

# 钻井利器之“金刚石钻头”

吴海霞, 蔡家品, 沈立娜\*, 贾美玲, 刘协鲁

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:**随着资源勘探和地球科学探测不断向深部发展, 钻探作为直接获取地下实物信息唯一的技术方法受到越来越多的关注, 也促进了破碎岩石的金刚石钻头技术的进步。本文从科普的角度介绍了金刚石钻头, 以及其分类、工作过程和应用。

**关键词:** 金刚石钻探; 金刚石钻头; 钻井利器; 岩石破碎; 深部探测

**中图分类号:** P634.4 **文献标识码:** C **文章编号:** 2096-9686(2023)02-0155-04

## The story of a drilling weapon—Diamond bit

WU Haixia, CAI Jiapin, SHEN Lina\*, JIA Meiling, LIU Xielu

(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the continuous development of resource exploration and geoscience exploration to the deep earth, drilling, as the only technical method to directly obtain underground information, has attracted more and more attention, and also promoted the progress of diamond bit technology for rock fragmentation. This paper introduces diamond bits, their classification, working process and application from the perspective of science popularization.

**Key words:** diamond drilling; diamond bit; drilling weapon; rock fragmentation; deep earth exploration

钻探是资源勘探和地球科学探测中最直接且不可或缺的手段,也是直接获取地下实物信息唯一的技术方法。在钻探过程中,钻头永远处于前沿和核心的位置,因为钻探的本质就是按一定的工艺方法破碎岩石,其他钻探技术,如信息、控制、泥浆等都在为破岩服务<sup>[1]</sup>。近年来我国资源勘探已由浅部、中深部向深部发展,孔深由几百米增加至数千米,同时启动了地球深部探测计划<sup>[2-4]</sup>,在这些钻探事业的快速发展中,钻发挥发了非常重要的作用。

俗话说,“没有金刚钻,别揽瓷器活”。这句俗语是从一门叫做“錾”的老手艺得来的。以前人们会把破了的碗、坛子、盆等瓷器制品找个铜匠修补后接着用。由于瓷器比较硬,铜匠修补时要用专门的“金刚钻”才行,时间久了就有了这句俗语。今天我们就来聊聊钻探中的“金刚钻”——金刚石钻头。

### 1 什么是金刚石钻头?

钻头是用以在实体材料上钻削出通孔或盲孔的刀具,通常大家熟悉的是麻花钻,如图1(a)所示。而在钻探行业中,钻头是破碎孔底岩石的专用工具,如图1(b)所示,其中金刚石钻头是以锋利、耐磨和能够自锐的天然金刚石或人造金刚石为切削刃的钻头<sup>[5-6]</sup>。

世界上深部油气勘探最深已达到万米,深部科学钻探最深更是超过12 km<sup>[1]</sup>。近年来,我国的钻探工作已由浅部、中深部向深部、超深部发展,已完井的松科二井井深7018 m,是亚洲国家实施的最深大陆科学钻井和国际大陆科学钻探计划(ICDP)成立以来实施的最深钻井<sup>[7]</sup>。深部钻探面临的关键问题是“三高”(高温、高压、高地应力)复杂工况、施工周期长、井壁稳定性差、井斜、取心困难等。据估算,

收稿日期:2022-06-10; 修回日期:2022-11-25 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.022

第一作者:吴海霞,女,汉族,1986年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,从事金刚石钻头及钻具的优化设计工作,北京市海淀区学院路29号,whaixia@mail.cgs.gov.cn。

通信作者:沈立娜,女,汉族,1985年生,高级工程师,材料科学专业,硕士,从事金刚石钻头及钻具的优化设计工作,北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号,slina@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:吴海霞,蔡家品,沈立娜,等. 钻井利器之“金刚石钻头”[J]. 钻探工程,2023,50(2):155-158.

WU Haixia, CAI Jiapin, SHEN Lina, et al. The story of a drilling weapon—Diamond bit[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 155-158.



(a) 麻花钻 (b) 金刚石钻头

图1 麻花钻和钻头对比

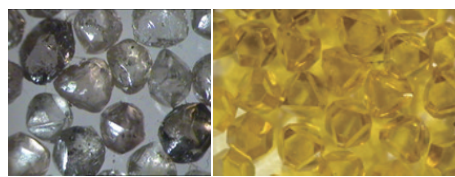
Fig.1 Comparison between twist drills and drill bits

13000 m的钻井井底温度将超过300℃,泥浆液柱静压力将达到143~156 MPa(当泥浆密度1.1~1.2 g/cm<sup>3</sup>时),且随着井深加大,地应力水平越高,取心钻进会出现明显的岩心片化现象<sup>[4]</sup>。上述问题对钻探工具提出了新的要求,金刚石钻头作为刻取岩石的重要工具,其性能的优劣直接影响钻进效率、钻孔质量和钻探成本。

说起金刚石,也许大家会问,这个金刚石和那个“钻石恒久远,一颗永流传”的钻石一样吗?金刚石钻头用的金刚石是钻石吗?没错,金刚石和钻石在本质上是一样的,是自然界最坚硬的物质,前者是矿物学中的称呼,后者是宝石行业中的称呼。金刚石钻头也确实是用钻石做的,但都是用比珠宝钻石品质低的工业金刚石,有天然的(图2a),也有人造的(图2b)。人造金刚石的种类可就多了,有单晶、聚晶,以及金刚石复合体(图3)等。人造金刚石单晶是石墨粉料及合金触媒剂在高温高压条件下合成的结晶体,具有硬度和抗压强度高、耐磨性好等特性;人造金刚石聚晶是金刚石微粉与微量的结合剂在高温高压条件下合成的各种形状的聚合物,具有良好的热稳定性和较高的耐磨性,但抗冲击韧性较低;金刚石复合体以复合片为代表,是由许多细颗粒金刚石在高温超高压条件下烧结而成的带硬质合金衬底的多晶金刚石产品,既具有金刚石的硬度与耐磨性,又具有硬质合金的强度与抗冲击韧性<sup>[7]</sup>。将这些超硬材料应用于钻探行业,于是就发展出来各种各样的金刚石钻头。

## 2 金刚石钻头有哪些呢?

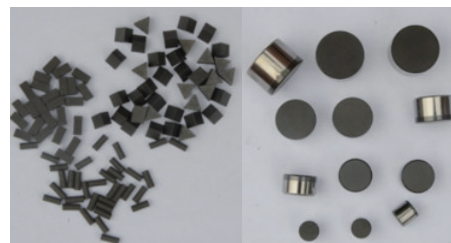
在地质钻探领域,一直以来人们使用钢制钻头,



(a) 天然金刚石 (b) 人造金刚石

图2 工业金刚石单晶

Fig.2 Industrial diamond single crystal



(a) 聚晶 (b) 金刚石复合片

图3 聚晶及金刚石复合片

Fig.3 Polycrystalline diamond and diamond composite

但切削磨料经历了巨大变化。1862年首次将天然金刚石钻头应用于矿山钻探,采用手工方法将黑色的金刚石镶嵌在钢制的环状钻头上。20世纪40年代,出现了采用孕镶细粒金刚石的取心钻头和全面钻头。1954年美国通用电气公司用人工方法合成了单晶人造金刚石,70年代后又先后开发了聚晶金刚石、金刚石复合片、三角聚晶巴拉赛特以及斯拉乌基奇等很多新型超硬复合材料,为钻探工程提供了极为丰富而廉价的钻探磨料,使得金刚石钻头技术获得十分广泛的应用。

为了在高温、高压、高地应力等复杂工况条件下保证金刚石钻头的效率和寿命,金刚石钻头的种类有很多。按照金刚石的来源,可以分为天然金刚石钻头和人造金刚石钻头。按金刚石镶嵌形式可分为表镶钻头(图4a、4c)和孕镶钻头(图4b),前者金刚石均匀布满钻头的胎体表面,不能有空隙,以便有效刻取岩石,一般表镶金刚石的粒度较大,适用于中硬地层;后者由很多较细的金刚石均匀分布在钻头胎体中,更适用于硬—坚硬地层。按照钻头的用途可以分为取心钻头(图4a、4b、4d)和全面钻头(图4c),地质岩心钻探和大陆科学钻探一般都要求全孔取心,以便对岩心进行分析研究,而石油钻井尤其是开发井以全面钻进为主。通常还习惯按加工制造方法命名,如:热压烧结金刚石钻头、低温电镀金刚石钻头、无压浸渍金刚石钻头等<sup>[5]</sup>。其中热压烧结法是

压制和烧结过程同时进行,可使胎体良好地包镶金刚石,并将胎体和钢体固结,是钻头的常用制造方法之一;低温电镀法是利用金属电镀原理将粘结金属镀到铺有金刚石的钻头钢体上,但生产周期长;无压浸渍法是将金刚石与骨架粉末按比例混匀放入石墨磨具内,加入钢体及粘结金属,放入加热炉中烧结,尤其适用于制造特殊形状钻头。

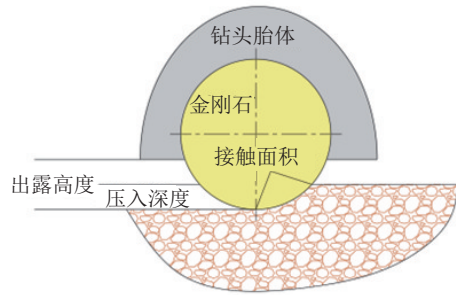


图5 金刚石钻头工作过程示意  
Fig.5 Working process of the diamond bit

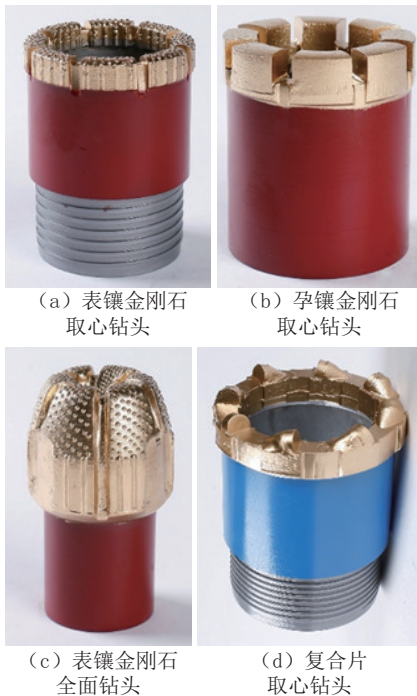


图4 按镶嵌形式和用途分类的金刚石钻头

Fig.4 Diamond bits by types of diamond setting and usage

### 3 金刚石钻头如何工作?

简单来说,金刚石钻头工作过程就是用金刚石不断破碎岩石的过程<sup>[5]</sup>,如图5所示。在破碎岩石的过程中,需给钻头施加一定压力和转速,使金刚石能够压入岩石,并在旋转中持续破碎岩石,钻头与岩石相互摩擦,会不断产生热量和大量细小的岩屑,需要用循环流体为钻头降温并将岩屑带走,以提高钻头破岩效率<sup>[6]</sup>。钻头唇面上出露的金刚石在轴向压力作用下切入岩石,在与金刚石接触的岩石上产生裂隙区;在切向力作用下,金刚石沿横向滑移,随之形成裂隙带;重复的压、张作用使得裂隙带不断伸展、相交,造成岩石破碎。一般金刚石钻头钻进坚硬脆性岩石以压裂、压碎为主,其特点为“崩离”;钻进较软岩石时,以剪切、切削为主,其特点为“犁开”。

### 4 金刚石钻头的应用及展望

#### 4.1 金刚石钻头的工程应用

近年来,金刚石钻头在科学钻探、能源勘探、地质矿产勘查等领域广泛应用,如中国大陆科学钻探CCSD-1井和松科二井,均使用了孕镶金刚石取心钻头(图6a、6b)<sup>[1,7]</sup>;能源勘探中,使用了表孕镶金刚石全面钻头(图6c)和复合片全面钻头(图6d);地质矿产勘查中,使用了高胎体金刚石取心钻头(图6e)和尖齿复合片取心钻头(图6f)<sup>[8-11]</sup>。这些金刚石钻头的使用,大幅加快了我国探索地球奥秘的步伐。

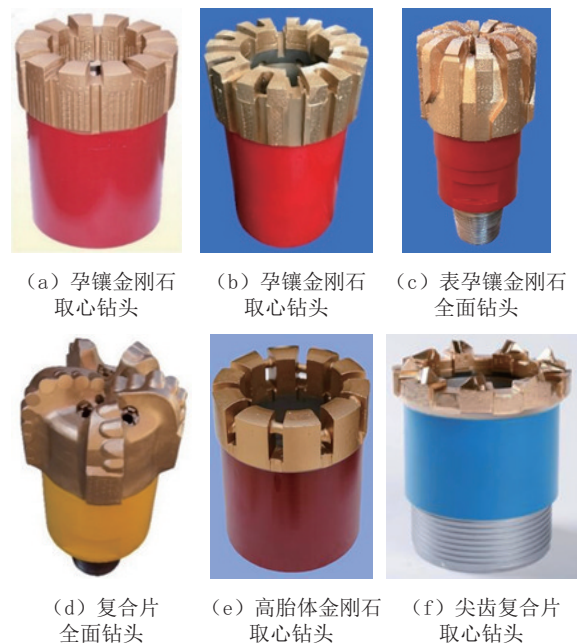


图6 工程应用中的金刚石钻头  
Fig.6 Diamond bits for engineering application

目前我国金刚石钻头水平总体上已得到大幅提升,尤其是表孕镶金刚石全面钻头的性能和指标均超过了国外同类型钻头。如近期在我国南方海相最

深井——元深1井须家河地层中,采用中国地质调查局北京探矿工程研究所研制的 $\text{O}406\text{ mm}$ 表孕镶金刚石全面钻头(图7),配合高速涡轮实现了快速钻进,钻头的寿命及机械钻速远超在该井使用的其他国内外钻头。但在钻遇较硬的砂砾石地层时,国产复合片钻头相比国外同类钻头尚存在差距。

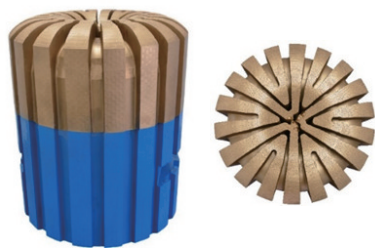


图7  $\text{O}406\text{ mm}$ 表孕镶金刚石全面钻进钻头  
Fig.7  $\text{O}406\text{ mm}$  diamond full face drilling bit

#### 4.2 不足与展望

随着深部资源的勘探以及地球深部探测计划的开展,对金刚石钻头提出了新要求、新挑战,需要不断提高“金刚钻”——金刚石钻头的能力。对于深部高温高压高地应力条件下岩石的物理力学性质、钻头破岩机理、耐高温钻头胎体与切削材料等研究,国内开展很少,国外已做过一定工作,但可查资料较少,急需在这些方面开展针对性研究。

未来金刚石钻头将向复合结构和适应多种复合钻进方式的方向发展,以期获得更长的钻头寿命和更快的钻进速度。钻探行业有了“金刚钻”,能够让我们更加深入地了解地球。同样,其他行业也需要有各自的“金刚钻”,才能揽住他们的“瓷器活”,科技才会不断进步,社会才能不断发展。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵尔信. 金刚石钻头的发展趋势[J]. 超硬材料工程, 2015, 27(1): 52-59.  
ZHAO Erxin. Development trend of diamond drill bit[J]. Superhard Material Engineering, 2015, 27(1): 52-59.
- [2] 张金昌, 刘秀美. 13000 m科学超深井钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 1-6.  
ZHANG Jinchang, LIU Xiumei. 13000m drilling technology of super-depth scientific drilling-well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 1-6.
- [3] 张金昌, 谢文卫. 科学超深井钻探技术国内外现状[J]. 地质学报, 2010, 84(6): 887-894.

- ZHANG Jinchang, XIE Wenwei. Status of scientific drilling technology for ultra-deep well[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(6): 887-894.
- [4] 王达, 张伟, 贾军. 特深科学钻探的关键问题[J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2698-2706.  
WANG Da, ZHANG Wei, JIA Jun. The key problems of ultra-deep drilling engineering [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(26): 2698-2706.
- [5] 刘广志. 金刚石钻探手册[M]. 北京: 地质出版社, 1991.  
LIU Guangzhi. Diamond Drilling Handbook[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [6] 汤凤林, Нескоромных В. В., 宁伏龙, 等. 金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(10): 43-55.  
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V. V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 43-55.
- [7] 侯贺晟, 王成善, 张交东, 等. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 2018, 45(4): 641-657.  
HOU Hecheng, WANG Chengshan, ZHANG Jiaodong, et al. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Resource discovery and progress in earth science research [J]. Geology in China, 2018, 45(4): 641-657.
- [8] 王达, 何远信, 赵国隆, 等. 地质钻探手册[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.  
WANG Da, HE Yuanxin, ZHANG Guolong, et al. Geological Drilling Handbook [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [9] 李春, 沈立娜. “松科二井”用硬岩长寿命钻头的设计与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(2): 56-60.  
LI Chun, SHEN Lina. Design and application of long service life bit in hard rock drilling for “SK- II” well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(2): 56-60.
- [10] 蔡家品, 贾美玲, 沈丽娜, 等. 难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(2): 67-73, 91.  
CAI Jiapin, JIA Meiling, SHEN Lina, et al. Present situation of diamond bit used in difficult drilling formations and the development trend [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(2): 67-73, 91.
- [11] 阮海龙, 沈立娜, 李春, 等. 弹塑性致密泥岩用新型尖齿PDC钻头的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(12): 80-83.  
RUAN Hailong, SHEN Lina, LI Chun, et al. Research and the application of new sharp-tooth PDC bit used in elastic-plastic compact mudstone [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(12): 80-83.

(编辑 李艺)