

# 组分对铁基金刚石钻头的力学性能影响研究

刘冀

(中化地质矿山总局湖南地质勘察院,湖南长沙410100)

**摘要:**为提高金刚石钻头钻进钢筋混凝土、强磨性岩层的钻进效率,选择了一种耐磨性高、冷压成型好的铁预合金粉。本文设计了铁基胎体配方,研究了铁基预合金粉、Cu、Ni、Co各成分对铁基金刚石钻头胎体及钻进性能的影响。测试了不同配方下烧结试样的抗拉强度、三点抗弯强度和硬度,使用扫描电镜对断口进行微观分析,通过现场钻进实验测试钻头的钻进效率与寿命。同时分析了保温时间对铁基胎体力学性能的影响。结果表明:Cu、Ni、Co对铁基胎体的抗弯强度和硬度影响较大,且保温时间为5 min时,铁基胎体可以获得较好的力学性能。

**关键词:**金刚石钻头;铁基胎体配方;保温时间;力学性能;断口形貌;钻进性能

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>1;TQ164 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)05-0047-07

## Effect of components on the mechanical properties of Fe-based diamond bits

LIU Ji

(Hunan Geology Exploration Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Changsha Hunan 410100, China)

**Abstract:** To improve the drilling efficiency of diamond bits in reinforced concrete and strong abrasive rock, a pre-alloyed Fe powder with high wear resistance and cold pressing molding ability was selected for the matrix. The formulas of Fe matrix were designed to research the effect of Fe-based pre-alloy powder, Cu, Ni and Co on the matrix and drilling properties of the diamond drill bits. Analysis was conducted of the tensile strength, three-point bending strength and hardness of the sintered samples of different formula, and the ruptures of the sintered samples were investigated with SEM. The drilling efficiency and life of the drill bits was field tested. The effects of heat insulation time on the mechanical properties of Fe-based matrix were also analyzed. The results showed that Cu, Ni and Co had a great influence on the bending strength and hardness of the Fe-based matrix, and the mechanical properties of the Fe-based matrix can be improved when the insulation time was 5min.

**Key words:** diamond bits; Fe-based matrix formula; heat insulation time; mechanical properties; fracture appearance; drilling property

### 0 引言

传统的热压金刚石钻头胎体是WC基胎体,胎体材料主要包含WC、Co、Ni等金属材料。但是目前这几种材料价格上涨,导致金刚石钻头成本显著增加。并且传统金刚石钻头胎体成分基本上采用单质金属粉末,预合金粉与单质金属粉相比有很多的优点,例如热压温度较低,烧结压力较低等,所以

得到广大从事金刚石工具研究人员的重视<sup>[1-5]</sup>。因此,本文对铁基金刚石钻头进行了研究,以铁基预合金粉替代碳化钨粉作为金刚石钻头的胎体材料,研究铁预合金粉、Cu、Ni、Co各成分对铁基胎体力学性能的影响,为铁基胎体的配方提供理论依据与实验基础<sup>[6-7]</sup>。

收稿日期:2020-06-03;修回日期:2020-10-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.05.007

基金项目:国家自然科学基金项目“基于‘浆-土’耦合作用下的注浆抬升控制理论研究”(编号:52078494)

作者简介:刘冀,男,汉族,1980年生,高级工程师,地质工程专业,主要从事水工环地质方面的工作,湖南省长沙市天心区湘府西路222号华菱嘉园商务楼15楼,4242014@qq.com。

引用格式:刘冀.组分对铁基金刚石钻头的力学性能影响研究[J].钻探工程,2021,48(5):47-53.

LIU Ji. Effect of components on the mechanical properties of Fe-based diamond bits[J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):47-53.

## 1 实验

### 1.1 配方设计

选用铁预合金粉末作为金刚石钻头胎体材料,铁基胎体配方包括4种材料,分别是铁预合金粉和适量纯铜粉,同时添加了适量纯镍和纯钴。Ni主要用来提高胎体强度和耐磨性。Co在钻头胎体中是不可缺少的粘结相,易烧结,使颗粒相互靠拢,可促进胎体的收缩致密化过程<sup>[8-11]</sup>。

金刚石浓度的选择与所钻岩层关系密切,谢德龙<sup>[12]</sup>指出,中强研磨性岩层金刚石浓度15%~30%,且在前期研究的基础上确定金刚石浓度设计为20%<sup>[13]</sup>(100%制,粒度为40/45)。通过调整铁基预合金粉、Cu以及Ni、Co之间的质量配比来研究胎体性能。铁预合金粉配方采用两阶段设计过程:第一阶段只包含铁预合金粉和适量纯铜粉,以铁基预合金粉 $F_1$ 为变量,其他成分含量不变设计了4组配方;第二阶段除铁预合金粉,还添加了适量Ni和Co,以Ni、Co为变量,其他成分含量不变设计了5组配方。本次实验先后设计了9种铁基胎体配方,各配方对应编号1~9,实验配方设计如表1所示。

表1 铁基胎体配方  
Table 1 Fe-based matrix formula %

配方 编号	铁基预合金粉				Cu	Ni	Co
	$F_1$	$F_1$	$F_1$	$F_1$			
1	30	15	30	20	5	0	0
2	40	15	30	10	5	0	0
3	20	15	30	30	5	0	0
4	25	30	30	10	5	0	0
5	25	30	30	10	0	5	0
6	25	30	30	10	0	0	5
7	25	30	30	5	0	10	0
8	25	30	30	5	0	5	5
9	25	30	25	5	0	10	5

其中将传统的WC基金刚石钻头胎体通用配方作为第10种配方:WC45%、Mn5%、Co10%、Ni10%、CuSn<sub>10</sub>30%,金刚石浓度设计为20%(100%制,粒度为40/45)。

### 1.2 热压烧结

试样分为2类:不加金刚石的空白试样和加金刚石的试样。分别测定试样的抗拉强度、抗弯强度、硬度,并进行断口SEM形貌分析。

烧结工艺在参考热压烧结WC基金刚石钻头烧结工艺<sup>[14-15]</sup>的基础上,根据铁预合金粉的特点,在前期试验<sup>[13]</sup>及Dai等<sup>[16]</sup>研究基础上确定热压烧结工艺及参数为:空白试样烧结温度 $T=900\text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间 $t=2、5、8\text{ min}$ ,压力 $P=19.6\text{ MPa}$ ;加金刚石的试样 $T=940\text{ }^\circ\text{C}$ , $t=2、5、8\text{ min}$ , $P=19.6\text{ MPa}$ 。

### 1.3 力学性能实验及断口测试

用液压万能材料试验机测试试样抗拉强度和三点抗弯强度。分别测定不含金刚石试样与含20%质量分数(下同)金刚石试样的抗拉强度和三点抗弯强度。用洛氏硬度计测试试样的硬度。按照标准《烧结金属摩擦材料抗拉强度的测定》<sup>[17]</sup>进行,加载速度2 mm/min。试样尺寸如图1所示。

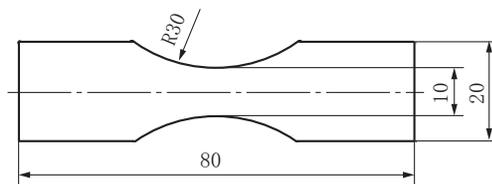


图1 拉伸试样的尺寸

Fig.1 Size of the samples for tension test

按照标准《金属材料弯曲试验方法》<sup>[18]</sup>在万能试验机上进行测定,试样为3 mm×20 mm×125 mm的长条形(试样长度根据试样厚度和所使用的试验设备确定),加载速度为2 mm/min。

在胎体配方相同的条件下,胎体硬度越高,耐磨性及抗冲蚀性也越高<sup>[19]</sup>。但目前并不能统一测定胎体耐磨性,因此用比较容易测定的洛氏硬度HRC来表示钻头胎体性能。测定按照标准《金属洛氏硬度试验》<sup>[20]</sup>在布洛维光学硬度计上进行,试样为 $\varnothing 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的圆柱体。

用扫描电镜观测烧结试样断口形貌。断口分析的样品选用拉伸试验中拉断的样品,在扫描前需要对样品进行预处理,把样品泡在酒精杯里,然后用超声波震荡清洗。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 抗拉强度

不同配方体系下烧结试样的抗拉强度结果如表2所示。A1~A10分别对应1~10号配方不含金刚石空白试样,B1~B10分别对应1~10号配方含20%金刚石试样。每种配方每组试样测试3件,分

别测定其抗拉强度值,并列出平均值。

表 2 抗拉强度测试结果平均值  
Table 2 Mean values of tensile strength test MPa

编号	不含金刚石空白试样			编号	含 20% 金刚石试样		
	t=2 min	t=5 min	t=8 min		t=2 min	t=5 min	t=8 min
A1	273	232	185	B1	130	94	70
A2	139	201	118	B2	87	177	113
A3	185	178	156	B3	70	113	139
A4	139	142	178	B4	46	64	59
A5	220	156	176	B5	86	70	84
A6	148	152	130	B6	56	55	46
A7	478	511	486	B7	264	264	258
A8	516	499	521	B8	235	211	248
A9	510	555	522	B9	259	275	246
A10	755	735	792	B10	364	360	388

由表 2 和图 2、3 所示,配方 1~6 的抗拉强度值都比较低,配方 7~9 的抗拉强度值较高。从配方成分分析,前 6 个配方未添加或少量添加 Ni 和 Co,而配方 7~9 添加了适量的 Ni 和 Co, Ni 和 Co 元素提高了抗拉强度值,这与其他学者的研究结论<sup>[16,21-22]</sup>一致。Ni 和 Co 都具有适度的磨损性能,与 Fe 适量搭配可以得到很好的综合性能,如小的变形性和适度的耐磨性。相较于不加金刚石试样,加入金刚石后,胎体试样的抗拉强度下降了 50% 左右,且在加金刚石试样中,配方 4~6 的抗拉强度低于配方 1~3,这是由于金刚石包镶能力随 Fe 含量的增大而降低。其中配方 9 的抗拉强度相较于传统的 WC 基通用配方 10,抗拉强度相差不大。在保温时间 t=5 min 时,配方 9 的抗拉强度最大。

2.2 抗弯强度

不同配方体系下烧结试样的抗弯强度结果如表 3 所示。A1~A10 分别对应 1~10 号配方不含金刚石空白试样, B1~B10 分别对应 1~10 号配方含 20% 金刚石试样。每种配方每组试样烧结 2 件,分别测定其抗弯强度值,并列出平均值。

由表 3 和图 4、5 所示,配方 1~10 的抗弯强度基本变化趋势是逐渐增大的,其中配方 5~9 的抗弯强度相差不大,但都高于配方 1~4。从配方成分来看,这是由于配方 5~9 中添加了适量的 Ni 和 Co,而配方 1~4 中未添加且 Cu 的质量分数较低。Co 的抗弯强度高,可提高铁基胎体的抗弯强度, Ni 也具有

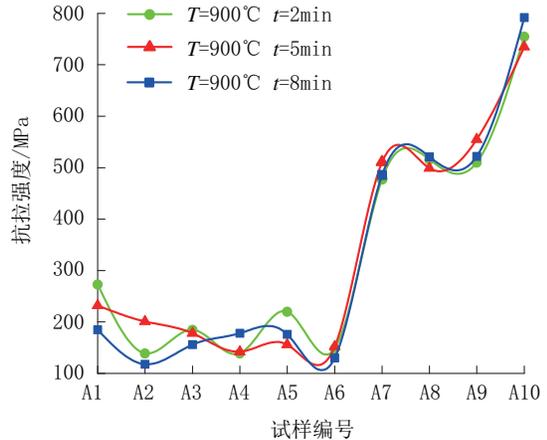


图 2 不同配方的抗拉强度变化(空白试样)

Fig.2 Tensile strength changes of different formulas (blank samples)

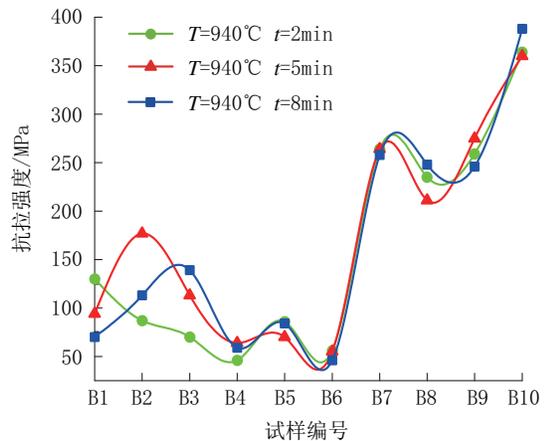


图 3 不同配方的抗拉强度变化(加金刚石试样)

Fig.3 Tensile strength changes of different formulas (samples with diamonds)

表 3 抗弯强度测试结果平均值

Table 3 Mean value of bending strength test results MPa

编号	不含金刚石空白试样			编号	含 20% 金刚石试样		
	t=2 min	t=5 min	t=8 min		t=2 min	t=5 min	t=8 min
A1	323	340	531	B1	226	245	258
A2	378	405	423	B2	238	/	233
A3	390	488	495	B3	238	210	248
A4	655	588	675	B4	330	348	298
A5	755	735	708	B5	390	400	395
A6	625	790	655	B6	373	353	348
A7	755	800	798	B7	475	450	405
A8	790	783	823	B8	450	413	423
A9	718	785	713	B9	443	453	453
A10	948	940	965	B10	433	528	500

一定的耐磨性和韧性<sup>[22]</sup>。相较于不加金刚石试样,加入金刚石后,胎体试样的抗弯强度最高下降了50%左右。其中配方9的抗弯强度相较于传统的WC基通用配方10相差不大。同一配方,在烧结温度相同的情况下,保温时间5 min时能获得较高的抗弯强度,这是由于保温时间过短影响胎体金属粉末的熔化、粘结浸渍金属、对金刚石和骨架金属浸润并形成粘结层的过程,但时间过长会影响金刚石强度,导致金刚石变质,强度降低,容易破碎<sup>[23-25]</sup>。

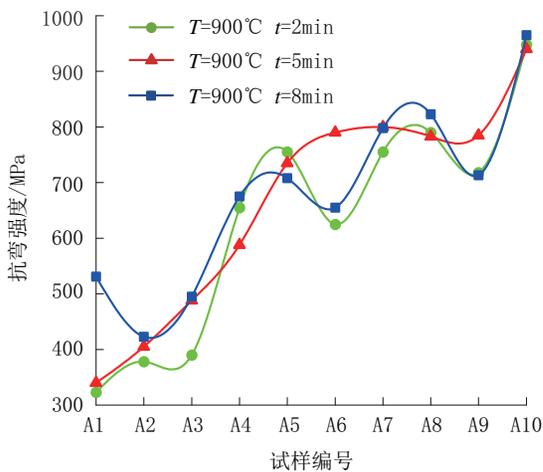


图4 不同配方的抗弯强度变化(空白试样)

Fig.4 Bending strength changes of different formulas (blank samples)

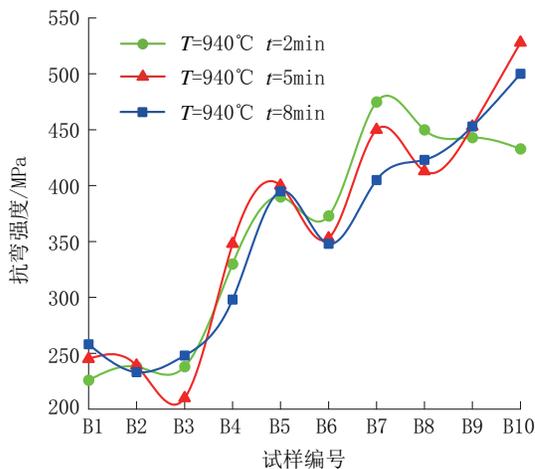


图5 不同配方的抗弯强度变化(加金刚石试样)

Fig.5 Bending strength changes of different formulas (samples with diamonds)

2.3 硬度

A1~A10分别对应1~10号配方不含金刚石的

空白试样,每种配方每组试样测试6个点的洛氏硬度值,按照检测数据处理准则进行取舍,并计算平均值作为测试结果。不同配方体系下烧结试样的硬度测试结果如表4所示。从表4及图6可知,配方5、7、9的硬度值较低,其余配方的硬度值都较高。

表4 洛氏硬度测试结果均值(不含金刚石的空白试样)

Table 4 Mean value of hardness test results (blank samples) HRC

编号	洛氏硬度测试均值		
	t=2 min	t=5 min	t=8 min
A1	44.2	45.1	39.5
A2	47.2	45.8	48.5
A3	40.8	42.5	43.5
A4	40.8	42.0	43.9
A5	31.0	30.0	30.1
A6	53.1	50.2	51.7
A7	22.0	23.6	23.2
A8	35.0	36.8	35.3
A9	26.6	26.1	26.1
A10	42.0	41.6	43.2

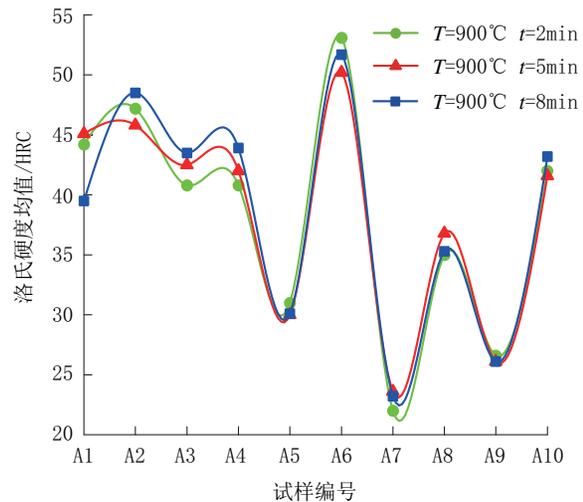


图6 不同配方的硬度变化(空白试样)

Fig.6 Hardness changes of different formulas (blank samples)

2.4 断口形貌SEM图像

试验主要利用扫描电镜观察试样的断口,图7(A1~A9)为配方1~9的不含金刚石的空白试样断口SEM图像,保温时间5 min。

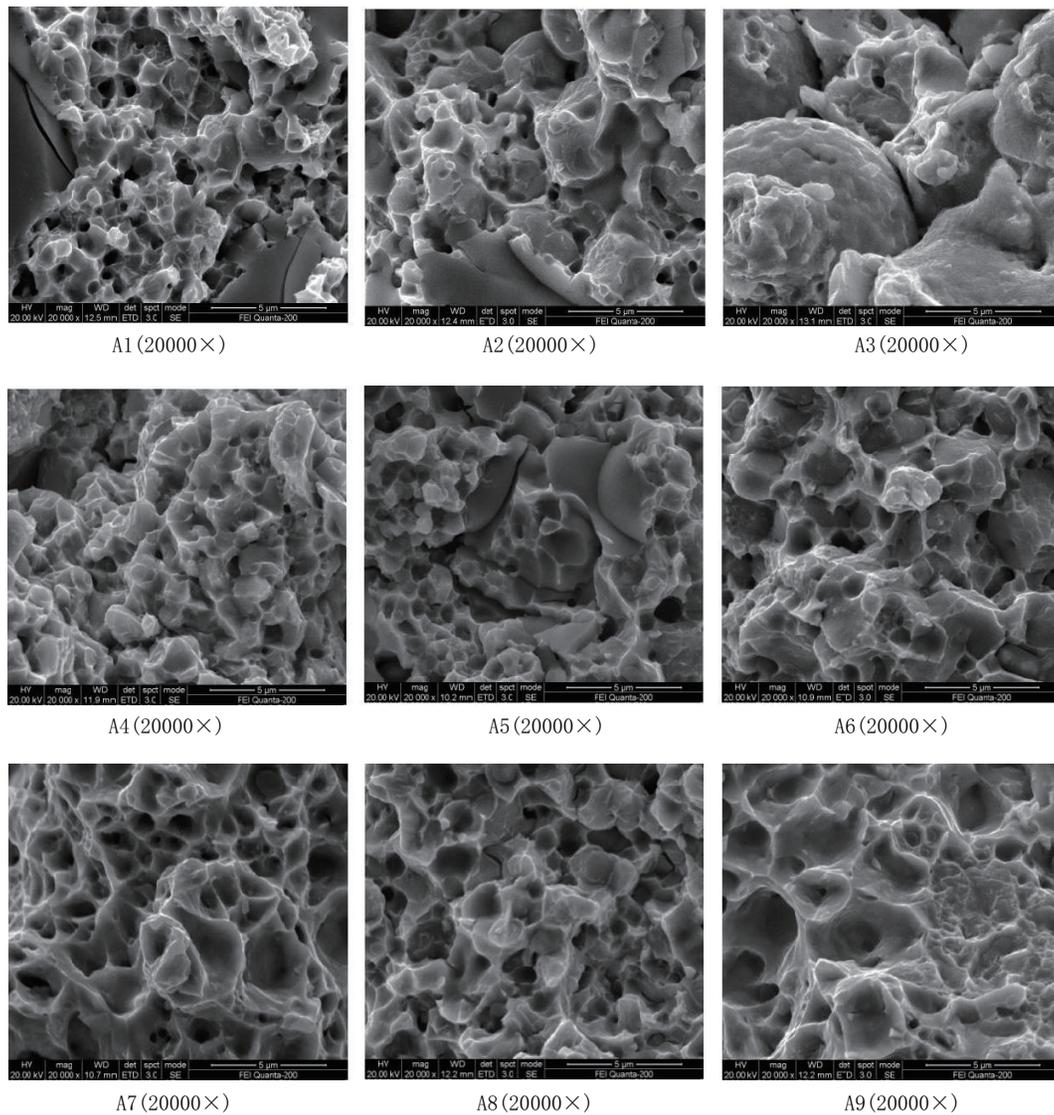


图7 断口截面SEM图像

Fig.7 SEM images of the rupture section

由SEM形貌图像可看到有韧窝存在,在断裂的过程中,存在塑性变形,断口大部分为韧性断裂。由配方1~3的SEM形貌照片可知,微观空隙相对较多,且分布不均匀,说明胎体材料没有充分熔合,有较多的孔洞、块状结构以及裂纹,但也存在一部分韧窝。在宏观上表现为此3种配方的烧结体的相对密度和力学性能较低,胎体致密性和稳定性差。从配方4~6的图上可看到有韧窝状断裂十分清楚,韧窝多但较浅,胎体中存在一定的空隙、孔洞、块状结构以及裂纹,但较之前3种配方较少,胎体粘结相对较好,胎体致密性和稳定性较差。从配方7~9的图上可看到韧窝状断裂很清晰,韧窝多、大且深,胎体中存在不明显的空隙、孔洞、块状结构以及裂纹,

胎体材料的均匀性得到了明显的改善,胎体粘结较好,胎体材料已经充分的熔合,胎体的烧结致密性很好,因而抗弯强度都比较高。

在此基础上可知:(1)配方1~3未添加Ni和Co,仅仅是铁基预合金粉和单质铜粉组成,故而各项力学性能都较差;(2)配方4~6中添加了少量的Ni、Co,抗弯强度有明显提升,但抗拉强度值还较低;(3)配方7~9的各项力学性能较好,且硬度值较低。综上所述,铁基胎体能够获得良好的力学性能,Cu、Co和Ni对铁基胎体的抗弯强度影响较大。

### 3 现场钻进试验

综合力学性能分析,采用胎体成分配方9设计

加工成金刚石钻头,进行钻进实验论证分析。采用XY-100型立式岩心钻机双管钻进,转速600~900 r/min,钻进地层为长沙望城县某高楼1和5号混凝土地基基础,钻头使用数为2个,钻进效果参数如表5所示。

从现场试验可看出,钻头未钻进之前是平底唇面(图8a),钻进一段时间后,由于胎体耐磨性间隔高低不同,使金刚石钻头钻进时唇面形成高低不平的圆圈(图8b)。使用后的钻头没有出现掉块、裂纹

编号	配方	钻头规格/ mm	总进尺/ m	时效/ m	平均寿命/ m
1	9	Ø101/83	36.7	6.3	36.25
5	9	Ø101/83	48.2	7.5	43.80

等现象,金刚石掉粒少,胎体力学性能和包镶强度高(图8c)。铁基胎体配方具有较高的耐磨性,金刚石又易于出刃,钻头使用寿命较长。



图8 现场使用的金刚石钻头

Fig.8 Field test diamond bit

在钻进混凝土标号C35的长沙望城县某地基基础时,钻头钻进速度较快,平均寿命达到42 m。说明铁基金刚石钻头胎体配方设计合理,钢体与胎体连接牢固,具有良好的使用性能,钻进效率较高。

#### 4 结论

本文以铁基预合金粉替代碳化钨粉作为金刚石钻头的胎体材料,研究铁预合金粉、Cu、Ni、Co各成分对铁基胎体的力学性能的影响,结论如下:

(1)添加适量Ni和Co的铁基胎体能够获得较好的烧结性能,铁预合金粉替代碳化钨粉是完全可行的,所烧结的钻头具有良好的使用性能,钻进效率较高。

(2)相较于不含金刚石的试样,含20%金刚石试样的抗拉强度和抗弯强度值均降低较多。

(3)当保温时间为5 min时,铁基胎体有较好的力学性能。

#### 参考文献(References):

- [1] 杨展. 预合金粉胎体钻头性能的研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 71-75.  
YANG Zhan. Performance of diamond bit matrix fabricated by pre-alloyed powder materials[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 34(1): 71-75.
- [2] 张绍和, 熊湘君, 王开志, 等. 金刚石与金刚石工具[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 209-211.  
ZHANG Shaohu, XIONG Xiangjun, WANG Kaizhi, et al. Diamonds and diamond tools[M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 209-211.
- [3] 吕申峰, 李季, 夏举学, 等. 国内外预合金粉末在金刚石工具中的应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2006(4): 81-84.  
LÜ Shenfeng, LI Ji, XIA Juxue, et al. The application of the pre-alloyed powder in diamond tools [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2006(4): 81-84.
- [4] Xu J, Sheikh A H, Xu C. 3-D Finite element modelling of diamond pull-out failure in impregnated diamond bits[J]. Diamond & Related Materials, 2017, 71: 1-12.
- [5] Bonneau M, Moltenni M. Wire manufacturing and free sintering

- with NEXT®[J]. *Industrial Diamond Review*, 2002, 62(595): 263-265.
- [6] 尹邦跃,张翠芳,董小雷,等.机械合金化Fe基预合金粉末对金刚石刀头性能的影响[J].*超硬材料工程*,2011,23(6):33-38.  
YIN Bangyue, ZHANG Cuifang, DONG Xiaolei, et al. Effects of Fe-based pre-alloy powder by mechanical alloying on properties of diamond tool[J]. *Superhard Material Engineering*, 2011, 23(6):33-38.
- [7] 李子章,邓伟,杨凯华.热压铁基孕镶金刚石钻头的试验研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2008,35(7):94-96.  
LI Zizhang, DENG Wei, YANG Kaihua. Experiment study on hot-pressing iron-based impregnated diamond drilling bit[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2008,35(7):94-96.
- [8] 孙毓超.金刚石工具胎体中合金元素的作用[C]//郑州国际超硬材料及制品研讨会.2003.  
SUN Yuchao. The role of alloying elements in the matrix of diamond tools [C]//Zhengzhou International Superhard Materials and Products Seminar. 2003.
- [9] 郑虎春.铁基金刚石锯片的制备及性能研究[D].长沙:中南大学,2011.  
ZHENG Huchun. Preparation and performance research of iron-based diamond saw blades [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [10] 王发明.适合坚硬地层孕镶金刚石钻头优化设计研究[D].北京:中国石油大学,2009.  
WANG Faming. Study on impregnated diamond bit's optimal design for hard formation [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2009.
- [11] 张鹰.金刚石制品金属结合剂配方设计探讨[J].*金刚石与磨料磨具工程*,2000,116(2):9-11.  
ZHANG Ying. Discussion on the formulation design of metal bond for diamond products[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2000,116(2):9-11.
- [12] 谢德龙.深孔钻探金刚石钻头用FeCoCu预合金粉的制备及性能研究[D].长沙:湖南大学,2016.  
XIE Delong. Study on preparation and application of FeCoCu pre-alloyed powders for deep prospecting diamond bits [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [13] 许华松,杨俊德,陈威.保温时间对Fe基金刚石钻头性能影响的研究[J].*超硬材料工程*,2016,28(4):1-5.  
XU Huasong, YANG Junde, CHEN Wei. Study of the influence of holding time on the performance of Iron-based diamond drill bits [J]. *Superhard Materials Engineering*, 2016, 28(4): 1-5.
- [14] 孙毓超.金刚石制品的烧结合金化原理[J].*工业金刚石*,1997(5-6):37-39.  
SUN Yuchao. The principle of sintering and alloying of diamond products [J]. *Industrial Diamond*, 1997(5-6):37-39.
- [15] 赵永赞,沈冰.工艺参数对金刚石工具性能的影响[J].*沈阳建筑工程学院学报*,1996,12(1):66-71.  
ZHAO Yongzan, SHEN Bing. The influence of process parameters on the performance of diamond tools [J]. *Journal of Shenyang Institute of Civil Engineering and Architecture*, 1996,12(1):66-71.
- [16] He Dai, Limin Wang, Jingguo Zhang, et al. Iron based partially pre-alloyed powders as matrix materials for diamond tools [J]. *Powder Metallurgy*, 2015,58(2):83-86.
- [17] GB/T 10423—2002,烧结金属摩擦材料抗拉强度的测定[S]. GB/T 10423—2002, Determination of tensile strength of sintered metal friction materials[S].
- [18] GB/T 232—1999,金属材料弯曲试验方法[S]. GB/T 232—1999, Bending test method for metallic materials[S].
- [19] 罗伟棠,赵尔信,卓国基,等.人造金刚石及金刚石钻头[J].*探矿工程*,1985(5):15-21.  
LUO Weitang, ZHAO Erxin, ZHUO Guoji, et al. Synthetic diamond and diamond drill bits [J]. *Exploration Engineering*, 1985(5):15-21.
- [20] GB/T 230.1—2004,金属洛氏硬度试验[S]. GB/T 230.1—2004, Metallic Rockwell hardness test[S].
- [21] Bai R, Zhang S, Han Y, et al. Effect of CL192 pre-alloyed powder on matrix properties of impregnated diamond bit [J]. *Diamond and Related Materials*, 2020,107:107878.
- [22] Zhao X, Li J, Duan L, et al. Effect of Fe-based pre-alloyed powder on the microstructure and holding strength of impregnated diamond bit matrix [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2019,79:115-122.
- [23] 张义东.金刚石钻头热压烧结工艺研究[D].长沙:中南大学,2010.  
ZHANG Yidong. Research on hot-pressing sintering process of diamond bits [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [24] 王镇全,王克雄,翟应虎,等.新型金刚石孕镶块的研究[J].*石油机械*,1999,27(10):11-13.  
WANG Zhenquan, WANG Kexiong, ZHAI Yinghu, et al. New diamond impregnated matrix [J]. *China Petroleum Machinery*, 1999,27(10):11-13.
- [25] Jia-liang Wang, Shao-he Zhang. A new diamond bit for extra-hard, compact and nonabrasive rock formation [J]. *Journal of Central South University*, 2015,22(4):1456-1462.

(编辑 荐华)