

# 旋流喷嘴钻头在 NP32 - 3646 井的现场应用分析

董超<sup>1</sup>, 谭松成<sup>1,2</sup>, 吴华<sup>3</sup>, 李伟<sup>1</sup>

(1. 中石油渤海钻探第一钻井公司, 天津 300280; 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500; 3. 大港油田采油工艺研究院钻井工艺室, 天津 300280)

**摘要:**南堡 32 - 3646 井是一口四开三段制定向井, 设计井深 5798 m。3864 ~ 4265 m (井斜 29.18° 的稳斜段) 试验了五刀翼旋流喷嘴 PDC 钻头 (主切削齿直径 16 mm, 3 个 Ø11 mm 常规水眼和 4 个 Ø18 mm 旋流喷射水眼)。针对深井超深井钻进中常采用的相对较高的钻井液密度和粘度, 不利于提高钻头破岩效率的问题, 在系统介绍旋转射流发生机理和破岩机理的基础上, 对 NP32 - 3646 井五刀翼旋流喷嘴 PDC 钻头现场应用情况进行了分析。试验结果表明, 旋转射流因具有切向、轴向和径向三维速度, 可在高粘钻井液条件下更好地改善井底清岩效果, 并通过剪切、冲蚀、拉伸和磨削等多种方式实现辅助破岩, 从而提高钻井效率。试验钻头进尺 401 m, 平均机械钻速 4.45 m/h, 可较好地满足现场钻进需要, 具有良好的推广应用前景。

**关键词:** 旋转射流; PDC 钻头; 深井超深井; 破岩机理; 冀东油田

**中图分类号:** TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2014)12 - 0031 - 03

**Analysis on Field Application of Swirl Nozzle Bit Employed for NP32 - 3646 Well Drilling/DONG Chao<sup>1</sup>, TAN Song-cheng<sup>1,2</sup>, WU Hua<sup>3</sup>, LI Wei<sup>1</sup>** (1. No. 1 Drilling Engineering Company, BHDC, CNPC, Tianjin 300280, China; 2. South-west Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China; 3. Oil Production Technology Institute of Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** NP32 - 3646 is a three-interval and four-spud directional well with designed depth of 5798m. The swirl nozzle PDC bit was tested in the section of 3864m to 4265m (well deviation angle of 29.18°), which had 5 drag blades with diameter of 16mm for its main cutters and 7 nozzles (3 ordinary ones and 4 swirl ones with 11mm and 18mm in diameter respectively). In deep and extra-deep well drilling, higher mud density and viscosity are usually employed, which is against to improve bit drilling efficiency. To address this issue, based on the produce mechanism and rock-breaking mechanism of swirling jet flow, the analysis is made on the field application of swirl nozzle PDC bit with 5 drag blades in well NP32 - 3646. The field application indicates that duo to its three-dimensional velocity of tangential, axial and radial, swirling jet flow can improve the cuttings removal performance at well bottom and rock-breaking can be realized by shear, erosion, stretching and grinding so as to improve drilling efficiency. The swirl nozzle bit obtained a total footage of 401m with average rate of penetration of 4.45m/h, which can meet the needs of field drilling and has good popularization and application prospect.

**Key words:** swirling jet flow; PDC bit; deep and extra-deep well; rock-breaking mechanism; Jidong oilfield

随着浅层油气资源勘探开发逐渐进入中后期阶段, 深部资源已成为我国重要的战略接替能源, 深井超深井的数量逐年增多。随着井深的加大, 井底岩石所处围压条件相应增大, 岩石变得更为致密, 抗压强度等参数均有明显提高。同时, 随着钻井深度的增加, 钻遇复杂地层的几率也更大, 因此在深井超深井钻进中常采用相对较高的钻井液密度和粘度。钻井液密度的增加将加大岩石破碎面上的液柱压力, 而粘度的增加也会增大对岩屑的压持效应, 从而导致深井超深井钻进破岩效率低、机械钻速低等问题, 严重影响钻井效率, 增加钻井成本。

自 1973 年美国 Exxon 公司连续高压水射流辅

助破岩实验以来, 水力射流技术已在钻井行业得到长足发展<sup>[1,2]</sup>, 先后发展形成了自激振荡空化射流、脉冲射流和旋转射流等技术<sup>[3]</sup>。其中旋转射流破岩机理与常规直射流不同, 以剪切破碎为主, 并辅以冲蚀、拉伸破坏和磨削等多种碎岩形式, 从而提高破岩效率<sup>[4]</sup>。

## 1 旋流喷嘴钻头提速原理

### 1.1 旋转射流的发生机理

旋转射流是指在射流喷嘴不发生旋转的情况下, 产生具有三维速度的射流体, 并沿着螺旋线轨迹运动而形成扩散状射流, 是通过安装在喷嘴腔内部

收稿日期: 2014 - 07 - 21

基金项目: 中国石油集团公司“高效破岩工具”项目的子课题——“高效 PDC 与孕镶式金刚石钻头研制”课题的研究内容 (2013E - 38 - 04)

作者简介: 董超 (1979 - ), 男 (汉族), 山东人, 中石油渤海钻探第一钻井公司生产技术科工程师, 石油工程专业, 从事钻井技术研究和科研管理工作, 天津市大港油田红旗路 128 号, ws\_alpha@qq.com。

的导向叶轮,将一维来流引导成具有轴向、切向和径向速度的三维流体<sup>[5]</sup>。如图1所示为导向叶轮流道的截面形状,射流产生过程为<sup>[6]</sup>:具有一定速度的一维流体经喷嘴腔流入导向叶轮后,弯曲的导向叶片使得来流只能沿着叶轮的侧面与之平行流动,从而在穿过导向叶轮的过程中受到一个扭曲力的作用;扭曲力使得流体获得一定旋转角速度和角动量距,射流体各质点均产生轴向、径向和切向的三维速度。当射流体流出导向叶轮后,受惯性力的影响,射流体仍然具有三维流速的特征;随后,射流体在经过喷嘴腔的锥形收缩段时,受压力变化的影响,射流体的轴向和切向速度迅速增大;当射流体从喷嘴中射出后,射流体在沿螺旋线旋转前进过程中,受离心力作用,流体沿径向上不断扩散,从而形成一个喇叭状的锥形射流体。

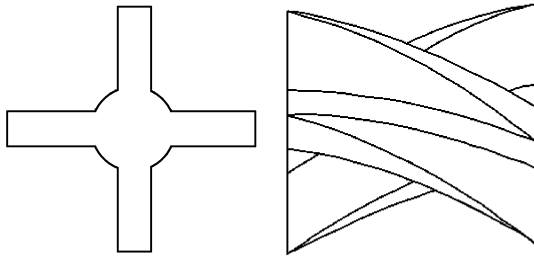


图1 导向叶轮截面形状示意

## 1.2 旋转射流的破岩机理

旋转射流与常规直圆射流的破岩机理差别之处在于,旋转射流不再单纯通过与岩石进行正面冲击而形成的密实核、拉伸和水楔作用来破碎岩石,而是通过对岩石表面施加平行载荷,从而使旋转射流区域中的岩石表面产生剪切破坏,并同时伴以一定的冲蚀和拉伸破碎,以及旋流磨削破碎<sup>[4]</sup>。

### 1.2.1 剪切破碎

岩石属于非均质材料,通常其抗剪强度只有抗压强度的 $1/15 \sim 1/8$ 。旋转射流除了在岩石表面施加有冲击作用之外,其切向分量也对岩石形成剪切破碎作用。由于旋转射流相的切向速度非常高,因而剪切破碎是旋转射流的主要碎岩方式。

### 1.2.2 冲蚀破碎

旋转射流的轴向速度虽不及常规直圆射流,但其动能仍有相当大一部分通过轴向速度释放,旋转射流冲击区域集中在一个环形区域内。环形区域内的岩石表面同时受到冲击力的作用和横向流的冲蚀作用,岩石的胶结面和层理面等薄弱处首先被冲蚀破坏,而后岩石颗粒裸露被射流冲蚀破坏。

### 1.2.3 拉伸破碎

旋转射流从喷嘴流出后,除轴向和切向速度外,还具有一定的径向速度,因此射流可沿井底的凸锥面产生一个平行载荷,形成拉应力。岩石抗拉强度只有抗压强度的 $1/80 \sim 1/16$ ,加上岩石表面已经受到射流的剪切和冲蚀破碎作用,从而更容易产生裂纹。裂纹的发展与射流体的连续灌入,使裂纹不断扩张并相互连通,造成宏观的岩石体积破碎。

### 1.2.4 旋流磨削

由于旋转射流呈喇叭状扩散,射流接触井底后将从来流的外侧仍以一定的速度旋转返回。这一射流运动路径不但可以避免来流与返流产生对流而造成能量损失,同时由于返流中携带有岩屑,因而可以在返出的过程中对井壁进行磨削,使井眼在一定程度上光滑扩大,提高钻孔质量。

## 2 现场应用情况

### 2.1 NP32-3646井基本情况

南堡32-3646井是冀东油田南堡3-2平台上一口设计井深5798m的四开三段制定向井,0~300m直井段;300~700m造斜段;700~4515m稳斜段(井斜 $29.18^\circ$ );4515~4572m造斜段;4572~5798m稳斜段(井斜 $33.20^\circ$ ;全井方位 $269.22^\circ$ )。该井的地质设计情况如表1所示,设计的井身结构如表2所示。

表1 NP32-3646井地质设计

层位	底界海拔/m	厚度/m	岩性描述
平原组	-300	300	粘土及散砂
明化镇	-2300	2000	上部为灰色泥岩与灰黄色细砂岩互层;中部以灰色泥岩与浅灰色细砂岩呈不等厚互层;下部为中段棕红色、绿灰色泥岩夹中、薄层浅灰色细砂岩、浅灰色粉砂岩、泥质砂岩
馆陶组	-2930	630	上部以浅灰色细砂岩、灰白色含砾不等砾砂岩为主;中部以浅灰色细砂岩为主,夹深黑色玄武岩和玄武质泥岩,下部为中段杂色砾岩
东一段	-3400	470	浅灰色细砂岩、砂砾岩及灰色泥岩互层
东二段	-3800	400	深灰色泥岩、粉砂质泥岩互层;中部砂岩发育
东三段	-4050	250	深灰色泥岩夹灰色细砂岩和粉砂岩
沙河街	-5075	1025	以深灰色泥岩、灰色凝灰岩与灰色砂砾岩、细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩不等厚互层

表2 NP32-3646井设计井身结构

开钻次序	钻头直径/mm	井深/m	套管直径/mm	下入深度/m	下入层位
一开	660.4	281	508.0	279	平原组
二开	444.5	1502	339.7	1500	明化镇
三开	311.1	3853	244.5	3851	东二段
四开	215.9	5798	139.7	5795	沙河街

### 2.2 旋流喷嘴钻头使用情况

钻具组合: Ø215.9 mm TUS1653RD 型钻头 × 0.3 m + Ø172 mm 螺杆 1.25° × 7.83 m + Ø208 mm 稳定器 × 0.72 m + 411/410 浮阀 × 0.49 m + Ø165 mm 无磁钻铤 × 9.15 m + Ø175 mm MWD 短节 × 1.34 m + 521/410 转换接头 × 0.51 m + Ø127 mm 加重钻铤 × 130.84 m + Ø127 mm 钻杆 × 3364.03 m + 411/520 转换接头 × 1.16 m + Ø139.7 mm 钻杆。

钻井液性能: 密度 1.35 g/cm<sup>3</sup>; 粘度 80 mPa·s; 失水量 3.6 mL/30 min; 泥饼厚度 0.5 mm; 含砂量 0.2%; 静切力(10 s/10 min) 5.0/8.0 Pa; pH 值 9.5。

钻井参数: 钻压 0 ~ 2 kN; 转速 45 r/min; 泵压 20 MPa; 排量 30 L/s。

钻头试验情况: 旋流喷嘴钻头的试验井段为 3864 ~ 4265 m, 据现场录井资料, 试验段主要为东二段地层; 钻头总进尺为 401 m, 纯钻时间为 90.25 h, 平均机械钻速为 4.45 m/h; 其中复合钻进时的机械钻速为 4 ~ 12 m/h, 定向钻进时的机械钻速为 1.5 ~ 3 m/h; 钻头试验后期, 因螺杆马达的使用时间 > 120 h, 且井斜偏大(井斜角为 30°, 超过设计井斜 2°), 因此调整钻具组合而终止试验。钻头试验前后照片对比如图 2 和图 3 所示。使用后的钻头整体完好, 仅有 3 个复合片存在较为严重磨损, 钻头外径磨损 0.5 mm。

### 3 旋流喷嘴钻头使用效果分析

试验的五刀翼 TUS1653RD 型旋流喷嘴 PDC 钻头,

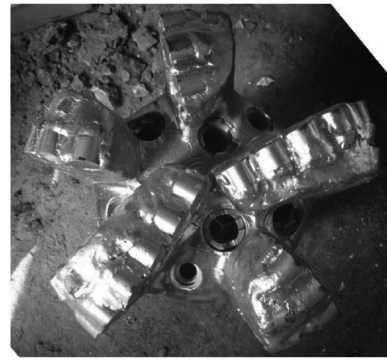


图 2 旋流喷嘴钻头试验前照片



图 3 旋流喷嘴钻头试验后照片

主切削齿直径 16 mm, 肩部设有双重保护切削齿。7 个水眼包括 3 个 Ø11 mm 的常规水眼和 4 个 Ø18 mm 的旋流喷射水眼(可拆换)。试验后钻头有 2 个肩部切削齿和一颗主动保径齿严重磨损, 其他切削齿仍基本完好。其使用效果与其他邻井对比如表 3 所示。

表 3 南堡构造东 2 ~ 东 3 段地层 Ø215.9 mm 钻头使用效果对比

井号	钻头型号	钻压 /kN	转速 / (r·min <sup>-1</sup> )	排量 / (L·min <sup>-1</sup> )	泵压 /MPa	钻井液密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	粘度 / (mPa·s)	使用井段 /m	机械钻速 / (m·h <sup>-1</sup> )
NP32 - 3646	TUS1653RD	20	40 + 马达	30	20	1.35	80	3864 ~ 4265	4.45
NP3 - 20	T1655AUG	20	马达	30	18	1.25	48	4003 ~ 4363	3.36
NP306X2	T1665B	60	80 + 马达	30	21	1.35	70	4316 ~ 4562	6.64
NP3 - 81	GP1645D	60	80 + 马达	27	20	1.42	43	4406 ~ 4436	1.67

由表 3 中对比结果可知, 旋流喷嘴钻头在低钻压和中低转速、高粘钻井液状态试验参数条件下, 仍可获得较大的进尺和较优的机械钻速。主要是通过旋转射流辅助破岩来实现的, 这与 PDC 钻头的切削破岩机理一致, 可增强钻头的破岩效率。

旋流喷嘴钻头可通过不同的旋转喷嘴与常规水眼组合, 获得更大的钻头与所钻地层之间的漫流速度, 以改善清岩效果。尤其是在高粘钻井液条件下, 可减小井底岩屑的压持效应, 使岩屑顺利返出, 从而提高钻井效率。此外, 旋流喷嘴配合双重保护切削齿结构的 PDC 钻头在复合钻进时, 既可合理控制切

削齿吃入岩石深度从而减小钻头扭矩, 又能增加钻头使用寿命。

### 4 结论

试验旋流喷嘴钻头在低压、中高转速和高粘钻井液条件下, 进尺 401 m, 平均机械钻速 4.45 m/h, 可满足现场钻井要求, 具有良好的推广应用前景。

(1) 旋转射流主要通过剪切、冲蚀和拉伸破碎来实现辅助破岩, 其破岩机理与 PDC 钻头类似, 可增强钻头的破岩效率。

(下转第 36 页)

通过水平孔反向延长线上的滑轮2,拖动孔口钻杆向后不断延伸,达到起出孔内钻杆的目的。

下钻滑轮组合如图2所示,钻机卷扬机上钢丝绳先通过钻机卷扬机上方滑轮1,再与孔口上方附近岩体中固定的滑轮3进行组合,先在孔口接长钻杆并与提引器钢丝绳连接,下钻时,钻机卷扬机收紧钢丝绳,钢丝绳先通过卷扬机上方滑轮1改变受力方向,钢丝绳再通过固定在孔口上方的滑轮3,拖动连接在孔口钻杆上提引器,使孔外钻杆滑行到钻孔内。

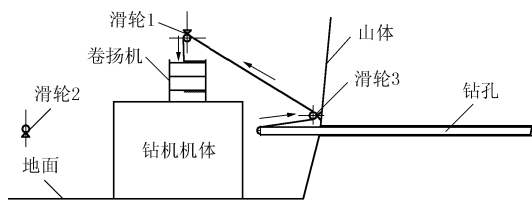


图2 下钻滑轮组合操作示意

#### 4 绳索取心钻进优点

(1)与普通钻进方法相比,绳索取心钻进具有防孔内掉块的优点。在水电工程地质钻探成孔过程中,经常会遇到不良地质岩层,如断层、软弱夹层、破碎带、节理发育等,当钻具钻穿破碎地层后,如果采用 $\varnothing 43$ 或50 mm钻杆,由于与孔径间隙过大,孔壁就会出现掉块,为此,经常因孔壁掉块使钻具卡在孔内;而改用绳索取心钻进技术之后,由于钻具外径75 mm,而钻杆外径为71 mm,其外径尺寸相差很小,直径 $>3$  mm的破碎岩石就无法掉入孔内,也就不会因不良地层而发生孔内卡钻事故。

(2)采用绳索取心钻杆,钻杆和孔壁之间间隙

较小,改善了钻杆的受力状态,钻杆不容易被折断,避免断钻杆等孔内事故的发生。同时,钻机在加压传递钻压过程中,钻杆受力不容易弯曲,从而提高了钻进稳定性和保证了钻孔孔径。

(3)只要金刚石钻头没有达到使用寿命就可以连续钻进,起钻次数减少,可以大大增加纯钻进时间,提高钻进工效,同时,减轻了劳动强度和减少了钻探成本。

(4)水平钻进其岩心进入内管相对较容易,因此岩心采取率较高。

(5)起下钻升降系统由垂直高空作业改变成水平地面作业,设备简化,操作较安全。

#### 5 结语

绳索取心技术在水平孔中的成功应用,是技术人员与钻探工人共同努力的结果,同时也使绳索取心钻进应用领域得到进一步拓展。该钻进技术具有提钻次数少、钻进工效高、钻孔质量好、工人劳动强度低等优点,具有很好地推广和应用价值。

#### 参考文献:

- [1] DL/T5013-2005,水电水利工程钻探规程[S].
- [2] 王世光,等.钻探工程[M].北京:地质出版社,1987.
- [3] 李永平,等.坑道内水平孔施工[J].探矿工程,1994,(6).
- [4] 李俊龙,李成,胡贵平.XY-1型岩芯钻机在水平钻孔施工中的应用[J].南方金属,2009,(6):51-53.
- [5] 刘东恒,李日喜,杨勇.超前水平钻探技术在隧道地质勘探中的应用[J].中国高新技术企业,2011,(33):85-86.
- [6] 刘志军,孙广义,肖福坤.瓦斯抽放水平长钻孔定向施工技术[J].黑龙江科技学院学报,2007,(4):262-265.
- [7] 闻招龄.金刚石绳索取心钻进技术在似水平孔中的应用[J].探矿工程,1985(6):53-54.

(上接第33页)

(2)旋流喷嘴的高速射流具有切向、轴向和径向三维速度,可较好地改善井底清岩效果,提高钻井效率,在高粘钻井液钻进中效果尤为明显。

(3)旋流喷嘴配合双重保护切削齿结构PDC钻头,可合理控制切削齿吃入岩石的深度,减小钻头扭矩,使钻进更为平稳,有效防止主切削齿发生非正常断裂破损,增加钻头使用寿命。

#### 参考文献:

- [1] 李根生,沈忠厚.高压水射流理论及其在石油工程中应用研究

进展[J].石油勘探与开发,2005,32(1):96-99.

- [2] 李根生,沈忠厚,徐依吉,等.超高压射流辅助钻井技术研究进展[J].石油钻探技术,2005,33(5):20-23.
- [3] 艾飞.旋流PDC钻头井底流场研究[D].山东东营:中国石油大学(华东)硕士学位论文,2007.
- [4] 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(Z1):5-9,104.
- [5] 王瑞和,沈忠厚.高压水射流破岩钻孔的实验研究[J].石油钻采工艺,1995,17(1):20-25.
- [6] 步玉环,王瑞和.旋转射流流线分析及旋流强度的计算[J].石油大学学报(自然科学版),1998,22(5):45-47.