



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, 西安 710069;

2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 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: 鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组页岩气勘探获得突破, 其中下部乌三段富硅质页岩为主要含气层段。乌三段页岩裂缝发育, 形成了重要储集空间和渗流通道, 影响了气藏分布和试气情况。岩相类型和沉积结构对页岩裂缝发育有非常重要的影响, 但目前对该问题研究较薄弱, 制约了乌三段页岩裂缝成因和分布的深入认识。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, 系统描述页岩岩相和结构、裂缝几何特征, 讨论岩相和结构对裂缝发育的影响。结果发现: 乌三段页岩主要发育纹层状页岩岩相, 岩心-微观尺度上灰岩、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0.5mm, 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。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, 形成复杂裂缝网络, 改善了岩石渗流能力。纹层状页岩为乌拉力克组优势储集岩相, 是页岩气勘探“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

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 Bin Feng¹, LIU Yang²,
LUO Xiaorong¹, Yan Wei², CHENG Ming³, LI Yishu¹, ZHAO Bowei¹

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

收稿日期:

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)。

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, E-mail: cao_bin Feng@126.com。

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, Hebei 066004, China)

Abstract: A breakthrough has been made in the exploration of shale gas in the Wulalike Formation in the western margin of the Ordos Basin. The siliceous shales in the third member of the Wulalike Formation are the main gas bearing layer. Fractures are well developed in the third member, forming important pore spaces and migration channels, and affecting distribution of gas reservoirs and gas test results. Lithofacies type and sedimentary structure have very important influence on shale fracture development. However, this issue has been weakly understood so far, affecting the in-depth understanding of genesis and distribution of shale fractures in the third member of the Wulalike Formation. Based on detailed core observations, combined with MaipSCAN mineral scan, dual-energy CT scan and rock mechanics log, lithofacies types and structures, and fracture geometric characteristics are systematically described, and influence of lithofacies and structures on fracture development is discussed. The results show that the shales in the third member of the Wulalike Formation mainly contain laminated shale lithofacies, and limestone and siliceous laminae are frequently interbedded at core to micro scale. Horizontal fractures are most abundant (>70% of total fractures), and the width is generally less than 0.5 mm, followed by high-angle and low-angle fractures. High-angle fractures are frequently filled with calcite, while low-angle and horizontal fractures are mostly unfilled. Fractures are most developed in laminated shales, and lamina density is strongly positively correlated with horizontal fracture density. Laminae aggravate shale mechanical heterogeneity. Laminated shale has low Poisson's ratio and high Young's modulus. Lamina interface acts as a mechanical weak surface. Horizontal and high-angle fractures form complex fracture networks, which improves seepage rock capacity. The laminated shales are important reservoir lithofacies of the Wulalike Formation and comprise "sweet spot" for shale gas exploration.

Key words: 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位置,构造演化历史复杂,晚期构造活动强烈。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储集条件,但规模开启断层邻近区域也易导致天然气快速逸散,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^[1,4-6]。

已有学者发现研究区不同钻井之间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],占总孔隙度比重为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]。长英质页岩比粘土质页岩裂缝发育程度高^[9-11]。页岩常见发育纹层状、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]。纹层发育影响矿物成分和岩石力学性质的变化,加剧了页岩非均质性^[13,15]。纹层界面作为页岩内部力学薄弱面,易沿其发生破裂^[9,12-14,16]。页岩中不同类型纹层岩石力学性质差异大,影响裂缝扩展路径^[9,11,13-14]。与钙质纹层对应力传递无明显的遏

止作用不同,粘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富集^[4-6,9,14,16]。然而,目前对乌三段页岩该问题研究较薄弱,制约了裂缝成因和分布的深入认识。本文针对乌拉力克组乌三段,系统统计描述岩心尺度裂缝类型、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,探究页岩岩相类型、纹层结构对裂缝发育的影响作用,旨在揭示纹层结构与裂缝发育内在关系,为页岩气高效勘探开发提供理论支撑。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地是我国第一大含油气盆地,其

西缘地区南北延伸近 300km,东西宽为 150km,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]。

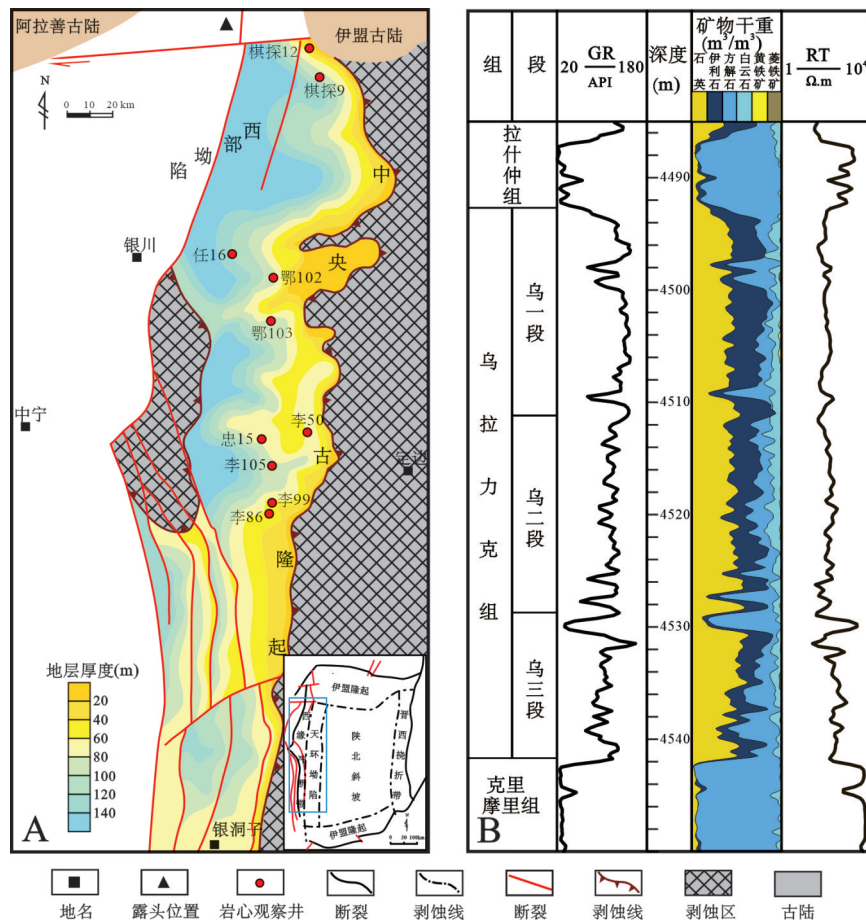


图1 鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组残余地层厚度分布图(a)(据于洲等^[27],修改);李86井单井综合柱状图(b)(据黄正良等^[16])

Fig. 1 Residual strata distribution map of the Wulalike Formation in the western margin of the Ordos Basin (a) (after Yu Zhou et al. ^[27]); Single well comprehensive column of well Li 86 (b) (after Huang Zhengliang et al. ^[16])

乌拉力克组地层厚度一般为20~150m(图1a),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(图1b)^[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20~80m,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;Ro介于1.5%~1.9%,为高成熟-过成熟,处于生气阶段^[1,3]。

2 研究方法

本研究对鄂102、鄂103、棋探12井、李86井、李105等10口井钻井岩心进行了细致观测并取样。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倾角、密度及填充度等参数,探讨页岩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,针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X射线并应用先进的图谱算法,实现页岩矿物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2.5cm×2.5cm的块体,通过氩离子剖光实现样品表面平整化,采用镀碳仪喷涂≥40nm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1μm,识别步长为2μm/64μm,电镜图像分辨率为400nm~1μm。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1.0mm,X/Y轴150μm。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

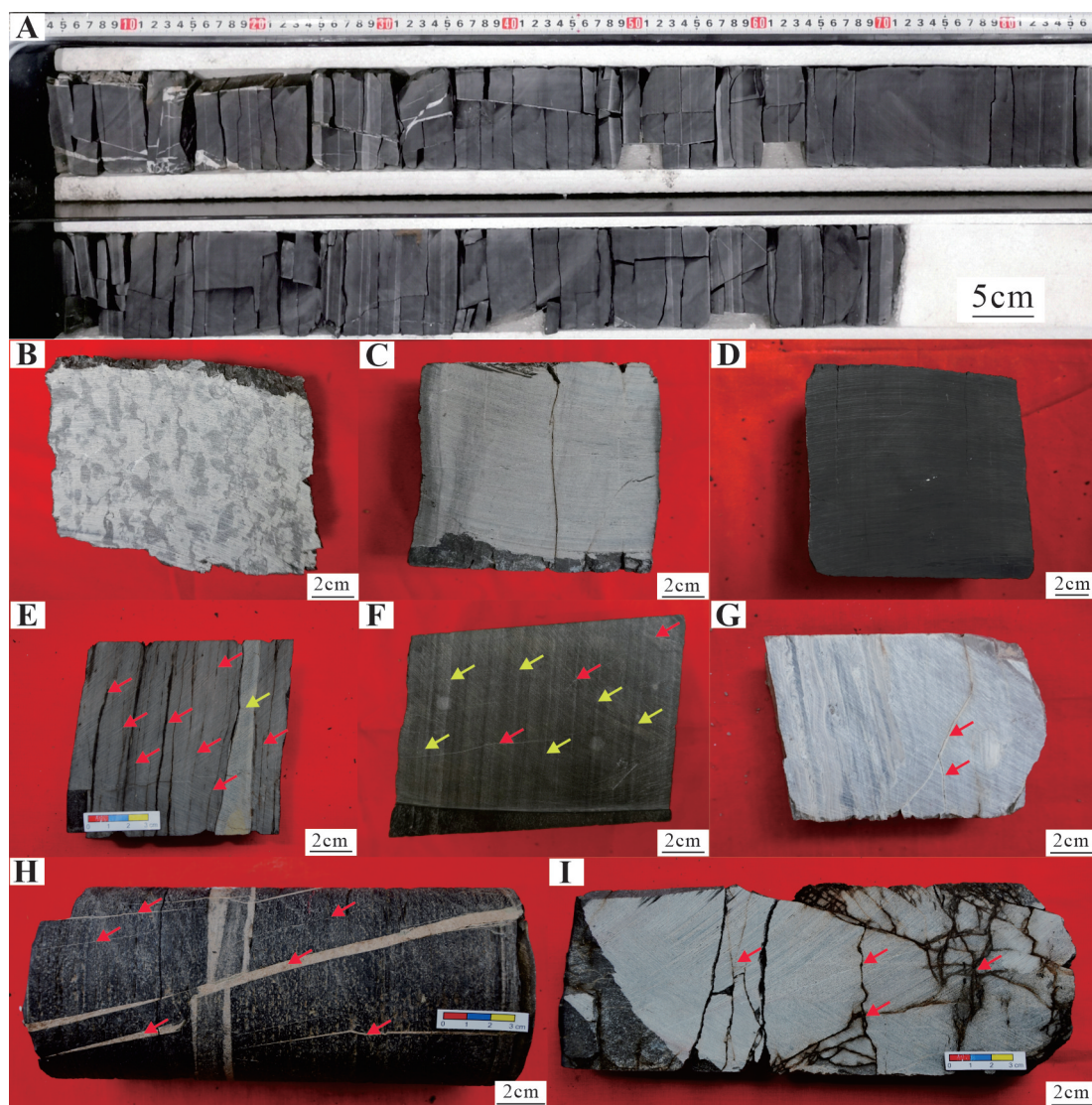
3.1 沉积结构和岩相类型

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(图2A)。借鉴黄正良等^[16]研究成果,本文将页岩划分为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2cm(图2B~C,图3A~B)。块状页岩总体上也表现为均质,主要是富硅质页岩,单层厚度也大于2cm(图2D,图3C)。纹层状页岩颜色、矿物组成在垂向上发生明显变化,灰岩(方解石含量大于50%)纹层和灰质(方解石含量介于25~50%)纹层发育普遍,单层厚度小于2cm,富硅质纹层和灰岩纹层或灰质纹层相互间隔产出(图2E~F)。灰岩和灰质纹层发育具有极强非均质性,纹层厚度变化大,综合薄片和岩心观测,可分为厘米级(图2E,图3D)、毫米级(图2F,图3E)、微米级(图3F)。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米扫描覆盖。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中将岩心图像、CT扫描灰度图像以及密度和Pe数据进行比对观察,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扫描显示低灰度值、低密度和低Pe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2.71g/

cm³)和高Pe值(均值5.2be)。全直径双能CT扫描分析结果显示,棋探11井4955~4970.7m层段纹层发育密度主要为40~220条/m(图4-5)。



A. 乌拉力克组乌三段岩心产出状态,忠15井,4219.96m-4221.62m;B. 砾屑灰岩,块状结构,棋探9井,4718.32m;C. 泥晶灰岩,块状结构,鄂103井,3956.06m;D. 块状页岩,棋探9井,4740.24m;E. 纹层状页岩,纹层(黄色箭头)厚度大,介于1cm与2cm之间,并可见水平裂缝(红色箭头),李99井,4429.40m;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,3736.53m;G. 低角度裂缝(红色箭头),李105井,4251.3m;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,4245.76m;I. 网状裂缝(红色箭头)发育,李99井,4424.32m

of the Wulalike Formation

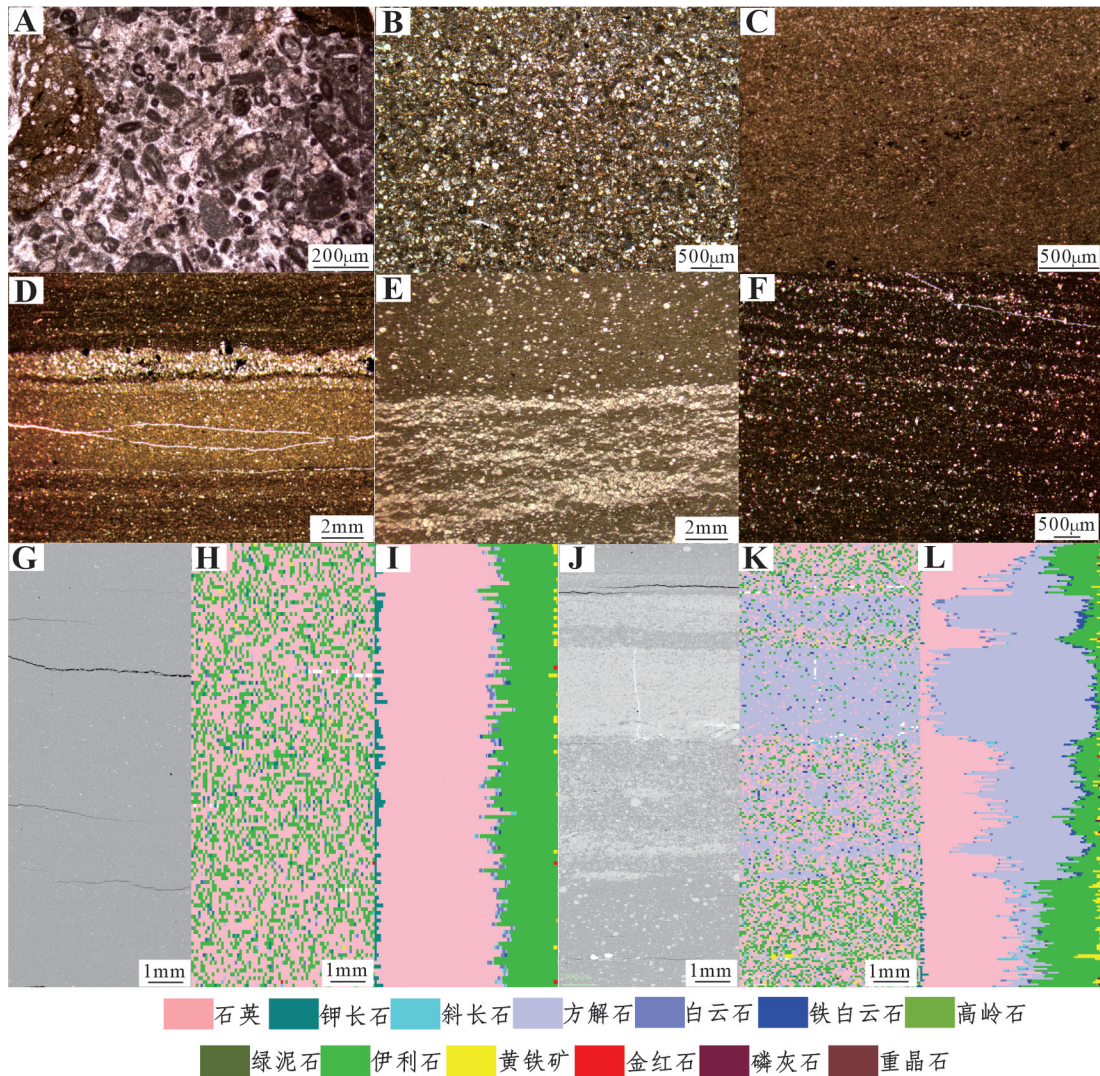
图2 乌拉力克组乌三段页岩典型岩相、裂缝岩心照片

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

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]。参考该划分方案,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(图2A,2E,2G~I)。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°,主要沿着纹层界面或与其有小于5°的夹角。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(图6)。



A. 块状砾屑灰岩, 李105井, 4266.07m, 单偏光; B. 块状泥晶灰岩, 李105井, 4253.60m, 单偏光; C. 块状页岩, 李50井, 4088.82m, 单偏光; D. 纹层状页岩中厘米级方解石纹层, 李105井, 4262.98m, 单偏光; E. 纹层状页岩中毫米级方解石纹层, 鄂102井, 3685.63m, 单偏光; F. 纹层状页岩中微米级纹层, 李105井, 4274.00m, 单偏光; G. 块状页岩背散射照片, 惠探5井, 4557.45m, 正交光; H. 块状页岩 MaipSCAN 矿物扫描图, 惠探5井, 4557.45m; I. 块状页岩 MaipSCAN 矿物含量统计图, 惠探5井, 4557.45m; J. 纹层状页岩背散射照片, 含毫米级方解石纹层, 惠探5井, 4551.26m; K. 纹层状页岩 MaipSCAN 矿物扫描图, 惠探5井, 4551.26m; L. 纹层状页岩 MaipSCAN 矿物含量统计图, 惠探5井, 4551.26m

member shales of the Wulalike Formation

图3 乌拉力克组乌三段页岩光学薄片及 MaipSCAN 观测照片

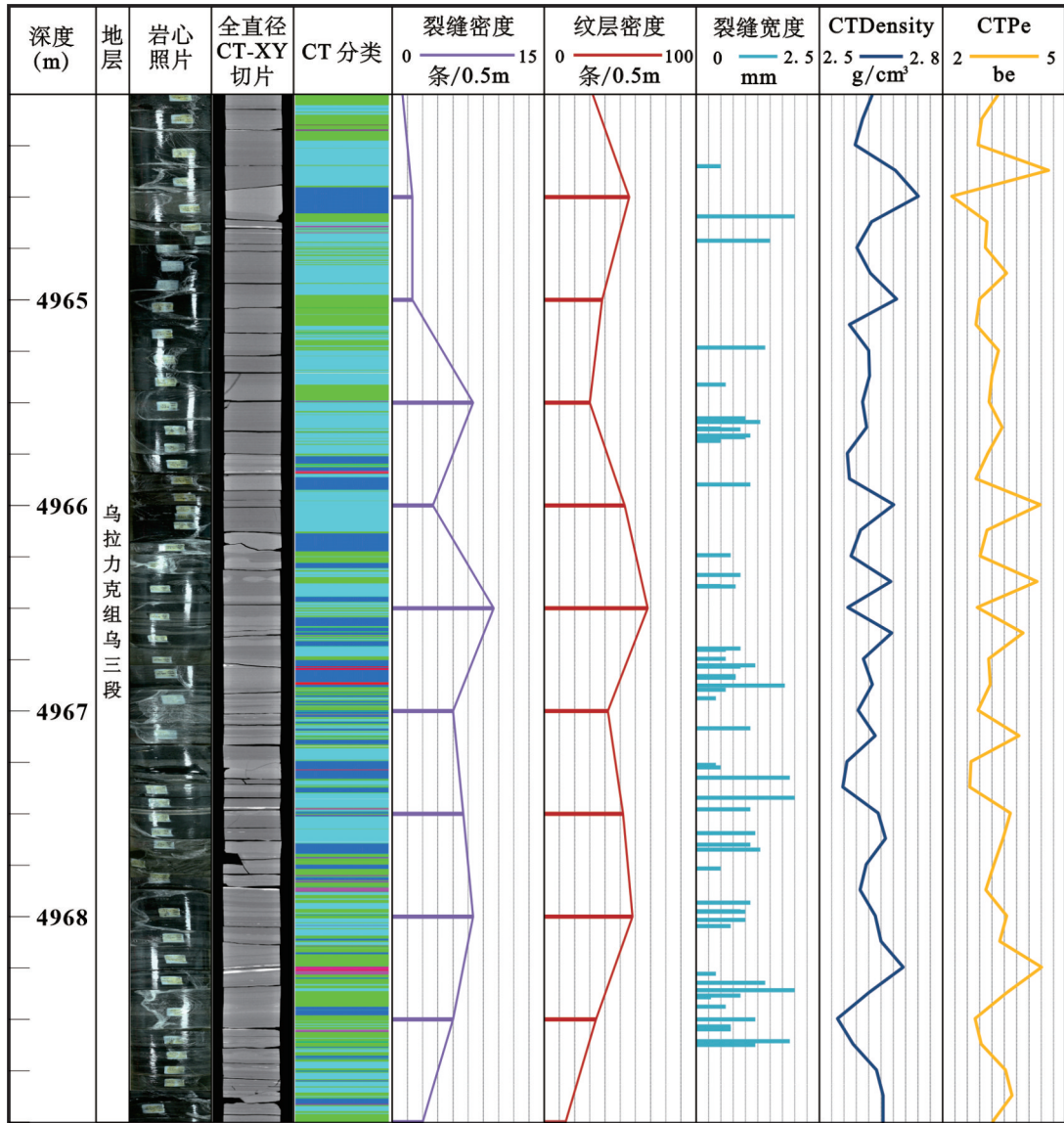
Fig. 3 Optical thin section images and MaipSCAN observations in the third

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,但未完全填满)、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(图7A,图7B)。裂缝填充矿物多为方解石(图2H)。

3.4 裂缝宽度及裂缝密度

裂缝宽度即裂缝两壁垂直距离,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(<0.1mm)、小裂缝(0.1~<1mm)、中裂缝(1~<10mm)、大裂缝(10~100mm)和巨裂缝(>100mm)^[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,发现总体上乌三段高角度、低角度裂缝宽度小于1.5mm(图



of the Wulalike Formation of well Qitan 11

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

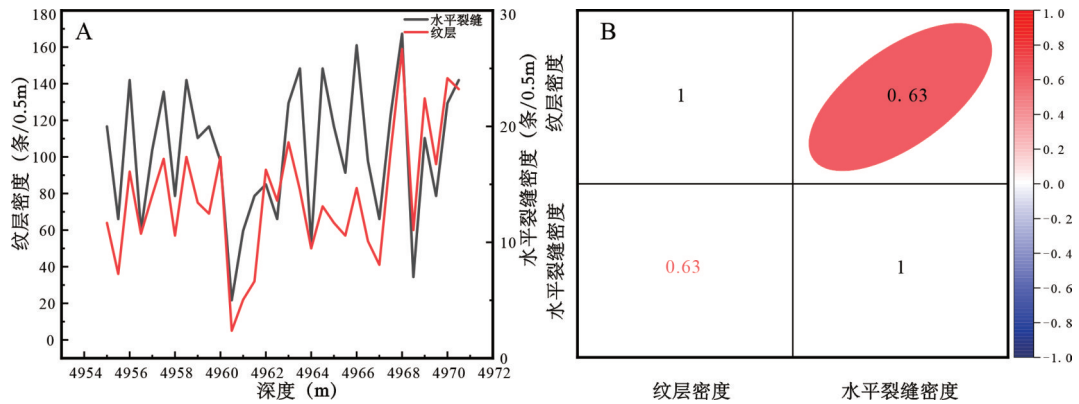


图5 棋探11井乌拉力克组乌三段页岩水平裂缝密度、纹层密度相关图

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

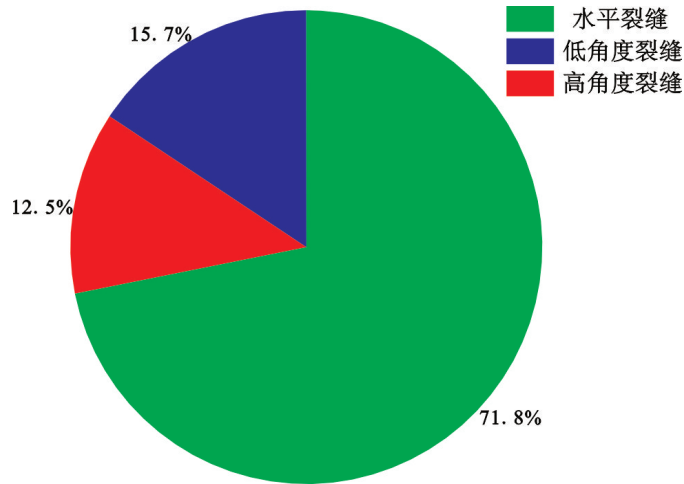


图6 乌拉力克组乌三段页岩不同类型裂缝发育占比图

Fig. 6 Proportion of different types of fractures in the third member shales of the Wulalike Formation

7C,图7D),但是局部可见宽度大于10mm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,其介于0.2~2mm,多数小于0.5mm(图4)。

高角度裂缝的密度主要为1~8条/m(图7E),低角度裂缝的密度主要为1~5条/m(图7F)。借助全直径双能CT扫描统计水平裂缝的密度,结果显示主要介于15~60条/m之间(图5)。

4 讨论

前人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^[5]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;他们也发现页岩高脆性与燕山期以来的冲断褶皱与滑脱作用相配置,控制了裂缝发育程度。

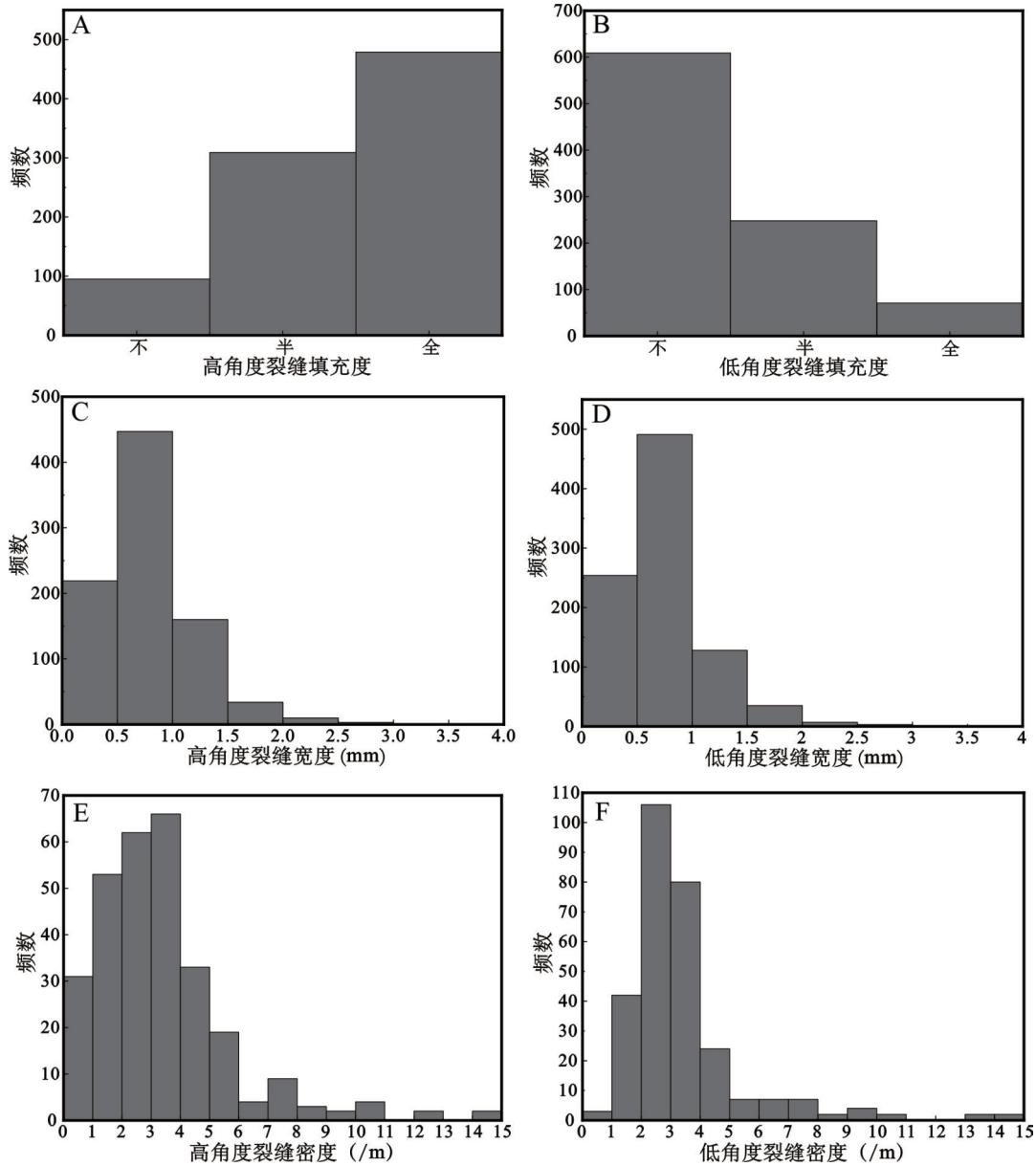
实际上,页岩岩相类型和沉积结构是控制裂缝发育非常重要的地质因素,不可忽略^[8-14]。本研究将乌三段页岩划分为纹层状页岩、块状灰岩及块状页岩。统计结果显示纹层状页岩中高角度与低角度裂缝数量显著高于块状灰岩和块状页岩

(图8A,图8B)。

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扫描数据揭示了纹层密度与水平裂缝发育存在显著响应关系,即纹层越发育,水平裂缝越发育(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皮尔逊相关系数 $r=0.63$,表现为强正相关性(图5B)。纹层的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],在一定程度上纹层的发育密度决定了水平裂缝发育及展布^[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,块状灰岩>纹层状页岩>块状页岩(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。块状页岩岩相裂缝发育程度差,可见部分低角度。纹层状页岩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(图2A,图11)。



of the Wulalike Formation

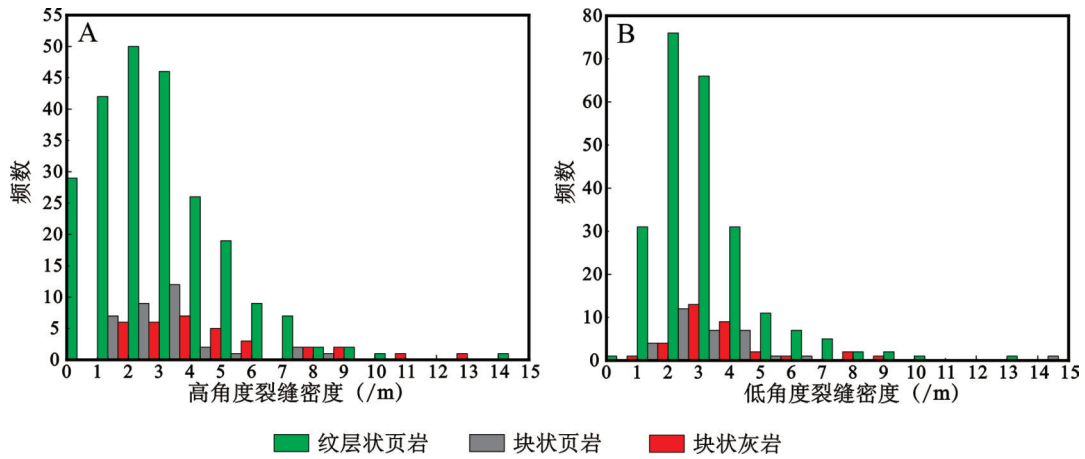
图7 乌拉力克组乌三段页岩裂缝参数统计柱状图

Fig. 7 Statistical histogram of fracture parameters in the third member shales

前人对页岩储层的研究,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,影响着页岩中油气的富集、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4522~4526m和4532~4535m,试气高产,产气量达 $15.22 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ (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。

论文研究所获认识属阶段性成果,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和纹层组合中基质孔隙和裂缝的空间结构关系。也需要关注裂缝期次和页岩气运聚成藏的匹配关系,理清不同期裂缝对页岩气成藏及晚期破坏的差异化作用。



in the third member shales of the Wulalike Formation

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

5 结论

(1)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、低角度裂缝宽度小于1.5mm,水平裂缝宽度多数小于0.5mm。

(3)纹层密度与水平裂缝密度存在显著正相关。纹层状页岩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储集空间与运移通道。纹层状页岩为乌拉力克组优势储集岩相,是油气勘探的“甜点”。

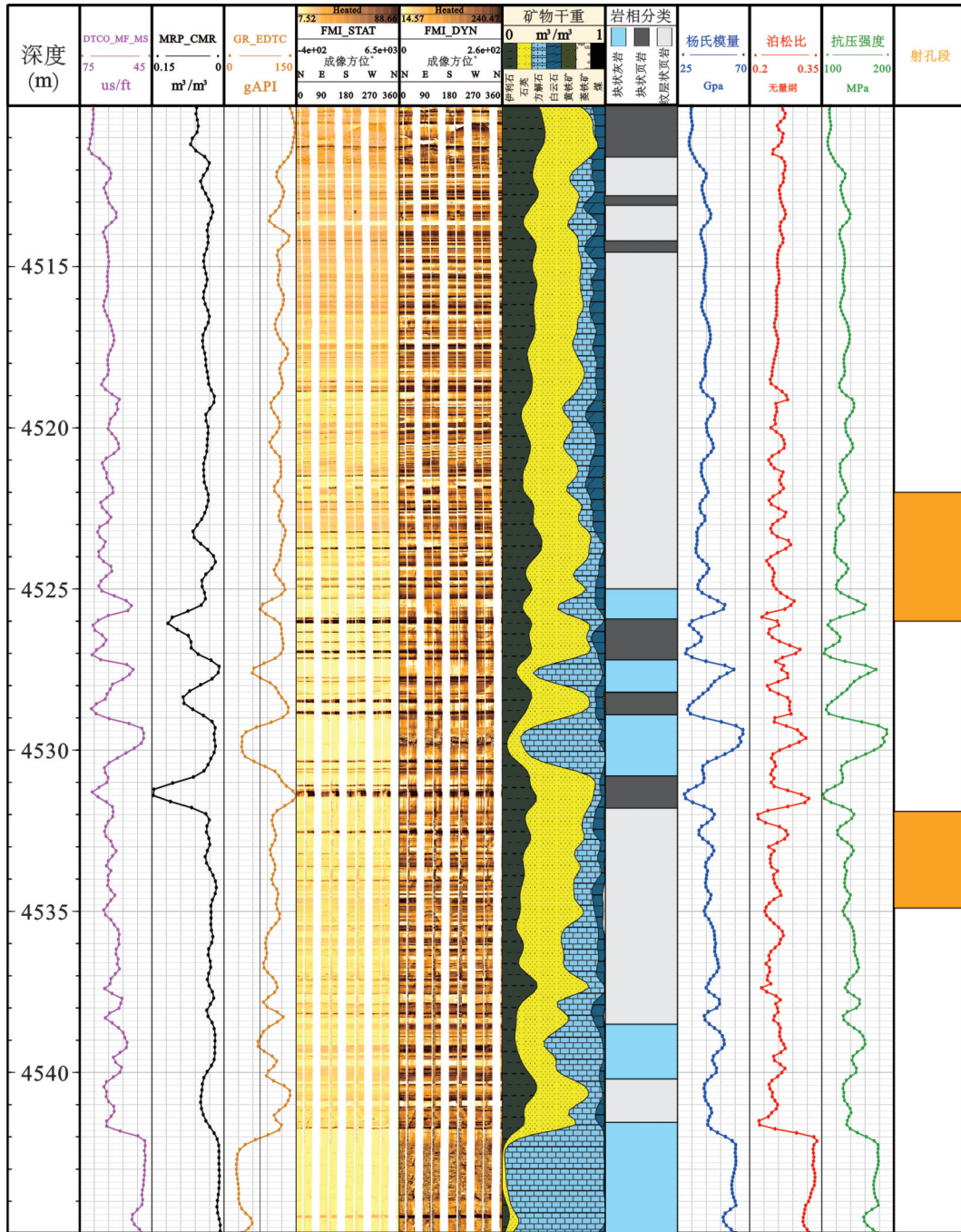
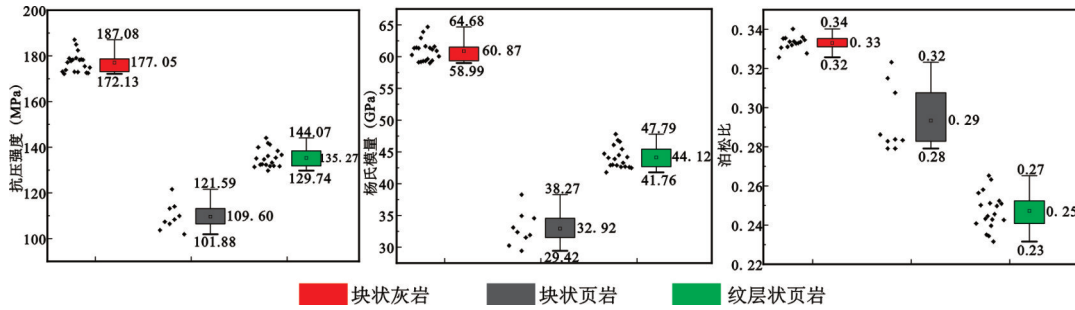


图9 李86井乌拉里克组乌三段页岩综合柱状图

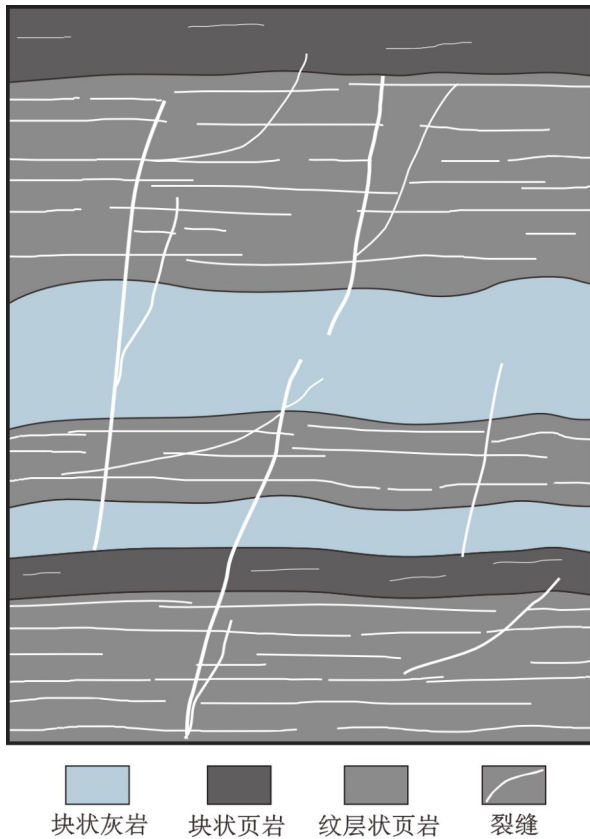
Fig 9 Synthetic column of in the third member shales of the Wulalike Formation of well Li 86



in the third member shales of the Wulalike Formation

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



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

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 Suotang, Fu Jinhua, Xi Shengli, 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 Shengli, Mo Wuling, Liu Xinshe, 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 Shengli, Liu Xinshe, Huang Zhengliang, 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 Rubiao, Wang Yuman, Huang Zhengliang, 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 Yuman, Zhou Shangwen, Huang Zhengliang, 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 Yuman, Huang Zhengliang, Ma Zhanrong, 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 Wenlong, Xu Changchun, KaiJiu, 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 Lianbo, Lv Wenya, Xu Xiang, 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[2025-06-22].
- Jiang Rui, He Jianhua, Deng Mingquan, 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 [2025 - 06 - 22].
- [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(05): 1-16.
- Yong Rui, Wu Jianfa, Liu Yong, 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 Yuyang, Li Hu, Wang Ying, 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 He, Zeng Lianbo, Xu Xiang, 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 Min, Chen Lei, Chen Xin, 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 Xiaoqiong, Zhong Yi, Wan Youyu, 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 Bo, Shi Jiixin, Fu Xiaofei, 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, 曹斌风, 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/OL]. *沉积学报*, 2024[2025-04-24].
- Huang Zhengliang, Cao Binfeng, Liu Yang, et al. Microscopic Reservoir Characteristics of Laminated Shales: A case study of the Wulalike Formation at the western margin of the Ordos Basin [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024 [2025-04-24].
- [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—亚段为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1517-1531.
- Wu Jin, Li Hai, Yang Xuefeng, et al. Types and combinations of deep marine shale laminae and their ef-

- fects on reservoir quality: a case study of the first sub-member 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 Ganlin, Wu Songtao, Qiu Zhen, 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 Songtao, Zhu Rukai, Luo Zhong, 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 Zhanrong, Bai Haifeng, Liu Baoxian, 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 Ziming, Fu Siyi, Wei Liubin, 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(6): 737-747.
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Wang Fenget al. Attributes of the Mesozoic Structure on the West Margin of the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005 (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 Hongping, Shao Dongbo, Wu Chunying, et al. The structural characteristics of south segment of western Ordos thrust belt, and its influence on gas reservoir forming of Plaeozoic [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 Dengfa, Bao Hongping, Baizekai, 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/OL]. *地球科学*, 2024[2025-04-24].
- Wei Jiayi, Zhang Lei, Wang Hongwei, 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/OL]. *Earth Science*, 2024 [2025-04-24].
- [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 Shengli, Li Wenhui, Huang Zhengliang, 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.
- Yuzhou, Huang Zhengliang, Li Weiling, 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MaipSCAN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 Hao, Wang Chenhui, Shi Feng, 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 Bin, Zou Caineng, Zhu Rukai, 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 Lianbo, Ma Shijie, Tian He, et al. Research Progress of Natural Fractures in Organic Rich Shale [J]. *Earth Science*, 2023, 48 (7) : 2427-2442.
- [31] 丁文龙, 王焱, 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 Wenlong, Wang Yao, Wang Shenghui, 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 jingyu, Lu Hongzhi, Chen Lei, 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.