

水力振动固井工具压力波发生原理研究

薛 亮¹ 李帮民¹ 刘爱萍² 邹建龙² 张文华³

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 昌平 102249;2. 中国石油海洋集团公司 固井事业部,天津 300451;3. 中国石油渤海钻探工程有限公司 工程技术研究院,天津 300457)

摘 要:振动固井可以提高固井质量,水力振动工具是振动固井的核心装备。分析了现有水力振动工具压力波发生的原理和水击波发生器的原理,结果表明:自振荡喷嘴在外来扰动的作用下,喷嘴内壁边界层的涡结构产生振动,涡结构产生压力脉动,这种自振荡放大的压力振动不具有波的特性,传播的距离有限;节流式压力波发生器通过改变过流面积产生压力波,但过流断面变化有限,压力波振幅小;水击波是一种压力瞬变过程,是一种强间断性质的矩形波,波的能量集中作用在间断面上。利用水击原理设计了双喷嘴水击波发生器,该发生器所产生水击波的振幅可以达到兆帕的数量级,频率由叶轮转速与阀轮叶片个数决定,可以根据需要调节。

关键词:水力振动;固井设备;固井质量;压力波
中图分类号:TE925⁺. 2;TP69 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)01-0105-05

Study of Compression Wave Caused by Hydraulic Cementing Tools

Xue Liang¹ Li Bangmin¹ Liu Aiping² Zou Jianlong² Zhang Wenhua³

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. CPOE Cementing Division, Tianjin, 300451, China; 3. Engineering Technology Research Institute, Bohai Drilling Engineering Company Ltd., Tianjin, 300457)

Abstract: Hydraulic vibration tool is the core of vibration cementing equipment which can improve cementing quality. The principle of both compression wave and water hammer wave caused by existing hydraulic tools were analyzed. The vibration and pulsation of vortex structure in the nozzle wall boundary layer were created in oscillating nozzle under external disturbances. This pressure oscillation with self-amplification does not have characteristics of wave and has limited spreading distance. The pressure wave was generator by changing the flow area of the pressure wave, while the amplitude is limited due to the limitation of the cross section. Water hammer pressure wave is a transient process and is discontinuous rectangular wave. The energy is focused on the cross section. The dual-nozzle water hammer generator was designed using the principles of water hammer. The amplitude of water hammer wave produced by the generator can be in the magnitude of MPa. The frequency is determined by the rotary speed of impeller and number of vanes which can be adjusted accordingly.

Key words: hydraulic vibration; cementing equipment; cementing quality; pressure wave

水力振动固井是利用水力振动发生器在固井过程中产生水力波,水力波在环空中传播,作用在井壁、套管外壁以及水泥介质本身,改善水泥浆顶替效率,缩短候凝时间,防止地层流体环空窜槽,提高水泥浆固化强度以及界面胶结质量^[1-3]。水力振动发生装置是振动固井技术的核心装备,其性能的好坏直接决定了水力振动波波形、频率、振幅,对振动固

收稿日期:2009-12-21;改回日期:2010-12-13
基金项目:教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目(编号:IRT 0411)资助
作者简介:薛亮(1973—),男,辽宁北镇人,1997年毕业于北京航空航天大学空气动力学专业,2007年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,讲师,主要从事钻采流体力学相关理论与技术研究。
联系方式:(010)89734958, xueliang200888@126.com

井效果有直接影响。笔者分析了现有水力振动器发生的压力波原理,提出了水击式压力波发生器的设计原理,并通过试验验证了可行性。

1 水力振动发生器设计原理

目前,水力振动装置的设计主要基于两种原理:自激振荡式压力波发生原理、节流式压力波发生原理。

1.1 自激振荡式水力发生器设计原理

图 1 为大港油田研制的螺旋他激水力振荡发生器^[4]。该发生器两端与套管连接,安装在套管鞋上方随套管柱下入井内。在循环、注水泥和顶替过程中,钻井液、水泥浆的流动带动轴上的涡轮和振动片旋转,振动片做为他激振动发生源。在螺旋出口上安装自激振动喷嘴,喷嘴按照亥姆霍兹原理设计,当钻井液或水泥浆通过喷嘴时,会在喷嘴的自激腔内产生振动,作用在水泥浆上,提高水泥浆固化强度。

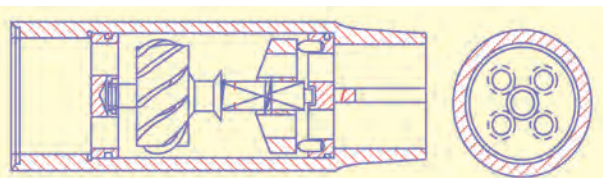


图1 螺旋他激水力振荡发生器
Fig.1 Spiral hydraulic slave oscillation generator

新疆石油管理局也成功研制了水力脉冲振动器^[5],并申请了专利,其设计如图 2 所示。水力振动发生机构由双谐振腔体与振动器组成,当上游流体经过双谐振腔时,流体会在双谐振腔内产生自激振荡,激发连续流动的液体产生压力振动,作用在水泥浆上,提高水泥浆固化强度。

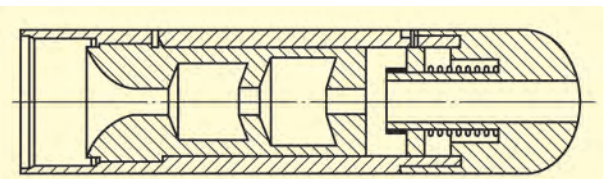


图2 双谐振水力振动器
Fig.2 Double resonance hydraulic vibrator

以上两种水力波发生原理都属于流体腔室自激振荡原理。流体流经自激振荡喷嘴时,在外来扰动的作用下,喷嘴内壁面的边界层会产生振动,这种边界层的振动在自激振荡喷嘴结构下会产生放大作用,压力振荡放大到一定程度会通过喷嘴出口释放

出来,从而产生压力脉动,但这种压力波却无法传播得很远,如图 3 所示。这种自激振荡产生的压力脉动与流场边界层涡结构紧密相关,压力振动是由涡结构自身的压力分布决定的。换句话说,这种压力脉动特征是和流体分离涡结构伴生的,流体分离涡结构存在,则压力脉动存在,流体涡结构在传播过程中耗散,则流场压力脉动消失,不具有波的传播特性。由于不具有传播特性,对水泥浆的作用只能在振动器附近起作用,效果有限。

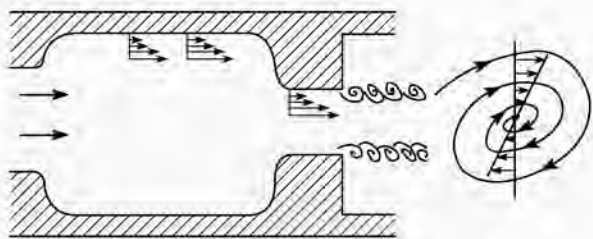


图3 自激振荡式水力波发生原理
Fig.3 Principle of hydraulic wave produced by self-oscillation

1.2 节流式水力波发生装置设计

辽河油田 1999 年设计了节流式压力发生装置,并申请了专利,如图 4 所示。该装置由本体、转子以及流道组成。在流体冲击作用下,水力振动器的转子旋转,造成流道过流面积周期性变化,在转子前后压力产生周期性变化,即周期性压力脉冲,这种压力脉冲具有良好的波动特性,可以传播很远,只是这种节流式设计原理制约了压力波的振幅,据文献^[7]报道只有 0.15 MPa。

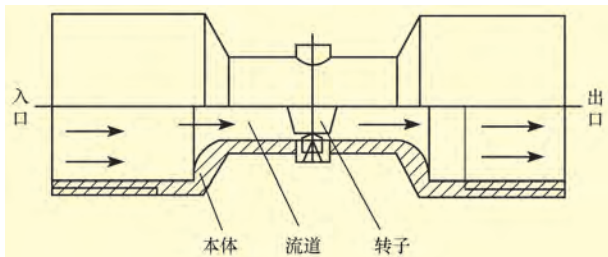
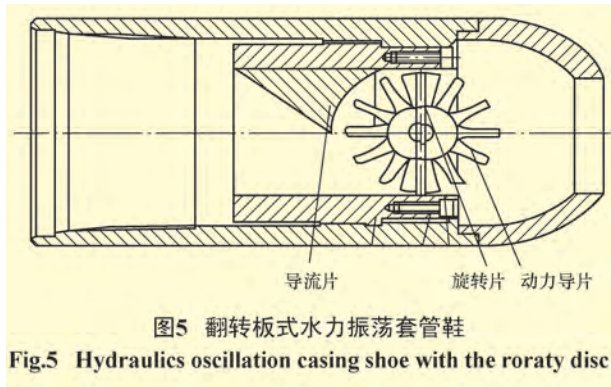


图4 叶轮式脉冲波发生器
Fig.4 Impeller type pulse wave generator

大庆石油学院研制的翻转板式水力振荡套管鞋^[8]与套管柱相连,固井时下入井内。注水泥前循环钻井液,液体通过时冲击动力导片,动力导片产生绕轴旋转的力矩,带动了旋转片连续绕轴转动。以上过程是一种周期性的开关截流过程,造成流通截面面积周期性改变,在旋转片前、后两侧产生周期性的脉动压力,进而达到改善固井质量的作用。与叶

轮式脉冲波发生器类似,节流式原理产生的压力波振幅同样有限,文献[7]没有给出振幅数据。

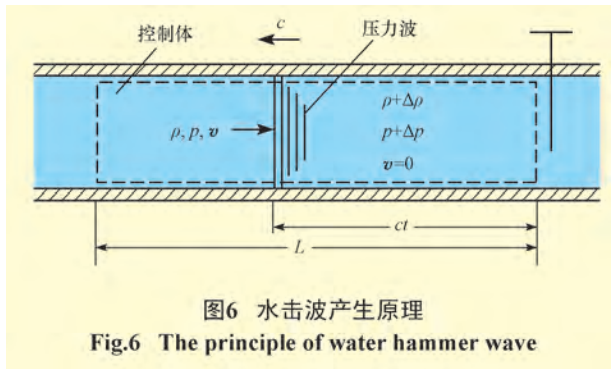


改变过流面积能产生压力波,基于该观点,人们设计了相应的装置,并申请相关专利。但由于没有完全了解节流产生水力波的机理,导致节流式水力波发生装置的设计缺乏理论基础,无法进行振幅与频率的设计,压力波性能很有限,制约了工具的推广应用。

另外这种由周期性节流产生的压力波波形一般为正弦波,波的振动能量分布在整个正弦波波段上,波的能量相对分散,提高固井质量的作用有限。

1.3 水击式压力波发生装置设计原理^[9]

水击是一种压力瞬变过程,是管路中不稳定流动所引起的一种特殊现象。当管路中流速突然变化时,例如开关阀门过快、突然断电停泵,都会引起管内压力突然变化,造成水击。水击原理如图 6 所示,当下游出口阀门突然关闭时会产生水击波,水击波从右向左传播。



笔者从流体力学基本方程出发推导了水击压力和水击波传播速度的计算公式。根据图 6 中虚线所绘的控制体列出一维动量方程为:

$$\sum F = \sum v\rho vA + \frac{d}{dt} \int v\rho dV \quad (1)$$

式(1)左边为控制体内流体所受到的合外力,右边第一项为通过控制面流入的流体介质产生的动量变化率,第二项为控制体内流体介质流量变化产生

的动量变化率,各项的表达式为:

$$\sum F = pA - (p + \Delta p)A \quad (2)$$

$$\sum v\rho vA = v\rho(-vA) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \int v\rho dV = \frac{d}{dt} [V\rho(L - ct)A] = -V\rho cA \quad (4)$$

把以上关系代入动量方程,并忽略小量,得水击波表达式为:

$$\Delta p = \rho vc \quad (5)$$

式中: Δp 为水击压力,Pa; ρ 为流体介质密度,kg/m³;c 为流体介质中的声速,m/s;v 为流体介质的运动速度,m/s。

由于声音在液体中的传播速度量纲为 10³ m/s,液体的密度量纲为 10³ kg/m³,因此,由式(5)可知,水击压力可以达到兆帕数量级。因此,即使很小的速度改变,都可以引起很大的水击压力。

另外,根据水击压力性质可知,这种水击压力波能量非常集中,是一种强间断性质的矩形波,波的能量集中作用在间断面上。

2 双喷嘴水击波发生器设计原理

基于水击波发生原理,笔者设计了双喷嘴水击波发生器,并通过室内试验进行了验证。

2.1 基本结构

双喷嘴水击式压力波发生器^[10]主要由外缸、导流体、轮阀、叶轮、常开流道与喷嘴、阀控流道与喷嘴以及反射引斜等部件组成,如图 7 所示。水击由阀控流道与阀控喷嘴产生。

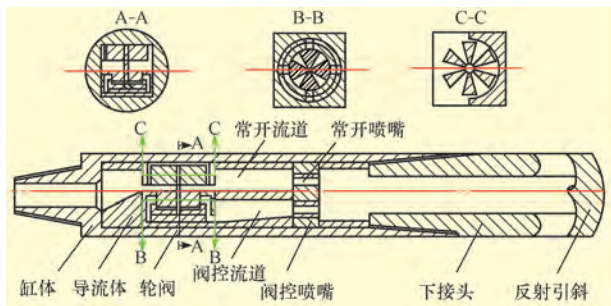


图7 水力波发生器结构

Fig.7 Structure and assembly of hydraulic wave generator

叶轮在过流冲击作用下旋转,轮阀由同轴的叶轮带动旋转,轮阀在转动过程中不断开关阀控流道,从而产生水击作用。图 7 上侧的流道与喷嘴处于常开状态,与阀控流道与阀控喷嘴并联。反射引斜内表面采用抛物线型设计,水击波在反射引斜抛物线型面上

反射到环空中,有利于减小压力波井底反射的损失。

2.2 工作原理

在洗井、注浆、替浆等过程中,水击波发生器均处于工作状态。当固井液体经过叶轮时,叶轮会在水流冲击力作用下旋转,叶轮旋转会带动轮阀旋转,当轮阀阀体转到阀控流道入口时,阀控流道关闭,当轮阀阀体离开阀控流道入口时,阀控流道打开,产生水击作用。

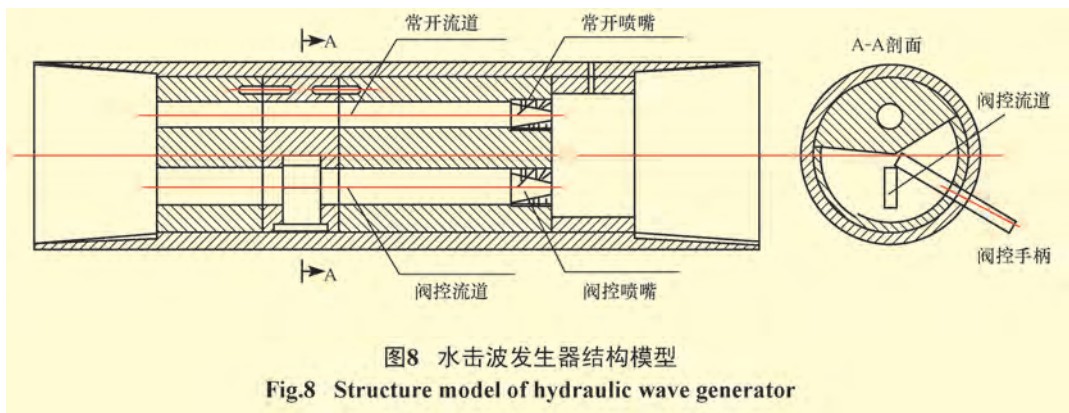
在阀控流道关闭瞬间,阀控流道上游流体流速瞬间滞止,产生水击压缩波,沿套管向上传播,阀控流道下游产生水击膨胀波,经过井底引斜的反射作用,沿着环空由井底向上传播。轮阀阀体继续旋转,当轮阀阀体离开阀控流道的入口时,阀控流道打开,阀控流道恢复过流,这样会在阀控流道的上游产生水击膨胀波,下游产生水击压缩波,水击膨胀波会沿着套管向上传播,水击压缩波经过引斜反射后沿着环空从井底向上传播。

在液流的冲击作用下,叶轮带动轮阀不停旋转,轮阀周期性地开关阀控流道,阀控流道周期性产生水击作用,交替产生水击膨胀波与压缩波,并经过引斜反射后,沿着环空从井底向上传播,作用在环空流体以及管壁与井壁上,提高固井质量。

2.3 水击波发生器模型室内试验

基于水击式井下增压器设计原理与图纸,设计了水击式井下增压器室内试验模拟装置,如图 8 所示。保留双喷嘴水击波发生器双流道与双喷嘴设计,对轮阀结构进行了简化。采取外接手动柄以控制阀控流道与阀控喷嘴的开启与关闭。试验过程中,通过快速扳动手柄来控制阀控流道的开关。

试验在中国石油大学(北京)射流实验室进行,采用排量为 5~10 L/s 柱塞泵,泵压 3 MPa,以清水为工作介质,采用量程为 5 MPa 的压力传感器测量压力,用计算机进行数据采集,绘制水击波随时间变化曲线。



连接好管路与数据采集系统,打开柱塞泵进行水击试验。把手柄插入控制阀中,快速往复扳动手柄以控制阀控流道与阀控喷嘴,启动数据采集系统,采集水击波发生装置压力波信号。把压力波信号输入到数据文件中,绘制压力波曲线,得到压力波曲线,如图 9 所示。双喷嘴式水击波振幅为 0.3 MPa,直接验证了双喷嘴式水击波发生原理的可行性。

3 结 论

1) 自振荡喷嘴在外来扰动的作用下,喷嘴内壁面边界层的涡结构产生振动并被放大,压力振动与涡结构伴生,这种自振荡产生的压力波动不具有波的特性,传播距离有限。

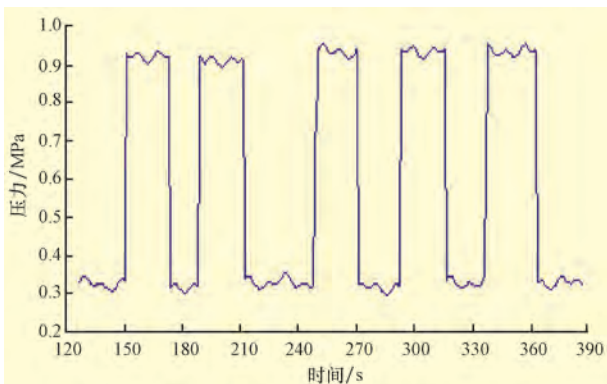


图9 水击波发生器室内试验压力输出曲线
Fig.9 Hydraulic wave generator output pressure curve of indoor test

2) 节流式压力波发生器通过改变过流面积产生压力波,但过流断面变化有限,压力波振幅小,且波形为正弦波,能量分散。

3) 水击是一种压力瞬变过程,利用节流原理研制的双喷嘴水击式发生器,水击压力波为矩形波,能量集中,振幅可以达到兆帕的数量级,频率由叶轮转速与阀轮叶片个数决定,可以根据需要调节。

参 考 文 献

- [1] 丁士东,高德利,张克坚,等.脉冲振动对水泥浆性能影响的实验研究[J].自然科学进展,2007,17(9):1251-1257.
Ding Shidong,Gao Deli,Zhang Kejian,et al. Experimental research on influence of pulsed cement on the cement slurry performance [J]. Progress in Natural Science,2007,17(9):1251-1257.
- [2] 刘小利,夏宏南,王小建,等.水力脉冲振动技术提高固井质量的研究与应用[J].钻采工艺,2007,30(2):20-21,36.
Liu Xiaoli,Xia Hongnan,Wang Xiaojian,et al. Research and application of water power vibratory impulse technique in improving cementing quality[J]. Drilling & Production Technology,2007,30(2):20-21,36.
- [3] 韩玉安,孙艳龙,王洪潮,等.国内外振动固井技术的发展现状[J].钻采工艺,2000,23(4):27-30.
Han Yu'an,Sun Yanlong,Wang Hongchao,et al. Developing status quo of vibration cementing technique both in China and abroad[J]. Drilling & Production Technology,2000,23(4):27-30.
- [4] 杨道平,陈嘉陵,胡国强,等.一种水力脉冲振动固井引鞋:中国,200620167280.6[P].2007-11-14.
Yang Daoping,Chen Jialing,Hu Guoqiang,et al. A kind of fluidic pulsation cement casing shoe;China,200620167280.6[P].2007-11-14.
- [5] 齐月魁,王晓林,徐学军,等.水力脉冲振动器:中国,200320129576[P].2005-04-20.
Qi Yuekui,Wang Xiaolin,Xu Xuejun,et al. Hydraulic pulse vibrator;China,200320129576[P].2005-04-20.
- [6] 韩崇福,田锡君,王冠军.振动固井技术在辽河油田的试验应用[J].石油钻采工艺,1999,21(4):24-29.
Han Chongfu,Tian Xijun,Wang Guanjun. Pilot application of vibration cementing technique in Liaohe Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology,1999,21(4):24-29.
- [7] 齐月魁.振动固井技术研究与运用[R].天津大港:大港油田钻采工艺研究院,2003.
Qi Yuekui. Research and application of vibration cementing technology[R]. Tianjin Dagang: Dagang Oilfield Company, Drilling and Production Technology Research Institute,2003.
- [8] 崔海清,申福轩,王景盛,等.翻转板式水力振荡套管鞋的研制及其应用[J].大庆石油学院学报,2001,25(3):66-69.
Cui Haiqing,Shen Fuxuan,Wang Jingsheng,et al. Development and application of casing shoe with hydraulic vibrator of rotating disc type[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute,2001,25(3):66-69.
- [9] 汪志明,崔海清,何光渝.流体力学[M].北京:石油工业出版社,2006:155-160.
Wang Zhiming,Cui Haiqing,He Guangyu. Fluid Mechanics [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2006:155-160.
- [10] 薛亮,刘爱萍,邹建龙,等.振动固井用压力波发生装置:中国,200920110259.6[P].2010-05-12.
Xue Liang,Liu Aiping,Zou Jianlong,et al. Vibration cementing by pressure wave occurred device;China,200920110259.6[P].2010-05-12.

胜利油田利用仿水平井技术开发难动用低渗透油藏

目前,胜利油田有相当比例的未动用低渗透油藏,大部分都是低丰度、深层、薄层储量。为了有效开发这类油藏,胜利油田试验应用了仿水平井技术。仿水平井是指直井钻遇油层时,不是拐弯继续钻进,而是沿着地应力方向在油层内实施大规模长裂缝压裂。该技术在樊 42-313 井进行了现场试验,并获得成功。该井每一侧压裂缝长 200 m 以上,两边加起来就有 400 m,相当于在油层内钻了一口长 400 m 的水平井,目前稳产在 20 t/d 左右。

仿水平井开发技术的成功应用,为目前开发难动用薄层、低丰度、低渗透和特低渗透油藏提供了一条新途径。

精细控压钻井技术现场试验成功

近日,中国石油西部钻探工程有限公司克拉玛依钻井工艺研究院自主研发的精细控压钻井技术,在新疆准噶尔盆地西部隆起红车断裂带沙门 011 井进行了现场试验。试验中,精细控压关键装置钻井参数监测系统、电控系统、自动节流控制系统、回压补偿系统及决策分析系统,在钻进和起下钻过程中有效联动,各系统硬件和软件性能稳定。起下钻控压试验井段 3 469~3 879 m,通过井口自动控制套压,回压泵补偿起钻环空压力亏空及抽汲压力,当量密度控制在 1.38~1.39 kg/L,达到了控制井底压力恒定的目标,试验获得成功。