

# 鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>亚段纹层型页岩油地质工程一体化评价

齐亚林<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安

<sup>2</sup>中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年4月18日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月30日

## 摘要

针对鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>亚段纹层型页岩油层产油贡献来源不清, 油产量主控因素不明等问题, 运用岩石力学与渗流力学理论, 按照地质工程一体化的理念, 对纹层型页岩油层的储集性、渗流性、含油性、流体可动性、可压性进行分析。结果表明: 页理不具有特殊的储集和渗流意义, 含油性从不是制约页岩油勘探的主要问题; 所谓的吸附烃、游离烃、滞留烃等, 仅反映了因组分的差异而导致动力黏度存在差异, 不能完全反映地层条件下烃类流体的可动性; 地层的整体渗流能力、岩石的弹性模量、岩石的抗拉强度和地应力场共同决定了地层的可压性, 压裂易于形成垂向裂缝-水平渗流的渗流场, 难以形成平行纹层方向的水平向裂缝-垂直渗流的渗流场; 油层厚度、孔隙度、含油饱和度、渗透率以及含油面积等宏观因素是决定勘探目标选择成效的关键; 上述认识为该类型页岩油勘探部署提供了新的思路。

## 关键词

纹层, 基质, 差异风化, 页理, 可动烃, 压力梯度, 渗流场

# Integrated Evaluation of Geological Engineering for Laminated Shale Oil in the Chang 7<sub>3</sub> Sub Segment of the Ordos Basin

Yalin Qi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Exploration & Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 18<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 21<sup>st</sup>, 2024; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2024

文章引用: 齐亚林. 鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>亚段纹层型页岩油地质工程一体化评价[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(6): 851-858. DOI: 10.12677/ag.2024.146079

## Abstract

Aiming at problems such as unclear sources of oil production contribution and unclear of oil production main controlling factors from the laminated shale reservoir of the Chang 7<sub>3</sub> sub segment in the Ordos Basin, Using the theory of rock mechanics and seepage mechanics, According to the idea of reengineering integration, The reservoir property, percolation property, oil bearing property, fluid mobility and compressibility of laminated shale reservoir are analyzed. Oil content is never the main problem restricting shale oil exploration. The so-called adsorbed hydrocarbon, free hydrocarbon and retained hydrocarbon only reflect the difference in dynamic viscosity caused by the difference in composition, and cannot fully reflect the mobility of hydrocarbon fluid under formation conditions. The overall permeability of the formation, The elastic modulus of rock, the tensile strength and geostress field of the rock together determine the compressibility of the formation. Fracturing is prone to forming a vertical crack horizontal seepage flow field, but it is difficult to form a horizontal crack vertical seepage flow field parallel to the layering direction; The reservoir thickness, porosity, oil saturation, permeability and oil bearing area are the key factors to determine the effectiveness of exploration target selection. The above understanding provides a new idea for the exploration and deployment of this type of shale oil.

## Keywords

Lamination, Matrix, Differential Weathering, Foliation, Mobile Hydrocarbon, Pressure Gradient, Seepage Field

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 纹层型页岩油在渤海湾盆地和松辽盆地的勘探相继取得突破并展现良好的前景[1] [2]。鄂尔多斯盆地纹层型页岩油勘探始于本世纪初, 2000 年, 为探索纹层型页岩油勘探潜力, 优选盆地东南部正 5 井长 7<sub>3</sub> 亚段纹层型页岩, 采用爆燃压裂方式改造, 获得日产 0.60 吨低产油流; 2010 年, 为进一步揭示该类型油藏的勘探潜力, 在系统总结正 5 井试油层段电性特征的基础上, 优选与其自然电位、自然伽马等主要电性特征相似的宁 70 井, 以纹层型页岩为攻关对象开展体积压裂试验, 日产水 3.2 方, 见油花, 考虑到较高的入地液量和较低的返排率, 认为目的层不具有工业意义的渗流能力。此后, 针对纹层型页岩, 陆续优选 13 口直井开展体积压裂探索试验, 其中 2 口井获得低产油流。

产油贡献来源关系到勘探部署思路 and 方向, 但试油为油流井的测试段产油贡献源于纹层型页岩自身、纹层型页岩的天然裂缝系统或邻近的粉砂岩 - 砂岩型储集体尚无定论。纹层的类型、纹层的储集能力和渗流能力、纹层的含油性等特征及其对纹层型页岩油藏的产油贡献, 以及可压性与纹层的关系尚待揭示。压后重建的渗流场类型为垂向裂缝 - 水平渗流(水平渗透率)亦或水平向裂缝 - 垂直渗流(垂直渗透率)尚不明确。由此导致试油结论为极低产油、产水或无液量的测试段无法得到合理的解释, 油产量主控因素不明。本文运用岩石力学与渗流力学理论, 按照地质工程一体化的理念, 宏观与微观结合, 静态与动态相结合, 对纹层型页岩油层的储集性、渗流性、含油性、流体可动性、可压性进行探讨。

## 2. 储集性和渗流性

矿物的成层富集并由此形成颜色、矿物组成与上下邻近的基质存在明显差异的条带构成页岩的纹层。页岩在微观上主要由基质和毫米-厘米级纹层构成；基质为长英质等碎屑颗粒，伊利石、伊蒙混层等黏土矿物，以及有机质等组分的无序混积；纹层为长英质、凝灰质(主要成分为长英质、伊利石、黄铁矿)、有机质等(图 1(a)、图 1(b))某组分的有序成层聚集。长英质、凝灰质等纹层，粒度为粉砂级或低于粉砂级，但相对邻近的基质，粒度较粗且以刚性颗粒为主在，抗压实能力较强，储集能力和渗流能力相对较好，可以作为页岩的优势储集体，页岩整体的储集能力和渗流能力取决于纹层的类型和发育程度。页岩的有机质生烃组分以基质和纹层形式存在，整体生烃能力取决于生烃组分的类型、含量和成熟度。纹层和基质的高频互层发育，构成了高频源储组合及韵律性的毫米-厘米级油藏。荧光照射下，明暗相间荧光条带的出现，既是页岩油藏韵律性发育的反映，也是纹层和基质生储能力差异的反映。

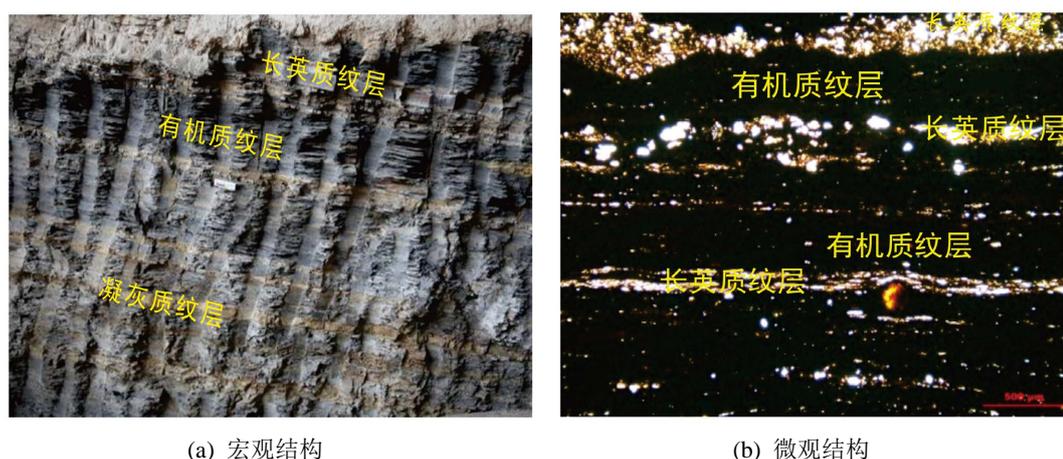
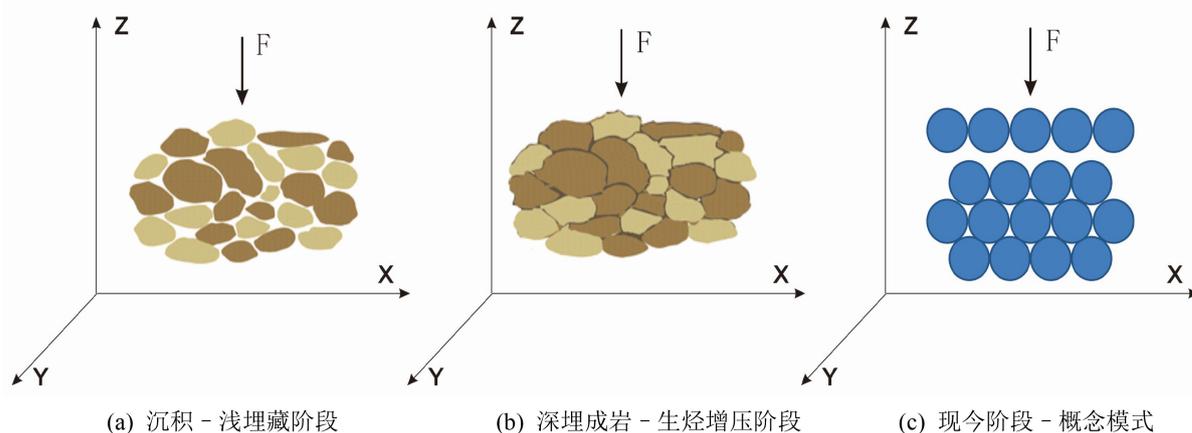
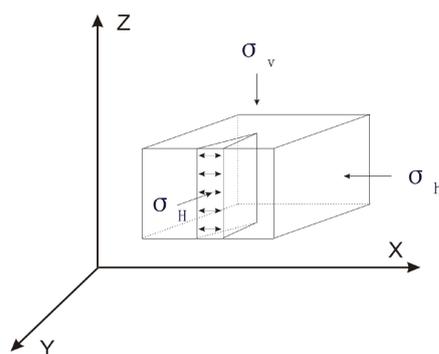


Figure 1. Shale structure of Chang 7<sub>3</sub> stratified shale in Triassic  
图 1. 三叠系延长组长 7<sub>3</sub> 亚段纹层型页岩结构

碎屑颗粒的接触关系可从 3 个演化阶段分析：1) 沉积-浅埋藏阶段，碎屑颗粒尚未固结成岩，加之含有较高的易变形的软塑性黏土矿物，垂向上相邻的骨架颗粒(图 2(a))将在有效上覆岩层压力作用下相互支撑发生点-线接触(图 2(b))，垂向上相邻的骨架颗粒脱离接触(颗粒悬空)且类似脱离接触的骨架颗粒在近水平向有一定延伸的情况无法存在(图 2(c))，具有韵律特征的近水平向裂缝或层间缝无法存在。2) 深埋成岩-生烃增压阶段，碎屑颗粒已固结成岩，骨架颗粒相互约束，流体压力如果大于地层破裂压力，裂缝将产生；由于此阶段垂向通常为最大主应力方向，虽然某方向页岩的抗拉强度同该方向与纹层的夹角有关，但垂向仍然为裂缝延伸的最有利方向(图 3)，所产生的裂缝为近垂向高角度裂缝而非近水平向裂缝，近水平向裂缝尤其是具有韵律特征的近水平向裂缝难以形成并存在。3) 现今阶段，地层处于低压状态(压力系数 0.70~0.85)，流体压力无法支撑骨架颗粒使得垂向上相邻的骨架颗粒脱离接触进而形成具有韵律特征的近水平向裂缝(图 2(c))。地层条件下只能形成并保持近垂向高角度裂缝，无垂向支撑的近水平向裂缝无法形成并保持。页岩具有低弹性模量、强应力敏感性特征，随着净上覆压力的增加，覆压孔隙度、覆压渗透率与净上覆压力呈幂指数降低，进一步证明了地层条件下近水平向裂缝无法形成并存在。页理本质上是页岩的基质与纹层具有不同的抗风化能力，地表条件下发生差异风化作用，从而形成书页状结构。纹层既可以在地层条件下存在，也可以在地表条件下存在，而页理只能在地表条件下形成，无法在地层条件下形成，页理不具有特殊的储集和渗流意义。



**Figure 2.** Contact relationship of detrital particles  
**图 2.** 碎屑颗粒接触关系



**Figure 3.** Schematic diagram of 3D stress field and pressure fracture propagation under formation conditions  
**图 3.** 地层条件下三维应力场与压裂缝扩展示意图

### 3. 含油性

长 7<sub>3</sub> 亚段页岩为中生界油藏的主要烃源岩, 该亚段储集体与生烃层系互层共生, 具有源储一体特征。以基质和纹层形式存在的有机质, 生成的烃类首先满足黏土矿物、有机质等基质的自身吸附, 导致烃源岩层系滞留烃含量较高且含水饱和度普遍低于 10.0% [3]; 在满足基质的自身吸附后, 生成的烃类向邻近长英质、凝灰质等纹层短程运移并充注成藏, 形成纹层型页岩油藏。该类型页岩油的资源潜力及勘探前景取决于长英质、凝灰质等纹层的累计厚度, 也就是取决于长英质、凝灰质等纹层厚度和纹层密度。此后生成的烃类继续向烃源岩层系内粉砂岩 - 砂岩型储集体运移并充注成藏, 储集体含油饱和度可达 60.0%~80.0% [4], 形成夹层型页岩油藏。过剩的烃类继续向烃源岩层系上下的地层运移并在相对高渗的砂岩型储集体充注成藏, 储集体含油饱和度可达 50.0%~70.0%, 形成源上组合的长 6、源下组合的长 8 等岩性油气藏。长 6、长 8 岩性油气藏的大规模存在, 从宏观上证实了长 7<sub>3</sub> 亚段地层, 无论是纹层型页岩储集体, 还是粉砂岩 - 砂岩型储集体, 整体均具有极高的含油饱和度, 含油性从不是制约页岩油勘探的主要问题[5]。

### 4. 流体的可动性

达西定律或哈根 - 泊肃叶定律能够描述流体在多孔介质(毛管束)内渗流规律, 流体在多孔介质中的渗流流速与渗透率或喉道半径、压力梯度正相关, 与流体动力黏度负相关。进一步的研究表明, 烃类流体

在页岩油藏中渗流,存在启动压力梯度,只有压力梯度大于启动压力梯度,流体才具有可动性[6] [7]。而启动压力梯度与流体的动力黏度正相关,与储集体渗透率负相关。这表明烃类流体的可动性不仅取决于流体的动力黏度(烃类流体的组成),还同时取决于储集体的渗透率和所施加压力梯度。所谓的吸附烃、游离烃、滞留烃等,仅反映了因组分的差异而导致动力黏度存在差异,不能完全反映烃类流体的动力学状态,不能完全反映地层条件下烃类流体的可动性。地层压力和储集体的启动压力梯度共同决定了极限泄流半径,决定了烃类流体的可动性,同时也控制了可动用(可波及)含油面积的范围及可动用地质储量。

该类油藏地面原油密度、黏度偏低,其族组成与岩心分析的族组成差异较大,表现为地面原油胶质、沥青质含量偏低,反映了地层条件下储集体整体渗流能力极低,胶质、沥青质等大分子烃类流体在储集体中大量滞留,从而导致该类型油藏油气采收率整体偏低。

## 5. 可压性

地层可压性评价需要从水力压裂的机理出发(公式(1)、公式(2)) [8] [9]。水力压裂是利用地面高压泵组,将压裂液以远超过地层吸收能力的排量注入目的层,当孔隙流体压力大于其破裂压力时,地层开始起裂并延伸(图 3、公式(3)),地层的可压性分析需从流体压力传导和裂缝延伸两方面考虑。

$$P_f = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p + S_t \quad (1)$$

$$P_r = \sigma_h - P_p + S_t \quad (2)$$

$$P_p > P_f \quad (3)$$

$P_f$ -破裂压力;  $P_r$ -延伸压力;  $\sigma_h$ -水平最小主应力;  $\sigma_H$ -水平最大主应力;  $P_p$ -孔隙流体压力;  $S_t$ -岩石抗拉强度;

流体压力传导阶段,流体在储集体中渗流,流体克服其在地层流动中的沿程阻力将部分压力(净压力)传导至地层深部,沿程阻力可以通过达西定律或哈根-泊肃叶定律描述(公式(4)、公式(5))。

$$Q = \frac{KA\Delta P}{\mu L} \quad (4)$$

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta L} \quad (5)$$

$Q$ -单位时间渗流量;  $K$ -介质的渗透率;  $A$ -横截面积;  $\Delta P$ -介质两端的压差;  $\mu$ -流体的动力黏度;  $L$ -介质的长度;  $r$ -喉道半径。

根据达西定律或哈根-泊肃叶定律,储集体渗流能力( $K$ 或 $r$ )越好,压裂液在其中流动的沿程阻力或摩阻( $P_1 - P_2$ )越小,作用于目的层的净压力( $P_2$ )越大(图 4),裂纹萌生和起裂越容易;储集体渗流能力越差,压裂液在其中流动的沿程阻力或摩阻( $\Delta P$ )越大,作用于目的层的剩余流体压力越小,裂纹萌生和起裂越困难。压裂实践显示,从侏罗系延安组到三叠系延长组,尤其是从长 1 到长 7,裂缝萌生和起裂的难度越来越大,与此相对应,储集体渗流能力越来越差(图 5),地层的可压性取决于地层的整体渗流能力[5]。

裂缝延伸阶段,由地层裂缝延伸公式可知(公式 2),裂缝能否延伸取决于净压力是否大于裂缝延伸压力,裂缝延伸压力取决于岩石抗拉强度与地应力场。净压力与裂缝宽度正相关,足够的裂缝宽度可以使压裂液在其中流动的摩阻更小并使净压力更大,从而使裂缝延伸更容易。岩石的弹性模量大,岩石不易变形,裂缝宽度受限,裂缝宽度与岩石的弹性模量负相关[8]。而弹性模量与脆性矿物含量、成岩作用强度正相关,脆性矿物含量的增大和成岩作用增强,导致岩石弹性模量增大,不利于裂缝扩展和裂缝延伸[8]。岩石抗拉强度主要受沉积作用的非均质性、压实作用强度、胶结物类型控制,与刚性矿物组分含量无必然关系。即使碎屑颗粒完全为塑性组分,如果成岩作用较弱导致储集体的渗流能力较好,地层的可

压性较好。反之，即使碎屑颗粒完全为刚性组分，如果成岩作用较强导致储集体的渗流能力较差，地层的可压性依然较差。沉积作用决定了页岩纹层的类型、密度和规模，初步控制了其储集能力和渗流能力；成岩作用改造了页岩纹层的储集和渗流能力；两者共同决定了页岩的储集能力和渗流能力、岩石抗拉强度，部分控制了地层的可压性。

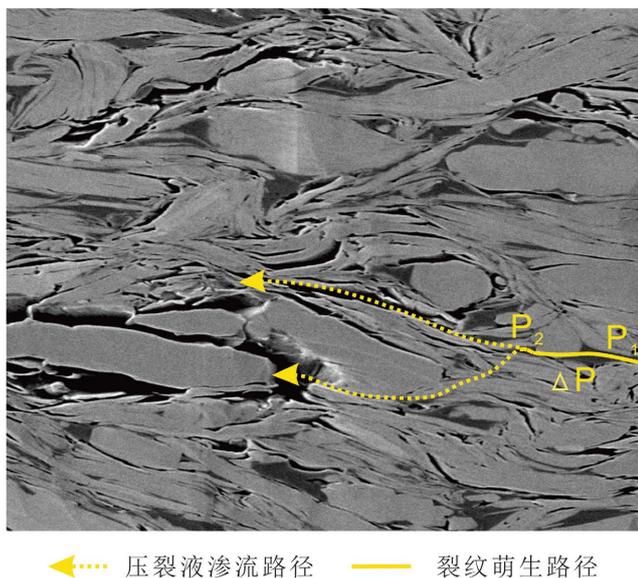


Figure 4. Schematic diagram of fluid pressure transfer and fracture initiation and propagation  
图 4. 流体压力传递及裂缝萌生扩展示意图

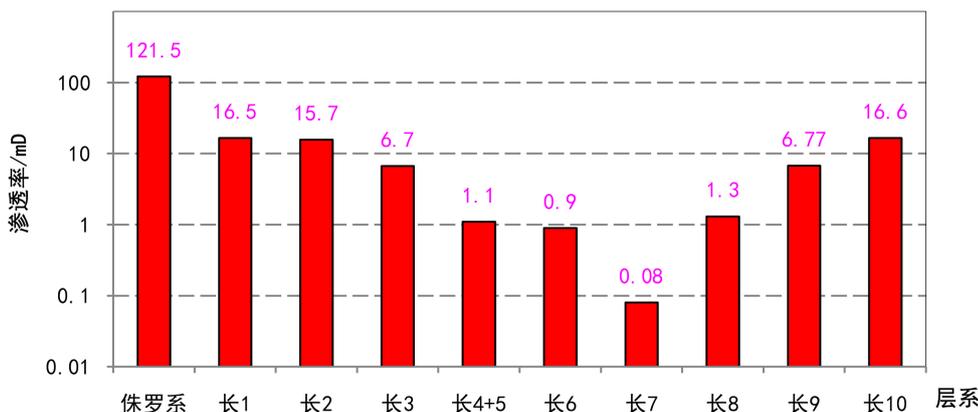
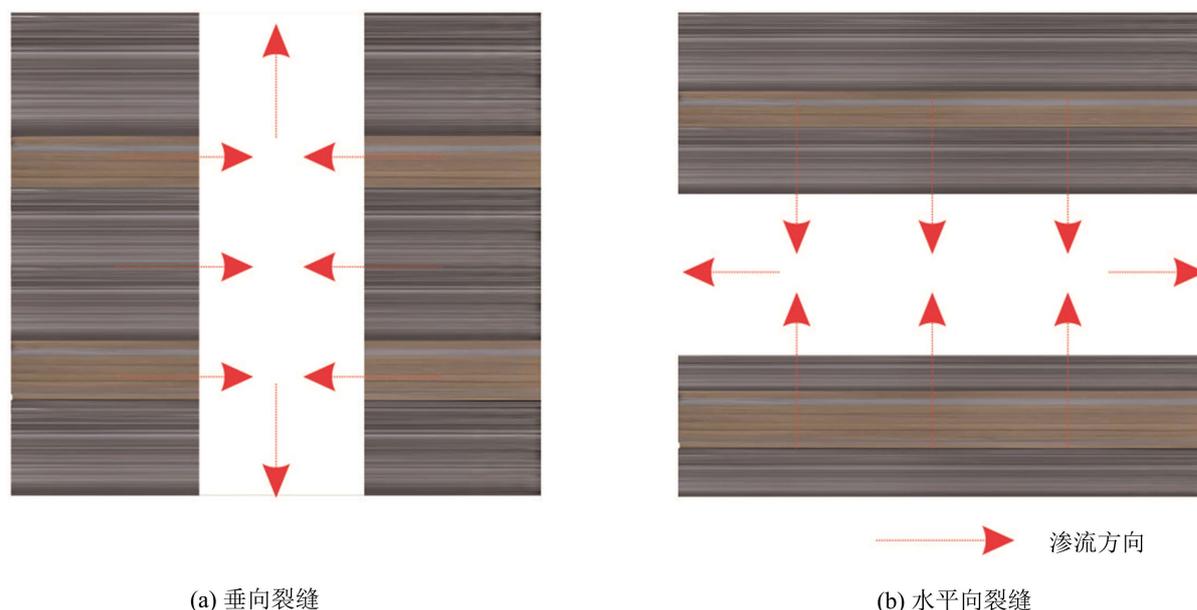


Figure 5. Physical property distribution histogram of Mesozoic reservoirs in Ordos Basin  
图 5. 鄂尔多斯盆地中生界储集体物性分布直方图

综上所述，地层的整体渗流能力、岩石的弹性模量、岩石的抗拉强度和地应力场共同决定了地层的可压性。

## 6. 渗流场类型

地层的最小主应力方向和岩石的抗拉强度决定了裂缝延伸的产状，而产状决定了渗流场类型和供液能力，也决定了该类油藏的勘探前景。这是因为垂向裂缝主要通过水平渗流方式向裂缝供液(图 6(a))，水平向裂缝主要通过垂直渗流方式向裂缝供液(图 6(b))，而页岩的水平渗透率远远大于垂直渗透率[10] [11]。



**Figure 6.** Orientation of pressure fracture and seepage field  
**图 6.** 压裂缝方向及渗流场

就鄂尔多斯盆地长<sub>7</sub><sub>3</sub>亚段地层剖面序列而言,粉砂岩-砂岩的沉积和成岩的非均质性不明显,其抗拉强度的非均质性不突出,近似认为粉砂岩-砂岩的抗拉强度不具有方向性,地层条件下裂缝沿垂直最小主应力方向延伸(图 3)。而纹层型页岩的沉积和成岩的非均质性明显,其抗拉强度的非均质性突出,纹层型页岩的抗拉强度具有方向性,平行纹层方向的抗拉强度大于垂直纹层方向,在地表不存在两向应力差情况下,纹层间的界面为结构薄弱面。由于实际地层处于地应力场作用下,存在较大的两向应力差(5.0~10.0 mPa),垂向应力(最大主应力)与垂直纹层方向页岩的抗拉强度之和普遍大于水平应力(最小主应力)与平行纹层方向页岩的抗拉强度之和,纹层间的界面不再是结构薄弱面,也不是页岩裂缝延伸的有利方向,地应力场对裂缝延伸方向的影响要大于纹层型页岩的抗拉强度。压裂易于形成垂向裂缝-水平渗流的渗流场(图 6(a)),难以形成平行纹层方向的水平向裂缝-垂直渗流的渗流场(图 6(b))。

此外,长英质、凝灰质等纹层平面上呈条带状分布在基质或有机质纹层间,纵向上与基质或有机质纹层互层,由此导致同向水平应力作用下长英质、凝灰质等纹层与基质或有机质纹层整体变形,层间同向水平应力差微弱,同向水平应力差非限定裂缝纵向延伸的主要因素。

## 7. 问题和展望

“水平井 + 体积压裂”是实现夹层型页岩油效益开发的必由途径,也是未来纹层型页岩油实现突破的必然选择。水平井的日产油量以及累积产油量主要取决于单井控制的可采地质储量,可采地质储量取决于地质储量、油层渗透率、地层压力、启动压力梯度、以及油层改造强度等,而地质储量主要受控于油层厚度、孔隙度、含油饱和度等,上述因素共同决定了水平井所能控制的地质储量以及最终可采地质储量,决定了水平井 EUR 上限(图 7)。在甜点评价标准难以掌握,也就是油产量主控因素不确定的情况下,目标区直井的日产油量以及累积产油量客观反映了目标区的油层的品质,对水平井目标选择有重要的参考价值,是目标优选的重要依据。因此,油层厚度、孔隙度、含油饱和度、渗透率以及含油面积等宏观因素是决定水平井目标选择成效的关键。展望未来,纹层型页岩油地质的微观研究,需要按照“地质工程一体化”的理念向上述宏观因素延伸,从而使研究更具有生产实践意义。

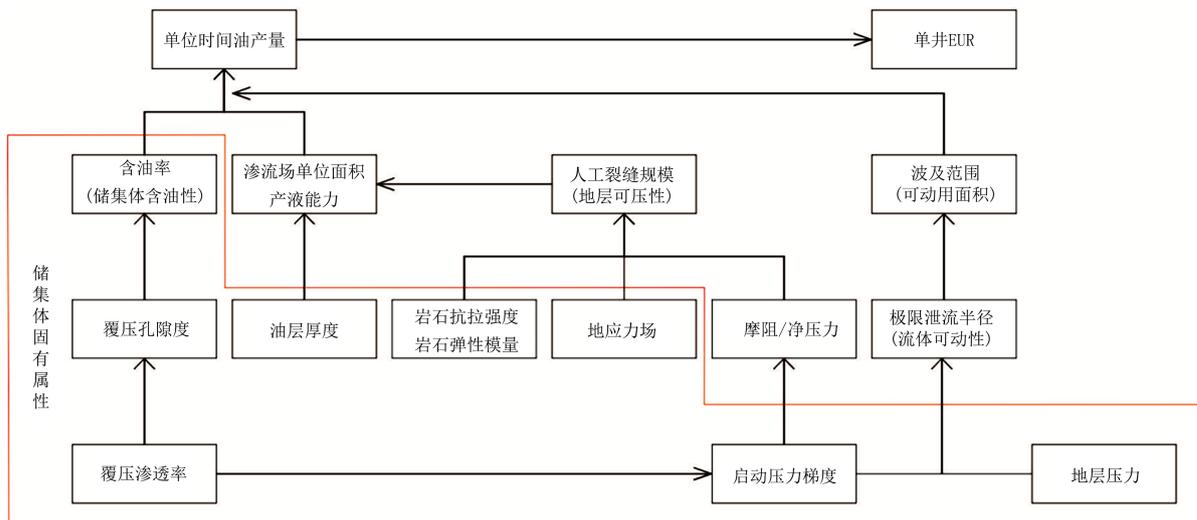


Figure 7. EUR influencing factors of single well in shale oil

图 7. 页岩油单井 EUR 影响因素

### 8. 结论

- 1) 地层条件下水平向裂缝或层间缝无法形成并存在，页理不具有特殊的储集和渗流意义。
- 2) 含油性从不是制约页岩油勘探的主要问题。
- 3) 所谓的吸附烃、游离烃、滞留烃等，仅反映了因组分的差异而导致动力黏度存在差异，不能完全反映地层条件下烃类流体的可动性。
- 4) 地层的整体渗流能力、岩石的弹性模量、岩石的抗拉强度和地应力场共同决定了地层的可压性。
- 5) 压裂易于形成垂向裂缝 - 水平渗流的渗流场，难以形成平行纹层方向的水平向裂缝 - 垂直渗流的渗流场。
- 6) 油层厚度、孔隙度、含油饱和度、渗透率以及含油面积等宏观因素是决定勘探目标选择成效的关键。

### 参考文献

- [1] 赵贤正, 周立宏, 赵敏, 等. 陆相页岩油工业化开发突破与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 589-600.
- [2] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 453-463.
- [3] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 537-545.
- [4] 杨智, 付金华, 郭秋麟, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 9-15.
- [5] 齐亚林, 邵晓州, 庞锦莲, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 页岩油层地质工程一体化评价[J]. 录井工程, 2021, 32(4): 1-12.
- [6] 樊建明, 李卫兵, 韩会平, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 致密油启动压力梯度变化规律研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(28): 27-31.
- [7] 石道涵, 张矿生, 唐梅荣, 等. 长庆油田页岩油水平井体积压裂技术发展与应用[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(3): 10-17.
- [8] 王德胜. 现代油藏压裂酸化开采新技术实用手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [9] 于光明. 最新石油井下作业关键技术应用手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [10] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819-828.
- [11] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568.