

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2018046

# 非均质地层锥形辅助切削齿 PDC 钻头设计与试验

汪为涛

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257000)

**摘要:**为了提高 PDC 钻头在非均质地层中的机械钻速和延长钻头使用寿命, 研制了带有锥形辅助切削齿的 PDC 钻头。该钻头以 PDC 齿为主切削元件, 锥形齿和 PDC 齿为副切削元件, 开始工作时以 PDC 切削齿剪切破岩为主, 当 PDC 切削齿吃入地层到一定程度后, 锥形齿开始犁削岩石形成裂纹, 有助于 PDC 齿以较小切割力破碎岩石; 相邻 2 个刀翼的后排齿分别布置锥形齿与 PDC 齿, 用于钻头钻进后期的提速提效, 既具有常规 PDC 钻头破岩效率稳定的特点, 又具有锥形齿在非均质地层破岩效率高的特点。现场试验表明, 与常规 PDC 钻头相比, 锥形辅助切削齿 PDC 钻头在非均质地层中使用寿命长、机械钻速高。锥形辅助切削齿 PDC 钻头的成功研制, 为钻进非均质地层提供了一种新的高效破岩工具。

**关键词:**非均质地层; 锥形辅助切削齿; PDC 钻头; 破岩效率; 丁页 5 井; 足 202-H1 井

**中图分类号:**TE21.<sup>+1</sup>    **文献标志码:**A    **文章编号:**1001-0890(2018)02-0058-05

## Design and Test of a New PDC Bit with Tapered Auxiliary Cutter for Heterogeneous Formations

WANG Weitao

(Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China)

**Abstract:** In order to improve the penetration rate of PDC bits for drilling through heterogeneous formations and to extend the life of drill bits, a new type of PDC bit with a tapered auxiliary cutter has been developed. The bit uses a PDC cutter as the main cutting element, with the conical cutter and PDC cutter as auxiliary cutting elements. When the bit starts to work, the PDC cutter will break rocks in “shearing” mode. After the PDC cutter drills into the formation to some extent, the conical cutter starts to plow and cut the rock to generate cracks and induce local fractures, which helps the PDC cutter break the rock at a relatively low cutting force. The rear cutter of two adjacent blades are arranged with the conical cutter and the PDC cutter respectively, which is used for the rate of penetration to increase and efficiency improvement of the bit in the later stage. It incorporates the characteristics of stable rock breaking efficiency of conventional PDC bits as well as the advantages of high rock breaking efficiency of the conical cutter in heterogeneous formations. The bit has been through field testing in different regions. Testing results show that the new bit has longer drilling life and higher penetration rate than conventional PDC bits in drilling through heterogeneous formations. The successful development of the new type of PDC bit provided a new and efficient rock breaking tool for drilling through heterogeneous formations.

**Key words:** heterogeneous formation; tapered auxiliary cutter; PDC bit; rock breaking efficiency; Well Dingye 5; Well Zu 202-H1

PDC 钻头在均质地层中破岩效率高、使用寿命长, 在石油钻井中得到了广泛应用。然而, PDC 钻头在非均质地层中使用效果比较差, 主要原因是 PDC 切削齿抗冲击性和攻击性较差, 冲击损坏和破岩效率低容易导致 PDC 钻头的使用寿命短, 钻速慢。为了提高 PDC 钻头在非均质地层的破岩效率、

收稿日期:2017-11-01; 改回日期:2018-03-18。

作者简介: 汪为涛(1988—), 男, 江西九江人, 2011 年毕业于中国石油大学(华东)材料成型及控制工程专业, 工程师, 主要从事石油钻井 PDC 钻头设计及研究工作。E-mail: wangweitao682@slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“复杂地层钻井提速提效关键工具与装备研发”(编号: 2016ZX05021-003)部分研究成果。

延长使用寿命,技术人员针对非均质地层特点,在新型 PDC 齿、刀翼设计、布齿和水力参数等方面进行了诸多优化<sup>[1-5]</sup>。国外学者研究发现,机械振动是导致钻头失效和进尺少的主要原因,斯伦贝谢公司为了解决常规 PDC 钻头钻进时因振动而影响钻进效率的问题,研制了锥形聚晶金刚石复合片(CDE); Novatek International 公司的 D. R. Hall 等人试制出以锥形齿为主要切削元件的钻头<sup>[2]</sup>,在实验室里钻进 Sierro 花岗岩等岩石,钻进速度高达 21.33 m/h,表明新型锥形齿钻头具有极高的破岩效率。锥形齿作为主要切削元件的钻头在钻进初期破岩效率高,但是在长时间钻进非均质地层时,随着锥形齿的损伤,钻进过程中产生的岩脊不能被有效的破碎,导致破岩效率相对较低<sup>[6-7]</sup>。笔者结合锥形齿的犁削破岩机制和常规 PDC 钻头井底覆盖全面的优势,将 PDC

钻头和锥形齿钻头结合,设计了一种相邻 2 个刀翼的后排齿分别布置锥形齿与 PDC 齿的 PDC 钻头,并分别在黔北丁页 5 井和渝西足 202-H1 井的非均质地层进行了现场试验,表现出较高的破岩效率。

## 1 锥形齿破岩机理及特点

锥形齿的破岩方式与常规 PDC 齿的剪切式破岩相比既有相似之处,又有很大的不同。相似之处在于二者都是在轴向力和扭矩作用下连续旋转破岩,不同之处在于锥形齿是以前倾角的角度将岩石犁出沟槽,再从切向上将岩石剥离母体,同时在侧向上对岩石产生挤压破坏作用<sup>[8-9]</sup>,如图 1 所示。

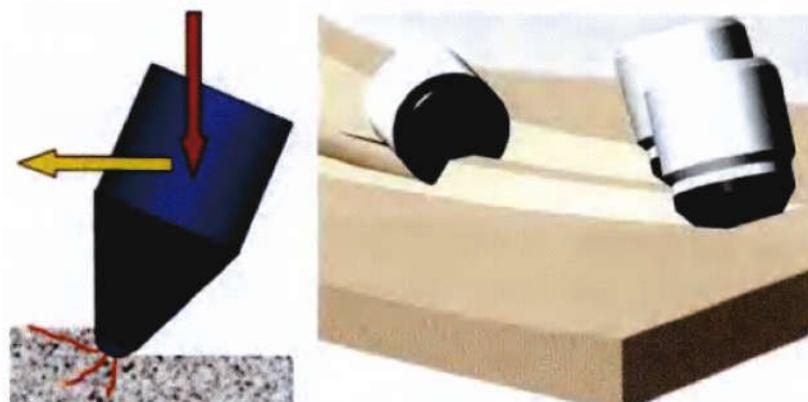


图 1 锥形齿破岩示意

Fig. 1 Schematic of rock breaking with conical cutter

锥形齿具有切向受力小的特点,在吃入深度相同的条件下,锥形齿受到的切向力约为复合片的一半。齿的切向力小,钻头旋转扭矩和扭转振动产生的冲击载荷就小,因此用锥形齿代替常规 PDC 齿,可以提高 PDC 钻头的抗冲击性能。

## 2 设计原理

PDC 钻头的破岩方式属于剪切破岩,而锥形齿钻头的破岩方式属于犁削破岩,因此,结合二者的特点和优势,设计适用于非均质地层的锥形辅助切削齿 PDC 钻头。

锥形辅助切削齿 PDC 钻头采用了 PDC 齿和锥形齿主辅切削元件混合的切削结构,且相邻的 2 个刀翼后排齿分别布置锥形齿与 PDC 齿。钻头后排齿均布置在 PDC 主齿之后(约 15.0~30.0 mm),锥

形齿出露高度比 PDC 主齿低 2.0 mm,PDC 后排齿出露高度比 PDC 主齿低 3.0 mm,钻进初期只有 PDC 主齿参与切削,当钻遇非均质地层时,由于前排主齿磨损或者受力载荷增大,锥形齿开始接触地层破岩,一方面降低了 PDC 齿上的钻压及扭转力,减小热磨损和冲击作用对 PDC 齿的破坏;另一方面锥形齿刻划犁削地层形成裂纹,PDC 齿随后切削已卸载内聚力的岩石,这时 PDC 齿所需的切削力远低于常规 PDC 齿切削地层时的力,因此可以以较低的扭矩切削岩石;锥形齿在钻进非均质地层后期,锥顶磨损后破岩效率降低。此时,相邻刀翼的 PDC 后排齿接触地层,一方面新复合片的切削刃非常锋利,有利于提高钻头钻进后期钻速,另一方面能够延长钻头的使用寿命。切削齿离钻头轴线越远,旋转钻进时线速度越大,承受的动载荷越大、热磨损速度越快,因而越容易损坏。因此,锥形辅

助切削齿 PDC 钻头在钻头鼻部外侧主切削齿后面布置锥形齿和普通 PDC 圆齿,不仅能提高破岩效率,还能起到保护 PDC 主切削齿的作用,延长 PDC 钻头使用寿命。

### 3 钻头设计

锥形辅助切削齿 PDC 钻头在钻进非均质地层时,钻头的切削结构方式、稳定性和地层适应性具有十分密切的联系<sup>[10]</sup>,因此针对非均质地层岩性特点,采用等磨损和等切削原则,在拟合 3 种基本轮廓理论曲线方程的基础上,结合钻头设计经验,进行了适用于非均质地层的 PDC 钻头个性化设计<sup>[11-12]</sup>。

#### 3.1 冠部剖面形状设计

冠部剖面设计为中等深度内锥结构(内锥角为 165°),双圆弧冠部轮廓和较大的冠顶半径(冠顶半径为 75.0 mm)。中等深度的内锥结构一方面能抵抗一部分钻头所受的横向力,保持钻头的稳定性;另一方面能确保定向钻进时钻头具有较强的侧向切削能力。双圆弧冠部轮廓剖面一是使钻头表面尽可能有效地布置切削齿;二是使钻头从鼻部切削齿到保径切削齿能够圆滑地过渡。较大的冠顶半径可以确保钻头在钻进非均质地层时切削齿受力较均匀,避免单齿受力过大而先期损坏。

#### 3.2 布齿设计

钻头前排齿的部分 PDC 切削齿(心部切削齿除外)设计分布在钻头冠部端面上不同的同心圆环上。这一径向布齿方式使钻头在钻进过程中产生不平滑的井底,PDC 切削齿在钻进中会撞击相邻的岩石凸起环带,产生一个与偏移方向相反的稳定力,从而提高钻头整体的稳定性。

钻头后排齿与前排主齿出露度关系为前排主齿>锥形齿>后排常规齿。该 PDC 钻头后排齿的布齿方式如图 2 所示。

#### 3.3 刀翼结构、切削齿参数及喷嘴设计

针对非均质地层特点,钻头的刀翼设计为稳定性较强的六刀翼结构(3 个长刀翼、3 个短刀翼),长刀翼与短刀翼相邻排列,不仅能提高钻头的稳定性,还能优化切削齿的分布。采用螺旋刀翼和螺旋保径设计,螺旋刀翼能降低钻头的回旋作用,提高钻头



图 2 锥形辅助切削齿 PDC 钻头三维模型

Fig. 2 Top view of the 3D model of the new type PDC bit

钻进非均质地层时的稳定性;螺旋保径能增加保径长度和面积,增大钻头与井壁接触面,提高钻头工作时的稳定性<sup>[13-15]</sup>。

PDC 钻头应用结果表明,Φ16.0 mm 复合片在非均质地层使用效果较好,所以锥形辅助切削齿钻头主切削齿选用 Φ16.0 mm 复合片。3 个短刀翼后排齿采用设计的锥形齿,3 个长刀翼后排齿采用常规的 Φ13.0 mm PDC 复合片。主切削齿从钻头中心向外方向依次采用 10°~20° 后倾角设计,以降低对钻头的冲击力。

锥形辅助切削齿 PDC 钻头的水力结构由 8 个 Φ12.0 mm 常规喷嘴组成,并利用模拟软件对钻进过程中岩屑翻移、运移、举升能力及钻头冷却与清洗情况进行分析,实现井底流场全覆盖。

### 4 现场试验

2017 年 3 月,在黔北丁页 5 井韩家店组和石牛栏组非均质地层中进行了 Φ11.1 mm 锥形辅助切削齿 PDC 钻头(PK6255SJZ 型钻头)现场试验;9 月,在渝西足 202-H1 井飞仙关组至茅口组非均质地层再次进行了锥形辅助切削齿 PDC 钻头现场试验。

#### 4.1 丁页 5 井

丁页 5 井是部署在川东南丁山构造的一口页岩气预探井,页岩气埋藏较深,地质条件复杂,地层压力系数变化大。该井的韩家店组、石牛栏组地层岩性以灰岩和泥岩为主,地层软硬交错频繁,属极不均质地层。采用常规 PDC 钻头钻进该段地层时钻头使用寿命短,钻进效率低,出井钻头磨损严重,切削齿的主要失效形式为冲击损坏。

丁页 5 井  $\varnothing 311.1$  mm 定向段首先应用进口钻头钻进, 钻进井段为 3 331.00~3 452.00 m(韩家店组), 进尺 121.00 m, 机械钻速 1.76 m/h, 起出钻头新度 60%; 随后下入新研制的 PK6255SJZ 型钻头, 钻进井段为 3 452.00~3 699.00 m, 后因钻具原因起钻, 钻头出井新度 90% 以上, 进尺 247.00 m, 平均机械钻速 3.23 m/h。该 PDC 钻头进尺与同井同层位进口钻头相比提高 104.1%, 机械钻速提高 83.5%, 较邻井丁页 4 井机械钻速提高 86.7%(见

表 1, 表中 HCM505ZX 型钻头为进口钻头)。

出井后的钻头检测结果表明, 钻头内锥有一颗齿发生齿崩, 说明该地层对钻头的冲击性强; 多颗锥形齿顶部磨损了 1.5 mm, 而前排齿完好。分析认为, 钻进非均质地层时锥形齿起到了辅助破岩的作用, 但其应力点集中, 锥顶位置金刚石含量低, 很容易受到磨损; 相邻刀翼的常规 PDC 后排齿完好, 既保证了钻进后期钻头的高效钻进, 也进一步保护了钻头。

表 1 丁页 5 井与邻井破岩效果对比

Table 1 Comparison of the rock breaking effects in Well Dingye 5 and that from adjacent wells

井号	钻头型号	钻进井段/m	钻进层位	进尺/m	平均机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )
丁页 5	PK6255SJZ	3 452.00~3 699.00	韩家店组, 石牛栏组	247.00	3.23
丁页 5	HCM505ZX	3 331.00~3 452.00	韩家店组	121.00	1.76
丁页 4	ES1655	3 341.00~3 465.00	韩家店组, 石牛栏组	124.00	1.73
丁页 2	T1355AB	4 052.00~4 246.00	韩家店组, 石牛栏组	194.00	1.49
丁页 2	T1355AB	4 246.00~4 317.30	石牛栏组	71.30	0.97

## 4.2 足 202-H1 井

PK6255SJZ 型锥形辅助切削齿 PDC 钻头在渝西大足地区足 202-H1 井飞仙关组、龙潭组和茅口组的砂泥岩及灰岩互层的非均质地层直井段进行了试验, 钻头钻进井段为 2 708.00~3 043.00 m, 进尺

335.00 m, 机械钻速 1.92 m/h, 起出钻头新度 90%。该只钻头进尺较邻井同层位进口钻头提高 44.4%, 机械钻速提高 47.7%, 创造该区块同层位单只钻头最高进尺及最高机械钻速 2 项纪录(见表 2, 表中 MM55DH 型和 MDS1716LUBPX 型钻头为进口钻头)。

表 2 足 202-H1 井与邻井破岩效果对比

Table 2 Comparison of rock breaking effects in Well Zu202-H1 and that from adjacent wells

井号	钻头型号	钻进井段/m	钻进层位	进尺/m	平均机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )
足 202-H1	PK6255SJZ	2 708.00~3 043.00	飞仙关组—茅口组	335.00	1.92
足 201	MM55DH	3 488.00~3 720.00	飞仙关组—茅口组	232.00	1.30
足 202	MDS1716LUBPX	2 990.00~3 165.00	飞仙关组、龙潭组	175.00	1.13

## 5 结论与建议

1) 锥形辅助切削齿 PDC 钻头既有 PDC 钻头破岩效率平稳的特点, 又有锥形齿钻头破岩效率高、抗冲击性能强的特点, 钻进非均质地层时既能延长钻头使用寿命, 又能提高破岩效率。

2) 现场试验情况表明, 锥形辅助切削齿 PDC 钻头能适应非均质地层破岩的要求, 机械钻速与常规 PDC 钻头相比大幅提高。

3) 建议根据实际地层情况、井型以及钻井参数等, 对锥形辅助切削齿钻头的布齿密度和前排

齿、锥形齿与后排齿等三者的高度差等进行进一步优化。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 邹德永, 郭玉龙, 赵建, 等. 锥形 PDC 单齿破岩试验研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1):122-125.  
ZOU Deyong, GUO Yulong, ZHAO Jian, et al. Experimental study on rock breaking of conical PDC cutter[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1):122-125.
- [2] 杨顺辉. 锥形 PDC 齿钻头的研制及室内试验评价[J]. 石油机械, 2015, 43(2):14-17.  
YANG Shunhui. Development and laboratory tests evaluation

- of PDC bit with conical cutter[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(2): 14-17.
- [3] 同炎, 管志川, 玄令超, 等. 复合冲击条件下 PDC 钻头破岩效率试验研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(6): 24-30.  
YAN Yan, GUAN Zhichuan, XUAN Lingchao, et al. Experimental study on rock breaking efficiency with a PDC bit under conditions of composite percussion [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(6): 24-30.
- [4] 孙源秀, 邹德永, 徐城凯, 等. 锥形聚晶金刚石复合片(PDC)齿与常规PDC齿破岩效果对比试验[J]. 科学技术与工程, 2015, 36(4): 159-162.  
SUN Yuanxiu, ZOU Deyong, XU Chengkai, et al. Contrast experiment on conical PDC cutter and conventional PDC cutter [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 36(4): 159-162.
- [5] 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. Novel PDC bit design to optimize its performance in multi-interbedded formation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(2): 31-34.
- [6] 邹德永, 孙源秀, 徐城凯, 等. 锥形齿 PDC 钻头台架试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 48-52.  
ZOU Deyong, SUN Yuanxiu, XU Chengkai, et al. Experimental study on bench test of stinger PDC bit[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 48-52.
- [7] 王福修, 田京燕. PDC 钻头稳定性技术研究[J]. 石油矿场机械, 2002, 31(2): 7-10.  
WANG Fuxiu, TIAN Jingyan. The technology study on PDC bit stability[J]. Oil Field Equipment, 2002, 31(2): 7-10.
- [8] 朱宽亮, 周岩, 胡中志. PDC-牙轮复合钻头在南堡油田大斜度井的应用[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(6): 60-64.  
ZHU Kuanliang, ZHOU Yan, HU Zhongzhi. Application of a PDC-roller hybrid bit in highly-deviated wells of the Nanpu Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(6): 60-64.
- [9] 豆宁辉, 杨顺辉. 锥形 PDC 齿破岩机理仿真研究[J]. 石油矿场机械, 2015, 44(11): 12-17.
- DOU Ninghui, YANG Shunhui. Simulation research of conical PDC cutter rock-breaking mechanism[J]. Oil Field Equipment, 2015, 44(11): 12-17.
- [10] 查春青, 柳贡慧, 李军, 等. 复合冲击破岩钻井新技术提速机理研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 20-24.  
ZHA Chunqing, LIU Gonghui, LI Jun, et al. The rock breaking mechanism of the compound percussive-rotary drilling method with a PDC bit[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 20-24.
- [11] 孙源秀, 邹德永, 郭玉龙, 等. 切削-犁削混合钻头设计及现场应用[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(1): 53-56.  
SUN Yuanxiu, ZOU Deyong, GUO Yulong, et al. Design and field application of plow-cutting PDC bit[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(1): 53-56.
- [12] 柳贡慧, 李玉梅, 李军, 等. 复合冲击破岩钻井新技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 10-15.  
LIU Gonghui, LI Yumei, LI Jun, et al. New technology with composite percussion drilling and rock breaking[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 10-15.
- [13] 邓勇, 陈勉, 金衍, 等. 冲击作用下岩石破碎的动力学特性及能耗特征研究[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 27-32.  
DENG Yong, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Investigation of the dynamic characteristics and energy consumption for breaking rocks using the impact load [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 27-32.
- [14] 刘亚军, 王晓鹏, 王昆剑, 等. 绥中 36-1 油田新型钻头的优化设计及应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(5): 669-671.  
LIU Yajun, WANG Xiaopeng, WANG Kunjian, et al. Optimization design and application of new drill bit in SZ 36-1 Oil-field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(5): 669-671.
- [15] 关舒伟. 新型孕镶金刚石钻头研制及试验[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 129-132.  
GUAN Shuwei. Development and testing of a new type of diamond-impregnated bits[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 129-132.

[编辑 滕春鸣]