

文章编号: 1000 0747(2006) 05 0638 05

安塞油田三叠系延长组特低渗透油藏增产技术

李永太¹, 宋晓峰²

(1. 西安石油大学; 2. 咸阳长庆化学剂有限公司)

基金项目: 国家“西部开发”科技行动重大攻关计划项目(2005BA901A13)

摘要: 安塞油田长6段油藏渗透率为 0.96~2.90 mD, 孔隙度为 11.00%~13.25%, 孔隙以小孔、细喉为主, 地饱压差值仅为 2.94~3.66MPa, 油层供液能力差, 为典型的特低渗透岩性储集层, 此为油井低产的主要地质因素。胶结物中酸敏性矿物含量高(6.19%), 是常规酸处理工艺造成储集层伤害的潜在因素。地层水矿化度高达 89 850mg/L, 严重的油层结垢是造成单井产量降低的重要因素。在安塞油田实施暂堵压裂 16 口井, 平均单井日增油 1.85t, 平均有效期 84.1d; 泡沫清洗 10 口井, 平均单井日增油 1.13t, 平均有效期 52.8d; 酸处理 99 口井, 平均单井日增油 1.10t, 平均有效期 128.9d; 清防垢处理 18 口井, 平均单井日增油 1.90t, 平均有效期 330d。分析认为, 清防垢施工处理半径较大是结垢处理效果较好的主要原因。有效增大油层压裂和酸处理半径是进一步提高压裂和酸处理效果的有效途径。图 2 表 5 参 7

关键词: 特低渗透油藏; 压裂; 酸化; 结垢防治; 安塞油田

中图分类号: TE348

文献标识码: A

Techniques for oil increasing of extra low permeability Triassic Yanchang Formation, Ansai Oilfield, Northern Shaanxi

LI Yong tai¹, SONG Xiao feng²

(1. Xi'an Petroleum University, Shaanxi 710065, China; 2. Changqing Chemical

Preparations Limited Company, Xiayang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: The geology of Triassic Yanchang Formation in Ansai Oilfield is extra low permeability(0.96~2.90mD), extra low porosity(11.00%~13.25%), fractured oil reservoir with dominant small pores and throats, little differences between formation and saturation pressure(2.94~3.66MPa), high percentage of acid sensitive minerals in cements(6.19%), and high formation water salinity(89 850mg/L). Severe scaling problems and production reductions appear in water flooding production wells. Fracturing treatments were performed in 16 production wells leading to an average increase of 1.85t/d per well in oil production, the average effective life was 84.1d; foam flushing was operated in 10 production wells, leading to an average increase of 1.13t/d per well, the average effective life was 52.8d; acidizing treatments in 99 production wells led to an average increase of 1.10t/d per well, the average effective life was 128.9d; scale control and removal treatments in 18 production wells led to an average increase of 1.90t/d per well, the average effective life was 330d. The better result of the scale control and removal treatment is mainly attributed to its larger radius. Enhancing the radius in fracturing and acidizing treatments can further improve their performance.

Key words: extra low permeability reservoir; fracturing; acidizing; scale control and removal; Ansai Oilfield

1 安塞油田地质特征及地层堵塞机理

1.1 储集层特征^[1]

安塞油田处于陕北斜坡中部, 为一平缓的西倾单斜。目前共有王窑、坪桥、侯市、杏河、谭家营、寨 152、招安、河庄坪、靖东等 9 个井区。开采层位为三叠系延长组长6段、长2段和长3段。主力油层长6段埋深 965~1500m, 油层有效厚度为 12.0~21.4m, 油层温度 45~51℃。受强烈成岩作用影响, 孔隙结构复杂, 以小孔、细喉为主, 平均喉道半径为 0.43μm, 分选系数 2.3。半径小于 0.1μm 的喉道连通的孔隙体积占 40%, 半径大于 0.81μm 的喉道连通的孔隙体积占 22%。油层物性差, 各井区有效孔隙度为 11.00%~13.25%, 平均渗透

率 0.96~2.90mD, 属典型的特低渗透岩性储集层, 此为油井低产的主要地质因素。

各井区长6段储集层原始地层压力较低(8.31~10.00MPa), 地层原始饱和压力较高(4.65~6.79MPa), 地饱压差较小(2.94~3.66MPa), 使得地层弹性能量较小, 不宜以放大生产压差方式提高油井产量和油田采油速度。且油井投产后近井地带压力下降快, 油层供液能力差, 泵效低, 是油井低产的另一地质因素。

长6段储集层岩性为细粒硬质长石砂岩, 颗粒分选较好, 构造成熟度高, 矿物成熟度低。储集层胶结物总量为 14.78%, 其中方解石 0.14%, 水云母 0.57%, 绿泥石 5.28%, 铁白云石和铁方解石 0.91%, 浊沸石 2.56%。水敏矿物(伊利石和蒙脱石)很少。可见, 胶

结物中酸性矿物含量较高,是常规酸处理工艺对长6段储集层造成伤害的潜在因素。

1.2 地层流体特征

安塞油田各井区长6段地层原油黏度 1.96~2.80 mPa·s, 平均含蜡量 11.39%, 凝固点 19.7~22.0℃, 平均沥青质含量 3.04%。由于油层温度偏低, 原油凝固点偏高, 蜡和沥青含量偏高, 在开采过程中, 油井结蜡倾向较大, 是造成井底堵塞的重要因素。

安塞油田地层水属封闭的原生水, 矿化度随地层深度的增加而升高, 最高达 89 850mg/L, 其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度最高达 20 794mg/L, 局部含有较高浓度的 Ba^{2+} , 水型主要为 CaCl_2 型。注入水(洛河水)总矿化度

602mg/L, 水型主要为 Na_2SO_4 型(见表 1)。由于注入水对地层水的淡化, 目前多数油井产出水的矿化度已降至 48 000mg/L 左右, 其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度为 8 000 mg/L 左右。在注水过程中, 原始地层条件下的固、液、气三相平衡遭到破坏, 析出大量碳酸盐垢, 此外, 富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 的产出水与富含 SO_4^{2-} 的注入水不相容, 析出大量硫酸盐垢, 从而导致注水地层孔隙和采油井底结垢。历次修井作业中, 经常可以观察到采油管柱和井下采油机具被坚硬的盐垢所覆盖; 地面集输系统因结垢而被迫停产的事件频繁发生。随着油井含水率不断上升, 油田结垢越来越严重, 这是造成地层堵塞和单井产量降低的另一个重要因素。

表 1 王窑区地层水与注入水分析资料

水样	离子浓度 (mg/L)								矿化度 (mg/L)	水型	
	K^++Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ba^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-			
地层水	长 2	9 194	2 544	199	27	18 945	91	17	411	31 423	CaCl_2
	长 3	11 351	1 161	211	23	19 617	326	127	288	33 104	$\text{CaCl}_2, \text{NaHCO}_3$
	长 4+5	13 168	5 920	6 435		48 862	80	11	105	75 320	CaCl_2
	长 6	12 220	20 710	84	648	56 105	0	0	83	89 850	CaCl_2
注入水	洛河水	78	48	30	0	46	78	1	322	602	$\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{NaHCO}_3$

此外, 在长期注水开发和频繁修井作业过程中, 因技术原因或管理原因携带入地层的悬浮颗粒和铁锈等机械杂质也经常造成严重的地层堵塞。

综上, 导致安塞油田单井产量较低的地质因素主要为储集层的特低渗透性、酸性矿物、高含蜡原油和高含盐地层水对地层的潜在伤害, 以及注水开发过程中所造成的地层机械性堵塞。

2 安塞油田开发动态及地层堵塞现状^{2,3]}

在安塞油田已经投入开发的 9 个井区中, 目前正常开采油井 2000 余口, 平均单井日产油 2.10t, 综合含水率 43.8%; 正常开注水井 600 余口, 平均单井日注水 25m³。由于油层物性较差, 经过十几年的注水开发, 油井含水率上升, 采液、采油指数下降, 油层堵塞特征日趋明显。如最早投产的王窑区, 采油速度为 0.89%, 采出程度仅 10.52%, 而老井综合递减率和含水上率已分别达到 8.58% 和 5.64%。

在王窑中西部以孔隙渗流为主的井区, 随着油层含水饱和度上升, 油相渗透率下降, 水相渗透率上升, 油井含水率上升速度加快, 目前综合含水率已超过 60%。另外由于岩石属中性—弱亲水润湿, 加之水驱过程中局部地区出现水敏、水锁、速敏以及注水滞后等, 地层压力和渗透率下降, 采液、采油指数下降。据王窑区资料统计, 综合含水率由 29% 上升到 45% 时, 采液指数由 0.88 m³/(d·MPa) 降为 0.49 m³/(d·MPa), 采油

指数由 0.69 m³/(d·MPa) 降为 0.28 m³/(d·MPa), 更加大了油田开发中后期提高采收率的难度。而在王窑东部和坪桥局部发育隐蔽裂缝的井区, 因压裂改造及注水开发后天然裂缝开启并与人工裂缝连通, 一方面增大了地层的吸水能力, 在一定程度上弥补了因低渗透造成的低产能, 另一方面也导致注入水单向突进, 油井含水率加速上升, 裂缝主方向上的油井平均见水周期仅 3month, 个别井 2month 就暴性水淹, 而裂缝侧向上的油井难以见到水驱效果, 长期处于低产、低压状态。由于局部水驱状况差, 剩余油饱和度高, 开发效果差。

3 安塞油田增产技术实施效果

针对低渗透、低压力和低产能的特征和油层堵塞日趋严重的现状, 近年来安塞油田不断加强提高油田单井产量技术的理论研究和现场措施。可将这些技术分为地层压裂改造和化学处理两大类。

3.1 地层压裂改造技术

陕北三叠系特低渗透油藏无自然油流, 油田开发初期全部通过地层压裂改造获得工业油流。油田投产初期, 由于油层天然裂缝侧向上的油井长期见不到注水效果, 要经常实施重复压裂来维持生产。但常规重复压裂只能起到扩大和延长初次裂缝的作用, 使裂缝主向上的油井含水率上升加快, 其增产效果越来越差。1995 至 1999 年所实施的 20 余井次常规重复压裂, 有

效率仅 58.3%，平均单井增油量仅 190t。2000 年，油田探索采用大砂量、高砂比暂堵压裂技术取得成功。该技术的基本原理是先用暂堵剂将初次主裂缝堵塞，使其在压裂过程中不再延伸，随着缝内压力不断增大，裂缝壁面应力薄弱处发生破裂，在新的方向产生支裂缝或连通闭合的天然微裂缝，增大泄油面积。在暂堵压裂时利用无源地震法对裂缝形态进行检测，初步证实了暂堵压裂可

以达到产生新的裂缝或连通闭合天然微裂缝的目的。表 2 为试验初期在坪桥裂缝发育区和侯市孔隙渗流区进行的暂堵压裂效果，可见，暂堵压裂的成功率和单井增产量均明显高于常规重复压裂。由于裂缝发育区和孔隙渗流区地质条件的差异，前者的实施效果不如后者，但暂堵压裂仍不失为解决安塞油田裂缝发育区裂缝侧向油井长期见不到注水效果难题的一项重要技术^[4]。

表 2 暂堵压裂试验效果统计

试验区油井	措施前生产动态			措施后生产动态			有效期 (d)	累计增油量 (t)	日均增油量 (t)	
	日产液量 (m ³)	日产油量 (t)	含水率 (%)	日产液量 (m ³)	日产油量 (t)	含水率 (%)				
裂 缝 发 育 区	P35 24	1.19	0.94	8.1	3.77	2.77	12.7	202	369	1.83
	P35 31	1.33	1.02	10.5	3.29	2.47	10.7	140	203	1.45
	P39 24	1.69	1.29	10.0	5.36	3.63	19.3	100	234	2.34
	P39 22	1.24	0.94	10.8	9.37	5.27	33.0	35	152	4.33
	P41 28	1.96	1.50	10.6	2.53	1.79	15.7	63	38	0.60
	P41 14	1.43	1.10	9.3	4.42	2.05	44.7	27	26	0.95
	P27 37	1.29	1.00	10.0	1.86	1.28	18.5	108	30	0.28
	P41 13	1.53	1.17	10.9	4.27	0	100	0	0	0
	P27 35	1.53	1.15	10.6	1.27	0.68	36.1	10	0	0
	孔 隙 渗 流 区	H5 28	2.72	2.24	2.5	4.14	3.16	9.0	139	128
H8 29		1.82	1.47	3.7	6.32	4.77	10.2	146	481	3.30
H10 29		1.97	1.57	5.1	5.26	3.74	15.4	132	287	2.17
H5 30		1.97	1.63	1.7	10.72	7.52	16.4	26	153	5.89
H7 30		2.30	1.87	2.9	5.42	4.23	7.1	18	42	2.36
H9 30		2.15	1.66	8.1	5.61	3.68	21.9	106	214	2.02
H11 29		2.12	1.14	36.1	3.90	2.27	30.6	94	106	1.13
平均		1.76	1.36	9.4	4.84	3.08	25.1	84.1	153.9	1.85

3.2 采油井解堵技术

针对安塞油田地层压力下降，采液、采油指数降低的生产动态，近年来油田开展了以地层化学解堵为主要手段的提高采油井单井产量的技术研究。

3.2.1 泡沫洗井技术

此项技术的基本原理是先用酸或表面活性剂清洗采油井井底，再利用低密度泡沫的悬浮性能将聚积在

井底的有机和无机固体颗粒举升出井口。由于施工中采用了特殊结构的洗井器，并通过配方优化强化了洗井液的除污性能和泡沫液的悬浮性能，使得泡沫洗井技术的解堵效果数倍于常规清水洗井。这项技术在长庆油田侏罗系中、低渗透油藏已得到广泛应用并取得良好增产效果，但在安塞特低渗透油田的应用效果并不十分理想(见表 3)。

表 3 泡沫洗井效果统计表

井 号	措施前生产动态			措施后生产动态			有效期 (d)	累计增油量 (t)	日均增油量 (t)
	日产液量 (m ³)	日产油量 (t)	含水率 (%)	日产液量 (m ³)	日产油量 (t)	含水率 (%)			
W15 26	0.60	0.55	3.6	1.31	0.53	51.8	121	48	0.40
W20 17	1.55	1.19	4.8	4.74	2.36	28.7	172	136	0.79
W14 07	2.10	1.58	7.1	5.15	3.74	15.0	4	9	2.16
W15 21	3.92	2.27	31.8	4.95	2.88	30.7	4	2	0.61
W19 24	1.77	0.80	45.3	4.71	2.04	45.8	15	19	1.24
P41 25	1.18	0.90	10.4	4.12	3.21	8.9	111	140	1.26
P39 23	1.78	1.46	3.6	4.49	3.62	4.0	91	211	2.32
P25 38	1.80	1.46	4.4	1.43	0.65	44.3	0	0	0
H19 11	2.58	3.00	17.2	4.43	4.20	8.0	10	12	1.20
H15 8	1.71	1.36	6.4	4.22	2.66	24.8	6	8	1.30
平均	1.90	1.46	13.5	3.96	2.59	26.2	52.8	58.5	1.13

3.2.2 油井酸化技术

由于安塞油田储集层中酸敏性矿物含量较高，长期以来一直将酸化作业视为该油田的禁忌。1999 年，

油田在充分的室内研究基础上，在 2 口油井上实施近井地带有机酸酸化试验并取得成功。通过进一步推广应用，证实了有机酸酸化技术在安塞油田是可行的。

该项技术的基本原理是以酸性较弱的有机酸为主剂,以铁离子稳定剂、黏土稳定剂、缓蚀剂以及有机溶剂为添加剂组成酸化液,作业时将酸化液挤入油井周围大约1m半径的地层中,溶蚀近距离地层中存在的盐垢、蜡、铁锈以及岩石基质,增加近井地带油层的渗流能力。关键技术是防止成垢离子和铁离子的二次沉淀和减缓酸与岩石基质的反应速度。

王13-10井是安塞油田王窑区的一口生产井,由于地层堵塞,2002年日产油量由投产初期的1.6t下降到0.9t。2002年5月实施有机酸酸化后,日产油量上升到2.5t,到2004年1月日产油量又下降到0.9t,措施有效期长达19month。2004年7月第二次酸化后,日产油量又上升到2.4t,直到2005年6月仍然有效(见图1)。

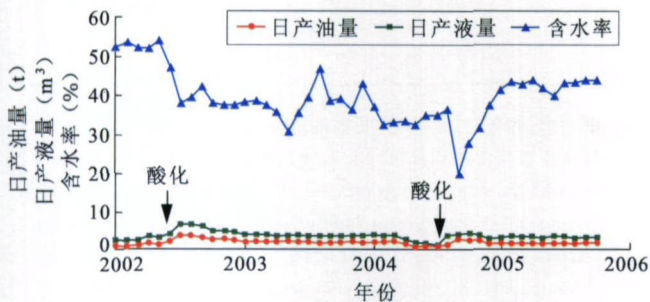


图1 王13-10井生产曲线

由表4可见,有机酸酸化作业在安塞油田的应用效果远大于洗井作业而接近于暂堵压裂技术^[9]。

表4 有机酸酸化技术应用效果统计表

有机酸体系	作业量 (井次)	平均 有效期 (d)	单井累计 增油量 (t)	单井日均 增油量 (t)
酸性微乳液	15	180	187	1.04
多元复合酸	24	133	167	1.25
超低阻胶束酸	16	152	135	0.89
复合深部酸化液	10	119	171	1.44
二氧化氯	15	96	75	0.78
多元缓速酸	16	99	134	1.35
硝酸粉末	3	70	26	0.37
平均		128.9	141.9	1.10

3.2.3 地层结垢防治技术

地层结垢防治技术的基本原理是通过采油井向远距离地层挤入防垢剂溶液,防垢剂在地层岩石表面的吸附使其滞留在地层孔隙中,随着地层流体产出,吸附在孔隙中的防垢剂缓慢解吸附,使产出液中保持一定浓度的防垢剂。在挤完防垢剂段塞后,再挤入整合型除垢剂段塞清理井底、射孔孔眼及近距离地层结垢,达到既提高产液量又延长措施有效期的双重目的。

挤入地层的除垢剂和防垢剂都是弱碱性或中性水

溶液,对施工设备的腐蚀性极小,即使挤入远距离地层,也不会引起酸敏性地层的堵塞和成垢物质的二次沉淀,因此防垢剂和除垢剂的处理半径一般都在5m以上。

安塞油田王窑区王11-281井于1998年9月投产,因结垢严重,产液能力逐月递减,到1999年10月产液量和产油量已分别由投产初期的 $9.57\text{m}^3/\text{d}$ 和 $5.22\text{t}/\text{d}$ 降到 $1.71\text{m}^3/\text{d}$ 和 $0.77\text{t}/\text{d}$ 。修井作业发现油管壁附着有厚2~4mm的碳酸盐垢。1999年上半年曾实施铣锥磨铣和酸化除垢作业,但产量仍继续降低。1999年11月挤入整合型除垢剂和离子型防垢剂后,产液量和产油量分别上升到 $5.18\text{m}^3/\text{d}$ 和 $1.61\text{t}/\text{d}$,含水率逐月下降,日产油量保持了18month的平稳期(见图2)。

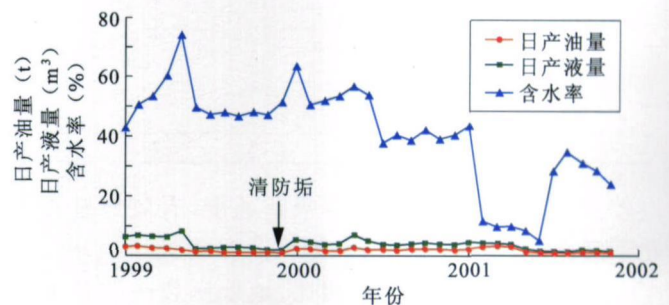


图2 王11-281井生产曲线

表5统计了长庆油田从1991年到2001年实施的采油井结垢防治现场施工效果^[6,7],可见该技术的作业成功率、单井日均增油量和累计增油量都远远超过了前述各项增产措施。

4 措施效果分析与认识

决定某一种措施增产效果的因素主要有技术因素和地质因素。实施上述每一种增产措施的油井都随机地分布在安塞油田的王窑、坪桥、侯市、杏河、招安等井区,其地质条件的差异较小,因此决定这些措施增产效果的因素主要是技术方面的。

评价油田增产措施效果的直接指标是增油量,它是单井日增油量与有效期的乘积。比较上述各种技术的增产效果,显然地层结垢防治技术的单井日均增油量和平均有效期都是最好的。地层压裂改造技术的单井日均增油量较大,但平均有效期较短。油井酸化技术的单井日均增油量较小,但平均有效期较长。而洗井技术的单井日均增油量和平均有效期都是最差的。

长6段地层水含盐量较高,井底和油层结垢造成的地层堵塞对单井产量有重要影响,在清防垢施工中,挤入地层的除垢剂和防垢剂都是弱碱性或中性水溶液,不会引起酸敏性地层的堵塞和成垢物质的二次沉淀。另外,清防垢施工的作业半径较大,所选用的防垢剂具

表5 地层结垢防治效果统计表

井号	措施前生产动态			措施后生产动态			有效期 (d)	累计 增油量 (t)	日均 增油量 (t)
	日产液量 (m ³)	日产油量 (t)	含水率 (%)	日产液量 (m ³)	日产油量 (t)	含水率 (%)			
W23 11	7.80	5.89	11.2	11.1	8.38	11.4	30	76	2.53
W21 14	4.25	3.13	13.4	7.50	5.48	14.0	240	168	0.70
W17 5	3.93	3.21	3.9	7.82	6.22	6.4	420	324	0.77
W17 4	5.37	4.51	1.2	10.2	8.39	9.2	300	244	0.81
W23 10	0.90	0.70	8.5	7.70	5.10	22.1	630	1158	1.84
W24 10	3.70	3.00	4.6	9.90	7.20	14.4	750	858	1.14
W52	1.10	0.20	78.6	20.9	3.10	82.5	600	510	0.85
W5 25	0.60	0.50	2.0	3.50	2.90	2.5	390	397	1.02
W20 4	4.70	3.40	14.9	6.84	5.05	13.1	120	158	1.32
W20 9	1.87	1.45	8.8	7.29	5.78	6.7	300	442	1.47
W20 7	3.84	0.97	69.0	5.69	1.60	66.4	630	141	0.22
W11 281	1.64	0.68	50.2	4.08	1.72	50.0	390	695	1.78
W11 17	1.77	0.73	50.9	2.39	1.68	66.2	420	125	0.30
W21 6	2.35	0.75	62.0	7.68	2.06	68.0	90	102	1.13
W320 013	7.86	4.29	36.4	4.29	1.73	52.0	0	0	0
H 19 17	1.80	1.40	5.6	5.40	1.83	59.9	240	79	0.33
X7 01	4.43	2.26	39.4	5.24	3.00	31.7	210	258	1.23
P37 9	4.67	3.58	8.9	5.27	3.72	16.6	180	50	0.28
平均	3.48	2.26	26.1	7.38	4.16	32.9	330	321.4	1.90

有较大的吸附量和较小的解吸附速度,有效地延长了化学剂在地层内的滞留时间和作业有效期。

与地层结垢防治技术相比,地层压裂改造技术可以大幅度增大近井地带的渗透率,但由于作业半径有限,其措施有效期较短;尽管在油井酸化中采用了缓速酸技术,但其作业半径仍然较小,其增产效果仍不理想;而洗井作业只是清除了采油井底沉积的污垢,并没有增大近井油层的导流能力,其增产效果较差。可见在安塞油藏特低渗透率这一特定的地质条件下,提高措施增产效果的关键是尽可能加大作业半径。值得强调的是,由于安塞油藏属酸敏性地层,如果大剂量挤入酸性处理液,有可能引起地层严重的酸敏伤害。

需要提及的是,在采用上述各项增产技术之后,随着油井日产油量的增大,油井平均含水率也有较大幅度上升。这一现象在侏罗系中、高渗透率油田也较为普遍。因此在实施各项增产技术时,应选择含水率相对较低的油井。

除增加产量以外,在油田措施中还应考虑措施成本。在以上各种增产措施中,地层压裂改造的作业难度和作业成本都远远大于地层结垢防治和油井酸化等地层化学解堵技术。由此可见,油田化学增产技术在安塞特低渗透油藏具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 史成恩. 特低渗透油田开发的主要作法[A]. 鄂尔多斯盆地油气勘探开发论文集[C]. 北京:石油工业出版社, 2000. (SHI Cheng en. The primary methods for developing extra low permeability Oilfield [A]. Papers of petroleum and gas exploration and development, Ordos Basin[C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.)

- [2] 李恕军, 柳良仁, 熊维亮. 安塞油田特低渗透油藏有效驱替压力系统及注水开发调整技术[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 65-68. (LI Shu jun, LIU Liang ren, XIONG Wei liang. The effective driving pressure system study and adjustment techniques of waterflooding in Ansai Oil Field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 65-68.)
- [3] 李天太, 刘小静, 董悦, 等. 安塞油田注水开发中后期复合解堵酸液配方实验[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 101-104. (LI Tian tai, LIU Xiao jing, DONG Yue, et al. Experiments on complex blockage removing acid for Ansai Oilfield in the middle late waterflooding stage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 101-104.)
- [4] 石道涵. 安塞油田压裂技术试验研究[R]. 西安: 中国石油长庆油田公司, 2004. (SHI Dao han. Study on fracturing techniques in Ansai Oilfield[R]. Xi'an: PetroChina Changqing Oilfield Company, 2004.)
- [5] 石道涵. 安塞油田酸化技术应用效果分析[R]. 西安: 中国石油长庆油田公司, 2003. (SHI Dao han. Analysis of efficiency of acidizing techniques in Ansai Oilfield[R]. Xi'an: PetroChina Changqing Oilfield Company, 2003.)
- [6] 马广彦. 采油井地层深部结垢防治技术[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 85-87. (MA Guang yan. Deep scaling control and removal techniques for oil wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 85-87.)
- [7] 马广彦. 长庆油田油藏地层结垢防治技术综述[J]. 低渗透油气田, 2005, 10(2): 45-48. (MA Guang yan. Summary of scaling control and removal techniques for reservoirs, Changqing Oilfield [J]. Low Permeability Reservoirs, 2005, 10(2): 45-48.)

第一作者简介: 李永太(1963), 男, 四川西充人, 博士, 西安石油大学石油工程学院副教授, 现从事提高石油采收率的科研和教学工作。地址: 陕西省西安市电子二路18号, 西安石油大学石油工程学院, 邮政编码: 710065; 电话: (029) 88383078. E mail: yongtai@sina.com

收稿日期: 2005 10 21 修回日期: 2006 06 23

(编辑、绘图 梁大新)