

杨维磊,李新宇,徐志,等.鄂尔多斯盆地安塞地区长7段页岩油资源潜力评价[J].海洋地质前沿,2019,35(4):48-56.

鄂尔多斯盆地安塞地区长7段页岩油资源潜力评价

杨维磊,李新宇,徐志,李二党

(中国石油长庆油田公司第一采油厂,陕西延安 716000)

摘要:鄂尔多斯盆地安塞地区三叠系延长组长7段油页岩在西南部较为发育,厚度可达到10 m以上,氯仿沥青“A”平均值达到0.87%,具备形成页岩油的地质基础。利用CT扫描电镜技术、核磁共振等技术对长7段油页岩储集空间及储集性能进行定量表征,揭示纳米级黏土颗粒片状孔隙是长7段油页岩的主要孔隙类型,平均有效孔隙度4.86%,平均含油饱和度为44.63%。安塞地区长7段具有页岩油赋存与聚集成藏的物质基础,大规模分布的黑色油页岩、良好的储集空间和充足的烃类,原油黏度低、油页岩可压裂性好、高角度裂缝发育等有利于页岩油在纳米级孔隙中流动和开采,预测资源潜力达到 $4.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,并指出了水平井+体积压裂提高单井产量的攻关方向。

关键词:安塞地区;三叠系长7段;油页岩;页岩油;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P736;P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.04006

0 引言

油页岩(又称油母页岩)是一种高灰分的含可燃有机质的沉积岩,其中含有尚未排出的成熟、低熟或未熟原油。本文重点研究的对象是油页岩中尚未排出的成熟石油,即油气地质界所称的页岩油^[1],是残存在油页岩内部层理面或者纳米级基质孔隙内的油气聚集,其含量可以用油页岩氯仿沥青“A”含量近似代表。

常规向非常规油气藏理念的转变,推动了全球非常规油气勘探开发快速发展,正在逐渐改变全球能源供应格局。2010年,加拿大学者基于“能源三角”理论,评价认为北美25个盆地非常规油气可采资源总量大约是常规油气的4倍^[2]。页

岩油作为一种非常规油气资源也越来越受到重视,国外在页岩油开发上进展较快,其中美国威灵斯顿盆地Bakken页岩层系中页岩油的开发取得明显进展,产量已经达到美国石油产量的1.7%。国内相对页岩气而言,页岩油的研究还在发展之中,页岩油开发还在探索^[3]。

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7期在盆地中沉积了分布广泛、富含有机质的张家滩页岩^[4-5],因其有机质丰度高(TOC多数大于2%,最高达30%)、有机质类型好(I-II₁型),成熟度适中(Ro为0.7%~1.3%),是延长组的主力烃源岩,据杨华等^[6]研究,长7烃源岩也是一套优质油页岩,目前已成为鄂尔多斯盆地页岩油气勘探的重要层位,姬源—华池—正宁一带油页岩累计厚度>20 m。而对于安塞地区油页岩分布特征及资源潜力分析研究较少。大量钻探、岩心分析测试表明,安塞地区西南部长7油页岩发育,厚度较大(6~12 m),且天然裂缝发育。本文基于岩心样品地球化学分析、CT扫描电镜技术、核磁共振等

收稿日期:2018-12-03

作者简介:杨维磊(1981—),男,本科,主要从事油田开发方面的研究工作。E-mail:108448595@qq.com

技术分析测试的基础上,综合取心资料、常规测井、成像测井解释方法,分析研究和评价了安塞地区页岩油资源潜力。

1 研究区油气地质概况

鄂尔多斯盆地边缘断裂褶皱较为发育,而盆地内部构造简单,可分为 6 个二级构造单元,研究区位于其中的陕北斜坡中部(图 1)。晚三叠世该盆地为一大型内陆差异性沉积盆地,期间沉积了一套河流—三角洲—湖泊相地层,层位归属上三叠统延长组,自上而下划分为 10 段(长 1—长 10)。其中,长 7 段沉积期为湖盆最大湖泛期,气候温暖潮^[7],沉积了一套厚度较大、分布较广优质烃源岩,俗称张家滩页岩。研究区长 7 段烃源岩层在以往的油气勘探活动中曾发现过高产工业油流,预示着长 7 段有良好的油气勘探前景。

安塞地区长 7 油页岩有机质类型为 I 型和 II₁ 型, TOC 值为 0.87%~7.16%, 平均值为 2.79%, S₁+S₂ 值为 1.5~24.7 mg/g, 平均值为 9.8 mg/g, 与盆地南部和陇东地区相比,相对较低(表 1), 主要受沉积环境影响,安塞地区为滨浅湖沉积,受三角洲物源和水动力影响,泥岩中粉砂质含量较高,有机质被生物分解^[8],未熟或低熟油

潜力较小,而盆地南部、陇东地区主要为半深湖、深湖沉积,有利于有机质的保存;但氯仿沥青“A”值相对较高,一般为 0.29%~1.89%,平均达到 0.87%,表明研究区页岩油含量较高,潜力较大。

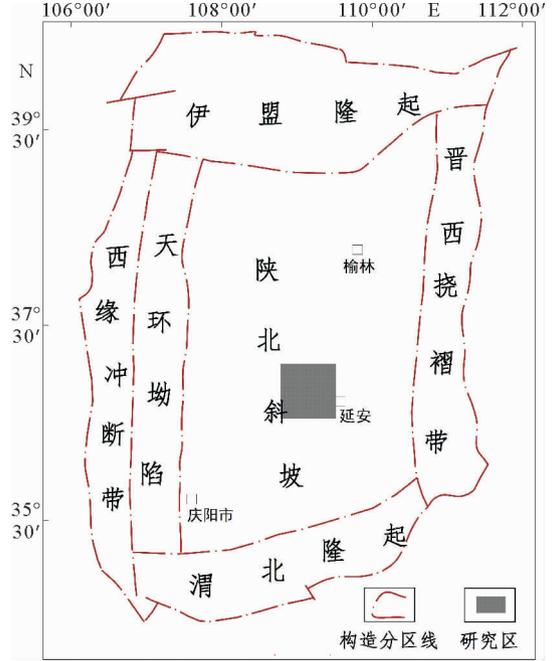


图 1 鄂尔多斯盆地构造分区及安塞地区勘探开发区位置
Fig. 1 Tectonic map of the Ordos Basin and the studied area

表 1 研究区与盆地其他区域有机地球化学特征对比表

Table 1 Comparison of organic geochemical characteristics between the study area and other areas of the basin

区域	TOC/%	S ₁ +S ₂ /(mg/g)	HI/(mg/g)	氯仿沥青“A”/%	Ro/%	干酪根类型
安塞地区	0.87~7.16	1.5~24.7	146~326	0.29~1.89	0.9~1.2	I—II ₁
	2.79	9.8	298	0.87	1.01	
盆地南部 ^[9]	3.9~22.5	23.1~120.1	356~752	0.19~1.38	0.53~0.6	I
	11.9	66.1	568	0.88	0.62	
陇东地区 ^[10]	2.0~18.0	17.77~100.99	75~350	0.20~1.70	0.68~1.08	I—II ₁
	8.6	52.21	178	0.6	0.82	

2 油页岩发育规模

按照石油地质理论和干酪根生烃理论,传统的油藏均经过二次运移,划归源外体系,页岩油只有初次运移,属于源内体系,页岩油在空间上受油页岩的分布特征控制,两者空间分布特征基本一致。

2.1 油页岩的识别

长 7 段油页岩与贫有机质的湖相(粉砂质)泥岩(TOC<2%)间极易区分^[5],测井响应特征显示,长 7 油页岩在测井曲线上表现为“三高一低”的特征(图 2),为高电阻率、高自然伽马、高声波时差和低密度^[11]。油页岩中的有机质不具有导

电性,在测井曲线上表现为电阻率测井值高于泥岩和页岩电阻率测井值;干酪根含量增加会引起油页岩中铀、钒、钾含量增大,导致油页岩的自然伽马测井值比泥岩和页岩的自然伽马测井值高;有机质的声波时差($70 \mu\text{s}/\text{m}$)大于岩石骨架的声波时差,有机质富集的岩石有较大的声波时差值,油页岩的声波时差要高于泥岩和页岩的声波时

差;有机质的密度近于 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$,黏土质矿物的骨架密度为 $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$,当有机质取代岩石骨架时,就会使岩石的密度减小,研究区油页岩电阻率为 $40\sim 110 \Omega \cdot \text{m}$,自然伽马为 $110\sim 140 \text{ API}$,声波时差为 $280\sim 340 \mu\text{s}/\text{m}$,密度为 $2.42\sim 2.53 \text{ g}/\text{cm}^3$ (图3)。取心显示研究区油页岩厚度在 $5\sim 10 \text{ m}$ 之间,页理发育,见鱼类化石,属于滨浅湖沉积。

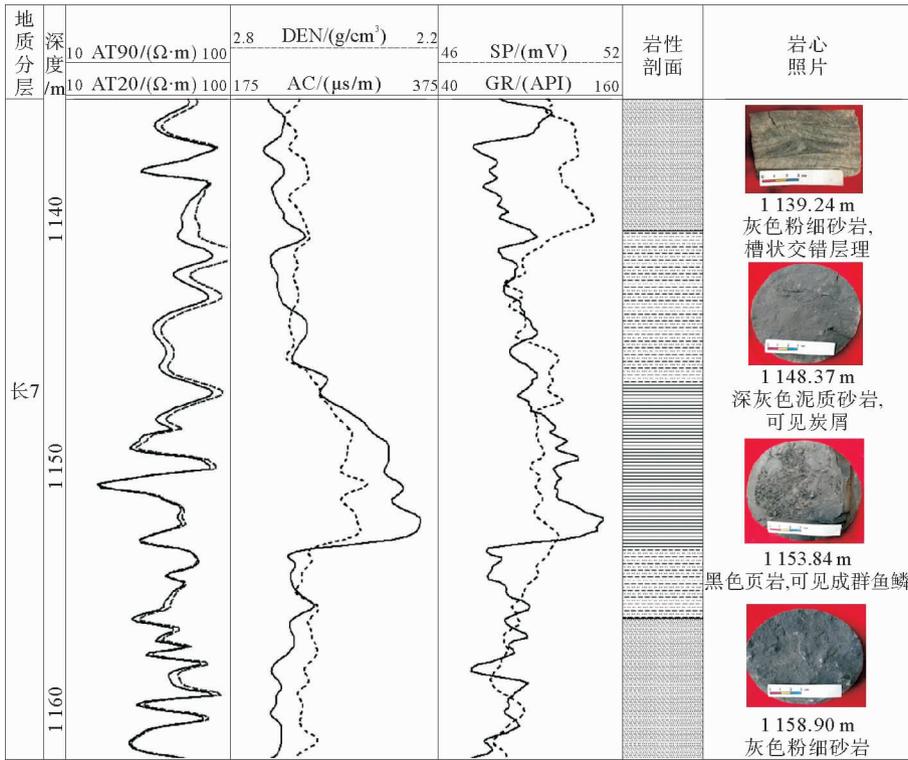


图2 丹214井长7段油页岩测井综合图

Fig. 2 Integrated logging column of the oil shale in the Chang 7 Member from Dan 214 Well

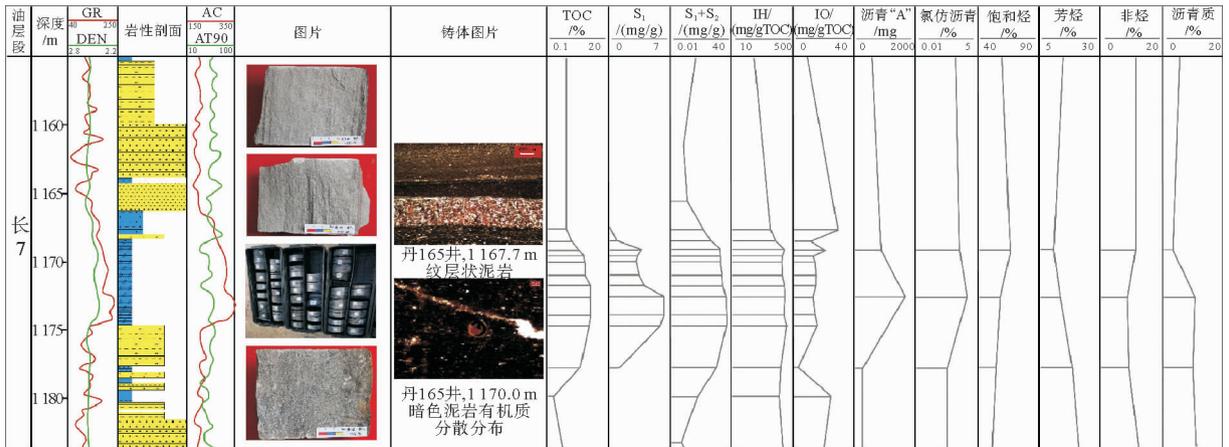


图3 丹165井长7油页岩岩性剖面和地球化学综合柱状图

Fig. 3 Integrated stratigraphic column of the Chang 7 Member from Dan 165 Well

2.2 油页岩平面分布特征

地质录井、测井识别相结合,刻画了研究区长 7 油页岩平面分布特征。长 7 油页岩的发育厚度与湖盆中心的展布密切相关,研究区西南方向靠近湖盆中心,油页岩厚度可达到 10 m 以上,NE 方向远离湖盆中心,页岩油不发育(图 4~6)。张渠—王窑—沿河湾一线西南部油页岩厚度 > 4 m,面积约 $2\ 220 \times 10^4\ \text{km}^2$,采用先分别计算各厚度级别泥页岩体积再累计的方法,得出长 7 段油页岩体积为 $20 \times 10^8\ \text{m}^3$ 。

3 油页岩储集性能

3.1 油页岩孔隙类型

高分辨率扫描电镜图像分析结果表明(图 7),研究区长 7 油页岩中主要发育矿物颗粒内片状孔隙和溶蚀孔,但 2 种孔隙的丰度、分布和孔隙连通性存在较大的差异。矿物颗粒内片状孔隙主

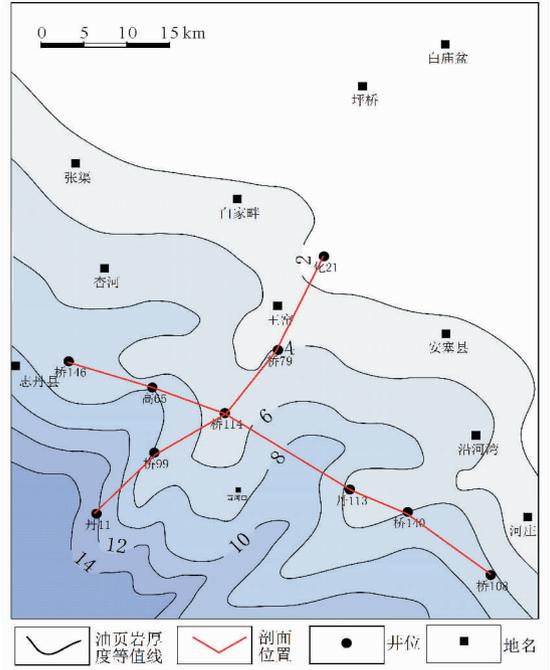


图 4 安塞地区长 7 段油页岩分布特征

Fig. 4 Distribution pattern of oil shale in the Chang 7 Member of the Ansai area

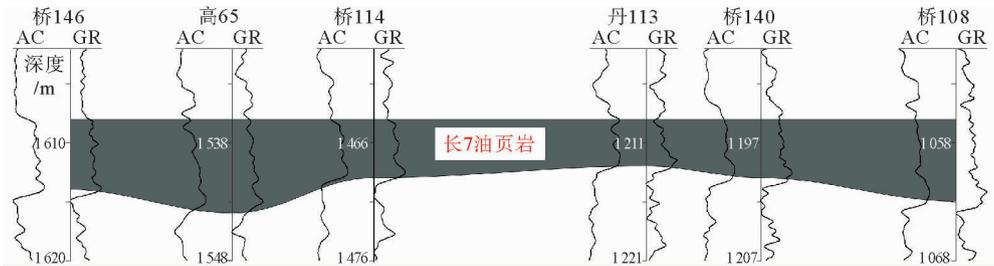


图 5 安塞地区桥 146—桥 108 井长 7 段油页岩连井对比剖面

Fig. 5 Well correlation showing oil shale in Chang 7 Member of from well Qiao 146 to Qiao 108 in the Ansai area

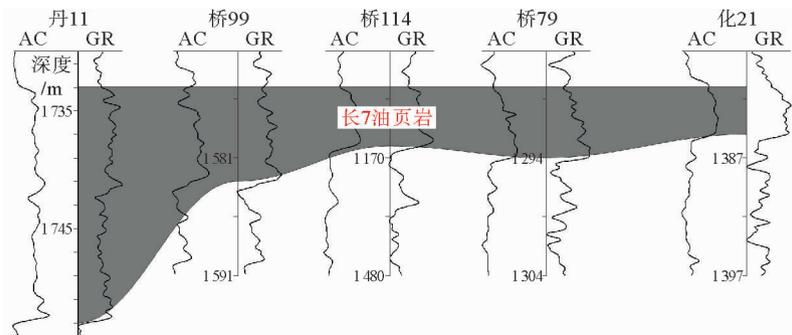
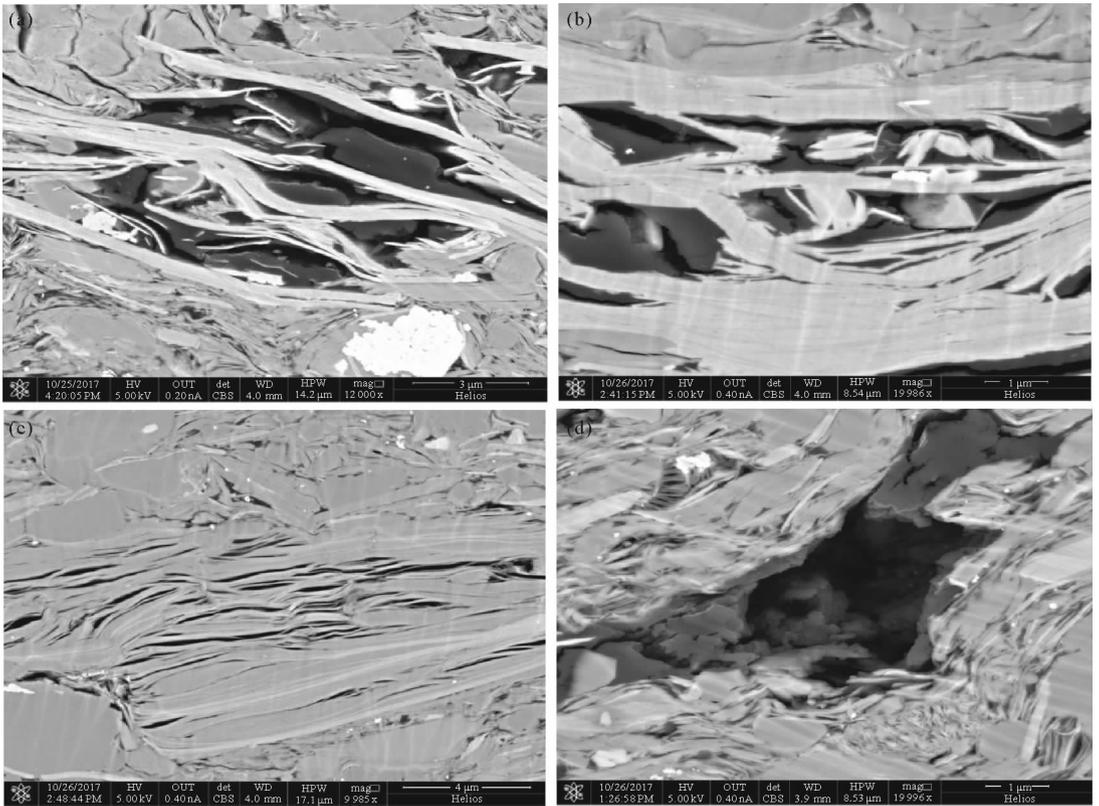


图 6 安塞地区丹 11—化 21 井长 7 段油页岩连井对比剖面

Fig. 6 Well correlation showing the oil shale in Chang 7 Member from well Dan 11 to Hua 21 in the Ansai area



(a)丹165井,1173 m,矿物颗粒内片状孔隙;(b)丹165井,1173 m,矿物颗粒溶蚀孔隙;(c)丹165井,1170 m,矿物颗粒内片状孔隙;(d)丹165井,1170 m,矿物颗粒内片状孔隙

图7 鄂尔多斯盆地安塞地区长7段油页岩中发育的孔隙类型

Fig. 7 Pore types of the oil shale in the Chang 7 Member of the Ansai area, Ordos Basin

要为黏土颗粒片状孔,在黏土内分布广泛,平行分布、成组出现,孔内均有有机质充填,随着有机质的收缩,形成纳米级互为连通的孔隙群(图7c);与以碳酸盐岩溶蚀孔为主要孔隙类型的陆相咸水型烃源岩不同^[12],研究样品中颗粒溶蚀孔数量相对较少,且多为长石溶蚀孔(图7b),孔隙受体腔形状的控制,数量少、多为孤立状。有机质孔不发育,基于温压模拟与纳米CT三维表征技术的研究发现 R_o 值 $>1.2\%$ 时盆地长7油页岩有机质孔大量发育,而研究区 R_o 值 $<1.2\%$ 。

3.2 油页岩孔隙度

长7油页岩主要发育纳米级孔隙,常规测试方法不能有效反映其真实孔隙度,核磁共振测井在油田勘探开发中发挥着重要作用^[13],MRT核磁共振测井仪性能稳定可靠,计算的储层参数重复误差在行业标准允许范围内^[14],研究区采用

MRT核磁共振测井仪测井3口,显示长7油页岩地层总孔隙度为 $3.97\% \sim 5.74\%$,平均为 5.11% ,有效孔隙度为 $3.78\% \sim 5.47\%$,平均为 4.86% ,计算研究区页岩油有效孔隙体积为 $9.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.3 页岩油含油饱和度

核磁共振技术能对岩石孔隙中流体所含的氢核 ^1H 进行探测,通过对岩心样品添加饱和和氯化锰溶液屏蔽水的 T_2 信号,可以反映岩石孔隙中油含量^[15],计算公式:

$$\text{含油饱和度} = \frac{\text{饱锰信号量}}{\text{饱水信号量}} \times 100\%$$

对研究区2块样品测试(图8),结果显示含油饱和度为 $38.49\%、50.76\%$,平均为 44.63% ,研究区长7页岩油体积系数1.21,计算研究区页岩油资源潜力 $4.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

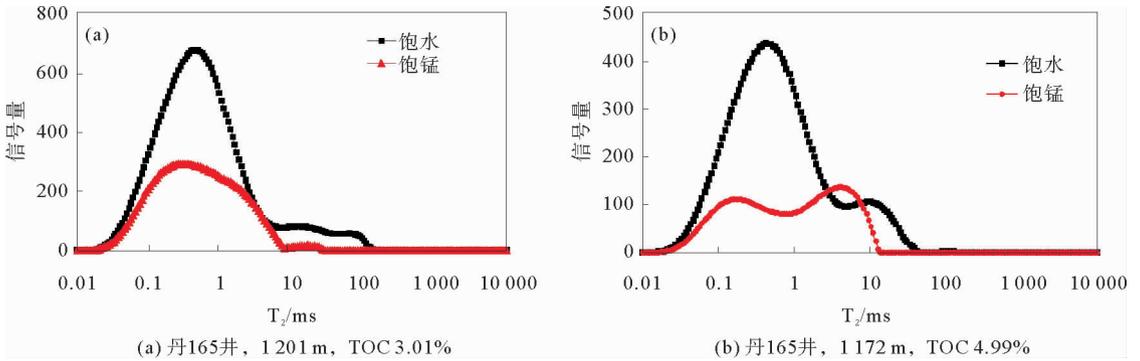


图8 安塞地区长7段油页岩岩心不同饱和度溶液下的 T_2 弛豫时间分布

Fig. 8 Distribution of T_2 relaxation time under the solutions of different saturation of the oil shale core in the Chang 7 Member of the Ansai area

4 页岩油开发可行性分析

4.1 页岩油可流动性

岩石中可溶有机物及原油簇组分分析表明,长7段页岩油总体具有油质轻、黏度小的特征,并伴生油型热解气,非常有利于页岩油在纳米孔喉

中的流动和开采(表2)。岩样中“非烃+沥青质”含量19.55%,饱和烃含量平均值72.13%,而原油中“非烃+沥青质”含量3.66%,含量较低,主要是因为“非烃+沥青质”不易被采出;饱和烃含量平均值78.47%,与岩样接近;地面页岩油密度平均值 0.85 g/cm^3 ,运动黏度值 $10.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (测试温度为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$),凝固点 $10.6 \text{ }^\circ\text{C}$,汽油比 $117.31 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

表2 安塞地区长7段原油簇组分分析对比

Table 2 Components of oil clusters in the Chang 7 Member of the Ansai area

井号	深度/m	层位	样品	TOC/%	氯仿沥青/%	饱和烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%
丹165	1 172.6	长 7_2	油页岩	4.52	1.854	58.47	13.66	8.77	10.78
招26-36	1 206.0	长 7_2	原油			56.94	21.53	3.23	0.43

4.2 油页岩可压裂性

元素俘获测井表明,研究区长7段油页岩黏土矿物含量39.68%,石英、碳酸盐含量等刚性组分含量59.28%,与盆地周边基本接近(表3),脆性矿物含量相对偏高,可压裂性好;岩心、成像测井显示,长7段油页岩中高角度构造裂缝较为发育(图9、10),压裂改造后,天然裂缝与水力压裂缝的结合可形成网状输导体系;针对长7油页岩,采用大液量、大排量、小砂比,泵入滑溜水和表面活性剂压裂液混合水进行压裂,产生网状裂缝,大幅度地扩大泄油体积,提高致密油单井产量,在研究区该技术已成功应用7口井,液量 $495 \sim 959 \text{ m}^3$,排量 $4 \sim 8 \text{ m}^3/\text{min}$,砂比 $3.1\% \sim 11.8\%$,地层破压 $28.6 \sim 34.6 \text{ MPa}$,5口井获得工业油流,

日产油最高达到 15.9 t/d 。

4.3 开发方式探讨

页岩油物性差,传统直井开发,单井产量低,研究区5口直井开发试验表明,单井产量 $0.41 \sim 0.96 \text{ t/d}$,经济效益较差。近年来开采技术的创新和进步为这类油藏开发提出了新的方向,李忠兴等^[16]和何崇康等^[17]研究表明,鄂尔多斯盆地长7段致密油采用水平井开发,配套“大排量、大液量、低砂比”的体积压裂改造工艺技术,能够有效提高单井产量,当直井产量达到 1.0 t/d 的区域,水平井单井产量可达到 6.0 t/d 以上;同时长庆油田创新形成的水力喷砂分段多簇体积压裂技术,较引进国外同类技术,开采成本大幅度下降^[16],这都为页岩油效益开发提出了方向,下一

表3 安塞地区长7段油页岩与其他地区油页岩矿物组成对比

Table 3 Comparison of mineral composition of oil shale in the Chang 7 Member of Ansai with other areas

产层	矿物含量/%					黏土
	刚性组分					
	石英	长石	碳酸盐	黄铁矿	合计	
鄂尔多斯盆地长7段油页岩 ^[6]	28.78	16.5	8.38	16.89	70.55	29.19
安塞地区长7段油页岩	31.42	19.67	3.33	4.86	59.28	39.68

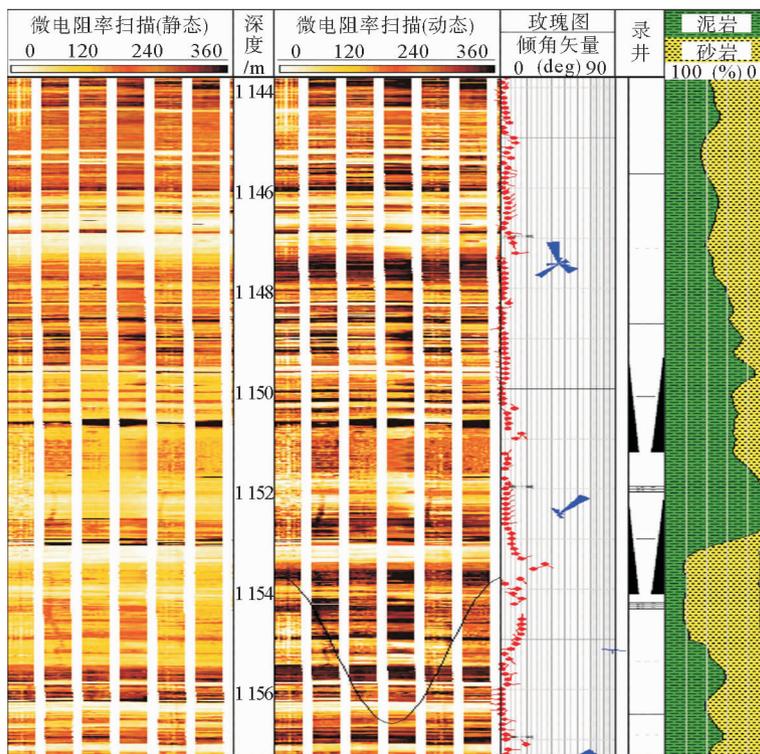


图9 安塞地区丹214井长7段成像测井成果图

Fig. 9 Imaging log picture of the Chang 7 Member from well Dan 214 in the Ansai area



图10 安塞地区丹214井长7段裂缝面照片

Fig. 10 Photograph of the cracks of the Chang 7 Member from well Dan 214 in the Ansai area

步主要在研究区西南部页岩油厚度 $>10\text{ m}$ 的区域,开展水平井开发试验。

由于页岩油的特殊性,目前尚无完善的理论计算水平井水平段长度、井距的方法。理论上,水平段长度越大,单井产量越高,目前长庆长7致密油采用 $1.5\sim 2.0\text{ km}$ 水平段水平井开发,单井产能可达到 20 t/d ,试验井水平段长度设定为 2.0 km ;试验井要进行体积压裂,压裂后地层形成一个复杂的裂缝箱体,如若井距太近,两口井裂缝之间会产生干扰,不但不会增加产量,反而会使产能减小,因此可以将压裂时裂缝的长度作为水平井的井距,长庆长7致密油裂缝半长 300 m ,考虑到油页岩脆性较致密砂岩要差一些,预计裂缝半长不超过 200 m ,因此井距设定为 400 m 。

北美体积压裂技术已经向缩短段间距、簇间距,降低每段压裂规模,提高人工裂缝密度的模式转变。借鉴国外开发经验,试验井采用多段多簇的方式压裂改造,段间距设定为 $20\sim 30\text{ m}$,簇间距设定为 $10\sim 15\text{ m}$ 。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地安塞地区三叠统延长组7段页岩油总有机碳含量平均为 2.79% ,与盆地其他区域相比较低,但氯仿沥青“A”值相对较高平均达到 0.87% ,含页岩油较高,具备形成页岩油的地质基础。

(2)安塞地区长7段页岩油测井响应特征明显,空间上分布连片,西南方向靠近湖盆中心,页岩油厚度可达到 10 m 以上,总体积 $20^3\times 10^8\text{ m}^3$,展布规模较大。

(3)安塞地区长7页岩油储集空间以纳米级黏土颗粒片状孔为主,平均有效孔隙度为 4.86% ,平均含油饱和度为 44.63% ,预测页岩油资源潜力达 $4.42\times 10^8\text{ m}^3$ 。

(4)安塞地区具有较大的页岩油勘探开发潜力,基于页岩油空间展布特征、储集体积以及开发试验等方面分析,认为研究区西南方向西河口地区为有利的勘探开发区带,下一步开展水平井+体积压裂提高单井产量试验,可望获得页岩油勘探的重大突破。

参考文献:

- [1] 丁敏,姚志刚,张狄杰.鄂尔多斯盆地延长组长7页岩油存在的可能性分析[J].石油化工应用,2011,30(12):59-63.
- [2] Cheng K, Wu W, Holditch S A, et al. Assessment of the distribution of technically recoverable Resources in north American basin[C]//Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2010.
- [3] 李玉喜,张金川.我国非常规油气资源类型和潜力[J].国际石油经济,2011,19(3):61-67.
- [4] 张文正,杨华,杨奕华,等.鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J].地球化学,2008,37(1):59-64.
- [5] 杨华,张文正.论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:地质地球化学特征[J].地球化学,2005,34(2):147-154.
- [6] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报,2013,34(1):1-11.
- [7] 吉利明,吴涛,李林涛.陇东三叠系延长组主要油源岩发育时期的古气候特征[J].沉积学报,2006,24(3):426-431.
- [8] 刘群,袁选俊,林森虎,等.湖相泥岩、页岩的沉积环境和特征对比——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J].石油与天然气地质,2018,39(3):531-540. DOI: 10.11743/ogg20180310.
- [9] 骆垠山,张哨楠,张枝焕,等.鄂尔多斯盆地南部油页岩有利勘探区预测[J].中国矿业,2014,23(1):83-108.
- [10] 高岗,刘显阳,王银会,等.鄂尔多斯盆地陇东地区长7段页岩油特征与资源潜力[J].地学前缘,2013,20(2):140-146.
- [11] 朱建伟,赵刚,刘博,等.油页岩测井识别技术及应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(2):289-295.
- [12] 章新文,余志远,黄庆.泌阳凹陷陆相页岩油富集主控因素分析[J].石油地质与工程,2013,27(3):5-11.
- [13] 肖立志.核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M].北京:科学出版社,1998.
- [14] 陈木银,陈江浩,曹孟鑫,等.MR核磁共振测井仪可靠性及应用效果分析[J].测井技术,2018,42(1):107-112.
- [15] 王学武,杨正明,李海波,等.利用核磁共振研究特低渗透油藏微观剩余油分布[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(4):702-709.
- [16] 李忠兴,李健,屈雪峰,等.鄂尔多斯盆地长7致密油开发试验及认识[J].天然气地球科学,2015,26(10):1933-1940.
- [17] 何崇康,成良丙,陈旭峰,等.鄂尔多斯盆地新安边油田长7致密油有效储层识别与甜点优选[J].石油实验地质,2017,39(6):812-818.

