

耐高温电镀镍锰合金胎体金刚石钻头的 钻进性能研究

杨雪嘉, 韦秀洁, 潘秉锁*

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 深部钻探的复杂钻进条件对孕镶金刚石钻头的性能提出了更高的要求。为了提高电镀金刚石钻头的使用范围,研究了 $MnCl_2$ 和丁炔二醇乙氧基化合物(BEO)对镍基镀层表面形貌、显微硬度和热稳定性的影响,对比研究了300℃退火1h后纯Ni金刚石钻头、Ni-Mn金刚石钻头和添加BEO的Ni-Mn金刚石钻头的钻进性能。结果表明,300℃退火1h后的纯Ni镀层显微硬度下降到300HV。以此镀层为胎体的金刚石钻头由于胎体耐磨性过低,导致金刚石过早脱落,钻头寿命只有2.94m。Ni-Mn镀层和添加BEO的Ni-Mn镀层都具有良好的热稳定性,300℃退火1h后硬度分别提高到640HV和693HV。Ni-Mn胎体电镀金刚石钻头在退火后兼有合适的钻进寿命和钻进效率,钻头寿命可以达到4.67m。而添加BEO的Ni-Mn胎体金刚石钻头在本文试验中由于胎体硬度过高,导致金刚石无法正常出刃而失效。

关键词: 孕镶金刚石钻头;电镀;镍锰镀层;热稳定性;深部钻探

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0046-08

Study on drilling performance of heat-resisting electroplated diamond bit with Ni-Mn alloy matrix

YANG Xuejia, WEI Xiujie, PAN Bingsuo*

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The complex drilling conditions of deep drilling put forward higher requirements for the performance of impregnated diamond bits. To improve the application range of electroplated diamond bits, the effects of $MnCl_2$ and butynediol ethoxylate (BEO) on the surface morphology, microhardness, and thermal stability of the nickel base coating were studied. The drilling performance of pure Ni matrix diamond bit, Ni-Mn matrix diamond bit, and Ni-Mn matrix diamond bit with BEO as an additive after annealing at 300℃ for 1 hr was compared. The results show that the microhardness of pure Ni decreases significantly to 300HV after annealing at 300℃ for 1 hr, and the wear resistance of the annealed diamond bit with this matrix is too low, which leads to premature diamond shedding and a short service life to 2.94m. Both Ni-Mn coating and Ni-Mn coating with BEO added have good thermal stability, and the hardness increases to 640HV and 693HV respectively after annealing at 300℃ for 1hr. Ni-Mn matrix diamond bit has both suitable drilling life and drilling efficiency after annealing, and the bit life can reach 4.67m. However, the annealed Ni-Mn matrix diamond bit with BEO as an additive fails due to the matrix's high microhardness.

Key words: impregnated diamond bit; electroplating; Ni-Mn electrodeposit; thermal stability; deep drilling

收稿日期: 2024-05-10; 修回日期: 2024-07-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.007

基金项目: 国家重点研发项目(编号: 2022YFB3706604)

第一作者: 杨雪嘉, 女, 汉族, 1998年生, 博士研究生, 地质工程专业, 主要从事金刚石工具磨损方面的研究, 湖北省武汉市鲁磨路388号, 20161001283@cug.edu.cn。

通信作者: 潘秉锁, 男, 汉族, 1976年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 长期从事深部钻探、金刚石工具设计与制造研究, 湖北省武汉市鲁磨路388号, diamondtools@cug.edu.cn。

引用格式: 杨雪嘉, 韦秀洁, 潘秉锁. 耐高温电镀镍锰合金胎体金刚石钻头的钻进性能研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 46-53.

YANG Xuejia, WEI Xiujie, PAN Bingsuo. Study on drilling performance of heat-resisting electroplated diamond bit with Ni-Mn alloy matrix[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 46-53.

0 引言

随着经济的快速发展,我国对能源资源的需求急剧增长,而深部钻探是解决能源资源问题的必要手段^[1-2]。深部高温高压环境、坚硬难钻地层对钻探技术带来了巨大挑战,对作为硬岩主要碎岩工具的孕镶金刚石钻头的性能提出了更高的要求^[3-6]。

对于孕镶金刚石钻头来说,金刚石钻头胎体磨损的快慢对金刚石钻头的钻进效率和使用寿命有很大影响^[7]。胎体磨损快于金刚石磨损,会导致金刚石的提前脱落,使用寿命下降;金刚石磨损快于胎体磨损,金刚石出刃高度不够,钻进效率下降。电镀法制造的孕镶金刚石钻头具有不损伤金刚石、工艺可控性好、钻头适应性广等突出优点,在松科一井和松科二井中都有应用^[8-9]。但电镀孕镶金刚石钻头胎体常用的纯 Ni 镀层或 Ni-Co 合金镀层都属于纳米材料^[10-11],具有热不稳定性,在高温下会发生退火软化现象^[12-14],如纯 Ni 在 300 °C 退火后显微硬度在 400 HV 左右,Ni-25Co 在 200 °C 退火后显微硬度只有 300 HV 左右。而深部钻探时地层高温以及冲洗液冷却不及时都很容易导致孕镶金刚石钻头的工作温度超过 300 °C^[15]。在这样的高温环境下,金刚石钻头的胎体硬度下降会使得胎体磨损速度快于金刚石的磨损,导致钻头使用寿命的显著下降,增加钻探施工成本^[16-18]。因此开发具有更好热稳定性的钻头胎体材料有着重要的意义。

在镍合金的研究中,人们发现锰的引入对于提高镍镀层的机械性能与热稳定性有着重要的作用^[19-21]。Zhu 等^[19]在旋转圆柱阴极上制备了 Ni-Mn 合金,发现当 Mn 的含量增加到 0.4 wt.% 以上,Ni-Mn 合金在 250 °C 退火 2 h 后仍表现出超过 1200 MPa 的抗拉强度。Talin 等^[20]发现 Ni-Mn 在 500 °C 退火 1 h 仍能保持其结构、细晶粒组织和强度,并且在 800 °C 退火处理后不会再结晶。也有报道显示在 600 °C 退火 1 h 后,含锰量为 1 wt.% 的 Ni-Mn 镀层的屈服强度损失仅为其初始屈服强度的 15% 左右^[21]。但目前有关 Ni-Mn 合金的研究主要集中在镀层中锰的含量以及镀层性质,Ni-Mn 合金作为金刚石钻头的胎体材料研究还较少。

针对深部钻探对金刚石钻头优良寿命的需要,本文在镀液中引入了锰离子和丁炔二醇乙氧基化合物(BEO),研究了它们对镀层表面形貌、显微硬度和耐热性的影响;对比研究了分别以纯 Ni 和 Ni-Mn 合金为胎体材料的金刚石钻头的钻进性能,并分析了钻头的磨损形貌,以期扩大电镀孕镶金刚石钻头的使用场合。

1 实验

1.1 镀液配方

本文所用的镀液配方如表 1 所示,主要分为纯 Ni 镀液、Ni-Mn 镀液、添加 BEO 的 Ni-Mn 镀液。

表 1 镀液配方
Table 1 Formula of plating solutions

成分	浓度/(g·L ⁻¹)			各组份作用
	Ni	Ni-Mn	添加 BEO 的 Ni-Mn	
NiSO ₄	200	200	200	主盐,提供 Ni ²⁺
H ₃ BO ₃	35	35	35	pH 值缓冲剂
NaCl	9.3	0	0	作为对比,提供相同摩尔质量的 Cl ⁻
MnCl ₂	0	10	10	主盐,提供 Mn ²⁺
糖精	2	2	2	细化晶粒,减小应力
十二烷基硫酸钠	0.075	0.075	0.075	润湿剂
BEO	0	0	0.15	调整镀层性能

1.2 镀层制作与表征

选用经过 0.05 μm 刚玉粉抛光的铜锌片(尺寸为 20 mm×20 mm×0.2 mm)作为镀层的基体,除中心部分直径为 10 mm 的圆形区域外,基体的其余部分均用聚氯乙烯掩模覆盖。电镀时,镀液温度保持

在 35 °C,pH 值为 3.8,电流密度为 1.6 A/dm²,电镀时间为 8 h,忽略电镀过程中副反应生成氢气所导致的 pH 值变化。镀层样品出槽后,使用 OTF-1200X-S 型管式炉在 300 °C 下退火处理 1 h。

镀层的表面形貌采用 Tescan Lyra3 型扫描电子

显微镜观察。镀层的显微硬度采用HVS-1000A型显微硬度计测试。测试时,使用1 N的加载载荷,停留时间为10 s。在每个试样表面选取随机的5个点进行测量,取平均值作为镀层的显微硬度。

1.3 室内钻进实验

本文所用的钻头钢体如图1(a)所示,其中钻头钢体外径 $35.4\text{ mm}\pm 0.05\text{ mm}$,内径 $24.6\text{ mm}\pm 0.05\text{ mm}$ 。所用的金刚石为HSD80系列,目数为45/50和50/60各占一半。钻头制作的电流密度、镀液温度、镀液pH值等工艺参数与上述镀层制作的参数

相同。钻头工作层共有3层金刚石,实物如图1(b)。电镀完成后,采用OTF-1200X-S型管式炉对钻头在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下退火处理1 h。

采用自制微钻实验台进行室内钻进试验。岩样采用坚硬致密、中等研磨性的黄锈石花岗岩,尺寸为 $140\text{ mm}\times 140\text{ mm}\times 180\text{ mm}$ 。所有钻头的微钻实验采用统一的钻进规程参数:钻压9 MPa,钻头转速710 r/min,冲洗液为清水,回次进尺14~15 cm。钻进试验后,采用KEYENCE VK-X100K型激光共聚焦显微镜拍摄钻头唇面的磨损形貌。

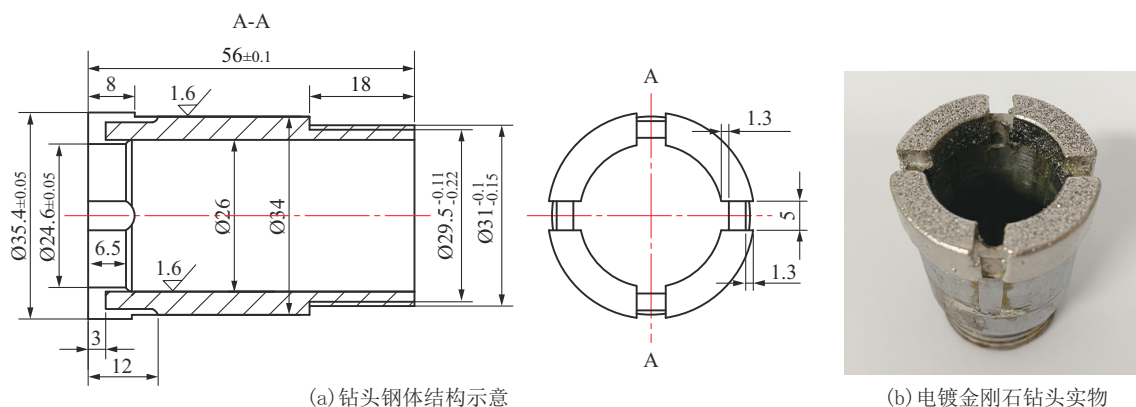


图1 钻头钢体及实物

Fig.1 Diamond bit body and electroplated diamond bit

2 实验结果与分析

2.1 镀层的表面形貌

三种镀层的表面形貌如图2所示。纯Ni镀层和Ni-Mn镀层的表面形貌都以均匀光滑的细胞状结构为特征;但是,Ni-Mn镀层细胞状结构的尺寸相较于纯Ni镀层要大得多,Ni-Mn镀层的细胞状结构平均尺寸为 $14\text{ }\mu\text{m}$,而纯Ni镀层的结构大小仅为

$7\text{ }\mu\text{m}$ 。这种细胞状结构的形成与镀液中的糖精有关。电镀过程中,糖精吸附在镀层表面并抑制锥体结构的生长^[22-23]。随着BEO的加入,镀层表面的细胞状结构消失,镀层整体上光滑平整,说明BEO的加入有利于抑制细胞状表面结构的产生。与糖精一起添加,Ni-Mn镀层具有良好的整平作用。

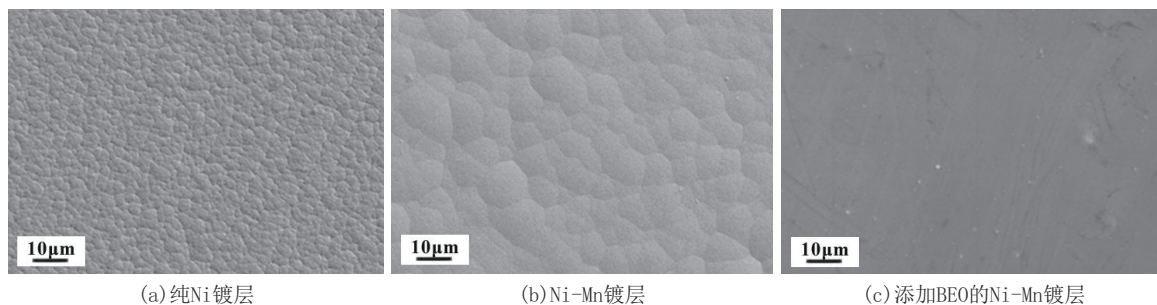


图2 三种镀层的扫描电镜照片

Fig.2 Scanning electron microscopy images of three electrodeposited coatings

2.2 镀层的显微硬度

对3种镀层退火前后的显微硬度进行了测试,结果如图3所示。未退火时,纯Ni镀层的硬度为489 HV,略高于文献中同类型镀液镀层的硬度^[24],这可能与本文试验所用的糖精添加量较大有关。随着镀液中 $MnCl_2$ 的加入,镀层的显微硬度明显增加,达到了554 HV。而BEO的加入进一步提高了镀层硬度,达到594 HV,与纯Ni镀层相比提高了21%。类似的文献中指出锰和BEO的加入都有细化晶粒的效果^[25-26]。根据Hall-Petch公式^[27],晶粒尺寸细化有助于提高材料的硬度,因此推测 $MnCl_2$ 和BEO的加入使镀层晶粒细化从而提高了镀层的显微硬度。

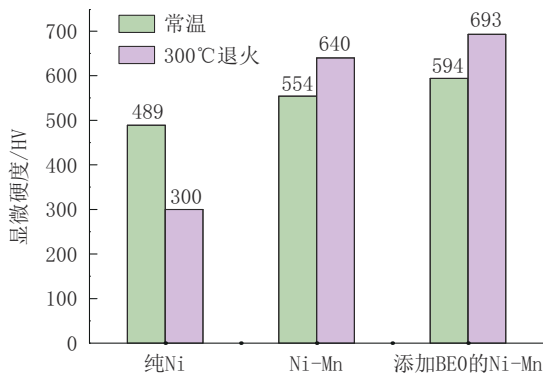


图3 三种镀层退火前后的显微硬度变化

Fig.3 Microhardness changes of three deposited coatings before and after annealing

退火处理后,纯Ni镀层和两种Ni-Mn镀层的硬度变化趋势相反。纯Ni镀层的显微硬度显著下降,在300℃退火1 h后下降到300 HV,约为退火前的60%。而两种Ni-Mn镀层则发生了退火硬化现象,可以明显观察到显微硬度的增长。经过300℃退火后,Ni-Mn镀层显微硬度增长到了640 HV,较未退火时提高了约15%;添加BEO的Ni-Mn镀层的硬度受退火处理的影响更大,硬度增加了近17%。说明锰和BEO的加入不仅有利于其抵抗退火软化现象,还能进一步增加显微硬度。根据文献,Ni-Mn镀层退火硬化现象可以归因于退火导致晶粒内部位错密度降低或孪晶强化作用^[26,28-30]。而BEO的添加有助于孪晶形成,因此也对退火硬化现象有帮助^[31-32]。

2.3 微钻实验结果

2.3.1 钻进时效

对3种钻头的钻进时间和对应进尺绘制的钻进时效曲线如图4所示。从图4可以发现纯Ni钻头的钻进时效相对平稳,一直保持在4 m/h左右。Ni-Mn钻头 and 添加BEO的Ni-Mn钻头随着钻进时间和进尺的增加,钻进时效出现下滑。Ni-Mn钻头在第32回次时钻进时效下降到1.4 m/h。添加BEO的Ni-Mn钻头在23回次前,钻进时效都基本略高于Ni-Mn钻头,23回次后,钻进时效突然下降到0.64 m/h。

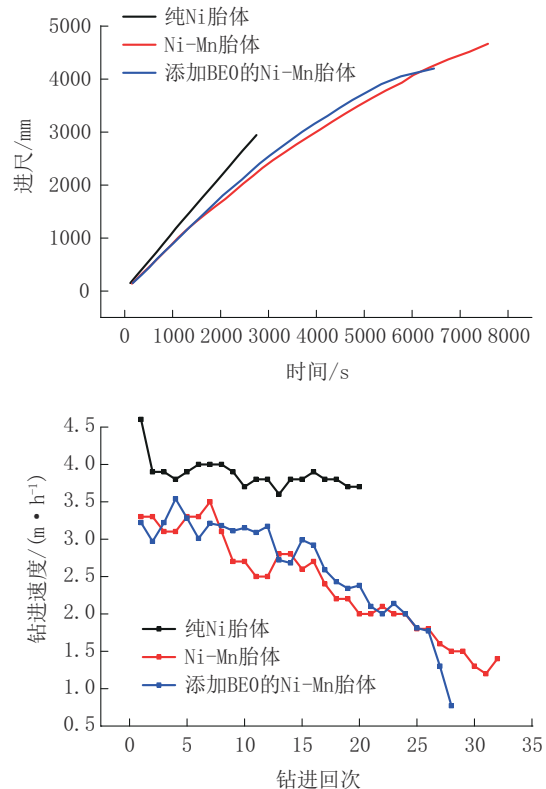


图4 钻进时效曲线

Fig.4 Drilling efficiency

2.3.2 钻头寿命

在电镀金刚石钻头的钻进过程中,金刚石的破碎掉落和出刃是一个连续的过程,并不会出现一层金刚石完全脱落后,下一层金刚石才出刃的情况。因此,当唇面出现较多的脱落坑同时下层金刚石开始出刃时,钻头的累计进尺可以看作是这一层金刚石的寿命。本文3种钻头的单层金刚石的使用寿命如表2所示。退火后的纯Ni钻头一层金刚石的使

使用寿命最短,只有 2.94 m,添加 BEO 的 Ni-Mn 钻头一层金刚石的使用寿命为 4.20 m,而 Ni-Mn 钻头单层金刚石的使用寿命最高,可以达到 4.67 m,约为纯 Ni 钻头的 1.6 倍。

表 2 使用寿命
Table 2 the service life

钻头类别	单层金刚石使用寿命/m
纯 Ni 钻头	2.94
Ni-Mn 钻头	4.67
添加 BEO 的 Ni-Mn 钻头	4.20

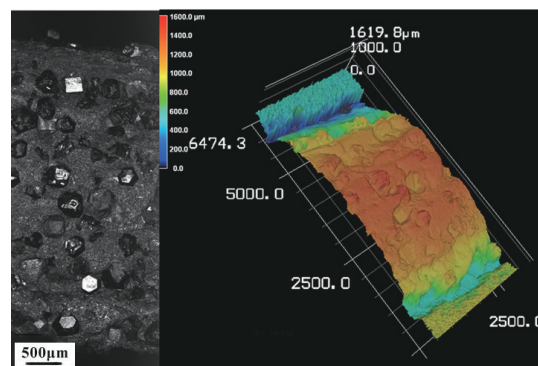
2.3.3 性能分析

为了了解 3 种电镀金刚石钻头性能差异的原因,采用激光共聚焦显微镜观察了钻进后 3 种钻头唇面的磨损形貌(激光图像和高度图像),如图 5 所示。同时对 3 种电镀金刚石钻头的出刃高度进行了测量,在 4 个唇面上各选取 4 个测量点,结果如表 3 所示。

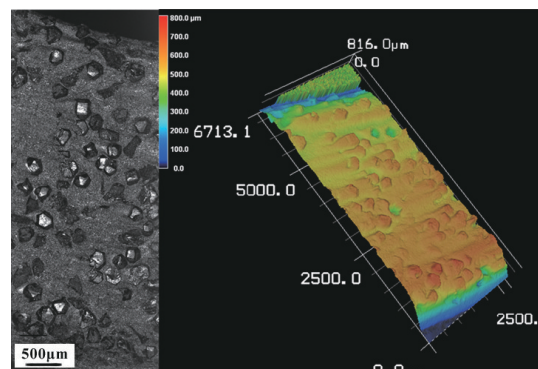
3 种钻头中,纯 Ni 钻头的钻进时效虽然最快,但寿命最短。通过高度图像发现,纯 Ni 钻头的内外保径磨损严重,唇面已经接近弧面,唇面内外侧的金

表 3 金刚石出刃高度
Table 3 Diamond exposure

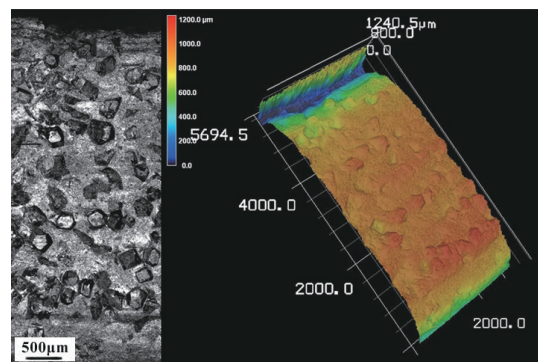
金刚石出刃/ μm	纯 Ni 钻头	Ni-Mn 钻头	添加 BEO 的 Ni-Mn 钻头
底唇面 1	224.20	150.41	92.31
	215.02	139.53	89.83
	180.30	150.03	85.70
	210.02	153.12	104.05
底唇面 2	202.23	146.13	87.93
	220.12	145.20	87.45
	216.30	128.56	107.86
	179.70	120.37	101.72
底唇面 3	235.37	141.13	98.51
	225.20	110.14	107.51
	203.36	127.57	97.02
	236.50	121.36	98.42
底唇面 4	203.24	139.53	98.23
	183.02	135.10	79.13
	209.03	117.05	94.24
	214.30	124.20	106.27
平均出刃	209.87	134.34	96.01



(a) 纯 Ni 胎体



(b) Ni-Mn 胎体



(c) 添加 BEO 的 Ni-Mn 胎体

图 5 三种电镀金刚石钻头的唇面磨损形貌

Fig.5 Wear patterns of the three electroplated diamond bits

刚石也有很多脱落。从金刚石出刃高度也可以看出,纯 Ni 钻头的金刚石出露最多,说明纯 Ni 钻头的胎体磨损最快,已经处于非正常磨损状态。这会导致钻头内外保径的丧失,使得钻头提前失效。普通的纯 Ni 胎体的电镀金刚石钻头由于塑性好且硬度低,钻进类似花岗岩时钻头唇面会出现拉槽现象^[33]。而本文的纯 Ni 钻头出现了内外保径丧失,表明退火后纯 Ni 胎体的耐磨性进一步降低了。此外,根据文献中对金刚石磨损的分类^[34],本文纯 Ni 钻头

中金刚石的失效形式主要是脱落。这也说明退火后镀层的耐磨性太低,它的磨损速度比金刚石的磨损速度大得过多,使得金刚石颗粒出刃过大而脱落。因此,在高温环境中或者冷却不充分的条件下,普通电镀纯Ni金刚石钻头的胎体会发生性能劣化,导致钻头寿命明显降低。

Ni-Mn钻头的使用寿命最高,虽然在钻进过程中钻进时效下降到1.4 m/h,但仍处于正常钻进时效范围,说明Ni-Mn钻头能够在正常钻进时效下实现金刚石的换层,钻头胎体耐磨性与岩石研磨性匹配良好。观察图5(b)Ni-Mn合金钻头的高度图像发现,Ni-Mn合金钻头表面出现了类似蝌蚪状的尾状支撑,金刚石的出露面积也较为正常。Ni-Mn胎体电镀金刚石钻头的金刚石失效形式主要是微观破碎(图6)。这种失效形式表明,所用的钻进规程、金刚石参数、胎体耐磨性相互之间匹配良好。

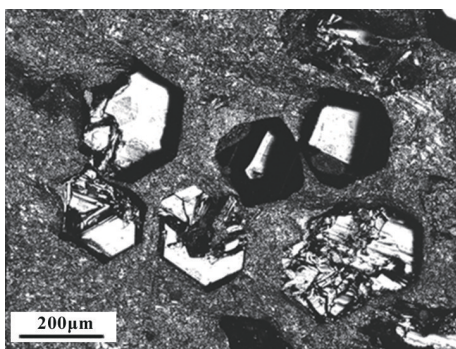


图6 Ni-Mn钻头金刚石微破碎

Fig.6 Micro-fractured diamond grains in Ni-Mn matrix diamond bit

添加BEO的Ni-Mn钻头前期虽然有较高的钻进时效,但后期钻进时效下降到0.64 m/h。从图5(c)的磨损形貌可以发现,唇面上没有塑性犁沟形貌,金刚石出刃高度小,这表明胎体磨损速率过慢。结合该钻头的钻进时效,可以认为添加BEO的Ni-Mn钻头也处于非正常磨损状态,下层金刚石已经无法正常出刃。在本文所用的钻进规程、金刚石参数、岩石研磨性条件下,添加BEO的Ni-Mn钻头胎体退火后硬度过高,耐磨性太好,导致胎体磨损速度过慢,使得金刚石难以出刃。低出刃的金刚石钻进过程中所受的弯矩小,难以发生微观破碎,而是直接被磨钝(图7),从而导致金刚石作用在岩石上的压强下降,切入深度变小而降低钻进时效,甚至

出现打滑现象。

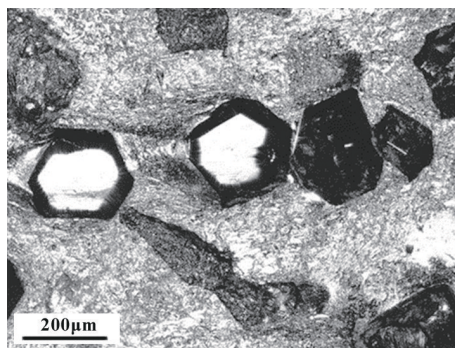


图7 添加BEO的Ni-Mn钻头中被磨钝的金刚石

Fig.7 Wear flat diamond grains in diamond bit of Ni-Mn matrix bit with BEO as additive

总体而言,经过退火处理后,纯Ni胎体的金刚石钻头由于胎体较软,内外径被严重磨损,这不仅导致了本层金刚石工作寿命下降,还会严重影响后续金刚石层的使用。添加BEO的Ni-Mn钻头则由胎体硬度过高,导致胎体磨损较慢,金刚石被磨钝,下层金刚石无法正常出刃。Ni-Mn钻头在退火后,仍然保持较长的钻进寿命,胎体磨损速度与金刚石的磨损相适应,能保持钻头的自锐性。

3 结论

本文主要比较了3种胎体镀层的表面形貌和显微硬度,并对3种钻头的钻进性能进行了比较与分析,得到以下结论:

(1)纯Ni镀层退火后会产生退火软化现象,硬度下降到300 HV;而 MnCl_2 和BEO的加入则使镀层具有退火硬化性能,经300℃退火1 h后硬度分别提高到640 HV和693 HV。

(2)300℃退火1 h后的纯Ni胎体电镀金刚石钻头产生了钻进性能劣化的问题,金刚石过快脱落,钻头寿命只有2.94 m;镀液中添加BEO得到的Ni-Mn胎体电镀金刚石钻头经300℃退火1 h后,由于胎体耐磨性过高,金刚石出刃困难而现出金刚石磨钝问题;Ni-Mn胎体电镀金刚石钻头在300℃退火1 h后,兼有合适的钻进寿命和钻进效率,钻头寿命可以达到4.67 m。

(3)随着热稳定性问题的解决,电镀金刚石钻头在深孔钻进中有望发挥重要作用。

参考文献(References):

- [1] 王安建,高蕊蕊.中国能源与重要矿产资源需求展望[J].中国科学院院刊,2020,35(3):338-344.
WANG Anjian, GAO Xinrui. China's energy and important mineral resources demand perspective [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(3): 338-344.
- [2] 文博杰,陈毓川,王高尚,等.2035年中国能源与矿产资源需求展望[J].中国工程科学,2019,21(1):68-73.
WEN Bojie, CHEN Yuchuan, WANG Gaoshang, et al. China's demand for energy and mineral resources by 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 68-73.
- [3] 薛倩冰,梁楠,韩丽丽,等.大陆科学钻探工程技术发展动态及趋势分析[J].钻探工程,2021,48(12):1-6.
XUE Qianbing, LIANG Nan, HAN Lili, et al. Development trend of continental scientific drilling technology[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12): 1-6.
- [4] 吴海霞,蔡家品,沈立娜,等.钻井利器故事之“金刚石钻头”[J].钻探工程,2023,50(2):155-158.
WU Haixia, CAI Jiabin, SHEN Lina, et al. The story of a drilling weapon—Diamond bit [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 155-158.
- [5] 张金昌,刘秀美.13000 m科学超深井钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):1-6.
ZHANG Jinchang, LIU Xiumei. 13000m Drilling Technology of Super depth Scientific Drilling well [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 1-6.
- [6] 王悦,张凯,李其州,等.超高速下单粒金刚石与岩石相互作用响应的研究[J].钻探工程,2023,50(3):21-29.
WANG Yue, ZHANG Kai, LI Qizhou, et al. Research on the response of single diamond particles and rock interaction at ultra-high speed [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 21-29.
- [7] 段隆臣,孙武成,王志明,等.孕镶金刚石钻头磨损研究现状与发展趋势[J].地质科技通报,2024,43(3):200-217.
DUAN Longchen, SUN Wucheng, WANG Zhiming, et al. Research status and development trend on wear of impregnated diamond bits [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 200-217.
- [8] 王稳石,隆东,闫家,等.松科2井二开大口径同径取心钻进技术[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2015:749-754.
WANG Wenshi, LONG Dong, YAN Jia, et al. Technology of large diameter core-drilling in Songke 2 well [C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Eighteenth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 749-754.
- [9] 朱永宜,王稳石,松科一井(主井)取心钻进工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(9):1-5.
ZHU Yongyi, WANG Wenshi. Coring drilling technology in Well-1 (main shaft) of Songliao Scientific Drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(9): 1-5.
- [10] 王星星,李帅,龙伟民,等.电化学方法制备金刚石工具的胎体材料性能研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2019,39(4):14-21.
WANG Xingxing, LI Shuai, LONG Weimin, et al. Research on matrix material property of diamond tool with electrochemical preparation method [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(4): 14-21.
- [11] 吴颖.电镀金刚石工具的应用现状及改进研究[J].热加工工艺,2015,44(18):18-21.
WU Ying. Application status and improved research of electroplated diamond tools [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 44(18): 18-21.
- [12] Klement U, Erb U, El-Sherik A M, et al. Thermal stability of nanocrystalline Ni [J]. Materials Science and Engineering: A, 1995, 203(1-2): 177-186.
- [13] Srivastava M, Grips V W, Rajam K S. Electrodeposition of Ni-Co composites containing nano-CeO₂ and their structure, properties [J]. Applied Surface Science, 2010, 257(3): 717-722.
- [14] Thuvander M, Abraham M, Cerezo A, et al. Thermal stability of electrodeposited nanocrystalline nickel and iron-nickel alloys [J]. Materials science and technology, 2001, 17(8): 961-970.
- [15] 邹长春,王成善,彭诚,等.中国大陆科学深钻发展的若干思考与建议[J].现代地质,2023,37(1):1-14.
ZOU Changchun, WANG Chengshan, PENG Cheng, et al. Development of the Chinese continental scientific deep drilling: Perspectives and suggestions [J]. Geoscience, 2023, 37(1): 1-14.
- [16] 刘晓阳,李博.地浸砂岩型铀矿钻探现状及提高钻探效率的技术措施[J].钻探工程,2021,48(1):35-41.
LIU Xiaoyang, LI Bo. Current status of in-situ leachable sandstone-type uranium drilling and technical measures of improving drilling efficiency [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 35-41.
- [17] 杨展,谭松成,方小红,等.提高烧结压力对孕镶金刚石钻头性能的影响研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(6):194-199.
YANG Zhan, TAN Songcheng, FANG Xiaohong, et al. Effects of increasing sintering pressure on the performance of impregnated diamond bit [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 194-199.
- [18] 李芑.硬岩钻进用预合金粉末金刚石钻头胎体性能的研究[D].长春:吉林大学,2019.
LI Peng. study on properties of prealloyed diamond bit matrix for hard rock drilling [D]. Changchun: Jinlin University, 2019.
- [19] Zhu Z, Li X, Zhu D. Mechanical electrodeposition of Ni-Mn alloy [J]. Materials and manufacturing processes, 2013, 28(12): 1301-1304.
- [20] Talin A A, Marquis E A, Goods S H, et al. Thermal stability of Ni-Mn electrodeposits [J]. Acta materialia, 2006, 54(7): 1935-1947.
- [21] Goods S H, Kelly J J, Yang N. Electrodeposited nickel-manganese: An alloy for microsystem applications [J]. Microsystem Technologies, 2004, 10: 498-505.
- [22] McCormack A G, Pomeroy M J, Cunnane V J. Microstructural development and surface characterization of electrodeposited

- nickel/yttria composite coatings [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2003, 150(5): C356.
- [23] Meng G, Li Y, Shao Y, et al. Effect of microstructures on corrosion behavior of nickel coatings: (I) Abnormal grain size effect on corrosion behavior [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(12): 1186-1192.
- [24] 李彭瑞, 任春江, 章军云, 等. 电镀参数对电镀镍层性能的影响 [J]. 电镀与精饰, 2022, 44(2): 26-29.
- LI Pengrui, REN Chunjiang, ZHANG Junyun, et al. Effect of electroplating parameters on the performance of electroplating nickel layer [J]. Plating & Finishing, 2022, 44(2): 26-29.
- [25] Li T, Wei X, Chen Y, et al. Electrodeposition of nanocrystalline cobalt from sulfate baths containing butynediol ethoxylate [J]. Materials Chemistry and Physics, 2024, 314: 128927.
- [26] Yang X, Liu S, Wei X, et al. Effects of annealing on the structure and microhardness of nanocrystalline Ni-Mn electrodeposits [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 960: 170732.
- [27] 卢柯, 刘学东, 胡壮麒. 纳米晶体材料的 Hall-Petch 关系 [J]. 材料研究学报, 1994, 8(5): 385-391.
- LU Ke, LIU Xuedong, HU Zhuangqi. The Hall-Petch relation in nanocrystalline materials [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1994, 8(5): 385-391.
- [28] Lu K, Lu L, Suresh S. Strengthening materials by engineering coherent internal boundaries at the nanoscale [J]. Science, 2009, 324(5925): 349-352.
- [29] Rohatgi A, Vecchio K S, Gray G T. The influence of stacking fault energy on the mechanical behavior of Cu and Cu-Al alloys: Deformation twinning, work hardening, and dynamic recovery [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32: 135-145.
- [30] Lehockey E M, Palumbo G, Lin P. Improving the weldability and service performance of nickel-and iron-based superalloys by grain boundary engineering [J]. Metallurgical and materials transactions a, 1998, 29: 3069-3079.
- [31] 韦秀洁, 陈宇湘, 杨雪嘉, 等. 丁炔二醇乙氧基化合物对镍锰镀层的影响 [J]. 电镀与精饰, 2024, 46(6): 42-47.
- WEI Xiujie, CHEN Yuxiang, YANG Xuejia, et al. Effect of butynediol ethoxylate on Ni-Mn coating [J]. Plating and Finishing, 2024, 46(6): 42-47.
- [32] Alimadadi H, Fanta A B, Somers M A, et al. Crystallographic orientations and twinning of electrodeposited nickel—A study with complementary characterization methods [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 254: 207-216.
- [33] 张艺媛. 电镀金刚石钻头胎体性能及钻头钻进性能定量研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- ZHANG Yiyuan. Quantitative study on the matrix materials properties and drilling performances of electroplated diamond bit [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [34] 石昆山. 孕镶人造金刚石钻头磨损机理的模拟试验研究 [J]. 探矿工程, 1988(5): 10-15.
- SHI Kunshan. Research on simulation test of wear mechanism of impregnated artificial diamond bit [J]. Exploration Engineering, 1988(5): 10-15.

(编辑 王文)