

关于提高金刚石钻头胎体耐磨性的试验研究

汤凤林^{1,2}, 彭莉¹, ЧИХОТКИН В. Ф.², 李晓磊¹, 赵俊彩¹

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

摘要:胎体耐磨性(胎体硬度)是金刚石钻头的一个重要技术指标,它直接影响钻头、钻进规程参数的选择和钻探工程技术指标的提高。目前,现场所用钻头实际胎体硬度低于出厂钻头的标称硬度,而钻探施工一般按胎体标称硬度进行安排生产,所以会对钻探效率和进尺的提高带来误导和负面影响。为了提高钻头胎体硬度,进行了如下研究工作:改进钻头烧结工艺,提高胎体材料中碳化钨的比例和增加混料时间。在改进钻头烧结工艺中,建议讨论研究俄罗斯冷压烧结技术,其烧结压力可以达到70~100 MPa,远远高于我国热压烧结的压力,这将有利于胎体耐磨性的提高和钻探技术经济指标的改善。

关键词:胎体耐磨性;钻头烧结工艺;碳化钨比例;混料时间;冷压烧结钻头;钻探技术经济指标

中图分类号:P634.4⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)01-0007-07

Experimental Research on Matrix Wear Resistance (Matrix Hardness) of Impregnated Diamond Bit/TANG Feng-lin^{1,2}, PENG Li¹, CHIKHOTKIN V. F.², LI Xiao-lei¹, ZHAO Jun-cai¹ (1. Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Matrix wear resistance (matrix hardness) is an important technical specification of diamond bit, which has direct influence on choice of bit to be used and drilling practice parameters and the improvement of technical and economical indexes of drilling. At present, real matrix hardness of bits applied in drilling engineering is lower than the nominal hardness of the factory bits that has misleading and negative influence on drilling efficiency and bit footage. In order to improve matrix wear resistance, researches were carried out on the improvement of hot pressing sintering technology, increasing the proportion of tungsten carbide in matrix materials and the mixing time of matrix materials. It is suggested that for the improvement of hot pressing sintering technology, Russian cold pressing sintering technology, with sintering pressure of 70~100MPa, should be discussed, which is much higher than the pressure of hot pressing sintering in China.

Key words: matrix wear resistance; diamond bit sintering process; proportion of tungsten carbides; mixing time of matrix materials; cold pressing sintering bit; technical and economical indexes of drilling engineering

1 概述

胎体耐磨性是金刚石钻头的重要性能指标之一,它直接影响钻头的选择、钻进规程参数的确定、所用的操作技术和经济指标的提高。胎体耐磨性与胎体硬度是2个不同的物理力学概念,二者不能等同,但是却有一定的内在关系。在目前有限的检测条件下,为了体现钻头耐磨性的高低,钻头厂商和用户常以胎体硬度视同表示胎体耐磨性,这个观点不够科学和全面。因为在许多情况下,硬度相同的钻头,其胎体耐磨性却不相同,这是因为胎体是一种假合金,胎体合金内部组成中含有金刚石颗粒,因此钻头胎体硬度和耐磨性不能只用胎体本身的性能来衡量,在很大的程度上还要受金刚石的制约和影响。

但现在社会上和钻探界都在如此使用,我们也暂且按此进行讨论。

钻头胎体耐磨性的选择首先应该根据所钻岩石的研磨性来确定。岩石研磨性越强,钻头胎体硬度应越大,耐磨性应越强。胎体硬度和耐磨性应与所钻岩石的研磨性等性质相适应,以保证在钻进过程中胎体有适当磨损,使钻头胎体中的金刚石裸露出来,但不能过快,以防止尚可使用的金刚石过早失效或脱落,不能发挥金刚石应有的作用。反之,如果胎体不磨损或磨损很慢,则金刚石不出刃或出刃很慢,也难以发挥金刚石破碎岩石的作用。

可见,孕镶金刚石钻头破碎岩石原理是以自磨出刃为基础的。所以胎体材料的选择原则,一是要

收稿日期:2015-10-26

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。

能够评价胎体材料的耐磨性,二是要能够确定岩粉的研磨性,把二者统一起来。生产条件下胎体材料选择建议见图1^[1-2]。

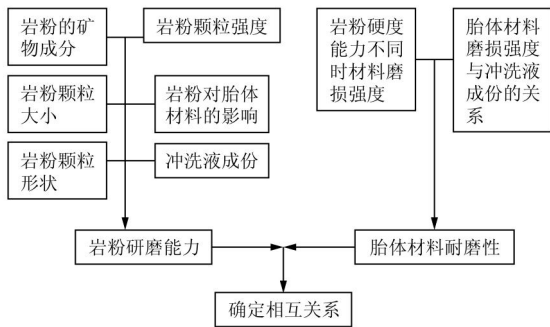


图1 岩粉研磨能力和胎体材料耐磨性关系的确定

在矿物成分中,要特别注意石英的含量。研究表明,岩石中石英含量由5%增到100%时,岩粉的研磨能力增加6倍以上。

乌克兰超硬材料研究所科研人员得到的胎体耐磨性与岩粉研磨能力的关系见图2^[1]。

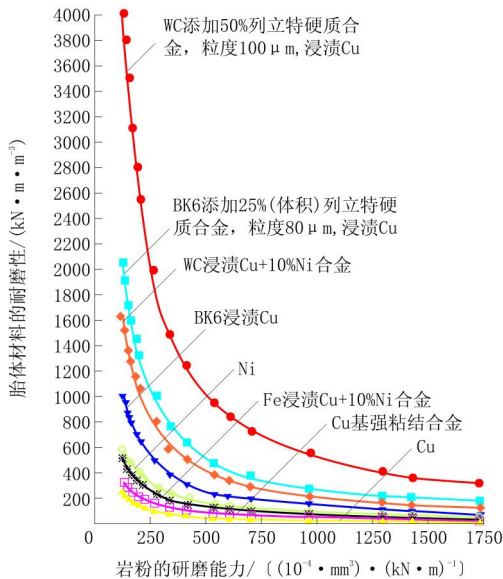


图2 胎体材料耐磨性与岩粉研磨能力关系图

2 热压烧结金刚石钻头工艺胎体的一般规律性认识^[3-5]

我国使用热压方法生产金刚石钻头已有多年的历史,积累了丰富的经验和丰富的资料。热压烧结工艺参数中,主要考虑的是烧结温度和烧结压力,同时要考虑时间的作用和影响。

2.1 胎体致密化过程与时间的关系

热压时胎体材料致密化过程曲线表示致密化系

数 $\alpha(\%)$ 与时间 T 的关系(见图3)。从图3可见,这个过程分为3个阶段:(1)快速致密化阶段(OA段),又称微流动阶段,在这个阶段中致密化速度较快,颗粒之间发生相对流动、塑性变形乃至颗粒破碎,致密化速度主要取决于粉料的粒度、形状和材料的断裂强度与屈服极限;(2)致密化减速阶段(AB段),以塑性流动为主,当热压温度不变时,增加压力可以提高胎体的致密度,当压力不变时,提高热压温度可以提高胎体致密度;(3)趋于终极密度阶段(BC段),主要是以扩散机理使胎体致密化。

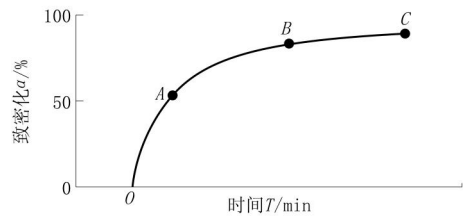


图3 致密化过程与时间的关系

2.2 胎体密度与热压时间的关系

升温速度和保温时间是热压烧结工艺中的重要因素。

为了使钻头胎体受热均匀,降低模具内外温度梯度,以使胎体收缩均匀,升温速度不宜太快。较慢的升温速度有利于胎体内氧化物充分还原,各类气体及时干净排除。如果升温速度过快,会造成胎体受热不均,模具内外温差过大,钻头外径表面提前烧结,形成致密层,使内部的气体难以排除,阻碍收缩。保温时间主要取决于钻头类型和规格。直径大且唇面厚度大的钻头,要求较长的保温时间。直径小且唇面薄的钻头,保温时间可以缩短。如果保温时间太短,会使钻头欠烧,包镶金刚石的强度降低;如果保温时间过长,会出现胎体成分发生变化或偏析,对保护金刚石的原始强度是不利的。胎体密度与热压时间的关系见图4。

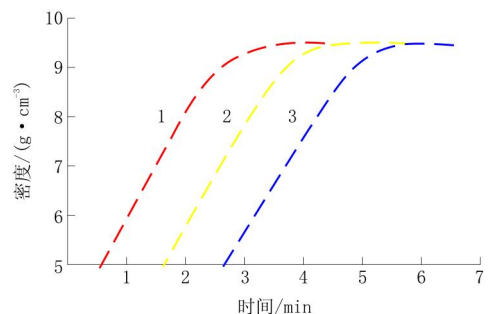


图4 胎体密度与时间的关系

2.3 胎体密度与热压压力的关系

热压金刚石钻头烧结工艺中主要参数为热压温度和压力。烧结温度确定后,压力就成了主要参数。压力的主要作用是提高胎体的致密化程度和合金化程度,提高钻头的耐磨性能。金刚石钻头热压烧结过程中,压力是分阶段提高的,一般是分为预压阶段和全压力阶段。

预压力是全压力的 1/4 左右。全压力则要求保障钻头的胎体合金材料中烧结后期能很好地实现合金化,使胎体具有所要求的密实度和耐磨性。全压力要考虑胎体材料的成分和性能、保温时间等因素。热压压力一般取为 15 ~ 22 MPa。提高热压压力,有利于提高胎体的密实度和硬度,有利于提高钻头的使用寿命。但是,压力过高对提高胎体的硬度和密实度意义不大,只能增加功率消耗,甚至可能降低石墨模具的使用寿命或压裂石墨模具等。

压力提高到全压力是在保温阶段开始一小段时间后开始的,即在胎体粉料吸收足够的溶解热后,慢慢地加上全压。这样有利于分布均匀的胎体粉料在热压工艺条件下形成其应该具有的“合金”金相,而不宜采用快速加到全压力的做法。胎体密度与热压压力的关系见图 5。

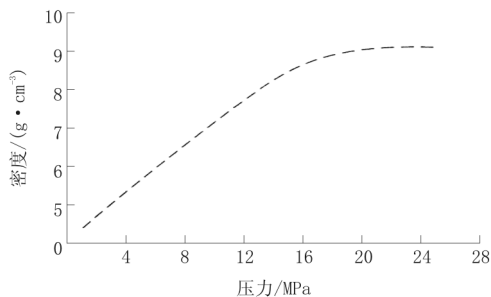


图 5 胎体密度与热压压力的关系

2.4 试验用烧结工艺曲线

图 6 是一条试验用金刚石钻头烧结工艺曲线数^[3-4]。从图 6 可见,这个烧结曲线的不同点是烧结曲线中出现了 2 个保温段。其中第一个保温段设计在模具温度达到 800 °C 时,保温 30 s。其目的是减小组装模具内的温度梯度。当胎体材料温度升至 800 °C 后,会出现液相软化与塑化现象,如果此时的胎体内部不同部位温度不同,胎体内部热效应程度就会不同,在压力作用下,胎体材料会出现局部偏析,或者部分流失的可能性。因此,需要设计这样一个保温段来消除胎体内部的温度梯度,防止胎体内

部成分与材质出现不均匀现象,以达到胎体性能均匀的目的。

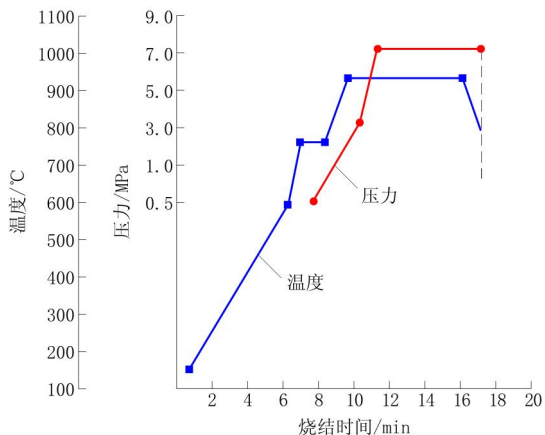


图 6 试验用金刚石钻头烧结工艺曲线

3 提高钻头胎体耐磨性的试验研究

为了研究金刚石钻头胎体耐磨性(下用胎体硬度)分布,我们在无锡钻探工具厂有限公司钻头实验室研究了 HRC30 ~ 35(配方 1)和 HRC40 ~ 45(配方 2)制作 $\varnothing 75/49$ mm 空白胎体钻头的胎体硬度分布情况(因为牵扯到配方保密,所以未把具体骨架金属和粘结金属配料列出)^[6-7]。为了研究胎体高度对其硬度的影响,选用了 6 和 8 mm 2 种胎体高度。组装好的钻头待酒精在 DH-5 型烘干炉烘干后,用 KGPS-250 型中频炉按以下工艺烧结:将空白钻头慢慢升温到 650 °C 后加压到 2.0 MPa,在升温到 990 °C 时压力加到 3.0 MPa,在 990 °C(配方 2 为 1010 °C)的温度及 3.0 MPa 的压力下保温 3 min,慢慢加压到 5.0 MPa 后再保温 10 min,然后保压冷却,冷却到 700 °C 以下卸压取出自然冷却。

待钻头胎体完全冷却后,进行粗加工。然后按从 0 ~ 9 的次序对每个钻头的 10 个扇形块依次编号,用洛氏硬度计(HR150-A 型)按照给定的 4 ~ 12 点标号顺序,依次测量每个扇形块上每个点的硬度并记录。将胎块磨去 1 mm,依次测量每个扇形块各点硬度并记录,直到胎块全部磨完接近过渡层,以了解胎体硬度随胎体高度变化而变化的情况。高度为 6 mm 的胎体共需测量 6 次。

胎体硬度测量结果表明,硬度均未达到钻头胎体标称硬度,而且离散度很大。实测从厂家购买钻头的胎体硬度也与标称硬度不同。用从胎体粉料厂家购买粉料制作的钻头,硬度也与标称硬度有差距^[6]。

为了提高胎体硬度,使胎体实际硬度与厂家标称硬度相应,我们进行了下列试验(这些试验都是在厂内的钻头实验室进行的)^[8-9]:

3.1 改变钻头烧结工艺来提高耐磨性

利用 HRC40~45(2号配方)的空白胎体做试验样品。按2号配方比例称取总计500g粉末,在混料机中搅拌30min。空白钻头尺寸参数:Ø75/49mm的模具,10水口,水口块高6mm,空白钻头胎体

高度6mm。

所用烧结工艺参数为:慢慢升温到600℃,加压至3.0MPa,边加温边加压,温度到1010℃时压力加至6.0MPa,升温过程为5min。然后在6.0MPa的压力下保温10min,停止加热,保持压力的同时自然冷却至700℃,卸压取出冷却。

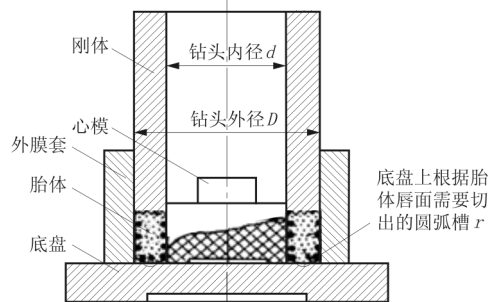
试验结果:钻头冷却磨平后,在洛氏硬度计上测量硬度。测量的硬度如图7所示。

		表面HRC	第一次磨HRC	第二次磨硬度	序号	HRC	序号	HRC
0扇		35	35		1	5点	1	
1扇		36	37.5		2		2	
2扇		33.5	36		3		3	
3扇		39	37		4	39	4	36
4扇		35	36		5	33	5	38
5扇		35	34.5		6	35.5	6	36.5
6扇		35	35		7	35	7	36.5
7扇		36	35.5		8	37.5	8	34
8扇		33.5	38		9	37.5	9	37
9扇		35	36.5		10	36	10	34
10个硬度点	average	35.3	36.1		11	36.5	11	34
					12	37	12	34
					13		13	
					average	36.3	average	35.6
				18个硬度点	average	35.9		

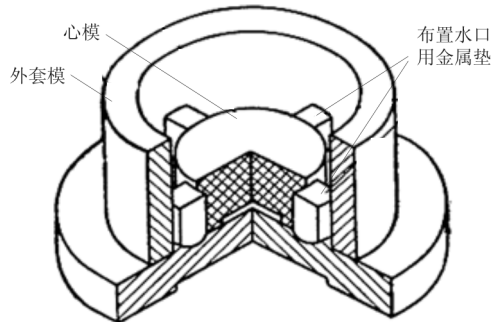
图7 改变烧结工艺后测得的胎体硬度

从图7可以看出,改变烧结工艺并未达到所标称HRC40~45的硬度。这可能与所用的胎体热压烧结工艺有关,特别是对热压压力应该给予充分考虑和注意。资料^[3-5]表明,为了提高胎体的密实度和硬度,提高钻头的使用寿命,热压压力一般取15~22MPa。而上述配方钻头胎体烧结时由于受烧结模具承载压力的限制,烧结时的加载压力为6MPa左右(比资料推荐的压力略小)。下一步考虑选择承载压力较大模具材料进一步试验,通过实验循序渐进,逐步提高烧结压力,以提高胎体耐磨性。对于已确定的配方胎体来说,最优压力可以通过试验研究确定。除了热压压力外,对烧结温度、保温时间、保压等方面参数优化也需进一步研究。

(见图8)(我国热压法采用石墨压模),因此压力可达



(a)冷压压模组成



(b)压模组装

图8 俄罗斯使用的冷压烧结模具

目前,在现有的热压烧结工艺条件下,国内普遍采取调整胎体高度的办法来提高钻头进尺寿命,并已取得了一定成效。

但是,俄罗斯钻头烧结工艺普遍采用冷压烧结法,很少使用热压烧结法。在此工艺条件下生产的钻头,用于可钻性8~9级岩石中钻头进尺可达100m以上。冷压烧结法最主要的特点是使用钢制压模

70 MPa 以上,甚至可达 100 MPa。胎体冷压成型,然后用铜粉或铝粉浸渍制成钻头。这个压力比热压烧结法使用的压力大得多,有利于耐磨性的提高和钻头进尺的改善^[7]。

3.2 改变胎体配方(增加碳化钨含量)提高胎体耐磨性

利用 2 号配方,再增加总量为 5% 的 W₂C,按此配比称取总共 500 g 粉料,搅拌 30 min。空白钻头尺寸参数:Ø75/49 mm 的模具,10 水口,水口块高 6 mm,空白钻头胎体高度 6 mm。

烧结工艺参数:慢慢升温到 600 °C,加压至 3.0 MPa,边加温边加压,温度到 1010 °C 时压力加至 6.0 MPa,升温过程为 5 min。然后在 6.0 MPa 的压力下保温 8 min,停止加热,保持压力的同时自然冷却至 700 °C,卸压取出冷却。

试验结果:试验用钻头胎体上有 10 个扇形块,以 0~9 编号。钻头冷却磨平后,用洛氏硬度计测量每个扇形块上的 4~12 点硬度。测量结果见图 9。

由上述测量资料可以看出,改变胎体配方(增加碳化钨含量)后,钻头胎体能够达到钻头胎体标称硬度。

3.3 增加混料时间来提高胎体耐磨性

试验条件基本上与 3.2 试验条件相同,只是

序号	HRC	序号	HRC	序号	HRC	序号	HRC	序号	HRC
0点		1点		2点		3点		4点	
4	40	4	39	4	40	4	41	4	41
5	40	5	43	5	40	5	41	5	42
6	39	6	40	6	41.5	6	39	6	41.5
7	40	7	44	7	40.5	7	44	7	42
8	44	8	41	8	42.5	8	44	8	44
9	43	9	42	9	41.5	9	43.5	9	45
10	39	10	41	10	39	10	41	10	40
11	40	11	41	11	43	11	41	11	42.5
12	40	12	40.5	12	42.5	12	41.5	12	43
13		13		13		13		13	
aver	40.6	aver	41.3	aver	41.2	aver	41.8	aver	42.3
序号	HRC	序号	HRC	序号	HRC	序号	HRC	序号	HRC
5点		6点		7点		8点		9点	
4	38	4	42	4	41	4	41	4	41
5	41	5	43	5	40.5	5	42.5	5	42.5
6	40.5	6	42	6	41	6	41	6	39.5
7	42	7	43	7	42.5	7	44	7	43.5
8	43	8	45.5	8	46.5	8	46	8	46
9	42.5	9	44	9	46	9	45	9	45
10	41	10	42.5	10	43	10	39	10	42
11	40	11	42	11	41.5	11	43	11	43.5
12	40	12	43	12	42	12	42.5	12	42
13		13		13		13		13	
aver	40.9	aver	43.0	aver	42.7	aver	42.7	aver	42.8
总计	aver	41.9							

图 9 改变胎体配方后的硬度测量值

混料时间由 30 min 改为 12 h。

试验用钻头胎体上有 10 个扇形块。每个扇形块上划定 9 个测点,分内、中、外三圈,绿色曲线测点 6、7、10 是靠近钻头内圈硬度,黑色曲线 4、9、12 是靠近钻头外圈硬度,红色点 5、8、11 位于中环上。在整个胎体上,每种颜色曲线均由 30 个测点硬度测量结果组成。扇形块每磨去 1 mm 后,测量记录 0~9 号单个扇形块 4~12 点硬度。测量结果如图 10~16 所示。

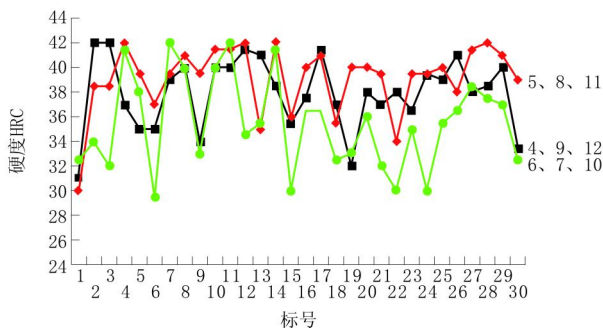


图 10 胎体唇面表面硬度曲线

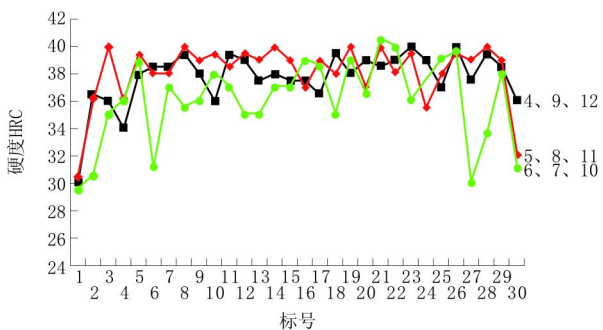
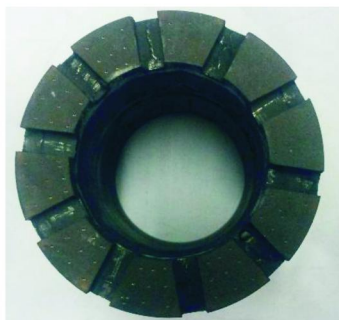
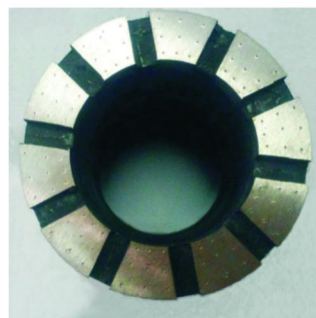


图 11 第 1 次磨 1 mm 后硬度曲线



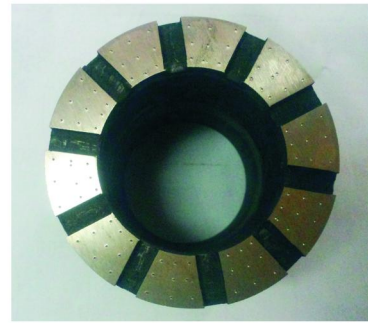
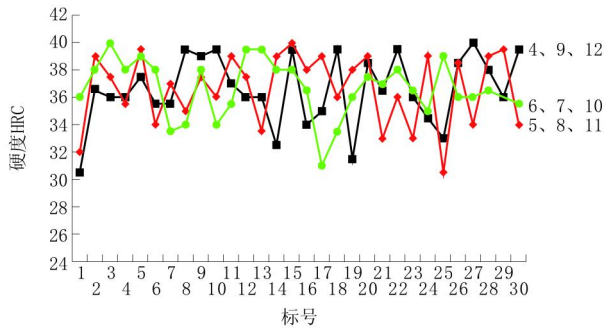


图 12 第 2 次磨 1 mm 后硬度曲线

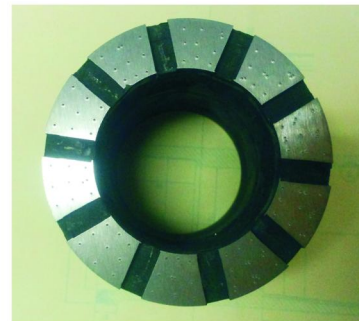
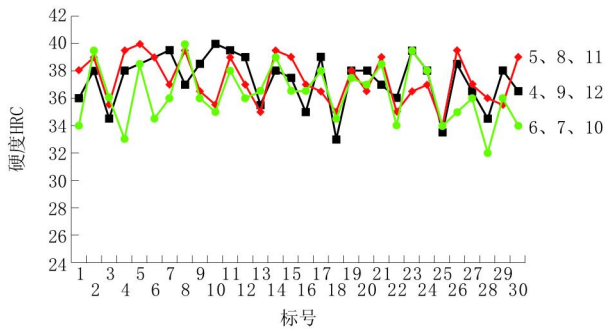


图 13 第 3 次磨 1 mm 后硬度曲线

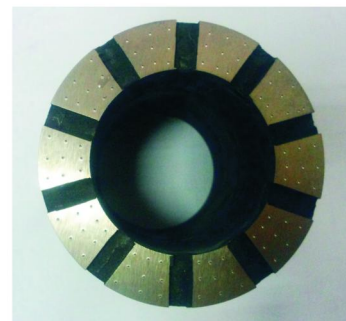
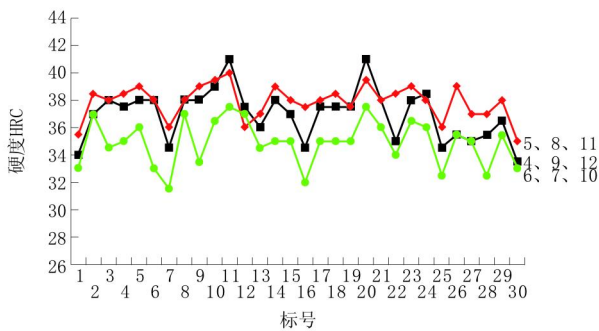


图 14 第 4 次磨 1 mm 后硬度曲线

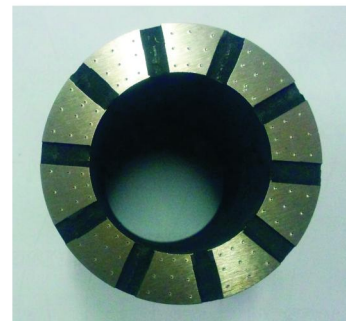
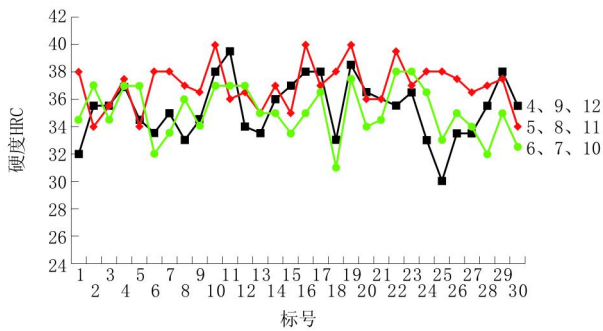


图 15 第 5 次磨 1 mm 后硬度曲线

硬度测量结果表明,加长混料时间(由 30 min 增到 12 h)对提高胎体硬度没有显著影响,但有两点应该引起我们的注意:胎体不同高度上硬度平均

值比较接近(见表 1);水口硬度测量值(测量硬度点见图 16)较扇形块唇面的测量硬度普遍偏高,均高于钻头的标称硬度,见表 2。

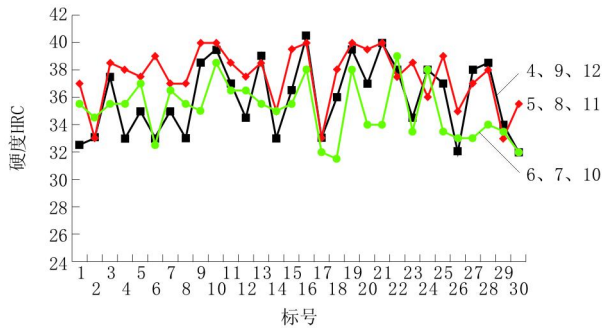


图16 第6次磨1 mm后水口附近硬度曲线

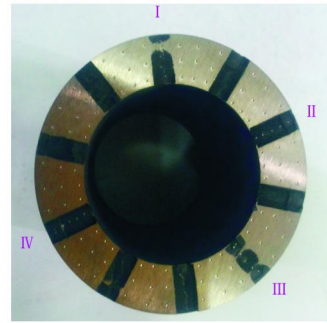


表1 不同高度胎体硬度平均值

胎体表面	第一次磨去1 mm	第二次磨去1 mm	第三次磨去1 mm	第四次磨去1 mm	第五次磨去1 mm	第六次磨去1 mm
37.5	37.3	36.6	37.0	36.6	35.8	36.2

表2 部分水口硬度测量值(参见图14)

编号	HRC	编号	HRC	编号	HRC	编号	HRC
14-I-1	46.0	14-II-1	47.0	14-III-1	49.0	14-IV-1	49.0
14-I-2	47.5	14-II-2	52.0	14-III-2	42.0	14-IV-2	51.0
14-I-3	46.0	14-II-3	48.5	14-III-3	51.0	14-IV-3	55.0
14-I-4	48.5	14-II-4	46.0	14-III-4	48.0	14-IV-4	52.0
14-I-5	38.0	14-II-5	46.0	14-III-5	48.0	14-IV-5	47.5
平均	45.2	平均	47.9	平均	47.6	平均	50.9

4 分析、讨论与建议

根据上述试验研究结果,可以看出以下情况。

(1) 胎体耐磨性是金刚石钻头的一个重要技术指标,直接影响钻头、钻进规程参数的选择和钻探工程技术指标的提高。在目前现有的检测条件下,胎体硬度可以作为衡量胎体耐磨性的一个比较直观的参考指标。而目前现场所用钻头实际胎体硬度普遍低于出厂钻头的标称硬度,生产厂家购买胎体材料制成的钻头的胎体硬度也低于胎粉厂家的标称硬度,这会容易造成误导,误认为钻头实际胎体硬度就是钻头上的标称硬度。钻探现场一般按标称硬度安排生产,所以对钻探效率和进尺的提高会带来负面影响,应该引起使用者和生产者的注意,钻头的标称硬度只能作为钻头选用时相对的一个参考值。

(2) 改进钻头烧结工艺,提高胎体硬度。试验表明,把烧结压力从5 MPa提高到6 MPa,对提高胎体硬度效果不够明显,可能是压力仍然偏小的缘故。资料^[3-5]表明,为了提高胎体的密实度和硬度,提高钻头的使用寿命,热压压力一般取15~22 MPa。本次试验使用的压力是6 MPa,似乎仍然小了一点。当然,也不一定要马上达到15~22 MPa,对于确定

的配方胎体来说,最优压力可以通过试验研究确定。

(3) 为了提高胎体硬度,增强钻头耐磨性,可以通过调整提高烧结压力来实现,建议讨论研究和试验俄罗斯冷压烧结技术^[7]。

(4) 试验表明,胎体传统配方中增加碳化钨的含量可以提高钻头胎体的硬度。但是,对碳化钨牌号的选择、配比用量,根据不同的硬度配方需要进一步研究,以期达到最优值。

(5) 把混料时间由30 min提高到12 h对提高胎体硬度没有起到明显作用,但是可以通过实验测试点的硬度分布看出:胎体不同高度上硬度平均值比较接近;水口硬度测量值较扇形块唇面的测量硬度普遍偏高,均高于钻头的标称硬度,这是很有意义的。

(6) 由于试验条件所限,加上时间紧迫,研究结果是初步的,建议今后继续进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Бугаев А. А. Синтетические алмазы в геолого-разведочном бурении [D]. Киев, 1978: 171-183.
- [2] Чихоткин В. Ф. Исследование призабойных процессов в алмазном бурении [D]. Москва, 1998: 118-127.
- [3] 朱恒银,王强,杨展,等. 深部地质钻探金刚石钻头研究与应用 [M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,2014:31-35.
- [4] 朱恒银,王强,杨凯华,等. 深部岩心钻探技术与工程 [M]. 北京:地质出版社,2014:133-136.
- [5] 段隆臣,潘秉锁,方小红. 金刚石工具的设计与制造 [M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,2012:206-209.
- [6] 汤凤林,Чихоткин В. Ф.,彭莉,等. 关于金刚石钻头胎体硬度分布的试验研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(9):65-71.
- [7] 汤凤林,А. Г. 加里宁,段隆臣. 岩心钻探学 [M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,2009:217-219.
- [8] Чихоткин В. Ф.,高申友,蒋国盛,等. 关于金刚石钻进工艺优化几个问题的研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):18-22.
- [9] В. Ф. Чихоткин,段隆臣,汤凤林,等. 基于破碎单位体积岩石能耗量设计坚硬研磨性岩石用钻头方法的研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S2):72-76.