

金刚石复合片 ELID 精密磨削工艺及机理研究

关佳亮¹, 赵显辉¹, 任勇¹, 孙晓楠¹, 陈玲²

¹北京工业大学; ²北京卫星制造厂

摘要: 针对金刚石复合片的超精密加工难题, 基于正交试验法优化金刚石复合片 ELID 精密磨削参数组合, 采用极差分析得到了各因素对加工质量的影响程度大小, 并以此为基础进行了工艺实验。根据金刚石复合片磨削加工后的 SEM 电镜扫描图, 对其表面磨削机理及加工表面典型缺陷进行了分析。研究表明, 金刚石复合片的 ELID 精密磨削最优参数为磨削深度为 0.3 μm、主轴转速 1500r/min、占空比 40%、工件移动速度为 0.25mm/s、电解电压 25V、电极间隙 1mm。采用优化后的参数组合进行磨削加工, 获得了粗糙度为 0.019 μm 的加工表面。

关键词: 金刚石复合片; ELID 精密磨削技术; 工艺参数; 正交试验

中图分类号: TC580.61; TH161

文献标志码: A

Research on ELID Precision Grinding Process and Mechanism of PDC

Guan Jialiang, Zhao Xianhui, Ren Yong, Sun Xiaonan, Chen Ling

Abstract: In view of PDC ultra-precision processing problem, orthogonal test method is based on the PDC ELID precision grinding combination of parameters to be optimized. Through range analysis, we obtained the degree of influence of various factors on the processing quality, and as a basis for the experimental study of the process. Then, based PDC SEM surface plot, analyzed its surface grinding mechanism and typical machined surface defects. Research shows optimal parameters of PDC ELID precision grinding is: cutting depth of 0.3 μm, spindle speed of 1500r/min, 40% duty cycle, the moving speed of the sample is 0.25mm/s, the electrolysis voltage of 25V, the electrode gap 1mm. Using a combination of the optimized parameters of PDC were grinding to obtain a roughness of the machined surface 0.019 μm.

Keywords: PDC; ELID grinding technology; process parameters; orthogonal test

1 引言

金刚石复合片由金刚石微粉层、结合剂过渡层和硬质合金层三部分组成。将金刚石微粉和硬质合金基片在超高压(5-7GPa)、高温(1400-1700℃)条件下烧结, 使得金刚石复合片具有高硬度、高耐磨性、导热性、强度特性和抗冲击的韧性, 在切削刀具、专用钻头、特殊耐磨工具领域具有很高的应用价值^[1-3]。

金刚石复合片的传统加工一般是用金刚石砂轮在工具磨床上进行平面粗磨, 随后研磨; 或将金刚石砂轮平面粗磨与电火花平面粗磨相结合进行组合加工。由于金刚石复合片的超硬、耐磨等特性, 传统磨削技术难以满足对金刚石复合片的超精密加工要求^[4,5]。在线电解修整精密磨削技术(ELID)是利用在线电解的微量砂轮修整作用对超硬磨料(CBN、金刚石等)进行微米级、亚微米级甚至纳米级超微细粒度(W0.5-W10)的金属结合剂砂轮进行修锐, 使砂轮在磨削过程中始终保持良好的切削性能, 克服了微米级、亚微米级甚至纳米级超微细粒度砂轮在

使用时极易堵塞的缺点, 实现了多种典型难加工材料的镜面磨削加工^[6]。

2 ELID 精密超精密磨削机理

图1为ELID精密超精密磨削原理图, ELID磨削系统采用铸铁基金属结合剂金刚石砂轮, 具有导电性, 将砂轮与ELID专用脉冲电源正极相连, 负极与专用电极相连, 在电极和砂轮之间喷有专用电解磨削液, 从而形成闭合回路。磨削过程中, 砂轮作为阳极发生电解作用, 砂轮表层的铸铁基体溶解露出内部崭新锋利的金刚石磨粒, 从而完成砂轮的自修锐过程; 同时电解作用还会在砂轮表面形成一层氧化钝化膜, 覆盖在铸铁基体表面, 防止砂轮过度电解, 并且还对金刚石复合片起到研磨作用。随着金刚石磨粒不断被磨除, 钝化膜被金刚石复合片(见图2)刮除, 铸铁基体将继续被电解, 砂轮重新被修锐^[7]。整个过程循环进行, 使砂轮时刻保持最佳磨削状态。

3 金刚石复合片 ELID 精密磨削试验

3.1 试验指标和因素

表面粗糙度是衡量金刚石复合片磨削质量的重

要因素,选用金刚石复合片表面粗糙度作为试验指标。在金刚石复合片 ELID 精密磨削中,磨削参数和电解参数是影响工件质量的主要因素。基于成熟的 ELID 磨削工艺技术,对超硬材料采用 25V 电解电压、1mm 电极间隙时磨削效果最好^[8]。将主轴转速、磨削深度、工作台移动速度、电源占空比作为试验因素,进行四因素正交试验,各因素均取四个水平,四因素四水平见表 1。

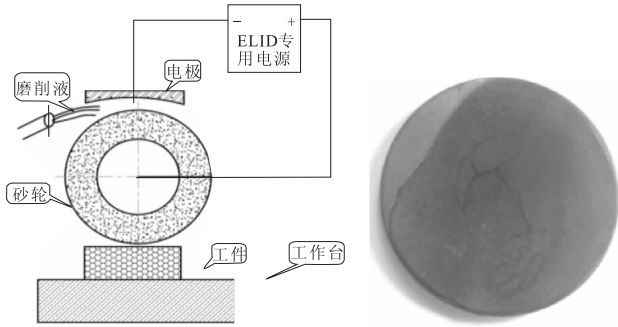


图 1 ELID 磨削原理

图 2 金刚石复合片

表 1 四因素四水平编码表

水平	因素			
	A 主轴转速 (r/min)	B 磨削深度 a_p (μm)	C 工件移动速度 V_w (mm/s)	D 占空比 (%)
1	800	0.05	0.25	20%
2	1000	0.1	0.5	40%
3	1200	0.2	0.75	60%
4	1500	0.3	1	80%

3.2 试验条件与方案

采用四因素四水平的正交试验表 $L_{16}(4^4)$ 设计实验,并按照此表设计的参数进行金刚石复合片 ELID 磨削加工试验。正交试验以德国威利·戈贝尔 GRS II - 1250 - DK 外圆磨床为平台,并搭载 ELID 超精密磨削工艺系统,运用 TR800 粗糙度形状测量仪测量金刚石复合片表面粗糙度值 R_a ,具体正交试验设计表与试验结果见表 2。

3.3 试验结果与分析

(1) 确定各因素的最优水平

由表 2 可以得出, A (主轴转速) 因素各水平对试验指标的影响。 A_1 的影响反映在第 1、2、3、4 号试验中, A_2 的影响反映在第 5、6、7、8 号试验中, A_3 的影响反映在第 9、10、11、12 号试验中, A_4 的影响反映在第 13、14、15、16 号试验中。通过计算可得

$$K_{A1} = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 = 0.046 + 0.040 + 0.030 + 0.018 = 0.134, k_{A1} = K_{A1}/4 = 0.0435$$

$$K_{A2} = y_5 + y_6 + y_7 + y_8 = 0.070 + 0.027 + 0.045 + 0.020 = 0.162, k_{A2} = K_{A2}/4 = 0.0405$$

$$K_{A3} = y_9 + y_{10} + y_{11} + y_{12} = 0.065 + 0.050 + 0.019 + 0.021$$

$$= 0.155, k_{A3} = K_{A3}/4 = 0.03875$$

$$K_{A4} = y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{16} = 0.035 + 0.032 + 0.022 + 0.020$$

$$= 0.109, k_{A4} = K_{A4}/4 = 0.02725$$

表 2 正交试验设计与试验结果

水平	因素				
	主轴转速 (r/min)	磨削深度 a_p (μm)	工件移动速度 V_w (mm/s)	占空比 (%)	表面粗糙度 R_a (μm)
1	800	0.1	0.25	20	0.046
2	800	0.2	0.5	40	0.040
3	800	0.05	0.75	60	0.030
4	800	0.3	0.1	80	0.018
5	1000	0.1	0.5	20	0.070
6	1000	0.2	0.25	60	0.027
7	1000	0.05	0.1	80	0.045
8	1000	0.3	0.75	40	0.020
9	1200	0.1	0.5	20	0.065
10	1200	0.2	0.75	80	0.050
11	1200	0.05	0.25	40	0.019
12	1200	0.3	0.1	60	0.021
13	1500	0.1	0.1	40	0.035
14	1500	0.2	0.5	60	0.032
15	1500	0.05	0.75	20	0.022
16	1500	0.3	0.25	80	0.020

比较得出 $k_{A4} < k_{A3} < k_{A2} < k_{A1}$, 即 A 因素的各水平变化对试验结果得到的表面粗糙度有影响, 其中 A_4 为 A 因素优水平。同理, 计算因素 B、C、D 的各水平所对应的试验指标之和, 并确定优水平。其中 B 因素各水平所对应的试验指标之和为: $K_{B1} = 0.216, k_{B1} = K_{B1}/4 = 0.054; K_{B2} = 0.149, k_{B2} = K_{B2}/4 = 0.03725; K_{B3} = 0.116, k_{B3} = K_{B3}/4 = 0.029; K_{B4} = 0.079, k_{B4} = K_{B4}/4 = 0.01975$ 。C 因素各水平所对应的试验指标之和为: $K_{C1} = 0.112, k_{C1} = K_{C1}/4 = 0.028; K_{C2} = 0.153, k_{C2} = K_{C2}/4 = 0.03825; K_{C3} = 0.147, k_{C3} = K_{C3}/4 = 0.03675; K_{C4} = 0.148, k_{C4} = K_{C4}/4 = 0.037$ 。D 因素各水平所对应的试验指标之和为: $K_{D1} = 0.144, k_{D1} = K_{D1}/4 = 0.036; K_{D2} = 0.114, k_{D2} = K_{D2}/4 = 0.0285; K_{D3} = 0.170, k_{D3} = K_{D3}/4 = 0.0425; K_{D4} = 0.132, k_{D4} = K_{D4}/4 = 0.033$ 。

从上述计算可得: B_4 为 B 因素的优水平; C_1 为 C 因素优水平; D_2 为 D 因素的优水平, 因此各因素的优水平组合为 $A_4B_4C_1D_2$, 即主轴转速 1500r/min、磨削深度为 $0.3\mu\text{m}$ 、工件移动速度为 0.25mm/s 、占空比为 40%。

(2) 确定各因素主次影响顺序

极差值 R 反映了在某因素的一定变动下, 试验指标所产生的波动大小。因此, 根据极差 R_i 的大小, 可以判断各因素对试验指标的影响主次。极差 R_i 计算结果见表 3, 比较各 R 值大小, 可知 $R_B > R_A > R_D > R_C$, 可得各试验因素对表面粗糙度影响的主

次顺序是 B、A、D、C,即金刚石复合片 ELID 精密磨削的最优工艺参数为:磨削深度为 $0.3\mu\text{m}$ 、主轴转速 $1500\text{r}/\text{min}$ 、占空比为 40% 、工件移动速度为 $0.25\text{mm}/\text{s}$ 、电解电压 25V 、电极间隙 1mm 。

表3 正交试验分析结果

水平	因素			
	A 主轴转速 (r/min)	B 磨削深度 a_p (μm)	C 工件移动速度 V_w (mm/s)	D 占空比 (%)
K_1	0.134	0.216	0.112	0.144
K_2	0.162	0.149	0.153	0.114
K_3	0.155	0.116	0.147	0.170
K_4	0.109	0.079	0.148	0.132
k_1	0.0435	0.054	0.028	0.036
k_2	0.0405	0.03725	0.03825	0.0285
k_3	0.03875	0.029	0.03675	0.0425
k_4	0.02725	0.01975	0.037	0.033
极差 R	0.01325	0.03425	0.01025	0.01029
影响主次顺序	B > A > D > C			
优水平	A ₄	B ₄	C ₁	D ₂
优组合	B ₄ A ₄ D ₂ C ₁			

4 金刚石复合片磨削过程及表面形貌分析

采用正交试验得出最优工艺参数,在外圆磨床上对金刚石复合片进行 ELID 精密磨削,得到粗糙度为 $0.019\mu\text{m}$ 的表面如图 3 和图 4 所示。利用扫描电镜(SEM/EDS)对磨削后的表面进行观察,分析金刚石复合片的磨削过程及缺陷产生机理。金刚石复合片的 ELID 精密磨削过程包括砂轮磨粒的直接磨除、热量集中下的物理化学磨除、金刚石颗粒的挤压破裂磨除三种形式。

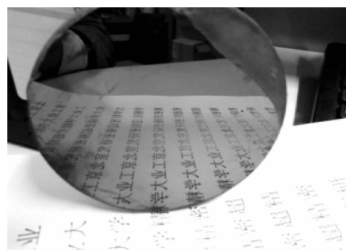


图3 磨削后的金刚石复合片

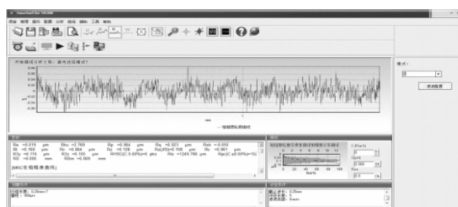


图4 加工表面粗糙度检测

4.1 砂轮磨粒的直接磨除

金刚石砂轮对金刚石复合片进行磨削时,磨粒冲击到 PDC 表面时,会产生瞬间挤压,当压应力超

过临界载荷时,就会诱发微裂纹(见图 5a);当磨粒遇到较软的结合剂部位时,该部位容易被磨粒切除,形成许多不连续的凹坑(见图 5b)。这种机械磨除贯穿整个磨削过程,由于在 ELID 精密超精密磨削过程形成的锋利磨削刃在砂轮表面随机分布且硬度不同,遇到硬度和耐磨性都很高的金刚石时不能形成切削作用,导致磨除过程缓慢,缺陷较少^[9]。

4.2 热量集中下的物理化学磨除

在金刚石复合片 ELID 精密磨削中,由于砂轮的高速旋转和较大的法向磨削力,使较多的能量转化为磨削热,金刚石复合片表面温度升高,当温度超过 350°C ,部分金刚石颗粒发生氧化和石墨化^[9-11]。随着磨削的进行,温度逐渐升高,当超过 700°C 时,就会加剧氧化和石墨化,从而降低金刚石复合片表面的硬度和耐磨度,使金刚石磨粒在其表面留划痕(见图 5c)。此外,随着温度的升高,当超过脆—塑临界点时,就会发生塑性变形,进一步降低表面硬度和耐磨度,在金刚石磨粒的冲击下产生沟犁。

4.3 金刚石颗粒的挤压破裂磨除

在金刚石复合片 ELID 精密磨削过程中,金刚石磨粒的冲击、应力集中、热量集中作用下,金刚石颗粒会发生破碎,从而引发破裂磨除^[10-12]。

金刚石复合片表面的金刚石晶粒为随机分布,并且在晶粒间存有结合剂,当外界冲击力大于金刚石晶粒间结合力时,就会在金刚石复合片表面诱发微裂纹,产生沿晶界破裂;此外,表面缺陷多的晶体,裂纹扩展具有随机性,裂纹更易发生。此时磨削产生的大量的热多集中于裂纹处,使强度低的部分首先发生破裂。由于晶粒间的结合剂和晶粒的热膨胀系数及弹性模量不同,降低了金刚石晶粒的韧性和强度,当温度升高到一定程度时,就会引发晶粒破碎,被金刚石磨粒拔除,在金刚石复合片表面形成孔洞(见图 5d)。

5 结语

通过对金刚石复合片进行 ELID 精密超精密磨削试验,得到以下结论:

(1)采用 ELID 精密磨削技术可以实现对金刚石复合片的高效精密加工,磨削缺陷小,表面形貌纹路清晰,加工质量好。

(2)当磨削深度 $0.3\mu\text{m}$ 、主轴转速 $1500\text{r}/\text{min}$ 、电源占空比 40% 、工作台移动速度 $0.025\text{mm}/\text{s}$ 、电源电压 25V 、电极间隙 1mm 时,可获得表面粗糙度为 $0.019\mu\text{m}$ 的表面。

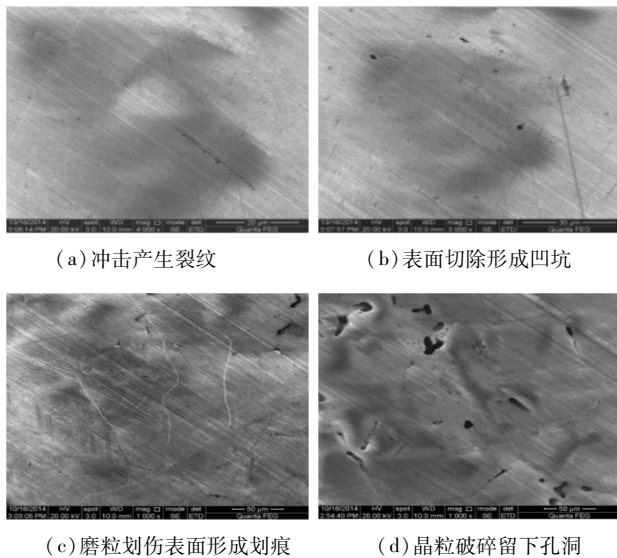


图5

(3) ELID 磨削金刚石复合片过程中形成的主要加工缺陷是:磨削冲击压力下 PDC 表面产生微裂纹,随着应力集中,裂纹扩张并出现表层局部剥落;加工过程中温升达到脆—塑临界温度时,局部发生塑性变形,出现沟犁;温度继续升高,金刚石晶粒石墨化,被压碎剥落后在表面形成孔洞并划伤表面。

参考文献

- [1] 焦淑静,高万夫. 金刚石复合片的界面转态及性能特点[J]. 金刚石与磨具工程,2004(2):61-63.
[2] 黎明发. 金刚石复合片的性能检测与发展趋势[J]. Journal of WUT (Information & Management Engineering),

- 2007,29:1-3.
[3] 陈晶晶. 聚晶金刚石复合片显微结构与性能的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
[4] 江钻股份新材料事业部. 金刚石复合片用途与制造[J]. 印刷杂志,2012(4):8-12.
[5] 马大刚. 聚晶金刚石刀具刃磨机理及其刃磨砂轮制造工艺研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
[6] 关佳亮,郭东明,袁哲俊. ELID 镜面磨削中砂轮生成氧化膜特性及其作用的研究[J]. 机械工程学报,2000,36(5):89-91.
[7] Marinescu D L, Uhlmann E, Doi T K. Handbook of lapping and polishing[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
[8] 宁生科,柯镭. ELID 磨削工艺控制研究[J]. 机械研究与应用,2014(1):60-61.
[9] 关佳亮,朱磊,孙鲁青,等. 聚晶金刚石的 ELID 精密磨削试验研究[J]. 制造技术与机床,2016(1):89-93.
[10] 李思成,屈继来,方海江. $\phi 58\text{mm}$ 聚晶金刚石复合片的合成及表征[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2016,36(1):38-42.
[11] 安磊. 聚晶金刚石精密磨削机理的研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.
[12] 李伯民,李清. 超硬工具加工与应用实例[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

第一作者:关佳亮,博士后,教授,北京工业大学机械工程与应用电子技术学院,100124 北京市

First Author: Guan Jiali, Post-Doctor, Professor, College of Mechanical and Electronic Application, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

中国“机器换人”主要战略要地

对于曾经依靠密集劳动力走向世界的“中国制造”,机器人正成为转型升级的新助力之一。在中国多地,机器人正在迅速进入制造业。在珠三角,家电业率先“机器换人”,电子信息产业紧紧跟上,汽车、纺织服装等行业也蓄势待发,一个个“无人工厂”取代了曾经工人们挥汗如雨的车间厂房。中国“机器换人”主要战略要地包括:长沙、东莞、天津、沈阳、青岛、浙江省、芜湖、上海、深圳等。

长沙:到 2017 年末,长沙将力争实现工业机器人产业产能突破 100 亿元;在全市重点工业领域实现工业机器人规模化应用,工业机器人密度达到 100 台/万人。东莞:自 2014 年起每年支出 2 亿元财政资金扶持企业“机器换人”,目前大量的机器人已运用到生产线中。天津:着力突破机器人整机、零部件设计制作与集成、机器人用材料及加工技术。沈阳:我国最重要的工业机器人生产基地之一;2015 年沈阳机器人相关业务收入超过 50 亿元,同比增长 30% 以上,产品占国产工业机器人市场份额约 20%。沈阳新松是我国工业

机器人领域的排头兵,市场份额遥遥领先。青岛:在青岛高新区规划建设占地 3000 亩的青岛市机器人产业园区,作为青岛机器人和智能制造装备产业发展的主体和核心区域。目标是到 2020 年,全市机器人产业总产值超过 100 亿元,成为国内具有影响力和竞争力的国家级机器人产业基地。浙江省:“机器换人”战略为浙江省工业机器人产业开启了巨大的应用空间。据调查,浙江省制造业使用的工业机器人总量占全国的 15% 左右,居全国第一位,工业机器人密度达到 52 台/万人,大大高出全国 36 台/万人的平均水平。芜湖:首个国字号机器人试点集聚区,截至 2016 年 2 月,芜湖市机器人产业园入驻的机器人企业共 56 家,产业规模达 70 亿元。上海:力争建设成为我国机器人产业高度集聚的研发中心、制造中心、服务中心和应用示范中心,整体实力进入世界一流阵营。2020 年全市机器人产业规模力争达到 600-800 亿元。深圳:2014-2020 年每年投资 5 亿元人民币援助机器人相关产业发展。深圳市与机器人有关的国家和省级重点实验室已达 30 处、工程实验室 16 处、工程技术研究中心 12 处、公共服务平台 7 处。