

文章编号: 1001-6112(2006)04-0399-05

大庆外围扶杨油层难采储量优选界限及开发方案

周永炳^{1,2}, 崔宝文², 周锡生²

(1. 大庆石油学院 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:大庆外围地区扶杨油层探明储量占大庆外围地区累计探明储量一半以上。扶杨油层河道砂体规模小, 储层物性差, 非均质性强。通过分析扶杨油层加密调整区块开发效果和开展未开发储量评价, 提出了扶杨油层储量注水开发优选界限和建立有效驱动体系并排距界限, 研究形成了“两个界限”以上 I, II 类储量井网与压裂整体优化设计方法, 在肇源油田源 35 等区块注水开发见到了明显效果。此外, 探索了 III 类储量采用特殊结构井、非常规方式开发的可行性。

关键词:未开发储量; 评价技术界限; 井排距界限; 特殊结构井开采; 扶杨油层; 大庆外围地区

中图分类号: TE323

文献标识码: A

大庆外围地区扶杨油层已探明 13 个油田, 累计探明石油地质储量 6.3×10^8 t, 含油面积 1 311.8 km², “十一五”及其以后扶杨油层仍然是大庆外围地区主要增储上产对象。已探明油藏(田)分布在松辽盆地北部中央拗陷区长垣两侧东、西部凹陷不同构造岩相带。国内外大量油气勘探开发实践表明, 盆地(凹陷)内不同构造岩相带之间含油气丰度具有极大的差别^[1]。扶杨油层石油富集与沉积物源分布、局部构造样式和沉积相带演化等诸多因素关系密切, 以朝阳沟、榆树林、头台油田为重点, 在扶杨油层油藏描述和注水开发方面前人做了大量的研究^[2~6]。近期, 笔者通过开展未开发储量评价分类, 结合扶杨油层开发加密区块效果分析, 提出了扶杨油层注水开发、建立有效驱动的储量优选“两个界限”和改善注水开发效果的开发设计方法, 进一步明确了扶杨油层油藏评价和攻关方向。

1 开发现状及未开发储量地质特点

大庆外围地区以扶杨油层为主要开发目的层的朝阳沟、榆树林、头台、升平油田, 动用地质储量 2.3×10^8 t, 动用面积 326.7 km², 4 个油田动用地质储量占大庆外围扶杨油层总动用储量的 94.3%。根据扶杨油层砂体规模小、渗透率低的特点, 开发初期主要采用正方形 300 m 井网, 反九点注水方式, 并探索了扶杨油层裂缝性油藏井排方向与裂缝走向 $0^\circ \sim 52.5^\circ$ 的 6 种形式, 采用“两早、三高、一适时”注水开发政策, 取得了较好的开发效果。

按扶杨油层空气渗透率和原油流度将未开发储量分为 4 类(表 1)。从表 1 看出, 扶杨油层未开发储量多分布在空气渗透率 $(0.5 \sim 1.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 原油流度 $(0.25 \sim 0.15) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ 之间, 开发难度大, 有效动用的技术经济界限高。

与扶杨油层已开发区块相比, 大庆外围地区未开发储量地质条件更加复杂。

扶杨油层已开发储量中油藏埋深小于 1 500 m 的占 75.2% 以上; 未开发储量以埋藏深度大于 2 000 m 为主, 埋藏深度大于 2 000 m 的储量占扶杨油层未开发储量的 80.3%, 主要分布于永乐、榆树林、他拉哈油田。

未开发储量分布在裂缝不发育储层中。朝阳沟、头台及榆树林油田已开发区块裂缝较为发育, 未开发地区裂缝发育程度相对较差。研究表明, 扶杨油层天然裂缝发育在应力比较集中的正向构造轴部, 如朝阳沟背斜构造轴部、头台鼻状构造轴部茂 11 区块, 而位于三肇凹陷向斜区的永乐油田、古龙凹陷向斜区的他拉哈油田的大部分区块裂缝不发育, 这是扶杨油层未开发储量难采的主要原因。

储层物性进一步变差。已开发区块平均空气渗透率大于 $5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储量占 90% 以上; 未开发储量平均渗透率以小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主, 其中扶杨油层渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储量占未开发储量的 63.4%。

储量丰度进一步降低。已开发区块储量丰度大于 $60 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ 的占 90% 以上; 未开发储量以丰度小于 $45 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ 为主, 占 60.7%。

收稿日期: 2005-12-21; 修订日期: 2006-04-30。

作者简介: 周永炳(1963—), 男(汉族), 湖北荆门人, 博士生、高级工程师, 主要从事油藏开发地质和储量评价等领域研究工作。

表1 大庆外围扶杨油层探明未开发储量分类

Table 1 Classification of proved undeveloped reserve in Fuyang oil layer, Daqing Oilfield

储量丰度/(10 ⁴ t · km ⁻²)		≥60	50~60	40~50	<40	合计
I类	面积/km ²	1.9	24.9	35.9	77.4	140.1
	储量/10 ⁴ t	182	1 389	1 556	2 293	5 420
	渗透率/10 ⁻³ μm ²	10.20	1.92	2.73	2.90	
II类	面积/km ²	28.9	20.4	44.4	79.5	173.2
	储量/10 ⁴ t	2 306	1 052	1 979	2 726	8 063
	渗透率/10 ⁻³ μm ²	1.21	1.25	1.21	1.21	
III类	面积/km ²	44.1	64.2	24.6	52.0	184.9
	储量/10 ⁴ t	3 370	3 371	1 056	1 710	9 507
	渗透率/10 ⁻³ μm ²	0.80	0.77	0.81	0.69	
IV类	面积/km ²	19.2	27.1	20.3	70.6	137.2
	储量/10 ⁴ t	1 469	1 581	10 444	1 735	15 229
	渗透率/10 ⁻³ μm ²	0.30	0.41	0.37	0.34	
总计	面积/km ²	94.1	136.6	125.2	279.5	635.4
	储量/10 ⁴ t	7 327	7 393	15 035	8 464	38 219

注: I—IV类未开发储量分别按渗透率≥1.5×10⁻³, (1.5~1.0)×10⁻³, (1.0~0.5)×10⁻³, <0.5×10⁻³ μm² 和原油流量 ≥0.35×10⁻³, (0.35~0.25)×10⁻³, (0.25~0.15)×10⁻³, <0.15×10⁻³ μm²/(mPa · s)的标准划分。

2 扶杨油层难采储量优选界限

大庆外围地区扶杨油层探明储量有效厚度物性下限为: 空气渗透率 0.1×10⁻³ μm², 有效孔隙度 9%, 该下限是完钻井中“储集层段具有可动油的下限”, 与给定开发方式条件下储量的可动用界限不一致^[7,8]。本文根据近年来扶杨油层驱替实验资料、低速非达西渗流理论以及油田开发动态资料, 提出了扶杨油层注水开发条件下难采储量优选界限。

2.1 注水开发动用技术界限

从扶杨油层岩心驱替实验曲线(图1)可以看到, 储层束缚水分布在直径 0.01~3 μm 孔喉中, 且以直径小于 0.8 μm 孔喉为主; 原始油主要分布在直径 0.2~40 μm 的孔喉中; 可动油主要分布在直径大

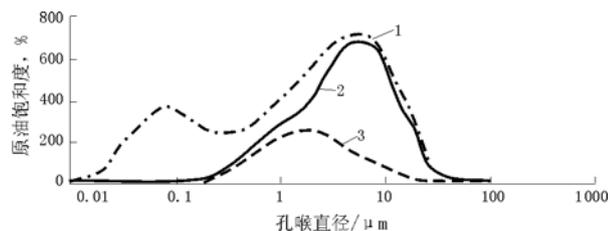


图1 水驱油实验油水在孔喉中分布曲线

1. 岩心分析孔喉分布; 2. 原始含油孔喉分布; 3. 岩心水驱残余油孔喉分布

Fig. 1 Distribution curves of oil and water in pore throat in water displacing oil experiment

于等于 0.8 μm 的孔喉中, 最小可动油孔喉半径 0.4 μm。据榆树林油田毛管压力资料, 扶杨油层平均孔喉半径 0.4 μm 所对应的平均空气渗透率为 0.66×10⁻³ μm², 平均有效孔隙度 11.2%, 即注水开发条件下, 在空气渗透率大于等于 0.66×10⁻³ μm², 有效孔隙度大于等于 11.2% 油层中的储量具有可动性。

研究表明, 特低渗透扶杨油层注水开发存在非达西渗流, 储层空气渗透率越低, 拟启动压力梯度越大。利用实验测定的拟启动压力, 建立地层条件下拟启动压力梯度(地温 60 °C)与空气渗透率的关系图版(图2)。从图2中可以明显看到, 当渗透率

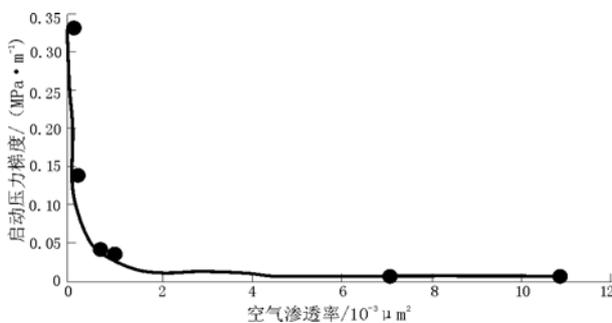


图2 大庆外围扶杨油层校正后启动压力梯度与空气渗透率关系

Fig. 2 Relationship between starting pressure gradient and air permeability after calibration in Fuyang oil layer, Daqing Oilfield

小于 $0.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,压力梯度值随着渗透率的减小急剧增加;当渗透率大于 $0.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,压力梯度值随着渗透率的增大而缓慢减小,说明特低渗透扶杨油层由于存在拟启动压力,只有当油层空气渗透率大于 $0.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,储量注水开发才可能动用。

统计榆树林油田扶杨油层 12 口井产液剖面测试资料,12 口井中空气渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、有效孔隙度小于 11% 的油层 23 层(表 2),测试结果显示 17 层无产量,占测试层的 73.9%。矿场资料进一步证实,绝大多数空气渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的层基本无产油能力。

综合上述资料认为,在注水开发条件下,扶杨油层储量优选技术界限为油层空气渗透率大于等于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,有效孔隙度大于等于 11.0%。

2.2 有效驱动体系井排距界限

过去主要通过理论公式计算有效驱动井距,但开发实际资料反映计算值偏大。本文应用近年来扶杨油层加密区块开发资料回归出有效驱动距离的计算公式。

按照“油井产液能力达到开发初期产液能力 80% 为有效”的标准,分析扶杨油层 14 个加密区块的动静态资料,朝 522、朝 55 和东 16 区块原 300 m

井网基本能建立起有效驱动体系,其它 11 个区块原井网不能建立起有效驱动体系,经过井网加密调整后 6 个区块建立起有效驱动体系。根据上述区块资料,回归出有效驱动距离与油相流度的关系式:

$$L_{\text{有效}} = 278.26M - 7.11$$

式中: $L_{\text{有效}}$ ——有效驱动距离, m; M ——油相流度, $10^{-3} \mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。

根据上述公式可以计算扶杨油层各类储层有效动用的井排距界限。未开发 I 类和 II 类储量有效驱动距离分别为 120, 90 m。扶杨油层河道砂体宽度一般在 300~600 m,考虑砂体对井网的要求,分别设计了 400, 450, 500 m 3 种井距的矩形井网,建立起有效驱动的最小井网密度(表 3),其中 500 m 井距对应有效驱动井网密度分别为 16.7 口/km²(I 类)和 22.2 口/km²(II 类)。未开发 III, IV 类储量有效驱动距离小于 50 m,不适合采用注水方式开发。

3 井网与压裂整体优化设计方法

研究认为, I, II 类扶杨油层井网与压裂整体优化设计能改善未开发 I, II 类储量注水开发效果,合理的开发方式是矩形井网线性注水。

表 2 大庆外围扶杨油层渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 油层动用状况

Table 2 Producing conditions of oil layers with permeability less than $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ in Fuyang oil layer, Daqing Oilfield

井号	全 井			渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 油层				
	有效厚度/m	动用厚度/m	日产油/t	层数	有效厚度/m	产油层	动用厚度/m	日产油/t
树 45-57	6.0	3.6	5.8	1	0.8			—
树 59-60	23.0	8.8	7.6	2	1.2			—
树 59-61	8.0	7.4	4.5	1	0.6			—
树 59-63	21.8	13.6	1.6	3	6.8	1	4.2	0.3
树 62-59	12.6	7.6	2.5	1	1.8			—
树 63-65	15.8	9.4	7.5	1	1.6			—
树 67-65	20.8	15.8	1.9	1	1.0			—
树 69-64	20.8	15.0	7.8	1	1.4			—
树 94-33	15.4	8.4	1.5	4	5.6	2	2.6	0.5
树 95-40	24.6	21.6	4.7	4	11.2	2	8.2	1.1
树 98-38	26.6	12.0	5.9	2	4.8			—
树 100-40	20.4	14.8	1.9	2	5.0	1	3.6	0.2
合 计	215.8	138.0	53.1	23	41.8	6	18.6	2.1

表 3 大庆外围扶杨油层有效驱动井网密度界限

Table 3 Limits of effective driving well spacing density for Fuyang oil layer, Daqing Oilfield

类别	注采排距/m				井网密度/(口·km ⁻²)		
	注采	排距	井距	井距	井网密度	井网密度	井网密度
I	120	400	450	500	20.8	18.5	16.7
II	90	400	450	500	27.8	24.7	22.2

3.1 井网形式

油藏数值模拟研究表明,扶杨油层矩形线性注水井网优于七点法正方形井网、五点法正方形井网和反九点正方形井网,采用小排距矩形线状注水方式开发效果最好。

3.2 井排方向

扶杨油层普遍压裂投产,裂缝渗透率远大于基质渗透率,井排方向应平行于油层空气渗透率优势方向,在注水开发中形成线状注水方式。研究表明,大庆外围地区扶杨油层最大水平主应力方向和裂缝(包括人工缝、天然裂缝)方向主要为近东西向,因此合理井排方向为东西向。

3.3 井排距比

根据渗流力学和油藏工程原理,为使平面波及系数最大,要求井排距比 $R=2\sqrt{m-2}$,其中 m 为渗透率张量的主分量,即基值渗透率(K_x)与裂缝渗透率(K_y)比值。由此计算出扶杨油层不同渗透率条件下合理井排距(表4)。

3.4 井网与压裂整体优化设计

优化后的矩形井网拉大了井距,必须加大压裂规模,增大泄油半径,保证合理的穿透比,提高单井产量。一是采用大规模压裂,增加泄油面积,提高单井产量。头台油田Ⅱ类区块茂J55-74井进行了大规模压裂,单层扶Ⅱ₁压开有效厚度3m,设计半缝长276m,实际半缝长300m,初期日产油3.7t,开采2年后日产油1.8t,采油强度为0.6t/(d·m),比周围8口油井0.27t/(d·m)采油强度增加一倍。

二是优化开发压裂设计,提高整体开发效果。矩形井网线状注水可以通过开发压裂优化设计来实现。2004年肇源油田源35开发试验区以排距80~150m、井距250~350m设计了4种井网形式,投产时,经过压裂优化设计,油井裂缝穿透比0.6~0.7,注水井裂缝穿透比0.8~0.9,实现了特低渗透储层线状注水。

表4 低渗透油藏矩形井网合理井排距

Table 4 Reasonable well line spacing of rectangular well pattern for low permeability reservoir

渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	合理排距/ m	合理井距/ m	井距/排距	井距/排距 (理论计算)
<0.5	<100	400	>4	>7
0.5~1	100~150	450	4.5~3	4~7
1~5	150~200	500	3.3~2.5	3.5~4.5
5~50	200~250	600	3.0~2.4	2~4

肇源油田源35区块采用矩形井网和整体压裂优化技术,投产的76口油井初期单井产液3.0t/d,产油2.8t/d,采油强度0.28t/(d·m),生产4个月后单井产液2.8t/d,产油2.6t/d,采油强度0.26t/(d·m),达到了设计产能要求。

4 非常规方式开发可行性探讨

扶杨油层未动用I、Ⅱ类储量评价落实后可以注水开发,而Ⅲ类储量由于储层渗透率特低,导压能力差,注水开发无效果,必须探索其它的开发方式。

4.1 主力油层发育型采用短分支水平井方式

大庆外围地区扶杨油层“九五”期间完钻水平井4口,因扶杨油层河道砂体窄小,除了树平1井、茂平1井开发效果较好外,朝平1井、朝平2井钻遇油层较差。应在扶杨油层多层河道砂体发育且隔层小的区块进一步探索短分支、阶梯式水平井开采方式,降低单一河道砂体发育型水平井开采的风险。这类扶杨油层主要分布在榆树林油田南区、肇州、宋芳屯油田、头台油田,预计可动用石油地质储量近 4000×10^4 t。

4.2 注CO₂开发可行性

2003年在宋芳屯油田芳48区块扶杨油层开辟了注CO₂试验区,试验区面积0.43km²,动用地质储量 23×10^4 t,采用80~300m井距一注四采拟五点法井网。通过一年多的现场试验,芳48区块注气压力较低,在平均日注44m³液态CO₂情况下,井底压力只有29.5MPa,相当于日注水140m³、井口注水压力10MPa左右,可以解决Ⅲ类储层注水难的问题。有5口油井见到不同程度的效果,产量和地层压力有所回升。下一步应扩大试验规模,降低注气成本,提高采收率。

4.3 热力采油开发可行性

朝阳沟油田先后在Ⅱ类区块和Ⅲ类区块进行蒸汽吞吐试验并取得较好效果。Ⅱ类区块2口试验井净总比为0.43~0.58,累积产油5003.2t,累积增油2441.3t,平均单井日增油1.9t,阶段采出程度2.49%,采油速度由注汽前的0.84%提高到1.25%。Ⅲ类区块1口井净总比0.2,该井见效,3口井净总比小于0.2,其中1口井见效;2口见效井累积产油1422.5t,累积增油738.7t,阶段采出程度0.71%,采油速度由注汽前的0.67%提高到0.71%。

朝阳沟油田Ⅱ、Ⅲ类区块油层渗透率分别为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,个别层渗透率在 $(1\sim2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。吸汽剖面测试结果显示,这些油层也有流体注入,说明特低渗透油层蒸汽注入问

题不大,关键在于提高油层的产能幅度。

未开发Ⅲ类储量主要分布在榆树林、头台、升平、肇州油田,这些油田测得的粘温曲线均显示,随着温度的升高,原油粘度明显降低。当温度升到200℃时,原油粘度可降到2.0 mPa·s以下,可明显提高油相流度。同时,温度升高使岩石表面的润湿性更倾向于亲水性,油相的渗透率提高,流动能力增加。

在相同注入孔隙体积下,随温度的增加,驱油效率明显增大。当注入孔隙体积为1.0,温度从55℃上升到200℃时,驱油效率由14.0%增加到57.1%,且残余油饱和度由0.546降低到0.245,明显提高了最终采收率。

5 结论

1)大庆外围扶杨油层未动用储量分为4类,储量优选技术界限为储层空气渗透率大于等于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,有效孔隙度大于等于11.0%。

2)大庆外围扶杨油层未动用Ⅰ、Ⅱ类储量进一步评价后可以注水开发,不同性质储层注水开发的有效驱动井排距界限不同,有效驱动距离为120 m(Ⅰ类)和90 m(Ⅱ类),井网密度分别为

16.7口/km²和22.2口/km²。采用井网与压裂整体优化技术可提高扶杨油层未动用Ⅰ、Ⅱ类储量注水开发效果。

3)扶杨油层未动用Ⅲ类储量应开展定向井、短分支水平井和蒸汽驱开发试验,探索其它有效动用方式。

参考文献:

- 1 刘泽容,信荃麟,郑清等. 断陷盆地构造岩相带与油气评价[M]. 北京:科学出版社,1992.1~132
- 2 楼章华,谢鸿森,蔡希源等. 松辽盆地扶杨油层(K₁q³⁺⁴)沉积环境[J]. 石油实验地质,1997,19(1):71~75
- 3 杨桂芳,卓胜广,滕玉洪等. 松辽盆地砂岩中成岩次生矿物特征[J]. 石油实验地质,2002,24(6):517~522
- 4 方石,刘招君,胡显辉. 松辽盆地布海合隆地区泉头组河流相层序地层学特征[J]. 石油实验地质,2003,25(1):33~38
- 5 牛彦良,周永炳等. 大庆外围低渗透油藏评价模式研究及应用[J]. 大庆石油地质与开发,2004,23(5):67~70
- 6 孙贻铃,王秀娟,周永炳. 三肇凹陷扶杨油层岩石力学参数特征[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(4):19~21
- 7 王秀娟,赵永胜,文武等. 低渗透储层应力敏感性与产能物性下限[J]. 石油与天然气地质,2003,24(2):162~165
- 8 郭会坤,高彦楼,吉庆生等. 特低渗透扶杨油层有效动用条件研究[J]. 大庆石油地质与开发,2004,23(3):38~40

TROUBLE RESERVE OPTIMAL LIMIT AND DEVELOPMENT DESIGN PLAN FOR FUYANG OIL LAYER, DAQING OILFIELD

Zhou Yongbing^{1,2}, Cui Baowen², Zhou Xisheng²

(1. Geoscience Department, Daqing Petroleum College, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: The proved reserve of Fuyang oil layer, with small-scale channel sand body, poor physical property and serious heterogeneity, accounts for more than 50 percent of accumulative proved reserve in outlying pools of Daqing Oilfield. By analyzing development effect of infill-regulate block and estimating undeveloped reserves, this paper determines the waterflood development optimal limit for Fuyang oil layer reserves and the well line spacing limit of effective drive system, prescribes types I and II reserves well pattern according to the "two limits" and integral optimization procedure for fracturing, by which obvious effect has been observed in the process of waterflood development in Yuan35 Block, etc. in Zhaoyuan oilfield. In addition, the feasibility of adopting special structure well and unconventional development plan to type III reserves was discussed in this paper.

Key word: undeveloped reserve; estimate technical limit; well line spacing limit; special structure well development; Fuyang oil layer; Daqing Oilfield