

双水平井SAGD开发稠油油藏界限标准

牟珍宝¹, 唐帅²

1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国石油吉林油田分公司, 松原 138000

摘要 蒸汽辅助重力泄油(SAGD)是开发超稠油的高效技术,具有驱油效率高,采收率高等特点,其开发油藏界限标准受油藏参数、工艺技术条件及油价等综合影响。国外根据油层厚度、原油黏度与开发等条件给出了SAGD开发油藏界限标准,但中国目前还没有合理的界限标准指导不同油藏条件下SAGD的部署以及经济有效的开发方法。运用油藏数值模拟技术,对新疆A油藏关键油藏参数对SAGD开发效果的影响规律进行研究,运用正交设计方法,以净利润为目标确定了影响双水平井SAGD开发油藏效果的主控因素;结合现有工艺条件,得到了不同原油价格下的SAGD开发油藏界限标准。

关键词 双水平井;蒸汽辅助重力泄油;正交设计;界限标准

中图分类号 TE357

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.11.011

Threshold Standards in Heavy Oil Reservoir Exploitation Using Steam Assisted Gravity Drainage with Dual-horizontal Wells

MOU Zhenbao¹, TANG Shuai²

1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, China Petro-Chemical Corporation, Beijing 100083, China
2. Jinlin Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Songyuan 138000, China

Abstract Steam assisted gravity drainage (SAGD) is an advanced technology for the exploitation of super heavy oil reservoir, possessing high oil displacement efficiency and high recovery ratio. The reservoir exploitation threshold standards of SAGD depend on the combined effect of reservoir parameters, technological conditions and oil price. Other countries have given the SAGD reservoir exploitation threshold according to their own reservoir thickness, oil viscosity and exploitation conditions, but there is no reasonable threshold standards for China to conduct SAGD deployment and efficient exploitation under different reservoir conditions. In this paper, the effect of key reservoir parameters on SAGD exploitation is studied using reservoir numerical simulation technologies. On that basis, the main controlling factors of reservoir exploitation effect in terms of net profit using SAGD with dual-horizontal wells is determined through orthogonal design and multi-index analysis. Finally, the threshold standards of reservoir exploitation using SAGD under different crude oil prices are obtained under existing technological conditions.

Keywords dual-horizontal wells; SAGD; orthogonal design; threshold standards

蒸汽辅助重力泄油(SAGD)是国际上—项开采稠油的前沿技术,在1981年由Butler^[1]首先提出。蒸汽辅助重力泄油技术作为蒸汽驱的一种特殊形式,其最重要的形式是将水平注入井和沿平行轨迹钻探的水平生产井配对。这些油井在储

层中的位置较低,距离钻探位置的垂直距离约5 m,注入井在配对的生产井上方,利用浮力及蒸汽等机理来有效开采稠油。其原理是,在注汽井中注入高于度蒸汽,蒸汽腔向上超覆在地层中形成蒸汽腔,蒸汽腔向上及侧面扩展,与油层中

收稿日期:2013-08-10;修回日期:2014-01-15

基金项目:国家重大科技专项“十二五”攻关项目(2008ZX05014-003-003)

作者简介:牟珍宝,高级工程师,研究方向为油气田开发理论与方法及提高采收率技术,电子信箱:muzb1970@sohu.com

引用格式:牟珍宝,唐帅.双水平井SAGD开发稠油油藏界限标准[J].科技导报,2014,32(11):71-76.

的原油发生热交换。被加热的原油黏度降低,和蒸汽冷凝水在重力作用下向下流动,从水平生产井中采出;蒸汽腔持续扩展,占据原油的体积;蒸汽腔内压力恒定,没有施加压力梯度,流动完全是重力作用引起的^[3]。

影响SAGD开发效果的关键因素是沿水平段的SAGD蒸汽腔的均匀发育程度。在开发过程中,诸多动、静态关键因素对SAGD的开发效果和蒸汽腔发育形态均有重要影响,制约着SAGD的产量水平、最终采收率和经济效益^[3]。因此,面对复杂地质条件、多重动态因素影响下的SAGD开发过程,寻求有针对性的、行之有效的提高SAGD蒸汽腔发育均匀程度的技术对策,优化双水平井SAGD开发稠油油藏界限标准,是确保SAGD成功开发超稠油油藏的基础^[4]。

影响SAGD的开发效果和蒸汽腔发育形态的动、静态因素较多,本文针对影响蒸汽辅助重力泄油(SAGD)开发效果的静态因素中的油藏界限标准展开优化研究。其主要油藏静态参数为:油层厚度、原油黏度、油层渗透率、孔隙度、油藏深度、初始含油饱和度、油层压力与温度、原始热特性等,但影响SAGD开发效果的最主要因素是前3个^[5]。针对SAGD开发稠油油藏界限标准研究,国内外开展了大量的室内实验、矿场试验、数值模拟研究,取得了一定的效果^[6-16]。

目前,加拿大根据其自身的油藏条件、工艺技术条件、自然社会环境等给出了超稠油SAGD开发油藏的界限标准:油层连续厚度>10 m;原油黏度>10000 mPa·s;水平渗透率>200×10⁻³ μm²,垂直/水平渗透率比值>0.2,已在现场实施的SAGD项目,油层厚度一般在20~40 m,最小为10~15 m^[17]。

中国目前在A油田进行SAGD的试验已经成功,准备实施大规模工业化开采^[18]。但中国储层条件、工艺技术条件、开采条件等与国外不同,需要根据自身特点来研究SAGD开发油藏界限标准。国内外对SAGD影响因素的研究也很多^[19-21],但是浅层超稠油SAGD关键决策参数还需深入研究。本文主要考虑原油黏度、油层厚度、渗透率对蒸汽辅助重力泄油的影响情况,确定新的双水平井SAGD开发稠油油藏界限标准。

1 数值模型

地质概况:国内目前在新疆A油田SAGD试验成功,已经准备实施大规模工业化开采^[19]。新疆A油田的基本落实储量达3.6×10⁸ t;油藏埋深较浅,油层厚度10~25 m,油藏埋深170~260 m,油层温度仅为18℃^[22],原始地层压力仅为2.6 MPa。油层平均孔隙度为30%,水平渗透率平均为3000×10⁻³ μm²,属于高孔高渗储层储层物性较好。原油黏度很高,达到0.1×10⁴~115×10⁴ mPa·s(50℃),属于超稠油,但是原油黏度的热敏感性很强。新疆A油田在对国外蒸汽辅助重力泄油开发技术与应用效果进行广泛调研的基础上,开展了蒸汽辅助重力泄油(SAGD)的先导性试验,当前,试验区均已经过循环预热及SAGD启动阶段,进入了SAGD生产阶段,总体趋势良好,但在实施过程中也暴露出了一些问题,严重地影响了

SAGD蒸汽腔的均匀扩展,亟需开展浅层SAGD开发效果随各影响因素的变化规律,最终确定影响SAGD试验区开发效果的主控因素,并得到浅层油藏双水平井SAGD开发稠油油藏界限标准,并以此作为依据来优化目标试验区的布井组合方式。

模拟参数:以新疆A油田某区块中的一个典型稠油油藏双水平井井组单元为基础建立三维均质模型,模型中模拟对称的半井模型(图1),水平井段长500 m,2口双水平井垂距为5 m。

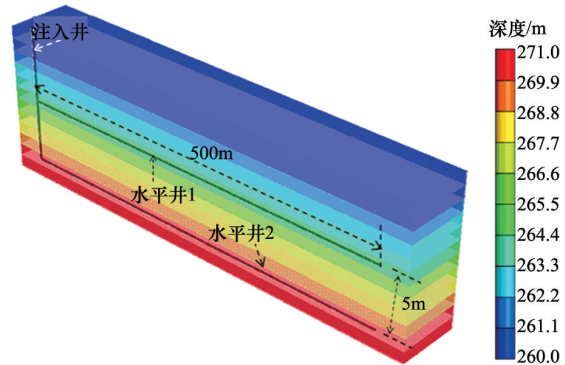


图1 双水平井井组的基础模型示意

Fig. 1 Schematic diagram of the basic model for dual-horizontal wells

地层参数:通过实际地质研究,新疆A油田的水平渗透率与垂直渗透率之比为0.6,原始含油饱和度75%,其余的地层参数同前文所述。

2 油藏参数敏感性单因素研究

单因素分析研究是为了得到给定油藏条件下单因素的变化规律,为下一步综合标准的确定奠定基础。

研究油藏参数的敏感性,需要分析油层厚度、原油黏度、渗透率等参数对双水平井SAGD的影响。本次模拟研究的参数设定如下:

油层厚度(m): 10、12、13、14、15、20、25。

50℃时原油黏度(mPa·s): 15000、20000、25000、30000、45000、100000、150000。

渗透率(10⁻³ μm²): 500、800、1000、1200、1500、2000。

2.1 厚度敏感性分析

根据数值模拟结果,由图2、图3可知,随着厚度增大,相同采收率下的累积油汽比不断增加,累积产油量也随之增加。因为SAGD过程是以流体的重力作用作为动力,油层厚度越大,重力作用越明显,反之,若油层厚度太小,不但重力作用小,而且上下围岩的热损失增大,还会降低油汽比。当渗透率1200×10⁻³ μm²,黏度25000 mPa·s,厚度10 m,采收率达到40%时,累积油汽比达到0.153,累积产油量达到34000 m³,已具有经济开采价值。

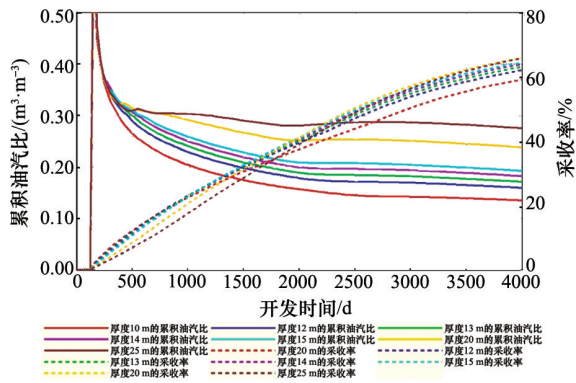


图2 不同油层厚度的累积油汽比与采收率对比
Fig. 2 Comparison of oil recovery and cumulative oil-steam ratio in stratum with different thicknesses

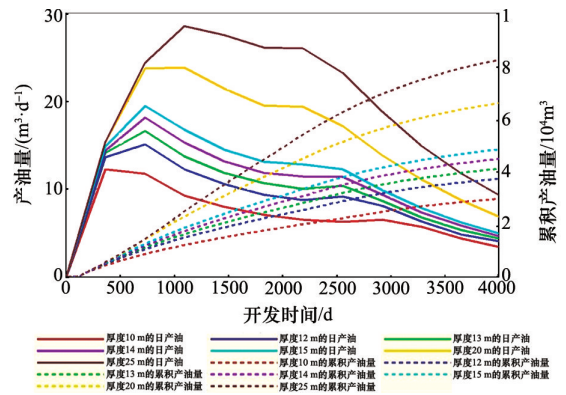


图3 不同油层厚度的日产油与累积产油量对比
Fig. 3 Comparison of daily and cumulative oil productions in stratum with different thicknesses

2.2 黏度敏感性分析

原油黏度的大小将直接影响SAGD蒸汽前缘沥青的泄油速度,也影响蒸汽前缘推进速度与产油速度。由图4、图5可

知,随着黏度降低,相同采收率下的累积油汽比不断增加;累积产油量也随之增加。厚度12 m,渗透率 $1500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,黏度 $< 100000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 初步具备开发条件。

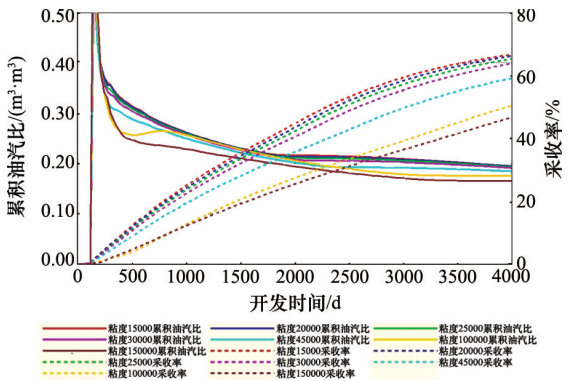


图4 不同黏度的累积油汽比与采收率对比
Fig. 4 Comparison of oil recovery and cumulative oil-steam ratio under different viscosity

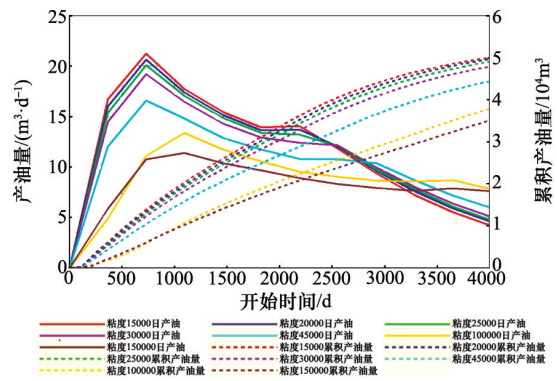


图5 不同黏度的日产油与累积产油量对比
Fig. 5 Comparison of daily and cumulative oil production under different viscosity

2.3 渗透率敏感性分析

渗透率主要影响蒸汽上升速度以及蒸汽室的侧向扩展,由图6、图7可知,随着渗透率的降低,相同采收率下的累积油

汽比不断减少;累积产油量也随之减少。厚度12 m,黏度 $25000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (50°C)情况下,渗透率 $> 1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 初步具备开发条件。

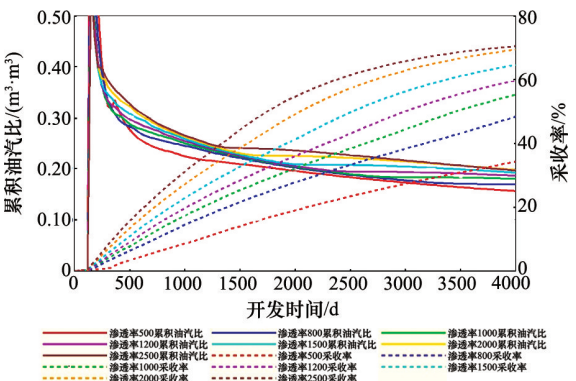


图6 不同渗透率的累积油汽比与采收率对比
Fig. 6 Comparison of oil recovery and cumulative oil-steam ratio under different permeability

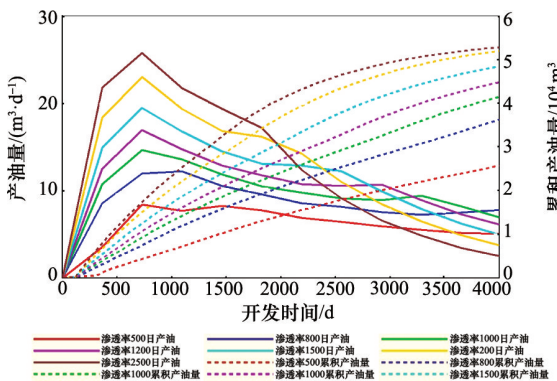


图7 不同渗透率的日产油与累积产油量对比
Fig. 7 Comparison of daily and cumulative oil production under different permeability

3 油藏开发界限标准

3.1 方案设计

正交试验设计和分析方法是目前最常用的工艺优化试验设计和分析方法,是部分因子设计的主要方法。正交试验以概率论、数理统计和实践经验为基础,利用标准化正交表安排试验方案,是一种高效处理多因素优化问题的科学计算方法^[23]。

在本研究中,根据新疆 A 油田实际油藏条件,结合单因素研究结果,厚度、黏度以及渗透率对双水平井 SAGD 开发是最主要的影响因素,因此选择 A(厚度)、B(50℃时黏度)、C(渗透率)作为 3 个因子,新疆 A 油田的厚度为 12 m,50℃时黏度为 25000 mPa·s,渗透率为 $1500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,根据正交试验设计原理,对于每个影响因子分别以该油田的实际参数为中心,上下各延展 3 个参数,加上油田本身的实际参数,共计 7 个水平级别,将以上 7 个不同水平级别进行正交优化模拟计算(表 1),综合考虑厚度、黏度及渗透率的影响研究油藏界限开发标准。

表 1 因子水平表

Table 1 Levels of the influential factors

水平	影响因子		
	A 厚度/m	B 50℃黏度/(mPa·s)	C 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	8	15000	500
2	9	20000	800
3	10	25000	1000
4	11	30000	1200
5	12	45000	1500
6	14	100000	2000
7	16	150000	2500

表 2 正交设计方案表与净利润

Table 2 Orthogonal optimization design and net profit

试验号	影响因子			试验结果		
	A	B	C	50 美元	60 美元	70 美元
1	1	1	4	-1131.04	-516.25	98.55
2	2	1	7	129.61	1822.84	3516.07
3	3	1	3	-636.52	360.74	1357.99
...
47	5	7	2	-967.58	-83.53	800.52
48	6	7	5	210.73	1793.19	3375.64
49	7	7	4	682.73	2557.50	4432.27

3.3 综合因素分析

表 3 中, k 值变化规律进一步验证了油藏参数敏感性的单因素分析结果:厚度越大,黏度越低,渗透率越高,开发效果越好。根据较优水平原则,通过 $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ 值的大小

依据油藏参数敏感性单因素研究结果,根据其变化规律选择将净利润作为正交设计试验结果参考标准,分别计算了原油价格为 50、60、70 美元时的净利润,其中净利润的表达式为

$$\text{净利润} = \text{累产油} \times \text{商品率} \times \text{油价} \times 6.3 \times 6.28 \times (1 - \text{增值税率}) - \text{累产油} \times \text{商品率} \times \text{资源税} - \text{水平井钻井成本} - \text{观察井钻井成本} - \text{地面投资} - \text{操作成本} \times \text{累产油} - \text{蒸汽成本} \times \text{累注汽}$$

计算净利润涉及到的参数有:水平井钻井成本 10486 万元/m,观察井钻井 5930 万元/m,操作成本 600 元/t,蒸汽成本 92 元/t,地面投资成本 392 万元/井组,增值税率 17%,商品率 0.98,资源税 14 元/t。

将数值模拟的最后累积产油量和累积注汽量分别代入以上不同油价的净利润的公式,可以分别计算 7 位级正交方法 49 个试验号的净利润,限于篇幅,只列出试验结果号为 1, 2, 3 和 47, 48, 49 的净利润值(表 2)。

3.2 主控因素分析

根据极差数 R ,可以判断各因素对实验结果的影响。判断的原则是:凡是极差越大,所对应的因子对实验结果越起主要影响作用,不同原油价格的正交设计试验结果见表 3。

表 4 中, K_1, K_2, \dots, K_7 分别代表水平 1, 2, $\dots, 7$ 所对应的试验指标之和, k_1, k_2, \dots, k_7 代表实验指标 1, 2, $\dots, 7$ 的平均值,极差数 R 代表某个因素在其取值范围内试验指标变化的幅度,其表达式为: $R = \max(k_i) - \min(k_i) (i=1, 2, \dots, 7)$ ^[23]。

可以看出,无论原油价格是 50、60 还是 70 美元,都满足同样的规律: $R_A > R_C > R_B$,可以得出,影响双水平井 SAGD 开发效果的各因素的主次关系为厚度 > 渗透率 > 黏度。厚度是影响双水平井 SAGD 开发效果的最主要因素,研究其界限标准对 SAGD 开发油藏有着重要的意义。

来确定 A、B、C 3 个因子的界限值。

表 3 中的 $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ 的值为正(大于 0),说明有净利润, $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ 的值为负(小于 0),说明没有净利润。

表3 不同原油价格的正交设计试验净利润(万元)

Table 3 Net profit of the orthogonal design results under different crude oil prices

试验结果	50美元			60美元			70美元		
	厚度/ m	黏度/ (mPa·s)	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	厚度/ m	黏度/ (mPa·s)	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	厚度/ m	黏度/ mPa·s	渗透率/ $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$
K_1	-8877.52	4433.06	-6083.85	-5282.39	17261.78	249.59	-1687.27	30090.50	6583.02
K_2	-6530.20	2912.64	-203.60	-892.95	15010.09	9396.45	4744.31	27107.55	18996.50
K_3	-4257.98	2255.15	-2421.50	3149.90	13468.48	6071.49	10557.77	24681.81	14564.47
K_4	-986.72	1442.18	-2052.32	8837.76	11509.17	6855.48	18662.24	21576.16	15763.28
K_5	1747.85	1281.50	394.73	13203.26	12061.44	10960.30	24658.67	22841.37	21525.86
K_6	7656.93	-1613.61	7045.86	21967.34	7121.77	20533.02	36277.75	15857.15	34020.17
K_7	16913.65	-5044.92	8986.68	37295.65	1845.83	24212.24	57677.65	8736.59	39437.81
k_1	-1268.22	633.29	-869.12	-754.63	2465.97	35.66	-241.04	4298.64	940.43
k_2	-932.89	416.09	-29.09	-127.56	2144.30	1342.35	677.76	3872.51	2713.79
k_3	-608.28	322.16	-345.93	449.99	1924.07	867.36	1508.25	3525.97	2080.64
k_4	-140.96	206.03	-293.19	1262.54	1644.17	979.35	2666.03	3082.31	2251.90
k_5	249.69	183.07	56.39	1886.18	1723.06	1565.76	3522.67	3263.05	3075.12
k_6	1093.85	-230.52	1006.55	3138.19	1017.40	2933.29	5182.54	2265.31	4860.02
k_7	2416.24	-720.70	1283.81	5327.95	263.69	3458.89	8239.66	1248.08	5633.97
R	3684.45	1354.00	2152.93	6082.58	2202.28	3423.24	8480.70	3050.56	4693.54

1) 由表3可知,当原油价格为50美元时, k_4 对应的净利润为-140.96万元, k_5 对应的净利润为249.96万元,说明净利润从负值转化为净利润大于0, k_5 对应的正交值为:厚度 ≥ 12 m,渗透率 $\geq 1500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,50℃黏度 ≤ 45000 mPa·s。在该油价下,SAGD开发油藏界限是:厚度 ≥ 12 m,渗透率 $\geq 1500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,50℃时黏度 ≤ 45000 mPa·s。

2) 对于原油价格为60美元时,净利润大于0对应 k_3 ,在该油价下,其SAGD开发油藏界限是:厚度 ≥ 10 m,渗透率 $\geq 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,50℃时黏度 ≤ 150000 mPa·s。原油价格为70美元时,净利润大于0的对应是 k_2 ,在该油价下,其SAGD开发油藏界限是:厚度 ≥ 9 m,渗透率 $\geq 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,50℃时黏度 ≤ 150000 mPa·s。

需指出的是,不同地质条件和油藏条件,不同的开发方式,稠油油藏双水平井开发界限标准有可能不同,因此,对于每一个具体的稠油油藏,需要有针对性的通过正交优化设计方法,以净利润极差数 R 为标准,展开数值模拟研究,形成自己稠油油藏界限标准。

4 结论

1) 由数值模拟结果可知,随着厚度及渗透率减少,相同采收率下的累积油气比不断减少,累积产油量也随之减少;而随着黏度的降低,相同采收率下的累积油气比不断增加;累积产油量也随之增加。

2) 厚度是影响双水平井SAGD开发效果的最主要因素,各因素影响双水平井SAGD开发效果的主次关系为:厚度>渗透率>黏度。

3) 得到双水平井SAGD稠油油藏开发界限标准:原油价格为50美元时,界限标准为厚度 ≥ 12 m,渗透率 $\geq 1500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,50℃时黏度 ≤ 45000 mPa·s;原油价格为60美元时,界限标准为厚度 ≥ 10 m,渗透率 $\geq 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,50℃时黏度 ≤ 150000 mPa·s;在原油价格为70美元时,界限标准为厚度 ≥ 9 m,渗透率 $\geq 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,50℃时黏度 ≤ 150000 mPa·s。

参考文献(References)

- [1] Butler R M. A new approach to the modelling of steam-assisted gravity drainage[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1985, 24(3): 42-45.
- [2] Grills T, Frank H, Trost D. Case History: Horizontal well SAGD technology is successfully applied to produced oil at LAK ranch in Newcastle Wyoming[C]. SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and International Horizontal Well Technology Conference, Houston, USA, November 24-27, 2002.
- [3] 刘文章. 特稠油、超稠油油藏热采开发模式综述[J]. 特种油气藏, 1998, 5(3): 1-7.
Liu Wenzhang. An over view on thermal development mode of super viscous crude oil and extra viscous crude oil reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 1998, 5(3): 1-7.
- [4] 王选茹, 程林松, 刘双全, 等. 蒸汽辅助重力泄油对油藏及流体适应性

- 研究[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(3): 57-60.
Wang Xuanru, Cheng Linsong, Liu Shuangquan, et al. Study of the adaptability of SAGD to oil reservoir and liquid parameters[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(3): 57-60.
- [5] 鄢旭. SAGD开发影响因素研究[J]. 甘肃科技, 2011, 27(4): 49-50.
Yan Xu. Study of the influencing factor of SAGD development[J]. Gansu Science and Technology, 2011, 27(4): 49-50.
- [6] Yang G, Butler R. Effects of reservoir heterogeneities on heavy oil recovery by steam-assisted gravity drainage[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1992, 31(8): 1-5.
- [7] Akhondzadeh H, Fattahi A, Zare A, et al. Promising approaches to enhance SAGD performance in uneconomical tar-sands[C]. North Africa Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, February 5-8, 2012.
- [8] Ipek G, Frauenfeld T, Yuan J. Numerical study of shale issues in SAGD [C]. In Canadian International Petroleum Conference. Toronto, Canada, June 24-26, 2008.
- [9] Gates I D, Leskiw C. Impact of steam trap control on performance of steam-assisted gravity drainage[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 75(1): 215-222.
- [10] Barillas J L, Dutra Jr T, da Mata W. Noncontinuous steam injection optimization for SAGD process for improving heavy oil recovery[C]. Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Mexico City, Mexico, May 16-20, 2009.
- [11] Boak J, Palmgren J C. Preliminary numerical analysis for a naphtha co-injection test during SAGD[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2007, 46(1): 3-5.
- [12] Vanegas J W, Cunha L B, Alhanati F J S. Impact of operational parameters and reservoir variables during the start-up phase of a SAGD process[C]. SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Society of Petroleum Engineers, Calgary, Canada, November 1-3, 2005.
- [13] 孟巍, 贾东, 谢晋男, 等. 超稠油油藏直井与水平井组合 SAGD 技术优化地质设计[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(2): 44-46.
Meng Wei, Jia Dong, Xie Jinnan, et al. Optimization of geological design for SAGD process in super heavy oil reservoirs using a combination of vertical and horizontal wells[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(2): 44-47.
- [14] 吴向红, 叶继根, 马远乐. 水平井蒸汽辅助重力驱油藏模拟方法[J]. 计算物理, 2002, 19(6): 549-552.
Wu Xianghong, Ye Jigen, Ma Yongle. SAGD numerical simulation with horizontal wells[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2002, 19(6): 549-552.
- [15] 席长丰, 马德胜, 李秀峦. 双水平井超稠油 SAGD 循环预热启动优化研究[J]. 西南石油大学学报, 2010, 32(4): 103-108.
Xi Changfeng, Ma Deshang, Li Xiulian. Study on SAGD technology for ultra heavy oil in dual horizontal wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2010, 32(4): 103-108.
- [16] 杨立强, 陈月明, 王宏远, 等. 超稠油直井-水平井组合蒸汽辅助重力泄油物理和数值模拟[J]. 中国石油大学学报, 2007, 31(4): 64-69.
Yang Liqiang, Chen Yueming, Wang Hongyuan, et al. Physical and numerical simulation of steam assisted gravity drainage with vertical and horizontal well combination in extra heavy oil reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(4): 64-69.
- [17] Le Ravalec M, Morlot C, Marmier R, et al. Heterogeneity impact on SAGD process performance in mobile heavy oil reservoirs. Oil & Gas Science and Technology, 2009, 64(4): 469-476.
- [18] 张方礼, 张丽萍, 鲍君刚, 等. 蒸汽辅助重力泄油技术在超稠油开发中的应用[J]. 特种油气藏, 2007, 14(2): 70-72.
Zhang Fangli, Zhang Liping, Bao Jungang, et al. Application of SAGD in ultra heavy oil development[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2007, 14(2): 70-72.
- [19] 曾焯, 周光辉. 水平井蒸汽辅助重力驱双模研究初探[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(5): 70-75.
Zeng Ye, Zhou Guanghui. A bi-model reservoir on steam-assisted gravity drive[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(5): 70-75.
- [20] 刘尚奇, 许心伟, 张锐. 稠油油藏水平井热采应用研究[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 65-69.
Liu Shangqi, Xu Xinwei, Zhang Rui. A simulation study on the application of horizontal wells in heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(2): 65-69.
- [21] Singhal A K, Das S K, Leggett S M, et al. Screening of reservoirs for exploitation by application of steam assisted gravity drainage/VAPEX processes[C]. International Conference on Horizontal Well Technology. Austin, UAS, November 18-20, 1996.
- [22] 何万军, 陈新文, 赵睿, 等. 水平井轨迹偏移对蒸汽辅助重力泄油生产的影响. 新疆石油地质, 2013, 34(6): 669-671.
He Wangjun, Chen Xinwen, Zhao Rui, et al. The impact of horizontal well trajectory offset on production by SAGD process[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(6): 669-671.
- [23] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.

(编辑 田恬)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。