

50-54 钻井工程用超硬材料及钻头的发展

TD 421.25

马保松 张祖培 孙友宏

(长春科技大学·长春·130026)

介绍了钻井工程用超硬复合材料(包括PDC、PCBN、陶瓷和金刚石膜)的发展现状及前景;同时也介绍了以这些材料切削具的钻头制造及应用情况;指出金刚石膜合成技术的发展已使金刚石膜制造钻井工程用切削具成为可能。

关键词 超硬材料, 钻头, 发展 应用

钻井工程, 金刚石膜



岩土工程

美国 W. C. Maurea 等人 1990 年统计指出,在深井施工中,大约有 70% 的时间花费在钻进和起下钻过程中,所以钻头质量好坏,在钻孔施工中显得尤为重要,因此研制高效、长寿命的切削具及钻头,一直是钻井工作者所追求的永恒主题。

半个世纪以来,钻井工程的发展与金刚石超硬材料及钻头的发展密切相关。50 年代人造金刚石的合成及后来人造金刚石钻头的应用,使得钻井成本大幅度降低;70 年代初期聚晶金刚石(PCD)的兴起及应用,大大提高了钻进效率,并在 70 年代中期广泛地应用于软-中硬地层;80 年代热稳定聚晶金刚石超硬材料及钻头的发展,使得在硬地层中钻进成为可能。

目前,立方氮化硼单晶(CBN)及聚晶(PCBN)在钻井工程中的应用已开始引起人们的重视;金刚石薄膜合成技术的发展,已能满足钻井工程中制造钻头切削具的需要(厚度已达 2mm,耐磨性不低于天然金刚石);近年来,精密陶瓷技术的进步,使得部分钻头已开始使用陶瓷做为切削具。这些新技术、新方法和新材料的应用和推广,必将推动钻井工程的快速发展。

1 金刚石超硬复合钻头

钻井工程中应用最为广泛的是金刚石单晶及其复合材料。目前在该领域应用的金刚石复合材料可以分为:聚晶金刚石复合片(PDC)、金刚石复合烧结体和热稳定聚晶。西方在 1972 年前后开始将复合片 Compax 和 Syndite 应用于钻井工程,1976 年又开始使用 Stratapax 和 Syndrill,而前苏联差不多也在同时开始使用金刚石与硬质合金混合烧结体斯拉乌季契(СЛАВУТИЧ);80 年代初期,西方和前苏联相继推出了 Geoset、Syndax3 和 CBC-II 等热稳定聚晶金刚石复合材料。

我国从 1969 年开始研究聚晶金刚石,1972 年研制成功 JRSN 多晶金刚石(以 Si、Ni 做为结合剂合成的 PCD),应用于地质钻探,取得了很好的效果。80 年代以来,郑州三磨所、上海硅酸盐研究所、六砂、地矿部探矿工程研究所和北京钻探工具厂等单位,也先后研制出聚晶金刚石及复合片,并大批量生产。

1.1 聚晶金刚石复合材料

聚晶金刚石复合材料一般由两部分组成:聚晶金刚石和硬质合金基体,采用高温高压(HTHP)工艺合成。这里硬质合金的作用有两点:一是提高材料的抗冲击韧性;二是在

本文 1997 年 7 月收到,王 梅编辑。

钻头的制造和钻进过程中,起到保护聚晶金刚石的作

在常压下,聚晶部分的热稳定性很差(仅为700℃左右),这主要是起粘结和触媒作用的Co元素造成的。Co元素不仅造成聚晶金刚石的石墨化,而且由于Co或Co的化合物的热膨胀系数和金刚石的热膨胀系数相差很大,聚晶层极易受热损伤,除了Co元素的影响外,聚晶金刚石和硬质合金热膨胀系数的不同,也易造成聚晶金刚石从硬质合金基体上脱落,造成切削具失效。为了克服上述不利因素,聚晶金刚石复合材料可以做成各种不同的结构。图1、2给出了两种典型的改善聚晶金刚石复合材料性能的结构。图1是采用复合过渡层技术研制成功的聚晶金刚石加强柱齿,它在保持传统PDC高耐磨性的前提下,具有更高的抗冲击韧性。该强化柱齿每层中金刚石的含量各不相同,依次递减。该强化柱齿经过相同于烧结聚晶金刚石的高温高压处理,在金刚石之间形成晶界链接,在PCD与预烧WC/Co颗粒间微小区域形成化学键。该强化柱齿用于牙轮钻头和潜孔锤钻头,取得了很好的效果。图2也是在高温高压条件下合成的聚晶金刚石(或CBN)复合材料,其特点是金刚石层可以用CBN或金刚石与CBN的混合物代替,具有多相结构,

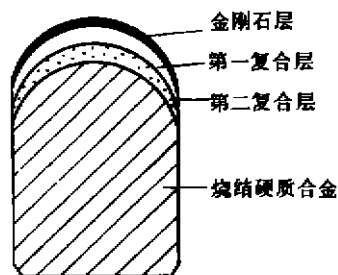


图1 金刚石加强柱齿

中间设有 η -相区,提高了材料的抗冲击韧性。

1.2 金刚石复合烧结体

金刚石复合烧结体与聚晶金刚石的区别在于:金刚石烧结体中金刚石的含量相对较

低,聚晶不是单一的金

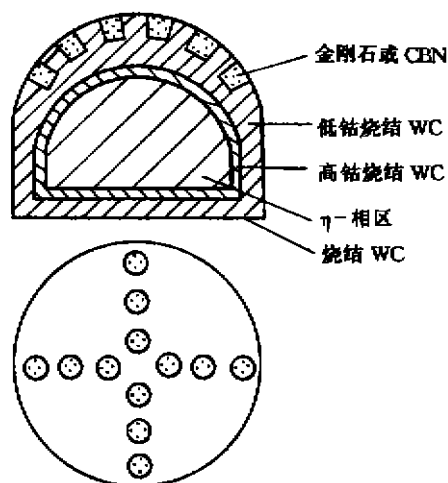


图2 新型聚晶金刚石加强镶嵌体

仅为增硬加强材料。这类超硬材料以前苏联的斯拉乌季契最具有代表性,它的制造方法是采用无压高温烧结法,将金刚石颗粒和硬质合金基粉料均匀混合后置入硬质合金粉料形成的外壳内,压制成型,然后在保护气氛下经高温无压烧结而成,由于外壳的收缩系数较大,压缩了其内部的烧结料,有利于烧结体密实,该外壳的成分为硬质合金,便于制造钻头时镶焊。与大颗粒天然金刚石相比,斯拉乌季契具有一系列的优越性:①耐磨性不亚于大颗粒天然金刚石;②强度大大超过了大颗粒天然金刚石;③斯拉乌季契可以制成任何形状和尺寸;④成本比大颗粒天然金刚石低得多。斯拉乌季契的这种较高的使用性能,促进了其在工业上的广泛应用,大量用来制造碎岩工具。早在1982年,前苏联就有50%的钻探工作量使用了斯拉乌季契。

由于斯拉乌季契仍是以钴为粘结剂,存在着热膨胀系数和石墨化问题,从而在制造钻头和钻进岩石的过程中产生高温易使其性能下降。

日本利用WC/Co和金刚石在液体中的沉淀速度不同,在一端形成高密度的金刚石,一端形成高密度的WC/Co层,中段的成分

是渐变的,这样烧结形成的烧结体,其富含 WC /Co 的一端可以直接焊到基柱上。

我国地矿部门也研制成功了用于钻井工程的人造金刚石烧结复合体 SDC、WHJ 和勘探奈特等。SDC 是一种以硬质合金为基体,以人造金刚石单晶为增硬材料的超硬烧结复合体,它是采用常规烧结设备,利用活化热压法烧结而成,具有优良的综合机械性能和较高的热稳定性。SDC 钻头与常规硬质合金钻头相比,寿命可提高 3~9 倍,钻进速度可提高 5%~50%,钻头成本可降低 30%~150%。勘探奈特通常为园片状,也可制成其它形状。其中间是金刚石层,厚度为 4 mm~6.5 mm,两端面分别是焊接层和保护层,厚度分别为 0.25 mm 和 0.15 mm,其周围一侧也可有 0.15 mm 厚的焊接层;金刚石为人造金刚石单晶或与热稳定金刚石组成的复合材料。勘探奈特钻头既能钻进软硬互层,又能钻进坚硬地层,寿命长、钻速高、适应性强,在坚硬、弱研磨性地层中钻进仍能保持恒定钻速,能显著降低钻井成本。

1.3 热稳定性聚晶金刚石

所谓热稳定性聚晶金刚石,就是指在高

表 1 天然金刚石、Syndrill、Syndax3、PCBN 的性能比较

	密度 g·cm ⁻³	抗压强度 GPa	断裂韧性 MPa·m ^{1/2}	努氏硬度 GPa	杨氏模量 GPa	热膨胀系数 10 ⁻⁶ K ⁻¹	导热率 Wm ⁻¹ K ⁻¹	研磨系数
Syndrill	3.99	7.61	9.80	50	810	4.6	760	3.97
Syndax3	3.42	4.19	6.89	50	925	3.8	120	2.99
天然金刚石	3.52	8.68	3.40	57~104	1141	1.5~4.8	500~2000	2.14~5.49
PCBN	3.12	3.80	10.0	28	680	4.9	100	2.01

硬夹层的地层中钻进,取得了很好的效果。

2 陶瓷钻头

陶瓷材料是一种新型工具材料,可分为氧化物陶瓷、氧化物-金属陶瓷、氧化物-碳化物陶瓷、氧化物-碳化物-金属陶瓷、氮化硅陶瓷和 SIALON 陶瓷等。陶瓷具有较高的硬度(高于硬质合金),抗压强度与硬质合金相当,但其高温硬度和抗压强度较高,另外,陶瓷还具有较高的化学稳定性,是工具材

料中最耐腐蚀的一种。但是由于陶瓷是脆性材料,其抗冲击韧性很差。

近年来由于精密陶瓷技术和纳米技术的进步,大大改善了陶瓷的性能,各种高性能的陶瓷已应用于各个领域,部分钻头也开始使用陶瓷。

陶瓷钻头在钻进中硬-硬岩层时,寿命是硬质合金的几倍,不需频繁更换,因而能够减少起下钻次数,提高纯钻进时间;对于硬质合金钻头不能钻进的极硬岩层,陶瓷钻头也

温(1200℃)下能保持原有物理机械性能的聚晶金刚石,它不需要硬质合金做衬底,它与复合片上的聚晶不同点在于不是采用钴而是用低熔点的硅合金(如 Syndax3)或者不用任何粘结剂在超高温、高压下直接结合(如 Geoset),并且只用微米级的单晶金刚石而不用石墨粉。由于采用了硅合金做粘结剂或者不用结合剂,大大提高了金刚石的临界石墨化温度,并且硅的碳化物与金刚石的热性能(包括膨胀系数)更为一致,提高了聚晶金刚石的性能,热稳定聚晶金刚石可以直接镶焊到钻头胎体上。还有一种热稳定聚晶金刚石是用酸浸析出聚晶金刚石中活泼的金属粘结相,从而减少了金刚石向石墨转化的触媒作用,提高了聚晶金刚石的热稳定性。表 1 列出了天然金刚石、聚晶金刚石复合片(Syndrill)、热稳定性聚晶(Syndax3)和 PCBN 的性能比较。

由于热稳定聚晶金刚石的出现,使得 PCD 钻头钻进岩层的范围从软-中硬地层扩大到中硬-硬研磨性地层,特别是在含软

能有效地钻进。由于钻头寿命长,大大降低了钻井成本,但是由于陶瓷脆性较大,其端部易损坏,然而使用新开发出来的韧性陶瓷做钻头,陶瓷的上述优点就丧失了,其特性和硬质合金钻头相同。为了克服上述缺陷,日本研制成了耐振动抗冲击的陶瓷钻头(图3)。

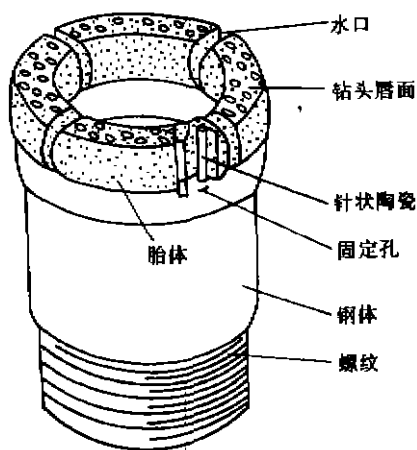


图3 陶瓷钻头

该陶瓷钻头的制造方法是:①将针状陶瓷插入钢体中事先加工好的固定孔内,将钢体放入粉末成型模中;②从钻头唇面7向胎体部分充填粉末;③在常温下将胎体加压成型;④对钻头进行精加工;⑤将成型、精加工好的钻头放入高压容器内进行高温高压处理,胎体被加压烧结。

3 金刚石膜切削具

随着金刚石膜(Diafilm)合成技术的发展,制造大片的厚度达2mm的金刚石膜已成为现实,并且已大量投放市场。这种新材料的特性主要表现在:①具有良好的均匀磨损机制;②优越的硬度和耐磨性;③良好的导热性;④高温下钻进效果好;⑤易与其它材料形成层状结构。

金刚石膜切削具结构如图4,这种用金刚石膜、热稳定性聚晶(TSP)、聚晶金刚石(PCD)和WC/Co硬质合金制成的多层复合切削具,为设计钻头提供了以下功效:①在硬

而裂隙发育的岩层中钻进能抗冲击载荷;②可进行抗热设计以限制切削具刃部温升;③分层组装的几何造型使金刚石膜处于受压状态;④可用计算机模拟法具体研究钻头外形参数。

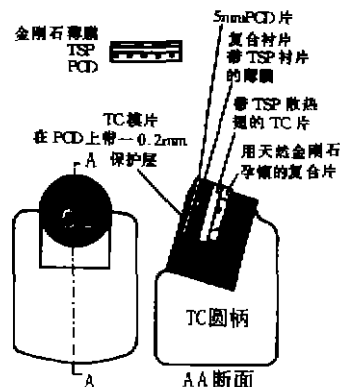


图4 金刚石膜切削具设计

每一种新型金刚石制品的出现,都会对设计和开发新式钻头做出贡献,CVD金刚石膜也不例外,金刚石膜切削具在不久的将来,将做为全新设计概念的切削具得到应用,其结构将是层状的或成层的复合式结构。

4 CBN为基的复合材料及钻头

立方氮化硼(CBN)自1957年问世以来,以其优异的性能显示出巨大的生命力,在世界上普遍为工业发达国家所重视,发展十分迅速。和金刚石相比,CBN除具有高硬度、高耐磨性、低摩擦系数等特性外,还有比金刚石优越的化学惰性和较高的热稳定性(1300℃~1400℃),特别是对铁族金属材料呈化学惰性。

目前,这类材料绝大部分仍用在机械加工切削上,前苏联对它应用于地质钻探做了一些试验,如一种称为埃利鲍尔(ЭЛЬБОР)的CBN基复合材料,其强度和热稳定性可与天然金刚石相比,硬度虽不及天然金刚石的80%,但大大高于硬质合金,以其为切削具制造的PK3型钻头,在可钻性为5.3级的岩层中钻进,机械钻速可达到2.9 m/h。

前苏联白俄罗斯科学院固体物理与半导体研究所研制的布兰尼特(Буранит)立方氮化硼聚晶(PCBN),其制造与一般的PCBN制造方法不同,为改善其物理机械性能,原料中加入了在空气中稳定并能活化HBN-CBN转化的添加剂,从而保证了PCBN的细粒结构。该PCBN硬度为10GPa,抗压强度为3GPa,空气中的热稳定性为1000℃、尺寸为 $\phi 4 \times 5.5$ mm圆柱体。用该PCBN制造的钻头,在孔深1.2m,可钻性为V~Ⅷ级的岩层中钻进,其寿命比天然金刚石钻头提高72%,钻进速度提高25%。

4 结论

根据本文阐述的内容,可以得出以下几点结论:

(1) 超硬复合材料的出现大大推动了钻井技术的发展。聚晶金刚石钻头和孔底马达、随钻测量并称为石油、天然气钻井的三大技术,目前已开始应用在矿山和固体矿床勘探中;

(2) 热稳定聚晶是聚晶金刚石复合材料出现以来的又一次飞跃,使聚晶金刚石在硬岩钻进中的应用成为可能,特别是对地质勘探钻进具有重要意义;

(3) CBN及PCBN钻头的初步试用,显示出了这类钻头的优越性,特别是在钻进铁族元素矿床时,具有不可替代的作用;

(4) 新型抗冲击陶瓷钻头的出现,为陶瓷钻头的进一步推广使用打下了基础;

(5) 金刚石膜合成技术的发展,使其在钻井工程中的应用成为可能。

参考文献

- 1 USP 5217081 Tools for Cutting Rock Drilling
- 2 张铁臣,等.立方氮化硼.吉林大学出版社,1993
- 3 庞馨萍译.陶瓷钻头及其制造方法.探矿工程译丛,1993,4
- 4 刘广志译.用层状金刚石膜切削具设计钻头新概念.探矿工程译丛,1997,1
- 5 地矿部情报研究所编.聚晶金刚石材料及钻头.国外探矿工程情报,1986,3~4
- 6 De Beers Industrial Diamond Division Product Information Leaflet - SYNDAX3

DEVELOPMENT OF DRILLING ULTRAHARD MATERIAL AND ITS BIT

Ma Baosong, Zhang Zupei, Sun Youhong

The development of drilling ultrahard materials(including PDC,PCBN,ceramic and diamond film) and the manufacturing and application of their bits were introduced. Based upon the improvement of diamond film synthetic technology, it was proposed that it is possible to make drilling cutter using diamond film.

Key words ultrahard material, bit development, application



第一作者简介:

马保松 男,1968年生。1992年毕业于长春科技大学勘察工程系勘察工程专业,1995年在长春科技大学勘工系获硕士学位。现任长春科技大学勘工系讲师,在职攻读探矿工程专业博士学位,主要从事勘工专业科研和教学工作。

通讯地址:吉林省长春市西民主大街6号 长春科技大学勘察工程系 邮政编码:

130026