

# 压裂水平井裂缝参数优化实验

袁 帅<sup>1,2</sup> 李春兰<sup>1</sup> 曾保全<sup>1</sup> 李 想<sup>3</sup> 苏宏益<sup>4</sup>

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学),北京 昌平 102249;2. 中国石油 四川销售公司,四川 成都 610059;3. 中国石  
油新疆油田分公司采油二厂,新疆 克拉玛依 834008;4. 中国石油新疆油田分公司 重油开发公司,新疆 克拉玛依 834008)

**摘 要:**压裂是开发低渗透油气藏的有效技术手段,人工裂缝参数是影响水平井产能的主要因素,因此压裂前需分析裂缝参数对压裂水平井产能的影响。针对低渗透油藏井网产能以及单缝贡献率物理模拟研究成果甚少的现状,利用电解模拟实验,分析了水平段封闭条件下交错排状井网中水平井不等缝长压裂、人工裂缝数以及裂缝穿透比对单条裂缝及井网产能的影响规律。结果表明:在总缝长一定时,不等缝长压裂对井网产能影响很小;在固定水平段长度和固定裂缝间距两种情况下增加压裂水平井人工裂缝数,单井产量递增,但缝数增加到 3 条后,增产幅度逐渐变缓;增大人工裂缝穿透比,中缝贡献率减小,端缝贡献率增大,但井网产量增幅不明显。

**关键词:**压裂;水平井;裂缝;物理模拟;产能;低渗透油气藏

**中图分类号:**TE357.1<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)04-0099-05

## Experimental Study on Optimization of Fracture Parameters in Horizontal Well Fracturing

Yuan Shuai<sup>1,2</sup> Li Chunlan<sup>1</sup> Zeng Baoquan<sup>1</sup> Li Xiang<sup>3</sup> Su Hongyi<sup>4</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Changping, Beijing, 102249, China; 2. Sichuan Marketing Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 3. No. 2 Production Division, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834008, China; 4. Heavy Oil Production Division, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834008, China)

**Abstract:** Horizontal well fracturing is one of the significant approaches in low permeability reservoirs development. Hydraulic fractures are the main factors that affect the productivity of horizontal wells, so it is necessary to study how fracture parameters affect the productivity of fractured horizontal wells before the treatment. There are limited research results on well pattern productivity and the contribution of single fracture, therefore a suite of electric analogy experiments were designed to study how the fracture with different lengths, the number of fractures and the penetration ratio impact well productivity with criss-cross pattern in a closed horizontal intervals. Results show that fractures of different lengths have slight influence on well pattern productivity when the total fracture length is same. When the length of horizontal section and spacing between fracture are fixed, the single well productivity increases with the increase of the number of fracture, while the increase is becoming smaller after the number of fracture is higher than 3. With the increase of the fracture penetration ratio, the production contribution ratio from the intermediate fracture would decrease and the well pattern production increase is not obvious.

**Key words:** fracturing; horizontal well; fracture; physical analog; productivity; low permeability pools

油藏开发实践证明,水平井技术适用于低渗透油藏的开发,但由于低渗油藏的岩石致密,要对水平井进行水力压裂改造才能大幅提高油井的产能。裂缝的存在改变了水平井周围的渗流场特征<sup>[1-3]</sup>,这是影响压裂水平井产能的主要因素,因

**收稿日期:**2009-06-24;**改回日期:**2010-06-10

**基金项目:**国家科技重大专项项目“低渗、特低渗油气田经济开发关键技术”(编号:2008ZX05013)部分研究内容

**作者简介:**袁帅(1985—),女,四川广元人,2007年毕业于成都理工大学能源学院,在读硕士研究生。

**联系方式:**(010)89733726,158891057@qq.com.

此进行压裂设计时,要对裂缝参数进行优化设计。从已有文献来看,前人在压裂水平井开发方面的研究一般是建立在一定简化和假设条件基础上的数学模型,但这些数学模型难以模拟复杂的裂缝系统对压裂水平井产能的影响<sup>[4-5]</sup>。另外,前人所进行的物理模拟主要集中在单井上<sup>[6-9]</sup>,而研究井网及单缝产能方面的物理模拟甚少。因此,笔者通过电解模拟实验,分析了水平段封闭条件下压裂水平井的人工裂缝参数,对单缝、单井及井网产能的影响,为压裂水平井的裂缝参数优化设计提供一定的理论依据。

1 实验理论基础

1.1 实验原理——水电相似原理

水电相似理论用导电介质模拟地层,然后在介质上施加一定电势差用其产生的电场来模拟地层中的稳定渗流场。渗流场中不可压缩的地下流体通过多孔介质时的稳定渗流符合达西定律及拉普拉斯方程;而电流场中,电流在导电介质中的流动满足欧姆定律及拉普拉斯方程。当两场的几何形状和边界条件相似时,稳态渗流场与稳态电流场相似。因此,在满足全部相似条件之后,不可压缩流体的稳定渗流问题可用稳定电流的流动进行模拟。各参数的对应关系见表 1。

渗流场		电流场	
拉普拉斯方程	$\nabla^2 p = 0$	拉普拉斯方程	$\nabla^2 U = 0$
达西定律	$v = -\frac{K}{\mu} \nabla p$	欧姆定律	$i = -\gamma \nabla U$
渗流速度	$v$	电流密度	$J$
流体流量	$q$	电流	$I$
流度	$\frac{K}{\mu}$	电导率	$\gamma$

1.2 实验装置

电解模拟实验的装置主要由油藏模拟系统、低压电路系统和测量系统组成。油藏模拟系统为一电解槽,配制适当浓度的  $\text{CuSO}_4$  溶液模拟油层,电解槽模拟封闭边界;低压电路系统提供低压交流电;测量系统可使探针作三维移动,即可以测量平面上和纵向上各点的电压和电流密度<sup>[10]</sup>。

需要注意的是,电解模拟实验模拟的是单相不

可压缩流体的稳定渗流,实验中电解质溶液只能模拟均质地层条件下刚性流体的稳定渗流,如果地层非均质性严重,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<sup>[11]</sup>。另外,铜片的电导率比  $\text{CuSO}_4$  溶液高很多,因此实验模拟的是无限导流能力的裂缝。

2 实验模型

通过实验分析水平段封闭情况下,裂缝对产量的影响规律。实验假设裂缝垂向上是垂直的,水平方向上与水平井筒的夹角为直角,不考虑裂缝倾角的影响。物理模型中,以一定长度的铜丝模拟裸眼水平段,以一组铜片模拟垂直裂缝,而铜丝与电解液不接触的地方用胶皮密封来模拟封闭水平段。生产井接低电位,注水井接高电位。将研究区的各油层参数代入对应的相似系数计算式,就可得到实验模型参数。地层参数为:平均渗透率  $0.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;有效厚度 20 m;井距 500 m;排距 250 m;注采压差 20 MPa;裂缝半长 110 m。计算得到的模型参数为:溶液电导率  $635 \mu\text{S}/\text{cm}$ ;溶液深度 2.3 m;井距 57.50 cm;排距 28.75 cm;电压压差 20 V;裂缝半长 12.65 cm。

3 实验结果与讨论

笔者在此分析交错排状井网中压裂水平井产量及每个裂缝的产量。实验方案的基本特点是:1)注水井为直井;2)采油井为压裂水平井;3)水平井水平段不生产。井网测量示意图如图 1 所示。

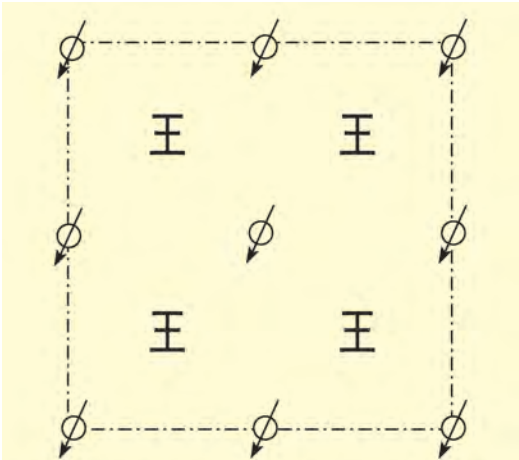


图1 交错排状井网三缝压裂水平井测量示意图

3.1 不等缝长与井网产能的关系

水平段长度固定为 200 m,裂缝间距固定为 70 m,裂缝数量固定为 3 条,3 条裂缝总长度分别选取 200、400、600、800 和 1 000 m,并令中缝与端缝长度之比为 1.75,测得了不同裂缝总长情况下油井产能变化情况以及每个裂缝贡献率的变化规律。最后以总缝长 600 m 为例,改变中缝与端缝长度比,分析不同中缝与端缝长度比情况下单井产量及裂缝贡献率变化规律。实验方案如表 2 所示,结果见表 3、图 2 和图 3。

表 2 不等缝测量方案			
三缝总长/m	端缝长度/m	中缝长度/m	端缝长度/m
200	53	93	53
400	106	186	106
600	260	80	260
	240	120	240
	220	160	220
	200	200	200
	180	240	180
	160	280	160
	140	320	140
	120	360	120
800	213	373	213
1 000	267	457	267

表 3 不等缝压裂产量(中缝与端缝长度比为 1.75)					
三缝总长/m	端缝产量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	中缝产量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	油井产量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	端缝贡献率, %	中缝贡献率, %
200	16.77	17.28	50.81	33	34
400	18.03	18.58	54.63	33	34
600	18.88	19.45	57.21	33	34
800	19.36	19.95	58.67	33	34
1 000	19.57	20.16	59.29	33	34

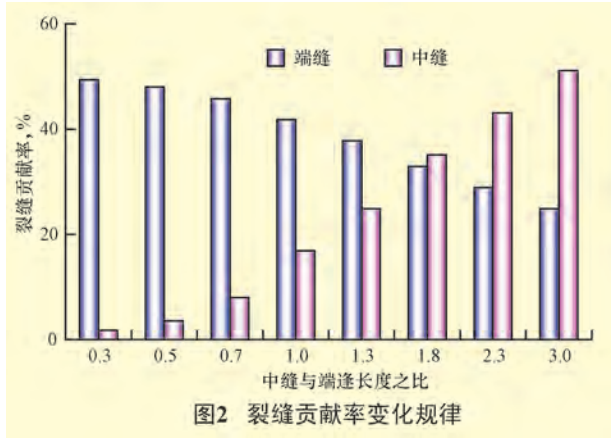


图2 裂缝贡献率变化规律

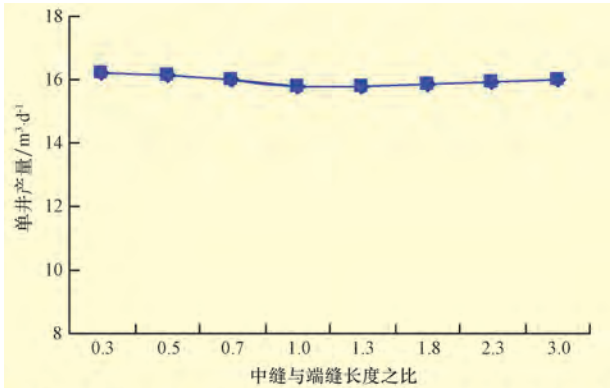


图3 总缝长一定，中缝与端缝长度之比与单井产量的关系

从表 3 可以看出:随着总缝长增长,油井产量递增,但增幅逐渐变小;端缝与中缝贡献率一致,与总缝长无关。

由图 2 和图 3 可知:

- 1) 当中缝与端缝的长度比发生变化时,中缝贡献率随着其长度的增加几乎呈直线上升,两条端缝贡献率直线下降。这主要是受裂缝长度的影响,中缝长度增大,裂缝所起的提高渗流能力的作用明显增大,同时端缝长度减小,缝间干扰对中缝产量的影响相对减小,因此中缝产量上升很快。
- 2) 在缝总长不变的情况下,不等缝压裂对井网产量影响不大,井网的最终增产幅度很小。这是由于在总缝长不变的前提下,流体流入井筒的通道长度不变,改变缝长仅仅改变单个裂缝的贡献率,而对水平井产量的影响不大。
- 3) 中缝长度短于端缝长度的压裂水平井增产效果好于中缝长度长于端缝长度的压裂水平井,这充分说明压裂水平井的端缝对提高产量方面起着举足轻重的作用,因为端缝离水井较近,等势线较为密集,压力梯度较大,所以能起到较大的增产作用,中缝却受到较大干扰,产量较低。因此在实际生产过程中对水平井实施不等缝长压裂时,应考虑适当增加裂缝总长,或者在总缝长不变的情况下,减小中缝长度,充分发挥端缝的增产作用。

3.2 裂缝数与产能的关系

笔者分别将水平段长度固定为 200 m,裂缝间距固定为 70 m,进行了交错排状井网中压裂水平井人工裂缝数从 1 条增加到 6 条时裂缝贡献率及井网产能的变化实验,结果如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出:

- 1) 不论是固定水平段长度还是固定裂缝间距,裂缝数增加都将使端缝贡献率减小,但端缝贡献率

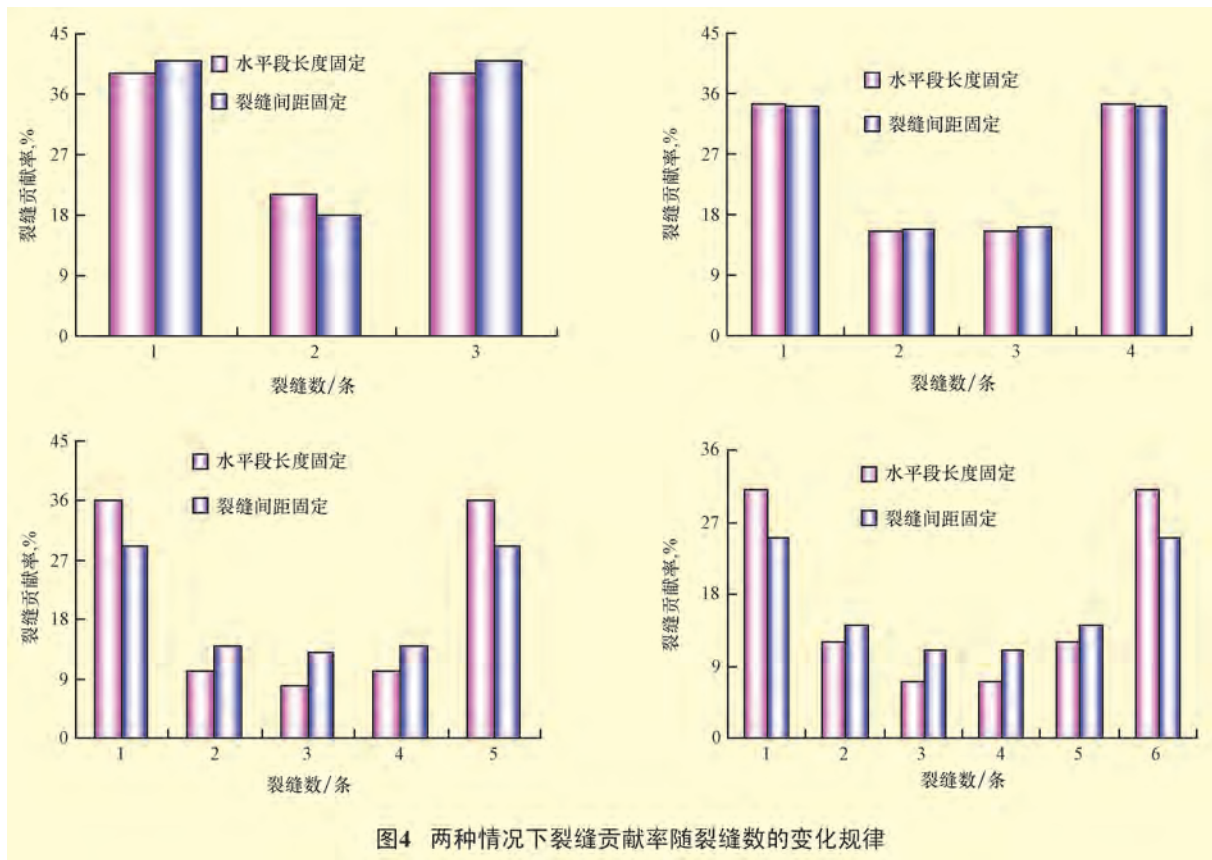


图4 两种情况下裂缝贡献率随裂缝数的变化规律

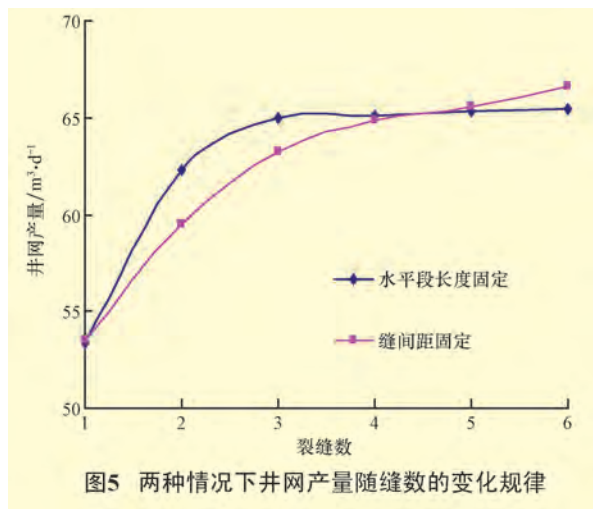


图5 两种情况下井网产量随缝数的变化规律

始终最高。在相同裂缝数条件下，固定水平段和固定缝间距两种情况下不同位置裂缝的贡献率有所不同，通过对比可知，裂缝数为3条时，后者的端缝和中缝贡献率差值较前者大，因为此时前者缝间距为100 m，后者缝间距为70 m，缝间干扰比前者严重，水井注入能量主要提供给端缝。裂缝数增至4条之后，定缝间距的情况下相邻两裂缝贡献率差值变小，并且随着裂缝数增加单缝产量分配更为均匀。对比6条裂缝时两种情况下的裂缝贡献率可以看出，固定水平段长度时端缝贡献率远高于其他裂缝，而固定缝间距时相邻两裂缝贡献率差值不大。这是由于

缝间距不变，缝数增加使水平段长度增加，缝间干扰相对较小，端缝对中缝的影响也随着它们之间距离的增加而减小，因此裂缝数越多，每条裂缝产量的差值越小，贡献率越均匀。在实际生产过程中，为避免缝间干扰对产量的影响，应适当增大裂缝间距。

2) 井网产量均随着裂缝数量的增加而增大，但增大幅度逐渐变小，且固定缝间距的情况下曲线略陡，最终增幅为24.4%，大于固定水平段时的增产幅度(22.6%)。分析原因：等缝长压裂，当水平段井筒长度一定时，裂缝间距随着裂缝数的增加而减小，从而使裂缝之间的相互干扰增强，中缝对产量贡献减小；当缝间距一定时，裂缝数越多，水平段长度越长，泄油面积越大，但缝间干扰也越严重，两者效果相互抵消，所以单井增产幅度减小。

3) 对于低渗透油藏，在水平井长度一定的条件下，应尽可能多地连通多条裂缝，以增加水平井产能。但实际生产中，裂缝越多，缝间干扰越严重，并且所需压裂技术越高，经济成本也越大，所以裂缝数量存在最优值范围。从实验结果看，最佳裂缝间距为70~110 m，裂缝数为3~4条。

### 3.3 裂缝穿透比与产能的关系

穿透比定义为裂缝长度与井距之比。在水平段



长度为 200 m、裂缝间距固定为 90 m、裂缝数为 3 条的条件下,笔者分别测得了裂缝穿透比为 0.1~0.5 情况下的单缝产量及井网产量,结果如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 可以看出:

- 1) 随着裂缝穿透比增大,端缝产量呈递增趋势,而中缝产量递减,因为端缝长度越长,控制面积越大,减弱了中缝的受效程度,使中缝贡献率变小;
- 2) 随着裂缝穿透比增加,井网产量曲线较为平缓,接近于水平直线,穿透比为 0.3 时出现一拐点,井网最终增幅为 13.6%,这是由于裂缝穿透比越大,缝间干扰越强,即随压裂规模增大,人工裂缝对井网产能的影响减小。这说明对于低渗油藏,提高水井注入能力是提高开发效果的关键。

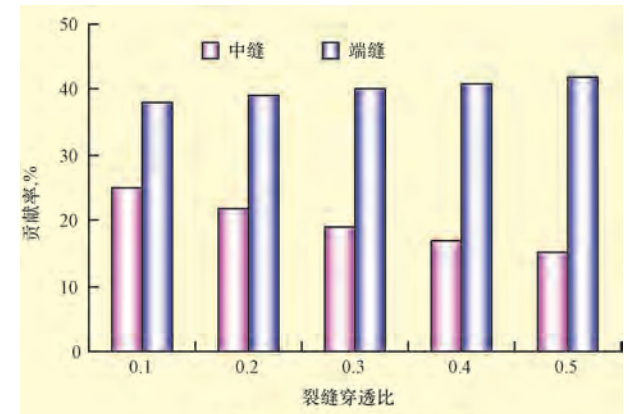


图6 裂缝贡献率变化规律

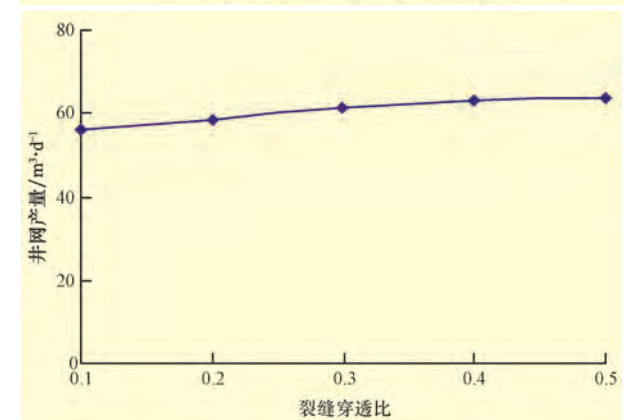


图7 井网产量变化规律

## 4 结论与建议

- 1) 压裂水平井裂缝数为 3 条时,每条裂缝贡献率与裂缝总长无关,仅与裂缝长度有关。中缝长度越长,贡献率越高,中缝与端缝长度之比为 1.75 时,3 条裂缝贡献率基本一样。
- 2) 在 3 条裂缝总长度不变的情况下,等缝长压裂与不等缝长压裂相比,等缝长压裂井网产量增幅

小。在实际生产过程中实施水平井不等缝长压裂时,应考虑适当增大裂缝总长,或者在总缝长不变的情况下,减小中缝长度,充分发挥端缝的增产作用。

- 3) 增加压裂水平井裂缝数有利于提高单井产量,但是增大到 3 条缝后增产幅度变缓,井网产量增幅不大;在缝间距固定的情况下增加裂缝数的增产效果大于固定水平段长度。
- 4) 缝间距越大,缝间干扰相对越小,端缝对中缝的影响也随之减小,中缝与端缝贡献率差值越小。在实际生产过程中,为了避免缝间干扰对产量的影响,应适当加大裂缝间距。
- 5) 增大油井人工裂缝穿透比,端缝产量呈递增趋势,而中缝产量递减,井网产量曲线较为平缓。即随压裂规模增大,人工裂缝对井网产能的影响减小。同时,增加裂缝数和裂缝穿透比会使压裂的成本升高,为减少缝间干扰,应尽可能增大裂缝长度、减少裂缝数。在文中条件下,最佳缝间距为 70~110 m,裂缝数为 3~4 条。

## 符 号 说 明

$K$  为地层渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\mu$  为流体黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $p$  为油层压力,  $\text{MPa}$ ;  $I$  为通过溶液的电流,  $\text{A}$ ;  $J$  为电流密度,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $U$  为导体上的电压,  $\text{V}$ ;  $\gamma$  为溶液电导率,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;  $Q$  为油井的产油量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

## 参 考 文 献

[1] 刘想平,张兆顺,刘翔鹏,等. 水平井筒内与渗流耦合的流动压降计算模型[J]. 西南石油学院学报,2000,22(2):36-39.

[2] 李晓平,赵必荣,吴小庆,等. 水平井压力动态分析[J]. 西南石油学院学报,1994,16(2):34-40.

[3] 贾振歧,李虎君,宋新辉. 水平井压力分布电模拟研究[J]. 大庆石油学院学报,1994,18(4):27-30.

[4] Hu Junli, Jia Zengqi, Wei Zhaosheng. A new method to predict performance of fractured horizontal wells[R]. SPE 37051, 1996.

[5] 范子菲,方宏长,午新年. 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.

[6] Valvatne P H, Durlofsky L J, Aziz K. Semi-analytical modeling of the performance of intelligent well completions[R]. SPE 66368, 2001.

[7] 李廷礼,李春兰. 低渗油气藏压裂水平井产能电模拟实验研究[J]. 中国海上油气,2005,17(6):389-393.

[8] 曲占庆,张琪,吴志民,等. 水平井压裂产能电模拟实验研究[J]. 油气地质与采收率,2006,13(3):53-55.

[9] 高海红,曲占庆,赵梅. 压裂水平井产能影响因素的实验研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(4):73-76.

[10] 李春兰. 油藏流体渗流机理电模拟实验仪[J]. 实验技术与管理,1999,16(6):34-36.

[11] 杨金海,郑天璞. 油气藏渗流的固体介质电模拟技术实验研究[J]. 石油勘探与开发,1994,21(4):70-74.

[审稿 蒋廷学]