

安塞特低渗透油田开发实践文选



序 言

随着国际国内油气勘探开发技术的不断发展,我国低渗、特低渗油藏的探明储量以越来越快的速度在逐年增长,在中石油已达到累计探明石油储量的 40% 以上。因此,要保障国家战略资源的稳定增长,高效开发好特低渗透油藏至关重要。

安塞油田是长庆油田第一个投入开发的三叠系特低渗透油田,也是中国陆上第一个实现效益开发的整装亿吨级特低渗透油田。该油田主要含油层系为三叠系延长组长 6、长 4 + 5、长 3、长 2 和长 10,主力油层长 6 是鄂尔多斯盆地三叠系湖盆由鼎盛时期转入衰退阶段形成的三角洲前缘亚相沉积体系,储层孔隙结构复杂,平均空气渗透率仅为 $1.29 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,原始地层压力仅 8.3 ~ 10.0 MPa,油井常规钻井无初产,油基和泡沫负压钻井中途测试初产仅 1 ~ 2 t/d,是一个典型的低渗、低压、低产油田;油田发现初期,曾被美国 CER 咨询公司定性为一个无开发价值的经济边际油田。

为了改变 20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期 10 多年间鄂尔多斯盆地石油天然气勘探开发无大发展的局面,长庆油田自 1983 年塞 1 井钻探成功,安塞油田被发现开始,坚持以科技进步为先导,进行了 7 年的现场开发试验,开展了以油藏研究、油层保护、钻井、完井、整体压裂改造、注水开发为主体的多项试验,克服重重困难,终于走出了一条经济、高效开发特低渗透油田的路子。1994 年,安塞特低渗透油田经济有效的开发技术被中国石油天然气总公司被誉为“安塞模式”。此后安塞油田生产规模逐年快速攀升,1997 年,原油年产量突破 100 万吨,2004 年,原油年产量突破 200 万吨,2010 年,原油年产量历史性地跨越 300 万吨。安塞特低渗透油田的高效开发和快速发展,不仅有力地支撑了长庆油田的大发展,同时为全国低渗透油田的效益开发起到了典型示范作用。

如今,安塞油田的开发已经走过了 20 多年的历程,老油田已经陆续进入中高含水开发期。为了实现老油田的长期稳产,长庆油田不断完善、发展和丰富“安塞模式”,在特低渗透油田稳产和提高采收率技术方面,也已经进行了多年的攻关研究和矿场实践,并取得了一系列认识、理论和技术方面的突破,油田已连续 14 年保持了一类开发水平。

《安塞特低渗透油田开发实践文选》一书收编了油藏研究论文 12 篇,油田注水开发研究论文 10 篇,油田开发管理论文 7 篇。研究论文时间跨度大,从开发初期到目前油田年产量实现 300 万吨,是作者在参加安塞油田勘探开发全过程中对油藏研究、开发技术、开发管理的系统总结、集成。本文作者毕业于西北大学地质系,取得了中国科学院理学博士学位,直接参与了安塞油田勘探和开发的全过程,从钻井队、野外队、地

质研究所,到任厂总地质师、副厂长、厂长,先后有多项科技成果获奖,在 2004 年被评为长庆油田公司有突出贡献科技专家。本次选择的内容包括安塞特低渗透油田的地质认识、储层评价、开发工艺、稳产技术、开发管理等 29 篇论文。这些论文大部分曾在国内有关会议上进行了交流或在刊物上发表,其中《安塞特低渗透油田的开发》等三篇文章发表在美国石油工程师杂志(SPE)。这些论文和成果对我国低渗透油田开发提供了宝贵的经验和资料。在论文的编写和收集过程中得到长庆油田公司和采油一厂领导、专家的大力支持,得到了西北大学地质学系李文厚教授和相关老师的指导和帮助,在此一并致谢!

作 者

2011.10.1

目 录

序言	(1)
1. 安塞地区延长组层序地层特征	(1)
2. 特低渗透油田注水开发技术	(8)
3. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组层序格架及其特征	(37)
4. 安塞油田上三叠统延长组油源特征分析	(46)
5. 安塞油田长 6、长 4 + 5 油层组成岩作用及孔隙类型	(58)
6. 安塞油田延长组长 10 ₁ 油层段沉积微相与优质储层特征分析	(66)
7. 安塞油田王窑区长 6 油层储层地质	(79)
8. 安塞地区上三叠统延长组沉积体系研究	(88)
9. 安塞油田延长组长 10 油层组储层非均质性特征分析	(95)
10. 安塞油田侏罗系储层特征	(107)
11. 安塞油田南部侏罗系延安组油藏综合地质研究	(123)
12. 安塞特低渗透油田的开发	(134)
13. 安塞油田坪桥水平井区沉积微相三维建模研究	(148)
14. 安塞油田长 2 油藏控制因素研究	(155)
15. 安塞油田裂缝特征及对开发效果的影响	(160)
16. 安塞油田水平井早期开发地质特征	(168)
17. 安塞特低渗油田的一种投注方式	(176)
18. 安塞特低渗透油田水平井开发效果评价	(182)
19. 安塞特低渗透油田注水开发稳产技术	(194)
20. 安塞油田内部加密技术研究	(203)
21. 裂缝监测技术在安塞油田开发中的应用	(212)
22. 安塞特低渗油田“母子井场”技术研究及应用	(218)

23. 提高储层随机建模精度的地质约束原则	(225)
24. 低渗透油田精细注水管理模式的探索与实践	(232)
25. 大油田系统管理模式的构建与实施	(236)
26. 大型油田以可持续发展为导向的系统化管理	(243)
27. 石油企业系统管理革新的思考	(254)
28. 采油厂岗位标准作业程序的探索与研究	(260)
29. 整合监督力量 强化过程监督 规范体系运行 提升质量管理 采油厂质量技术监督模式的实践与探索	(272)

安塞地区延长组层序地层特征^①

吴志宇 赵 虹 李文厚 李 强

【摘 要】 运用层序地层学原理,结合野外剖面 and 钻井资料,根据不同的层序界面,将安塞地区延长组划分为4个层序,自下而上为S1、S2、S3和S4。除了S4的高位体系域因剥蚀而缺失外,其他层序均由低位、水进和高位体系域组成。各层序呈现不同的堆砌样式。研究区的层序对于生储盖的组合及储层的展布以及储层的储集性能均有一定的控制作用。因此,位于最大湖进面的长7张家滩页岩成为主要的生油层;处于水进体系域的长9、长4+5和长1湖相泥岩既具有一定的生油能力,同时又可作为盖层;位于低位体系域的长6、长2和长3油层组是良好的储集层,而同处于低位体系域的长8油层组则是研究区的下一个勘探目的层。

【关键词】 层序地层 体系域 延长组 安塞地区 鄂尔多斯盆地

以Vail(1987)为代表的经典层序地层学不仅变革了传统地层学和沉积学的理论,而且使其已成为一门能够指导油气勘探和开发的应用学科。其基本指导思想是强调地层层序的形成受控于全球海平面的升降、构造沉降、气候和沉积物供给等因素,并表现出不同的级别、规模和不同的时间间隔。与海相盆地不同,陆相盆地有其多物源、多沉降中心、多沉积中心等特点。对陆相湖盆来说,周期性的构造运动、交替变化的古气候条件、断层的间歇性活动都会引起基准面的周期性升降变化、湖盆水体深度和水域大小的变化、沉积物供给速率的变化,最终导致湖盆可容纳空间的变化,由此决定了地层旋回的形成与发育特征。

近年来,层序地层学方法已大量地应用于陆相沉积体系研究,并取得了可喜的成果。本文就是利用层序地层学的原理,对安塞地区晚三叠世延长组陆相地层进行了层序划分,并阐述了不同层序的充填特点,以期对研究区的油气勘探与开发具有一定的指导意义。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是我国陆上第二大沉积盆地(图1)。构造形态总体显示为东翼宽缓、西翼陡窄的不对称大向斜。盆地边缘断裂、褶皱较发育,而盆地内部构造相对简单,以低

^① 本文发表于《天然气地球科学》,2005年第16卷第2期。

幅鼻状隆起为主。研究区位于盆内一级构造单元陕北斜坡的中东部(图1)。

鄂尔多斯盆地是晚三叠世初期华北地台解体后独立发展起来的大型内陆湖盆,盆地内主要以升降运动为主。上三叠统延长组是该内陆湖盆形成后发育的一套河流—湖泊三角洲沉积,也是第一套生储油岩系,厚度为1000~1500m,与下伏中三叠世的纸坊组、上覆早侏罗世富县组或延安组分别呈平行不整合接触关系。前人根据岩性特征,将延长组自下而上划分为5个岩性段(T3y1—T3y5),而据岩、电特征及含油性的差异,又将其自上而下划分为10个油层组(长1—长10)。

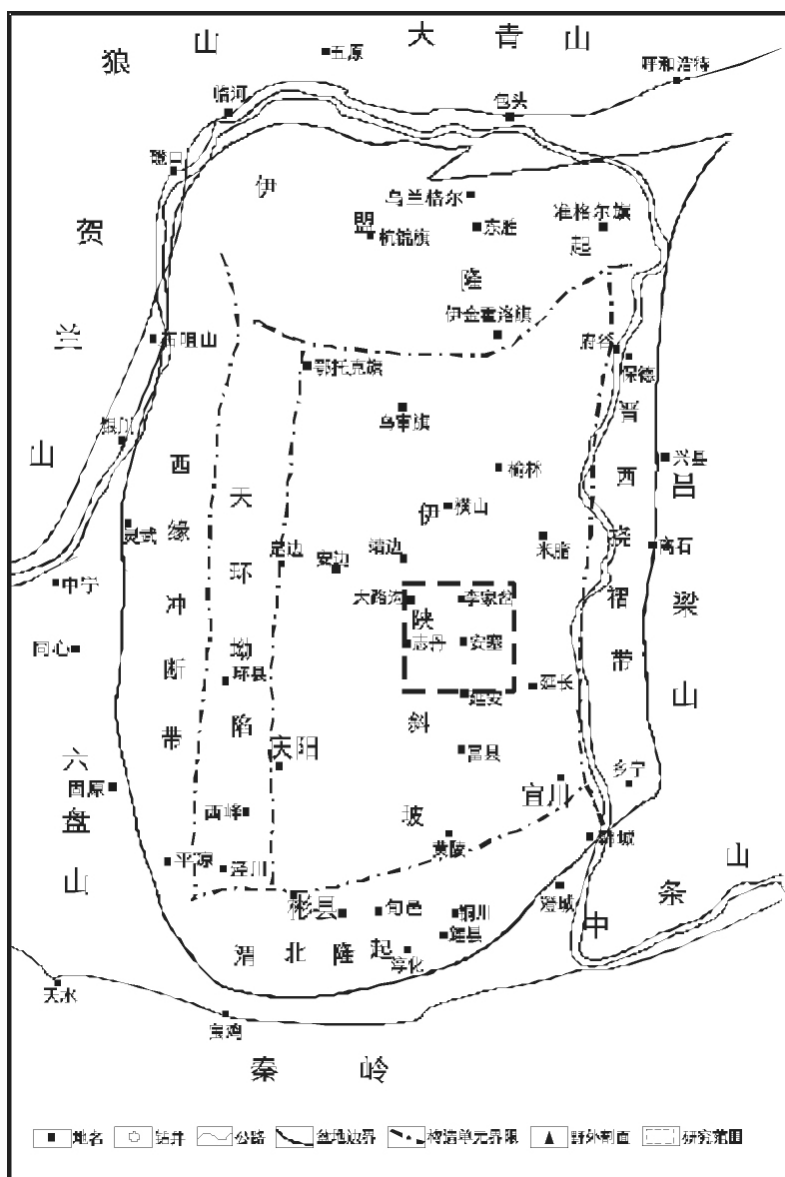


图1 鄂尔多斯盆地单元划分及研究区位置

安塞地区上三叠统延长组为典型的陆相河流湖泊沉积环境,沉积过程中环境几多变化。自长10至长9期由满盆的河流到局部湖进,长8期发育浅湖亚相和三角洲沉积,长7期大规模的湖进引起湖岸退缩,长6期三角洲的广泛发育,长4+5期区内大范围的沼泽平原化,长2+3期河流沉积广泛发育,长1期又发生大范围的沼泽平原化,局部为浅湖至深湖沉积。

2 层序划分及充填特点

2.1 层序边界的识别

根据对研究区及周边延河延长组剖面、延安云岩河延长组剖面、清涧河延长组剖面、窟野河延长组剖面 and 仕望河延长组剖面等野外剖面的观察,结合研究区内钻井资料,本区延长组内层序界面识别标志有2种:一种是由沉积过程中强烈的冲刷、侵蚀作用所造成的不整合界面;另一种是整一的岩性、岩相突变面或结构转换面。研究区上三叠统延长组是一套完整的旋回沉积。根据上述层序界面识别标志,可将其自下而上分为4个层序界面,分别是SB1、SB2、SB3和SB4(表1),各自的特征表现如下:

SB1界面位于T3y1的底部,即长10油层组底部。该界面之上发育大型切割叠置的河道砂体,基底冲刷起伏较大,发育滞留沉积。砂体下部发育大型板状、槽状交错层理和平行层理,反映水动力条件较强,基准面迅速下降的特征。该界面与下伏中三叠统的纸坊组紫红色泥岩呈平行不整合接触。

SB2界面位于T3y2中部,与长8油层组底部一致,是一个岩性、岩相突变的界面。界面之上为长8水下分流河道砂体,河道横剖面呈透镜状,砂体的槽状交错层理十分发育。界面之下则发育长9浅湖相细粒沉积。长8油层组因三角洲向盆内推进,形成进积序列,位于长9湖相泥岩段之上,两者之间具有侵蚀截切以及向盆地方向迁移的层序边界特征。

SB3界面位于T3y3的中下部,与长6油层组底部一致。界面之上主要为三角洲前缘的水下分流河道砂体,砂体横向迁移,反映基准面下降引起的河道摆动。该界面以下则发育长7浅湖相细粒沉积。

SB4界面位于T3y4的底部,即长3油层组的底部。该界面之上为长3的三角洲平原河道沉积,砂体厚度大,发育前积交错层理。该界面之下为长4+5的河漫滩细粒沉积,夹有多层煤线,发育直立虫孔,反映沉积时陆上暴露的特征。

2.2 层序的划分

层序是以不整合面或与之可对比的整合面为界的、相对整一连续的、有成因联系的一套地层(Vail等,1997)。李思田等曾将鄂尔多斯盆地东北部的上三叠统划分为一个构造层序,其顶界面为具深切谷特征的层序界面。前已述及,延长组与纸坊组之

间为平行不整合接触关系。因此,整个延长组是一个以不整合面为界的三级层序地层单位。湖泊面积周期性的扩张和萎缩,形成了延长组地层内部的次级旋回,根据沉积体系发育的周期性将其划分出 4 个四级层序地层单元(表 1)。

表 1 安塞地区晚三叠世延长组层序地层划分

组	段	油层组	沉积微相	准层序	体系域	层序边界	四级层序
延 长 组	T3y5	长 1	湖沼相	加积	TST	SB ₄	S ₄
	T3y4	长 2	三角洲平原	进积			
		长 3	三角洲平原	进积	LST		
	T3y3	长 4 + 51	湖沼相	退积	TST	SB ₃	S ₃
		长 4 + 52	湖沼相	进积			
		长 6	三角洲前缘	进积	LST		
		长 7	湖相	退积	TST		
	T3y2	长 8	三角洲前缘	进积	LST	SB ₂	S ₂
		长 9	浅湖相	退积	TST		
	T3y1	长 10	曲流河	加积	LST	SB ₁	S ₁

2.3 层序充填特点

安塞地区三叠系延长组内由于湖平面周期性升降,形成 4 个沉积旋回,各自的地层堆砌样式有所差异,充填特点各不相同(下面以清涧河剖面为例逐一说明)。清涧河延长组剖面底部长 10 油层组出露不全,在黄河附近见与纸坊组呈平行不整合接触,构成层序底界,顶部长 1 油层组遭受剥蚀,与侏罗系呈平行不整合接触,形成层序的顶界。整个剖面可区分为 4 个层序(图 2)。

(1) 层序 S1。

相当于长 10—长 9 油层组。低位体系域由长 10 油层组的曲流河组成,为厚层一块状中—细砂岩夹砂质泥岩,砂岩具大型槽状交错层理和平行层理,底部有冲刷面,常见泥砾等滞留沉积,上部为厚层状细砂岩与粉砂质泥岩不等厚互层,具向上变细的序列。水进体系域由长 9 油层组的浅湖亚相组成,为粉砂质泥岩夹粉—细砂岩,见沙纹层理和包卷层理。高位体系域由长 9 油层组上部的三角洲前缘水下分流河道和浅湖亚相组成,下部为灰绿色厚层一块状细砂岩,上部为深灰色页岩夹灰色薄层状粉细砂岩,岩层中含介形虫及鱼鳞化石。

(2) 层序 S2。

相当于长 8—长 7 油层组。低位体系域由长 8 组的三角洲前缘水下分流河道和浅湖组成,主要为灰绿色厚层一块状细砂岩与灰色粉砂质泥岩、粉砂岩不等厚互层。水

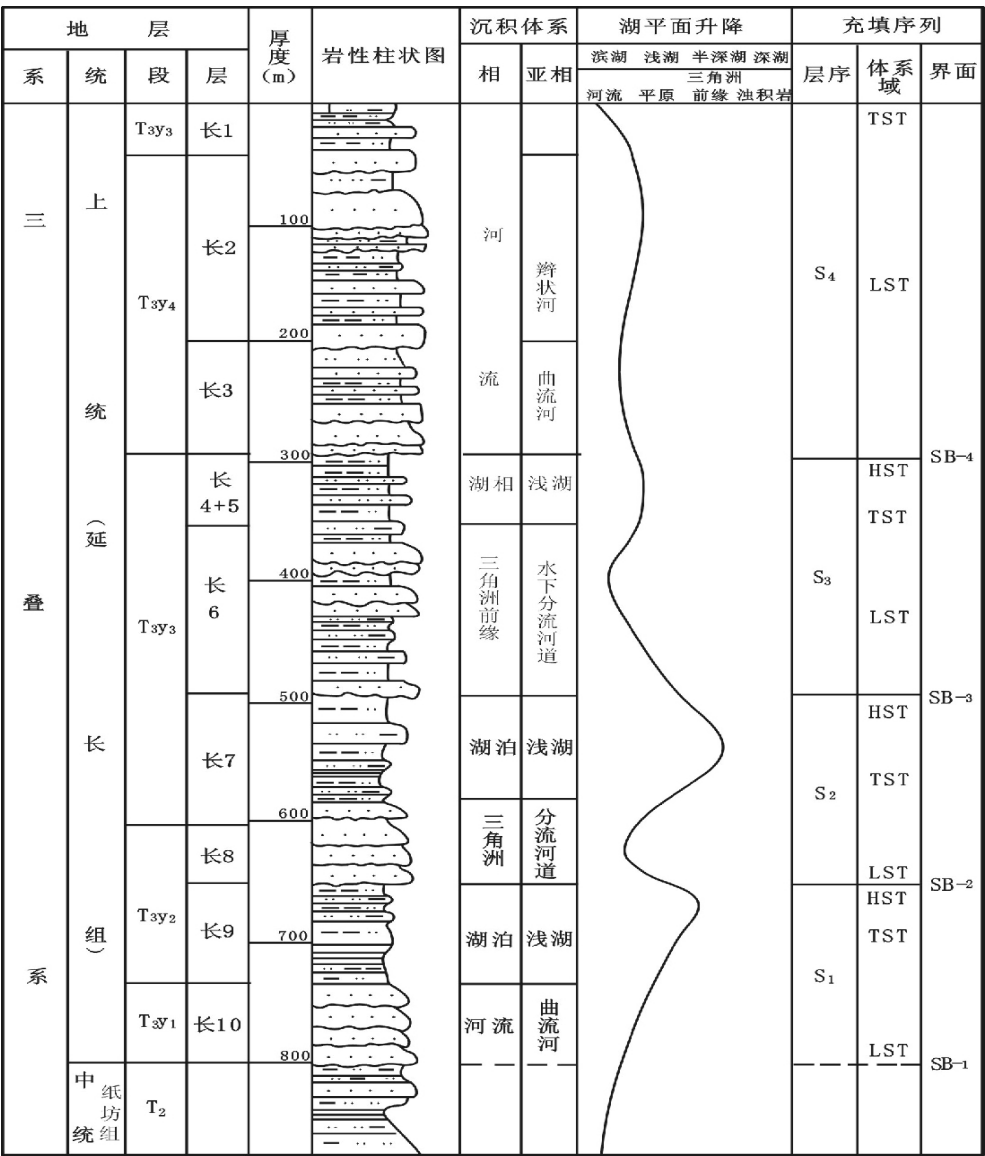


图2 清涧河野外剖面上三叠统延长组层序划分与充填特征

进体系域由长7油层组中下部的湖相泥页岩和三角洲前缘水下分流河道厚层状细砂岩组成,岩层中含大量介形虫、叶肢介、瓣鳃类和鱼鳞化石,张家滩页岩的底为最大湖泛面。高位体系域由该组上部的三角洲前缘分流河道和分流间湾亚相组成,为灰绿色厚层状细砂岩夹粉砂岩、粉砂质泥岩。低位体系域由长6油层组的三角洲前缘水下分流河道和分流间湾砂泥岩互层组成,发育槽状、板状交错层理、沙纹交错层理和包卷层理。水进体系域主要是由长4+5油层组下部的三角洲前缘分流间湾砂质泥岩组成,在测井曲线上为典型的“细脖子”段,以细粒沉积为主,在野外露头上可见多层薄的煤

线和根土岩。高位体系域由该组上部的三角洲前缘水下分流河道和分流间湾砂泥岩互层组成。

(3) 层序 S4。

相当于长 3、长 2 和长 1 油层组。低位体系域由长 3 和长 2 组的曲流河和辫状河组成,主要为灰绿色厚层—块状中—细砂岩夹灰色泥岩、粉砂质泥岩及粉砂岩。砂岩底部常见冲刷面构造和大型板状及槽状交错层理。水进体系域由长 1 层组的交织河和上部的浅湖—深湖亚相组成,交织河亚相为灰、深灰色泥岩、粉砂质泥岩与灰绿色中—厚层状细砂岩不等厚互层,浅湖亚相为深灰色泥岩夹灰色粉砂岩及细砂岩,深湖亚相为灰黑色泥岩与油页岩不等厚互层,含介形虫及鱼鳞化石。该层序的高位体系域由于遭受剥蚀而缺失。

3 层序与油气的关系

位于研究区的安塞油田自 20 世纪 80 年代初发现以来,经过 20 年的勘探和开发,先后找到了王窑、侯市、杏河、坪桥、靖东、谭家营、招安和河庄坪等 8 个含油区块,目前全部投入开发。主要开采层位为三叠系延长组长 6、长 4 + 5、长 2 和长 3 层。到目前为止,安塞油田已成为鄂尔多斯盆地的一个大油田。

根据安塞油田延长组砂岩含油气性的特点,认为层序对油气的控制主要表现在以下几点:

(1) 层序控制着生储盖的组合。

层序是一个等时地层格架,生油层、储集层和盖层均是这个格架中的组成部分,所以层序决定了生储盖的配置。一般来说,低位体系域发育分选良好的储层,最大洪泛期形成的地层则往往是良好的生油层和盖层。研究区 S2 层序湖进体系域的长 7 湖相泥页岩,由于形成于盆地快速沉降阶段,并发育在基准面旋回上升到下降的转换位置,沉积速率高,可容纳空间最大,泥岩厚度大而稳定,有机质丰度高、干酪根类型好,是研究区最重要的生油层,向南厚度加大。S3 层序的低位体系域长 6 油层组是良好的储集层,长 4 + 5 油层组的水进体系域和高位体系域的泛滥盆地沉积又是良好的盖层,形成了区内重要的储盖组合。长 2、长 3 油层组也有类似特征,其储层为 S4 层序的低位体系域,盖层据此推测,处于低位体系域的长 8 组三角洲前缘砂岩体,可能成为今后该地区乃至整个陕北地区的石油勘探接替层系。

(2) 层序控制着储层的展布。

层序控制着砂体展布,在陆相地层中,低位体系域发育反复切割叠置的河道砂体,是最重要的储层。研究区上三叠统延长组的油气主要集中在长 6、长 2 油层组,它们均属于低位体系域。长 6 油层组砂体的延伸呈北东向,在进行安塞油田新探区的研究

时,成功预测了探区西南部长 6 油层组的分布。因此,详细研究层序构成,特别是准确识别其层序界面及相伴生的低位体系域,是在陆相地层中寻找良好储层的一个重要方向。

(3) 层序影响着储层的储集性能。

据 Baum(1995) 统计,全世界 86% 的油气储于低水位体系域中,有大约 12% 的油气储于水进体系域中,而只有 2% 的油气储于高水位体系域中。这表明低水位体系域在油气勘探中有着特殊重要的意义。在层序的不同位置,虽然都能形成一些储集砂体,但其分选性差别十分明显。在低位体系域中,砂体分选性好,潜在孔渗条件较好,能够形成区域规模的储层。属于低位体系域的长 2 和长 6 油层组是典型代表。

以上研究表明,陕北斜坡中东部上三叠统延长组内的四级层序对于储层发育及其特性具有控制作用,展示了良好的油气勘探和开发前景。

参考文献

- [1] 朱筱敏. 层序地层学原理及应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 3 - 6.
- [2] 邓宏文, 王洪亮, 祝永军, 等. 高分辨率层序地层学——原理与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 5 - 6.
- [3] Aitken J F, Flint S S. The application of high resolution sequence stratigraphy of fluvial systems: A case study from the Upper Carboniferous Breathitt Group, eastern Kentucky USA [J]. Sedimentology, 1995, 42 (1): 3 - 30.
- [4] Currie B S. Sequence stratigraphy of non-marine Jurassic Cretaceous rocks, central Cordilleran foreland basin system [J]. GSA Bull., 1997, 109(6): 1206 - 1222.
- [5] Martinsen O J, Ryseth A Hell, Hansen W, et al. Stratigraphic base level and fluvial architecture: Ericson and stone (Campanian), rock springs uplift, SW Wyoming, USA [J]. Sedimentology, 1999, 46 (2): 235 - 259.
- [6] 顾家裕. 陆相盆地层序地层学格架概念及模式 [J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 6 - 10.
- [7] 尹太举, 张昌民. 层序地层格架内的油气勘探 [J]. 天然气地球科学, 2005, 16(1): 25 - 30.
- [8] 徐怀大. 陆相层序地层学研究中的某些问题 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 83 - 89.
- [9] 李思田, 林畅松, 解习农, 等. 大型陆相盆地层序地层学研究——以鄂尔多斯中生代盆地为例 [J]. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 33 - 136.
- [10] 赵虹, 党彝, 李文厚, 等. 安塞地区延长组沉积微相研究 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(5): 492 - 497.
- [11] 党彝, 赵虹, 李文厚, 等. 安塞油田和延长组长 6 油层组沉积微相特征 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 597 - 600.
- [12] 瞿辉, 赵文智. 层序地层格架在油气勘探中的作用 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 40 - 46.

特低渗透油田注水开发技术^①

王道富 李忠兴 杨克文 史成恩 李恕军 赵继勇 吴志宇

【摘要】 本文根据鄂尔多斯盆地成功开发的特低渗油田——安塞、靖安、华池油田长 6、长 3 油层的储层特征及开发实践,总结、提出了特低渗油田注水开发的主要技术,即油藏综合评价技术,优化布井技术,精细注水工艺技术,超前注水技术,注采参数、注水方式优化及调整技术,加密调整技术等,从而提高单井产量及最终采收率,提高整体开发效益。

【关键词】 注水试验 特低渗油田 安塞油田 油田开发

众所周知,低渗、特低渗透油田只是个相对概念,且随时间、资源状况、技术经济条件的变化而变化。根据中国石油天然气集团公司有关标准及李道品等专家的研究成果,现有条件下低渗透油田分类的物性标准为:

第一类为一般低渗透油田,油层平均渗透率为: $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq K < 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;

第二类为特低渗透油田,油层平均渗透率为: $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq K < 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;

第三类为超低渗透油田,油层平均渗透率为: $K < 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;

这一分类标准目前已在国内广泛应用。

随着勘探程度的逐步深入及油层改造工艺技术的不断提高,低渗油田发现的个数及规模不断扩大,从长庆油区 2000 年底石油储量现状看(表 1),探明储量中低渗以下储量占 79.3%,其中特低渗油田储量占 57%;未动用储量中低渗以下储量高达 96.0%,其中特低渗油田储量占 72.7%。而且根据石油资源评价结果来看,今后提交的探明石油地质储量也将以特低渗储量为主。

表 1 长庆油田探明石油地质储量构成表

物性分类	中高渗(%)	低渗(%)	特低渗(%)	超低渗(%)
探明石油地质储量	20.7	17.8	57.0	4.5
未动用地质储量	4.0	14.6	72.7	8.7

由此可见,低渗、特低渗油田储量的开发已成为长庆油田稳定发展的主要潜力;但其物性差、产量低,多属岩性油藏,天然能量匮乏,故搞好此类油田的注水开发,提高其

^① 本文发表于 2001 年《中石油油气田开发技术座谈会论文集》。

开发水平和经济效益,是长庆油田持续发展的关键技术。

本文根据鄂尔多斯盆地目前开发的主要特低渗油田——安塞、靖安、华池油田长6、长3油层的地质特点及开发实践,总结提出了特低渗油田注水开发的主要技术,对同类油田提高整体开发效益有一定的指导意义。

1 油藏地质特征

1.1 构造背景平缓

长庆特低渗油田位于鄂尔多斯盆地一级构造单元陕北斜坡中部,区域构造背景为一平缓西倾单斜,地层倾角仅半度左右。局部地区发育着近东西向的低缓鼻状隆起带,隆起幅度一般10~30m,轴长2~12km,轴宽0.5~3km。这些鼻状隆起与三角洲砂体配合,对油气的聚集起到一定作用。

1.2 三角洲前缘沉积体系,油层分布稳定

该地区长6、长3地层属内陆淡水湖泊三角洲沉积体系,由于主要含油小层多以三角洲前缘水下分流河道、河口砂坝为主,各小层叠加,同时每个小层又由数目不等(2~6个)的单砂体叠置而成(单旋回厚2.5~5m,偶见薄泥质粉砂岩隔层,厚0.2~1.0m的钙质夹层发育),因此一般含油范围较大(单层含油面积14.6~114.9km²),油层分布稳定。

1.3 天然微裂缝发育,但在地层条件下呈闭合状态

根据取心井岩心观察资料,有1/3的井见到天然微裂缝。按成因分类,构造应力缝和水平成岩缝。构造应力缝一般倾角87°左右,有时可见到两组以上相互平行的垂直裂缝,裂缝大多数被方解石充填,充填厚度在0.5mm以下或无充填物,一般缝长0.1~4m,缝间距0.01~3m。成岩缝多近水平状态,个别井呈密集带分布,如ZJ33井岩心中有9段见到密集分布的裂缝,平均间距为1.4cm。一般岩心出筒后原油顺层理面呈串珠状外渗,层理越发育,原油外渗越多。

应用古地磁测试、构造裂缝三维数值模拟等方法,分析认为靖安—安塞地区长6油层中主要发育近东西向和近南北向的天然微裂缝,次为北东向、北西向,这与延长县张家滩—呼家川剖面、佳县西梁介剖面观察结果一致。另外,根据数值模拟结果,靖安五里湾一区长6层裂缝线密度在0.2~0.6条/米,裂缝间距为1.6~5m,一般为2~3m。

美国CER公司对安塞油田长6油层试井资料分析和NIPER研究所的岩心室内试验结果均表明,在原始地层压力条件下,上述微裂缝一般呈闭合状态,对初期油气渗流影响不大。

1.4 岩石颗粒细小,加之成岩后生作用,储层孔喉细微,物性差

储层属成岩型为主的沉积一成岩型硬砂质长石细砂岩。根据岩矿薄片资料分析,长石含量 49.8% ~ 51.2%,石英含量 20.1% ~ 22.2%,岩屑含量 8.6% ~ 15%,杂基含量低(0% ~ 2.83%)。岩石颗粒分选较好受(分选系数 0.43),粒径细(平均粒径 0.138 ~ 0.18mm),粒度类型以细砂为主(细砂含量 72% 左右)。

据分析,储层最初沉积物中的胶结物含蛋极少(小于 2%),推测原始孔隙度为 35% ~ 40%。经过绿泥石粘土膜的析出沉淀、压实和淋滤作用所引起的浊沸石等沉淀,有机酸对浊沸石、长石的溶蚀等成岩及后生作用,目前孔隙度 11% ~ 14%。尽管以原生粒间孔为主(占总孔的 59.7% ~ 73%),但次生孔隙较发育(占总孔的 27% ~ 40.3%),详见表 2。

表 2 长 6、长 3 等特低渗油层孔隙表

油田	层位	样品块数	面孔率(%)	粒间孔(%)		长石溶孔(%)		浊沸石溶孔(%)		其他孔隙(%)	
				面孔率	占总孔	面孔率	占总孔	面孔率	占总孔	面孔率	占总孔
靖安	长 6 ₂	24	7.729	5.64	73	0.788	10.2	0.513	6.6	1.788	10.2
靖安	长 6 ₁	142	6.31	4	63.4	0.994	15.8	0.493	7.8	0.823	13
安塞	长 6 ₁	172	6.48	3.87	59.7	0.8	12.3	1.65	25.5	0.16	2.5
华池	长 3	138	7.22	4.88	67.6	0.94	13	1	13.9	0.4	5.5

根据压汞资料,长 6、长 3 储层平均喉道半径 0.18 ~ 0.43 μm ,中值半径 0.14 ~ 0.25 μm ,分选系数 1.8 ~ 3.9,退汞效率 29% ~ 36%。安塞长 6 储层中大于 0.81 μm 的喉道连通的孔隙体积占 22%,0.1 ~ 0.81 μm 的喉道连通的孔隙体积占 38%;小于 0.1 μm 的喉道连通的孔隙体积占 40%。大中喉道连通的孔隙体积被油占据。而 40% 的微孔是绿泥石薄膜充填或岩石碎片充填形成,基本为水湿不流动孔隙,反映出小孔喉高密度分布的特点。

上述特点导致了油层低孔、低渗,平均有效孔隙度 11% ~ 15%,空气渗透率 $1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

1.5 粘土矿物以酸敏矿物为主,水敏矿物较少

从储层胶结物成分看(表 3),主要以酸敏矿物绿泥石(4.54% ~ 7.1%)、浊沸石(0.4% ~ 2.56%)、方解石(1.04% ~ 4.8%) 为主,占敏感矿物的 80% 左右;水敏矿物较少,主要为自生水云母及伊蒙混层矿物(一般小于 1%,油层部位小于 0.5%);杂基微粒含量一般为 2% 左右,重结晶显著,临界流速较高,通常不会发生迁移。另外,从粘土矿物成分分析(表 4) 来看结果也一致。

表 3 长 6、长 3 等特低渗储层胶结物成分分析简表

油田	层位	胶结物总量 (%)	方解石 (%)	水云母 (%)	绿泥石 (%)	铁白云石 (%)	铁方解石 (%)	浊沸石 (%)	其 它 (%)
靖安	长 6 ₂	13.32	0.2	0.68	4.54	0.16	2.25	2.42	3.07
靖安	长 6 ₁	12.57	0.78	0.41	4.7	0.07	2.16	1.14	3.31
安塞	长 6 ₁	14.78	0.14	0.57	5.28	0.01	0.9	2.56	5.32
华池	长 3	16.7	0.1	0.2	7.1	0.7	4.7	0.6	3.5

表 4 储层粘土矿物 X 衍射分析数据表

油田	层位	粘土矿物相对含量(%)				伊蒙混层 蒙皂石晶层
		伊利石	绿泥石	伊蒙混层	高岭石	
安塞	长 6	4.61	92.15	2.43	0	< 10
靖安	长 6	3.6	89.8	6.53	0	< 10
华池	长 3	16.8	77.3	77.3	0	< 10

储层敏感性试验结果与粘土矿物成分、性质较吻合,即呈中强一中偏弱酸敏,无一弱速敏,弱水敏(用注入水试验无水敏)的敏感性。

1.6 流体性质较好

尽管本地区长 6 油层低孔、低渗,但流体性质较好(表 5)。原油具低相对密度、低粘度、低凝点的特点,地层水矿化度 74.59 ~ 99.5g/L,以 CaCl₂ 型为主,属稳定、封闭的原生水。

表 5 流体性质统计表

油田区块	流体性质	王窑	侯市	杏河	坪桥	靖安	华池长 3
地层原油	原油粘度(MPa·s)	1.96	2.0	2.3	2.8	2.04	1.15
	气油比(m ³ /t)	79.1	73.0	76.5	53.5	70	103.6
	饱和压力(MPa)	6.19	6.23	6.79	4.65	7.02	8.91
	体积系数	1.21	1.20	1.21	1.151	1.21	1.229
地面原油	原油粘度(MPa·s)	4.85	4.8	5.65	7.01	7.69	5.13
	相对密度	0.8403	0.8469	0.8496	0.8569	0.8559	0.8488
	凝点℃	22	21	21.8	19.7	22.7	18.7
地层水	矿化度(g/L)	74.59	79.93	82.24	78.07	80.56	99.5
	水型	CaCl ₂	NaCO ₃ CaCl ₂	CaCl ₂	NaCO ₃ CaCl ₂	CaCl ₂	CaCl ₂
	pH 值	6-8	6.0	5.8	5.9	6.0	5.8

1.7 岩石表面弱亲水,水相占据中小喉道,有利于提高水驱油效率

根据室内吸入法等润湿性测试资料,计算无量纲净吸水量 0.29% ~ 5.42%,表明油层润湿性为弱亲水——中性。

上述储层润湿性特点,使得水湿不流动相占据了微孔,油湿相占据了大中孔喉,加之低粘易流动的原油性质,为油气渗流创造了较好的条件,在一定程度上弥补了小孔、微细喉、物性差的不足,水驱油效率较高。据室内水驱油试验结果统计(表 6),无水期驱油效率 20% ~ 26.3%,最终驱油效率 47.7% ~ 56.4%。

表 6 水驱油试验结果统计表

油田	样品数 (块)	束缚水饱和度(%)	残余油饱和度(%)	两相流饱和度区间(%)	驱油效率(%)			
					无水期	含水 95%	含水 98%	最终期
安塞	148	38.1	32.1	29.8	20.0	36.8	41.0	47.7
靖安	30	34.1	32	33.9	24.8	35.3	41.2	48.9
华池	16	38.8	29.5	31.7	26.3	36.3	42.8	56.4

1.8 原始地层压力低,地饱压差小,天然能量不足

油藏的范围与砂岩主体带展布范围及相对高孔、高渗区分布范围基本一致,即砂岩致密带,相变带等岩性、物性的变化是油藏的主要控制因素,仅每个区块的西南部有局部边水,但面积小、物性差,不起主要驱动作用。故油藏类型属较为典型的岩性油藏,其天然能量不足。据统计,该长 6、长 3 油藏原始地层压力 8.31 ~ 13.48MPa,压力系数 0.65 ~ 0.75,地层原油饱和压力较高(4.65 ~ 8.91MPa),地饱压差较小(2.94 ~ 6.16MPa,表 7)。故原始驱动类型为弹性溶解气驱。

表 7 安塞—靖安油田长 6 原始地层能量统计简表

油田(区块)	安塞王窑	安塞侯市	安塞杏河	安塞坪桥	靖安五里湾	华池长 3
原始地层压力(MPa)	9.13	9.6	10.0	8.31	13.2	13.48
原始地层饱和压力(MPa)	6.19	6.23	6.79	4.65	7.04	8.91
地饱压差(MPa)	2.94	3.37	3.21	3.66	6.16	4.57

2 油田开发中面临的主要问题

2.1 油层自然产能甚低

由于油层的特低渗及低压,自然产能极低。安塞油田采用油基钻井液、泡沫负压钻井试验时进行中途测试,油井初产仅 0.3 ~ 0.5t/d。故一般油井须经压裂改造方可获得工业油流。

2.2 自然能量开采递减大,采收率低

由于油藏缺乏天然能量补给,采用自然能量开发,以弹性溶解气驱为主,油层供液