

# 水平井压裂产能电模拟实验研究

曲占庆<sup>1</sup>, 张琪<sup>1</sup>, 吴志民<sup>2</sup>, 赵梅<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061;

2. 中国石化胜利石油管理局 井下作业公司, 山东 东营 257077)

**摘要:**水平井压裂前须对其产能进行预测,通过电模拟实验,测量了水平井压裂模型的电压和电流密度,将实验数据转换为模拟油藏数据计算水平井压裂产能。实验结果表明,所采用的水平井压裂产能预测公式计算精度较高,实验和实际油藏条件下产能比值基本吻合。因此,在满足相似条件情况下,可以利用电模拟实验数据来表征水平井压裂产能的大小,从而达到快速预测水平井压裂产能的目的。

**关键词:**水平井;压裂;形状因子;电模拟;产能预测

**中图分类号:**TE319

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-9603(2006)03-0053-03

水平井数量的迅速增加,推动了压裂工艺在水平井的研究和应用。水平井压裂后储层形成的裂缝改变了油藏的渗流,增加了水平井的产能。国内外许多学者研究了纵向裂缝、横向裂缝和斜向裂缝<sup>[1-6]</sup>水平井的产能,给出了相应的产能计算公式。但计算水平井压裂产能的理论公式所需参数多且计算量大,在实际矿场应用中受到一定限制。而通过电模拟实验可以简单快速地模拟水平井压裂产能,即用电流密度比表示水平井压裂产能的大小,为预测水平井压裂产能提供了一种新方法。

## 1 电模拟实验原理

在油藏渗流研究中,可利用电流来模拟地下流体的渗流规律。电模拟方程的理论基础是水电相似原理<sup>[7]</sup>,即描述渗流场和电流场的数学方程相似。因此,在满足全部相似条件后,不可压缩流体的稳定渗流可用稳定电流的流动进行模拟。

不可压缩的地下流体通过多孔介质的稳定渗流符合达西定律及拉普拉斯方程<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} v = -\frac{k}{\mu} \text{grad} p \\ \nabla^2 p = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v$ 为流体流速,  $\text{m/s}$ ;  $k$ 为渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\mu$ 为流体粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $p$ 为流体压力,  $\text{MPa}$ 。

电流密度在导电介质中的流动满足欧姆定律及拉普拉斯方程<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} i = -\rho \text{grad} U \\ \nabla^2 U = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i$ 为电流密度,  $\text{A/m}^2$ ;  $\rho$ 为电导率,  $(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$ ;  $U$ 为电压,  $\text{V}$ 。

依据相似理论,当渗流场和电流场的几何形状和边界条件相似时,稳态渗流压力场的分布与稳态电流、电压场的分布相似。因此,可以利用电流场来研究水平井压裂后复杂的渗流场。

## 2 相似系数的确定

由式(1)和式(2)可知,电流场中的电流密度和电压及其分布与稳定渗流场中的流量和压力及其分布具有一定的比例关系<sup>[8]</sup>,因此,相似系数的确定如下。

几何相似系数

$$C_L = \frac{d_r}{d_m} \quad (3)$$

式中: $C_L$ 为几何相似系数; $d$ 为物体的几何尺寸, $\text{m}$ ;  $r$ 为地层; $m$ 为模型。

电导率相似系数

$$C_\rho = \frac{(k/\mu)_r}{\rho_m} \quad (4)$$

收稿日期 2006-01-18; 改回日期 2006-03-20。

作者简介:曲占庆,男,副教授,1986年毕业于华东石油学院采油工程专业,1999年获得石油大学(华东)油气田开发工程专业硕士学位,现为石油大学(华东)油气田开发工程专业在读博士研究生,从事油气田开发方面的教学与研究工作。联系电话:(0546)8395886, E-mail: quzhq@hdpu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目“水平井压裂改造及砾石充填防砂技术研究”(No. 50274055)部分成果

式中： $C_p$ 为电导率相似系数。

压力相似系数

$$C_p = \frac{(\Delta p)_r}{(\Delta U)_m} \quad (5)$$

式中： $C_p$ 为压力相似系数； $\Delta p$ 为压力差，MPa； $\Delta U$ 为电压差，V。

流量相似系数

$$C_q = \frac{q_r}{I_m} \quad (6)$$

式中： $C_q$ 为流量相似系数； $q$ 为产能， $m^3/d$ ； $I$ 为电流，A。

各相似系数之间还应满足下列条件

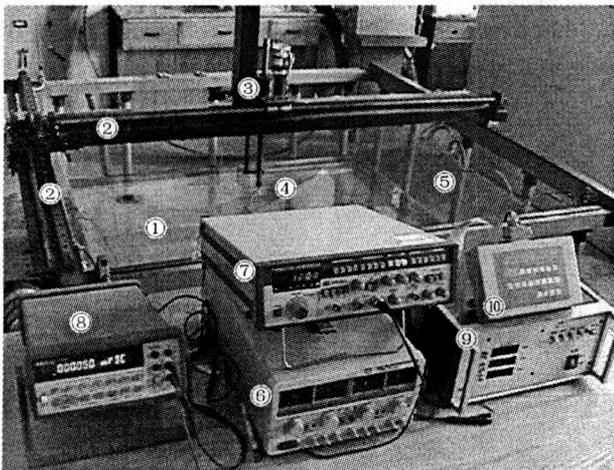
$$C_q = C_L C_p C_\rho \quad (7)$$

满足上述条件的稳定渗流场和电流场之间存在类比关系，在测得电流场中的电流密度和电压后，利用相似比例关系可换算成渗流场中的流量和压力，即可以用电场模拟研究油藏渗流场。由于实验中的电流可以在瞬间达到稳定，因而，电模拟所模拟的过程是地层中的单相稳定流动过程。

### 3 实验装置及模型设计

#### 3.1 实验装置

电模拟实验装置包括油藏模拟系统、测量系统和电路系统3个部分(图1)。油藏模拟系统为一装有电解液的长、宽、高分别为1.5,0.0015和0.35m的有机玻璃槽，在2个电极上造成电势差，使其与油井和供给边界压力成一定比例，可得到类似油藏压力场的电压场。用不同浓度的电解液模拟不同渗透



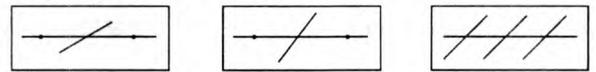
①—方形有机玻璃槽；②—定位丝杠；③—步进电机；④—探针；  
⑤—供给边界；⑥—直流稳压电源；⑦—频率发生器；  
⑧—高精度万用表；⑨—定位主控箱；⑩—定位键盘

图1 电模拟实验装置

性的油层，用电解液高度模拟地层厚度。测量系统可使探针作三维移动，测量其在平面上和纵向上各点的电压和电流密度。电路系统提供的是低压交流电，为减小电模拟实验中电解液的极化现象<sup>[9]</sup>，用频率发生器提高电源频率，使用毫伏表及探针测电场分布，得到模型井与供给边界的生产压差。

#### 3.2 模型设计

利用直径为2mm的铜棒模拟水平井，利用长为30mm，宽为2mm的薄铜片模拟裂缝，将铜棒和薄铜片焊接在一起模拟裂缝与水平井筒成不同角度的水平井压裂(图2)。实验所用电解液为自来水，由于铜的电导率比自来水的电导率高很多，因此模拟裂缝的导电能力较高。



a—30°单条裂缝水平井 b—60°单条裂缝水平井 c—45°三条裂缝水平井

图2 电模拟实验模型示意图

### 4 实验分析

根据实验数据，计算得到实验条件下水平井压裂的产能比(水平井单位压差下的产能与同样条件下直井单位压差下的产能之比)与实际油藏条件下的产能比进行比较，可以发现用电模拟方法能方便地计算出水平井压裂后的生产能力。

在电模拟实验中，由式(6)得到产能比的表达式为

$$\frac{q_h}{q_v} = \frac{C_{qh} I_h / U_h}{C_{qv} I_v / U_v} \quad (8)$$

式中： $h$ 为水平井； $v$ 为垂直井。

在同等条件下  $C_{qh} = C_{qv}$ ，则

$$\frac{q_h}{q_v} = \frac{I_h / U_h}{I_v / U_v} \quad (9)$$

即在实验条件下，压裂水平井与直井产能比应等于单位电压差下的电流密度比值。

实际水平井压裂的裂缝宽度一般为几毫米到几厘米，不同宽度裂缝的渗流特点没有改变。当裂缝数目为3时，裂缝与水平井的夹角分别为30°，45°，60°，75°和90°时，根据相似系数将实验数据转换成模拟油藏数据，将模拟油藏参数分别代入水平井产能经验公式<sup>[2]</sup>和直井产能经验公式<sup>[10]</sup>计算得到产能比；将电模拟实验中所测电压和电流密度值代入式(9)，计算得到实验条件下的产能比(表1)。从表1中可以看出，5组实验数据的偏差均小于12%，

其中3组实验数据的偏差小于等于10%,表明实验的精度较高,符合工程计算的误差要求。因此,电模拟实验中电流密度比的大小可以体现水平井压裂产能比的大小,用电模拟方法进行水平井压裂前的产能预测不失为一种有效的方法。

表1 油藏条件与实验条件产能对比

裂缝与水平井夹角/(°)	产 能 比		实验偏差, %
	经验公式计算结果	电模拟实验结果	
30	7.67	6.76	11.9
45	7.99	7.12	10.9
60	8.19	7.37	10.0
75	8.30	7.54	9.2
90	8.34	7.66	8.2

## 5 结论

在电模拟实验条件下,油藏产能比与电流密度比基本一致,一方面说明了水平井压裂产能预测公式的计算精度较高,另一方面也说明了实验结果可以反映水平井压裂的产能大小。即在工程计算允许的误差范围内,电模拟实验可直观快捷的实现产能预测。在此基础上,可进一步利用电模拟实验研究水平井压裂的复杂渗流问题,为水平井开发不同类

型的油藏提供理论依据。如果地层的非均质性严重,建议采用固体电解质代替电解液进行实验,实验结果会更准确。

### 参考文献:

- [1] Li Hujun, Jia Zhengqi. A new method to predict performance of fractured horizontal wells[J]. SPE 37051, 1996.
- [2] 郎兆新,张丽华,程林松. 水平井压裂产能研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,1994,18(2):43-46.
- [3] 宁正福,韩树刚,程林松,等. 低渗透油气藏水平井压裂产能计算方法[J]. 石油学报,2002,23(2):68-71.
- [4] 范子非,方宏长. 裂缝性油藏水平井稳态解产能公式研究[J]. 石油勘探与开发,1996,23(3):52-57.
- [5] Guo Genliang, Evans R D. Inflow performance of a horizontal well intersecting natural fractures[J]. SPE 25501, 1993.
- [6] 韩清华,薛巨丰,张霞. 水平井与直井结合开发营93断块中低渗透油藏[J]. 油气地质与采收率, 2003,10(3):55-58.
- [7] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京:中国农业机械出版社, 1982.
- [8] 曲德斌. 水平井开发理论物理模型研究[J]. 大庆石油地质与开发,1993,12(4):27-31.
- [9] 冯跃平. 电模拟平面径向流理论在实际运用中的几个问题的探讨[J]. 西南石油学院学报,1990,12(4):49-58.
- [10] 王鸿勋,张琪. 采油工艺原理[M]. 北京:石油工业出版社, 1989.

编辑 刘文强