m; h. 薄片页岩页理缝, B1井, 1 438.44 m (井位如图1b和图1c所示, 箭头指示裂缝)

Fig. 7 Photographs of bedding fractures and lamellation fractures in different lithologies of Chang 7 oil formation in the southern Ordos Basin

伸,形成尺度更大的层理缝。粉砂岩中的层理缝多集中分布在黑色泥岩条带发育的砂岩中,层理缝沿微层理面分布(图7c、图7d),其开度通常为几十至几百微米,一般没有被矿物充填,有效性好。

在研究区长 7_3 段底部广泛发育有厚度2 m左右的凝灰岩,其层理缝普遍发育,并有原油沿层理缝渗出。凝灰岩中层理缝分布密集,但规模小,开度也相对较小,延伸较短(图7e)。在微观上,层理缝延伸方向与晶屑和玻屑定向排列的方向一致,开度一般分布在0.1~0.2 mm之间,层理缝分布不规则,弯曲和分叉现象明显,一般未被矿物充填(图7f),有效性好。

(2) 页理缝

页理是页岩的重要特征,同时也是页岩的力学薄弱面,在页岩中顺着页理面发育的裂缝称之为页理缝(邱欣卫等,2009),与砂岩中的层理缝类似。页理缝是页岩中最发育的天然裂缝类型。根据岩心和薄片分析,页理缝主要在纹层发育的页岩中,其分布形态和开度随纹层的横向变化而发生改变,当纹层分布不明显时页理缝发生尖灭、分叉或穿层等现象(图7h)。页理缝的开度一般为几百纳米至数十微米,充填较弱,有效性好,是页岩油的重要储集空间和侧向渗流通道。

(3) 收缩裂缝

页岩常见有收缩裂缝,它们是页岩在沉积成岩过程由于脱水收缩导致体积减小而形成的一种拉张裂缝(曾联波,2008),属于成岩裂缝的一种类型(图8)。在岩心上该类裂缝垂直于层面发育,在平面上多呈网状分布,在纵向上多成“V”字形分布。收缩裂缝的规模较小,延伸短,产状不稳定。收缩裂缝的发育程度较差,且多被泥质等充填,有效性差,因而对油气的储渗意义较小。



图8 鄂尔多斯盆地南部长7油层组收缩裂缝照片(L2井,939.81 m;井位如图1b所示)

Fig. 8 Photograph of shrinkage fracture of Chang 7 oil formation in the southern Ordos Basin (well L2, 939.81 m; see Fig 1b for well location)

3 天然裂缝的主控因素

通过对野外相似露头、岩心、微观薄片和成像测井资料的裂缝统计,对构造裂缝、层理缝和页理缝3种主要类型裂缝形成与发育的主控因素进行了分析。

3.1 构造裂缝的主控因素

构造裂缝的影响因素主要包括岩性、岩层厚度、储层物性、构造等因素(吕文雅等,2016;赵向原等,2018),其中岩性和岩石力学层厚度是控制研究区构造裂缝的主要地质因素。

(1) 岩性对裂缝的控制作用

由于不同岩性的力学性质不同，它们在相同的构造应力作用下，构造裂缝的产状、规模以及发育程度存在明显的差异(曾联波，2004)。研究区为一个平缓的单斜构造，断层和褶皱均不发育，根据岩心观察发现，细砂岩中构造裂缝的平均倾角最大，基本上为直立缝，中低角度的构造裂缝不发育，裂缝在纵向上延伸高度大，最长可达1 m以上。粉砂岩中以高角度构造裂缝为主，此外还有少量的中低角度裂缝，构造裂缝在纵向上的延伸高度相对较小。页岩中高角度构造裂缝少见，以中低角度滑脱裂缝为主，裂缝在纵向上的延伸高度更小。同时，构造裂缝在砂岩中的发育程度高于页岩(图9)。上述现象说明岩石的脆性程度越强，构造裂缝越发育，且以高角度构造裂缝为主；相反，如果岩石的塑性越强，岩石的强度越低，构造裂缝发育程度相对较低，中低角度的滑脱裂缝更发育。

(2) 岩石力学层对裂缝的控制作用

构造裂缝的形成与分布受控于岩石力学层(Underwood et al., 2003; Laubach et al., 2009)，岩石力学层厚度控制了构造裂缝的发育程度和分布样式。所谓岩石力学层，是指一套岩石力学行为相近或力学性质一致的岩层(Underwood et al., 2003; 巩磊等，2018)。通过野外露头观察，岩石力学层影响了裂缝的分布样式，研究区单一岩石力学层内主要发育高角度构造剪切裂缝，与岩石力学层近垂直，并终止于岩石力学层界面上；在相同的岩石力学层内，构造剪切裂缝常成组出现，它们的产状和规模具有一定的相似性，同组裂缝间具有较好的等间距性。从发育程度来看，由于不同力学性质的岩石强度不同，它们在相同的构造应力作用下，岩石发生破裂的容易程度不同，因而其构造裂缝的发育程度存在一定差异(鞠玮等，2014)。通过对地层倾角较小、断层与褶皱均不发育的旬邑石槽沟剖面 and 单井岩心高角度构造剪切裂缝统计，在一定的厚度范围内，裂缝间距与岩石力学层厚度有良好的正相关关系(图10)，即随着岩石力学层层厚的增大，裂缝的间距增加，而裂缝的密度降低。因此，厚度越小的岩石力学层构造裂缝发育程度越高，规模越小；而厚度越大

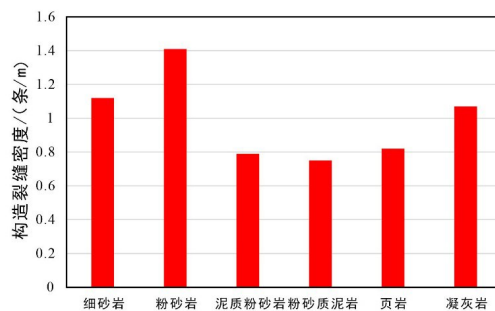


图9 鄂尔多斯盆地南部长7油层组不同岩性构造裂缝密度分布图(N = 76)

Fig. 9 The intensity distribution of tectonic fractures in Chang 7 oil formation of different lithologies, southern Ordos Basin (N = 76)

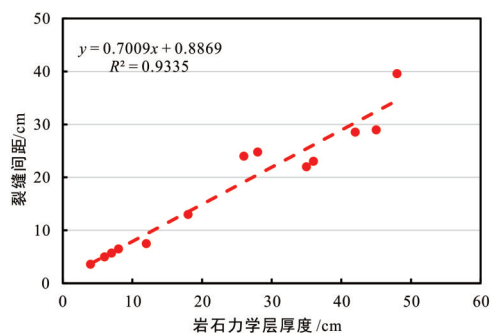


图10 鄂尔多斯盆地南部长7油层组细砂岩构造裂缝间距与力学层层厚关系图(N = 13)

Fig. 10 The relationship between tectonic fracture spacing and mechanical layer thickness in fine sandstones in Chang 7 oil formation, southern Ordos Basin (N = 13)

的岩石力学层构造裂缝发育程度越低, 规模越大。

3.2 层理缝的主控因素

层理缝主要在砂岩和凝灰岩中发育, 其主控因素各不相同。研究区砂岩中层理缝的形成和分布主要受碳质纹层以及粘土矿物转化的影响, 而凝灰岩中的层理缝主要受刚性玻屑脱玻化程度的影响。

(1) 砂岩层理缝的主控因素

发育层理缝的砂岩中常含密集分布的黑色碳质条带纹层, 这些碳质纹层厚度小于 0.5 cm, 层理缝主要顺着这些碳质纹层分布(Gale et al., 2014)。因此, 在层理缝的缝面上常见植物碎屑和大量云母。碳质纹层的分布对层理缝的形成有重要的控制作用, 碳质纹层数量越多, 越有利于层理缝的发育。碳质纹层与砂岩的岩性界面是力学薄弱面, 有利于层理缝的形成。同时, 在砂岩的成岩过程中, 碳质纹层的脱水收缩, 是形成层理缝的重要地质作用。

砂岩中层理缝的发育程度还与粘土矿物含量密切相关。粘土矿物是砂岩填隙物的重要组成部分, 该区粘土矿物以高岭石、伊利石和蒙脱石为主。在砂岩的成岩过程中, 蒙脱石转化为伊利石时脱水收缩形成的微裂缝, 为层理缝的发育提供了基础。通过对 B1 井砂岩中层理缝密度与对应的伊利石含量统计表明, 二者之间呈良好的正相关关系(图 11), 伊利石含量越高, 砂岩层理缝发育程度越高, 密度越大, 反映了粘土矿物含量对砂岩层理缝发育的控制作用。

(2) 凝灰岩层理缝的主控因素

凝灰岩中主要包含晶屑和玻屑, 其中玻屑又分为黑色团块状玻屑和灰色塑性玻屑(火山尘)。在岩石的成岩演化过程中, 玻屑脱玻化形成长英质矿物颗粒, 同时刚性玻屑脱水收缩形成微裂缝, 这些微裂缝为凝灰岩层理缝的形成奠定了基础。通过对 B1 井层理缝密度与刚性玻屑含量之间的关系统计表明, 两者呈较好的正相关关系, 刚性玻屑含量越高, 凝灰岩层理缝密度越大(图 12)。

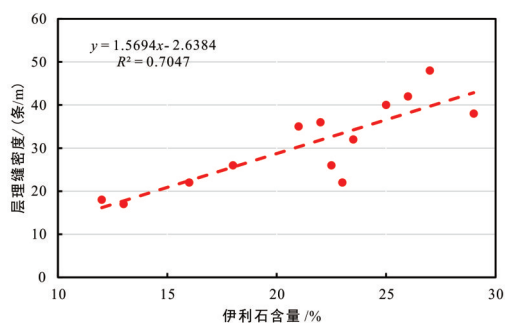


图 11 B1 井长 7 油层组砂岩中层理缝密度与伊利石含量关系 ($N = 13$; 井位如图 1c 所示)

Fig. 11 Relationship between bedding-fracture intensity and illite content in sandstones of Chang 7 oil formation in well B1 ($N = 13$; see Fig.1c for well location)

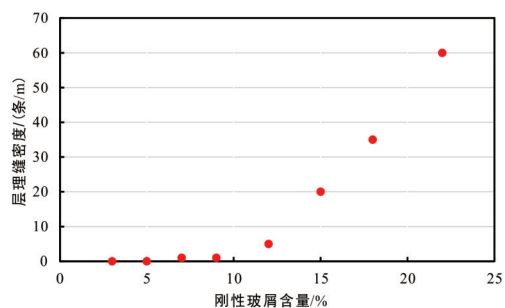


图 12 B1 井长 7 油层组凝灰岩中层理缝密度与刚性玻屑含量关系 ($N = 8$; 井位如图 1c 所示)

Fig. 12 The relationship between bedding fracture intensity and rigid glass chip content of tuffs in Chang 7 oil formation in well B1 ($N = 8$; see Fig.1c for well location)

3.3 页理缝的主控因素

页岩中页理缝的影响因素包括纹层、TOC、黄铁矿、脆性矿物等因素，其中主要受纹层、TOC、黄铁矿等因素控制。根据微观薄片观察，页理缝多沿着纹层分布，页理缝的形态和开度随纹层变化而发生改变。该区页岩中的纹层主要包括有机质纹层、粉砂质纹层和凝灰质纹层3种类型，其中有机质纹层发育的页岩，有利于页理缝的发育，其形成层理缝的频率高达69%，远高于粉砂质纹层和凝灰质纹层的页岩，粉砂质纹层和凝灰质纹层发育层理缝的比例分别为12%和19%。而且，纹层的密度越大，厚度越小，纹层变化越频繁，则其页理缝发育程度越高。

正是由于页理缝主要在有机质纹层的上下发育，因此，页岩的TOC含量越高的层段，页理缝也越发育。这与有机质演化过程中排烃产生的局部异常流体高压作用和产生的有机酸的溶蚀作用、有机质收缩作用等原因有关。通过页理缝发育程度与页岩矿物成份关系分析发现，页理缝密度还与黄铁矿含量呈较好的正相关关系（图13）。页岩中黄铁矿反映了其沉积时的还原环境，黄铁矿含量越高，相应的有机质含量越高，越有利于页理缝的形成和发育。

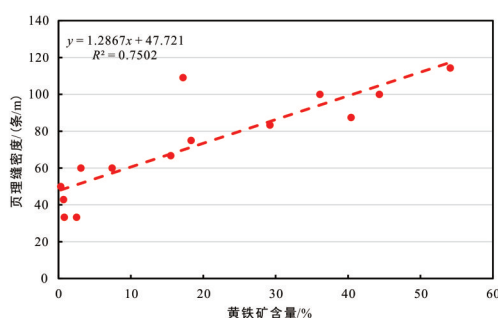


图13 鄂尔多斯盆地南部长7油层组页理缝密度与黄铁矿含量关系 ($N = 14$)

Fig. 13 The relationship between lamellation fracture intensity and pyrite content in Chang 7 oil formation, southern Ordos Basin ($N = 14$)

4 结 论

鄂尔多斯南部长7页岩层系天然裂缝主要有构造裂缝和成岩裂缝两类，其中构造裂缝包括剪切裂缝和张性裂缝，剪切裂缝根据角度分为高角度剪切裂缝和低角度剪切裂缝；成岩裂缝包括层理缝、页理缝和收缩裂缝。研究区以高角度剪切裂缝、层理缝和页理缝为主，它们在砂岩、凝灰岩和页岩中的分布特征和发育程度差异明显。构造裂缝的发育程度主要受岩性和岩石力学层层厚的控制，砂岩层理缝发育程度主要受碳质纹层以及粘土矿物含量的影响，凝灰岩层理缝发育程度主要与刚性玻璃含量有关，而页岩中页理缝发育程度主要受纹层、TOC含量和黄铁矿含量控制。

参 考 文 献

- 戴俊生, 冯建伟, 李明等. 2011. 砂泥岩间互地层裂缝延伸规律探讨. 地学前缘, 18(2): 277-283.
Dai Junsheng, Feng Jianwei, Li Ming et al. 2011. Discussion on the extension law of structural fracture in sand-mud interbed formation. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 277-283.

- 丁文龙, 许长春, 久凯等. 2011. 泥页岩裂缝研究进展. 地球科学进展, 26(2): 135-144.
- Ding Wenlong, Xu Changchun, Jiu Kai et al. 2011. The research progress of shale fractures. *Advances in Earth Science*, 26(2): 135-144.
- 丁文龙, 李超, 李春燕等. 2012. 页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响. 地学前缘, 19(2): 212-220.
- Ding Wenlong, Li Chao, Li Chunyan et al. 2012. Dominant factor for fracture development in shale and its relationship to gas accumulation. *Earth Science Frontiers*, 19(2): 212-220.
- 丁文龙, 王兴华, 胡秋嘉等. 2015. 致密砂岩储层裂缝研究进展. 地球科学进展, 30(7): 737-750.
- Ding Wenlong, Wang Xinghua, Hu Qiujia et al. 2015. Progress in tight sandstone reservoir fractures research. *Advances in Earth Science*, 30(7): 737-750.
- 耳闯, 赵靖舟, 姚泾利等. 2016. 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组页岩—致密砂岩储层孔缝特征. 石油与天然气地质, 37(3): 341-353.
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Yao Jingli et al. 2016. Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang-7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(3): 341-353.
- 高金栋, 周立发, 冯乔. 2018. 鄂尔多斯盆地姬塬—元城地区构造裂缝特征与形成期次的划分. 大地测量与地球动力学, 38(8): 811-817.
- Gao Jindong, Zhou Lifa and Feng Qiao. 2018. The characteristics and formation phase of structural fracture of the Jiyuan-Yuancheng area in the Ordos Basin. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 38(8): 811-817.
- 高帅, 曾联波, 马世忠等. 2015. 致密砂岩储层不同方向构造裂缝定量预测. 天然气地球科学, 26(3): 427-434.
- Gao Shuai, Zeng Lianbo, Ma Shizhong et al. 2015. Quantitative prediction of fractures with different directions in tight sandstone reservoirs. *Natural Gas Geoscience*, 26(3): 427-434.
- 巩磊, 姚嘉琪, 高帅等. 2018. 岩石力学层对构造裂缝间距的控制作用. 大地构造与成矿学, 42(6): 965-973.
- Gong Lei, Yao Jiaqi, Gao Shuai et al. 2018. Controls of rock mechanical stratigraphy on tectonic fracture spacing. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(6): 965-973.
- 黄金亮, 董大忠, 李建忠等. 2016. 陆相页岩储层孔隙分形特征——以四川盆地三叠系须家河组为例. 天然气地球科学, 27(9): 1611-1618.
- Huang Jinliang, Dong Dazhong, Li Jianzhong et al. 2016. Reservoir fractal characteristics of continental shale: An example from Triassic Xujiahe Formation shale, Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 27(9): 1611-1618.
- 鞠玮, 侯贵廷, 冯胜斌等. 2014. 鄂尔多斯盆地庆城—合水地区延长组长6-3储层构造裂缝定量预测. 地学前缘, 21(6): 310-320.
- Ju Wei, Hou Guiting, Feng Shengbin et al. 2014. Quantitative prediction of the Yanchang Formation Chang 6₃ reservoir tectonic fracture in the Qingcheng-Heshui area, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 310-320.
- 鞠玮, 尤源, 冯胜斌等. 2020. 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组致密砂岩储层层理缝特征及成因. 石油与天然气地质, 41(3): 596-605.
- Ju Wei, You Yuan, Feng Shengbin et al. 2020. Characteristics and genesis of bedding parallel fractures in tight sandstone reservoirs of Chang 7 oil layer, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 41(3): 596-605.
- 据宜文, 戚宇, 房立志等. 2016. 中国页岩气的储层类型及其制约因素. 地球科学进展, 31(8): 782-799.
- Ju Yiwen, Qi Yu, Fang Lizhi et al. 2016. China shale gas reservoir types and its controlling factors. *Advances in Earth Science*, 31(8): 782-799.
- 李德生. 2004. 重新认识鄂尔多斯盆地油气地质学. 石油勘探与开发, 31(6): 1-7.
- Li Desheng. 2004. Return to petroleum geology of Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 31(6): 1-7.
- 吕文雅, 曾联波, 刘静等. 2016. 致密低渗透储层裂缝研究进展. 地质科技情报, 35(4): 74-83.
- Lü Wenya, Zeng Lianbo, Liu Jing et al. 2016. Fractures research status and progress in low permeability tight reservoirs. *Geological Science and Technology Information*, 35(4): 74-83.
- 吕文雅, 曾联波, 周思宾等. 2020. 鄂尔多斯盆地西南部致密砂岩储层微观裂缝特征及控制因素——以红河油田长8储层为例. 天然气地球科学, 31(1): 37-46.

- Lü Wenya, Zeng Lianbo, Zhou Sibin et al. 2020. Microfracture characteristics and its controlling factors in the tight oil sandstones in the southwest Ordos Basin: Case study of the eighth member of the Yanchang Formation in Honghe oilfield. *Natural Gas Geoscience*, 31(1): 37-46.
- 邱欣卫, 刘池洋, 李元昊等. 2009. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义. *沉积学报*, 27(6): 1138-1146.
- Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Li Yuanhao et al. 2009. Distribution characteristics and geological significances of tuff interlayers in Yanchang Formation of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1138-1146.
- 宿晓岑, 巩磊, 高帅等. 2021. 陇东地区长7段致密储集层裂缝特征及定量预测. *新疆石油地质*, 42(2): 161-167.
- Su Xiaocen, Gong Lei, Gao Shuai et al. 2021. Characteristics and quantitative prediction of fractures of tight reservoir in Chang 7 member in Longdong area. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(2): 161-167.
- 唐小梅, 曾联波, 岳锋等. 2012. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩油储层裂缝特征及常规测井识别方法. *石油天然气学报*, 34(6): 95-99.
- Tang Xiaomei, Zeng Lianbo, Yue Feng et al. 2012. Fracture characterization and identification by conventional logs of shale reservoirs in Ordos Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 34(6): 95-99.
- 王芮, 赵靖舟, 耳闯等. 2014. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段富有机质页岩裂缝特征及形成机制. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 29(5): 43-48.
- Wang Rui, Zhao Jingzhou, Er Chuang et al. 2014. Characteristics and forming mechanism of fractures in organic-rich shale of Chang-7 member of Yanchang Formation, Ordos Basin. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 29(5): 43-48.
- 吴志均, 唐红君, 安凤山. 2003. 川西新场致密砂岩气藏层理缝成因探讨. *石油勘探与开发*, 30(2): 109-111.
- Wu Zhijun, Tang Hongjun and An Fengshan. 2003. Causes of bedding fractures of tight sand gas-reservoir in Xinchang, West Sichuan region. *Oil Exploration and Development*, 30(2): 109-111.
- 杨华, 席胜利, 魏新善等. 2006. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集. *中国石油勘探*, 11(1): 17-24.
- Yang Hua, Xi Shengli, Wei Xinshan et al. 2006. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in Ordos. *China Petroleum Exploration*, 11(1): 17-24.
- 杨华, 窦伟坦, 刘显阳等. 2010. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析. *沉积学报*, 28(2): 254-263.
- Yang Hua, Dou Weitan, Liu Xianyang et al. 2010. Analysis on sedimentary facies of member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(2): 254-263.
- 杨华, 李士祥, 刘显阳. 2013. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力. *石油学报*, 34(1): 1-11.
- Yang Hua, Li Shixiang and Liu Xianyang. 2013. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 34(1): 1-11.
- 杨俊杰. 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社. 1-228.
- Yang Junjie. 2002. Tectonic Evolution and Oil-Gas Reservoirs Distribution in Ordos Basin. Beijing: Petroleum Industry Press. 1-228.
- 曾联波. 2004. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征. *地质科学*, 39(1): 11-17.
- Zeng Lianbo. 2004. Fissure and its seepage characteristics in low-permeable sandstone reservoir. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 11-17.
- 曾联波, 李忠兴, 史成恩等. 2007. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因. *地质学报*, 81(2): 174-180.
- Zeng Lianbo, Li Zhongxing, Shi Cheng'en et al. 2007. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 174-180.
- 曾联波. 2008. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布. 北京: 科学出版社. 1-169.
- Zeng Lianbo. 2008. Formation and Distribution of Fractures in Low-Permeability Sandstone Reservoir. Beijing: Science Press. 1-169.
- 赵向原, 胡向阳, 肖开华等. 2018. 川西彭州地区雷口坡组碳酸盐岩储层裂缝特征及主控因素. *石油与天然气地质*,

- 39(1): 30-39.
- Zhao Xiangyuan, Hu Xiangyang, Xiao Kaihua et al. 2018. Characteristics and major control factors of natural fractures in carbonate reservoirs of Leikoupo Formation in Pengzhou area, western Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(1): 30-39.
- 周 文, 林家善, 张银德等. 2008. 镇泾地区曙光油田延长组构造裂缝分布评价. *石油天然气学报*, 30(5): 1-4+376.
- Zhou Wen, Lin Jiashan, Zhang Yinde et al. 2008. Evaluation on distribution of structural fractures of Yanchang Formation of Shuguang oilfield of Zhenjing region. *Journal of Oil and Gas Technology*, 30(5): 1-4+376.
- 周新桂, 张林炎, 范 昆. 2006. 油气盆地低渗透储层裂缝预测研究现状及进展. *地质论评*, 52(6): 777-782.
- Zhou Xingui, Zhang Linyan and Fan Kun. 2006. The research situation and progresses of natural fracture for low permeability reservoirs in oil and gas basin. *Geological Review*, 52(6): 777-782.
- 朱如凯, 邹才能, 吴松涛等. 2019. 中国陆相致密油形成机理与富集规律. *石油与天然气地质*, 40(6): 1168-1184.
- Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao et al. 2019. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China. *Oil & Gas Geology*, 40(6): 1168-1184.
- 邹才能, 杨 智, 崔景伟等. 2013. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策. *石油勘探与开发*, 40(1): 14-26.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei et al. 2013. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of non-marine shale oil in China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1): 14-26.
- Fall A, Eichhubl P, Bondnar R J et al. 2015. Natural hydraulic fracturing of tight-gas sandstone reservoirs, Piceance Basin, Colorado. *GSA Bulletin*, 127(1-2): 61-75.
- Gale J F W, Laubach S E, Olson J E et al. 2014. Natural fractures in shale: A review and new observations. *AAPG Bulletin*, 98(11): 2165-2216.
- Gong L, Fu X F, Wang Z S et al. 2019. A new approach for characterization and prediction of natural fracture occurrence in tight oil sandstones with intense anisotropy. *AAPG Bulletin*, 103(6): 1383-1400.
- Gong L, Wang J, Gao S et al. 2021. Characterization controlling factors and evolution of fracture effectiveness in shale oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 203: 108655.
- Jussi N and Timo R. 2019. The EIA WPSR release, OVX and crude oil internet interest. *Energy*, 166(1): 131-141.
- Laubach S E, Olson J E and Gale J F W. 2004. Are open fractures necessarily aligned with maximum horizontal stress? *Earth and Planetary Science Letters*, 222(1): 191-195.
- Laubach S E, Olson J E and Gross M R. 2009. Mechanical and fracture stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 93(11): 1413-1426.
- Li Q, Wu S H, Xia D L et al. 2020. Major and trace element geochemistry of the lacustrine organic-rich shales from the Upper Triassic Chang 7 member in the southwestern Ordos Basin, China: Implications for paleoenvironment and organic matter accumulation. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 852-867.
- Lu H, Li Q, Yue D L et al. 2021. Study on optimal selection of porosity logging interpretation methods for Chang 73 segment of the Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 198: DOI: [org/10.1016/j.petrol.2020.108153](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108153).
- Lü W Y, Zeng L B, Liu Z Q et al. 2019. Natural fractures in tight-oil sandstones: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China. *AAPG Bulletin*, 103(10): 2343-2367.
- Nelson R A. 1985. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*. Houston: Gulf Publishing Company. 1-332.
- Nikkinen J and Rothovius T. 2019. The EIA WPSR release, OVX and crude oil internet interest. *Energy*, 166(1): 131-141.
- Underwood C A, Cooke M L, Simo J A et al. 2003. Stratigraphic controls on vertical fracture patterns in Silurian dolomite, northeastern Wisconsin. *AAPG Bulletin*, 87(1): 121-142.
- Zeng L B and Li X Y. 2009. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China. *AAPG Bulletin*, 93(4): 461-477.
- Zeng L B, Lü W Y, Li J et al. 2016. Natural fractures and their influence on shale gas enrichment in Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 30(1): 1-9.

Development characteristics and main controlling factors of natural fractures in shale series of the seventh member of the Yanchang Formation, southern Ordos Basin

Li Yanlu^{1,2} Lu Shilei¹ Xia Dongling³ Lü Wenya¹

Liang Feng¹ Tang Lei¹ Li Ruiqi¹ Wang Leifei²

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249; 2. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083)

Abstract

Using outcrops, cores, thin sections and well logs, the paper studied the genetic types, developmental characteristics and main control factors of natural fractures in the terrestrial shale strata of the 7th member of the Yanchang Formation (Chang 7) in the southern Ordos Basin. In terms of geological origin, the natural fractures developed in the shale series of Chang 7 in the southern Ordos Basin can be divided into tectonic fractures and diagenetic fractures, with the former including high-dip angle shear fractures, low-dip angle shear fractures and tensile fractures. The diagenetic fractures mainly include bedding fractures, lamellation fractures and shrinkage fractures. The development of natural fractures in different lithologies is obviously different. The natural fractures in tight sandstones are dominated by tectonic fractures, the bedding fractures are only developed in siltstones and local fine sandstones. In shales and tuffs, lamellation fractures or bedding fractures and tectonic fractures are all developed. The main controlling factors of different types of natural fractures are obviously different. The development degree of tectonic fractures is controlled by lithology and the thickness of rock mechanical stratigraphy. The development degree of bedding fractures in sandstones is mainly controlled by the degree of carbonaceous interlayer development and clay mineral transformation. The development degree of bedding fractures tuff is mainly controlled by rigid glass chip contents. The development degree of lamellation fractures is mainly controlled by the lamina, TOC content and pyrite content.

Keywords Natural fractures, Development characteristics, Main controlling factors, Shale oil, Chang 7 oil formation, Ordos Basin