

文章编号:1673-5005(2014)04-0104-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.04.015

PDC 切削齿与岩石相互作用模型

王家骏, 邹德永, 杨光, 何仁清, 陈修平

(中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要: 使用可以加载钻压的试验设备, 在不同钻压、切削面积、切削速度和切削齿后倾角条件下对不同性质的岩石进行钻进试验, 通过对试验数据的多元非线性回归分析, 建立新的 PDC 切削齿与岩石相互作用模型。结果表明: 切削面积是影响切削齿受力的主要因素; 切削齿受力随切削面积、切削齿后倾角和岩石可钻性级值的增大而增大; 切削齿受力与切削速度呈对数关系。

关键词: PDC 钻头; 切削齿; 相互作用模型; 钻速; 钻压

中图分类号: TE 21 **文献标志码:** A

引用格式: 王家骏, 邹德永, 杨光, 等. PDC 切削齿与岩石相互作用模型[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(4): 104-109.

WANG Jiajun, ZOU Deyong, YANG Guang, et al. Interaction model of PDC cutter and rock[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 104-109.

Interaction model of PDC cutter and rock

WANG Jiajun, ZOU Deyong, YANG Guang, HE Renqing, CHEN Xiuping

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: A series of drilling experiment were carried out by using experimental equipment, in which load on cutters can be increased. Experiments were conducted with various load, cutting area, cutting speed, back dip angle of PDC cutter and rock properties. The experimental results were analyzed with multiple nonlinear regression technique and a new cutter-rock interaction model was proposed. The results show that the cutter area is the principal factor influencing the force of cutters. The force of cutters increases with cutting area, back dip angle of PDC cutter and rock drillability. It is a logarithmic relationship between the force of cutters and cutting speed.

Key words: PDC bits; cutters; interaction model; drilling rate; weight on bit

PDC 切削齿与岩石相互作用关系对预测钻速十分重要。前人在车床上做了 PDC 切削齿切削岩石试验^[1-2], 建立了 PDC 切削齿与岩石相互作用模型。以往的试验设备是车床, 在切削岩石的过程中不能给钻头加载钻压, 只能在固定切削深度条件下测得切削齿受力, 实际钻井时切削齿在钻压下切削岩石, 因此这些试验不符合实际情况; 当钻头转速不同时, 同一切削齿的切削速度不同, 这对切削齿受力有很大影响, 以往的试验没有考虑这一因素; 前人使用逐步回归法对试验数据进行分析, 模型的预测结果与试验数据误差较大。针对以上问题, 笔者使用

可以加载钻压的试验设备, 在不同切削速度下进行试验, 并用多元非线性回归方法对试验数据进行分析。

1 PDC 切削齿切削岩石试验

1.1 试验装置

试验装置为中国石油大学(华东)的 XY-2B 型钻机(图 1(a)), 钻机由调速电机、方钻杆、钻头、加压装置、传感器和数据采集系统组成。试验用钻头由 3 个切削齿构成, 如图 1(b)所示。

收稿日期: 2013-12-08

基金项目: 国家“十二五”科技重大专项(05Z12020300); 中国石油大学(华东)自主创新基金项目(12CX06025A)

作者简介: 王家骏(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事油气井工程岩石力学研究。E-mail: wangjiajun1983@163.com。

1.2 试验原理及方法

钻机由调速电机产生转速和扭矩,方钻杆带动钻头旋转,轴向加压装置给予钻头钻压,传感器和数据采集系统可以实时收集钻压、扭矩和位移的信息,通过这些信息可以测定切削齿的正压力 F_n 和切削力 F_c 。用 PDC 微钻头在华石 I 型岩石可钻性测试仪上测定岩石可钻性级值,用硬度计测定压入硬度,用三轴应力仪测定岩石的抗压强度和抗拉强度,表 1 中为岩石参数的平均值。在不同的切削齿直径、后倾角、钻压和切削速度下进行试验,试验条件见表 2,每种条件下重复做 4 次试验,取得了 1 200 组数据。

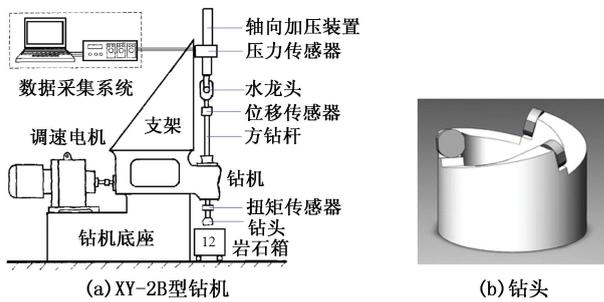


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental equipment

表 1 岩石参数

Table 1 Rock parameters

岩性	岩石可钻性 K_d	压入硬度 P/MPa	抗压强度 δ_c/MPa	抗拉强度 δ_b/MPa
泥岩	5.0	944.50	67.34	5.58
大理岩	5.7	1 118.36	84.79	6.21
花岗岩	6.4	1 490.80	94.18	7.02
灰岩	7.0	1 785.40	103.54	7.87

表 2 试验条件

Table 2 Experimental conditions

钻压 P_{WOB}/kN	转速 $N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	切削速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	齿直径 r_c/mm	后倾角 $\alpha/(\text{°})$
3	50	0.2975	13	5
4	100	0.5950	16	10
5	150	0.8925	19	15
6	200	1.1896	20	20
7				25

2 试验结果分析

2.1 聚类分析

本文中采用系统聚类法^[7]将变化规律相近的变量归成类(图 2)。由图 2 可见:切削力、正压力与吃入深度、接触弧长、切削面积、齿直径最先聚类,说明这些变量在 12 个变量中关系最为密切;岩石的可钻性与压入硬度、抗压强度、抗拉强度先聚为一类而

后才与切削力、正压力聚类,这些变量都反映了岩石的强度特征。由于岩石可钻性可以综合反映岩石破碎的难易程度,所以在公式中只考虑岩石可钻性。

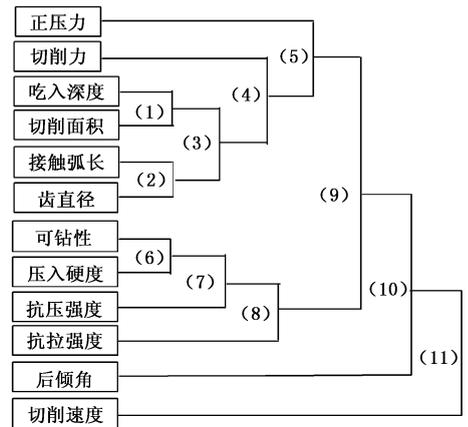


图 2 聚类图

Fig. 2 Cluster analysis diagram

2.2 主成分分析

试验中变量太多将问题复杂化,为了找到影响切削齿受力的主要因素,对试验数据做主成分分析,变量的特征值及贡献率见表 3。由表 3 可知切削力和正压力与切削面积的贡献率之和均大于 76%,这说明切削面积是影响切削齿受力的主要因素。

表 3 变量的特征值及贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution rate of variables

	切削力	切削面积	可钻性	后倾角	切削速度
特征值	5.443	2.38	0.845	0.813	0.612
贡献率	54.399	22.901	8.567	8.124	6.009
	正压力	切削面积	可钻性	后倾角	切削速度
特征值	5.192	2.47	0.878	0.827	0.632
贡献率	51.924	24.704	8.778	8.269	6.325

2.3 回归分析

2.3.1 切削面积与切削齿受力的关系

切削齿受力与切削面积的关系最为密切,利用回归分析可以确定二者之间的定量关系。正压力 F_n 、切削力 F_c 与切削面积 A 的关系曲线如图 3(切削齿后倾角 15° ,切削速度 0.2975 m/s)所示。当切削齿后倾角和岩石倾角相同时,切削齿的切削力、正压力随切削面积的增大呈线性增大。

根据图 3 可以建立切削齿受力与切削面积之间的关系,表达式为

$$F_n = a_1 A + b_1, F_c = a_2 A + b_2. \quad (1)$$

式中, a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 为系数。

试验发现,在相同的切削面积和岩石性质下,加载钻压的试验与没有加载钻压的试验相比,其切削齿受力更大。实际钻井时切削齿在钻压下切削岩

石,所以加载钻压的试验更符合实际情况。

2.3.2 切削速度与切削齿受力的关系

因为文献 [4-6] 中的试验刀具是前倾、尖锐、没有倒角和磨损的切削齿,所以认为可以忽略切削速度对切削齿受力的影响。但是,实际钻头使用的是后倾、有倒角的 PDC 切削齿,这些试验的结论不适用于 PDC 钻头。文献 [8-10] 的试验证明,当切削

深度相同时,切削速度越大切削齿受力越大。

本文中对试验数据进行回归分析,确定切削速度与正压力、切削力的关系(图4,切削齿后倾角15°,泥岩)。当切削齿后倾角和地层岩石倾角相同时,在相同吃入深度下,切削齿的切削力、正压力都随切削速度的增大而增大,切削齿受力与切削速度呈对数关系。

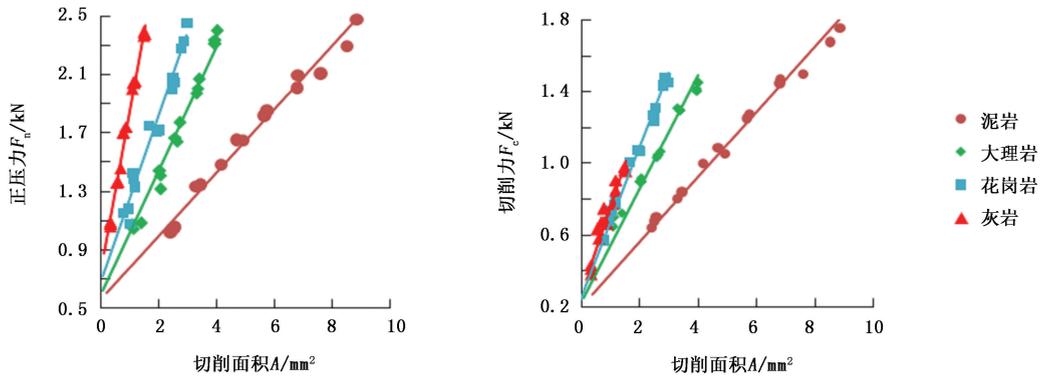


图3 正压力 F_n 、切削力 F_c 与切削面积 A 的关系

Fig.3 Relationship of cutting area A with normal force F_n and tangential force F_c

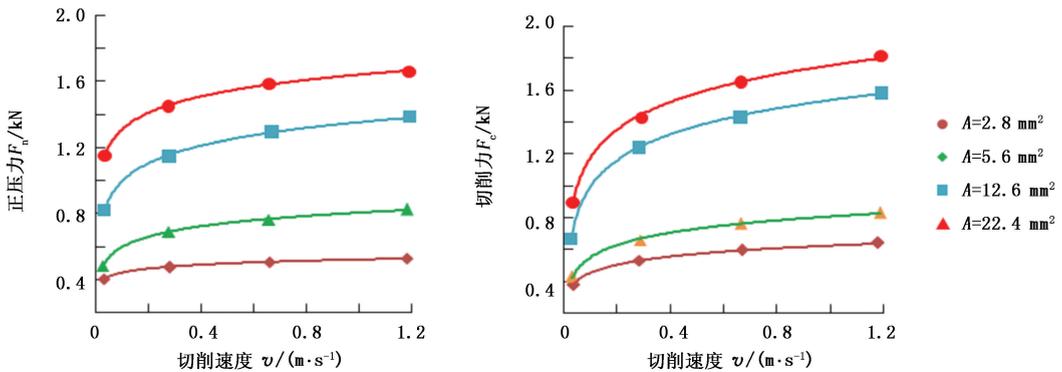


图4 正压力 F_n 、切削力 F_c 与切削速度 v 的关系

Fig.4 Relationship of cutting velocity v with normal force F_n and tangential force F_c

2.3.3 切削齿后倾角与切削齿受力的关系

在相同岩性和切削面积下,切削齿后倾角约为10°时,PDC 切削齿受力最小,切削力和正压力随切削齿后倾角增大而增大,可以用二次函数拟合二者之间的关系。

2.3.4 岩石可钻性级值与切削齿受力的关系

在相同的切削齿后倾角和切削面积下,当岩石可钻性级值 K_d 增大时,切削齿的切削力和正压力随之增大,二者呈线性函数关系。

3 PDC 切削齿与岩石相互作用理论模型

在做多元非线性回归分析之前,需要确定各变量与切削齿受力的关系式的形式。在试验和数值模

拟的基础上,深入研究 PDC 切削齿的破岩机制,建立新的切削齿与岩石相互作用理论模型,由此说明新建公式的形式的合理性。

图5(a)为使用 LS-DYNA 有限元分析软件^[13]对 PDC 切削齿切削岩石作动态分析得到的损伤云图。本模型主要考虑岩石的损伤与破坏,岩石采用 MAT_CSCM 材料,能够模拟脆性岩石的体积破碎。设岩石的密度为 2 600 kg/m³,剪切模量为 28 GPa,体积模量为 38.1 GPa,抗压强度为 112 MPa,将 PDC 切削齿设置为刚体。钻井时产生块状岩屑的原因是岩石沿着剪切面破坏,PDC 切削齿将块状岩屑从岩石本体上切削下来。当切削齿向前做切削运动时,块状岩屑向前运动。在切削齿与块状岩屑之间的岩石由于挤压破坏形成岩粉破碎带。因为挤压作用,

式(10)即为切削齿与岩石相互作用理论模型,切削齿受力与切削速度呈对数关系。

4 PDC 切削齿受力计算模型

有关岩石性质的 θ_r, ψ, ϕ 等参数在试验室中容易获得,但是在钻井现场不易获得,所以式(10)有不足之处。岩石可钻性可在钻井现场获得,因此需要建立基于岩石可钻性的计算模型。

由于是在切削齿的微小表面上求切削齿受力,吃入深度 h 与接触弧长 w 的乘积近似等于切削面积 A ,所以可以只考虑切削面积 A 和接触弧长 w 。对比式(10),对试验数据进行多元非线性回归,式(1)可以改写为

$$\begin{cases} F_n = a_1 A + b_1 w, \\ F_c = a_2 A + b_2 w. \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$a_1 = (0.03\alpha^2 - 0.07\alpha + 11.84)(2.31K_d - 8.87) \times (0.43\ln w + 0.81),$$

$$b_1 = (0.19\alpha^2 - 5.34\alpha + 321.83)(1.10K_d - 3.38) \times (0.04\ln w + 0.08),$$

$$a_2 = (0.01\alpha^2 - 1.29\alpha + 11.23)(2.12K_d - 7.83) \times (0.44\ln w + 0.82),$$

$$b_2 = (0.01\alpha^2 + 0.03\alpha + 96.39)(0.31K_d - 0.60) \times (0.04\ln w + 0.07).$$

在多元非线性回归中,整体方差 $R^2 = 0.954$,符合工程要求。表4为切削齿受力的计算值与实测值的对比,可见二者吻合较好,说明切削齿受力计算模型精度较高。

表4 切削齿受力的计算值与实测值对比

Table 4 Experimental data and calculated value of force of cutters

岩性	后倾角 $\alpha/^\circ$	切削速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	切削面积 A/mm^2	正压力 F_n/N		切削力 F_c/N	
				实测	计算	实测	计算
泥岩	10	0.28	7.396	985.4	986.2	595.8	594.3
	15	0.66	9.842	1338.3	1337.9	935.4	934.8
	20	1.19	11.531	1680.6	1681.1	1198.9	1197.9
大理岩	10	0.28	4.472	1032.5	1032.9	388.3	388.8
	15	0.66	6.213	1314.8	1314.2	897.8	898.2
	20	1.19	7.582	2013.5	2014.2	1217.1	1216.7
花岗岩	10	0.28	4.794	1328.7	1329.2	800.8	801.3
	15	0.66	7.448	2078.3	2077.9	1238.3	1237.5
	20	1.19	7.842	2337.5	2336.8	1464.7	1463.6
灰岩	10	0.28	3.755	1659.9	1658.6	843.5	844.5
	15	0.66	2.636	1745.5	1744.9	665.1	666.2
	20	1.19	3.936	2424.3	2423.6	1257.6	1256.8

5 结 论

(1) 切削面积是影响切削齿受力的主要因素。

(2) 加载钻压的试验更符合实际情况。

(3) 切削齿受力随切削面积、岩石可钻性级值的增大而增大,呈线性函数关系。切削齿受力与切削齿后倾角呈二次函数关系。

(4) 在相同吃入深度下,切削齿受力随切削速度的增大而增大,并且切削齿受力与切削速度呈对数关系。

(5) 将颗粒物质动力学理论应用到岩粉破碎带上,从理论上验证了切削齿受力与切削速度呈对数关系。

参考文献:

[1] 邹德永,张将海,王瑞和. PDC 钻头力学模型的试验研究[J]. 石油钻探技术, 2005,33(2):41-43.
ZOU Deyong, ZHANG Jianghai, WANG Ruihe. The experiment study on mechanical model of PDC bits [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005,33(2):41-43.

[2] 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.

[3] 邹德永,王瑞和,岳志国. PDC 钻头的轨迹方程及切削参数计算方法[J]. 石油钻采工艺, 2003,25(5):34-38.
ZOU Deyong, WANG Ruihe, YUE Zhiguo. Trace equation and methods for computing cutting parameters of PDC bits [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003,25(5):34-38.

[4] FAIRHURST C. Some possibility and limitations of rotary drilling in hard rocks [J]. Transaction of the Institution of Mining Engineers, 1955,1115:85-103.

[5] GRAY K E, ARMSTRONG F, GATLIN C. Two-dimensional study of rock breakage in drag-bit drilling at atmospheric pressure [J]. Journal of Petroleum Technology, 1962,14(1):93-98.

[6] ROXBOROUGH F F, ROXBOROUGH F F, PEDRONCELLI E J. A Practical evaluation of some coal cutting theories using a continuous miner[J]. The Mining Engineer, 1982,11:145-156.

[7] 张厚美,吴何洪. 岩石力学特性关系的探讨[J]. 中国海上油气:工程, 1999,11(3):46-50.

- ZHANG Houmei, WU Hehong. Investigate the relationship between the mechanical properties of the rock[J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 1999, 11(3):46-50.
- [8] DAGRAIN F, TSHIBANGU J P. Use of the D3 model for the estimation of forces acting on a cutter in rock cutting and drilling[R]. SPE 78242, 2002.
- [9] PELFRENE G, SELLAMI H, GERBAUD L. Mitigating stick-slip in deep drilling based on optimization of PDC bit design[R]. SPE 139839, 2011.
- [10] 董海, 张弘韬. 切削速度对岩石切削力的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 1999(1):21-23.
DONG Hai, ZHANG Hongtao. Study on the impact of cutting speed on the force of cutting rock [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 1999(1):21-23.
- [11] HARTLEY R R, BEHRINGER R P. Logarithmic rate dependence of force networks in sheared granular materials [J]. Nature, 2003(421):928-931.
- [12] GERBAUD L, MENAND S, SELLAMI H. PDC bits: all comes from the cutter rock interaction [R]. SPE 98988, 2006.
- [13] JAIME M C. Numerical modeling of rock cutting and its associated fragmentation process using the finite element method [D]. The Swanson School of Engineering, University of Pittsburgh, 2012.

(编辑 李志芬)