

纳米金刚石钻头试验研究

汤凤林^{1,2}, 高申友², ЧИХОТКИН В. Ф.¹, 彭 莉², 蒋国盛¹, 张晓西¹, 卢春华¹

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 无锡钻探工具厂有限公司, 江苏 无锡 214174)

摘要: 纳米技术(nanotechnology)是近年来发展起来的一种新技术,许多国家都在研究这种新技术及其应用。俄罗斯研制出了用爆炸法生产纳米金刚石的成套设备。乌克兰生产出了纳米金刚石。乌克兰超硬材料研究所设计出了纳米金刚石钻头,并进行了实验台试验。试验结果表明,纳米金刚石钻头是一种很有前景的破碎岩石工具,可以取得很好的技术经济效益,在地质勘探和采矿工业中应用前景广阔。建议我国加强对纳米金刚石钻头的研究并推广使用。

关键词: 纳米技术; 纳米金刚石; 金刚石钻头

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)06-0076-04

Experimental Research on Nanodiamond Impregnated Bit / TANG Feng-lin^{1,2}, GAO Shen-you², CHIKHOTKIN V. F.¹, PENG Li², JIANG Guo-sheng¹, ZHANG Xiao-xi¹, LU Chun-hua¹ (1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China)

Abstract: Nanotechnology is a new technology developed in recent years. At present many countries are researching on the new technology and its applications. Equipment for manufacturing nanodiamond with detonation method has been developed in Russia. The nanodiamond has been produced in Ukraine. The Institute of Superhard Materials in Ukraine has worked out nanodiamond bit and done experimental work in laboratory. The results of the experimental work show, that nanodiamond bit is a good tool for drilling engineering, can obtain excellent social and economic results and have good future in geological exploration and mining industry. It is suggested, that nanodiamond bit studying and using are strengthened in China.

Key words: nanotechnology; nanodiamond; diamond bit

1 概述

纳米技术是用单个原子、分子制造物质的科学技术,主要研究结构尺寸在 0.1 ~ 100 nm 范围内材料的性质和应用。纳米技术是一门应用科学,是现代科学(混沌物理、量子力学、介观物理学、分子生物学)和现代技术(计算机技术、微电子和扫描隧道显微镜技术、核分析技术)相结合的产物。我国著名科学家钱学森曾指出,纳米左右和纳米以下的结构是下一阶段科技发展的一个重点,会是一次技术革命,从而将引起 21 世纪又一次产业革命。

纳米材料是 20 世纪 90 年代后期兴起的一种高新材料,纳米级金刚石是近几年来用爆炸技术合成的一种新材料。它不但具有金刚石的固有特性,而且具有小尺寸效应、大比表面积效应、量子尺寸效应等,因而展现出纳米材料的特性。在爆炸波中合成的这种金刚石具有立方组织结构,晶格常数为

(0.3562 ± 0.0003) nm,晶体密度为 3.1 g/cm³,比表面积为 300 ~ 390 m²/g。经过不同的化学处理后,金刚石表面可以形成多种不同的官能团,这种金刚石晶体具有很高的吸附能力。

俄罗斯、美国等国家在开展爆炸合成纳米级金刚石技术及应用开发方面起步较早,已经开发出不少的产品,取得了很好的成果。我国在这个领域的研究起步较晚,但也取得了一定的成果^[1-4]。

2 纳米金刚石

纳米金刚石(nanodiamond)是利用负氧平衡炸药在爆炸(轰)过程中产生的游离碳,控制爆轰时的压力和温度,使之转变成 5 ~ 20 nm 粒径的微晶金刚石颗粒。特殊的合成条件使其基本颗粒近球形,表面具有丰富的功能团,比表面积相对普通金刚石产品提高了一个数量级。纳米金刚石不仅有金刚石

收稿日期:2015-04-26

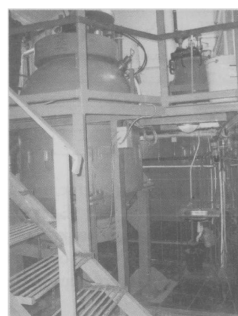
基金项目:江苏省江苏双创团队资助项目(编号:苏人才办[2014])27号)

作者简介:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院院士,俄罗斯自然科学院院士,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,ftang_wuhan@aliyun.com。

极好的硬度和研磨特性,同时也具有纳米功能材料的新特性。

纳米金刚石在磨料磨具领域主要用来与胎体金属混合制造出高强度低气孔率的金刚石烧结体,其显微硬度可达 $6000 \sim 7000 \text{ kg/mm}^2$ ($60 \sim 70 \text{ GPa}$), 可用来加工软或脆性材料,加工表面粗糙度很低。如果预先外延生长碳或添加静压合成的金刚石微粉,在 $10 \sim 12 \text{ GPa}$ 压力下烧结获得的金刚石聚晶显微硬度可以达到天然金刚石单晶的水平^[5]。

俄罗斯圣彼得堡联邦国家专门联合设计局(ФГУП СКТБ)利用最新技术和工艺研制出了年产 1 t 的纳米金刚石的成套设备(见图 1)。该设备生产纳米金刚石分为 2 个阶段:第一个阶段是生产含纳米金刚石的粉料(图 1a);第二个阶段是在高压作用下,利用反应堆对粉料进行热力氧化处理和化学提纯处理(图 1b)^[6]。



(a) 内部容积为 2m^3 的爆炸腔室



(b) 对所得含纳米金刚石粉料进行热力氧化处理的反应堆设备

图 1 生产纳米金刚石的成套设备

乌克兰超硬材料研究所(ИСМ)利用三硝基甲苯和黑索金炸药(三甲基三硝基胺)爆炸方法研制出了纳米金刚石 АСУД-50、АСУД-75、АСУД-95 和 АСУД-99。每种纳米金刚石都有其不同的使用目的和使用范围。上述纳米金刚石的物理化学指标见表 1^[7]。

表 1 乌克兰超硬材料研究所研制的纳米金刚石物理化学指标

纳米金刚石 型号	金刚石相和非金 刚石碳的比例	比重计测得的密 度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	未燃烧残余物 的质量比例/%	金属杂质颗 粒总量/%	磁化率 $\chi \cdot 10^8 /$ $(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	水分的质 量比例/%	比面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
АСУД-50	1 : 1	2.75	1.65	0.521	—	—	2.97	220
АСУД-75	2 : 1	3.00	0.90	0.436	—	—	1.50	219
АСУД-95	—	3.40	1.70	0.624	18.0	1.2×10^6	2.65	167
АСУД-99	—	3.42	0.45	0.283	1.0	3.7×10^9	0.90	178

3 纳米金刚石钻头试验

乌克兰超硬材料研究所 Г. П. Богатырева 博士等人对研制的纳米金刚石钻头进行了实验室试验^[8]。

3.1 试验条件

试验使用的钻头是 $\varnothing 76 \text{ mm}$ 、BC20 型的金刚石钻头。为了保证钻头的转数,所有试验用钻头的结构都是相同的。把 АСУД-99 型爆炸合成的纳米金刚石 ДНА,按(YG + Cu)粉料体积的 0.5%、1.0%、2.0% 和 3.0% 比例分别加入钻头胎体粉料中,按照标准工艺制作金刚石钻头。

钻头上镶有 AC125T 型人造金刚石,粒度为 $400/315 \mu\text{m}$,相对浓度为 125%。在用作对比的钻头胎体粉料中,没有加入纳米金刚石 ДНА。

钻头试验是在专门设计的钻进试验台上进行的。钻进试验台由改进的 2H58 型直立钻床和液压给进系统以及冲洗系统组成。

试验所用岩石为科罗斯德舍夫花岗岩,可钻性

为 10 级,压模硬度 $p_m = 237 \text{ dN/mm}^2$ (2.37 kPa),研磨性为 43,可钻性联合指标为 $p_m = 34.2 \sim 51.2$,每次试验钻进岩石深度均为 0.4 m 。

3.2 评价指标

钻头钻进试验结果是用胎体耐磨性和破碎单位体积岩石消耗的功这 2 个参数进行评价的。用破碎单位体积岩石消耗的功来评价钻头钻进效果,可能比用机械钻速和钻头进尺进行评价更加科学和客观。

磨损试验条件与生产条件相同;所有钻头的试验条件都是相同的;钻头试验后高度磨损量用 МИГ 仪器进行,精度达 $1 \mu\text{m}$ 。

钻头高度磨损强度 I 按下式计算:

$$I = \frac{2h_i}{\pi(D_{\text{外}} + D_{\text{内}})nT} \quad (1)$$

式中: h_i ——钻头高度磨损量,mm; $D_{\text{外}}$ 、 $D_{\text{内}}$ ——钻头外径和内径,mm; n ——钻头转数,r/min; T ——钻进时间,min。

机械钻速(每转钻头进尺)不变时,岩石破碎效

果用破碎单位体积岩石消耗的功进行评价。破碎单位体积岩石消耗的功 $A_{比}$ 按下式计算:

$$A_{比} = \frac{3.6 \times 10^6 NT}{\pi(D_{外}^2 - D_{内}^2)L} \quad (2)$$

式中: N ——破碎岩石消耗的功率, kW; T ——钻进时间, min; $D_{外}$ 、 $D_{内}$ ——钻头外径和内径, mm; L ——钻进试验进尺, m。

钻头试验时的钻头转速为 400 ~ 800 r/min, 因为金刚石生产钻进中这种转速最为常用, 所以选用了这个转速。得到的机械钻速为 1.5 ~ 4.8 m/h, 与生产条件下的钻速基本相当。由于钻头每转进尺分别为 63.80 和 100 μm 保持不变, 所以一个循环中所用所有 4 种试验钻头的机械钻速都是相同的。

3.3 试验结果

第一阶段试验的目的是确定金刚石钻头胎体材料(YG+Cu)硬度与胎体中 ДHA 含量的关系(见图 2)。

从图 2 可见, 胎体硬度是变化的。与未加纳米金刚石的胎体比较, 加有纳米金刚石的胎体硬度皆随纳米金刚石含量的增加而增大, 加有体积 2% 纳米金刚石的胎体硬度增加了 30%。继续加大纳米金刚石含量时, 钻头胎体硬度降低。

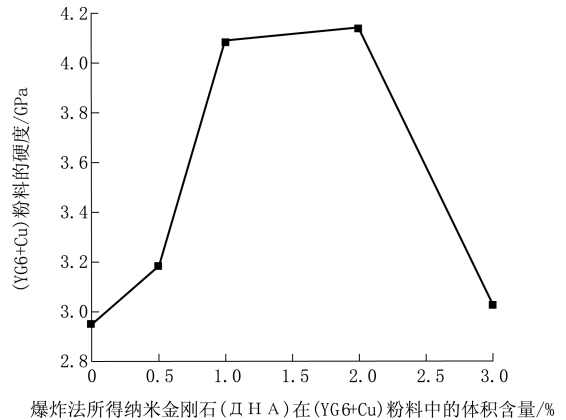


图2 金刚石钻头胎体材料(YG+Cu)硬度与胎体中 ДHA 含量的关系

第二阶段试验的目的是确定钻头耐磨性与其胎体中纳米金刚石含量的关系和破碎单位体积岩石消耗的功与纳米金刚石含量的关系。

钻进科罗斯德舍夫花岗岩时, 钻头转数 n 不同、每转不同进尺时, 磨损强度与钻头胎体中 ДHA 含量的关系试验资料见图 3。

不同转速、每转不同进尺时, 破碎单位体积科罗斯德舍夫花岗岩消耗的功与钻头胎体中 ДHA 含量的关系试验资料见图 4。

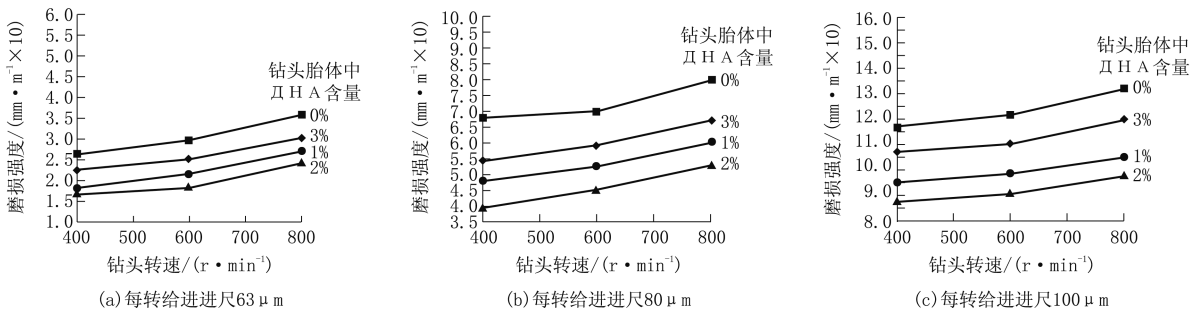


图3 不同转速、每转不同进尺时, 磨损强度与钻头胎体中 ДHA 含量的关系曲线

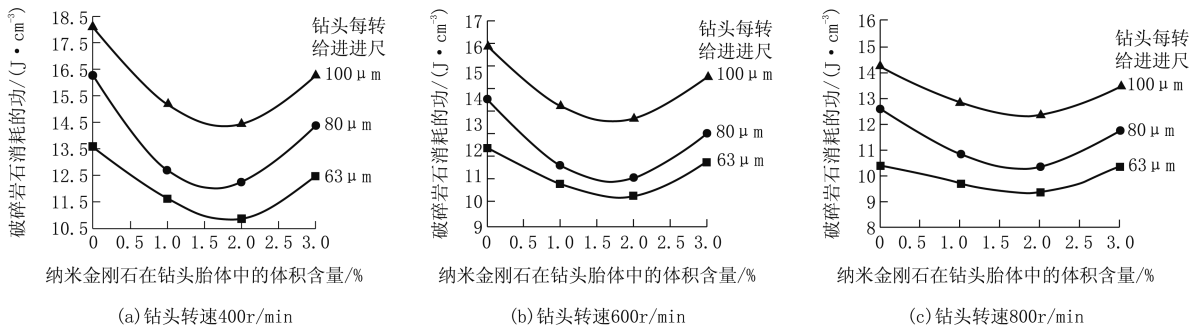


图4 不同转速、每转不同进尺时, 破碎单位体积科罗斯德舍夫花岗岩消耗的功与钻头胎体中 ДHA 含量的关系曲线

从图 3 可见, 对于所有试验的钻头来说, 胎体磨损强度皆随钻头转速的增加和每转给进进尺的增加

(请注意每转进尺不同时,图3a、3b、3c纵坐标上的磨损数值比例尺不同)而增加,这是共同的规律性。考虑到岩石破碎过程是用正常规程进行的,所以,对于各种数值的每转进尺来说,钻头磨损强度与每分钟转数的关系都是一条直线或者是接近一条直线。图3还表明,在钻头任何转数条件下和任何每转进尺条件下,当纳米金刚石在胎体中的体积含量为1%和2%时,钻头磨损强度最小,即钻头耐磨性最大。当纳米金刚石在胎体中的体积含量大于2%时,钻头磨损强度增大,而且接近于胎体中不含纳米金刚石胎体的磨损强度的数值。

必须指出的是,与钻头每分钟转数相比,钻头每转进尺这个参数可以引起钻头磨损强度发生较大的变化。这是因为岩石破碎体积的增加会引起作用在钻头工作唇面上的动载增加,从而提高了胎体和位于胎体唇面上金刚石与岩石的摩擦力。

可以认为,上述关系可能与破碎岩石消耗的功率与岩石摩擦消耗的功率的比例不同有关,示于图4上关于岩石破碎过程能量消耗的资料,可以证明这一点。这是因为,随着胎体硬度的增加,胎体抵制被破碎岩石岩屑产生的研磨性磨损的能力也增加了。

从图4可见,对破碎单位岩石消耗的功的试验资料进行对比分析表明,胎体中ДНА体积含量占1%~2%的试验钻头,破碎单位岩石消耗的功均为较小。钻头转速400 r/min、每转进尺63 μm 和胎体中ДНА体积含量占2%的试验钻头破碎单位岩石消耗的功最小(见图4a)。可以认为这是钻进上述花岗岩时的最优钻进规程。

4 认识与建议

根据以上讨论,提出以下认识和建议。

(1) 纳米技术是近年来发展起来的一种新技术。纳米技术是一门应用科学,是现代科学和现代技术相结合的产物。这是一次技术革命,必将引起一次产业革命。我们应该加紧研究,努力工作,迎头赶上,把纳米技术早日用到探矿工程中来。

(2) 在金刚石钻头生产使用的材料中,含有金刚石材料和胎体粉料。这两种材料都有一个纳米化研究的问题。但是在钻探工程中,破碎岩石主要是胎体中的硬质点金刚石,所以,先从纳米金刚石开始进行研究是必要的,也是应该的。

(3) 乌克兰超硬材料研究所进行的钻头试验结果表明,在钻头耐磨性和钻进效果指标(破碎单位体积岩石消耗的功)方面,胎体中加有爆炸方法产生的纳米金刚石ДНА的钻头,均比未加该种金刚石的钻头好。这就说明这种纳米金刚石是一种很好的破碎岩石材料,很有发展前景。

(4) 钻头试验是用每转恒进尺钻进方式进行的。试验结果证明,在冲洗液性能、数量合理,保持正常岩屑规程的条件下,钻头转速400 r/min、每转进尺63 μm 和胎体中ДНА体积含量占2%情况下钻头耐磨性最好、破碎单位体积岩石消耗的功最小。说明采用的这种钻进规程参数是合理的,纳米金刚石在胎体中的含量是最优的,这可能与所钻的花岗岩的物理力学性质有关。但是必须指出的是,这个试验结果只能说是初步的,今后还有很多工作需要做。

(5) 金刚石钻进是我国的主要钻探方式。我国从事金刚石钻头研制和进行金刚石钻进的单位和人员很多,从事纳米金刚石研究工作的同事们已经取得了很好的成果。可以相信,中国探工人一定能够在纳米技术在探矿工程的应用、在纳米金刚石钻头的研发方面取得新的更大的成绩,达到世界先进水平。

参考文献:

- [1] 秦宇,王光祖. 发展中的中国纳米金刚石应用技术[J]. 超硬材料工程,2007,(4):38-42.
- [2] 罗立群,张泾林,朱永伟. 纳米金刚石的研究与应用现状[J]. 材料导报工程,2004,18(10):127-131.
- [3] 邹芹,王明智,王艳辉. 纳米金刚石的性能与应用前景[J]. 金刚石与磨具磨料工程,2003,(2):54-58.
- [4] 王光祖,胡建根,罗明. 纳米级金刚石的结构、性能和应用[J]. 金刚石与磨具磨料工程,2000,(5):9-12.
- [5] О. Н. Ефимов, Н. Н. Вершинин, Б. В. Ф. Тацкий и др. Наноалмазы и катализ[J]. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, 2007, 6(50):98-106.
- [6] В. Ю. Долматов. О необходимости создания мощного производства детонационных наноалмазов [A]. Сборник научных трудов [C]. Киев, 2010:320-323.
- [7] Г. П. Богатырева и др. Сопоставительный анализ детонационных наноалмазов в различных условиях [A]. Сборник научных трудов [C]. Киев, 2010:315-320.
- [8] Г. П. Богатырева и др. Оценка перспективности структурирования металломатричных композитов алмазных буровых коронок наноалмазами [A]. Сборник научных трудов [C]. Киев, 2011:97-102.