

等效裂缝渗流模型在天然裂缝储层产能预测中的应用

张志伟¹, 刘卫东², 孙灵辉², 孙春辉¹

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

摘要 为了研究天然裂缝发育的低渗透油藏产能特征, 根据连续介质理论, 简化了裂缝系统, 建立了天然裂缝的等效渗流模型, 得到了等效渗流模型稳态渗流的产能方程。应用产能方程进行实例计算, 所得单井产能结果与实际油田单井产能相符合, 验证了该产能方程的正确性及适用性。分析了裂缝宽度、裂缝长度和裂缝渗透率对产能的影响, 结果表明, 裂缝长度对产能的影响更大; 当裂缝渗透率和裂缝宽度达到一定值之后, 要提高产量应主要增加裂缝的长度。

关键词 天然裂缝; 等效裂缝渗流模型; 产能; 低渗透

中图分类号 TE312

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)14-0056-03

Application of Equivalent Fracture Flow Model for Productivity Prediction in Natural Fractured Reservoir

ZHANG Zhiwei¹, LIU Weidong², SUN Linghui², SUN Chunhui¹

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploitation and Development, China National Petroleum Corporation, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract In order to investigate the productivity characteristics of low permeability reservoirs with natural fractures, the system of natural fractures was simplified and the equivalent fracture flow model was established based on the continuous medium theory. By using the equivalent permeability model, the steady-state productivity equation was set up in naturally fractured low-permeability reservoirs. The productivity equation was applied to an example calculation and the results were compared with the actual production data, to validate the model. The influences of fracture characterization parameters on productivity were analyzed by using the model. These fracture parameters include the fracture width, the fracture length and the fracture permeability. The results show that the fracture permeability has a more important effect on the productivity of naturally fracture low-permeability reservoirs. An important conclusion for better production response is as follows: when the fracture permeability and the fracture width reach a certain level, the longer the length of fracture is, the higher productivity could be obtained.

Keywords nature fracture; equivalent fracture flow model; productivity; low permeability

0 引言

低渗透储层中多发育有天然裂缝。天然裂缝是低渗透油田开发需考虑的重要因素, 一方面裂缝的存在改善了低渗透油藏的渗流条件; 另一方面高压注水导致裂缝开启, 注入水沿裂缝水窜, 油井过早水淹^[1]。实际储层中的天然裂缝分布极

为复杂, 要确定裂缝储层油藏的产能, 必须对裂缝系统进行简化, 建立合理的理论模型^[2]。目前, 对水力压裂井的产能研究较多, 而对天然裂缝发育的低渗透油藏的产能研究还较少。为了确定低渗透裂缝油藏的产能, 本文根据裂缝统计特征数据量化建立了等效裂缝渗流模型, 将此类油藏视为由

收稿日期: 2010-05-13

基金项目: 国家科技重大专项课题(2008ZX05013-005)

作者简介: 张志伟, 硕士研究生, 研究方向为低渗透油气田开发, 电子信箱: upczhiwei@163.com; 刘卫东(通信作者), 高级工程师, 研究方向为渗流力学、低渗透油气田开发及提高采收率, 电子信箱: lwd69@petrochina.com.cn

不同渗透率区块拼装而成,每个区块可采用连续介质的方法进行处理^[3-4]。

1 等效裂缝渗流模型

1.1 基本假设

为了建立天然裂缝的等效渗流模型,需要对裂缝系统进行简化。假定裂缝系统满足如下假设:①天然裂缝发育方向平行于流线方向;②天然裂缝中的流体流动符合达西渗流规律;③忽略流体及储层的弹性作用;④不考虑裂缝与基质间的微观渗流,只研究流体流动的宏观规律;⑤流体同时从裂缝和基质流入井底。

1.2 物理模型建立

低渗透油藏的天然裂缝分布是不连续的^[5],在数值模拟时可将这类油藏视为由不同渗透率区块拼装而成,具有裂缝的区块渗透率较大,不含裂缝的区块渗透率较小,即将模型理想化为由裂缝集中区和无裂缝区组成,如图1所示。

建立如图2所示的地质模型。在油井控制范围内,在井底附近 r_2 范围内为裂缝发育集中区, r_2 以外为无裂缝的基岩系统。



图1 等效渗流模型
剖面示意图

Fig. 1 Section of the equivalent permeability model

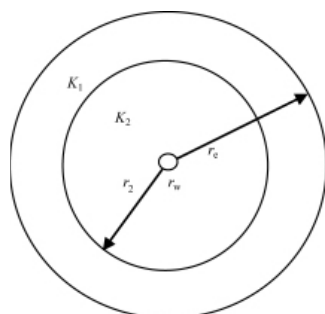


图2 等效渗流模型
平面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the equivalent permeability model

假设在天然裂缝发育区域裂缝均匀分布,方向一致,均为垂直裂缝,裂缝在裂缝集中区储层平面上和纵向上完全贯通。油层水平均质等厚,厚度为 h, m ;油层渗透率为 $K_1, 10^{-3}\mu m^2$;裂缝集中区渗透率为 $K_2, 10^{-3}\mu m^2$;天然裂缝渗透率为 $K_f, 10^{-3}\mu m^2$;油藏供给压力为 p_e, MPa ;井底流压为 p, MPa ;内外区域交界处压力为 p_1, MPa ;供液半径为 r_e, m ;生产井半径为 r_w, m ; r_2 为裂缝集中区半径, m 。

1.3 数学模型推导

在天然裂缝集中区域,裂缝均匀分布。生产过程中,流体分别在裂缝和基质中流动。不考虑裂缝渗透率随压力变化。裂缝长度高度均与裂缝集中区基质一致;裂缝宽度为 w_f, m ;裂缝条数为 n 条。

模型中无裂缝区的流量为 Q_1 ,裂缝集中区的流量为 Q_2 。

裂缝集中区的渗流可以等效为裂缝内的单向流和基质内的径向流,流量分别为 Q_f 和 Q_r ,则

$$Q_f = \frac{nw_f K_f h (p_1 - p_w)}{\mu r_2} \quad (1)$$

$$Q_r = \frac{2\pi K_1 h (p_1 - p_w)}{\mu \ln \frac{r_2}{r_w}} \quad (2)$$

其中, μ 为原油黏度, $mPa \cdot s$ 。则裂缝集中区的流量为

$$Q_2 = Q_f + Q_r = \frac{nw_f K_f h (p_1 - p_w)}{\mu r_2} + \frac{2\pi K_1 h (p_1 - p_w)}{\mu \ln \frac{r_2}{r_w}} \quad (3)$$

化简得

$$Q_2 = \frac{[nw_f K_f h \ln \frac{r_2}{r_w} + 2\pi K_1 h r_2] (p_1 - p_w)}{\mu r_2 \ln \frac{r_2}{r_w}} \quad (4)$$

根据渗流力学中稳定流连续性关系 $Q_1 = Q_2 = Q$,有

$$Q = \frac{2\pi K_1 h (p_e - p_1)}{\mu \ln \frac{r_e}{r_2}} = \frac{2\pi K_2 h (p_1 - p_w)}{\mu \ln \frac{r_2}{r_w}} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可得 K_2 与 K_1, K_f 的关系为

$$K_2 = K_1 + \frac{nw_f K_f \ln \frac{r_2}{r_w}}{2\pi r_2} \quad (6)$$

从而得到等效裂缝渗流模型稳态渗流的产能方程为

$$Q = \frac{2\pi h (p_e - p_w)}{\frac{\mu}{K_1} \ln \frac{r_e}{r_2} + \frac{\mu}{K_1 + \frac{nw_f K_f \ln \frac{r_2}{r_w}}{2\pi r_2}} \ln \frac{r_2}{r_w}} \quad (7)$$

由于某些垂直裂缝纵向上延伸范围较大,有可能裂缝集中区储层厚度与基岩储层厚度不相等。当两个渗流区域厚度不相等时,设 h 为基岩储层厚度, h_f 为裂缝集中区储层厚度,则储层的产能为

$$Q = \frac{2\pi (p_e - p_w)}{\frac{\mu}{K_1 h} \ln \frac{r_e}{r_2} + \frac{\mu}{K_1 h_f + \frac{nw_f K_f h_f \ln \frac{r_2}{r_w}}{2\pi r_2}} \ln \frac{r_2}{r_w}} \quad (8)$$

2 计算实例

以长庆油田某区块为例,采用以上建立的等效裂缝渗流模型对该区单井产能进行计算。计算所需的基础数据和地层参数为:裂缝渗透率 $(800 \sim 1000) \times 10^{-3}\mu m^2$,油层渗透率 $2 \times 10^{-3}\mu m^2$,裂缝长度 $0.6 \sim 3m$,裂缝宽度 $0.0002 \sim 0.02m$,裂缝条数 $4 \sim 8$ 条,供给边界距离 $400 \sim 500m$,井半径 $0.1m$,油层厚度 $12m$,供液压力 $9MPa$,井底流压 $5MPa$,原油黏度 $2mPa \cdot s$ 。根据以上基础数据,计算得到单井产能为 $2.2 \sim 3.7t$ 。

该区实际单井产能为 $2 \sim 4t$,模型计算单井产能与生产实际产能很接近,说明该模型是较为合理有效的。

3 结果分析

对于裂缝性低渗透油藏,影响油井产能的因素很多。应用算例分析裂缝宽度、裂缝长度、裂缝渗透率对产能的影响。

为了反映油井产能的变化,对采油指数 J_o 进行分析。有

$$J_o = \frac{2\pi h}{\frac{\mu}{K_1} \ln \frac{r_e}{r_2} + \frac{\mu}{K_1 + \frac{nw_i K_f}{2\pi r_2}} \ln \frac{r_2}{r_w}} \quad (9)$$

3.1 裂缝宽度对产能的影响

改变裂缝宽度,其他基础数据不变,应用式(9)求采油指数 J_o ,得到 J_o 与裂缝宽度的关系如图3所示。由图3可知,天然裂缝宽度对油井增产作用影响较大。随着裂缝宽度的增大,采油指数增大。裂缝宽度小于0.01m时,采油指数增幅较大,与裂缝宽度呈非线性关系。裂缝宽度大于0.01m时,随着裂缝宽度的增大,采油指数增幅较小,采油指数与裂缝宽度基本呈线性关系。这说明,当裂缝宽度达到一定程度之后,通过增大裂缝宽度的方式,油井产能变化不大。在对裂缝性油藏进行压裂改造时,裂缝宽度存在最合适范围。

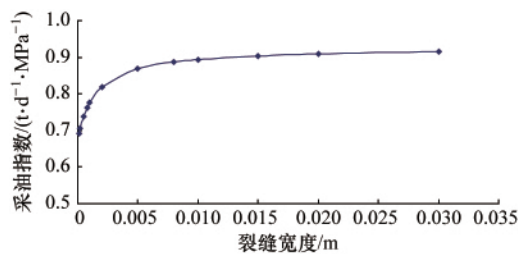


图3 裂缝宽度与采油指数关系

Fig. 3 Fracture width and the oil well production index

3.2 裂缝长度对产能的影响

改变裂缝长度,取裂缝宽度为1mm,裂缝渗透率为 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其他基础数据不变,应用式(9)求采油指数 J_o ,得到 J_o 与裂缝长度的关系如图4所示。由图4可知,随着裂缝长度的增加,采油指数增大。裂缝长度小于5m时,裂缝长度与采油指数呈非线性关系。裂缝长度大于5m,二者关系逐渐变为线性。这说明,要提高油井产量,应对天然裂缝进行压裂改造,增加裂缝的长度。

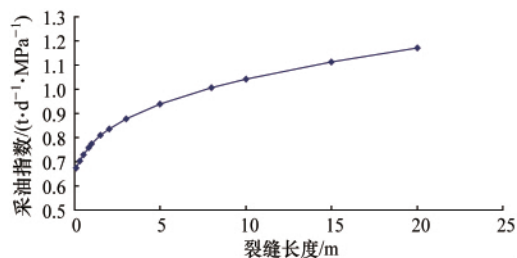


图4 裂缝长度与采油指数关系

Fig. 4 Fracture length and the oil well production index

3.3 裂缝渗透率对产能的影响

取裂缝宽度0.0005、0.001、0.005、0.01、0.02m,裂缝长度1m,其他数据不变,改变裂缝渗透率值,应用式(9)求采油指数 J_o ,得到 J_o 与裂缝渗透率的关系如图5所示。由图5可知,裂缝宽度较小时,随着裂缝渗透率的增大,采油指数呈线性

变化;当裂缝宽度达0.005m、裂缝渗透率小于 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,裂缝渗透率与采油指数呈非线性关系,此时采油指数增加的幅度较快;当裂缝宽度达0.005m、裂缝渗透率大于 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,裂缝渗透率与采油指数呈线性关系。

综上所述可知,当井底附近裂缝渗透率达到一定值后,渗透率的增加对油井产量影响不大,在对井底附近天然裂缝储层进行改造时,当裂缝渗透率和裂缝宽度达到一定值后,应采取增大裂缝长度的措施来提高油井产能。

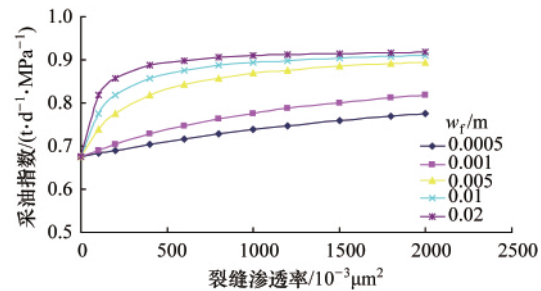


图5 裂缝渗透率与采油指数关系

Fig. 5 Fracture permeability and the oil well production index

4 结论

- 1) 根据连续介质理论,建立了裂缝等效渗流物理模型和数学模型。计算结果与实际吻合较好,表明该模型有实用性。
- 2) 分析了影响天然裂缝低渗透油藏产能的主要因素。通过对裂缝宽度、裂缝长度和裂缝渗透率的影响对比可知,裂缝长度对产能的影响更为显著。
- 3) 在对天然裂缝储层进行压裂改造时,当裂缝渗透率和宽度达到一定值时,应以增加裂缝长度为主。

参考文献 (References)

- [1] 刘建军,冯夏庭,刘先贵. 裂缝性砂岩油藏水驱效果的物理及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2313-2318.
Liu Jianjun, Feng Xiating, Liu Xiangui. *Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering*, 2004, 23(14): 2313-2318.
- [2] 刘德华. 裂缝孔隙介质储层产能确定方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(4): 57-60.
Liu Dehua. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2008, 27(4): 57-60.
- [3] 薛守义. 论连续介质概念与岩体的连续介质模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 230-232.
Xue Shouyi. *Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering*, 1999, 18(2): 230-232.
- [4] 刘建军,刘先贵,胡雅初. 裂缝性砂岩油藏渗流的等效连续介质模型 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(S1): 158-160.
Liu Jianjun, Liu Xiangui, Hu Yareng. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2000, 23(S1): 158-160.
- [5] 吴忠宝,胡文瑞,宋新民. 天然微裂缝发育的低渗透油藏数值模拟[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 727-730.
Wu Zhongbao, Hu Wenrui, Song Xinmin. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(5): 727-730.

(责任编辑 刘志远)