

文章编号: 1000-0747(2018)02-0257-08 DOI: 10.11698/PED.2018.02.08

特低渗砂岩储集层孔隙结构差异与低电阻率油层成因 ——以鄂尔多斯盆地中部烟雾茆区块为例

王建民, 张三

(西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065)

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2010JM5003); 西安石油大学青年科技创新基金项目(2012BS010)

摘要: 以鄂尔多斯盆地中部烟雾茆区块三叠系延长组长6油层组为例, 通过岩心观察、实验分析、地质研究、测井解释、试采验证等, 探讨孔隙结构差异对储集层及油层岩石电学特征的影响, 论证并揭示了孔隙结构差异与低电阻率油层的成因关系。区内长6油层具有正常电阻率油层和低电阻率油层两种表现形式, 发育孔隙型单孔介质和微裂缝-孔隙型双孔介质两种结构类型; 微裂缝的发育极大地改变了储集层的微观孔隙结构, 孔隙结构差异则对特低渗砂岩储集层及其油层的岩石电学特征产生了重要影响; 正常电阻率油层具有明显的孔隙型单孔介质特征, 主要集中于长6₁亚油层组和长6₂²、长6₂³小层, 低电阻率油层具有明显的微裂缝-孔隙型双孔介质特征, 主要集中于长6₂¹小层和长6₃亚油层组。钻井液沿微裂缝对油层形成了超深侵入, 导致电阻率大幅降低及油层的低电阻率现象, 低电阻率油层比正常电阻率油层具有更好的储产能力。图7表2参24

关键词: 鄂尔多斯盆地; 长6油层组; 特低渗储集层; 低电阻率油层; 孔隙结构; 钻井液侵入; 低电阻率成因

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Pore structure differences of the extra-low permeability sandstone reservoirs and the causes of low resistivity oil layers: A case study of Block Yanwumao in the middle of Ordos Basin, NW China

WANG Jianmin, ZHANG San

(School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The influence of pore structure difference on rock electrical characteristics of reservoir and oil reservoir was analyzed taking Triassic Chang 6 reservoir in Block Yanwumao in the middle of Ordos Basin as an example. The relationship between the pore structure difference and the low resistivity oil layer was revealed and demonstrated through core observation, lab experiments, geological research, well log interpretation and trial production etc. The results show that there were two kinds of oil layers in Chang 6 Member, normal oil layer and low resistivity oil layer in the region, corresponding to two types of pore structures, pore type mono-medium and micro-fracture-pore type double-medium; the development of micro-fracture changed greatly the micro-pore structure of the reservoir, and the pore structure difference had an important influence on the rock electrical characteristics of the extra-low permeability sandstone reservoir and oil reservoir; the normal oil layers had obvious characteristics of pore-type mono-medium, and were concentrated in Chang 6₁, Chang 6₂² and Chang 6₂³; the low resistivity oil layers had obvious characteristics of micro-fracture-pore type double-medium, which were mainly distributed in Chang 6₂¹ and Chang 6₃. The mud filtrate penetrated deep into the oil layers along the micro-cracks, leading to sharp reduction of resistivity, and thus low resistivity of the oil layer; the low resistivity oil layers had better storage capacity and higher productivity than the normal oil layers.

Key words: Ordos Basin; Chang 6 oil layers; extra-low permeability reservoir; low resistivity oil layer; pore structure; mud invasion; low resistivity cause

引用: 王建民, 张三. 特低渗砂岩储集层孔隙结构差异与低电阻率油层成因: 以鄂尔多斯盆地中部烟雾茆区块为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 257-264.

WANG Jianmin, ZHANG San. Pore structure differences of the extra-low permeability sandstone reservoirs and the causes of low resistivity oil layers: A case study of Block Yanwumao in the middle of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 257-264.

0 引言

鄂尔多斯盆地中生界三叠系延长组广泛发育低孔特低渗砂岩储集层,该类储集层孔隙结构差异大,非均质性强,孔喉类型多样^[1-2],天然裂缝发育^[3],广泛发育低电阻率油层^[4]。已有研究成果表明,受沉积、成岩和后期构造应力作用,鄂尔多斯盆地中部伊陕斜坡发育大量天然裂缝,这些天然裂缝按规模大小可分为显裂缝(宏观裂缝)和微裂缝(微观裂缝)两大类^[5],其中显裂缝大致由东西、北西—南东、南北、北东—南西4个方向裂缝组成^[3,6],微裂缝和孔隙则发育在被显裂缝系统切割而成的岩块系统^[7]之中。该岩块系统为由微裂缝与基质团块组成的微裂缝-基质孔隙系统,具有微裂缝-孔隙型双孔介质^[8]特征,若该岩块系统内部不含微裂缝而只含有基质孔隙,且该岩块系统足够大,则可形成局部的孔隙型(单孔)多孔介质储集层^[8-9]。

微裂缝既是特低渗砂岩储集层中主要的天然裂缝类型,又是连接基质孔隙、改善储集层渗流能力的主要通道^[10];不仅控制次生孔隙的形成和分布^[7],加剧储集层的非均质性,而且对基质岩块与宏观裂缝的连通也具有重要作用^[5];既是导致岩心渗透率异常的要件^[11],也是引发储集层岩石电学特征改变的重要原因。

低电阻率油气层是指电阻率值相对于邻近水层电阻率值偏低并引起油水层解释困难的一类油气层,通常以电阻增大率小于2或3定义之^[12]。已有研究表明,低电阻率油层在鄂尔多斯盆地中生界低渗及超特低渗油气藏中广泛分布,其成因复杂多样,储集层岩性、物性、放射性、岩石微观结构、黏土矿物及束缚水含量、地层水矿化度等都是可能的成因^[4,13-14]。杨春梅等探讨了低电阻率油层的成因以及钻井液侵入条件下油层径向电阻率的变化^[15-22],揭示了“低电阻率环带”^[16,18-19,21]的发育特征。Rasmus^[23]建立了低孔低渗双重孔隙介质储集层的地层因素及电阻率与孔隙度的关系模型,指出裂缝-孔隙型双孔介质油层的电阻率会显著低于孔隙型单孔介质油层。

本文基于特低渗砂岩油田勘探开发实际,通过对大量实验分析、综合解释、试油试采等资料成果的统计分析,探讨微裂缝导致的储集层孔隙结构差异对储集层及油层岩石电学特征的影响,揭示孔隙结构差异与低电阻率油层成因之间关系,实例论证双孔介质与钻井液侵入、钻井液侵入与油层电阻率之间关系及相互影响,为Rasmus理论模型及模拟结果提供了理论补

充和验证实例。

1 地质概况

1.1 地质背景

志丹油田烟雾岭区块地处鄂尔多斯盆地中部,构造上位于鄂尔多斯盆地主体构造单元——伊陕斜坡中南部,处于中生代三叠纪延长组沉积期湖盆北翼大型三角洲体系之中。区块面积约50 km²(见图1),区内构造整体简单,地层平缓西倾(倾角1°左右),局部低幅度构造发育;区内含油层系众多,三叠系延长组长6油层组为主力储产层。长6油层组沉积时期,区内发育三角洲前缘亚相沉积^[24],分流河道、河口坝、远砂坝等砂体复合发育,分布广泛,为特低渗砂岩储集层形成奠定了基础。根据沉积旋回及岩石电学组合特征,长6油层组自下而上可分为长6₁、长6₂、长6₃及长6₄共4个亚油层组,其中长6₁和长6₂亚油层组可进一步分为长6₁¹、长6₁²、长6₁³以及长6₂¹、长6₂²、6₂³等小层。

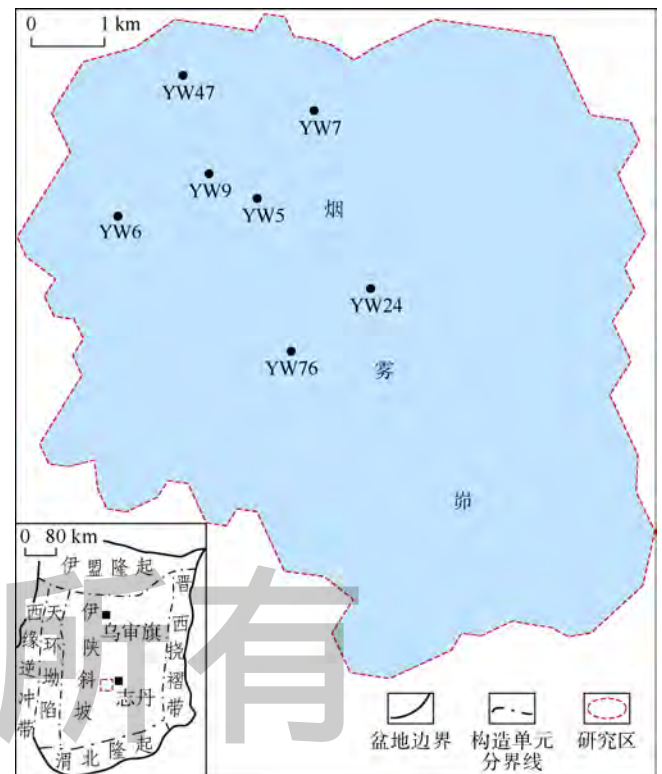


图1 研究区位置图

长6储集层岩性主要为灰色细粒及中细粒长石砂岩,碎屑含量占90%以上,成分以长石为主,石英次之,岩屑、云母等少量,填隙物主要为绿泥石、高岭石及混合泥质,局部钙质及硅质相对富集;成岩作用

及非均质性强，微观结构复杂，发育各种溶蚀孔隙，局部发育微裂缝，显裂缝仅在局部可见；平均孔隙度为11.03%，平均渗透率为 $1.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于低孔特低渗储集层。

长6油层组平均埋深约1850 m，地层压力系数约0.79；原始含油饱和度为51.6%，束缚水饱和度为40.3%，残余油饱和度为30.5%；地层水矿化度为62870 mg/L，CaCl₂型；油层电阻率一般在2~28 $\Omega \cdot \text{m}$ ，水层电阻率小于5 $\Omega \cdot \text{m}$ ；地层水电阻率为0.064 $\Omega \cdot \text{m}$ ，地层温度为59.3 $^{\circ}\text{C}$ 。全区普遍采用水基钻井液钻井，钻井液密度约1.03 g/cm³，钻井液电阻率约0.8 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

1.2 油层构成与分布

长6油层构造幅度低，地层压力小，含油饱和度偏低，束缚水饱和度偏高，垂向油水无明显分异，测井响应复杂。笔者按电阻增大率(I)，将区内油层大致分为正常(电阻率)油层($I \geq 2$)和低电阻率油层($I < 2$)两大类。

分层统计结果(见表1)表明，不同含油层段的油层构成比例明显不同，正常油层主要集中于长6₁亚油层组以及长6₂²和长6₂³两个小层；低电阻率油层则主要集中于长6₂¹小层和长6₃亚油层组，其中长6₂¹小层的低电阻率油层比例高达54.8%，超过了正常油层。长6油层组正常油层总体比例高达77.6%，低电阻率油层比例为22.4%。

表1 烟雾茆区块长6油层钻遇状况统计

层位	油层总数/层	正常油层		低电阻率油层	
		数量/层	比例/%	数量/层	比例/%
长6 ₁ ¹	540	518	95.9	22	4.1
长6 ₁ ²	572	534	93.4	38	6.6
长6 ₁ ³	767	671	87.5	96	12.5
长6 ₂ ¹	728	329	45.2	399	54.8
长6 ₂ ²	526	498	94.7	28	5.3
长6 ₂ ³	83	77	92.8	6	7.2
长6 ₃	812	499	61.5	313	38.5
长6 ₄	116	89	76.7	27	23.3
合计	4144	3215	77.6	929	22.4

2 不同孔隙结构储集层物性及空间特征差异

2.1 物性特征差异

岩心物性分层统计结果显示，区内部分长6特低渗砂岩储集层具有明显的渗透率异常^[11]，图2上部的孔渗散点的趋势线明显偏离了下部孔渗散点分布正常线性

关系，渗透率加速变大，局部可达 $64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，表明上、下部散点对应储集层的孔隙结构存在明显差异，属于不同的孔隙结构类型，两者大致以渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为分界，下部(渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)对应孔隙型的单孔介质储集层；上部(渗透率不小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)微裂缝发育，属于微裂缝-孔隙型双孔介质储集层。

孔隙型单孔介质储集层主要位于长6₁亚油层组和长6₂²小层，与正常油层的主要发育层位相同；微裂缝-孔隙型双孔介质储集层主要位于长6₂¹小层和长6₃亚油层组，与低电阻率油层的主要发育层位一致(见图2，表1)。这一结果表明，特低渗砂岩储集层孔隙结构的差异表现在发育层位和空间分布上有所不同，具有时空差异，同时还可以看出，微裂缝的发育极大地改变了特低渗砂岩储集层的孔隙结构，加剧了储集层的孔隙结构差异，使其物性特征发生了改变，也为岩石电学效应特征变化奠定了基础。

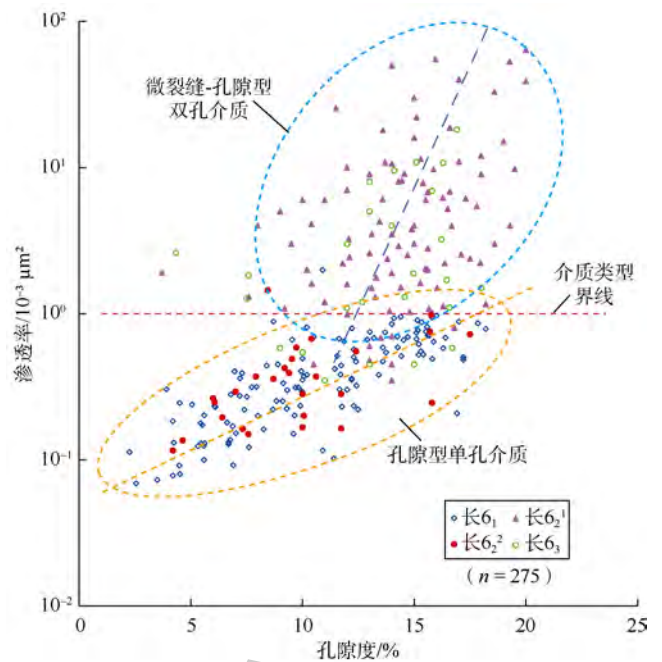
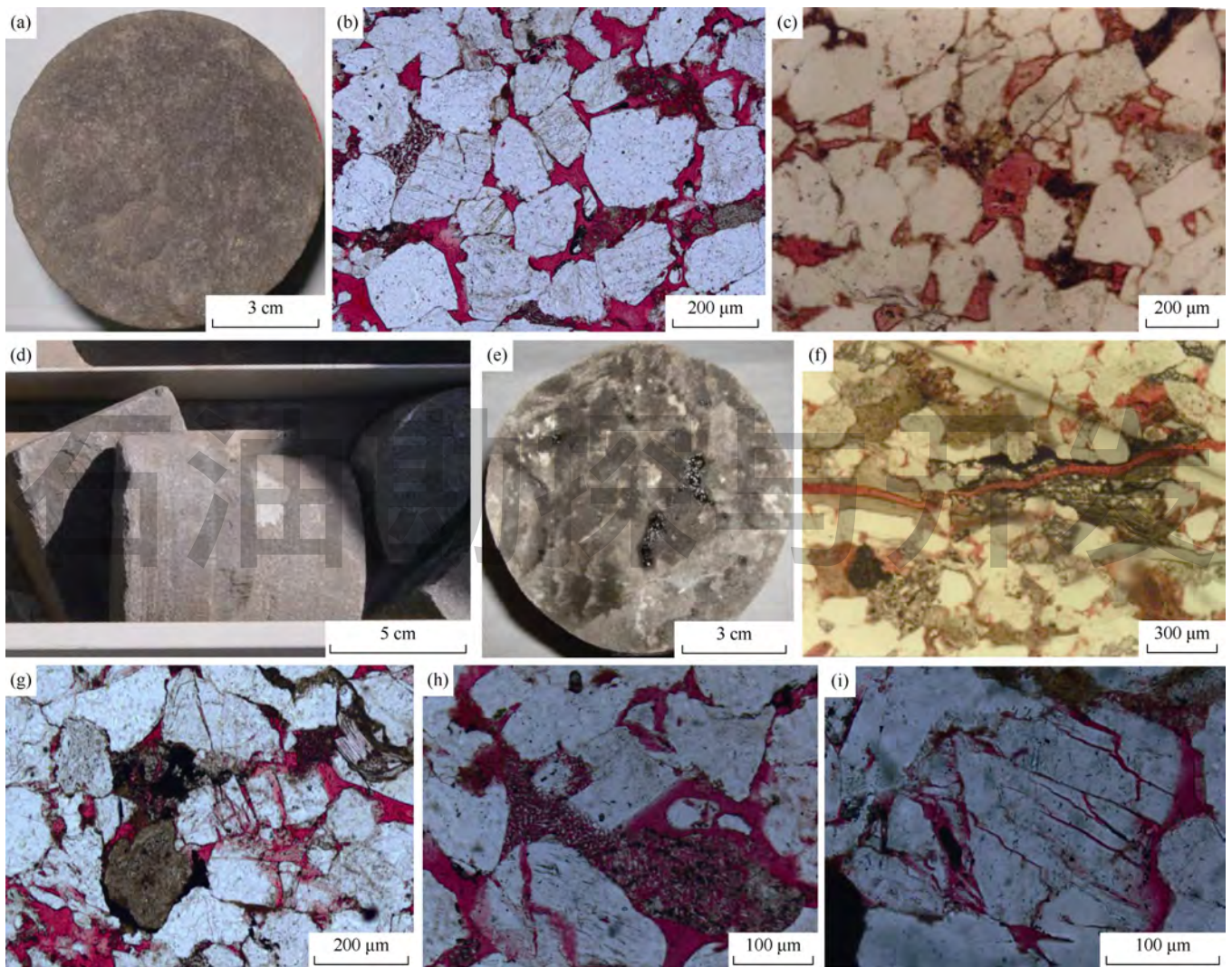


图2 烟雾茆区块长6储集层孔隙度与渗透率关系

2.2 孔隙空间特征差异

岩心观察及铸体薄片鉴定结果表明，区内正常油层岩石的孔隙结构具明显的孔隙型单孔介质特征，岩心一般比较完整，无直观可见的显裂缝发育，原油呈星点状、斑点状或均匀面积状外渗(见图3a)；铸体薄片下可见残余粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔等多种孔隙(见图3b、图3c)，孔喉结构复杂，孔隙直径一般在20~120 μm ，喉道半径一般在3~15 μm ，少见碎屑颗粒的挤压破碎现象，孔隙之间由喉道连通。



(a) YW7 井, 长 6_1^3 , 1 903.88 m, 孔隙型细砂岩; (b) YW7 井, 长 6_1^3 , 1 906.36 m, 孔喉网络; (c) YW76 井, 长 6_1 , 1 783.08 m, 长石铸模孔、粒间溶孔; (d) YW6 井, 长 6_3 , 1 881.40 m, 显裂缝; (e) YW7 井, 长 6_2^1 , 1 922.05 m, 微裂缝; (f) YW76 井, 长 6_1 , 1 835.58 m, 微裂缝与孔隙; (g) YW7 井, 长 6_2^1 , 1 923.40 m, 破裂缝及溶孔; (h) YW5 井, 长 6_2^1 , 1 825.20 m, 破裂缝溶蚀扩大; (i) YW9 井, 长 6_2^1 , 1 749.40 m, 孔缝网络系统

图3 烟雾茆区块长6储集层孔隙结构类型及其空间特征((a) — (c)为单孔介质储集层岩心,(d) — (i)为双孔介质储集层岩心)

低电阻率油层岩石的孔隙结构具明显的微裂缝-孔隙型双孔介质特征,岩心中偶见宏观裂缝(见图3d),且多为立缝,缝高一般小于80 cm,缝宽0.1~0.4 mm,呈开启或半充填状态,缝面比较平整,可见原油外渗痕迹;岩心断面可见原油沿微裂缝的差异性外渗现象(见图3e);铸体薄片可见大量的微裂缝及溶蚀孔隙,包括粒间溶孔、粒内溶孔、压碎缝^[5]等,偶见构造微缝(见图3f),其数量虽少,但规模较大,缝宽5~15 μm ,缝长约800~2 000 μm ,能够贯穿众多颗粒和孔隙等。微裂缝一般缝长50~300 μm ,局部具溶蚀扩大(见图3g、图3h),连通基质孔隙,构成复合交织的孔缝网络系统(见图3i)。

3 孔隙结构差异的岩石电学效应与低电阻率油层成因

分层统计区内大量已试采油层的综合解释成果,分析其双感应电阻率交会曲线以及深感应电阻率与声波时差交会曲线的特征(见图4),结果表明微裂缝的发育不仅导致了岩石物性差异,而且还控制和影响了油层岩石电学特征,微裂缝-孔隙型双孔介质的发育导致了低电阻率油层的形成。

由图4可出,长6油层组的声波时差(Δt)测井值主要为220~265 $\mu\text{s}/\text{m}$,深感应电阻率(R_{ILD})值主要为2~28 $\Omega \cdot \text{m}$ 。 $R_{\text{ILD}}-\Delta t$ 和 $R_{\text{ILD}}-R_{\text{ILM}}$ (中感应电阻率)

在直角坐标系中的分布趋势分别呈现为两条不同斜率的直线，两组趋势线交点的深感应电阻率值为 $10.5 \Omega \cdot m$ ，相应的电阻增大率约为 2，表明该点不仅为特低渗储集层孔隙结构分化的界限，也是油层岩石电学特征分化的界线。分界点右边（见图 4）， R_{ILD} 大于 $10.5 \Omega \cdot m$ ， I 大于 2，为正常油层及孔隙型单孔介质储集层发育区， Δt 值随 R_{ILD} 值增大缓慢，且最大不超过 $250 \mu s/m$ ， $R_{ILD}-R_{ILM}$ 趋势线的斜率较小， R_{ILD} 值普遍大于 R_{ILM} 值，具正常油层特征。分界点左边（见图 4）， R_{ILD} 小于 $10.5 \Omega \cdot m$ ， I 小于 2，为低电阻率油层及微裂缝-孔隙型双孔介质储集层发育区， $R_{ILD}-\Delta t$ 交会曲线的斜率增加， Δt 值最终超过了 $260 \mu s/m$ ，微裂缝的响应特征越来越明显，对电阻率的影响也越来越突出， $R_{ILD}-R_{ILM}$ 交会曲线的斜率约等于 1，亦即 $R_{ILD} \approx R_{ILM}$ 。这一岩石电学特征具有重要意义，表明钻井液对低电阻率油层形成了深度侵入，且侵入深度超过了感应系列的探测半径，从而导致了低电阻率油层的形成及 $R_{ILD} \approx R_{ILM}$ 现象的发生。

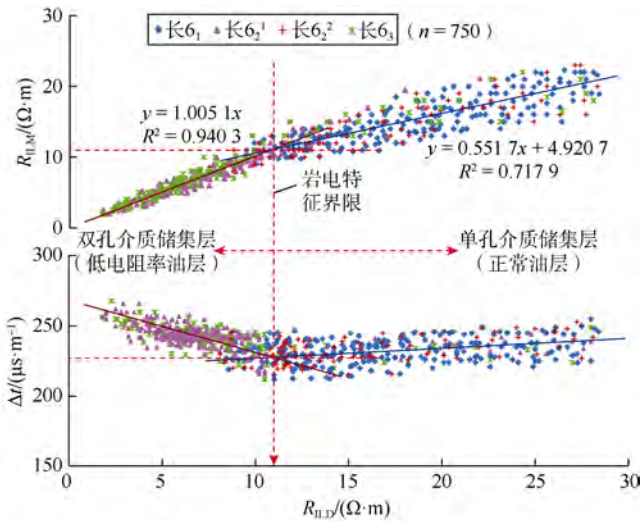


图 4 烟雾茆区块长 6 试采油层的岩石电学特征

综上所述，结合前述区块地质特征，长 6 各亚油层组及其小层均处于三角洲前缘亚相发育区内，上下及侧向相间发育的正常油层与低电阻率油层都属于河口坝或分流河道沉积，岩性特征近似，沉积类型相同，层序结构一致，矿物成分、胶结物组分及含量、束缚水饱和度、地层水矿化度等也都基本相当，因此可以将上述因素排除在低电阻率油层的成因之外。

储集层孔隙结构与其岩石电学特征密切相关，微裂缝-孔隙型双孔介质储集层的发育为钻井液侵入创造了条件，钻井液的超深侵入^[22]则是导致低电阻率油层成因的关键。在低孔特低渗的双孔介质条件下，（微）裂缝具有良好的渗流通道作用，钻井液在一定压差下能够深度侵入（大于感应测井系列的径向探测半径）并驱替其中的原油，导致油层电阻率大幅下降，形成了低电阻率。由此可见，淡水钻井液对裂缝性特低渗油层的侵入特征与淡水钻井液对一般孔隙型油层的“低电阻率环带”^[18-19]式的侵入特征有所不同，但却能够很好地印证和支持 Rasmus 的理论模型^[23]。

4 孔隙结构差异及低电阻率油层的试采验证

4.1 孔隙结构差异油层的压裂验证

压裂施工曲线中油压曲线上“尖峰”的有无是判断储集层中天然裂缝的重要证据。图 5 为区内两口井的压裂施工曲线，其中图 5a 为正常油层的压裂施工曲线，油压曲线存在显著的“尖峰”，地层破裂压力高达 28 MPa，表明该储集层属于孔隙型单孔介质的基质储集层，岩性致密。图 5b 为低电阻率油层的压裂施工曲线，地层破裂压力只有大约 16 MPa，油压曲线整体低平，无明显的“尖峰”出现，表明该储集层中存在天然裂缝，属于微裂缝-孔隙型双孔介质储集层，地层破裂压力相当于天然裂缝的开启压力。

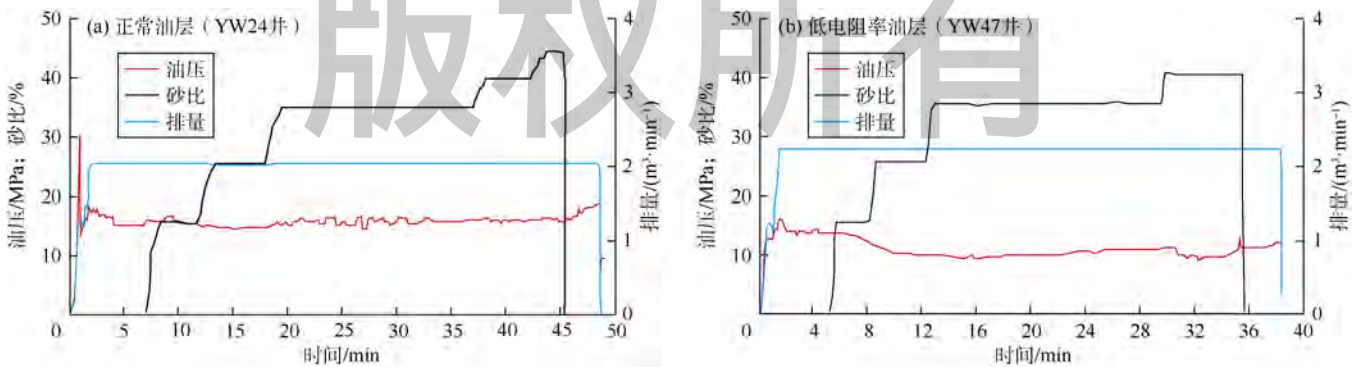


图 5 烟雾茆区块长 6 油层压裂施工曲线特征

此外,根据井史资料,区内部分钻井(例如 YW2 井和 YW9 井)在施钻长 6 低电阻率油层段时曾发生过不同程度的钻井液漏失现象,进一步印证了特低渗砂岩储集层中(微)裂缝的发育及其影响。

4.2 孔隙结构差异油层的试采验证

以 YW7 井为例,图 6 为该井长 6 油层组相邻两个油层的综合特征图,其中①号油层深度为 1 900.20~1 909.70 m,②号油层深度为 1 915.80~1 929.50 m。两套含油砂体的沉积类型及岩石学特征基本相同,但

孔隙结构及电性特征却存在明显差异,因此导致前期测井解释出现偏差。

根据岩心物性剖面,可将上部①号油层细分为 a、b、c 3 段(见表 2),b 段渗透率虽有异常但厚度小,岩石电学特征总体以 a+c 致密段孔隙型单孔介质的正常油层为主导,其孔喉半径细小,物性差,毛管压力曲线陡斜,排驱压力及中值压力高;声波时差曲线值中等,井径比较规则,双感应测井曲线凸起, R_{ILD} 平均值达 15.5 $\Omega \cdot m$ 。

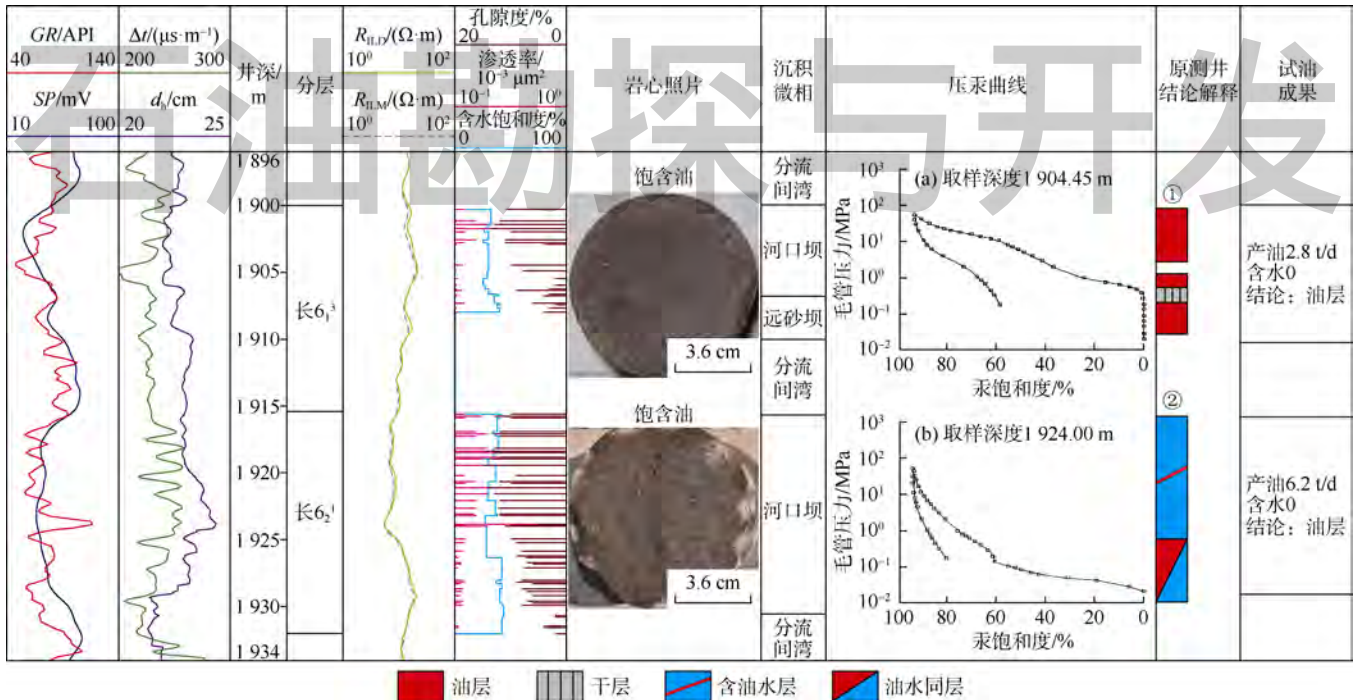


图 6 YW7 井长 6 正常油层和低电阻率油层岩石电学特征及试采成果综合图

表 2 YW7 井长 6 正常油层与低电阻率油层岩石电学特征参数评价结果表

油层编号	井深/m	分层编号	解释井段/m	厚度/m	岩性	岩心孔隙度/%	岩心渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	含水饱和度/%	声波时差/ $(\mu s \cdot m^{-1})$	深感应电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	排驱压力/MPa	中值压力/MPa	中值半径/ μm	平均孔径/ μm	孔隙结构类型	孔隙结构差异评价 $K_a/K_s \quad \phi_a/\phi_s$	油层属性
①	1 900.2~1 909.7	a	1 900.2~1 901.0	0.8	细砂岩	6.15	0.51	31.5	227.1	16.1					单孔介质		正常油层
		b	1 901.0~1 902.5	1.5	细砂岩	12.26	2.54	28.44	240.5	14.5					双孔介质	6.05 2.12	
		c	1 902.5~1 909.7	7.2	细砂岩	5.79	0.42	33.07	228.8	16.8	0.562	5.42	0.14	15.8	单孔介质		
②	1 915.8~1 929.5	d	1 915.8~1 925.0	9.2	细砂岩	12.51	2.39	33.68	244.6	7.5	0.022	1.54	1.88	26.5	双孔介质		低电阻率油层
		e	1 925.0~1 929.5	4.5	细砂岩	6.97	0.57	41.19	230.2	15.3					单孔介质	4.19 1.79	正常油层

下部②号油层可进一步细分为 d、e 两段(见表 2),d 段渗透率呈大段异常,感应电阻率曲线呈大段低凹状, R_{ILD} 平均值仅 7.5 $\Omega \cdot m$, 声波时差大段跳高,井

径明显扩径,属于典型的微裂缝-孔隙型双孔介质的低电阻率油层;孔喉半径显著增大,物性变好,排驱压力及中值压力低,毛管压力曲线出现近似的双平台。e

段岩石电学特征与①号油层的c段相似，属于孔隙型单孔介质的正常油层。比较而论，②号油层应以d段微裂缝-孔隙型双孔介质的低电阻率油层为主导。

分层试油结果表明：①、②两层均产纯油，且②号低电阻率油层的产油量是①号正常油层的2.38倍。两层试采初期含水率极高，随后即大幅度快速下降直至为零（见图7）。

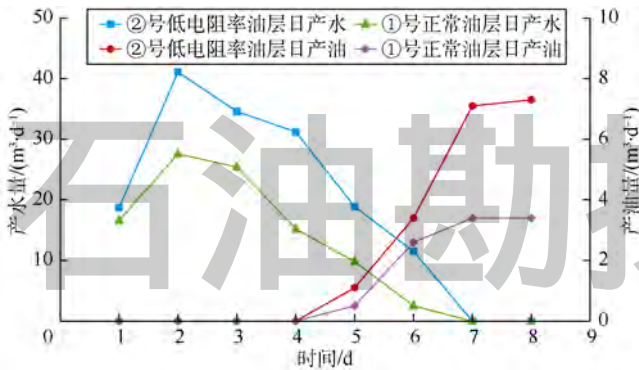


图7 YW7井长6正常油层及低电阻率油层分层试油曲线

YW7井试油成果充分验证了实验分析及综合解释结论，揭示了特低渗砂岩储集层的孔隙结构差异及其对油层岩石电学特征的影响，表明微裂缝-孔隙型双孔介质储集层的孔隙度比孔隙型单孔介质储集层高1.8~2.1倍，渗透率则高出4~6倍（见表2），证明了低电阻率油层比正常油层具有更高的储产能力。

5 结论

鄂尔多斯盆地志丹油田烟雾茆区块内长6油层组具有正常油层和低电阻率油层两种基本表现形式，发育孔隙型单孔介质和微裂缝-孔隙型双孔介质两种储集层孔隙结构类型，两者大致以渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为区分界限。岩心实验分析结果反映了特低渗砂岩储集层中两种孔隙介质的结构差异性，岩石电学特征则表明了钻井液对低电阻率油层形成了超深侵入。在低孔特低渗条件下，微裂缝的发育能够极大地改变储集层微观孔隙结构特征，造成孔隙结构类型的显著差异，引起油层孔隙结构、物性、渗流、岩石电学特征的显著变化，同时也导致了油层低电阻率现象。压裂及试油试采成果均印证了长6储集层中天然微裂缝的客观存在。

符号注释：

d_h ——井径，cm；GR——自然伽马，API； I ——电阻增大率，无因次； K_d ——双孔介质渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； K_s ——单

孔介质渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； n ——样品数，个； R ——相关系数，无因次； R_{ILD} ——深感应电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； R_{ILM} ——中感应电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； SP ——自然电位，mV； ϕ_d ——双孔介质孔隙度，%； ϕ_s ——单孔介质孔隙度，%； Δt ——声波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

参考文献：

- [1] 王瑞飞, 陈明强, 孙卫. 鄂尔多斯盆地延长组超低渗透砂岩储层微观孔隙结构特征研究[J]. 地质论评, 2008, 54(2): 270-277.
WANG Ruifei, CHEN Mingqiang, SUN Wei. The research of micro-pore structure in super-low permeability sandstone reservoir of the Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Geological Review, 2008, 54(2): 270-277.
- [2] 盛军, 孙卫, 刘艳妮, 等. 低渗透油藏储层微观孔隙结构差异对可动流体的影响: 以鄂尔多斯盆地姬塬与板桥地区长6储层为例[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 167-172.
SHENG Jun, SUN Wei, LIU Yanni, et al. Effect of the difference of low permeability reservoir microscopic pore structure on movable fluid: A case for the Chang 6 reservoir of Jiyuan and Banqiao Areas in Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(3): 167-172.
- [3] 樊建明, 屈雪峰, 王冲, 等. 鄂尔多斯盆地致密储集层天然裂缝分布特征及有效裂缝预测新方法[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 740-748.
FAN Jianming, QU Xuefeng, WANG Chong, et al. Natural fracture distribution and a new method predicting effective fractures in tight oil reservoirs of Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 740-748.
- [4] 张小莉. 陕北三叠系延长组低阻油层特性及其形成机理分析[J]. 测井技术, 1999, 23(4): 276-278.
ZHANG Xiaoli. Characteristics of low resistivity oil reservoir in Yanchang Formation Shanbei Triassic system and its origin[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(4): 276-278.
- [5] 南珺祥, 王素荣, 姚卫华, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长6-8特低渗透储层微裂缝研究[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 40-44.
NAN Junxiang, WANG Surong, YAO Weihua, et al. Micro-fractures in extra-low permeability reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 40-44.
- [6] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-180.
ZENG Lianbo, LI Zhongxing, SHI Cheng'en, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 174-180.
- [7] 王瑞飞, 陈明强, 孙卫. 特低渗透砂岩储层微裂缝特征及微裂缝参数的定量研究: 以鄂尔多斯盆地沿25区块、庄40区块为例[J]. 矿物学报, 2008, 28(2): 215-220.
WANG Ruifei, CHEN Mingqiang, SUN Wei. Quantitative research on the characteristics of and parameters for micro cracks in ultra-low permeability sandstone reservoirs: Taking Yan25 and Zhuang40 areas in the Ordos Basin for example[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2): 215-220.

- [8] 杨胜来, 魏俊之. 油层物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 106-248.
YANG Shenglai, WEI Junzhi. Reservoir physics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 106-248.
- [9] DULLIEN F A L. 多孔介质: 流体渗移与孔隙结构[M]. 杨富民, 黎用启, 译. 北京: 石油工业出版社, 1990.
DULLIEN F A L. Porous media-fluid permeability and pore structure[M]. YANG Fumin, LI Yongqi, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [10] 郝明强, 刘先贵, 胡永乐, 等. 微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 93-98.
HAO Mingqiang, LIU Xiangui, HU Yongle, et al. Reservoir characteristics of micro-fractured ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 93-98.
- [11] 王景, 凌升阶, 南中虎. 特低渗透砂岩微裂缝分布研究方法探索[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 51-53.
WANG Jing, LING Shengjie, NAN Zhonghu. Micro-fractures distribution in extremely lower permeable sandstone reservoirs of Yanchang Formation and its geologic significance, Ordos Basin, Northwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 51-53.
- [12] 中国石油勘探与生产公司. 低阻油气藏测井识别评价方法与技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 1-12, 364-368.
China Petroleum Exploration and Production Company. Low resistivity reservoir logging identification evaluation method and technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 1-12, 364-368.
- [13] 赵虹, 党彝, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长 2 低阻油层成因机理[J]. 石油实验地质, 2009, 31(6): 588-592.
ZHAO Hong, DANG Ben, YAO Jingli, et al. Forming mechanism of Chang2 low resistivity oil layer, Yanchang Formation, Jiyuan region, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(6): 588-592.
- [14] 郭顺, 王震亮, 张小莉, 等. 陕北志丹油田樊川区长 6¹ 低阻油层成因分析与识别方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 18-24.
GUO Shun, WANG Zhenliang, ZHANG Xiaoli, et al. Origin analysis on Chang 6¹ reservoir with low resistivity and its identifying methods from Fanchuan Area, Zhidan Oilfield, in Northern Shaanxi, Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1): 18-24.
- [15] 杨春梅, 周灿灿, 程相志. 低电阻率油层成因机理分析及有利区预测[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 600-605.
YANG Chunmei, ZHOU Cancan, CHENG Xiangzhi. Origin of low resistivity pays and forecasting of favorable prospecting areas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 600-605.
- [16] 田中元, 闫伟林, 秦开明. 淡水泥浆侵入条件下储层电阻率的变化研究[J]. 测井技术, 2003, 27(2): 113-117.
TIAN Zhongyuan, YAN Weilin, QIN Kaiming. On variations of formation resistivity in fresh drilling mud invasion[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(2): 113-117.
- [17] 邓少贵, 范宜仁, 谢关宝, 等. 泥浆侵入地层双感应测井曲线正负差异特性分析[J]. 测井技术, 2004, 28(6): 496-498.
DENG Shaogui, FAN Yiren, XIE Guanbao, et al. The influential factors on electrolog response of formation with mud filtration invasion[J]. Well Logging Technology, 2004, 28(6): 496-498.
- [18] 李长喜, 欧阳健, 周灿灿, 等. 淡水钻井液侵入油层形成低电阻率环带的综合研究与应用分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 82-86.
LI Changxi, OUYANG Jian, ZHOU Cancan, et al. Forming mechanism and application of low resistivity annulus in oil reservoirs invaded by fresh drilling mud[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 82-86.
- [19] 李长喜, 李潮流, 周灿灿, 等. 淡水钻井液侵入对双感应和双侧向测井响应的影响[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 603-608.
LI Changxi, LI Chaoliu, ZHOU Cancan, et al. Effects of fresh drilling mud invasion on logging responses of dual induction and dual lateral to reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 603-608.
- [20] 李长喜, 石玉江, 周灿灿, 等. 淡水钻井液侵入低幅度-低电阻率油层评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 696-702.
LI Changxi, SHI Yujiang, ZHOU Cancan, et al. Evaluation of low amplitude and low resistivity pay zones under the fresh drilling mud invasion condition[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 696-702.
- [21] 丁娱娇, 邵维志, 王志勇, 等. 不同泥浆侵入环境下储层电性变化特征[J]. 测井技术, 2009, 33(4): 315-320.
DING Yujiao, SHAO Weizhi, WANG Zhiyong, et al. On the characteristics of formation resistivity variation under different mud invasion environments[J]. Well Logging Technology, 2009, 33(4): 315-320.
- [22] 范翔宇, 龚明, 夏宏泉, 等. 裂缝性致密砂岩储层钻井液侵入深度的定量计算方法[J]. 天然气工业, 2012, 32(6): 60-64.
FAN Xiangyu, GONG Ming, XIA Hongquan, et al. A quantitative calculating method of the invasion depth of drilling fluids into the fractured tight sandstone reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6): 60-64.
- [23] RASMUS J C. Summary of the effects of various pore geometries and their wettabilities on measured and in situ values of cementation and saturation exponents[J]. Discuss Faraday Society, 1986, 28(1): 201-206.
- [24] 王建民. 陕北志丹地区长 6—长 2 油层组水退型三角洲沉积演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 182-187.
WANG Jianmin. Sedimentary and evolutionary characteristics of dereliction deltas in Chang 6-Chang 2 oily members, Zhidan region, northern Shaanxi[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 182-187.

第一作者简介: 王建民(1962-), 男, 陕西富平人, 博士, 西安石油大学教授, 主要从事沉积、储集层、油气成藏及开发地质等方面的教学与科研工作。地址: 陕西省西安市电子二路东段 18 号, 西安石油大学地球科学与工程学院, 邮政编码: 710065。E-mail: wangjm@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2017-06-29 修回日期: 2018-02-25

(编辑 黄昌武)