

文章编号:1673-5005(2009)05-0076-04

布齿参数对 PDC 钻头破岩效率影响的试验

邹德永, 蔡 环

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: PDC 切削齿尺寸、后倾角和布齿密度是影响 PDC 钻头性能的重要设计参数。采用室内钻进试验方法, 考察切削齿尺寸、后倾角和布齿密度对 PDC 钻头破岩效率的影响。结果表明: 对可钻性为Ⅲ级以下的岩石, 直径 19 mm 切削齿的破岩效率最高; 对可钻性为Ⅳ~Ⅴ级的岩石, 直径 16 mm 切削齿的破岩效率最高; 采用直径 19 mm 和 16 mm 切削齿时, 后倾角为 15°左右时的破岩效率最高; 随布齿密度增大, 破岩效率降低, 特别是在可钻性为Ⅲ级以下的岩石中, 布齿密度的影响更为明显。

关键词: PDC 钻头; 切削齿尺寸; 后倾角; 布齿密度; 破岩效率

中图分类号: TE 921

文献标识码: A

Experiment on effect of cutter parameters of PDC bit on rate of penetration

ZOU De-yong, CAI Huan

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: PDC cutter size, back rake and density are very important design parameters affecting the performance of PDC bit. The effects of PDC cutter's size, back rake, and density on the rate of penetration (ROP) of PDC bit were researched through room drilling experiment. The results show that the ROP of the PDC bit designed with cutters diameter of 19 mm is the highest in the rock whose drillability grade is Ⅲ. But in the rock whose drillability grade is Ⅳ - V, the ROP of the PDC bit designed with cutters diameter of 16 mm is the highest. When the PDC bits designed with cutters diameter of 19 mm and 16 mm are used, the highest ROP is obtained in the back rake about 15°. In the rock whose drillability grade is Ⅲ, the ROP decreases with the PDC cutter density increasing, and the effect is obvious.

Key words: PDC bit; cutter size; back rake; cutter density; rate of penetration

钻井实践证明, 切削齿尺寸、后倾角和布齿密度是 PDC 钻头设计的重要参数, 对 PDC 钻头破岩效率有着十分重要的影响。但是, 在目前的 PDC 钻头设计中, 切削齿尺寸、后倾角和布齿密度设计仍然凭经验: 软地层采用大尺寸、低密度布齿, 硬地层采用小尺寸、高密度布齿, 后倾角为 10°~30°^[1-2]。目前, 国内外对 PDC 钻头力学分析、水力模拟、布齿设计方法等问题研究较多^[3-10], 但对 PDC 切削齿尺寸、后倾角和布齿密度的合理取值问题, 由于缺乏理论依据, 钻头设计存在很大的不确定性, 不能满足 PDC 钻头个性化设计的需要。笔者通过室内钻进试验, 对 PDC 切削齿尺寸、后倾角和布齿密度对 PDC

钻头破岩效率的影响进行研究, 确定出适合不同性质地层的切削齿尺寸、后倾角和布齿密度, 为 PDC 钻头的个性化设计和合理选型提供科学依据。

1 试验钻头设计

试验钻头为直径 10 cm 的三刀翼钻头, 如图 1 所示。钻头剖面形状设计为“直线-圆弧-直线”形, 内锥角 130°, 外锥角 15°, 冠顶旋转半径 30 mm, 冠顶圆弧半径 13 mm。切削齿直径采用目前常用的 13.44, 16.10 和 19.05 mm。后倾角取 5°, 10°, 15°, 20°和 25°。不同布齿密度的试验钻头所对应的布齿数量见表 1。共设计了 21 只试验钻头, 各钻头布

收稿日期: 2008-11-10

作者简介: 邹德永(1962-), 男(汉族), 山东威海人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事油气井工程研究。

齿参数见表 2。

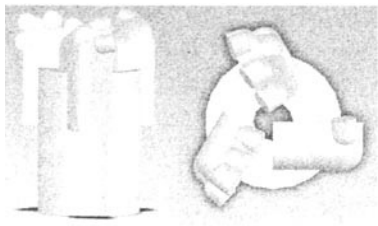


图 1 钻头设计图
Fig.1 Test bit design drawing

表 1 不同布齿密度试验钻头对应的切削齿数量
Table 1 PDC cutters number corresponding to various density for test bits

布齿密度	切削齿数量		
	$d = 13.44\text{ mm}$	$d = 16.10\text{ mm}$	$d = 19.05\text{ mm}$
低	7	6	5
中	9	8	7
高	11	9	8

表 2 试验钻头布齿参数
Table 2 PDC cutters design parameters for test bits

钻头序号	切削齿直径 d/mm	后倾角 $\theta/(\text{^\circ})$	切削齿数量	布齿密度
1	13.44	5	9	中
2	13.44	10	9	中
3	13.44	15	9	中
4	13.44	20	9	中
5	13.44	25	9	中
6	16.10	5	8	中
7	16.10	10	8	中
8	16.10	15	8	中
9	16.10	20	8	中
10	16.10	25	8	中
11	19.05	5	7	中
12	19.05	10	7	中
13	19.05	15	7	中
14	19.05	20	7	中
15	19.05	25	7	中
16	16.10	15	6	低
17	16.10	15	8	中
18	16.10	15	9	高
19	19.05	15	5	低
20	19.05	15	7	中
21	19.05	15	8	高

2 岩样制备

为使试验具有良好的重复性和对比性,试验采用人造岩样。以水泥为主材,制备了 3 种标准岩样,分别代表极软、软和中 3 类地层^[11],其组成及特性见表 3。

表 3 试验岩样组成及特性
Table 3 Composition and properties of test rock samples

岩样标号	组成	抗压强度 P/MPa	可钻性 级值	代表地 层级别
1#	G 级水泥:砂:水 = 1:2:0.5	17.31	3.5	Ⅲ
2#	325 水泥:水 = 7:3	20.36	4.6	Ⅳ
3#	525 水泥:水 = 7:3	30.74	5.8	Ⅴ

3 钻进试验

钻进试验是在中国石油大学油气井工程实验室的 3H-650A 型钻头试验台架上完成。3H-650A 型钻头试验台架由液压控制钻压系统、电机驱动旋转系统、水力循环清洗系统和数据采集系统等组成,如图 2 所示。在钻进试验中,转速固定为 60 r/min,钻压分别为 6,8 和 10 kN。采用清水作为循环介质,流量为 11 L/s。

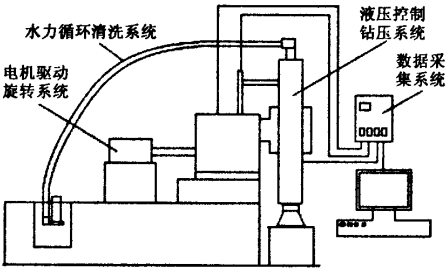


图 2 3H-650A 型钻机示意图
Fig.2 3H-650A drilling rig diagram

试验分为两个阶段进行:第一阶段,用 1~15 号钻头分别钻进 1#,2#,3#岩样,数据采集系统自动记录钻压、转速、扭矩、进尺和钻时等参数,每次试验重复 3 次,取平均钻速作为衡量破岩效率的指标;第二阶段,在通过第一阶段试验优选出适合不同性质岩样的最佳切削齿直径和后倾角的基础上,用 16~21 号钻头分别钻进 1#,2#,3#岩样,分析其布齿密度对破岩效率的影响。

4 试验结果分析

4.1 切削齿尺寸与后倾角对破岩效率的影响

图 3 为 8 kN 钻压下钻进 3 种岩样获得的平均钻速随切削齿直径和后倾角的变化曲线。6 kN 和 10 kN 钻压下的变化规律与 8 kN 钻压下的完全相同,只是平均钻速的数值不同。

由图 3 可以看出,切削齿后倾角对 PDC 钻头的破岩效率有显著的影响,而且这种影响与切削齿尺寸和岩石性质有关。直径 16 mm 和 19 mm 切削齿

钻头,钻进可钻性级值分别为3.5,4.6和5.8的岩样时,后倾角为 15° 左右时破岩效率最高。13 mm 切削齿钻头,钻进可钻性级值为3.5的岩样时,后倾角为 15° 左右时的破岩效率较高;钻进可钻性级值为4.6和5.8的岩样时,后倾角 20° 左右时的破岩效率较高。后倾角对破岩效率的影响机制涉及到齿下

岩石的应力分布问题,十分复杂,在此不作讨论。根据试验结果,可以认为,在V级以下地层中,无论是采用19 mm 切削齿还是16 mm 切削齿,最佳后倾角均为 15° 。对可钻性级别更高的地层,若采用13 mm 切削齿,最佳后倾角为 20° 。

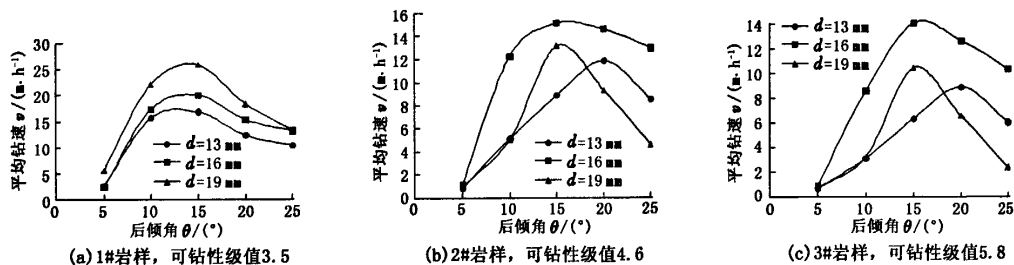


图3 PDC 切削齿尺寸和后倾角对钻速的影响

Fig.3 Effect of PDC cutter size and back rake on drilling rate

由图3还可以看出,切削齿尺寸对PDC钻头的破岩效率也有比较大的影响。钻进可钻性级值为3.5的岩样时,19 mm 切削齿钻头的平均钻速最快,其次是16 mm 切削齿钻头,13 mm 切削齿钻头的平均钻速最低;钻进可钻性级值为4.6和5.8的岩样时,16 mm 切削齿钻头平均钻速最快,其次是19 mm 切削齿钻头。分析其原因,地层可钻性级值低,抗钻阻力小,在同样的钻压水平下,切削齿比较容易吃入地层,故较大尺寸切削齿可获得较高的破岩效率。地层可钻性级值越高,抗钻阻力越大,切削齿尺寸越大,吃入越困难。据此可以得出结论:钻进Ⅲ级以下软地层的PDC钻头,选用19 mm 切削齿,可获得较高的破岩效率;钻进Ⅳ和Ⅴ级地层时,选用16 mm 切削齿可获得较高的破岩效率。从提高破岩效率方面考虑,地层可钻性级值越高,选用的切削齿直径应越小。

4.2 布齿密度对破岩效率的影响

图4为8 kN 钻压下平均钻速随布齿密度(数量)的变化规律。在6 kN 和10 kN 钻压下,也具有相同的规律。

由图4可以看出:平均钻速均随布齿密度的增大而降低;与钻进3#岩样相比,钻进1#岩样时,布齿密度对机械钻速的影响更为显著。这是因为在同样的钻压水平下,布齿密度增大,切削齿嵌入地层的能力必然降低,而且布齿密度对破岩效率的影响与所钻地层的可钻性密切相关。因此,在设计PDC钻头时,应根据所钻地层的性质和采用的切削齿尺寸,合理地设计切削齿数量。对于较软地层,在满足井底

覆盖要求的前提下,建议尽量设计和选用低密度布齿钻头,以提高破岩效率。

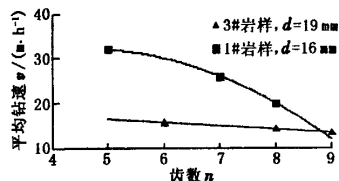


图4 布齿密度对PDC钻头钻速的影响

Fig.4 Effect of PDC cutter number on drilling rate

5 结论

(1)PDC 切削齿尺寸对钻头破岩效率有明显地影响。在设计和选用PDC钻头时,应根据所钻地层性质,选用合适尺寸的切削齿。钻进可钻性为Ⅲ级以下的软地层,应选用直径为19 mm 或更大尺寸的切削齿;钻进可钻性为Ⅵ~Ⅴ级地层,选用直径为16 mm 左右的切削齿。

(2)PDC 切削齿的后倾角对钻头的破岩效率有显著地影响,且与切削齿尺寸和地层性质有关。在Ⅴ级以下地层中,无论是采用19 mm 切削齿还是16 mm 切削齿,最佳后倾角为 15° 。对可钻性级别高的地层,若采用13 mm 切削齿,最佳后倾角为 20° 。

(3)PDC 钻头钻进速度随布齿密度的增大而降低,且与地层性质密切相关。设计PDC钻头时,应根据所钻地层的性质和采用的切削齿尺寸合理地设计布齿密度。对于较软地层,在满足井底覆盖要求的前提下,建议尽量设计和选用低密度布齿钻头,以提高破岩效率。

参考文献:

- [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 De-yong, LIANG Er-guo. Design of PDC bit for hard formation [J]. China Petroleum Machinery, 2004, 32(9): 28-31.
- [3] 邹德永, 王瑞和. PDC 钻头的岩石研磨性试验研究 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(2): 41-43.
ZOU De-yong, WANG Rui-he. Experimental study on rock abrasiveness with PDC bit [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(2): 41-43.
- [4] 邹德永, 王瑞和. 刀翼式 PDC 钻头侧向力平衡设计 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(2): 42-44.
ZOU De-yong, WANG Rui-he. Lateral force balancing design of blade PDC bits [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(2): 42-44.
- [5] 黄红梅, 翟应虎, 王辉, 等. 实体 PDC 钻头流场数值模拟与实验验证 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(3): 49-52.
HUANG Hong-mei, ZHAI Ying-hu, WANG Hui, et al. Numerical simulation and experimental checking for downhole flow field of a real PDC bit [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(3): 49-52.
- [6] 张召平, 苏新亮, 葛洪魁. 利用岩石三轴抗压强度优选 PDC 钻头 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(5): 39-40.
ZHANG Zhao-ping, SU Xin-liang, GE Hong-kui. Selection of polycrystalline diamond compact bits based on tri-axial compressive strength of rock [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(5): 39-40.
- [7] 宋洵成, 邹德永. 采用遗传算法的 PDC 钻头侧向力平衡优化设计 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(4): 50-52.
SONG Xun-cheng, ZOU De-yong. Optimization design of lateral force balance of PDC bits by genetic algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(4): 50-52.
- [8] 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 Qing-ming, WANG Rui-he. 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.
- [9] 沈忠厚, 彭焯. 双级 PDC 钻头井底应力场分析 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 62-67.
SHEN Zhong-hou, PENG Ye. Analysis of bottom-hole stress field of two-stage PDC bit [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(1): 62-67.
- [10] ROBERT Clayton, SHILIN Chen, GUY Lefort. New bit design, cutter technology extend PDC application to hard rock drilling [R]. SPE/IADC 91840, 2005.
- [11] 尹宏锦. 实用岩石可钻性 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1988: 87.

(编辑 李志芬)

(上接第 75 页)

- [4] 汪志明, 薛亮. 射流元件附壁与切换流动规律研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(3): 352-357.
WANG Zhi-ming, XUE Liang. Study on the attached flow and alteration flow character in fluidic element of down hole pressure intensifier [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(3): 352-357.
- [5] 汪志明, 薛亮. 射流式井底增压器水力参数理论模型研究 [J]. 石油学报, 2008, 29(2): 308-312.
WANG Zhi-ming, XUE Liang. Hydraulic parameter model for design of fluidics downhole boost compressor [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 308-312.
- [6] 索忠伟, 殷琨, 徐克里, 等. 射流式液动锤内部动力过程的数学模型及仿真分析 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(1): 200-203.
SUO Zhong-wei, YIN Kun, XU Ke-li, et al. Mathematical model and synthetic analysis of hydro-efflux DTH hammer inside power process [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(1): 200-203.
- [7] 李国琳, 彭视明. 射流式液动锤冲击功非接触测量系统的改进 [J]. 石油机械, 2008, 36(7): 56-58.
LI Guo-lin, PENG Jian-ming. Improvement of non-contact measuring system of jet hydraulic hammer blow energy [J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(7): 56-58.
- [8] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 63-159.
- [9] 盛敬超. 工程流体力学: 机械类 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980: 197-201.

(编辑 李志芬)