文章编号:1673-5005(2015)01-0083-05 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2015.01.012

脉冲空化多孔喷嘴破岩效果试验研究

马东军[1], 李根生[2], 金 磊[3], 黄中伟[2], 牛继磊[2], 宋先知[2]

(1. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101; 2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 3. 中国石化石油工程技术研究院德州大陆架石油工程技术有限公司,山东德州 253005)

摘要:射流喷嘴是径向水平井技术中的关键部件,其破岩能力直接影响水平井眼的延伸能力和钻进速度。在多孔喷嘴的基础上,设计脉冲空化多孔喷嘴,分析其脉冲空化射流的调制机制,并通过试验与多孔喷嘴的破岩效果进行对比。结果表明:脉冲空化多孔喷嘴破岩效果优于多孔喷嘴,孔眼深度是多孔喷嘴的 1.02 ~ 2.18 倍,破岩体积是多孔喷嘴的 1.23 ~ 2.35 倍;为保证喷嘴破岩形成的最小孔眼直径大于喷嘴外径,试验岩样的喷嘴压降不能小于 30 MPa;射流喷嘴破岩存在最优喷距,试验条件下的最优喷距为 12 mm;利用脉冲空化多孔喷嘴可增加径向井的水平延伸长度,提高钻进速度。

关键词:脉冲; 空化; 多孔喷嘴; 孔眼直径; 孔眼深度; 破岩体积

中图分类号:TP 69 **文献标志码**:A

引用格式:马东军,李根生,金磊,等. 脉冲空化多孔喷嘴破岩效果试验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015,39(1):83-87.

MA Dongjun, LI Gensheng, JIN Lei, et al. Experimental study of rock breaking efficiency by pulsed cavitating multi-hole nozzle[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015,39(1):83-87.

Experimental study of rock breaking efficiency by pulsed cavitating multi-hole nozzle

MA Dongjun[1], LI Gensheng[2], JIN Lei[3], HUANG Zhongwei[2], NIU Jilei[2], SONG Xianzhi[2]

(1. *Research Institute of Petroleum Engineering*, *SINOPEC*, *Beijing* 100101, *China*;
2. *State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting*, *China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*;
3. *Shelfoil Petroleum Equipment & Services Company Limited*, *Research Institute of Petroleum Engineering*, *SINOPEC*, *Dezhou* 253005, *China*)

Abstract: Jet nozzle is a key device in radial horizontal well drilling technique, of which the rock breaking ability directly affects the extension of horizontal holes and drilling rate. On the basis of the multi-hole nozzle, a pulsed cavitating multi-hole nozzle was designed, and its modulation mechanism of pulsed cavitating jet was analyzed. Also, the rock breaking test was carried out to compare with the rock breaking result of pulsed cavitating multi-hole nozzle. The results indicate that the rock breaking result of pulsed cavitating multi-hole nozzle is better than that of multi-hole nozzle. The hole depth from pulsed cavitating multi-hole nozzle is 1.02–2.18 times than that from multi-hole nozzle. The rock breaking volume from pulsed cavitating multi-hole nozzle is 1.23–2.35 times than that from multi-hole nozzle. To guarantee the minimum hole diameter is bigger than nozzle diameter, jet impact pressure should not be lower than 30 MPa in the experiment. There is an optimal standoff distance in the bock breaking, which is 12 mm under the current testing conditions. The results suggest that using pulsed cavitating multi-hole nozzle can increase the extension of horizontal holes and improve drilling rate in radial drilling technique.

Keywords: pulse; cavitating; multi-hole nozzle; hole diameter; hole depth; rock breaking volume

收稿日期:2014-03-01

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2010CB226700);国家科技重大专项(2011ZX05009-005)

作者简介:马东军(1985-),男,高级工程师,博士,研究方向为油气井流体力学与井下工具。E-mail:251872726@qq.com。

径向水平井技术主要应用于枯竭油藏、断块油藏、边际油藏和稠油油藏[1-4],在应用过程中存在钻遇较硬地层时水平延伸长度较短、钻速低、钻井周期长等问题。径向水平井技术不同于常规钻井技术,它仅采用水力能量在地层中钻进[5-8],因此射流喷嘴的破岩能力是影响径向井水平延伸长度和钻进速度的关键。何育荣等[9]提出了旋转射流喷嘴,并通过试验测得旋转射流中心轴存在一个低压区,射流最高压力存在于中心低压区与射流边界之间。王瑞和等[10]研究了旋转射流的破岩机理,主要有剪切破碎、冲蚀破碎、拉伸破碎和旋流磨削。旋转射流的优点是钻孔直径比较大,缺点是在孔底会形成内凸锥柱。William 等[11]提出了双射流喷嘴,双射流是由旋转射流和中心直射流形成的。李根生和宋剑等[12-14]对双射流的流场特性、破岩规律等进行了较为系统的研究。双射流的优点是可以同时获得较大的孔径和孔深而不会形成内凸锥柱;缺点是有效靶距小于直射流,并且能量损失严重。Carl[15-17]和 Buset 等[18]提出径向钻井系统中应用多孔喷嘴在地层中进行钻进。这种喷嘴通过多股射流组合破岩钻孔,射流能量分布具有局部集中和总体叠加包络的特点。多孔喷嘴的优点是有效靶距长,钻孔直径和孔深较大,能量损失小于旋转射流喷嘴和双射流喷嘴;缺点是直射流的破岩效率不如新型射流。目前亟需提高射流喷嘴的破岩能力,设计出新型高效破岩喷嘴。笔者以多孔喷嘴为基础,设计脉冲空化多孔喷嘴,通过其内部特殊元件调制出多股脉冲空化射流,进而提高喷嘴的破岩效率;通过破岩试验的方法,对比新型喷嘴和多孔喷嘴的破岩效果。目标是研制出一种可以应用于径向水平井技术中的高效破岩喷嘴,进而增加其水平延伸长度和提高钻进速度。

1　脉冲空化多孔喷嘴结构与原理

脉冲空化多孔喷嘴主要由喷嘴本体、叶轮和叶轮轴等组成。其结构示意图如图 1 所示,实物照片如图 2 所示。喷嘴本体左侧为母接头,用于连接管线。喷嘴本体内部从左至右依次安装叶轮轴和叶轮。喷嘴本体右侧端面布置多个孔眼,为喷嘴的流体出口。

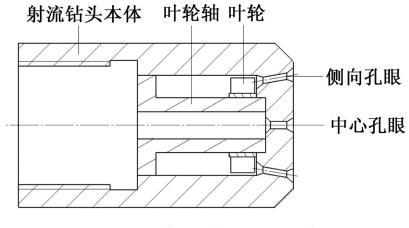

图 1　喷嘴本体结构示意图

Fig. 1　Structure schematic drawing of pulsed cavitating multi-hole nozzle

图 2　脉冲空化多孔喷嘴实物图

Fig. 2　Pictures of pulsed cavitating multi-hole nozzle

喷嘴本体结构类似于普通多孔喷嘴,其右侧端面内部中心布置一圆柱形空腔,用于放置叶轮轴。叶轮轴左端为十字形支架结构,支撑于喷嘴本体内壁,其右端放置于喷嘴本体圆柱形空腔内,通过十字形支架和圆柱形空腔固定叶轮轴在喷嘴本体内的方位。叶轮轴为空心结构,流体经过叶轮轴时一部分流入其内部流道,从中心喷嘴射出;另一部分流体绕过十字形支架后平行于叶轮轴方向流动,推动叶轮高速旋转,然后从侧向喷嘴射出。叶轮安装于叶轮轴右端,与喷嘴本体右端内壁接触。叶轮上均匀布置 3 ~ 6 个叶片,叶片与叶轮端面须设置 10 ~ 45°的倾斜角度,当流体冲击叶片时叶轮可以高速旋转。高速旋转的叶轮对侧向喷嘴入口处流场产生有规律的扰动,进而产生脉冲射流。同时,高速旋转的叶轮会降低叶轮附近流体的局部压力,产生微小空泡,空泡夹杂在流体中从侧向喷嘴射出即形成空化射流。同时形成的两种射流可以耦合成脉冲空化射流。

脉冲射流以不连续能量的方式作用于岩石,不易产生水垫效应。同时,脉冲射流能够在能级相同的情况下增大射流的瞬时冲击力,可以提高射流的破岩和清岩效果。空化射流是利用水射流流束内空泡破裂所产生的强大冲击力以增强射流冲蚀能力的方式对岩石进行破碎。空泡破碎产生的冲击力一般为非空化射流冲击压力的 8.6 ~ 124 倍;空泡破裂时产生的能量高度集中,并局限在许多非常小的面积上,从而在岩石表面许多局部区域产生极高的冲击压力和应力集中,使岩石表面迅速破坏,所以更容易破碎岩石[19]。由此可知,脉冲空化多孔喷嘴可以较大程度地提高多股射流的清岩破岩能力。

2　试验装置与方法

破岩试验是确定射流喷嘴破岩能力较直接的方法。通过对比不同条件下射流破岩的孔眼直径、深度和体积可以得到喷嘴破岩能力与射流参数的变化规律。脉冲空化多孔喷嘴破岩试验的设计借鉴于常规喷嘴破岩试验。

2.1　试验装置

喷嘴破岩试验设备流程图如图 3 所示。高压泵输送出的流体经过调压阀时,一部分流回储水池,另一部分流经管线进入喷射装置后由喷嘴射出,直接作用于岩样。

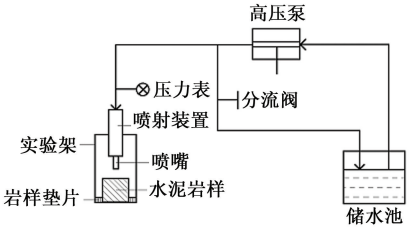

图 3　破岩试验设备流程图

Fig. 3　Flow chart of rock breaking test

试验所用设备的主要性能参数如下:

(1)高压水泵。2 台,额定压力为 50 MPa,排量为 63 L/min,电机功率为 75 kW。

(2)喷射装置。主要由管线接头、压力表、直管、喷嘴接头和试验架组成。直管放置于试验架上部的圆环内,圆环后面布置压紧螺栓,可用来固定和调节喷距。

(3)岩样桶。内部用于安装试验用岩样,试验时将其放置于喷嘴正下方的岩样槽内,通过添加垫片使其固定。

(4)喷嘴。脉冲空化多孔喷嘴和多孔喷嘴(脉冲空化多孔喷嘴本体),射流入口压力可达 35 MPa。

(5)试验岩样。人造混凝土岩样,单轴抗压强度为 50 MPa。

2.2　试验方法

喷嘴破岩试验采用固定时间定点冲击破碎的方式,以孔眼直径、深度和破岩体积评价破岩效果。试验参数取值:喷距 L 为 9、12、15、18、21 mm;喷嘴压降 p 为 25、30、35 MPa;喷嘴类型为脉冲空化多孔喷嘴和多孔喷嘴(脉冲空化多孔喷嘴本体)。喷射时间 t 为 5 min,经前期试验验证,当喷射时间大于 5 min 时,破岩效果基本不再增加。

3　结果分析

选取孔眼直径、深度和破岩体积 3 个评价指标分析喷嘴压降、喷嘴类型和喷距对破岩效果的影响。由于射流冲蚀孔眼并非规则圆形(图 4),选取最小孔眼直径进行分析(在径向水平井技术中,射流冲蚀孔眼的最小直径决定了喷嘴能否进入孔眼并继续向前钻进)。

图 4　喷射试验后岩样

Fig. 4　Picture of rock samples after jetting

3.1　喷嘴压降对破岩效果的影响

喷嘴压降表征了射流总能量。随着喷嘴压降的升高,参与破岩的射流能量增大,射流的流速和水功率相对增加,对岩石的冲击、剪切及拉伸作用加强,因此射流破岩能力相对增强。

如图 5 ~ 7 所示,在试验条件下,同一喷嘴在喷距相同时,最小孔眼直径、孔眼深度和破岩体积随着喷嘴压降的增大而呈增大趋势。这是因为喷嘴压降增大,射流的能量随之增大,作用在岩石上体现为破碎孔眼的最小直径、孔眼深度和破岩体积都相应的增大。由于本次试验岩样抗压强度较大(50 MPa),如图 5 所示,当喷嘴压降为 25 MPa 时形成的最小孔眼直径均比较小,小于喷嘴直径(18 mm),不满足继续向前钻进的条件。当喷嘴压降大于 30 MPa 时,形成的最小孔眼直径均大于喷嘴直径,可以继续向前钻进,因此针对于试验岩样,设计喷嘴压降建议不小于 30 MPa。当喷嘴压降为 25 MPa 时,喷距

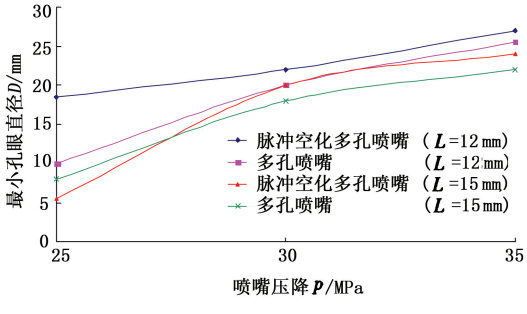

图 5　最小孔眼直径随喷嘴压降的变化

Fig. 5　Effect of jet impact pressure on minimum hole diameter

为 15 mm 时,脉冲空化多孔喷嘴冲蚀最小孔眼直径小于多孔喷嘴,这是由于当喷嘴压降较小且喷距较大时脉冲空化多孔喷嘴射流能力损失较快所致。

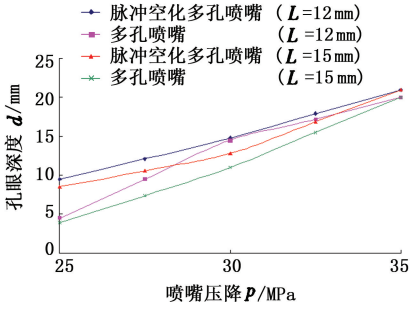

图 6　孔眼深度随喷嘴压降的变化

Fig. 6　Effect of jet impact pressure on hole depth

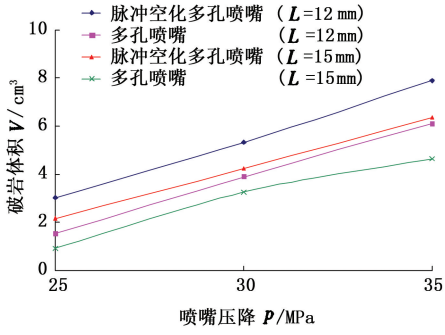

图 7　破岩体积随喷嘴压降的变化

Fig. 7　Effect of jet impact pressure on rock breaking volume

3.2　喷距对破岩效果的影响

喷距是影响射流破岩效果的一个重要因素,当其他条件一定时,喷距的调整就成了有效利用射流能量的关键。如果没有合适的喷距,即使喷嘴压降超过了岩石的门限压力,破岩效率也未必很高,因此有必要通过破岩试验的方法确定喷嘴的最优喷距。

如图 8、9 所示,在试验条件下,喷距范围为 9 ~ 21 mm,同一喷嘴在喷嘴压降相同时,孔眼深度和破碎体积随喷距的增加呈先增大后减小的趋势,在喷距为 12 mm 时达到最大值。这是因为喷距在 9 ~ 12 mm 时,射流还没有充分发展,同时冲击岩面后的回流较强,有阻碍后续流的趋势,因此孔眼深度和破碎体积随喷距增大而逐渐增大。当喷距为 12 ~ 21 mm 时,射流能量随喷距的增加而逐渐衰减,因此孔眼深度和破碎体积随喷距增大而逐渐减小。以孔眼深度和破碎体积作为评价标准,本试验得到的最优喷距为 12 mm。

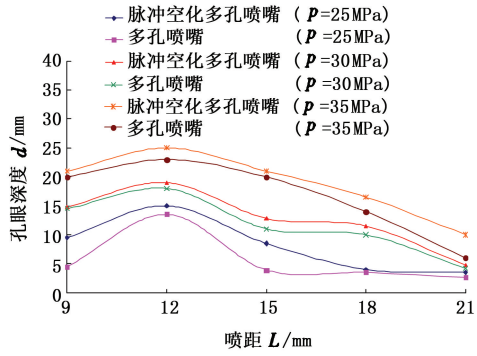

图 8　孔眼深度随喷距的变化

Fig. 8　Effect of standoff distance on hole depth

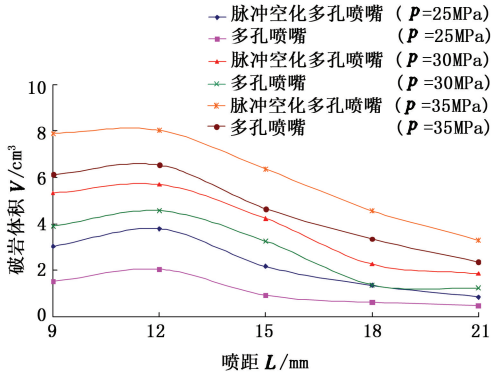

图 9　破岩体积随喷距的变化

Fig. 9　Effect of standoff distance on rock breaking volume

3.3　脉冲空化多孔喷嘴与多孔喷嘴破岩效果对比

脉冲空化多孔喷嘴通过其内部特殊元件可调制出多股脉冲空化射流。多孔喷嘴即为脉冲空化多孔喷嘴本体产生普通直射流。本文中运用破岩试验方法对比这两种射流喷嘴的破岩效果。

由图 8、9 看出,在试验条件下,当喷嘴压降和喷距相同时,脉冲空化多孔喷嘴冲蚀岩石产生的孔眼深度和破碎体积都大于多孔喷嘴。脉冲空化多孔喷嘴破岩的孔眼深度是普通多孔喷嘴的 1.02 ~ 2.18 倍;脉冲空化多孔喷嘴的破碎体积是多孔喷嘴的 1.23 ~ 2.35 倍。这是因为脉冲空化多孔喷嘴可调制出多股脉冲空化射流,而脉冲空化射流既有脉冲射流的特点又有空化射流的特点,其破岩效率要大于普通直射流,因此在喷嘴压降和喷距相同的情况下,脉冲空化多孔喷嘴的破岩效果优于多孔喷嘴。

4　结　论

(1)脉冲空化多孔喷嘴可调制出多股脉冲空化射流,脉冲空化多孔喷嘴破岩形成的孔眼深度是多孔喷嘴的 1.02 ~ 2.18 倍,破碎体积是多孔喷嘴的

1.23 ~2.35 倍,脉冲空化多孔喷嘴具有较高的破岩效率。

(2)随着喷嘴压降的增大,最小孔眼直径、孔眼深度和破岩体积均呈增大趋势。针对试验岩样,若保证喷嘴破岩形成的最小孔眼直径大于喷嘴外径,喷嘴压降不能小于 30 MPa。

(3)喷嘴压降固定时,随着喷距的增加,同一种喷嘴破岩孔眼深度和破碎体积随喷距的增加先增大后减小。试验条件下的最优喷距为 12 mm。

参考文献:

[1] GUO R C, LI G S, HUANG Z W, et al. Theoretical and experimental study of the pulling force of jet bits in radial drilling technology[J]. Petroleum Science, 2009,6(4):395-399.

[2] BRUNI M, BIASSOTTI H, SALOMONE G. Radial drilling in Argentina[R]. SPE 107382,2007.

[3] RAUL A C, JUAN F T B. First experience in the application of radial perforation technology in deep wells[R]. SPE 107182,2007.

[4] URSEGOV S, BAZYLEV A, TARASKIN E. First result of cyclic stimulations of vertical wells with radial horizontal bores in heavy oil carbonates[R]. SPE 115125, 2008.

[5] HENRY B M. Horizontal directional drilling in wells: USA,6889781B2[P]. 2005-05-10.

[6] HENRY B M. Horizontal directional drilling in wells: USA,6964303B2[P]. 2005-11-15.

[7] MICHAEL U. Horizontal drilling for oil recovery: USA, 5934390[P]. 1999-08-10.

[8] RODERICK D M. Lateral jet drilling system: USA, 6189629B1[P]. 2001-02-20.

[9] 何育荣,沈忠厚,王瑞和. 锥形旋转水射流的试验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,1994,18(1):30-34.
HE Yurong, SHEN Zhonghou, WANG Ruihe. Experimental study of conical rotatory water jet[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1994,18(1):30-34.

[10] 王瑞和,周卫东,沈忠厚,等. 旋转射流破岩钻孔机理研究[J]. 中国安全科学学报, 1999,9(3):1-5.
WANG Ruihe, ZHOU Weidong, SHEN Zhonghou, et al. Study on mechanism of rock-breaking by swirling water jet[J]. China Safety Science Journal, 1999,9(3):1-5.

[11] WILLIAM G B, THOMAS L D, MICHAEL D M, et al. Nozzle for jet drilling: USA, 20030192718[P]. 2003-10-16.

[12] 李根生,宋剑. 双射流流动特性数值模拟和 PIV 实验研究[J]. 自然科学进展, 2004,14(12):1464-1468.
LI Gensheng, SONG Jian. Numerical simulation on flow characteristic of dual-jet and PIV experimental study [J]. Progress in Natural Science, 2004,14(12):1464-1468.

[13] 李根生,宋剑,胡永堂,等. 双射流破岩钻孔参数实验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):68-71.
LI Gensheng, SONG Jian, HU Yongtang, et al. Experimental study on rock breaking parameters of dual-jet [J]. Journal China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2006,30(1):68-71.

[14] 宋剑,李根生,牛继磊,等. 双射流流动结构实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2006,21(1):90-94.
SONG Jian, LI Gensheng, NIU Jilei, et al. Experimental study on flow structure of a dual-jet[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006,21(1):90-94.

[15] CARL L. Method of and apparatus for horizontal drilling: USA,5413184[P]. 1995-05-09.

[16] CARL L. Method of and apparatus for horizontal drilling: USA,5853056[P]. 1998-12-29.

[17] CARL L. Method of and apparatus for horizontal drilling: USA, 6125949[P]. 2000-10-03.

[18] BUSET P, RIIBER M, EEK A. Jet drilling tool: cost-effective lateral drilling technology for enhanced oil recovery[R]. SPE 68504,2001.

[19] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 东营:中国石油大学出版社, 1998:200-210.

(编辑　刘为清)