

文章编号:1673-5005(2009)01-0078-05

裂缝各向异性油藏渗流特征

冯金德¹, 程林松², 常毓文¹, 冯金城³, 付宁海², 罗 成²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249;
3. 中石油 新疆油田公司采油工艺研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:为研究天然裂缝发育油藏的渗流特征,利用坐标变换原理,设计新的电模拟试验方法,并将天然裂缝表征参数应用到油藏工程研究中,建立求解裂缝各向异性储层渗透率张量的模型,形成了研究裂缝性低渗透砂岩油藏渗流规律和产能评价的新方法。研究结果表明,储层中发育的天然裂缝一方面有利于改善储层物性,提高油井产能,另一方面却加剧了储层的各向异性,降低井网效率和油井产能;采取水平段垂直裂缝发育方向的布井方式,有利于建立优势渗流场和提高单井产能。

关键词:裂缝性油藏; 各向异性; 渗流特征; 电模拟试验

中图分类号:TE 344

文献标识码:A

Percolation characteristics of fractured anisotropic reservoir

FENG Jin-de¹, CHENG Lin-song², CHANG Yu-wen¹, FENG Jin-cheng³, FU Ning-hai², LUO Cheng²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
2. MOE Key Laboratory for Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. Production Technology Research Institute, Xinjiang Oilfield Company of PetroChina, Karamay 834000, China)

Abstract: In order to investigate the percolation characteristics of reservoir developed natural fracture, a new electric-analogy-modeling experiment designing method was proposed based on the coordinate transformation principle. And the permeability tensor model of the fractured anisotropic reservoir was established by applying the natural fracture parameters to the reservoir engineering. And a new method of investigating the percolation law and evaluating the productivity of the fractured low-permeability reservoir was formed. The results indicate that, on the one hand, the natural fractures improve the oil well productivity by increasing the formation permeability, on the other hand, the natural fractures decrease the well pattern efficiency and the oil well productivity by increasing the reservoir anisotropy. To drill horizontal well in vertical direction of fracture orientation is beneficial to establish the advantaged percolation field and improve the well productivity.

Key words: fractured reservoir; anisotropy; percolation characteristics; electric-analogy-modeling experiment

天然裂缝使裂缝性油藏油气渗流规律异常复杂,试验是研究油藏渗流规律的有效方法。电模拟试验具有装置结构简单、操作方便、成本低等优点,在油气渗流、水利、水文和水体渗流等研究领域得到了广泛应用,其在石油领域的应用主要集中于均质储层中水平井、压裂水平井及复杂结构井的渗流场及产能研究^[1-10]。利用电解模拟试验来研究各向异性油藏渗流的文献较少。笔者根据坐标变换原理设计新的试验方法,对常规电模拟试验装置进行简单

的改造来模拟各向异性油藏的渗流规律。另外,针对裂缝性低渗透砂岩油藏具有高角度缝发育、裂缝方向性强、裂缝间连通性差等特点,将天然裂缝表征参数应用到油藏工程研究中,建立求解裂缝各向异性储层渗透率张量的模型。

1 坐标变换原理

裂缝性各向异性储层中的渗透率须以张量形式来表示,采用常规方法难以求解渗透率各向异性储

收稿日期:2008-09-02

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0108);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060425001)

作者简介:冯金德(1974-),男(汉族),四川简阳人,工程师,博士,在站博士后,主要从事油气田开发方面的研究工作。

层的渗流方程。当渗透率张量为对角张量的形式时,按照 Bear 的方法^[11],根据几何关系和渗透率方向之间的等价关系,可将各向异性介质中的流动变换为各向同性介质中的等价流动。各向异性储层中的坐标分别为 x, y, z , 各向同性储层中坐标分别为 x', y', z' , 则

$$\begin{cases} x' = x \sqrt{k/k_x}, & y' = y \sqrt{k/k_y}, \\ z' = z \sqrt{k/k_z}, & k = \sqrt[3]{k_x k_y k_z}. \end{cases} \quad (1)$$

式中, k_x, k_y, k_z 分别为渗透率张量的主方向与坐标轴一致时 x, y, z 方向的主值, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; k 为裂缝油藏的几何平均渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 裂缝性储层渗透率张量模型的求解

天然裂缝的高导流能力只表现在平行裂缝方向,而对垂直裂缝方向的渗流没有影响。裂缝在将其渗透率绝对值贡献给相邻基质区域的同时,也将其方向性平均到相邻基质区域,从宏观角度来看,油藏的总体渗透率就具有了方向性。裂缝的存在加剧了油藏的非均质性和各向异性。以平行板理论为基础,利用渗透率张量理论和渗流力学的相关理论,将复杂的裂缝系统简化,可建立求解裂缝性储层渗透率张量的数学模型。

沿裂缝水平方向的等效渗透率张量主值为

$$k_x = \frac{\alpha_x k_{mx} [k_{mx} + (k_f - k_{mx}) D_L b_f]}{\alpha_x k_{mx} + (1 - \alpha_x) [k_{mx} + (k_f - k_{mx}) D_L b_f]} + (1 - \alpha_x) k_{mx}. \quad (2)$$

垂直裂缝方向的等效渗透率张量主值为

$$k_y = \alpha_y \alpha_z \left\{ \left[\frac{k_{my} k_f}{k_f - (k_f - k_{my}) D_L b_f} \right] + (1 - \alpha_x) k_{mx} \right\} + (1 - \alpha_x) k_{my}. \quad (3)$$

纵向上的等效渗透率张量主值为

$$k_z = \frac{\alpha_x k_{mx} \{ [k_{mx} + (k_f - k_{mx}) D_L b_f] + (1 - \alpha_x) k_{mx} \}}{\alpha_x k_{mx} + \alpha_x (1 - \alpha_x) \{ [k_{mx} + (k_f - k_{mx}) D_L b_f] + (1 - \alpha_x) k_{mx} \}}. \quad (4)$$

$$k_f = b_f^2 / 12. \quad (5)$$

式中, k_{mx}, k_{my}, k_{mz} 为基质渗透率在 x, y, z 方向的主值, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_f 为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; D_L 为裂缝线密度, 条/m; b_f 为裂缝开度, μm ; α_x 为裂缝平面连通系数; α_z 为裂缝纵向切穿系数。

式(2)~(5)的详细推导过程见文献[12]。

3 试验装置及试验方法

3.1 试验装置

电模拟试验的原理为水电相似原理。试验采用

普通电模拟试验装置,主要由油藏模拟系统、低压电路系统和测量系统3部分组成。油藏模拟系统为 $1.36 \text{ m} \times 1.36 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 的盛有 CuSO_4 溶液的有机玻璃池,可配置相应浓度的 CuSO_4 溶液来模拟油层;低压电路系统可将 220 V 交流电进行稳压、降压后得到试验所需电压;测量系统可以测得池中三维空间各点势的分布及所模拟油井的电流。因为模拟的井网单元不再是正方形,所以与普通电模拟试验装置不同的是,模拟系统的有机玻璃池可根据模拟参数采用有机玻璃隔板隔成相应的尺寸(技术关键是确保模拟区和模拟区外完全隔绝)。另外,采用了高精度稳压器和万用电表。

3.2 试验方法

3.2.1 油藏模型

某裂缝性低渗透油藏岩心基质渗透率为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油层厚度为 12.0 m,地层油黏度为 $2.35 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,地面原油密度为 0.85 g/cm^3 ,原油体积系数为 1.25,注采压差为 15 MPa。天然裂缝平均开度为 $30 \mu\text{m}$,线密度为 1 条/m,根据裂缝长度和裂缝切深计算的裂缝连通系数为 0.9,裂缝切穿系数为 0.7。由式(2)~(5)可算得油藏模型渗透率(表1)。

表1 油藏模型渗透率

Table 1 Premeability of reservoir model

油藏模型	平行裂缝方向渗透率 $k_x/10^{-3} \mu\text{m}^2$	垂直裂缝方向渗透率 $k_y/10^{-3} \mu\text{m}^2$	纵向渗透率 $k_z/10^{-3} \mu\text{m}^2$	平面上渗透率级差 m
1	0.36	0.12	0.21	3
2	0.61	0.12	0.27	5.11
3	1.20	0.12	0.38	10

水平井注水、水平井采油的交错排状井网,井距为 720 m,基础排距为 360 m,水平段长度为 360 m。井距指的是平行裂缝发育方向的同一井排两相邻油井间的距离;排距为垂直裂缝发育方向的同一井排两相邻油井间的距离。

3.2.2 模拟模型及相似系数

根据井网单元的对称性和渗流场流线封闭的特点,取井网的 1/4 单元作为模拟单元。根据计算可得模拟模型的相似系数,见表2。表2中的井距、排距指的是裂缝性储层中的实际井网参数。

电解质溶液由硫酸铜晶体与蒸馏水配制而成。试验中采用直径为 0.08 mm 的铜丝来模拟水平井,根据几何相似系数可计算出模拟单元中铜丝的长度。将铜丝固定于电解液的中部位置。

表2 模拟模型的相似系数

Table 2 Similarity coefficient of simulation model

油藏模型	井距 L_f/m	排距 L_p/m	压力相似系数 $C_p/(V \cdot MPa^{-1})$	几何相似系数 C_l	流量相似系数 $C_q/(mA \cdot d \cdot m^{-3})$
1	720	240	1.505	0.004 306	104.81
		360	1.505	0.002 871	69.88
		480	1.505	0.002 153	52.41
		600	1.505	0.001 723	41.93
2	720	240	1.505	0.003 790	70.68
		360	1.505	0.002 527	47.12
		480	1.505	0.001 895	35.34
		600	1.505	0.001 516	28.28
3	720	240	1.505	0.003 187	42.49
		360	1.505	0.002 125	28.33
		480	1.505	0.001 594	21.25
		600	1.505	0.001 275	16.99

3.3 试验步骤

试验流程见图1。

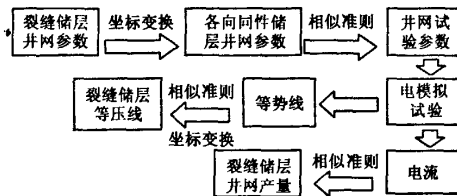


图1 裂缝各向异性油藏电模拟试验流程

Fig.1 Flow chat of modeling fractured anisotropic reservoir by electric analogy experiment

(1)根据裂缝表征参数,利用式(2)~(4)计算裂缝性油藏各方向的渗透率张量主值和平面上的渗透率级差。定义渗透率级差 m 为平面上储层沿裂缝发育方向的渗透率与垂直裂缝方向渗透率的比值($m=k_x/k_y$),用来表征天然裂缝的发育程度, m 值越大表明天然裂缝越发育。

(2)根据式(1)用坐标变换的方法将裂缝各向异性油藏中的井网参数转换为各向同性油藏中的井网参数,再根据相似准则计算电模拟试验的井网参数。

(3)利用电模拟试验测得生产井电流,根据相似准则换算成产量,所得到的产量就是裂缝性油藏中生产井的产量。

(4)测得等势线分布,然后根据相似准则换算成实际油藏条件下的压力分布,再根据式(1)将测得的等压线分布图进行坐标变换,可得裂缝各向异性油藏中的等压线分布。

4 试验结果分析

4.1 裂缝各向异性油藏渗流场特征

图2为均质各向同性油藏中井距720 m、排距360 m、水平段360 m的井网的压力分布。由图2可知,压力波在注、采井周围呈同轴椭圆族向外传播。

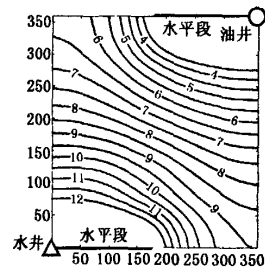


图2 各向同性油藏交错排状井网压力(MPa)分布

Fig.2 Pressure distribution of staggered line drive horizontal well pattern in isotropic reservoir

图3为裂缝各向异性油藏中交错排状井网压力分布。

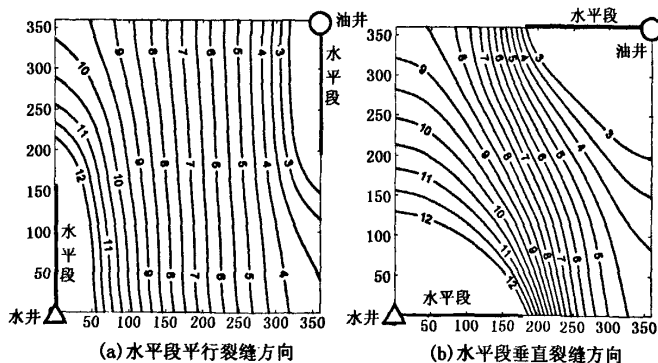


图3 裂缝各向异性油藏中交错排状井网压力(MPa)分布

Fig.3 Pressure distribution of staggered line drive horizontal well pattern in fractured anisotropic reservoir

由图3(a)可知,压力波优先向裂缝发育方向传播,压力波沿裂缝方向波及较远,沿垂直裂缝方向波

及范围较小,高压区和低压区只分别存在于水井和油井周围较小的范围内,从而造成注采井间的驱替

压力梯度小;由图3(b)可知,当水平段垂直于裂缝发育方向时,高压区和低压区的面积大幅度增加,从而提高了注采井间的驱替压力梯度,这对于低渗透油藏来说,有利于建立有效的驱替压力系统,克服启动压力梯度,使油水井间难以流动的油流动起来。

4.2 裂缝各向异性油藏井网产能

定义无因次产量 Q_D ,该参数与井网参数、天然裂缝发育程度及油藏的各向异性程度有关,用来表征井网的传导效率,即

$$Q_D = \frac{11.574 Q \mu}{k h \Delta p} \quad (6)$$

式中, Q 为油井产量, m^3/d ; μ 为原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; h 为油层厚度, m ; Δp 为注采压差, MPa 。

图4为井网产量随排距的变化。由图4(a)可知,随排距缩小,产量增加。井网产量随天然裂缝发育程度增加而增加,这主要是因为天然裂缝提高了

储层的渗流能力。但在这种布井方式下,天然裂缝的发育程度对井网产量影响较小,当渗透率级差由3增加到10,渗透率级差增加了230%,而产量只增加了17%~33%,增产幅度较小。

由图4(b)可知,水平段垂直裂缝发育方向时,产量大幅度提高,相同条件下产量是水平段平行裂缝方向时的1.6~3.8倍。当排距小于360 m时,随排距缩小,井网产量大幅度提高,天然裂缝发育程度对产量的影响较大。这是由于水平段垂直裂缝发育方向时,注、采井有部分水平段在沿裂缝发育方向(该方向渗透率最高,渗流阻力最小)形成正对式的注采关系。当排距大于360 m时,随排距增加,裂缝发育程度对井网产量的影响逐渐变小。图4(b)中,渗透率级差由3增加到10时,产量增加了58%~209%,增产幅度较大。

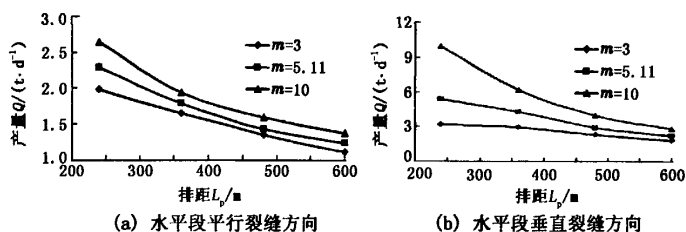


图4 不同渗透率级差下的井网产量

Fig. 4 Production of well pattern in different permeability ratio

图5为不同渗透率级差下的无因次井网产量。由图5(a)知,水平段平行于裂缝发育方向布井时,天然裂缝越发育,井网无因次产量越低,即井网传导

效率越低,这表明天然裂缝在提高储层的渗流能力使油井增产的同时,对储层造成的严重各向异性也使井网效率大幅度降低。

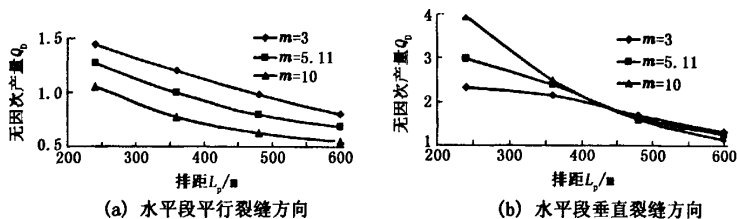


图5 不同渗透率级差下的井网无因次产量

Fig. 5 Dimensionless production of well pattern in different permeability ratio

由图5(b)可知:当排距大于水平段长度(360 m)时,天然裂缝越发育,井网无因次产量越低,井网传导效率越低;当排距小于水平段长度(360 m)时,天然裂缝越发育,无因次产量越大。可见对于裂缝性储层,在部署水平井井网时,采用水平段垂直裂缝方向并且注、采井形成正对式注采关系的布井方式有利于提高井网效率和产能。

由以上分析可知,水平井水平段垂直裂缝方向

布井有利于建立优势渗流场和提高井网产能。采取这种布井方式对一般裂缝性油藏而言,由于裂缝间连通性好,注采方向与裂缝发育方向一致将造成油井严重水淹。低渗、特低渗砂岩油藏中天然裂缝之间连通性较差,可以采取水平段垂直裂缝发育方向布井的方式,通过优化注水制度、井距和排距,在避免过早水淹的前提下,充分发挥天然裂缝的作用,解决注水不见效的难题。另外,从水平井压裂改造的

角度而言,水平段垂直天然裂缝发育方向布井有较大优势。长庆油田的现场试验表明:水平段平行裂缝方向布井油井注水不见效,产量低;水平段垂直裂缝方向布井产量高。

5 结 论

(1)对于裂缝性低渗、特低渗砂岩油藏来说,天然裂缝在提高储层渗透能力、使油井增产的同时,加剧了储层的各向异性,降低了井网的传导效率和产能。

(2)在部署水平井井网时,水平段垂直天然裂缝发育方向布井,并且注、采井形成正对式的注采关系,有利于建立优势渗流场和提高井网产能。

参考文献:

- [1] 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.
YANG Jin-hai, ZHENG Tian-pu. The application of solid-state electric modeling technique in the simulation of oil and gas flow in an oil(gas) reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994,21(4):70-74.
- [2] 冯跃平,潘迎德,唐愉拉,等. 电模拟平面径向流理论在实际运用中几个问题的探讨[J]. 西南石油学院学报,1990,12(4):49-59.
FENG Yue-ping, PAN Ying-de, TANG Yu-la, et al. Analysis of problems in actual application of the theory of electricity imitating plane-radial flow[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1990,12(4):49-59.
- [3] HAN Guo-qing, LI Xiang-fang, WU Xiao-dong. Experimental research on multi-lateral wells by the electric field analogue model[J]. Petroleum Science,2004,1(4):66-71.
- [4] 周德华,焦方正,葛家理. 裂缝网络油藏水平井开发电模拟实验研究[J]. 石油实验地质,2003,25(2):216-220.
ZHOU De-hua, JIAO Fang-zheng, GE Jia-li. Electric analogy modeling experiment of fracture network reservoir development by horizontal wells[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003,25(2):216-220.
- [5] 冯金德,程林松,李春兰,等. 裂缝性低渗透油藏整体压裂开发电模拟研究[J]. 钻采工艺,2006,29(2):42-45.
FENG Jin-de, CHENG Lin-song, LI Chun-lan, et al. Study on naturally fractured reservoir developed by integral-fracturing by using electric analogy modeling[J]. Drilling & Production Technology, 2006,29(2):42-45.
- [6] 高海红,程林松,曲占庆. 压裂水平井裂缝参数优化研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(2):29-32.
GAO Hai-hong, CHENG Lin-song, QU Zhan-qing. Optimization of the fracture parameters of fractured horizontal wells[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2006,21(2):29-32.
- [7] 曲占庆,许霞,刘建敏,等. 辐射状分支井产能电模拟实验研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(4):65-71.
QU Zhan-qing, XU Xia, LIU Jian-min, et al. Electric analogy experiment of the productivity of radial-distributing multi-branch horizontal wells[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2007,22(4):65-71.
- [8] 李廷礼,李春兰. 低渗油气藏压裂水平井产能电解模拟实验研究[J]. 中国海上油气,2005,17(6):389-397.
LI Ting-li, LI Chun-lan. The electrolytic simulation experiment research of fractured horizontal well's productivity in low permeability reservoirs[J]. China Offshore Oil and Gas, 2005,17(6):389-397.
- [9] 黄世军,程林松,赵凤兰,等. 鱼骨刺井近井地带流动机理实验研究[J]. 石油钻采工艺,2006,28(6):58-60.
HUANG Shi-jun, CHENG Lin-song, ZHAO Feng-lan, et al. Experimental research of flow mechanism of near wellbore area of fishbone wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(6):58-60.
- [10] 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.
QU Zhan-qing, ZHANG Qi, WU Zhi-min, et al. Experimental research on electric analogy of the productivity of fractured horizontal well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2006,13(3):53-55.
- [11] T. D. 范. 高尔夫-拉特. 裂缝油藏工程基础[M]. 陈钟祥,译. 北京:石油工业出版社,1989.
- [12] 冯金德,程林松,李春兰,等. 裂缝性低渗透油藏等效连续介质模型[J]. 石油钻探技术,2007,35(5):94-97.
FENG Jin-de, CHENG Lin-song, LI Chun-lan, et al. Equivalent continuous medium model for fractured low-permeability reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(5):94-97.

(编辑 李志芬)