

# 电火花加工在聚晶金刚石耐磨带成形中的 工艺适配与效率提升研究

刘长硕<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 王瑜<sup>1,2\*</sup>, 张凯<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083; 2. 矿山钻探救援应急管理部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 针对聚晶金刚石耐磨带类超硬复合材料机械磨削成形时大余量去除效率低、砂轮磨损大等问题, 围绕电火花加工在聚晶金刚石耐磨带成形中的工艺适配与效率提升开展实验研究。区别于放电与机械作用在同一加工区同步进行的复合加工方式, 也不同于采用旋转轮电极完成材料去除的电火花磨削, 本文将电火花加工与机械磨削设置为前后独立工序, 提出电火花粗加工、60目粗磨整形和400目精磨修整分阶段进行余量分配的加工方法。以胎体金属包镶热稳定聚晶金刚石(TSP)块的环形聚晶金刚石耐磨带为对象, 首先分别对胎体包镶材料和TSP材料电火花加工响应进行分析, 再开展复合材料表面电火花加工参数优选, 最后开展耐磨带电火花成形与机械磨削修整, 并与纯机械磨削、纯电火花加工进行工艺对比评价。结果表明: 纯机械磨削表面粗糙度为 $2.63\text{ }\mu\text{m}$ , 但质量去除率仅为 $0.20625\text{ g/h}$ , 加工效率受限; 电火花加工质量去除率可达 $1.23053\text{ g/h}$ , 具有较高去除效率, 虽然加工表面粗糙度为 $16.62\text{ }\mu\text{m}$ , 难以直接满足表面质量要求, 但在机械磨削修整进行小余量去除后, 能使质量去除效率较纯机械磨削提高 $160.2\%$ , 同时将表面粗糙度控制在 $2.92\text{ }\mu\text{m}$ , 接近纯机械磨削水平。研究表明, 电火花加工经参数适配后可有效用于聚晶金刚石耐磨带类超硬复合材料高效率成形, 并可为深井钻杆接头聚晶金刚石耐磨带加工提供工艺参考。

**关键词:** 深井钻探; 钻杆接头; 聚晶金刚石耐磨带; 电火花加工; 磨削成形; 工艺适配; 加工效率

**中图分类号:** P634.4; TE921<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0080-12

## Process adaptability and efficiency enhancement of electrical discharge machining for polycrystalline diamond hardbanding profiling

LIU Changshuo<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Mine Drilling and Rescue, Ministry of Emergency Management, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To address the low bulk stock-removal efficiency and severe grinding-wheel wear encountered during the mechanical grinding and profiling of superhard composites such as polycrystalline diamond (PCD) hardbanding, an experimental study was conducted into the process applicability and efficiency enhancement of electrical discharge machining (EDM) for PCD hardbanding profiling. Unlike hybrid processes in which electrical discharge and mechanical actions occur simultaneously within the same machining zone, and electrical discharge grinding using a rotating wheel electrode, the proposed method arranges electrical discharge machining and mechanical grinding as sequential, independent operations and allocates the machining allowance across three stages: EDM roughing, profile grinding with a 60-grit wheel, and finish grinding with a 400-grit wheel. The investigated PCD hardbanding consisted of thermally stable polycrystalline diamond (TSP) blocks embedded in a metal matrix. Firstly, the EDM responses of

收稿日期: 2026-07-14; 修回日期: 2026-08-12 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.009

基金项目: 国家重点研发计划课题(编号: 2023YFB3711704); 余姚市重点研发计划项目(编号: 20251JH03010004)

第一作者: 刘长硕, 男, 汉族, 2000年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为钻探技术, 北京市海淀区学院路29号, 2660916807@qq.com。

通信作者: 王瑜, 男, 汉族, 1979年生, 教授, 博士生导师, 地质资源与地质工程专业, 博士, 主要从事钻探机具和装备方面的研究, 北京市海淀区学院路29号, wangyu203@cugb.edu.cn。

引用格式: 刘长硕, 吴迪, 王瑜, 等. 电火花加工在聚晶金刚石耐磨带成形中的工艺适配与效率提升研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 80-91.

LIU Changshuo, WU Di, WANG Yu, et al. Process adaptability and efficiency enhancement of electrical discharge machining for polycrystalline diamond hardbanding profiling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 80-91.

the metal-matrix material and TSP material were characterized separately. The EDM parameters for machining the composite surface were then optimized. Finally, the hardbanding was profiled by EDM and subsequently finished by mechanical grinding, and the combined process was comparatively evaluated against pure mechanical grinding and pure EDM alone. The results showed that pure mechanical grinding produced a surface roughness of  $2.63\text{ }\mu\text{m}$ , but its mass removal rate was only  $0.20625\text{ g/h}$ , resulting in limited machining efficiency. EDM achieved a mass removal rate of up to  $1.23053\text{ g/h}$ , demonstrating substantially higher stock-removal efficiency. Although the EDM-processed surface exhibited a roughness of  $16.62\text{ }\mu\text{m}$  and could not directly satisfy the surface-quality requirement, subsequent mechanical grinding with a small finishing allowance increased the overall mass removal efficiency by  $160.2\%$  compared with pure mechanical grinding, while reducing the surface roughness to  $2.92\text{ }\mu\text{m}$ , a level close to that achieved by pure mechanical grinding. These results demonstrate that, after appropriate parameter optimization, EDM can be effectively applied to the high-efficiency profiling of superhard composites used in PCD hardbanding. The proposed process provides a technical reference for machining PCD hardbanding on drillpipe tool joints used in deep-well drilling.

**Key words:** deep-well drilling; drillpipe joint; polycrystalline diamond hardbanding; electrical discharge machining; grinding finishing; process adaptability; machining efficiency

## 0 引言

随着深井、超深井、水平井和复杂结构井数量不断增加,钻柱在井下服役过程中承受的轴向载荷、扭转载荷、弯曲载荷、冲击载荷和接触摩擦磨损问题越来越严重。钻杆接头作为钻柱中外径较大、接触频繁且受力集中的关键部位,长期与套管、井壁和岩屑发生摩擦磨损,容易造成接头外表面磨损、套管损伤、环空间隙变化以及钻柱服役可靠性下降等问题。耐磨带是提高钻杆接头表面防护能力的重要结构,其材料性能、成形精度和表面完整性直接影响钻杆接头服役寿命及深井钻进安全<sup>[1-2]</sup>。

传统耐磨带多采用金属基硬质合金体系,能够在一定程度上提高钻杆接头表面的抗磨能力,但在特深井高温、高载荷、强研磨性地层和长井段滑动摩擦条件下,其耐磨寿命和减摩性能仍受限制<sup>[2]</sup>。现有研究指出,深井钻杆接头耐磨防护不仅需要提高接头自身的耐磨性,还应兼顾耐磨带的抗脱落、可修复性和套管友好性等关键服役要求<sup>[3]</sup>。因此,传统耐磨带材料在特深井复杂工况下仍存在进一步提高耐磨减摩能力和双向防护性能的需求。

针对上述服役需求,金刚石复合耐磨带为提高钻杆接头表面防护能力提供了新的材料方案。吴迪等<sup>[4]</sup>通过钻柱-套管力学分析及摩擦磨损实验发现,金刚石复合耐磨带可依靠硬质相支撑和自润滑协同作用降低摩擦系数,并通过梯度复合保护层及石墨化转移膜实现钻杆接头与套管的双向防护。聚晶金刚石及热稳定聚晶金刚石材料具有高硬度、高耐磨性、低摩擦系数和较好的抗冲击性能,在钻探工具、耐磨部件和超硬切削材料中具有良好应用

前景<sup>[5-6]</sup>。将热稳定聚晶金刚石(TSP)等超硬相嵌入胎体金属形成聚晶金刚石耐磨带,可利用TSP相承担主要抗磨、减摩作用,并通过胎体金属实现包镶固定、载荷传递和抗冲击支撑,为提高深井钻杆接头表面防护能力提供新的材料方案。

聚晶金刚石耐磨带不是单一的超硬材料层,而是由胎体金属和TSP块共同组成的复合防护结构。在实际工作中,TSP相主要承担抗磨和减摩,胎体金属则承担包镶固定、载荷传递和抗冲击支撑。然而,聚晶金刚石耐磨带的工程应用不仅要求材料本身的耐磨性强,还要求其能实现高效、低损伤和高精度成形加工。聚晶金刚石耐磨带的复合防护结构有利于改善钻杆接头在深井、复杂井段中的服役状态,但也使加工对象同时具有超高硬度、非均质和多过渡区等特征,成形加工过程需要兼顾尺寸精度、表面连续性和局部材料去除一致性。

目前,耐磨带成形及余量去除仍以机械磨削为主要加工方法。机械磨削能够获得较好的几何精度和表面质量,但直接加工大余量超硬复合材料时效率低、砂轮磨损严重,并容易在硬脆相边缘诱发表面崩裂和亚表面缺陷<sup>[5-7]</sup>。激光加工可实现非接触去除,但热影响区、烧蚀残留及局部石墨化等问题难以控制<sup>[8]</sup>;电化学加工受导电相分布和电解液环境限制,加工效率和工程适应性不足<sup>[5-6]</sup>。电火花加工利用脉冲放电产生的瞬时高温实现材料蚀除,不受材料宏观硬度限制,适用于超硬导电或半导电复合材料加工,为聚晶金刚石耐磨带大余量高效去除提供了可行工艺路径<sup>[9-14]</sup>。

因此,将电火花加工的高效去除能力与机械磨

削的表面修整能力相结合,有望在保持耐磨带表面质量的同时提高成形效率。然而,现有研究多集中于聚晶金刚石、TSP或金属材料的单一加工过程,针对胎体金属包镶TSP块复合耐磨带的电火花工艺适配研究仍不充分<sup>[9-14]</sup>。对于该类超硬复合材料,放电参数既要保证胎体金属和TSP区域均能稳定去除,又要控制电极损耗、重铸层堆积、微坑和过渡区高度差,使其满足后续机械磨削修整要求。因此,如何确定适用于复合材料表面的电火花加工参数,并评价其对耐磨带成形效率的提升作用,是聚晶金刚石耐磨带加工中需要解决的关键问题。

基于上述问题,本文以聚晶金刚石耐磨带为对象,开展电火花加工在耐磨带成形中的工艺适配与效率提升实验研究。首先分别对胎体包镶材料与TSP材料的电火花加工响应进行分析,明确胎体包镶材料与TSP材料在放电作用下的去除差异和表面质量变化,再结合两种材料的加工特点,对聚晶金刚石复合材料表面电火花加工参数优选,确定适用于耐磨带粗加工的电火花加工参数;与已有研究不同,本文根据胎体金属和TSP的差异化放电响应,对两类工序进行功能分配:首先采用外圆电火花加工完成环形耐磨带的主要余量去除和初始轮廓成形,随后采用60目粗磨和400目精磨,分阶段削减重铸层、局部凸起及胎体-TSP过渡区高度差。本文的差异化贡献在于建立“组成材料响应分析—复合表面参数适配—实际环形耐磨带验证”的研究路径,并通过去除效率、表面粗糙度和三维形貌对工艺进行定量评价,验证电火花加工用于聚晶金刚石耐磨带高效成形的可行性。

## 1 试样材料与实验方法

### 1.1 试样材料

实验对象为胎体金属包镶TSP块构成的聚晶金刚石耐磨带。耐磨带采用无压熔渗工艺制备,胎体金属由铸造碳化钨骨架和锰白铜类黏结金属构成,在烧结过程中,黏结相合金发生熔融,并在毛细作用与扩散作用的共同影响下向硬质骨架内部渗透,使胎体金属与TSP之间形成致密且牢固的冶金结合。

本文试样包括胎体包镶材料、TSP材料、复合材料弧形试样与金属胎体包镶TSP块构成的聚晶金刚石耐磨带。试样材料组成见表1,弧形试样结

构及耐磨带用于参数筛选实验与后续整形(见图1)。其中,胎体包镶材料与TSP材料用于分析不同组成材料的电火花加工响应差异;复合材料弧形试样用于分析电火花加工后复合材料表面的表面形貌、粗糙度和材料去除差异;实际耐磨带试样用于开展外圆面成形加工和后续机械磨削修整工艺评价。该设置能够使实验从组成材料电火花加工响应逐步过渡到复合材料电火花加工响应再过渡到实际耐磨带整形工艺评价。

表1 聚晶金刚石耐磨带材料组成

| 材 料   | 化学成分/%                                                     |
|-------|------------------------------------------------------------|
| TSP   | 碳(C) 84.7%、硅(Si) 12%、镍(Ni) 3%、硼(B) 0.3%                    |
| 铸造碳化钨 | 钨(W) 95.8%、总碳(C) $3.9 \pm 0.1\%$ 、游离碳 < 0.1%、氯化物残渣 < 0.25% |
| 锰白铜合金 | 铜(Cu) 60%、锰(Mn) 20%、镍(Ni) 20%                              |

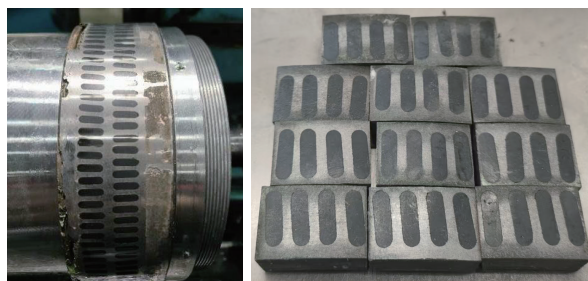


图1 聚晶金刚石耐磨带及弧形试样结构

### 1.2 实验方法与评价指标

电火花加工实验分为组成材料响应分析和复合材料表面参数筛选两类。前者以胎体包镶材料和TSP材料对比试样为对象,用于比较不同组成材料在不同放电参数下的材料去除行为和表面质量差异;后者以聚晶金刚石复合材料弧形试样为对象,用于优选耐磨带粗加工参数。耐磨带外圆面电火花加工用于快速去除主要余量,并形成后续机械磨削修整所需的初始轮廓;实验所用电火花加工机床用于完成上述胎体包镶材料、TSP材料、复合材料及实际耐磨带加工实验(见图2)。

机械磨削采用内外圆磨床完成电火花加工后的表面修整,其作用是辅助电火花加工完成削减放电蚀坑、重铸层、局部凸起和胎体与TSP过渡区高度差,使耐磨带表面获得更连续的几何轮廓和更低的粗糙度。



图2 电火花加工机床

为保证不同实验结果具有可比性,加工前后均对工件和电极进行清洗、干燥和称量,并以单位时间质量变化评价材料去除率。加工后采用扫描电子显微镜观察表面微观形貌和过渡区形貌特征,采用三维共聚焦显微镜对加工表面进行高精度、非接触式光学测量,表征表面粗糙度、峰谷起伏和高度差;采用能谱分析胎体金属、TSP及重铸层组成变化,采用拉曼光谱判断TSP表面相结构变化。其中,三维共聚焦显微镜与激光共聚焦拉曼光谱仪用于表面形貌和相结构表征(见图3)。评价指标包括材料质量去除率、表面粗糙度、过渡区高度差和表面形貌连续性等,上述指标能够从加工效率、材料去除行为和表面质量三个方面评价工艺效果。

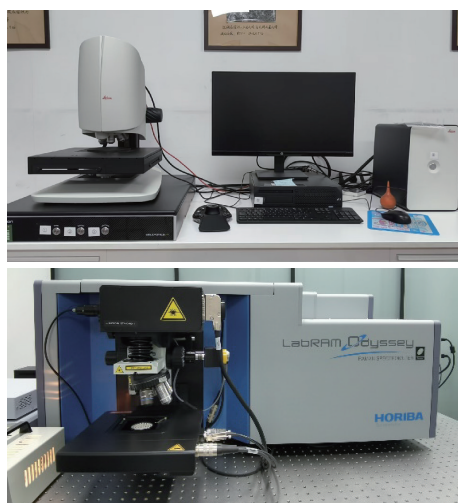


图3 三维共聚焦显微镜与激光共聚焦拉曼光谱仪

## 2 胎体包镶材料与TSP材料电火花加工响应与参数适配

首先开展聚晶金刚石耐磨带中胎体包镶材料与TSP材料的电火花加工响应分析,以胎体包镶材料和TSP材料作为试样分别开展电火花加工参数实验。该实验重点考察放电电流、脉冲宽度和脉冲间隔对表面粗糙度、表面形貌和材料去除的影响,为后续复合材料表面加工和耐磨带外圆面加工提供参数依据。

根据电火花加工设备工作参数、粗加工与精加工常用参数区间以及胎体包镶材料与TSP材料热响应特性选取加工参数。由于胎体包镶材料中金属相导电性较好,较低能量即可形成稳定放电和明显去除;TSP材料导电性相对较弱、导热性较高,去除难度更大,因此在相近参数组合下适当提高了电流水平,并比较不同能量输入条件下的材料去除能力和表面质量变化。

实验共设置9组参数组合:胎体包镶材料电火花加工实验当电流为4 A时,实验1~3的脉冲宽度与脉冲间隔分别取40、60和80  $\mu\text{s}$ ,构成三组对比实验;电流提高至6 A后,实验4~6的脉冲宽度与脉冲间隔依次为40与60、60与80、80与40  $\mu\text{s}$ ;当电流为8 A时,实验7~9的脉冲宽度与脉冲间隔依次为40与80、60与40、80与60  $\mu\text{s}$ ,相对应的TSP材料则将电流分别提升至4、8、12 A,脉冲宽度与脉冲间隔与胎体包镶材料电火花加工实验参数组合相同。同时选取实验1为低放电参数组,实验7为高放电参数组。通过上述参数组合,实现不同放电能量与间隙恢复条件下胎体包镶材料与TSP材料的电火花响应对比分析。

电火花加工过程中,放电电流增大可提高单位时间能量输入,使材料去除率上升,但也会增大单个蚀坑尺度和表面热影响风险;脉冲宽度增加使热作用时间延长,有利于材料充分熔融、相变和抛出,但过长脉宽会引起热量积累,使重铸层增厚并导致表面粗糙度升高;脉冲间隔主要影响极间消电离、排屑和冷却过程<sup>[9-10,15-17]</sup>。由于胎体包镶材料与TSP材料的导电性、导热性和相变行为不同,参数选择需要同时兼顾去除效率、加工稳定性和表面质量。

胎体包镶材料电火花加工响应表明,在高电流、长脉冲宽度条件下,金属黏结相熔融范围扩大,

部分硬质骨架相被带出或残留于再凝固层中,表面容易形成较高的重铸凸起和颗粒堆积。表面粗糙度随电火花加工参数的变化(见图4a)和未加工、低参数加工、高参数加工后的表面形貌(见图5a~c)表明,若脉冲间隔过短,导致工作液无法将其充分冷却并抛出间隙,大量残余的金属液滴在基体表面凝固形成了严重的高耸重铸层,会导致表面粗糙度的急剧恶化。

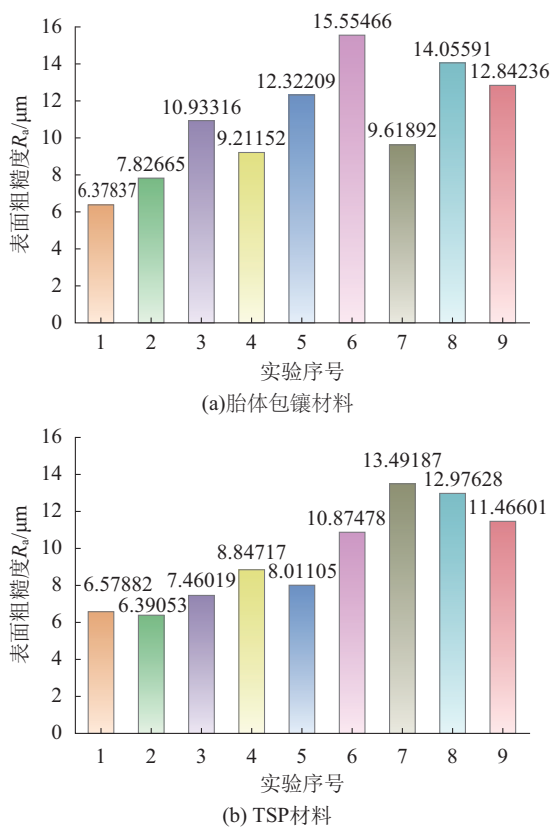


图4 胎体包镶材料与TSP材料表面粗糙度随电火花参数的变化

TSP材料电火花加工响应表明,放电能量提高会加剧材料热损伤,导致表面质量下降。TSP材料表面粗糙度随电火花参数的变化(见图4b)显示,低参数条件下,TSP表面仅出现较轻微热蚀并附着少量细小再凝固物;高参数条件下,瞬时热作用显著增强,TSP表面出现颗粒塌陷、界面剥离及微孔等特征,整体结构明显受损,呈现出不规则蚀损形貌(见图5d~f)。以上分析表明,TSP材料的电火花加工响应与胎体包镶材料存在明显差别,实现TSP材料良好表面质量的关键在于控制放电能量并保证足够的排屑条件。

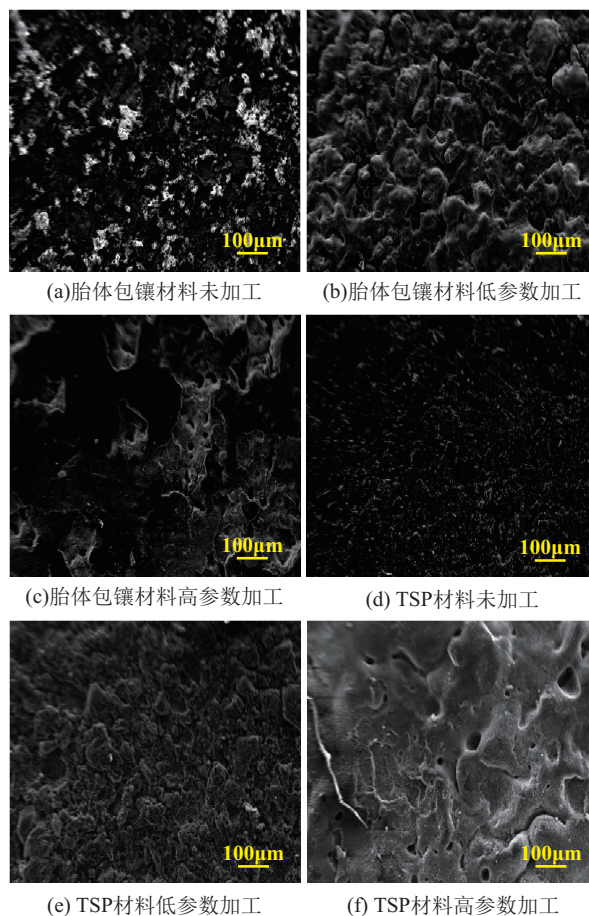


图5 胎体包镶材料与TSP材料电火花加工表面形貌

结合能谱分析结果(见图6),胎体包镶材料与TSP材料电火花加工结果表明,胎体包镶材料中C和Cu含量相对较高,Mn、Ni及W次之(见图6a)。电火花加工过程中胎体包镶材料以基体熔融、流动与再凝固为主,伴随电极沉积和硬质相剥离,最终在表面形成成分复杂的重铸层;TSP材料中以C元素为主,Cu元素次之,Si元素含量相对较低(见图6b)。以上分析表明,电火花加工过程中TSP材料更容易出现微裂纹和热冲击剥离,并伴随电极材料的沉积以及局部黏结相的热影响,从而在表面形成成分不均的改性层结构。胎体包镶材料与TSP材料在相同放电参数下的表面响应差异说明,聚晶金刚石耐磨带的电火花粗加工不能仅依靠单一材料最高去除率选择参数,还应兼顾胎体区域去除效率、TSP区域表面质量和过渡区形貌一致性。

拉曼光谱结果(见图7)表明,低放电参数下G峰强度高于D峰,且可观察到2D峰,说明加工表层

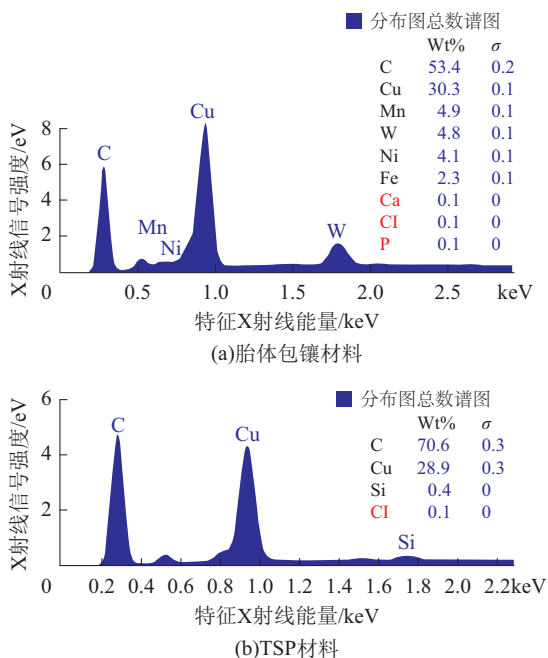


图 6 胎体包镶材料与 TSP 材料电火花加工后能谱分析

石墨化程度相对较低;高参数下 D 峰相对增强、2D 峰明显减弱,表明加工表层碳相无序度提高,较高放电能量加剧了 TSP 表层的石墨化和碳结构转变<sup>[15,18]</sup>。该结果说明,较低放电参数加工能够兼顾 TSP 材料去除与表面质量,适合作为复合材料中 TSP 区域的参数适配依据。

3 聚晶金刚石复合材料表面电火花加工参数优选

在分析胎体包镶材料与 TSP 材料电火花加工响应差异后,进一步针对同时包含胎体与 TSP 的聚晶金刚石复合材料弧形试样开展电火花加工实验。相比于单一的组成材料,聚晶金刚石复合材料表面同时包含导电性较好的金属胎体区域和导电性较弱的 TSP 区域,放电过程中的材料去除和表面形成会表现出非均匀特征。由于胎体包镶材料在较低放电能量条件下即可实现高效的材料去除,而由于 TSP 材料导电性较差、去除难度较高,若采用适用于胎体包镶材料的加工参数,可能导致 TSP 区域材料去除不充分,进一步造成聚晶金刚石复合材料表面出现残留凸起或在过渡区形成高度差。因此,以 TSP 材料电火花加工实验相同的参数组合开展聚晶金刚石复合材料电火花加工实验,以表面粗糙度、材料去除量、电极损耗和过渡区形貌为评价依

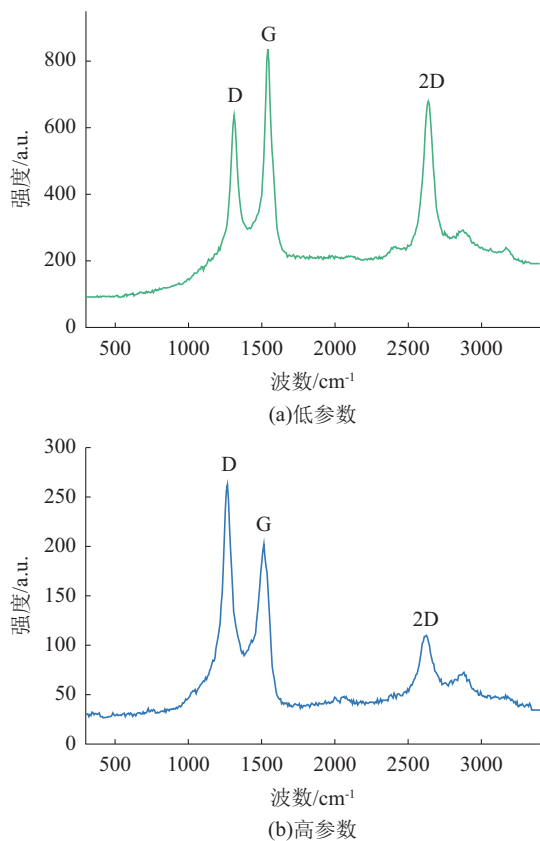


图 7 TSP 材料电火花加工后表面拉曼光谱

据,确定适用于后续耐磨带粗加工的参数。

复合材料弧形试样由实际耐磨带切分制备,其外表面同时包含胎体金属、TSP 块及过渡区,能够有效反映耐磨带实际的加工状态。实验采用三因素三水平参数组合方案,并通过定深度加工方式获取具有可比性的实验数据。由于 TSP 相对整体加工稳定性影响较大,参数选取以保证复合材料表面稳定放电和后续可磨削修整为原则,而非追求单一材料的最大去除量。

聚晶金刚石复合材料表面电火花加工实验结果(见表 2)表明,9 组参数下质量去除率为 147.0~421.3 mg/h,电极损耗比为 7.97%~36.01%。其中,实验 7 的质量去除率最高达 421.3 mg/h;实验 8 的电极损耗率和电极损耗比最高,分别为 115.6 mg/h 和 36.01%。上述结果表明,复合材料电火花加工中去除效率、电极损耗和放电稳定性并不是简单地线性同步提高关系。表面粗糙度结果(见图 8)进一步显示,实验 3 的表面粗糙度最低,为 9.90  $\mu\text{m}$ ;实验 8 的表面粗糙度最高,达到 33.65  $\mu\text{m}$ 。该结果说明,在高能量输入且极间恢复不足时,电蚀产物排出不

足和放电稳定性变差,容易造成表面粗糙度显著增大。为定量分析放电电流、脉冲宽度和脉冲间隔对质量去除率的影响,消除不同因素量纲及取值范围

差异对回归分析的影响,首先对放电参数进行无量纲编码:

表2 复合材料电火花加工去除量与电极损耗

| 实验编号 | 材料去除量/mg | 电极损耗量/mg | 质量去除率/(mg·h <sup>-1</sup> ) | 电极损耗率/(mg·h <sup>-1</sup> ) | 电极损耗比/% |
|------|----------|----------|-----------------------------|-----------------------------|---------|
| 1    | 1588.0   | 127.3    | 153.2                       | 12.28                       | 8.02    |
| 2    | 1531.3   | 122.1    | 147.0                       | 11.72                       | 7.97    |
| 3    | 1528.2   | 168.9    | 186.4                       | 20.60                       | 11.05   |
| 4    | 1306.0   | 169.2    | 252.8                       | 32.75                       | 12.96   |
| 5    | 1469.8   | 175.3    | 247.0                       | 29.46                       | 11.93   |
| 6    | 1665.1   | 233.7    | 244.9                       | 34.37                       | 14.04   |
| 7    | 1313.2   | 197.4    | 421.3                       | 63.33                       | 15.03   |
| 8    | 1423.4   | 512.5    | 321.1                       | 115.60                      | 36.01   |
| 9    | 1223.8   | 208.8    | 272.0                       | 46.40                       | 17.06   |

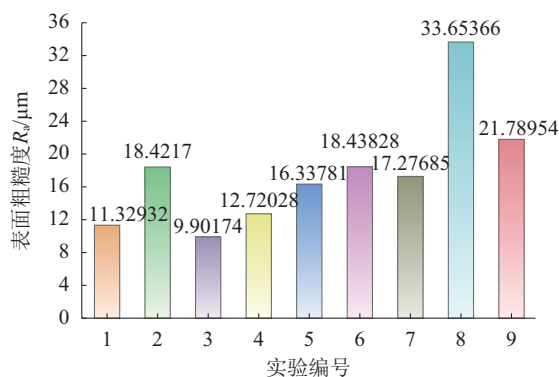


图8 聚晶金刚石复合材料表面粗糙度随电火花参数的变化

$$x_1 = \frac{I-8}{4}, x_2 = \frac{T_{\text{on}}-60}{20}, x_3 = \frac{T_{\text{off}}-60}{20} \quad (1)$$

式中:  $I$ ——放电电流, A;  $T_{\text{on}}$ ——脉冲宽度,  $\mu\text{s}$ ;  $T_{\text{off}}$ ——脉冲间隔,  $\mu\text{s}$ ;  $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_3$ ——分别为三项参数对应的编码值。

放电电流的 4、8 和 12 A, 脉冲宽度的 40、60 和 80  $\mu\text{s}$ , 以及脉冲间隔的 40、60 和 80  $\mu\text{s}$ , 各因素的低、中、高水平分别对应编码水平 -1、0 和 1。基于九组三因素三水平实验结果数据, 以三项编码参数为自变量、质量去除率为响应变量, 采用最小二乘法建立一阶线性主效应趋势模型:

$$\widehat{MRR} = 249.52 + 87.97x_1 - 20.67x_2 + 22.58x_3 \quad (2)$$

式中:  $\widehat{MRR}$ ——质量去除率预测值,  $\text{mg/h}$ 。

模型的决定系数  $R^2$  为 0.883, 调整后决定系数  $R^2_{\text{adj}}$  为 0.813, 模型整体检验结果为  $F(3, 5) =$

12.58,  $p = 0.009$ , 表明该模型整体具有统计学显著性, 能够解释当前实验范围内的质量去除率趋势。在各回归系数的检验中, 放电电流项的回归系数为 87.97, 且其影响达到显著水平  $t = 5.80$ ,  $p = 0.002$ ; 说明放电电流是影响质量去除率的主要因素。其回归系数为正, 表明随着放电电流增大, 单脉冲能量输入增强, 质量去除率总体呈上升趋势。脉冲宽度和脉冲间隔项的回归系数分别为 -20.67 和 22.58, 对应的  $p$  值分别为 0.231 和 0.197, 表明在现有样本量和参数范围内, 二者的独立主效应均未达到显著水平。因此其系数方向只能作为变化趋势的初步提示: 脉冲宽度增加可能使有效材料去除效率有所降低, 而适当延长脉冲间隔可能有利于极间介质消电离、排屑和冷却, 从而改善有效放电状态。受实验数量和模型阶次限制, 该模型仅用于表征当前参数范围内各因素的平均主效应, 不包含因素间交互作用及非线性效应。

不同加工参数下的表面形貌(见图9)与粗糙度结果相对应。未加工表面可见原始机械加工痕迹和两相过渡区轮廓; 采用低放电参数加工后, 原始划痕基本消失, 表面出现较多细小电蚀微孔, 加工表面整体形貌较为稳定; 高放电参数加工后, 表面熔融、重凝固和局部塌陷更加明显, 并伴随飞溅颗粒和气孔等加工表面缺陷。由此可见, 复合材料表面质量劣化主要与局部热作用增强、排屑不足和电极损耗增加有关。因此耐磨带粗加工参数应优先选择中电流、短脉冲宽度、中脉冲间隔的精加工策

略,实现放电过程稳定、排屑充分且电极损耗可控的加工过程。

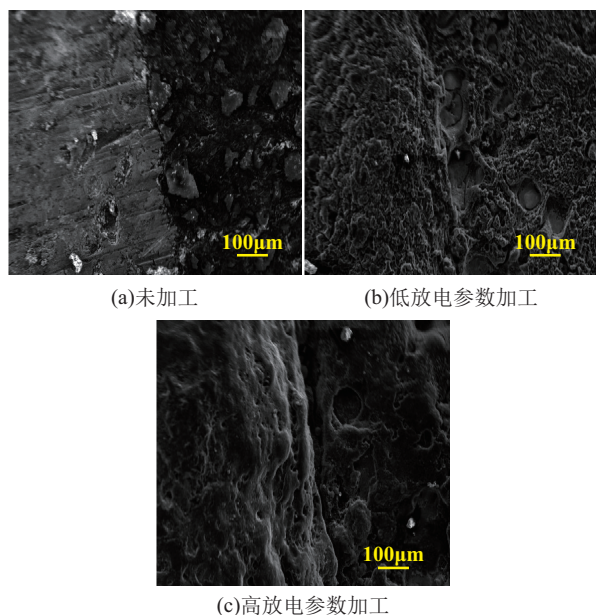


图9 聚晶金刚石复合材料表面电火花加工形貌

能谱分析结果(见图10)表明,C元素在整体区域中占据主导地位,Cu元素和W元素含量相对较少。说明试样表层仍以TSP碳相为主要组成,同时包含胎体金属和硬质相成分;少量O元素表明在加工过程中材料表面可能发生了轻微氧化反应。不同加工参数下的拉曼光谱结果(见图11)显示,在低能量参数条件下,极间热作用相对较弱,G峰强度明显高于D峰,2D峰较为显著,碳相结构破坏程度较低,形成的相变产物层较薄并具备一定的层状有序性。在高放电参数条件下,D峰强度明显增强并超过G峰,表明较强的热冲击不仅加快了低熔点黏结相的消耗,也促使大面积裸露的金刚石发生显著石墨化。相变过程中碳原子重新排列趋于无序,在复合材料表面形成厚度较大的石墨化重铸层,促进了裸露金刚石区域向石墨结构转变,2D峰明显减弱。上述结果从表层成分和碳结构角度说明了高能量参数加工导致的表层成分变化和碳结构劣化,是造成复合材料加工表面质量下降的重要原因,与前述表面形貌和粗糙度变化具有一致性。

聚晶金刚石复合材料表面加工后,复合材料表面与电极表面形貌(见图12)表明其主要表现为四类特征:(1)金属胎体选择性蚀除导致局部凹陷;

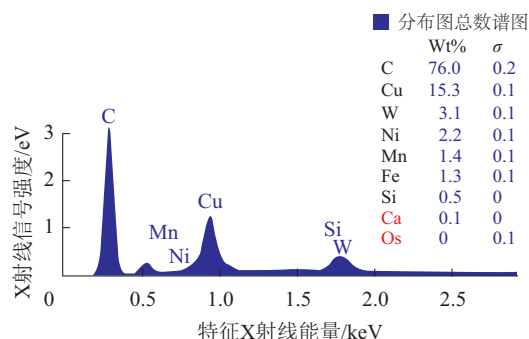
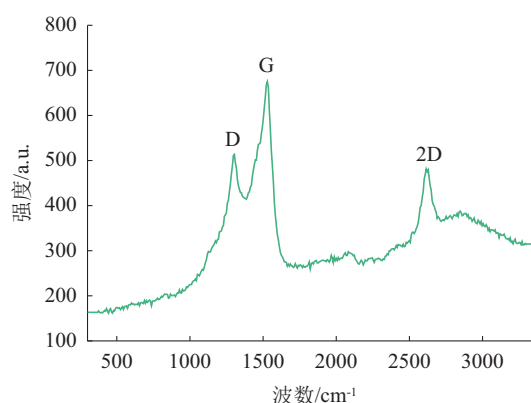
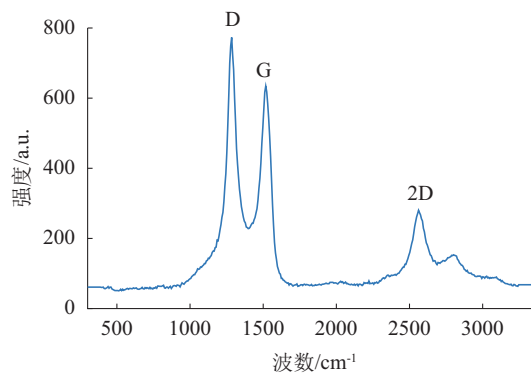


图10 聚晶金刚石复合材料表面电火花加工后能谱分析



(a)低放电参数



(b)高放电参数

图11 聚晶金刚石复合材料表面电火花加工后拉曼光谱

(2)熔融金属快速冷却形成重铸层、飞溅颗粒和局部堆积;(3)TSP边缘受热冲击和支撑削弱影响,局部出现微裂纹或剥落;(4)胎体与TSP过渡区高度差使耐磨带表面连续性下降。上述表面特征与聚晶金刚石复合材料的多相结构密切相关。放电通道更容易在导电性较好的金属胎体区域形成,局部高温使黏结金属发生熔融、迁移和再沉积;TSP区域由于导电和热响应不同,去除量相对有限,边缘

部位则可能因周围胎体去除后支撑减弱而形成局部剥落。由此造成的高度差和形貌不连续是单一电火花加工后表面质量不足的主要来源,也正是后续机械磨削需要重点修整的对象。

综合复合材料电火花加工实验结果,本文将电火花加工作为耐磨带粗加工工序,优选低电流、长

脉冲间隔的精加工策略,用于快速去除加工余量并完成初始轮廓成形;针对电火花加工后形成的微坑、重铸层、局部凸起和过渡区高度差,通过机械磨削进行小余量修整和表面质量提高。

#### 4 耐磨带电火花成形与效率评价

##### 4.1 组合工艺路线

在完成组成材料和复合材料表面参数优选后,需要将电火花加工用于实际环形耐磨带成形,并评价其相对于纯机械磨削的效率提升效果。电火花加工能够快速去除聚晶金刚石耐磨带余量,但加工后表面可能存在蚀坑、重铸层、局部热影响和形貌起伏<sup>[10,15-16]</sup>;机械磨削可获得较好表面质量,但直接承担超硬复合材料大余量去除时效率低、砂轮磨耗大,并可能在TSP边缘诱发机械冲击缺陷<sup>[7,19-20]</sup>。已有PCD复合加工和轮电极电火花磨削研究表明,辅助作用有助于协调去除效率与表面质量<sup>[21-22]</sup>。因此,更合理的方式是将电火花加工用于前期粗去除和初始轮廓成形,将机械磨削用于后续小余量表面修整。

基于上述思路,本文采用电火花粗加工—机械磨削修整组合路线(见图13)。该路线将电火花加工作为主要余量去除手段,用于快速完成耐磨带外圆面成形;随后采用机械磨削进行小余量修整,用于削减放电蚀坑、重铸层、局部凸起和过渡区高度差。电火花加工负责解决“高效去除”问题,机械磨削负责解决“表面质量控制”问题。



图12 电火花加工后聚晶金刚石复合材料表面与电极形貌

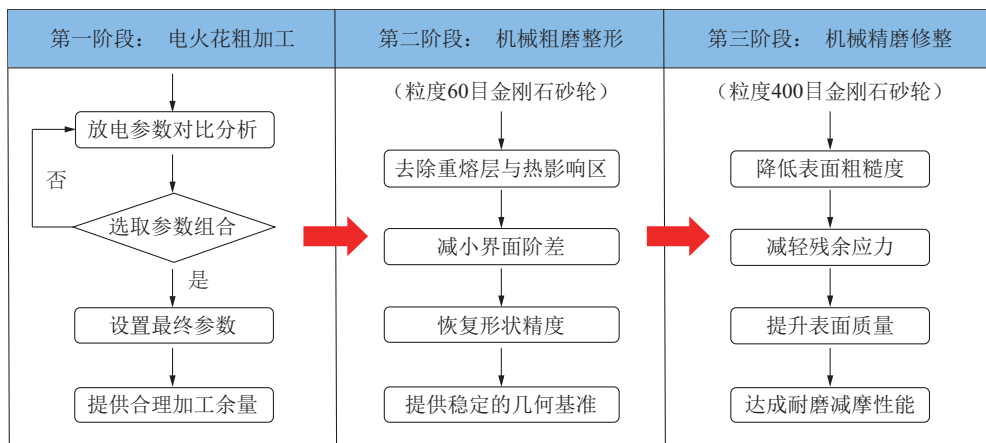


图13 电火花粗加工—机械磨削修整工艺流程

该组合路线的关键在于对不同加工方法的功能分工与余量分配。电火花加工阶段保留足够的

加工稳定性和后续磨削余量,避免因过高能量输入形成难以修复的局部缺陷;机械磨削阶段以小余量

修整为主,利用金刚石砂轮对重铸层、蚀坑边缘和TSP凸起区域进行均化处理。通过分阶段控制余量分配,可降低砂轮直接承担大余量去除时的磨损,同时避免单一电火花加工后表面粗糙度过高的问题。

4.2 耐磨带外圆面成形与修整

聚晶金刚石耐磨带为环形结构,服役时需要与钻杆接头表面配合,其外圆面的几何精度和表面质量直接影响服役状态和接触行为。在复合材料表面参数优选基础上,耐磨带加工方案(见表3)中,电火花外圆面加工用于外圆面初始成形(见图14),在

外圆面加工时,电极位于工件外侧,与耐磨带外圆面保持一定放电间隙,通过相对运动实现环形表面连续加工。由于耐磨带外表面包含胎体金属和TSP块,电极经过不同材料区域时放电状态并不完全一致,因此需要稳定放电参数、同时保持电极与工件之间的相对运动稳定,并借助工作液冲刷、周期性抬刀和旋转运动促进电蚀产物排出。对于含TSP块的环形复合表面,若排屑不充分,局部短路和异常放电会使表面粗糙度增大,并加剧电极端部损耗<sup>[9-10,14]</sup>。因此排屑和消电离状态是保证外圆电火花加工稳定性的关键。

表3 聚晶金刚石耐磨带加工方案

| 编号 | 工艺类型       | 电火花加工放电参数                                                                                 | 机械磨削加工砂轮粒度     |
|----|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1  | 电火花加工      | $I=8\text{ A}, T_{\text{on}}=40\text{ }\mu\text{s}, T_{\text{off}}=60\text{ }\mu\text{s}$ |                |
| 2  | 机械磨削加工     |                                                                                           | 金刚石砂轮 60目及400目 |
| 3  | 电火花-机械辅助整形 | $I=8\text{ A}, T_{\text{on}}=40\text{ }\mu\text{s}, T_{\text{off}}=60\text{ }\mu\text{s}$ | 金刚石砂轮 60目及400目 |

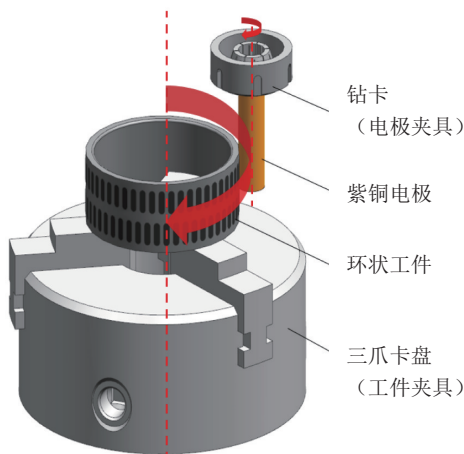


图14 聚晶金刚石耐磨带外圆面电火花加工示意

机械磨削在组合工艺中的主要作用是对电火花加工后的表面进行修复和整形。由于电火花加工已完成主要余量去除,机械磨削仅需承担小余量修整任务,砂轮负荷和磨损显著降低,加工过程更加稳定。磨削可削平电火花加工形成的局部凸起和重铸层,减小胎体金属与TSP之间的高度差,并降低表面粗糙度,使耐磨带表面获得更好的连续性。

机械修整可分为粗磨整形和精磨修整两个阶段。粗磨阶段主要去除电火花加工后的重铸层、局部凸起和热影响区域,使外圆得到一致的几何轮

廓;精磨阶段则采用更细粒度金刚石砂轮进行微量进给,进一步降低表面粗糙度并改善表面连续性。机械磨削阶段侧重于形貌修整和表面质量提升。

4.3 工艺效果对比

三维白光干涉形貌表明,相较于标准尺寸表面光整的耐磨带圆环,电火花加工后耐磨带表面起伏明显,TSP区域相对凸起约0.22 mm,胎体包镶材料区域仅凸起约0.13 mm,二者之间形成显著高度差(见图15a)。经过机械磨削修整后,表面峰谷差减小,局部凸起被削平,过渡区轮廓更加平缓,表面连续性明显提升(见图15b)。结果表明机械磨削能够有效修复电火花加工造成的形貌缺陷,使耐磨带获得更适用于钻杆接头服役的表面状态。同时三维形貌结果进一步说明了两种工艺的互补关系。电火花加工后,表面出现随机微坑和局部凸起,整体峰谷起伏增大。机械磨削后,各测量点高度波动明显减小,表面由局部起伏状态转变为较平缓连续的轮廓。由此可见,电火花加工适合形成初始轮廓和快速去除余量,而最终表面质量仍需依赖机械磨削进行补偿和修正,这也体现了电火花加工在聚晶金刚石耐磨带成形中的工艺适配边界。

不同工艺条件下的质量去除率和表面粗糙度对比结果表明(见图16),虽然纯电火花加工质量去除率最高达到1.23053 g/h,但表面粗糙度高达

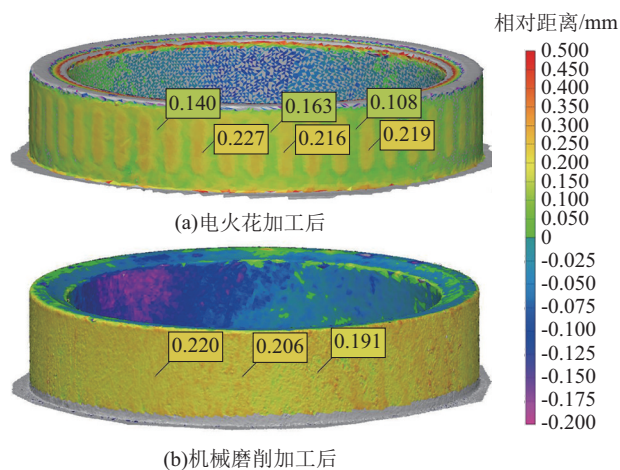


图15 三维白光干涉形貌对比

16.62  $\mu\text{m}$ , 表面存在明显热影响和形貌缺陷; 纯机械磨削能够获得较好表面质量, 表面粗糙度为 2.63  $\mu\text{m}$ , 但质量去除率仅为 0.20625 g/h, 加工效率存在限制。采用电火花粗加工与机械磨削整形工艺后, 质量去除率较纯机械磨削提升 160.2%, 表面粗糙度控制在 2.92  $\mu\text{m}$ 。该结果表明, 电火花粗加工与机械磨削整形工艺既突破了机械磨削效率受限的问题, 又避免了单一电火花加工造成的表面粗糙化和局部形貌起伏, 从而形成了“电火花提升效率、机械磨削控制质量”的工艺优势。

## 5 结论

本文面向胎体金属包镶 TSP 块的环形聚晶金刚石耐磨带, 建立了“组成材料响应分析—复合表面参数适配—实际环形耐磨带验证”的研究路径, 并通过去除效率、表面粗糙度和三维形貌对工艺进行定量评价, 主要结论如下:

(1) 针对纯机械磨削加工聚晶金刚石耐磨带时大余量去除效率低的问题, 提出“电火花粗加工+机械磨削精整”的组合工艺。电火花加工不受材料宏观硬度限制, 适合承担主要余量去除和外圆面初始成形; 机械磨削则用于去除微坑、重铸层及局部凸起, 改善材料过渡区高度差。两种工艺在去除效率和表面质量控制方面具有良好的互补性。该方法并非将电火花加工与机械磨削进行一般性的工艺组合, 而是依据组成材料的放电响应和前序加工形成的表面特征, 对各阶段的加工任务进行分配, 其工艺不同于同步复合加工或单一轮电极电火花磨削方式。

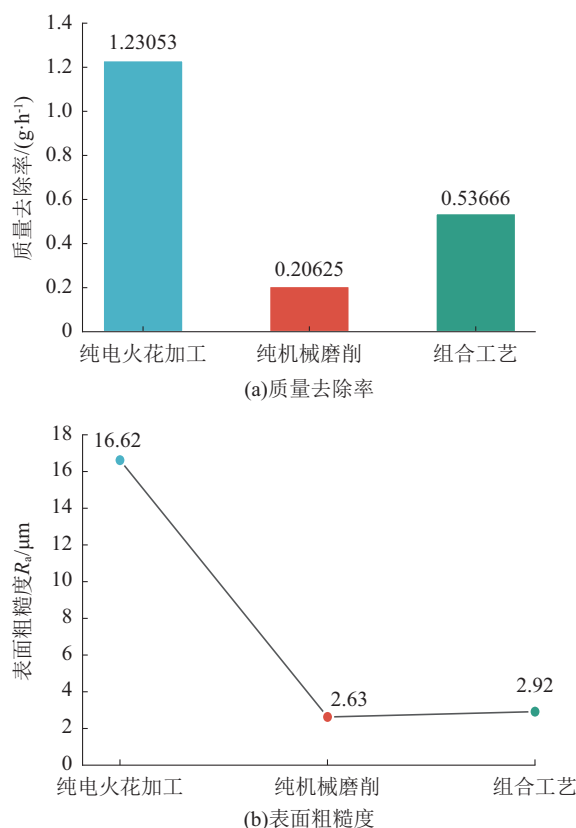


图16 聚晶金刚石耐磨带质量去除率与表面粗糙度

(2) 针对耐磨带由胎体包镶材料和 TSP 等多相材料组成、不同组分放电去除特性差异明显的问题, 分别开展胎体材料和 TSP 材料的电火花加工实验, 研究放电参数对材料去除行为和表面粗糙度的影响。在此基础上, 优选出较低电流、较长脉冲间隔的参数组合, 实现放电过程稳定、排屑充分的加工过程, 完成了加工参数与复合材料特性的适配。

(3) 结合胎体材料与 TSP 材料的放电去除特性, 确定聚晶金刚石复合材料的电火花加工参数并开展整形实验。结果表明, 适配后的电火花加工能够稳定完成复合材料主要余量去除和轮廓初始成形, 验证了该工艺用于聚晶金刚石耐磨带粗加工的可行性。在此基础上进行小余量机械磨削, 可有效去除电火花加工形成的表面缺陷, 使加工后耐磨带表面获得更好的连续性。

(4) 针对聚晶金刚石耐磨带类超硬复合材料非均质、难加工的特点, 形成了适用于聚晶金刚石耐磨带的电火花高效整形工艺。对比结果表明, 纯机械磨削表面粗糙度为 2.63  $\mu\text{m}$ , 但质量去除率仅为

0.20625 g/h,加工效率受限。电火花加工质量去除率可达1.23053 g/h,具有较高去除效率,虽然加工表面粗糙度为16.62  $\mu\text{m}$ ,难以直接满足表面质量要求,但经机械磨削小余量修整后,能使质量去除效率较纯机械磨削提高160.2%,同时将表面粗糙度控制在2.92  $\mu\text{m}$ ,接近纯机械磨削水平。然而在参数优选实验中,最高质量去除率对应的电极损耗比为15.03%,即每去除1 g复合材料约消耗0.150 g电极。因此,电火花加工经参数适配后可用于聚晶金刚石耐磨带类超硬复合材料高效成形,可为深井钻杆接头聚晶金刚石耐磨带加工提供工艺参考,但其量产应用的经济性仍需进一步结合电极寿命及损耗评估。

#### 参考文献:

- [1] 刘长硕,王瑜,李立鑫,等.特深井钻杆柱材料的研究现状与关键技术[J].钻探工程,2024,51(S1):1-9.
- [2] 王镇全,张凯,王德国,等.钻杆接头耐磨带材料研究进展[J].石油矿场机械,2016,45(2):94-98.
- [3] 覃泳杰,王瑜,张凯,等.深井钻杆接头耐磨防护技术研究综述与展望[J].钻探工程,2024,51(4):54-63.
- [4] 吴迪,乔铭朝,梁晨帆,等.特深井钻杆接头耐磨减摩双向防护机制研究[J].钻探工程,2025,52(6):42-51.
- [5] 张勤俭,曹凤国,刘媛,等.聚晶金刚石加工技术进展[J].金刚石与磨料磨具工程,2006(6):76-80.
- [6] 刘涛,许立福,周丽,等.聚晶金刚石加工技术的研究现状[J].工具技术,2011,45(1):3-9.
- [7] Breuer P, Reuter E, Prinz S, et al. Explanatory model of the material removal mechanisms and grinding wheel wear during grinding of PCD with water-based cooling lubricants[J]. Processes, 2025,13(6):1671.
- [8] 郝生财,曹康,王海滨,等.基于超快激光的PCD超硬材料加工研究[J].电加工与模具,2023(5):44-48.
- [9] Abbas M N, Solomon G D, Bahari F M. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007,47(7-8):1214-1228.
- [10] Wang X, Li C, Guo H, et al. Electrical discharge machining of polycrystalline diamond: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2023,237(11):1611-1627.
- [11] 严东剑.基于空载概率检测的聚晶金刚石电火花线切割高效加工研究[D].南京:南京航空航天大学,2023.
- [12] 李彪.聚晶金刚石电火花磨削加工机理及工艺研究[D].佛山:佛山科学技术学院,2017.
- [13] 蒋盟.聚晶金刚石电火花加工工艺及机理研究[D].淄博:山东理工大学,2023.
- [14] Rahim M Z, Ding S, Mo J. Electrical discharge grinding of polycrystalline diamond: effect of wheel rotation[J]. Machining Science and Technology, 2016,20(1):62-78.
- [15] Watanabe K, Yan J. Effects of electrical discharge machining conditions on thermal damage in polycrystalline diamond[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21). Kyoto: Japan Society of Mechanical Engineers, 2015,1105:1-6.
- [16] 张廷亮.电火花加工表面重熔层成形过程仿真和实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2023.
- [17] Zhang K, Zhu L, Chen Z, et al. Experimental study on the wire electrical discharge machining of PCD with different grain sizes[J]. Diamond and Related Materials, 2025,155:112331.
- [18] Zhang H, Li L, Liu X, et al. Investigation of processing characteristics of PCD in ultrasonic-assisted graphene powder mixed EDM[J]. Diamond and Related Materials, 2024,144:111041.
- [19] 孙国栋,李维翠,胡晋昭,等.研磨压力对聚晶金刚石表面质量的影响[J].金刚石与磨料磨具工程,2024,44(4):528-533.
- [20] Kuppaswamy R, Airey K A, Sardikmen H. Micro-grinding characteristics of polycrystalline diamond tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015,76(1-4):161-171.
- [21] 张勤俭,李建勇,蔡永林,等.聚晶金刚石电火花超声机械复合加工技术研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2012,32(1):8-11.
- [22] Ding S L, Mo J, Brandt M, et al. Electric discharge grinding of polycrystalline diamond materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,271-272:333-337.

(编辑 王文)