

# 新型耐磨损 ONYX 切削具制作的 PDC 钻头

汤凤林<sup>1,2</sup>, 赵荣欣<sup>1</sup>, Нескоромных В.В.<sup>3</sup>, 李博<sup>1</sup>, 周欣<sup>4</sup>, 段隆臣<sup>2</sup>

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海 200032; 2.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074;

3.Сибирский Федеративный университет, г.Красноярск, Россия 660095; 4.湖北省地震局,湖北武汉 430064)

**摘要:** PDC 钻头在石油天然气钻井和地质勘探钻进中得到了广泛的应用,取得了很好的技术经济效果。但是,钻进中产生的 PDC 切削具非正常磨损,影响了这种先进方法的机械钻速和钻头进尺的提高。俄罗斯史密斯钻头 (Smith Bits) 公司研发了一种钻进过程中可以沿着自身轴线回转的 ONYX 切削具,抑制了 PDC 切削具的非正常磨损,具有创新性和实用价值。Нескоромных В.В. 教授等对镶有 ONYX 切削具的钻头的结构和性能参数进行了分析研究。试验表明,这种 ONYX 切削具的耐磨性比常规固定式 PDC 切削具的耐磨性好,钻头钻进效果也比较好,俄罗斯正在积极推广使用,建议中国有关专家和部门对此进行研究和试验。

**关键词:** PDC 钻头; 切削具非正常磨损; ONYX 切削具; 钻头结构; 性能参数; 钻进效果

中图分类号: P634.4; TE921 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)03-0111-07

## PDC drill bit made of new wear-resisting cutting elements ONYX

TANG Fenglin<sup>1,2</sup>, ZHAO Rongxin<sup>1</sup>, Neskormnyh V. V.<sup>3</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>4</sup>, DUAN Longchen<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Building Sciences Limited Company, Shanghai 200032, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

3. Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660095, Russia;

4. Hubei Earthquake Agency, Wuhan Hubei 430064, China)

**Abstract:** PDC bits are widely used in oil and gas drilling and geological exploration drilling. and good technical and economical results have been obtained. However, abnormal wear of the cutting element in drilling engineering affects the improving of technical and economic effectiveness of the advanced drilling method. Company Smith drill bit of Russia (Smith Bits) has developed a new cutting element, rotating around its inner shaft, inhibiting the wear of PDC cutting element. It is a new innovation and has practical significance. Prof Neskormnyh V. V. et al have analyzed and researched on design and characteristic parameters of the bit with ONYX. Finished tests show, that the wear resistance of the ONYX is better than, that of the fixed PDC element. The result of drilling using such bit are better and the bits are being used actively in geological and prospecting organizations of Russia. It is worth for us to pay attention to.

**Key words:** PDC bit; anomaly wear of cutting element; cutting element ONYX; drill bit structure; characteristic parameter; result of drilling

### 1 PDC 切削具磨损分析

自从 20 世纪 70 年代以来, PDC (Polycrystalline Diamond Compact) 钻头在国内外油气井软—中硬地层钻进中得到了广泛地应用, 逐步取代了金

石钻头。后来, 很快发展到地质钻探中, PDC 钻头研究日趋成熟, 钻进工艺日臻完善, 技术经济指标不断提高, 引起了地质钻探界的高度重视, 并已推广使用<sup>[1-23]</sup>。但是, PDC 钻头钻进中产生的切削具

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-12-11 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.014

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“不同结构高压电脉冲钻头的破岩过程与预测模型研究”(编号: 42272366)

第一作者: 汤凤林, 男, 汉族, 1933 年生, 教授, 博士生导师, 俄罗斯工程院外籍院士, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 国际矿产资源科学院院士, 探矿工程专业, 主要从事探矿工程方面的教学和科研工作, 湖北省武汉市鲁磨路 388 号, fttang\_wuhan@aliyun.com。

引用格式: 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В.В., 等. 新型耐磨损 ONYX 切削具制作的 PDC 钻头[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 111-117.

TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Neskormnyh V. V., et al. PDC drill bit made of new wear-resisting cutting elements ONYX[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 111-117.

非正常磨损问题,一直没有得到很好的解决,直接影响了机械钻速、钻头寿命、钻孔质量和经济技术指标的提高。

俄罗斯史密斯钻头(Smith Bits)公司利用PDC切削具磨损试验台对PDC的磨损进行了试验研究,见图1<sup>[9]</sup>。试验结果表明,切削具的磨损是局部的。

钻头取出时可以看到,切削具表面的磨损部分基本上不超过1/4。使用固定式PDC钻头钻进时,只是在靠近孔底的下部切削刃遭受了磨损(见图2)。根据史密斯钻头(Smith Bits)公司的资料,60%以上的PDC钻头都是由于切削具下部切削刃的磨损和折断而报废的<sup>[8]</sup>。

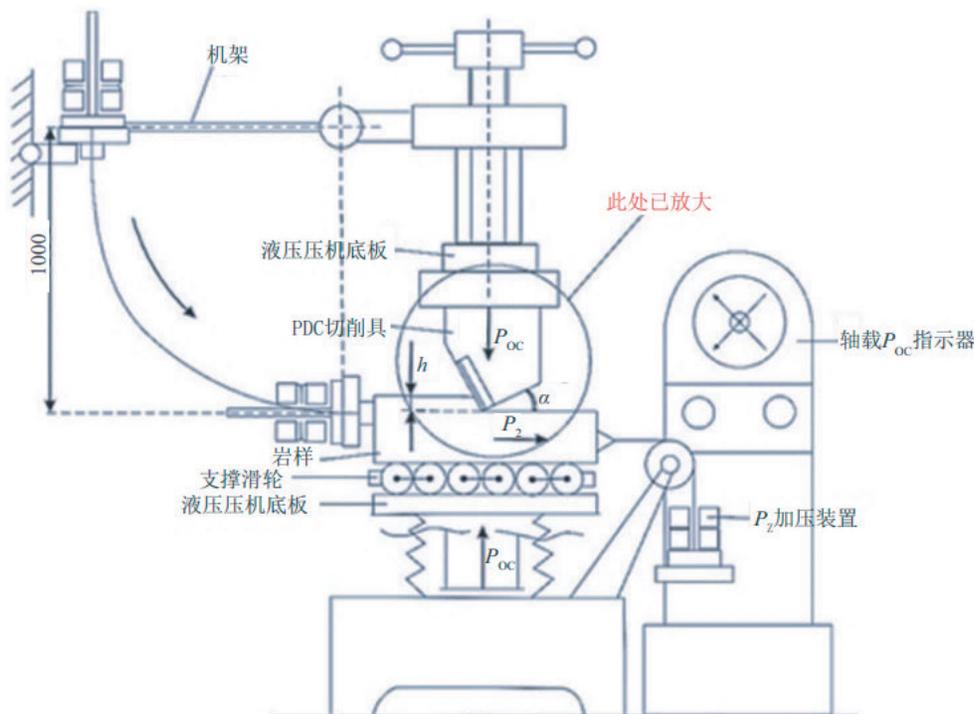


图1 PDC切削具磨损试验台示意

Fig.1 Scheme of test table for testing wear of PDC cutting element

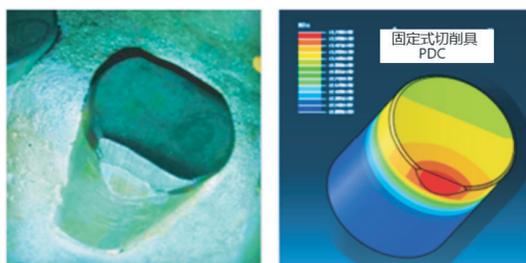


图2 固定式PDC切削具磨损情况<sup>[8]</sup>

Fig.2 Wear pattern of the fixed PDC cutting element

此外,最大磨损是在接近钻头外径的部位发生的,即在 $0.77R_H$ 处发生的(见图3)。这种异常磨损与来自孔底的阻力最大有关,该阻力随钻头切削具线速度从回转中心向回转边缘增大而增加,故此处磨损最为严重<sup>[9]</sup>。

## 2 ONYX切削具及其性能

史密斯钻头公司对PDC钻头损坏的原因进行了分析,开发出了可以在井底破碎岩石过程中围绕自身轴线回转的ONYX切削具,见图4<sup>[8-9]</sup>。

使用ONYA切削具钻头,在研磨性砂岩中钻进时,钻头寿命增加了57%,钻进速度增加了26%。俄罗斯伊尔库茨科州使用ONYX钻头钻进时,机械钻速提高了60%,钻头进尺提高了30%,目前正在乌拉尔-伏尔加地区和东西伯利亚地区钻探工程中推广使用。

与同样形状和大小的固定式切削具磨损对比试验表明,使用ONYA切削具破碎岩石时,可以进行600个回次,而固定式切削具只能进行100个回次(见图5)。切削具磨损的部位和程度见图6<sup>[8]</sup>。

钻头切削具的磨损从中心到边缘增加的原因,

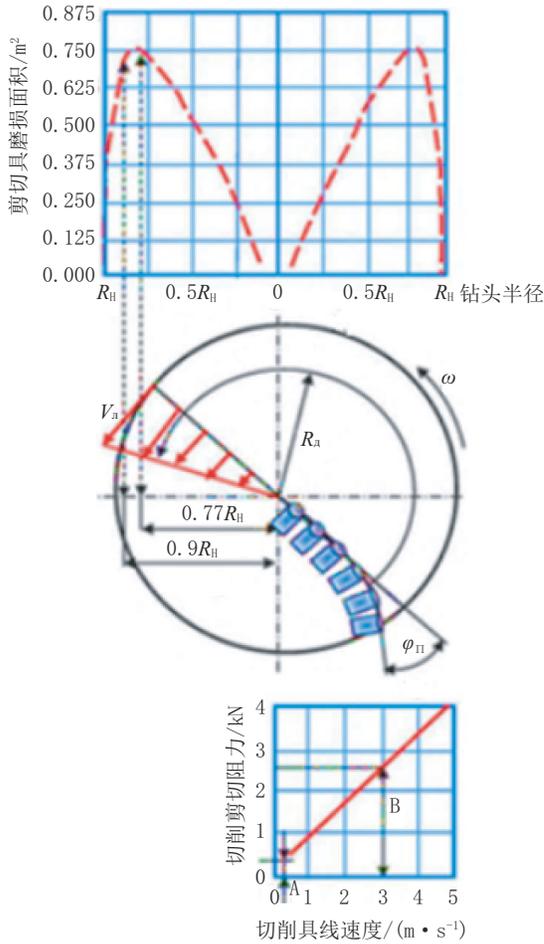


图 3 切削具磨损、岩石切削剪切阻力与切削具线速度的关系<sup>[8-9]</sup>

Fig.3 Dependence of wear of cutting element and resistance of rock cutting and shearing from liner speed of the element

是因为切削具随着钻头线性移动速度的增加而遇到的岩石切削剪切阻力增加所致。切削具线性移动速度如下确定:

$$V_n = 2\pi\omega R_n$$

式中:  $\omega$ ——钻头转速, r/min;  $R_n$ ——钻头唇部中心(O)到边缘( $R_H$ )的半径, m。

根据二水平、全因子试验数据处理结果得到的  $R_n$  为<sup>[8]</sup>:

$$R_n = 0.258 + 0.664V_n + 0.021V_n^2 \quad (1)$$

根据式(1), 图 3(下)给出了反映切削剪切破碎岩石阻力、切削具磨损强度与位于不同中心距的切削具线速度的关系。

PDC 切削具切削剪切岩石过程示意图 7。

根据图 7, 岩石切削剪切深度  $H$  可按式确定<sup>[17]</sup>:



(a) 安装 ONYX 切削具的钻头



(b) 安装在钻头上的和拆下的切削具

图 4 史密斯钻头公司开发的 ONYX 切削具

Fig.4 Cutting element of company Smith bits ONYX cutting elements

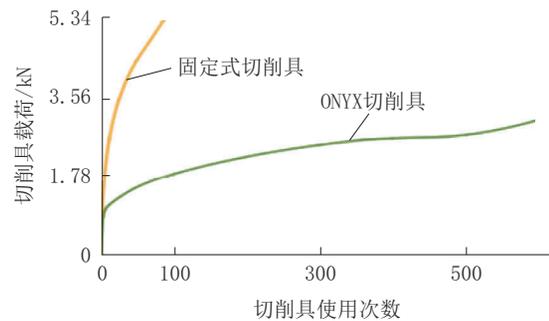
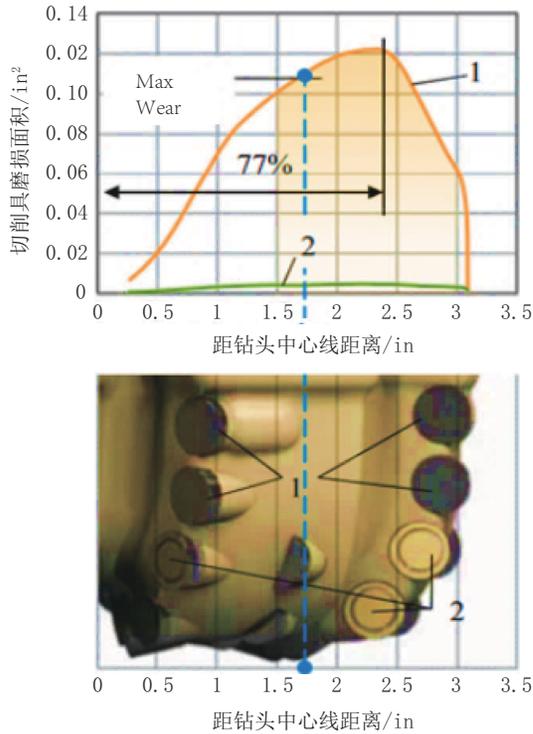


图 5 ONYX 切削具耐磨性与载荷的关系

Fig.5 Dependence of ONYX cutting element and fixed cutting element wear resistance from the weight on the element

$$H = \sqrt{\left[ \frac{P_{oc} \sin \gamma_{CK} (1 - \mu \operatorname{tg} \gamma_n)}{\pi K_n \sigma_{CK} \cos \varphi_n \operatorname{tg} \gamma_n \sqrt{d} (1 - \operatorname{tg} \varphi_n)} \right]^{-3}} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_{CK}$ ——切削具前面的剪切角度, ( $^\circ$ );  $\mu$ ——切削具和岩石的摩擦系数;  $\gamma_n$ ——切削具安装前角, ( $^\circ$ );  $\sigma_{CK}$ ——岩石剪切强度极限, Pa;  $K_n$ ——钻头转速提高时, 计算岩石切削剪切阻力增加用的系数;  $\varphi_n$ ——岩石破碎时变形层中的内摩擦角, ( $^\circ$ );  $d$ ——切削具直径, m。



1—固定式切削具PDC; 2—ONYX切削具  
注: 1 in=25.4 mm

图6 切削具工作150 h后磨损部位和程度试验结果  
Fig.6 Experimental result of the place and degree of cutting elements wear after working 150 hours

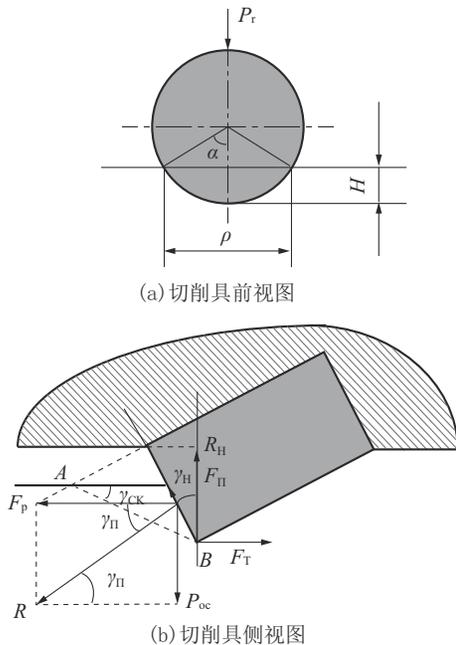


图7 PDC切削具切削剪切岩石过程示意  
Fig.7 Scheme of rock cutting and shearing fragmentation process by PDC cutting element

从式(2)可见,岩石剪切极限强度 $\sigma_{ck}$ ,随着切削具线性移动速度提高而引起的变化,可用系数 $K_n$ 表示。从图3(下)可见,切削具线性移动速度A点为0 m/s时,岩石切削剪切阻力为0.4 kN,而在切削具线性移动速度B点为3 m/s时,岩石切削剪切阻力为2.7 kN,故系数 $K_n=2.7/0.4=6.75$ 。此公式说明设计钻头时要考虑,切削具线性移动速度变化时,岩石切削剪切阻力是变化的,不能忽略。

### 3 ONYX切削具回转条件<sup>[8-9]</sup>

讨论ONYX切削具回转的条件和机理,以便使钻头唇面部分形状最优化,可以安置多个围绕自身轴线回转的切削具ONYX。

钻孔加深时,钻头沿着孔壁做纵向移动(钻进),使钻头侧部切削具和位于钻头唇部倾斜部分上的切削具与岩石相互作用,其结果是钻头纵向移动钻进时可以使切削具回转。

图8给出了围绕自身轴线回转的切削具的结构图,外壳内安置有切削具和切削具内轴,止动弹簧圈安装在切削具内轴的环槽和外壳的内表面内。

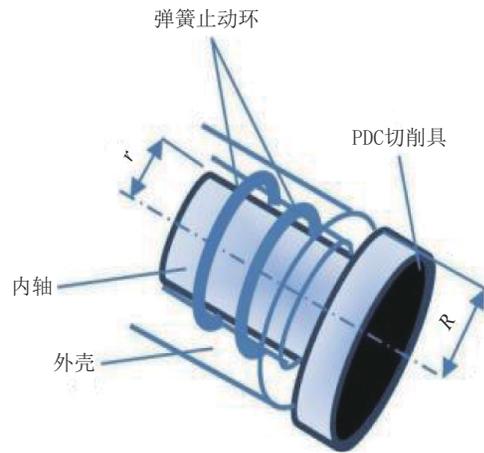


图8 围绕自身轴线回转的ONYX切削具结构  
Fig.8 Design of ONYX cutting element rotating around its inner shaft

从图8可见,切削具的回转,是在下列扭矩 $M_{kp}$ 作用下产生的:

$$M_{kp} = RF \tag{3}$$

式中: $R$ ——切削具半径; $F$ ——使切削具在钻进中回转的作用力,其方向为与切削具和钻孔侧表面接触点向上垂直。

从图9可见,作用力 $F$ 是由切削具对钻孔(孔壁

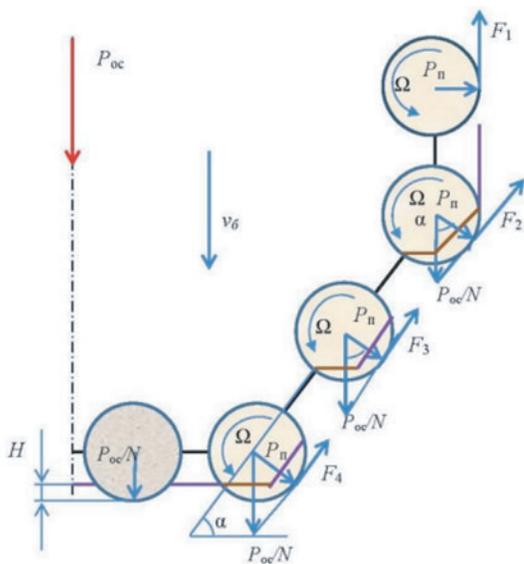
或孔底部分)表面上的压力和切削具与岩石的摩擦系数确定的:

$$F = P_{oc} \mu \cos \alpha / N \quad (4)$$

式中:  $P_{oc}$ ——钻头轴向载荷, kN;  $N$ ——承受轴向载荷的钻头唇面上的切削具数量;  $\mu$ ——切削具与岩石的摩擦系数;  $\alpha$ ——钻头唇面倾斜侧表面的倾斜角度, ( $^{\circ}$ )。

则扭矩  $M_{kp}$  为:

$$M_{kp} = RP_{oc} \mu \cos \alpha / N \quad (5)$$



$P_{oc}$ —钻头轴向载荷, kN;  $N$ —钻头唇面上的切削具数量;  $H$ —切削剪切岩石深度;  $V_0$ —钻进速度;  $P_n$ —切削具对孔壁或孔底的压力, Pa;  $\alpha$ —钻头唇面倾斜侧表面的倾斜角度, ( $^{\circ}$ );  $\Omega$ —切削具回转速度

图 9 确定 ONYX 切削具回转条件用计算示意

Fig.9 Design scheme for determining the conditions of ONYX cutting element

从式(5)可见,为了提高切削具围绕自身轴线回转的可能性,需要改善切削具侧表面的摩擦性能。例如,在切削具侧表面上刻痕或利用喷敷金属的办法解决,以此来大幅度提高切削具和岩石摩擦系数的数值。

但是,阻力扭矩可能阻碍切削具围绕自身轴线回转,阻力扭矩  $M_c$  计算如下:

$$M_c = rfF \quad (6)$$

式中:  $r$ ——切削具轴半径, m, 参见图 8;  $f$ ——切削具外壳内切削具轴的摩擦系数。

切削具打滑系数可以用  $M_{kp}/M_c$  比表示。

由此可见,为了降低切削具打滑的概率,应使下列参数比例越大越好,即:

$$(R\mu)/(rf) \rightarrow \max \quad (7)$$

从式(7)可见,当切削具与岩石摩擦系数  $\mu$  最大 ( $\mu=1$ )、切削具轴(参见图 8)同壳体的摩擦系数 ( $f$ ) 最小时,切削具回转效果更好。在这种情况下,切削具回转时相互作用的切削件结构更为合理、切削具外部表面摩擦性能比更好,可以得到更好的效果,即切削具可以围绕自身轴线均匀回转。

钻头切入速度  $V_0$  是切削具围绕自身轴线回转的重要参数。

在钻头唇部倾斜表面上布置切削具(见图 10)时,钻头切入速度  $V_0$  的方向和  $F$  力的作用方向,可以通过乘以  $\sin \alpha$  计算确定,即  $\sin 45^{\circ} = 0.707$ 。切削具对孔壁的压力,可以通过乘以  $\cos \alpha$  计算[式(5)],  $\cos 45^{\circ} = 0.707$ 。从图 10 可见,  $\alpha = 45^{\circ}$  时的钻头唇面是最为合理的倾斜表面,即钻头唇部如此倾斜角度时,  $P_n$  最大,  $F$  最大,孔内钻头钻进作用面的方向与  $F$  力作用方向配合最为合理。

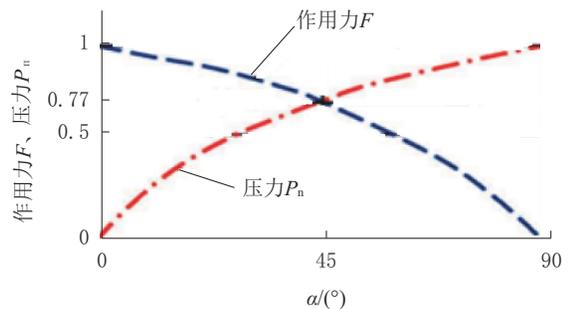


图 10 回转切削具的作用力  $F$ 、切削具对孔底的压力  $P_n$  与钻头端面倾斜角度  $\alpha$  的关系

Fig.10 Dependence of the force  $F$  turning the cutting element and the pressure of cutting element on the hole wall  $P_n$  from deviation angle of the bit end face  $\alpha$

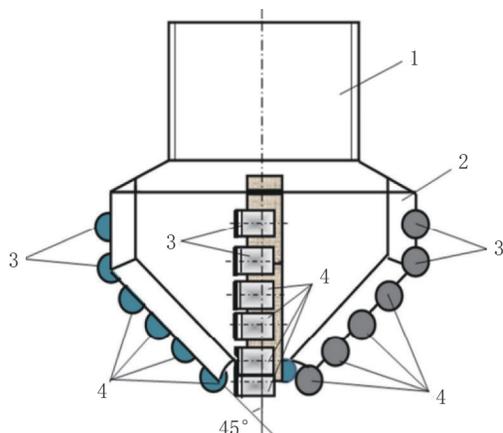
#### 4 ONYX 切削具钻头的类型<sup>[8-9]</sup>

这种切削具可以安装在不取心钻头上,也可以安装在取心钻头上。

##### 4.1 装有 ONYX 切削具的不取心钻头

图 11 是装有 ONYX 切削具的不取心钻头示意图。钻头唇面倾斜角度  $45^{\circ}$  时,可以保证钻头切削部分有效破碎岩石,并且可以保证在钻头整个工作表面上布置多个 ONYX 切削具。ONYX 切削具的回

转是由切削具3和孔壁的相互作用,以及切削具4和孔底倾斜部分相互作用来保证的。为了提高切削具围绕自身轴线回转的可能性,切削具侧表面上可以通过喷镀硬质合金粉(例如碳化钨粉),以及沿着切削具纵向轴线刻成肋骨状刻纹来增加其摩擦性能。



1—带螺纹的钻头体;2—胎体;3、4—ONYX切削具

图11 装有ONYX切削具的不取心钻头示意

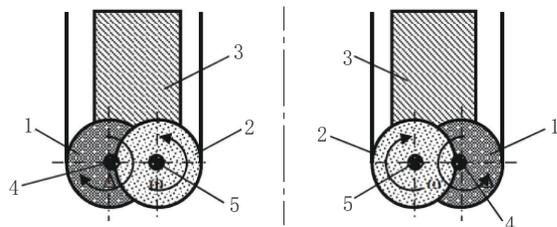
Fig.11 Drill bit with ONYX cutting element

#### 4.2 装有ONYX切削具的取心钻头

设计取心钻头时,也可使用ONYX切削具。

图12是装有ONYX切削具的取心钻头示意图。为了形成岩心和孔壁,在位于胎体的内、外半径的两个轴上布置了ONYX切削具。钻头钻进时,外切削具1的回转是依靠其侧表面与孔壁相互作用实现的,而内切削具2的回转是依靠其与形成的岩心相互作用来实现的。

这种方式设计、生产的钻头,可以保证钻头钻进时,切削具围绕自身轴线有效回转,降低切削具磨损,提高钻进效率和钻头寿命。



1—外切削具;2—内切削具;3—钻头胎体;4—外切削具回转轴;5—内切削具回转轴

图12 ONYX切削具的取心钻头示意

Fig.12 Coring drill bit with ONYX elements

#### 5 讨论、分析和建议

根据上述资料可以进行如下讨论、分析和建议。

(1)PDC钻头在国内外的石油天然气钻井、地质钻探工程和其它有关钻探施工中得到了广泛应用,取得了良好的技术经济效果。但是,PDC切削具的磨损,特别是非正常磨损,直接影响了其技术经济指标的提高,因此,如何提高其耐磨性,以提高其钻进速度和钻头进尺,是一个需要研究的非常重要的技术问题。

(2)俄罗斯史密斯钻头公司对PDC钻头磨损问题进行了试验研究,在此基础上开发出了一种钻进时可以围绕其自身轴线回转的ONYX切削具。该切削具的耐磨性和韧性较好,具有一定的广谱性,可以安装在钻头受力最大的部位或其它部位上,钻进效率高,钻头寿命长,提高了钻头钻进的技术经济指标。具有创新性,有科学价值和实际意义,很有发展使用和推广前景。

(3)俄罗斯 Нескоромных В.В. 教授等对镶有ONYX切削具的钻头的结构和性能参数进行了分析研究,得出了此种钻头的工作唇面与钻头中心轴线呈45°角度时,钻头结构最为合理,钻进效果最好。试验和使用表明,这种ONYX切削具钻头比固定式PDC切削具钻头的钻进效果好,得到了用户的认可,正在俄罗斯有关地质勘探单位积极使用中。

(4)目前,中国国内尚未看到有关ONYX切削具钻头的报导,值得引起我们的注意,建议有关专家和部门对此进行研究和试验,以便确定其有效性、可行性和使用前景。

#### 参考文献(References):

- [1] 胡郁乐,张惠,王稳石,等.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.  
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key Technologies in Deep Core drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [2] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J].钻探工程,2023,50(1):39-48.  
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):39-48.
- [3] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):74-79.  
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al.

- Experimental research on new type diamond bit for drilling in deep hard anisotropic rocks[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 74-79.
- [4] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):88-92.  
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on cutting type multitierwing bit[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6):88-92.
- [5] 段隆臣,潘秉锁,方小红.金刚石工具的设计与制造[M].武汉:中国地质大学出版社,2012.  
DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and Manufacture of Diamond Tools[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2012.
- [6] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [7] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep Core Drilling Technology and Management[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [8] Нескоромных В. В., Попова М. С., Парахонько Е. В. Разработка породоразрушающего инструмента с резами PDC [J]. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 2.131 - 138.
- [9] Чихоткин А. В. Совершенствование методики проектирования инструмента с резами PDC равнопрочногопрофиля с учетом особенностями механизма разрушения горных пород и сопротивления среды [D]. Россия, г. Москва, Российский государственный геологоразведочный университет, 2020.
- [10] Третьяк А. А., КБорисов. А. Классификация поломок пласти PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин [С]//Результаты исследований -2020: Материалы 5-ой Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ) - Новочеркасск, 2020: 252-254.
- [11] Р. Р. Мингазов, Г. Г. Ишбаев и др., Снижение вибраций в процессе бурения путем совершенствования конструкции PDC долот[J]. Бурение и нефть, 2021(7):13-18.
- [12] Нескоромных В. В., Попова М. С., ЛБачанг. Влияние среды прибойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г. Красноярск, 2021(9):119-127.
- [13] Нескоромных В. В., Попова М. С., ЛБачанг. Резцы PDC с вогнутой поверхностью режущей грани [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г. Красноярск, 2022(4): 181-192.
- [14] Нескоромных В. В., Попова М. С., АЧихоткин. В. Методика проектирования долот с резами PDC, учитывающая динамические процессы резания - скальвания горной породы и сопротивление среды [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море, 2020(4):14-17.
- [15] ВНескоромных. В. и др. Алгоритм управления системой алмазного бурения [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г. Красноярск, 2022(11):114-126.
- [16] Нескоромных В. В., МПопова. С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев[J]. Записки Горного Института, 2019, 240:701-710.
- [17] Нескоромных В. В., Попова М. С., ЛБачанг. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом [M]. Красноярск, Россия, Сибирский федеральный университет, 2020.
- [18] ВНескоромных. В. Оптимизация в геологоразведочном производстве [M]. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013.
- [19] Нескоромных В. В., Попова М. С., АХаритонов. Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания - скальвания горной породы алмазным резцом[J]. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020, 331(10):40-48.
- [20] А. А. Буканов, Л. К. Горшков, А. И. Осецкий, Н. В. Соловьев. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента[J]. Разведка и охрана недр, 2013(7):44 - 49.
- [21] АКоротков. В. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения [J]. Известия сибирского отделения РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011, 2(39):205-209.
- [22] Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скальванию при бурении долотами PDC[M]. Томск: ТПУ, 2013.
- [23] А. Я. Третьяк, В. В. Попов, А. Н. Гроссу, К. А. Борисов/ Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента [J]. Горный информационно - аналитический бюллетень, 2017(8):225-230.

(编辑 荐华)