

# 硬地层 PDC 钻头切削齿尺寸及后倾角优化设计

邹德永<sup>1</sup>, 曹继飞<sup>2</sup>, 袁 军<sup>1</sup>, 谌 湛<sup>1</sup>, 于 鹏<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266555; 2. 中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

**摘 要:** PDC 钻头是目前石油钻井中使用较为广泛的一种破岩工具, 但其在硬地层中的使用效果不佳, 钻进效率低, 使用寿命短。PDC 钻头的切削齿尺寸、后倾角等是影响其钻进性能的重要参数, 通过室内微钻头试验, 综合考虑硬地层 PDC 钻头布齿设计中切削齿的重叠和覆盖情况, 以相同钻压下微钻头在岩样表面旋转一周的切削深度作为评价其破岩效率的指标, 分析了切削齿尺寸、后倾角等对硬地层 PDC 钻头破岩效率的影响。结果表明: 在钻进可钻性超过 VI 级的硬地层时, 切削齿尺寸越大, 其破岩效率越低; 钻进可钻性为 VI—VII 级的硬地层时,  $\phi 13.44$  mm 切削齿的破岩效率最高, 其最佳后倾角为  $15^\circ$ 。

**关键词:** 硬地层 PDC 钻头 切削齿尺寸 后倾角 破岩效率

**中图分类号:** TE921<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2011)06-0091-04

## Optimization Design of the Cutter Size and Back Rake for PDC Bit in Hard Formation

Zou Deyong<sup>1</sup>, Cao Jifei<sup>2</sup>, Yuan Jun<sup>1</sup>, Chen Zhan<sup>1</sup>, Yu Peng<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266555, China; 2. Research Institute of Drilling Technology, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong, 257017, China)

**Abstract:** PDC bit, a rock-breaking tool, has been widely used in the oil drilling industry. While its result in hard formation is not good, the drilling efficiency is low and the working life is short. PDC cutter size and back rake are the very important design parameters affecting the performance of PDC bit. Considering the cutter design of PDC bit in hard formation and using the cutting depth as the index to reflect the cutting efficiency, the effects of PDC cutter size and back rake on the ROP of PDC bit were investigated through the micro-bit drilling experiment. The results showed that in hard formation with drillability higher than VI level, the larger the cutting teeth size, the lower rock-breaking efficiency. In the rock with drillability in VI—VII, the PDC bit designed with 13.44 mm cutter has the best cutting efficiency and the best back rake is  $15^\circ$ .

**Key words:** hard formation; PDC bit; cutter size; back rake; cutting efficiency

PDC 钻头具有切削破岩效率高、寿命长、钻井故障少等优点, 在石油钻井中应用越来越广泛。目前, PDC 钻头主要用于钻进可钻性 VI 级以下的均质地层。为了将 PDC 钻头的应用范围拓宽到更硬的地层, 国内外研究人员加快了研究适合硬地层 PDC 钻头的步伐, 并取得了一定进展<sup>[1-5]</sup>。

现场钻井实践表明, PDC 钻头在钻进可钻性 VI 级以上地层时, 破岩效率较低。如川东北地区的海相碳酸盐岩地层, 岩石可钻性级值 6.08~7.42, 最

**收稿日期:** 2010-09-30; **改回日期:** 2011-10-03。

**作者简介:** 邹德永(1962—), 男, 山东威海人, 1984 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 1988 年获石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位, 2004 年获石油大学(华东)油气井工程专业博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事油气井工程方面的教学与科研工作。

**联系方式:** (0546)8394550, zouyan@upc.edu.cn。

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题“超深井新型破岩工具及配套技术研究”(编号: 2006AA06A109)部分研究内容。

高可达 7.95, 现场多采用 PDC 钻头配合螺杆进行复合钻进, 平均机械钻速仅约 2 m/h。要提高 PDC 钻头在硬地层中的破岩效率, 除研制新型 PDC 复合片外, 钻头的结构设计也非常关键。切削齿尺寸、后倾角等是 PDC 钻头设计的重要参数, 直接影响 PDC 钻头的破岩效率。但在目前的硬地层 PDC 钻头设计中, 由于缺乏足够的理论依据, 切削齿尺寸、后倾角等的设计多凭经验, PDC 钻头的设计存在很大不确定性, 无法满足个性化钻头设计的要求<sup>[6-9]</sup>。为此, 笔者通过室内微钻头切削试验, 分析了 PDC 切削齿尺寸和后倾角等对切削破岩效率的影响规律, 确定了适合可钻性为 VI—VII 级地层的最优切削齿尺寸和后倾角, 为 PDC 钻头的个性化设计提供了理论依据。

## 1 微钻头切削试验

### 1.1 微钻头设计

试验钻头设计为 PDC 单齿钻头, 如图 1 所示。其中, 切削齿旋转半径为 20 mm, 切削齿尺寸为常用的  $\phi 13.44$ ,  $\phi 16.10$  和  $\phi 19.05$  mm 系列, 切削齿后倾角设计为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $25^\circ$  等 5 种。

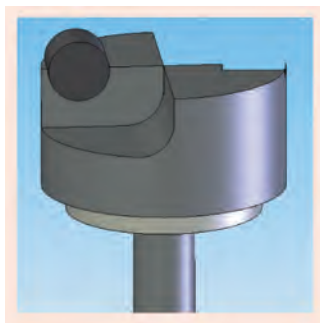


图 1 PDC 微钻头

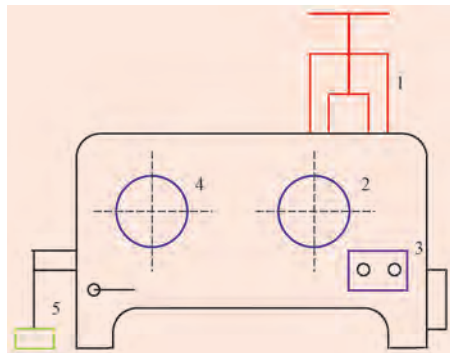
Fig. 1 The design schematic of PDC micro-bit

### 1.2 岩样选取

选取石灰岩、白云岩和大理岩作为试验岩样, 其可钻性级值分别为 6.13, 6.64 和 7.30。

### 1.3 试验装置

试验在中国石油大学(华东)油气井工程实验室的微型钻机上进行, 试验装置如图 2 所示。试验装置由加压机构、旋转机构、岩样夹持机构和测量部分组成。



1. 岩样夹持器; 2. 升降杆; 3. 启动开关; 4. 测深盘; 5. 砧码

图 2 PDC 单齿钻头试验装置

Fig. 2 The test device of PDC micro-bit

### 1.4 试验方案

试验时, 将岩样夹在岩样夹持器上, 控制启动开关, 使微钻头在岩样表面旋转一周, 通过测量部分测定不同钻压下微钻头在岩样表面的切削深度, 分析在硬地层中切削齿尺寸、后倾角等参数对 PDC 钻头破岩效率的影响规律。钻进试验中, 用微钻头分别钻进 3 种岩样, 每次试验重复 4~5 次, 取平均切削深度作为衡量破岩效率的指标, 转速固定为 55 r/min, 钻压分别为 200, 400, 600 和 800 N。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 切削齿尺寸对破岩效率的影响规律

图 3 为不同尺寸切削齿在 3 种岩样中的切削深度曲线。

从图 3 可以看出, 切削齿尺寸对 PDC 钻头的破岩效率有较大影响: 钻进可钻性级值 6.13 的岩样时,  $\phi 16.10$  和  $\phi 13.44$  mm 切削齿微钻头的每转切削深度较大, 且两者相差不大,  $\phi 19.05$  mm 切削齿微钻头的切削深度较小; 钻进可钻性级值 6.64 和 7.30 的岩样时,  $\phi 13.44$  mm 切削齿微钻头的每转切削深度最大, 其次是  $\phi 16.10$  mm 切削齿微钻头。分析可知, 岩石可钻性级值越低, 抗钻阻力越小, 在相同钻压下, 切削齿比较容易吃入地层, 切削深度较大, 故较大尺寸的切削齿可以获得较高的破岩效率; 岩石可钻性级值越高, 抗钻阻力越大, 切削齿尺寸越大, 其吃入越困难, 破岩效率越低。由此可知, 钻进可钻性 VI—VII 级地层时, PDC 钻头选用  $\phi 13.44$  mm 切削齿, 可以获得较高的破岩效率。另外, 从提高破岩效率的方面考

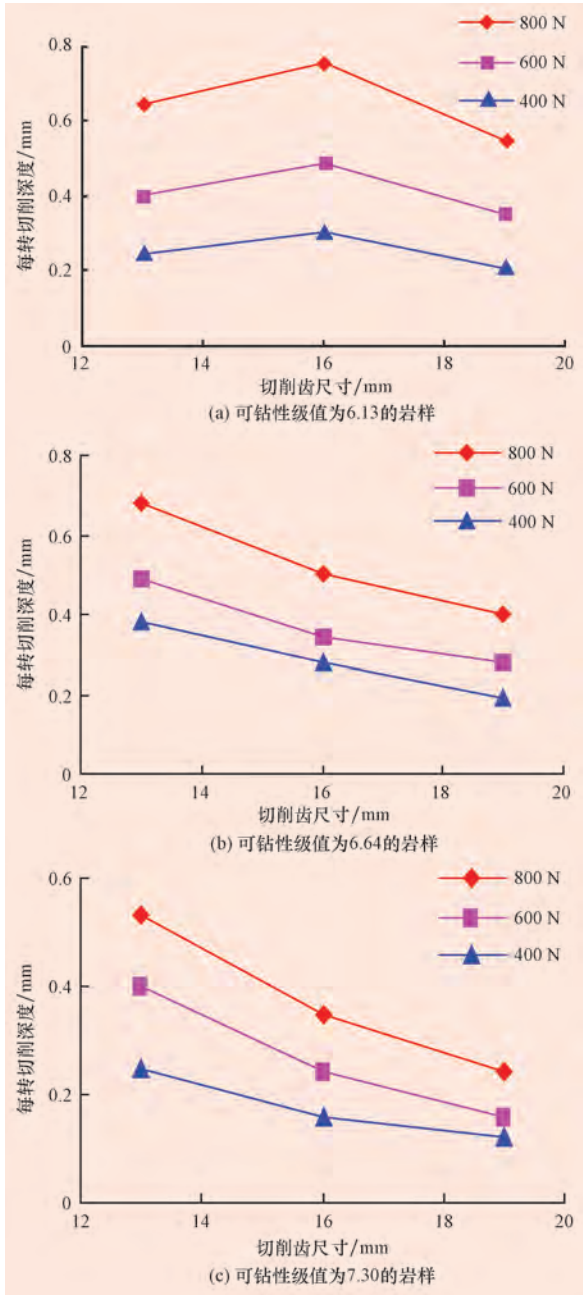


图 3 不同尺寸切削齿在不同可钻性级值岩样中的切削深度曲线

Fig. 3 The cutting depth of different cutting size in different level rock drillability

考虑,岩石可钻性级值越大,PDC 钻头选用切削齿的直径应越小。

## 2.2 切削齿后倾角对破岩效率的影响规律

从以上的分析中可以看出,在钻进可钻性Ⅵ—Ⅶ级地层时,选用 $\phi 13.44$  mm 切削齿可以获得较高的破岩效率。下面着重分析不同岩样中 $\phi 13.44$  mm 切削齿的后倾角对破岩效率的影响规律。图 4 为不同后倾角 $\phi 13.44$  mm 切削齿在不同可钻性级值岩

样中的切削深度曲线。

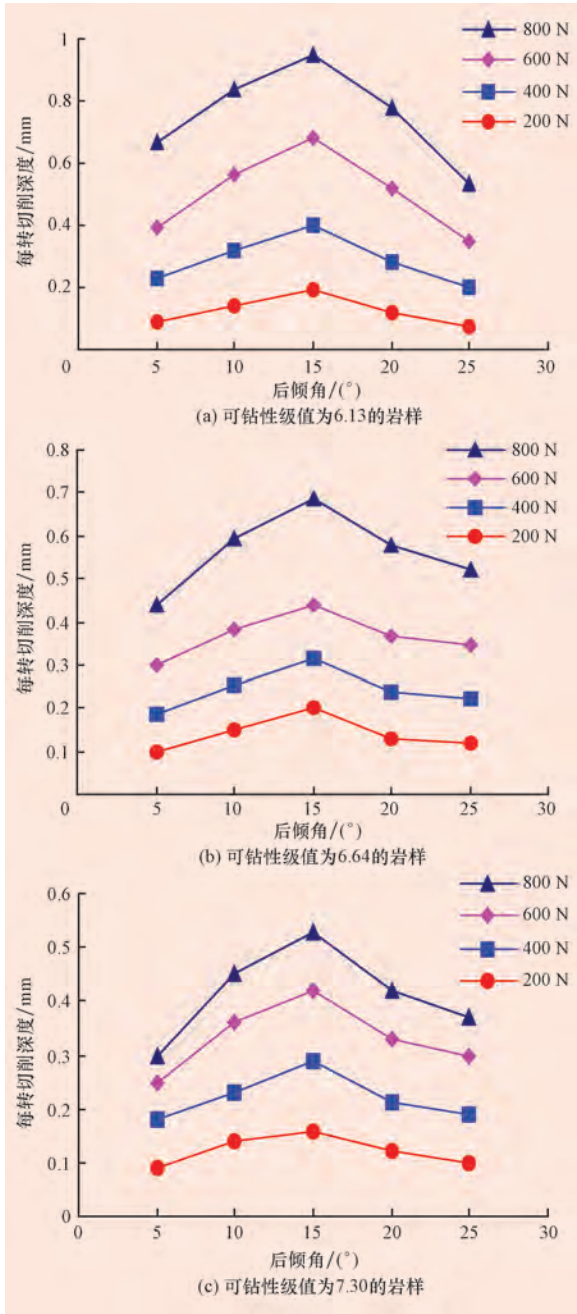


图 4 不同后倾角 $\phi 13.44$  mm 切削齿在不同可钻性级值岩样中的切削深度曲线

Fig. 4 The cutting depth of different back rake angle in different level rock drillability for  $\phi 13.44$  mm cutting teeth

从图 4 可以看出,切削齿的后倾角对 PDC 钻头的破岩效率有显著的影响,且该影响与岩石性质有关:钻进可钻性级值 6.13,6.64 和 7.30 的岩样时,后倾角 15°的 $\phi 13.44$  mm 切削齿的每转切削深度最大,破岩效率最高;随着岩石可钻性级值的变大,增大后倾角能获得较高的切削破岩效率。另外,从切

切削齿的受力情况看,  $\phi 13.44$  mm 切削齿在钻进可钻性级值 6.13, 6.64 和 7.30 的岩样时, 要达到相同的切削深度, 后倾角为  $15^\circ$  时切削齿受力最小, 所需的钻压最小; 其他后倾角的切削齿需较大的钻压, 受力也较大, 这就容易引起切削齿的加速磨损和冲击损坏, 进而影响钻头的稳定性和使用寿命<sup>[10-12]</sup>。

### 3 结 论

1) 在岩石可钻性超过 VI 级后, PDC 钻头切削齿的尺寸越大, 其破岩效率越低。

2) 切削齿尺寸对 PDC 钻头的破岩效率有较为显著的影响。在 PDC 钻头的设计过程中, 应根据所钻地层的可钻性, 选择合适尺寸的切削齿。钻进可钻性 VI—VII 级的硬地层时, 应选用  $\phi 13.44$  mm 切削齿。

3) 切削齿的后倾角对 PDC 钻头的破岩效率有明显的影响, 且与地层性质有关。钻进可钻性 VI—VII 级的地层时, 切削齿的最佳后倾角为  $15^\circ$ 。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] Sinor L A, Powers J R, Warren T M. The effect of PDC cutter density, back rake, size, and speed on performance[R]. IADC/SPE 39306, 1998.
- [2] 邹德永, 梁尔国. 硬地层 PDC 钻头设计的探讨[J]. 石油机械, 2004, 32(9): 28-31.  
Zou Deyong, Liang Erguo. Design of PDC bit for hard formation[J]. China Petroleum Machinery, 2004, 32(9): 28-31.
- [3] 邹德永. 新型 PDC 钻头切削齿的发展[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(3): 4-6.  
Zou Deyong. The development of new PDC cutting elements [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(3): 4-6.
- [4] 孙明光, 张云联. 新型 PDC 钻头设计[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(2): 31-34.  
Sun Mingguang, Zhang Yunlian. New PDC bit design to optimize its performance in multi-interedred formation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(2): 31-34.
- [5] 薄和秋, 苏锦正, 海罗·史莱斯塔. 济阳坳陷深部地层 PDC 钻头优化设计与应用[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 57-61.  
Bo Heqiu, Sue Jinzheng, Sreshta H. Optimization and application of PDC bits in Jiyang deep depression formation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 57-61.
- [6] Rafatian N, Miska S Z, Ledgerwood L W, et al. Experimental study of MSE of a single PDC cutter under simulated pressurized conditions[R]. SPE/IADC 119302, 2010.
- [7] Hareland G, Yan W, Nygaard R, et al. Cutting efficiency of a single PDC cutter on hard rock[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(6): 60-65.
- [8] Clayton R, Chen Shilin, Lefort G. New bit design, cutter technology extend PDC application to hard rock drilling[R]. SPE/IADC 91840, 2005.
- [9] 许杰, 安文忠, 徐荣强. PDC 钻头钻复合地层技术在旅大油田的应用[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1): 76-79.  
Xu Jie, An Wenzhong, Xu Rongqiang. Application of PDC bits in complex formations of Lvda Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 76-79.
- [10] 邹德永, 蔡环. 布齿参数对 PDC 钻头破岩效率影响的试验 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(5): 76-79.  
Zou Deyong, Cai Huan. Experiment on effect of cutter parameters of PDC bit on rate of penetration[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(5): 76-79.
- [11] 马清明, 王瑞和. PDC 切削齿破岩受力的试验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 45-47.  
Ma Qingming, Wang Ruihe. Experimental study on force of PDC cutter breaking rock[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(2): 45-47.
- [12] 尹宏锦. 实用岩石可钻性[M]. 东营: 石油大学出版社, 1988: 80-87.  
Yin Hongjin. Analysis of rock drillability[M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1988: 80-87.
- [13] 杨立, 杨迎新, 林敏. 横振钻井模式下 PDC 钻头切削齿工作角度计算[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 72-74.  
Yang Li, Yang Yingxin, Lin Min. Calculation on a cutting angle of PDC cutter under drilling with lateral movement[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 72-74.
- [14] 刘向东, 屈均利. PDC 钻头布齿参数对其强度影响的研究 [J]. 石油机械, 2009, 37(12): 59-62.  
Liu Xiangdong, Qu Junli. Study on effect of cutter parameters of PDC bit on its strength[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(12): 59-62.

## 一种新型打水泥塞固井工具

水泥浆的重力沉降会造成水泥浆与钻井液的置换和混合, 从而导致水泥塞的位置发生变化并影响水泥塞的质量。为此, BJ 公司研制了一种伞形打水泥塞固井工具。该工具由 2 个伞形的支撑弓组成, 在井眼内可以形成相反方向的扩张支撑, 从而防止水泥浆的沉降, 将水泥浆定位凝固的成功率提高到 50% 以上。该工具适用于  $\phi 152.4 \sim \phi 508.0$  mm 套管或裸眼。

在打水泥塞作业时, 先将该工具通过钻柱下至设计井深, 通过送入工具的上部循环孔建立循环; 从井口投入憋压球通过憋压关闭上部循环孔, 并将该工具的伞形支撑弓推出支撑到井壁上, 然后通过送入工具的下部循环孔实现精确打水泥塞作业。

[郭朝辉 供稿]