

应用水力空化射流技术提高灰岩地层钻速

鲍洪志

(中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

摘要:水力空化射流技术具有安全、可靠、效果好等特点,在石油钻井中得到了推广应用。针对伊朗 Y 油田中下部中硬灰岩地层可钻性差、机械钻速低的情况,试验应用了水力空化射流工具。研究了试验油田的地层强度及可钻性参数,优选了水力脉冲空化射流装置和下部钻具组合,优化了机械及水力参数。现场实钻资料表明,水力空化射流工具提高钻速明显,对中硬地层的灰岩具有良好的钻进效果。

关键词:水力空化射流;灰岩地层;可钻性;机械钻速;伊朗

中图分类号:TE248 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2013)05-0001-03

Application of Hydraulic Cavitation Jet Technology to Improve Penetration Rate in Limestone Formation/BAO Hong-zhi (Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: Hydraulic cavitation jet technology is widely used in petroleum drilling for its safety and reliability with good effects. According to the conditions of poor drillability and low ROP in lower part of medium hard limestone formation of Y oil field in Iran, hydraulic cavitation jet tools are tested. By the study on the formation strength of test oil field and the drillability parameters, hydraulic pulsed cavitation jet device and BHA were selected; the mechanical and hydraulic parameters have been optimized. The real drilling data indicate the obvious improvement of hydraulic cavitation jet drilling tool, which is good for drilling in medium hard limestone formation.

Key words: hydraulic cavitation jet; limestone formation; drillability; ROP; Iran

1 水力空化射流装置及其破岩机理

空化射流是指人为地控制水射流流束并产生许多空泡,利用空泡破裂所产生的强大冲击力来增强射流的作用效果。基本原理是在液体射流内诱使空化发生并让空泡长大,当含有这些空泡的射流冲击物体时,使空泡在物体表面及其附近破裂,由于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,从而在物体表面许多局部区域产生极高的冲击压力和应力集中,使物体表面迅速破坏。在相同泵压和流速条件下,空化射流的这种局部压力放大作用使其清洗切割效果大大优于非空化射流。

水力空化射流装置的结构原理见图 1,其结构主要由本体、弹性挡圈、导流体和自激振荡喷嘴等组成。导流体改变钻井液方向和速度,叶轮总成为振荡腔提供有源脉冲,自激振荡腔有源脉冲信号具有流体声谱共振、信号放大等功能,在流体出口端可产生强烈脉动涡环流。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:

水力脉冲可改善井底流场,提高井底净化和清岩效率,减少压持和重复破碎;空化冲蚀可辅助破岩,提高破岩效率;井底瞬时负压脉冲,可保持局部瞬时欠平衡,改变井底岩面应力状态。

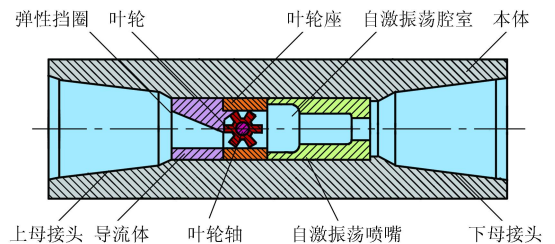


图 1 水力空化射流工具结构示意图

V E Johnson Jr 等人推导出了等温压缩条件下空化射流产生的冲击压力与连续射流冲击压力之间的关系:

$$p_i = (p_s/6.35) \exp[(2/3)\alpha] \quad (1)$$

式中: p_i ——空化射流冲击压力,Pa; p_s ——连续射流冲击压力,Pa; α ——液体内气体的体积分数,%。

Conn 和 Rudy 曾用试验的方法求取了 α 值,假定当 $\alpha = 1/6 \sim 1/12$ 范围内时,从式(1)可得到空化

收稿日期:2013-04-25; 修回日期:2013-05-03

基金项目:中国石化科技部项目“伊朗 Y 油田安全快速成井关键技术研究”(JP10005)资助

作者简介:鲍洪志(1966-),男(汉族),辽宁盖州人,中国石化石油工程技术研究院高级工程师,钻探工程专业,从事钻井技术研究、钻井工程设计、海外钻井技术支持等工作,北京市朝阳区北辰东路 8 号,baohz.sripe@sinopec.com。

射流与连续射流冲击压力之间的关系:

$$p_i = (8.6 \sim 124)p_c \quad (2)$$

式(2)表明,在泵压和流速相同的条件下,空化射流冲击压力为连续冲击压力的 8.6 ~ 124 倍,即如果连续射流的冲击压力为 10 MPa,则相同条件下空化射流冲击压力高达 86 ~ 1240 MPa,如此高的冲击压力,足以切割和破坏岩石金属之类的坚硬材料。

2 水力空化射流装置在伊朗 Y 油田适用性分析

伊朗 Y 油田上部地层主要为砂泥岩夹灰岩地层,中下部为大段的灰岩地层。早期已钻井资料表明,该油田中下部灰岩地层平均机械钻速普遍较低(1.6 m/h),严重制约了油田勘探开发进程。为了实现提高机械钻速的目的,开展了一系列提高机械钻速的研究,包括了力水空化射流装置应用。Y 油田为白垩系灰岩为主的海相地层,主要地层描述见表 1。

表 1 Y 油田地层描述

地层	深度/m	岩性描述
Agha	1350	砂岩,泥岩,泥质灰岩,薄层石灰岩,石膏
Gach	1750	石膏层,泥岩和泥质灰岩
Asma	1802	砂岩,泥岩,石灰岩和泥页岩互层
Paban	2246	泥灰岩,浅棕色,浅灰色石灰岩
Gurp	2603	粘土质灰色石灰岩,灰岩
Ila	2700	棕色石灰岩
Laf	2722	泥岩,灰绿色页岩
Sarv	3300	油层,浅棕色,深棕色石灰岩,灰色石灰岩
Kazh	3500	黑色沥青质页岩,灰色石灰岩
Dari	3700	石灰岩,沥青质石灰岩,泥灰岩
Gad	3900	泥岩,泥灰岩,石灰岩,页岩,砂岩
Fah-U	4000	储层,灰色,白色石灰岩,灰色泥质灰岩
Fah-L	4500	储层,灰岩,泥质灰岩

采用 ASTM D 3148-93 和 ISRM 推荐的岩石力学试验方法,利用已钻井取得的岩心开展了岩石力学实验(见表 2)。

表 2 岩心单轴试验数据

深度/m	岩样号	长度/mm	直径/mm	单轴抗压强度/MPa	杨氏模量/GPa	泊松比
3084.93	1x	84.30	37.67	21.35	3.97	0.16
3086.72	2c	81.11	38.49	22.78	3.42	0.28
3086.77	2d	83.36	38.49	24.41	5.76	0.20
4145.08	5a	112.23	66.42	24.53	1.075	0.30

应用测井资料结合灰岩可钻性经验模型,建立了地层的可钻性剖面(见图 2)。从图中可以看出,中下部地层的可钻性变差,可达 6 ~ 7 级。

根据 Y 油田的地层抗压强度以及空化射流的射流压力,可以得出空化射流在此地区的提速适应性(见图 3)。

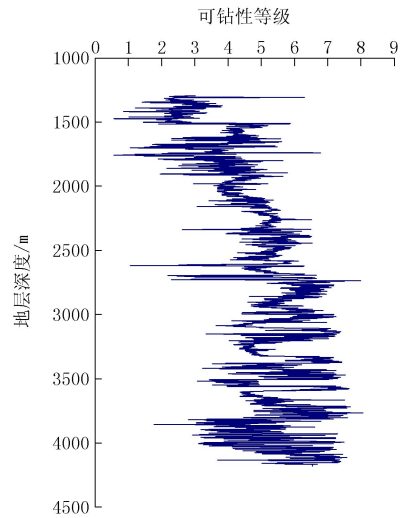


图 2 HOS 井地层可钻性剖面

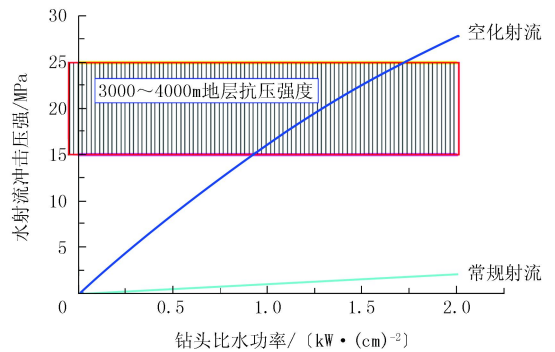


图 3 常规水射流与空化射流冲击压强的比较

水射流提高机械钻速的原因:一是有效清洗井底,射流撞击井底后形成的井底冲击波和井底漫流对井底清洗起重要作用。这种作用尤其在软地层快速钻井时作用尤为显著,钻速提高时破碎的岩屑很多,需要快速有效的清洗井底,以防止重复破碎。

二是射流的辅助破岩作用,理论和实践表明射流功率足够大时,不但具有冲洗井底的作用,而且具备辅助破岩的作用。但是具备的条件是射流的冲击力要超过地层岩石的抗破碎压力。因此对于常规钻头的射流而言,辅助破岩只能在软地层时才能发生作用。

综上所述,常规钻头水射流提高机械钻速最有效的地层条件是软地层,当钻遇硬地层时,常规水射流难以达到岩石的破碎压力,根据《钻井手册(甲方)》推荐的通用钻速方程可定量评价。

使用简化的钻速方程可以进行射流压力对钻速的影响:

$$V = (W/5.62)^{0.5366 + 0.1993K_d} \cdot (N/60)^{0.9250 - 0.0375K_d} \cdot (HEI/1.026)^{0.7011 - 0.05682K_d} \cdot HEI = C^2 \cdot 0.05\rho Q^3 / (A_B A^2) \quad (3)$$

式中: V ——机械钻速, m/h ; W ——比钻压, t/in ; K_d ——可钻性级值; N ——转速, r/min ; HEI ——有效钻头比水功率, kW/cm^2 ; C ——钻头喷嘴能量转换效率; ρ ——钻井液密度, g/cm^3 ; Q ——排量, L/s ; A_B ——钻头面积, cm^2 ; A ——钻头喷嘴出口截面积, cm^2 。

钻头射流冲击压强为:

$$P_{BJ} = \rho Q^2 / (100A^2) \quad (4)$$

将式(3)、(4)进行整理可以得到钻头比水功率与钻头喷嘴压强的关系:

$$HEI = 5C^2 Q / A_B \quad (5)$$

假设转换效率为 0.9, 排量为 30 L/s, 钻头尺寸为 21.59 cm, 用水射流冲击力表达的钻速方程可以推导为:

$$V = (W/5.62)^{0.5366 + 0.1993K_d} \cdot (N/60)^{0.9250 - 0.0375K_d} \cdot (0.33P_{BJ}/1.026)^{0.7011 - 0.05682K_d}$$

同时, 根据岩石强度与可钻性的相关性关系经验公式:

$$\sigma = 8.572e^{0.486K_d} \quad (6)$$

可做出不同强度的岩石条件下钻头水射流压力对于机械钻速的影响(见图 4)。

根据通用钻速方程计算出的曲线可以看出地层的影响, 硬地层条件下, 钻头射流压力提高机械钻速效果有限, 因此需要使用高压水射流来辅助破岩。

根据岩石力学参数试验和计算结果, 伊朗雅达地区井深 3000 m 以下的地层岩石强度基本保持在 15~25 MPa。根据图 4 可知, 常规的水射流在这种硬地层中难以有效提高钻速, 如果应用高压水射流

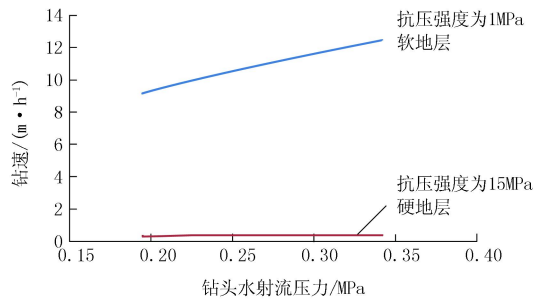


图 4 软硬地层对水射流提高机械钻速的影响

需要极高的泵压, 在不考虑钻柱、井眼压耗的情况下就要需 35~140 MPa 的高压, 钻井现场难以达到。采用空化射流工具在钻头处产生空化射流可以在常规钻头水功率的条件达到极高的压力。

3 水力空化射流装置在 Y 油田应用效果分析

为了验证空化射流工具的效果, 选择了雅达油田机械钻速相对较低的 Gad 地层进行了试验, 并与邻井的同地层常规钻进数据进行了对比。

试验井: F24 井, 井眼尺寸 8 3/8 in, 井深 3740~3953 m, 空化射流工具规格为 7 in (Ø178 mm)。

钻具组合: 8 3/8 in 钻头 + 空化射流工具 + 6 1/2 in DC × 2 + 8 1/8 in STB + 6 1/2 in DC × 1 + 8 1/8 in STB + 6 1/2 in DC × 6 + 5 in HWDP × 6 + Jar + 5 in HWDP × 8 + 5 in DP。

应用效果见表 3。

4 结论与认识

水力空化射流装置可应用于中硬地层, 能有效

表 3 空化射流工具应用效果对比

钻进方法	井名	钻头厂商	钻头型号	井段/m	进尺/m	纯钻时间/h	钻速/(m·h ⁻¹)	钻速提高/%
空化射流	F24	kingdream	KM1363SDGR	3740~3953	213.0	61.50	3.46	
	APP1	Kingdream	KM1363SGRA	3804.3~3856.0	51.7	31.00	1.67	107.71
常规钻进	APP1	kingdream	KM1363SGRA	3856.0~3982.8	126.8	52.65	2.41	43.80
	F19	kingdream	KM1363SGRA	3839~3986	147.0	53.00	2.77	24.87

提高钻井机械钻速。伊朗 Y 油田的应用效果表明, 在相近井段、钻头型号相同或相近, 应用空化射流工具钻速提高 24.87%~107.71%, 提速效果显著。

水力空化射流装置结构简单, 操作可靠, 长度仅相当于一个钻具短节, 即使该装置失效也不会对井下安全造成不利影响。

参考文献:

[1] 李燕. 脉冲空化射流钻井技术研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(3): 29-32.

[2] 史怀忠. 水力脉冲空化射流钻井提高钻速技术[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2).

[3] 史怀忠, 李根生, 沈忠厚. 水力脉冲式钻井工具的研制与应用[J]. 石油机械, 2006, 34(5).

[4] 王学杰, 李根生, 康延军, 等. 利用水力脉冲空化射流复合钻井技术提高钻速[J]. 石油学报, 2009, 30(1).

[5] 马东军, 李根生, 史怀忠, 等. 水力脉冲空化射流发生器参数优化试验研究[J]. 石油机械, 2009, 37(12).

[6] 李根生, 史怀忠, 沈忠厚, 等. 水力脉冲空化射流钻井机理与试验[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2).

[7] 张志云. 超深井水力脉冲空化射流钻井试验研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(4).