

油田开发以产能界限要求选择井型的研究

周 强 唐昌强 曾立军 徐 彬

成都欧美克石油科技股份有限公司 四川成都 610207

摘 要: 在油田开发的过程中, 为了满足开发速度和经济效益的要求, 往往对单井的产量都有一定的界限。该文先通过考虑单层的情况, 计算求得不同井型(直井、斜井和水平井)在压裂和不压裂两种情况下的不同流度系数与单井单位压差下的产能关系曲线, 再引入干扰系数进行校正, 得到多层合采条件下的不同流度系数与单井单位压差下的产能关系曲线。并以海洋油田为例, 以一定的储层物性参数为依据, 计算不同井型在压裂和不压裂两种情况下的产量, 再根据产能界限选择适合的井型进行开发。该方法对油田开发中井型的选择具有一定的指导意义。

关键字: 产能界限; 井型; 多层合采; 干扰系数

在设计油田开发方案的过程中, 对单井的产量往往有一定的要求, 因此选择何种井型进行开发也显得至关重要^[1]。目前, 国内外对以产能界限为要求选择井型的研究鲜有报道, 在编写开发方案时往往是根据实际储层的物性条件, 选择适用直井、斜井或水平井进行开发^[2]。因此, 在编写开发方案中事先对一定储层物性条件下的不同井型的产量进行预测, 然后根据产能的要求, 选择合适的井型进行开发, 这对油田的开发格外重要。

一、不同井型的产能计算公式

1. 直井的产能公式

假设地层水平均质等厚, 在定压边界圆形油层中心一口垂直井, 且渗流为单相渗流, 根据达西定律, 直井稳定流动条件下的产能公式如下^[3]。

$$Q = \frac{0.543hK [p_e - p_{wf}]}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \quad (1)$$

无限导流垂直裂缝井的产能公式为^[4]

$$Q = \frac{0.543hK [p_e - p_{wf}]}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{X_f} + s \right)} \quad (2)$$

式中: K 为地层渗透率, mD; h 油层厚度, m; p_e 地层边界压力, Mpa; p_{wf} 井底流压, Mpa; r_e 为泄油半径, m; r_w 为油井半径, m; B_o 为原油体积系数; μ_o 为原油粘度,

mPa·s; X_f 为裂缝半长, m; s 为表皮系数。

2. 斜井的产能公式

用 Cinco-lee 方法来计算斜井的产能^[5]:

$$q_o = \frac{0.543K_h h \Delta p / \mu_o B_o}{\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + S_{oc} + S_s} \quad (3)$$

式中:

$$S_{oc} = -(\alpha' / 41)^{2.06} - (\alpha' / 56)^{1.865} \log(h_D / 100) \quad (4)$$

$$h_D = h / r_w (\sqrt{K_h / K_v}) \quad (5)$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \left[\sqrt{K_v / K_h} \tan \alpha \right] \quad (6)$$

根据(3)推导可以得到垂直裂缝斜井的产能公式为

$$q_o = \frac{0.543K_h h \Delta p / \mu_o B_o}{\ln \left(\frac{r_e}{X_f} \right) + S_{oc} + S_s} \quad (7)$$

式中: K_h 为水平方向渗透率, mD; K_v 为垂直方向渗透率, mD; h 为油层厚度, m; r_w 为井筒半径, m; X_f 为裂缝半长, m; S_s 为斜井拟稳态的表皮因子; α 为井斜角, °。

3. 水平井的产能公式

陈氏公式法计算水平的产能, 公式如下^[6]:

$$q_{oh} = \frac{0.543K_f h \Delta p}{\mu_o B_o \left[\ln \left[\sqrt{(4a/L - 1)^2 + 1} \right] + (h/L) \ln(h/2r_w) \right]} \quad (8)$$

其中, $a = L/4 + \sqrt{(L/4)^2 + A/\pi}$

式中: Δp 为生产压差, MPa; q_{oh} 为水平井的流量, m³/d; K_h 为储层水平方向上的渗透率, 10⁻³ μm²; L 为水平井半长, m; h 为油层厚度, m; r_w —水平井半径, m; A —泄油面积, m²。

对于压裂水平井采用以下方法计算产能^[7]。

理论假设为：

(1) 上下封闭的地层，地层渗透率为 K_{fi} ，厚度为 h ；地层中间有一口水平井，井筒半径 r_w ，井筒长度为 L ；

(2) 水平段进行压裂，压出 N 条垂直裂缝，裂缝穿透整个油层，不等距分布，裂缝与 x 轴的距离为 $|d_i|$ ，裂缝半长为 X_{fi} ，裂缝内渗透率为 K_{fi} ，宽度为 w_i （其中 $i=0, 1, \dots, N-1$ ，代表不同的裂缝）；

(3) 水平段没有进行补孔，流体将先从地层流入裂缝，然后沿裂缝流入井筒，所以压裂水平井的产量即为每条裂缝产量之和。

压裂水平井的产能计算公式如下：

$$p_c - p_{wf} = \frac{\mu B}{2\pi K_f h} \sum_{i=0}^{N-1} q_{fi} \ln \left(\frac{\left(\frac{R_e - d_i}{X_{fi}} \frac{d_i}{X_{fi}} \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{R_e - d_i}{X_{fi}} \frac{d_i}{X_{fi}} \right)^2}}{\left(\frac{d_j - d_i}{X_{fi}} \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{d_j - d_i}{X_{fi}} \right)^2}} \right) + \frac{q_{fi} \mu B}{2\pi K_{fi} w_i} \ln \frac{h}{2r_w} \quad (9)$$

式中： R_e 为供给半径， m ； q_{fi} 为第 i 条裂缝的产量， m^3/s ； X_{fi} 为第 i 条裂缝的裂缝半长， m ； K_{fi} 为第 i 条裂缝的渗透率， D ； w_i 为裂缝宽度， m 。

二、不同流量单位压差的产能

根据前面的理论，取斜井的井斜角为 60° ，水平井水平段的长度取 $400m$ ，压裂裂缝为 4 条，可以分别计算出单层条件下压裂和不压裂两种情况直井、斜井、水平井随流量系数影响的单位压差下的产能，结果如下。从图 1 和图 2 可以看出：随着流量系数的增加，产能增加；斜井的产能略大于直井，水平井的产能大大增加；压裂后的产能大大增加，增加了近一倍。

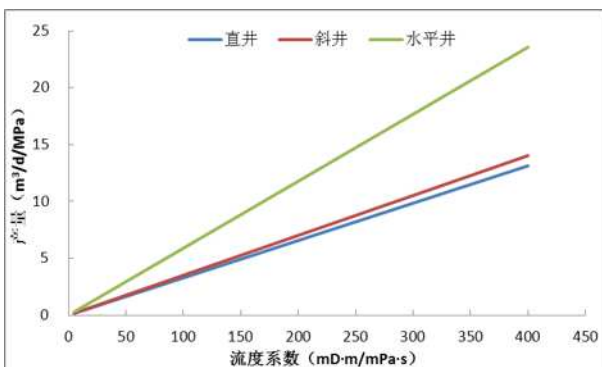


图 1 不同井型单位压差下的产量的关系（不压裂）

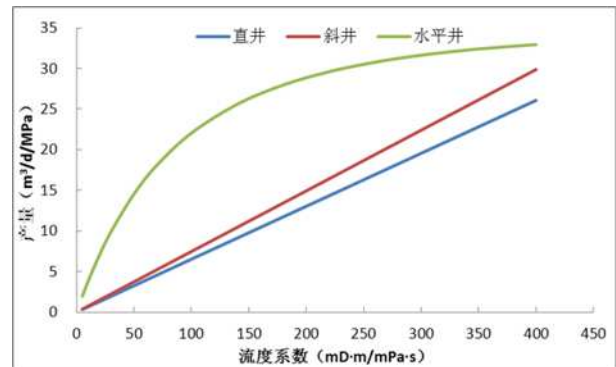


图 2 不同井型单位压差下的产量的关系（压裂）

三、实例应用

在油田实际的开发过程中，一般都采用多层合采的开发方式，由于多层合采存在层间干扰，而且对产能的影响较大，因此必须对产能进行校正^[8-12]。以海上 X 油田为例，该地区多层合采的平均干扰系数为 5.2 。利用干扰系数进行校正，便可得到多层合采时单位压差下的产能，结果如下。

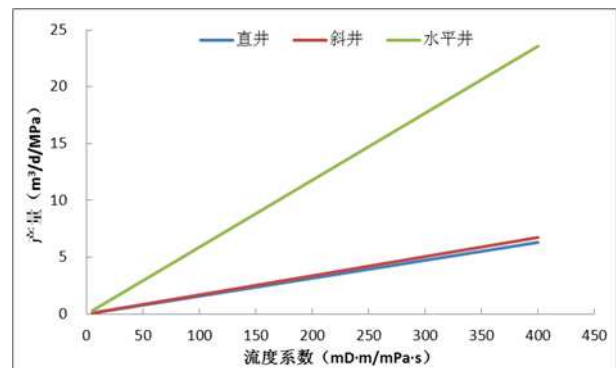


图 3 不同井型单位压差下的产量的关系（不压裂）

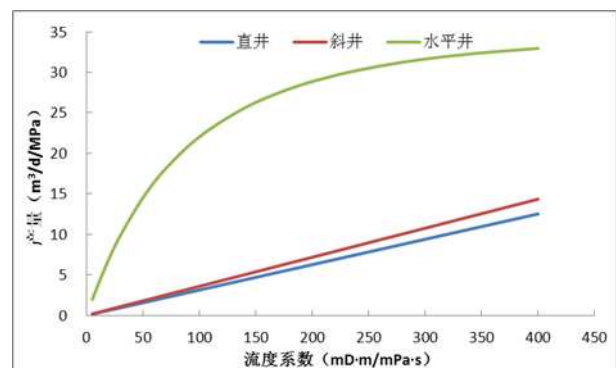


图 4 不同井型单位压差下的产量的关系（压裂）

回归得到的流量系数与单位压差下的产量之间的关系如下：

表 1 流度系数与单位压差下的产量关系

不压裂		压裂	
井型	公式	井型	公式
直井	$q=0.0158f$	直井	$q=0.0313f$
斜井	$q=0.0168f$	斜井	$q=0.0358f$
水平井	$q=0.0589f$	水平井	$q=8.02591nf-14.784$

其中: q 为单井单位压差下的日产量, $m^3/d/MPa$; f 为流度系数, $mD \cdot m/mPa \cdot s$ 。

根据以上的结果, 可以举一个例子来说明某一储层采用何种井型来进行开发。假设海洋 X 油田某一储层的地层物性参数如下, 定生产压差为 12MPa, 原油粘度为 $0.85mPa \cdot s$, 生产界限为 $80m^3/d$ 。

表 2 储层物性参数

储层	厚度 (m)	渗透率 (mD)	流度系数 ($mD \cdot m/mPa \cdot s$)
1	1.4	5.6	9.22
2	2.3	10.4	28.14
3	1.6	12.4	23.34
4	3.4	8.3	33.20
5	15.2	10.8	193.13
6	1.8	4.3	9.11

根据物性参数, 直井、斜井用总的流度系数, 按照前面的回归公式, 可以求得单位生产压差下的产量, 再乘以生产压差便能得到单井的日产量。水平井可以考虑为水平段打在主力层位, 即第 5 小层, 上面的 4 个小层可以按斜井来计算其产量, 计算的结果如下。

表 3 不同井型的产量

井型	不压裂		压裂	
	产量 (m^3/d)	备注	产量 (m^3/d)	备注
直井	56.15	水平井主力层产量为 $136.5 m^3/d$	111.23	水平井主力层产量为 $329.51 m^3/d$
斜井	59.70		127.22	
水平井	155.44		348.44	

根据以上结果可以看出, 在不压裂的情况下, 直井和斜井难以满足海洋单井产量 $80m^3/d$ 的要求, 压裂后的产量大大增加, 能够满足生产要求。因此, 从产能的角度去考虑, 可以采用水平井或压裂直井、斜井、水平井的开发方式进行开发。

四、结论

通过以上的研究, 可以得到以下结论:

(1) 斜井的产能略大于直井, 水平井产能大大增加;

(2) 压裂井的产能大大增加, 比压裂前增加近一倍;

(3) 利用油田的干扰系数校正后得到的单位压差下的产能, 可快速预测任一储层不同井型在压裂和不压裂情况下的单井产量, 为编织开发方案提供有利的依据;

(4) 根据油田对单井产能的要求, 利用上面的结果, 可以选择合适的井型进行开发, 对油田的实际开发具有现实的指导意义。

参考文献

- [1] 陈武, 邓川南, 钟雨师等. 油气田开发单井经济产能界限模型研究 [J]. 钻采工艺, 2007, 30(4): 62-63, 77.
- [2] 郭晶晶, 张烈辉, 王海涛等. 双孔介质油藏多层合采油井产能分析 [J]. 石油学报, 2011, 26(6): 705-712.
- [3] 罗天雨. 异常高压油藏注采井单井产能方程研究 [D]. 成都: 西南石油学院, 2003.53-55.
- [4] 黄勇, 李春兰, 程林松等. 低渗透油藏垂直裂缝井产能评价新方法 [J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(1): 99-101.
- [5] Cinco-Ley H, Ramey Jr H J and Miller F G. 1975, Pseudo-skin Factors for Partjally-Penetrating Directionally-Drilled Wells, PaPer SPE 5589.56-58.
- [6] 陈元千. 水平井产量公式的推导与对比 [J]. 新疆石油地质, 2008, 29(1): 68-71.
- [7] 宁正福, 韩树刚, 程林松等. 低渗透油气藏压裂水平井产能计算方法 [J]. 石油学报, 2002, 23(2): 68-71.
- [8] 李大建, 牛彩云, 吕亿明等. 低渗透油藏两层合采油井层间干扰分析 [J]. 西部探矿工程, 2012, 12: 20-23.
- [9] 刘洪杰. 常规油藏多层合采层间干扰系数确定新方法 [J]. 石油地质与工程, 2013, 27(5): 80-82.
- [10] 王峙博, 黄爱先, 魏进峰. 薄互层油藏层间干扰数值模拟研究 [J]. 石油学报, 2012, 34(9): 247-250.
- [11] 王跃文, 卢双舫, 方伟等. 多层合采产能配比的算法研究及应用 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(6): 630-634.
- [12] 张哲. 蒸汽吞吐合理开发界限研究 [J]. 特种油气藏, 2003, 10(3): 60-63.

作者简介:

周强, 1986 年生, 男, 硕士, 油气田开发工程专业, 主要从事油藏工程、渗流力学、数值模拟和压裂酸化体系及助剂方面的研究及研发工作。