

油层改造及修井工艺技术论文集

主 编	王新纯	
副主编	王秀臣	王世贵
	王家齐	兰中孝
	岳湘刚	



石油工业出版社

油层改造及修井工艺

技术论文集

主 编 王新纯
副主编 王秀臣 王世贵 王家齐
兰中孝 岳湘刚

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书收集了砂岩油田油层改造技术及修井工艺技术等方面论文共 40 多篇。论述了低渗透油层压裂、压裂施工参数的优化设计、人工裂缝形态研究、聚合物驱储层压裂效果研究、注水井压裂效果评价方法研究、注聚井措施前注入状况诊断方法研究、压裂液技术性能研究、非常规压裂技术研究、固体硝酸粉末酸化技术,以及压裂的合理经济界限研究等油层改造技术。同时,阐述了深部取套技术、管外窜槽封窜技术、多点套损井长井段密封加固修复技术、气井修井技术、小通径套损井打通道技术、套损井侧钻定向井挖潜技术及高砂比多层压裂管柱研究、化学堵水管柱研究等修井及采油工艺技术。

本书适合于从事油田开发的工程技术人员、管理人员及有关院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

油层改造及修井工艺技术论文集/王新纯主编.

北京:石油工业出版社,2001.4

ISBN 7-5021-3347-X

I. 油…

II. 王…

III. ①砂岩油气田-油层改造-研究-文集

②砂岩油气田-修井-研究-文集

IV. TE35-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 20215 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 350 千字 印 1—700

2001 年 4 月北京第 1 版 2001 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3347-X/TE·2507

定价: 27.50 元

目 录

全三维模型对人工裂缝形态的数值模拟及影响因素分析	王秀臣	王文军	郑东红	(1)
低渗透油田注水井压裂的数值模拟研究	王文军	庞宗艳	王 微	(5)
压裂施工参数的优化与经济评价	李志恩	侯德林	刘 萍	张跃宏 (10)
油井压裂前后产量递减规律预测方法研究	张有才	相荣成	姚海晶	石常兰 董建华 (16)
水平人工裂缝条件下滤失系数的解释方法	曾 林	李志恩	郭立平	(19)
低渗透垂直裂缝油田开发压裂方案研究	张有才	相荣成	李志恩	张国亮 (23)
喇嘛甸油田人工裂缝形态预测与判断			张安富	(28)
裂缝诊断技术的应用	刘 鹏	许 佳	唐 涛	袁菁华 (31)
水平裂缝参数对油井生产动态的影响		相荣成	张有才	(36)
萨中油田聚合物驱储层压裂改造效果的几点认识	张安富	吴邦英	杨庆春	(40)
注水开发过程中影响地应力及人工裂缝形态的因素分析			王文军	(43)
注水井压裂效果评价方法研究	王秀臣	王文军	庞宗艳	王 微 (46)
注聚井措施前注入状况诊断方法研究	岳湘刚	王文军	张国亮	于 英 (55)
大庆油田压裂液油层保护技术研究及应用	赵茹皓	张国亮	崔福林	(63)
提高压裂一次成功率的技术措施	侯德林	姚海晶	兰乘宇	(68)
喇嘛甸油田压裂高效井地质规律的认识			石常兰	(72)
大庆低渗透油田压裂技术的应用	张安富	侯德林	王复丽	樊文忠 姜亚玲 (76)
储层裂缝监测技术在大庆油田的应用	许 佳	张安富	王 微	刘 鹏 (84)
影响压裂效果的因素分析及技术对策	李 敏	张跃宏	蔡春梅	王复丽 (88)
大庆探区火山岩储层压裂改造影响因素分析	刘春利	罗明辉	刘 鹏	袁菁华 (93)
大庆油田非常规井压裂技术的研究与发展	王家齐	赵恩远	班 丽	(98)
全三维压裂优化设计程序在实际中的应用	李志恩	王文军	郑东红	(105)
压裂改造中胶囊破胶剂的性能研究	赵茹皓	王宪辉	张红军	(109)
高效压裂工艺技术在外围油田的应用	兰乘宇	侯德林	张旭升	肖景禄 刘 鹏 (113)
优化布孔方案提高限流法压裂改造效果	董建华	张有才	张永春	刘 鹏 侯 峰 (118)
水平缝端部脱砂压裂工艺技术及其应用	张旭升	侯德林	王凤和	董建华 侯 峰 (125)
聚驱油井压裂后出砂原因分析	张红军	王文军	张永春	石常兰 于 英 (129)
聚驱井压裂后防砂技术的研究与应用			石常兰	王文军 张永春 (134)
控制压裂增油低效井的技术措施	南志学	王 微	石常兰	姚海晶 (138)
新一代无聚合物压裂液	王家齐	樊文忠	赵茹皓	易丽萍 穆 兰 (145)
提高扶杨油层压裂改造效果途径的探讨	夏玉民	姚海晶	李 敏	王康菁 (149)

聚合物注入井压裂措施效果的影响因素分析	王文军	张国亮	王凤和	王宪辉 (154)
均衡压裂开发技术在大庆油田的应用前景	樊文忠	石常兰	易丽萍	穆 兰 (159)
压裂液中铁离子伤害机理的研究	赵茹皓	张国亮	孟晓春	(167)
葡萄花油田储层保护探讨	曹辉辉	尹仲鹰	周新宇	彭妮妮 (171)
大庆油田高含水后期套损井修复技术的应用与发展	兰中孝	赵恩远	田友仁	(179)
5 1/2"套管井深部 (900m) 取换套工艺技术研究与实践				
.....	赵恩远	徐延军	夏玉民	张兴福 朱大力 (184)
关于确定深层取套合理套铣参数的几点认识	兰中孝	赵恩远	王久民	(188)
中深部取套钻井液的研制与应用	张海龙	田友仁	曹辉辉	周新宇 彭妮妮 (191)
密封加固技术的配套发展与完善	夏玉民	兰中孝	刘士军	张广明 王康菁 (195)
多点套损井长井段密封加固修复技术研究	兰中孝	王久民	王彦兴	李 霞 (199)
大庆油田封窜技术的研究与应用	井瑞泉	张国亮	郭美玲	(202)
5 1/2"套损井侧钻定向井挖潜技术	兰中孝	赵恩远	田友仁	李春华 郝东奎 (207)
化学堵水管柱的研究与应用	陈建业	王康菁	李 霞	倪云峰 (212)

全三维模型对人工裂缝形态 的数值模拟及影响因素分析

王秀臣 王文军 郑东红

摘 要 本文对全三维水力压裂模型进行了介绍,对求解方法进行了讨论,应用全三维水力压裂模拟程序对人工裂缝进行了动态模拟,通过大量的计算拟合,对影响裂缝形态的主要因素进行了分析。

前 言

以往对水力压裂的模拟应用多是基于二维或拟三维模型进行的,由于假定缝高为常数,流体在缝内做一维流动,以及缝内截面为椭圆,因此拟和的误差很大。随着计算机速度的提高以及各种新的测试手段的出现,全三维压裂模型已由原来仅限于理论研究的范围,而走向了现场应用设计。本文利用全三维模型对裂缝形态进行了动态模拟,并对影响模拟结果的因素进行了分析,为更好地应用全三维模型指导压裂设计、施工提供了准备。

一、全三维模型的建立

在近十多年里,国内外学者分别建立了各自的全三维模型。这些全三维模型都是按三维弹性问题考虑裂缝的张开,缝内流体沿裂缝面按两维流动处理。其中,Gu, Yew 等人建立的模型利用有限元的方法求解缝宽方程和流动方程,并引入了临界强度作为判断断裂的准则,从而降低了方程奇异性的阶数,提高了数值解法的精度和效率。本文应用的模型就是在Gu—Yew 模型基础上发展来的,仅从弹性变形方程、两维液体流动方程和裂缝扩展条件等方面进行论述。

1. 裂缝的三维弹性方程

建立全三维裂缝模型的弹性方程的假设条件为:①假设地层是无限大、各向同性、均质的线弹性体;②各层之间弹性模量的变化影响忽略不计;③裂缝假设为一垂直于最小水平主应力方向的平面垂直裂缝;④裂缝在足够深的地层中产生,从而忽略地表自由表面的影响。

设裂缝如图 1 所示,由于作用在裂缝面 A 上的法向应力从初值 $\delta_{zz}(x, y, 0)$ 上升为压裂液的流动压力 $p(x, y, t)$,从而引起地层内应力场和位移场的变化。设裂缝面上的剪力为零,反映裂缝面上法向应力与裂缝宽度之间关系的积分方程为:

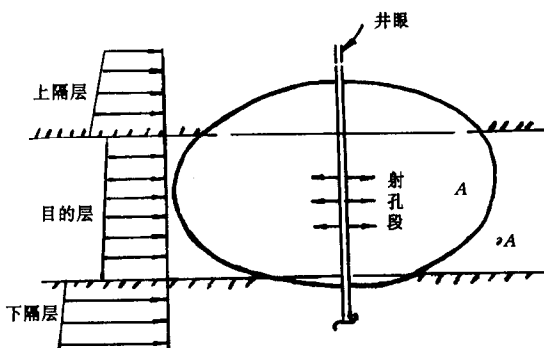


图 1 水力压裂裂缝形成示意图

$$p(x, y, t) - \delta_{zz}(x, y, 0) = Ee \iint \nabla' W \cdot \nabla (1/R) dA' \quad (1)$$

边界条件为:

$$W(x, y, t) | \partial A = 0 \quad (2)$$

引入试函数 $V(x, y)$, 使其在裂缝域 A 上连续且满足边界条件:

$$V(x, y) | \partial A = 0 \quad (3)$$

对 (1) 式两边同时乘以试函数 $V(x, y)$, 在裂缝域上积分:

$$\int_A \Delta p V(x, y) dx dy = -Ee \iint_A \frac{1}{R} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial x'} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial W}{\partial y'} \right) dx' dy' dx dy \quad (4)$$

积分存在的条件是: $W(x, y)$ 连续, 因此在数值离散时可采用简单的公式。

2. 二维液体流动方程

压裂过程中压裂液在裂缝内部的流动被理想化为不可压缩幂律流体在两个基本平行的孔隙壁之间的层流。根据综合滤失系数及滤失时间 (从裂缝面与压裂液接触的时刻算起) 来确定压裂液通过孔隙壁的滤失速度。基本方程在裂缝宽度上积分出裂缝内部压裂液两维流动方程为:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = -q_1 \frac{\partial W}{\partial t} + q_r \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \eta' \left[\frac{|q_x|}{W^2} \right]^{n_1-1} \cdot \frac{q_x}{W^3} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \eta' \left[\frac{|q_y|}{W^2} \right]^{n_1-1} \cdot \frac{q_y}{W^3} = \rho F_y \quad (7)$$

3. 裂缝扩展的判据

全三维模型中采用线弹性力学的准则作为裂缝扩展的判据。裂缝扩展的边界条件是: 扩展点处的应力强度因子 K_I 大于等于岩石的临界强度因子 K_{IC} , 即

$$K_I < K_{IC} \quad \text{裂缝不扩展}$$

$$K_I \geq K_{IC} \quad \text{裂缝扩展}$$

临界强度因子 K_{IC} 是裂缝扩展所需的缝端处应力场的量度, 该值可由室内实验确定, 裂缝边界上任意点的应力强度因子为:

$$K_I = \frac{G}{2(1-\nu)} \left(\frac{2\pi}{r} \right)^{1/2} W(x, y) \quad (8)$$

二、全三维模型的求解

对于上述全三维理论模型, 应用有限元数值计算方法进行求解。为求解 $W(x, y)$ 的数值解, 把裂缝面划为三角元。边界处划为四边形网格单元, 经数值离散后, 裂缝宽度被表示为结点缝宽 $W_j(x_j, y_j)$ 与试函数 $\varphi(x, y)$ 的线性组合:

$$W(x, y) = \sum W_j \varphi_j(x, y)$$

将上式代入 (4) 式, 令 $V = \varphi_j(x, y)$, 则得到了 (4) 式的矩阵形式:

$$[A]\{W\} = \{f\} \quad (10)$$

可以看出, 矩阵 $[A]$ 是对称且对角优势的。

同理, 应用变分原理可将流动方程写为:

$$(D + C_1 T)(p - p_f) = -0.5T \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{n}{p} \quad (11)$$

在各个结点上联立 (10) 式和 (11) 式, 迭代求解就可以求出各个结点处的缝宽和流量。

利用根据上述模型和解法编制的全三维计算和绘图程序对表 1 中所给的某井的压裂施工进行了计算, 给出了裂缝的动态三维几何形态 (见表 2), 根据施工中 8m 厚夹层未穿的实际情况, 可以看出符合实际。同时可以看出, 利用全三维程序计算的结果, 可以判断是否有压窄的危险, 从而指导制订合理的施工方案。

表 1 A 井 1000.8~1005.8m 层段全三维压裂设计输入参数

地 层 参 数	孔隙度 %	有效渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	弹性模量 MPa	泊松比	断裂韧性 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$	油层压力 MPa
	15.1	20.0	29400	0.265	1.1	9
	地层温度 $^{\circ}\text{C}$	地层比热容 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	导热系数 $\text{W}\cdot\text{m}/^{\circ}\text{C}$	伤害半径 m	伤害渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	闭合压力 MPa
	50	1.586	1.013	0.0	0.0	16.1
	目的层厚 m	上隔层厚 m	下隔层厚 m	目的层应力 MPa	上隔层应力 MPa	下隔层应力 MPa
	5.0	8.6	13.6	0.0	18.0	18.1
压裂液参数	压裂液 名称	基液粘度 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	稠度系数 $\text{mPa}\cdot\text{s}^n$	流态指数	比热容 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	导热系数 $\text{W}\cdot\text{m}/^{\circ}\text{C}$
	胍胶	42	1.47	0.5	4.187	1.145
支撑剂参数	支撑剂 名称	粒径 mm	视相对密度	比热容 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	导热系数 $\text{W}\cdot\text{m}/^{\circ}\text{C}$	真密度 kg/m^3
	石英砂	0.4~0.8	1.7	1.34	0.978	2.65

表 2 裂缝动态基本参数

序号	泵注时间 min	下半缝高 m	上半缝高 m	裂缝半长 m	最大缝宽 mm	井底净压 MPa	液体效率 %
1	0.85	3.34	3.33	39.15	3.30	10.487	44.7
2	1.66	3.59	3.59	56.76	3.88	11.771	41.7
3	2.53	3.82	3.82	69.37	4.46	12.981	39.5
4	3.66	4.06	4.06	79.82	4.92	13.804	38.0
5	4.69	4.32	4.32	90.75	5.25	14.284	36.8
6	5.64	4.53	4.53	99.55	5.49	14.575	35.8
7	6.76	4.78	4.77	109.05	5.80	14.950	34.8
8	7.90	5.06	5.06	119.41	6.00	15.075	33.6
9	8.75	5.36	5.35	130.21	6.17	15.136	32.5
10	9.57	5.59	5.58	137.90	6.27	15.112	31.6
11	10.73	5.81	5.80	145.44	6.36	15.105	30.3
12	12.01	6.03	6.02	152.76	6.48	15.157	29.2
13	13.23	6.20	6.20	159.89	6.61	15.260	28.5
14	14.56	6.43	6.42	169.59	6.82	15.469	27.8
15	15.86	6.60	6.60	176.17	6.97	15.578	27.4
16	16.35	6.69	6.69	179.16	7.05	15.657	27.2

三、影响因素分析

1. 压裂液滤失系数的影响

压裂液滤失是影响裂缝形态的重要因素, 随着综合滤失系数的增加, 裂缝的长度近似线性降低, 而裂缝宽度和高度降低程度趋于缓慢。

2. 隔层地应力差值的影响

隔层地应力差值是影响裂缝高度和长度的又一个重要因素，对高度控制起主要作用。随着应力差值的变小，裂缝高度增加，缝长减小；而且应力差值越小，其对缝高的影响也越显著。当应力差值较大时，裂缝被限制在目的层延伸，这种情况下，二维压裂设计中，可以用目的层厚度代替裂缝高度来近似计算裂缝尺寸。

3. 杨氏模量、泊松比的影响

杨氏模量增大，裂缝的长度减小，缝高变化不大。对于杨氏模量小的地区，裂缝长度有延伸的趋势。泊松比对裂缝形态的影响相对较小，泊松比大的区域，对缝高的控制较为有利。

四、结 论

①本文对水力压裂的全三维模型进行了介绍，对求解方法进行了研究，从理论上讲，全三维模型比以往的二维、拟三维模型更能真实地反映裂缝形成的物理过程。

②从理论拟合和实际计算的结果看，全三维压裂程序计算结果符合压裂原理，并能达到一定的精度，其裂缝尺寸，尤其是裂缝高度的模拟，对压裂施工具有重要的指导意义。

③通过影响因素分析可以看出，滤失系数、隔层应力、杨氏模量、泊松比等参数对计算结果都有不同程度的影响，取准各项参数是取得较好模拟的先决条件。

参 考 文 献

- [1] Abou-Sayed, A. S and Clifton, R. J: "A Variational Approach To Prediction of the Three-Dimensional Geometry of Hydraulic Fractures" SPE/DOE 9879.
- [2] J.L. 吉德利. 水力压裂技术新进展. 北京: 石油工业出版社, 1995

低渗透油田注水井压裂的数值模拟研究

王文军 庞宗艳 王 微

摘 要 本文介绍了一种油水两相三维油藏裂缝数值模拟模型,可以在不同井网条件下对垂直裂缝油藏注水井压裂效果进行数值模拟。文中以朝阳沟油田为例,对反九点法井网条件下,在裂缝处于有利方位和不利方位的时候,不同裂缝参数对注水井压裂后的注入动态以及对应油井的生产动态的影响进行了分析,并与油田的实际生产动态进行了对比。本文的研究成果为注水井压裂效果评价提供了一种手段,对于经济有效地进行低渗透油田注水开发具有一定的指导意义。

前 言

实践证明区块整体压裂是开发低渗透油田的有效方法,合理的水力裂缝方位和裂缝参数对经济有效地开发低渗透油田是非常重要的。以往的研究都是只针对油井进行的,但注水井压裂同样会影响整体开发的效果。

通过油水两相三维油藏裂缝数值模拟模型,可以对垂直裂缝油藏不同井网条件下注水井压裂效果进行数值模拟。

一、三维两相油藏数值模型及求解方法

在对黑油模型改进的基础上,建立了三维两相有裂缝的油藏数值模拟模型,可以对五点法井网(裂缝方位 0° 和 45°)和反九点法井网(裂缝方位 0° 和 45°)条件下,注水井压裂对井组单元内油水井生产动态的影响进行模拟研究。

1. 模型的基本假设

- ①油藏均质,各向同性,渗流为等温渗流。
- ②油藏内仅有油水两相渗流,地层压力大于饱和压力。
- ③油水不混溶。
- ④地层流体和岩石微可压缩。
- ⑤忽略毛管力作用。
- ⑥裂缝为两翼对称垂直缝,井眼和裂缝穿过压裂层,多井压裂裂缝方向一致。

2. 数学模型

流动方程考虑了重力和垂向的流动:

$$\nabla \cdot \left[\left(\frac{\rho_o^o K K_{ro}}{\mu_o} \right) \nabla \phi_o \right] + q_o = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_o^o \phi S_o) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left[\left(\frac{\rho_w^w K K_{rw}}{\mu_w} \right) \nabla \phi_w \right] + q_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w^w \phi S_w) \quad (2)$$

$$\phi_o = p_o + \rho_o g z$$

$$\phi_w = p_w + \rho_w g z$$

边界条件和初始条件:

分别考虑五点井网（裂缝方位 0° 和 45° ）、反九点井网（裂缝方位 0° 和 45° ）注采井都压裂的情况，见图 1 至图 4。

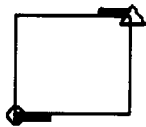


图 1 五点法井网裂缝方位与井排夹角 0°

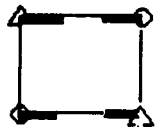


图 2 五点法井网裂缝方位与井排夹角 45°

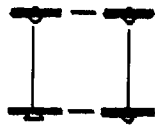


图 3 反九点法井网裂缝方位与井排夹角 0°

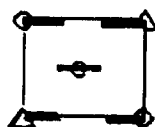


图 4 反九点法井网裂缝方位与井排夹角 45°

边界条件和初始条件如下

$$p(x, y, z, t) |_{\Omega_1} = p_{wf}$$

$$p(x, y, z, t) |_{\Omega_2} = p_{inj}$$

$$\frac{\partial p}{\partial \Sigma} |_{\Sigma \in f(x, y, z)} = 0$$

$$p(x, y, z, t) |_{t=0} = p_i$$

$$S_w(x, y, z) |_{t=0} = S_{wi}$$

上述模型中的一些辅助关系为

$$S_o + S_w = 1$$

$$K_{ro} = K_{ro}(S_w)$$

$$K_{rw} = K_{rw}(S_w)$$

$$\mu = \mu(p)$$

$$\rho = \rho(p)$$

3. 网格划分及差分求解

采用不均匀网格，裂缝单独作为一排网格，裂缝附近网格由小到大逐渐变化，纵向上按均匀网格划分，裂缝处理用二维模型（y 方向放大缝宽，相应减小缝内渗透率）。

使用 IMPES 法求解，计算过程中，方程左端达西项系数均取上一时间步的值，即做常数处理，等式右边按泰勒级数展开，取一级小量，通过方程合并，得到压力和饱和度方程，用隐式求解压力方程，解出压力分布后带入饱和度方程，求解每一层的注入量和采出量，累加后可得单井的注采量。

在上述理论模型的基础上，编制了注水井压裂后油水井动态数值模拟程序。

二、朝阳沟油田注水井压裂的数值模拟研究

朝阳沟油田是 1986 年投入开发的大庆外围低渗透油田，1987 年进入注水开发阶段，采用 300m 井距反九点法井网注水。为了强化注水，弥补地下亏空，1990 年以来开始对部分注水井进行压裂改造，见到了一定的增注效果。

针对朝阳沟油田的开发特点和油藏参数，应用垂直缝条件下油水井压裂数值模拟软件，在裂缝处于有利方位和不利方位的条件下，注水井压裂的不同裂缝参数对压裂后注入动态以及对应油井生产动态的影响进行了数值模拟研究，模拟过程中，油井的裂缝参数不变（穿透

比为0.3)。在整体裂缝参数研究的基础上,还针对单井的具体地层条件和裂缝参数,对注水井压前压后的注入动态进行了模拟,并与实际生产动态进行了拟合对比。

1. 朝阳沟油田油层和流体参数

有效厚度: 5.0m

有效渗透率: $8.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

有效孔隙度: 0.1924

地下油粘度: 12.5mPa·s

原油含油饱和度: 0.59

原始地层压力: 8.55MPa

地下水粘度: 0.34mPa·s

综合压缩系数: 0.00119MPa^{-1}

束缚水饱和度: 0.37

残余油饱和度: 0.25

井距 (井排距): 300m

生产井流压: 5MPa

注水井流压: 20.0MPa

2. 反九点法井网裂缝方位与井排夹角为 45°

对于反九点法井网,当人工裂缝夹角与井排夹角为 45° 时 (见图 5),裂缝处于有利的方向。不同裂缝穿透比下注水井注入动态变化的模拟结果表明:当裂缝穿透比为 0.1 时,压后日注入量就明显增加,从整个井组生产全过程考虑,计算到油井含水 98% 时,累计注水达 199000m^3 ,生产时间由 9500d 缩短到 7670d。因此,注水井压裂以后,可以明显地提高日注水量,从而

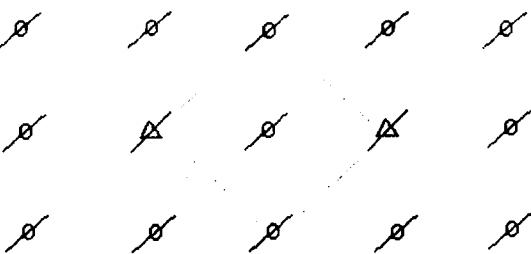


图 5 反九点井网裂缝方位与井排夹角为 45°

增加了水驱强度。另外,随着裂缝穿透比的增大,压裂增注的效果越来越接近,当穿透比超过 0.2 以后,模拟的注入动态曲线基本重合,说明继续增大压裂施工规模无益于增注效果提高。因此,对于注水井压裂,应以短缝为益,裂缝穿透比应控制在 0.2 以内。

注水井压裂后,井组单元内连通油井计算到含水 98% 时,生产动态变化的模拟结果表明:当注水井不压裂时,注水见效后边井稳定产能 5.6t/d,角井稳定产能 6.7t/d,计算到含水 98%,生产天数为 9500d,可采储量采出程度达 76%。当注水井压裂穿透比为 0.3 时,注水见效后边井稳定产能 9.5t/d,角井稳定产能 9.3t/d,计算到含水 98%,生产天数为 7510d,可采储量采出程度 77.1%。由此可见,由于注水井压裂后,增加了水驱强度,从而提高了油井的采油速度。另外,注水井压裂后,对边井和角井的影响程度不同,角井见水后油井产能下降较大。这主要是由于角井与裂缝在一条直线上,见水后,含水上升较快引起的。

3. 反九点法井网裂缝方位与井排夹角为 0°

当人工裂缝与井排夹角为 0° 时 (见图 6),不压裂和压裂后的注水井注入动态变化。与反九点法井网裂缝方位与井排夹角为 45° 时的情况相似。当裂缝穿透比为 0.1 时,压后日注

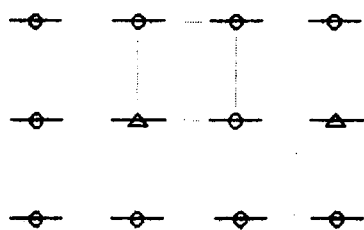


图6 反九点法井网裂缝
与井排夹角为 0°

入量就明显增加,从整个井组生产全过程考虑,计算到油井含水 98% 时,累计注水达 178000m^3 ,生产时间由 9010d 缩短到 6980d。但随着裂缝穿透比的增大,压裂增产的效果越来越接近。注水井压裂时也应短缝为宜,裂缝穿透比应控制在 0.2 以内。对于井组单元内连通油井,计算到含水 98% 时,生产动态变化的模拟结果可以看出,当注水井压裂时,边井角井的产能都比不压裂的情况增加,但各井增产的幅度有所不同,生产天数由 9010d 缩短到 6980d,可采储量采出程度 74.4%,比反九

点法井网裂缝方位与井排夹角为 45° 时的情况低。

由此可以看出,对于反九点井网油水井压裂的情况下,井组的采收率与裂缝方位和井排夹角的大小有关,方位角为 45° 时采收率最高。这是因为当裂缝与井排夹角为 0° 时,注水井裂缝与两口边井裂缝的压力梯度很大,而与其它井的压力梯度小,因而注水井波及的面积减少;当裂缝与井排夹角为 45° 时,注水井与边井、角井裂缝间的距离相当,注水井裂缝影响的范围大,波及面积增加,因而采收率增大。

4. 单井预测与拟合

根据朝阳沟油田裂缝形态监测的结果,裂缝方位与井排夹角在 $37.5^{\circ} \sim 45^{\circ}$ (见图 7),为了计算方便,按 45° 考虑,应用数值模拟软件对朝阳沟油田已压裂的注水井的压前压后注入动态进行了预测,并与实际动态进行了对比。

以朝 124-72 井为例,该井有效厚度 10.6m,平均有效渗透率 $9.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,稳定注水压力 13.8MPa,地层流体参数借鉴油田数据,该井 1988 年投注,1994 年全井压裂改造,共加 0.4~0.8mm 砂 25.8m^3 ,应用压裂设计软件预测平均支撑缝长 90m,平均缝宽 1.5mm。在此基础上,应用数值模拟软件预测注水井压前压后动态见图 8 和图 9。

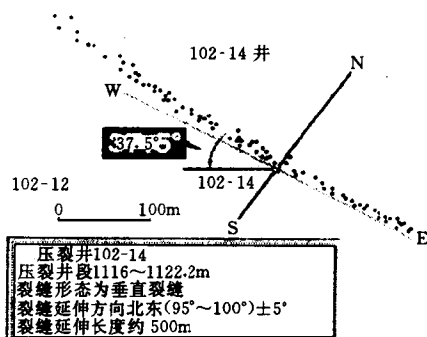


图7 朝阳沟油田裂缝方位检测结果

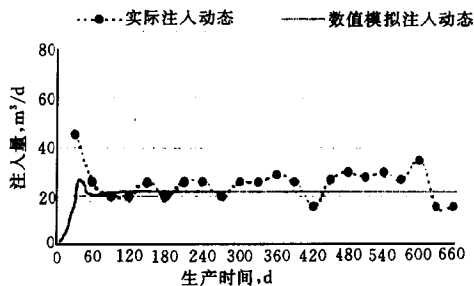


图8 朝124-72井压
前注入动态拟合

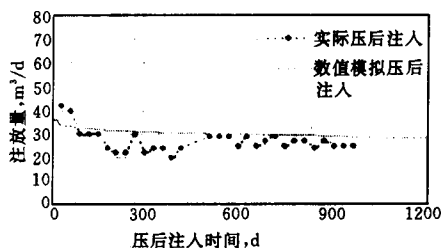


图9 朝124-72井压
后注入动态拟合

从图 8 和图 9 可以看出,压前压后程序预测注入动态与实际注水情况符合较好。现场应用该软件模拟预测 38 口井,平均符合程度达 75%。因此,可以利用该软件优化注水井压裂参数,预测注水井压后的注入动态。

三、结 论

通过对朝阳沟油田注水井压裂的数值模拟研究,可以得出以下认识:

①注水井压裂可以有效地提高注水井的注入能力,从而提高井组油井的产能,从开采的全过程讲,缩短了开采时间,提高了采油速度。

②对于注水井压裂,以短缝为宜,裂缝穿透比应控制在 0.2 以内。

③对于反九点井网油水井压裂的情况下,井组的采收率与裂缝方位和井排夹角的大小有关,裂缝方位角为 45° 时采收率最高。

④经现场实际资料验证,该方法可以用来预测注水井压后的注入动态,为注水井压裂参数优化提供了依据。

压裂施工参数的优化与经济评价

李志恩 侯德林 刘 萍 张跃宏

摘 要 本文依据萨南油田“八五”期间压裂井的实际资料,运用多元统计分析及多目标规划的理论和方法,建立起了一套经济有效的优化压裂设计方案,经现场验证,符合率达75%以上。

前 言

针对以往进行压裂施工设计的软件存在着很多地质参数无法获得,只能借鉴设计人员的经验进行设计,导致做出的压裂施工设计受地质参数和设计人员素质的影响较大,结果往往不够理想的实际情况。依据萨南油田“八五”期间压裂井的实际资料,从统计角度入手,运用多元线性回归及多目标规划的理论和方法,建立起了一套经济有效的优化压裂施工设计方案,预测出了压裂后的增产油量,并做出了相应的经济评价结果。经现场验证,比较符合实际的压裂增产效果,符合率达78.3%,达到了选用最佳的压裂施工设计方案和最少的投入取得最佳油层改造效果的目的。该数学模型可做今后进行压裂施工设计的重要参考依据。

一、压裂施工参数与其增油量的数学模型

目前压裂层施工参数的确定是根据压裂层的地质条件,以往实际压裂增油效果以及设备能力等条件决定的。为了寻求压裂层的施工参数(砂量、排量、砂比等)与压裂层增油量之间的客观规律,以便选取最佳施工参数使其增油量最大。这样,就需要建立施工参数与增油量的数学模型。由于施工参数较多,而且他们之间存在着相关关系,即共线或近似共线问题,又根据各施工参数对压裂后增油量的影响效果,选定了砂量、排量、砂比三个主要参数,研究建立这三个参数与增油量的数学模型。这里主要考虑三个参数与其初期增油量的数学模型,而三个参数与累计增油量的数学模型,可以通过初期增油量与累计增油量的相互关系模型间接得到。

1. 施工参数与其初期增油量的数学模型

(1) 数据的处理

施工参数砂量、排量、砂比与增油量的原始数据是从大庆油田采油二厂的现场记录整理得到的。因为施工参数与地质条件密切相关,我们把原有五个区块按地质条件(有效厚度、含水)又分成21个组,并建立了数据库。其中每一组地质条件看作是基本类同的,这样建模就减少了地质条件的影响。

从数据库调出的数据基本真实可靠,但不可避免混有不真实的异常数据(测试整理过程中读错、记错,测试仪器出现故障),这时若能将该数据剔除不用,就一定会更符合客观情况。在另一种情况下,一组正确数据的分散性,本来是客观地反映了特定条件下进行测试的随机波动特性,但为了得到精度更高的结果而人为地去掉一些误差大一点的但不属于异常的数据,则这样得到所谓分散很小、精度很高的结果,实质上是虚假的。这样,在整个测试数据中不能确定哪一个是异常数据。这时我们可用统计法判别。统计法的基本思想在于,给定

一置信概念,并确定一个置信限,凡超过这个界限的数据就认为它不属随机误差范畴,而从原始数据中剔除。

(2) 数学模型的选取

通过对实际数据的分析表明,砂量(x_1)、排量(x_2)、砂比(x_3)均与增油量(y)有密切关系,而且三个施工参数 x_1 、 x_2 、 x_3 又彼此相互独立,我们试图建立一个三元函数模型 $y=f(x_1, x_2, x_3)$ 。由于三元函数的种类繁多,给建模带来困难。我们从理论上探讨,任何曲线、曲面、超曲面问题,至少在一个有限范围内可以用多项式任意地逼近,所以在比较复杂的情况下,不管 x_1 、 x_2 、 x_3 与 y 的确切关系如何,均可直接用适当幂次的多项式拟合,而多项式幂次的选择是本着由低次到高次的方法,逐级地提高自变量的幂次配取多项式,一直配到前后两次的回归差方和的差异不显著为止,此时的幂次为多项式的合理幂次。

(3) 数学模型的优化

选取合理幂次的多项式回归模型之后,可以把其中的每一项看作是一个因子,但不意味着每个因子对 y 的影响都是重要的,而我们总想从多项式回归方程中剔除那些次要的、可有可无的因子,选取那些对 y 影响显著的因子,使模型更符合实际,进而增加模型的可靠性,提高模型的精度。

(4) 实际建模与计算

1) 异常数据的剔除

从数据库读出 GJZM200 组的原始数据共 20 个,由肖维勒准则,剔除 $y \leq 2$ 和 $y \geq 14$ 的 3 组数据,剩余的 17 组数据用于建模。

2) 模型的选取

我们选取三元二次完全多项式的回归模型,即

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3 \quad (1)$$

把(1)式线性化得

$$y = b_0 + b_1x'_1 + b_2x'_2 + b_3x'_3 + b_4x'_4 + b_5x'_5 + b_6x'_6 + b_7x'_7 + b_8x'_8 + b_9x'_9 \quad (2)$$

参数的估计,变量的剔除,模型的显著性检验等均按(2)式进行。

3) 模型的优化

由最小二乘法对(2)式回归方程进行回归系数的估计,然后给定 $F_{引} = 0.15$, $F_{剔除} = 0.15$ 对(2)式中不显著的变量 y'_5 , x'_7 给以剔除,得到如下模型

$$y = 7.40 - 18.84x'_1 + 36.94x'_2 + 1.86x'_3 + 0.65x'_4 - 6.02 \times 10^{-3}x'_6 + 0.37x'_8 - 1.53x'_9 \quad (3)$$

4) 模型地显著性检验

由微机上计算得到 $S_{剩} = 0.2045$, 剩余标准差 $S = \sqrt{S_{剩}/(n-10-1)} = \sqrt{20.45/(17-7-1)} = 1.5$ 。

$F = 18.80$, $F_{0.05}(7, 9) = 3.29$, $F > F_{0.05}(7, 9)$, 模型(3)高度显著,其复相关系数 $R = 0.96$ 。

5) 模型的实际精度

把(3)式还原成原来非线性模型为

$$y = 7.40 - 18.84x_1 + 36.94x_2 + 1.86x_3 + 0.65x_1x_2 - 6.02 \times 10^{-3}x_3^2 + 0.37x_1x_3 - 1.53x_2x_3 \quad (4)$$

把实际的施工参数 x_1, x_2, x_3 代入 (4) 式估计出测试值 y , 求得该层系平均误差为 16.77%, 满足实际要求的误差限。

其他组的数学模型建立基本类同, 我们把建模结果列于表 1。

表 1 施工参数与初期增油量的数学模型
(按地质条件分为 21 个层系)

模型名称	地质条件	数 学 模 型	F 检 验	复相关系数	平均误差
NJ1M1-1	$0 < HI \leq 0.8$ $0 \leq FWI \leq 0.2$	$y = 0.0026 - 0.93x_1 + 13.09x_2 + 0.17x_3$ $+ 0.05x_1^2 - 3.66x_2^2 - 0.0032x_3^2$	$F_{0.05}(6, 21) = 2.57$ $f = 20.95 > 2.57$	$R = 0.90$	23%
NJ1M1-2	$0 < HI \leq 0.8$ $0.2 < FWI < 1.0$	$y = 0.0022 + 3.58x_1 - 17.50x_2 + 1.02x_3$ $- 0.25x_1^2 + 10.21x_2^2 - 0.028x_3^2$ $- 2.40x_1x_2 - 0.40x_2x_3$	$F_{0.05}(9, 17) = 2.49$ $f = 17.04 > 2.49$	$R = 0.92$	20.6%
NJ1M1-3	$0.8 < HI \leq 1.4$ $0 \leq FWI \leq 0.2$	$y = -0.035 - 63.26x_1 + 14.54x_3 + 1.98x_1^2$ $- 0.034x_3^2 + 20.33x_1x_3 - 0.38x_1x_3$ $- 4.27x_2x_3$	$F_{0.05}(7, 20) = 2.51$ $f = 20.38 > 2.51$	$R = 0.92$	21.20%
NJ1M1-4	$0.8 < HI \leq 1.4$ $0.2 < FWI < 1.0$	$y = 0.0069 - 16.09x_1 + 63.68x_2 - 1.21x_3$ $- 1.08x_1^2 - 28.96x_2^2 + 0.0022x_3^2$ $+ 12.51x_1x_2 + 0.048x_1x_3 - x_3 - 0.20x_2x_3$	$F_{0.05}(9, 23) = 2.32$ $f = 11.27 > 2.32$	$R = 0.88$	19.7%
NJ1M1-5	$1.4 < HI \leq 6.1$ $0 < FWI < 0.2$	$y = 0.0026 - 1.37x_1 - 60.77x_2 + 4.33x_3$ $+ 1.03x_1^2 + 31.63x_2^2 + 0.0070x_3^2$ $- 4.00x_1x_3 - 1.54x_2x_3$	$F_{0.05}(9, 183) = 2.46$ $f = 9.89 > 2.46$	$R = 0.89$	19.7%
NJ1M1-6	$1.4 < HI \leq 6.11$ $0.2 < FWI < 1.0$	$y = 0.0066 - 24.73x_1 + 83.45x_2 - 0.44x_3$ $+ 0.41x_1^2 - 32.39x_2^2 + 0.034x_3^2$ $+ 7.61x_1x_2 + 0.12x_1x_3 + 0.58x_2x_3$	$F_{0.05}(9, 13) = 2.71$ $f = 9.06 > 2.71$	$R = 0.90$	22.8%
NJ2X-1	$0 < HI \leq 0.6$ $0 \leq FWI \leq 1.0$	$y = 0.00042 - 7.67x_2 + 12.1x_3 - 0.46x_1^2$ $- 3.18x_2^2 - 0.012x_3^2 + 3.12x_1x_2$ $- 0.06x_1x_3$	$F_{0.05}(7, 15) = 2.71$ $f = 30.29 > 2.71$	$R = 0.95$	19.5%
NJ2X-2	$0.6 < HI \leq 0.9$ $0 \leq FWI < 1.0$	$y = 0.00066 + 12.93x_1 - 26.61x_2 + 0.36x_3$ $- 0.078x_1^2 + 3.23x_2^2 - 0.027x_3^2$ $- 3.05x_1x_2 - 0.16x_1x_3 + 0.85x_2x_3$	$F_{0.05}(9, 17) = 2.49$ $f = 23.32 > 2.49$	$R = 0.94$	22.8%
NJ2X-3	$0.9 < HI$ $0 \leq FWI \leq 1.0$	$y = 0.00031 - 69.91x_1 + 115.96x_2 + 3.30x_3$ $+ 1.36x_1^2 - 23.96x_2^2 - 0.068x_3^2$ $+ 12.58x_1x_2 + 1.12x_1x_3 - 2.56x_2x_3$	$F_{0.05}(9, 10) = 3.02$ $f = 17.31 > 3.02$	$R = 0.95$	18.5%
NJ3X2-1	$0 < HI \leq 0.7$ $0 \leq FWI < 1.0$	$y = 0.000032 + 5.64x_1 - 8.08x_2 - 0.61x_3$ $+ 0.95x_1^2 + 6.03x_2^2 + 0.017x_3^2$ $- 4.88x_1x_2 - 0.22x_1x_3 + 0.44x_2x_3$	$F_{0.05}(9, 21) = 2.37$ $f = 13.89 > 2.37$	$R = 0.90$	19.8%