

# 石灰岩地层 PDC 钻头仿生 PDC 齿工作角优化试验研究

高科<sup>1</sup>, 孙阳<sup>1</sup>, 刘婧<sup>2</sup>, 孙友宏<sup>1</sup>, 张绪良<sup>1</sup>, 李梦<sup>1</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 威海市水利岩土工程有限公司, 山东 威海 264200)

**摘要:**在仿生耦合理论的指导下,根据贝壳的表面非光滑的结构特性设计研制一种仿生 PDC 齿。设计 PDC 钻头时,主要考虑切削齿的后倾角与侧转角,二者对钻头碎岩效率有重要影响。通过理论分析仿生 PDC 齿在钻头的最优安装角度,并通过钻进试验来优选仿生 PDC 齿在钻进石灰岩的最优安装角度。试验结果表明:在相同的转速、钻压的条件下,切削齿后倾角为 20°、侧转角为 0°时,钻头钻速最快。此试验结果可以为石灰岩地层用 PDC 钻头的设计提供参考依据。

**关键词:**仿生;PDC 齿;非光滑;后倾角;侧转角;PDC 钻头

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)11-0070-04

**Experimental Study on Bionic PDC Cutting Teeth of PDC Bit Working Angle Optimization for Limestone Stratum/GAO Ke<sup>1</sup>, SUN Yang<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>2</sup>, SUN You-hong<sup>1</sup>, ZHANG Xu-liang<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Weihai Hydraulic & Geotechnical Engineering Co., Ltd., Weihai Shandong 264200, China)

**Abstract:** Based on the bionic coupling theory, a kind of PDC cutter was designed according to the non-smooth surface structure of shells. In the design, the posterior slope and side rake angle were mainly considered, which have important influence on rock breaking efficiency. The bionic PDC cutters' optimal installation angle in bit was theoretically analyzed and that in limestone drilling was further optimized by drilling test. The experimental results show that with the same rotating speed and weight on bit, the fastest rotating speed can be obtained with posterior slope 20° and side rake angle 0°. And the experimental results above may serve as a reference for PDC bit design, especially for the PDC drilling bit used in limestone stratum.

**Key words:** bionic; PDC cutting teeth; non-smooth; posterior slope; side rake angle; PDC bit

## 0 引言

PDC 钻头适用于软到中硬岩石地层的钻探,具有碎岩效率高、使用寿命长、稳定性较好、单位进尺成本低等优点,显示出良好的破岩性能和可观的综合经济效益,从 20 世纪 70 年代以来,随着技术的不断提升,PDC 钻头已被广泛应用于石油、地质勘探等钻探领域<sup>[1-3]</sup>。据统计,2010 年全球钻头消耗量 65% 左右为 PDC 钻头。但 PDC 钻头切削齿抗冲击性能较差,在钻进不同地层时,其钻进速率、钻头寿命均不同,如钻遇坚硬地层时,如果钻头 PDC 齿后倾角过小,PDC 齿受到岩石正面冲击力过大,极易导致 PDC 齿的断裂、崩落而失效。另外在钻进软岩地层时,如果钻头上 PDC 齿侧转角选择不合理,会导致孔底岩屑不能及时排离孔底,钻头重复破岩,碎岩速率降低,影响钻进速度。因此,合理地选择钻头

PDC 切削齿的工作角,对提高 PDC 钻头碎岩效率和使用寿命有着重大意义。

本文首先分析了 PDC 齿工作角(后倾角与侧转角)在钻进过程中的作用,并在课题组对仿生 PDC 齿及其钻头研究基础上<sup>[4-7]</sup>,针对石灰岩地层,通过微钻试验优化钻头上仿生 PDC 齿的工作角(包括后倾角和侧转角),提高钻头的使用寿命和碎岩效率,改善钻头的排屑效果。

## 1 PDC 齿工作角

PDC 齿工作角的主要参数包括后倾角  $\alpha$  和侧转角  $\beta$ ,如图 1 所示。

### 1.1 后倾角

后倾角在 PDC 齿工作过程中主要起到减少 PDC 齿的工作震动和延长 PDC 齿使用寿命的作用。

收稿日期:2015-06-10; 修回日期:2015-10-23

项目基金:中国地质调查局地质调查工作项目(编号:12120114055001);国土资源部公益性行业科研专项经费(编号:SinoProbe-09-05);国家自然科学基金青年基金(编号:51004052);国家潜在油气资源(油页岩勘探开发利用)产学研用合作创新研究项目(编号:OSR-04-04)

作者简介:高科,男,汉族,1977 年生,副教授,博士,主要从事超硬材料及地质、石油钻头方面的研究工作,吉林省长春市西民主大街 938 号, gaokenm@jlu.edu.cn。

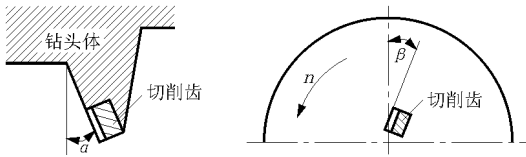


图 1 PDC 齿的工作角示意图

理论上,不考虑 PDC 齿的本身性能因素,绕钻头中心轴回转时,在相同钻压条件下,PDC 齿后倾角越小,吃入地层越容易<sup>[8]</sup>,岩石体积破碎程度大,钻进速度越高,单位体积岩石破碎功越小,越耐磨。但实际上,对特定物理力学性能参数的 PDC 齿而言,后倾角越小,受到来自岩石表面的振动越大,越容易提前达到其疲劳破坏强度,失效越快。一般而言,随着切削岩石硬度、强度和脆性的不断增大,后倾角也应随之逐渐增大。针对不同力学性能的岩石,PDC 齿都有一个最佳的后倾角与之对应。然而,对于常规柱形 PDC 齿而言,后倾角太大或太小都将增加齿与岩石的接触面积,压强减小,对岩石的攻击力会下降。在忽略一些次要因素后,单个 PDC 齿的受力示意图如图 2 所示,其中  $F_1$  是通过钻头体作用在 PDC 齿上轴向载荷; $F_2$  是水平载荷; $F_N$  是岩石对 PDC 齿的反作用力; $d$  为切削齿切入岩石深度; $P_N$  是水平方向上岩石对 PDC 齿的反作用力; $F_s$  是 PDC 齿与岩石在水平方向上的摩擦力; $A$  为 PDC 齿与岩石接触面积; $s$  为 PDC 齿的水平切削位移; $\alpha$  是 PDC 齿后倾角, $\theta$  是 PDC 齿切削角,很明显  $\alpha = \theta$ 。中国地质大学李田军等对斜镶圆柱体 PDC 斜向压入岩石受力分析进行过深入研究,得出  $F_N$ 、 $P_N$ 、 $F_s$  的计算方法如下<sup>[9]</sup>:

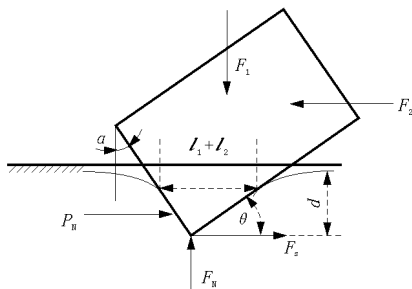


图 2 PDC 齿的受力示意图

$$F_N = E^* (\beta_1 k_1 d^2 + \beta_2 k_2 d \sqrt{A}) \quad (1)$$

$$P_N = k_3 E^* s \sqrt{A} \quad (2)$$

$$F_s = f F_N \quad (3)$$

其中:

$$\beta_1 = \cos\theta + f\sin\theta$$

$$\beta_2 = \sin\theta + f\cos\theta$$

$$k_1 = \frac{11}{16} \cdot \frac{1}{\sin(2\theta)}$$

$$k_2 = \frac{1.015}{\sin\theta} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi}}$$

$$k_3 = 2.03 \sqrt{\cos\theta} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi}}$$

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu^2}$$

式中: $E^*$ ——PDC 齿弹性模量; $\nu$ ——PDC 齿泊松比。

利用极限平衡原理,有:

$$\sum F_y = 0, F_1 - F_N = 0$$

$$\sum F_x = 0, F_2 - P_N - F_s = 0$$

求解,可得:

$$F_N = F_1 \quad (4)$$

$$P_N = F_2 - fF_1 \quad (5)$$

进行代换计算可得到  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $d$  和  $\theta$  之间的关系如下:

$$F_1 = E^* (\beta_1 k_1 d^2 + \beta_2 k_2 d \sqrt{A}) \quad (6)$$

$$F_2 = E^* (f\beta_1 k_1 d^2 + f\beta_2 k_2 d \sqrt{A} + k_3 s \sqrt{A}) \quad (7)$$

在式(5)和式(6)中,面积  $A$  主要跟压入深度、切入角和圆柱半径有关。

根据公式(6)和(7)可知, $F_1$  和  $F_2$  的大小除了与岩石的弹性性能有关外,还与 PDC 齿的尺寸、切入深度  $d$ 、切削角度  $\theta$  以及所产生的水平切削位移  $s$  有关。

假设岩石为均质的,并且 PDC 齿的形状和尺寸及 PDC 齿与岩石之间的水平向摩擦系数是恒定的,即: $E^*$  为常数, $R = 6.75 \text{ mm}$ , $f = 0.25$ ,并假定切入的深度  $d = 0.5 \text{ mm}$  是一个固定的值,那么由上述关系式可以得出其轴向力与后倾角(切削角)的关系曲线如图 3 所示。

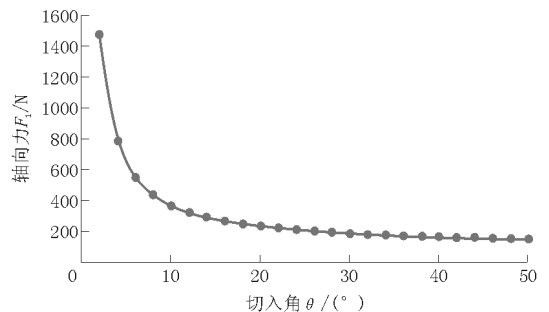


图 3 轴向力与切入角的关系趋势示意图

从图 3 可以看出,在理论上(不考虑岩石本身物理性质),当 PDC 齿切入的角度越大,PDC 切削齿

吃入岩石所需要的轴向力越小,当切入角度  $> 15^\circ$  时, PDC 齿切入岩石的轴向力减小幅度变小,最后趋于水平。考虑到实际钻进过程,当切入角过大, PDC 齿切入岩石所需要的功率虽然有所减小,但钻头钻进速度也相应减慢,而且容易造成排屑不畅的问题,此结果与文献[10]所述部分观点相吻合。因此合理的选择 PDC 齿切入角度(即 PDC 齿后倾角)对钻头钻进速度及功率消耗有着重大意义。

### 1.2 侧转角

在 PDC 切削齿工作过程中,侧转角主要是对齿前产生侧向推力,这样有利于提高切削齿的排屑能力,进而防止泥包现象的发生。一般来说, PDC 切削齿的侧转角控制在  $0^\circ \sim 15^\circ$ 。目前 PDC 切削齿一般取零。

## 2 仿生 PDC 微钻头结构设计及制备

### 2.1 仿生齿结构设计

利用仿生耦合设计思想,采用相似原理,分析贝壳体表(图4)波纹型非光滑特性,研制了仿生 PDC 齿(图5),刘婧等对具有该仿生结构的 PDC 齿进行相关的防粘试验<sup>[11]</sup>及野外钻进试验<sup>[12]</sup>,试验结果证明该结构的 PDC 齿比普通 PDC 齿具有良好防粘、减阻特性和较佳的碎岩效率。



图4 仿生原型(贝壳)

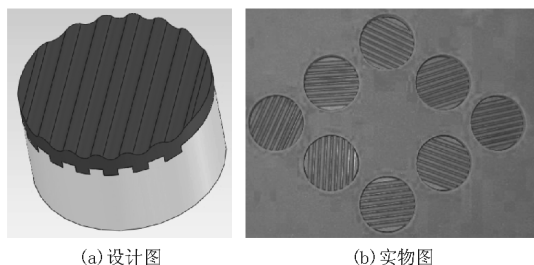


图5 仿生 PDC 齿

### 2.2 仿生 PDC 齿钻头结构设计

据上述 PDC 切削齿的工作角度和石灰岩的岩性,制定试验方案:采用  $15^\circ$  和  $20^\circ$  两种后倾角以及

$0^\circ$  和  $5^\circ$  两种侧转角组合,设计 4 种不同工作参数的 PDC 微型钻头(见图6)。目的在于通过测试 4 种不同工作参数的 PDC 切削齿钻头的钻进情况,寻找在钻进某种岩层时仿生 PDC 切削齿工作的最佳参数组合。

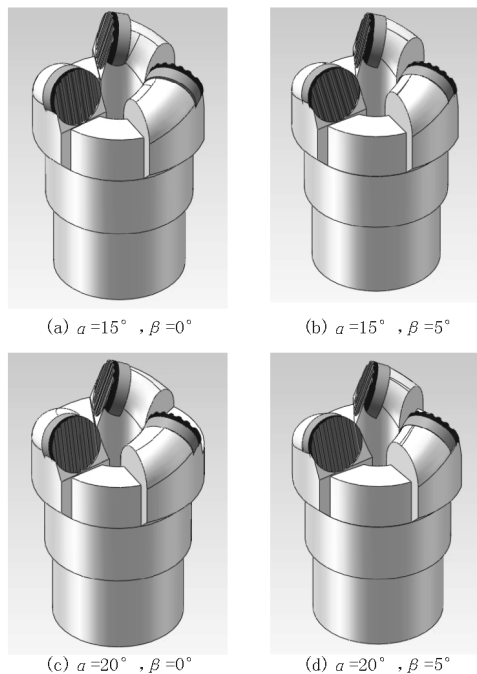


图6 微钻头设计图

### 2.3 微型钻头的制备

根据上述设计图纸输出的工程图,加工制备仿生 PDC 齿微钻头,采用的 PDC 尺寸为  $\varnothing 13.33 \text{ mm}$ ,钻头实物见图7。

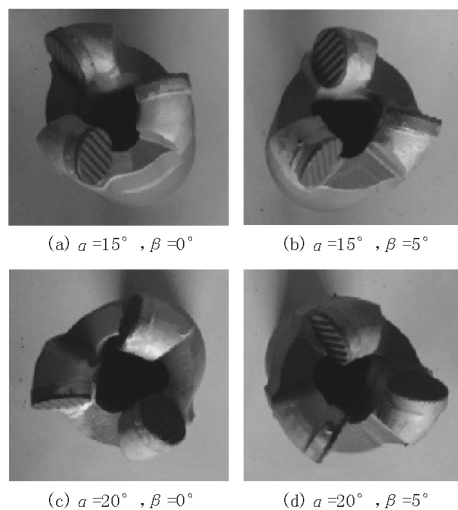


图7 仿生非光滑 PDC 切削齿钻头

### 3 钻进试验与数据处理

#### 3.1 钻进参数和岩石的选择

本试验使用的是液压微钻实验台(见图 8),钻进岩石是石灰岩(见图 9),可钻性级别约为 6 级。钻进参数设计为:钻压 4600 N,转速 180 r/min,泵量 30 L/min。



图 8 微钻实验台



图 9 石灰岩

#### 3.2 钻进结果分析

对 4 只钻头进行 2 组试验,每组试验多次重复测试并分别取每组试验机械钻速的平均值,试验数据如表 1 所示,曲线图如图 10 所示。

表 1 机械钻速试验数据 mm/s

安装角	试验 I (平均值)	试验 II (平均值)	平均值
$\alpha = 15^\circ, \beta = 0^\circ$	1.04	0.92	0.98
$\alpha = 15^\circ, \beta = 5^\circ$	1.19	1.05	1.12
$\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$	1.96	1.22	1.50
$\alpha = 20^\circ, \beta = 5^\circ$	1.47	1.47	1.47

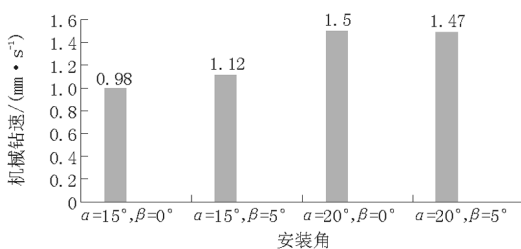


图 10 机械钻速曲线图

从上述机械钻速曲线图可以看出:(1)针对石灰岩,仿生 PDC 切削齿的后倾角  $\alpha$  变化对其机械钻速的提高有明显的影 响,最佳的后倾角角度为  $20^\circ$ ; (2)在后倾角角度为  $20^\circ$  前提下,侧转角对仿生 PDC 切削齿切削岩石效率的影响不明显。

### 4 结论

从仿生耦合理论出发,根据贝壳的体表特征研制仿生 PDC 齿,从力学角度对 PDC 齿受力进行计算,为仿生 PDC 微钻头结构设计 与优化提供理论依据。

进行了仿生 PDC 微钻头在石灰岩地层的钻进切削试验,结果表明:仿生 PDC 齿在钻进石灰岩地层是后倾角对其机械钻速有明显的影 响,最佳的后倾角角度为  $20^\circ$ ,侧转角对钻进效率影响不明显。以上结果可以为石灰岩地层用 PDC 钻头的设计提供参 考依据。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马保松,张祖培,孙友宏. 钻井工程用超硬材料及钻头的发展[J]. 地质与勘探,1998,34(2):50-54.
- [3] 邹德永,蔡环. 布齿参数对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,2009,30(2):76-79.
- [4] 李小洋,孙友宏,王传留,等. 仿生耦合孕镶金刚石钻头底唇面非光滑形态的优化[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):75-77.
- [5] Xu Liang, Sun Youhong, Gao Ke. Efficient rock fragmentation mechanism analysis of impregnated diamond bionics bit[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(6): 1015-1019.
- [6] 王建强,李国民,汤小仁,等. 凸包型仿生耦合金刚石钻头模拟分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):77-79,84.
- [7] Gao Ke, Sun Youhong, Ren Luquan. Design and analysis of ternary coupling bionic bits[J]. Journal of Bionic Engineering, 2008,(5):53-59.
- [8] Sinor LA, Powers JR, Warren TM. The effect of PDC cutter density, back rate, size, and speed on performance[J]. IADC/SPE 39306,1998.
- [9] 李田军. PDC 钻头破碎岩石的力学分析与机理研究[D]. 湖北武汉:中国地质大学(武汉),2012.
- [10] 张强,李丁,景文清,等. PDC 钻头单齿“攻击性”布齿研究及有限元分析[J]. 石油机械,2014,42(10):5-9.
- [11] 刘婧. 仿生非光滑 PDC 切削齿切削机理与试验研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2014.
- [12] 高科,李梦,董博,等. 仿生耦合聚晶金刚石复合片钻头[J]. 石油勘探与开发,2014,41(4):5-6.