

裂缝扩展注水技术中的裂缝扩展规律研究

韩忠英¹,程远方²,王京印²

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东青岛 266555;2. 中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266555)

摘 要:低渗透油藏开发主要面临注水困难的问题,而裂缝扩展注水技术是提高低渗透油藏注水能力的有效技术。基于微可压缩流体假设和 Griffith 理论,分析了裂缝扩展注水机理,建立了裂缝扩展注水的扩展周期模型和裂缝半缝长扩展增量模型,讨论了注水量、滤失系数等参数对裂缝扩展规律的影响。结果表明:在裂缝扩展过程中,缝内压力呈不规则的周期性变化,随着注水量的增加,压力上升的速度越来越快;注水量越高,裂缝越容易扩展;随着注水时间增加,初始滤失系数越小裂缝越容易扩展;滤失系数减小越快,裂缝扩展越快,半缝长增量越小。

关键词:注水 裂缝扩展 扩展周期 低渗透油藏

中图分类号:TE348 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)06-0082-04

Fracture Propagation in Water Injection above Fracture Propagation Pressure

Han Zhongying¹, Cheng Yuanfang², Wang Jingyin²

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266555, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266555, China)

Abstract: Injection difficulty is one of the main problems in developing low-permeability reservoirs. The technique of water injection above fracture propagation pressure is feasible to increase water injection capacity of low-permeability reservoirs. On the basis of micro-compressible fluid assumption and Griffith theory, the mechanism of the water injection above fracture propagation pressure is analyzed. In addition, water injection cycle model and half-fracture length increment model are established. The effects of water injection and filtration coefficient are analyzed. It is found that the change of pressure is irregular during fracture propagation. The rate of pressure rise increases with the increase of injection volume. The higher the injection flow rate, the higher the fracture expansion. If the initial filtration coefficient is low, the fracture propagation would be much easier with the increase of injection time. If the filtration coefficient decreases rapidly, the fracture propagation would be fast and the half-fracture length increment would be short.

Key words: water flooding; fracture extension; expansion cycle; low permeability pools

注水开发是油田开发提高采收率最经济有效的技术手段,国内外应用广泛。低渗透油藏渗吸机理复杂^[1-3],注水效果较差,导致地层能量补充不及时,油井产量下降快,储层动用状况差。要提高低渗透油藏注入能力,必须提高水质^[4-5]或频繁进行作业,导致开发成本增加。传统的注水工艺是将注水压力控制在地层破裂压力以下,避免压裂储层,这也限制了注水能力的提高。目前通常先采用常规水力压裂后

注水的方法,它可以在短时间内提高注水能力,但其驱油效率明显降低,并存在有效期短、对地层污染大

收稿日期:2010-03-16;**改回日期:**2011-10-05。

作者简介:韩忠英(1979—),女,山东乳山人,2002年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,2009年获中国石油大学油气井工程专业硕士学位,工程力学专业在读博士研究生,主要从事油气田地下工程力学方面的研究。

联系方式:hzy_0218@163.com。

等问题。综合考虑传统方案的不足,在借鉴国外研究成果的基础上^[6-8],提出了裂缝扩展注水技术,即恒定排量注水,将注水压力提高到破裂压力,在地层中形成一个小裂缝,增加地层的吸水能力,随后注入压力下降,而后又逐渐升高,诱导裂缝进一步扩展,从而实现恒定排量注水的目的。

1 裂缝扩展注水机理

裂缝扩展注水的前提是在注水过程中保持注水量不变。低渗透油藏要保持注水量不变,必须提高地面注水压力。根据地层造缝机理,对于直井,当井底压力达到地层破裂压力时,地层沿最大水平地应力方向产生裂缝;新裂缝产生后,由于缝表面未受污染,吸水能力增强,此时若仍保持注水量不变,地面注水压力会瞬间下降到某一值;继续注水,由于水质、出砂等原因污染裂缝表面,注水压力会逐渐上升,当地层压力达到裂缝扩展极限时,在裂缝尖端,会沿原裂缝方向产生新的裂缝增量,新缝表面渗透率增加,注水压力再次瞬间降低。以此类推,裂缝扩展过程中注水压力呈现不规则的周期变化,总缝长逐渐增加,直至合理的范围,从而达到提高注水量和驱油效率的目的(见图 1)。

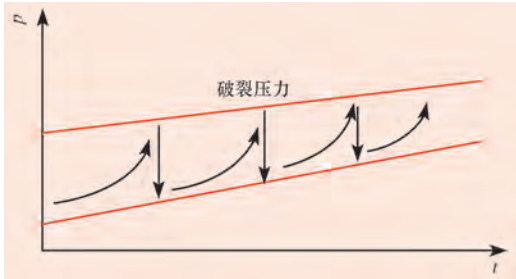


图 1 裂缝扩展注水基本原理

Fig. 1 Schematic diagram of water injection above fracture propagation pressure

2 裂缝扩展数学模型的建立

2.1 基本条件

根据裂缝扩展注水机理,直井在裂缝扩展过程中,地面压力随时间呈周期性变化。对于微可压缩流体,裂缝扩展参数与压力的变化密切相关。因此,做下列假设:1)产生垂直缝,裂缝水平截面为椭圆形截面;2)仅考虑裂缝壁面的滤失情况;3)流体瞬间充满已开启裂缝;4)裂缝高度等于油层厚度;5)初始裂缝已经存在,裂缝基本参数一定,但未充满流体。

假定新裂缝扩展前(同一周期内)地面注水压力与时间呈线性关系,即满足:

$$p_i(t) = k_i t + p_{i0} \quad (1)$$

边界条件:1)设在 $t = T_i$ 时,井底缝内压力 $p_{iw}(T_i) = p$, p 为裂缝第 i 次扩展时的扩展压力,可由裂缝尖端扩展问题求得,也可根据实验获得,为计算方便,设裂缝每次扩展时 p 不变;2) $i=1$ 时,地面压力 p_{10} 设为已知常数。 $t = T_{i0}$ 时,地面压力为 p_{i0} ,且 $p_{i0} = \left(\sum_{i=1}^n L_{i-1} / \sum_{i=1}^n L_i \right) (p - p_H)$, 并设井筒内流体的压力 p_H 随井深 H_w 呈线性变化,即 $p_H = k H_w$ 。

2.2 扩展周期模型

基本假设:1)忽略油套环空中流体的体积;2)在注水过程中裂缝不闭合。

那么,以一定排量注入到裂缝中的流体,一部分充满井筒,一部分滤失到地层中,还有一部分充满已产生的裂缝,根据质量守恒,在任一段时间间隔内满足以下条件:

$$\Delta m_0 = \Delta m_w + \Delta m_f + m_i \quad (2)$$

根据液体状态方程,式(2)展开得:

$$\begin{aligned} QT_i = & \frac{1}{2} \pi C_L (p - p_H - p_{i0}) W_{\max} H_r \sum_{j=1}^{i-1} \Delta L_j + \\ & \frac{1}{2} \pi [1 + C_L (p - p_H - p_{i0})] W_{\max} H_r \Delta L_i + \\ & 2 \int_{T_{i0}}^{T_i} [1 + C_L (p(t) + p_H - p_p - p_{i0})] \sum_{j=1}^i \left(\frac{C(t)}{\sqrt{t}} A_j \right) dt + \\ & C_L (p - p_H - p_{i0}) V_w \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 裂缝扩展半缝长增量模型

基本假设:1)忽略流动过程中流体的剪切强度;2)忽略注液系统内各种摩擦力;3)忽略流体与岩石表面间的摩擦阻力。

在裂缝扩展过程中,根据 Griffith 准则采用能量平衡原理^[9],从旧裂缝生成且还未充填流体的瞬间开始,到新裂缝产生且还未充填流体的瞬间结束为单元,对整个系统进行线弹性求解:

$$\Delta E_i = \Delta E_{l,i} + \Delta E_{f,i} + \Delta E_{rs,i+1} + \Delta E_{ic,i+1} \quad (4)$$

通常,在一个较小的时间间隔 Δt 内,流体的能量可表示为 $\Delta E = p(\Delta t) \Delta V$ 。则式(4)展开得:

$$\begin{aligned} \int_{T_{i0}}^{T_i} p(t) Q dt = & 2 \sum_{j=1}^i \int_{T_{i0}}^{T_i} (p(t) + p_H - p_p) \frac{C(t)}{\sqrt{t}} A_j dt + \\ & 2(p - p_H - p_{i0}) \sum_{j=1}^i V_{f,j} + \frac{\pi \sigma_h^2 A_{j+1}^2}{16EH} + 2A_{i+1} \gamma \end{aligned} \quad (5)$$

根据式(3)和式(5)即可求得裂缝扩展注水的扩展周期和缝长增量。

根据能量平衡原理,由式(4)可知,当 $\Delta E_i \leq \Delta E_{l,i} + \Delta E_{t,i}$ 时,裂缝将无法继续扩展。但在实际注水过程中,由于受注采井网、地面配套设施、地质参数等因素的限制,裂缝缝长可能不需要或无法达到扩展极限,甚至可能无限扩展,这都可根据生产需要进行适当调整。

3 算 例

胜利油田某井油管内半径 0.03 m,油层厚度 10 m,最小水平主应力 54 MPa,弹性模量 20 GPa,表面能密度 5 MJ/m²,液体压缩系数 0.5×10^{-4} MPa⁻¹,滤失系数随时间的变化规律为 $C(t) = -0.045t + 0.53$ 。

若该井采用裂缝扩展技术注水开发 20 a,设初始半裂缝长为 1 m,最大缝宽为 0.01 m,分别绘制裂缝扩展地面压力变化曲线和半缝长增量曲线(见图 2 和图 3)。从图 2、图 3 可以看出:裂缝扩展过程中,地面最高压力为 29.72 MPa,该压力在实际注水过程中通过增压泵增压即可实现^[10-15];地面压力随时间呈不规则的周期变化,且注水量越高越容易扩展,同一段时间内半缝长扩展长度也越长。

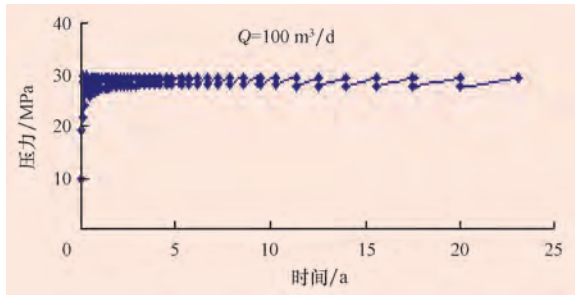


图 2 地面压力变化曲线
Fig. 2 Surface pressure curve

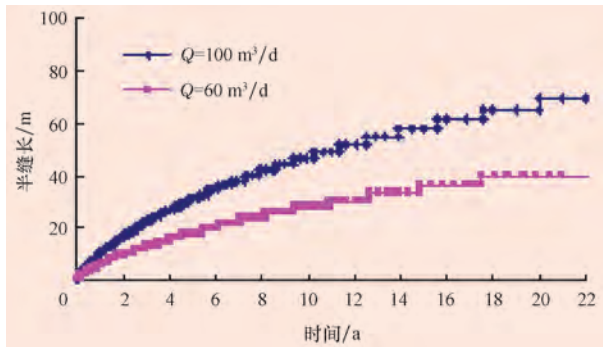


图 3 注水量对半缝长的影响曲线
Fig. 3 The effect of water injection rate on half-fracture length

另外,滤失系数是影响裂缝扩展的一个重要因素。滤失系数的变化综合反映了不同地层裂缝中渗透率、孔隙度及注入水水质等参数的变化。若滤失系数与注水时间平方根呈线性关系,斜率越大,滤失系数减小越快。截距(即初始滤失系数)反映的是地层本身的渗透性,截距越大,原始地层渗透性越好。从图 4、图 5 可以看出:在注水量一定的情况下,随着注水时间增加,初始滤失系数越小裂缝越容易扩展;滤失系数减小越快,裂缝扩展越快,半缝长增量越小。

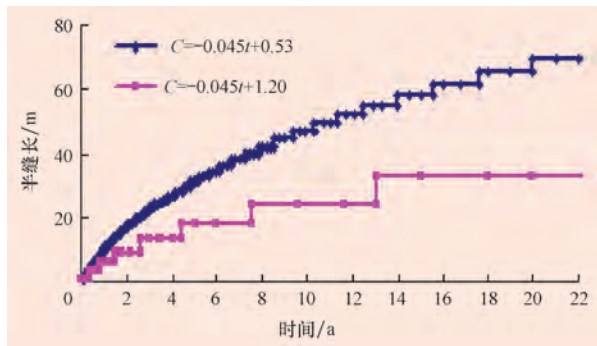


图 4 初始滤失系数对半缝长的影响曲线
Fig. 4 The effect of initial filtration coefficient on half-fracture length

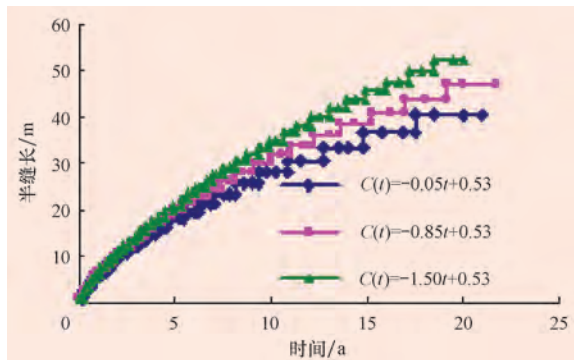


图 5 滤失系数下降速率对半缝长的影响曲线
Fig. 5 The effect of filtration coefficient reduction on half-fracture length

4 结 论

- 1) 建立了裂缝扩展注水的裂缝扩展周期和半缝长增量计算模型,对裂缝扩展注水过程进行了模拟,验证了该技术在实际注水过程中的可行性。
- 2) 在裂缝扩展过程中,缝内压力呈不规则的周期变化,随着注入量的增大,压力上升的速度越来越快;注水量越高,裂缝越容易扩展。
- 3) 随着注水时间增加,初始滤失系数越小,裂缝越容易扩展;滤失系数减小越快,裂缝扩展越快,半缝长增量越小。

符号注释

$p_i(t)$ 为第 i 次扩展后形成的裂缝, 在 t 时刻的地面注水压力, MPa; k_i 为压力变化系数, MPa/d; L 为半缝长, m; k 为压力梯度, MPa/m; Δm_0 为任一时间间隔 Δt 内, 井口注入流体的总质量, kg; Δm_w 为任一时间间隔 Δt 内, 井筒内储存的流体的质量, kg; Δm_f 为任一时间间隔 Δt 内, 裂缝内流体的质量, kg; m_l 为任一时间间隔 Δt 内, 从壁面滤失到地层流体的质量, kg; T_i 为从第 i 次裂缝产生开始到第 $i+1$ 次裂缝产生过程中流体的注入时间, d; C_l 为液体的弹性压缩系数, MPa^{-1} ; p_{i0} 为第 i 次裂缝产生且瞬间充满流体时的地面压力, MPa; V_w 为井筒的体积, m^3 ; Q 为地面上流体的排量, m^3/d ; $W_{\max}$ 为裂缝的最大缝宽, m; p_p 为孔隙压力, MPa; $C(t)$ 为裂缝扩展的滤失系数, $\text{m} \cdot \text{d}^{-0.5}$; A_j 为第 j 段半裂缝的滤失面积, m^2 ; ΔE_i 为从第 i 次裂缝扩展后开始到第 $i+1$ 次裂缝产生结束, 地面流体注入过程中所做的功, J; $\Delta E_{l,i}$ 为从第 i 次裂缝扩展后开始到第 $i+1$ 次裂缝产生结束, 流体滤失到地层所消耗的能量, J; $\Delta E_{f,i}$ 为从第 i 次裂缝扩展后开始到第 $i+1$ 次裂缝产生结束, 缝内流体储存的弹性应变能的改变量, J; $\Delta E_{rs,i+1}$ 为从第 i 次裂缝扩展后开始到第 $i+1$ 次裂缝产生结束, 地层岩石内储存的弹性应变能的改变量, J; $\Delta E_{ic,i+1}$ 为从第 i 次裂缝扩展后开始到第 $i+1$ 次裂缝产生结束, 岩石破坏所作的功即产生新裂缝表面所吸收的能量, J; $p(\Delta t)$ 为微小时间段 Δt 的平均压力, MPa; $V_{f,j}$ 为第 j 段半裂缝的滤失体积, m^3 ; σ_h 为地层最小水平主应力, MPa; E 为地层岩石弹性模量, MPa; H 为油层厚度, m; γ 为表面能密度, MJ/m^2 ; i, j, n 为裂缝扩展次数。

参考文献

References

[1] 朱维耀, 鞠岩, 赵明, 等. 低渗透裂缝性砂岩油藏多孔介质渗吸机理研究[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 56-59.
Zhu Weiyao, Ju Yan, Zhao Ming, et al. Mechanism of imbibition in porous media of low-permeability fractured sandstone reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 56-59.

[2] 王家禄, 刘玉章, 陈茂谦, 等. 低渗透油藏裂缝动态渗吸机理实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 86-90.
Wang Jialu, Liu Yuzhang, Chen Maoqian, et al. Experimental study on dynamic imbibition mechanism of low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 86-90.

[3] 周林波, 程林松, 曾保全. 裂缝性特低渗透储层渗吸表征模型

[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(3): 83-86.
Zhou Linbo, Cheng Linsong, Zeng Baoquan. Scaling model of imbibition in fractured ultra-low permeability reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(3): 83-86.

[4] 张艳. 低渗透油田注水水质评价处理技术[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(3): 52-54.
Zhang Yan. Treating techniques of injected water evaluation in low permeable oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(3): 52-54.

[5] 汪亚蓉, 汪伟英, 刘子雄, 等. 注水水质对油藏开发指标的影响研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(1): 82-84.
Wang Yarong, Wang Weiyong, Liu Zixiong, et al. Effect of injected water quality on reservoir development index[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(1): 82-84.

[6] Gadde Phani B, Sharma Mukul M. Growing injection well fractures and their impact on waterflood performance[R]. SPE 71614, 2001.

[7] Abou-Sayed A S, Zaki K S, Wang G G, et al. A mechanistic model for formation damage and fracture propagation during water injection[R]. SPE 94606, 2005.

[8] Souza A L S, Fernandes P D, Mendes R A, et al. The impact of fracture propagation on sweep efficiency during a waterflooding process[R]. SPE 94704, 2005.

[9] 阳友奎, 吴刚, 邱贤德, 等. 水力压裂的能量平衡与断裂韧度[J]. 重庆大学学报, 1992, 15(2): 1-6.
Yang Youkui, Wu Gang, Qiu Xiande, et al. Energy balance of hydraulic fracture and fracture toughness [J]. Journal of Chongqing University, 1992, 15(2): 1-6.

[10] 王子刚. 增压泵在油田注水中的应用[J]. 油气田地面工程, 2005, 24(10): 17-18.
Wang Zigang. The application of booster pump during field water-flood[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2005, 24(10): 17-18.

[11] 徐建, 郭明. ZSDL-II 型增压泵[J]. 油气田地面工程, 2004, 23(1): 63.
Xu Jian, Guo Ming. ZSDL-II booster pump[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2004, 23(1): 63.

[12] 王小辉, 姚永柏, 应付晓, 等. JB 型阶梯柱塞节能注水增压泵的应用[J]. 石油机械, 2004, 32(6): 78-79.
Wang Xiaohui, Yao Yongbai, Ying Fuxiao, et al. The application of JB stepped plunger-type energy-saving water booster pump[J]. China Petroleum Machinery, 2004, 32(6): 78-79.

[13] 张春荣. 低渗透油田高压注水开发探讨[J]. 断块油气田, 2009, 16(4): 80-82.
Zhang Chunrong. High-pressure water injection in the development of low-permeability oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(4): 80-82.

[14] 孟勇, 秦延才, 王金亮. 水力活塞增压注水泵的研究与应用[J]. 石油机械, 2003, 31(12): 25-27.
Meng Yong, Qin Yancai, Wang Jinliang. Research and application of booster injection pump with hydraulic piston[J]. China Petroleum Machinery, 2003, 31(12): 25-27.

[15] 丁鹏, 闫相祯. 高压注水管柱受力分析[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(6): 47-50.
Ding Peng, Yan Xiangzhen. Force analysis of high pressure water injection string [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(6): 47-50.