



· 地球科学 ·

鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组页岩岩相和结构 对裂缝发育的影响

赵文晟¹, 黄正良², 曹斌风¹, 刘洋², 罗晓容¹, 闫伟², 程明³, 李亿殊¹, 赵博威¹

1. 西北大学 地质学系/大陆演化与早期生命全国重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018;

3. 东北石油大学 环渤海能源研究院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 基于岩心观测统计, 结合 MaipSCAN 矿物扫描、双能 CT 扫描及岩石力学测井等方法, 系统描述鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组页岩的岩相和结构、裂缝几何特征, 讨论岩相和结构对裂缝发育的影响。研究发现: 研究区乌三段页岩主要发育纹层状页岩岩相, 岩心在微观尺度上呈灰岩、灰质纹层与富硅质纹层频繁互层; 水平裂缝为主(占比 > 70%, 宽度普遍小于 0.5 mm), 次为高角度和低角度裂缝; 高角度裂缝多被方解石充填, 低角度和水平裂缝多未充填。纹层状页岩中裂缝最为发育, 纹层密度与水平裂缝密度呈强正相关。研究认为, 纹层发育加剧了页岩力学性质的非均质程度, 纹层状页岩泊松比低、杨氏模量高, 纹层界面为力学薄弱面, 水平和高角度裂缝交织成网, 形成复杂的裂缝网络, 改善了岩石的渗流能力。纹层状页岩是乌拉力克组的优势储集岩相, 是页岩气勘探的“甜点”。

关键词 鄂尔多斯盆地; 乌拉力克组; 纹层状页岩; 裂缝; 岩相; 双能 CT 扫描; 岩石力学性质

中图分类号: P618.13 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-03-017

Influence of lithofacies and structures on fracture development in the Wulalike Formation shales in the western margin of the Ordos Basin

ZHAO Wensheng¹, HUANG Zhengliang², CAO Binfeng¹, LIU Yang²,
LUO Xiaorong¹, Yan Wei², CHENG Ming³, LI Yishu¹, ZHAO Bowei¹

1. Department of Geology/State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China;

3. Bohai-Rim Energy Research Institute, Northeast Petroleum University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract Based on core observation statistics, combined with MaipSCAN mineral scanning, dual-energy CT scanning and rock mechanics logging, the lithofacies, structure and fracture geometry characteristics of the Wulalike Formation shale in the western margin of the Ordos Basin were systematically described, and the influence of lithofacies and structure on fracture development was discussed. It is found that the shales in the

收稿日期: 2025-11-26 修回日期: 2025-12-07

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1400203); 中国石油长庆油田公司重大科技专项(2024D1JC06)。

第一作者: 赵文晟, 男, 从事与储层相关的页岩裂缝及岩石力学非均质性研究, 2659904772@qq.com。

通信作者: 曹斌风, 男, 副教授, 从事油气输导层成岩-成藏过程、输导层地质建模表征及油气运移成藏研究, cao_binfeng@126.com。

third member of the Wulalike Formation in the study area mainly develops lamellar shale lithofacies, and limestone, gray lamina and silicon-rich lamina are frequently interbedded on the core-micro scale. The horizontal cracks are the major type (accounting for more than 70 %), the width is generally less than 0.5 mm, followed by high-angle and low-angle cracks ; high-angle fractures are mostly filled with calcite, and low-angle and horizontal fractures are mostly unfilled. Fractures are most developed in laminated shale, and there is a strong positive correlation between lamina density and horizontal fracture density. According to the research, the development of laminae aggravates the heterogeneity of shale mechanical properties. The laminated shale has low Poisson's ratio and high Young's modulus. The laminae interface is a mechanical weak surface. Horizontal and high-angle fractures are intertwined into a network to form a complex fracture network, which improves the seepage capacity of the rock. The laminated shale is the dominant reservoir lithofacies of the Uralike Formation and is a "dessert" for shale gas exploration.

Keywords Ordos Basin; Wulalike Formation; laminated shales; fractures; lithofacies; dual-energy CT scan; rock mechanics

近年来,鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组页岩气勘探取得了重大突破,多口探井获得高产工业气流^[1-3]。乌拉力克组乌三段发育富硅质页岩,总有机碳(TOC)明显高于上部其他段,含气性好,是页岩气勘探的主要目标层段^[1-3]。气藏解剖发现,研究区乌三段试气产量变化大,气藏分布不完全受页岩厚度、有机质丰度控制,总体呈现出大面积含气但局部富集的特点^[1,3]。盆地西缘处于多级构造单元交界的位置,构造演化历史复杂,晚期构造活动强烈。研究区页岩气试气产量差异大且普遍产水,可能与断裂、裂缝密切相关。构造变形形成连通裂隙网络可大大改善页岩的储集条件,但规模开启的断层也会导致邻近区域天然气快速逸散,保存条件受到破坏而产水。乌拉力克组页岩的高角度裂缝和近水平层理缝非常发育,是该页岩非常重要的储集空间和渗流通道^[1,46]。

已有学者研究发现,研究区不同钻井之间的裂缝发育程度和裂缝孔隙度具有明显差异,裂缝孔隙度一般为 0.5% ~ 2.0% (平均值为 1.1%)^[5],占总孔隙度的 10% ~ 66% (平均值 40%)^[4]。除了高角度缝外,乌三段普遍发育近水平层理缝且多表现为开启状。有学者认为这种顺层理面和纹层面发育的近水平缝为构造裂缝,主要受前陆冲断席顺层滑脱作用控制^[5]。也有一部分学者认为其是非构造缝,主要与压实压溶、成岩收缩和异常高压作用有关^[7-8]。许多研究发现,页岩的岩相类型和沉积结构对裂缝(包括层理缝)的发育有非常重要的影响^[8-14]。长英质页岩比黏土质页岩的裂缝发育程度高^[9-11]。页岩常发育纹层状、层状及块状等结构^[15],乌三段页岩

主要发育纹层状结构,其他两种结构相对少见;高产段纹层、裂缝普遍发育^[16]。纹层发育影响着矿物成分和岩石力学性质的变化,加剧了页岩的非均质性^[13,15]。纹层界面作为页岩内部的力学薄弱面,易沿其发生破裂^[9,12-14,16]。页岩中不同类型纹层的岩石力学性质差异大,影响裂缝的扩展路径^[9,11,13,14]。与钙质纹层对应力传递无明显的遏止作用不同,黏土质和凝灰质纹层具有阻隔效应,可能抑制应力和裂缝传播^[9,11,13]。因此,纹层结构及其发育程度会显著影响页岩的储集性能^[16-19],特别是其顺纹层发育的裂缝,通过改善储集空间和渗流通道促进页岩气的富集^[4,6,9,14,16]。目前,学者对乌三段页岩该问题的研究较薄弱,制约了裂缝成因和分布的深入认识。本研究针对乌拉力克组乌三段页岩,系统统计其岩心尺度、裂缝类型、倾角、张开度、填充度、密度等参数特征的变化,结合 MaipSCAN 矿物扫描、双能 CT 扫描及测井等多源信息,探究页岩的岩相类型、纹层结构对裂缝发育的影响,旨在揭示纹层结构与裂缝发育的内在关系,为页岩气的高效勘探开发提供理论支撑。

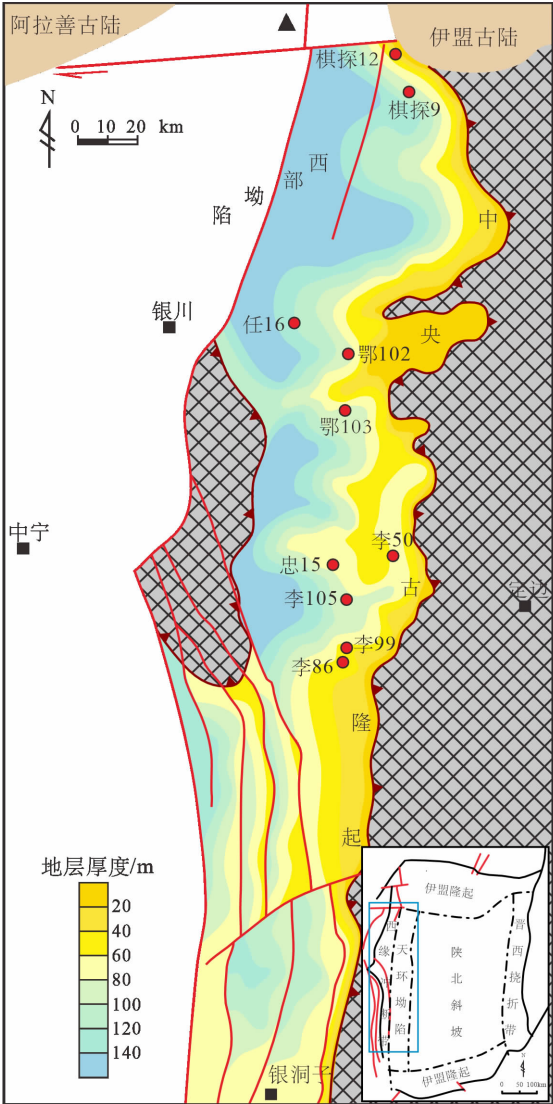
1 地质概况

鄂尔多斯盆地是中国第一大含油气盆地,其西缘地区南北延伸近 300 km,东西宽为 150 km,构造上横跨伊盟隆起、天环坳陷和西缘冲断带三大构造单元^[20-21]。盆地西缘构造-沉积演化受多期次拉张、闭合的秦岭-祁连山褶皱带、贺兰褶皱带以及兴蒙海槽和鄂尔多斯地块的共同影响,

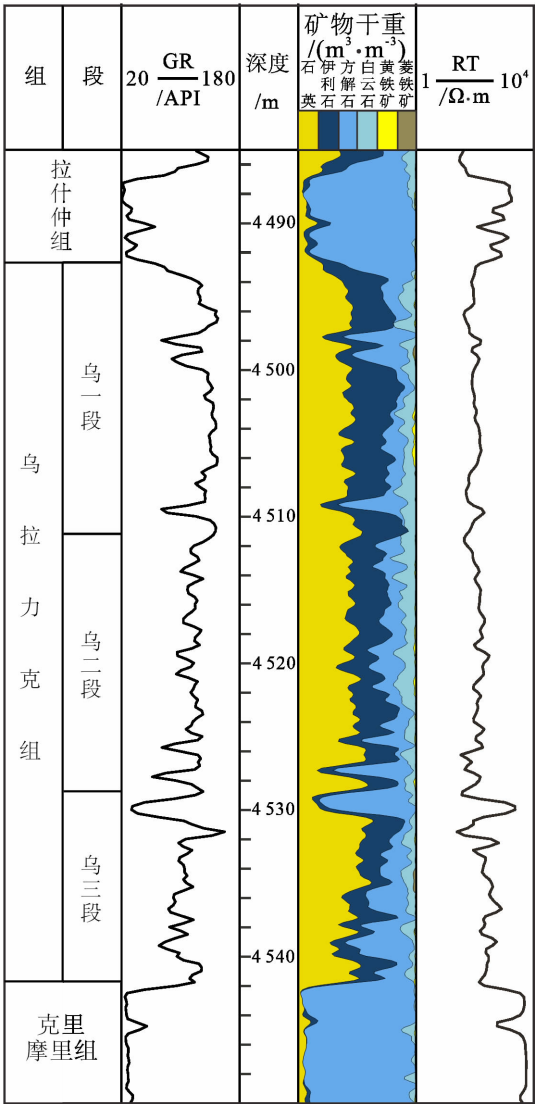
形成了一套复杂的裂陷系统^[22-24]。古生代,贺兰裂陷槽多次开裂闭合,在裂陷槽发展期,盆地西缘处于伸展环境,地表迅速沉降,与盆地内部相比表现为明显的负地形,总体沿近南北方向呈条带状展布,为古生界烃源岩的发育创造了良好的构造条件^[24-25]。乌拉力克期,盆地西缘则发生断陷并持续接受沉积,其水体自东向西逐渐加深^[20];发育一套以斜坡-广海陆棚-盆地相为主的海相地层,形成了一套以黑色页岩为主的沉积,其内广泛发育重力流滑塌成因的灰岩透镜体^[20,26]。

乌拉力克组地层厚度一般为 20 ~ 150 m〔见

图 1 (a)],具有“北厚南薄、西厚东薄”的特点^[26-27]。按照岩性组合特征自上而下可划分为乌一段、乌二段和乌三段,其中乌一段、乌二段主体为富含钙质、黏土质的页岩夹灰岩组合,乌三段为富含硅质的页岩和灰岩组合〔见图 1(b)〕^[6,27]。乌三段有机质丰度相对高,为优质页岩发育段,厚度一般为 20 ~ 80 m,是页岩气勘探的“铂金段”^[6,26]。乌三段页岩 TOC 值介于 0.3% ~ 1.7%;干酪根类型主要为 I 型和 II₁ 型;*R_o* 介于 1.5% ~ 1.9%,为高成熟—过成熟,处于生气阶段^[1,3]。



(a) 鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组残余地层厚度分布图 (据文献[27]修改)



(b) 李86井单井综合柱状图 (据文献[16]修改)



图1 研究区地层厚度及单井综合柱状图

Fig.1 Study area formation thickness and single well comprehensive histogram

2 研究方法

本研究对鄂 102、鄂 103、棋探 12 井、李 86 井、李 105 等 10 口井的钻井岩心进行了细致的观测并取样。观测过程中对裂缝的几何特征,如倾角、宽度、填充度等参数进行系统的测量。检查确定岩心的原始摆放位置与顶底方向后,逐筒次测量裂缝的倾角与张开度,计算并统计不同类型裂缝的填充程度及密度。同时,对页岩层系的岩相类型和沉积结构进行仔细观测,分岩相进一步统计裂缝的倾角、密度及填充度等参数,探讨页岩的岩相类型和结构与裂缝发育之间关系。

利用普通薄片,结合先进的 MaipSCAN 自动矿物学电镜技术,对页岩不同岩相类型样品的矿物和元素分布进行高清电子成像和定量解释。MaipSCAN 是一种集高分辨率扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)及多种智能分析软件为一体的国际最新一代自动矿物分析系统。通过能谱仪收集岩石样品的 X 射线并应用先进的图谱算法,实现页岩矿物的自动识别和定量分析,可以针对每一个扫描点进行人工验证,以保证矿物分析结果的准确性。实验中,将样品切割为 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 的块体,通过氩离子抛光实现样品表面的平整化,采用镀碳仪喷涂 $\geq 40\text{ nm}$ 厚的碳层,确保导电性。通过自动面扫获取背散射电子(BSE)图像及 X 射线能谱数据,矿物识别精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$,识别步长为 $2 \sim 64\text{ }\mu\text{m}$,电镜图像分辨率为 $0.4 \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 。MaipSCAN 自动矿物学电镜分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。

采用全直径双能 CT 对页岩纹层和近水平层理缝进行扫描解释。全直径双能 CT 作为一种高分辨率三维成像技术,利用样品对 X 射线或伽马射线的吸收、散射及衰减特性,获取岩石内部的结构信息。与传统的单能 CT 扫描相比,双能 CT 扫描通过采集两种不同能量的射线数据,有效消除了岩石内部的散射影响,从而显著提高了成像质量和分辨率^[28]。本研究采用飞利浦螺旋 CT 设备,通过对光电吸收效应和康普顿效应解耦的计算,实现沿岩心深度方向密度和光电指数 Pe 分布的高精度测定,其分辨率 z 轴 1.0 mm , x/y 轴 $150\text{ }\mu\text{m}$ 。通过 CT 密度与光电指数 Pe 两个数据,定量分析岩心样品,准确识别纹层及裂缝,探究近水平层理缝发育与页岩纹层的关系。全直径双能 CT

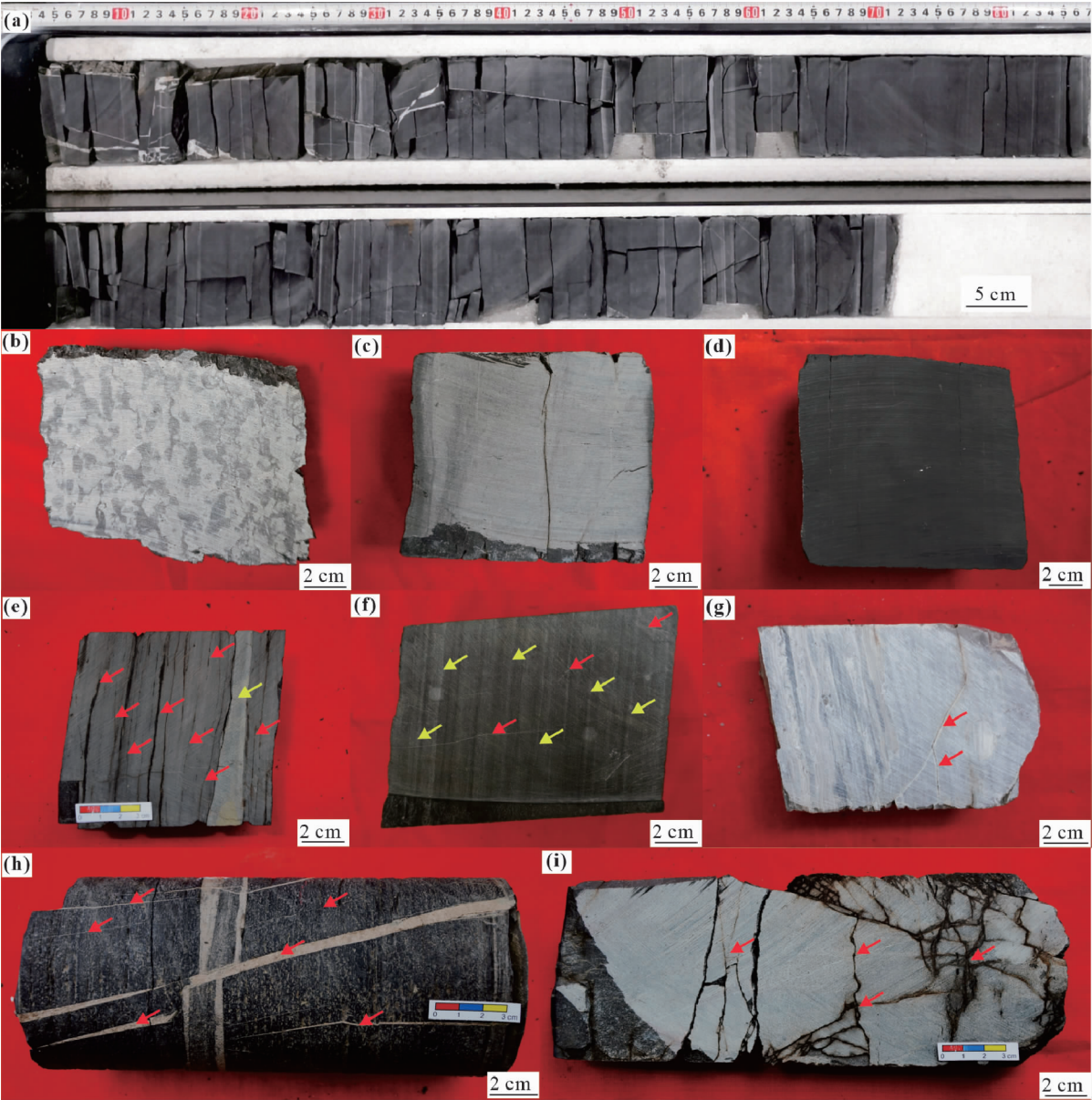
在中国科学院地质与地球物理研究所完成。

3 结果

3.1 沉积结构和岩相类型

乌拉力克组乌三段发育黑色、灰黑色页岩,主要夹灰白色角砾状砾屑灰岩、泥晶灰岩,也发育少量的黄色凝灰岩。灰岩厚度变化大、分布复杂,页岩表现出不同的沉积结构构造,包括纹层状、层状及块状,其中纹层状最为发育[见图 2(a)]。依据黄正良等的研究成果^[16],本研究将页岩划分为 3 种主要的岩相大类,即块状灰岩、块状页岩及纹层状页岩。块状灰岩岩相包括砾屑灰岩、泥晶灰岩,总体上表现为均质,没有颜色和矿物成分的明显变化,单层厚度往往大于 2 cm [见图 2(b)、(c)、图 3(a)、(b)]。块状页岩总体上也表现为均质,主要是富硅质页岩,单层层厚也大于 2 cm [见图 2(d)、图 3(c)]。纹层状页岩的颜色、矿物组成在垂向上发生明显变化,灰岩(方解石质量分数大于 50%)纹层和灰质(方解石质量分数 25%~50%)纹层发育普遍,单层厚度小于 2 cm ,富硅质纹层和灰岩纹层或灰质纹层相互间隔产出[见图 2(e)、(f)]。灰岩和灰质纹层发育具有极强的非均质性,纹层厚度变化大,综合薄片和岩心观测,可分为厘米级[见图 2(e)、图 3(d)]、毫米级[见图 2(f)、图 3(e)]、微米级[见图 3(f)]。毫米级纹层、微米级纹层在岩心上统计困难,需借助双能 CT 扫描进行统计。

应用双能 CT 对棋探 11 井乌三段岩心进行了扫描,累计完成 15.7 m 的扫描覆盖。该岩心段在扫描测试前没有进行人为的切割处理,因而避免了人为活动产生裂缝,影响测试结果。图 4 将岩心图像、CT 扫描灰度图像以及密度和 Pe 数据进行比对观察发现,随着岩心图像和 CT 灰度图像的明暗变化,密度值和光电指数 Pe 值也随之发生变化,较好地表征了纵向上岩石内部矿物成分的变化。硅质含量高的岩石 CT 扫描显示出低灰度值、低密度和低 Pe 值的特点,随着碳酸盐矿物的增多,密度和 Pe 数据增大。灰岩纹层表现为高密度(均值 2.71 g/cm^3)和高 Pe 值(均值 5.2 be)。全直径双能 CT 扫描分析结果显示,棋探 11 井 4 955~4 970.7 m 层段纹层发育密度主要为 $40 \sim 220\text{ 条/m}$ (见图 4、5)。



注:(a) 乌拉力克组乌三段岩心产出状态,忠 15 井,4 219.96 m~4 221.62 m;(b) 砾屑灰岩,块状结构,棋探 9 井,4 718.32 m;(c) 泥晶灰岩,块状结构,鄂 103 井,3 956.06 m;(d) 块状页岩,棋探 9 井,4 740.24 m;E. 纹层状页岩,纹层(黄色箭头)厚度大,1~2 cm,并可见水平裂缝(红色箭头),李 99 井,4 429.40 m;(f) 纹层状页岩,纹层(黄色箭头)厚度小,微米—毫米级,并可见高角度裂缝(红色箭头),鄂 102 井,3 736.53 m;(g) 低角度裂缝(红色箭头),李 105 井,4 251.3 m;(h) 纹层状页岩高角度裂缝(红色箭头)且被方解石全填充,忠 15 井,4 245.76 m;(i) 网状裂缝(红色箭头)发育,李 99 井,4 424.32 m。

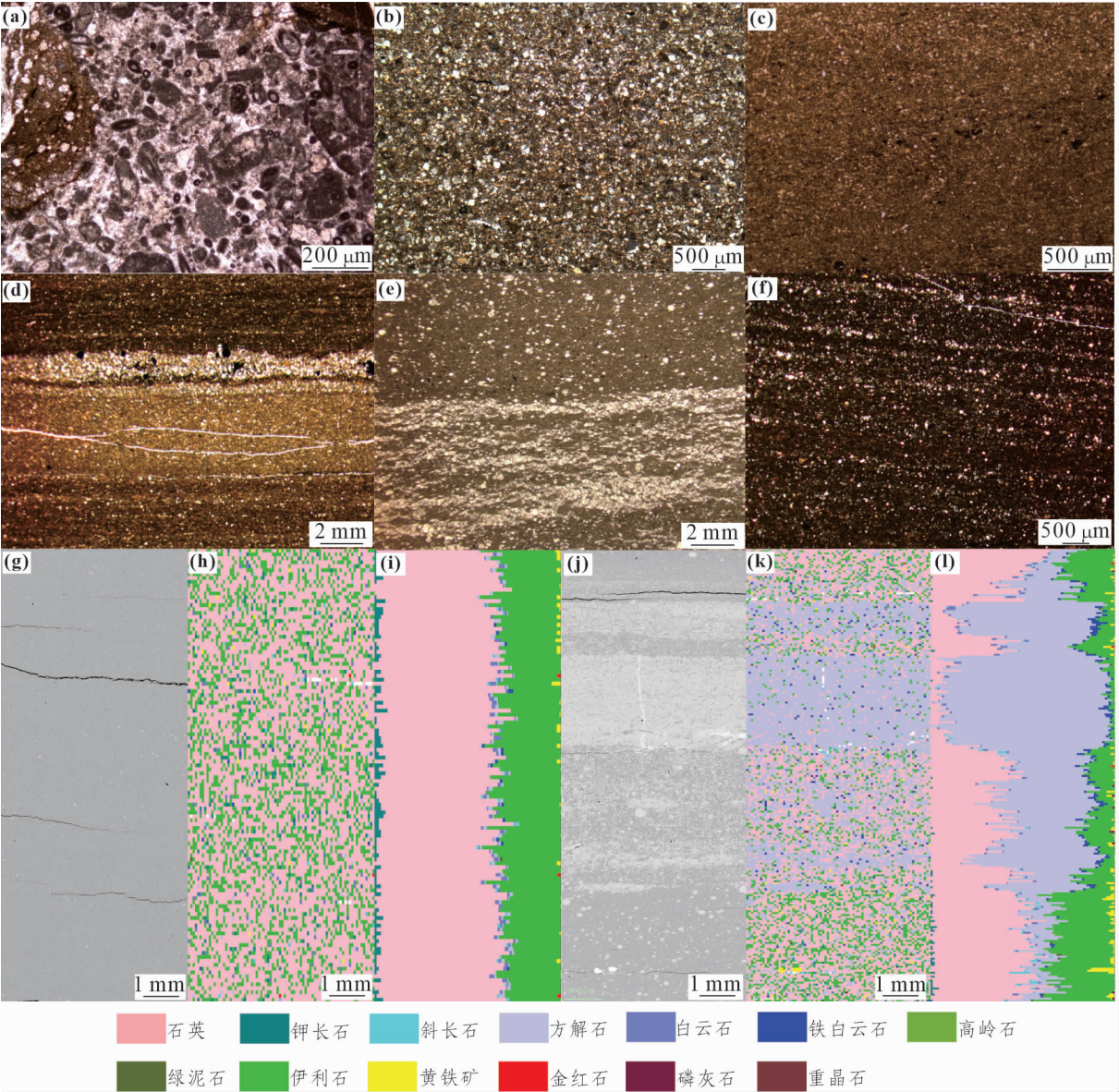
图 2 乌拉力克组乌三段页岩典型岩相、裂缝岩心照片

Fig.2 Typical lithofacies and fracture core photos in the third member shales of the Wulalike Formation

3.2 裂缝类型

前人根据倾角将裂缝划分为水平裂缝(0°~5°)、低角度裂缝(5°~45°)、高角度裂缝(45°~85°)及垂直裂缝(85°~90°)^[29]。依据该划分方案可知,乌拉力克组页岩裂缝主要为水平裂缝、低角度裂缝及高角度裂缝〔见图 2(a)、(e)、(g~

1)〕。低角度裂缝倾角主要分布区间为 5°~15°,高角度裂缝倾角主要分布区间为 75°~90°。水平裂缝的倾角小于 5°,主要沿着纹层界面发育展布。统计显示,乌三段裂缝以水平裂缝为主,其占裂缝总量的 70% 以上,而高角度裂缝与低角度裂缝占裂缝总量的 28% 左右(见图 6)。



注:(a)块状砾屑灰岩,李105井,4 266.07 m,单偏光;(b)块状泥晶灰岩,李105井,4 253.60 m,单偏光;(c)块状页岩,李50井,4 088.82 m,单偏光;(d)纹层状页岩中厘米级方解石纹层,李105井,4 262.98 m,单偏光;(e)纹层状页岩中毫米级方解石纹层,鄂102井,3 685.63 m,单偏光;(f)纹层状页岩中微米级纹层,李105井,4 274.00 m,单偏光;(g)块状页岩背散射照片,惠探5井,4 557.45 m,正交光;(h)块状页岩 MaipSCAN 矿物扫描图,惠探5井,4 557.45 m;(i)块状页岩 MaipSCAN 矿物含量统计图,惠探5井,4 557.45 m;(j)纹层状页岩背散射照片,含毫米级方解石纹层,惠探5井,4 551.26 m;(k)纹层状页岩 MaipSCAN 矿物扫描图,惠探5井,4 551.26 m;(l)纹层状页岩 MaipSCAN 矿物含量统计图,惠探5井,4 551.26 m。

图3 乌拉里克组乌三段页岩光学薄片及 MaipSCAN 观测照片

Fig. 3 Optical thin section images and MaipSCAN observations in the third member shales of the Wulalike Formation

3.3 裂缝填充度

根据填充程度将裂缝划分为全填充裂缝(裂缝被完全填充)、半填充裂缝(裂缝内可见矿物填充,但未完全填充)、不填充裂缝(裂缝未被填充)。对乌三段裂缝的填充程度统计发现,低角度

裂缝填充程度低于高角度裂缝;低角度裂缝以不填充为主,而高角度裂缝以全填充-半填充为主[见图7(a),图7(b)]。裂缝填充矿物多为方解石[见图2(h)]。

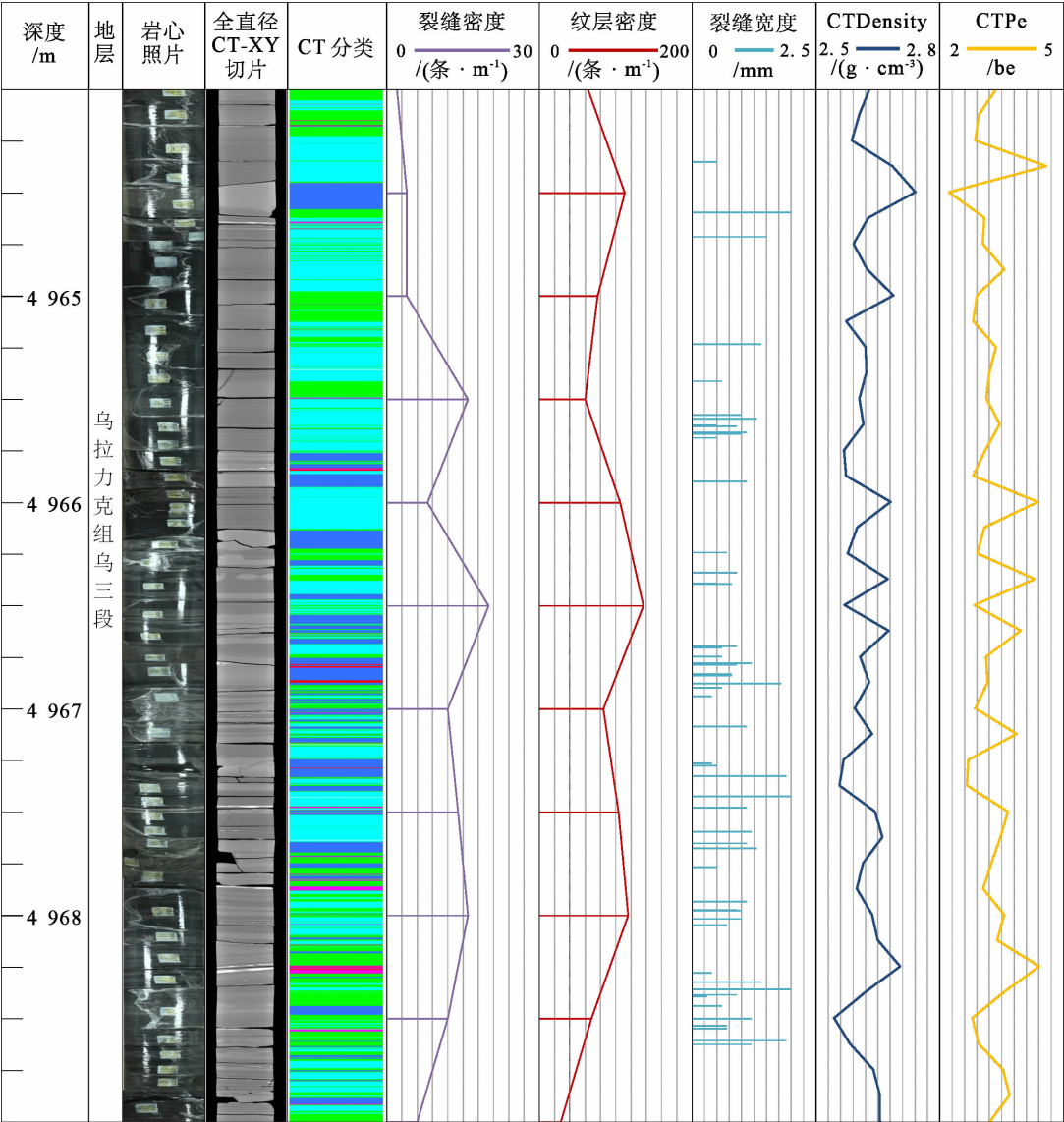


图 4 棋探 11 井乌拉力克组乌三段页岩全直径双能 CT 扫描结果图

Fig.4 Full-diameter dual-energy CT scan results of the third member shales of the Wulalike Formation of well Qitan 11

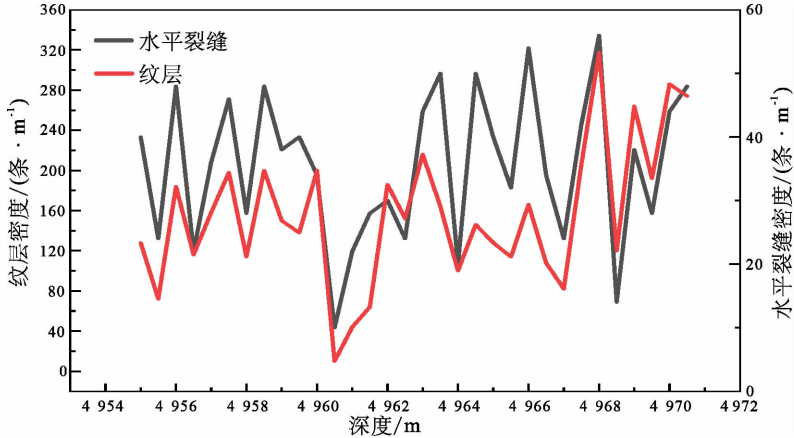


图 5 棋探 11 井乌拉力克组乌三段页岩水平裂缝密度、纹层密度相关图

Fig. 5 Correlation diagram of horizontal fracture and lamina density of the third member shales of the Wulalike Formation of well Qitan 11

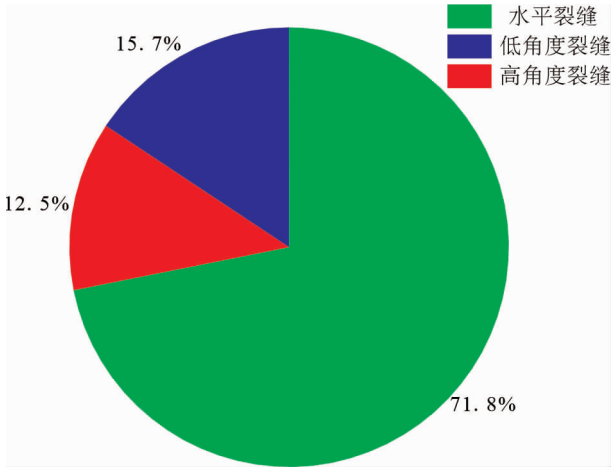


图 6 乌拉力克组乌三段页岩不同类型裂缝发育占比图
Fig. 6 Proportion of different types of fractures in the third member shales of the Wulalike Formation

3.4 裂缝宽度及裂缝密度

裂缝宽度即裂缝两壁间的垂直距离,测量时不考虑填充矿物的影响。前人将肉眼可以识别的裂缝宽度分为 5 级,分别为微裂缝($<0.1\text{ mm}$)、小裂缝($0.1\sim<1\text{ mm}$)、中裂缝($1\sim<10\text{ mm}$)、大裂缝($10\sim100\text{ mm}$)和巨裂缝($>100\text{ mm}$)^[7]。全填充裂缝测量其脉体宽度即为裂缝宽度;半填充裂缝和不填充裂缝测量裂缝两壁垂直距离,并沿裂缝不同位置测量多次后取平均值。观测统计发现,总体上讲,乌三段高角度、低角度裂缝宽度小于 1.5 mm [见图 7(c)、(d)],但局部可见宽度大于 10 mm 的裂缝且以高角度裂缝为主。水平裂缝的宽度可由全直径双能 CT 扫描计算获得,为 $0.2\sim2\text{ mm}$,多数小于 0.5 mm (见图 4)。

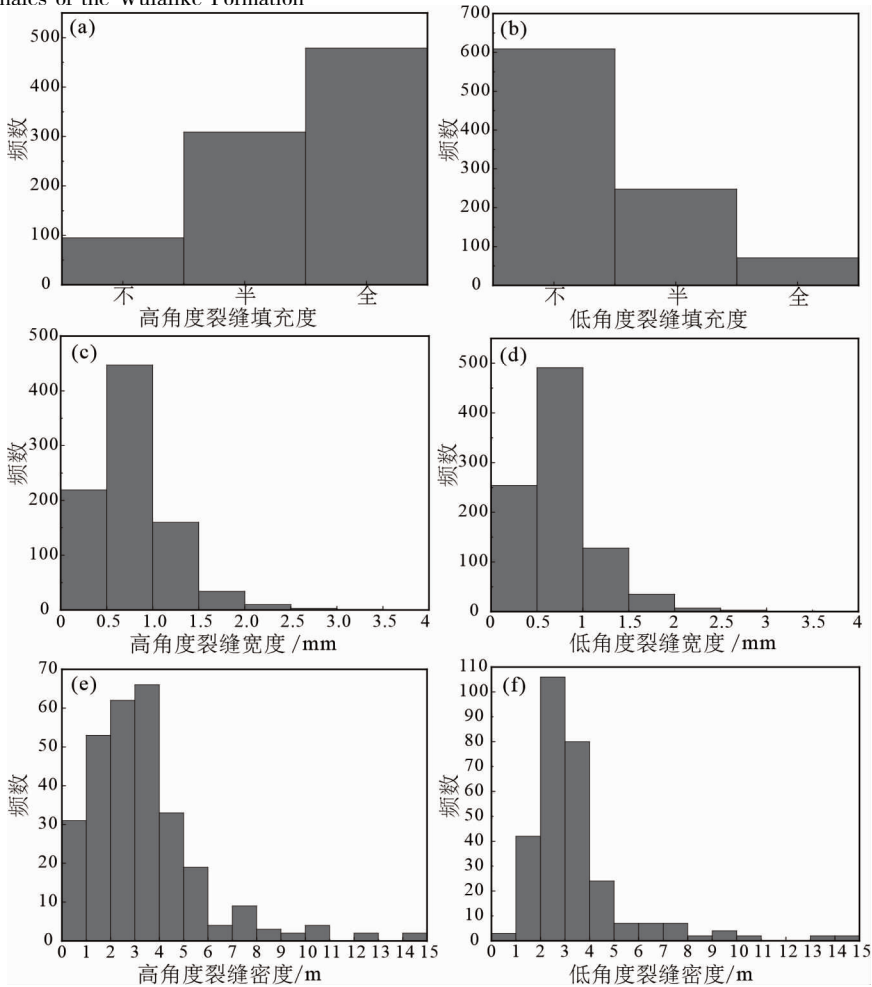


图 7 乌拉力克组乌三段页岩裂缝参数统计柱状图
Fig. 7 Statistical histogram of fracture parameters in the third member shales of the Wulalike Formation

高角度裂缝的密度主要为 $1\sim8\text{ 条/m}$ [见图 7(e)],低角度裂缝的密度主要为 $1\sim5\text{ 条/m}$ [见图 7(f)]。借助全直径双能 CT 扫描统计水平裂缝的密度,结果显示主要为 $15\sim60\text{ 条/m}$ (见图 5)。

4 讨论

学者将页岩中的天然裂缝分为构造裂缝与非构造裂缝两类,其中构造裂缝包括拉张缝与剪切缝,非构造缝分为成岩缝、异常高压裂缝、层理缝与表生缝^[7,8,30-31]。影响页岩天然裂缝发育的因素主要为沉积成岩作用、构造作用和异常流体高压作用^[7,8,30-31]。其中,沉积成岩作用因素包括页岩的矿物成分与脆性、有机质含量及其热演化程度、岩石力学层厚度及纹层等^[7-8,12,30-31]。研究区乌三段不同井区之间,裂缝发育程度变化大,特别

是近水平顺层缝,不同钻井之间发育密度差异显著。王玉满等认为,这主要是由区域褶皱变形和顺层滑脱作用强弱变化造成的;页岩高脆性与燕山期以来的冲断褶皱与滑脱作用相配置,控制了裂缝的发育程度^[5]。

实际上,页岩岩相类型和沉积结构是控制裂缝发育非常重要的地质因素,不可忽略^[8-14]。本研究将乌三段页岩划分为纹层状页岩、块状灰岩及块状页岩。统计结果显示,纹层状页岩中高角度与低角度裂缝数量显著高于块状灰岩和块状页岩〔见图 8(a)、(b)〕。

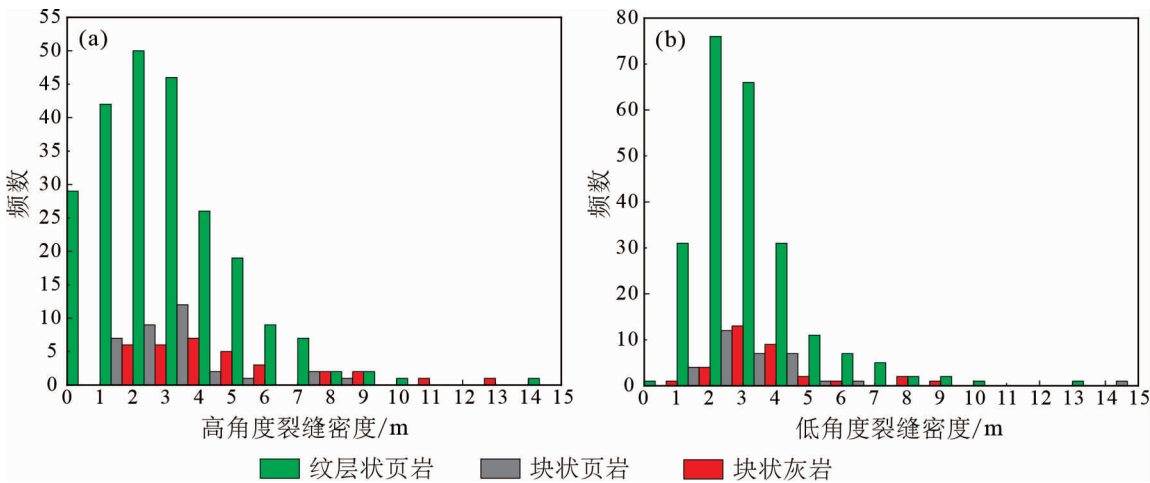


图 8 乌拉力克组乌三段页岩不同岩相裂缝参数统计柱状图

Fig. 8 Statistical histogram of different shale lithofacies fracture parameters in the third member shales of the Wulake Formation

就水平裂缝而言,纹层状页岩非常发育而块状页岩和块状灰岩几乎不发育。双能 CT 扫描数据揭示,纹层密度与水平裂缝发育存在显著的响应关系,即纹层越发育,水平裂缝越发育(见图 5)。高纹层密度区域(>8 条/cm)对应高水平裂缝密度值(>100 条/m)。纹层密度和水平裂缝密度二者的皮尔逊相关系数 $r = 0.63$, 表现为强正相关性〔见图 5(b)〕。纹层发育导致页岩中形成顺纹层的结构软弱面,在地应力条件改变的情况下,裂缝会沿着这些结构软弱面优先发育扩展^[9,12-14],在一定程度上讲,纹层的发育密度决定了水平裂缝的发育及展布^[16]。

岩石力学性质是控制页岩储层裂缝发育的关键因素之一,其通过影响岩石的抗破裂能力和应力响应特征,控制裂缝的生成、扩展与空间展布。纹层的发育进一步加剧了页岩岩石力学性质的非

均质程度^[14,32]。以李 86 井为例,将乌三段岩相划分后,分岩相讨论其岩石力学性质,结果发现,不同岩相的力学性质存在显著差异。对杨氏模量而言,块状灰岩>纹层状页岩>块状页岩。对泊松比而言,块状灰岩>块状页岩>纹层状页岩。对抗压强度而言,块状灰岩>纹层状页岩>块状页岩(见图 9,10)。高杨氏模量、低泊松比的纹层状页岩在应力作用下更易形成密集裂缝^[14]。乌三段块状灰岩的岩相裂缝以高角度填充缝为主,裂缝张开度较大,发育程度优于块状页岩岩相,次于纹层状页岩岩相。块状页岩岩相的裂缝发育程度差,可见部分低角度裂缝。纹层状页岩的岩相裂缝发育程度高,以近水平层理缝为主,并与低角度和高角度裂缝沟通,形成复杂缝网〔见图 2(a)、图 11〕。

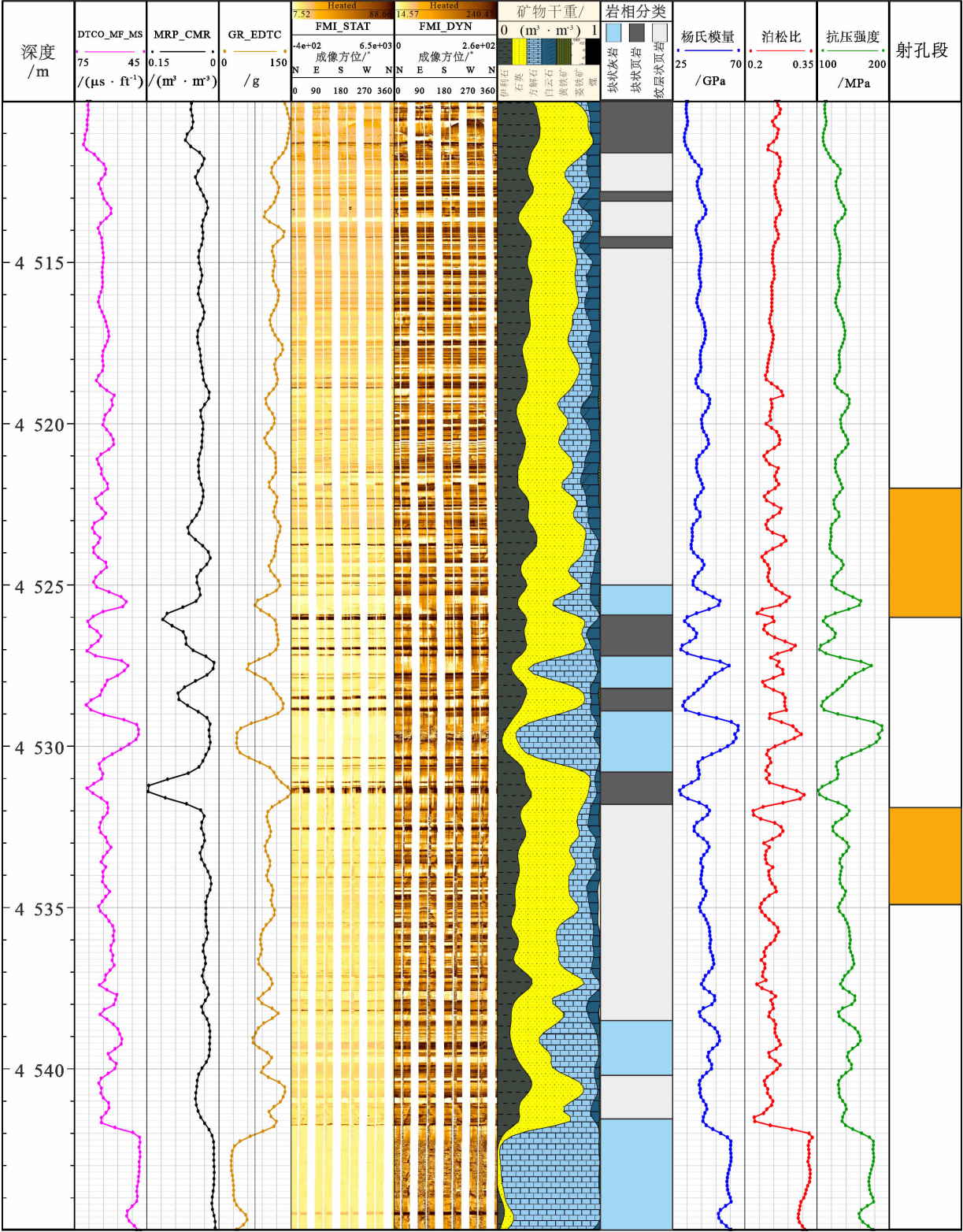


图 9 李 86 井乌拉力克组乌三段页岩综合柱状图
Fig.9 Synthetic column of in the third member shales of the Wulalike Formation of well Li 86

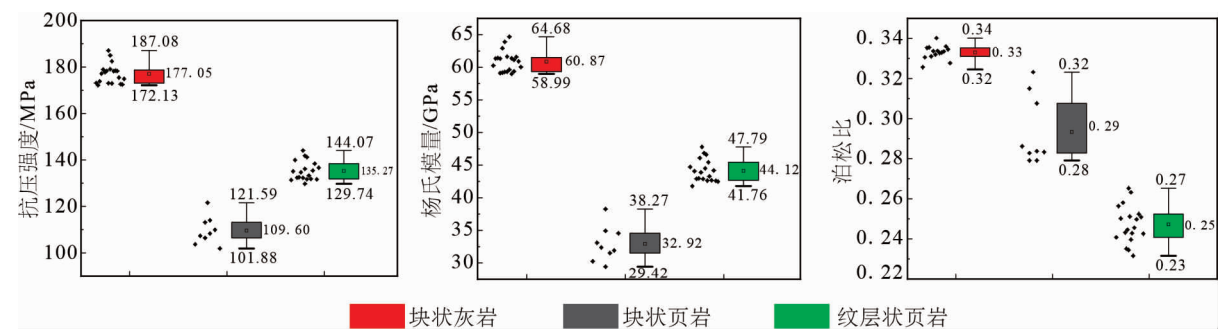


图 10 乌拉力克组乌三段李 86 井页岩层系不同岩相岩石力学性质统计

Fig. 10 Rock mechanical properties of different lithofacies of well Li 86 in the third member shales of the Wulalike Formation

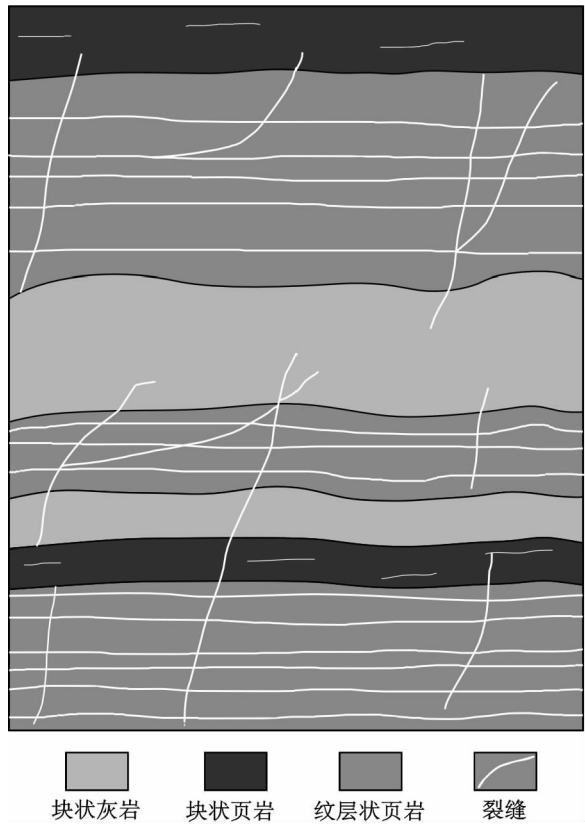


图 11 乌拉力克组乌三段页岩层系裂缝展布模式
Fig. 11 Fracture distribution pattern in the third member shales of the Wulalike Formation

学者对页岩储层的研究发现,近水平裂缝是页岩油气的重要储集空间和主要渗流通道,影响着页岩油气的富集、单井产能和开发效果^[4-6]。油田试气产液结果:李 86 井乌拉力克组乌三段射孔段分别为 4 522 ~ 4 526 m 和 4 532 ~ 4 535 m,试气高产,产气量达 $15.22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (见图 9)。试气段岩相为纹层状页岩岩相,证明其为优势岩相。纹层状页岩压裂裂缝易沿纹层界面扩展,也会形成数量更多、更为复杂的裂缝网络^[14,16]。乌三段页岩纹层状结构普遍发育^[16],纹层密度与裂缝密度,特别是水平裂缝密度存在强相关性。纹层发

育加剧了储层力学的各向异性,导致高角度裂缝与水平裂缝交织发育,形成网状裂缝系统,形成流体运移的优势通道。

本研究所获结果属阶段性成果,未来工作重点需融合多尺度页岩储层表征技术,定量刻画页岩中不同类型纹层以及纹层组合中基质孔隙和裂缝的空间结构关系。同时,需要关注裂缝次期和页岩气运聚成藏的匹配关系,厘清不同时期裂缝对页岩气成藏及晚期破坏的差异化作用。

5 结论

1) 研究区乌拉力克组乌三段页岩发育纹层状、层状及块状结构,其中纹层状页岩最为发育。乌三段主要发育水平裂缝、低角度裂缝及高角度裂缝。纹层状页岩中,高角度与低角度裂缝密度显著高于块状灰岩和块状页岩。

2) 高角度裂缝、低角度裂缝密度分别为 1 ~ 8 条/m、1 ~ 5 条/m,水平裂缝密度主要为 15 ~ 60 条/m。水平裂缝占裂缝总量的 70% 以上。低角度裂缝填充程度低于高角度裂缝。高角度、低角度裂缝的宽度小于 1.5 mm,水平裂缝的宽度多数小于 0.5 mm。

3) 纹层密度与水平裂缝密度存在显著正相关。纹层状页岩的杨氏模量与抗压强度显著高于块状页岩,其低泊松比与高杨氏模量的特征使其易发育裂缝。纹层状页岩的高角度构造裂缝与近水平层理缝交织,形成“网状”裂缝系统可以作为油气的储集空间与运移通道。纹层状页岩为乌拉力克组的优势储集岩相,是油气勘探的“甜点”。

参考文献

[1] 付锁堂,付金华,席胜利,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J]. 中国石油

- 勘探, 2021, 26(2): 33-44.
- FU S T, FU J H, XI S L, et al. Geological characteristics of Ordovician marine shale gas in the Ordos Basin and its prospects [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26 (2): 33-44.
- [2] 席胜利, 莫午零, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力——以忠平1井为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(8): 1235-1246.
- XI S L, MO W L, LIU X S, et al. Shale gas exploration potential of Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin: Case study of Well Zhongping 1 [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32 (8): 1235-1246.
- [3] 席胜利, 刘新社, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组页岩油气富集条件及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 12-22.
- XI S L, LIU X S, HUANG Z L, et al. Enrichment characteristics and exploration direction of shale oil and gas in Wulalike Formation of Middle Ordovician in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43 (3): 12-22.
- [4] 陈如彪, 王玉满, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘海相页岩裂缝孔隙发育特征与页岩气富集模式: 以奥陶系乌拉力克组为例[J]. *地学前缘*, 2024, 31(5): 46-60.
- CHEN R B, WANG Y M, HUANG Z L, et al. Fracture pore characteristics and gas accumulation model of marine shales in the northwestern Ordos Basin: A case study of the Ordovician Wulalike Formation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31 (5): 46-60.
- [5] 王玉满, 周尚文, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系乌拉力克组裂缝孔隙表征[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(7): 1146-1162.
- WANG Y M, ZHOU S W, HUANG Z L, et al. Fracture pore characterization of the Ordovician Wulalike Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34 (7): 1146-1162.
- [6] 王玉满, 黄正良, 马占荣, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系乌拉力克组页岩气赋存条件与聚集模式[J]. *中国石油勘探*, 2025, 30(1): 125-143.
- WANG Y M, HUANG Z L, MA Z R, et al. Geological conditions and accumulation mode of shale gas in the Ordovician Wulalike Formation in the northwestern margin of Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2025, 30 (1): 125-143.
- [7] 丁文龙, 许长春, 久凯, 等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 135-144.
- DING W L, XU C C, JIU K, et al. The research progress of shale fractures [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26 (2): 135-144.
- [8] 曾联波, 吕文雅, 徐翔, 等. 典型致密砂岩与页岩层理缝的发育特征、形成机理及油气意义[J]. *石油学报*, 2022, 43(2): 180-191.
- ZENG L B, LYU W Y, XU X, et al. Development characteristics, formation mechanism and hydrocarbon significance of bedding fractures in typical tight sandstone and shale [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43 (2): 180-191.
- [9] 蒋睿, 何建华, 邓明全, 等. 川南筇竹寺组页岩储层天然裂缝发育特征及对页岩气富集高产的影响[J/OL]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 1-19[2026-03-13]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20250410.1344.002>.
- JIANG R, HE J H, DENG M Q, et al. Development characteristics of natural fractures in the Qiongzhusi Formation shale reservoir in southern Sichuan and their impact on shale gas enrichment and high yield [J/OL]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 1-19[2026-03-13]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20250410.1344.002>.
- [10] 雍锐, 吴建发, 刘勇, 等. 多期次构造运动背景下深层页岩天然裂缝发育特征及其油气地质意义——以四川盆地资阳地区下寒武统筇竹寺组页岩为例[J]. *天然气工业*, 2025, 45(5): 1-16.
- YONG R, WU J F, LIU Y, et al. Development characteristics of natural fractures in deep shale in the context of multiphase tectonic movement and their petroleum geological implications: A case study on the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Ziyang Area of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2025, 45(5): 1-16.
- [11] 袁余洋, 李虎, 王瑛, 等. 页岩岩相类型对裂缝形成及演化的影响研究——以黔西北地区龙马溪组为例[J]. *地质科学*, 2021, 56(1): 82-97.
- YUAN Y Y, LI H, WANG Y, et al. Study on the influence of lithofacies types on the formation and evolution of fracture: A case study of Longmaxi Formation in Northwest Guizhou [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(1): 82-97.
- [12] 田鹤, 曾联波, 徐翔, 等. 四川盆地涪陵地区海相页岩天然裂缝特征及对页岩气的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 474-483.
- TIAN H, ZENG L B, XU X, et al. Characteristics of

- natural fractures in marine shale in Fuling area, Sichuan Basin, and their influence on shale gas [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41 (3): 474-483.
- [13] 熊敏, 陈雷, 陈鑫, 等. 海相页岩纹层特征、成因机理及其页岩气意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3490-3508.
- XIONG M, CHEN L, CHEN X, et al. Characteristics, genetic mechanism of marine shale laminae and its significance of shale gas accumulation [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2022, 53(9): 3490-3508.
- [14] 王小琼, 钟毅, 万有余, 等. 纹层对页岩力学性质的影响及其对水力压裂的启示[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(1): 92-100.
- WANG X Q, ZHONG Y, WAN Y Y, et al. The effect of lamina on the mechanical properties of shale and its enlightenment to hydraulic fracturing [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2025, 49(1): 92-100.
- [15] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 828-838.
- LIU B, SHI J X, FU X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 828-838.
- [16] 黄正良, 曹斌凤, 刘洋, 等. 纹层状页岩微观储层特征研究——以鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组为例[J]. 沉积学报, 2025, 43(4): 1251-1263.
- HUANG Z L, CAO B F, LIU Y, et al. Microscopic reservoir characteristics of laminated shales: A case study of the Wulalike Formation at the western margin of the Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(4): 1251-1263.
- [17] 武瑾, 李海, 杨学锋, 等. 深层海相页岩纹层类型、组合及其对储层品质的影响——以四川盆地南部泸州区块龙马溪组一段一亚段为例[J]. 石油学报, 2023, 44(9): 1517-1531.
- WU J, LI H, YANG X F, et al. Types and combinations of deep marine shale laminae and their effects on reservoir quality: A case study of the first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou Block, south Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1517-1531.
- [18] 华柑霖, 吴松涛, 邱振, 等. 页岩纹层结构分类与储集性能差异——以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(2): 281-296.
- HUA G L, WU S T, QIU Z, et al. Lamination texture and its effect on reservoir properties: A case study of Longmaxi Shale, Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 281-296.
- [19] 吴松涛, 朱如凯, 罗忠, 等. 中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 62-72.
- WU S T, ZHU R K, LUO Z, et al. Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central-western basins in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27 (5): 62-72.
- [20] 马占荣, 白海峰, 刘宝宪, 等. 鄂尔多斯西部地区中一晚奥陶世克里摩里期—乌拉力克期岩相古地理[J]. 古地理学报, 2013, 15(6): 751-764.
- MA Z R, BAI H F, LIU B X, et al. Lithofacies palaeogeography of the Middle-Late Ordovician Kelimoli and Wulalike Ages in western Ordos Area [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2013, 15(6): 751-764.
- [21] 刘子铭, 付斯一, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中一晚奥陶世沉积演化特征及古环境分析[J]. 矿物岩石, 2024, 44(2): 177-193.
- LIU Z M, FU S Y, WEI L B, et al. Sedimentary evolution characteristics and paleoenvironment analysis of the Ordovician in the western margin of the Ordos Basin [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2024, 44(2): 177-193.
- [22] 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 737-747.
- LIU C Y, ZHAO H G, WANG F, et al. Attributes of the mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 737-747.
- [23] 包洪平, 邵东波, 武春英, 等. 鄂尔多斯西缘冲断带南段构造特征及其对古生界天然气成藏演化的影响[J]. 地质科学, 2018, 53(2): 434-457.
- BAO H P, SHAO D B, WU C Y, et al. The structural characteristics of south segment of western Ordos thrust belt, and its influence on gas reservoir forming of Palaeozoic [J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 2018, 53(2): 434-457.
- [24] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1255-1269.

- HE D F, BAO H P, KAI B Z, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(10): 1255-1269.
- [25] 魏嘉怡, 张雷, 王红伟, 等. 鄂尔多斯盆地西缘南段古生界油藏地质特征及其构造演化与成藏耦合关系[J]. *地球科学*, 2025, 50(5): 1933-1952.
- WEI J Y, ZHANG L, WANG H W, et al. Geological characteristics and their coupling relationship between structural evolution and reservoir formation of Paleozoic oil reservoirs in the southern section of the western edge of the Ordos Basin [J]. *Earth Science*, 2025, 50(5): 1933-1952.
- [26] 席胜利, 李文厚, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系乌拉力克组沉积特征及其控源作用[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 1013-1022.
- XI S L, LI W H, HUANG Z L, et al. Sedimentary characteristics and controlling effect on source rocks in Wulalike Formation of Ordovician in Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2024, 54(6): 1013-1022.
- [27] 于洲, 黄正良, 李维岭, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组海相页岩岩相类型及优质储层发育特征[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 23-33.
- YU Z, HUANG Z L, LI W L, et al. Lithofacies types and high-quality reservoir development characteristics of marine shale in the Middle Ordovician Wulalike Formation, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 23-33.
- [28] 周浩, 王晨辉, 时凤, 等. 基于双能 CT 和 Maip-SCAN 的岩石分类和选样新方法——以玛湖凹陷页岩油储层为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2025, 44(1): 227-240.
- ZHOU H, WANG C H, SHI F, et al. A new method for rock classification and sample selection based on dual-energy CT and MaipSCAN: A case study of shale oil reservoirs in the Mahu Depression [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2025, 44(1): 227-240.
- [29] 白斌, 邹才能, 朱如凯, 等. 四川盆地九龙山构造须二段致密砂岩储层裂缝特征、形成时期与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(4): 526-535.
- BAI B, ZOU C N, ZHU R K, et al. Characteristics, timing and controlling factors of structural fractures in tight sandstones of the 2nd member of Xujiahe Formation in Jiulong Mountain structure, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(4): 526-535.
- [30] 曾联波, 马诗杰, 田鹤, 等. 富有机质页岩天然裂缝研究进展[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2427-2442.
- ZENG L B, MA S J, TIAN H, et al. Research progress of natural fractures in organic rich shale [J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2427-2442.
- [31] 丁文龙, 王垚, 王生晖, 等. 页岩储层非构造裂缝研究进展与思考[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 297-314.
- DING W L, WANG Y, WANG S H, et al. Research progress and insight on non-tectonic fractures in shale reservoirs [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(1): 297-314.
- [32] 解经宇, 陆洪智, 陈磊, 等. 龙马溪组层状页岩微观非均质性及力学各向异性特征[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(3): 67-77.
- XIE J Y, LU H Z, CHEN L, et al. Microscopic heterogeneity and mechanical anisotropy of the laminated shale in Longmaxi Formation [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(3): 67-77.

(编辑 雷雁林)