

文章编号:1673-5005(2006)02-0045-03

PDC 切削齿破岩受力的试验研究

马清明^{1,2}, 王瑞和¹

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 胜利石油管理局 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要:试验模拟了切削面积、接触弧长、切削面形状、切削齿后倾角和岩石性能对 PDC 切削齿破岩受力的影响。结果表明,采用接触弧长、切削面积和岩石可钻性表征切削面的几何形状和岩石性能与 PDC 切削齿破岩的实质相符。PDC 切削齿单位切削面积上的切向力和正压力随着接触弧长、切削面积、切削齿后倾角和岩石可钻性级值的增大而增大,并与切削面积与接触弧长的乘积呈显著的线性关系。当后倾角小于 10°时,切削齿受力较小。根据试验结果,建立了 PDC 切削齿破岩的受力模型。

关键词:PDC 切削齿; 岩石破碎; 受力模型; 试验研究

中图分类号:TE 21

文献标识码:A

Experimental study on force of PDC cutter breaking rock

MA Qing-ming^{1,2}, WANG Rui-he¹

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257017, Shandong Province, China)

Abstract: The effects of cutting area, contact arc length, the geometry of cutting face, back dip angle of PDC cutter and rock performance on force of PDC cutter breaking rock were simulated experimentally. The results show that it conforms to the essence of PDC cutter breaking rock that adopting contact arc length, cutting area and rock drillability as the characteristic parameters of the geometry property of cutting face and rock performance. The tangential and positive forces on unit cutting area of PDC cutter increase with the increase of contact arc length, cutting area, back dip angle of PDC cutter and rock drillability class. The mathematical relationship between the tangential and positive forces on unit cutting area and the multiplication of cutting area and contact arc length is obvious linear. When back dip angle is less than 10 degrees, the force on PDC cutter is relatively less. According to the experimental results, the force model of PDC cutter breaking rock was developed.

Key words: PDC cutter; rock breaking; force model; experimental study

PDC 具有很高的硬度和耐磨性,作为切削元件被广泛地用于破碎岩石。一般 PDC 破岩工具具有多个切削齿,工具的受力和工作状态取决于各个切削齿的受力和工作状态,而切削齿的受力是影响其磨损和工作状态的一个关键性因素。因此准确把握 PDC 切削齿破岩受力的内在作用规律,对 PDC 破岩工具的设计和应用具有重要意义。

1 装置及试验方法

试验装置由 CW6130 车床改装而成(图 1)。岩样尺寸为 $\Phi 220 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。为了能够有效地控制切削深度,在岩样的半径方向预先加工一条深

100 mm 的切槽。试验采用胜利油田钻井工艺研究院生产的 $\Phi 13.4 \text{ mm}$ 标准复合片,固定在钢质刀柄上构成 PDC 切削齿。PDC 切削齿固定在定位装置上的 QB-07 型三轴测力计上,定位装置有两个自由度,可以根据不同的切削半径和切削深度对 PDC 切削齿进行定位。锁紧装置用于锁定切削齿的位置。

试验模拟了切削面积、接触弧长、切削面形状、后倾角和岩石性能对 PDC 齿切削受力的影响,研究中共设计了 5 种典型的切削面形状(图 2)来模拟相邻齿的重叠切削。岩石的性能见表 1,其中岩石可钻性采用华东Ⅲ型微钻头测定仪测定。

收稿日期:2005-09-30

基金项目:“十五”国家攻关项目(2003BA613A-11)

作者简介:马清明(1966-),男(汉族),山东临朐人,高级工程师,博士研究生,主要从事石油工具的研究和开发工作。

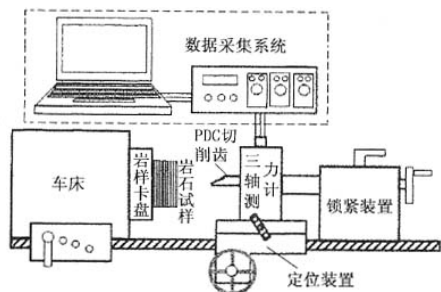


图 1 试验装置

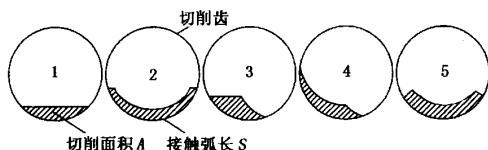


图 2 切削面形状示意图

表 1 岩石参数

岩性	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗压强度 σ/MPa	压入硬度 P/MPa	岩石可钻性 K_d
水泥石	2.03	22.43	723.8	4.00
红砂岩	2.38	55.75	775.9	4.39
泥岩	2.24	20.51	543.9	5.00
粉砂岩	2.47	87.19	1417.1	5.58
黄砂岩	2.52	89.90	1574.7	6.13
大理岩	2.59	122.03	1539.6	6.41
灰岩	2.72	249.93	2552.8	6.81
粉砂质泥岩	2.26	42.96	637.11	4.62

切削时,切削齿的轴线在与岩石切削表面垂直的平面内,在该平面内将切削齿的受力分解成两个正交的力,即沿切削方向的切向力 F_c 和与岩石切削表面垂直的正压力 F_n (见图 3,图中 α 为切削齿后倾角)。

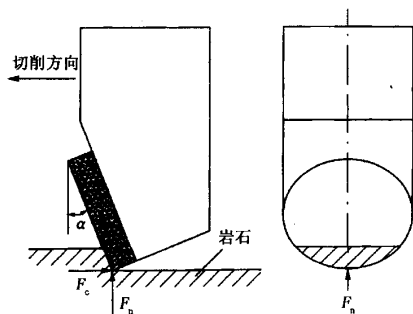


图 3 切削齿受力示意图

预备试验表明,在试验条件下,切削齿的侧向力与正压力、切向力相比小得多,因此研究认为切削齿的侧向力为零;当转速较低时,受岩石局部非均质性的影响,测试数据波动较大,随着转速的增大,数据的离散性逐渐减小,当转速大于 90 r/min 时,转速

对切削齿受力的影响基本可以忽略,因此研究中设定转速为 96 r/min。

2 试验结果及其分析

2.1 切削面

PDC 切削齿破岩过程中,岩石对切削齿的反作用力主要由岩石破碎阻力和切削面上的摩擦力两部分构成。因此,切削面的几何性质直接影响到 PDC 切削齿的受力。但在现有研究中,一般只采用切削深度一个参数来表征切削面对切削齿受力的影响^[1-3],难以全面揭示切削面对 PDC 切削齿受力的作用规律。为此,考察分析了图 2 所示的 5 种典型的切削面对切削齿受力的影响,结果见表 2。

表 2 切削面对切削齿受力的影响(水泥石, $\alpha = 5^\circ$)

切削面形状	切削深度 H/mm	切削面积 A/mm^2	接触弧长 S/mm	切向力 F_c/N	正压力 F_n/N
1	1.5	8.688	9.174	26.086	32.043
2	1.0	8.427	10.670	35.510	34.733
3	2.0	10.623	8.443	19.814	31.550
4	1.5	10.024	9.237	25.242	38.190
5	1.5	10.247	9.294	27.145	34.049

由表 2 中数据难以建立具体切削面形状与切削齿受力之间的有效关联。表 2 中数据以及大量试验表明,切削齿的受力主要受切削面积和接触弧长的影响(图 4)。

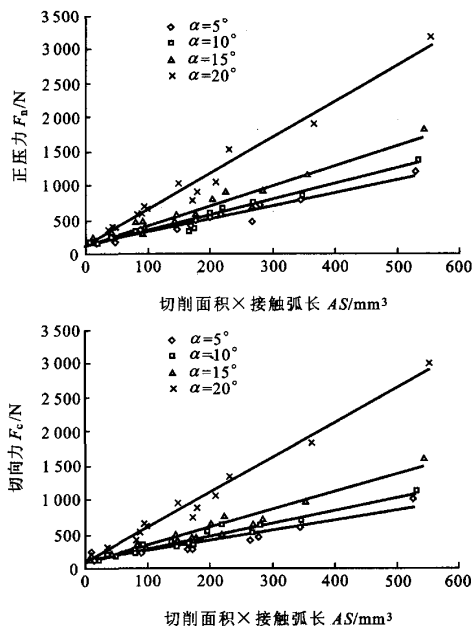


图 4 切削齿受力与切削面积及接触弧长的关系

分析图 4 可以看出,PDC 切削齿单位切削面积上的切向力和正压力随着接触弧长与切削面积的增

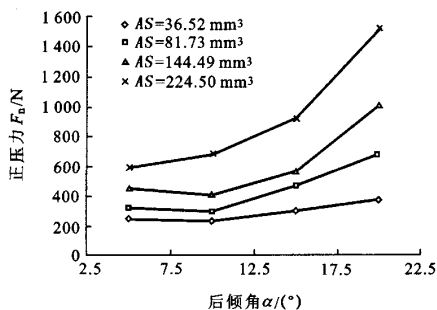
大而增大。统计分析发现,PDC切削齿单位切削面积上的切向力和正压力与切削面积和接触弧长的乘积呈线性关系,表达式为

$$F_c = a_1 AS + b_1, \quad (1)$$

$$F_n = a_2 AS + b_2. \quad (2)$$

式中, a_1, a_2, b_1, b_2 为无因次系数,与切削齿后倾角和岩性有关。

分析结果表明,切削面积和接触弧长是作为一个整体对PDC切削齿的受力产生作用,因此在PDC破岩工具的设计和应用中,不可将切削面积与接触弧长割裂开来,以免顾此失彼。



2.2 切削齿后倾角

图5是切削面积与接触弧长乘积变化时,后倾角与切削齿受力的关系。分析图5可以看出,PDC切削齿所受的切向力和正压力均随着切削齿后倾角的增大而增大,当切削齿后倾角 α 小于 10° ,切削齿受力均较小,该结论与A. Sinor^[4]通过全尺寸钻头的试验所获得的结论一致。在保证切削效率的前提下,PDC切削齿受力越小,越有利于其使用寿命的延长,该结论为PDC破岩工具的设计和应用提供了重要的依据。

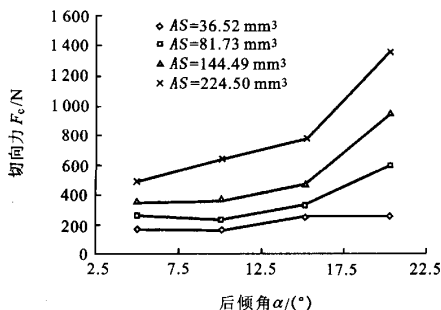
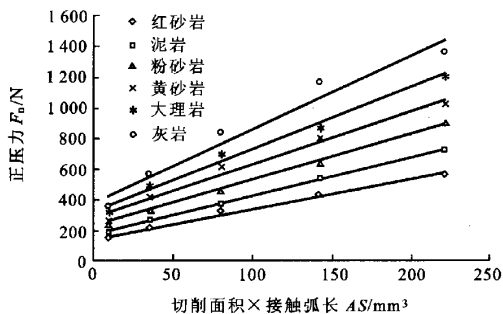


图5 后倾角对切削齿受力的影响

2.3 岩石性能

岩石可钻性是石油钻井中非常重要的一个参数,表征岩石破碎的难易程度,反映了岩石的综合强度,相对于抗压强度单一指标而言,它更能体现岩石



抵抗机械破坏的综合能力^[5]。试验表明,切削齿的切向力和正压力均随岩石可钻性级值 K_d 的增大而增大。图6是后倾角为 10° 时不同岩性(反映 K_d 不同)的试验结果。

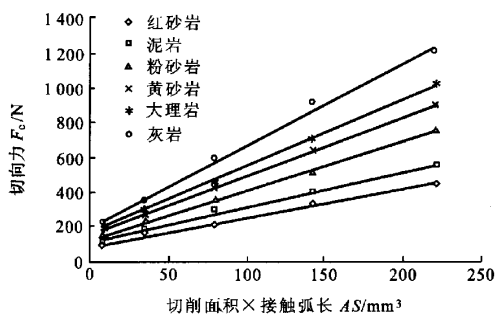


图6 岩性对切削齿受力的影响

试验模拟了不同后倾角对应的切削齿的受力情况,运用统计分析的方法,建立了系数 a_1, b_1, a_2, b_2 与岩石可钻性级值 K_d 间的关系,表达式为

$$\begin{cases} a_1 = (0.0002\alpha^2 - 0.0024\alpha + 0.0966)K_d^2, \\ b_1 = (0.0056\alpha^2 - 0.0719\alpha + 4.597)K_d^2. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_2 = (0.0003\alpha^2 - 0.0047\alpha + 0.1142)K_d^2, \\ b_2 = (0.0021\alpha^2 + 0.0317\alpha + 7.1472)K_d^2. \end{cases} \quad (4)$$

2.4 受力模型

式(1)~(4)即构成了PDC单齿切削破岩的受力模型,表3是受力模型计算结果与实测结果的对比。从表3可以看出,二者吻合良好,说明计算值具有较高精度。检验计算结果同时也表明,采用接触弧长、切削面积和岩石可钻性表征切削面的几何形状和岩石性能符合PDC切削齿破岩的实质,具有广泛的适应性和可行性。

(下转第58页)

(1):49-54.
ZHAO Fu-lin, ZHANG Gui-cai, ZHOU Hong-tao, et al.
Potentiality, limitation and developing tendency of profile control and water shutoff [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1999, 23(1):49-54.

[2] DI Lullo G, RAE P. New insights into water control—a review of the state of the art [R]. SPE 77963, 2002.

[3] 赵福麟, 张贵才, 周洪涛, 等. 二次采油与三次采油的结合技术及其进展[J]. 石油学报, 2001, 22(5):38-42.
ZHAO Fu-lin, ZHANG Gui-cai, ZHOU Hong-tao, et al.
The combination technique of secondary oil recovery with tertiary oil recovery and its progress [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5):38-42.

[4] 赵福麟. 采油用剂[M]. 东营:石油大学出版社, 1997: 27-56.

[5] SCHEMPF F J. Water shutoff [J]. Hart's E & P, 2002, 75(5):63-68.

[6] KABIR A H. Chemical water and gas shutoff technology—an overview [R]. SPE 72119, 2001.

[7] CHIAPPA L, ANDREI M, LOCKHART T P, et al. Process for reducing the production of water in oil wells: GB, 2392695 A[P]. 2004.

[8] AL-MUTAIRI T Z, SHAHID M A, REINHOLD M R, et al. Remarkable results from water shutoff treatments using a new deep penetrating polymer system—case histories from south Umm Gudair Field [R]. SPE 85329, 2003.

[9] SERIGHT R S, LANE R H, SYDANSK R D. A strategy for attacking excess water production [R]. SPE 70067, 2002.

(编辑 李志芬)

(上接第 47 页)

表 3 计算结果与实测结果对比

岩性	后倾角 $\alpha/(^{\circ})$	切削面积 A/mm^2	接触弧长 S/mm	切向力 F_c/N		正压力 F_n/N	
				实测	计算	实测	计算
红砂岩	10	13.28	10.73	336.37	339.82	427.12	414.83
	20	1.761	5.384	125.43	127.55	190.74	191.77
泥岩	5	8.688	9.174	284.73	287.97	374.69	379.63
	20	13.56	11	569.46	614.52	736.62	738.34
粉砂岩	5	0.5	1.712	155.87	138.69	232.47	231.73
	10	0.5	1.722	152.14	140.67	242.79	241.55
黄砂岩	10	13.28	10.73	641.26	662.59	802.32	808.83
	25	5.006	7.811	450.84	474.16	604.25	618.32
大理岩	5	4.786	7.441	298.95	310.97	467.02	446.03
	25	19	12.64	1794.5	1853.46	2260.0	2197.79
灰岩	5	1.712	5.227	247.91	2401.96	363.23	3819.98
	25	19	12.64	2065.3	2092.0	2552.7	2480.64
粉砂质泥岩	15	4.857	7.560	172.58	184.76	235.62	259.94
		13.398	10.842	406.35	429.41	545.46	517.56
		23.970	13.480	854.83	830.29	906.27	939.70

3 结 论

(1) 采用接触弧长、切削面积和岩石可钻性表征切削面的几何形状和岩石性能与 PDC 切削齿破岩的实质相符。

(2) PDC 切削齿单位切削面积上的切向力和正压力随着接触弧长、切削面积、切削齿后倾角和岩石可钻性级值的增大而增大,并与切削面积与接触弧长的乘积呈显著的线性关系。当后倾角小于 10° 时,切削齿受力较小。

参考文献:

[1] MELAUGH J E, SALZER J A. Development of a predictive model for drilling pressurized shale with STRAT-

[2] GLOWKA D A. The use of single-cutter data in the analysis of PDC bit designs[R]. SPE 15619, 1986.

[3] 须志刚,蔡镜伦. PDC 钻头切削齿受力试验的新方法[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1994, 18(4):31-35.
XU Zhi-gang, CAI Jing-lun. New approach to experimental studies of force on PDC bit cutters[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1994, 18(4):31-35.

[4] WARREN T M, SINOR A. Drag bit performance modeling[R]. SPE 15618, 1986.

[5] 尹宏锦. 实用岩石可钻性[M]. 东营:石油大学出版社, 1989.

(编辑 李志芬)