

文章编号 1004-924X(2012)06-1303-07

聚晶金刚石复合片的电火花线切割精密加工试验

宋满仓^{1,2*}, 张建磊^{1,2}, 于超^{1,2}, 王敏杰^{1,2}, 刘冲³

- (1. 大连理工大学 模塑制品教育部工程研究中心, 辽宁 大连 116023;
2. 三菱电机 大连理工大学 电加工技术中心, 辽宁 大连 116023;
3. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为了提高聚晶金刚石(PCD)刀具的生产效率,改进加工表面质量并减少刃磨余量,利用慢走丝电火花线切割机床(WEDM)对 PCD 复合片进行了加工工艺试验。对 PCD 复合片进行了 5 次切割,并分别测量了每次加工后的表面粗糙度、富钴界面层凹槽深度及宽度和 PCD 层刃口加工质量。试验结果表明:PCD 复合片经慢走丝线切割多次加工,能够得到较好的表面质量,在众多影响因素中金刚石颗粒大小对加工质量影响较大;其中 CTH025 型号和 CTB010 型号的最终表面粗糙度分别为 $R_a=0.85\ \mu\text{m}$ 和 $R_a=0.57\ \mu\text{m}$,富钴界面层凹槽的深度分别为 $16.3\ \mu\text{m}$ 和 $5.7\ \mu\text{m}$,刃口处切口缺陷的尺寸也与金刚石颗粒的尺寸相当。经 WEDM 加工后的 PCD 复合片的刃磨余量可控制在 $4\sim 15\ \mu\text{m}$ 左右。

关键词: 聚晶金刚石复合片;聚晶金刚石刀具;电火花线切割机

中图分类号: TG484 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1303

Experiment of WEDM precision machining for polycrystalline diamond compact

SONG Man-cang^{1,2*}, ZHANG Jian-lei^{1,2}, YU Chao^{1,2}, WANG Min-jie^{1,2}, LIU Chong³

- (1. *Engineering Research Center for Molding Product of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*
 2. *MITSUBISHI-DUT Electrical Discharge Machining Technology Center, Dalian 116023, China;*
 3. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: mcsong@dlut.edu.cn*

Abstract: In order to improve the production efficiency, surface quality and reduce the grinding margins of Polycrystalline Diamond (PCD) compact cutting tools, a series of experiments of Low-speed Wire Cutting Electric Discharge Machining (LS-WEDM) for a PCD compact were taken. The PCD compact was cut by the WEDM for five times, then the surface roughness of cutting section, the machining quality of cobalt-rich interface layer and the edge of PCD layer were measured and discussed. The results indicate that the PCD compact shows better surface quality in its cutting section after multiple processing by LS-WEDM, and the machining quality is affected by diamond particle sizes greatly.

收稿日期: 2011-12-15; 修订日期: 2012-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 20890024); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2007CB714502)

For two kinds of PCD compacts, CTH025 and CTB010, the surface roughness are $R_a=0.85\ \mu\text{m}$ and $R_a=0.57\ \mu\text{m}$, and the depths of the grooves of cobalt-rich interface layer are $16.3\ \mu\text{m}$ and $5.7\ \mu\text{m}$, respectively. The size of the defect in the edge of PCD compact is matched with that of the diamond particle. The minimum grinding margins of PCD cutting tools can be controlled in $4-15\ \mu\text{m}$ after LS-WEDM.

Key words: Polycrystalline Diamond (PCD) compact; PCD cutting tool; Wire Cutting Electric Discharge Machine (WEDM)

1 引言

聚晶金刚石 (Polycrystalline Diamond, PCD) 复合片是由粒度为微米级的金刚石颗粒与钴、镍等金属粉末均匀混合后, 在高温高压下硬质合金基材上烧结而成的, PCD 层厚度一般在 $0.3\ \text{mm}$ 以上^[1]。PCD 层具有接近天然金刚石的高硬度、高耐磨性、高导热性、低摩擦系数和低热膨胀系数等优越性能, 同时硬质合金基底具有良好的强度和韧性, 二者结合使 PCD 复合片在切削加工、木材加工、地质钻探和模具 (拉伸模具) 等行业获得了广泛应用^[2], 特别是在超精密加工中更显其优势^[3-4]。

PCD 刀具常规制作方法大体可分为 3 步: (1) 复合片的切割; (2) 与刀体的焊接; (3) 刃磨。复合片的切割一般采用激光切割或线切割^[5]。用于 PCD 复合片加工的激光切割机价格昂贵, 且加工质量并不十分理想, 许多刀具生产企业仍然采用电火花线切割进行 PCD 复合片的切割加工。由于金刚石颗粒不导电, 增加了放电加工的难度, 尤其是在线切割加工中, 极易断丝。王军^[6]指出, 提高超硬刀具材料线切割加工效率的途径是在电极丝所能承受工作电流的前提下, 进行综合的工艺试验, 探求各项工艺参数, 特别是电参数对线切割加工效率的影响, 找出最佳的工艺参数组合; 张高峰^[7]、吴煜^[8]对 PCD 加工机理进行了研究; K. Suzuki^[9]、G. Obaciu^[10]在 PCD 中加入硼来提高其导电性, 运用电火花线切割加工得到了较好的效果。另外王永国^[11]、Y. Jia^[12]等也从事过这方面的研究。

目前专业用于超硬刀具材料切割加工的商业机床, 国外以德国 Vollmer 公司的 QWD 系列机床为代表^[13]。该机床采用电火花线切割加工 PCD、人造立方氮化硼 (PCBN) 刀具, 自动化程度

及加工精度均很高。不足之处是切割表面粗糙度稍逊于磨削表面, 此外机床价格较为昂贵。国内以北京凝华 NHT 系列机床为代表, 经过大量加工对比试验及反馈证明其在聚晶金刚石、金刚石合金等超硬材料加工方面具有效率高、损耗小、加工稳定等特点。

综上所述, 电火花线切割在 PCD 刀具生产中发挥着非常重要的作用, 其加工质量的好坏直接关系到刀具生产的效率与质量。随着电火花线切割技术的不断发展, 线切割机床性能的不断提高, 利用普通商品化电火花线切割机床完成 PCD 刀具生产中大部分工作, 甚至取代最终的刃磨工序, 以降低刀具制造成本, 正是业界所期望的。本文对两种 PCD 复合片开展了慢走丝电火花线切割精密加工试验, 对切割截面及刃口形貌进行了观察与测量, 通过试验结果与理论分析来探索提高切割效率, 改进加工表面质量和减少刃磨余量的方法。

2 试验设备、材料及方法

试验所用机床为 NA2400 慢走丝线切割机 (Wire Cutting Electric Discharge Machine, WEDM), 测量设备为表面轮廓仪 (NewView 5022)、超景深三维显微镜 (VHX-600E) 及数字式影像工具显微镜。NA2400 是三菱电机针对中国市场推出的最新 WEDM 机床, 该机床在指定的加工条件下, 能够保证 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 的尺寸精度, 最佳表面粗糙度可达 R_a 为 $0.03\ \mu\text{m}$, 角部形状精度可控制在 $1\ \mu\text{m}$ 以内。

试验所用 PCD 复合片为 Element Six 公司生产的 SYNDITE CTB010 与 CTH025, PCD 层厚度为 $0.5\ \text{mm}$, 基底为硬质合金 (WC), 总厚度为 $2.0\ \text{mm}$, 金刚石颗粒大小分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$ 。

提高线切割加工精度和表面质量最有效的方法是多次切割, 通过逐次降低放电能量和缩减放

电间隙来提高加工质量。对于常规材料,线切割机床都会预置好多次放电加工参数,供操作时选择。而对于PCD复合片等特种材料,则需专门研究。在本试验中,首先进行试切试验来确定工艺条件范围,其次通过正交试验了解其工艺规律,确定多次切割试验的放电加工参数取值,最终进行多次切割试验,考察加工效果。PCD复合片的加工方式如图1所示^[9],利用一次装夹,对复合片进行多次加工且保留每次的加工结果以便测量分析。在第1次加工的基础上,从第2次加工到第5次加工偏移增量依次为30,15,8,8 μm ,加工完成后通过测量考察其加工效果。

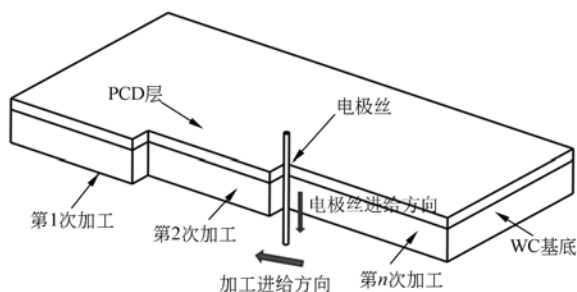


图1 PCD复合片加工模型

Fig. 1 Machining model for PCD compact

3 试验结果及分析

3.1 加工表面粗糙度

运用表面轮廓仪对加工后的表面进行测量,结果如图2所示。由测试结果可以看出,表面粗糙度值随着加工次数的增多逐渐减小,经过WEDM机床多次加工后可以得到较小的表面粗糙度。CTH025第1次加工后表面粗糙度值 R_a 为1.96 μm ,经5次加工后 R_a 减少为0.85 μm ,而CTB010第1次加工后表面粗糙度值 R_a 为1.29 μm ,经5次加工后减少 R_a 为0.57 μm 。CTB010经加工后的表面粗糙度优于CTH025,而在切割加工过程中,CTB010较CTH025表现出更好的可加工性。

PCD层的电火花加工去除机理包括2个方面^[5]:其一是通过等离子体压缩通道的高温使局部区域的金刚石石墨化、熔化与汽化,熔体在放电爆炸力作用下从熔池抛出;其二是通过爆炸冲击波所产生的拉应力使金刚石颗粒局部碎化而被去除。在多次加工PCD复合片的过程中,第1次加

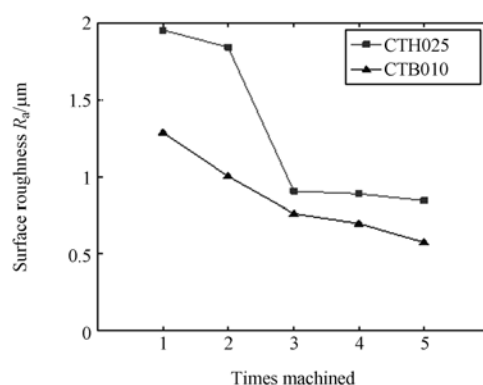


图2 PCD层表面粗糙度与加工次数关系

Fig. 2 Relationship between PCD compact surface roughness and machining times

工由于能量较大,金刚石颗粒被冲击或局部碎化脱落,或整体脱落,在加工表面留下较大的凹陷。金刚石颗粒直径大时,加工表面留下的凹陷就大,这就是CTB010经加工后的表面粗糙度优于CTH025的原因。随着加工次数的增加,为获得较好的加工表面,加工能量逐渐调小,将峰值电流以40%的速率逐渐减小,伺服电压以50%的速率逐渐增加到第3次后再以20%的速率逐渐减小,结合每次加工的偏移增量,对加工表面进行不断修整,可获得较好的表面质量。

3.2 富钴界面层加工质量

在PCD复合片烧结过程中,硬质合金基底的金属钴有向PCD层渗透的趋势,这样在PCD层与硬质合金基底之间存在富钴界面层。金属钴的熔点与汽化点都比较低,导电性好,而且在加工PCD复合片时一般需采用高电压、高功率等电加工参数。所以在富钴界面层处的放电间隙电压高,单个脉冲去除材料体积大,即使在较大的放电间隙也能产生火花放电,因此在富钴界面层的放电腐蚀量要高于周围的材料,而加工后PCD层与硬质合金基底之间的富钴界面层会产生凹槽。凹槽深度的大小直接决定后续刃磨与抛光的工作量,因此,在加工中力求减小凹槽深度。

运用超景深三维显微镜对加工后的富钴界面层进行观察,放大倍数为500时所得加工凹槽图像如图3、图4所示。针对每个加工位置,挑选加工凹槽最深处进行测量,并测量该处凹槽宽度。图5、图6为5次加工凹槽的深度和宽度测量值。CTH025经5次加工后,凹槽深16.3 μm 、宽99.4 μm ,CTB010经5次加工后凹槽深5.7 μm 、

宽 $72.6 \mu\text{m}$ 。经试验加工得到的凹槽深度较小，能够节省后续加工工时。而由于 CTH025 中金刚石颗粒直径较 CTB010 大，加工过程不稳定，造成较深、较宽的加工凹槽。

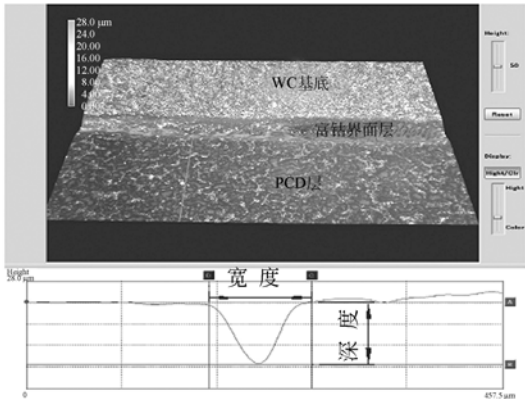


图 3 CTH025 富钴界面层加工质量

Fig. 3 Machining quality of rich cobalt interface for CTH025

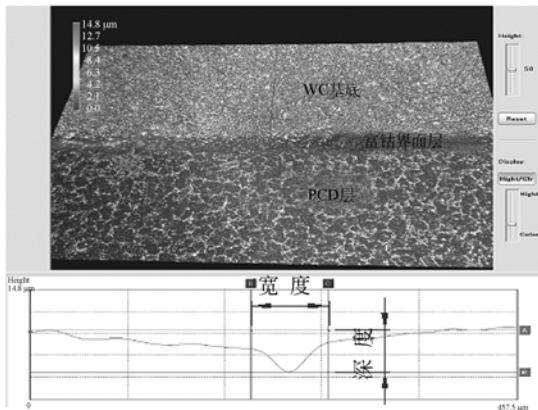


图 4 CTB010 富钴界面层加工质量

Fig. 4 Machining quality of rich cobalt interface for CTB010

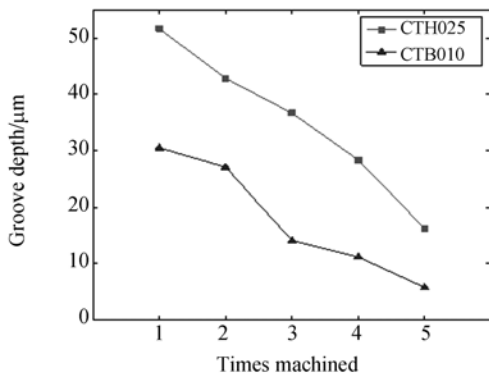


图 5 凹槽深度与加工次数关系

Fig. 5 Relationship between groove depth and machining times

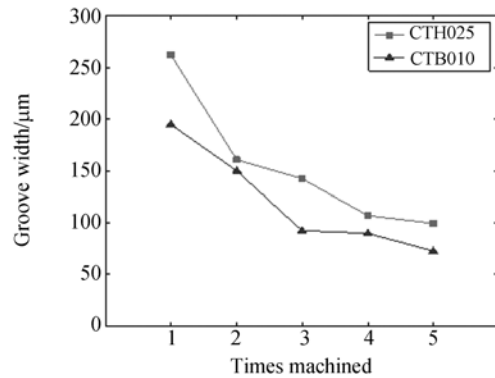


图 6 凹槽宽度与加工次数关系

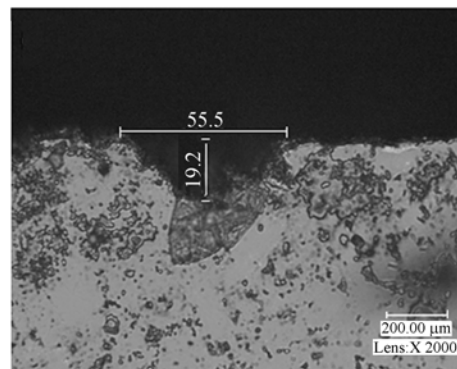
Fig. 6 Relationship between groove width and machining times

3.3 PCD 层刃口加工质量

刀具刃口质量是关系刀具寿命的主要因素之一^[14]，在刀具的生产过程中，保证刀具切削刃的加工质量和加工效率非常重要。在 PCD 复合片的线切割加工过程中，由于刃口处位置特殊，位于 PCD 复合片上表面处的金刚石颗粒固定不牢固，电火花线切割加工时易整体脱落，从而形成切口缺陷。

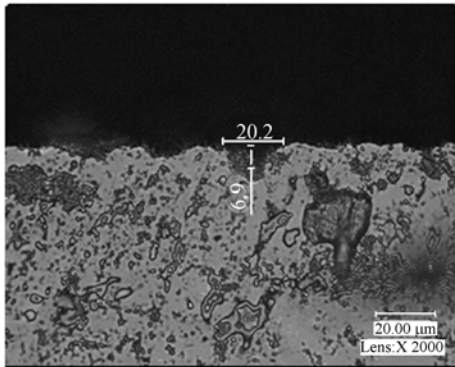
在第 1 次切割时，脉冲能量较大，较大的冲击力使金刚石颗粒脱落的同时带走周围的粘结剂，形成较大的切口缺陷。随着对加工表面的不断修整加工，脉冲能量变小，切口缺陷得到修正。最终加工后得到的切口缺陷大小与金刚石颗粒体积大小相当，故 CTB010 加工后切口缺陷尺寸小于 CTH025。

本试验运用超景深三维显微镜对其切口缺陷进行了测量，如图 7、图 8 所示，垂直 PCD 层上表面测量切口缺陷的宽度和深度。切口缺陷与加工



(a) 第 1 次加工

(a) The first machining

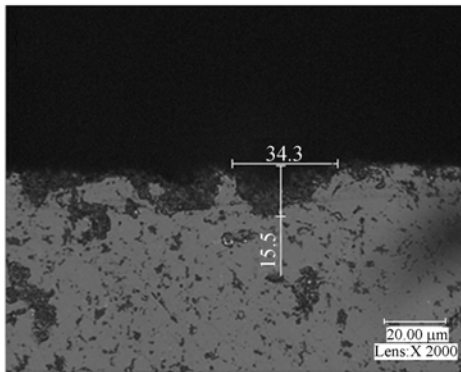


(b)第 5 次加工

(b)The fifth machining

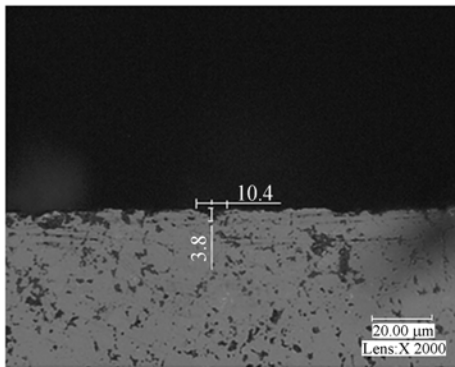
图 7 CTH025 切口缺陷

Fig. 7 Machining quality of CTH025 edge



(a)第 1 次加工

(a)The first machining



(b)第 5 次加工

(b)The fifth machining

图 8 CTB010 切口缺陷

Fig. 8 Machining defects of CTH010 edge

次数的关系如图 9、10 所示,CTH025 经第 1 次切割后其最大切口缺陷宽度为 55.5 μm 、深度为 19.2 μm ,经过 5 次加工后最大切口缺陷宽度降

低为 20.2 μm 、深度为 6.9 μm ;CTB010 经第 1 次切割后其最大切口缺陷宽度为 34.3 μm 、深度为 15.5 μm ,经过 5 次加工后最大切口宽度降低为 10.4 μm 、深度为 3.8 μm 。试验结果与上述分析基本一致。而为消除刃口缺陷,尚需下一工序的刃磨,刃磨量应大于切口缺陷的深度。综合富钴界面层凹槽深度和加工表面粗糙度结果,经 WEDM 加工后的 PCD 复合片刃磨余量可控制在 4~15 μm 左右,从而显著提高了加工效率。

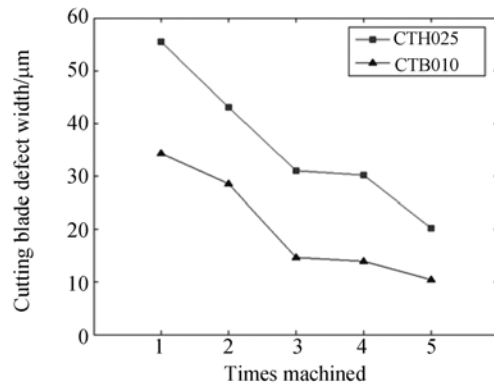


图 9 切口缺陷宽度与加工次数关系

Fig. 9 Relationship between machining defect width and machining times

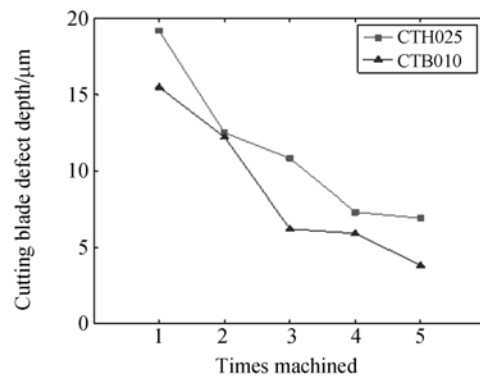


图 10 切口缺陷深度与加工次数关系

Fig. 10 Relationship between machining defect depth and machining times

4 结 论

PCD 复合片经慢走丝线切割加工,能够得到较好的表面质量,但由于 CTH025 复合片中金刚石颗粒直径较大,电火花线切割难度增大,加工质量随之降低。在电火花线切割加工中,PCD 复合片富钴界面层处产生凹槽不可避免,但可通过多

次加工减小凹槽深度,CTH025、CTB010 经 5 次加工后形成凹槽的深度分别为 16.3 μm 和 5.7 μm 。经电火花线切割加工的 PCD 复合片刃口会产生切口缺陷,经多次加工后,最终的切口缺陷大

小与金刚石颗粒体积大小相当。为消除刃口缺陷,尚需下一工序的刃磨。综合本文试验结果,经 WEDM 加工后的 PCD 复合片刃磨余量可控制在 4~15 μm 左右。

参考文献:

- [1] 罗德. 聚晶金刚石复合片及其钻头的应用研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2010:1-5.
LUO D. *Research and application of PDC and PDC bits*[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010:1-5. (in Chinese)
- [2] 张勤俭,曹凤国. 聚晶金刚石加工技术进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2006(4):76-80.
ZHANG Q J, CAO F G. Summary of machining technologies of polycrystalline diamond (PCD)[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006(4):76-80. (in Chinese)
- [3] 刘志兵,王西彬. 积屑瘤状态对微细切削表面轮廓特征的影响[J]. 光学精密工程, 2011,19(1):90-96.
LIU ZH B, WANG X B. Influence of built-up edge phases on characteristics of surface profile of micro cutting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(1):90-96. (in Chinese)
- [4] 葛英飞,徐九华,杨辉. SiCp/Al 复合材料的超精密车削试验[J]. 光学精密工程, 2009,17(7):1621-1628.
GE Y F, XU J H, YANG H. Experiments of ultra-precision turning of SiCp/Al composites [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2009,17(7):1621-1628. (in Chinese)
- [5] 王适,张弘强. PCD 刀具最小刃磨余量的研究[J]. 工具技术, 2004,38(4):17-19.
WANG SH, ZHANG H T. Research on minimum grinding allowance of PCD tools[J]. *Tool Engineering*, 2004,38(4):17-19. (in Chinese)
- [6] 王军. 提高超硬刀具材料线切割加工效率的途径[J]. 电加工与模具, 2004(4):59-60.
WANG J. The way to improve super-hard cutting tool material wire-cutting processing efficiency [J]. *Electromachining & Mould*, 2004(4):59-60. (in Chinese)
- [7] 张高峰,邓朝晖. 聚晶金刚石复合片的电火花线切割机理与形貌[J]. 中国机械工程, 2007,18(6):671-675.
ZHANG G F, DENG ZH H. Cutting mechanism and surface appearance of PDC with WEDM[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007,18(6):671-675. (in Chinese)
- [8] 吴煜,张高峰. 聚晶金刚石的 Nd_YAG 激光切割与电火花线切割损伤分析[J]. 中国机械工程, 2010,21(9):1034-1039.
WU Y, ZHANG G F. Damage analysis of PDC cut by Nd:YAG laser and WEDM[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010,21(9):1034-1039. (in Chinese)
- [9] SUZUKI K, SHIRAIISHI Y, NAKAJIMA N, et al.. Development of new PCD made up of boron doped diamond particles and its machinability by EDM[J]. *Advanced Materials Research*, 2009,76-78:684-689.
- [10] OBACIU G, PISARCIUC C. Electro discharge machining of PCD and CVD [J]. *Nonconventional Technologies Review*, 2008(1):27-30.
- [11] 王永国,涂国才,刘刚. 制备 PCD 刀具的关键工序[J]. 工具技术, 2010,44(1):32-35.
WANG Y G, TU G C, LIU G. Key processes for manufacturing PCD cutting tools [J]. *Tool Technology*, 2010,44(1):32-35. (in Chinese)
- [12] JIA Y, KIM B S, DJHU. Parametric study on near-dry wire electrodischarge machining of polycrystalline diamond-coated tungsten carbide material[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2009,224:185-194.
- [13] 申晓龙,张来希. 基于超硬刀具材料的 WEDM 线切割加工研究[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2010,10(1):1-3.
SHEN X L, ZHANG L X. Based on superhard tool materials research with WEDM wire cutting [J]. *Journal of Hunan Industry Polytechnic*, 2010,10(1):1-3. (in Chinese)

作者简介:



宋满仓(1964—),男,辽宁本溪人,博士,副教授,1989年于清华大学获得硕士学位,2005年于大连理工大学获得博士学位,主要从事模具设计与制造技术及放电加工工艺的研究。E-mail: mcsong@dlut.edu.cn



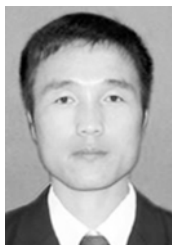
王敏杰(1958—),男,山西太原人,工学博士,教授,博士生导师,1989年于大连理工大学获得博士学位,主要从事模具技术、高速切削与先进制造技术、高分子材料成型技术和水中航行体流体动力学的研究。E-mail: mjwang@dlut.edu.cn



张建磊(1986—),男,山东滨州人,硕士研究生,2009年于山东科技大学获得学士学位,主要从事电加工技术的研究。E-mail: skdzjl_001@126.com



刘冲(1963—),男,湖北武汉人,工学博士,教授,博士生导师,1993年于华中科技大学获得博士学位,主要从事微机电系统(MEMS)、生化微传感器、物联网技术和精密仪器与测试技术的研究。E-mail: chongl@dlut.edu.cn



于超(1985—),男,河北保定人,硕士研究生,2009年于大连工业大学获得学士学位,主要从事电加工技术的研究。E-mail: smiletofacelife@163.com

●下期预告

LMCCD 三线阵立体测绘相机焦平面组件的实现

周怀得¹,刘金国¹,张立平¹,乔克¹,陈佳豫¹,孔德柱^{1,2}

(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033

2 中国科学院 研究生院,北京 100039)

对 LMCCD 制式立体测绘相机相关内容进行研究。首先,介绍 LMCCD 制式相机的相关原理,强调实现 LMCCD 相机的关键一步在于相机焦平面组件的研制;接着,重点介绍了 LMCCD 相机焦平面组件在研制过程中的关键技术,如 LMCCD 像面基板与 CCD 的高精度拼接,焦平面组件电子学部分的低噪声、高集成度设计,焦平面组件真空环境下热噪声抑制和热传导设计,以及焦平面组件高难度装配和焊接等;最后,给出了实际结果。实现结果表明,LMCCD 拼接的共面精度优于 $5\ \mu\text{m}$,平移量和平行度均优于 $2\ \mu\text{m}$;在典型工作情况下实验室测试信噪比优于 90;在 15 min 的工作周期下,焦面组件的温度控制在 30°C 以下,完全满足 LMCCD 制式相机关于 CCD 拼接、焦面温度控制和信噪比的要求,为实现卫星摄影测量精度提供了充分的保证。