

近年来钻探用超硬材料的发展与展望

方啸虎¹, 崔祥仁², 谢德龙³

(1. 上海昌润极锐超硬材料有限公司, 上海 201108; 2. 晶日金刚石工业有限公司, 河北 三河 065201;
3. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要:超硬材料在工业发展中扮演着举足轻重的角色,特别是地质钻探行业中超硬材料的研制与应用更显突出。以前钻探界有句话:“有什么样的磨料就有什么样的钻进设备和钻进工艺”,这充分说明了它们的因果关系。金刚石钻头随着人造金刚石的品种、结构、性能、品质等方面不断提高,很大程度上满足了地质钻探行业的需求,并推动了钻探行业的飞速发展;同样钻探应用中提出的新需求,又不断促进超硬行业继续探索。两者相辅相成,互相促进,共同发展。本文结合大量实例阐述了地质钻探行业中使用的超硬产品的特点、种类、性能等。真切地期待未来超硬材料能够更精更新,更多地在钻探产业实现创新突破。

关键词:超硬材料;地质钻探;金刚石钻头;展望

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)S1-0018-07

Development and prospect of the super hard materials applied to the drilling industry in recent years

FANG Xiaohu¹, CUI Xiangren², XIE Delong³

(1. CR GEMS Superabrasives Co., Ltd., Shanghai 201108, China;

2. JingRi Diamond Industry Co., Ltd., Sanhe Hebei 065201, China;

3. China Nonferrous Metals(Guilin) Geology And Mining Co., Ltd., Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Superhard materials play an important role in the industrial development, especially in the geological drilling industry, the development and application of superhard materials are more prominent. In the past, the drilling industry has a word saying that the kind of abrasive results in the kind of drilling equipment and craft, which fully explained their causal relationship. As the promotion of the variety, structure, performance, quality of the artificial diamond, the diamond bit has met the needs of geological drilling industry to a large extent, and rapidly promoted the development of drilling industry. In the meantime, the new requirements from drilling applications continue to accelerate further exploration in the superhard industry. In other words, they complement each other, promote each other and develop together. This paper describes the characteristics, types and properties of superhard products used in geological drilling industry according to large numbers of examples. The authors sincerely expect that the superhard materials will be more refined and updated in the future, and more innovation breakthroughs will be achieved.

Key words: superhard material; geological drilling; diamond bit; prospect

0 引言

超硬材料是指硬度特别高的材料。钻探用超硬材料是指满足钻探工程需求的金刚石等材料。

早在20世纪70年代初,行业资深老专家方啸虎先生就提出钻探用超硬材料的概念。包括钻探用金刚石单晶、金刚石聚晶、金刚石复合材料等,他

收稿日期:2021-05-31 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2021.S1.003

作者简介:方啸虎,男,汉族,1939年生,教授级高级工程师,北京科技大学、中南工业大学、湖南大学等兼职教授,博士生导师,目前从事超硬材料与探矿工程技术的研究工作,上海闵行区申北路168号30楼1102室, fang5371636@sohu.com。

引用格式:方啸虎,崔祥仁,谢德龙.近年来钻探用超硬材料的发展与展望[J].钻探工程,2021,48(S1):18-24.

FANG Xiaohu, CUI Xiangren, XIE Delong. Development and prospect of the super hard materials applied to the drilling industry in recent years[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):18-24.

指出钻探用超硬材料不只是金刚石单晶,而是经过多年来围绕钻探技术不断进步而研究生产所形成的系列超硬材料。包括:

- (1)不同粒度和强度的高品质金刚石;
- (2)不同形态和磨耗比的聚晶;
- (3)不同大小和磨耗比的复合片;
- (4)不同种类用于钻探工程的超硬材料,包括聚合钻石纳米棒(ADNR)、化学气相沉积金刚石(CVD)、多晶立方氮化硼(PCBN)等。

1 钻探工程和超硬材料共同发展

我国金刚石行业的早期发展就是得益于钻探工程的需求的拉动。当年的冶金部就是为了提高地质找矿效率,开展人造金刚石钻探研究。以原北京地质研究所(后搬迁桂林,现称中国有色桂林矿产地质研究院)为代表开创性地开展了研究。后在冶金部统筹下,在1974年、1975年先后成立了燕郊金刚石厂等一批金刚石生产企业,并在系统内推广金刚石钻头生产。许多金刚石生产厂家也是缘于钻探工程,许多金刚石行业专家也出自钻探工程行业。当年也是为解决钻探难题而投入研发新型超硬材料。因此超硬材料与钻探工程两个行业有着密切的联系,互相促进,互相帮助,共同发展。这也是许多地质和石油钻头厂家,自行研发生产钻探用超硬材料的原因。

不同岩石的硬度及可钻性级别不同,对钻探用金刚石钻头的金刚石强度、粒度、浓度及胎体的硬度要求都不同,但对金刚石强度的要求是越高越好。这也就是过去金刚石行业常把静压强度在13 kgf(1kgf=10N,下同)以上的金刚石称为高强金刚石的原因。

人造金刚石聚晶是一种把金刚石与结合剂在高温、超高压下烧结而成的金刚石聚合物,现在它已具有极高的耐热性和很高的热稳定性。从一开始就是为了替代粗颗粒人造金刚石单晶用于钻探工程而发明的。现在已广泛应用于钻头、扩孔器等钻探工具中。

金刚石复合片是一种金刚石和硬质合金基体组成的复合材料,具有强度高、耐磨性好的特点。广泛用于石油钻井、地质勘探、煤田钻采钻头等钻探工程行业。现在还广泛应用于钻采业。

近年来许多金刚石厂家一直瞄准解决钻探工程

中的难题,反复试验研发适用于钻探用超硬材料。随着金刚石生产技术的成熟、产品质量的提高和产品成本的降低,使钻探可用超硬材料的品种范围越来越宽,推进了各种钻探工程技术水平的不断提高,使我国钻探工程取得了许多光辉的业绩,我国钻探技术达到世界先进水平。

例如,我国松辽盆地资源与环境深部钻探工程——松科2井,钻井深度达7018 m,创亚洲国家地壳深钻新纪录。

在石油钻探领域,超过8000 m的钻井已经很多。中国石油塔里木油田负责的“轮探1井”2019年完钻井深达8882 m,成为目前亚洲陆上的最深井。该井的成功钻探标志着塔里木油田超深井钻井技术达到世界领先水平。

“顺北55X井”完钻井深8725 m,创亚洲陆上定向井最深纪录。

湖南科技大学研制的海底多用途钻机“海牛号”在南海3109 m海底海试成功。

2019中国自主研发的极地钻探装备成功钻穿近200 m厚的南极冰盖,获取了连续的冰芯样品和冰下岩心样品。

2020年12月17日,嫦娥五号带回1731 g月球样本。中国地质大学(武汉)段隆臣团队分别参加了部分钻探方案设计和钻探模拟试验等工作。

此外,我国半幅式海上平台已达世界先进水平,各种防爆、破拆、救援钻探效率更高,这些成就的取得是离不开超硬材料的支撑。这就是钻探界当年提出的“上天、入地、探极、入海”的综合成果展现。

2 钻探用超硬材料的快速发展

2.1 中国超硬材料发展现状

根据中国机床工具工业协会超硬材料分会和《中国磨料磨具工业年鉴2020》统计数据,2020年,中国超硬材料行业总产值已达50亿元,中国金刚石产量200亿ct(1ct=0.2 g,下同)。其中工业金刚石达145亿、宝石级单晶244万ct,金刚石复合片587万片8.6亿元,中国金刚石已达到国际先进水平,见表1。

据不完整的资料分析:钻探用的金刚石占工业金刚石40%左右,钻采用复合片和聚晶占金刚石复合材料的65%,各种钻采工具(不包括石油领域)占金刚石工具的20%,保守估计钻探用超硬材料及工

表1 中国工业金刚石的历年产量 10^6ct

时间	产量	时间	产量
2011年	12400	2016年	13600
2012年	14000	2017年	14300
2013年	15300	2018年	15200
2014年	17200	2019年	15000
2015年	15600	2020年	14500

具年产值已达20亿元以上。

2019年以来,受新冠疫情的影响,国内超硬材料和金刚石产业受国内外经济拉动政策影响,出现了不降反升的非常兴旺景象。金刚石产品结构的调整,宝石级钻石需求增大,使得工业金刚石也严重供不应求。

2.2 中国超硬材料技术进步推动了钻探用超硬材料的发展

近年来,中国超硬材料(金刚石和复合材料)的生产制造技术进步飞快,超硬材料生产技术的进步为高品质钻探用超硬材料的生产提供了基础。

(1)中国特色的六面顶压机的大型化、智能化,不仅大大提高了中国超硬材料的产能,还生产出了更高强度、更粗颗粒、更加坚硬的钻探用超硬材料。

国内金刚石合成装备制造厂家和金刚石生产厂家一起共同研发,通过不断地对合成压机的工作缸、绞链梁、液压系统、电控系统的优化和更新,使中国特色压机具有稳定性强、操作简单、可靠性高、重复性好、智能跟踪、顶锤消耗低、维修方便等特点,已普遍得到金刚石行业的认可,出口到美国、日本、俄罗斯、乌克兰等许多国家,达千台以上。

目前,超硬材料压机大型化已经普及。行业 $\varnothing 750\sim\varnothing 900\text{ mm}$ 缸径压机已成为主流机型。国内金刚石压机总量超过万台以上, $\varnothing 500\sim\varnothing 600\text{ mm}$ 的压机已基本淘汰,六面顶压机的缸径已达到 1 m ,总推力可达 $9000\text{ t}(9\times 10^7\text{ N})$,可支持 $\varnothing 200\text{ mm}$ 直径的顶锤和 $\varnothing 90\text{ mm}$ 腔体、 $5\sim 7\text{ GPa}$ 的合成条件。通过二次增压,合成压力可达 $15\sim 50\text{ GPa}$,同时精密的加工精度、良好的对中性 and 智能的控制系统,支持持续合成加压时间 30 d 以上。

此外,锻造压机、框架压机、分裂球式以及新型的两面顶压机等超硬材料合成装备不断涌现,如:吉林大学研发的 $6\text{万 t}(6\times 10^8\text{ N})$ 超大压机(见图1),为优质超硬材料及其他高压材料研发奠定了基础。



图1 吉林大学6万t压机

新型智能控制技术和装备不断出现,使压机控制更容易、工艺更精准,压机可在生产单晶和复合片工艺上自由切换,为钻探用超硬材料生产提供了基础。高温高压大粗颗粒单晶、大尺寸PDC,高强度NPD,以及特殊异形单晶、多晶、复合片的生产工艺得以实现。

CVD、MPCVD等技术装备的突破,CVD法生产迅速发展,大单晶可达 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 、多晶复合片能达 $6\text{ in}(152.4\text{ mm})$ 。见图2。

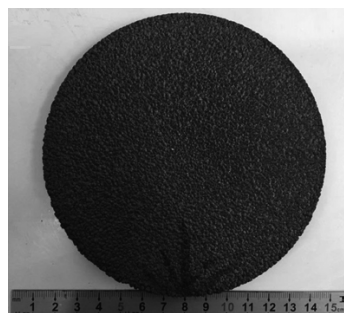


图2 CVD法多晶复合片

(2)合成工艺水平不断提高,许多钻探用超硬材料达到和超过国际水平。

近年来,经过技术人员反复研究摸索,通过对超硬材料的合成密封材料、粉体配方、腔体结构、合成工艺的不断优化,国内超硬材料达到了国际水平。

通过控制金刚石合成压力和温度,调整金刚石晶体的生长方式,生产出不同强度、不同晶型的金刚石,提高了品级和质量,现在工业金刚石品种多达70多种,可用于钻探工程的牌号多达40多种。

通过调整品种和金刚石触媒配方,控制金刚石单晶粒度生长,生产出了粒度更粗、强度更高的金刚石,如 2.5 mm 的粗颗粒、 $10\sim 25$ 目的高强度粗粒度金刚石,可专门用于替代天然金刚石,更好地用于钻探工程。

通过调整基体结构和微粉粒度、结合剂配方,生

产出磨耗比更高的金刚石复合材料,并且对生长方式、齿型结构、分层组装控制,生产各种异型复合片,更好地用于钻探工程。

(3)企业规模化经营和精细管理的推广,钻探用超硬材料成本大幅度降低。

目前中国超硬材料行业的企业在全球不仅技术先进,而且规模领先,共有9家上市公司,规模最大的超硬材料厂家的资产已达50亿元。

许多大厂都是从金刚石原材料开始,金刚石合成、金刚石制品以及金刚石制造装备等形成一条龙生产。大部分都是国家高新技术企业,拥有自主研发机构,集研发、生产、销售为一体,并且建有世界级先进的实验室和检测机构。

同时也有许多厂家积极推进信息化和工业化的深度结合,以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,走新型工业化道路;利用新型网络技术、大数据、云计算等信息手段实现生产和管理的自动化,追求可持续发展模式。5G及智能技术也已经启动。

这种大规模的生产和精细化的管理,降低了整个行业的生产成本。

3 中国超硬材料发展为钻探技术的发展提供了多种可能

近年来,超硬材料技术得以迅速发展。随着金刚石合成技术和合成装备的不断进步,压机的大型化,合成工艺的智能化,高压、高温条件下合成的超硬材料,不仅在品种和型号上增加了许多,而且品质和质量上也有了飞速发展。

3.1 钻探用超硬材料技术的发展

“十三五”末,HPHT法合成的大单晶单颗粒已超过20 ct,如图3所示,且实现大批量工业化生产,PCD产品直径可达45 mm,NPD产品直径达10 mm,硬度达134 GPa。PDC复合片直径可达75 mm,磨耗比能达100万或以上。各种功能性超硬材料不断出现。

中国是金刚石生产大国,产能的提高,也使成本大幅度降低,钻探级金刚石成本的降低是本人搞金刚石时无法比拟的,目前行业基本上都不用金刚石静态抗压强度概念了,而是用TP、TTP(冷冲、热冲强度)。这些因素都直接或间接地推动了钻探技术的发展。

3.2 中国超硬材料发展为钻探技术的发展提供许



图3 人工培育白色钻石

多可能

钻探工程是探矿和油、气开采工程的重要组成部分。在钻进中主要应用机械的方法破碎岩石。按破碎岩石的外力作用方式可分为:冲击钻进、回转钻进、冲击回转钻进等,回转钻进中主要靠磨粒研磨岩石钻进。

按破碎岩石所使用的磨料可分为:硬质合金钻进、钢粒钻进和金刚石钻进等。

金刚石钻探是指用金刚石作磨料制成的钻头,以回转方式破碎孔底岩石,用岩心管取岩(矿)心的一种钻探方法。

目前金刚石钻探是钻探工程中的一种重要技术手段,广泛应用于寻找和勘探开采各种矿产、油气藏、地下水、地热,以及水利建设、工程建筑和交通设施、矿山抢险等领域。

不同的岩石,不同的地层,不同的钻探目的对钻探工程和钻探技术要求不同,同样不同的钻探技术对钻探用的超硬材料要求也不同。

超硬材料的发展为钻探技术提供许多可能:

(1)高强度使钻头寿命增长。金刚石高强度的水平的提高,使得钻头无论是表镶还是孕镶都不再依赖天然金刚石了,在钻头上应用的金刚石单晶无论在粒度还是强度上都能满足钻探的需要,这大大提高了以金刚石单晶为磨料钻进的效率和寿命。

(2)高质量金刚石复合片使大口径钻进和切削钻进效率更高。过去金刚石复合片只能用于中软岩层的钻进,现在高质量复合片使中硬和坚硬地层的磨削也可以变成了切削,改变了钻进方式提高了进尺效率。

(3)金刚石尖齿的出现,使钻进刻取岩石的切削方式转变,实现了花岗岩和硅质灰岩岩层中的钻进机理和方式由切削变成了犁削。

(4)金刚石球齿强度提高,为冲击钻头和牙轮钻

使用寿命的延长奠定了基础。过去传统的金刚石球齿抗冲击强度低、工作层厚度不足,严重影响了其使用寿命,现在通过优化金刚石配方和合金基体界面设计、增加过渡层、采用分层组装等技术,使金刚石球齿的性能得到了极大的提高,满足了其在高冲击领域的应用。

(5)金刚石异型齿、360齿、3D齿为金刚石钻头仿生设计和定向钻进提供了可能,能适用于更多地层。

(6)含硼金刚石、自锐性金刚石、金刚石方晶体、金刚石大单晶、微米级金刚石聚晶MPD,纳米级金刚石聚晶NPD等许多材料的出现,为未来钻探提供了更多的空间。

4 钻探用超硬材料的现状

介绍几种新型的钻探用超硬材料。

4.1 钻探用金刚石

(1)高强度金刚石,是一种通过金刚石材料、合成工艺的改变生产的高品质金刚石(见图4)。原钻探钻头常用45、40目的金刚石,静压强度可达50 kgf,比原国标金刚石钻头要求的金刚石标准高出3

倍,用其生产的钻头使用寿命提高2~4倍以上,为钻探钻头的耐磨性提高了更大空间。

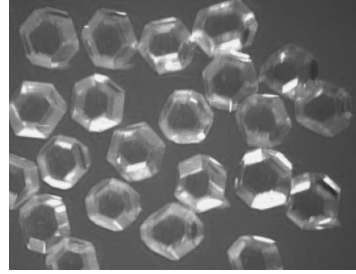


图4 高强度金刚石单晶

(2)完整晶型,高强度方晶,一种为保证钻头的锋利程度的不同晶型的金刚石(见图5),如力量公司生产的高强度方晶,厚德公司生产的自锐性金刚石,河北晶日、上海昌润生产的“正方晶金刚石”。

近年许多金刚石厂家在金刚石生长工艺上下功夫,通过生产工艺控制金刚石晶型的生长,生产出许多适应钻探使用的金刚石晶型,如完整“方晶”单晶,自锐性和高强度都表现得很好。这些金刚石为刻取不同的岩石提供了更多设计方案。

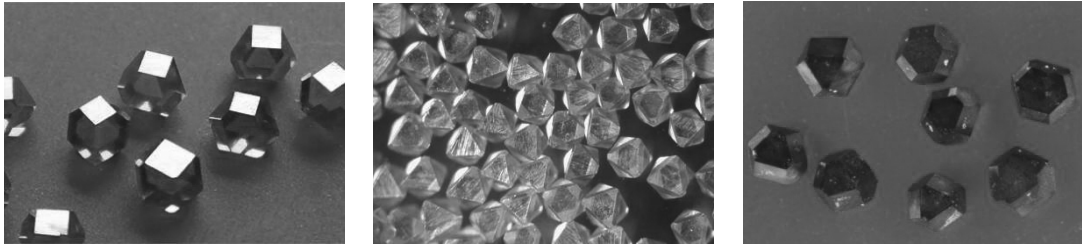


图5 不同晶型的金刚石

(3)粗粒度和大颗粒单晶,是指12~35目以及2.5 mm以上金刚石。过去受压机技术限制,很难生产高强度的粗粒度金刚石,过去钻探用粒度金刚石只能用天然金刚石,其晶形、粒度、强度差异很大。现在人工合成的高强度粗粒度、大颗粒金刚石可以大批量生产,用大粗颗粒表镶的金刚石钻头(见图6、图7)适用于更复杂的地层,为钻头在硬岩中高效钻进提供了可能。

4.2 金刚石复合材料

(1)金刚石聚晶(PCD)。近年来,除了传统硅基聚晶以外,还研究出许多热稳定聚晶、钴基聚晶、生长型聚晶等,多形状、大尺寸、高强度、高磨损比的

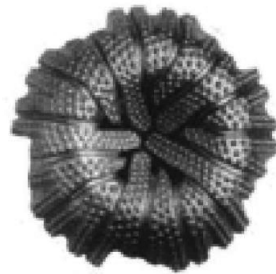


图6 大粗颗粒表镶的金刚石钻头

钻探用聚晶。用于石油地质钻探,保径、转向、扶正、扩孔等钻探工艺上。见图8、图9。

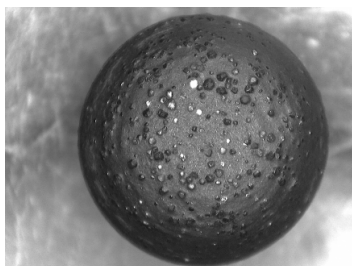


图 7 用大粗颗粒压制的金刚石球齿

产品名称	规格	订单号	规格公差	检测数量	检测公差	生产日期	检测日期	检测人
PDC	1208	\	3	3	320-45F	\	2015.6.7	
		物理参数		化学成分		检测标准		
		硬度	弹性模量	碳含量	氮含量	氧含量	硫含量	磷含量
		1000.0	718.0	204.0	15.85015	15.85551	0.00066	43.17
		1000.0	715.0	210.0	15.49295	15.49209	0.00066	26.13
		1000.0	705.0	245.0	15.54652	15.54236	0.00059	26.42
显微组织								
样品 1			样品 2			样品 3		
磨粒宽度 0.715mm			磨粒宽度 0.730mm			磨粒宽度 0.811mm		

图 11 国内某厂家复合片检测报告

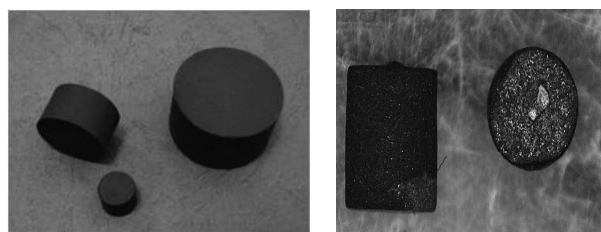


图 8 金刚石聚晶(PCD) 图 9 含 CVD 颗粒的金刚石聚晶

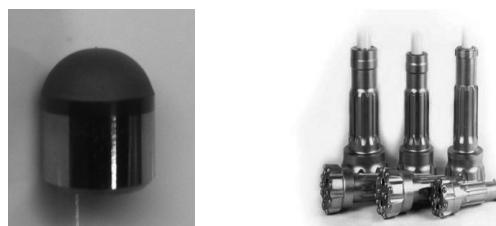


图 12 金刚石球齿 图 13 应用金刚石球齿的潜孔钻头

(2)金刚石复合片。过去,钻探用金刚石复合片主要依赖进口,目前国产复合片技术的快速提高,国产金刚石复合片通过基体、配方、合成工艺的改变,已达到和接近国际先进产品。

国产金刚石复合片金刚石层不断加厚,可达 2~6 mm,产品的寿命也随之提高。金刚石微粉越来越细,加上分层组装,耐磨性和抗冲击性性能提高,磨耗比能达 50 万。通过优化工艺增加耐热层,复合片热稳定性大幅提高。见图 10。



图 10 金刚石复合片(PDC)

图 11 为某公司金刚石复合片,冲击强度和磨性指标达国际标准。

(3)金刚石球齿。随着技术进步,国内已有许多厂家将金刚石球齿应用到冲击锤和牙轮钻上,其使用寿命是硬质合金的 4~6 倍。见图 12~14。

(4)金刚石复合异型齿见图 15。为仿生钻探、定向钻探、孔底驱动钻探的钻头设计提供了支撑。尖齿钻头效率更高,见图 16。

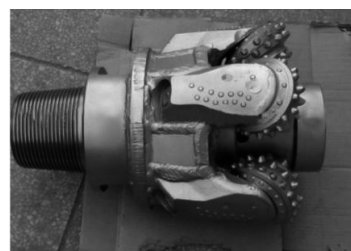


图 14 应用金刚石球齿的牙轮钻头

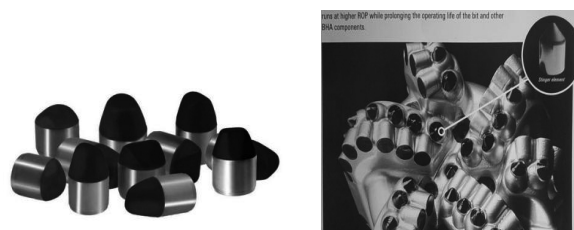


图 15 金刚石复合异形齿 图 16 尖齿钻头

(5)含硼金刚石和复合片。含硼金刚石除具有正常金刚石本身优异的性能外,在导电性和化学稳定性方面,也比普通金刚石热扩散性好、氧化温度高。与普通金刚石相比:耐热性(耐热温度可以增加 200~250 ℃)、化学稳定性(切削铁族材料时,无切削瘤形成)、耐磨性(特别对硬而脆的材料,寿命提高 2~4 倍)、高耐冲击性(多晶钻头多晶体很少破碎,优于普通金刚石多晶钻头和天然金刚石单晶钻头),用含硼金刚石做成的复合片和聚晶用于岩石和钢铁相组合的复杂地层的钻探效果较好,如废旧油井的清理等。见图 17、图 18。

(6)MPD、NPD。燕山大学王明智团队多年来



图 17 含硼金刚石



图 18 含硼金刚石复合片

一直致力于MPD产品的研究,他们用纳米葱头状碳源制备微米级金刚石聚晶的方法,能够使聚晶强度更为适用。

纳米金刚石聚晶作为最硬的超硬材料国内已有许多厂家可以生产,中南杰特生产的NPD直径已达 $\varnothing 10$ mm、维氏硬度可达134 GPa,已具世界先进水平。

随着生产技术的完善和生产厂家的增多,纳米/微米金刚石聚晶必将用于钻探工程中,在石油钻探、精密拉丝、光学器件加工等领域替代单晶金刚石。当然最新的产品所需的合成压力更高,全面商业化尚需一个过程,但方向是完全肯定的。见图19、图20。



图 19 MPD



图 20 NPD

5 总结

(1)本文力图介绍我国钻探用超硬材料发展和现状。钻探用超硬材料占我国超硬材料重要份额,钻探用超硬材料发展是推动超硬材料发展的重要组成部分,也是推动钻探工程发展的动力源。

(2)近年来,我国金刚石单晶、聚晶/复合片、立方氮化硼等超硬材料发展迅速,产品的产量、品质不断提高,必将推动钻探工程的发展。而且许多新的超硬材料的不断出现,将革命性地改变我们的钻探方式,为钻探工程技术发展提供更多的可能。

(3)超硬材料与钻探工程两个行业有着密切的联系。钻探工程和超硬材料互相促进,不断进步,共同发展。钻探工程的不断进步为钻探用超硬材料提

出了许多新要求,钻探用超硬材料的发展也不断推动钻探技术的发展,重视钻探工程发展的新需求是我国超硬材料的重要任务。

(4)我国已经步入世界超硬材料的强国。要下大力气推动超硬材料的应用,推进下游产业,特别是钻探工程中的应用,使的各项工作都达到国际先进水平,真正实现创新、实现高质量发展!

参考文献:

- [1] 方啸虎.中国超硬材料新技术与进展[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.
- [2] 方啸虎,等.现代超硬材料与制品[M].杭州:浙江大学出版社,2011.
- [3] 李志宏.2020年超硬材料行业经济运行形势简析[C]//中国超硬材料行业技术发展论坛.中国机床工具工业协会,2020.
- [4] 方啸虎,温简杰,崔祥仁,等.我国超硬材料的现状与发展[J].超硬材料工程,2011(5):46-50.
- [5] 吕智,谢志刚,林峰,等.超硬材料行业技术发展现状与展望[J].超硬材料工程,2017,29(5):47-51.
- [6] Delong Xie, Zhigang Xie, Feng Lin, et al. Microstructures and properties of FeCoCu pre-alloyed powder for geological diamond bits[J]. Journal of Superhard Materials, 2019, 41(3): 302-309.
- [7] XIE Delong, WAN Long, SONG Dongdong, et al. Low-temperature sintering of FeCoCu based pre-alloyed powder for diamond bits[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015,31(5): 56-61.
- [8] 谢德龙,张绍和,方啸虎,等.地质钻探发展新动态[J].超硬材料工程,2017,29(4):51-54.
- [9] 谢德龙,万隆,方啸虎.国家战略为依托,积极发展深孔钻.中国超硬材料工业五十年会议[R].郑州,2013.
- [10] Wang Jia-liang, Zhang Shao-he. A new diamond bit for extra-hard, compact and nonabrasive rock formation[J]. Journal of Central South University, 2015,4:634-641.
- [11] Qian J., Memurray C.E., Mukhopadhyay D.K., et al. Polycrystalline diamond cutters sintered with magnesium carbonate in cubic anvil press[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 31: 71-75.
- [12] 方啸虎,谢德龙,万隆,等.我国超硬材料的今天和明天——纪念中国超硬材料发展50年[J].超硬材料工程,2013,25(1): 38-42.
- [13] 赵尔信,蔡家品,贾美玲,等.我国海洋钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):43-49.
- [14] 王明智,邹芹,赵玉成,等.纳米圆葱头-碳+微米级金刚石制备聚晶金刚石的方法:CN103274398A[P].2013.
- [15] 赵尔信.超硬材料应用于钻探的新领域[J].超硬材料工程,2018,30(5):47-50.
- [16] 鄢泰宁.人造金刚石超硬材料在钻探中的应用[M].北京:地质出版社,2011.
- [17] 尤悦,李尚升,宿太超,等.高温高压下金刚石大单晶研究进展[J].物理学报,2020,69(23):30-45.