

文章编号:1673-5005(2007)01-0072-04

自振空化射流改善油层渗透率机理及实验研究

李根生¹, 易 灿², 黄中伟¹

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中石化胜利油田 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要:可以利用自振空化射流的振动和空化特性来解除或减轻地层堵塞, 提高渗透率。借助高压釜装置对围压下自振空化射流提高污染岩心渗透率进行了实验研究。结果表明, 随喷嘴出口直径、射流压力增加, 自振空化射流改善油层渗透率的作用效果增强; 处理中低渗岩心比高渗岩心需要更长的时间, 对不同渗透率岩心作用效果不同, 对中低渗、高渗岩心射流作用效果明显; 空化噪声作用深度随射流压力的升高而增加。现场应用表明, 自振空化射流在油井解堵、注水井增注方面作用效果明显。实验为拓宽自振空化射流的研究和应用领域提供了重要的参考依据。

关键词:自振空化射流; 噪声; 渗透率; 解堵; 实验研究

中图分类号:TE 355.9

文献标识码:A

Mechanism and experimental study of self-resonating cavitating jet for improving polluted rock permeability

LI Gen-sheng¹, YI Can², HUANG Zhong-wei¹

(1. Key Laboratory of Petroleum Engineering, Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Oilfield, China Petrochemical Corporation,

Dongying 257017, Shandong Province, China)

Abstract: The polluted rock core permeability could be improved by self-resonating cavitating jet with strong pressure oscillation and high cavitation inception characteristics. Experiments were conducted to investigate improvement of polluted rock permeability with self-resonating cavitating jets impingement under a high pressure vessel. The results show that the action effect of self-resonating cavitating jet improving permeability increases with the diameter of nozzle and jet pressure increasing. Meanwhile, under the same conditions, it needs more time for treating medium of low permeability rock samples than high ones, and the effect of medium and low permeability rock samples by the self-resonating cavitating jet is more obvious than extraordinarily low permeability ones. The action depth of self-resonating cavitating jet increases with the jet pressure increasing. Field applications also show that the self-resonating cavitating jet has obvious effects on broken down of oil production and water injection wells. The study will afford important evidence for widening self-resonating cavitating jets researches and applications.

Key words: self-resonating cavitating jet; noise; permeability; broken down; experimental study

钻井及石油开采期间, 由于固体颗粒运移、射孔时形成致密压实带等原因, 在生产井周围地层孔隙中很容易形成非渗透性障碍物, 导致地层渗流能力下降甚至生产井停产。国内外改善近井地带油层特性的方法有化学方法和物理方法。传统化学方法成本较高, 溶解物容易造成井下二次污染; 物理法主要有超

声波、水力振动及高能气体压裂等方法, 都是利用超声、振动、冲击等物理作用处理地层^[1-3]。自振空化射流是 20 世纪 80 年代初由美国 V. E. Johnson 等^[4]提出的一种新型高效射流技术, 它具有大结构的涡流环和高强度的压力振荡, 在常压及围压条件下产生出比一般空化射流更强的空化, 同时辐射强烈的空化噪

收稿日期: 2006-06-20

基金项目: 教育部长江学者与创新团队计划(IRT0411)和 CNPC 中青年创新基金资助项目(04E7034)

作者简介: 李根生(1961-), 男(汉族), 安徽石台人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事石油工程和高压水射流理论及应用研究。

声,具有更强的破坏力和更理想的应用效果,因而在最近十几年里得到了迅速发展^[56]。因此,可以利用自振空化射流强烈的冲击、振动、空化噪声等作用改善油层特性,提高地层渗透率,这对开辟自振空化射流新的研究和应用领域、实现物理法处理地层技术的突破性发展具有重要的理论和实用价值。

1 自振空化射流改善油层特性的机理

自振空化射流是利用小扰动波在管系传播的瞬态流理论和水声学的流体自激振荡原理将连续射流调制成具有强烈压力振荡和高空化初生能力的新型射流,因而可以利用其强烈的压力振荡和辐射空化噪声冲击波来解除地层堵塞,恢复或提高地层渗透率。

1.1 振动冲击作用

研究人员对自振空化射流的机理及作用效果已进行了大量研究。实验表明^[7-8],射流振动频率达几千至上万赫兹,自振空化喷嘴的冲击压力峰值和压力脉动幅度分别比锥形喷嘴提高37%和24%。在相同泵压下,冲蚀岩石效果为普通射流的2~4倍。张德斌等^[9]对围压下自振空化射流压力特性进行的实验研究表明,在围压和压降一定时,自振空化射流的最大冲击压力明显高于普通连续射流;自振空化射流的脉动频率基本不随围压、压降和喷距的变化而变化。当高压射流冲击近井地层时,储层因受冲击力而产生振动,不仅能够使孔隙壁附着的污染物慢慢剥离,分散在液体中并被携带走,起到疏通孔道、清除油层堵塞、提高渗透率的作用,而且能够造成孔隙的挤压与张合,储于孔隙中的液体也会因挤压而流动,从而促进液体流动。同时,振动也改变了毛细孔隙内水、气和油的分布,使部分气体溢出,从而达到疏通孔道、提高油层渗透率的目的。

1.2 射流噪声作用

超声波能够改善油层特性和提高渗透率,这已为许多实验及现场应用所证实,自振空化射流要利用噪声(超声波)辐射作用改善油层特性,必须在较高围压下仍能产生空化作用。文献[10,11]研究了自振空化射流的空化初生能力,表明在射流压力为20 MPa下,即使围压达到9 MPa,仍存在较强的空化噪声,其空化初生数都在1.0以上,最大达到1.67,噪声频率为10~100 kHz。这种高频超声波一方面有助于解堵,另一方面可以改变原油分子结构,降低原油粘度,减小岩石和油水界面的表面张力,从而改善流体的流动性,提高原油采出程度。

2 室内实验

2.1 实验装置

图1是实验装置示意图。实验在高压釜上进行,由高压泵组、高压釜体和调速电机等组成,调速电机通过螺杆带动岩心盒上下移动,从而调节喷距,旋转电机带动螺杆旋转从而模拟井下工具实际工作情况,岩心可放置在射流冲击中心或偏置射流冲击中心。高压泵采用两台额定压力为50 MPa的三缸柱塞泵,额定流量为63 L/min。实验用喷嘴主要为根据瞬态流和水声学原理设计的风琴管自振空化喷嘴^[12],喷嘴出口直径为2 mm和3 mm,喷距为6 mm,岩心渗透率测量装置^[13]主要包括小排量水泵、岩心夹持器、量杯等,水泵排量为0~20 mL/min。实验用岩心由石英砂和环氧树脂胶结而成^[13],岩心尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,采用地层水作为渗流液体,岩心置于射流冲击中心时,为了避免射流冲蚀,在岩心端面放置有0.2 mm厚的薄铁片。

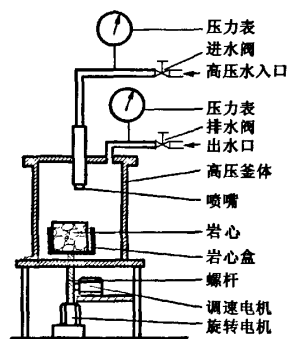


图1 实验装置示意图

2.2 实验方法

首先将岩心置于盛满地层水的烧杯中,用真空泵抽吸使其达到饱和状态,置于岩心夹持器中,测量其原始渗透压差 Δp_1 、流量 Q_1 ,求出原始渗透率 k_1 ;然后用现场钻井液污染该岩心,测量渗透压差 Δp_2 、流量 Q_2 ,求出渗透率 k_2 ;再用自振空化射流处理受污染的岩心,最后测量射流处理后岩心渗透压差 Δp_3 、流量 Q_3 ,求出渗透率 k_3 。以岩心渗透率提高幅度作为标准对射流参数进行比较,岩心渗透率提高幅度 Δk 定义为

$$\Delta k = \frac{k_3 - k_2}{k_2}, \quad k = \frac{Q\mu L}{A\Delta p}$$

式中, k 为液测渗透率, μm^2 ; Δp 为岩心夹持器进出口压力差,MPa; μ 为液体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; A 为岩心的过流断面面积, cm^2 ; L 为岩心样品长度,cm; Q 为液

体流量, cm^3/s 。

通过测量污染岩心试验前、后的渗透率来考察自振空化射流对油层特性的改善程度。

3 实验结果及其分析

3.1 喷嘴出口直径对岩心渗透率提高幅度的影响

图2为采用中低渗透岩心且放置在射流冲击中心、作用时间为4 min及围压为5 MPa时不同出口直径(d)的自激振荡喷嘴对应的射流压力与岩心渗透率提高幅度曲线。由图2可知,随着喷嘴直径的增大,其作用效果也增强,对高渗透岩心研究也是如此,这是因为随着喷嘴直径的增大,其空化噪声能量增加,振动、冲击力也增加,当然其能量消耗也大大增加。同时图2也表明,随射流压力增加,渗透率提高幅度增加。因此,在条件允许情况下,可以适当增大射流压力。

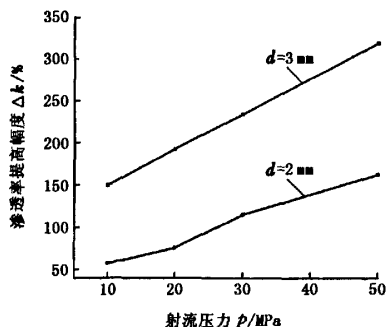


图2 喷嘴出口直径对岩心渗透率提高幅度的影响

3.2 射流压力对岩心渗透率提高幅度的影响

图3为采用中低渗透岩心、射流压力为20和30 MPa、岩心置于射流冲击中心、围压为5 MPa时作用时间与岩心渗透率提高幅度的关系曲线。

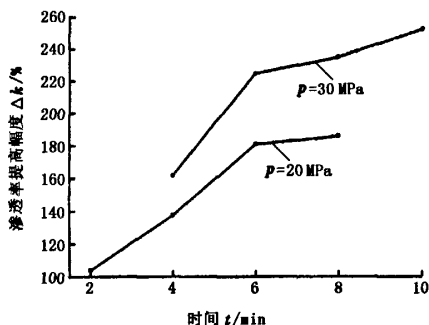


图3 射流压力对岩心渗透率提高幅度的影响

由图3可知,对于中低渗透岩心,随射流压力增加,作用效果明显增加,作用时间为6 min时,20 MPa和30 MPa下,渗透率提高幅度分别为181%和

223%;作用效果随作用时间延长先大幅增加,后增幅变缓,对高渗透岩心也有同样规律。

3.3 岩心渗透能力对岩心渗透率提高幅度的影响

图4为不同岩心渗透率下自振空化射流压力与渗透率提高幅度的关系曲线,实验条件为岩心置于射流冲击中心、作用时间4 min、常压。由图4可知,自振空化射流对中低渗、高渗岩心作用效果明显,但对特低渗岩心作用效果有限。

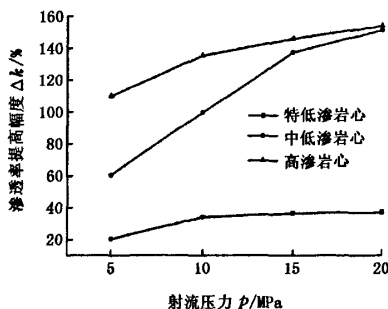


图4 岩心渗透能力对岩心渗透率提高幅度的影响

3.4 空化射流超声波对岩心渗透率提高幅度的影响

为了考察单纯空化射流超声波对岩心渗透率提高幅度的影响,将岩心偏置于射流冲击中心20 cm处,对中低渗岩心、作用时间为4 min时,不同射流压力下射流空化超声波对岩心渗透率提高幅度进行了研究(图5)。由图5可知,随着射流压力的增大,作用效果先大幅增加后增幅变缓,当存在一定围压(p_r)时,其作用效果比在常压下作用效果要好,这与文献[10]结论相一致。

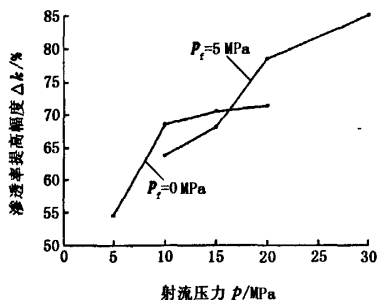


图5 射流超声波对岩心渗透率提高幅度的影响

3.5 射流空化超声波对岩心渗透率作用深度影响

空化噪声对油层渗透率的影响深度一直是各物理采油专家比较感兴趣的问题。为了研究这个问题,将5块岩心连接起来(由于实验条件的限制,高压釜深度只能容纳5块岩心的高度),在外面包裹多层橡胶,并将橡胶两端封固起来,仅留一个岩心

端面裸露,偏置于射流冲击中心 20 cm 处。图 6 为采用中低渗岩心、围压 5 MPa、不同射流压力下射流噪声作用深度与渗透率提高幅度的关系曲线。由图 6 可知,在射流压力为 20 MPa、作用深度达到 250 mm 时(第 5 块岩心),岩心渗透率提高幅度仍达 45%,表明其作用深度超过 250 mm;射流压力为 30 MPa 时,同作用深度下岩心渗透率提高幅度达 74%,表明提高射流压力,其作用深度也将加大。

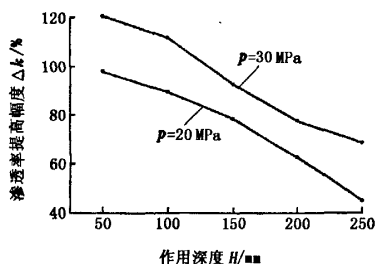


图 6 空化噪声对岩心渗透率影响深度曲线

4 现场试验

自振空化射流深穿透解堵技术适用于因钻井、完井、井下作业及长期采油和注水造成的近井带污染堵塞的油水井解堵,现场施工仅需一至两台 400 型水泥车和一台作业机,用油管将解堵工具送到井下并输送液体。自 2004 年 1 月至 6 月,胜利油田东辛采油厂共试验了 11 口油井,13 口水井,有效率超过 90%,有效期超过 90 d,累积增油 6 135.2 t,创经济效益 300 多万元。

A3X133 是东辛采油厂新近投资钻探的一口生产井,射孔试井后,该井完全不产液,分析资料为油层供液能力差,在钻井及试井过程中油层受到污染,堵塞了油流通道。2004 年 4 月实施自振空化射流深穿透解堵措施,油井开始产液,初期日产液量达 17.9 t,日产油量 15.4 t,至 2004 年 9 月,日产液量 10.4 t,日产油量 5.3 t,有效期超过了 136 d,累积增油量为 1 113.5 t。

5 结论

(1) 利用自振空化射流的强烈压力振荡和高空化初生能力特性来解除地层堵塞,恢复或提高地层渗透率,效果显著,具有可行性。

(2) 随着喷嘴出口直径的增大,其作用效果增加。在本实验条件下,处理低渗岩心需要比高渗岩

心更长时间,但过长的作用时间对改善作用效果并不明显。对不同渗透率岩心射流的作用效果不同,对中低渗、高渗透岩心作用效果明显。

(3) 空化射流超声波随着射流压力的增大,作用效果先增幅明显,后增幅变缓,当存在一定围压时,其作用效果比常压下作用效果要好。

(4) 在本实验条件下,空化噪声作用深度都超过了 250 mm,并随着射流压力的升高,作用深度进一步增加。

(5) 自振空化射流在油井解堵、注水井增注方面作用效果明显,有效率超过 90%,有效期均超过了 90 d。

参考文献:

- [1] 邵长金,罗荣章,孙仁远,等. 利用物理场提高原油产量的基础研究[J]. 石油学报,1997,18(3):63-69.
SHAO Chang-jin, LUO Rong-zhang, SUN Ren-yuan, et al. A basic research on applying physical field to increase crude oil production[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(3):63-69.
- [2] 金友煌,马建国,蒋华义,等. 振动条件下渗流的先期试验研究[J]. 石油钻采工艺,1997,19(增刊):28-31.
JIN You-huang, MA Jian-guo, JIANG Hua-yi, et al. Preliminary experimental study of percolation under the condition of vibration[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997, 19(sup):28-31.
- [3] 胡博仲,刘顺生,杨宝君. 解除近井地层污染技术[J]. 石油钻采工艺,1995,17(4):72-77.
HU Bo-zhong, LIU Shun-sheng, YANG Bao-jun. Technique for removal of near wellbore formation plugging[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995, 17(4):72-77.
- [4] JOHNSON V E Jr, CONN A F, LINDENMUTH W T, et al. Self-resonating cavitating jets: Proceedings of the 6th International Symposium on Jet Cutting Technology[C]. Cranfield: BHRA, 1982:1-26.
- [5] SHEN Zhong-hou, LI Gen-sheng, WANG Zhi-ming, et al. New jet theory and prospects of application in drilling engineering: Proceeding of 13th World Petroleum Congress[C]. Buenos Aires, 1991:397-405.
- [6] JOHNSON V E Jr, CHAHNIE G L, LINDENMUTH W T, et al. The development of structured cavitating jet for deep hole bits[R]. SPE 11060, 1982.

(下转第 86 页)

- Journal, 1997, 2(2): 136-149.
- [8] OREN P E, BAKKE S. Process based reconstruction of sandstones and predictions of transport properties[J]. *Transport in Porous Media*, 2002, 46(2-3): 311-343.
- [9] SCHEIDEGGER A E. The physics of flow through porous media[D]. Toronto: University of Toronto, 1974.
- [10] BISWAL B, MANWART C, HILFER R, et al. Quantitative analysis of experimental and synthetic microstructures for sedimentary rocks[J]. *Physica A*, 1999, 273(3-4): 452-475.
- [11] 郭照立. 模拟不可压流体流动的格子 Boltzmann 方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.
- [12] 阎广武, 胡守信, 施卫平. 用 Lattice Boltzmann 方法确定多孔介质的渗透率[J]. *计算物理*, 1997, 14(1): 63-67.
- YAN Guang-wu, HU Shou-xin, SHI Wei-ping. Determining permeabilities of porous media by Lattice Boltzmann method[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1997, 14(1): 63-67.
- [13] 钱吉裕, 李强, 宣益民, 等. 确定多孔介质流动参数的格子 Boltzmann 方法[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(4): 655-657.
- QIAN Ji-yu, LI Qiang, XUAN Yi-min, et al. Application of Lattice-Boltzmann scheme on determining flow parameters of porous media[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(4): 655-657.
- [14] QIAN Y H, HUMIERES D D, LALLEMAND P. Lattice BGK models for the Navier-Stokes equation[J]. *Europhys Letters*, 1992, 17(1): 479-484.
- [15] MEI R, SHYY W, YU D, et al. Lattice Boltzmann method for 3-D flows with curved boundary[J]. *J Comput Phys*, 2000, 161(2): 680-699.
- (编辑 李志芬)

(上接第 75 页)

- [7] 李根生, 沈忠厚, 周长山, 等. 自振空化射流冲击压力脉动特性实验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(5): 570-575.
- LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou, ZHOU Chang-shan, et al. An experimental study on impact pressure characteristics of self-resonant cavitating jets[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(5): 570-575.
- [8] 李根生, 沈忠厚. 常压下淹没自振空化射流冲刷岩石效果的实验研究[J]. *华东石油学院学报*, 1987, 11(3): 12-21.
- LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou. Experimental study on rock erosion efficiency of submerged self-resonant cavitating jets under atmospheric pressure[J]. *Journal of Huadong Petroleum Institute*, 1987, 11(3): 12-22.
- [9] 张德斌, 李根生, 沈忠厚. 围压作用下自振空化射流脉动特性实验研究[J]. *中国安全科学学报*, 1999, 9(专辑): 6-11.
- ZHANG De-bin, LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou. An experimental study on self-resonant cavitating jet under ambient pressure[J]. *China Safety Science Journal*, 1999, 9(special): 6-11.
- [10] 易灿, 李根生, 张定国. 围压下自振喷嘴空化起始能力试验及应用研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(6): 218-223.
- YI Can, LI Gen-sheng, ZHANG Ding-guo. Laboratory and field study of enhancing cavitation effect with self-resonating nozzle under ambient pressure[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(6): 218-223.
- [11] 易灿, 李根生, 张定国. 喷嘴结构对空化起始的影响研究[J]. *实验流体力学*, 2005, 19(1): 52-55.
- YI Can, LI Gen-sheng, ZHANG Ding-guo. Experimental study on cavitation inception of nozzles with different geometries[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 19(1): 52-55.
- [12] 李根生, 沈忠厚. 风琴管自振空化喷嘴设计原理[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1992, 16(5): 35-39.
- LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou. Design of principle of organ-pipe cavitating jet nozzles[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1992, 16(5): 35-39.
- [13] 严焱培, 吴小薇, 李正开, 等. 用超声波提高油气渗流速度的研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1989, 13(6): 72-78.
- YAN Chi-pei, WU Xiao-wei, LI Zheng-kai, et al. Experimental study on increasing flow rate in porous media by using ultrasonic wave[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1989, 13(6): 72-78.
- (编辑 李志芬)