



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403338

引用格式:万有余,王小琼,林海,等.英雄岭页岩油储层甜点评价的实验研究[J].科学技术与工程,2025,25(11):4496-4504.

Wan Youyu, Wang Xiaoqiong, Lin Hai, et al. Experimental study on sweet spot evaluation of Yingxiongling shale oil reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4496-4504.

石油、天然气工业

英雄岭页岩油储层甜点评价的实验研究

万有余¹, 王小琼^{2*}, 林海¹, 熊廷松¹, 钟毅², 申颖浩²

(1. 中国石油青海油田分公司, 敦煌 736202; 2. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249)

摘要 柴达木盆地英雄岭页岩油主要发育有纹层状和薄层状页岩油储层,为了确定优势甜点,在实验室中开展了纹层状和薄层状页岩岩石物性及力学性质的实验研究,结合现场产液等资料,系统地英雄岭页岩油储层甜点进行了评价。研究结果表明:相比薄层状页岩,纹层状页岩的总有机碳(total organic carbon, TOC)含量高、生烃能力强,原始含油饱和度高;纹层状页岩孔隙度相对低,但纹层状页岩具有较强的各向异性及应力敏感性系数,初始天然微裂隙发育;纹层状页岩水平渗透率高,吸液能力较强,渗吸驱油能力强;纹层状页岩抗压强度相对低,天然微裂隙更发育,破裂后更易沿层理方向形成裂缝条数更多的复杂裂缝网络。实验研究结果与现场的产液分析结果一致,纹层状页岩压后产生的裂缝形态更复杂,液体进入后置换驱油的面积大,导致渗吸驱油的能力强,渗吸驱油效率高,使得纹层状页岩最先产液。综合分析可见纹层状页岩是最优的甜点。研究成果对于英雄岭页岩油的勘探与开发具有重要的理论和实践指导意义。

关键词 英雄岭; 页岩油; 甜点; 纹层状页岩; 薄层状页岩

中图分类号 TE135; 文献标志码 A

Experimental Study on Sweet Spot Evaluation of Yingxiongling Shale Oil Reservoir

WAN You-yu¹, WANG Xiao-qiong^{2*}, LIN Hai¹, XIONG Ting-song¹, ZHONG Yi², SHEN Ying-hao²

(1. Petrochina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang 736202, China; 2. Unconventional Oil & Gas Science and Technology Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

[Abstract] The Yingxiongling shale oil reservoirs in the Qaidam Basin are notably characterized by the development of the laminated shale and thin-layered shale. In order to identify the superior sweet spots, an experimental study on the physical and mechanical properties of laminated and thin-layered shales was conducted, and the sweet spots of the Yingxiongling shale oil reservoirs were systematically evaluated in conjunction with the analysis of oilfield production data. The results show that laminated shale exhibits higher total organic carbon (TOC) content, stronger hydrocarbon generation capacity, and higher initial oil saturation compared to thin-layered shale. Although laminated shale has lower porosity, it exhibits stronger anisotropy, higher stress sensitivity coefficient, and more developed initial natural microcracks. Additionally, the laminated shale demonstrates high horizontal permeability, strong fluid absorption capacity, and effective imbibition oil displacement ability. Its lower compressive strength facilitates the formation of complex fracture networks. The experimental research results are consistent with the in site fluid production analysis. The fracture morphology generated by the laminated shale is more complex with strong oil displacement ability and high oil displacement efficiency, indicating that the laminated shales produce fluids first; therefore, it is concluded that the laminated shales are the preferred sweet spots. The findings of this study have important theoretical significance for the exploration and development of shale oil in Yingxiongling.

[Keywords] Yingxiongling; shale oil; sweet spots; laminated shale; thin-layered shale

非常规油气藏勘探开发技术理论近年来得到了不断完善发展^[1-4],以北美页岩油气革命为代表,提升了非常规油气藏在全世界范围内的地位^[5]。中国非

常规油气藏分布广,储量大^[6]。其中柴达木盆地英雄岭油气构造带位于柴达木高山深盆柴西部古近系-新近系,是盆地重要的油气勘探区域^[7-9]。近几年来,凭

收稿日期: 2024-05-07 修订日期: 2024-08-10

基金项目: 青海省科技项目(2025-0202-QYC-0056)

第一作者: 万有余(1983—),男,汉族,青海海东人,硕士,高级工程师。研究方向: 钻采工艺、储层改造等。E-mail: wanyouyuqh@petrochina.com.cn。

* 通信作者: 王小琼(1984—),女,汉族,湖南永州人,博士,副研究员。研究方向: 非常规油气开发和岩石物理。E-mail: wxq4526@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

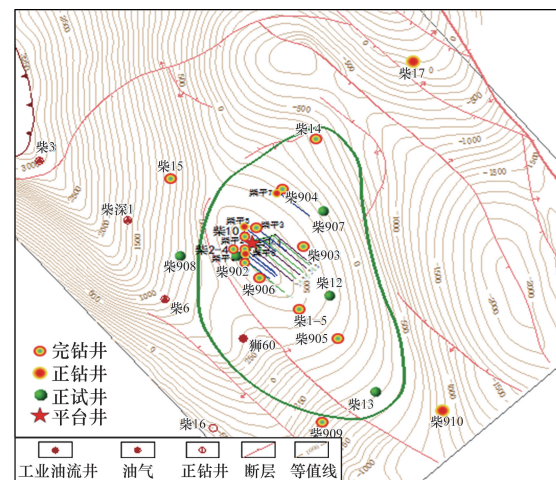
借“探评水平井评价不同箱体,试验水平井组提效,直井多层合采探索效果”的工作思路开展室内研究及矿场实践,取得了重要突破。2021年完试的7口直井均获工业油流,其中柴平1井,日产油高达 124 m^3 ,日产气 $15\,358\text{ m}^3$,实现了战略突破^[10]。

地质勘探结果表明:英雄岭页岩油储层下干柴沟组上段主要发育有薄层状页岩和纹层状页岩两种主要的页岩油类型,呈复杂叠置状态分布。页岩纹层发育稳定连续,主要是富含有机质纹层与富碳酸盐纹层高频交互,通常纹层厚度小于 1 cm ,大部分是小于 1 mm 。薄层状页岩主要以碳酸盐矿物为主,为混积型碳酸盐岩,层理厚度 1 cm 以上。根据层理和矿物成分,主要分为薄层状灰云质页岩、薄层状黏土质页岩、纹层状灰云质页岩和纹层状黏土质页岩。因为黏土质页岩的含量相对较少,主要是薄层状灰云质页岩和纹层状灰云质页岩,为此将研究重点放在薄层状灰云质页岩和纹层状灰云质页岩的对比上。研究区块储层的组构特征使得研究区储层具有很强的各向异性而非均质性^[11-12]。导致页岩油储层甜点的评价与选取较为复杂且困难^[13-14]。为此在实验室内以柴达木盆地英雄岭干柴沟组页岩油为研究对象,开展岩石物性与力学特性的实验研究,结合现场测井等资料,系统对比纹层状页岩油储层以及薄层状页岩油储层的总有机碳(total organic carbon, TOC)、生烃能力、含油饱和度、孔隙度、渗透率、天然微裂隙发育及渗吸驱油潜力、形成复杂裂缝的能力等。研究结果对于英雄岭页岩油的勘探与开发具有重要的理论和实践指导意义,同时对国内外相似地质背景的页岩油气储层的勘探开发也具有重要的借鉴意义。

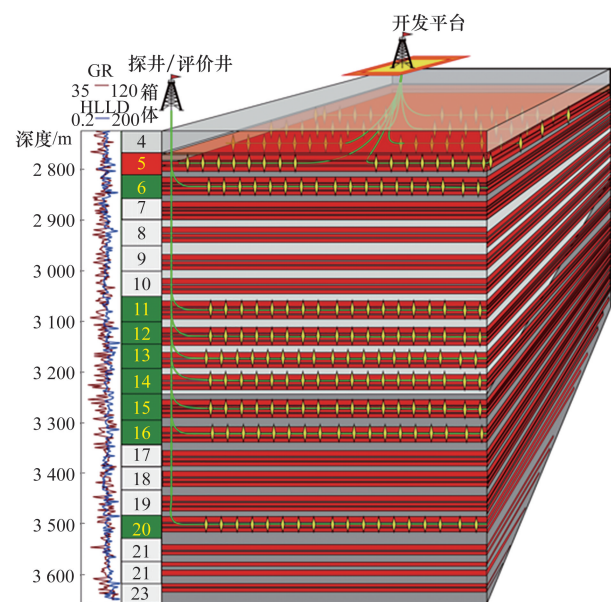
1 研究区概况

英雄岭页岩油资源量估算高达 $21 \times 10^8\text{ t}$,有巨大的开发潜力^[10],包含狮子沟、花土沟、油砂山、英东、英西、上干柴沟和下干柴沟等组^[15],其中主力层位为下干柴沟组上段(E_3^2) [图1(a)]。英雄岭区块下干柴沟组上段是典型的巨厚山地式多箱体混合沉积页岩油气藏,有效烃源岩厚度为 $600 \sim 700\text{ m}$,纵向厚度大,岩性非均质性强,沉积特征上高频回旋发育,由上至下共划分为23个箱体[图1(b)],并分为上甜点、中甜点和下甜点三个甜点集中段,其中上甜点主要分布在4~6箱体,中甜点主要分布于14~16箱体,下甜点分布于19~21箱体^[16-17]。

本次研究主要选取柴2-4井的纹层状灰云质页岩、薄层状灰云质页岩、纹层状黏土质页岩、薄层状黏土质页岩开展研究,并与现场的产液剖面等结论进行比对。



(a)干柴沟地区 E_3^2 页岩油勘探成果图



(b)英雄岭页岩油下干柴沟组上段23个箱体及开发平台示意图

图1 柴达木盆地英雄岭页岩油区地质油气构造图

Fig. 1 Geological map of Yingxiong shale oil in Qaidam Basin

2 TOC 含量表征

有机质丰度的评价是判断烃源岩品质的重要手段,常用的指标为有机碳含量(TOC)及生烃潜力 $S_1 + S_2$ 。评价的标准基于中国石油行业标《陆相烃源岩地球化学评价方法》^[18]。选取柴2~4井的纹层状灰云质页岩、薄层状灰云质页岩、纹层状黏土质页岩、薄层状黏土质页岩,采样深度范围 $2\,800 \sim 3\,000\text{ m}$,在实验室中使用碳硫分析仪测量了其TOC的含量和 S_1 、 S_2 。碳硫分析仪是快速准确测定页岩样品中碳和硫含量的专用仪器,利用 CO_2 和 SO_2 分别在 $4.26\ \mu\text{m}$ 和 $7.4\ \mu\text{m}$ 处具有较强的特征吸收带这一特性,其根据郎伯-比尔定律将测量光强度换算成混合气体中 CO_2 和 SO_2 的含量,用两种气体中碳元素和硫元素含量除以页岩样品的质量,即可得到页岩样品中总有机碳

(TOC)的含量。研究表明,研究区块样品 TOC 介于 0.4% ~ 2.7%, 平均值为 1%, TOC $\geq 1.0\%$ 烃源岩占比 49.4%。实验测得 S_1 介于 0.04 ~ 17.12 mg/g, 平均 2.55 mg/g; 实验测得 S_2 介于 0.08 ~ 18.82 mg/g, 平均 5.12 mg/g。纹层状灰云质页岩有效源岩 TOC 平均值最大(图 2)。整体来说,纹层状页岩 TOC 含量高,生烃能力强,生油潜力大,利于生油。现场的密闭取心二维核磁共振的结果也表明,薄层状页岩的含油饱和度要低于纹层状的含油饱和度。薄层状页岩的可动油饱和度平均约为 48%, 纹层状页岩的可动油饱和度平均约为 56%^[11]。

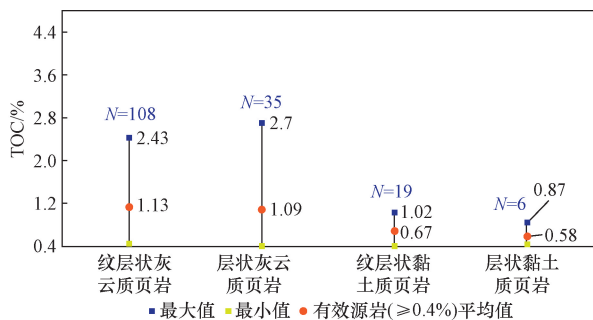


图 2 四类岩性的 TOC

Fig. 2 TOC content in four lithologic shales

3 孔隙和微裂隙表征

3.1 孔隙度和渗透率表征

因为黏土质页岩的含量相对较少,主要是薄层状灰云质页岩和纹层状灰云质页岩,为此将研究重点放在薄层状灰云质页岩和纹层状灰云质页岩的对比上。在实验室中主要针对薄层状灰云质页岩和纹层状灰云质页岩的孔隙度和渗透率进行了测量。孔隙度利用 KXD-III 氦气孔隙度测定仪进行测量,渗透率采用 YRD-CP200 脉冲式低渗透测定仪和脉冲渗透率法进行测试获得。先保持岩样两端的孔隙流体压力和相同,在某一时刻,突然将岩样一端的孔隙流体压力升高一个 ΔP 。则两端压力分别会指数减少或指数增加,直到它们达到新的平衡状态。通过测量流体流过岩样以及流体压力随时间的指数变化,可得到渗透率。图 3 所示为两类样品的孔隙度和渗透率测量结果。从图 3 可以看出,纹层状页岩的平均孔隙度约为 3%, 薄层状页岩的孔隙度平均为 4.98%。沿着平行地层层理方向测量两类样品的渗透率,发表纹层状页岩的平均渗透率约为 0.2 mD, 而薄层状页岩的渗透率约为 0.128 mD。这表明虽然纹层状页岩的孔隙度较低,但平行渗透率比薄层状的较高,表明发育了较多的微裂隙,这些微裂隙对孔隙度的贡献率较小,但却是影响渗透率的主要因素。

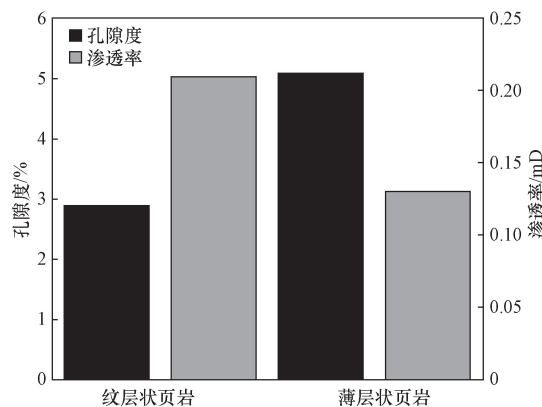


图 3 两类岩性的孔隙度和渗透率表征

Fig. 3 Porosity and permeability of two lithologic shales

3.2 应力敏感性

在低应力情况下,波速随着应力的增加会增加,主要是样品中的天然微裂隙闭合引起波速增加。为此可以使用波速随应力变化的应力敏感性来评价样品中微裂隙的发育情况^[19]。本次评价通过三次循环加载测量岩心在轴压变化下的波速,从而得出波速与轴向应力之间的关系。采用三次循环加载的原理是当岩心从地下取出,应力释放使岩心内部原有微裂隙开度增大或产生新的微裂隙,为此先对岩心进行两轮预加载减少应力释放的影响,然后选取第三次加载的波速应力敏感性来判断储层在地底下的微裂隙发育程度。应力敏感性系数在 30 m/(s·MPa) 以上,表明微裂隙很发育。应力敏感性系数在 10 m/(s·MPa) 以下,微裂隙不太发育,介于 10 ~ 30 m/(s·MPa),表明微裂隙较发育^[19]。图 4 所示为本次实验测得的应力敏感系数,可以看出,纹层状页岩应力敏感系数均值为 34.18, 应力敏感系数较大,层理与微裂隙很发育,使得其非均质性强。薄层状页岩应力敏感系数低,均值为 12.19,整体小于 20,表明其微裂隙中等发育。

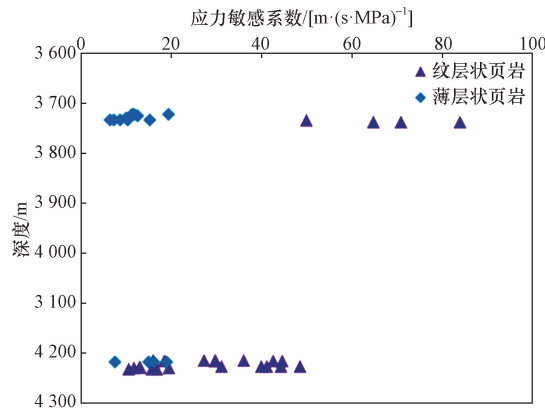


图 4 两种岩性页岩应力敏感系数对比图

Fig. 4 Comparative scatter plots of stress sensitivity for two lithologic shales

3.3 波速各向异性

波速各向异性是层理发育程度的宏观表现,利用超声测试系统开展储层样品不同方向上的波速测量可以研究储层的各向异性^[20]。波速各向异性的大小是表征储层层理发育程度的重要参数之一。波的传播速度受到传播路径上介质的影响,当波以垂直方向穿过微裂隙或层理弱面时,波速会变低,当波以平行方向穿过微裂隙时,波速会较大。为此不同路径上波速的差异,即波速各向异性会反映裂隙的方向和形态。所以波速各向异性越大,表明层理缝越发育^[20]。图5所示为两种岩性波速各向异性系数的对比图,由图5可知,纹层状页岩的波速各向异性系数分布在0.09~0.42,薄层层状各向异性系数分布在0.05~0.13。纹层状页岩波速各向异性更高,岩石沿层理排列的微裂隙更为发育。薄层层状页岩波速各向异性更低,表明其更加均质,沿层理分布的微裂隙没有纹层状页岩的微裂隙发育,这个研究结果与2.1节中纹层状平行渗透率较高的结果是一致的,也与2.2节中的波速应力敏感性系数结果一致。

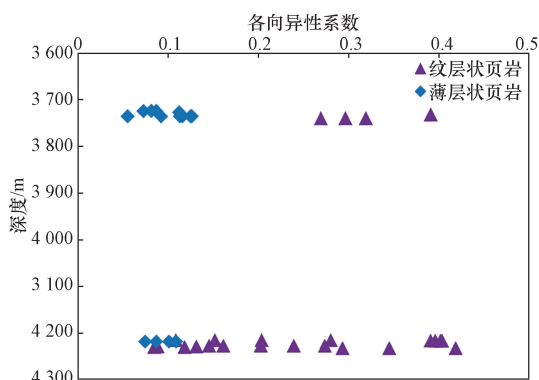


图5 两种岩性页岩波速各向异性系数对比图

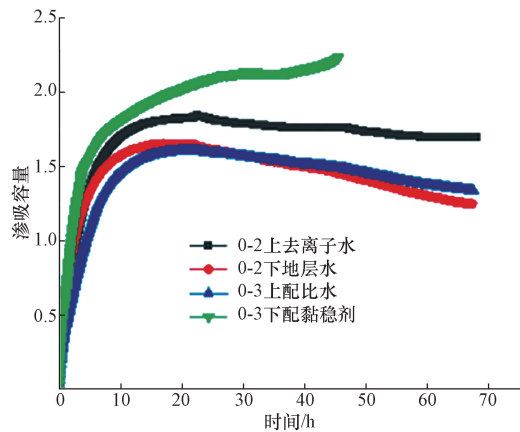
Fig. 5 Comparative scatter plots of wave velocity anisotropy coefficients for two lithologic shales

4 渗吸驱油能力分析

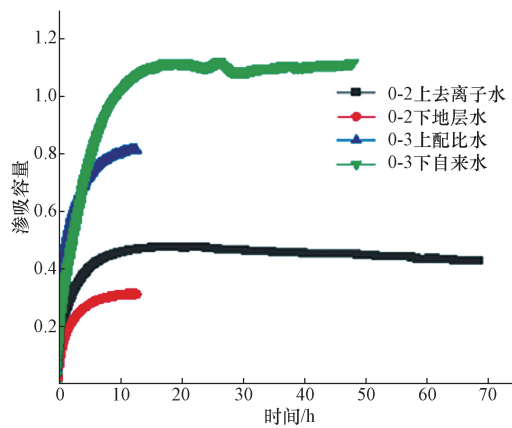
4.1 自发渗吸分析

岩心在吸入压裂液后的总质量会增大,因此凭借观察岩心在自发渗吸过程中质量的改变量获得岩心吸液的规律,岩心吸入一定量液体后也会将驱油,为此吸液规律具有很重要的研究意义^[21]。利用自发渗吸实验装置,分别对纹层状页岩和薄层状页岩岩心开展自发渗吸实验,研究两种岩性岩心的渗吸量与时间的关系曲线,渗吸方式为岩心全面暴露在渗吸液中。图6所示为两类岩心的自发渗吸曲线,实验结果表明英雄岭页岩油吸水能力整体较强,渗吸初始阶段,渗吸液快速吸入,渗吸时间15 h

左右岩心质量达到最大值,说明两种岩性岩心具有较快的渗吸速率,渗吸平衡时间短。比较两类岩性,纹层状页岩整体的渗吸速度和效率均高于薄层状页岩,主要跟其裂隙较发育相关。图7所示为渗吸实验后两类岩心的外观图,可以看出纹层状页岩渗吸过程中岩石会次生裂缝。



(a)纹层状页岩



(b)薄层状页岩

图6 纹层状和薄层状页岩渗吸曲线

Fig. 6 Imbibition curves for laminated and thin-layered shales



(a)纹层状页岩

(b)薄层状页岩

图7 纹层状和薄层状页岩渗吸实验后外观

Fig. 7 Appearance of laminated and thin-layered shale samples after imbibition experiments

4.2 渗吸驱油能力分析

非常规页岩岩心的渗吸驱油实验是当今实验室内评价非常规储层岩心的开发效率的重要实验方法^[22]。通过对地层岩心进行洗油、饱和模拟油和地层原油、再进行自发渗吸和高温渗吸等多种条件的变化,使用体积法或者质量差法来对渗吸效果进行评价^[23],可以获得不同因素对渗吸驱油的影响,是一种针对现场开发方案提供合理判断的重要方法。图8所示为纹层状页岩和薄层状页岩两种岩性渗吸驱油的实验结果,结果表明英雄岭页岩油具有较强的渗吸驱油潜力,其中纹层状页岩的渗吸效率高于薄层状页岩,利用渗吸驱油作用可以有效地动用纹层状页岩小孔隙中的原油,从而提高整体的原油可动用性。

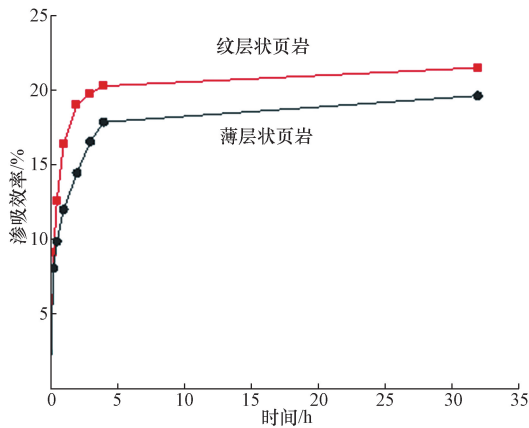


图8 纹层状页岩和薄层状页岩渗吸驱油效率对比曲线
Fig. 8 Comparison curve of oil displacement efficiency between laminated and thin layered shale

5 岩石力学性质及压后裂缝形态分析

对纹层状页岩和薄层状页岩进行单轴压缩实验,以此可以获得两种岩性岩心的岩石力学性质和压后裂缝网络形态。本次单轴加载采用的设备是伺服控制三轴加载设备(图9),该仪器的主要功能是对样品进行常规的单三轴实验以及剪切实验。围压最大可达70 MPa,轴向最大载荷为300 kN。加载过程中采用应变规获得轴向和横向应变。典型的应力-应变曲线主要包括5个阶段。第一阶段在应力的加载下,样品内部微裂隙发生闭合。在样品中微裂隙闭合后进入第二阶段线弹性阶段,岩石的弹性模量、泊松比等弹性参数即可从这个阶段获得。之后随着应力的增加,样品中开始有裂隙稳定扩展,然后进入第四阶段裂隙非稳定扩展阶段,随着应力持续增加达到岩心破裂压力时,样品发生破裂,进入第五阶段,即破裂后阶段。

图10所示为纹层状页岩和薄层状页岩两类岩

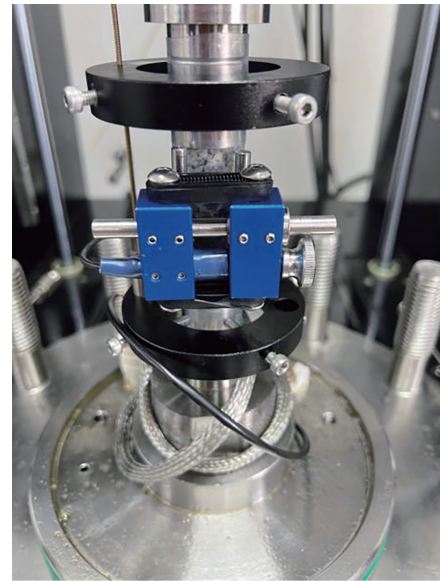


图9 样品加载及测试系统
Fig. 9 Sample loading and testing system

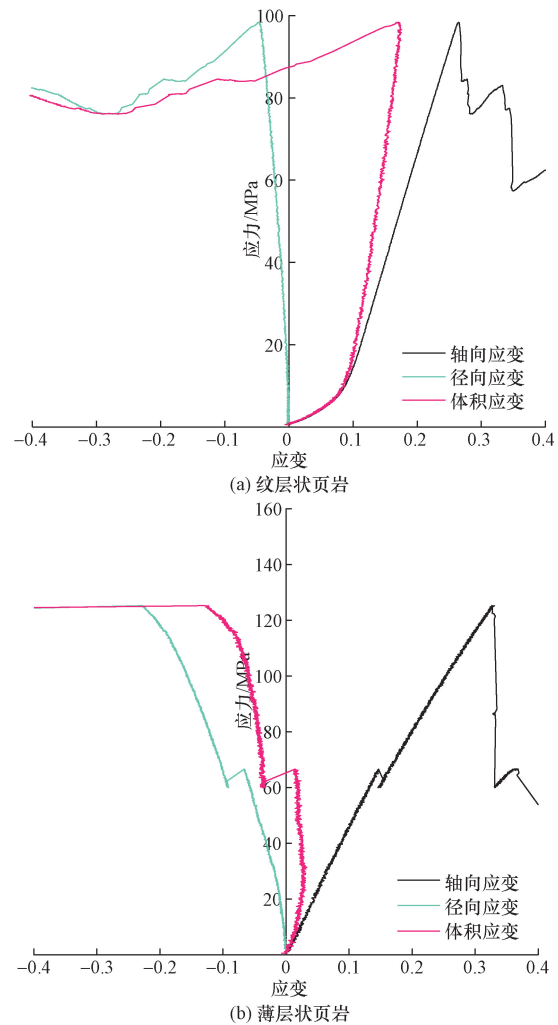


图10 纹层状和薄层状页岩应力-应变曲线
Fig. 10 Stress-strain curves of laminated and thin-layered shale

性的应力-应变曲线,从图 10 可知,纹层状页岩的杨氏模量低于薄层状页岩,泊松比高于层状页岩,纹层状页岩的抗压强度在 90 ~ 100 MPa,薄层状页岩的抗压强度在 120 ~ 130 MPa。纹层状页岩的抗压强度远小于薄层状页岩的抗压强度,且纹层状页岩的应力应变曲线上具有应变台阶,应变台阶主要是其中的微裂隙发生错动导致。纹层状页岩的抗压强度低、具有应变台阶主要跟纹层状页岩的微裂隙很发育相关,这个研究结果跟 2.2 节和 2.3 节波速应力敏感性 & 波速各向异性的评价结果是一致的。图 11 所示为两种岩心在经过单轴压缩实验后的破裂形态图,由图 11 可知,纹层状页岩和薄层状页岩都容易沿层理缝扩展和沟通,形成复杂裂缝网络。其中纹层状页岩由于层理缝更为发育,压缩破坏后的形态更为复杂,产生的裂缝条数更多。薄层状页岩岩心压后的裂缝条数更少一些,裂缝形态相对简单,主要形成共轭的 X 形剪切裂缝。

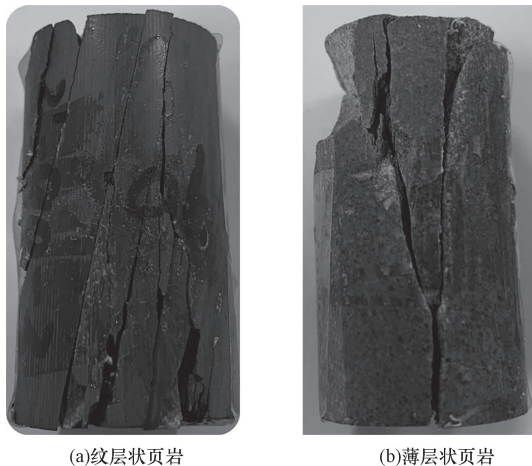


图 11 纹层状和薄层状页岩单轴压缩后破裂形态图

Fig. 11 Fracture morphology of laminated and thin-layered shale after uniaxial compression

6 产液动态分析

为了验证实验结果的可靠性,也将实验室的结果与现场的产液动态进行了对比分析。图 12 所示为研究区某井 CP1 井产液剖面及示踪剂分析,该井共压裂有 21 段。在经历放喷 50 d 后该井所有段全部产油,彰显出水平井产量高且稳定的经济价值特点。监测的压裂示踪剂结果表明,CP1 井 21 段的动用大体划分为三次差异化动用,第一次是投产后 10 d 内,动用的主要是以纹层状页岩为主的 20、21、13、14、16、1、2 段,见剂时间快,示踪剂浓度高;第二次是投产后的 10 ~ 25 d 内,动用主要是以纹层状页岩为主的 19 段和以薄层状为主的 5 段和 10 段;第三次是投产后的 25 ~ 50 d 内,动用的主要是以薄层状为主的 3、4、6、7、8、9、11、12、15、17、18 段,见剂时间慢,示踪剂浓度低。整体来说,相比薄层状页岩,纹层状页岩见剂时间快,最先动用。由此可见,纹层状页岩是最优甜点,该现场结果跟实验结果较一致,因为产液的速率与压裂后裂缝形态复杂有关,纹层状页岩天然微裂隙发育,压后产生的裂缝形态更复杂,液体进入后置换驱油的面积大,导致渗吸驱油的能力强,渗吸驱油效率高,使得纹层状页岩最先产液。

图 13 所示为纹层状页岩和薄层状页岩岩石物性的对比图。整体来讲,相比薄层状页岩,纹层状页岩的 TOC 含量高、生烃能力强,原始含油饱和度高;纹层状页岩孔隙度相对低,但纹层状页岩的初始天然微裂隙更为发育,纹层状页岩水平渗透率高,吸液能力较强,渗吸驱油能力强;纹层状页岩抗压强度相对低,更容易形成复杂裂缝网络;实验研究结果与现场的产液分析结果一致,纹层状页岩最先产液,综合来看纹层状页岩是最优的甜点。

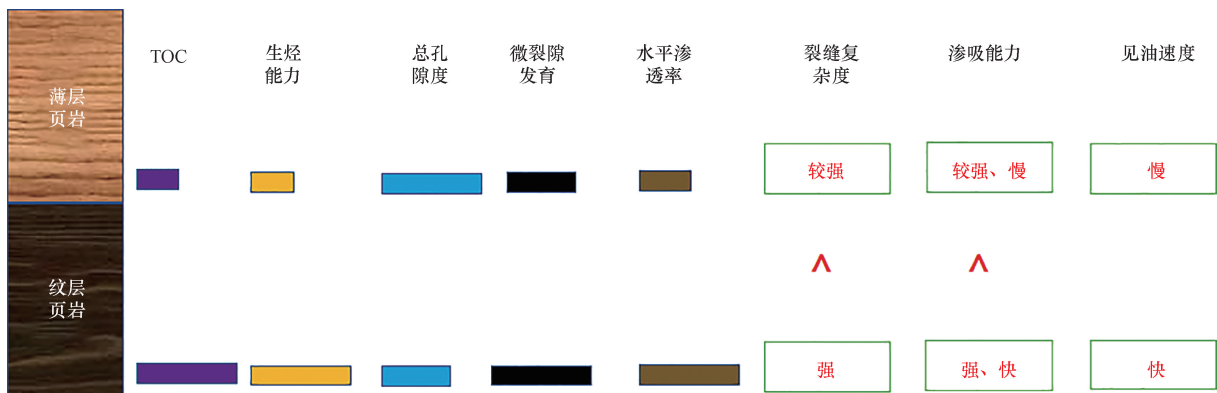


图 13 薄层页岩和纹层页岩物性的对比图

Fig. 13 Comparison schematic of the physical properties between thin-layered and laminated shales

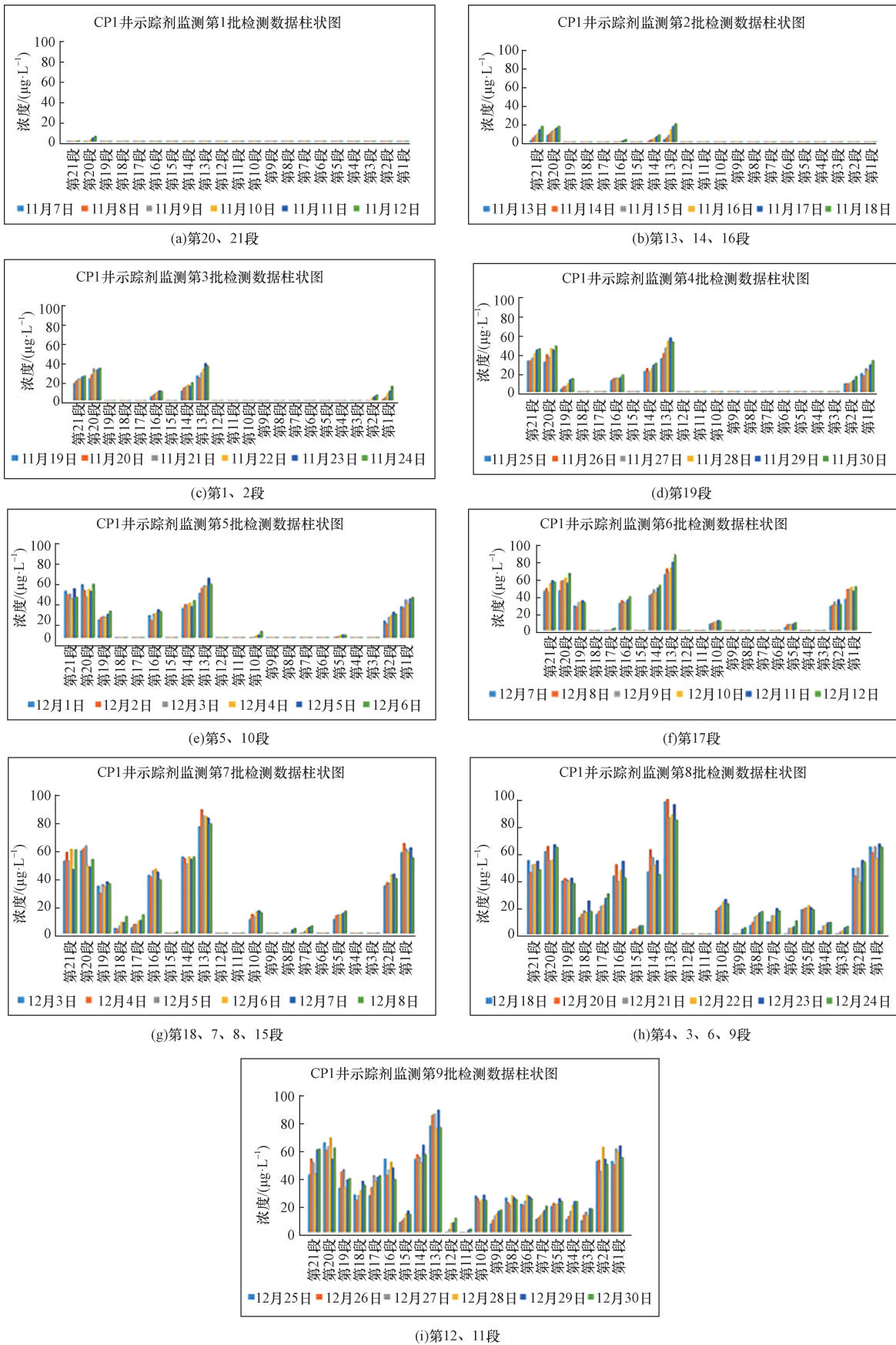


图 12 CPI 井各压裂段差异化动用图

Fig. 12 Differential utilization diagram of each fractured section in Well CPI

7 结论及建议

(1)通过实验室中对薄层页岩和纹层页岩两类岩性的实验分析表明,英雄岭页岩油纹层状页岩TOC含量较高、生烃能力相对强,原始含油饱和度高。

(2)相比薄层状页岩,纹层状页岩具有较低的总孔隙度,但其波速各向异性和波速应力敏感性系数较高,因此表明其具有更为发育的天然裂隙。

(3)相比薄层状页岩,纹层状页岩沿层理方向的天然裂隙更为发育,为此其平行层理的渗透率较大,自发渗吸能力强,渗吸驱油潜力更好。

(4)纹层状页岩因为微裂隙较发育,为此其抗压强度低,破裂后容易沿层理方向形成裂缝条数更多的复杂裂缝网络。

(5)实验研究结果与现场的产液分析结果一致,纹层状页岩最先产液,综合来看纹层状页岩是最优的甜点。综合来看,纹层状页岩是最优的地质甜点和工程甜点:含油饱和度高,缝网形成能力强,渗吸驱油潜力好。本文的研究成果对于英雄岭页岩油的勘探与开发具有重要的理论和实践指导意义。

参 考 文 献

- [1] Pollastro R M. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant barnett shale continuous (unconventional) gas accumulation, fort worth basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 551-578.
- [2] Yerkin D. Energy reshaping the world [M]. Zhu Yuben, Yan Zhimin, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [3] 窦立荣, 温志新, 王建君, 等. 2021年世界油气勘探形势分析与思考[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 1033-1044.
Dou Lirong, Wen Zhixin, Wang Jianjun, et al. Analysis of the world oil and gas exploration situation in 2021 [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 1033-1044.
- [4] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 非常规油气地质学理论技术及实践[J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2376-2397.
Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Theory, technology and practice of unconventional petroleum geology [J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2376-2397.
- [5] 张福祥, 李国欣, 郑新权, 等. 北美页岩革命时代带来的启示[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 26-39.
Zhang Fuxiang, Li Guoxin, Zheng Xinquan, et al. Enlightenment from the post shale revolution era in North America [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 26-39.
- [6] 程强, 秦紫函. 我国陆相页岩油革命呈燎原之势[N]. 中国石化报, 2023-03-13(006).
Cheng Qiang, Qin Zihan. China's continental shale oil revolution is spreading rapidly [N]. Sinopec News, 2023-03-13(006).
- [7] 郝万鑫, 周飞, 陈果, 等. 柴达木盆地西部地区古近系——新近系烃源岩地球化学特征及其对形成机制的差异性响应[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(10): 1855-1870.
Hao Wanxin, Zhou Fei, Chen Guo, et al. Geochemical characteristics and their differential responses to formation mechanisms of the Paleogene and Neogene source rocks in western Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(10): 1855-1870.
- [8] 邢蓝田. 柴达木盆地西部第三系咸化湖盆烃源岩的生烃及成藏特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Xing Lantian. Hydrocarbon generation and accumulation characteristics of Tertiary saline lacustrine source rocks in the western Qaidam Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [9] 李国欣, 石亚军, 张永庶, 等. 柴达木盆地油气勘探、地质认识新进展及重要启示[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(6): 1-18.
Li Guoxin, Shi Yajun, Zhang Yongshu, et al. New progress and enlightenment of oil and gas exploration and geological understanding in Qaidam Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(6): 1-18.
- [10] 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 Delong, Shen Yinghao, Lin Hai, 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.
- [11] 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 Guoxin, Zhu Rukai, Zhang Yongshu, 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.
- [12] 姜在兴, 张建国, 孔祥鑫, 等. 中国陆相页岩油气沉积储层研究进展及发展方向[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 45-71.
Jiang Zaixing, Zhang Jianguo, Kong Xiangxin, et al. Research progress and development direction of continental shale oil and gas deposition and reservoirs in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 45-71.
- [13] 史璨, 林伯韬, 谢勃勃, 等. 基于双甜点的页岩储层可压性评价方法[J]. 深圳大学学报(理工版), 2024, 41(2): 183-191.
Shi Can, Lin Botao, Xie Bobo, et al. Evaluation method of shale reservoir fracability based on double sweet spots [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2024, 41(2): 183-191.
- [14] Donovan A, Evenick J, Banfield L, et al. An organofacies-based mudstone classification for unconventional tight rock and source rock plays [C]//Unconventional Resources Technology Conference. Austin: URTEC, 2017: URTEC-2715154-MS.
- [15] 王艳清, 刘占国, 宋光永, 等. 咸化湖盆滩坝砂岩发育特征、控砂机制及油气成藏特征——以柴达木盆地西南地区新近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 742-754.
Wang Yanqing, Liu Zhanguo, Song Guangyong, et al. Development, sand control mechanism and hydrocarbon accumulation of beach-bar sandstone in a saline lake basin: a case from the Neogene of southwestern Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 742-754.
- [16] 党建锋, 张永国, 邱忠. 柴达木盆地英雄岭页岩油体积压裂技术攻关与实践[J]. 石油化工应用, 2023, 42(10): 62-67.
Dang Jianfeng, Zhang Yongguo, Qiu Zhong. Research and practice of volume fracturing technology for shale oil in Yingxiongling

- area, Qaidam Basin [J]. Petrochemical Industry Application, 2023, 42(10): 62-67.
- [17] 范旭强. 英西地区混积致密储层岩石物理特征及其含流体性质识别[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
Fan Xuqiang. Petrophysical characterization of tight reservoirs in the mixed sediments and its fluid types identification in Yingxi Area [D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2020.
- [18] 中国石油天然气总公司. 陆相烃源岩地球化学评价方法: SY/T 5735—1995[S]. 北京: 中华人民共和国石油天然气行业标准, 1995.
China National Petroleum Corporation. Geochemical evaluation methods of continental source rocks: SY/T 5735—1995[S]. Beijing: China Oil and Gas Industry Standards, 1995.
- [19] Wang X Q, Ge H K, Wang J B, et al. Evaluation of the micro-cracks in shale from the stress sensitivity of ultrasonic velocities [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(12): 4929-4934.
- [20] Wang X Q, Wu S, Ge H K, et al. Experimental study on the anisotropy of shale with wave velocity and permeability[C]//The Proceedings of the 53rd U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. New York: ARMA, 2019: 0405.
- [21] 张奎, 刘敦卿, 黄波, 等. 吉木萨尔芦草沟组致密油储层渗吸驱油特性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 538-545.
Zhang Kui, Liu Dunqing, Huang Bo, et al. Imbibition displacement characteristics in tight oil reservoir of Lucaogou Formation, Jimsar[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 538-545.
- [22] 李传亮, 毛万义, 吴庭新, 等. 渗吸驱油的机理研究[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(6): 687-694.
Li Chuanliang, Mao Wanyi, Wu Tingxin, et al. A study on mechanism of oil displacement by imbibition [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 687-694.
- [23] 石立华, 薛颖, 崔鹏兴, 等. 致密油藏自发静态渗吸实验及影响因素[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12494-12503.
Shi Lihua, Xue Ying, Cui Pengxing, et al. Spontaneous static imbibition experiment of tight reservoir and its influencing factors [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(29): 12494-12503.