



李锦锋, 钟高润, 王鹏瑜, 等. 2026. 鄂尔多斯盆地南部延长组长 8 致密砂岩储层岩石力学参数及地应力分析. 地球物理学进展, 41(1):0277-0288, doi:10.6038/pg2026JJ0153.

LI JinFeng, ZHONG GaoRun, WANG PengYu, et al. 2026. Analysis of rock mechanical parameters and in-situ stress of Chang 8 tight sandstone reservoirs in the southern Ordos Basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(1):0277-0288, doi:10.6038/pg2026JJ0153.

鄂尔多斯盆地南部延长组长 8 致密砂岩储层岩石力学参数及地应力分析

Analysis of rock mechanical parameters and in-situ stress of Chang 8 tight sandstone reservoirs in the southern Ordos Basin

李锦锋¹, 钟高润^{2,3*}, 王鹏瑜², 毛景萱², 潘子凡², 龚嘉顺¹, 王茜¹, 段特征¹, 韩莹²

LI JinFeng¹, ZHONG GaoRun^{2,3*}, WANG PengYu², MAO JingXuan², PAN ZiFan², GONG JiaShun¹, WANG Qian¹, DUAN TeZheng¹, HAN Ying²

1. 延长油田股份有限公司下寺湾采油厂, 延安 716000

2. 延安大学石油工程与环境工程学院, 延安 716000

3. 陕西省能源大数据智能处理重点实验室, 延安 716000

1. Yanchang Oilfield Co., Ltd. XiaSiWan Oil Production Plant, Yan'an 716000, China

2. School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China

3. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Processing for Big Energy Data Yan'an, Yan'an 716000, China

摘要 鄂尔多斯盆地南部甘泉地区三叠系延长组致密油资源潜力巨大,但其致密砂岩储层岩石力学参数、地应力分析研究等较为滞后。研究中,钻取与层理面夹角为 0°(平行 H)、45°(斜交)和 90°(垂直 V)的小岩心,开展 X 射线衍射、扫描电镜及三轴应力实验。研究表明,长 8 层岩样矿物主要为石英(31.8%)、斜长石(22.6%)和黏土(26.6%),总含量达 81.0%。扫描电镜显示:孔隙中存在石英加大、粒间及粒表黏土矿物充填,存在残余粒间孔隙。在平行、斜交、垂直层理方向下,KAISER 点应力值、压负荷峰值、抗压强度依次降低,弹性模量、泊松比先降后升。孔隙体积压缩系数与有效应力呈对数函数关系。通过测井资料与实验数据分析,动态弹性模量高于静态,动态泊松比低于静态,抗压强度、抗拉强度、地应力预测结果与实验相符。研究成果为甘泉地区长 8 段致密油藏地质工程一体化“甜点”预测提供了新指标,对鄂尔多斯盆地南部致密

Abstract The tight oil resources in the Triassic Yanchang Formation in the Ganquan area of the southern Ordos Basin have great potential. However, the research on rock mechanical parameters and in-situ stress analysis of its tight sandstone reservoirs is relatively lagging. In this paper, small cores with angles of 0° (parallel, H), 45° (oblique intersection) and 90° (perpendicular, V) to the bedding plane were drilled, and X-ray diffraction, scanning electron microscopy and triaxial stress experiments were carried out. The research shows that the minerals in the Chang 8 layer samples are mainly quartz (31.8%), plagioclase (22.6%) and clay (26.6%), with a total content of 81.0%. Scanning electron microscopy shows that there are quartz overgrowth, intergranular and grain-surface clay mineral filling in the core, and there are intergranular residual pores. Under different bedding directions, the Kaiser point stress value, peak load value and compressive strength decrease in turn, while the elastic modulus and Poisson's ratio first decrease and then increase. There is a logarithmic function relationship between the pore volume compressibility coefficient and the effective stress. Through the analysis and prediction of logging data and experimental data, the dynamic elastic modulus is higher than the static one, and the dynamic

收稿日期 2025-05-17; 修回日期 2025-10-20.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBQN-0341)、延长石油科研基金项目“下寺湾油田柳洛峪下组合长 8 致密油地质工程一体化研究”(ycsy2023ky-C-01-07)和延安大学博士启动基金项目联合资助。

第一作者简介 李锦锋,男,1987 年生,硕士,高级工程师,主要从事致密(页岩)油勘探开发及管理工作. E-mail: vip_lj1213@163.com

* 通讯作者 钟高润,男,1990 年生,博士,副教授,主要从事测井资料综合解释与油藏描述研究. E-mail: zhonggaorun@126.com

油储层综合甜点识别、水平井轨迹优化、压裂段簇设计、施工参数优化等具有重要指导意义。

关键词 长8致密油; 矿物组分; 岩石力学参数; 地应力分析; 鄂尔多斯盆地

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10. 6038/pg2026JJ0153

CSTR:32085.14.pg2026JJ0153

Poisson's ratio is lower than the static one. The prediction results of compressive strength, tensile strength and in-situ stress are consistent with the experimental results. The research results provide new indicators for the prediction of "sweet spots" in the integration of geology and engineering of tight oil reservoirs in the Chang 8 interval of the Ganquan area. They have important guiding value for the identification of comprehensive sweet spots in tight oil reservoirs in the southern part of the Ordos Basin, the optimization of horizontal well trajectories, the design of fracturing stages and clusters, and the optimization of construction parameters.

Keywords Chang 8 tight oil; Mineral composition; Rock mechanical parameters; In-situ stress analysis; Ordos Basin

0 引言

鄂尔多斯盆地作为我国重要的能源基地,其南部甘泉地区三叠系延长组展现出独特的油气资源潜力(付金华等,2023;陶士振等,2023;朱如凯等,2025)。该区自晚三叠世以来经历了多期构造演化与沉积充填过程,形成了以湖相-三角洲相为主的沉积体系(孙宁亮等,2017a, b;梁正中等,2022)。其中延长组长7、长8和长9段发育的三套富有机质陆相烃源岩,为研究区致密油、页岩油大规模富集成藏提供了丰富的油源(蒋杨等,2024;肖正录等,2022, 2023;陈义国等,2021;崔景伟等,2024)。据最新资源评价数据显示,甘泉地区仅长8段致密油资源量就达1.5亿吨以上,已成为延长油田致密油勘探开发的主战场之一(李锦锋等,2019;杨连如等,2025;钟宝鸿等,2024)。在工程实践层面,长水平段水平钻完井技术与差异化细切割体积压裂技术的联合应用,显著提升了研究区致密油藏的开发效率(李锦锋等,2022;张矿生等,2024;欧阳勇等,2024)。然而,水力压裂过程中暴露出的关键地质力学问题日益凸显。受沉积成岩作用控制,储层内部发育的层理面普遍存在胶结程度弱、力学强度低的特点(郭鹏等,2024)。这种各向异性特征导致在压裂施工时,水力裂缝往往优先沿层理面扩展,而非形成预期的复杂网状裂缝系统(唐颖等,2025;高毅等,2021)。微地震裂缝监测数据显示,超过60%的压裂段出现裂缝高度受限、缝网复杂度不足等问题,直接导致有效储层动用率降低约30%。这一现象不仅制约了单井产量的提升,更对储层整体采收率产生显著影响,已成为制约鄂尔多斯盆地致密油效益开发的关键技术瓶颈。

在此背景下,深入开展致密砂岩储层岩石力学特性及其各向异性研究具有重要的理论价值和实践

意义。从储层可压裂性评价到水平井差异化分段优化,从压裂方案设计到开发效果评估,岩石力学参数的精确获取与各向异性特征的深入认知,构成了整个压裂工程体系的基础支撑(张皎生等,2025;唐颖等,2025)。近年来,这一领域已成为国际非常规油气开发研究的焦点,美国二叠纪盆地、加拿大Duvernay页岩区等典型致密油气田的开发实践表明,储层各向异性特征的量化表征可提升压裂效果预测精度达40%以上。国内外学者在岩石各向异性研究领域已取得系列进展。国外学者通过页岩三轴试验揭示了层理角度对破裂模式的调控机制,建立了裂缝扩展方向与层理倾角的定量关系模型。国内学者创新性地将数字岩心技术应用于致密砂岩各向异性研究,实现了微观组构与宏观力学行为的跨尺度关联。然而,现有研究仍存在明显局限。首先,针对陆相致密砂岩的系统研究相对匮乏,现有成果多集中于海相页岩领域;其次,矿物组构特征与力学参数各向异性之间的定量耦合关系尚未明晰;再者,动态弹性参数与静态力学参数之间的转换模型在致密砂岩中的适用性仍需验证。特别值得关注的是,不同层理方向下岩石力学行为的系统对比研究仍属空白,这直接制约着压裂裂缝扩展模型的精细化构建。

基于此,文章聚焦鄂尔多斯盆地南部甘泉地区三叠系延长组长8段致密砂岩储层,采用多学科交叉的研究方法开展系统攻关。从全直径岩心样品制备入手,构建了与层理面呈0°(平行)、45°(斜交)、90°(垂直)的三组标准岩样体系。通过X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)等先进测试手段,系统表征了不同方向样品的矿物组成、颗粒定向排列等组构特征。在此基础上,开展系统的三轴压缩试验与声波速度测试,获取了包括单轴抗压强度、杨氏模量、泊松比等在内的静态力学参数,以及纵横波速等动态弹性参数。研究成果不仅为甘泉地区长8段致密

油藏“甜点”预测提供了新的评价指标,更对鄂尔多斯盆地南部致密油储层的水平井轨迹优化、压裂段(簇)设计、施工参数优化等关键工程决策具有重要指导价值.

1 样品制备与实验过程

1.1 实验仪器及参数

(1)三轴应力实验设备为TFD-2000微机伺服控制岩石三轴试验系统,该系统最大轴向压力为2000 kN,最大围压为100 MPa,孔隙压力为140 MPa,温度为150 ℃.实验控制精度压力为0.01 MPa,变形为0.001 mm.全部数据由SCN2000 Digital System Controller系统来采集与控制.岩石声发射信号由DS5-8A全信息声发射信号分析系统采集.

(2)X射线衍射设备为日本理学高分辨率衍射仪SmartLab X射线衍射仪,该仪器参数如下:X射线发生器功率为9 kW,测角仪为水平测角仪,测角仪最小步进为1/10000度,最高精度测角仪(双光学编码、直接轴上定位);测角仪配程序式可变狭缝,自

动识别所有光学组件、样品台;CBO交叉光路,提供聚焦光路及高强度高分辨平行光路;入射端Ka1光学组件;高速探测器D/teX-Ultra250(能量分辨率20%以下).扫描电镜实验仪器型号为ZEISS SIGMA500场发射扫描电子显微镜.

1.2 岩样加工及基础参数

岩心样品来源于下寺湾QZ区,层位为长8油层组致密砂岩.首先在全直径岩心上测量径向声波,确定最大、最小水平地应力方向,即沿原最大水平主应力方向有最小声波速度,而沿原最小水平主应力方向有最大声波速度.沿确定的方向钻取岩心.三轴压缩实验小岩心加工成直径25 mm,长度50 mm的圆柱形试样,岩样长径比接近1.5.将圆柱形试样两端车平、磨光,两端面的不平行度小于0.015 mm.为研究层理面影响下致密砂岩储层的力学特性和强度特征的各向异性,钻取了与层理面夹角依次为0°、45°和90°的小岩心.同时对7口探井长8段致密砂岩储层开展X-衍射实验,获取岩样的矿物组成.试样基本参数如表1所示.

表 1 试样基本参数
Table 1 Basic parameters of the specimens

试样编号		取样深度 /m	井号	平均长度 /mm	平均直径 /mm	质量/g	密度 /(g/cm ²)
1	全1 0°	1462.92 ~ 1465.20	QT41	50.12	25.49	65.51	2.56
2	全1 45°			50.38	25.32	65.23	2.57
3	全1 90°			50.62	25.12	65.22	2.6
4	全1 垂直			50.14	25.64	65.35	2.53
5	全2 0°	1504.99 ~ 1505.77	QT44	50.61	25.69	65.39	2.49
6	全2 45°			50.47	25.58	66.02	2.55
7	全2 90°			50.16	25.14	65.91	2.65
8	全2 垂直			50.35	25.61	66.11	2.55
9	全3 0°	1469.82 ~ 1471.81	QT45	50.76	25.91	65.36	2.44
10	全3 45°			50.26	25.14	65.28	2.62
11	全3 90°			50.34	25.63	66.13	2.55
12	全3 垂直			50.22	25.33	65.44	2.59
13	全4 0°	1504.66 ~ 1506.22	QT47	50.36	25.38	64.28	2.52
14	全4 45°			50.74	25.48	64.38	2.49
15	全4 90°			50.41	25.09	65.94	2.65
16	全4 垂直			50.62	25.46	64.82	2.52
17	全5 0°	1465.91 ~ 1467.65	QT50	50.28	25.55	62.5	2.43
18	全5 45°			50.72	25.7	62.5	2.38
19	全5 90°			50.65	25.51	63	2.43
20	全5 垂直			50.08	25.61	62	2.4

续表 1

Continued Table 1

试样编号		取样深度 /m	井号	平均长度 /mm	平均直径 /mm	质量/g	密度 /(g/cm ²)
21	全 6 0°	1566. 23 ~ 1567. 85	QT53	50. 32	25. 69	65. 18	2. 5
22	全 6 45°			50. 62	25. 81	64. 25	2. 43
23	全 6 90°			50. 48	25. 46	63. 29	2. 46
24	全 6 垂直			50. 47	25. 77	64. 33	2. 45
25	全 7 0°	1486. 08 ~ 1487. 95	QT48	50. 65	25. 37	64. 14	2. 51
26	全 7 45°			50. 29	25. 11	65. 08	2. 61
27	全 7 90°			50. 36	25. 44	64. 51	2. 52
28	全 7 垂直			50. 55	25. 36	65. 27	2. 56

2 实验结果与分析

2.1 岩石矿物组分与微观孔隙结构特征

2.1.1 岩石矿物组分特征

致密砂岩储层中岩石矿物组成对储层岩石力学性质有很大的影响. 石英、长石等脆性矿物晶体结构稳定,抗压强度高,其含量的增加会提高岩石硬度和弹性模量,增强岩石的脆性特征. 而蒙脱石、伊利石等黏土矿物的存在会显著降低岩石抗压强度和抗变形能力. 本次研究对 7 口探井长 8 段致密砂岩储层

开展 X-衍射实验,全岩 X-衍射结果表明,长 8 段所取岩样的矿物主要为石英、斜长石和黏土(表 2),三种矿物平均总含量为 81.0%. 其中石英含量介于 28.7%~35.4%,平均含量为 31.8%;斜长石含量介于 17.2%~34.2%,平均含量为 22.6%;黏土含量介于 17.8%~38.2%,平均含量为 26.6%. 此外白云石和钾长石含量也相对较高,平均含量分别达到 11.6%和 6.2%. 其余方解石、菱铁矿和黄铁矿等矿物含量较低,在部分样品中偶见,部分样品中未检测到.

表 2 全岩矿物 X-射线衍射分析数据统计表

Table 2 Statistical table of X-ray diffraction analysis data of all-rock minerals

样品号	矿物含量/%							
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	黏土矿物
Y1	28. 7	4. 1	23. 5	0. 1	20. 2	—	0. 3	23. 1
Y2	31. 9	6. 6	17. 6	0. 2	11. 5	—	—	32. 2
Y3	35. 4	6. 9	17. 5	0. 8	14. 3	—	1. 2	23. 9
Y4	32. 4	5. 5	17. 2	—	5. 2	—	1. 5	38. 2
Y5	33. 2	4. 7	34. 2	0. 8	8. 4	0. 5	0. 4	17. 8
Y6	29. 8	8. 5	23. 6	0. 4	10. 1	0. 9	0. 4	26. 3
Y7	30. 9	6. 9	24. 8	0. 7	11. 2	—	0. 6	24. 9
均值	31. 8	6. 2	22. 6	0. 4	11. 6	0. 2	0. 6	26. 6

2.1.2 微观孔隙结构

致密砂岩储层的微观孔隙结构特征直接影响储层的岩石力学性能,储层中溶蚀孔、粒间孔等开放孔隙结构的存在会降低岩石强度,而微裂隙发育会显著增加储层脆性. 扫描电镜结果表明,岩心普遍能观察到孔隙全貌,发现石英加大、粒间充填黏土矿物(伊利石)和粒表黏土矿物(伊利石),并能观察到粒

间残余孔隙、碎屑颗粒溶孔和粒间孔缝等(图 1). a 岩样中有长石见加大现象,可见粒间伊利石黏土填隙物及粒间残余孔隙. b 岩样中石英加大,可见粒间充填、粒表衬垫状伊利石等黏土矿物、自形菱面体白云石及粒间残余孔隙和碎屑颗粒溶孔. c 岩样中可见碎屑颗粒、颗粒状白云石、伊利石黏土填隙物及粒间孔缝、白云石晶内溶孔. d 岩样可见碎屑颗粒、

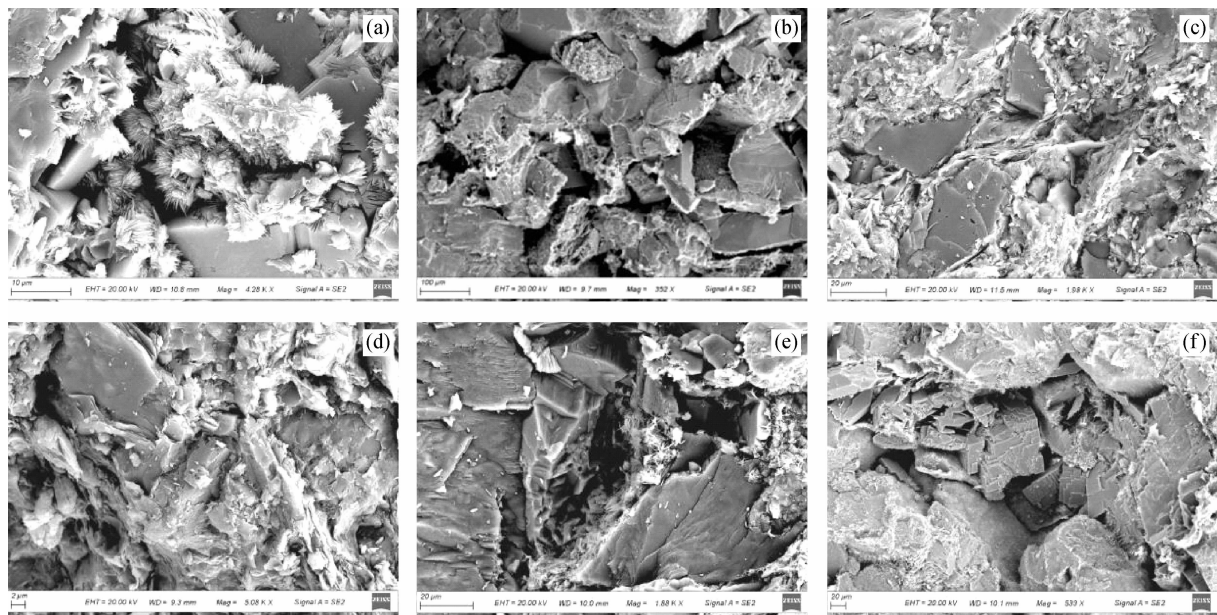


图1 长8储层微观孔隙结构特征

Fig.1 Microscopic pore structure characteristics of the Chang 8 reservoir in the study area

颗粒状白云石、晶粒状黄铁矿、片状伊利石等黏土矿物及粒间孔缝。e 岩样中可观察到粒间方解石、伊利石黏土充填物及粒间残余孔隙。f 岩样中可观察到粒间充填、粒表衬垫状伊利石黏土、自形菱面体白云石和微晶石英,存在粒间残余孔隙和碎屑颗粒溶孔。

2.2 岩石力学三轴试验

2.2.1 地应力实验

KAISER 点应力测试结果表明:在 0°和垂直方向上,两次测量的 KAISER 点应力值基本一致,在 0°、45°、90°时,对应的 KAISER 点应力值依次降低(图 2)。

实验样品抗压强度范围为 14.21 ~ 88.74 MPa,平均值 44.19 MPa;测出的弹性模量范围为 23.88 ~

62.39 GPa,平均值 42.79 MPa;泊松比范围为 0.12 ~ 0.33,平均值 0.22。在 0°、45°、90°时,对应的压负荷峰值、抗压强度依次降低;对应的弹性模量、泊松比整体上表现为先降低后升高的特征(图 3),试样应力应变曲线及 KAISER 点位置见图 4。

长 8 储层测试样的地应力大小关系为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 。垂向主应力范围为 20.22 ~ 23.23 MPa,平均值 22.04 MPa,平均应力梯度为 0.015 MPa/m;最大水平地应力范围为 17.68 ~ 22.71 MPa,平均值 20.64 MPa,平均应力梯度为 0.014 MPa/m;最小水平地应力范围为 15.94 ~ 19.87 MPa,平均值 17.90 MPa,平均应力梯度为 0.012 MPa/m。地应力成果表见表 3。

表 3 地应力计算结果

Table 3 Calculation results of geostress

编号	取样深度/m	地层孔隙压力 /MPa	上覆地层应力 /MPa	最大水平地应力 /MPa	最小水平地应力 /MPa	$\tan(2\beta)$
1	1462.92	16.09	21.94	20.48	17.56	0.21
2	1510.56	16.62	22.66	21.15	18.13	0.19
3	1497.59	16.47	23.23	22.71	18.73	0.22
4	1504.99	16.55	22.57	21.07	18.06	0.24
5	1437.84	15.82	21.57	20.13	17.25	0.31
6	1469.82	16.17	22.05	20.58	17.64	0.29
7	1429.9	15.73	20.22	17.68	15.94	0.35
8	1504.66	16.55	22.57	21.07	18.06	0.34
9	1389.73	15.29	20.85	19.46	16.68	0.24

续表 3
Continued Table 3

编号	取样深度/m	地层孔隙压力 /MPa	上覆地层应力 /MPa	最大水平地应力 /MPa	最小水平地应力 /MPa	$\tan(2\beta)$
10	1465.91	16.13	21.28	20.33	19.87	0.29
11	1530.86	16.84	21.44	20.06	17.93	0.18
12	1566.23	17.23	23.08	21.93	18.79	0.19
13	1442.62	15.87	21.64	20.2	17.31	0.26
14	1486.08	16.35	22.29	20.81	17.83	0.25
均值	—	16.27	21.96	20.55	17.84	—

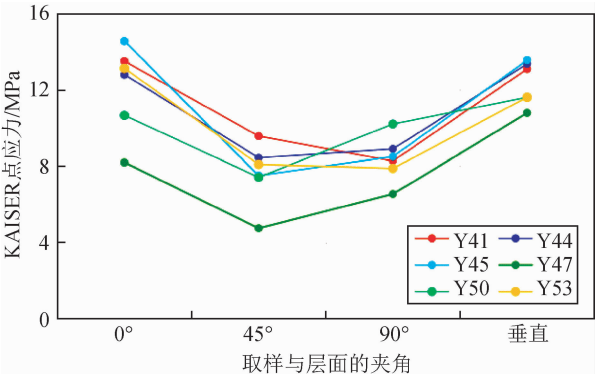


图 2 KAISER 点应力值与取样相位关系图
Fig. 2 Relationship diagram between the stress value at the KAISER point and the sampling phase

2.2.2 抗张强度实验

单轴抗张试验采用间接方法—巴西试验法来测定岩石的抗张强度,样品加工成 $\Phi 25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的圆柱形试样.抗拉强度试验结果表明,抗拉强度范围为 3.88 ~ 13.32 MPa,平均值 7.27 MPa(表 4).

2.2.3 有效应力系数实验

孔隙压力的作用可以通过孔隙弹性系数即 Biot 系数来衡量,采用两步法测定,测定过程为:首先将岩心放入仪器,施加围压、孔压、温度(常温);其次加轴向载荷至围压大小,记录样品横向、纵向变形以及液流量;然后将围压和轴向载荷同时增大 10 MPa,记录样品横向、纵向变形以及液流量;孔隙变形就为

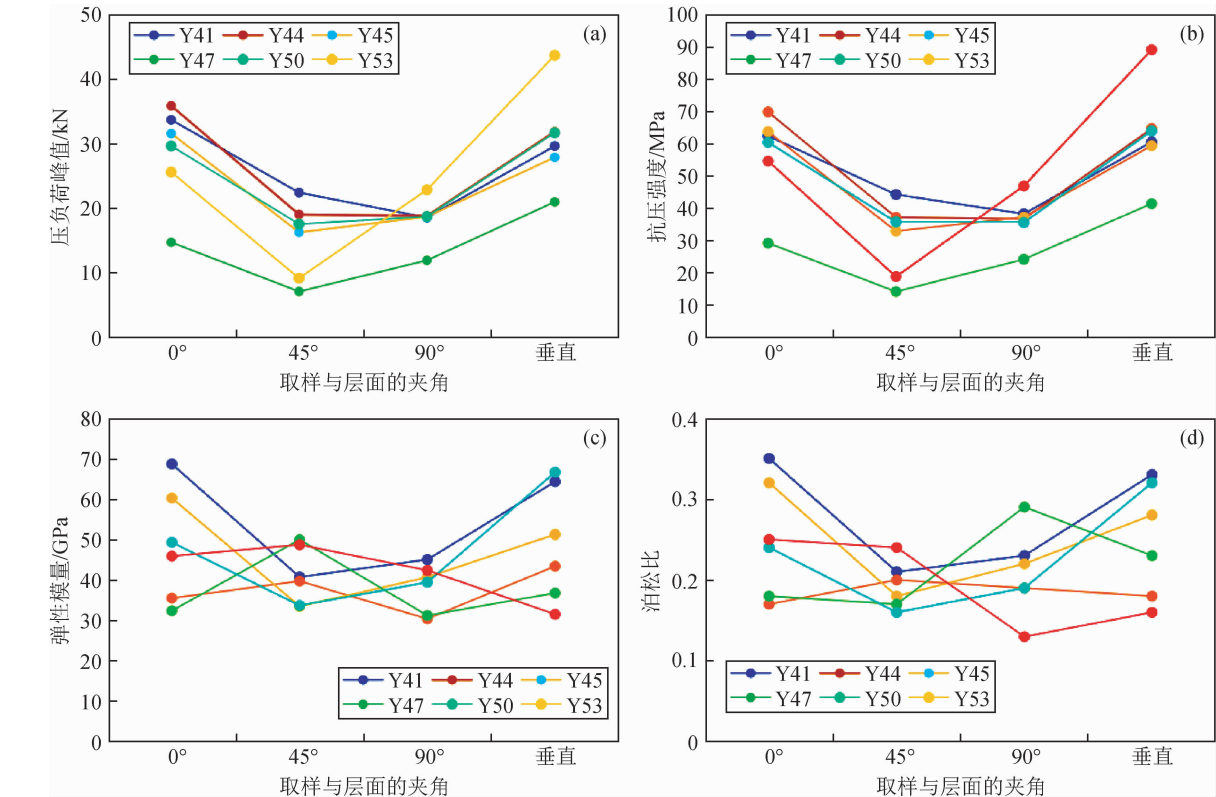


图 3 三轴试验参数与取样相位关系图
Fig. 3 Relationship diagram between triaxial test parameters and sampling phase

表 4 抗拉强度试验结果
Table 4 Test results of tensile strength

编号	取样深度 /m	井号	长度/m	直径/m	质量/g	密度 /(g/cm ³)	最大荷载 /kN	抗拉强度 /MPa
T1	1465.91	QT50	10.47	50.14	49.1	2.38	3.66	6.97
T2			10.57	50.08	49.1	2.36	4.24	8.01
T3			10.36	50.11	48.3	2.37	4.36	8.4
T4			10.05	50.01	52.1	2.64	3.68	7.32
T5	1530.86	QT53	10.1	50.05	51.9	2.61	2.8	5.54
T6			10.61	49.82	52.8	2.55	2.5	4.73
T7			10.37	49.92	51.9	2.56	2.01	3.88
T8			10.51	49.99	52.4	2.54	7	13.32

两者差值,骨架变形为体积差值;最后计算骨架体积模量 k_f 、颗粒体积模量 k_s 并计算 Biot 系数。
实验测试了 7 个岩样的有效应力系数 (Biot 系数),实验测定出的孔隙弹性系数范围 0.70 ~ 0.85,平均值 0.78(表 5)。

表 5 有效应力系数实验测试结果
Table 5 Experimental test results of the effective stress coefficient

序号	井号	层深/m	岩性	孔系弹性 系数 α
1	QT41	1462.92 ~ 1465.20	砂岩	0.811
2	QT41	1510.56 ~ 1512.38	砂岩	0.749
3	QT45	1437.84 ~ 1439.13	砂岩	0.701
4	QT50	1389.73 ~ 1391.40	砂岩	0.726
5	QT50	1465.91 ~ 1467.65	砂岩	0.795
6	QT53	1530.86 ~ 1532.58	砂岩	0.822
7	QT48	1442.62 ~ 1444.61	砂岩	0.845

2.2.4 岩石压缩实验

岩石压缩实验测定参数包括:压缩强度、杨氏模量、泊松比、体积压缩系数、颗粒压缩系数、孔隙弹性系数、拟合单轴抗压强度、黏聚力、内摩擦角。具体实验步骤如下:①试样安装,将试样置于上下压头之间,使三者中心成一条直线并固定,装上轴向与径向位移传感器,置于压力舱,与轴向活塞对中,连接围压管线,孔隙压力管线;②将压力舱充满油,密封压力舱;③以 0.035 MPa/s 的速率加围压至 1 MPa,以 0.035 MPa/s 的速度同时增加围压和孔隙压力 1 MPa,等待 5 min;④加温到测试要求温度值,稳定 15 ~ 30 min;⑤围压与孔压力以 0.05 ~ 0.15 MPa/s

的速率同步上升,始终保持围压大于孔隙压力直到达到所需的孔隙压力水平,压力稳定 5 min;⑥以 0.05 ~ 0.15 MPa/s 的速率继续加围压至所需的围压水平,压力稳定 5 min;⑦以 0.1 ~ 0.5 MPa/s 或 0.0005 ~ 0.0025 mm/s 的速率进行轴加载,直至试样破坏;⑧先卸载轴压,待轴压卸载完后开始同步同速率卸载围压和孔隙压力分别至 2 MPa 和 1 MPa 冷却降温,孔隙压力和围压依次完全卸载,泄油。⑨实验过程中自动连续采集和记录荷载、围压、位移数据,绘制应力—应变曲线。各样品有效应力与孔隙体积压缩系数关系图见图 5,从图中可以看出,孔隙体积压缩系数与有效应力之间存在对数函数关系,即:

$$CP = a * \ln(P_e) + b,$$

(1)

式中,CP 为不同有效压力下的孔隙体积压缩系数,单位为 10^{-4} MPa^{-1} ; P_e 为有效应力,单位为 MPa; a 、 b 为拟合系数。

3 岩石力学参数及地应力评价

3.1 岩石力学参数计算

岩石的弹性参数包含弹性模量与泊松比。其中,弹性模量用于表征岩石的刚度特性,该数值越大,意味着岩石在受到外力作用时,其抵抗变形的能力就越强。从压裂作业的角度来看,这种高抵抗变形能力会给压裂工作带来阻碍,并不利于压裂操作的顺利开展。在确定纵、横波时差后,根据纵波时差测井资料、横波时差预测剖面以及岩石力学实验参数可分析得到的动静态弹性模量转换系数、动静态泊松比转换系数。通过式(2)—(5)可以进行目标井动静态弹性模量剖面、动静态泊松比剖面预测:

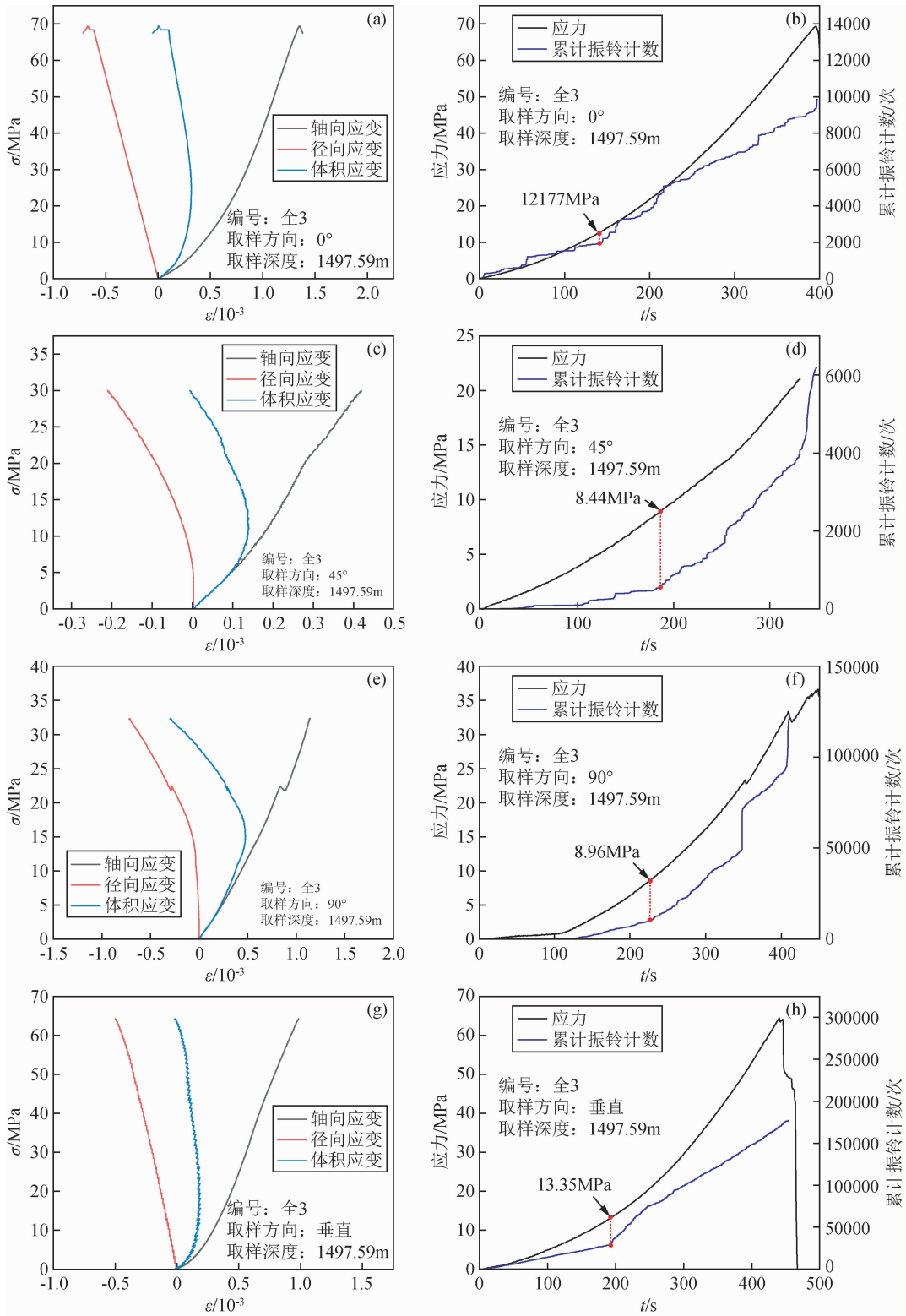


图 4 不同相位垂直应力应变曲线及凯泽点位置 (QT44 井, 深度: 1497. 59 m)

Fig. 4 Vertical stress-strain curves at different phases and the location of the kaiser point (well QT44, depth: 1497. 59 m)

$$E_d = \frac{\rho(3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2)}{\Delta t_s^2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \times 10^6, \tag{2}$$

$$\mu_d = \frac{0.5\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}, \tag{3}$$

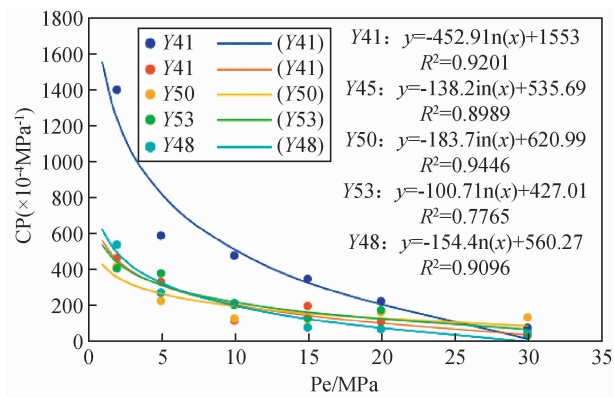


图5 孔隙体积压缩系数与有效应力关系图
Fig.5 Relationship diagram between pore volume compressibility coefficient and effective stress

$$E_s = a_2 E_d + b_2, \tag{4}$$

$$\mu_s = a_3 \mu_d + b_3, \tag{5}$$

式中: E_d 为动态弹性模量,单位为 GPa; μ_d 为动态泊松比,无因次; E_s 为静态弹性模量,单位为 GPa; μ_s 为静态泊松比,无因次。

根据实验分析数据和测井参数计算结果,拟合获取了动、静态弹性模量转换系数: $a_2 = 0.2755$, $b_2 = 33.337$;动、静态泊松比转换系数: $a_3 = 0.1553$, $b_3 = 0.1777$ 。在此基础上对动、静态弹性模量、泊松比预测。结果显示:动态弹性模量为 12.06 ~ 49.68 GPa,静态弹性模量为 21.78 ~ 26.85 GPa(图6);动态泊松比为 0.244 ~ 0.275,静态泊松比为 0.208 ~ 0.241(图7)。

在此基础上,根据岩石弹性模量与泥质含量的

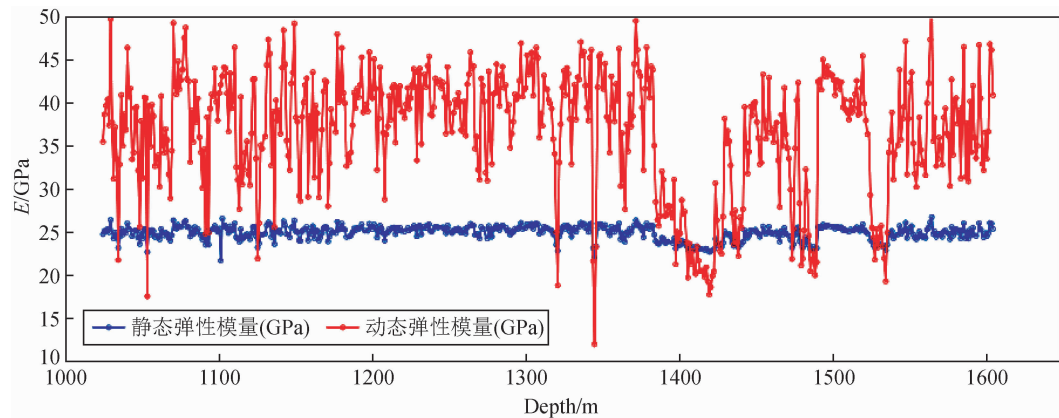


图6 动、静态弹性模量预测剖面(QT27井)
Fig.6 Prediction profile of dynamic and static elastic modulus(well QT27)

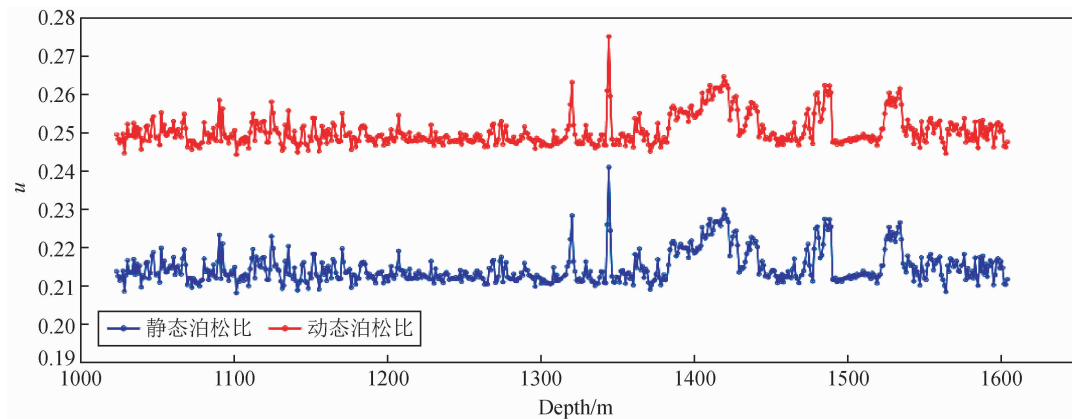


图7 动、静态泊松比预测剖面(QT27井)
Fig.7 Prediction profile of dynamic and static Poisson's ratio(well QT27)

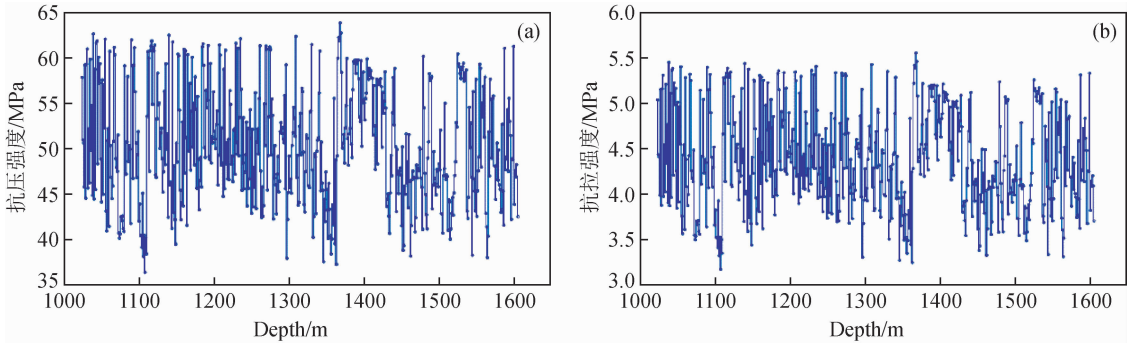


图8 岩石抗压、抗拉强度预测剖面(QT27井)

Fig.8 Prediction profiles of the compressive and tensile strengths of the rock(well QT27)

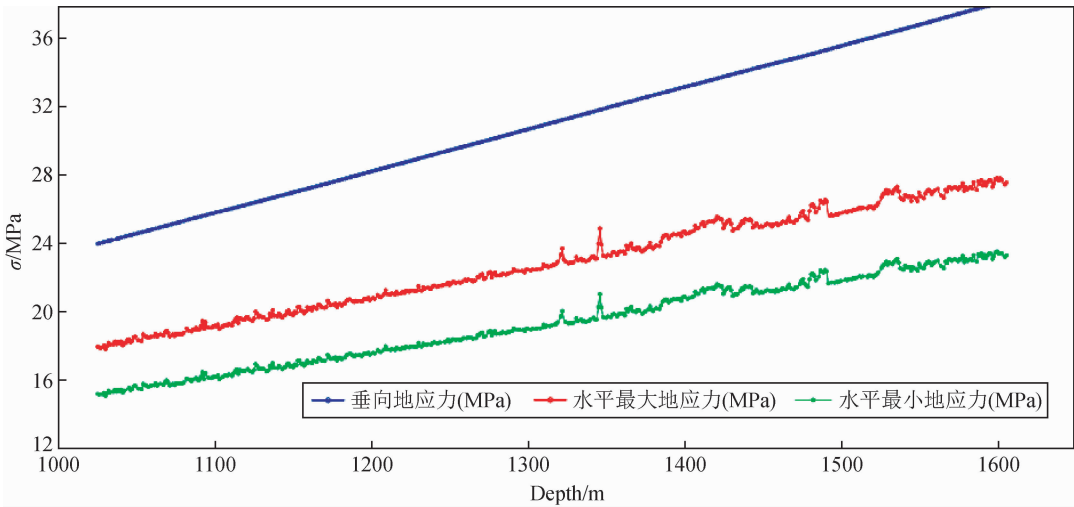


图9 垂向地应力和水平最大地应力剖面(QT27井)

Fig.9 Profiles of vertical geostress and maximum horizontal geostress(QT27)

统计关系式及岩石抗拉强度计算公式,预测目标井岩石抗拉强度剖面、岩石抗压强度剖面(图8),结果显示其抗压强度范围36.48~63.79 MPa,抗拉强度3.17~5.55 MPa.

3.2 地应力评价

基于测井数据,在实验数据约束下,对试验井垂向应力、水平应力开展计算,公式如下:

$$\sigma_v = \int_0^{TVD} \rho g dz, \tag{6}$$

$$\sigma_h = \frac{\mu_s(\sigma_v - \alpha P_p)}{1 - \mu_s} + K_h(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p, \tag{7}$$

$$\sigma_H = K \cdot \sigma_h, \tag{8}$$

式中: ρ 为密度测井测量的岩石的体积密度,单位为 g/cm^3 ; g 为重力加速度,一般取 9.80 m/s^2 . 其中岩石密度暂无测井资料,采用基于泥质含量或均匀岩

石密度进行计算. 式中: σ_h 为水平最小主应力,单位为MPa; μ_s 为静态泊松比,无因次; α 为孔弹性系数,无因次; P_p 为地层孔隙压力,单位为MPa.

利用黄荣樽模型建立关系图确定构造应力系数 K_h 为0.401;根据最大、最小水平地应力关系,确定 $K=1.1521$. 最终确定其垂向地应力分布在23.96~38.26 MPa,水平最大地应力主要分布在17.76~27.83 MPa,水平最小地应力主要分布在15.01~23.51 MPa,水平地应力差分布在2.7~4.3 MPa,预测剖面图见图9.

基于地应力评价结果可以看出,研究区长8致密储层水平应力差异较小,致密储层天然裂缝或层理面可能主导裂缝形态,容易形成复杂缝网. 可采用低黏滑溜水体系和大规模体积压裂工艺对水平井水平段进行改造,以达到最大限度的提高人造缝网复

杂程度,提升储层改造效果.相关成果可为研究区长8致密油水平井井位部署、水平井目的层优选、差异化压裂设计和利用地质工程一体化策略提升产能提供依据.

4 结 论

(1)研究区长8致密油储层岩石矿物主要为石英、斜长石和黏土,平均含量分别为31.8%、22.6%和26.6%,具有高黏土特征,高黏土矿物含量要求压裂液具有较强的防膨性.孔隙类型包括粒间孔、溶蚀孔,石英加大、粒间充填黏土矿物(伊利石)和粒表黏土矿物(伊利石),充填孔隙.

(2)在0°、45°和90°时,对应的KAISER点应力值、压负荷峰值、抗压强度依次降低;对应的弹性模量、泊松比整体上表现为先降低后升高的特征.抗压强度平均值为44.19 MPa;弹性模量平均值为42.79 MPa;泊松比平均值为0.22.抗拉强度平均值为7.27 MPa.孔隙弹性系数平均值为0.78.孔隙体积压缩系数与有效应力之间存在对数函数关系,在有效应力逐渐增大时,孔隙体积压缩系数均表现为“先快速降低,后缓慢降低”的特征.

(3)地应力评价结果可以看出,研究区长8致密储层水平应力差异较小,容易形成复杂缝网.水平井水平段压裂改造中可采用低黏滑溜水体系加大规模体积压裂工艺,以达到最佳储层改造效果.相关试验结果可为研究区长8致密油水平井井位部署、水平井目的层优选、差异化压裂设计和利用地质工程一体化策略提升产能提供依据.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Chen Y G, He Y H, Wang C, *et al.* 2021. Genesis and accumulation patterns of unconventional oil reservoir in Member 8 of Triassic Yanchang Formation: a case study of the western Ganquan area, southeastern Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 42 (10): 1270-1286.

Cui J W, Zhu R K, Li Y, *et al.* 2024. Discovery and geological significance of black carbon in Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and its influences on source rock evaluation, NW China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 51 (6): 1280-1290.

Fu J H, Zhao H T, Dong G D, *et al.* 2023. Discovery and prospect of oil and gas exploration in new areas of Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 34(8): 1289-1304.

Gao Y, Lin L F, Yin S, *et al.* 2021. Characteristics of in situ stress of tight oil reservoirs and its influence on petrophysical properties: a

case study of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Petroleum Geology and Experiment* (in Chinese), 43 (2): 250-258.

Guo P, Li X, Li S D, *et al.* 2024. Combined effect of rock fabric, in-situ stress, and fluid viscosity on hydraulic fracture propagation in Chang 7₃ lacustrine shale from the Ordos Basin. *Journal of Central South University* (in Chinese), 31(5): 1646-1658.

Jiang Y, Gong H J, Pu R H. 2024. Geochemical characteristics of source rocks in the Chang 9-Chang 7 members and their correlation with the tight oil sources of Chang 8 member in the Ganquan-Fuxian area, Ordos Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology* (in Chinese), 44(3): 656-670.

Li J F, Yang L R, Zhang F B, *et al.* 2019. Main controlling factors of enrichment and sweet spot mode of tight sandstone oil reservoir in Chang-8 Member of Yanchang Formation in Xiasiwan Oilfield. *Reservoir Evaluation and Development* (in Chinese), 9(6): 1-9.

Li J F, Yang L R, Gong J S, *et al.* 2022. Technology optimization and field test of stimulated reservoir volume with differential subdivision cutting for horizontal wells in tight oil reservoirs in Xiasiwan oilfield. *Sino-Global Energy* (in Chinese), 27(10): 37-43.

Liang Z Z, Xu H T, Li C. 2022. Discussion on relationship between reservoir oil-bearing and physical properties of Chang 8 section in southwest margin of the Ordos Basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 37(6): 2417-2427, doi: 10.6038/pg2022GG0042.

Ouyang Y, Gong C X, Li Z J, *et al.* 2024. The key drilling and completion technologies and practice of long horizontal well in Longdong shale oil platform in Ordos Basin. *Drilling & Production Technology* (in Chinese), 47(6): 69-75.

Sun N L, Zhong J H, Liu S G, *et al.* 2017a. Diagenesis and physical property evolution of gravity flow tight reservoir of Yanchang formation in southern Ordos Basin. *Earth Science* (in Chinese), 42 (10): 1802-1816.

Sun N L, Zhong J H, Tian D E, *et al.* 2017b. Relationship between event deposits and tight oil of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* (in Chinese), 41(6): 30-40.

Tang Y, Yin S, Wang R F. 2025. Analysis of the impact of rock mechanics and fracture effectiveness on the development of tight sandstone reservoirs: a case study of the Chang 7 member in the Longdong area of Ordos Basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 40(2): 670-680, doi: 10.6038/pg2025H0183.

Tao S Z, Hu S Y, Wang J, *et al.* 2023. Forming conditions, enrichment regularities and resource potentials of continental tight oil in China. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 44(8): 1222-1239.

Xiao Z L, Li Y, Zhu Z Y, *et al.* 2022. Influence of source-reservoir contact conditions on the enrichment of near-source tight oil: taking Chang 8₁ reservoir in the Longdong area of Ordos Basin as an example. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 44(5): 825-834.

Xiao Z L, Li Y, Yu J, *et al.* 2023. Key geochemical evidence of “near-source accumulation” of tight oil: a case study of near-source assemblage of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Petroleum Geology and Experiment* (in Chinese), 45 (3): 517-527.

Yang L R, Li J F, Sun J J, *et al.* 2025. Study on integrated evaluation system of tight oil geological engineering: a case study of Chang 8 reservoir in western Ganquan area, Ordos Basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 40 (1): 166-175, doi: 10.6038/pg2025H0024.

Zhang K S, Mu L J, Lu H J, *et al.* 2024. Overview and practical understanding of the construction of shale oil hydraulic fracture field labs in the Ordos Basin. *Drilling & Production Technology* (in Chinese), 47(6): 16-27.

Zhang J S, Ju W, Li D S, *et al.* 2025. Current geostress characteristics and influencing factors of the Chang 8 reservoir in the Yanchang formation in the Jiuyan area. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 1-11.

Zhong B H, Li J F, Wei T T, *et al.* 2024. Geological characteristics of tight oil and evaluation of sweet spot in Chang 8 Member of Liulouyu

area, Ordos Basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(6): 2357-2367, doi: 10.6038/pg2024HH0455.

Zhu R K, Li G X, Cui J W, et al. 2025. Geological accumulation conditions and exploration prospects of tight oil and gas in China. Acta Petrolei Sinica (in Chinese), 46(1): 17-32.

附中文参考文献

陈义国, 贺永红, 王超, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组 8 段非常规油藏成因与成藏模式——以盆地东南部甘泉西区为例. 石油学报, 42(10): 1270-1286.

崔景伟, 朱如凯, 李扬, 等. 2024. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组黑炭的发现、地质意义及其对烃源岩评价的影响. 石油勘探与开发, 51(6): 1280-1290.

付金华, 赵会涛, 董国栋, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地新领域油气勘探发现与前景展望. 天然气地球科学, 34(8): 1289-1304.

高毅, 林利飞, 尹帅, 等. 2021. 致密油储层地应力特征及其对物性的影响——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组为例. 石油实验地质, 43(2): 250-258.

郭鹏, 李晓, 李守定, 等. 2024. 岩石组构、地应力与流体黏度对鄂尔多斯盆地长 7₃ 陆相页岩水力裂缝扩展的影响规律. 中南大学学报(英文版), 31(5): 1646-1658.

蒋杨, 弓虎军, 蒲仁海. 2024. 鄂尔多斯盆地甘泉—富县地区延长组长 9—长 7 段烃源岩地球化学特征及长 8 致密油源对比. 沉积与特提斯地质, 44(3): 656-670.

李锦锋, 杨连如, 张凤博, 等. 2019. 下寺湾油田延长组长 8 段致密油富集主控因素及“甜点”模式. 油气藏评价与开发, 9(6): 1-9.

李锦锋, 杨连如, 龚嘉顺, 等. 2022. 下寺湾油田致密油水平井差异化细割体积压裂工艺优化及矿场试验. 中外能源, 27(10): 37-43.

梁正中, 许红涛, 李昌. 2022. 低渗致密储层物性对含油性的控制作用浅析——以鄂尔多斯盆地西南缘为例. 地球物理学进展, 37(6): 2417-2427, doi: 10.6038/pg2022GG0042.

欧阳勇, 宫臣兴, 李治君, 等. 2024. 鄂尔多斯盆地陇东页岩油大平台长水平井钻完井关键技术及实践. 钻采工艺, 47(6): 69-75.

孙宁亮, 钟建华, 刘绍光, 等. 2017a. 鄂尔多斯盆地南部延长组重力流致密储层成岩作用及物性演化. 地球科学, 42(10): 1802-1816.

孙宁亮, 钟建华, 田东恩, 等. 2017b. 鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积与致密油的关系. 中国石油大学学报(自然科学版), 41(6): 30-40.

唐颖, 尹帅, 王瑞飞. 2025. 岩石力学特性与裂缝有效性对致密砂岩油藏开发影响分析——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 7 段为例. 地球物理学进展, 40(2): 670-680, doi: 10.6038/pg2025II0183.

陶士振, 胡素云, 王建, 等. 2023. 中国陆相致密油形成条件、富集规律与资源潜力. 石油学报, 44(8): 1222-1239.

肖正录, 李勇, 朱志勇, 等. 2022. 源储接触关系及其对近源致密油富集的影响——以鄂尔多斯盆地陇东地区长 8₁ 油藏为例. 石油实验地质, 44(5): 825-834.

肖正录, 李勇, 喻健, 等. 2023. 致密油“近源成藏”关键地球化学证据——以鄂尔多斯盆地延长组近源组合为例. 石油实验地质, 45(3): 517-527.

杨连如, 李锦锋, 孙继继, 等. 2025. 致密油地质工程一体化评价体系研究——以鄂尔多斯盆地甘泉西部长 8 油藏为例. 地球物理学进展, 40(1): 166-175, doi: 10.6038/pg2025II0024.

张矿生, 慕立俊, 陆红军, 等. 2024. 鄂尔多斯盆地页岩油水力压裂试验场建设概述及实践认识. 钻采工艺, 47(6): 16-27.

张皎生, 鞠玮, 李德生, 等. 2025. 姬塬地区延长组长 8 储层现今地应力特征及其影响因素. 地质通报, 1-11.

钟宝鸿, 李锦锋, 魏涛涛, 等. 2024. 鄂尔多斯盆地柳洛峪地区长 8 段致密油地质特征与甜点区评价. 地球物理学进展, 39(6): 2357-2367, doi: 10.6038/pg2024HH0455.

朱如凯, 李国欣, 崔景伟, 等. 2025. 中国致密油气形成地质条件与勘探前景. 石油学报, 46(1): 17-32.