

安全高效钻探用梯度结构金刚石复合片制备技术研究

邵众望^{1,2}, 张绍和^{1,2*}, 荣令龙^{1,2*}, 孔祥旺^{1,2}, 李俞露^{1,2}

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083)

摘要:在油气钻井、深部地层钻探中,聚晶金刚石钻头有着广泛的应用。聚晶金刚石复合片(PDC)由聚晶金刚石层与硬质合金基体所组成。由于聚晶金刚石层与硬质合金基体的热膨胀系数等性质差异,PDC在烧结冷却后内部会存在巨大的残余应力。为降低PDC内部的残余应力,本文提出了一种梯度结构金刚石复合片的制备技术。通过以熔融沉积成型加烧结的工艺方法,确定了梯度结构金刚石复合片的制备技术路线;对制备出的梯度结构金刚石复合片的微观形貌及残余应力的分布情况特征等进行分析;进行室内钻进试验验证了梯度结构金刚石复合片的钻进性能。结果表明,熔丝制造工艺制备的梯度结构金刚石复合片在聚晶金刚石层和梯度层界面处存在1.4 GPa的压应力,显著提高了层间结合能力,相比常规复合片钻进效率提升约36%且使用寿命更长。

关键词:熔丝制造工艺;梯度结构;金刚石复合片;残余应力;拉曼光谱;PDC钻头;深部钻探

中图分类号:P634.4⁺1;TE921⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)04-0038-08

Research on the preparation technology of gradient structure diamond composite disc for safe and efficient drilling

SHAO Zhongwang^{1,2}, ZHANG Shaohe^{1,2*}, RONG Linglong^{1,2*}, KONG Xiangwang^{1,2}, LI Yulu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring

(Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: Polycrystalline diamond bits have the widest application in oil and gas drilling and deep formation drilling. Polycrystalline diamond compact (PDC) consists of a polycrystalline diamond layer and a cemented carbide substrate. Due to the difference in the coefficient of thermal expansion between the polycrystalline diamond layer and the tungsten carbide matrix, there is a huge residual stress inside the PDC after sintering and cooling. To solve the problem of reducing the residual stresses inside the PDC, this paper reports a preparation technology for gradient structure diamond compact. Through the process of fused deposition modelling and sintering (FDMS), the technical route for the preparation of gradient structure diamond compact was determined; the micro-morphological features of the prepared gradient structure diamond compact and the distribution of the residual stresses were analysed; and the indoor drilling tests were carried out to verify the drilling performance of the gradient structure diamond compact. The results

收稿日期:2024-05-07; 修回日期:2024-07-07 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.04.006

基金项目:国家自然科学基金面上项目“钻进坚硬岩层的梯度结构PDC应力调控机制与3D打印制备技术研究”(编号:42372358);国家重点研发计划项目“金刚石超硬复合材料制品增材制造技术与应用研究”(编号:2021YFB3701800);湖南省自然科学基金面上项目“基于岩石压入-刻划强度定量表征的钻头参数设计智能化研究”(编号:2022JJ30709)

第一作者:邵众望,男,汉族,2001年生,在读硕士研究生,地质资源与地质工程专业,主要从事3D打印金刚石工具方面的研究工作,湖南省长沙市岳麓区中南大学北校区,18404970690@163.com。

通信作者:张绍和,男,汉族,1967年生,教授,博士生导师,探矿工程专业,博士,长期从事金刚石工具和地质工程的研究和教学工作,湖南省长沙市岳麓区中南大学北校区,zhangshaohe@163.com。

荣令龙,男,汉族,2000年生,博士研究生,地质资源与地质工程专业,主要从事3D打印金刚石工具方面的研究工作,湖南省长沙市岳麓区中南大学北校区,ronglinglong0922@163.com。

引用格式:邵众望,张绍和,荣令龙,等.安全高效钻探用梯度结构金刚石复合片制备技术研究[J].钻探工程,2024,51(4):38-45.

SHAO Zhongwang, ZHANG Shaohe, RONG Linglong, et al. Research on the preparation technology of gradient structure diamond composite disc for safe and efficient drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):38-45.

show that the gradient structure diamond compact prepared by the FDMS has a compressive stress of 1.4GPa at the interface between the polycrystalline diamond layer and the gradient layer, which significantly improves the interlayer bonding ability and effectively reduces the internal residual stress, and improves the drilling efficiency by about 36% and the service life is longer compared with that of the conventional compact.

Key words: fused filament fabrication; gradient structure; diamond compact; residual stress; Raman spectroscopy; PDC bits; deep drilling

0 引言

随着深地深海钻探技术的进步,地球深部资源,尤其是如天然气、页岩气、干热岩等新兴能源领域的开采将迎来井喷式发展时期,这必然会进一步带动用于勘探、钻井钻头上的核心部件之一的金刚石复合片需求量^[1-4]。金刚石复合片钻头与孕镶金刚石钻头、牙轮钻头相比,由于具有碎岩效果好、机械钻速高、寿命长等特点,已经在软—中硬地层得到了广泛的应用^[5-7]。然而,在面对高温、高压、高地应力等复杂地层时,超过70%的钻头是由于金刚石复合片出现了断裂、磨损和脱落而失效^[8-10],这在一定程度上增加了钻井成本、技术难度和安全隐患。因此,为了保障深井钻探中钻头的高效与长寿命,研制安全高效耐用的金刚石复合片成了关键。

金刚石复合片是由聚晶金刚石层和硬质合金基底(衬底)在高温高压条件(1300~2000℃, 5~7 GPa)下复合而成的超硬复合材料^[11]。在烧结过程中,金刚石粉末被烧结到碳化钨基体上,钻从中渗透到金刚石晶粒中,作为金刚石晶粒结合的溶剂催化剂^[12]。随着减压和冷却的过程,由于聚晶金刚石层与硬质合金基体的热膨胀系数等物性参数相差较大,两种材料以不同的速率进行收缩,产生了严重的残余应力^[13],导致二者之间的结合力不强。残余应力的存在使聚晶金刚石层容易开裂或者脱落,致使复合片失去切削能力而失效,这也是目前复合片最常见的非正常失效情形^[14]。因此,如何有效降低金刚石复合片内部的残余应力是制备高性能金刚石复合片所亟待解决的问题。为了降低金刚石复合片内的残余应力,目前研究学者主要从结构和材料组成方面进行研究。Johnson等^[15]研发了锯齿界面结构金刚石复合片,这种锯齿形结构能够有效分散界面应力的作用,提升金刚石复合片的强度。全斐斐等^[16]、王彩利等^[17]均采用路易斯酸-氯化铁-盐酸对复合片进行了脱钴处理,发现随着脱钴深度的增加,复合片的耐磨性和热稳定性得到了显著的

增强。Deng等^[18]研究发现复合片在经过不同的酸处理后,其热稳定性和抗弯强度得到了显著的提高,这主要与Co的脱除深度有关。此外,有学者提出在硬质合金衬底与金刚石层之间设置功能梯度材料层,即设计制作梯度结构金刚石复合片。功能梯度材料(FGM)是指通过连续改变两种材料的组分和结构,使材料的性质和功能沿厚度方向上呈梯度变化,达到缓和内部应力的目的^[19]。贾志宏等^[20]利用粉末层铺法制备了梯度金刚石复合片,通过具有层状结构的过渡层改善了层间界面的结合状况,提高了复合片的热稳定性。根据研究,金刚石复合片结合界面残余应力的大小与梯度结构渐变层数密切相关,更多的渐变层数可更大幅度降低金刚石复合片内部的残余应力^[21-22]。但是,由于金刚石复合片的传统制备工艺存在布料精度不足、制备过程控制不精准等局限性,梯度结构复合片的研制往往具有层数较少(层数少于4)、层厚较大的特点,因而亟需研究一种高精度、可实现结构定制、制造效率高的技术来实现梯度结构金刚石复合片的制备。

随着增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术的发展,越来越多种功能梯度材料通过AM方法制备出来,这为梯度结构金刚石复合片的制备提供了充分的研发基础。比如Wang等^[23]成功利用激光熔覆技术(LAM)实现了SiCp/Ti6Al4V的梯度材料涂附在基板上,并成功验证了缓和残余应力的作用。此外,国内张绍和团队利用熔融沉积成型加烧结(Fused deposition modelling and sintering, FDM-MS)工艺技术成功制备了多种性能优良、结构复杂的金属基金刚石工具^[24-25]。熔丝制造技术是一种丝材挤出式的熔融沉积成型技术,通过层层堆叠打印形成固体零件。区别于依赖高能束的3D打印技术,熔丝制造打印技术由于打印温度低,并不会对金刚石带来热损伤,而且具有设备成本低、稳定性好的特点,便于大规模的工业生产制造,成了制备梯度结构金刚石复合片的最佳选择。

本文提出了梯度结构金刚石复合片的熔丝制造工艺制备技术。通过以熔融沉积成型加烧结的工艺方法,确定了梯度结构金刚石复合片的制备技术路线;利用扫描电镜、拉曼光谱等测试方法对制备出的梯度结构金刚石复合片的形貌特征、内部微观结构特征及残余应力的分布情况特征等进行分析;进行室内钻探实验对制备的梯度结构金刚石复合片的实际钻进性能完成检验,验证了梯度结构金刚石复合片的钻进性能。这些工作为梯度结构金刚石复合片的生产制备与推广应用奠定了基础。

1 梯度结构金刚石复合片制备技术

1.1 技术路线

梯度结构金刚石复合片的制备技术,以熔丝制造工艺为核心,主要分为前期的成型工艺和后处理工艺,技术路线示意如图1和图2所示。

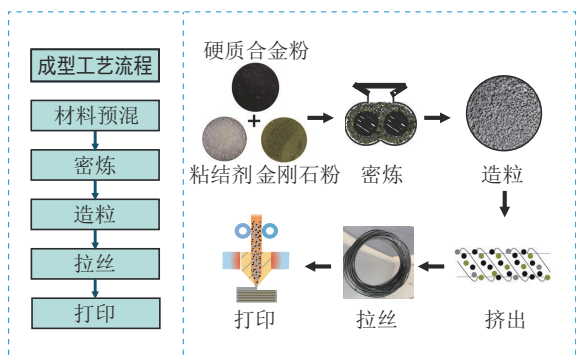


图1 梯度结构金刚石复合片的成型工艺流程

Fig.1 Gradient-structured diamond compact moulding process

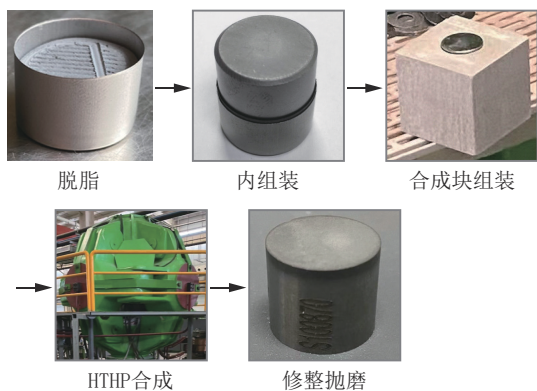


图2 梯度结构金刚石复合片的后处理工艺流程

Fig.2 Post-treatment process flow of gradient-structured diamond compact

熔丝制造技术制备梯度结构金刚石复合片的具体流程包括:(1)将硬质合金粉末、金刚石粉料与专用粘结剂充分混合,然后将混合料置于密炼设备中进行密炼形成均匀分布的状态,使其具备一定可流动性。(2)密炼结束后取出密炼料放入单螺杆挤出造粒机中,在螺杆的挤压作用下挤出并切割造粒。(3)随后将粒度相对均一的颗粒料依次放入拉丝机中挤出丝材。(4)将丝材放入FDM打印机中,丝材由送丝齿轮传送至挤出喷嘴,熔融后的丝料从喷嘴挤出后通过层层堆叠的形式沉积在打印平台上,最终打印出梯度结构金刚石复合片各结构层生坯。(5)打印完成后将生坯按顺序装入坩埚,再放入高温真空气氛炉脱脂处理。(6)脱脂完成后,将硬质合金基体与生坯组装成合成块,在六面顶压机中进行合成,最终通过修磨得到梯度结构金刚石复合片。

1.2 实验材料

研究中用于制备梯度结构金刚石复合片的材料主要包括硬质合金粉末、金刚石微粉以及专用粘结剂。其中硬质合金粉末是由87%WC粉末和13%Co粉末组成,简称为YG13,是复合片中硬质合金基体常用的配方。相关材料的基本性能见表1。

表1 金刚石复合片材料基本性能

Table 1 Basic properties of diamond composite sheet materials

材料名称	粒度/ μm	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
WC	<4	15.63
Co	<2	8.90
金刚石	20~30	3.52

根据以往研究基础^[26],综合力学性能及制造工艺两方面要求,设计梯度结构复合片中含8层梯度层,梯度结构金刚石复合片的尺寸则按照常规复合片的尺寸进行设计。梯度层的材料组成见表2。

1.3 测试方法

1.3.1 微观形貌表征

使用扫描电镜对梯度结构金刚石复合片的截面形貌进行观察,目的是对梯度层中金刚石微粒的分布进行表征,可以直观地判断梯度结构金刚石复合片的合成质量。

1.3.2 拉曼光谱测试

制备的复合片样品经切割和表面抛光,选用净

表 2 梯度层材料组成

Table 2 Gradient layer material composition

代号	高度/mm	结构层	材料组成	
			粉末(体积分数 50%)	粘结剂(体积分数 50%)
D0	11.2	硬质合金基体	100% YG13	
D5	0.2	梯度层	95% YG13	5% 金刚石微粉
D10	0.2		90% YG13	10% 金刚石微粉
D15	0.2		85% YG13	15% 金刚石微粉
D20	0.2		80% YG13	20% 金刚石微粉
D30	0.2		70% YG13	30% 金刚石微粉
D40	0.2		60% YG13	40% 金刚石微粉
D60	0.2		40% YG13	60% 金刚石微粉
D80	0.2		20% YG13	80% 金刚石微粉
D100	1.0	聚晶金刚石层	100% 金刚石	

化后的金刚石表面,通过微区 Raman 光谱对其残余应力进行表征。微区 Raman 光谱是在一激光共焦拉曼光谱仪上进行的。其中各测试条件为:扫描范围 50~4000 cm⁻¹、波长 532 nm、光斑扫描直径 5 μm、测试深度 2 μm、激光能量 12 mW、曝光时间 1 s。

拉曼光谱与固体分子的振动相关,通过测量不同位置因应力而造成的拉曼光谱位移大小及方向来计算材料内部的残余应力大小及种类,其应力值与峰值偏移成正比。通过建立应力模型,Raman 测试已经能够较好的表征金刚石膜的残余应力问题^[27],残余应力形式及数值计算如下(σ 结果正值表示为压应力, σ 负值表现为拉应力):

$$\sigma=(\gamma_0-\gamma)/2.88 \tag{1}$$

式中: σ ——残余应力; γ_0 ——无应力下金刚石的 Raman 峰频率值,1332 cm⁻¹; γ ——被测梯度层中金刚石的 Raman 峰频率值。

1.3.3 力学性能测试

为评估梯度结构金刚石复合片的力学性能,进行了抗冲击韧性测试、弯曲强度测试和努氏硬度测试。冲击韧性是指材料在冲击载荷作用下吸收塑性变形功和断裂功的能力,反映材料内部的细微缺陷和抗冲击性能。弯曲强度是指材料在弯曲负荷作用下破裂或达到规定弯矩时能承受的最大应力,此应力为弯曲时的最大正应力。它反映了材料抗弯曲的能力,用来衡量材料的弯曲性能。努氏硬度与显微维氏硬度试验一样,使用较小的力以特殊形状的压头进行试验,测量压痕对角线求得硬度值。

所有测试均按检测标准执行。

1.3.4 室内微钻试验

室内微钻试验是为了对利用上述工艺制备出的梯度结构金刚石复合片进行实际钻进性能的评估。试验在如图 3 所示的岩石取心钻床上进行,试验前设定相应的转速以及钻压。该机器主轴的转动和进给由两个独立电机控制,转速和进给速度分别通过设置参数和调节旋钮开关来控制,适合微型钻头垂直钻进及振动小的试验要求。



图 3 微钻试验平台

Fig.3 Micro drilling platform

2 梯度结构金刚石复合片性能检测

2.1 结构扫描分析

图 4 展示了采用扫描电子显微镜拍摄梯度结构金刚石复合片的剖面图像。图 4(a)、(b)展示了合

成后的梯度结构金刚石复合片及其剖面,图中可以看出通过上述制备技术合成出的梯度结构金刚石复合片结构完整。同时,在复合片的外表面及剖切面上未出现明显的裂纹及脱层现象,这表明熔丝制造技术具有良好的合成效果。图4(c)展示了梯度结构金刚石复合片剖面的形貌特征,其中黑色部分代表的是金刚石颗粒。金刚石由硬质合金层上方开始出现,上层材料中的金刚石含量明显增加,可以看出明显的材料渐变现象。各梯度层界面间结合良好,没有出现裂纹和缺陷。此外,靠近上方的各梯度层的层间结构比较清晰,下方的各梯度层结构则比较模糊,难以区分它们之间的分界面。由表2可知,靠近聚晶金刚石层侧的梯度层的金刚石含量较高且变化较大,靠近硬质合金侧的梯度层的金刚石含量较低且变化程度较少,因此梯度层的层间分界面具有上述特征。图4(d)中展示的是聚晶金刚石层中的形貌特征,其中亮白色且呈断续网格状分布的是粘结相Co。聚晶金刚石层是复合片最重要的工作结构,它的合成质量至关重要。图中可以看出金刚石颗粒之间未出现明显的孔洞与裂隙,金刚石颗粒间形成了大量的D-D键合,其结合强度要显著高于D-M-D键^[28]

图5对比展示了常规结构复合片与梯度结构金

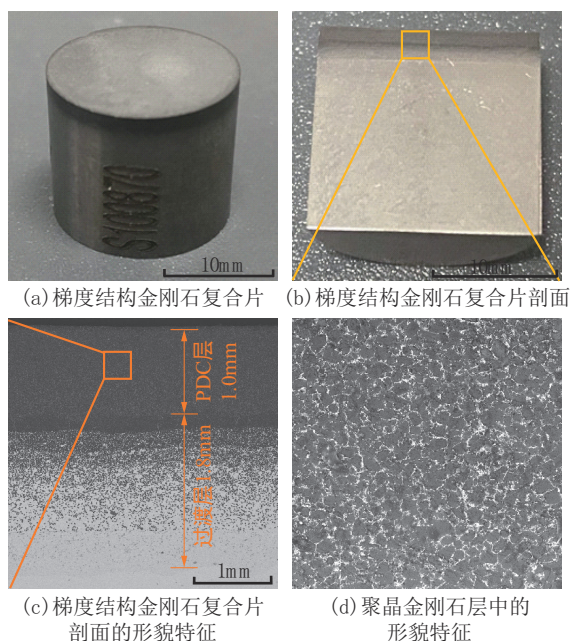


图4 梯度结构金刚石复合片样品及微观结构特征

Fig. 4 Samples of gradient-structured diamond compact and microstructural features

刚石复合片界面处的微观结构特征。图5(a)中可以看出常规复合片材料分界面处存在明显的材料分界,聚晶金刚石层与硬质合金基体直接连接。而在梯度结构金刚石复合片中,性质差异巨大的两种材料通过梯度层相连接,梯度层的材料组成渐变过渡到聚晶金刚石层。同时,在聚晶金刚石层和硬质合金基体附近的分界面处的材料也有着很好的烧结质量,未发现裂纹及其它显著的缺陷。

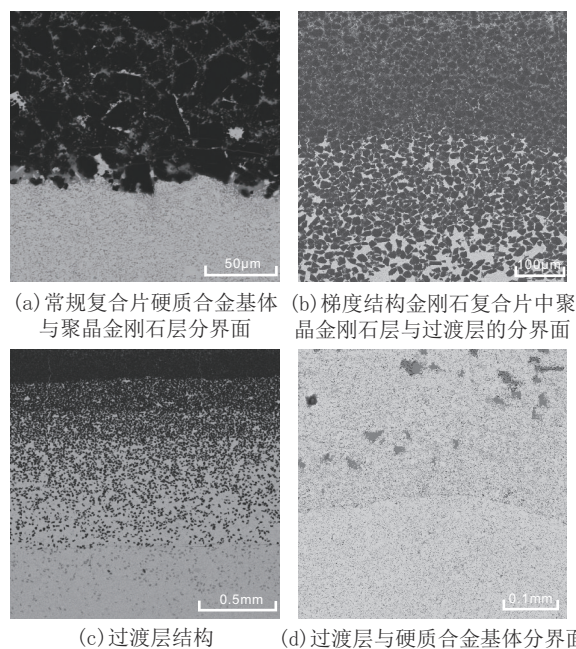


图5 不同分界面的微观结构特征

Fig.5 Microstructural features of different interfaces

2.2 力学性能检测

为进一步验证熔丝制造工艺制备的梯度结构金刚石复合片的性能,对在同一条件下合成的5组复合片,进行抗冲击韧性、弯曲强度和努氏硬度检测,性能测试结果如表3所示。从表中数据可知,梯度结构金刚石复合片的抗冲击韧性达到了11 J/cm²,弯曲强度达到了1.455 GPa,努氏硬度达到了37.3 GPa(努氏硬度不是太高,可能由于聚晶层中含有钴元素对硬度测量产生了干扰)。梯度结构金刚石复合片的这些基本性能已优于市场上大部分常规复合片。

2.3 残余应力检测

通过拉曼光谱法测定了梯度结构金刚石复合片侧面各点的拉曼光谱,各检测点位如图6所示。根据公式(1)可对各检测点的残余应力进行计算。

表3 梯度结构金刚石复合片的性能指标
Table 3 Performance indexes of gradient-structured diamond composite wafers

性能指标	检测结果	检测标准
抗冲击韧性/(J·cm ⁻²)	11	GB/T 3851—2015
弯曲强度/GPa	1.455	GB/T 1817—2017
努氏硬度/GPa	37.3	GB/T 18449.1—2009

通过对常规金刚石复合片中硬质合金基体与聚晶金刚石分界面处进行拉曼检测,发现其分界面处的特征拉曼峰偏移幅度较大,经计算其残余应力值达到了0.809 GPa,表明分界面附近存在有较大的拉应力。这种拉伸应力极易产生裂纹,造成金刚石层和硬质合金衬底之间的破裂或分层,这也是金刚石复合片钻头在钻井过程中最严重的破坏失效模式^[29]。

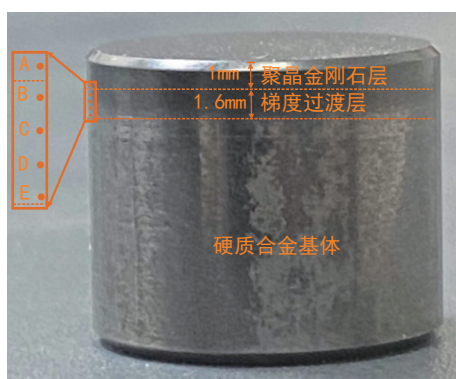


图6 梯度结构金刚石复合片检测点位示意

Fig.6 Schematic diagram of inspection points of gradient structure diamond composite sheet

图7为梯度结构金刚石复合片沿轴向所测各点的拉曼光谱值及计算得到的残余应力值。从图中可以看出,在聚晶金刚石层与梯度层分界面的A点处的应力值达到了-1.402 GPa,而常规复合片分界面处表现为极大的拉应力,这说明梯度结构的存在有效地降低了分界面处的残余应力,还出现了非常大的压应力。梯度层中B、C、D、E四点的拉曼峰基本一致,对应的残余应力值均为-0.299 GPa,均为压应力。这种压应力可以有效地阻止在烧结和制造过程中新微裂纹的形成和现有微裂纹的扩展^[29]。以上结果说明梯度层的存在能够有效缓解聚晶金刚石层与硬质合金基体之间的残余拉应力。

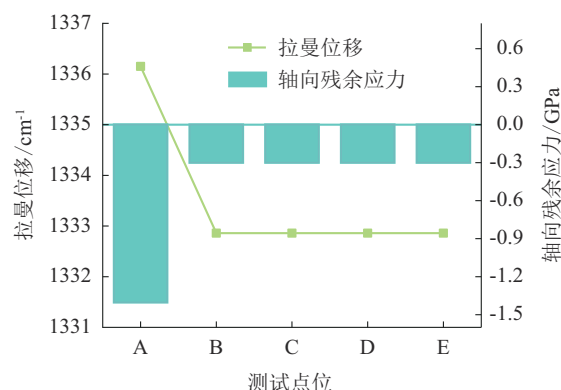


图7 梯度结构金刚石复合片侧面沿轴向所测各点的拉曼峰位及其对应的残余应力

Fig.7 Raman peak positions and their corresponding residual stresses at the points measured along the axial direction on the side of a gradient-structured diamond compact

3 室内钻进试验

为了进一步验证梯度结构复合片的实钻效果,以13.44 mm×4 mm的PDC切削齿为例,将通过熔丝制造工艺制备的梯度结构金刚石复合片切削齿钎焊到两翼型微钻头体上(如图8所示)。通过室内微钻试验设备,选用岩样为广西耀阳黑大理石,钻进压力均保持在3.5~4.0 kN,每组准备3个样品进行测试,平均测试结果如表4所示。



图8 梯度结构金刚石复合片锚杆钻头

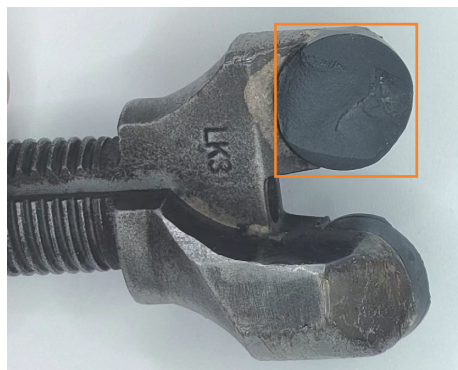
Fig.8 Gradient structure diamond composite anchor bit

表4 微钻试验结果

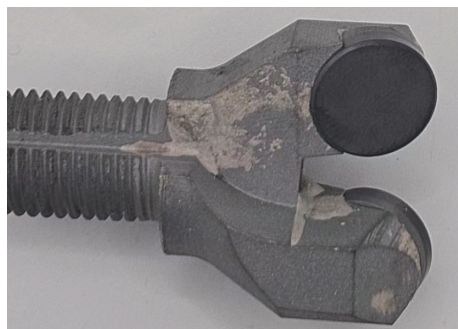
Table 4 Microdrilling test results

复合片	总钻深/ mm	总用时/ s	钻进效率/ (mm·s ⁻¹)	备注
常规复合片	1800	1221	1.47	崩片
梯度结构复合片	1972	982	2.01	可用

测试结果表明,梯度结构金刚石复合片的平均钻进效率高于常规复合片(钻进效率提升36%),且未出现崩片现象。钻进测试后的钻头如图9所示。从图9中可以看出,经过钻进后的梯度结构金刚石复合片钻头未见明显的损坏,而常规复合片钻头则出现了崩片损坏现象,寿命明显低于梯度结构金刚石复合片。



(a) 常规复合片钻头(崩片)



(b) 梯度结构金刚石复合片钻头

图9 钻进后钻头照片

Fig.9 Photographs of drill bits after drilling

4 结论

(1)本研究通过熔丝制造工艺流程进行了梯度结构金刚石复合片的制备。结果表明,通过工艺熔丝制造工艺能够成功制备出梯度结构金刚石复合片成品。

(2)通过微观结构表征发现,梯度结构金刚石复合片内部具有明显的梯度过渡结构层,能够实现从硬质合金基体到聚晶金刚石层的过渡。

(3)通过拉曼光谱检测残余应力发现,在梯度层与聚晶金刚石层的界面处存在1.4 GPa的压应力,表明梯度过渡层能够有效增强复合片的结合效果。

(4)通过室内微钻试验发现,梯度结构金刚石

复合片相比常规复合片钻进效率提升约36%。实验表明梯度结构金刚石复合片具有钻进效率高、稳定性好、寿命长等优点。

参考文献(References):

- [1] 刘畅. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. 新华社, 2021-3-13.
LIU Chang. Outline of the Fourteenth Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of the People's Republic of China and Vision 2035[EB/OL]. Xinhua News Agency, 2021-3-13.
- [2] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [3] 陈朝然. 坚硬地层钻探用复合超硬材料(PDC)研制及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
CHEN Chaoran. Development and performance research of polycrystalline diamond compact for hard rock drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [4] 方啸虎, 崔祥仁, 谢德龙. 近年来钻探用超硬材料的发展与展望[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 18-24.
FANG Xiaohu, CUI Xiangren, XIE Delong. Development and prospect of the super hard materials applied to the drilling industry in recent years[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 18-24.
- [5] 杨金华, 郭晓霞. PDC钻头技术发展现状与展望[J]. 石油科技论坛, 2018, 37(1): 33-38.
YANG Jinhua, GUO Xiaoxia. The present status and outlook of PDC bit technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2018, 37(1): 33-38.
- [6] 陈新海. 巴彦河套新区异形齿PDC钻头研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 127-135.
CHEN Xinhai. Research and application of special-shaped tooth PDC bits in Bayanhetao New Area[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 127-135.
- [7] 冯云春. 龙凤山气田火山岩地层个性化PDC钻头设计与应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 94-101.
FENG Yunchun. Design and application of personalized PDC bit for volcanic rock formation in Longfengshan Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 94-101.
- [8] 高明洋, 张凯, 周琴, 等. 高温硬地层钻进中PDC钻头切削齿磨损研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10): 185-189.
GAO Mingyang, ZHANG Kai, ZHOU Qin, et al. Wear of PDC cutters in high temperature hard formation drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10): 185-189.
- [9] 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В. В., 等. 新型耐磨损ONYX切削具制作的PDC钻头[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 111-117.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Neskormnyh V. V., et al. PDC drill bit made of new wear-resisting cutting elements ONYX[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 111-117.
- [10] 荣准, 杨学军, 张航, 等. 五宝场硬塑性地层斧形曲面PDC齿

- 破岩性能研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 85-93.
- RONG Zhun, YANG Xuejun, ZHANG Hang, et al. Study on the rock breaking performance of axe-shape cambered PDC cutters in the hard plastic formation in Wubaochang[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 85-93.
- [11] Yahiaoui M, Gerbaud L, Paris J Y, et al. A study on PDC drill bits quality[J]. Wear, 2013, 298: 32-41.
- [12] Huang H, Zhao B, Wei W, et al. Effect of cobalt content on the performance of polycrystalline diamond compacts[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 92: 105312.
- [13] Baek M S, Park H S, Lee J, et al. Effect of diamond particle size on the microstructure and wear property of high pressure high temperature (HPHT) sintered polycrystalline diamond compact (PDC)[J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2017, 55(11): 790-797.
- [14] Zhang F, Lu Y, Xie D, et al. Experimental study on the impact resistance of interface structure to PDC cutting tooth[J]. Engineering Failure Analysis, 2022: 106503.
- [15] Johnson D. M., Klug F. J. Polycrystalline diamond compact cutter with reduced failure during brazing: U.S. 6042463[P]. 2000-03-28.
- [16] 全斐斐,王海阔,刘俊龙,等. 金刚石复合片脱钴技术研究[J]. 超硬材料工程, 2017, 29(4): 1-7.
- TONG Feifei, WANG Haikuo, LIU Junlong, et al. Research on the method of cobalt removal of polycrystalline diamond compact[J]. Superhard Material Engineering, 2017, 29(4): 1-7.
- [17] 王彩利,刘慧苹,方海江. 聚晶金刚石复合片的室温去钴工艺及耐磨性研究[J]. 超硬材料工程, 2019, 31(2): 30-34.
- WANG Caili, LIU Huiping, FANG Haijiang. A study on Cobalt removal technique and wear resistance of polycrystalline diamond compact at indoor temperature[J]. Superhard Material Engineering, 2019, 31(2): 30-34.
- [18] Deng F., Hao C., Deng W., et al. Effect of different acid corrosion reagents on de-cobalt effect and performance of PDC at room temperature[J]. Diamond and Related Materials, 2020, 106: 107702.
- [19] Swaminathan K, Sangeetha D M. Thermal analysis of FGM plates—A critical review of various modeling techniques and solution methods[J]. Composite Structures, 2017, 160: 43-60.
- [20] 贾志宏,王贵成. 梯度复合片的组织与耐热性[J]. 农业机械学报, 2005(6): 114-116, 137.
- JIA Zhihong, WANG Guicheng. Microstructure and performance of gradient polycrystalline diamond compact[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005(6): 114-116, 137.
- [21] 曹品鲁,刘宝昌,殷琨. 梯度结构聚晶金刚石复合片残余热应力的有限元分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, 33(3): 50-53.
- CAO Pinlu, LIU Baochang, YIN Kun. Finite element analysis of residual thermal stress in functionally graded polycrystalline diamond compact[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006, 33(3): 50-53.
- [22] Rong L, Zhang S, Wu D, et al. Optimization of functionally graded polycrystalline diamond compact based on residual stress: Numerical simulation and experimental verification[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 117: 106414.
- [23] Wang Q, Shi J, Zhang L, et al. Impacts of laser cladding residual stress and material properties of functionally graded layers on titanium alloy sheet[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101303.
- [24] 张绍和,苏舟,刘磊磊,等. SLS和FDMS制造超薄金刚石锯片对比研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(1): 38-43.
- ZHANG Shaohe, SU Zhou, LIU Leilei, et al. Comparative study on ultra-thin diamond saw blades made by SLS and FDMS[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(1): 38-43.
- [25] Su Z., Zhang S.H., Liu L. L., Wu J. J. Microstructure and performance characterization of Co-based diamond composites fabricated via fused deposition molding and sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 871: 159569.
- [26] Rong L, Zhang S, Wu D, et al. Optimization of functionally graded polycrystalline diamond compact based on residual stress: Numerical simulation and experimental verification[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 117: 106414.
- [27] 徐国平,尹志民,陈启武,等. 激光拉曼光谱法测定金刚石复合片残余应力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1310-1314.
- XU Guoping, YIN Zhimin, CHEN Qiwu, et al. Micro-Raman stress of polycrystalline diamond compact[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(4): 1310-1314.
- [28] Yang X., Deng F. Synthesis and characterisation of Ø62mm polycrystalline diamond compact[J]. Diamond and Related Materials, 2019, 100: 107594.
- [29] Catledge S. A., Vohra Y. K., Ladi R., et al. Micro-Raman stress investigations and X-ray diffraction analysis of polycrystalline diamond (PCD) tools[J]. Diamond and related materials, 1996, 5(10): 1159-1165.

(编辑 王文)