

低温氮、磁化综合处理钻头使用性能提高的 X 射线和电子显微技术分析研究

汤凤林, ЧИХОТКИН В.Ф., 段隆臣, 潘秉锁, 谭松成

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:在地质钻探和石油钻井中,钻头都是非常重要的钻进工具。其技术特性,特别是硬度和耐磨性与钻探的技术经济指标,即与机械钻速、钻头进尺和每米钻探成本直接相关。为了提高钻头的工作性能,俄罗斯南方国立技术大学提出了综合低温淬火、磁化回火处理钻头的方法。经过综合处理后,钻头体、复合片底座和钎焊层的硬度分别提高了 30%、3% 和 22%。野外钻进试验结果表明,经过低温液态氮和磁化综合处理的与未经综合处理的钻头相比,每次试验钻头进尺都有提高,总体上钻头进尺提高了 22.2%,取得了很好的钻进效果。并对取得的效果进行了 X 射线和显微技术分析。

关键词:地质钻探;石油钻井;钻头;使用性能;低温磁化处理;X 射线和显微技术

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)04-0080-08

Analytical research on X-ray diffraction and electronic microscopic technology used for improving working abilities of bit, treated integratively by cryogenic nitrogen and magnetization

TANG Fenglin, CHIKHOTKIN V.F., DUAN Longchen, PAN Bingsuo, TAN Songcheng

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

Abstract: In geological drilling and petroleum drilling, the bit is a very important drilling tool. Its technical characteristics, particularly its hardness and wear-resistance, is related directly to drilling technical and economical index, i.e. penetration rate, bit footage and drilling cost per meter. In order to improve performance of the bit, South Russian State Technical University has proposed and tested cryogenic nitrogen and magnetization integrative treatment method for the bit. The hardness of the bit body, base of PDC and the solder layer were improved by 30%, 3% and 22% respectively. The field testing results show that the penetration rates of the bit with the treatment of cryogenic nitrogen and magnetization were improved than those of the normal one in each test, and the penetration rate of this type bit increased by overall 22.2%, achieving good results. Meanwhile, the obtained results were analyzed with X-ray diffraction and electronic microscopic technology.

Key words: geological drilling; petroleum drilling; drill bit; performance; cryogenic nitrogen and magnetization treatment; X-ray diffraction and electronic microscopic technology

1 概述

在地质钻探中,特别是在硬岩钻进中,金刚石钻

进是一种主要的钻进方法。金刚石复合片(PDC)的研发成功,使得在石油天然气钻井和地质钻探中,

收稿日期:2019-02-02; 修回日期:2019-03-22 DOI:10.12143/j.tkge.2019.04.014

基金项目:国家自然科学基金面上项目“基于张力环试验的热压钻头 WC-Cu 基胎体对金刚石把持力的定量研究”(编号:41672364,2017-2020)

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,fltang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林, ЧИХОТКИН В.Ф., 段隆臣,等.低温氮、磁化综合处理钻头使用性能提高的 X 射线和电子显微技术分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):80-87.

TANG Fenglin, CHIKHOTKIN V.F., DUAN Longchen, et al. Analytical research on X-ray diffraction and electronic microscopic technology used for improving working abilities of bit, treated integratively by cryogenic nitrogen and magnetization[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):80-87.

PDC 钻头得到了很大的发展。金刚石钻进和 PDC 钻头钻进对我国国民经济建设做出了很大的贡献,美国、俄罗斯也是如此^[1-5]。

地质钻探和石油天然气钻井中,其技术经济指标与钻头使用性能有直接关系。钻头使用性能直接影响到机械钻速、钻头进尺和每米钻探成本,因此钻头性能,特别是钻头的强度(硬度)和耐磨性是非常重要的技术问题。

俄罗斯南方国立技术大学石油天然气钻井和地球物理教研室的教授们对此进行了深入的研究,提出了提高钻头性能的分类法。该分类法表明,提高钻头使用性能可以有多种方法,在单一处理方法中,可以使用热能方法、高温处理方法、淬火退火回火方法、低温处理方法、恒低温处理方法、中子辐射方法等,但是试验结果表明,恒低温处理方法效果更好。在综合处理方法中,恒低温、磁化综合方法较好。俄罗斯南方国立技术大学纳米技术和公用技术实验室对这种钻头低温、磁化处理结果用 X 射线衍射和电子显微镜技术进行了分析^[6-19]。

2 钻头低温氮、磁化综合处理

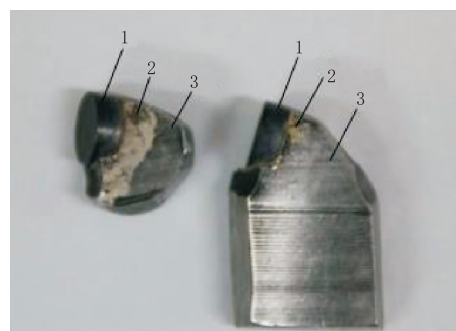
这种方法系指把室内 20 °C 左右的钻头放入 -196 °C 的低温液态氮中,经过 15 min,取出后恢复到 20 °C,然后在 3200~4000 奥斯特(磁场强度单位,1 奥斯特=79.6 A/m)的永久磁铁磁场中对其进行磁化处理 15 min,取出后供研究和钻探使用。此综合方法亦可称之为低温淬火、磁化回火的处理

方法。此种处理方法已经获得了俄罗斯发明专利,专利号为 RU2566523^[12]。

俄罗斯南方国立技术大学石油天然气钻井和地球物理教研室的教授们利用自己研制的钻头对此方法进行了试验研究^[14]。

2.1 钻头硬度测试

为了测量钻头硬度,从钻头上切割下来一块带有 PDC 的扇形块(见图 1),在室温下置入低温液态氮中 15 min,提出来,室内停留 15 min,下入强度为 320 kA/m 的磁场中进行磁化处理。取出后进行测量^[14]。



1—复合片;2—钎焊层 ПСР-45;3—钻头体(XГСА 合金钢)

图 1 X 射线分析结构用的钻头扇形块

Fig.1 Segments of the drill bit for X-ray analysis

钻头体合金钢 XГСА:Cr-1.5%,Fe-97.9%,C-0.3%~0.6%;钎焊层 ПСР-45:Ag-45%,Cu-31%,Zn-20%,Pb-4%。低温处理后,永久磁铁 60 r/min 回转、磁化处理 15 min 条件下得到的钻头硬度结果见表 1^[14]。

表 1 低温、磁化综合处理前、后测量的钻头硬度结果

Table 1 Results of drill bit hardness before and after treatment with cryogenic nitrogen and magnetization

序号	钻头规格及类型	永久磁铁强度/(kA·m ⁻¹)	硬 度 HRA							
			处 理 前				处 理 后			
			钻头体钢材 XГСА	复合片底座 BK-20	钎焊层 ПСР-45	金刚石层	钻头体钢材 XГСА	复合片底座 BK-20	钎焊层 ПСР-45	金刚石层
1	Ø93 mm 复合片	320	58.1	89.0	57.5	96.0	75.6	91.5	70.1	96.0
2	Ø112 mm 复合片	320	58.0	89.0	57.5	96.0	75.6	91.5	70.1	96.0
3	Ø151 mm 复合片	320	58.0	89.0	57.5	96.0	75.5	91.5	70.0	96.0
4	Ø225 mm 复合片	320	58.0	89.0	57.5	96.0	75.1	91.4	70.0	96.0

从表 1 可见,经过综合处理后,钻头体、复合片底座和钎焊层的硬度分别提高了 30%、3%和 22%,而金刚石层的硬度没有变化,未受影响。测量是在俄罗斯南方国立技术大学的纳米技术和新材料测试中心用洛氏硬度计测得的。

2.2 野外钻进对比试验

对经过低温液态氮、磁化综合处理的钻头和未经处理的钻头进行了野外钻进对比试验。试验是采用直径 112 mm 复合片钻头钻进可钻性 7 级砂岩、400 m 深度时进行的。现场采用 СКБ-4 型钻机,НБ-32 型水泵,低固相聚合物冲洗液。钻头对比试验结果见表 2^[12]。

表2 PDC钻头综合处理对比钻进试验结果

Table 2 Comparison of testing results between drill bits with and without comprehensive treatment

钻头编号	钻头类型	液氮处理时间/min	永久磁场作用时间/min	永久磁场强度/(kA·m ⁻¹)	钻头进尺/m	提高百分比/%
1	未经处理钻头				127.2	
2	经过处理钻头	10	10	239	151.9	19.4
3	未经处理钻头				128.1	
4	经过处理钻头	12	12	239	153.2	19.6
5	未经处理钻头				129.7	
6	经过处理钻头	13	13	320	155.1	19.6
7	未经处理钻头				130.0	
8	经过处理钻头	14	14	239	155.6	19.7
9	未经处理钻头				130.1	
10	经过处理钻头	15	15	239	156.0	19.9
11	未经处理钻头				128.2	
12	经过处理钻头	18	16	239	154.2	20.3
13	未经处理钻头				129.1	
14	经过处理钻头	17	17	320	155.2	19.8
15	未经处理钻头				129.6	
16	经过处理钻头	15	15	278	156.3	20.6
17	未经处理钻头				130.3	
18	经过处理钻头	15	15	320	159.7	22.6
19	未经处理钻头				128.0	
20	经过处理钻头	15	15	358	155.0	21.1
21	未经处理钻头				129.8	
22	经过处理钻头	16	16	358	158.3	22.0
23	未经处理钻头				130.1	
24	经过处理钻头	15	15	320	158.1	21.1
25	未经处理钻头				126.0	
26	经过处理钻头	15	15	320	153.9	22.1

表2表明,经过低温液态氮和磁化(磁场强度为239~358 kA/m)综合处理与未经综合处理的钻头相比,每次试验钻头进尺都有提高,总体上使钻头进尺提高了22.2%,其中第18号试验提高了22.6%,说明这种综合处理方法是有效的^[14]。

3 钻头性能提高的X射线和电子显微技术分析研究

俄罗斯南方国立技术大学纳米技术和高新技术研究室利用X射线衍射技术和电子显微分析技术对钻头性能提高的机理进行了分析研究。

3.1 概述

金属X射线衍射技术与电子显微分析技术是材料科学的重要研究方法,是材料微观组织分析和晶体结构分析的重要手段。X射线衍射仪(X-ray Powder Diffractometer 简称为XPD)是利用衍射原理,通过对材料进行X射线衍射,分析其衍射图谱,获得

材料的成分、材料内部原子或分子的结构或形态等信息的研究手段。英国物理学家布拉格(Bragg W.L.)提出了产生衍射的条件——布拉格方程: $2d \sin\theta = n\lambda$,式中 λ 为X射线的波长, d 为晶面距离, θ 为入射线与晶面的夹角, n 为任何正整数(见图2)^[20]。

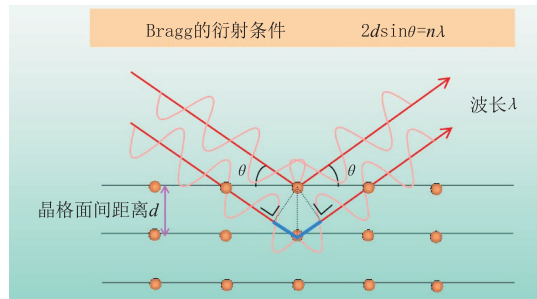


图2 X射线衍射条件示意图
Fig.2 Diagram of X-ray diffraction conditions

X射线的波长和晶体内部原子面之间的间距相近,一束X射线照射到物体上时,受到物体中原子的散射,每个原子都产生散射波,这些波互相干涉,其结果是产生衍射。衍射波叠加的结果,使射线的强度在某些方向上加强,在其他方向上减弱。分析衍射结果可以获得晶体的结构。用已知波长的X射线来测量 θ 角,从而计算出晶面间距 d ,这用于X射线结构的分析;另一个是应用已知 d 的晶体来测量 θ 角,从而计算出特征X射线的波长,进而在已有资料里查出试样中所含的元素。

在衍射谱上可以得到3个物理量:衍射峰的位置(2θ)、衍射峰的强度 I (每秒的电脉冲次数,cps)及其与入射线、晶面间的夹角(2θ),即 $2d \sin\theta = n\lambda$ 。

对于晶体材料,当待测晶体与入射束成不同角度时,那些满足布拉格衍射的晶面就会被检测出来,体现在XRD图谱上就有具有不同衍射强度的衍射峰。对于非晶体材料,其XRD图谱为一些漫散射的馒头峰(见图3)^[21]。

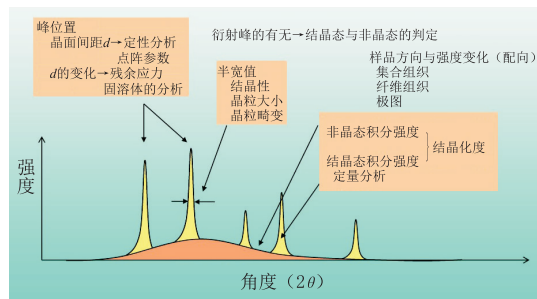


图3 多晶X射线衍射图谱示意图
Fig.3 Diagram of polycrystalline X-ray diffraction atlas

X 射线多晶衍射仪也称为 X 射线粉末衍射仪,主要是用来测定样品的物相组成,它是依据粉末衍射文件(PDF)数据库,通过与数据库中的衍射图谱进行比对来鉴定某个晶态物相是否存在或估计其含量的多少。

X 射线衍射仪示意图见图 4。

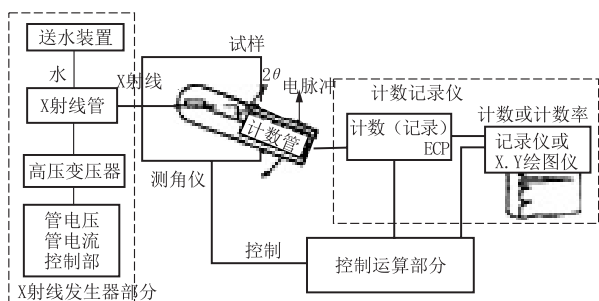


图 4 X 射线衍射仪示意图

Fig.4 Diagram of X-ray diffractometer

3.2 研究使用的设备

俄罗斯南方国立技术大学研究分析钻头使用的设备见表 3^[14]。

3.3 分析研究结果

X 射线衍射仪使用的是 ThermoScientific 公司生产的 ARL XTRA 衍射仪,所用的 X 射线管是铜阳极(铜线 K_{a1} 和 K_{a2} , 波长 $\lambda_1 = 1.540562 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 1.544390 \text{ \AA}$),冷却系统是别尔奇耶(Пельтье),角度记录范围为 $2\theta = 10^\circ \sim 100^\circ$ 。扫描方式是步长式,步长为 0.04° 。完成时间为 1 s。

3.3.1 复合片 X 射线衍射相对强度 $I(\text{cps})$ 与电子能量 eV (e 为电子电荷, V 为通过两极时的电压降)的关系

测试了 2 个没有经过综合处理的复合片样品 a (直径 16 mm) 和 b (直径 18 mm) 的 X 射线衍射相对

表 3 研究钻头所用的设备

Table 3 Equipment for drill bit research

序号	设备名称	生产国家	测量手段性能	功用
1	扫描电子显微镜 Quanta 200	荷兰	分辨能力 3.5 nm; 加速电压 0.2~30 kV; 放大倍数 50~100000 倍; 测量范围 0.01~1000 μm ; 许用误差范围 $\pm 0.1 \mu\text{m}$;	用来研究半导体、金属和非金属的表面形态
2	X 射线散射荧光谱仪 ARL QUANTX	美国	管阳极 Rh/加 Ag; 最大辐射功率 50 W; 强度 4~50 kV, 步长 1 kV; 探测器类型 Si(Li); 选择性: 7 个过滤管 + 直接激发; 最大计数速度 100000 脉冲/s; 最优计数速度 100000 脉冲/s; 灵敏度范围 0.0001%~100%; 8 h 期间内辐射稳定性 0.25%	对任何形状、大小和组成的固体和液体样品从钠(Na)到铀(U)进行定性和定量分析
3	粉晶 X 射线衍射仪 APL XTRA	美国	辐射源—铜极 X 射线管; $(\text{CuK}_{a1}/\text{K}_{a2}) \mu = 1.541/1.544 \text{ \AA}$; 管功率 2200 W; 扫描步长 0.04° ; 集成时间 1.0 s	多功能 X 射线衍射器可以解决 X 射线相分析和 X 射线结构分析

强度 $I(\text{cps})$ 与电子能量 eV (e 为电子电荷, V 为通过两极时的电压降)的关系, 见图 5 和图 6^[14]。

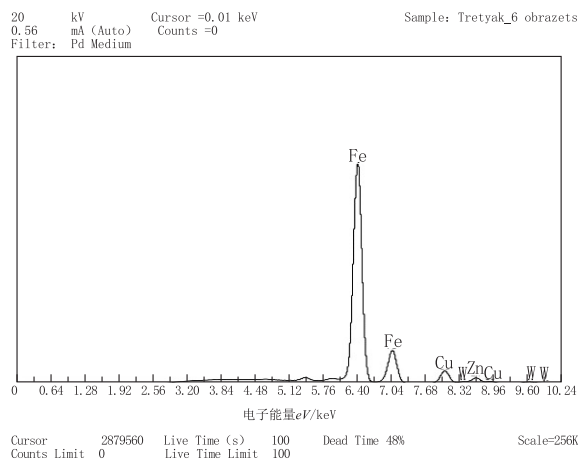


图 5 直径 16 mm 复合片 X 射线衍射相对强度 $I(\text{cps})$ 与电子能量 eV 的关系图

Fig.5 Relationship between X-ray diffraction relative intensity $I(\text{cps})$ and electron energy eV of PDC with diameter of 16 mm

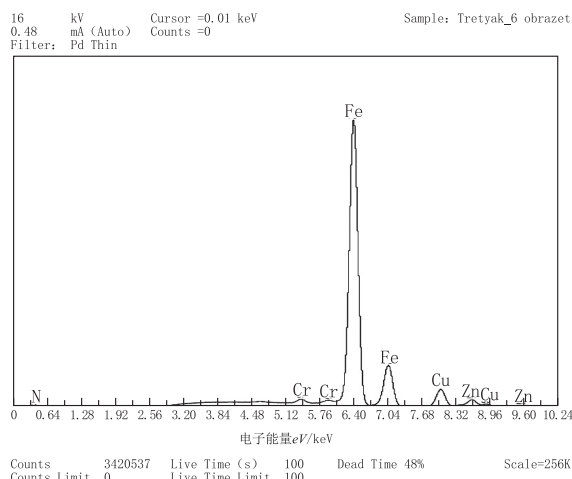


图 6 直径 18 mm 复合片 X 射线衍射相对强度 $I(\text{cps})$ 与电子能量 eV 的关系图

Fig.6 Relationship between X-ray diffraction relative intensity $I(\text{cps})$ and electron energy eV of PDC with diameter of 18 mm

从图 5 和图 6 可见, 未经过综合处理的这两个复合片的胎体组成基本相同, 如果按照相对强度峰

值的不同进行比较的话,则其差别不大。这个差别可以说明这两个样品的机械状态不同(晶格同位素变形)。这两个样品的含有的物相为 $CrNi_3$ (与标准样本图片 010-71-7595 相符)和 $Mo(C_{0.5}N_{0.5})$ (与标准样本图片 010-71-6030 相符)^[14]。

3.3.2 复合片综合处理前后的变化

复合片 X 射线结构分析是用扫描电子显微镜 QUANTA-200 进行的。复合片样品综合处理前、后的变化情况见图 7 和图 8^[14]。

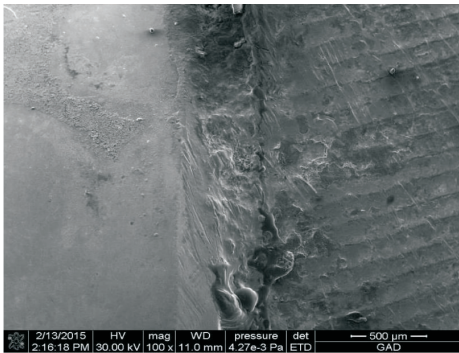


图 7 复合片样品综合处理前的图像

Fig.7 Image of PDC samples before comprehensive treatment

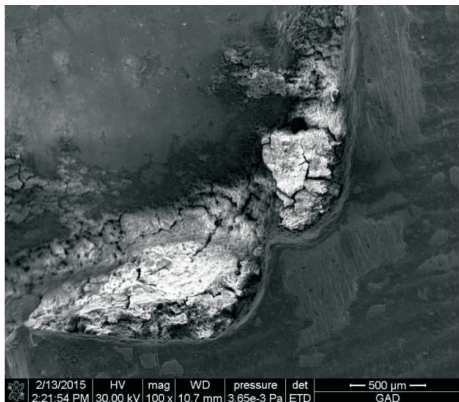


图 8 复合片样品综合处理后的图像

Fig.8 Image of PDC samples after comprehensive treatment

比较图 7 和图 8 可见,综合处理后,钴或其它粘结剂在碳化物包裹体边界上的塑性变形形成了表面硬化,而且 WC 和 Co 热膨胀系数不同,致使硬合金和复合材料的细晶结果发生变化,所以在钻头复合片表面上形成一个高硬度、高耐磨性、高抗腐蚀性、高接触韧性和高抗弯疲劳强度的一层。同时,已经确定,在此情况下没有发现金刚石层有脱离现象,钎焊层也保持完好。

应该指出的是,低温处理产生的冷(热)冲击给钻头材料应力状态也带来了变化,主要是因为低温

处理时形成了压应力。由于有这个压应力的存在,复合片在嵌镶窝中的固定,不仅是由于其连接力,而且周围金属的压持力也起了作用,所以钻头的强度和耐磨性提高了,钻头的技术经济指标改善了。

用 QUANTA 电子显微镜对钎焊层 X 射线结构分析结果表明,采用低温、磁化综合方法时,合金中的微裂隙成长速度降低了,似乎微裂隙发生了“磁渗碳”,所以复合片在钻头体上固定的质量也提高了。

3.3.3 复合片金刚石层、钎焊层和钨钴底座部分的变化

从原子物理学得知,X 射线谱的产生与阳极物质的原子结构紧密相关。原子系统内的电子是按泡利不相容原理和能量最低原理分布于各个能级上的。各能级中电子运动的能级是不连续的,按其能量大小分为 K、L、M、N 等层,K 层最靠近原子核,能量最低,依次是 L、M、N 等。在电子束轰击阳极的过程中,当某个具有足够能量的电子将阳极靶原子的内层电子击出时,则在低能级上出现空位,原子系统能量因此提高,处于激发状态。这种激发状态是不稳定的,于是便有较高能级上的电子向低能级上的空位跃迁,使原子系统的能量重新降低而趋于稳定^[20]。

X 射线谱的激发和辐射,可以用原子能级图(见图 9)来描述。如图 9 所示,沿纵坐标方向的箭头表示原子被激发时系统能量的提高和辐射时系统能量降低的情况。当 K 层电子被击出时,原子系统的能量由基态升高到 K 激发态,称为 K 系激发。随后,

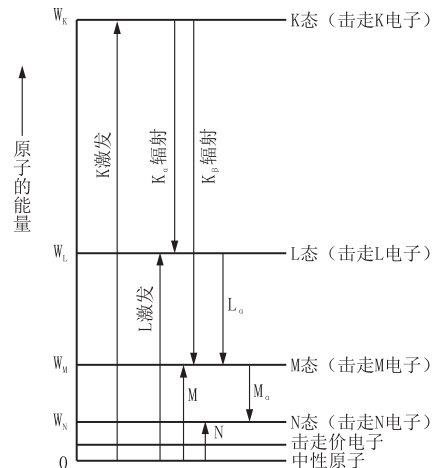


图 9 原子的能级示意图

Fig.9 Diagram of atomic energy level

K 层空位被高能级电子填充,此时产生的辐射称为 K 系辐射。在 K 系辐射中,当 K 层的空位被 L 层的电子填充时,空位从 K 层转移到 L 层,则受击原子从 K 激发态转为 L 激发态,产生 K_{α} 辐射。当 K 层的空位被 M 层的电子填充时,空位从 K 层转移到 M 层,则受击原子从 K 激发态转为 M 激发态,产生 K_{β} 辐射。L、M、N 等系的激发辐射过程与 K 系情况类似^[20]。

从原子能级(图 9)可以看出, K_{β} 的光子能量大于 K_{α} 的能量。但是光子能量与波长成反比,所以, K_{β} 的波长小于 K_{α} 的波长。因为 K 层与 L 层是相邻的能级,K 层空位被 L 层电子填充的概率大大高于被 M 层电子填充的概率,所以 K_{α} 的强度比 K_{β} 的大得多。因此,尽管 K_{β} 辐射的光子能量大于 K_{α}

的能量,但是产生的光子的数量却很少。所以,就光子的能量与其数目的乘积(这个乘积决定强度)而言, K_{β} 要比 K_{α} 小得多, K_{α} 的强度约为 K_{β} 的 5 倍^[22]。

复合片金刚石层、钎焊层和钨钴底座部分的 X 射线衍射相对强度 $I(\text{cps})$ 与电子能量 eV 的关系见图 10^[14]。

从图 10 可见,按照相对强度峰值的大小,测区附近的元素依次是 Ag、Cu、Zn、W、Sn 和 Fe。Ag 的体积百分比 $V_t = 43.88\%$,质量百分比 $W_t = 36.62\%$;Cu 的 $V_t = 20.78\%$, $W_t = 29.44\%$;Zn 的 $V_t = 13.87\%$, $W_t = 19.10\%$;W 的 $V_t = 11.06\%$, $W_t = 5.41\%$ 。而且 Ag、W、Sn 的能级都比较高,是 L 层,即 AgL、WL、SnL(见图 10),是比较稳定的。

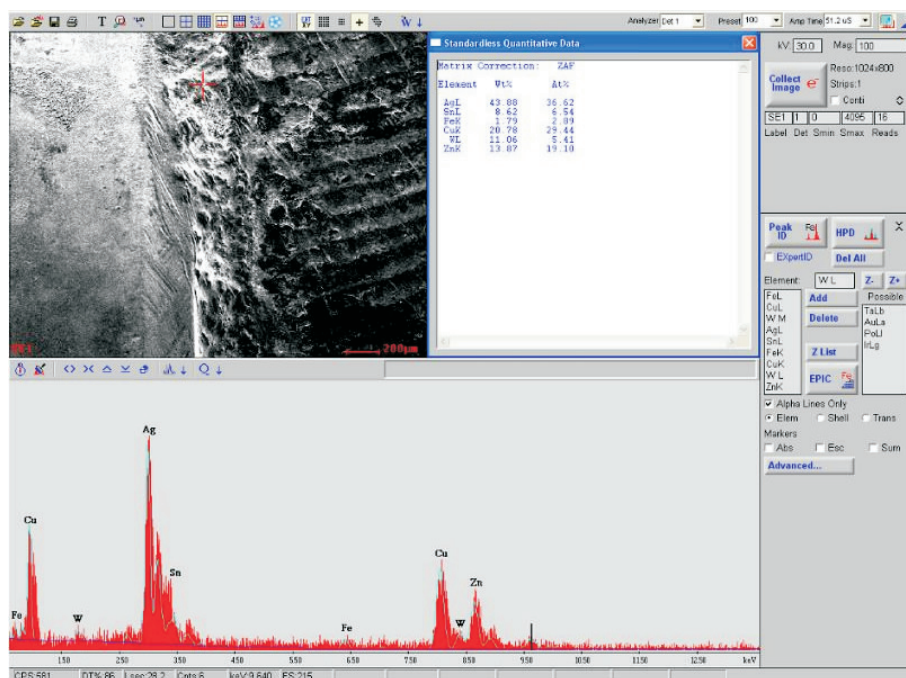


图 10 复合片金刚石层、钎焊层和钨钴底座 X 射线衍射相对强度 $I(\text{cps})$ 与电子能量 eV 的关系图
Fig.10 Relationship between X-ray diffraction relative intensity $I(\text{cps})$ and electron energy eV of diamond layer, solder layer and tungsten cobalt base of PDC

钨钴底座部分 X 射线衍射相对强度 $I(\text{cps})$ 与电子能量 eV 的关系见图 11^[14]。

从图 11 可见,复合片钨钴底座中,CrK 的质量百分比为 1.56%,体积百分比为 1.58%;钨钴底座中主要是 FeK,其质量百分比为 95.03%,体积百分比为 97.54%,而且其中有 FeL 存在,说明其是比较稳定的。应该指出的是,钻头磁化处理时,钻头上有

4 个永久磁铁,每转一圈有两次磁化(充磁和去磁)过程。在磁化过程中,电动力学的力将使钻头结构晶体更加密集有序,降低了其内应力,使其结构变得最优,犹如经受了“螺旋式压缩”。这是由于钻头在磁场中移动时,在磁场方向上循环的微电子产生的磁矩呈定向排列所致,因而钻头强度(硬度)和耐磨性更加提高了,钻探技术经济指标更加改善了。

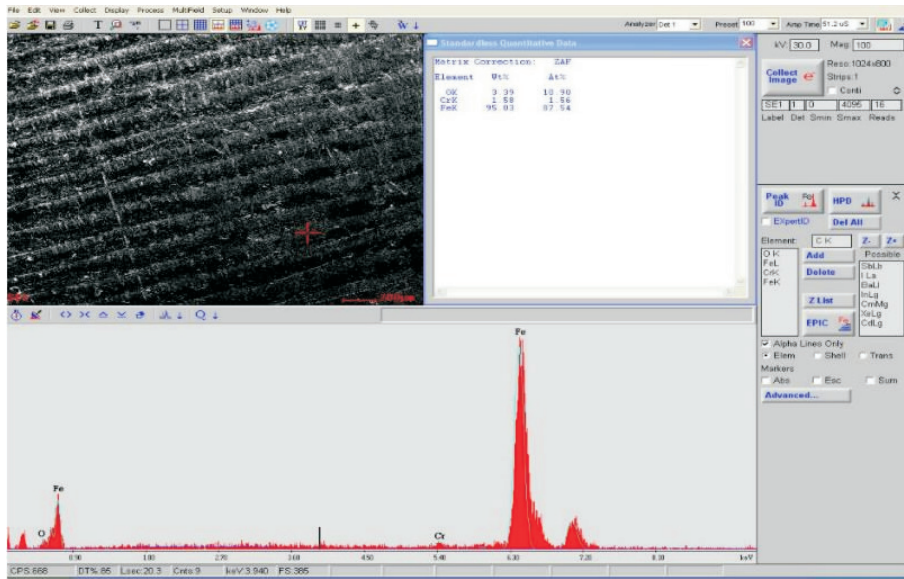


图 11 复合片钨钴底座部分的 X 射线衍射相对强度 I (cps) 与电子能量 eV 的关系图

Fig.11 Relationship between X - ray diffraction relative intensity I (cps) and electron energy eV of PDC tungsten cobalt base

4 结论与建议

(1)在地质钻探和石油钻井中,金刚石钻头和 PDC 复合片钻头都是孔底破碎岩石的主要钻进工具,其使用性能直接影响钻进效果及其技术经济指标。目前,我国钻探生产单位和钻头制造单位,在钻头生产后和钻探过程中,一般都不再进行任何处理,运到钻探机台上就要准备使用,而且使用很“狠”,很想多打进尺,直到不能再使用、报废为止。虽然一个钻头的价格不算很贵,但是由于使用钻头的数量巨大,所以,这种由于金刚石未能充分发挥作用、钻头使用不够合理造成的损失和浪费是非常大的。我们不应支持这种无意义的损失和浪费,建议在钻头使用前,对钻头进行适当处理,以便进一步提高钻头的使用性能,提高钻探的技术经济指标。

(2)俄罗斯钻探工作者提出了对钻头进行处理的分类表,其中包括一些单一的处理方法和综合的处理方法。在综合处理方法中,对低温氮气和磁化的综合处理方法进行了试验研究。试验结果表明,钻头进尺的提高是比较稳定的,均在 20% 以上,这是难能可贵的,证明这种综合处理方法的试验是成功的,可用的。建议我国钻头生产单位和钻探生产单位,对此综合处理方法进行试验研究,以确定其可靠性和推广价值。

(3)金属 X 射线衍射技术与电子显微分析技术是材料科学的重要研究方法,是材料微观组织分析

和晶体结构分析的重要手段。X 射线衍射仪是利用衍射原理,通过对材料进行 X 射线衍射,分析其衍射图谱,获得材料的成分、材料内部原子或分子的结构或形态等信息的研究手段,主要是用来测定样品的物相组成。它是依据粉末衍射文件(PDF),通过与数据库中的衍射图谱进行比对来鉴定某个晶态物相是否存在或估计其含量是多少的。

俄罗斯南方国立技术大学纳米技术和高新技术研究室利用 X 射线衍射技术和电子显微分析技术对钻头性能提高的机理进行了分析研究,取得了很好的效果。进行这种分析研究,不仅可以从宏观上对经过综合处理的钻头胎体金属和金刚石进行结构和形态进行分析,而且还可以从微观上对其进行分析,有利于我们深入了解这种综合处理方法提高钻头性能和钻探技术经济指标的机理和缘由,值得借鉴,应该引起我们的注意。建议我国有关单位利用这种方法原理进行试验研究、推广使用,以提高钻头的使用性能和钻探的技术经济效果。

参考文献(References):

- [1] 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.
ZHU Hengying, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and application of diamond bit for deep geological drilling[M]. Wuhan Hubei: China University of Geosciences Press, 2014.
- [2] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.

- ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep core drilling technology and management[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [3] 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.
- DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and manufacture of diamond tools [M]. Wuhan Hubei: China University of Geosciences Press, 2012.
- [4] 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.
- TANG Fenglin, CHIKHOTKIN V.F., PENG Li, et al. Experimental research on matrix hardness of impregnated diamond bit[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(9): 65—71.
- [5] 汤凤林, 彭莉, Чихоткин В.Ф., 等. 关于提高金刚石钻头胎体耐磨性的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(1): 7—13.
- TANG Fenglin, PENG Li, CHIKHOTKIN V.F., et al. Experimental research on matrix wear resistance (matrix hardness) of impregnated diamond bit[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(1): 7—13.
- [6] Кубасов В.В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента[D]. Московский государственный геологоразведочный университет, 2015.
- [7] Г. П. Богатырева и др. Оценка перспективности структурирования металломатричных алмазных буровых коронок наноалмазами[C]. Сборник научных трудов, Киев, 2011: 97—102.
- [8] Скоромных В.В. и др. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных породах [J]. Известия Томского политехнического университета, 2015, 326(4): 30—40.
- [9] Кубасов В.В., Будюков Ю.Е., Спиринов В.И. Повышение работоспособности алмазных коронок криогенной обработки[C]. Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов V III научно-технической конференции Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2013.: 45—50.
- [10] Будюков Ю.Е., Кубасов В.В., Спиринов В.И. Характер износа алмазной коронки[C]. Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов V III научно-технической конференции Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2015.: 89—92.
- [11] Кубасов В.В. Исследование износа алмазных коронок[J]. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-аналитический журнал), 2015, 4: 6—11.
- [12] Третьяк А.А., Савенок О.В., Литкевич Ю.Ф. и др. Способ упрочнения буровых коронок, армированныхх АТП: Россия, RU2566523[P]. 2014—01—20.
- [13] Третьяк А.А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами[D]. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2017.
- [14] Третьяк А.А. Разработка современных конструкций коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами и технология их использования[D]. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2012.
- [15] Третьяк А.А. и др. Определение рациональных значений рабочих углов армирующих элементов буровых коронок режущего типа [J]. Nftegaz, 2016, (10): 29—33.
- [16] Третьяк А.А. и др. Буровые коронки армированные алмазно-твердосплавными пластинами [M]. Новочеркасск: Издательство «Политехник», 2015.
- [17] Третьяк А.А. и др. Конструкция буровых коронок армированных алмазно-твердосплавными пластинами с учетом схемы разрушения забоя скважины[J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на море и суше, 2015, (6): 9—12.
- [18] Кубасов В.В. и др. Новые технологии повышения работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента[J]. «Экономика XXI века. инновации, инвестиции, образование», 2013, (5): 50—53.
- [19] Третьяк А.А. Технология бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами [M]. Издательство «Политехник», Новочеркасск, 2016.
- [20] 李树棠. 金属 X 射线衍射与电子显微分析技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
- LI Shutang. X-ray diffraction and electron microscopic analysis of metals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985.
- [21] 晋勇, 孙小松, 薛纪. X 射线衍射分析技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- JIN Yong, SUN Xiaosong, XUE Qi. X-ray diffraction analysis technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [22] 杨福家. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- YANG Fujia. Atomic physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.

(编辑 王建华)