

# 国际油气井钻头进展概述(四)

## ——PDC钻头发展进程及当今态势(下)

左汝强

(国土资源部,北京100812)

**摘要:**近年来,非平面PDC切削齿,如浅凹面PDC齿、Stinger毒牙中心锥形齿、Stinger毒牙刀翼锥形齿、AxeBlade斧式脊形PDC齿和StayCool保持冷却PDC齿等制造的钻头,逐步在油气钻井中得到有效的应用。这些钻头能够以较高的钻进效率和工作寿命钻进某些硬岩和研磨性地层。为了满足水平钻井,特别在页岩气水平井中能够强力排除岩屑,并具有优良的钻井导向性能,国际著名公司推出了许多新型钻头,如ONXY II矛式PDC钻头、Seeker导向PDC钻头、CounterForce反力PDC钻头、Speed快速PDC钻头等用于当代油气钻井,取得了良好的效果。文章还介绍了Defyer DPA套管钻头与CuttPro PDC防剪切保护帽。提出了以下建议:继续深入研究PDC钻头,以提高其性能,更好地满足油气钻井的要求;组合化钻头是油气钻头发展的重要趋势;比金刚石性能更好的钻头切削材料有可能今后发现或合成,可用于制作更佳钻井钻头;我国钻头企业需重组和发展壮大;各种钻头技术创新应该加强。

**关键词:**非平面PDC切削齿;斧式脊形PDC齿;防泥包涂层;导向PDC钻头;PDC防剪切保护帽;单钻头钻井  
**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>1;TE921<sup>+</sup>.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)04-0040-09

**International Advancement of Drilling Bits for Oil and Gas Well (4)—PDC Bits Progress and Present Trend (II)/ZUO Ru-qiang** (Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Beijing 100812, China)

**Abstract:** New bits with non-planar face PDC cutters, including shallow recessed cutter, Stinger central conical element, StingBlade element, AxeBlade ridged diamond element and StayCool diamond element, have gradually been introduced in oil and gas drilling in recent years. Those bits could drill some hard and abrasive formations with propriety ROP and durability. To meet the demands for powerful removal of cuttings and excellent steering for horizontal drilling, especially in shale well, ONXY II Spear PDC bits, Seeker Directional PDC bits, CounterForce PDC bits, Speed Double Diameter PDC bits etc. Launched by International famous companies for oil and gas drilling worldwide at present. Newly developed Defyer DPA drillable casing bit and CuttPro cutter shearing caps for PDC are also mentioned in the paper. Summary (total 4 articles): (1) PDC bits should be continued deeply developed to meet requirements for oil and gas field perfectly. (2) Hybridization of bits is a trend in oil and gas well drilling. About 7 types of hybrid bits are introduced in the paper. It is just a beginning. More category's hybrid bits would be developed and applied in oil and gas drilling in future years. (3) Some super-hard materials, which could be better used as cutters for well bits compared with diamond, might be discovered or synthesized later. (4) The bits enterprises should be reorganized and grown up, as well as technical innovations for drill bits must be strengthened in China.

**Key words:** non-planar face PDC bits; AxeBlade ridged diamond element; anti-balling coating; steering PDC bits; CuttPro shearing caps for PDC; Single-bit Well

页岩气勘探开发促进了水平井钻井更加广泛的应用。至今,美国水平井钻井数量已超过全部油气钻井数的40%。而且,水平井钻井的最大测量深度早在2009年底就超过垂直井和定向井,首先达到13000 m。但是,水平井钻井,特别在页岩气地层中

钻进水平井段存在两大问题:一是页岩钻进中常规PDC钻头易产生泥包,并且在钻进过程中岩屑在井眼下侧和底部沉积,促使钻进效率降低,引起烧钻甚至卡钻事故;二是水平井的3个井段(垂直、曲线和水平)都需要严格控制钻井方向,特别在水平井段

收稿日期:2016-03-28

**作者简介:**左汝强,男,汉族,1941生,国土资源部咨询研究中心原咨询委员,教授级高级工程师,探矿工程专业,曾从事钻孔弯曲测量与定向钻进科研及科技管理工作,现进行国际油气钻井技术、国际科学钻探发展态势研究,北京市海淀区北三环中路77号24楼1003室(100088), zrq1941@sina.com。

因钻具侧向振动使井眼偏离。运用普通的 PDC 钻头,对井眼的定向能力差,对工具面向角难以控制,可能造成钻井严重弯曲。因此,近年来国际知名油服公司、钻井公司等大力研发新型油气井 PDC 钻头,以解决上述 2 个问题。同时,对常规油气钻井和页岩气钻进中的基本要求,如在钻进硬岩、研磨性强与坚韧夹层等难钻地层中提高钻进效率,增加钻头使用寿命等也进行了深入的研究,开发出种类繁多、性能优异的新型 PDC 钻头。

## 1 适用于硬岩、研磨性地层的新颖异形 PDC 切削齿钻头

### 1.1 浅凹面 PDC 切削齿及其钻头

传统平面 PDC 切削齿钻头发展 40 余年来,目前应用于中硬,甚至某些硬岩中钻进效率和使用寿命都取得了很大成效。但是在钻进坚硬地层、含坚韧岩脉夹层等地层时却很困难。贝克·休斯公司经研究试验,采用改变传统 PDC 切削齿的平面几何形状,运用独特的浅凹面 PDC 切削齿(图 1)制作钻头,可在上述难钻地层取得高效耐用的效果。其原因在于此凹面切削齿聚晶金刚石层较厚,使其具有较高的强度和抗冲击韧性,可承受切削坚韧夹层时的强烈振动。而凹面 PDC 切削齿也利于产生较大颗粒的岩屑。实际应用表明,运用这种新型浅凹面 PDC 齿制作的钻头在页岩气田硬软互层的页岩和砂岩钻进,可提高钻进效率 21%,并显著提高钻头寿命<sup>[1]</sup>。



图 1 凹面 PDC 切削齿

### 1.2 配置 Stinger 毒牙中心锥齿的 PDC 钻头

#### 1.2.1 中心锥齿 PDC 钻头的优点

斯伦贝谢下属 Smith Bits 公司多年来致力于研发可应用于多种地层,且对井孔中心岩石高效破碎的钻头,近年研发出镶有 Stinger 毒牙中心锥齿的

PDC 钻头(图 2)<sup>[2]</sup>。顾名思义,毒牙(Stinger)寓意该中心锥齿既尖锐又致命,可碎裂顽石。



图 2 Stinger 毒牙中心锥齿 PDC 钻头

因空间限制,常规 PDC 钻头在其端面中心只配置 2~3 个 PDC 齿破碎井底中心岩石。由于钻头中心切削齿回转速线速度较低,剪切碎岩效率很低。在钻进地层、特别是硬地层时,井底中心残留的圆岩柱,会造成钻进效率低,引起破坏性横向振动,促使 PDC 切削齿损坏,从而需频繁提钻换钻头,浪费时间。在钻头中心配置锥形 PDC 齿,以一种强力点载荷来压裂破碎这个孤立圆岩柱,却是比用切削方式容易得多。

Smith Bits 公司的中心锥形 PDC 齿选用高品质人造金刚石材料制造,具有很高的抗冲击强度和超强的耐磨性能,并且其 PDC 聚晶金刚石层比常规 PDC 要厚(高)得多,这种锥形切削齿足以胜任破碎井底中心坚硬岩柱的任务。此外,公司还进一步设计完善了钻头的整体切削结构。仿真试验测量了 PDC 钻头在增加中心锥齿之后的效果。试验表明,在页岩、石灰岩和砂岩等地层中可提高钻进效率 10%~15%。

除了提高钻进效率和钻头寿命外,安置中心锥齿的 PDC 钻头对钻头具有“定心”作用,使钻头在钻进中减少了与井壁的间隙,从而井底钻具组合具有良好的稳定性,不易发生侧向振动,保持井孔方向。此外,中心锥齿还能产生很大的岩屑,提供地质人员作更精确的地层评价。

#### 1.2.2 在页岩气钻井中的应用

##### 1.2.2.1 在美国 Bakken 页岩气田水平井段应用

某钻井承包商致力于用一个钻头以最大的钻速和稳定性,在目标储层内钻进 2743 m 侧向水平井段,以避免多次提钻更换钻头。选用了 6 in(Ø152.4 mm)6 刀翼配置 13 mm PDC 齿、镶有中心锥齿的钻头进行试验。首日,只用一个回次就钻进了 885 m,

这是该钻井公司历史上在 1 d(24 h) 内所钻最长的进尺数。用同样的钻头继续钻进,在 4.25 d 内,以 29.7 m/h 的平均钻进效率,钻进了 2909 m 的整个水平井段,又创造了该公司的记录。

该公司将钻机搬迁至 20 英里(约 32 km) 外的另一试验井,使用 6 in 镶有中心锥齿的 PDC 钻头钻进水平井段。该钻头又只用一个回次以破记录的钻进效率,钻进了 2936 m。提钻取出钻头检查,只在钻头外肩部发现轻微磨损,而中心 PDC 锥齿却仍有效无损。

#### 1.2.2.2 在美国 Bakken 页岩气田垂直井段应用

Bakken 页岩气田另一钻井公司选用 8 in ( $\varnothing 222.25$  mm) 配置高抗磨性 16 mm PDC 齿,并镶有中心锥齿的钻头,以 51.2 m/h 的平均钻进效率,61.9 m/h 的最大钻速,成功地钻进了 1892~1974 m 的垂直井段。与用其它钻头在相同钻井中以平均 35 m/h 的钻进效率相比,这种具有中心锥齿的 PDC 钻头的钻进效率提高了 45%。

### 1.3 StingBlade 毒牙刀翼 PDC 钻头<sup>[3]</sup>

#### 1.3.1 碎岩机理及优点

锥形 PDC 齿不但可以镶嵌于钻头中心破碎井底中心岩柱,也可与常规 PDC 切削齿相结合,配置于整个钻头端面对井底作全面破碎。StingBlade 型 PDC 钻头(图 3)是将常规 PDC 齿放置于刀翼上前排,其后排配置锥形 PDC 齿。这实际上也是一种组合式钻头,有些类似于 Pexus 组合钻头<sup>[4]</sup>,即不同几何形状的 PDC 切削齿相组合。这 2 种 PDC 切削齿具有不同的碎岩机理,也即有不同的碎岩功能。常规平面 PDC 齿以切削方式破岩,而具有超厚聚晶金刚石表层的锥形切削齿,则可以对地层施加很大的点载荷,形成犁式破岩机理,有利于硬岩破碎。2 种碎岩机理综合作用的结果,提高了碎岩效果,从而就提高钻头在地层,特别是硬地层中的钻进效率,也增加了



图3 StingBlade 毒牙刀翼 PDC 钻头

钻头的耐用性。

#### 1.3.2 应用效果

在巴西近海盐下油田,运用 12 ¼ in ( $\varnothing 311.15$  mm) StingBlade 毒牙钻头钻进储油层。该储层主要由硬质碳酸盐组成,并含有部分硬质硅酸盐结节。钻进中施加钻压超过 345 MPa (5 万 lb/in)。运用这种新型钻头,只使用一个钻头就钻完了整个井段。与邻井相比,进尺提高了 25%,钻进效率超过 11%,还节省了大量钻头费用。

StingBlade 毒牙 PDC 钻头已经在世界上 39 个国家的 1400 多口井进行了现场应用,包括在北美和南美地区近海与陆地钻井、非常规油气田钻井、俄罗斯和中东地区硬质灰岩钻井等。到目前为止,这种新型钻头已经完成了超过 160 万 m 的钻井总进尺。

### 1.4 AxeBlade 斧式脊状 PDC 钻头 (AxeBlade ridged diamond element bit)

斯伦贝谢公司于 2016 年 3 月 1 日正式宣布由其 Smith Bits 公司推出斧式脊状 PDC 钻头(图 4)<sup>[5]</sup>。

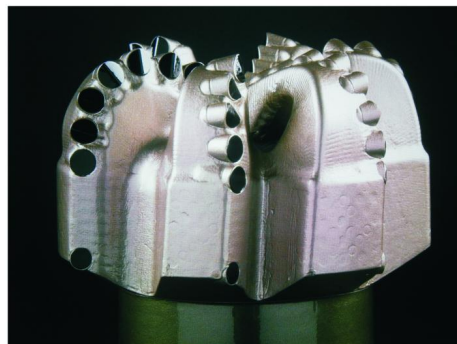


图4 AxeBlade 斧式脊状 PDC 钻头

#### 1.4.1 破岩机理

该钻头端面镶有新型斧式脊状聚晶金刚石 PDC 切削齿,形似斧刃或山脊状。这种奇异的斧式 PDC 切削具,在井底首先以斧刃下端接触岩石,以强力点载荷侵入岩石,将常规 PDC 钻头的剪切、牙轮钻头的挤压以及锥形齿的点载荷压裂等几种碎岩机理综合一起,所需的切削力可降低 30%。所以,该新型钻头能够在很宽范围内的地层中提高钻进效率,并在定向钻井中具有良好的导向效果。

#### 1.4.2 应用效果

该斧式脊状 PDC 钻头已在现场进行了多次试验和应用,至今钻井总进尺已达 60960 m。在南德克萨斯的油田的应用中,该钻头从垂直井开始造斜



至水平方向,并继续侧向钻进 1093 m 的水平井段终孔。其钻进效率比邻井提高了 29%<sup>[6]</sup>。

### 1.5 StayCool 保持冷却波纹面 PDC 钻头

贝克·休斯公司研发的 StayCool 波纹面 PDC 切削齿将超级耐磨金刚石、新颖界面设计与波状轮廓聚晶全金刚石层顶面相结合,可有效地降低 PDC 齿的表面摩擦力。所制钻头在钻进中可保持切削齿始终锋利,降低机械比能。实验室检测,此 StayCool 波纹面 PDC 在钻进时产生的热量比普通 PDC 要减少 20%。

该新型钻头在美国俄克拉荷马州的 Woodford 硬砂岩和硬石灰岩互层中钻进,将钻进效率提高了 10%,进尺增加 37%,从而降低了单位进尺成本。StayCool 波纹顶面 PDC 钻头在美国为 20 多家客户、5 个油气田完成了 89 次钻井作业,钻井进尺超过 8.8 万 m。

## 2 适用于页岩气开发、水平井钻井的新型 PDC 钻头

### 2.1 ONYX II 矛式 PDC 钻头

ONYX II 矛式 PDC 钻头是斯伦贝谢 Smith Bits 公司推出 ONYX 玛瑙 PDC 钻头系列的另一产品。该钻头称为矛式(Spear)寓意其碎岩尖锐锋利,并能对准钻井前行方向。自 2011 年 3 月该新型钻头商品化之后的一年时间内,已在北美、南美、欧洲与亚洲完成超过 4000 个钻井回次的应用<sup>[7]</sup>。之后,公司继续深化研究提高该钻头性能。新一代的矛型钻头产品强化了 2 个方面的研究:(1)优化钻头水槽设计,使岩屑以最低阻力流向环状空间;(2)研发新型优质 ONYX 玛瑙切削齿。

#### 2.1.1 ONYX II 矛式 PDC 钻头的特征

##### 2.1.1.1 优化钻头水槽设计及钻头覆盖防泥包涂层

(1)这种矛式钻头具有宽而深的水槽,以及弹头凸状外形,有利于钻井液快速流动并将岩屑冲扫到环空去。图 5 为工程师在现场检查 ONYX II 4 刀翼矛式 PDC 钻头。

(2)钻头钢体上覆盖一种“防泥包涂层”(anti-balling coating),使钻头特别适用于在页岩气田粘塑性地层(如中东)中钻进。这种表面省涂覆材料用电化学技术粘结到钻头外表面,具有将钻头钢体的导电性转变为负电荷的特性。当钻井中使用水基



图 5 工程师在检查 ONYX II 4 刀翼矛式 PDC 钻头

泥浆时,其浆液中的颗粒为负电荷。根据同电性相斥原理,钻进中钻头体就将泥浆中的固体颗粒强力排斥到环空去,从而就不易形成泥包。同时,由于井底清洁,钻进效率也大为提高。

##### 2.1.1.2 研发应用新型优质 ONYX 玛瑙切削齿

ONYX II 矛式钻头的 PDC 齿采用经高温高压合成的优质金刚石制造。这种新材料在保持抗冲击韧性的同时可提高抗磨性。

新设计的矛式钻头于 2011 年第四季度开始在阿根廷、波兰、德国、加拿大和中国等国家应用。

##### 2.1.1.3 具有良好的钻进稳定性和造斜能力

该矛式钻头选用较小尺寸的 PDC 切削齿(11 mm 和 13 mm),钻进中切深不大,不会因摩阻大引起钻头扭振;对 PDC 齿在钻头唇面上进行合理布局,以保证其钻进的稳定性。

在定向钻进中,因矛式钻头刀翼较短,在井下便于偏转。同时在配置井底钻具组合时,使弯接头与矛式钻头之间的长度减短,便于变换钻头方向,从而提高钻头的造斜能力。

#### 2.1.2 ONYX II 矛式钻头的应用

(1)在美国路易斯安那州 Haynesville 页岩气田应用。2013 年初,运用  $6\frac{3}{4}$  in( $\varnothing 171.45$  mm)的 ONYX II 钻头以 12.2 m/h 的钻进效率,钻进 1945 m,比油田原先所用常规 PDC 钻头钻进效率提高 40%。

(2)在美国 Marcellus 页岩气田应用。Smith Bits 公司运用其 IDEAS 综合钻头设计实验平台(可对井底钻具组合每个单元进行 4D 模拟),研制了 4 刀翼

ONYX 矛式 PDC 钻头。2011 年末,该新型 4 刀翼  $8\frac{1}{2}$  in ( $\varnothing 215.9$  mm) 的矛式钻头用于美国 Marcellus 页岩气田,以时效 42.1 m, 42 h 钻进了 1757 m。该钻头在钻进中还具有较好的稳定性,可保持准确的工具面向角。图 6 为 Smith Bits 公司在 IDEAS 综合设计实验平台作钻头水力学效应研究。

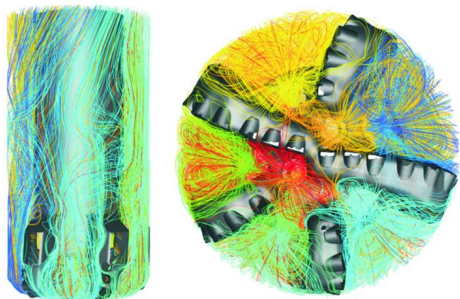


图 6 史密斯钻头公司 IDEAS 实验平台评估钻头水力学效应

## 2.2 SteelForce 钢力钻头

钢力钻头由哈里伯顿 (Halliburton) 公司研发,于 2011 年 11 月推入市场,期待其在页岩钻进中具有较高效率。该钻头主要应用于多泥岩的 Haynesville 页岩气田。SteelForce 钢力钻头不易形成泥包源于 2 项技术:(1) 钻头上布置了许多微型喷嘴,使井底冲洗干净;(2) 钻头钢体上覆盖了一层如前所述的防泥包涂层,能强力排斥井底岩屑至环空中去。该钢力钻头已广泛应用于全美陆地钻井,墨西哥湾近海,以及中东油气田等地<sup>[7]</sup>。

具有良好的排除岩屑功能,并使钻头在井底能保持稳定性和导向性,适用于页岩气地层钻进的钻头,还有贝克·休斯公司的 Talon (鹰爪) 钻头系列等。

## 2.3 Seeker 导向 PDC 钻头

该导向钻头由 NOV 公司下属 ReedHycalog 公司推出<sup>[8]</sup>。其 Seeker 含有自我制导之意,即钻头具有导向能力。

### 2.3.1 Seeker 导向 PDC 钻头特点

(1) Seeker 导向 PDC 钻头(图 7)镶嵌 Helios 太阳神热韧性聚晶金刚石 PDC 齿。该 PDC 齿采用高密度优质聚晶金刚石材料,运用深滤钻工艺专利技术制造,具有极高的热稳定性,所制钻头钻进效率高、寿命长。

(2) 针对用户所钻地层、井身结构、匹配的动力钻具和井底钻具组合,对钻头进行个性化设计,来确定钻头的结构、外形、几何尺寸及 PDC 齿的选用与

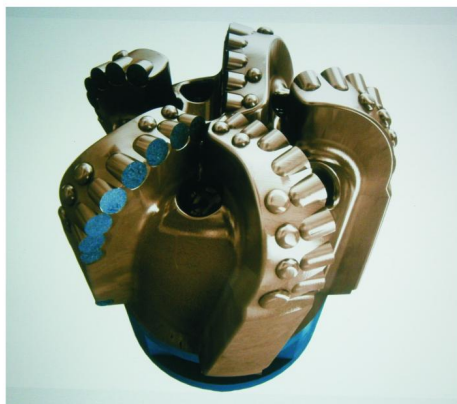


图 7 Seeker 导向 PDC 钻头

布局等,使钻头性能达到最优。

### 2.3.2 Seeker 导向 PDC 钻头应用效果

2011 年二季度,在挪威 Troll 油田含坚硬方解石脉的中—粗粒砂岩地层中,用  $8\frac{1}{2}$  in Seeker 导向 PDC 钻头配合旋转导向钻具,成功地不提钻一次钻成一口主井,及侧钻出 3 个裸眼分支井,总进尺达 4827 m,创造了油田钻头寿命新记录<sup>[9]</sup>。在美国德克萨斯—油气田的石灰岩、砂岩、泥岩交错地层中,运用  $8\frac{1}{2}$  in Seeker 导向钻头与螺杆钻具匹配使用,创造了井下钻至造斜点的最快记录,平均进尺 1957 m,平均钻进效率 60.6 m/h,提高钻速 20%。

## 2.4 CounterForce 反力 PDC 钻头

### 2.4.1 抗扭振机理及特点

在定向钻井中,井底不受限制的侧向力引起的剧烈振动会严重影响或破坏钻井作业。除了降低钻速,失去井眼方向控制,使总钻探效率低下外,井底钻具组合(BHA)的扭振会造成许多不良后果,如切削齿断裂、钻头磨钝、多次提钻,以及破坏地层等。

为解决井下由振动引起相关的问题,Ulterra 钻井技术(Ulterra Drilling Technologies)公司研发了切削齿定向设计的反力 PDC 齿,已申请专利。其特征是反向安置的 PDC 齿能够缓冲侧向振动、改善机械比能,减少钻头反扭矩,并调整作用力重新指向岩石(图 8)。

通常,钻进时一旦井底钻具组合产生强烈作用力会引起钻头侧向运动,使切削具不能破碎其前方岩石,而将此运动能量作无效的损耗;而反力切削齿钻头则能将侧向能量转变为破岩能量,向前钻进。同时,以倾斜方式镶嵌的 PDC 切削齿能将固体岩屑强行排至水口、水槽,使井底更加干净,显著地提高



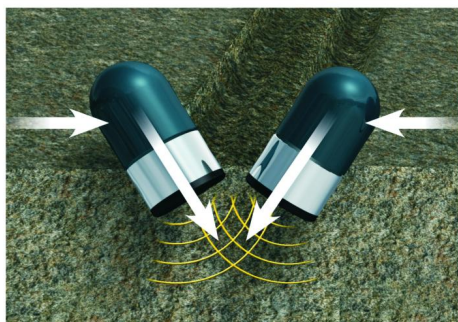


图8 CounterForce 反力 PDC 钻头一对切削齿碎岩示意

钻进效率。

#### 2.4.2 CounterForce 反力 PDC 钻头油田应用

CounterForce 反力 PDC 齿钻头(图9)自2013年4月推出以来,已钻进超过450万m的进尺。其应用从美国、加拿大直到拉丁美洲、澳大利亚、中东、北非和亚太地区。

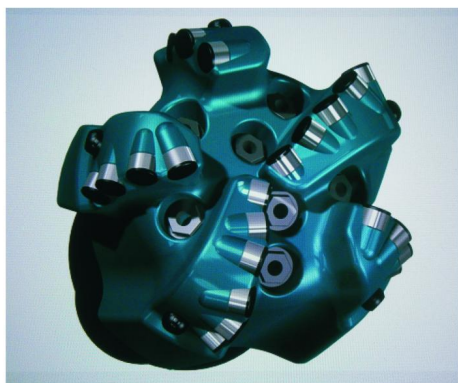


图9 CounterForce 反力 PDC 钻头

##### 2.4.2.1 在中东的应用

在中东,已用此种新型 PDC 钻头取代原先占主导地位的牙轮钻头。除了在某些情况下能提高钻进效率100%外,这种反力 PDC 钻头最大的优点是,能够钻进用常规 PDC 钻头始终应付不了的地层。

在阿曼,某钻井公司采用传统机械式钻机配用牙轮钻头钻进12¼ in 地表孔时,遇到井内钻具横向剧烈振动的问题。由于钻机功率不足以及缺少交流变频或液压顶驱钻机的优越性能,对于井下钻具组合的振动难以控制。几次试用常规 PDC 钻头,由于井下产生大扭矩,机械转盘难以应付。后来,选用Ulterra公司5刀翼16 mm反向PDC切削齿的U516S钻头。在首次下井,钻进600 m井段,钻进效率为57 m/h,比牙轮钻头30 m/h的平均钻进效率提高90%。第二个回次,以62 m/h的钻进效率钻

完余下井段。

同样的情况发生在中东另一大钻井公司在海上所钻12¼ in的定向井。在很近的一口邻井钻进效率为12~15 m/h。选用反力 PDC 钻头第一回次钻进600 m井段,钻进效率为25 m/h,比邻井提高了100%。其结果是节约了9 h钻井时间,相当于节约成本75000~80000美元。因此,该钻井公司决定此后全部选反力 PDC 钻头取代原用的 PDC 钻头<sup>[10]</sup>。

##### 2.4.2.2 在美国的应用

在德克萨斯州南部油田,将该 CounterForce 反力 PDC 钻头安装在威德福公司的旋转导向系统上,以解决井下钻具振动问题。首先,井下钻具从表层套管下部开始钻进,经过曲线和水平2个井段,直钻至总井深处,仅一个回次就完成钻井任务。所用 CounterForce U516M 钻头与该地区所用其它 PDC 钻头相比,其平均钻进效率提高了10%,起下钻时间减少了32%<sup>[3]</sup>。该 U516M 型号的钻头,在2015年共下井钻进41次,性能表现优异。

另外,在同地区施工的4口井中,在3口井的旋转导向系统上配置了 CounterForce U516M 钻头,另一口井配用的是常规 PDC 钻头。实际钻进表明,与邻近井相比,运用 CounterForce 反力 PDC 钻头钻进遇到粘-滑(slip-stick)时间下降35%,平均钻速提高了27%,作业时间平均减少了13 h。

CounterForce 反力 PDC 钻头因其性能优异,荣获2013年世界石油奖之一——最佳钻井技术奖。该奖项为美国《世界石油》杂志组织,由9名业界知名专家组成顾问委员会,经过3个多月严格筛选,共评出16个奖项。

## 3 新颖 PDC 钻头

### 3.1 Speed 快速双径 PDC 钻头

#### 3.1.1 火山硬岩与施工环境的需求

2012年,法国道达尔 E&P(TOTAL E&P)英国分公司,计划在北大西洋设得兰群岛西部的 Tomintoul 油气田钻一口勘探井。除了施工位置偏远与极寒气候条件外,还有技术上的挑战,即储层之上为火山岩地层,不但坚硬、研磨性高,而且极易引起钻进时井下钻具的振动,使钻头难以控制方向。因此要求提供一种高效破碎硬岩的钻头,并配置稳定性和导向性良好的井底钻具组合,实施高速优质钻井,达到缩短海上施工周期,节约成本和保证安全的目的。

### 3.1.2 新型钻头钻进机理及在 Tomintoul 油气田的应用<sup>[11]</sup>

为完成此项任务,道达尔公司总结从双中心钻头应用中取得的大量经验,研发出这种同心、两级、双径的 Speed 快速 PDC 钻头(图 10),并与低转速、大扭矩螺杆钻具等配置成井底钻具组合,提供钻头足够的能量,良好的稳定性和耐用性,来钻进包含极难钻进火山岩在内的整个井段。

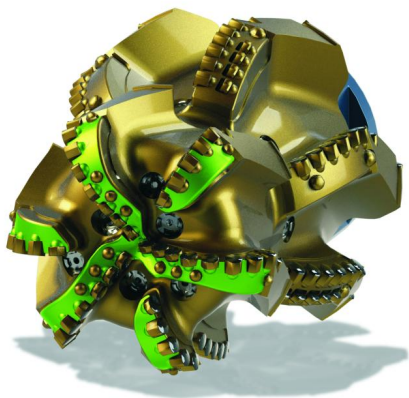


图 10 Speed 快速双径钻头

由 NOV 公司研发的 Speed 快速双径钻头包括钻头和扩孔器,钻进中它首先钻一个  $9\frac{1}{8}$  in ( $\varnothing 247.65$  mm) 较小的导向孔以释放围岩应力,接着扩孔器扩大井眼至所需  $12\frac{1}{4}$  in 的井径。

在 Tomintoul 油气田应用中,运用快速双径钻头及其井底钻具组合,以 9.25 h,完成了在坚硬火山岩地层勘探井井段的钻进。在  $12\frac{1}{4}$  in 的井段,用此新型钻头以 11 m/h 的平均钻进效率,钻进超过 1000 m。在穿越其中 30 m 厚橄榄玄武岩时钻进效率在 1~10 m/h 范围内。这种钻头从其碎岩过程及外形来看,也是一种组合式钻头。普通钻头与井眼的接触面只有 50%,而这种钻头+扩孔器的组合 PDC 钻头与井眼的接触面近于 100%,从而具有很好的导向性和稳定性。所以,该钻头在这次坚硬研磨性强的火山岩应用中,钻进效率和钻井轨迹控制均达到预期的效果。

### 3.2 Defyer DPA 铝刀翼支撑体套管钻头

威德福(Weatherford)公司于前两三年研发的 Defyer DPA 套管钻头,用于美国墨西哥湾墨西哥比海谷深水套(衬)管钻井(DwL, Drilling with Liner)<sup>[12]</sup>。该套管钻头钢体连同刀翼支撑体(图 11,白色部件)由铝制造,镶有常规 PDC 切削齿的钢制刀

翼(红色部件)则用机械方式固定在铝支撑体上。该新型结构 PDC 钻头与全钢合金钻头相比,可减少使用 80% 的钢材。Defyer DPA 套管钻头设计用于抗压强度 172 MPa 的岩层。其喷嘴可在野外更换。2009 年,威德福公司的 Defyer DPA 套管钻头在俄罗斯西伯利亚西北雅马尔省冻土带(北极圈内)的天然气管,用于套管钻井(DwC),获得很大成功。该套管钻井技术与装备于次年的“俄罗斯油气工业工具和设备论坛”上荣获“油田服务奖”。



图 11 Defyer DPA 铝刀翼支撑体套管钻头

### 3.3 CuttPro 切削齿防剪切保护帽(CuttPro shearing PDC caps)

#### 3.3.1 用途

为了保护 PDC 切削齿在钻水泥塞作业时不受损伤,Varel 公司研发了 CuttPro 切削齿防剪切帽<sup>[13]</sup>,其上有硬质合金切削刃,起保护和初次切削作用(图 12)。该 CuttPro 保护帽产品于 2015 年在伦敦召开的美国石油工程师协会/国际钻井承包商协会(SPE/IADC)钻井大会上推出。这种保护帽可以安装在任何标准的 PDC 切削齿上,方便用户针对拟钻岩层选用最佳的 PDC 钻头。在钻套管钻头时,首先由硬质合金保护帽钻出,在进入岩层前它即被磨损完毕,接着便由 PDC 钻头接替它向前钻进岩层。



图 12 CuttPro 防剪切 PDC 保护帽

#### 3.3.2 应用效果

2014年8月,安置CuttPro防剪切保护帽的12 1/4 in的Raider PDC钻头,在Gabon's DIGA油田进行了生产试验,并与常规钻头作性能对比。附近有5口邻井,用两家钻头公司提供的4个PDC钻头和1个牙轮钻头钻进相似的井段。用安置保护帽的钻头以14.1 m/h的平均钻进效率,用了3 h钻出水泥塞;而邻井用的其它钻头则以9.5 m/h的平均钻进效率,用了5.4 h。

Varel公司期望将CuttPro防剪切保护帽广泛推广,运用到更多油气田PDC钻头钻水泥塞的作业中去。

#### 4 总结和建议

《国际油气井钻头进展概述》一文共4篇(连载)。全文先后介绍了3种最新推向市场的典型的组合式钻头;PDC钻头44年的进展历程;当今国际上应用的约12种新型和新型PDC钻头(其中4种也可属于组合式钻头)。现对此进行总结并提出相应的建议。

(1)国际上PDC钻头近10多年来发展极为迅速,钻进性能日趋完善,类型品种日益增多,可以满足大部分地层油气钻井的要求。因此,目前PDC钻头在世界油气市场所占份额已达80%,其进尺数已占世界钻井总进尺比例超过90%<sup>[9]</sup>。但是,PDC钻头的发展并未到顶,还需进一步地改进提高。今后还应继续在PDC切削齿的材质、形状、尺寸,与在钻头上的配置,以及钻头的外形、结构、水眼、喷嘴,和制造工艺等方面深入研究,开发出性能和质量更加优良的PDC钻头,满足现代油气水平钻井、延伸井、以及高温高压超深井的需要。

从材料性能和切削原理上看,PDC钻头毕竟有其局限性。对于极硬、强研磨性及其它若干难钻地层,PDC钻头终归不能完全胜任。对于这些地层,除了运用表镶金刚石钻头、孕镶金刚石钻头等等外,近年来诞生的组合式钻头是一个重要的开拓和选择。另外,对于今后可能出现的新型超硬材料制作的钻头,我们是应当期待并努力去争取的。

(2)以PDC切削具与其它类型切削具结合的组合式钻头,以及在结构、外形与材料等方面不同组合的钻头已成为国际上油气井钻头发展的重要趋势之一<sup>[4]</sup>。《国际油气井钻头进展概述》(4期连载)共介绍了约7种近五六年来推向市场或已实际应用的

组合式钻头:Kymera组合式钻头(PDC+牙轮)<sup>[14]</sup>、FuseTek融合钻头(PDC+孕镶金刚石柱齿)<sup>[4]</sup>、Pexus组合式钻头(PDC+硬质合金)<sup>[4]</sup>、ONYX360滚动PDC钻头(固定PDC+滚动PDC)<sup>[9]</sup>、Sting-Blade毒牙刀翼PDC钻头(平面PDC+锥形PDC)<sup>[3]</sup>、Speed快速双径PDC钻头(钻头+扩孔钻头)<sup>[11]</sup>,以及Defyer DPA铝刀翼支撑体套管钻头(铝钻头体+钢刀翼)<sup>[12]</sup>等。

这些组合式钻头比传统PDC钻头的性能显著提高:钻进范围扩大到一些硬岩、研磨性及难钻硬软互层等;显著的提高钻进效率,使用寿命成倍增加;一个回次以不同切削具先后钻进不同岩性地层;具有良好的稳定性和导向性,严控钻井方向,等等。然而,这些组合式钻头主要出现在近四五年内,还只刚刚开始。今后,组合式钻头无论在类型品种,还是性能指标方面都还有很大的发展空间。我国油气钻井、地质钻探领域相关企业公司、科研院所和高等院校应该重视并加强对组合式钻头的研发应用。

(3)页岩气勘探开发推动了整个钻井技术和装备的发展,包括PDC钻头的日益完善,以及组合式钻头的相继出现。但是,人们还期待油气钻井、地质钻探等领域钻头取得重大突破。纵观近代世界油气钻头发展史,每隔几十年要发生一次重大变革。早期顿钻采用冲击钻头,后于19世纪末产生回转钻进的刮刀钻头(西方称“鱼尾”钻头,Fishtail bit)。1909年又发明了两牙轮钻头。

金刚石作为自然界最坚硬材料,用于手工镶嵌地质钻头(1863年)已有153年历史,第一只用于石油钻井金刚石取心钻头产生(1946年)到今年刚好70年,而含有金刚石的PDC钻头也已经历了44年历程。金刚石原料制作的钻头,过去、现在一直在油气钻井、地质钻探等领域发挥着重要作用。但是,金刚石是否永远是人类钻进地层的最佳碎岩材料呢?恐怕未必。世界第四次工业革命才刚开始,就已产生了石墨烯、硼墨烯、富勒烯等超级材料。石墨烯是碳的二维结构,其硬度超过金刚石,导热性和导电性极佳,多次叠加后具有良好的韧性,这都是钻进地层钻头所需要的宝贵性能。虽然目前石墨烯近期只可能在电子工程等领域具有应用价值,它的二维结构还不宜制作钻头用的切削具,但是通过人们的努力,借助化学、物理或其它方法,将石墨烯叠加形成三维立体结构,是否可以保持其原有特性来加以利用呢?



即使不行,石墨烯等超级材料的诞生也给了我们重要的启示和探索的信心:人们是能够从大自然中提取、分解,或人工合成、制造出硬度等性能超过金刚石的超级材料的,用它(们)制造出更加优异的地层钻头已不完全是梦想。

世界上每当刚出现重要发明(如电视、超级计算机、智能手机等)时,无论在东方,或是西方,人们总会惊讶地感叹:“谁知道将来会发生什么呀!”;“Who knows what will happen in the future!”。当比金刚石更好的材料制成钻头的那一天,人们又会发出这样的感叹。我们应当借助世界第四次工业革命的机遇,积极争取这一天的早日到来。

(4)目前我国油气井钻头研发制造已具有相当基础,无论数量或是质量都能大致满足国内需求。然而,国内油气钻头制造企业虽多,但多数规模不大、科研人员分散、研发投入不足;钻头产品无论性能指标还是品种类型,与国际上著名钻头公司产品相比,尚有不少差距,高端钻头尚需进口或依靠合资企业。建议今后我国钻头企业进行必要的调整、重组,使之发展壮大;促进企业与科研院所、高校的合作;加强基础理论和计算机建模研究,建设现代化钻头设计和试验平台,积极跟踪国际领先水平。今后仍应深化PDC钻头研究,提高其性能和质量,加强个性化钻头研究和服务;重视和加强对不同类型组合式钻头的研发和应用;将研发制造油气井钻头纳入国家“发展高端制造业”战略的内容,从而提高国产钻头市场占有率和国际竞争力。

目前,国际上使用一只钻头、一个回次钻进深度超过5000 m 钻井的实例已非罕见。运用一个钻头与高造斜率旋转导向钻井系统配合,可以钻成一口水平井完整的垂直段+曲线段+水平段,直至终孔,亦即人们早就期待的“单钻头钻井”(Single-bit Well),或“等径钻井”(Monodiameter Drilling),国内俗称“一趟钻”的目标已经实现。期待我国油气钻井、地质钻探界共同努力,争取今后不久也实现这个目标。

## 参考文献:

- [1] A. DiGiovanni, D. Ridgway, D. E. Gavia, et al. Innovative Non-Planar Face PDC Cutters Demonstrate 21% Drilling Efficiency Improvement in Interbedded Shales and Sand [J]. IADC/SPE 168000, 2014 IADC/SPE Drilling Conference: Exclusive roundup of abstract, Drilling contractor, IADC, 2014, (1-2).
- [2] Steven Segal. PDC bit with conical element targets rock cutting at bore center in 2013, Global and Regional Markets/ New bit design drilled 9,631 - ft lateral in single run in Bakken field test [J]. Drilling contractor, IADC, 2013, (7-8).
- [3] 全球七大最具创新钻头牛在哪里[EB/OL]. 2016-01-08. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_151503f9e0102w8hb.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_151503f9e0102w8hb.html).
- [4] 左汝强. 国际油气井钻头进展概述(二)——FuseTek 融合钻头与Pexux 组合钻头[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(2): 1-4.
- [5] Schlumberger launches AxeBlade ridged diamond element bit[J]. Innovating While Drilling, News, Mar 1, 2016. Drilling contractor, IADC, 2016, (3-4).
- [6] 斯伦贝谢发布 Axe Blade 金刚石钻头[EB/OL]. 2016-03-03. <http://www.cubeoil.com>.
- [7] Joanne Liou. New bits look beyond design at overall wellbore/Advanced cutters, manufacturing methods, data analysis help extend bit life, performance[J]. Drilling contractor, IADC, 2012, (7-8).
- [8] <http://www.nov.com/segments/Wellbore>[EB/OL].
- [9] 左汝强. 国际油气井钻头进展概述(三)——PDC 钻头发展进程及当今态势(上)[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(3): 1-8.
- [10] Chris Gooch. PDC bit uses staggered cutter configuration to take energy from vibrations to drill ahead/Cutting structure works to dampen vibration, reduce bit reactive torque and redirect force back into rock[J]. Drilling contractor, 2015, (7-8).
- [11] Katie Mazerov. Bit of best fit/Vector-accurate PDC bits target unconventional as hybrid bits address complex wells, interbedded formations. Drilling contractor, IADC, 2013, (7-8).
- [12] S. M. Rosenberg, T. Cummins, T. Dunn, M. Z. Tan. A Collaborative Approach for Planning a Drilling with Liner Operation [Jul]. SPE/IADC163451, 2014.
- [13] Linda Hsieh, Alex Endress. Better and better, bit by bit/New drill bits utilize unique cutting structures, cutter element shapes, advanced modeling software to increase ROP, control, durability, Drilling contractor, IADC, 2015, (7-8).
- [14] 左汝强. 国际油气井钻头进展概述(一)——Kymera 组合式(Hybrid)钻头系列[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(1): 4-6.