

文章编号: 0253-2697(2006) 04-0081-04

复杂断块油藏不规则井网整体压裂优化设计

甘云雁¹ 张士诚¹ 陈 利¹ 苗 宏² 张帅仟¹

(1. 中国石油大学石油天然气工程学院 北京 102249; 2. 中原油田 河南濮阳 457001)

摘要: 建立了低渗透复杂断块油藏复杂地应力条件下的不规则井网优化模型,以驱油面积和采出程度为目标函数,考虑了任意裂缝方位与井网的匹配关系。在运用油藏数值模拟方法确定了压裂井作用椭圆边界,采用 Matlab 编程求解,得到了数学问题的 2 个最优解。在此基础上,应用大型油藏数模软件 Eclipse 建立实际油藏模型。以最高采出程度、采油速度为目标,优选出最佳井网方案。该模型应用于中原油田某井区的井网调整,取得了较好的生产效果。

关键词: 复杂断块油藏;复杂地应力;不规则井网;椭圆边界;数值模拟;优化模型

中图分类号: T E357.11

文献标识码: A

Optimization design of integral hydraulic fracturing for skewed patterns in low permeability complex faulted reservoir

Gan Yunyan¹ Zhang Shicheng¹ Chen Li¹ Miao Hong² Zhang Shuaiqian¹

(1. Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Zhongyuan Oilfield, Puyang 457001, China)

Abstract: The optimization model for skewed patterns in low permeability complex faulted reservoir under the condition of complicated field stress was established. The sweep area and oil recovery were taken as the target functions of the model, and the matching relationship between orientation of arbitrary fractures and well patterns were considered in the model. The ellipse boundary of a fractured well was determined by the numerical simulation method. The model was solved with the Matlab programming, and two optimal solutions of mathematical problem were obtained. A real reservoir model was built up by Eclipse reservoir simulation software. This model was used to adjust well patterns in Zhongyuan Oilfield, and the preferable production effectiveness were achieved. This model is also suitable for other complex faulted reservoirs.

Key words: complex faulted reservoir; complicated field stress; skewed pattern; ellipse boundary; numerical simulation; optimum model

在以往复杂断块油田的开发中,大都采用滚动勘探开发的方式进行。由于复杂断块油藏地应力分布与常规油藏有很大差别,造成其地层中各点的最大主应力方向不一致,因此受水平最大主应力方向控制的水力裂缝的延伸方向也就随之不同。如果在油藏滚动勘探开发的过程中进行水力压裂增产,若在初期布井时未曾考虑到裂缝方位的影响,压裂后就很难形成有效的注采系统,会使增产效果不佳。甚至由于注入水沿裂缝发生窜流,使已有生产井发生暴性水淹。根据国内外众多断块油藏勘探开发的经验表明,对复杂断块油藏大都采用不规则井网、不规则注采方式进行开采^[1-3]。笔者考虑到裂缝方位与井网的匹配关系,对不规则井网的不规则性做了大量的研究工作。

1 复杂断块油藏不规则井网优化模型的建立

复杂断块油藏是指含油面积小于 1 km^2 的断块油藏,其地质储量占油田总储量的 50% 以上^[4]。将此类油藏细分为如下两类: 区块内已有井(如对老区块的调整或是区块中已存在探井); 区块中未布任何井(全新区块)。由于裂缝的延伸方向主要受水平最大主应力方向的影响,所以又可根据地应力分布规律将上述两种类型进一步细分。

基本假设如下:

(1) 油藏形状为任意平面三角形。

(2) 油藏内各点地应力方向已知;地应力数据构

基金项目: 国家“十五”重大科技攻关项目(2003BA613A-07-06)部分成果。

作者简介: 甘云雁,女,1980 年 8 月生,2002 年毕业于石油大学(北京),现为中国石油大学(北京)在读博士研究生,主要从事低渗透油田增产机理研究工作。E-mail: ganyunyan2004@yahoo.com.cn

成 (x, y, α) 的离散数据点格式。其中, x 和 y 分别代表地层中任意点的横、纵坐标; α 代表该点最大水平主应力的方向, 它可充分体现地应力分布规律。对于复杂断块油藏, 其值各不相等。对于常规油藏, 其值几乎相等。

(3) 区域内需布置的井均为生产井, 且各井均实施压裂。

(4) 裂缝方向完全沿地层最大主应力方向延伸, 不存在偏转。

(5) 各井压裂后所形成的裂缝长度相同。

(6) 裂缝井的泄油边界为规则椭圆。

三角形复杂断块油藏中存在 n 个点(n 的理论值趋于无穷, 但在该模型的建立中 n 值沿用有限元地应力建模分析时的节点数)。根据假设, 裂缝井形成的泄油边界为简化椭圆, 其大小和形状可根据油藏数模的方法确定。由于裂缝方位完全沿地层水平最大主应力方向延伸, 所以椭圆的长轴与水平方向的夹角也就随水平最大主应力方向而确定。又因为由有限元方法对地层进行三维地应力场反演分析可以得到油藏中各点地应力方向, 所以只要选定油藏中的点, 以该点为中心的椭圆就可以确定(图 1)。

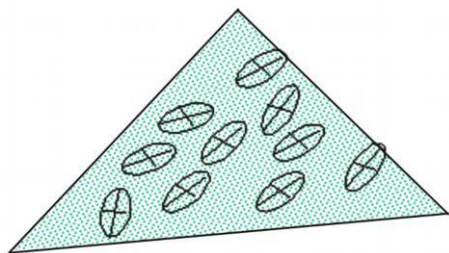


图 1 井网优化模型示意图

Fig. 1 The sketch map of optimization model of well pattern

目标函数的确定: 通过优化区域内点的位置和个数(即井位和井数), 使得在所有椭圆都不相交的前提下, 椭圆面对给定区域的覆盖面积最大, 即油井对整个区块的驱油面积最大、死油区最小。

该模型可以扩展到以下情况: 模型仅考虑了复杂断块油藏为任意三角形, 对于四边形、五边形和圆形情况, 本模型也适用, 只须改变外边界条件即可实现。

模型中假设所钻井均为生产井, 但是可在未被椭圆面覆盖的较大区域内布置注水井(即内部不规则点状注水)。假设注水井的注水边界所形成椭圆的长、短轴值与油井的长、短轴值不相同, 即在给定区域内用大小、形状不同的两类椭圆去覆盖。改变模型中的裂缝长度, 计算不同缝长下布井方案的生产指标, 通过优选指标高的方案来达到优化缝长的目的。

2 裂缝井泄油边界椭圆的确定^[5-6]

由于用现代渗流力学解析方法还难以确定裂缝井泄油边界的椭圆, 因此, 采用了油藏数值模拟的方法来确定。椭圆的大小、形状主要受裂缝长度、裂缝内导流能力、生产时间、生产压差和地层渗透率等多因素控制, 对该 5 种因素进行了详细分析(其中, 椭圆的形状用其长短轴的比值来表示; 在长短轴之比确定的前提下, 大小可用椭圆长轴长度来近似表示)。

2.1 计算模型的建立

假设油藏为油水两相渗流及矩形封闭边界的均质油藏, 中心一口采油井压裂。运用 Eclipse 进行模拟计算研究^[4]。模拟参数: 地面水、原油质量分别为 1000 kg/m^3 和 870 kg/m^3 ; 油藏水、原油粘度分别为 $0.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 和 $1.7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; 岩石压缩系数为 $5.648 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$; 原始油藏压力为 16.18 MPa , 井筒半径为 0.14 m 。

2.2 影响因素分析^[17]

(1) 时间及缝长的影响 假设生产压差为 10 MPa , 地层渗透率为 $0.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 裂缝导流能力为 $40 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 。计算结果表明, 在相同的时间内, 缝长越长长轴越长, 长、短轴之比越大。即缝长越长, 椭圆越大, 单井泄油面积就越大。随时间的增加, 椭圆长轴增加, 长、短轴之比却逐渐减小, 且逐渐接近 1。因为随时间的增加, 单井作用边界虽逐渐扩大, 但在边界上受裂缝的影响却越来越小, 所以边界上的椭圆就越接近圆, 其长短轴之比也就接近 1。当时间为 1 年后椭圆的大小和形状的变化范围均较小, 说明此时压裂生产达到拟稳定状态。

(2) 缝长及地层渗透率的影响 假设生产压差为 10 MPa , 裂缝内导流能力为 $40 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$, 计算压裂后投产 1 年的情况发现, 在相同缝长下, 地层渗透率越高, 椭圆长轴越长, 长、短轴之比越小。随缝长的增加, 椭圆长轴和长、短轴之比都随之增加。

(3) 生产压差及缝长、时间的影响 假设地层渗透率为 $0.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 裂缝导流能力为 $40 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 。计算结果发现, 在相同的缝长和时间下, 生产压差几乎对椭圆大小和形状不产生影响。

(4) 缝内导流能力的影响 假设地层渗透率为 $0.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 裂缝长度为 100 m , 生产压差为 10 MPa , 计算压裂后投产 1 年的情况发现, 对于低渗透油藏, 当裂缝内导流能力大于 $25 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 时, 椭圆的大小和形状几乎不再受导流能力的影响。

由此可见, 椭圆的大小、形状虽受缝长、缝内导流能力、时间、地层渗透率和生产压差多个因素的影响, 但生产压差和导流能力对其影响甚小, 缝长和时间对

其影响较大,地层渗透率次之。对于确定的油藏区块,地层渗透率已知,当该油藏地应力不太复杂时,也可大致确定缝长。

在复杂断块油藏井网模型中,要求各压裂井形成的泄油边界椭圆不相交,因而时间因素的选择在此就显得尤为重要。在时间因素影响的计算结果中发现:当压裂投产 1 年后,椭圆的大小、形状随时间的变化均较小,压裂生产达到拟稳定状态。因此,选定压裂投产 1 年后最为合适。

3 井网优化模型的求解

复杂断块油藏井网优化模型的求解是一个极其复杂的问题,这是因为:模型中要求所有椭圆都不相交,即椭圆 1 上的点到椭圆 2 的点的距离之和大于等于长轴;所有椭圆对给定区域的覆盖面积最大,即在给定区域内布置最多的不相交的椭圆也即选点最多。

运用 Matlab 编程求解^[8]。画出给定区域内可能布置的所有椭圆(图 2)。根据椭圆与 3 条边界的

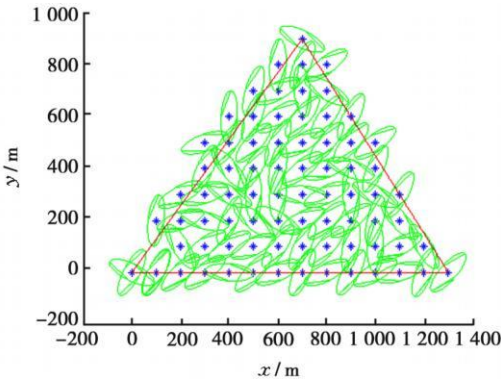


图 2 区域内所有椭圆分布

Fig. 2 Distribution of all ellipses in study area

相交情况,删除与边界相交的所有椭圆(对区域内椭圆的相交情况,从三角形的顶点出发依次判断,若椭圆 1 上的点到椭圆 2 的点的距离之和小于长轴,则说明椭圆 1 上的该点落在椭圆 2 内,两椭圆相交,删除椭圆 2);依次判断 2 个椭圆之间的位置关系,最终得到所有不相交的椭圆(图 3)。

由图 3 可见,运用该方法筛选得到的结果并不理想,一些较好的椭圆也被删除了,出现较大的区域内无椭圆覆盖的情况,因而采用了以下改进方法:保留与边界相交且落在区域内椭圆面积大于落在区域外椭圆面积的椭圆。通过记录每个椭圆与其他椭圆的相交次数,然后逐次删除与其他椭圆相交最多的椭圆,称为改进方法(图 4);或运用矩阵来表示 2 个椭圆的相交关系,相交的记为 1,不相交的记为 0,通过对矩阵的处理来删除相交椭圆,最终得到所有不相交的椭圆,称为改进方法(图 5)。

通过对不规则井网模型的求解可确定椭圆的位置,进而初步确定不规则井网的井点位置。从数学角

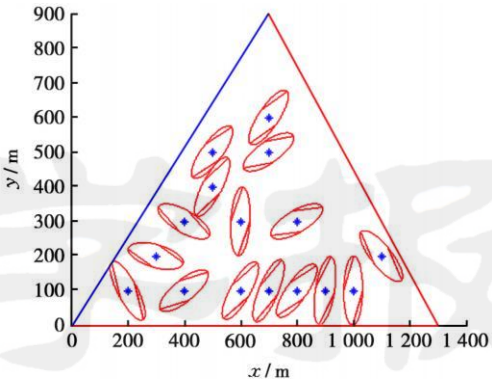


图 3 试算方法优选结果

Fig. 3 The optimum result of test

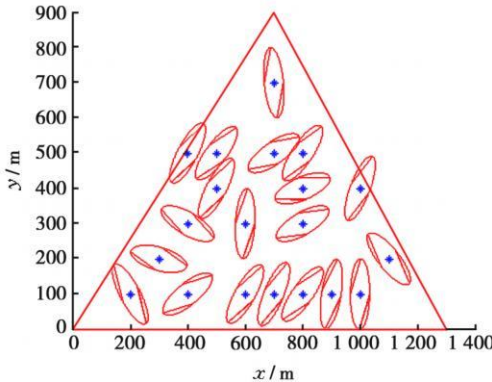


图 4 用改进方法 删选结果

Fig. 4 The result of the first improvement method

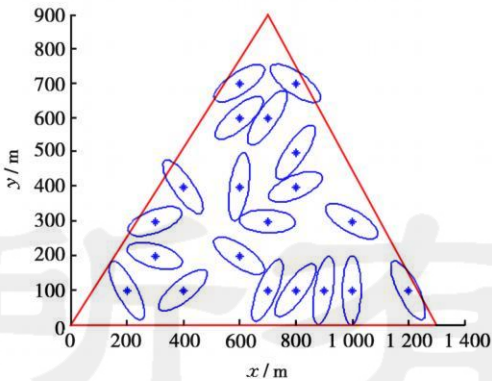


图 5 用改进方法 删选结果

Fig. 5 The result of the second improvement method

度分析这两种方法的求解结果都是问题的最优解,但是不规则井网实际布置的井点位置是唯一的,所以应借助油藏数模的方法,以采出程度、采油速度最高为目标,优选出最佳井网方案。

4 井网优化模型的现场应用

为了验证不规则井网优化模型的正确性和可行性,

选定中原油田某井区进行了现场试验。该井区原有采油井 2 口, 注水井 1 口, 含油面积为 0.29 km^2 , 标定地质储量为 $18 \times 10^4\text{ t}$, 可采储量为 $4.3 \times 10^4\text{ t}$, 采油速度为 0.65% , 水驱采出程度为 19.3% 。由于注采井网不完善, 采油速度和水驱采出程度均较低。运用井网优化模型对该井区现有井网进行了调整和完善, 从而提高该井区的采油速度和最终水驱采出程度。该井区原有井网布置如图 6 所示(紫色三角形区域为所选重点研究区域)。

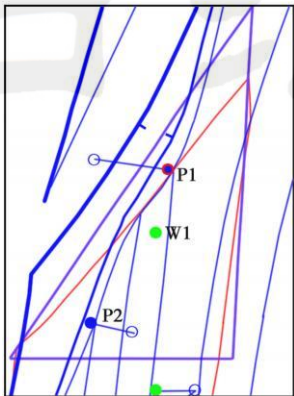


图 6 中原油田某井区原有井网布置
Fig. 6 A well pattern of zhongyuan Oilfield

该井区属于模型建立中对油藏细分的第一类, 即已存在基础井网的情况, 不规则井网优化模型仍然适用。在部署调整井网之前, 将已有井生产所形成的椭圆布置在给定区域内, 然后用给定椭圆去覆盖剩余面积。

4 1 裂缝井椭圆大小和形状的确定

该井区地层平均渗透率为 $3.5 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$, 油井压裂后缝长约为 85 m , 水井缝长约为 70 m , 生产压差为 9 MPa , 裂缝导流能力约为 $35\text{ }\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$, 调整井网时间为压裂投产后 1 年。将以上参数代入油藏模型中, 计算得到压裂后油、水井边界椭圆的大小和形状。压裂油井泄油边界椭圆长轴为 230 m , 短轴为 170 m ; 压裂水井注

水边界椭圆长轴为 190 m , 短轴为 150 m 。
4 2 方案的初步调整
运用井网优化模型, 根据改进方法得到该井区的两种不同最优方案(图 7)。

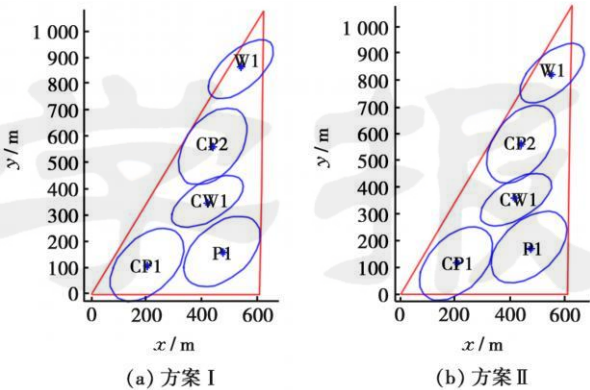


图 7 中原油田某井区井网改进最优方案
Fig. 7 The optimum well patterns of an area in zhongyuan Oilfield

由于给定区域已存在 3 个椭圆, 用采油井椭圆对剩余区域进行覆盖后, 在区域顶部还有不小的区域未被椭圆覆盖。此时若用油井椭圆去覆盖, 则落在区域外的椭圆面积较大。选择了用水井的椭圆去覆盖, 浪费面积较小。

虽然用不同数学方法优选出了该问题的 2 个最优解, 但对于实际油藏只能采用一套井网调整方案。因此, 对 2 种方案筛选可以通过建立实际油藏模型进行生产预测, 优选出生产指标高的方案, 作为最终该井区的井网调整方案。

4 3 井网调整方案的优选

对该井区建立了实际油藏模型, 通过模拟计算, 对 2 套方案进行了优选。其调整方案的采出程度、采油速度计算结果与原布井方案的计算结果进行了对比(表 1)。

表 1 井网调整前后生产指标对比

Table 1 The production target reference before and after adjustment of well pattern

年 份	调整前/%		用方案 调整/%		方案 调整/%	
	采油速度	采出程度	采油速度	采出程度	采油速度	采出程度
1994	0.176822	0.405556	0.176822	0.405556	0.176822	0.405556
1995	0.168635	0.792333	0.168635	0.792333	0.168635	0.792333
1996	0.092916	1.005444	0.092916	1.005444	0.092916	1.005444
1997	0.11382	1.2665	0.113820	1.2665	0.11382	1.2665
1998	0.39911	2.181889	0.399109	2.181888	0.39911	2.181888
1999	1.369331	5.322555	1.369330	5.322553	1.369331	5.322553
2000	0.947573	7.495889	0.947573	7.495889	0.947573	7.495889
2001	0.754208	9.225723	0.754207	9.225722	0.754208	9.225722
2002	1.050902	11.63605	1.050902	11.636051	1.050903	11.636052
2003	0.922137	13.75104	0.92219	13.751232	0.922228	13.751254
2004	1.209188	16.52441	1.209523	16.525368	1.209601	16.525568
2005	1.041617	18.91344	1.042575	18.916595	1.04267	18.917014
2006	0.863087	20.893	1.314203	21.930822	1.3143	21.93147

$$E_A = 1.8949M^{-0.2357} - 0.6247\lambda + 0.114\sin\theta - 1.2443 \quad (3)$$

4 结 论

(1) 油水流量比、水平井的穿透比及水平井与水平方向的夹角对五点法水平井与直井联合井网的波及系数有较大的影响。

(2) 五点法水平井与直井联合井网见水时刻的波及系数与油水流量比呈幂函数关系。3 种不同联合井网见水时刻的波及系数都随油水流量比的增大而减小。波及系数与穿透比呈直线关系。波及系数随水平井穿透比的增加而呈直线递减。在相同的条件下, 五点法联合井网见水时刻的波及系数要大于七点法和九点法的波及系数。

(3) 当油水流量比小于 5 时, 3 种联合井网的波及系数随流量比的增大而急剧减小; 当油水流量比大于 5 时, 波及系数随流量比的增大而缓慢减小。

(4) 对于五点法井网, 波及系数随夹角 θ 的增大而减小。对于七点法和九点法井网, 波及系数随夹角的增大而增大。

(上接第 84 页)

由表 1 中可见, 该井区井网调整后的采油速度和水驱采出程度都有了一定程度的提高。通过不规则井网优化模型得到的该井区的调整方案能够获得较好的生产效益, 可以运用于现场试验。

4.4 现场实施效果评价

2005 年 3 月中原油田根据井网调整优选方案所提供的井点位置, 布置了相应的采油井, 获得了较好的生产效果。截至 2005 年 9 月, 该井区采油速度提高了 0.66%, 采出程度提高了 1.46%。

5 结 论

(1) 建立了低渗透复杂断块油藏在复杂地应力条件下不规则井网优化模型, 以驱油面积和采出程度为目标函数, 充分考虑了任意裂缝方位与井网的匹配关系, 为低渗透复杂断块油藏不规则井网的部署提供了依据。

(2) 将压裂井的作用边界简化处理为椭圆, 用椭圆面去覆盖给定的油藏区域。采用不同数学方法, 得到该模型数学问题的不同最优解, 通过建立实际油藏模型, 以最高采出程度、采油速度为目标优选出最佳井

参 考 文 献

- [1] 万仁溥. 水平井开采技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 115-160.
- [2] 姚军, 李爱芬, 陈月明, 等. 盒状砂岩油藏中水平井试井分析方法[J]. 石油学报, 1997, 18(3): 105-109.
- [3] 武兵厂, 姚军, 张继宏, 等. 水平井与直井联合井网见水时间的确定方法[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 111-114.
- [4] 阿库利申 A И. 油气田开发预测[M]. 周成勋, 孙志道, 译. 北京: 石油工业出版社, 1993: 68-88.
- [5] 法兹雷耶夫 P Т. 油田面积注水[M]. 杨寿山, 译. 北京: 石油工业出版社, 1989: 51-83.
- [6] 奥尔诺夫 B С. 油田注水开发设计与分析[M]. 申中辉, 译. 北京: 石油工业出版社, 1982: 147-169.
- [7] 秦同洛, 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 250-266.
- [8] 姜汉桥, 姚军, 刘慧卿. 油藏工程原理与方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 17-30.
- [9] 曲德斌, 葛家理, 王德民. 水平井与直井联合面积分布的开发理论(一)[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(1): 35-40.
- [10] 曲德斌, 葛家理, 王德民. 水平井与直井联合面积分布的开发理论(二)[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(2): 47-51.

(收稿日期 2005-07-30 改回日期 2005-11-18 编辑 孟伟铭)

网方案。

(3) 将该模型运用于现场实践, 取得了较好的生产效果。

参 考 文 献

- [1] 程世铭, 张福仁. 东辛复杂断块油藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 98-101.
- [2] 李幼琼. 文明寨极复杂断块油藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 71.
- [3] 李宗信, 李幼琼, 彭鹏商. 复杂断块油田滚动开发技术研究[J]. 断块油气藏, 1995, 2(3): 24-28.
- [4] 余守德. 复杂断块砂岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 1-2.
- [5] 张义堂, 刘慈群. 垂直裂缝井椭圆流模型近似解的进一步研究[J]. 石油学报, 1996, 17(4): 71-77.
- [6] 邓英尔, 刘慈群. 两相流体椭圆渗流数学模拟与开发计算方法[J]. 石油学报, 1999, 20(5): 48-53.
- [7] 杨能宇, 张士诚, 王鸿勋. 整体压裂水力裂缝参数对采收率的影响[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 70-76.
- [8] 尹泽明, 丁春利. 精通 Matlab 6[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 111-210.

(收稿日期 2005-08-31 改回日期 2005-11-02 编辑 孟伟铭)