

文章编号: 0253-2697(2004)01-0074-05

水平缝四点井网整体压裂裂缝参数优化设计

张士诚¹ 温庆志¹ 王凤和² 张国良²

(1. 石油大学 北京 102249; 2. 大庆油田有限责任公司 黑龙江大庆 163710)

摘要: 大庆长垣内部油田经三次加密调整后,部分区块采用四点法面积井网布井,由于井距小、地下油水关系复杂,为了实施水力压裂增产改造,必须选择合适的裂缝参数,以避免油井过早被水淹。为此,针对四点井网以及水力压裂后形成水平裂缝的特点,结合萨南油田表外储层的地质特征,建立了水平缝整体压裂改造后油水井生产动态预测模型,以整体压裂改造后的增产量、采出程度和经济效益为目标,进行了裂缝参数(裂缝半径、导流能力)优化研究。该研究成果在萨南油田实际应用取得了较好的增产效果和经济效益,为这类油田整体压裂改造裂缝参数优化设计提供了理论依据。

关键词: 四点井网; 水平裂缝; 压裂; 裂缝参数; 优化; 经济评价

中图分类号: TE357.1 文献标识码: A

Optimization design of integral fracturing parameters for four-spot well pattern with horizontal fractures

ZHANG Shi-cheng¹ WEN Qing-zhi¹ WANG Feng-he² ZHANG Guo-liang²

(1. University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Daqing Oil Field Company, Limited, Daqing 163710, China)

Abstract: After employed tertiary infilling, four-spot well pattern has been applied in part of blocks in Changyuan interior of Daqing Oil-field. Due to the close well spacing and complicated oil-water relationship in the reservoir, it is necessary to choose some appropriate fracture parameters during hydraulic fracturing, in order to avoid premature water breakthrough in oil wells. Aiming at the characteristics of horizontal fractures formed in four-spot well pattern by using hydraulic fracturing and according to the geologic features of non-tabulated reservoirs in Sanan Oilfield, a production model for predicting operation of oil and water wells was build up. With the purpose of increase in oil production, oil recovery and economic benefit, some fracture parameters such as radium and conductivity were optimized. The better stimulation and economic benefits have been achieved in Sanan Oilfield. The result can provide theoretical references to the optimization of fracture parameters in integral fracturing stimulation in such kind of oil field.

Key words: four-spot well pattern; horizontal fracture; integral fracturing; fracture parameter; optimization; economic evaluation

整体压裂改造技术是低渗透注水开发油田高效开采的有效方法,实施整体压裂改造的关键之一是对裂缝参数的优化。迄今为止,人们对五点井网和反九点井网垂直裂缝整体压裂裂缝参数优化设计已开展了大量研究工作,并取得了一定的研究成果。而对于四点井网,由于其布井方式的特殊性,对其进行整体压裂优化研究比较困难,再加上所研究的区块为水平缝,所以与此有关的研究成果也很少。大庆长垣内部油田经三次加密调整后,部分区块采用四点法面积注水井网。由于井网的特殊性和裂缝参数优化的复杂性,为了确定合理的压裂规模,有必要进行四点井网裂缝参数优

化。为此,建立了四点井网布井方式下整体压裂的物理模型和数学模型。结合经济评价模型,优化出区块的最优导流能力和缝长比(单翼缝长与井距的比值),现场应用取得了较好的效果。

1 产量模型的建立^[1~7]

根据大庆长垣内部油田的油藏特点和产生水平裂缝的特征,建立了油藏与裂缝的物理模型和数学模型;由人工裂缝和油藏之间的接触壁面满足压力相等和流量相等的原理,建立了裂缝和油藏之间的内边界交换条件。

基金项目:国家“九五”科技攻关项目(95-109-01-06-02)部分研究成果。

作者简介:张士诚,男,1963年11月生,1989年毕业于石油大学(北京),获工学硕士学位,现为石油大学(北京)石油天然气工程学院教授,主要从事低渗透油田增产机理的教学与科研工作。E-mail:wzsc@bjpeu.edu.cn

1.1 物理模型

水平缝都是以井轴为中心向外发展的, 从俯视图上看, 呈圆饼状。物理模型中将水平裂缝在水平面上的投影简化成正方形, 这样在数值模拟过程中, 与地层有共同的网格走向, 可采用共同的坐标系, 有利于网格的划分和差分方程的建立。

在建模时, 将地层及裂缝看作两个相对独立的系统, 两者之间通过地层向裂缝内的窜流量联结起来。模型中的计算模块取地层厚度的 $1/2$, 不计地层内流体从水平方向流入裂缝的流量(因为裂缝的宽度很小), 只考虑地层流体从纵向上流入裂缝的流量。

四点井网单元水平裂缝与地层关系的示意图见图1。

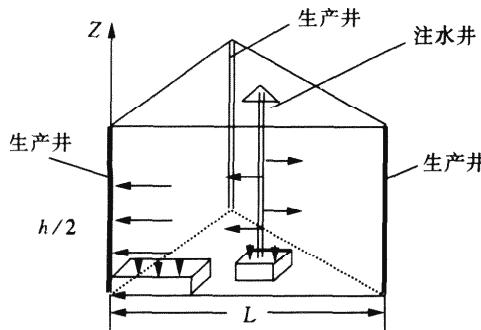


图1 四点井网单元水平裂缝与地层关系示意图

Fig.1 The sketch map of relationship between horizontal fracture and reservoir in four spot well net

实际计算时, 为了消除边界的影响, 选择有代表性的计算单元(图2)。

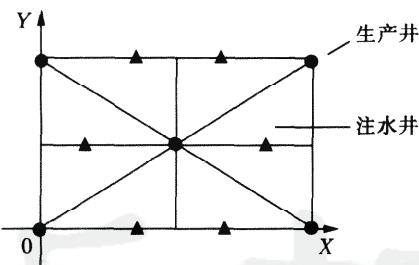


图2 四点井网计算单元示意图

Fig.2 The sketch map of calculated cell for four spot well net

1.2 数学模型

1.2.1 油藏模型

假设条件: ①油藏为三维油、水两相流动, 油层呈水平状; ②油藏为非均质, 渗透率各向异性; ③地层和流体均为微可压缩, 且压缩系数保持不变; ④因为油层薄(1m左右), 渗透率相对较高($0.1\mu\text{m}^2$), 忽略重力和毛管力的影响。

运动方程:

油相为

$$\vec{V}_o = - \frac{K \cdot K_{ro}}{\mu_o} \nabla p_o \quad (1)$$

水相为

$$\vec{V}_w = - \frac{K \cdot K_{rw}}{\mu_w} \nabla p_w \quad (2)$$

连续性方程:

油相为

$$\operatorname{div}(\rho_o \vec{V}_o) = - \frac{\partial(\rho_o \phi S_o)}{\partial t} \quad (3)$$

水相为

$$\operatorname{div}(\rho_w \vec{V}_w) = - \frac{\partial(\rho_w \phi S_w)}{\partial t} \quad (4)$$

把运动方程代入连续性方程得渗流方程。

油相为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_{mx} K_{rom} \rho_o}{\mu_o} \frac{\partial p_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_{my} K_{rom} \rho_o}{\mu_o} \frac{\partial p_m}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_{mz} K_{rom} \rho_o}{\mu_o} \frac{\partial p_m}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_o \phi_m S_{om}) \end{aligned} \quad (5)$$

水相为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_{mr} K_{rwm} \rho_w}{\mu_w} \frac{\partial p_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_{my} K_{rwm} \rho_w}{\mu_w} \frac{\partial p_m}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_{mz} K_{rwm} \rho_w}{\mu_w} \frac{\partial p_m}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi_m S_{wm}) \end{aligned} \quad (6)$$

辅助方程如下:

$$S_o + S_w = 1.0 \quad (7)$$

$$p_o = p_w \quad (8)$$

$$K_{ro} = K_{ro}(S_o) \quad (9)$$

$$K_{rw} = K_{rw}(S_w) \quad (10)$$

$$\phi = \phi_o [1 + C_f (p - p_o)] \quad (11)$$

$$\rho_l = \rho_l^0 [(1 + C_i (p - p_o))] \quad (12)$$

式中 K_{rom} 和 K_{rwm} 分别为地层油、水相对渗透率; ρ_o 和 ρ_w 分别为油、水相压力; μ_o 和 μ_w 分别为地下油、水粘度; S_o 和 S_w 分别为地层油、水饱和度; ρ_o 和 ρ_w 分别为地下油、水密度。 C_f 为地层综合压缩系数; C_i 为流体弹性压缩系数; K_{mx} 、 K_{my} 、 K_{mz} 分别为 X 、 Y 、 Z 方向地层的渗透率; p_m 为地层压力; ϕ 为孔隙度。

1.2.2 裂缝模型

假设条件: ①裂缝为水平缝, 俯视图形状为正方形; ②裂缝是均质的, 裂缝渗透率各向同性; ③考虑裂缝导流能力随生产时间的失效性; ④裂缝中流体的流动为达西流动。

油相方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h_f \frac{K_f K_{rof} \rho_o}{\mu_o} \frac{\partial p_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_f \frac{K_f K_{rof} \rho_o}{\mu_o} \frac{\partial p_f}{\partial y} \right) + q_{of} + q_{omf} = h_f \frac{\partial}{\partial t} (\rho_o \phi_f S_{of}) \quad (13)$$

水相方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h_f \frac{K_f K_{rwf} \rho_w}{\mu_w} \frac{\partial p_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_f \frac{K_f K_{rwf} \rho_w}{\mu_w} \frac{\partial p_f}{\partial y} \right) + q_{wf} + q_{wmf} = h_f \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi_f S_{wf}) \quad (14)$$

式中 K_f 为裂缝渗透率; K_{rof} 、 K_{rwf} 分别为裂缝内油、水相对渗透率; q_{of} 、 q_{wf} 分别为裂缝内油、水流流量; q_{omf} 、 q_{wmf} 分别为从地层流入裂缝的油、水流流量。

在计算过程中考虑了裂缝的失效性, 即水力裂缝导流能力在油田开发过程中是不断降低的。假设裂缝宽度不变, 则裂缝渗透率随时间逐渐减小, 其效果是一样的。由大庆长垣内部油田大量的生产数据回归出渗透率随时间变化的表达式为

$$K_f = K_{f0} \cdot e^{-bt} + K_0 \quad (15)$$

式中 K_f 为压裂后某生产时刻的裂缝渗透率; K_{f0} 为压裂后裂缝渗透率的初始值; t 为生产时间; b 为导流能力衰减系数(因井而异); K_0 为地层渗透率。

辅助方程为

$$S_{of} + S_{wf} = 1.0 \quad (16)$$

$$p_{of} = p_{wf} \quad (17)$$

1.2.3 油藏边界条件和初始条件

(1) 油藏外边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = 0, \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中, 对四点井网有

$$L_x = \sqrt{3} \times L_y$$

(2) 油藏内边界条件:

油井定压生产油井井底流压为

$$p_{wf}(r_w, t) = C_1 \quad (19)$$

水井定压注入时水井井底压力为

$$p_{wfi}(r_w, t) = C_2 \quad (20)$$

水井定量注入时水井注入量为

$$Q_w(r_w, t) = C_3 \quad (21)$$

裂缝计算单元示意图见图 3。

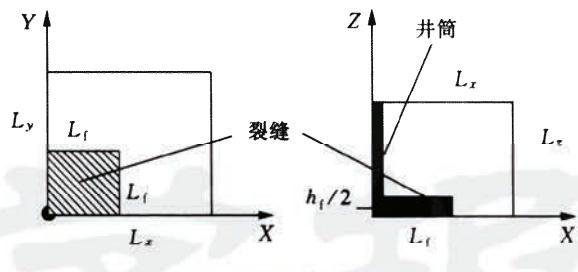


图 3 裂缝计算单元示意图

Fig.3 The sketch map of calculated cell for the fracture

(3) 裂缝外边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_f}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial p_f}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \\ \frac{\partial p_f}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \frac{\partial p_f}{\partial y} \Big|_{y=L_f} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$z = W_f/2$ 处, 有

$$Q_{mi} = Q_{fi} \quad p_m(i, j, k) = p_f(i, j)$$

式中 Q_{mi} 和 Q_{fi} 为裂缝与油藏之间对应网格块的流量交换量。

(4) 裂缝内边界条件:

$$\text{采油井} \quad p_{wf} \Big|_{x=0} = C_1 \quad (23)$$

$$\text{注水井} \quad p_{wfi} \Big|_{x=0} = C_2 \quad (24)$$

(5) 油藏和裂缝初始条件:

油藏和裂缝内初始压力和含水饱和度分布。

油藏模型为

$$p_m(x, y) \Big|_{t=0} = p_i \quad S_w \Big|_{t=0} = S_{wi} \quad (25)$$

裂缝模型为

$$p_f(x, y) \Big|_{t=0} = p_i, S_{wf} \Big|_{t=0} = S_{wi} \quad (26)$$

式中 p_i 为原始地层压力; S_{wi} 为初始含水饱和度。

1.2.4 网格划分

裂缝与油藏是一个相互联系、相互制约的整体, 在网格划分时, 采用统一的网格系统划分裂缝和油藏, 即接触面处两个系统的网格相同, 相互对应统一(图 4)。

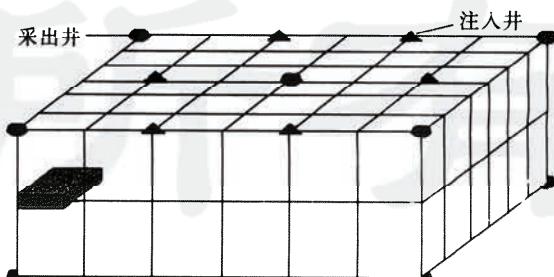


图 4 四点井网网格划分示意图

Fig.4 The sketch map of gridding for four spot well net

1.2.5 方程的求解

分别对地层和裂缝渗流方程进行差分, 采用

IMPES方法求解,即稳式求解压力,显式求解饱和度,得到地层和裂缝内的压力、饱和度分布,进而计算油、水井的产量和生产动态等。

2 经济评价模型的建立

采用增量法对改造方案的增产效果进行了评价。以其中未进行压裂或某一规模的压裂方案为基准方案,其他方案与之比较,计算改造后的增量现金流,然后根据增量现金流进行增量效果指标计算。为了更清晰地确定改造项目是否可行,评价指标采用增量分析指标中的增量净现值(NPV_d)。评价指标的计算式为

$$NPV_d = \sum_{t=0}^n [-k_t + (CI'_{2t} - CI'_{1t}) - (CO'_{2t} - CO'_{1t})] \cdot (P/F, i_0, t) + (s_2 - s_1)(P/F, i_0, n) \quad (27)$$

式中 k_t 为第 t 年的改造投资; CI'_{2t} 为改造方案第 t 年的现金流人(不含转让收入和期末资产残值回收); CI'_{1t} 为无措施方案第 t 年的现金流人(不含转让收入和期末资产残值回收); CO'_{2t} 为改造方案第 t 年的现金流出(不含改造投资); CO'_{1t} 为无措施方案第 t 年的现金流出(不含改造投资); s_2 为改造方案在 n_1 年末的

资产残值; s_1 为无措施方案在 n_1 年末的资产残值; n 为项目寿命期; i_0 为基准折现率。

由于进行改造和不进行改造均具有相同的原有资产,因此,在进行增量现金流计算时相互抵消,不必进行原有资产的估价,大大地减小了计算量。

若增量净现值 $NPV_d > 0$, 则从经济效益角度考虑可以进行改造。由于油田现场的油井生产是已经存在的, 即无措施方案已经通过总量效果评价, 因此没有必要进行绝对效果检验。只要通过相对效果检验, 证明压裂增产改造比不改造效益好即可。

3 实例计算

3.1 裂缝参数优化

利用水平缝四点井网整体压裂优化软件, 对大庆油田萨尔图某区块的 10 口生产井进行了历史拟合, 并预测了 8 口生产井的日产量。计算结果与现场实际曲线具有很好的一致性。以其中的南 2-4-丙 450 井的历史拟合结果及经济评价结果为例说明了四点井网压裂参数优化效果评价方法(南 2-4-丙 450 井地层参数、生产和压裂参数见表 1、表 2。)

表 1 南 2-4-丙 450 井地层参数

Table 1 Stratum parameters of the N2-4-B450 Well

参数名称	地层厚度 /m	地层渗透率 / μm^2	原始地层压力 /MPa	岩石孔隙度	原油密度 /(kg·m ⁻³)	地层压缩系数 /(MPa ⁻¹)	原油压缩系数 /(MPa ⁻¹)	地层水压缩系数 /(MPa ⁻¹)
参数值	2.30	0.083	10.32	0.246	861.8	0.0084	0.006	0.0044
参数名称	表皮系数	初始含水 饱和度	残余油 饱和度	原油体积 系数	原油粘度 /mPa·s	地层水密度 /(kg·m ⁻³)	地层水粘度 /mPa·s	
参数值	16.0	0.111	0.333	1.118	2.1	1000	0.8	

表 2 南 2-4-丙 450 井生产及压裂参数

Table 2 Production and fracture parameters of the N2-4-B450 Well

参数名称	井径 /m	生产井井底流压 /MPa	定压注水流压 /MPa	油井缝长比	水井缝长比	裂缝宽度 /m
参数值	0.10	5.0	12.0	0.25	0	0.0035
参数名称	裂缝内渗透率 / μm^2	导流能力 衰减系数	开始压裂时间 /d	井间距 /m	X 方向网格数	Y 方向网格数
参数值	30	0.0124	1200	156	30	30

从图 5 可以看到, 计算产量与实际产量比较一致, 证明本文建立的水平缝压裂井裂缝参数优化模型是正确的。为了优选出合理的压裂规模和裂缝参数, 根据现场实际选取不同裂缝半径和导流能力进行计算, 计

算结果如图 6。

从图 6 可以看到, 如果以采出程度为优化目标, 对某一给定的裂缝导流能力存在一个最佳的裂缝半径(缝长比), 超过该值时随裂缝半径的增加采出程度反

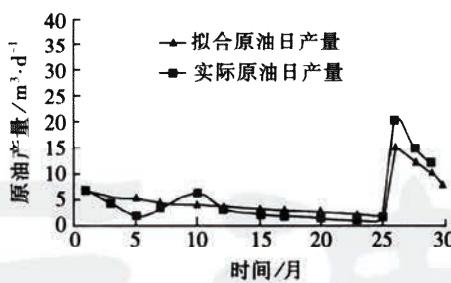


图5 南2-4-丙450井日产量拟合曲线

Fig.5 The simulated curve of daily output for the N2-4-B450 Well

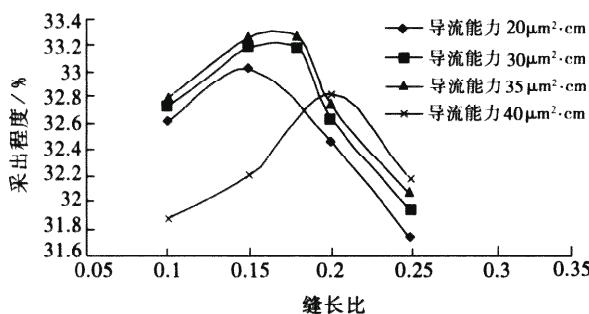


图6 缝长比和导流能力优化曲线

Fig.6 The optimum curve of fracture length to width ratio and conductivity

而降低。同时也可以看出,对于给定的地层条件,同样也存在一个最佳的裂缝导流能力,超过该值时采出程度也下降。因此对于该区块,存在一个合理的裂缝参数组合(导流能力为 $35\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 、缝长比为0.18),这也符合优化结果和研究目标。

3.2 经济评价计算

根据四点井网中南2-4-丙450井的地质资料和压裂施工的各项施工参数,利用四点井网数值模拟结果,预测出该油井在无增产措施和实施压裂增产措施两种情况下的日产量与时间关系曲线。以综合含水率达到98%为经济极限指标,应用增量法进行评价,可以得到生产井压裂与不压裂两种情况下的经济效益,如表3所示。

表3 南2-4-丙450井压裂增产措施的经济评价结果

Table 3 The result of economic evaluation for fractured N2-4-B450 Well

井号	年份	不压裂	压裂	不压裂	压裂	ΔNPV	$\Sigma \Delta NPV$
		产油量 /t	产油量 /t	NPV /(万元)	NPV /(万元)	/(万元)	/(万元)
南2-4-丙450	第1年	346.10	1504.8	13.85	53.3	39.47	39.465
	第2年	266.90	477.13	9.492	17.1	7.61	47.076
	第3年	213.31	119.76	6.735	4	-2.73	44.342

从表3中可以看出,南2-4-丙450井压裂后要比

不压裂多获得47.076万元的净现值,说明进行压裂的措施得当。第1年和第2年内,压裂比不压裂时的净现值大,表明压裂有效。到了第3年,压裂时净现值比不压裂时小,表明压裂已经失效。

4 结论

(1) 建立了四点井网油、水井水平裂缝的三维两相油藏数值模拟模型,研究了大庆长垣油田四点井网注水开发压裂井产量预测方法,为四点井网压裂优化设计奠定了基础。

(2) 利用编制的计算程序,对四点法井网中实施压裂增产措施的油井进行了原油日产量历史拟合和预测,其结果与实际生产动态具有很好的一致性,说明建立的数值模拟模型和计算软件是正确的。

(3) 数值模拟研究结果表明,油井的日产油量、采出程度、水井的注水量等开发指标与地层参数和裂缝参数有关,而且随地层渗透率、厚度、裂缝导流能力、注采压差等参数的增加而增加;随裂缝导流能力衰减系数、井距、压裂时间的增加而减小。对给定的区块优化的裂缝导流能力为 $35\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 、裂缝缝长比为0.18。

(4) 利用建立的四点井网压裂经济评价模型,结合实际压裂井的生产动态,研究了裂缝参数对经济评价指标的影响。经济评价结果与生产动态评价结果具有很好的一致性,并可作为优化长垣油田四点井网压裂井裂缝参数的依据。

参考文献

- [1] 蒋廷学,王宝峰.整体压裂优化方案设计的理论模式[J].石油学报,2001,22(5):58-62.
- [2] 王鸿勋,张士诚.水力压裂设计数值计算[M].北京:石油工业出版社,1998:202-228.
- [3] Gidley J L, Holditch S A, Dalee Nierode, 等.水力压裂技术新发展[M].蒋闻,等译.北京:石油工业出版社,1995:16-26.
- [4] 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.
- [5] 王鸿勋.水力压裂原理[M].北京:石油工业出版社,1987:94-112.
- [6] 韩大匡,陈钦雷,闫存章.油藏数值模拟基础[M].北京:石油工业出版社,1993:6-45.
- [7] Heber Cinco. Evaluation of hydraulic fracturing by transient pressure analysis methods[C]. SPE 10043, 1982:639-665.