

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.008

射孔完井水平井筒变质量流压降规律实验

魏建光¹,汪志明²,张 权²,高学珍³

(1. 东北石油大学 石油工程学院,黑龙江 大庆 163000;2. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249;
3. 大庆油田第八采油厂工程技术大队,黑龙江 大庆 163000)

摘 要:目前各国学者主要针对注入比对射孔完井水平井筒变质量流压降的影响规律进行研究,而关于射孔相位、射孔直径、射孔密度对水平井筒变质量流壁面摩擦压降、混合压降、总压降影响规律的研究并不系统。因此笔者开展了射孔完井水平井变质量流压降规律实验研究。实验设计了三种射孔相位(45度螺旋射孔、90度螺旋射孔、180度螺旋射孔)、三种射孔直径(10、20、30 mm)和三种射孔密度(8、16、24 孔/m)、主流雷诺数为 1 000~20 000、壁面注入比(单位井筒长度壁面入流量与主流流量的比值)为 0.01%~10%。通过实验,研究了射孔相位、射孔直径、射孔密度对壁面摩擦压降、混合压降、总压降的影响规律,同时分析了壁面注入比对混合压降和加速度压降的影响规律。研究表明:随着射孔密度和射孔直径增大,壁面摩擦压降和总压降增大,混合压降减小;随着射孔相位增大,混合压降、壁面摩擦压降和总压降均增大;随着壁面注入比的增加,混合压降和加速度压降均增加。同时发现壁面注入比存在一个临界值,当壁面注入比小于此临界值时,混合压降为负值,加速度压降基本为零,总压降小于壁面摩擦压降;当壁面注入比大于此临界值时,混合压降开始为正值,加速度压降随着壁面注入比的增加而显著增加。

关键词:水平井;射孔完井;变质量流;压降;实验

中图分类号:TE257

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)09-052-06

Experiments on variable mass flow in perforated completion horizontal wells

WEI Jianguang¹, WANG Zhiming², ZHANG Quan², GAO Xuezhen³

(1. College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Helongjiang 163000, China;

2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;

3. No. 8 Oil Production of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing, Helongjiang 163514, China)

Abstract: A considerable number of experimental work on the influence of flux ratio on variable mass flow in perforated completed horizontal wells has been published by many scholars, but the effects of perforation phasing, perforation diameter and perforation density on frictional, mixing and total pressure drop have not been studied systematically. In this paper, an experiment system is developed to investigate the influence of the perforation phasing, diameter and density. Three values of screw perforating phasing (45°, 90°, 180°), three kinds of perforation density (8 meter-1, 16 meter-1, 24 meter-1) and three sizes of perforation diameter (10 mm, 20 mm, 30 mm) are considered in the experiment of this paper. In the experiment, the *Re*

收稿日期:2013-04-15

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05009-005)

作者简介:魏建光(1979-),男,东北石油大学副教授,主要从事完井优化技术、井筒多相流动及提高采收率技术方面的研究,(E-mail)weijianguang@163.com。

(Reynolds number) of axial flow in pipe ranges from 1 000 to 20 000, the flux ratio (the ratio of the radial volume inflow at unit wellbore length to the axial volume flow in production pipe) ranges from 0.01% to 10%. The results indicate that: the frictional and total pressure drop increases while mixture pressure drop reduces with the increase of the perforation density and perforation diameter; the “mixing”, frictional and total pressure drop all increases with the increase of the perforation phasing; the proportion of frictional pressure drop to total pressure drop reduces while the proportion of “mixing” and acceleration pressure drop increases with the flux ratio; the “mixing” and acceleration pressure drop increases with the flux ratio, but there exists a critical value of flux ratio. When the actual flux ratio less than the critical value, the “mixing” pressure drop is negative, the acceleration pressure drop is almost 0 that induces the total pressure drop less than the frictional term. When the actual flux ratio is bigger than the critical value, the “mixing” pressure drop increases to positive, and the acceleration pressure drop increases with the flux ratio obviously.

Key words: horizontal wells; perforation completion; variable mass flow; voltage drop; experiments

研究水平井筒变质量流压降规律是进行水平井生产动态预测、水平井眼轨迹设计、完井参数优化设计、壁面入流控制方法选择的重要依据。针对射孔完井水平井筒变质量流压降规律,国内外很多学者都开展了比较深入的实验研究。其中具有代表性的学者有 Norwegian 科技大学的 Asheim^[1]和 Su^[2-3]、日本学者 Ihara^[4-6]、Tulsa 大学的 Yuan^[7-9]、Stanford 大学的 OuYang^[10-12]、中国石油大学(华东)的周生田^[13-14]、中国石油大学(北京)的汪志明^[15-16]。但是这些学者的实验研究并没有系统详细的给出射孔相位、射孔直径、射孔密度等参数对各种压降的影响规律。本研究采用外径 5.5 in 壁面打孔套管模拟射孔完井水平井筒,能够真实的反映水平井筒实际生产情况。实验设计了三种射孔相位、三种射孔直径和三种射孔密度,主流雷诺数为 1 000~20 000、壁面注入比为 0.01%~10%。实验研究了射孔相位、射孔直径和射孔密度对壁面摩擦压降、混合压降和总压降的影响规律,同时还分析了壁面注入比对混合压降和加速度压降的影响规律。本实验研究给出的射孔参数和注入比对井筒壁面摩擦压降、混合压降和总压降的影响规律为射孔完井水平井筒压降模型建立提供了科学依据。

1 实验介绍

1.1 实验条件

自主设计了水平井筒变质量流实验系统,整个实验系统由 3 部分组成:模拟实验单元、实验流体供给与控制系统、数据采集分析系统,如图 1 所示。

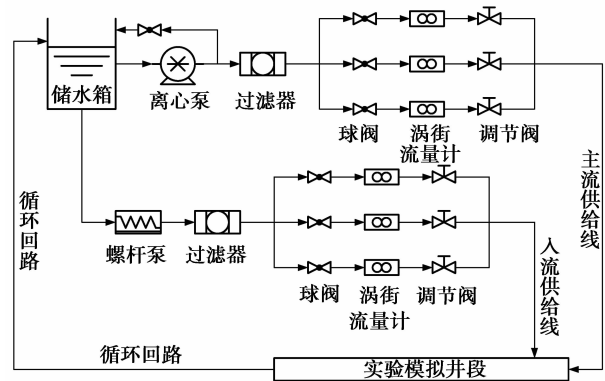


图 1 水平井目标井段复杂流动实验系统

模拟实验单元采用内径为 124.0 mm(外径为 5.5 in)左右的套管,管外套有内径 149.1 mm(外径为 7.5 in)的套管,实验单元长 6.5 m,两测压点间距离为 6.0 m。为提高压力测量精度,两测压点压差利用柔软透明橡胶管测得,测量精度为 1 Pa 数量级。环空缠有致密纱布,实验单元两端上下设计了两个进液口,目的是使壁面入流均匀,模拟实验单元如图 2 所示。

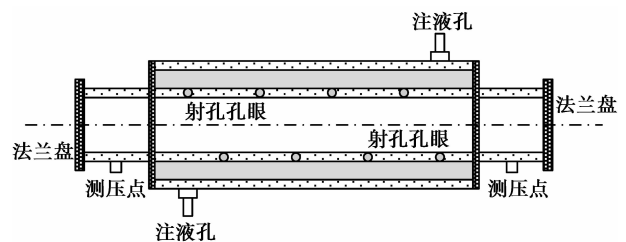
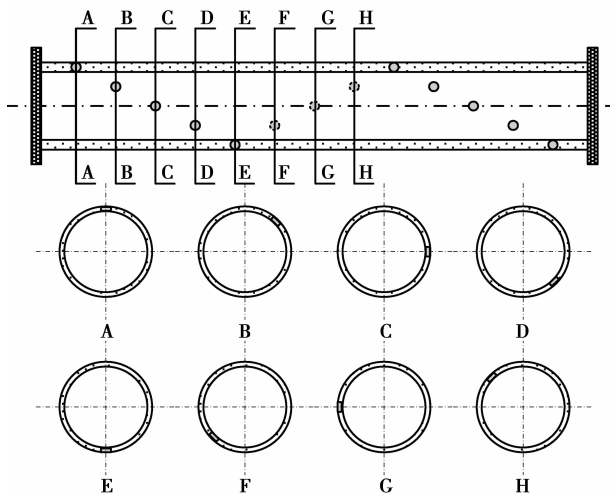


图 2 模拟实验单元示意图

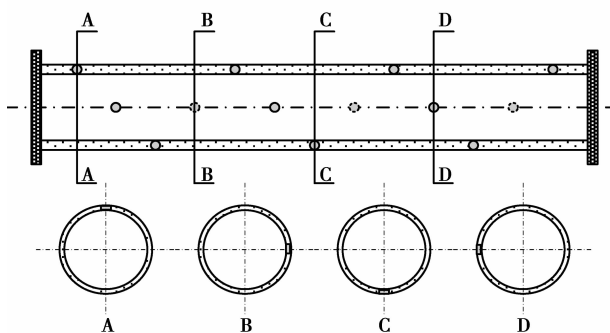
实验用 10 mPa·s 左右的白油代替常规原油,每天开展实验之前均事先测量室内温度和自油黏

度,当室内温度和白油黏度与前一天基本一致以后方可开展实验。

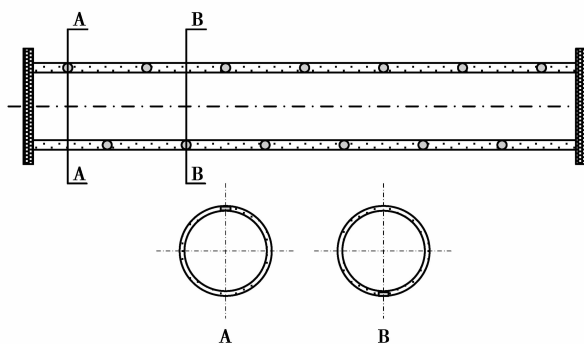
实验段射孔相位设计了 3 种:45 度螺旋射孔、90 度螺旋射孔、180 度螺旋射孔,如图 3 所示。射孔密度设计了 3 种:8、16、24 孔/m。射孔直径设计了 3 种:10、20、30 mm。



(a)45° 相位螺旋射孔



(b)90° 相位螺旋射孔



(c)180° 相位螺旋射孔

图 3 三种螺旋射孔示意图

主流雷诺数设计为 1 000~20 000。注入比设计为 0.02%~10%。

1.2 实验步骤

1)将事先设计加工好的不打孔眼的实验单元安装在实验环路上,检测实验环路是否密封良好,测量室内温度和白油黏度是否满足实验要求,检测流量和压力测量精度是否满足要求,然后调解主流控制阀门使主流雷诺数分别为 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、11 000、12 000、13 000、14 000、15 000、16 000、17 000、18 000、19 000、20 000,压力稳定以后测量不打孔眼不同主流雷诺数条件下的压差。

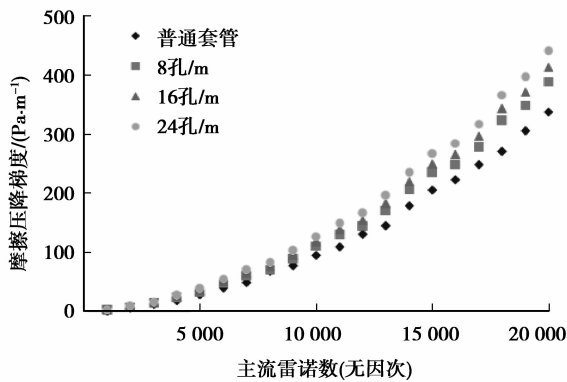
2)将事先设计加工好的一根壁面打好孔眼的目标实验单元安装在实验环路上,检测实验环路是否密封良好,测量室内温度和白油黏度是否满足实验要求,检测流量和压力测量精度是否满足要求。调解主流控制阀门使主流雷诺数分别为 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、11 000、12 000、13 000、14 000、15 000、16 000、17 000、18 000、19 000、20 000,压力稳定以后测量无壁面入流不同主流雷诺数条件下的压差。

3)同时调解主流控制阀门和壁面入流控制阀门使壁面注入比分别为 0.01%、0.02%、0.03%、0.04%、0.05%、0.06%、0.07%、0.08%、0.09%、0.1%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、2%、4%、6%、8%、10%,实验单元出口端主流雷诺数分别为 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、11 000、12 000、13 000、14 000、15 000、16 000、17 000、18 000、19 000、20 000,压力稳定以后测量不同壁面入流不同主流雷诺数条件下的压差。

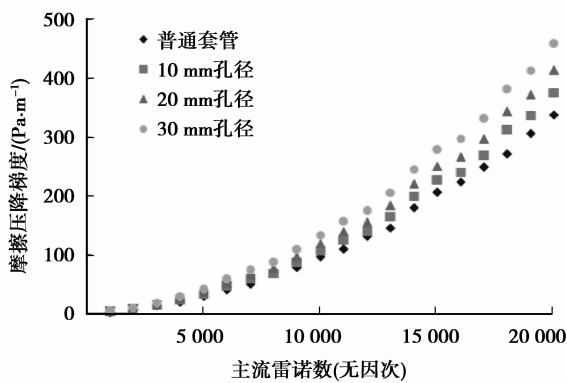
4)将事先设计好的其他实验单元(目标实验段射孔格式 3 种、射孔密度 3 种、射孔孔径 3 种)依次重复步骤 1)和 3)的实验内容。

2 规律分析

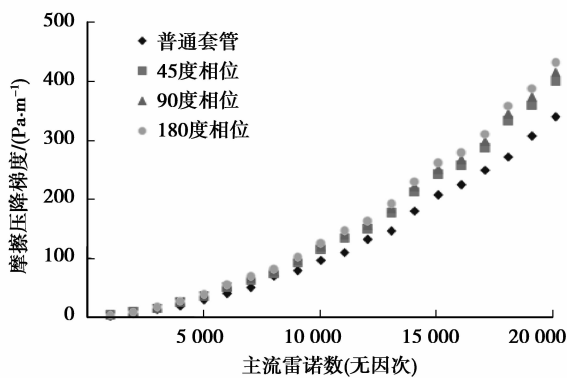
需要再次说明的是这些实验套管内径均为 124 mm 左右,两个测压点距离均为 6 m 左右,普通套管指的是没有射孔的套管。图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)分别给出了无壁面入流条件下不同射孔密度、射孔直径、射孔相位的射孔井筒流动壁面摩擦压降梯度与主流雷诺数的关系曲线。从图 4 中可以看出,射孔密度、射孔直径、射孔相位对射孔井筒流动壁面摩擦压降影响均显著,随着射孔密度增大、射孔直径增大、射孔相位增大,射孔井筒流动壁面摩擦压降均增大。射孔直径为 20 mm、射孔相位为 90°、主流雷诺数为 20 000 条件下,射孔密度为 8、16、



(a)不同射孔密度条件下壁面摩擦压降曲线



(b)不同射孔直径条件下壁面摩擦压降曲线



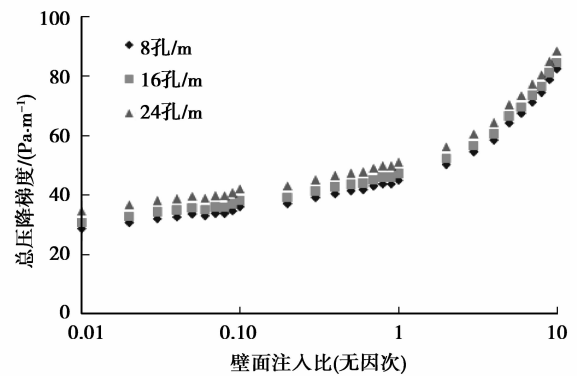
(c)不同射孔相位条件下壁面摩擦压降曲线

图4 无壁面入流不同条件下壁面摩擦压降曲线

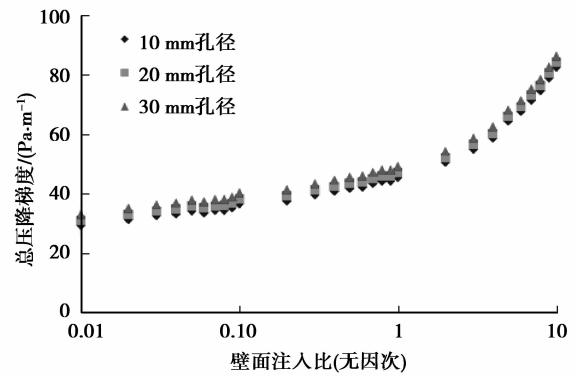
24孔/m对应的射孔井筒流动壁面摩擦压降梯度分别约为389、414、441 Pa/m,分别比普通套管流动壁面摩擦压降增大15.14%、22.41%、30.46%。射孔密度为16孔/m、射孔相位为90°、主流雷诺数为20000条件下,射孔直径为10、20、30 mm对应的射孔井筒流动壁面摩擦压降梯度分别约为376、414、459 Pa/m,分别比普通套管流动壁面摩擦压降增大11.11%、22.41%、35.71%。射孔密度为16孔/m、射孔直径为20 mm、主流雷诺数为20000条件下,射孔相位为45°、90°、180°对应的射孔井筒流动壁面

摩擦压降梯度分别约为399、414、430 Pa/m,分别比普通套管流动壁面摩擦压降梯度增大约为17.96%、22.41%、27.14%。可见射孔孔眼的存在明显增加了井筒壁面的粗糙度,进而导致井筒流动壁面摩擦压降增大。

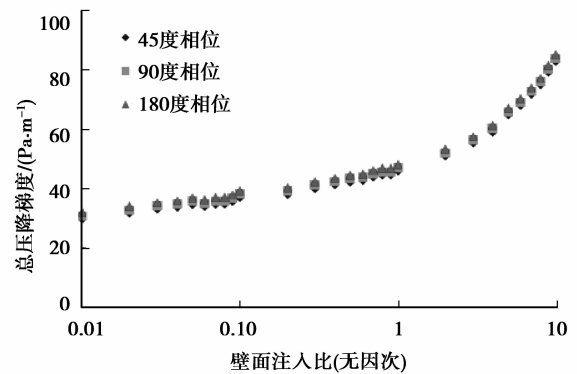
为了分析射孔密度、射孔直径、射孔相位对射孔井筒流动总压降和混合压降的影响规律,图5(a)、图5(b)、图5(c)分别给出了出口主流雷诺数为5000条件下,不同射孔密度、不同射孔直径、不同射孔相位的射孔井筒流动总压降梯度与壁面注入比的



(a)不同射孔密度条件下总压降与壁面注入比关系曲线



(b)不同射孔直径条件下总压降与壁面注入比关系曲线



(c)不同射孔相位条件下总压降与壁面注入比关系曲线

图5 不同条件下总压降与壁面注入比关系曲线

关系曲线。图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)分别给出了出口主流雷诺数为 5 000 条件下,不同射孔密度、不同射孔直径、不同射孔相位的射孔井筒流动混合压降梯度与壁面注入比的关系曲线。从图 5 中可以看出,射孔井筒出口主流雷诺数相同条件下,壁面注入比对射孔井筒流动总压降影响显著,随着壁面注入比的增大,射孔井筒流动总压降增大。壁面注入比分别为 0.01%、0.1%、1%、10%时,射孔井筒流动压降梯度分别约为 28、36、45、82 Pa/m,分别比普通套管流动壁面摩擦压降梯度(约为 29 Pa/m)增大大约为 -3%、25%、56%、185%。说明壁面注入比较低时,射孔井筒流动总压降小于射孔井筒流动壁面摩

擦压降。随着射孔密度、射孔直径、射孔相位的增大,射孔井筒流动总压降均增大,但相对壁面注入比对射孔井筒流动总压降的影响,射孔密度、射孔孔径、射孔相位的影响均较小,由此可知高壁面注入比条件下混合压降和加速度压降都比较显著。从图 6 中可以看出,射孔井筒出口主流雷诺数相同条件下,随着壁面注入比的增大,射孔井筒流动混合压降增大,但壁面注入比对射孔井筒流动混合压降的影响存在一个临界值。当壁面注入比小于临界值时,射孔井筒流动混合压降为负值,说明此时壁面入流的存在降低了射孔井筒流动总压降;当壁面注入比大于临界值时,射孔井筒流动混合压降为正值,说明此时壁面入流的存在增加了射孔井筒流动总压降。临界壁面注入比的大小主要受射孔密度和射孔孔径的影响,随着射孔密度和射孔孔径增大,临界壁面注入比增大。在本研究条件下(井筒内径为 124 mm 左右、射孔密度为 8~24 孔/m、射孔孔径为 10~30 mm)壁面临界注入比为 0.05%~0.1%。

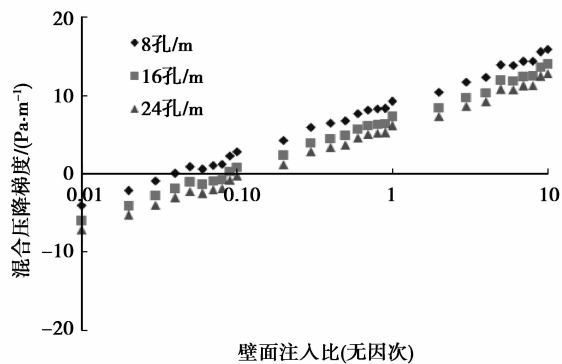
5 结 论

1)射孔孔眼的存在明显增加了井筒壁面的粗糙度,导致了射孔井筒流动壁面摩擦压降增大,且随着射孔密度的增大、射孔直径的增大、射孔相位的增大,射孔井筒流动壁面摩擦压降增大。射孔密度为 8~24 孔/m、射孔直径为 10~30 mm、射孔相位为 45°~180°范围内,射孔井筒流动壁面摩擦压降比普通套管流动壁面摩擦压降增大大约 11%~35%。

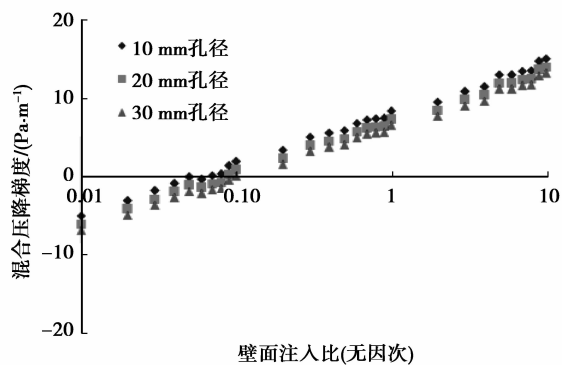
2)主流雷诺数相同条件下壁面注入比对射孔井筒流动总压降影响显著,随着壁面注入比的增大,射孔井筒流动总压降增大。壁面注入比分别为 0.01%、0.1%、1%、10%时射孔井筒流动压降分别比普通套管流动壁面摩擦压降增大大约 -3%、25%、56%、185%。

3)壁面注入比对射孔井筒流动混合压降的影响存在一个临界值。当壁面注入比小于临界值时,射孔井筒流动混合压降为负值,表明壁面注入比较小时,壁面有流体注入时的压降要比无注入时的低;当壁面注入比大于临界值时,射孔井筒流动混合压降为正值,表明壁面注入比较大时,壁面有流体注入时的压降要比无注入时的高。

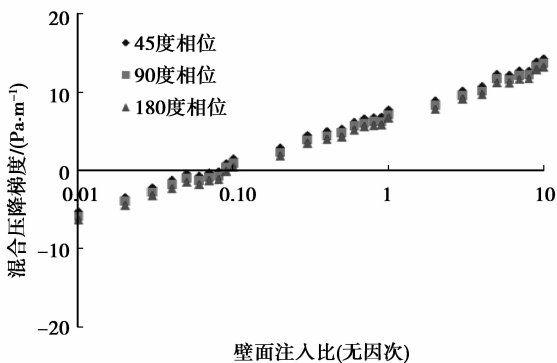
4)临界壁面注入比的大小主要受射孔密度和射孔孔径的影响,随着射孔密度和射孔孔径增大,临界壁面注入比增大。本研究条件下壁面临界注入比为 0.05%~0.1%。



(a)不同射孔密度条件下混合压降与壁面注入比关系曲线



(b)不同射孔直径条件下混合压降与壁面注入比关系曲线



(c)不同射孔相位条件下混合压降与壁面注入比关系曲线

图 6 不同条件下混合压降与壁面注入比关系曲线

参考文献:

- [1] Asheim H, Kolnes J, Oudeman P. A flow resistance correlation for completed wellbore [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1992, 8(2): 97-104.
- [2] Su Z, Gudmundsson J S. Friction factor of perforation roughness in pipes [C] // *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, October 3-6, 1993, Houston, Texas. [S. l.]: SPE, 1993: 151-163.
- [3] Su Z, Gudmundsson J S. Pressure drop in perforated pipes: experiments and analysis [C] // *Proceedings of the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference*, November 7-10, 1994, Melbourne, Australia. [S. l.]: SPE, 1994: 563-574.
- [4] Ihara M, Brill J P, Shoham O. Experimental and theoretical investigation of two-phase flow in horizontal wells [C] // *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, October 4-7, 1992, Washington, USA. [S. l.]: SPE, 1992: 57-67.
- [5] Ihara M, Shimizu N. Effect of accelerational pressure drop in a horizontal wellbore [C] // *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, October 3-6, 1993, Houston, Texas. [S. l.]: SPE, 1993: 125-138.
- [6] Ihara M, Yanai K, Yakao S. Two-phase flow in horizontal wells [J]. *SPE Production & Facilities*, 1995, 10(4): 249-256.
- [7] Yuan H, Sarica C, Brill J P. Effect of perforation density on single phase liquid flow behavior in horizontal wells [C] // *Proceedings of the SPE International Conference on Horizontal Well Technology*, November 18-20, 1996, Calgary, Alberta, Canada. [S. l.]: SPE, 1996: 603-612.
- [8] Yuan H. Investigation of single phase liquid flow behavior in horizontal wells [D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1997.
- [9] Yuan H, Sarica C, Brill J P. Effect of completion geometry and phasing on single-phase liquid flow behavior in horizontal wells [C] // *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, September 27-30, 1998, New Orleans, Louisiana. [S. l.]: SPE, 1998: 93-104.
- [10] Ouyang L B. Single phase and multiphase fluid flow in horizontal wells [D]. Stanford: Stanford University, 1998.
- [11] Ouyang L B, Arbabi S, Aziz K. General wellbore flow model for horizontal, vertical, and slanted wells completions [J]. *SPE Journal*, 1998, 3(2): 124-133.
- [12] Ouyang L B, Petalas N, Arbabi S, et al. An experimental study of single-phase and two-phase fluid flow in horizontal wells [C] // *Proceedings of the SPE Western Regional Meeting*, May 10-13, 1998, Bakersfield, California. [S. l.]: SPE, 1998: 1-10.
- [13] 周生田, 张琪, 李明忠, 等. 水平井筒变质量流体流动实验研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1998, 22(5): 53-55.
ZHOU Shengtian, ZHANG Qi, LI Mingzhong, et al. Experimental study on variable mass fluid flow in horizontal wells [J]. *Journal of the University of Petroleum: Natural Science Edition*, 1998, 22(5): 53-55.
- [14] 周生田, 张琪, 李明忠, 等. 水平井变质量流研究进展[J]. *力学进展*, 2002, 32(1): 119-127.
ZHOU Shengtian, ZHANG Qi, LI Mingzhong, et al. The advances on the variable mass flow in horizontal well [J]. *Advances in Mechanics*, 2002, 32(1): 119-127.
- [15] 汪志明, 张松杰, 薛亮, 等. 水平井筒射孔完井变质量流动压降规律[J]. *石油钻采工艺*, 2007, 29(3): 4-7.
WANG Zhiming, ZHANG Songjie, XUE liang, et al. Pressure drop of variable mass flow in perforation completion of horizontal wellbore [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2007, 29(3): 4-7.
- [16] 汪志明, 肖京男, 王小秋, 等. 水平井变质量流动压降规律实验研究[J]. *实验流体力学*, 2011, 25(5): 26-29.
WANG Zhiming, XIAO Jingnan, WANG Xiaoqiu, et al. Experimental study for pressure drop of variable mass flow in horizontal well [J]. *Experiments and Measur in Fluid Mechanics*, 2011, 25(5): 26-29.

(编辑 郑洁)