

脉冲空化射流钻井技术研究与应用

李 燕

(中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院海外钻井技术中心,北京 100101)

摘要:通过空化射流发生器的结构对提高机械钻速的机理分析,同时结合现场应用,介绍了空化射流在国内外石油行业的市场前景,提出了目前解决钻井机械钻速慢的一种比较简单可行的钻井方法。

关键词:脉冲;空化射流;钻井工具;水力脉冲;瞬时负压;振动射流

中图分类号:TE248 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)03-0029-04

Study on Pulsed Cavitation Jet Drilling Technology and the Application/Li Yan (Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: By the analysis on the mechanism of improving penetration rate by the structure of pulsed cavitation jet generator and based on the field application, the paper introduced market prospect of oil industrial both in China and abroad and put forward the solution of improving penetration rate for well drilling.

Key words: pulse; cavitation jet; drilling tool; water pulse; instant negative pressure; vibration jet

0 引言

空化射流钻井技术是一种独具特色、能显著提高机械钻速的工艺技术方法。空化射流钻井属井下动力钻井的一种,空化射流钻井技术是一项先进、实用、可靠的现代钻井技术,在钻井工程界已得到很好的发展和应用。美国、加拿大、澳大利亚等工业发达国家已经普遍推广使用了该技术。近年来,我国通过科研立项空化射流科研攻关取得成功,很多油田应用效果明显。由于空化射流钻井的破岩方式更合理、有效,对钻头寿命没有影响以及射流的可靠性,受到国内外许多油田的关注,为深井快速钻井探索出了一条有效的途径,充分展示了该项钻井技术良好的市场前景。

随着油气勘探开发以“稳定东部,发展西部,储备南方”海相沉积构造,油气资源战略的实施,钻井深度会越来越深,深井比例会不断增加,地层年代愈来愈久远,岩石愈来愈硬,提高深井钻进速度问题已成为钻井界研究的重要课题之一。

1 水力脉冲空化射流钻井技术简介

水力脉冲空化射流钻井是在钻井过程中利用安装于钻头上部的水力脉冲空化射流发生器增强钻头喷嘴的射流作用,以提高钻井速度的一种新技术。在分析水力脉冲与空化射流调制机理的基础上,设计出了一种新型水力脉冲与空化射流耦合的水力脉

冲空化射流发生器,通过流体脉冲扰动和自振空化效应耦合,使进入钻头的常规连续流动调制成振动脉冲流动,在钻头喷嘴出口形成脉冲空化射流,产生水力脉冲、空化冲蚀和瞬时负压效应,从而提高井底净化和辅助破岩效果。

2 水力脉冲空化射流发生器结构与工作原理

2.1 结构

水力脉冲空化射流发生器主要由本体、弹性挡圈、导流体、叶轮座、叶轮轴、叶轮及轴套组件、自激空化振荡腔组成,见图 1。

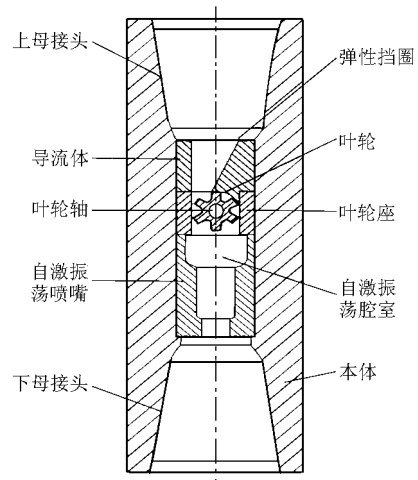


图 1 水力脉冲空化射流发生器结构图

收稿日期:2010-07-28; 修回日期:2011-02-28

作者简介:李燕(1973-),男(汉族),四川人,中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院工程师,石油工程专业,从事钻井技术工作,北京市朝阳区北辰东路8号北辰大厦501室,liyan19730930@163.com。

2.2 工作原理

导流体位于内腔顶部,以改变钻井液的流动方向和速度,对叶轮叶片产生切向力促使叶轮连续不断的高速旋转。

叶轮总成位于导游体下部,主要由叶轮座、叶轮、叶轮轴和轴套等部件组成(见图1)。叶轮安装在叶轮座上,并通过轴套连接叶轮在叶轮座上,在钻井液对叶轮片冲击力的作用下,叶轮高速旋转连续改变流道面积,产生脉冲扰动。

自激振荡腔室位于叶轮总成下部,对叶轮总成产生的源脉冲放大并产生流体谐振,当其通过振荡腔室出口收缩截面进入谐振喷嘴时,产生压力波动,这种压力波动又反射回谐振腔形成反馈压力振荡,从而在谐振腔内产生流体声谱共振,在流体出口段产生强烈脉动脉冲空化涡环流,以波动压力的方式冲击井底。

2.3 水力脉冲空化射流钻井提高机械钻速机理

钻井过程中水力脉冲空化射流发生器安装于钻头上部,将流体的扰动作用和自振空化效应耦合,使进入钻头的常规连续流动调制成振动脉冲流动,钻头喷嘴出口成脉冲空化射流,产生3种效应。

2.3.1 水力脉冲

改善井底流场,提高井底净化 and 清岩效率,减少压持和重复破碎;振动与非振动淹没射流冲击流动比较见图2。

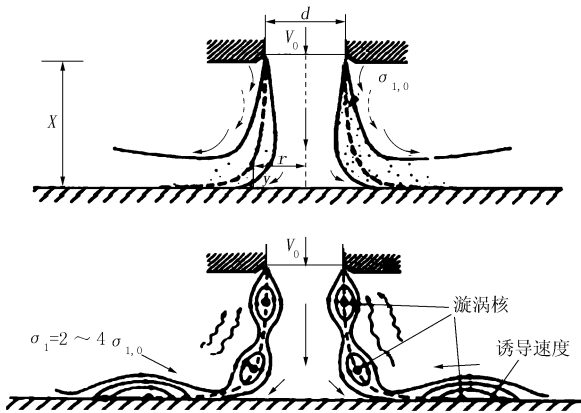


图2 模拟井底流场所做的室内实验 (上图是振动,下图是非振动)

2.3.2 空化冲蚀

利用空化冲击能量辅助破岩,提高破岩效率,计算公式如下:

空化冲蚀后剪切 $aa'dd'ff'cc'$ 时,所产生的抗剪阻力 T_0 等于:

$$T_0 = [S_{cc'ff} + S_{adfc} + S_{a'd'f'c'}] \sigma_0$$

$$\begin{aligned} &= [(S_{cc'b'b} - S_{ff'b'b}) + 2(S_{abc} - S_{def})] \sigma_0 \\ &= [(S_{cc'b'b} + 2S_{abc}) - (S_{ff'b'b} + 2S_{def})] \sigma_0 \\ &= T - (S_{ff'b'b} + 2S_{def}) \sigma_0 \end{aligned}$$

切削 $aa'dd'ff'cc'$ 岩体时所需克服的总阻力 F_0 等于:

$$F_0 = T_0 + f$$

由于 $T_0 \leq T$, 所以 $F_0 \leq F$

式中: T_0 ——产生脉冲时切削岩石所需的力; T ——正常情况切削岩石所需的力; f ——由于脉冲所产生的负压力。

2.3.3 瞬时负压

井底瞬时负压脉冲,局部瞬时欠平衡,改变岩石受力状态使岩石易破碎。水力脉冲空化射流钻井技术在钻头喷嘴出口形成脉冲射流,提高射流清岩破岩的作用,同时水力脉冲装置产生压力脉动,在钻头附近形成低压区,能够减少环空液柱压力对井底岩石的压持效应,提高钻井速度。图3是推导公式的理论分析受力模型。

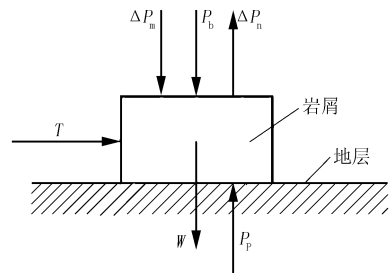


图3 受力模型分析

水平推力 法向压力 摩擦系数

$$T_i = (P_b + \Delta P_m + w - P_p) \mu$$

$$T_i = (P_b + \Delta P_m + w - P_p - \Delta P_n) \mu$$

式中: T_i ——井底岩屑的受力之和。

2.4 水力脉冲空化射流钻井技术的特点

(1)是在现有的地面装备条件下通过在井下动力钻具和钻头之间或钻铤和钻头之间安装水力脉冲空化射流发生器来实现的,不需增加任何地面装备;

(2)是在现有的施工参数条件下进行的,工具本身仅有0.5~1.0 MPa的压耗,在地面装备允许的情况下可以适当提高水力参数;

(3)只是在井底钻头附近形成脉冲射流、瞬时负压,不改变井眼整体的循环模式,有利于安全钻进;

(4)该钻井技术试验期间各参数正常、稳定,并取得了很好的提高钻速效果;

(5)具有使用方便、操作简单、成本低等优点。

3 水力脉冲空化射流钻井试用效果

水力脉冲空化射流钻井技术自 2005 年后先后在塔里木、吐哈、克拉玛依、西北油田分公司、大庆、吉林、青海、四川等 8 个油田进行了 60 多井次的现场试验,分别与常规钻井、复合钻井等多种钻井方式组合试验,配合使用了多种型号、参数的牙轮钻头和 PDC 钻头,1274~6162 m 的 8½、12¼、16、17½in 各种尺寸的井眼,1.1~1.7 g/cm³ 的钻井液密度,平均提高机械钻速 15% 以上,局部区块提高幅度更大,纯钻时超过 280 h,起出后状况良好,表明工具在钻井过程中性能稳定、可靠,完全能够满足正常钻井要求。

3.1 国内使用效果

表 1 是川东北元坝 121H 井现场使用效果对比;图 4 是使用井段与未使用井段的钻时对比图;图 5 是空化射流在塔河油田应用效果对比;表 2 是阆中 2 井试验井段与相邻井段钻速对比情况。

表 1 空化射流在元坝 121H 井使用效果对比

井号	井段深度 /m	进尺 /m	纯钻 /h	钻速 / (m·h ⁻¹)	钻速提高 /%
试验井	元坝 3918~4084	167	109.59	1.58	77.5
	121H 3801~3917	117	97.57	1.20	34.8
对比井	元坝 12 3378~3823	445	502	0.89	

表 2 阆中 2 井试验井段与相邻井段钻速对比

井型	井号	井段 /m	钻遇地层	进尺 /m	纯钻钻时 /h	机械钻速 / (m·h ⁻¹)
试验井段	第一次入井	2752.45~2824.31	下沙溪庙组	71.86	76.25	1.15
	第二次入井	2824.31~2934.30	下沙溪庙组	109.99	102.58	1.07
对比井段	下部相邻段	2934.30~2990.14	下沙溪庙组	55.84	45.30	1.23

表 3 缅甸 Thringadon - 1 井实验井段与临井段钻速对比

钻头型号	工况	井段 /m	进尺 /m	纯钻时间 /h	机械钻速 / (m·h ⁻¹)	机械钻速提高百分比 /%
R20AP 17	牙轮 + 常规钻具组合	2971.79~3114.07	142.28	73.25	1.94	
R20AP 18	牙轮 + 脉冲接头 + 常规钻具组合	3114.07~3334.5	220.43	89.5	2.46	26.8~42
R30AP 19	牙轮 + 脉冲接头 + 常规钻具组合	3334.5~3465.23	130.73	62.25	2.1	27.2~40
R30AP 20	牙轮 + 脉冲接头 + 常规钻具组合	3470.23~3617.2	146.97	89	1.65	4.4~10
R30AP 21	牙轮 + 常规钻具组合	3617.2~3735.25	118.05	71.5	1.65	
R30AP 22	牙轮 + 常规钻具组合	3735.25~3830	94.75	63.25	1.50	

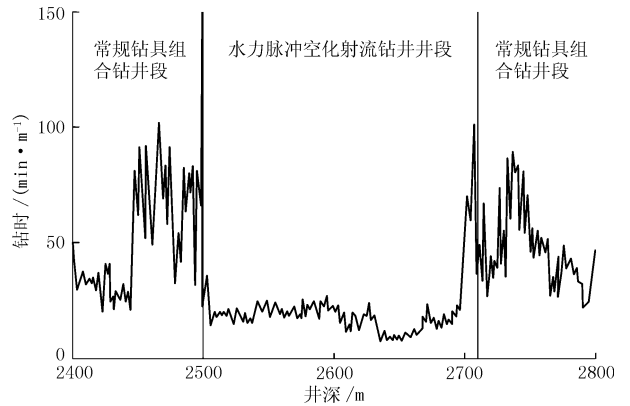


图 4 使用空化射流和不使用空化射流钻时比较

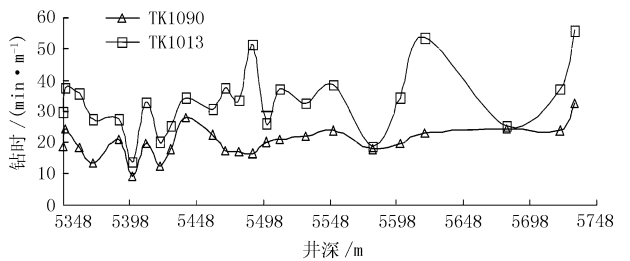


图 5 空化射流钻井技术在塔河油田使用效果

3.2 海外使用情况

表 3、图 6 为空化射流钻井技术在缅甸使用情况。

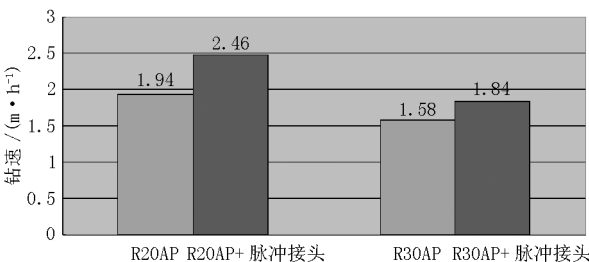


图 6 Thringadon - 1 井两种类型钻头机械钻速提高统计对比

从统计使用情况可以看出,R20AP18 钻头应用

脉冲接头对绿灰色、棕红色、褐灰色等泥岩井段机械钻速有明显的提高,累计绿灰色泥岩井段机械钻速提高 38%,棕红色泥岩井段机械钻速提高 40.6%,褐灰色泥岩井段机械钻速提高 76.8%;但是对灰色粉砂质泥岩、灰色泥质粉砂岩机械钻速没有明显的效果,效果不明显。从现场使用分析认为:使用脉冲空化射流接头 R30AP19、R30AP20 钻头和没有使用脉冲接头 R30AP21、R30AP22 钻头,从钻进岩性上可以看出,绿灰色、灰色、褐灰色等泥岩井段机械钻

速有明显的提高。相对于砂质泥岩或砂岩相对机械钻速提高较少。

4 水力脉冲空化射流使用范围

- (1) 适用井眼范围包括 $8\frac{1}{2}$ 、 $12\frac{1}{4}$ 、16、 $17\frac{1}{2}$ in;
- (2) 适用钻井液密度范围在 $1.1 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$;
- (3) 适用的钻井深度 $0 \sim 6162 \text{ m}$;

(4) 效果明显,平均提高机械钻速 30% 以上,中软到中硬地层提高提速效果更加明显,在试验条件下该工具纯钻时间超过 260 h;

(5) 特别在目前页岩气的勘探中,该工具对页岩的钻速提高具有更好的作用。

5 水力空化脉冲射流发生器的特点

5.1 使用条件简单

使用水力脉冲空化射流发生器,不影响正常钻井施工,各种钻井参数可按照原设计执行。由于水力脉冲空化射流发生器工作过程中自身仅有 $0.5 \sim 1.0 \text{ MPa}$ 的压耗,可以通过适当增加排量以提高水力脉冲空化射流发生器使用效果。

5.2 安全性高

水力脉冲空化射流发生器本体为 40GrMnMo,屈服强度 900 MPa ,最大许用拉力、压力和扭矩强度满足要求(表 4)。

表 4 水力脉冲空化射流发生器许用载荷

工具尺寸 /in	最大允许拉力 /kN	最大允许压力 /kN	最大允许扭矩 /(N·m)
7	4920.50	4920.50	172459.3
9	6775.15	6775.15	158933.1

常用钻具组合中,5 和 $5\frac{1}{2}$ in 钻杆的抗拉和抗扭强度见表 5。

实际钻井过程中的载荷数值远小于安全许用强

(上接第 28 页)

替代。在开始造斜阶段应注意控制钻进参数,防止意外事故的发生。开始钻进时要轻压慢转,待取出完整岩心直至粗径钻具超过偏心楔斜面后,压力和转速可适当逐渐增大。

8 认识与体会

金刚石绳索取心钻具补打斜孔,施工难度大,技术复杂。由于钻杆与孔壁的环空间隙小,钻具弯曲难,一般选用小一级钻具造斜,偏心楔的斜度一定不能太大,一般控制在 $1.5^\circ \sim 2^\circ$ 之间即可。打斜孔时

表 5 常用钻具组合中 5 和 $5\frac{1}{2}$ in 钻杆的抗拉和抗扭强度

钻杆规格	G105(抗拉) /kN	S135(抗拉) /kN	G105(抗扭) /(kN·m)	S135(抗扭) /(kN·m)
$5\frac{1}{2}$ in 新	2720	3500	96	123.4
5 in 新	2460	3170	78	100.3

度值,安全系数非常高,对钻井的任何处理措施无不良影响。

6 结论

(1) 空化射流钻进现场试验表明,空化射流发生器既可以配合牙轮钻头也可以配合 PDC 钻头使用。若要进一步大幅度提高机械钻速,还需进一步提高射流的瞬时负压作用,同时提高射流发生器的寿命。

(2) 空化射流发生器可提高机械钻速 15% ~ 50%,其结构设计合理,使用可靠,工作性能稳定。

(3) 优化射流发生器加工工艺,以提高射流发生器的单次使用寿命。

(4) 空化射流钻井工艺技术应与旋冲钻井工艺技术同步研究,射流发生器应标准化、系列化以便推广和普及。

(5) 可用于非常规能源的勘探开发,以不断地提高钻井效率。

参考文献:

- [1] 罗肇丰. 钻井技术手册(一)[M]. 北京:石油工业出版社,1984.
- [2] 刘希圣. 钻井工艺原理[M]. 北京:石油工业出版社,1992.
- [3] [美]P. L. 穆尔,等. 钻井工艺技术(续篇)[M]. 北京:石油工业出版社,1989.
- [4] 陈谱. 钻井技术手册(一)钻头[M]. 北京:石油工业出版社,1992.
- [5] 王达. 探矿工程(地质工程)未来 20 年科技发展战略研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(1).

最重要的是不要扫坏偏心楔和防止偏心楔转动。在补打斜孔取煤施工中,只要把握正确有效的施工技术措施,按设计步骤和正确的操作方法进行,成功率就会显著提高。

参考文献:

- [1] 张家军,潘峰. 煤田深孔采煤心施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(5):34-35,52.
- [2] 韩广德. 中国煤炭工业钻探工程学[M]. 北京:煤炭工业出版社,2000.
- [3] 赵运兴. 煤田钻探技术手册(修订本)[M]. 北京:煤炭工业出版社,1986.