

天然气地球科学
Natural Gas Geoscience
ISSN 1672-1926, CN 62-1177/TE

《天然气地球科学》网络首发论文

题目：柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝发育特征与测井识别
作者：赵星，王贵文，李亚锋，孙权伟，赖锦，申颖浩，伍坤宇，李栋，王松，韩宗晏
收稿日期：2024-07-15
网络首发日期：2024-10-15
引用格式：赵星，王贵文，李亚锋，孙权伟，赖锦，申颖浩，伍坤宇，李栋，王松，韩宗晏. 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝发育特征与测井识别[J/OL]. 天然气地球科学. <https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20241015.0920.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2024.09.009

柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝发育特征与测井识别

赵星^{1,2}, 王贵文^{1,2}, 李亚锋³, 孙权伟^{1,2}, 赖锦^{1,2}, 申颖浩¹, 伍坤宇³,

李栋^{1,2}, 王松^{1,2}, 韩宗晏^{1,2}

(1.中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2.中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3.中国石油青海油田分公司勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202)

摘要:天然裂缝作为控制页岩油储层产能的重要因素, 实现其精准识别与特征分析对页岩油气甜点优选与效益开发意义重大。以柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段混积型页岩油储层为研究对象, 利用岩心、薄片、扫描电镜、常规及新技术测井等资料, 总结了研究区天然裂缝发育类型和特征, 建立了裂缝测井综合识别模式, 实现了裂缝的测井连续识别与表征。在此基础上, 结合裂缝参数和岩心实验数据, 完成了裂缝发育程度和有效性分析。结果表明, 研究区天然裂缝主要分为构造裂缝、成岩裂缝和异常高压裂缝。构造裂缝多为高角度裂缝, 充填程度高; 成岩裂缝多为水平裂缝, 充填程度低; 异常高压裂缝产状杂乱, 多为充填裂缝。裂缝在下干柴沟组上段 VI 油层组最为发育, V 油层组次之, IV 油层组相对发育较少。整体表现为低角度未充填裂缝发育数量最多, 水平未充填裂缝集中发育程度最高, 高角度未充填裂缝有效性最好。研究区现今水平最大主应力方向为 NE—SW 向, 未充填裂缝走向多与现今水平最大主应力方向夹角小于 30°, 易产生较好的压裂效果。充填裂缝主体走向与现今水平最大主应力方向夹角大于 40°, 不易提升压裂效果。研究成果预期可为湖相混积型页岩油储层天然裂缝识别评价与甜点优选提供理论和方法支撑。

关键词:天然裂缝; 发育特征; 测井识别; 混积型页岩油储层; 下干柴沟组上段; 英雄岭; 柴达木盆地

中图分类号: TE132.1

文献标志码: A

0 引言

我国陆相页岩油资源丰富, 近年来已在准噶尔、柴达木、鄂尔多斯、松辽、渤海湾等盆地取得积极进展, 是我国油气增储上产的主力领域^[1-5]。陆相页岩油储层通常以矿物类型多样、岩性复杂多变、纵向薄互层叠置、储层非均质性强为特征^[6-9], 导致成岩和构造演化过程中岩石受力状态不均, 易形成复杂的天然裂缝网络系统^[10-13]。天然裂缝的存在可有效改善储层物性, 也会影响人工压裂缝网的扩展方式和展布形态, 对页岩油储层的油气品质和开采效益具有决定性作用^[14-15]。因此, 针对陆相页岩油储层中的天然裂缝开展系列研究对页岩油气甜点评价和开发方案设计具有重要意义。

多年来, 国内外学者聚焦于天然裂缝发育特征、形成机理、识别方法和分布预测等方

收稿日期: 2024-07-15; 修回日期: 2024-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41872133); 中国石油青海油田分公司—中国石油大学(北京)战略合作项目(编号: 研 2022-勘探-技术-06)联合资助。

作者简介: 赵星(1994-), 男, 甘肃泾川人, 博士研究生, 主要从事储层沉积学和测井地质学研究. Email: zhaox0402@163.com。

通信作者: 王贵文(1966-), 男, 山西大同人, 博士, 教授, 主要从事沉积学、储层地质学与测井地质学研究和教学工作. Email: wanggw@cup.edu.com.

面进行研究，并在致密砂岩储层和碳酸盐岩储层中取得了重大突破^[16-23]。近年来，随着页岩油气勘探开发的不断深入和技术理论的不断革新，前人^[24-25]意识到页岩油储层中的天然裂缝具有明显的特殊性和复杂性，因此在裂缝发育特征、主控因素、成因机制和识别方法等方面做了大量工作^[26-32]。然而多数研究主要针对海相页岩储层，以陆相页岩油储层或混积型页岩油储层为主的研究相对较少，尤其在该类储层多尺度天然裂缝测井识别及表征方面的研究极为匮乏^[33-38]，导致天然裂缝发育特征、分布规律等方面的深入认识不足，严重制约了陆相页岩油储层的有效勘探和效益开发。

柴达木盆地英雄岭地区古近系下干柴沟组上段发育一套厚层的咸湖相混积型页岩油储层，地质资源量丰富，是柴达木盆地页岩油气勘探开发的主战场^[2,8,39]。本文以柴达木盆地英雄岭地区古近系下干柴沟组上段湖相混积型页岩油储层为研究对象，基于岩心、薄片、扫描电镜、常规测井、成像测井和阵列声波测井等资料，系统总结了研究区天然裂缝发育类型及特征，建立了混积型页岩油储层裂缝测井综合识别图版和识别模式，明确了不同类型裂缝的测井响应特征，实现了储层裂缝的测井连续识别。在此基础上，结合裂缝参数和岩心分析化验数据，分析了裂缝发育程度和有效性特征。研究成果以期为研究区页岩油甜点优选提供指导，为湖相混积型页岩油储层天然裂缝研究提供理论与方法支撑。

1 区域地质背景

柴达木盆地地处青藏高原北部，是中国西部唯一以新生界为主的大型陆相山间含油气盆地，盆地平均海拔为 3000 m，面积约为 $1.21 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，整体形态呈西宽东窄的不规则菱形^[40-42]。依据盆地构造格局和地球物理特征，可将整个盆地划分为柴西坳陷、柴北断陷和三湖坳陷 3 个一级构造单元[图 1 (a)]。英雄岭构造带位于柴达木盆地西部柴西坳陷中的茫崖次级凹陷内，是形成于喜马拉雅运动晚期的构造隆起带，研究区内常见多种褶皱、滑脱变形和断裂构造^[43]。新生代以来经历了古近纪断坳、中新世—上新世早期弱挤压和上新世晚期—第四纪强烈挤压阶段 3 个构造演化阶段^[44-45]。受东昆仑和阿尔金两大左行走滑断裂影响，英雄岭构造带从古近纪的伸展应力背景转换为新近纪的走滑挤压背景，复杂的变化使其样式变得特殊^[46]。干柴沟区块作为英雄岭页岩油的先导示范区和重点突破区，位于英雄岭构造带中北部，是自盆地西北向东南方向倾没的大型鼻状斜坡，现今构造简单^[47]，平面上呈近矩形状展布。

在阿尔金构造带、东昆仑构造带和祁连山构造带的共同控制下，柴达木盆地沉积了巨厚的中、新生代地层^[42]。英雄岭地区主要发育新生代地层，自下而上分别为路乐河组 (E_{1+2})、下干柴沟组下段 (E_3^1)、下干柴沟组上段 (E_3^2)、上干柴沟组 (N_1) 和下油砂山

组 (N_2^1) 5 套地层^[44-45]。其中, 湖相混积型页岩油储层主要发育于下干柴沟组上段 (E_3^2), 自上而下分为 6 个油层组, 上部 (I—III 油层组) 含灰泥岩和含石膏泥岩与盐岩叠置发育, 泥质灰云岩和灰质白云岩分别发育于上部顶底。下部 (IV—VI 油层组) 以黏土质页岩和灰云质页岩频繁交互为主, 灰质白云岩和粉砂岩分散其中^[8,48]。下干柴沟组上段 (E_3^2) 整体地层厚度为 1000~2000 m, 混积页岩层系厚度超千米, 厚度占比较大[图 1 (b)]。

柴达木盆地的形成和演化主要分为四个阶段, 其中渐新世—中新世 (E_3^2 — N_1) 时期为湖盆的扩张沉降阶段^[49], 该时期湖盆受季节性降雨变化影响显著, 使其在 E_3^2 沉积期经历了干旱到湿润再到干旱的古气候变化^[50], 湖盆沉积也相应经历了半咸化—咸化—盐湖的演化过程^[51]。沉积早期 (VI 油层组沉积期) 为半咸化阶段, 此时盆地迎来大规模湖侵, 相对温暖湿润的气候和适宜的盐度促进了湖盆内生物的繁殖和生长, 使有机质得以富集和保存^[8]。与此同时, 由于构造演化和气候变化的共同影响, 盆地的沉积中心不断迁移, 英雄岭地区成为柴西坳陷的沉积中心^[46], 泥页岩在该区大规模沉积, 为后期优质烃源岩发育奠定了基础。沉积中期 (V—IV 油层组沉积期) 为咸化阶段, 盆地气候相对寒冷干旱, 物源供给减弱, 蒸发作用强烈, 湖盆水体盐度升高。沉积晚期 (III—I 油层组沉积期) 为盐湖阶段, 受全球降温影响, 盆地气候进一步寒冷干旱, 不断减弱的物源补给、持续加强的蒸发作用和快速下降的湖平面, 导致湖盆面积快速收缩, 水体盐度显著变高, 膏盐岩在研究区连片发育, 为页岩油的富集和保存提供了条件^[8,51-53]。

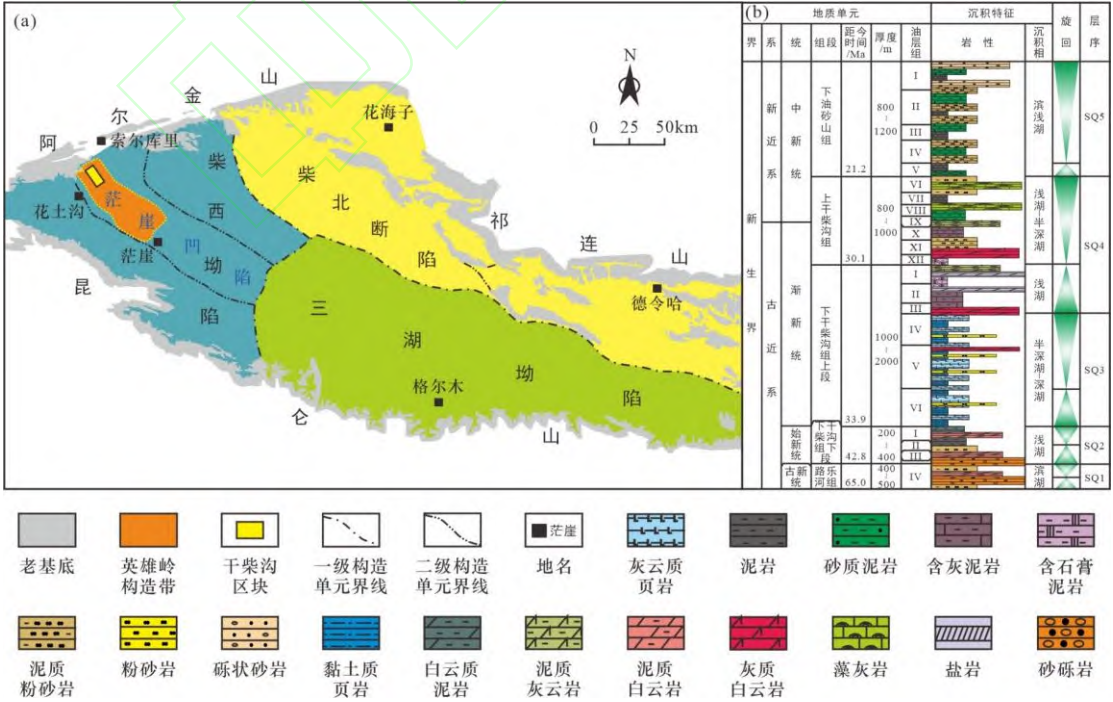


图 1 柴达木盆地英雄岭地区构造位置(a)^[8]和地层柱状图(b)^[8]

Fig. 1 Structural location(a)^[8] and stratigraphic histogram(b)^[8] of the Yingxiongling area in Qaidam Basin

2 储层特征

2.1 岩石学特征

柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段页岩油储层矿物成分多样、岩性复杂多变。研究区 C908 井 228 块岩心样品的 X 射线衍射实验结果显示, 下干柴沟组上段页岩油储层矿物组分包含碳酸盐矿物(方解石、白云石和铁白云石)、长英质矿物(石英、钾长石和钠长石)、黏土矿物以及少量硬石膏、黄铁矿和菱铁矿等(图 2)。其中, 碳酸盐矿物含量介于 4.4%~72.1%之间, 方解石和白云石发育程度相当; 长英质矿物含量介于 7.5%~67.5%之间, 石英发育程度高, 长石以钠长石为主; 黏土矿物含量介于 9.7%~47.3%之间, 主要为伊利石和伊/蒙混层; 黄铁矿、菱铁矿和硬石膏含量普遍低于 5%(图 2)。各类矿物含量在纵向上频繁变化, 加之高含量的脆性矿物, 为复杂缝网的产生和大规模压裂改造提供了条件。

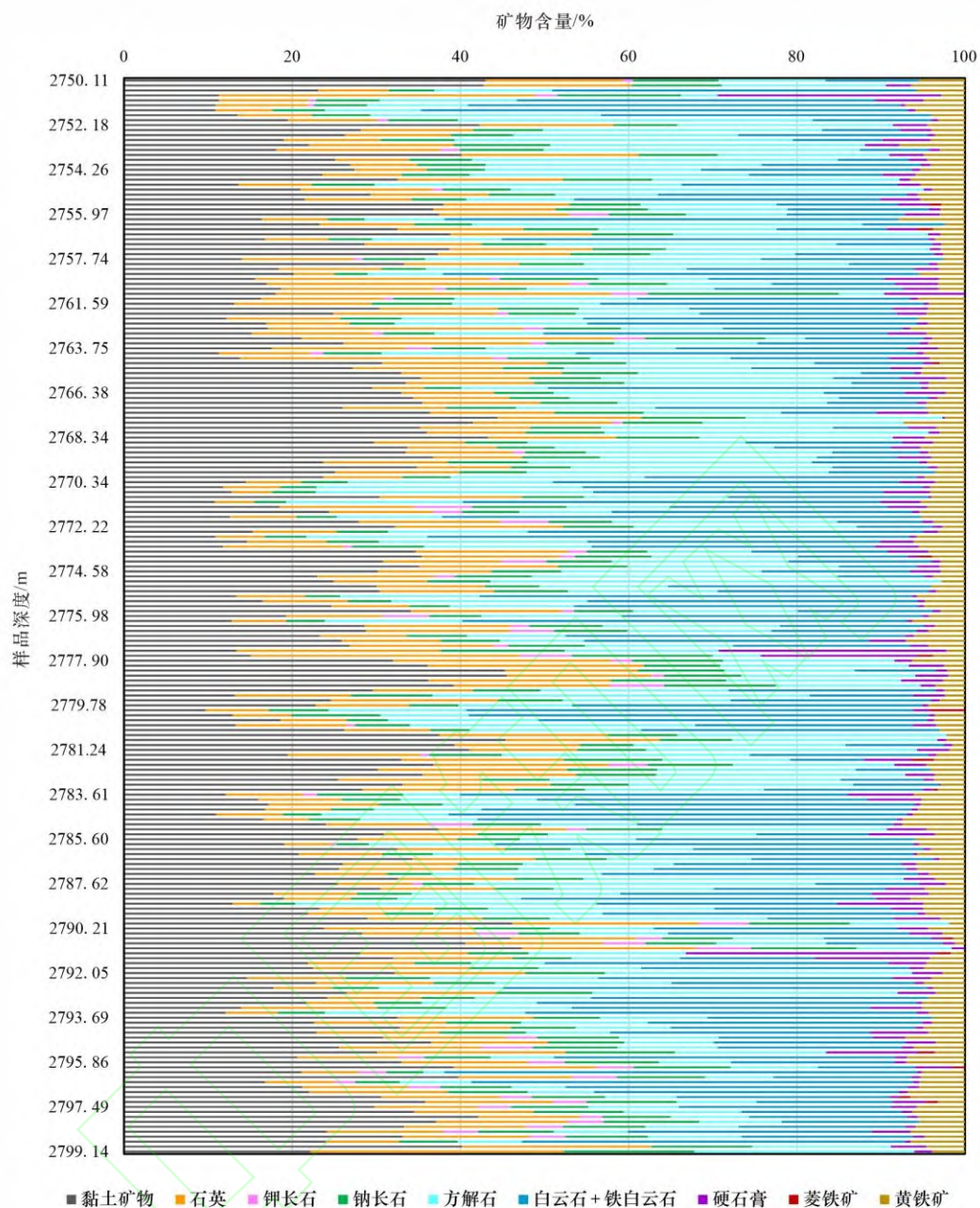


图2 柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段页岩油储层岩心样品 X 射线衍射分析结果 (C908 井)

Fig. 2 The x-ray diffraction analysis results of shale oil reservoir core samples from the upper member of the Lower Ganchaigou Formation in the Yingxiongling area, Qaidam Basin (Well C908)

此外，依据全岩“碳酸盐矿物—黏土矿物—长英质矿物”含量特征，将粒度小于 $62\mu\text{m}$ 的细粒沉积岩初步分为 4 类：I 灰/云岩类，II 泥页岩类，III 粉砂岩类，IV 细粒混积岩类，研究区样品以灰/云岩类和细粒混积岩类为主（图 3）。结合岩心、薄片观察结果，考虑沉积构造特征，可在 4 类基础上细分出 13 种岩性。研究区样品主要为 I₁ 层状灰/云岩、III₁ 块状粉砂岩、IV₁ 纹层状细粒混积岩（三元混积型页岩）、IV₂ 纹层状黏土—碳酸盐质细粒混积岩（灰云质页岩）、IV₃ 纹层状碳酸盐—长英质细粒混积岩（长英质页岩）、IV₄ 纹层

状长英质—黏土质细粒混积岩（黏土质页岩）（图 3，表 1）。

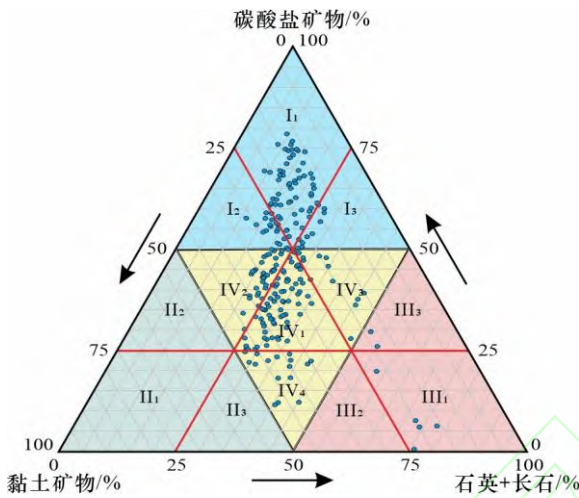


图 3 柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段页岩油储层矿物学三角图（C908 井）

Fig. 3 Ternary diagrams of mineralogy in shale oil reservoirs from the upper member of the Lower Ganchaigou Formation in the Yingxiongling area, Qaidam Basin (Well C908)

表 1 柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段岩性特征

Table 1 The lithological characteristics of the upper member of the Lower Ganchaigou Formation in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

序号	岩性	特征描述	矿物组成（%）
I ₁	层状灰/云岩	灰白色，层状构造，成分以泥晶方解石和泥晶白云石为主	黏土矿物<25，石英+长石<25，碳酸盐矿物>50，白云石>方解石=灰质白云岩，白云石<方解石=白云质灰岩
III ₁	块状粉砂岩	灰黑色，块状构造，成分以石英和长石为主，可见少量黏土矿物和碳酸盐矿物	黏土矿物<25，石英+长石>50，碳酸盐矿物<25
IV ₁	三元混积型页岩	灰褐色，纹层状构造，泥晶碳酸盐、黏土矿物和细粒的石英、长石混合分布	黏土矿物 25~50，石英+长石 25~50，碳酸盐矿物 25~50
IV ₂	灰云质页岩	灰褐色，纹层状构造，成分以泥晶碳酸盐和黏土矿物为主	黏土矿物 25~50，石英+长石<25，碳酸盐矿物 25~50
IV ₃	长英质页岩	灰褐色，纹层状构造，成分以细粒石英、长石以及泥晶碳酸盐为主	黏土矿物<25，石英+长石 25~50，碳酸盐矿物 25~50
IV ₄	黏土质页岩	炭灰色，纹层状构造，成分以黏土矿物和细粒的石英、长石为主	黏土矿物>25，石英+长石 25~50，碳酸盐矿物<25

层状灰/云岩在岩心上呈灰白色，发育层状构造，垂向上颜色和矿物变化频率低[图 4（a）]，镜下可见大量泥晶方解石和泥晶白云石以及少量黏土矿物和长英质矿物混杂分布

[图 4 (i)]。块状粉砂岩在岩心上呈灰黑色，发育块状构造，垂向上颜色和矿物无明显变化[图 4 (b)]，镜下可见大量细粒石英、长石和少量黏土矿物以及黄铁矿杂乱分散[图 4 (j)]。灰云质页岩在岩心上呈灰褐色，可见纹层密集发育，垂向上颜色随矿物成分高频变化[图 4 (c)]，镜下可见碳酸盐纹层与黏土矿物纹层、混积纹层频繁互层[图 4 (f)]。黏土质页岩在岩心上呈炭灰色，发育纹层状构造，纹层密度高[图 4 (d)]，镜下可见大量黏土矿物纹层与混合纹层互层[图 4 (g)]。长英质页岩发育较少，镜下可见长英质纹层分布于大量细粒长英质矿物和碳酸盐矿物中[图 4 (h)]。三元混积型页岩发育纹层状构造，镜下可见多个混积纹层与黏土矿物纹层和碳酸盐纹层频繁互层[图 4 (e)]。

2.2 储集空间特征

柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段页岩油储层储集空间具多类型、多尺度特征。岩心、薄片和扫描电镜观察结果显示，研究区储集空间包括晶间孔、溶蚀孔、有机质孔和裂缝等。晶间孔是研究区内广泛发育的孔隙类型，主要以白云石晶间孔为主，镜下常呈三角形、菱形和不规则四边形状，孔径以纳米级—微米级为主[图 4 (k)]。溶蚀孔以晶间溶孔为主，镜下常呈长条状或蜂窝状，孔隙边缘不规则，孔径多为微米级[图 4 (l)]。有机质孔发育较少且多与黄铁矿伴生，镜下可见其形态呈近圆形，孔径小，多为纳米级孔隙[图 4 (m)]。除基质孔隙外，微米级至分米级的天然裂缝也是构成研究区储集空间的重要部分。小孔径的基质孔隙在裂缝的沟通下可大幅提升储集空间和孔隙连通性^[54]。

2.3 储层物性特征

储层物性对油气储量和生产效率具有决定性影响。研究区 954 块岩心样品的实测孔隙度和渗透率数据显示，储层整体孔隙度介于 0.02%~15.38%之间，平均值为 3.36%，渗透率介于 $(0.01\sim18.66)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间，平均值为 $0.40\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，储层整体呈特低孔低渗特征且孔渗相关性较差（图 5）。其中，无裂缝样品孔隙度普遍小于 12%，渗透率普遍小于 $0.1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。有裂缝样品孔隙度普遍小于 6%，渗透率普遍大于 $0.1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。无裂缝样品的孔隙度普遍大于有裂缝样品，而渗透率分布特征恰好相反（图 5）。统计结果表明，储层裂缝可极大提高储层的渗流能力，有效改善储层物性，故针对研究区混积型页岩油储层开展天然裂缝识别和特征研究至关重要。

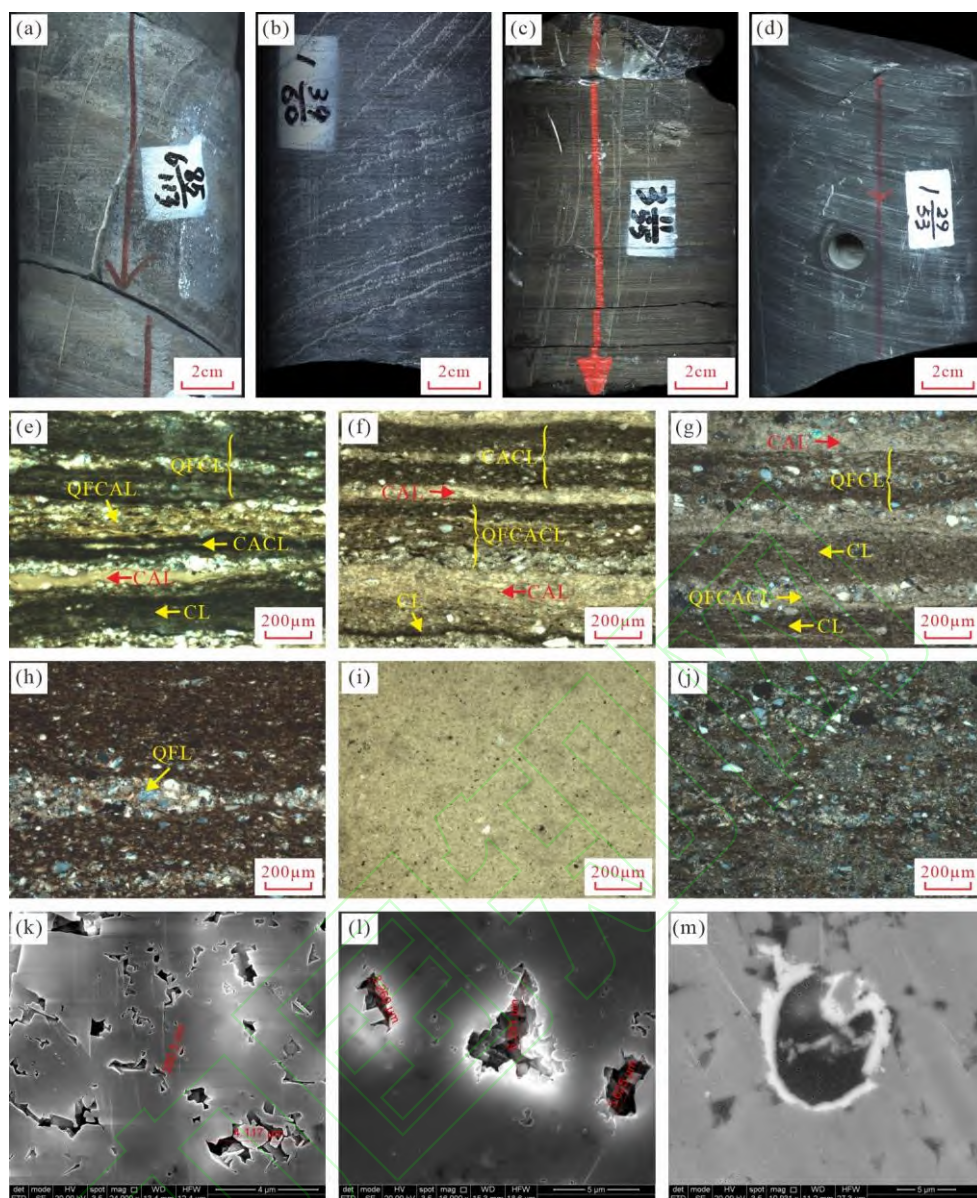


图4 柴达木盆地英雄岭地区页岩油储层岩石学特征和储集空间类型

Fig. 4 Petrological characteristics and reservoir space types of shale oil reservoirs in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

(a) 灰质白云岩, 具层状构造, 纹层不发育, C908 井, 3228.33~3228.48m, 岩心外表面; (b) 粉砂岩, 块状构造, C14 井, 3835.73~3835.88m, 岩心外表面; (c) 灰云质页岩, 具纹层状构造, 纹层发育密集且平直, C2-4 井, 2811.00~2811.15m, 岩心外表面; (d) 黏土质页岩, 具纹层状构造, 纹层发育密集, C12 井, 3524.69~3524.84m, 岩心外表面; (e) 三元混积型页岩, 黏土矿物纹层、碳酸盐矿物纹层和混合纹层频繁互层, C2-4 井, 2812.18m, 正交偏光; (f) 灰云质页岩, 主体为碳酸盐矿物纹层, 可见混合纹层和黏土矿物纹层, C908 井, 2753.66m, 正交偏光; (g) 黏土质页岩, 主体为黏土矿物纹层, 与碳酸盐矿物纹层和混合纹层频繁互层, C13 井, 3726.66m, 正交偏光; (h) 长英质页岩, 主体为细粒长英质矿物和碳酸盐矿物, 可见长英质矿物纹层发育其中, C12 井, 3522.42m, 正交偏光; (i) 灰质白云岩, 主体为泥晶白云石, 少量长英质矿物零散分布, C908 井, 2755.00m, 正交偏光; (j) 含灰泥质粉砂岩, C14 井, 3834.90m, 正交偏光; (k) 晶间孔, C2-4 井, 2800.34m, 扫描电镜, 氩离子剖光; (l) 晶间溶孔, C906 井, 3237.92m, 扫描电镜, 氩离子剖光; (m) 有机质孔, C13 井, 4225.74m, 扫描电镜, 氩离子剖光. 注: CL 为黏土矿物纹层; CAL 为碳酸盐矿物纹层; QFL 为长英质矿物 (石英+长石) 纹层; QFCL 为以长英质矿物和黏土矿物为主的混合纹层; QFCAL 为以长英质矿物和碳酸盐矿物为主的混合纹层; CACL 为以碳酸盐矿物和黏土矿物为主的混合纹层; QFCACL

为长英质矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物混合纹层。

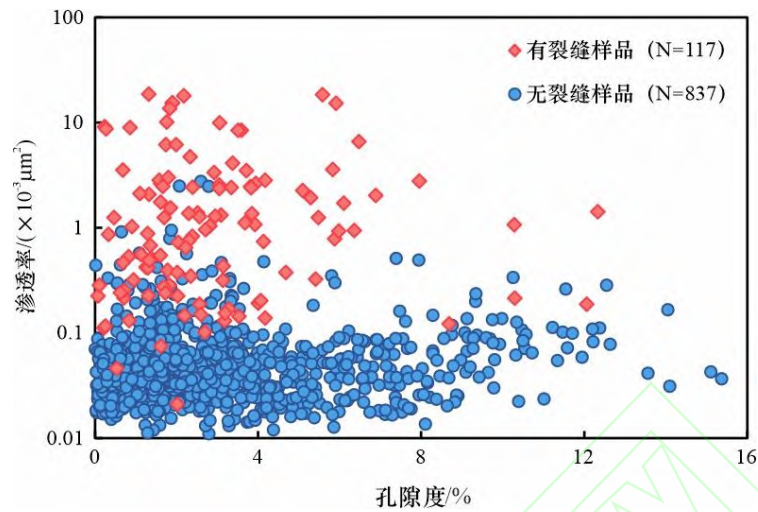


图 5 柴达木盆地英雄岭地区页岩油储层岩心实测孔隙度和渗透率交会图
Fig. 5 Cross-plot of experimental porosity and permeability of shale oil reservoir cores in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

3 裂缝发育特征

3.1 裂缝发育类型

天然裂缝形成机理复杂，影响因素多样，分类方案众多^[33,55]。本文以地质成因、裂缝产状和力学性质等为主要依据，对柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段页岩油储层天然裂缝类型进行了划分。根据地质成因，可将研究区天然裂缝分为构造裂缝、成岩裂缝和异常高压裂缝（表 2）。其中，构造裂缝是指储层在构造变形作用下形成的不连续面状构造^[56]，根据力学性质，可进一步分为剪切裂缝和张性裂缝。成岩裂缝是指储层在沉积和成岩过程中受成岩改造作用而形成的天然裂缝^[36]，根据成因及产状，可细分为层理缝、收缩缝和溶蚀缝。异常高压裂缝是指储层内部流体压力超过岩石破裂压力时形成的裂缝^[33]，受最小主应力为张应力影响，常具拉张特征^[24]。

3.2 裂缝发育特征

岩心、薄片和扫描电镜可以直观反映不同尺度的天然裂缝特征。观察发现，剪切裂缝在研究区广泛发育，缝面平直光滑，延伸距离远，常见裂缝切穿整块岩心，倾角变化大，缝宽较小，充填性由未充填到完全充填，充填物以硬石膏为主[图 6(a),图 6(b),图 6(d)]。张性裂缝大多缝面弯曲粗糙，常呈锯齿状延伸，延伸距离较短，裂缝倾角较大，多数近垂直层面发育，缝宽变化大，常被硬石膏和方解石充填[图 6(c)]。收缩缝在岩心上以“V”字型分布为主，裂缝整体规模小，延伸距离短，常被方解石全充填[图 6(f)]，镜下可见其多分布于矿物颗粒或晶粒之间，裂缝开度偏小，连续性差[图 6(l)]。层理缝在页岩储

层中亦称之为页理缝，岩心上可见其平行或近平行于层理展布，规模相对较小，缝面平直，倾角偏低，裂缝充填性从未充填到完全充填，充填物多为方解石和硬石膏[图 6（g）,图 6（h）]，镜下可见其沿纹层发育，连续性较好，常绕开矿物颗粒展布，裂缝开度变化小，充填程度低，多为未充填裂缝[图 6（i）]。溶蚀缝是矿物在差异性溶蚀作用下产生，裂缝规模变化大，边缘不规则，产状不稳定，镜下可见裂缝开度较小且变化快，延伸距离短，充填程度低，大多数未被充填[图 6（j）]。异常高压裂缝在岩心上呈不规则形态，发育规模小，延伸长度短，分布无规律，部分为透镜状，镜下可见其与缝合线、层理微裂缝等混杂出现，整体延伸距离短，充填程度高，充填物以硬石膏和方解石为主，多为无效裂缝[图 6（e）,图 6（k）]。

表 2 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝类型及特征

Table 2 Types and characteristics of natural fractures in shale oil reservoirs of Yingxiongling area, Qaidam Basin			
类型		成因	特征
构造裂缝	剪切裂缝	构造应力场中，岩石受剪切应力破裂而形成	缝面平直光滑，延伸距离远，倾角变化大
	张性裂缝	构造应力场中，岩石受张性应力破裂而形成	缝面弯曲粗糙，延伸距离较短，倾角较大
成岩裂缝	层理缝	沉积和成岩叠加作用下岩石沿力学薄弱面破裂而形成	平行或近平行于层理展布，缝面平直，倾角偏低，规模较小
	收缩缝	沉积成岩过程中由于矿物脱水收缩导致体积减小而形成	多呈 V 字型，延伸距离短，整体规模小
	溶蚀缝	岩石矿物在差异性溶蚀作用下形成	边缘不规则，产状不稳定，延伸距离短，规模变化大
异常高压裂缝	异常高压缝	有机质生烃或储层内部流体作用形成的异常压力超过岩石破裂压力时形成	形态不规则，发育规模小，延伸长度短，分布无规律

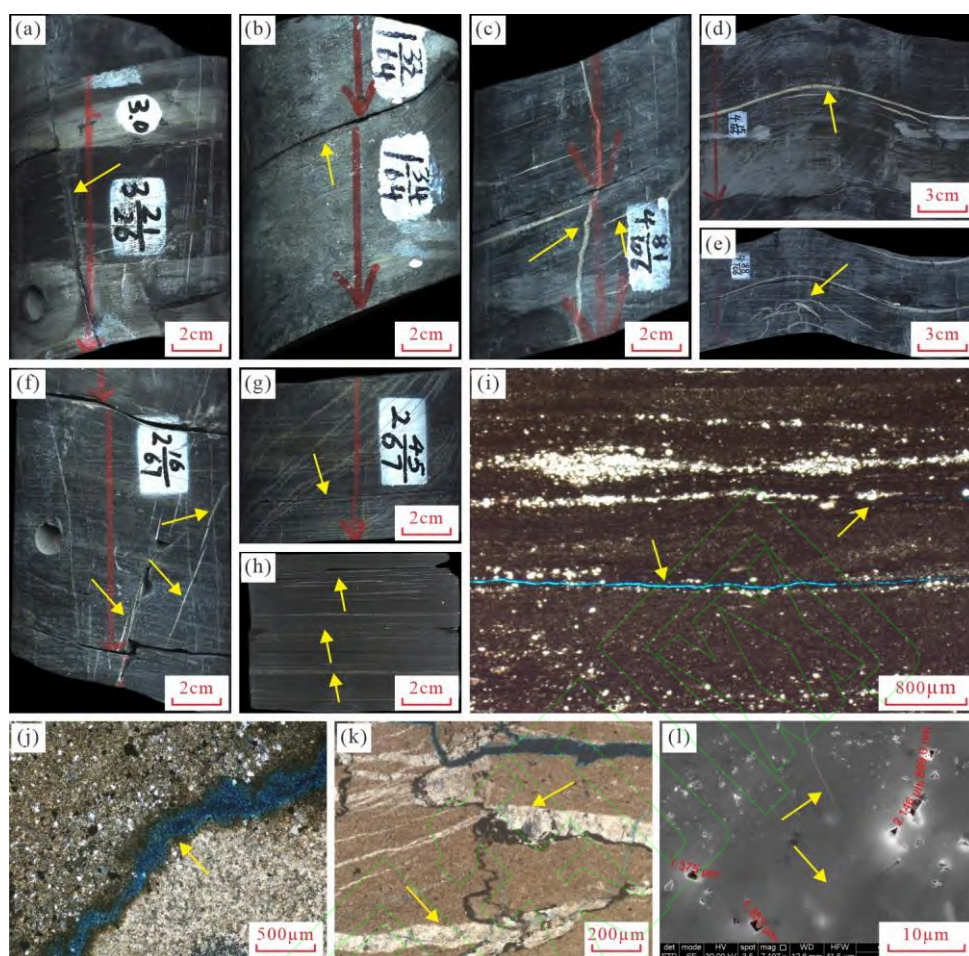


图6 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝特征

Fig. 6 Natural fracture characteristics of shale oil reservoirs in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

(a) 剪切裂缝, 高角度, 未充填, C13 井, 3732.46~3732.59m, 岩心外表面; (b) 剪切裂缝, 低角度, 未充填, C908 井, 2754.33~2754.46m, 岩心外表面; (c) 张性裂缝, 倾角近垂直, 硬石膏和方解石充填, C908 井, 2796.78~2796.91m, 岩心外表面; (d) 剪切裂缝, 倾角近水平, 硬石膏和方解石充填, C908 井, 2786.50~2786.76m, 岩心滚扫面; (e) 异常高压裂缝, 硬石膏和方解石充填, C908 井, 2797.57~2797.66m, 岩心滚扫面; (f) 收缩缝, 方解石充填, C13 井, 3723.19~3723.32m, 岩心外表面; (g) 层理缝, 未充填, C906 井, 3238.47~3238.54m, 岩心外表面; (h) 层理缝, 未充填, C2-4 井, 2799.64~2799.69m, 岩心剖面; (i) 层理缝, 未充填, C13 井, 4227.09m, 铸体薄片, 单偏光; (j) 溶蚀缝, C2-4 井, 2828.69m, 铸体薄片, 正交偏光; (k) 异常高压裂缝, 方解石和硬石膏充填, C12 井, 3563.73m, 铸体薄片, 正交偏光; (l) 收缩缝, C14 井, 3842.21m, 扫描电镜, 氦离子剖光

此外, 依据裂缝倾角大小, 可将上述天然裂缝分为垂直裂缝 ($70^{\circ} < \theta \leq 90^{\circ}$)、高角度裂缝 ($45^{\circ} < \theta \leq 70^{\circ}$)、低角度裂缝 ($20^{\circ} < \theta \leq 45^{\circ}$) 和水平裂缝 ($0^{\circ} < \theta \leq 20^{\circ}$)。岩心观察结果显示, 研究区构造裂缝多为高角度裂缝, 成岩裂缝则以水平裂缝为主[图 7 (a)]。同时, 根据裂缝充填情况, 也可将研究区裂缝分为充填裂缝和未充填裂缝。其中, 构造裂缝和异常高压裂缝多为充填裂缝, 以层理缝为主的成岩裂缝多为未充填裂缝[图 7 (b)]。此现象表明, 构造裂缝、异常高压裂缝和成岩裂缝成因期次明显不同。前人研究发现, 英雄岭构造带形成于中一晚喜马拉雅期^[45], 在上新世早期 (N_2^1 末期), 受昆仑山抬升影响, 英

雄岭地区在挤压变形和褶皱作用的叠加应力下形成大量构造裂缝^[57]。英雄岭地区在 E_3^2 沉积时期处于湖盆沉积中心，受咸化环境影响，膏盐层较为发育^[8,57]。膏盐层易流动、塑性强，且能够提供丰富的 Ca^{2+} ，后期充入断层与构造裂缝中并逐渐沉淀下来，形成充填物将断层与构造裂缝充填。此外，英雄岭地区下干柴沟组下段（ E_3^1 ）和上段（ E_3^2 ）的烃源岩在上新世中期—更新世时期（ N_2^2 —Q 时期）分别达到了生油高峰^[44,58]。膏盐岩层的覆盖与封堵以及不断增强的生烃强度，使得下覆地层中产生高压，形成异常高压裂缝。异常高压裂缝常具拉张特征^[24]，高压流体易充入裂缝中，并将携带的矿物沉淀下来，导致异常高压缝充填程度较高。成岩裂缝的形成贯穿于整个沉积和成岩过程。黏土矿物脱水收缩形成的收缩缝，发育连续性差、开度小，与周围孔隙连通性差，易导致孔隙流体中钙镁离子滞留沉淀后充填其中。而有机质生烃过程中产生的有机酸溶蚀矿物形成孔洞和溶蚀缝，形成时间多在大量生烃之后，受其他作用影响较小，因此研究区的溶蚀缝多为开启状态。层理缝是岩石沿力学薄弱面破裂而形成，沉积成岩以及构造演化整个过程均可产生层理缝。由于其特殊的性质，高压的阻碍压实、生烃流体的改造作用和局部构造应力，使其多为保持开启状态。

然而，由于取心成本高昂，取心资料的有限性难以支撑研究区天然裂缝的深入研究。因此，利用测井资料连续性好、纵向分辨率较高、获取成本相对较低的优势^[59]，实现裂缝的连续识别与评价，对研究区天然裂缝的深层次探索意义重大。

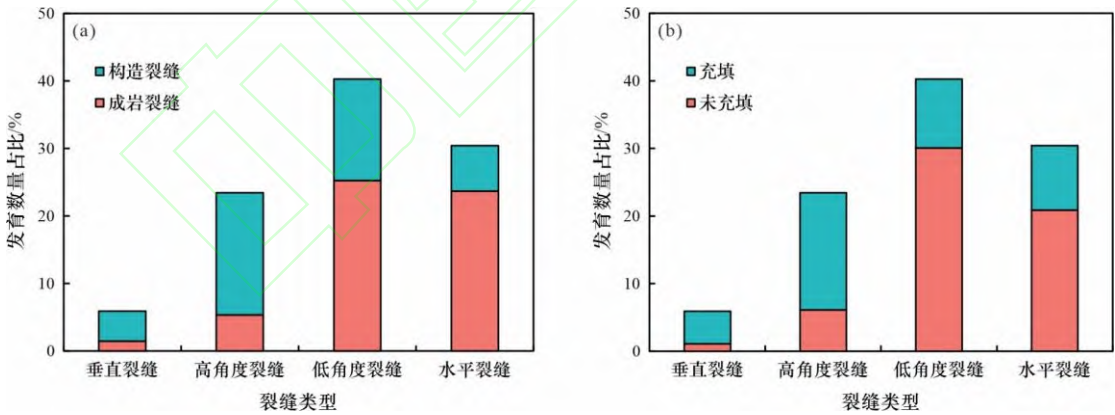


图 7 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝不同成因与充填情况占比统计

Fig. 7 Statistics on the proportions of different origins and filling conditions of natural fractures in shale oil reservoirs of the Yingxiongling area, Qaidam Basin

(a) 天然裂缝不同成因占比情况统计; (b) 天然裂缝充填情况统计

4 裂缝测井识别

4.1 常规测井识别

常规测井资料易于获取且应用广泛，利用其在裂缝发育处的响应特征，可在一定程度

上实现裂缝的定性和半定量识别。在裂缝发育处，常规测井通常呈现电阻率降低、伽马值升高、井径增大或者减小、声波时差增大、补偿中子升高以及密度减小的特征^[55]。然而，由于英雄岭页岩油储层矿物成分多样、混积特征明显、岩性复杂多变，导致岩性测井（自然电位、伽马和井径）对裂缝的响应效果极差。因此，针对研究区天然裂缝的常规测井识别主要以电阻率和孔隙度测井（声波时差、补偿中子和密度）为主。以 C14 井 3832~3868m 井段为例，依据上述测井曲线特征，共识别出 5 个裂缝发育段（图 8 红色标识段），经岩心和成像测井图像验证后，证实对应层段内裂缝发育。同时，不同产状或充填情况的裂缝，其常规测井响应特征展现出细微差别。未充填的水平裂缝或低角度裂缝，电阻率曲线以明显的负异常为主，声波时差、补偿中子和密度均降低。而充填的高角度裂缝，深、浅侧向电阻率曲线多为重合状态，无明显负异常现象，声波时差和补偿中子略微降低，密度略微升高（图 8）。

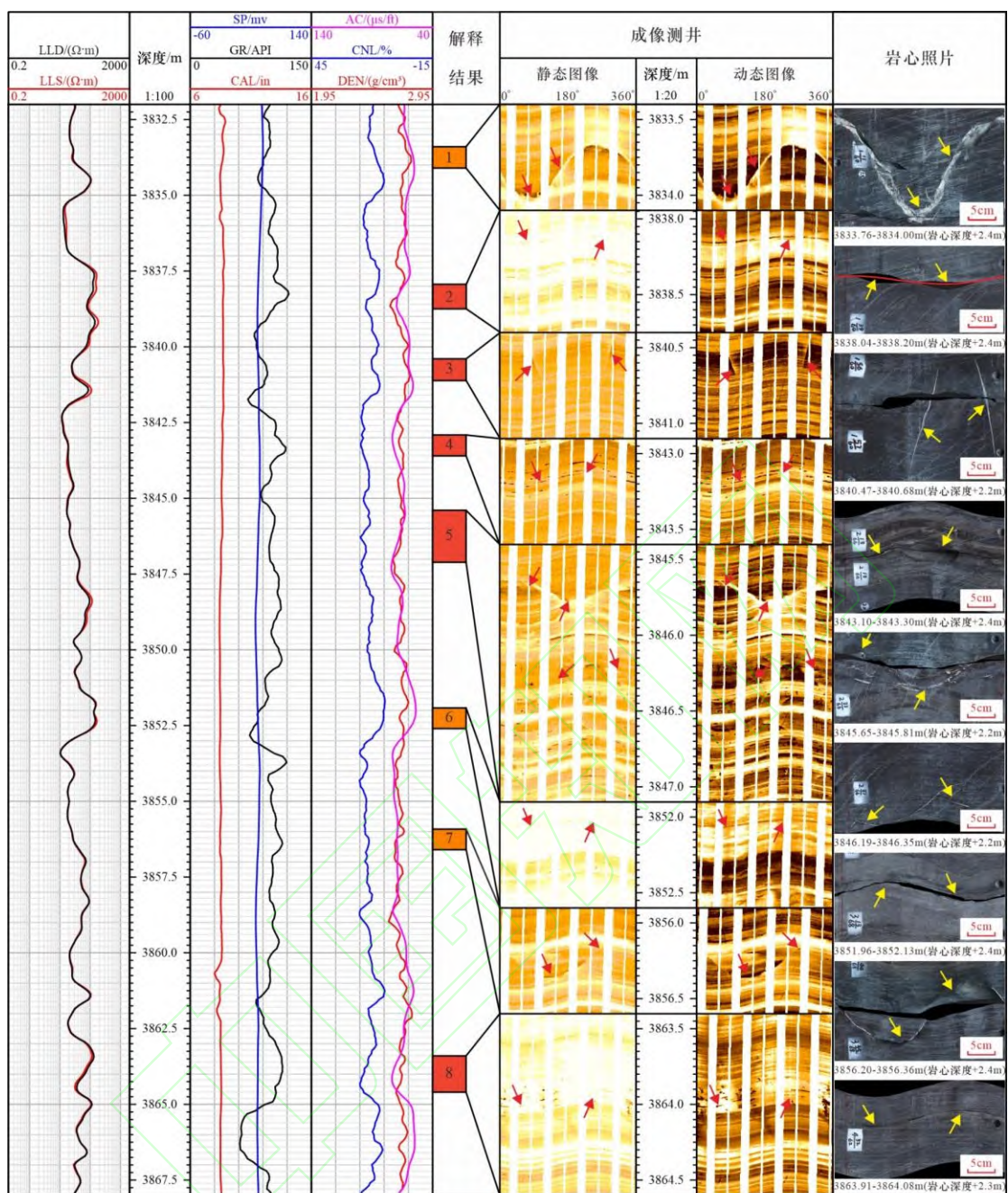


图 8 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝测井响应特征 (C14 井)

Fig. 8 Logging response characteristics of natural fractures in shale oil reservoirs of the Yingxiongling area, Qaidam Basin (Well C14)

然而，受研究区页岩油储层特征的复杂性和曲线特征法的局限性影响，仅靠上述识别方法很容易忽略多数裂缝的存在。如图 8 所示，图中橙色标识段在岩心和成像测井图像中明显可见裂缝，但常规测井曲线上并未出现对应的响应特征，导致无法识别出裂缝。此外，利用岩心精细观察结果，提取 100 个层段的测井数据（37 个无裂缝段和 63 个裂缝发育段），优选裂缝敏感曲线（LLD、AC 和 DEN）制作交会图版，发现区分效果较差[图 9（a）,图 9（b）]。因此，本文基于前期裂缝常规测井响应特征总结成果，利用深、浅侧向电阻率差

异性对裂缝响应明显的特点，构建了新的裂缝敏感参数 DSR，放大了曲线差异信号，并结合 AC 和 DEN 制作交会图版[图 9（c）,图 9（d）]。

$$DSR = \frac{|LLD - LLS|}{LLS} \quad (1)$$

式中，DSR 为深、浅侧向电阻率相对幅度差，无量纲；LLD 为对应层段的深侧向电阻率值， $\Omega \cdot m$ ；LLS 为对应层段的浅侧向电阻率值， $\Omega \cdot m$ 。

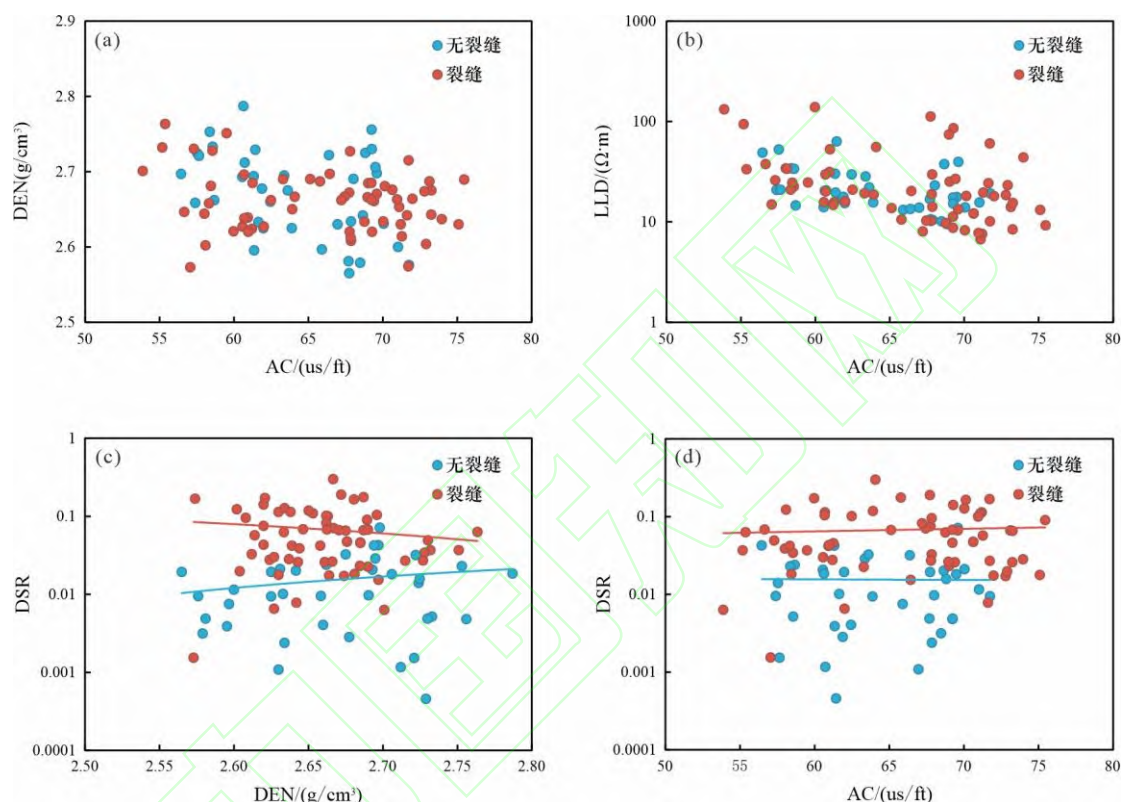


图 9 柴达木盆地英雄岭页岩油储层常规测井数据交会图

Fig. 9 Cross-plot of conventional logs date for shale oil reservoirs in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

(a) DEN-AC 交会图; (b) LLD-AC 交会图; (c) DSR-DEN 交会图; (d) DSR-AC 交会图

对比发现，重构参数 DSR 与 AC 和 DEN 绘制的交会图版，其裂缝识别能力提升较大。DSR-DEN 交会图版显示，随着 DEN 值的增大，裂缝发育段的 DSR 呈减小趋势，无裂缝发育段恰好相反[图 9（c）]。DSR-AC 交会图中，随着 AC 值的增大，裂缝发育段的 DSR 呈略微增大趋势，无裂缝发育段略微减小[图 9（d）]。分析认为，此规律与裂缝的充填程度和裂缝产状相关。充填程度越高，裂缝段密度值越大，声波时差越小，双侧向电阻率差异性越小，DSR 值越小。同时，水平裂缝或低角度裂缝的双侧向电阻率差异性往往较高。但

此方法仅能识别裂缝发育层段，并不能明确裂缝的产状和类型，适用于没有新技术测井数据的井段。若要实现裂缝的测井精细识别与评价，还需进一步结合新技术测井技术与方法。

4.2 成像测井识别

成像测井具有高井眼覆盖率、高纵向分辨率的特点，其提供的高清晰环井壁图像可直观、精准地显示裂缝发育情况，是当下能实现裂缝精细识别与评价最有效的测井技术^[34,57]。裂缝在成像测井图像中通常以正弦曲线的样式显示，其中曲线的宽度指示裂缝的开度，曲线最低点的方位指示裂缝的倾向，曲线的幅度指示裂缝的倾角^[59]，曲线的颜色反映了裂缝的充填情况。一般而言，亮色曲线代表被高阻矿物充填的裂缝，暗色曲线多代表未被充填的裂缝，部分代表被低阻矿物充填的裂缝^[60]。

依据上述响应特征，对研究区裂缝进行了成像精细识别。高角度充填和高角度未充填裂缝分别对应亮色和高幅度的正弦曲线形状，特征明显，易于识别（如图 8 中 1，5，7 段所示）。然而，水平充填/未充填裂缝、低角度充填/未充填裂缝由于倾角低，常与页岩纹层或层理面平行，加之张开度小，导致区分度较低，为识别工作带来了巨大挑战（如图 8 中 2，4，6，8 段所示）。此外，研究区部分垂直裂缝在成像测井图像中并非完整的正弦曲线，而是以“雁列式”双直线形态出现（如图 8 中 3 段所示），与诱导缝的成像测井图像特征极其相似（图 10）。因此，在识别高倾角的裂缝时，需排除诱导缝的干扰。

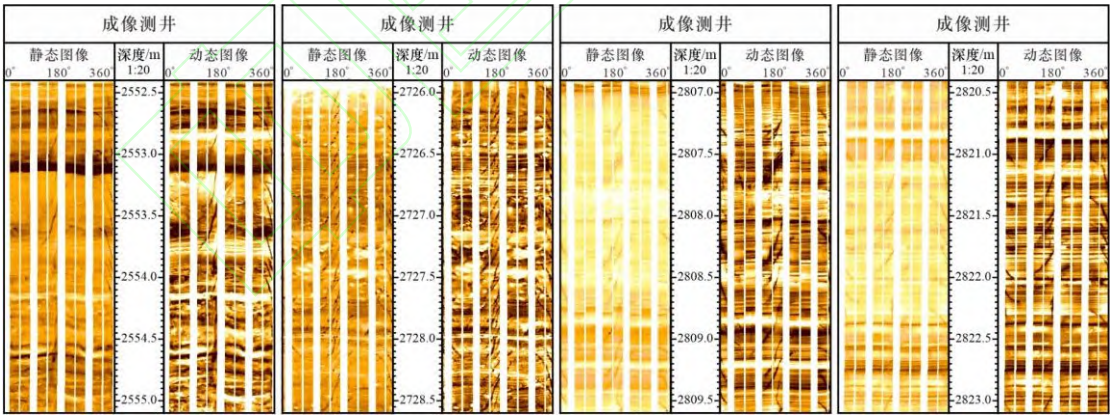


图 10 柴达木盆地英雄岭地区诱导缝成像测井图像特征

Fig. 10 Characteristics of induced fracture image logs in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

为解决上述问题，本文基于岩心刻度测井模式，结合常规测井、成像测井和地质资料，建立了研究区典型裂缝的测井识别图版，厘清了不同裂缝的测井综合响应特征（表 3）。（1）高角度充填裂缝：常规曲线中，深、浅侧向电阻率值略微降低，双曲线重合或正差异幅度小，声波时差和补偿中子值略微降低，密度值升高；成像测井图像中呈高幅度亮色正弦曲线状；岩心上可见高倾角特征，主要被方解石或硬石膏充填[图 11（a）]。（2）高角度未充

填裂缝：常规曲线中，深、浅侧向电阻率值明显降低，双曲线呈负差异特征，声波时差、补偿中子和密度值明显降低；成像测井图像中呈高幅度暗色正弦曲线状；岩心上可见高倾角裂缝切穿岩石。（3）垂直充填裂缝：常规曲线中，深、浅侧向电阻率值略微降低，双曲线重合，声波时差值略微降低，密度值明显升高；成像测井图像中呈亮色雁列式线状或极高幅度的正弦曲线状；岩心上可见近垂直裂缝切穿纹层，主要被方解石充填。（4）低角度充填裂缝：常规曲线中，深、浅侧向电阻率值略微降低且双曲线重合，声波时差和补偿中子值略微降低，密度值明显升高；成像测井图像中呈低幅度亮色正弦曲线状；岩心上可见裂缝常与页岩纹层或层理近乎平行，大多被方解石充填[图 11（b）]。（5）低角度未充填裂缝：常规曲线中，深、浅侧向电阻率值明显降低，双曲线呈负差异特征，声波时差、补偿中子和密度值明显降低；成像测井图像中呈低幅度暗色正弦曲线状；岩心上可见裂缝常与页岩纹层或平行层理存在小角度夹角，大多切穿岩石[图 11（c）]。（6）水平充填裂缝：常规曲线中，深、浅侧向电阻率值略微降低且双曲线重合，声波时差和补偿中子值略微降低，密度值略微升高；成像测井图像中呈极低幅度亮色正弦曲线状；岩心上可见裂缝大多平行于纹层或层理展布，常被方解石和硬石膏充填。（7）水平未充填裂缝：常规曲线中，深、浅侧向电阻率值明显降低，双曲线呈负差异特征，声波时差、补偿中子和密度值明显降低；成像测井图像中呈极低幅度的暗色正弦曲线状；岩心上可见裂缝常与页岩纹层或沉积层理平行，大多横向切穿岩石[图 11（d）]。

表 3 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝测井响应特征

Table 3 The well logging response of natural fractures in shale oil reservoir of Yingxiongling area, Qaidam Basin

类型	常规测井特征	成像测井特征	岩心特征
高角度充填裂缝	深、浅侧向电阻率值略微降低，双曲线重合或正差异幅度小，声波时差和补偿中子值略微降低，密度值升高	高幅度亮色正弦曲线状	高倾角特征，主要被方解石或硬石膏充填
高角度未充填裂缝	深、浅侧向电阻率值明显降低，双曲线呈负差异特征，声波时差、补偿中子和密度值明显降低	高幅度暗色正弦曲线状	高倾角裂缝切穿岩石
垂直充填裂缝	深、浅侧向电阻率值略微降低，双曲线重合，声波时差值略微降低，密度值明显升高	亮色雁列式线状或极高幅度的正弦曲线状	近垂直切穿纹层，主要被方解石充填
低角度充填裂缝	深、浅侧向电阻率值略微降低且双曲线重合，声波时差和补偿中子值略微降低，密度值明显升高	低幅度亮色正弦曲线状	常与层理近乎平行，大多被方解石充填
低角度未充填裂缝	深、浅侧向电阻率值明显降低，双曲线呈负差异特征，声波时差、补偿中子和密度值明显降低	低幅度暗色正弦曲线状	常与平行层理存在小角度夹角，大多切穿岩石
水平充填裂缝	深、浅侧向电阻率值略微降低且双曲线重合，声波时差和补偿中子值略微降低，密度	极低幅度亮色正弦曲线状	常与纹层或沉积层理平行，大多

水平未充填 裂缝	值略微升高 深、浅侧向电阻率值明显降低，双曲线呈负 差异特征，声波时差、补偿中子和密度值明 显降低	极低幅度的暗色 正弦曲线状	横向切穿岩石 常与纹层或沉积 层理平行，大多 横向切穿岩石
-------------	--	------------------	--



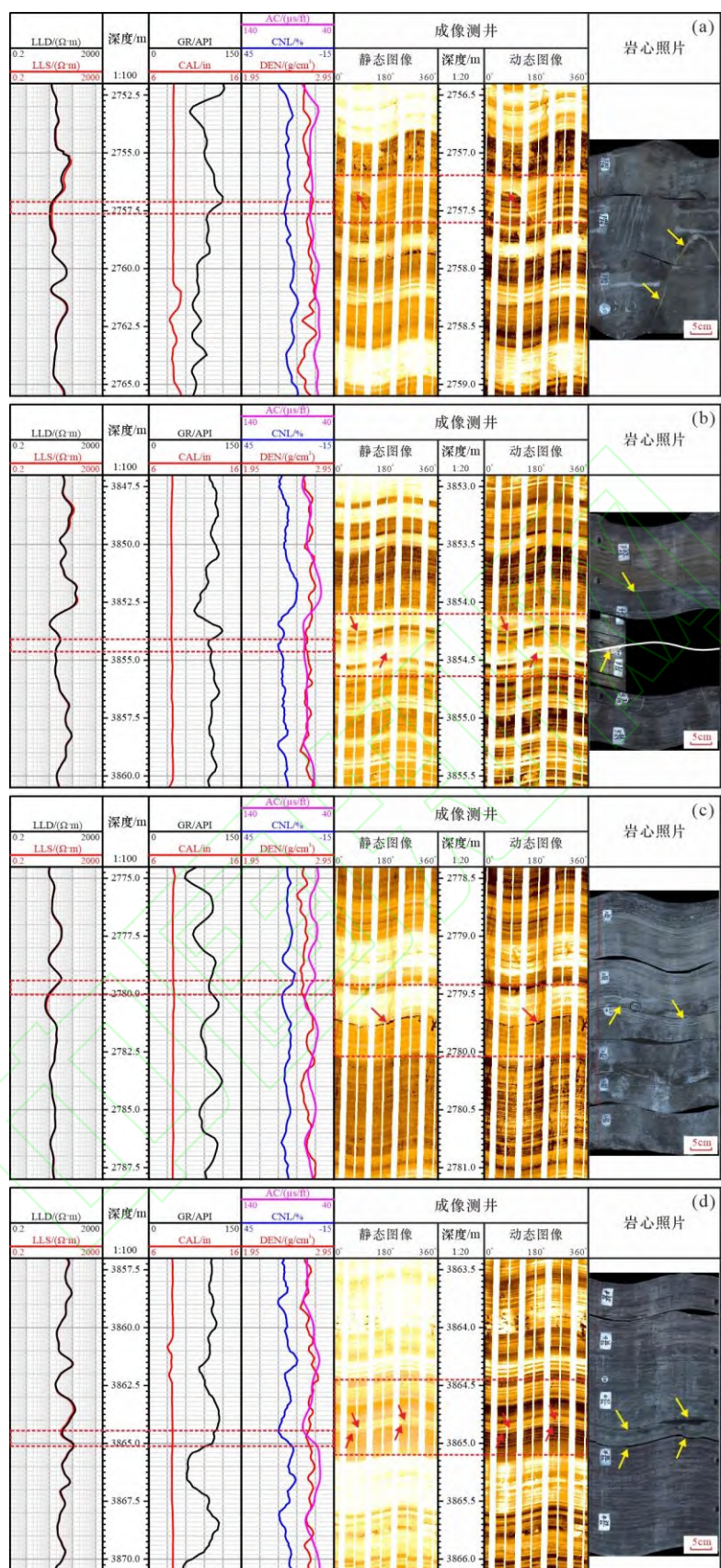


图 11 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝测井识别图版

Fig. 11 Logging identification chart of natural fractures in shale oil reservoirs of the Yingxiongling area, Qaidam Basin

(a) 高角度充填裂缝; (b) 低角度充填裂缝; (c) 低角度未充填裂缝; (d) 水平未充填裂缝

4.3 声波测井识别

阵列声波测井能够有效采集地层的纵波、横波和斯通利波等原始数据, 数据中蕴含的丰富信息使其在裂缝识别、地应力分析和地层评价等方面得到了广泛应用^[59]。其中, 裂缝识别与评价的主要方法包括纵横波时差比、声波衰减特征、斯通利波反射系数和地层各向异性等, 然而每种方法均存在一定的干扰因素^[61], 致使识别结果多解性强。因此, 本文基于偶极横波成像测井 (DSI) 数据, 综合应用多种方法对英雄岭页岩油储层天然裂缝进行识别, 并分析总结了相应的阵列声波测井响应特征。

结果表明, 研究区页岩油层系天然裂缝发育段, 纵横波时差比明显增大或减小, 增大多指示水平/低角度裂缝, 减小多指示高角度/垂直裂缝; 纵波、横波和斯通利波能量衰减明显, 波形变密度图中可见“V”字形条纹; 斯通利波反射系数增大, 其对未充填裂缝的响应更为敏感; 快、慢横波时差曲线显示差异分离, 时差各项异性指数明显增大。

此外, 利用声波测井的单一方法或参数判别裂缝发育情况时, 其判别结果与成像测井识别结果对应性较差。当不同方法或指示参数均满足判别条件时, 结果对应性较好。如图 12 所示, 在 C908 井 2389.50~2391.00m 层段, 声波测井中纵横波时差比明显增大, 如果仅以此为依据, 不考虑其他方法或参数, 易将其判定为裂缝发育层段, 而该层段的成像测井图像中并未显示裂缝存在。与此同时, 在 2347.15~2348.50m、2350.50~2351.50m、2356.55~2358.50m 和 2365.25~2366.50m 等层段, 声波测井特征表现为: 纵横波时差比增大, 斯通利波反射系数增大, 快、慢横波时差曲线差异分离, 时差各项异性指数明显增大。四种判定方法或参数均指示裂缝发育, 对应层段的成像测井图像中也显示裂缝存在。因此, 对于阵列声波测井而言, 结合多方法识别裂缝是降低结果多解性的有效方案。

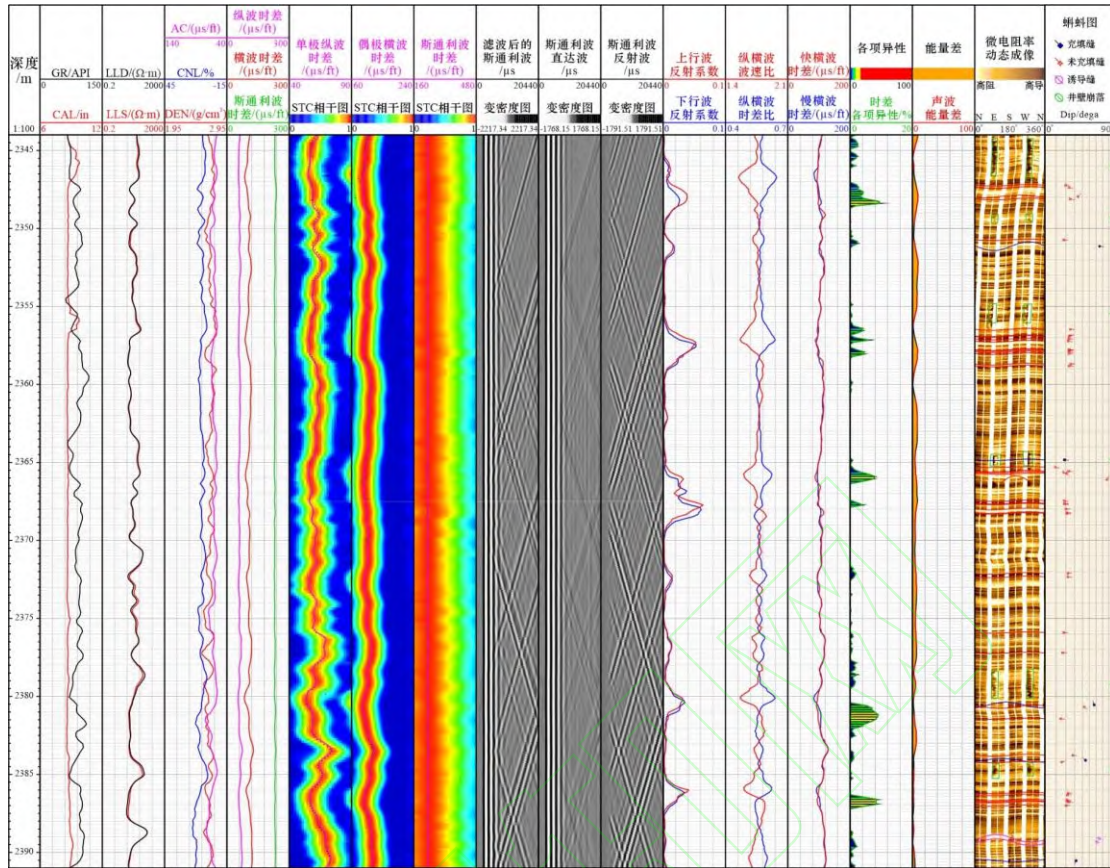


图 12 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝阵列声波测井识别结果

Fig. 12 Array acoustic logging identification results of natural fractures in shale oil reservoirs of the Yingxingling area, Qaidam Basin

4.4 裂缝纵向连续识别

前文述及，不同测井系列在页岩油储层裂缝识别方面均存在一定的优势和局限性。常规测井可以约束裂缝发育段，但无法精细刻画裂缝的产状和类型。成像测井可精准识别高角度裂缝和垂直裂缝以及部分低角度裂缝，但难以明确区分沉积层理与水平裂缝。阵列声波测井对不同产状的裂缝均有较高的敏感度，但同时也易被岩性、井壁情况和储层含气性等因素干扰^[61]。因此，综合运用多种测井系列和地质资料，充分发挥各自优势，是进一步提高裂缝测井识别精度的重要手段。

基于上述思路，结合不同裂缝的测井综合响应特征，实现了研究区单井裂缝的纵向连续识别。以 C908 井为例，在 1341m 的目的层中共识别出裂缝 924 条，其中未充填裂缝 501 条，占比 54.2%，充填裂缝 423 条，占比 45.8%（图 13）。进一步统计发现，研究区裂缝倾角总体范围为 9.11°~87.82°，主要分布于 10°~40°之间[图 14（a）]。相应可知，低角度未充填裂缝发育程度最高，水平未充填裂缝次之，垂直裂缝发育程度最低[图 14（b）]。纵向上，裂缝在下干柴沟组上段底部的 VI 油层组最为发育，其中主要发育水平未充填裂缝；V 油层组次之，主要发育高角度充填裂缝；IV 油层组较低，主要发育低角度未充填裂缝[图 14

(c),图 14 (d)]。整体而言,高角度裂缝和垂直裂缝多为充填裂缝,充填程度高。低角度裂缝和水平裂缝大多为未充填裂缝,充填程度低[图 14 (b),图 14 (d)]。

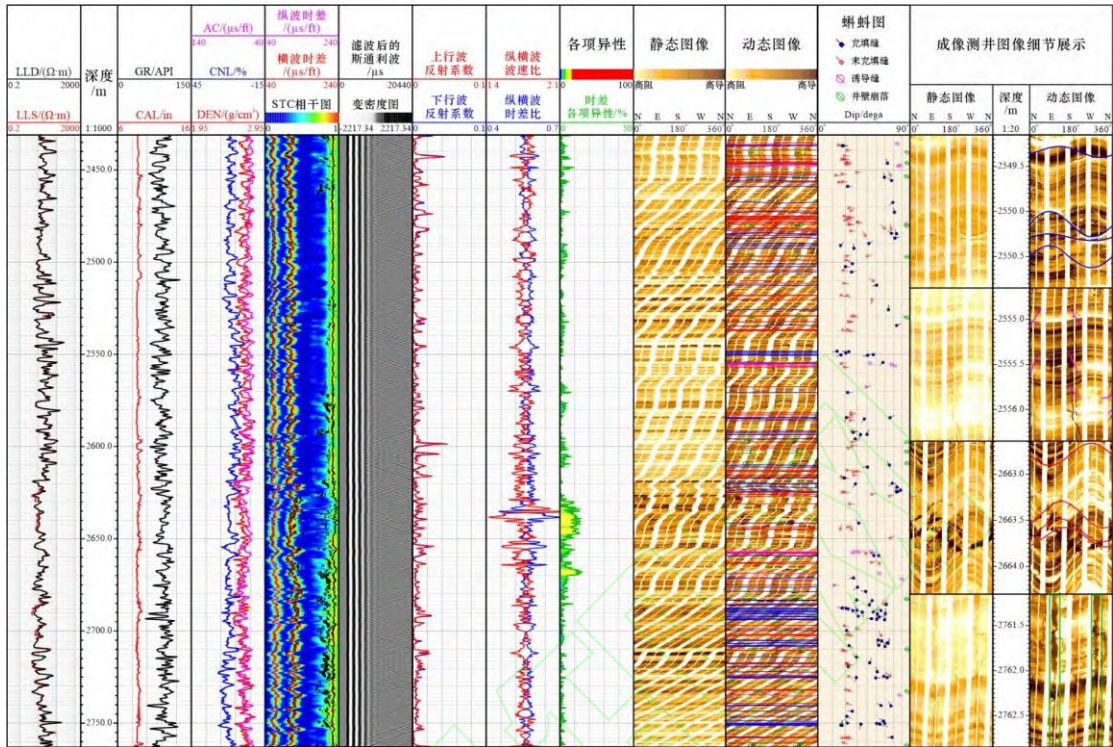


图 13 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝测井综合识别结果

Fig. 13 Comprehensive logging identification results of natural fractures in shale oil reservoirs of the Yingxiongling area, Qaidam Basin

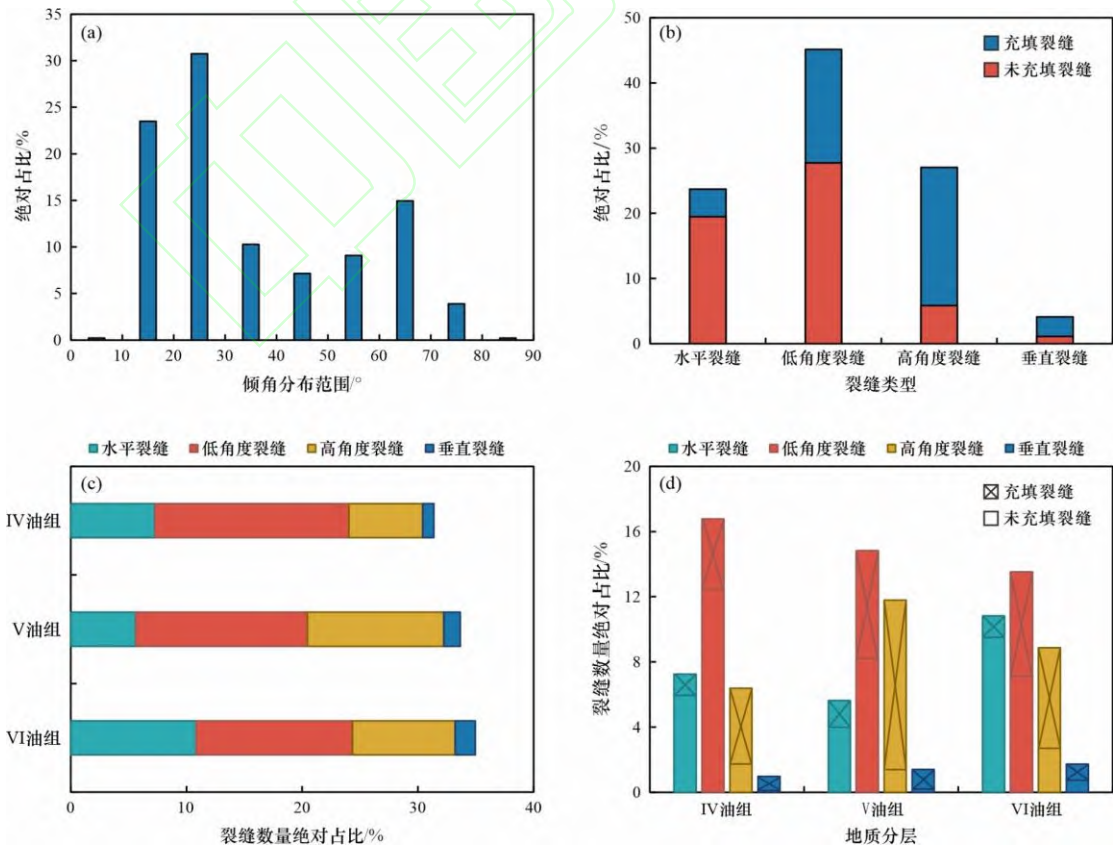


图 14 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝测井综合识别结果统计

Fig. 14 Statistical results of comprehensive logging identification of natural fractures in shale oil reservoirs of the Yingxiongling area, Qaidam Basin

(a) 裂缝倾角分布情况统计图; (b) 不同类型裂缝的充填情况统计图;
(c) 裂缝纵向发育情况统计图; (d) 不同层段的裂缝类型及充填情况统计图

5 裂缝测井识别结果综合分析

单井裂缝测井识别结果表明, 研究区主要发育水平未充填裂缝、水平充填裂缝、低角度未充填裂缝、低角度充填裂缝、高角度未充填裂缝和高角度充填裂缝 6 种天然裂缝。对上述 6 种天然裂缝进行了参数计算, 并对其集中发育程度和有效性特征进行了综合分析。

裂缝线密度为单位长度中裂缝的条数, 反映储层裂缝的集中发育程度。研究区裂缝线密度介于 0.51~5.59 条/m 之间, 平均值为 1.84 条/m。其中, 水平裂缝主体线密度最高, 低角度裂缝次之, 高角度裂缝最低[图 15 (a)]。裂缝面密度为单位体积内裂缝面的总面积, 反映储层裂缝的集中发育程度和分布情况。研究区裂缝面密度介于 $(0.64\sim6.86) \text{ m}^2/\text{m}^3$ 之间, 平均值为 $2.29 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。其中, 水平裂缝主体面密度最高, 低角度裂缝次之, 高角度裂缝最低[图 15 (b)]。裂缝长度为单位面积内裂缝长度的总和, 反映储层裂缝的集中发育程度和局部连通性。研究区裂缝长度介于 $0.57\sim7.17 \text{ m}/\text{m}^2$ 之间, 平均值为 $2.14 \text{ m}/\text{m}^2$ 。其中, 水平裂缝长度最大, 低角度裂缝次之, 高角度裂缝最小[图 15 (c)]。裂缝开度是指裂缝开口宽度, 可直接反映裂缝的有效性。研究区裂缝开度介于 0.008~1.17 mm 之间, 平均值为 0.33mm。其中, 高角度未充填裂缝和低角度未充填裂缝主体开度最大, 水平未充填裂缝和高角度充填裂缝次之, 低角度充填裂缝和水平充填裂缝开度较低[图 15 (d)]。整体而言, 研究区主要发育的天然裂缝中, 未充填裂缝和充填裂缝的集中发育程度相当, 水平裂缝和低角度裂缝的局部发育程度和局部连通性强于高角度裂缝; 未充填裂缝的有效性优于充填裂缝, 高角度裂缝的有效性优于低角度裂缝和水平裂缝。

同时, 研究区 12 口单井的裂缝走向叠合玫瑰花图显示, 研究区诱导裂缝走向为 NE—SW 向, 指示研究区现今水平最大主应力方向为 NE—SW 向[图 16 (a)]。未充填裂缝主体走向为 NE-SW 向, 多数未充填裂缝走向与现今水平最大主应力方向相近或夹角小于 30° [图 16 (b)]。该条件下通常指示裂缝有效性好, 且易产生较好的压裂效果^[34]。充填裂缝主体走向近 E—W 向, 其走向大多与现今水平最大主应力方向夹角大于 40° [图 16 (c)], 指示裂缝有效性差, 不易提升压裂效果。

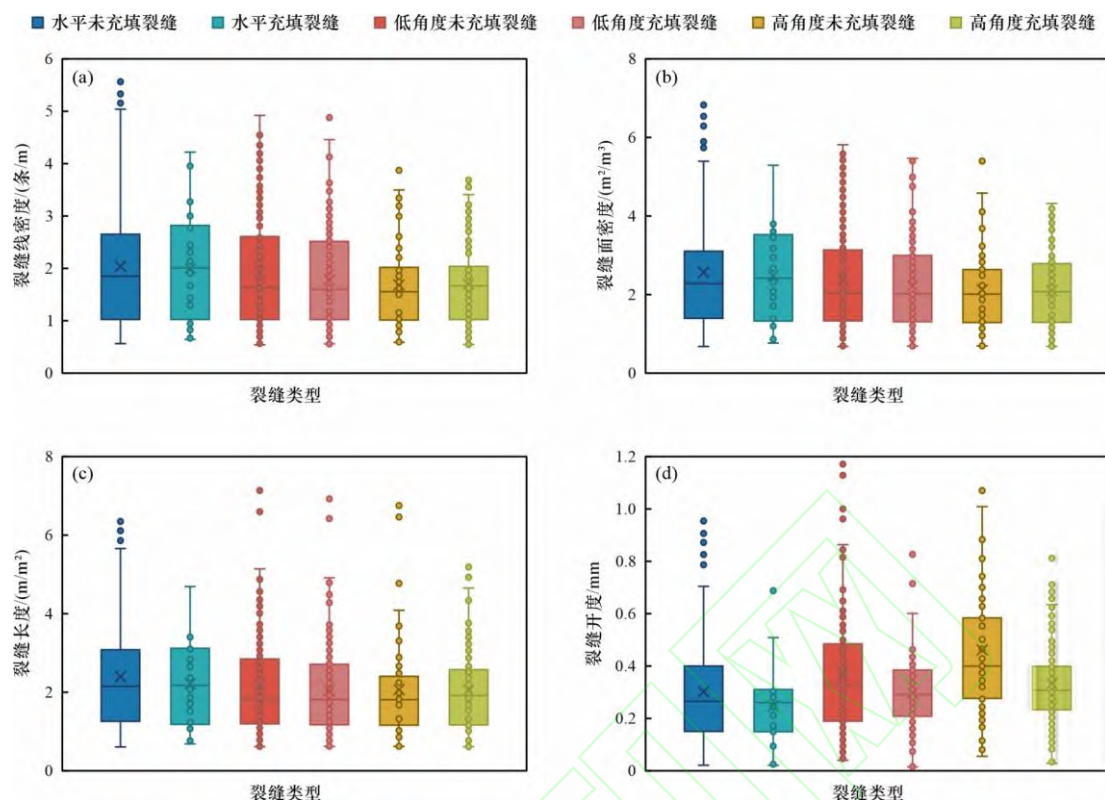


图 15 柴达木盆地英雄岭页岩油储层天然裂缝参数统计

Fig. 15 Statistics of natural fracture parameters in shale oil reservoir of the Yingxiongling area, Qaidam Basin

(a) 不同类型裂缝的线密度分布箱型图; (b) 不同类型裂缝的面密度分布箱型图;
(c) 不同类型裂缝的长度分布箱型图; (d) 不同类型裂缝的开启度分布箱型图

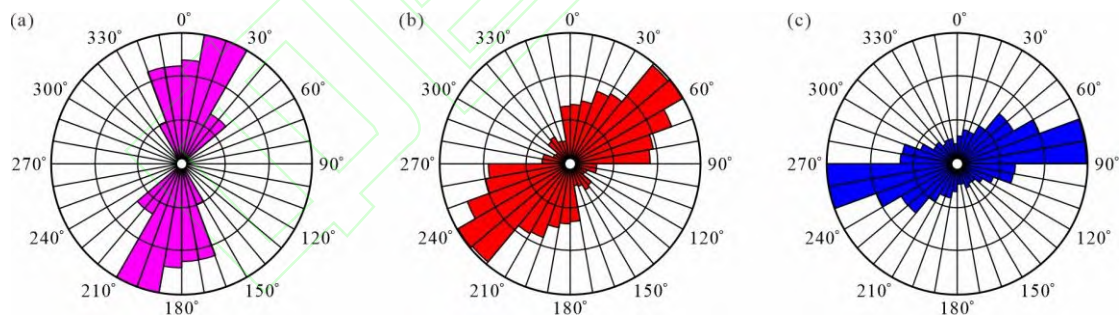


图 16 柴达木盆地英雄岭页岩油储层裂缝走向玫瑰花图

Fig. 16 Rose diagram of fracture orientation in shale oil reservoirs of the Yingxiongling area, Qaidam Basin

(a) 诱导裂缝走向玫瑰花图; (b) 未充填裂缝走向玫瑰花图; (c) 充填裂缝走向玫瑰花图

6 结论

(1) 柴达木盆地英雄岭地区下干柴沟组上段页岩油储层矿物组成丰富，混积特征明显，非均质性极强，储集空间类型多样，基质孔隙与天然裂缝并存。其中，天然裂缝可有效增加孔隙连通性，形成渗流网络，提升储层渗流能力，改善储层物性。

(2) 英雄岭页岩油储层天然裂缝依据地质成因可分为构造裂缝、成岩裂缝和异常高压

裂缝。其中，构造裂缝多为高角度裂缝，充填程度高；成岩裂缝多为水平裂缝，充填程度低；异常高压裂缝产状杂乱，多为充填裂缝。

(3) 不同测井系列在页岩油储层天然裂缝识别方面均存在一定的优势和局限性。综合运用多种测井系列和地质资料，建立“常规+成像+声波+岩心”的裂缝识别模式，充分发挥各自优势，挖掘提取裂缝信息，相互验证检验结果，总结裂缝综合响应特征，是实现单井裂缝连续识别、提高裂缝测井识别精度的重要方法和有效手段。

(4) 英雄岭页岩油储层天然裂缝中，未充填裂缝的集中发育程度与充填裂缝相当，但有效性明显优于充填裂缝。其中，低角度未充填裂缝发育数量最多，水平未充填裂缝集中发育程度最高，高角度未充填裂缝有效性最好。此外，研究区现今水平最大主应力方向为NE-SW向，未充填裂缝走向多与现今水平最大主应力方向相近或夹角小于 30° ，易产生较好的压裂效果。充填裂缝主体走向与现今水平最大主应力方向夹角大于 40° ，不易提升压裂效果。

致谢：感谢中国石油青海油田分公司提供的数据支撑；感谢审稿专家的宝贵意见和建议；感谢贵刊编辑部各位专家的修改意见和专业指导。

参考文献 (References)

- [1] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 116-127.
ZHAO W Z, ZHU R K, LIU W, et al. Enrichment conditions and distribution characteristics of lacustrine medium-to-high maturity shale oil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 116-127.
- [2] 李国欣, 伍坤宇, 朱如凯, 等. 巨厚高原山地式页岩油藏的富集模式与高效动用方式——以柴达木盆地英雄岭页岩油藏为例[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 144-157.
LI G X, WU K Y, ZHU R K, et al. Enrichment model and high-efficiency production of thick plateau mountainous shale oil reservoir: a case study of the Yingxiongling shale oil reservoir in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 144-157.
- [3] 孙龙德, 崔宝文, 朱如凯, 等. 古龙页岩油富集因素评价与生产规律研究[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 441-454.
SUN L D, CUI B W, ZHU R K, et al. Shale oil enrichment evaluation and production law in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 441-454.
- [4] 付金华, 李士祥, 郭茂恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1702-1716.
FU J H, LI S X, GUO Q H, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1702-1716.
- [5] 邹才能, 赵群, 王红岩, 等. 非常规油气勘探开发理论技术助力我国油气增储上产[J]. 石

- 油科技论坛, 2021, 40(3): 72-79.
- ZOU C N, ZHAO Q, WANG H Y, et al. Theory and technology of unconventional oil and gas exploration and development helps China increase oil and gas reserves and production[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(3): 72-79.
- [6] 赵喆, 白斌, 刘畅, 等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 327-340.
- ZHAO Z, BAI B, LIU C, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 327-340.
- [7] 张益粼, 王贵文, 宋连腾, 等. 页岩岩相测井表征方法——以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(1): 393-408.
- ZHANG Y L, WANG G W, SONG L T, et al. Logging identification method of shale lithofacies: a study of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(1): 393-408.
- [8] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 18-31.
- LI G X, ZHU R K, ZHANG Y S, et al. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 18-31.
- [9] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 225-235.
- SONG M S, LIU H M, WANG Y, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 225-235.
- [10] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 中国陆相页岩油勘探理论与技术进展[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 373-390.
- ZHAO W Z, ZHU R K, LIU W, et al. Advances in theory and technology of non-marine shale oil exploration in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 373-390.
- [11] 王濡岳, 胡宗全, 赖富强, 等. 川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段陆相页岩脆性特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 366-378.
- WANG R Y, HU Z Q, LAI F Q, et al. Brittleness features and controlling factors of continental shale from Da'anzhai Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 366-378.
- [12] 李彦录, 陆诗磊, 夏东领, 等. 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[J]. 地质科学, 2022, 57(1): 73-87.
- LI Y L, LU S L, XIA D L, et al. Development characteristics and main controlling factors of natural fractures in shale series of the seventh member of the Yanchang Formation, southern Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(1): 73-87.
- [13] 柳波, 吕延防, 孟元林, 等. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义——以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 598-607.
- LIU B, LYU Y F, MENG Y L, et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: A case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 598-607.

- [14] 沈永星, 冯增朝, 周动, 等. 天然裂缝对页岩储层水力裂缝扩展影响数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 195-202.
SHEN Y X, FENG Z C, ZHOU D, et al. Study on numerical simulation of effect on natural fractures to hydraulic fracture propagation in shale reservoirs[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 195-202.
- [15] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [16] 董少群, 曾联波, 杜相仪, 等. 致密碳酸盐岩储集层裂缝智能预测方法[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1179-1189.
DONG S Q, ZENG L B, DU X Y, et al. An intelligent prediction method of fractures in tight carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1179-1189.
- [17] 刘永杰. 伊拉克东南部 A 油田 Asmari 组碳酸盐岩储层裂缝测井多分辨率综合评价[J]. 矿物岩石, 2022, 42(2): 101-111.
LIU Y J. Application of multi-resolution comprehensive evaluation of fracture logging to Asmari Formation carbonate reservoir in a oilfield, southeastern IRAQ[J]. Mineralogy and Petrology, 2022, 42(2): 101-111.
- [18] 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 W Y, ZENG L B, CHEN S Q, et al. Characterization methods of multi-scale natural fractures in tight and low-permeability sandstone reservoirs[J]. Geological Review, 2021, 67(2): 543-556.
- [19] 张云钊, 曾联波, 罗群, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组致密储层裂缝特征和成因机制[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 211-225.
ZHANG Y Z, ZENG L B, LUO Q, et al. Research on the types and genetic mechanisms of tight reservoir in the Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 211-225.
- [20] AMEEN M S, MACPHERSON K, AL-MARHOON M I, et al. Diverse fracture properties and their impact on performance in conventional and tight-gas reservoirs, Saudi Arabia: The Unayzah, South Haradh case study[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(3): 459-492.
- [21] LAI J, WANG G W, FAN Z Y, et al. Fracture detection in oil-based drilling mud using a combination of borehole image and sonic logs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 84: 195-214.
- [22] LAUBACH S E, OLSON J E, GROSS M R. Mechanical and fracture stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1413-1426.
- [23] ZENG L B, QI J F, LI Y G. Relationship between fractures and tectonic stress field in the extra low-permeability sandstone reservoir at the south of western Sichuan Depression[J]. Journal of China University of Geosciences, 2007, 18(3): 23-231.
- [24] 刘国平, 金之钧, 曾联波, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组深层陆相页岩储层天然裂缝及其有效性[J]. 地球科学, 2024, 49(7): 2346-2358.
LIU G P, JIN Z J, ZENG L B, et al. Natural fractures and their effectiveness in deep continental shale reservoirs of the Permian Fengcheng Formation in the Mahu Sag[J]. Earth Science, 2024, 49(7): 2346-2358.
- [25] SONDERGELD C H, AMBROSE R J, RAI C S, et al. Micro-structural studies of gas shales[C]//SPE Unconventional Resources Conference/Gas Technology Symposium. Richardson, TX, USA: SPE, 2010: SPE-131771.

- [26] 王飞, 吴翔, 段朝伟, 等. 基于三维 CT 重构的页岩裂缝定量表征及可压裂性评价[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(5): 2147-2159.
WANG F, WU X, DUAN C W, et al. CT scan-based quantitative characterization and fracability evaluation of fractures in shale reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(5): 2147-2159.
- [27] 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 Petroli Sinica, 2022, 43(2): 180-191.
- [28] 曾维特, 丁文龙, 张金川, 等. 渝东南-黔北地区下古生界页岩非构造裂缝发育特征与主控因素[J]. 地球科学, 2022, 48(7), 2652-2664.
ZENG W T, DING W L, ZHANG J C, et al. Non-tectonic fracture characteristics of Lower Paleozoic shale in southeast Chongqing and north Guizhou area(south China) and Its main controlling factors[J]. Earth Science, 2022, 48(7), 2652-2664.
- [29] 郭旭升, 胡东风, 魏祥峰, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩裂缝发育主控因素及对产能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 799-808.
GUO X S, HU D F, WEI X F, et al. Main controlling factors on shale fractures and their influences on production capacity in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 799-808.
- [30] 焦伟伟, 岳锋, 程礼军. 渝东南下寒武统页岩裂缝成因类型及其应力控制机制[J]. 地质论评, 2015, 61(S1): 229-230.
JIAO W W, YUE F, CHENG L J. Genesis types of fractures in the Cambrian shale of southeastern Chongqing and their stress control mechanisms[J]. Geological Review, 2015, 61(S1): 229-230.
- [31] 刘之的, 赵靖舟. 鄂尔多斯盆地长 7 段油页岩裂缝测井定量识别[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 259-265.
LIU Z D, ZHAO J Z. Recognizing oil shale fracture of Chang 7 Member in Ordos Basin using logging data[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 259-265.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 黄玉越, 王贵文, 宋连腾, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩储集层裂缝测井识别与有效性分析[J]. 古地理学报, 2022, 24(3): 540-555.
HUANG Y Y, WANG G W, SONG L T, et al. Fracture logging identification and effectiveness analysis of shale reservoir of the Permian Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(3): 540-555.
- [35] LAI J, LIU B C, LI H B, et al. Bedding parallel fractures in fine-grained sedimentary rocks: Recognition, formation mechanisms, and prediction using well log[J]. Petroleum Science, 2022, 19: 554-569.
- [36] ZENG L B, LYU W Y, LI J, et al. Natural fractures and their influence on shale gas

- enrichment in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 30: 1-9.
- [37] 代鹏, 丁文龙, 何建华, 等. 地球物理技术在页岩储层裂缝研究中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(3): 1315-1328.
- DAI P, DING W L, HE J H, et al. Application of geophysical techniques in fracture of shale reservoir[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 40(4): 1315-1328.
- [38] DING W L, ZHU D W, CAI J J, et al. Analysis of the developmental characteristics and major regulating factors of fractures in marine–continental transitional shale-gas reservoirs: A case study of the Carboniferous–Permian strata in the southeastern Ordos Basin, central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 45: 121-133.
- [39] 张道伟, 薛建勤, 伍坤宇, 等. 柴达木盆地英西地区页岩油储层特征及有利区优选[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(4): 1-11.
- ZHANG D W, XUE J Q, WU K Y, et al. Shale oil reservoir characteristics and favorable area optimization in Yingxi area, Qaidam Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(4): 1-11.
- [40] 张道伟, 马达德, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气地质研究新进展及勘探成果[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(5): 505-512.
- ZHANG D W, MA D D, CHEN Y, et al. Research progress on oil and gas geology and exploration practice in Qaidam Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(5): 505-512.
- [41] 潘家伟, 李海兵, 孙知明, 等. 阿尔金断裂带新生代活动在柴达木盆地中的响应[J]. *岩石学报*, 2015, 31(12): 3701-3712.
- PAN J W, LI H B, SUN Z M, et al. Tectonic responses in the Qaidam basin induced by Cenozoic activities of the Altyn Tagh fault[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3701-3712.
- [42] 吴婵, 阎存凤, 李海兵, 等. 柴达木盆地西部新生代构造演化及其对青藏高原北部生长过程的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2211-2222.
- WU C, YAN C F, LI H B, et al. Cenozoic tectonic evolution of the western Qaidam Basin and its constrain on the growth of the northern Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 2211-2222.
- [43] 王亚东, 张涛, 李仕远, 等. 地震剖面记录的柴达木盆地西部地区新生代构造变形特征[J]. *世界地质*, 2011, 30(2): 213-223.
- WANG Y D, ZHANG T, LI S Y, et al. Cenozoic tectonic deformation characteristics of western Qaidam Basin inferred by seismic profile[J]. *World Geology*, 2011, 30(2): 213-223.
- [44] 龙国徽, 王艳清, 朱超, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带油气成藏条件与有利勘探区带[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(1): 145-160.
- LONG G H, WANG Y Q, ZHU C, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and favorable exploration plays in Yingxiongling structural belt, Qaidam Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(1): 145-160.
- [45] 伍坤宇, 廖春, 李翔, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带油气藏地质特征[J]. *现代地质*, 2020, 34(2): 378-389.
- WU K Y, LIAO C, LI X, et al. Geological characteristics of hydrocarbon pool in Yingxiongling structural zone, Qaidam Basin[J]. *Geoscience*, 2020, 34(2): 378-389.
- [46] 付锁堂, 马达德, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气勘探新进展[J]. *石油学报*, 2016, 37(S1): 1-10.
- FU S T, MA D D, CHEN Y, et al. New advance of petroleum and gas exploration in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 37(S1): 1-10.

- [47] 郭得龙, 申颖浩, 林海, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油 CP1 井压裂后甜点分析[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 117-128.
- GUO D L, SHEN Y H, LIN H, et al. Post fracturing shale oil sweet spot evaluation in Well CP1 in Yingxiongling area, Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 117-128.
- [48] 朱超, 刘占国, 宋光永, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带古近系湖相碳酸盐岩沉积模式、演化与分布[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1558-1567.
- ZHU C, LIU Z G, SONG G Y, et al. Sedimentary model, evolution and distribution of Paleogene lacustrine carbonate rocks in Yingxiongling structural belt, Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(11): 1558-1567.
- [49] 郭泽清, 孙平, 张春燕, 等. 柴达木盆地西部地区致密油气形成条件和勘探领域探讨[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1366-1377.
- GUO Z Q, SUN P, ZHANG C Y, et al. Formation conditions of tight oil & gas and Its exploration fields in the western Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1366-1377.
- [50] 郭泽清, 龙国徽, 周飞, 等. 咸化湖盆页岩油地质特征及资源潜力评价方法——以柴西坳陷下干柴沟组上段为例[J]. 地质学报, 2023, 97(7): 2425-2444.
- GUO Z Q, LONG G H, ZHOU F, et al. Geological characteristics and resource evaluation method for shale oil in a salinized lake basin: A case study from the upper member of the Lower Ganchaigou Formation in western Qaidam depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(7): 2425-2444.
- [51] 夏志远, 刘占国, 李森明, 等. 岩盐成因与发育模式——以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例[J]. 石油学报, 2017, 38(1): 55-66.
- XIA Z Y, LIU Z G, LI S M, et al. Origin and developing model of rock salt: A case study of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in the west of Yingxiong ridge, Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 55-66.
- [52] 刘占国, 张永庶, 宋光永, 等. 柴达木盆地英西地区咸化湖盆混积碳酸盐岩岩相特征与控储机制[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 68-80.
- LIU Z G, ZHANG Y S, SONG G Y, et al. Mixed carbonate rocks lithofacies features and reservoirs controlling mechanisms in the saline lacustrine basin in Yingxi area, Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 68-80.
- [53] 洪汉烈, 王朝文, 徐耀明, 等. 青藏高原新生代以来气候环境演化的粘土矿物学特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(5): 728-736.
- HONG H L, WANG C W, XU Y M, et al. Paleoclimate Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau since the Cenozoic[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(5): 728-736.
- [54] DAI Q Q, WANG G W, ZHAO X, et al. Fractal model for permeability estimation in low-permeable porous media with variable pore sizes and unevenly adsorbed water lay[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 130: 105145.
- [55] 赖锦, 王贵文, 孙思勉, 等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1712-1724.
- LAI J, WANG G W, SUN S M, et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1712-1724.

- [56] NELSON R A. Geological analysis of naturally fractured reservoirs[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 2001, 1-332.
- [57] 完颜泽, 龙国徽, 杨巍, 等. 柴达木盆地英雄岭地区古近系油气成藏过程及其演化特征[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 94-102.
WAN Y Z, LONG G H, YANG W, et al. Hydrocarbon accumulation and evolution characteristics of Paleogene in Yingxiongling area, Qaidam Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(2): 94-102.
- [58] 张斌, 何媛媛, 陈琰, 等. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩地球化学特征及成藏意义[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1158-1167.
ZHANG B, HE Y Y, CHEN Y, et al. Geochemical characteristics and oil accumulation significance of the high quality saline lacustrine source rocks in the western Oaidam Basin, NW China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(10): 1158-1167.
- [59] 赖锦, 王贵文, 庞小娇, 等. 测井地质学前世、今生与未来——写在《测井地质学·第二版》出版之时[J]. 地质论评, 2021, 67(6): 1804-1828.
LAI J, WANG G W, PANG X J, et al. The past, present and future of well logging geology-- To celebrate the publication of second edition of "Well Logging Geology"[J]. Geological Review, 2021, 67(6): 1804-1828.
- [60] LAI J, WANG G W, WANG S, et al. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 95: 139-166.
- [61] 车小花, 赵腾, 乔文孝, 等. 多极子声波测井的裂缝识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1263-1272.
CHE X H, ZHAO T, QIAO W X, et al. Fracture identification and evaluation based on multi-pole acoustic logging[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1263-1272.

Development characteristics and logging identification of natural fractures in shale oil reservoirs of the Yingxiongling Area, Qaidam Basin

ZHAO Xing^{1,2}, WANG Guiwen^{1,2}, LI Yafeng³, SUN Quanwei^{1,2}, LAI Jin^{1,2}, SHEN Yinghao¹,
WU Kunyu³, LI Dong^{1,2}, WANG Song^{1,2}, HAN Zongyan^{1,2}

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

2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, 736202, China)

Abstract: Natural fractures are a critical factor controlling the productivity of shale oil reservoirs, and their accurate identification and characterization are essential for the optimal selection of sweet spots and efficient development of shale oil and gas. This study focuses on the mixed shale oil reservoirs in the Upper Member of the Lower Ganchaigou Formation in the Yingxiongling

area, Qaidam Basin. Core samples, thin sections, scanning electron microscopy (SEM), and both conventional and advanced logging data were used to summarize the types and characteristics of natural fractures in the study area, and a comprehensive logging-based fracture identification model was established. This model enables continuous fracture identification and characterization from well logs. Additionally, by integrating fracture parameters with core experimental data, the degree of fracture development and effectiveness were analyzed. The results show that natural fractures in the study area can be classified into three types: tectonic fractures, diagenetic fractures, and abnormal high-pressure fractures. Tectonic fractures are mostly high-angle and highly filled, diagenetic fractures are typically horizontal with low degrees of filling, and abnormal high-pressure fractures display irregular orientations and are often filled. Fractures are most developed in the VI oil layer group of the Upper Member of the Lower Ganchaigou Formation, followed by the V oil layer group, with the IV oil layer group being relatively less developed. In general, the abundance of low-angle unfilled fractures is the greatest, the developmental intensity of horizontal unfilled fractures is the highest, and the effectiveness of high-angle unfilled fractures is the best. The current maximum horizontal principal stress direction in the study area is NE–SW, and most unfilled fractures form angles less than 30° with this direction, making them conducive to efficient fracturing. In contrast, filled fractures have dominant orientations forming angles greater than 40° with the maximum horizontal principal stress, making them less effective for enhancing fracturing. The findings of this study are expected to provide theoretical and methodological support for the identification, evaluation of natural fractures, and the optimization of sweet spots in lacustrine mixed shale oil reservoirs.

Key words: Natural fractures; Development characteristics; Logging identification; Mixed shale oil reservoirs; the Upper Member of the Lower Ganchaigou Formation; Yingxiongling area; Qaidam Basin

Foundation items: The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41872133); The Strategic Cooperation Project between PetroChina Qinghai Oilfield Branch Company and China University of Petroleum(Beijing) (Grant No. Research2022-Exploration-Technology-06).