

聚晶金刚石复合片 (PDC) 钻头 的设计与油田扩大应用

C. Kerr

Norton Christensen Canada Ltd.

刘长生 译

摘 要

1973年PDC切削块的采用促进了初期以人造金刚石为切削元件的钻头的发展, 这个发展过程已达到目前大量的进尺是用PDC钻头钻的这样的程度。经过这段发展过程, 一些影响钻头性能的设计要求已明朗化了, 特别是钻头体的材料、切削块的布置和密度、钻头外形、背倾角、侧倾角及水马力对于使用性能的影响已能描述了。工业上首先是采用钢体钻头, 然后又采用了碳化钨胎体钻头。切削块的布置和密度原先是按计算的每一切削块切削的体积相等的原则来确定的, 现代的PDC钻头特征是按每一切削块等工作强度的原则用计算机处理方法来确定切削块的布置和密度。还用力矩平衡方法和矢量分析来考虑背倾角、侧倾角和钻头外形。现在并已利用有关钻头流动情况的观察室优化了水力设计。

广泛的现场试验和工程设计评价相结合确定了PDC钻头目前的使用区域和界限, 采用形状和尺寸上新型、热稳定性和机械韧性改进了的切削块, 促使PDC钻头结构进一步完善。大直径的切削块能增加出露高度, 并使其具有承载能力更大的外形, 这是现已经检验的技术优点。超硬材料的改进及在水力学上和机械上更有效的钻头结构相汇合, 将会扩大PDC钻头今后的应用范围。

早期的结构

早期的PDC钻头与现在的制造商产品样本的型式相距甚远, 早期的原型是利用了非常类似于天然金刚石钻头的设计概念设计出来的 (见图1)。

钻头外形基本上和普通天然金刚石钻头是一样的, 仅仅是用PDC切削元件取代了天然金刚石。研究了各种各样的流道布置, 包括通常的爪式、槽式和固定喷嘴。

另外, PDC切削元件亦有变化, 在早期它是通用电气公司供应的。早期切削块的直径是0.323英寸 (8.2毫米), 与今天最常用的切削块直径为0.524英寸 (13.3毫米) 不一样。在早期有360°整圆的和180°半圆的坯件, 它们被固定在柱块上。早期的钻头上采用了钢的、碳化钨的和表面硬化了的钢的柱块, 它们和360°的及180°的坯件相结合。

现场应用

用PDC切削块作的石油钻头的早期现场试验是在1973年11月在科罗拉多州进行的。这些试验的数据暴露了结构固有的弱点。Walker, Evans, Fielder和Appl在1980年的论著证明了这些问题^[1]。基本上, 这些问题是小直径(0.323英寸或8.2毫米)的坯件不能提供足够的面积, 使它与柱块牢靠地铜焊在一起。进而言之, 小的坯件不能提供足够的出露高度来满足高钻速的要求, 问题还在于碰到柱块冲击破坏, 切削块由于铜焊破坏而掉落, 以及差的水力结构不能提供适当的清洗等问题。

改进了的结构

在早期令人沮丧的现场试验之后, 钻头设计人员认识到, 要利用这种新型切削元件, 思路的出发点要完全背离常规的天然金刚石钻头结构。天然金刚石钻头的研磨、犁削的切削机理与PDC切削块对岩石剪切作用之间的对比表明, 新钻头应有完全不同的结构才能有效地钻井。这种认识就产生出了最初的PDC钻头型式, 它象今天在制造商样本中通常看到的那样(见图2), 这种钻头以其刀片型式的布齿、碳化钨胎体、流道和若干喷嘴(实际喷嘴数取决于具体结构)为特征。其性能是勉强够格的, 典型的问题有喷嘴堵塞和切削块失落, 但结果是令人鼓舞的。

1978年, 在PDC切削块上另外粘附上一片碳化钨, 这为硬焊到钻头体上提供上了较大的面积和更大的焊接强度(图3)。

虽然进行了现场试验, 但在1979年发展出一种新的焊接工艺之前, 切削块的失落问题并未得到完全解决。在此期间进行的现场试验所取得的成功是偶然的, 因为这些钻头应用的知识曲线和工作参数都处于非常早的阶段。然而, 一些试验结果显示出了轰动一时的效果和经济效益。

从那时起, 作业者们和制造商们开始认识到PDC钻头的潜力, 在随后一个时期里, 钻头的发展工作得到了新的重视, 钻头在结构、工作参数和地层适应性方面的发展十分迅速。

应该指出, 本文提及的大部分早期钻头是带焊接切削块的碳化钨胎体钻头, 而在钢体钻头中也同样发展着利用柱块切削块。现在, PDC钻头结构的基本要素已清楚了, 而剩下的问题是确定有关钻头性能的细节及其效果。

影响钻头性能的结构设计特点

钻头体材料

前面提及的碳化钨胎体和钢体这两种材料目前都用于PDC钻头(图4和图5)。对哪一种的结构设计更为有效尚未得出结论, 但对每种材料的某些特性是清楚的。

钢体钻头采用柱块切削块(图6), 是将柱块切削块压入钻头体的塞孔内, 钻头的保径通常采取嵌入碳化钨块。柱块有固定的背倾角, 它限制了成品钻头的背倾角有变化的可能性。

如果钻头体的侵蚀不成为一个限制因素，采用柱块的优点则是可以更换柱块，柱块的采用还消除了切削块与钻头体之间的焊接。

现场试验已表明，钢体钻头的表面是有侵蚀的^[2,3,4,5]。发生这种情况通常与钻头压降高、运转时间长和（或）泥浆固相含量高的情况相关联。由于钻头体的侵蚀或研磨，柱块不能再予以更换，或者是喷嘴的牢固性受影响，此时就成了一种限制因素，失去了改装的优点。这个问题可以通过硬化钻头体表面来解决，以减轻侵蚀和研磨的影响^[3]。

钢体钻头同样因其抗冲击能力有限而使切削块断裂遭受损坏，原因是柱块切削块没有后支撑^[2]。

钢体钻头利用碳化钨镶齿来保径，这在用井下动力钻具进行高转速钻井时是有意义的。

碳化钨胎体钻头采用圆柱体形的切削块，在钻头体利用天然金刚石钻头的常规烧结技术烧结出来之后，将切削块焊接到穴槽里。其特点是这种碳化钨胎体钻头既抗侵蚀又抗研磨^[5]，而且胎体穴槽具有抗冲击能力。碳化钨胎体钻头在经济上有一弱点，因为胎体材料很贵。

这两种钻头体各具特色，一些制造商采用钢体钻头方案，另一些采用胎体方案，也有一些制造商则既生产钢体钻头又制造碳化钨胎体钻头。

背 倾 角

有关不同背倾角的现场试验来评价其性能和单个切削块试验方面的课题已做了许多工作^[6,7]，在这些工作的基础上已可得出一些结论。众所周知，当背倾角减小时，切削作用变得更有效，那就是说，在同样钻压下，背倾角更小的切削块切削得更深，它通常可钻出更大的岩屑^[1]，这使得钻头更能吃入地层，从而在所有其它条件都相同的条件下可获得高钻速。但是，较小背倾角的切削块在钻遇硬地层时因冲击而更易损坏。相反，较大的背倾角虽然切削出较小的岩屑，但是在硬地层中将是更耐久，且寿命更长。

另外，对排屑效率来说，背倾角对钻头清洗是有影响的，因为它推动岩屑卷曲地从钻头体排出来。

侧 倾 角

侧倾角对PDC钻头清洗的效应在于切削块利用侧倾角用机械方法把岩屑引向环空^[7]。

外 形

钻头外形有三种基本形式：平底或浅锥型、锥型或双锥型，以及抛物线型。有一些与这三种型式有所不同，但基本上介于上述提及的这些型式之间。现场应用已可描述出这些不同外形钻头之间的一些特性差别。

平底的或浅锥型外形均匀地把静钻压分配到钻头的每一个切削块上（图7）。如果只是按照钻头能象它的最快的切削块那样快的钻进来推论，平底外形的钻头具有最高的潜在钻速，这是因为每一切削块的切削深度在理论上是相等的。

平底外形的钻头的两个缺点是旋转稳定性有限和磨损不均匀。由于外形是浅锥型的，在高转速下能产生摇摆，它可造成高的瞬时点载荷和失去对PDC块削块的冷却作用，这都有损于钻头寿命。

对用旧的钻头的分析表明，有一种重复的磨损模式，即从钻头中心到外径磨损增多。这

意味着最靠近中心的切削块没有被充分利用。

平底外形的钻头似乎主要限制在没有硬夹层的地区里使用。硬夹层与一般夹层的区别在于它在破碎之前不经受塑性变形，因而是不能用PDC切削块剪切的。其理论是这样的，即当遇到硬夹层时切削的深度减小，而且因为钻压是均匀分配在各切削块上，所以是均匀分配在切削的深度上。在现场已证明了，当遇到硬夹层时钻速和旋转力矩两者都下降。为了达到需要的钻速和切削深度，不得不增加钻压，这可能引起切削块超负荷和灾难性的破坏。换句话说，由于外缘上切削块的圆周速度增大，这种新的增大的钻压值将提高外缘部位上的切削块的工作强度并加速其磨损。

锥型或双锥型的外形以有一个楔形鼻子（图8）为特征，并允许在钻头外缘部分布置更多的切削块。因此，可获得旋转稳定性、方向稳定性和更均匀的磨损。

由于钻压加到钻头侧面上的切削块时引起侧向力，它对于钻头有稳定效应，减少钻头摆动和偏斜倾向。

对钻头使用情况的评价已指明典型磨损方式是：朝钻头外径方向的磨损增大。然而，这种外形的钻头欲能更有效地利用靠近中心的切削块。

另外，一般认为：这种锥型外形的钻头更适合在常常遇到硬砂岩夹层的地区使用。这种楔形鼻子在其鼻子上提供了较高的点载荷，可在硬夹层里切削深度更深些。

外形为抛物线型的钻头为在其型面上平滑地分配载荷创造了条件，它消除了尖锐的过渡区（图9）。这种型面有最大的表面积，为了能适当的覆盖，要在其上布置更多的切削块。在螺杆钻具和涡轮钻具钻井中选择钻头时，这种外形为抛物线型的钻头是具有代表性的。

切削块密度

钻头性能与切削块密度变化有关，其定性检测是可能的。这从实验室和现场研究结果两方面来看都是显然的^[8]。

当切削块密度，或切削块的数量增加时，钻速下降。其产生原因有几种，最重要的有两条。第一条，当钻压相等的时候，切削深度和钻速由于切削块密度增加而降低。第二条，在钻头表面增加更多的切削块就降低了清洗效果，这就直接影响了钻速^[9]。

相反，如某一给定PDC钻头的切削块密度增加，则每一切削块的有效承载将减少，每一切削块的工作强度，及其磨损速度都将下降，这就将延长钻头寿命。

切削块的出露高度

切削块的出露高度要考虑其清洗效果和机械强度，用PDC切削块相对于钻头表面的全部出露和部分出露的术语来讨论这个问题。

Cerkovnik从使岩屑切离时不致与钻头体发生干涉的角度讨论了出露高度的效应^[8]，因此岩屑将很快被带走，也不会发生钻头泥包及岩屑重新破碎。可以断定，增加出露高度可使钻头体与钻进地层之间的间隙增大，然而间隙增大是以牺牲表面流速为代价的，因为钻头与地层之间面积的增长导致了表面流速的降低。

部分出露的好处在于它为PDC切削块提供了附加的机械衬垫，提高切削块抗冲击载荷的

能力。这对于在较硬的地层，诸如较硬的砂岩层段，应用PDC钻头是有意义的，在这些地层里钻井预期会产生较高的冲击载荷。

关于进一步研究切削块全部和部分出露的优缺点问题已由Huang和Iversen⁽⁷⁾讨论过了。

现场应用

水马力

广泛的现场试验已表明，只有全面地观察才能得出增加水马力对PDC钻头使用效果有何影响的定性结论。其结论是增加水马力对PDC钻头的使用有利。这和使用牙轮钻头时的结论是一致的。

用钻速增加和钻头泥包情况减少表示使用效果有所改进的某些实例已见诸文献^(2,4,5,8,9)。另外，被引述的实例包括了实验室的和现场的研究情况，这两方面的研究工作都已证明了增加水马力的效益。

在研究水马力的问题时，钻头压力降和流量这两项是重要的，这可从下述方程式看出

$$\text{HHP} = \text{PQ}/1714 \quad (1)$$

进而言之，井底面积（井径为d）的每平方英寸上消耗的单位水马力可利用下式计算：

$$\text{HSI} = \text{HHP} \times 4/\pi d^2 \quad (2)$$

众所周知，有效地清洗钻头要求压力降和流量相结合⁽⁸⁾。对于一个给定的钻头，可利用的流量通常确定在某些极限之间，这些极限通常是由携带岩屑能力、临界环空流速和其他相关因素确定的。穿过钻头的压力降由立管压力和泥浆泵最大输出压力所限制。为使钻头水马力最大，推荐：在计及系统水力损失之后所有可供钻头利用的压力都要利用上去，这将确保可利用的最大水马力消耗在钻头上，这是优化钻井的主要组成部分。

有关水马力优化方面还有一点值得进一步指出来，即对泥浆泵的输出和输入功率应予以识别。已经发生过许多这样的情况：即计算的在给定排量下的泥浆泵输出功率大大高于泥浆泵能获得的输入功率。如果不识别这一点，则可能在泥浆泵无法给出的水马力值的基础上确定喷嘴尺寸。

使用参数

一般说来，PDC钻头的使用参数与普通牙轮钻头的使用参数不同。为了使PDC钻头使用效果达到最佳水平，认识到这一点是极为重要的。由于PDC钻头的剪切作用很不同于牙轮钻头的压入和破碎作用，所以PDC钻头要求不同的使用参数。

与牙轮钻头相比较，PDC钻头最好在低钻压和高转速下钻井，而且需要高得多的扭矩，这是使用PDC钻头的基本趋向⁽¹¹⁾。Cheatham和Loeb推荐采用可能达到的最大转速，并且评价了它在每一种情况下对钻速的影响⁽¹¹⁾。他们的研究工作表明，不管是新钻头还是用过的，不管是在现场还是在实验室内，上述观点都保持其正确性。

在现场使用中常常观察到PDC钻头另一特征是扭矩和转速周期性地变化。这是由于钻柱类似于扭力弹簧，并在某种转速、钻压和扭矩的组合下达到其自振频率。Cheatham和Loeb把这种现象的产生归因于提供给钻头的和钻头需要的机械功率之间的差异⁽¹¹⁾。在现场可用

减小钻压或增加转速来缓解这种现象。

PDC钻头方向倾向

各种PDC钻头的各种方向倾向问题仍是未能明确确定的问题，在已大量进行了PDC钻头钻井的和其方位和倾角都已被记录的地区里，结论是有的。

Balkenbush和Onisko报导说，在阿拉斯加用过的PDC钻头只是克服了牙轮钻头的右旋偏移的特性^[4]，较早时，Paterson和Shute发展了在采用各种不同的近钻头和钻头稳定器保径长度进行涡轮钻井时预期发生的左旋偏移率的定量测定^[12]。Powell、Cooke和Hippman也研究了方向特性^[13]。

PDC钻头趋向左旋（反时针方向）偏移，这是一个很一般性的结论。然而，方位和偏移两者都受地层特性、钻头外形、钻头尺寸、地层倾角、钻压、下部钻具组合和其他因素的影响。这意味着特定的方向特性必须在地区性的具体使用条件下来确定。

地 层

地层选择跟方向倾向一样，只能是在概括的条件下讨论。必须在考虑到诸如层段长度、夹层出现频繁程度、牙轮钻头使用情况和钻井速度等地区性条件的情况下确定特定的适用地层。

一般来说，已经证明了PDC钻头在软至中硬的地层范围内使用是有成效的。更确切地讲，PDC钻头适用于在PDC切削块的剪切作用下易于破碎的地层里，这些地层是在破碎前经历塑性变形的地层，所以对转速比对钻压更敏感，这是它们有代表性的特征。适用地层的类型包括页岩、泥岩、粘土层、石灰岩、硬石膏、白垩和泥灰岩^[3]。

有两种类型的地层会给PDC钻头带来众多的问题，它们是经常被提到的可水化的页岩和砂岩条带。

可水化的页岩在海湾沿岸地区是最常见的，它常呈现为“强粘土”。页岩的水化是页岩的粘土表面水化作用造成的。这些粘土，特别是伊利石和蒙脱石，在用水基泥浆钻井的时候经历水化作用。其结果是形成塑性的粘性页岩，它就不再是易于破碎和对PDC钻头转速敏感的地层了。钻可水化页岩的通常后果是钻头泥包。

砂岩条带是在PDC钻头能钻的页岩中常见的夹层，这些条带是PDC钻头不能钻的，并能损坏钻头和缩短使用寿命，最后的答案就是不适用PDC钻头钻它^[3]。

钻 井 液

PDC钻头在水基和油基泥浆中使用都是有成效的^[2,4,5]，但效果不尽相同。然而，广泛的研究工作表明，在使用油基泥浆体系时，PDC钻头的使用效果更好。在钻可水化的页岩地层时其使用效果的改进最为明显^[2,5]。Holster和Kipp在1983年提供的研究成果表明，不用油基泥浆就不能有效地钻“强粘土”型的可水化页岩层^[10]。进而，他们又发现，在钻可水化的页岩时钻速对于比水马力（HSl）的增加是敏感的，但是在用油基泥浆钻相对不可水化

的页岩时是不敏感的。

除了把钻井时PDC钻头泥包的减少归因于防止水化作用之外，还发现了油基泥浆的其他效益。Moore、Lynch和Talbot的报导说，在南路易斯安那州的Tuscaloosa斜坡，PDC钻头的钻速和进尺等项性能指标都提高了^[5]。使用效果改进的原因可归因于上述因素，诸如用油基泥浆时润滑情况改善，切削块磨损平面温度低，这关系到切削块的磨损速度，以及钻头体首先由油润湿。

油基泥浆的效益在文献中已有很好的报导并已被接受使用。要记住这一事实，纵然油基泥浆可使PDC钻头钻井获益，但它并非PDC钻头钻井获得经济效益的先决条件。

PDC钻头的使用效果受泥浆性能的影响，这和牙轮钻头相一致。泥浆固相含量或者比重的增加将降低PDC钻头的使用效果^[5]。

结构设计的发展

正如前面提到过的，自1973年出现PDC钻头以来，其结构已有很大的变化。今天已有许多结构不同的PDC钻头可供采用。实际上，还没有一种办法能肯定地确定哪一种是“最好”的结构。换句话说，这里讨论的是一些设计的准则。

确定切削块布置和密度的一种方法是要计算每一切削块的等破碎体积^[14]。这就是说，钻头上的各个切削块在钻头每转一圈时要破碎掉同体积的岩石。由于切削下来的岩石的量是随着切削块距中心的距离的增大而增大，切削块的密度也需相应增加以保持每一切削块切削同体积岩石的比例关系。

PDC切削块基本上在两个方面受到限制，即能承受的最大冲击力有限度和支配磨损速度的温度有限度。提高支持金刚石片的碳化钨柱块或钢柱块的韧性，即可提高PDC切削块的抗冲击能力。

350℃和750℃，这两个温度在考虑PDC切削块的热载荷时是重要的。Glowka和Stone估计，PDC切削块的磨损速度在350℃时将因一、二个因素的影响而加速^[15]。在超过750℃时，由于金刚石与粘结剂（原生钻）的热膨胀不同所引起的应力会产生灾难性的破坏。因为金刚石与金刚石之间的粘结破裂造成整个金刚石颗粒的脱出，这是这种破坏所具有的形式。实质上，PDC切削块失去其聚晶的本性，并变得像单晶天然金刚石那样易于发生解理破裂。

根据上述分析，在PDC钻头结构设计阶段，最首要的似乎是考虑PDC切削块的温度及其引起的磨损速度问题。许多钻井因素对PDC切削块的温度有影响，然而，主要的影响因素是钻压和转速。进而言之，从温度的角度来看已表明，PDC切削块对增加钻压的反应很快，而且是接近于成比例^[15]。

如果在确定切削块位置的时候既考虑了其背倾角、侧倾角、扭矩、钻压、转速和钻速，又考虑了某些地层的参数，然后才能进行等工作强度计算。而计算每一切削块的工作强度显然是一项冗长乏味的任务。所以采用计算机是必要的，而计算机辅助设计（CAD）亦是必需的。至于设计程序的专门公式和计算则超出了本文的范围。可以肯定地讲，计算机现已成为钻头设计师们前所未有的工具。每一切削块的有效载荷可根据其背倾角、侧倾角和钻头外形来确定；随着整个钻头的反扭矩方向和偏差能被纠正，也就不会发生无意的偏离了。

最近的发展正在一个可观察流动情况的室里进行全尺寸钻头的试验。这就有可能在从用

旧的钻头中找出问题之前对PDC钻头的清洗特性进行评价，并可看清楚。喷嘴方位与切削块位置和排屑槽的相互作用。

PDC钻头的未来

在某些区域，诸如北美，PDC钻头可钻地层的类型在相当程度上已可以描述出来了⁽³⁾。毫无疑问，在世界的各个地区将发现多得多的PDC钻头可钻的地层。水力学上和机械上都改进了的钻头结构将提高在这些地层的使用效果。

PDC钻头的一个巨大发展潜力在于那些PDC钻头还没有钻过的地层，美国海湾沿岸地区的“强粘土”页岩就是其中一个例子。当PDC切削块的耐温限度提高了，而且尺寸和形状多样化了的时候，被分类为不宜用PDC钻头钻的地层将会变成适用这种钻头钻进了。

结 论

1. PDC钻头结构从类似于普通镶天然金刚石钻头起发展到已有今天的各种型式。
2. 早期的钢体钻头、钢柱块的复合片钻头常因柱块破裂和磨蚀而受到损害。
3. 当PDC钻头的切削块数目增加时，钻速将下降。
4. 增加消耗于钻头的水马力将改进钻头的使用效果。
5. 在小钻压、高转速和高扭矩下使用PDC钻头可获得最佳的钻头特性。
6. PDC钻头适用于软到中硬的地层。
7. 在采用油基泥浆体系时，PDC钻头显示了更好的使用性能，在钻可水化的页岩时更是如此。
8. PDC切削块有两个重要的温度限度，350°C和750°C，在这两个温度下，切削块的磨损速度加快。
9. PDC钻头结构设计理论包括等体积/切削块和等工作强度/切削块的原则，两者都适用计算机辅助设计（CAD）。

术 语

| | |
|-----|------------|
| BHA | 下部钻具组合 |
| CAD | 计算机辅助设计 |
| d | 直径 |
| HHP | 水马力 |
| HSI | 每平方英寸上的水马力 |
| P | 压力 |
| PDC | 聚晶金刚石复合片 |
| Q | 流量 |
| ROP | 钻速 |
| RPM | 每分钟转速 |
| WOB | 钻压 |

参 考 文 献

1. Walker, B.H., Evans, S.T., Fielder, C.M. and Appl, F.C.: paper presented at the 1980 ASME Energy Sources Technology Conference, New Orleans, February 3-7.
2. McLelland, G.M.: "Review of Polycrystalline Diamond Compact Bits Run With Invert Emulsion Oil Mud in Shallow South Texas Wells," paper SPE 13110 presented at the 1984 Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, September 16-19.
3. Keller, W.S. and Crow, M.L.: "Where and How Not to Run PDC Bits," paper IADC/SPE 11387 presented at the 1983 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, February 20-23.
4. Balkenbush, R.J. and Onisko, J.E.: "Application of PDC Bits in the Kuparak River Field, Alaska," paper SPE 11946 presented at the 1983 SPE 58th Annual Technical Conference and Exhibition, San Francisco, October 5-8.
5. Moore, S.W., Lynch, B.W. and Talbot, K.J.: "A Case History of Polycrystalline Diamond Compact Bit Performance in the Tuscaloosa Trend," paper SPE 11944 presented at the 1983 Annual Technical Conference and Exhibition, San Francisco, October 5-8.
6. Cheatham, J.B., Jr., and Daniels, W.H.: "A Study of Factors Influencing the Drillability of Shales: Single Cutter Experiments with STRATAPAX Drill Blanks," *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 101, September 1979, pp. 189-195.
7. Huang, H.I., and Iversen, R.E.: "The Positive Effects of Side Rake in Oilfield Bits Using Polycrystalline Diamond Compact Cutters," SPE 10152 presented at the 1981 56th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas.
8. Cerkovnik, Jerry: "Design, Application and Future of Polycrystalline Diamond Compact Cutters in the Rocky Mountains," paper SPE 10893 presented at the 1982 SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Billings, Montana, May 19-21.
9. Pain, D.D., Schieck, B.E. and Atchison, W.E.: "Evolution of PDC Bit Designs for Rocky Mountain Drilling," paper SPE 12906 presented at the 1984 SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Casper, May 21-23.
10. Holster, J.L. and Kipp, R.J.: "Effect of Bit Hydraulic Horsepower on the Drilling Rate of a Polycrystalline Diamond Bit," paper SPE 11949 presented at the 1983 SPE 58th Annual Technical Conference and Exhibition, San Francisco, October 5-8.
11. Cheatham, C.A. and Loeb, D.A.: "Effects of Field Wear on PDC Bit Performance," SPE 13464 presented at the 1985 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, March 6-8.
12. Paterson, A.W., and Shute, J.P.: "Experience With Polycrystalline Diamond Compact Bits in the Northern North Sea," paper EUR 339 presented at the 1982 European Petroleum Conference, London, England, October 25-28.
13. Powell, R., Cooke, G., and Hippman, A.: "The Versatility of the Turbodrill in North Sea Drilling," paper EUR 245 presented at the European Offshore Petroleum Conference, London, England, October 21-24, 1980.
14. Park, Arthur: "Improvement of Drilling Capabilities of PDC Cutters in Hard Formation," Final Report OOE/BC/10364-24, August, 1982.
15. Glowka, D.A. and Stone, C.M.: "Effects of Thermal and Mechanical Loading on PDC Bit Life," paper SPE 13257 presented at the 1984 59th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, September 16-19.



图 1 早期的PDC钻头结构

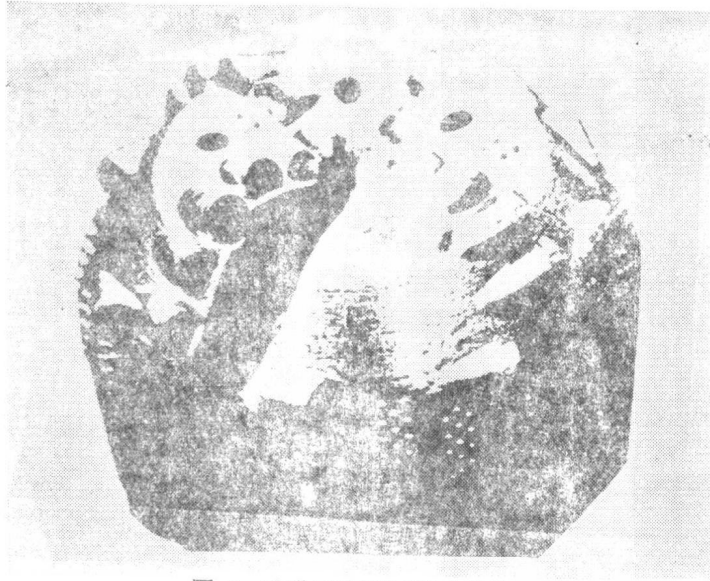


图 2 改进了的PDC钻头结构

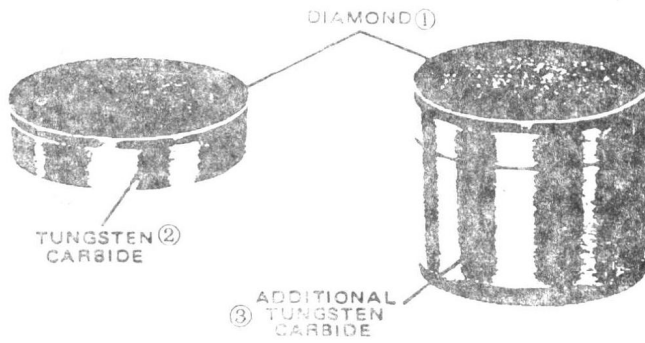


图 3 PDC钻头切削块

①金刚石；②碳化钨；③附加碳化钨片

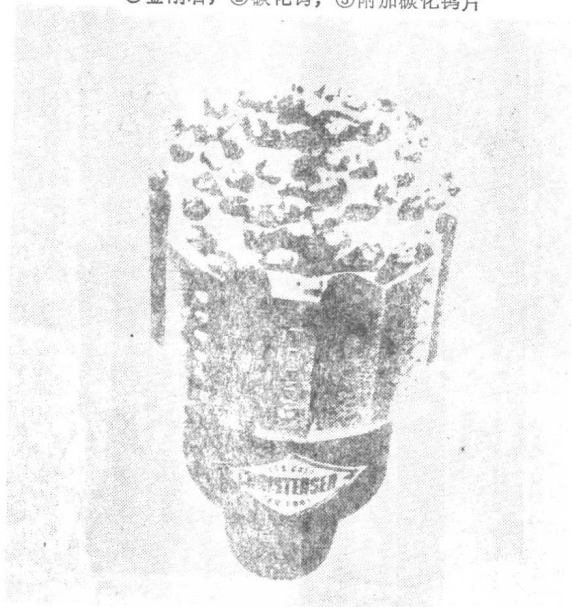


图 4 钢体PDC钻头



图 5 碳化钨胎体PDC钻头

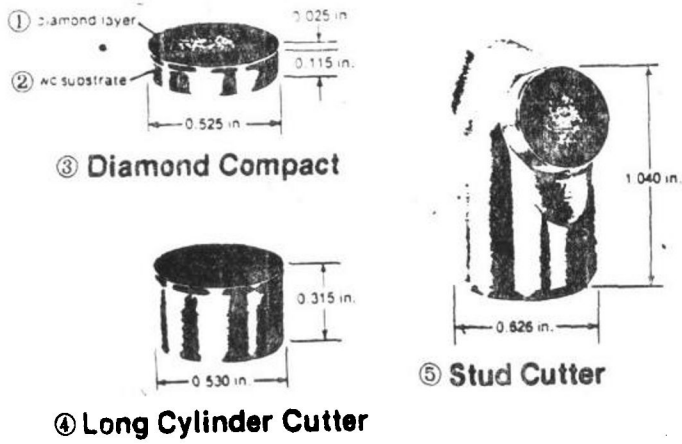


图 6 聚晶金刚石复合片
① 金刚石层；② WC 基底；③ 金刚石复合片；④ 长圆柱切削块；⑤ 柱块切削块

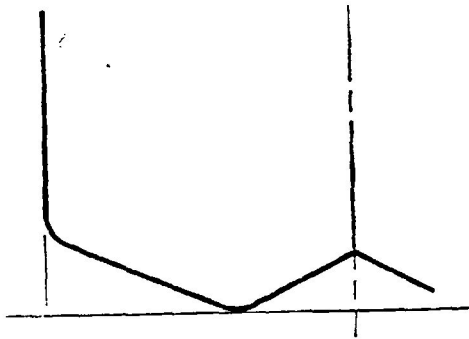


图 7 浅锥型外形

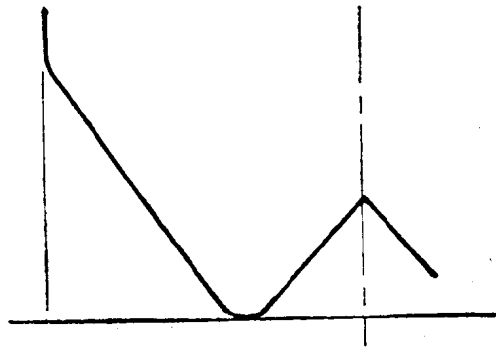


图 8 双锥形外形

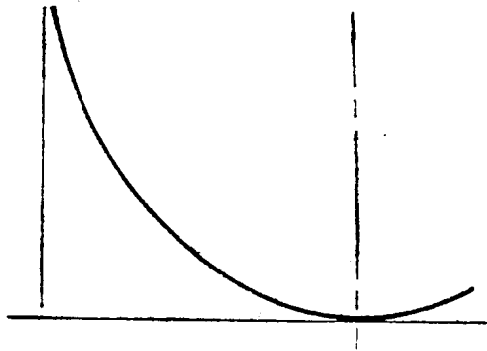


图 9 抛物线型外形