

微心 PDC 钻头设计及现场试验

田京燕, 徐玉超

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257000)

摘 要:为了解决普通 PDC 钻头形成的岩屑细碎、无法满足岩屑录井,而采用牙轮钻头进尺少、机械钻速低又存在掉牙轮风险的问题,设计了微心 PDC 钻头。介绍了微心 PDC 钻头整体结构设计和结构参数优化方法,设计制造了小尺寸微心钻头,进行了室内取心试验和提速试验;结合临盘油田街 403 井和胜坨油田坨 202 井实钻地层的岩性特征,分别设计制造了 $\phi 215.9$ mm 微心 PDC 钻头,进行了现场试验。室内试验和现场试验结果均显示:该钻头获取的岩屑较大,大小与牙轮钻头产生的钻屑相当,能满足岩屑录井的要求;而且,钻头进尺和机械钻速与普通 PDC 钻头相当,与牙轮钻头相比有明显提高。研究结果表明,微心 PDC 钻头可以代替牙轮钻头在岩屑录井井段使用,并能达到提速提效的目的。

关键词:微心 PDC 钻头;岩屑录井;结构设计;实验室试验;现场试验;机械钻速

中图分类号:TE921⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2019)01-0065-04

Design and Field Application of a Micro-Coring PDC Bit

TIAN Jingyan, XU Yuchao

(Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: During coring, the cuttings obtained by an ordinary PDC bit are broken into small bits and cannot meet the minimum necessary conditions for logging cuttings. Further, the cone bit has small footage, low ROP and there are high risks of cone breakage. In order to overcome these challenges, a micro-coring PDC bit was designed. This paper describes the overall structural design and also describes the best method for optimizing structural parameters for the micro-coring PDC bit. Aligning with the results of mechanical analysis, a small-size bit was designed and manufactured, and laboratory coring experiments and acceleration experiments were carried out. Using specifications developed from the formation lithology from Well Jie 403 in Linpan Oilfield and Well Tuo 202 in Shengtuo Oilfield, a $\phi 215.9$ mm micro-coring PDC bit was designed and manufactured. The bit was then sent to the field where it was put into use in order to verify the design. Both the results of laboratory experiments and the field tests showed that the cuttings obtained by this bit were relatively large and the size was equivalent to that drilled by a cone bit, which could meet the requirements of cuttings logging. In addition, the bit footage and ROP were similar to that of ordinary PDC bit, and the efficiency was significantly improved compared to the cone bit. The results showed that the micro-core PDC bit could replace the cone bit in the interval for logging the cuttings, and could improve the efficiency due to its higher ROP.

Key words: micro-coring PDC bit; cuttings logging; structure design; laboratory experiments; field tests; penetration rate

PDC 钻头在钻进中主要依靠切削齿的剪切和刮削来破碎地层岩石,但在钻进硬地层时,由于岩石抗压强度较高,PDC 切削齿不能有效切入地层,只能依靠刮削缓慢破碎岩石,机械钻速较低,岩屑非常细碎(岩屑颗粒直径通常小于 0.5 mm,远小于牙轮钻头钻进时产生的岩屑^[1]),给岩屑录井带来了一定困难。而且,这种问题在岩性相近的地层中表现得尤为突出。因此,为了获得较大的岩屑,从而准确判断层位和岩性^[1],在探井中往往使用牙轮钻头钻进。但是,使用牙轮钻头也有其不足:相对于 PDC 钻头,牙轮钻头进尺少、机械钻速低,会延长钻井周期,增加钻井成本;而且,使用牙轮钻头存在掉牙轮的风

险,不利于井下安全。针对上述情况,笔者提出了结合 PDC 钻头和牙轮钻头两者优点设计新型钻头的思路,即改进 PDC 钻头的结构,使其在保留机械钻速快、使用寿命长和钻进安全等优点的同时,能够在钻进中获得较大的岩屑,满足岩屑录井的需要。基于此,设计了微心 PDC 钻头,并对其进行了现场试

收稿日期:2018-02-22;**改回日期:**2018-09-27。

作者简介:田京燕(1973—),女,北京房山人,1994年毕业于胜利石油学校石油钻井专业,2000年毕业于石油大学(华东)(函授)计算机应用专业,2012年获中国石油大学(华东)计算机技术专业工程硕士学位,高级工程师,主要从事钻头研发工作。E-mail:tianjy35.oss@sinopetco.com。

基金项目:国家科技重大专项“致密油藏开发钻井技术优化及集成”(编号:2017ZX05072-003)资助。

验,取得了预期效果。

1 微心 PDC 钻头结构设计方法

1.1 整体结构

在保持普通 PDC 钻头冠部轮廓的基础上,对切削齿结构重新进行设计——在钻头中心部位不布置切削齿。这样,钻进地层时,在钻头的中心部位会形成一个圆柱状的小岩心,称之为微心^[2]。

在钻头中心靠近钻头基体部位与钻头轴心成一倾斜角处设计斜面。当钻头持续钻进时,岩心不断增长,其顶端就会接触到钻头中心部位的斜面。在钻压作用下,该斜面会对岩心产生一个侧向力。当该侧向力达到一定程度后,岩心就会断裂。该结构的钻头,称之为微心 PDC 钻头,如图 1 所示。

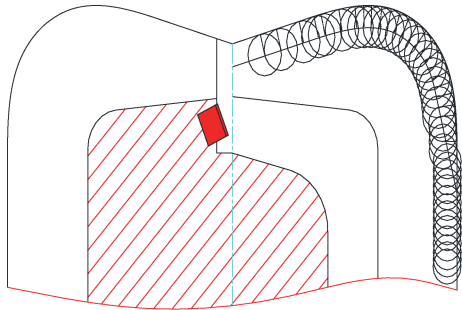


图 1 微心 PDC 钻头结构

Fig. 1 Micro-coring PDC bit structure

1.2 结构参数

岩心在折断过程中要受到来自钻头的扭断力和挤压力。因此,岩心内会产生相应的剪应力和挤压力。折断的岩心如图 2 所示(图 2 中: d 为岩心直径,mm; h 为岩心高度,mm; φ 为岩心横断面与钻头中心斜面的夹角,称之为断心角,°)。下面针对图 2 进行结构参数的分析与讨论。

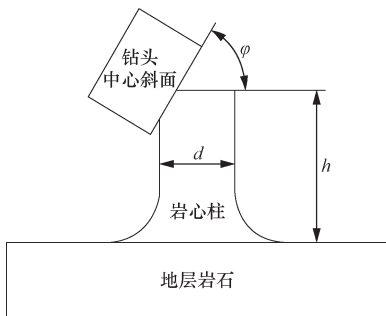


图 2 折断的岩心结构示意图

Fig. 2 Schematic of the broken core structure

线弹性范围内,介质某处的剪应力与其相应的剪应变成正比^[3],即:

$$\tau = G\rho \frac{d\varphi}{dx} \quad (1)$$

式中: τ 为剪应力,MPa; G 为比例系数; ρ 为某处到转轴的距离,cm。

若在岩心横截面上距圆心 ρ 处取微面积 dA ,其上的剪应力为 τdA ,则横截面上的扭矩为:

$$M = \int_A \rho \tau dA = \int_A \rho G \rho \frac{d\varphi}{dx} dA = G \frac{d\varphi}{dx} \int_A \rho^2 dA \quad (2)$$

式中: M 为截面扭矩,N·m。

令 $I = \int_A \rho^2 dA$,则由式(1)和式(2)可得:

$$\tau = \frac{M\rho}{I} \quad (3)$$

由式(3)可知,当 $\rho = \frac{d}{2}$ 时:

$$\tau_{\max} = \frac{16F_p}{\pi d^2} \leq p \quad (4)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为岩心边缘点的最大剪应力,MPa; p 为岩石抗压强度,MPa。

岩心的挤压强度和断心角应满足如下关系:

$$\sigma = \frac{F_p \cos \varphi}{h} \leq p \quad (5)$$

$$\cot \varphi \leq \frac{d}{h} \quad (6)$$

式中: σ 为岩心的挤压强度,MPa; F_p 为作用在岩心上的钻压,N。

由于种种原因,钻井中产生的岩心尺寸往往小于理论计算的岩心尺寸,设计钻头时需要考虑这一点。如果断心角过大,复合片与岩心接触点的半径就会过大,甚至有可能接触不到岩心;或者即使接触到岩心,在岩心没有断裂之前,由于磨损的作用,会把岩心进一步磨小,使断心结构失去作用。同时,岩心的直径和高度要根据地层岩性特征进行设计,当所钻地层比较松软时,岩心比较容易折断,这时应选择相对较小的断心角,防止断心结构不能产生作用;当所钻地层较硬时,使用较大的断心角可以产生更大的横向力,使岩心更容易折断。综合考虑上述各种影响因素,将 φ 设置为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。

若取 $F_p = 999.54 \text{ N}$, $p = 60.00 \text{ MPa}$, $\varphi = 70^\circ$,由式(4)和式(5)可知岩心的直径和高度应满足: $d \geq 9.2 \text{ mm}$; $h \geq 15.7 \text{ mm}$ 。若取 $F_p = 999.54 \text{ N}$, $p = 30.00 \text{ MPa}$, $\varphi = 60^\circ$,可得岩心的直径和高度应满足: $d \geq 13.0 \text{ mm}$; $h \geq 28.8 \text{ mm}$ 。

在此基础上,为检验研究结果的可靠性并选出合适的断心角,分别针对软硬 2 种岩性、2 种断心角、2 种岩心直径和 2 种岩心高度进行了模拟分析。分析结果显示,在硬地层中, $d=10.0\text{ mm}$ 、 $h=15.0\text{ mm}$ 比较适合;在软地层中, $d=15.0\text{ mm}$ 、 $h=20.0\text{ mm}$ 较为适合。

2 微心 PDC 钻头性能室内试验

2.1 取心试验

根据前述研究结果,设计制造了小尺寸微心 PDC 钻头,并进行了室内性能试验。所设计钻头为 4 刀翼,钻头直径为 80.0 mm ,切削齿直径为 13.4 mm ,如图 3 所示。

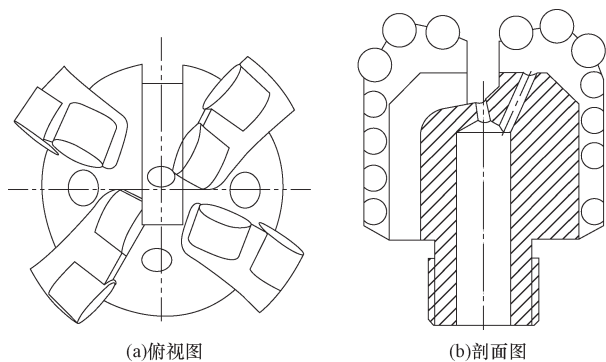


图 3 室内试验用微心 PDC 钻头

Fig. 3 The micro-coring PDC bit in laboratory experiments

该钻头在岩石力学实验台架上进行了试验,钻压为 5 kN ,转速为 100 r/min ;试验岩石采用可钻性级值为 7 的黄色中砂岩。钻进过程平稳,无特殊振动现象。试验获取的微岩心为直径 10.0 mm 、高度 10.0 mm 的圆柱体,断裂面呈 45° 角,如图 4 所示。



图 4 室内试验获得的微岩心

Fig. 4 Micro cores obtained in laboratory experiments

试验结果表明,设计的微心 PDC 钻头结构合理,能够在试验室条件下取得符合要求的岩心,具备现场试验的基本条件。

2.2 提速试验

PDC 钻头的转速越高,其切削齿的线速度越高,钻头破碎岩石的动能就越高,机械钻速就越高^[4]。就同一 PDC 钻头而言,不同部位切削齿的情况不同:靠近钻头外侧切削齿的线速度高,破岩效率也高;靠近中心部位切削齿的线速度低,尤其是中心切削齿,线速度非常低。而 PDC 钻头中心切削齿破岩效率过低,会影响该钻头的整体破岩效率^[5]。为了分析微心 PDC 钻头的提速效果,在室内进行了与相同尺寸常规结构 PDC 钻头的钻速对比试验(试验中,2 种钻头采用了相同的转速、钻压和相同岩性的岩心),试验结果为:微心 PDC 钻头的机械钻速为 39.96 m/h ,常规 PDC 钻头的机械钻速为 29.70 m/h 。

试验结果显示,在同等条件下,微心 PDC 钻头比常规 PDC 钻头的机械钻速提高 16.2% ,表明该钻头设计合理,提速效果明显。

3 现场试验

为进一步验证微心 PDC 钻头在钻井现场实际应用的可行性,在临盘油田的街 403 井和胜坨油田的坨 202 井进行了现场试验。

3.1 街 403 井

街 403 井为临盘油田临南坡折带部位的一口勘探评价井,该井完钻层位在沙三段,设计井深 $4\,290.00\text{ m}$,目的层较深,下部井段岩性以泥岩和砂岩为主,地层中的不均质夹层会影响钻头的稳定性,但地层总体可钻性相对较好。因此,试验之前对微心 PDC 钻头进行了针对性的设计:根据邻井的 PDC 钻头使用资料以及地层岩性分析结果,确定试验用微心 PDC 钻头的冠部轮廓为中内锥—短外锥^[6],采用螺旋刀翼布齿方式,目的是在钻进时钻头的切削齿能逐个吃入地层,提高钻头的稳定性^[7];采用 $\phi 16.0\text{ mm}$ 复合片为主切削元件的中等布齿密度,以保证钻头具有较长的使用寿命和较高的机械钻速;采用复合切削结构,在主切削齿后增加备用齿($\phi 13.4\text{ mm}$ 复合片);采用折断式微心结构,岩心柱理论直径为 10.0 mm ,高度为 10.0 mm ;同时,为了能够使岩屑顺利上返排出,在保持钻头受力平衡的条件下,对排屑槽进行了加宽、加深,并使之延伸至钻头中心部位。设计的 $\phi 215.9\text{ mm}$ CP5263SJ 型微心 PDC 钻头见图 5。

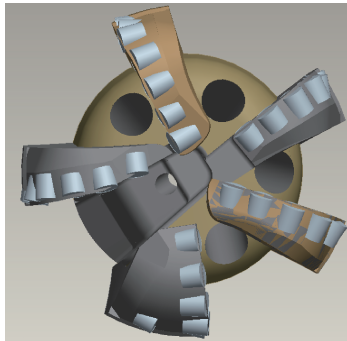


图5 $\phi 215.9$ mm CP5263SJ 型微心 PDC 钻头设计结果

Fig. 5 Designed $\phi 215.9$ mm CP5263SJ type micro-coring PDC bit

试验中, $\phi 215.9$ mm 微心 PDC 钻头从井深 3 450.00 m 钻至取心点 3 679.00 m,平均机械钻速 7.21 m/h。试验结果表明,返出的岩屑尺寸较大,一些岩屑的直径达到了 10.0 mm 以上,为岩屑录井卡准层位、判断岩性提供了保障;而且,平均机械钻速比邻井同层位其他 PDC 钻头提高了 17.8%。

3.2 坨 202 井

坨 202 井为胜利油田布置的一口勘探开发井,完钻层位在沙四段,油层埋藏深。该井下部地层以泥质灰岩和砂砾岩为主,地层岩石抗压强度高,研磨性强,岩性不均质性强,易对 PDC 钻头造成冲击和磨损破坏。为满足岩屑录井的需要,该井的邻井主要使用牙轮钻头,机械钻速较低。

针对该井地层岩性特征和录井的需要,设计了 $\phi 215.9$ mm P5253SJC 型微心 PDC 钻头(见图 6)。该钻头总体布齿结构与街 403 井使用的微心钻头类似,但考虑到坨 202 井沙四段地层抗压强度高、研磨性和均质性强,进行了如下改进:采用了双排切削齿结构,主切削齿为 $\phi 16.0$ mm 高性能复合片,后排切削齿为 $\phi 13.4$ mm 复合片,以提高钻头的抗冲击和抗研磨性能;适当减小主切削齿的后倾角度,以提高钻头在硬地层中的吃入性能和机械钻速。

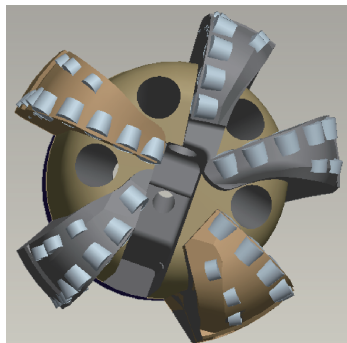


图6 $\phi 215.9$ mm P5253SJC 型微心 PDC 钻头设计结果

Fig. 6 Designed $\phi 215.9$ mm P5253SJC type micro-coring PDC bit

试验中,该钻头从井深 3 375.00 m 入井,钻至井深 3 520.00 m 完钻,平均机械钻速 2.22 m/h。对比邻井的钻井情况可知,该微心 PDC 钻头可以取得与牙轮钻头大小相当的岩屑,完全满足岩屑录井的需要;同时,与牙轮钻头相比,机械钻速提高了 48.0% 左右,单钻头平均进尺也增加了 48.5%,效果非常好。

4 结 论

1) 为满足岩屑录井的需要,设计了微心 PDC 钻头。试验表明,该钻头具有 PDC 钻头机械钻速高、使用寿命长和钻进安全等优点;同时,能够像牙轮钻头一样在钻进中获得较大的岩屑,从而确保岩屑录井能卡准层位、有效辨别岩性。

2) 设计的微心 PDC 钻头与常规 PDC 钻头、牙轮钻头相比,机械钻速都有一定提高,表明其在满足岩屑录井要求的同时,还具有提速功能。

3) 在不同地层使用时,微心 PDC 钻头的结构要根据地层岩性特征进行调整,提高其针对性,这样才能获得较好的效果。

参 考 文 献

References

- [1] 田京燕. PDC 钻头三维设计软件的开发[J]. 石油机械, 2009, 37(5): 32-34.
TIAN Jingyan. PDC bit 3D design software development[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(5): 32-34.
- [2] AADNOY B S, LOOYEH R. 钻井岩石力学[M]. 韩来聚, 王宗钢, 冯光通, 等译. 东营: 中国石油大学出版社, 2013: 6-58.
AADNOY B S, LOOYEH R. Petroleum rock mechanics drilling operations and well design[M]. Translated by HAN Laiju, WANG Zonggang, FENG Guangtong, et al. Dongying: China of University Petroleum Press, 2013: 6-58.
- [3] 刘竞, 高含, 陈光碧, 等. 微取心 PDC 钻头试验及评价[J]. 钻采工艺, 2014, 37(3): 34-35.
LIU Jing, GAO Han, CHEN Guangbi, et al. Test and evaluation of micro core PDC bit[J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(3): 34-35.
- [4] 汪海阁, 王灵碧, 纪国栋, 等. 国内外钻完井技术新进展[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(5): 1-12.
WANG Haige, WANG Lingbi, JI Guodong, et al. Advances in well drilling and completion technologies for domestic and overseas[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(5): 1-12.
- [5] 黄英勇, 李根生, 宋先知, 等. PDC 钻头定向喷嘴井底流场数值模拟[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 99-103.
HUANG Yingyong, LI Gensheng, SONG Xianzhi, et al. Numerical simulation of bottomhole flow field of PDC bit with orientation nozzle[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 99-103.
- [6] 徐玉超. 定向井 PDC 钻头受力模型及优化设计研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008.
XU Yuchao. Mechanical model and optimizing design of oriented PDC bit [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2008.
- [7] DESCHAMPS B, DESMETTE S D J, DELWICHE R, et al. Drilling to the extreme: the micro-coring bit concept[R]. SPE 115187, 2008.