

聚晶金刚石微铣刀制备及其蓝宝石 微铣削工艺实验

巩思茜¹, 孙瑶², 李思慧²

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 利用电火花车削工艺非接触且不受材料强度和硬度限制的特性, 制备出直径小于1 mm的聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀; 建立电火花车削聚晶金刚石螺旋微铣刀的刀体结构与进给速度、转速间的内在联系及微铣刀形貌仿真模型, 解决了直径小于1 mm聚晶金刚石螺旋微铣刀的实际制备难题. 采用该工艺制备的聚晶金刚石微铣刀进行蓝宝石微铣削实验, 研究微铣削参数对蓝宝石三维表面粗糙度 S_a 、 S_z 和三向微铣削力的影响规律; 通过加工表面质量、微铣削力和刀具磨损分析, 评价电火花车削制备的聚晶金刚石微铣刀的微铣削性能. 结果表明: 聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀微铣削蓝宝石材料的面粗糙度 S_a 可稳定控制在0.76~1.00 μm , 刀具磨损形式以微铣刀底面破损为主.

关键词: 聚晶金刚石微铣刀; 电火花车削; 微铣削; 蓝宝石; 微铣削力

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)12-0078-08

Preparation of Polycrystalline Diamond Micro End Mill and Experiment of Its Micro-milling Process for Sapphire

GONG Si-qian¹, SUN Yao², LI Si-hui²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SUN Yao, E-mail: sy547515291@163.com)

Abstract: The polycrystalline diamond single-edged helical micro end mill with a diameter of less than 1 mm was fabricated using electrical discharge turning technology featuring non-contact and independence from material strength and hardness limitations. The intrinsic relationship of the tool structure of the polycrystalline diamond spiral micro end mill by electrical discharge turning relative to the feed speed and rotational speed was established, as well as the morphological simulation model of the micro end mill, which successfully solved the difficulties in preparing a polycrystalline diamond helical micro end mill with the diameter of less than 1 mm in the actual machining. The prepared polycrystalline diamond micro end mill was used to carry out experimental research on the micro-milling process of sapphire, and the influence of micro-milling parameters on the three-dimensional surface roughness S_a , S_z , and the triaxial micro-milling force of sapphire was investigated. Moreover, the surface quality, micro-milling force, and tool wear were analyzed to evaluate the micro-milling performance of the polycrystalline diamond micro end mill prepared by electrical discharge turning. The results indicate that the surface roughness S_a of the sapphire processed by the polycrystalline diamond single-edged helical micro end mill can be stably controlled within the range of 0.76~1.00 μm , and the tool wear mode is primarily characterized by damage to the bottom surface of the micro end mill.

Key words: polycrystalline diamond micro end mill; electrical discharge turning; micro-milling; sapphire; micro-milling force

随着航空航天、医疗设备、国防工业、现代生物医学和半导体行业的快速发展,对特征尺寸在微米至毫米级别的微小零部件的需求日益广泛^[1].由于尺寸较小且结构相对复杂,微小零部件的制造尤为困难.微铣削加工相较于其他加工方式,具有材料去除率高、柔性好、效率高以及能加工多种材料和复杂结构的优点^[2-3].因此,微切削技术已发展成为一项关键技术,用于克服制造微小零件时遇到的工艺局限性^[4].然而,微切削加工受微铣刀尺寸及加工精度的限制,难以加工出符合要求的微小零件.微铣刀的性能和寿命成为限制微铣削工艺发展的关键因素之一.因此,微铣刀的制备已成为微机械加工领域亟须解决的问题^[5].

与常规铣削不同,微铣削所使用的微铣刀的直径一般在 1 mm 以下,刀具体积很小,制备难度大,如果刀具的结构复杂会进一步增大制备的难度.目前,微铣刀的制备主要采用聚焦离子束加工、精密磨削、激光加工、电火花加工等工艺,其中,电火花加工因其非接触性、高效率、良好的可控性和低成本等优势,受到了国内外学者的广泛关注^[6-7].如 Egashira 等^[8]利用电火花磨削方法成功制备了直径约 20 μm 、刃口半径为 0.5 μm 的硬质合金微铣刀.Chen 等^[9]采用电火花磨削技术制备出硬质合金微铣刀并用它在铝合金表面加工出微槽和微薄壁结构.杨正杰等^[10]通过线电极电火花磨削方法制备了刀头直径为 100 μm 的微铣刀.Oliaei 等^[11]通过电火花线切割技术制备出具有微金字塔结构的聚晶金刚石刀具.Cheng 等^[12]采用电火花线切割技术加工出多晶金刚石立铣刀并开展微铣削工艺实验,结果显示其微铣削后的加工表面粗糙度可达亚微米级.Perveen 等^[13]使用不同角度 V 型槽作为工具电极,成功制备了直径约为 200 μm 的半圆形、三角形和四边形直刃微铣刀.王琛等^[14]研究了微铣刀结构参数对微铣削力和毛刺生成的影响,并通过响应曲面法优化了微铣刀的侧刃后角、底刃后角和底刃倾角.陈俊云等^[15]计算了单晶金刚石的飞秒激光烧蚀阈值,并据此制备了前后刀面粗糙度达纳米级的高质量单晶金刚石微铣刀,实验结果显示这种激光加工的金刚石微铣刀具有良好的切削性能和耐磨性.Zhao 等^[16]提出采用飞秒激光制造具有不同微阵列切削刃的金刚石刀具,以实现金刚石刀具设计的灵活性,发现激光的烧蚀速度直接影响微阵列切削刃的形成.采用磨削方法制备微铣刀时,宏观作用力和物理接触会限制微铣刀的最小

直径.飞秒激光加工和聚焦离子束加工微铣刀不受材料硬度的限制,可实现对金刚石微铣刀的制备.然而,这两种方法的效率较低且成本较高.电火花制备微铣刀的主要方法可分为电火花线切割、电火花磨削和电火花成形加工.其中,电火花线切割主要用于制备直刃和多边形微铣刀,而电火花磨削可以实现具有螺旋结构或局部回转结构的微铣刀制备.

综上所述,聚晶金刚石微铣刀的制备主要通过飞秒激光和聚焦离子束加工方法来实现.通过电火花车削工艺实现具有局部螺旋结构的聚晶金刚石微铣刀制备的相关研究相对较少.因此,本文开展直径小于 1 mm 的聚晶金刚石螺旋微铣刀的电火花车削制备工艺研究,并采用所制备的微铣刀进行蓝宝石微铣削工艺研究,通过分析微铣削加工表面质量、表面形貌、微铣削力及刀具磨损来评价电火花车削所制备微铣刀的使用性能和刀具磨损机理.本研究结果拓宽了电火花线切割加工机床的应用范围,并为聚晶金刚石螺旋微铣刀的制备提供了新的途径和方法,具有一定的理论意义和工程应用价值.

1 微铣刀制备与微铣削实验设计

1.1 实验条件及检测设备

本实验采用阿奇夏米尔 CA20 低速走丝线切割机床(如图 1 所示),其中电极丝为 $\phi 0.2$ mm 的黄铜丝,电极丝做单向走丝运动,工作液为去离子水,采用全浸入下冲液方式.在低速走丝电火花线切割机床上搭建出高精度防水回转机构,通过电火花车削工艺实现对微铣刀螺旋结构和局部回转结构的制备.在聚晶金刚石螺旋微铣刀的制备过程中,电极丝在垂直方向的进给速度为 v_s ,微铣刀基体的回转速度(工件转速)为 v_n ,工作台的水平进给速度为 v_f .由于聚晶金刚石螺旋微铣刀的加工过程是在去离子水中进行的,为指导加工工艺参数选择和降低加工盲目性,对电火花车削聚晶金刚石螺旋微铣刀的电极丝运动轨迹进行建模仿真.基于 MATLAB 软件得出电火花车削单刃螺旋微铣刀的刀头仿真结果如图 2 所示.

采用电火花车削技术制备的微型铣刀进行硬脆材料蓝宝石的微铣削工艺实验研究,如图 3 所示,微切削机床的具体技术指标如表 1 所示.实验过程中采用 FC3D60-20N 三向测力仪实时检

测力信号;实验后采用 VHX-1000E 超景深显微镜观测微铣削后蓝宝石工件表面形貌,采用 Olympus OLS4100 3D 激光共聚焦显微镜测量微铣削后的表面粗糙度.

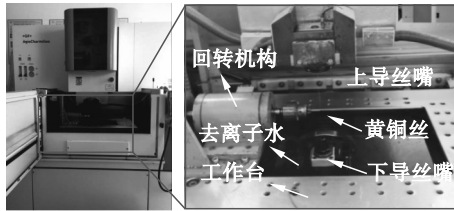


图1 阿奇夏米尔 CA20 低速走丝线切割机床

Fig. 1 Agiecharmilles CA20 low-speed wire electrical discharge machine(WEDM) tool

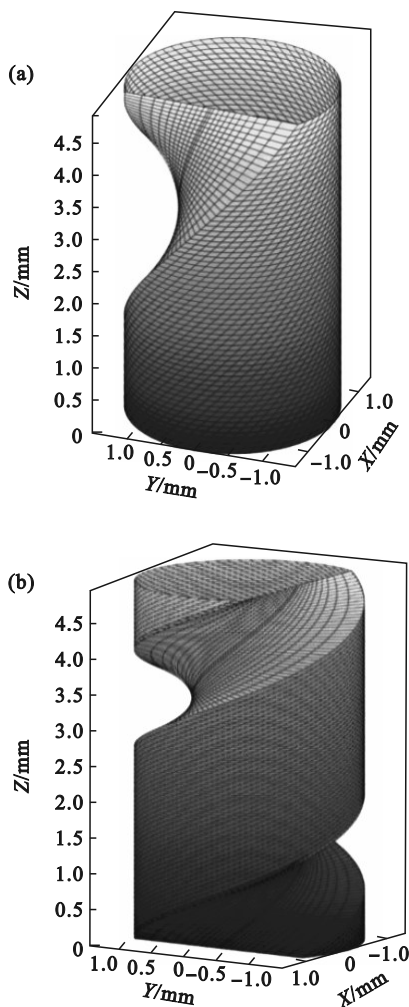


图2 电火花车削单刃螺旋微铣刀刀头的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of cutting head of single-edged helical micro end mill for electrical discharge turning

(a)— $v_f=2$ mm/s, $v_n=2$ r/min; (b)— $v_f=4$ mm/s, $v_n=1$ r/min.

1.2 实验方案

采用电火花车削聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀的主要参数如表2所示.开展聚晶金刚石单刃螺旋

微铣刀加工蓝宝石的微铣削工艺实验研究,其中微铣削深度为2~20 μm ,进给速度为10~70 $\mu\text{m/s}$.

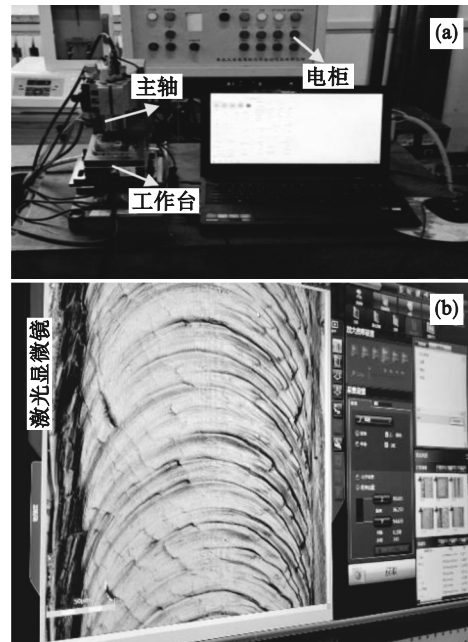


图3 自主开发的微铣削机床和激光共聚焦显微镜

Fig. 3 Independently developed micro-milling machine tool and laser confocal microscope
(a)—微铣削机床; (b)—激光共聚焦显微镜.

表1 微切削机床技术指标

Table 1 Technical specifications of micro-milling machine tool

机床的技术参数	值
机床主体外形尺寸/mm	360×200×350
X,Y,Z工作台行程/mm	50
全闭环数控系统分辨率/ μm	0.01
主轴最高转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	60 000
各向工作台最大速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	30
各向工作台最大加速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$)	2
花岗石平台底座尺寸/mm	1 000×630×750

表2 电火花车削聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀参数

Table 2 Parameters of polycrystalline diamond single-edged helical micro end mill using electrical discharge turning

参数名称	符号	单位	数值
冲液压力	p	MPa	0.1
峰值电流	I	A	120
开路电压	U	V	100
脉冲宽度	t_{on}	μs	13
工件转速	v_n	r/min	2
走丝速度	v_w	mm/s	30
丝张力	F_w	N	15
电极丝进给速度	v_s	mm/min	2

2 实验结果与讨论

2.1 聚晶金刚石螺旋微铣刀的制备结果

基于电火花车削聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀刀头的形貌仿真结果确定了加工的主要速度参数,即电极丝走丝速度 $v_w=30$ mm/s,微铣刀工件转速 $v_n=2$ r/min,工作台水平进给速度 $v_s=2$ mm/min.在此工艺参数组合下,电火花车削制备的聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀的表面形貌观测结果如图 4 所示,其中单刃螺旋微铣刀的直径约为 1 mm、螺距为 2 mm、深度为 120 μm .可以看出,电火花车削得到的聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀表面光滑,聚晶金刚石与硬质合金焊接处连接平滑,无断裂和过切现象.螺旋微铣刀的聚晶金刚石部分和硬质合金部分的截面轮廓的起伏高度变化范围可分别控制在 15 μm 和 10 μm 以内,基本满足设计要求.

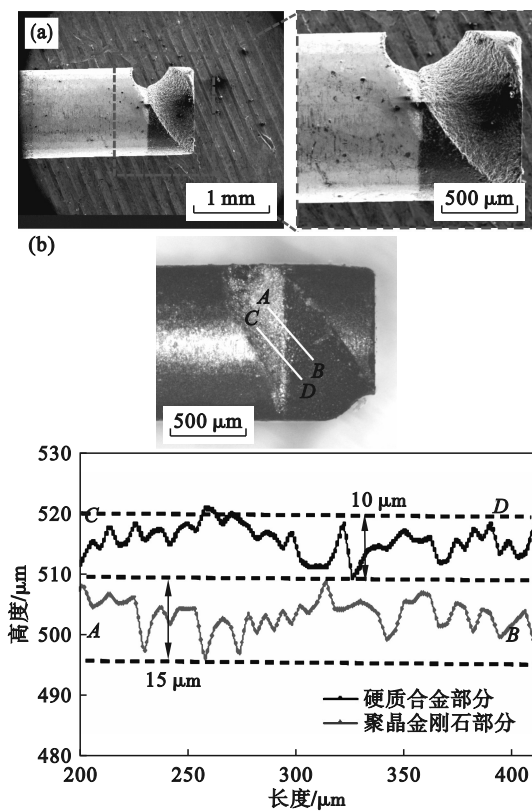


图 4 电火花车削聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀形貌和表面粗糙度观测结果

Fig. 4 Observation results of morphology and surface roughness of polycrystalline diamond single-edged helical micro end mill using electrical discharge turning

(a) 聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀扫描观测结果;
(b) 聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀的螺旋槽内的截面轮廓.

2.2 硬脆材料蓝宝石微铣削加工表面质量研究

采用所制备的聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀

开展蓝宝石微铣削工艺实验研究.实验采用 Olympus OLS4100 3D 激光共聚焦显微镜测量加工后的蓝宝石表面形貌和表面粗糙度.蓝宝石作为典型的硬脆材料,在加工过程中极易产生脆性断裂和裂纹,导致微铣削加工表面质量变差.在微铣削主轴转速 20 000 r/min、进给速度 40 $\mu\text{m/s}$ 的加工条件下,探究微铣削深度 (a_p) 的变化对表面形貌的影响规律,微铣削蓝宝石的二维和三维表面形貌如图 5 所示.可以看出,当 $a_p=5$ μm 时,聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀加工蓝宝石的表面缺陷面积较小,随着 a_p 增加到 17 μm ,表面缺陷面积明显增加.从三维形貌可以看出,当 $a_p=17$ μm 时,蓝宝石微铣削表面的高度差更大,表面起伏相对较高.为定量表征聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀加工蓝宝石的表面质量,采用算术平均高度 S_a 和面最大高度 S_z 作为表面粗糙度的评价指标.这两个评价指标采用面积作为扫描区域,检测结果相较于传统的以线长度作为扫描区域的粗糙度 R_a 和 R_z 具有更高的准确性.

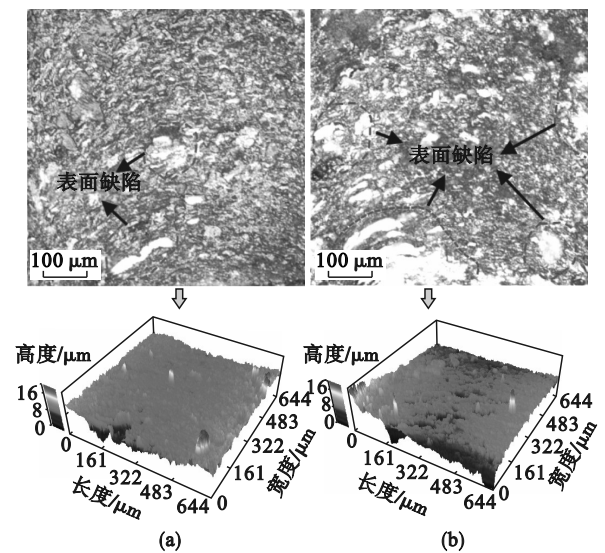


图 5 微铣削深度对蓝宝石表面形貌的影响

Fig. 5 Effect of micro-milling depth on surface topography of sapphire

(a) — $a_p=5$ μm ; (b) — $a_p=17$ μm .

此外,不同微铣削速度下聚晶金刚石螺旋微铣刀加工蓝宝石表面形貌及沿微铣刀加工方向(X方向)和垂直微铣刀加工方向(Y方向)的截面轮廓分别如图 6 和图 7 所示.当 $v_f=10$ $\mu\text{m/s}$ 时,聚晶金刚石螺旋微铣刀加工蓝宝石的表面缺陷少且表面平整光滑;当 $v_f=60$ $\mu\text{m/s}$ 时,微铣削表面缺陷增加,表面形貌起伏增大.从图 6 可以看出,聚晶金刚石螺旋微铣刀加工蓝宝石的表面一致性好.当进给速度较小时,微铣削表面

沿 X 和 Y 方向的截面轮廓的波动幅值相差不大, 随着进给速度的增加, 微铣削表面沿 X 方向的截面轮廓的波动幅值明显大于 Y 方向. 此外, 当 $v_f=10 \mu\text{m/s}$ 时, 蓝宝石微铣削表面 X 和 Y 双向的截面轮廓波动范围可控制在 $8 \mu\text{m}$; 当 v_f 增加到 $60 \mu\text{m/s}$ 时, 截面轮廓波动范围增至 $24 \mu\text{m}$. 这主要是因为随着微铣削进给速度增加, 微铣削力增大, 蓝宝石工件表面材料未被及时去除, 材料变形量增大, 表面质量下降, 进而导致微铣削表面截面轮廓变化幅值随进给速度的增加而增大.

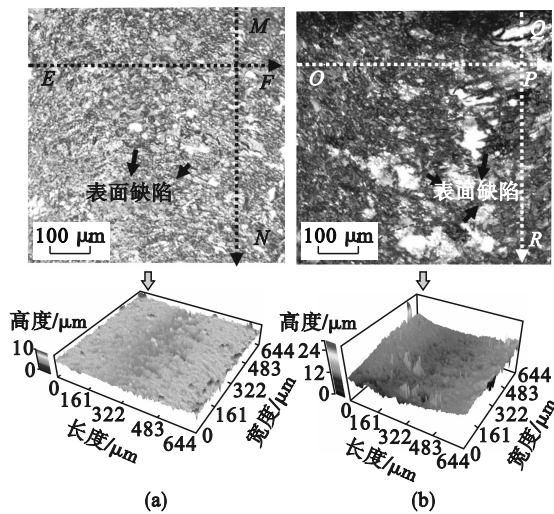


图 6 微铣削进给速度对蓝宝石表面形貌的影响
Fig. 6 Effect of micro-milling feed speed on surface topography of sapphire
(a)— $v_f=10 \mu\text{m/s}$; (b)— $v_f=60 \mu\text{m/s}$.

不同微铣削进给速度和深度对聚晶金刚石微铣刀微铣削加工蓝宝石表面粗糙度 S_a 和 S_z 的影响规律如图 8 所示. 可以看出聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀微铣削蓝宝石的表面粗糙度参数 S_a 和 S_z 随着微铣削深度和进给速度的增加均呈现先减小后增大的变化趋势. 当主轴转速为 $20\ 000 \text{ r/min}$, 铣削深度为 $11 \mu\text{m}$ 时, 随着进给速度的增加, 蓝宝石的表面粗糙度 S_a 和 S_z 呈先减小后增大的趋势, 在进给速度为 $30 \mu\text{m/s}$ 时达到最小, S_a 和 S_z 分别为 $0.74 \mu\text{m}$ 和 $25.65 \mu\text{m}$; 当进给速度达到 $70 \mu\text{m/s}$ 时, 蓝宝石的表面粗糙度 S_a 和 S_z 达到最大, 分别为 $1.03 \mu\text{m}$ 和 $33.14 \mu\text{m}$, 如图 8a 所示. 当微铣削深度 a_p 从 $2 \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $8 \mu\text{m}$ 时, 蓝宝石的表面粗糙度 S_a 从 $0.790 \mu\text{m}$ 逐渐减小到 $0.761 \mu\text{m}$, S_z 从 $26.18 \mu\text{m}$ 逐渐减小到 $25.31 \mu\text{m}$; 随着微铣削深度的进一步增加, 表面粗糙度 S_a 和 S_z 均呈现出逐渐增大的趋势, 当铣削深度为 $20 \mu\text{m}$ 时, S_a 增大到 $0.97 \mu\text{m}$, S_z 增大到 $33.03 \mu\text{m}$. 这主要是由于当微

铣削深度较小时, 切削厚度较小, 而当切削厚度小于工件的最小切削厚度时, 加工过程中不产生切屑, 主要是划擦和犁切; 微铣削深度越小, 刀具与工件之间的划擦和犁切现象越严重. 此外, 过小的微铣削深度会导致聚晶金刚石微铣刀在蓝宝石工件表面产生挤压、打滑, 对工件表面产生强烈的挤压和摩擦, 也会增大蓝宝石微铣削表面粗糙度. 因此当 $a_p=2 \mu\text{m}$ 时, 聚晶金刚石微铣刀微铣削加工蓝宝石表面质量差, 表面粗糙度较大. 当微铣削深度过大时, 会导致微铣削加工振动增大, 进而引起蓝宝石工件表面产生脆性裂纹、凹坑和刀痕等表面缺陷, 使微铣削表面质量降低.

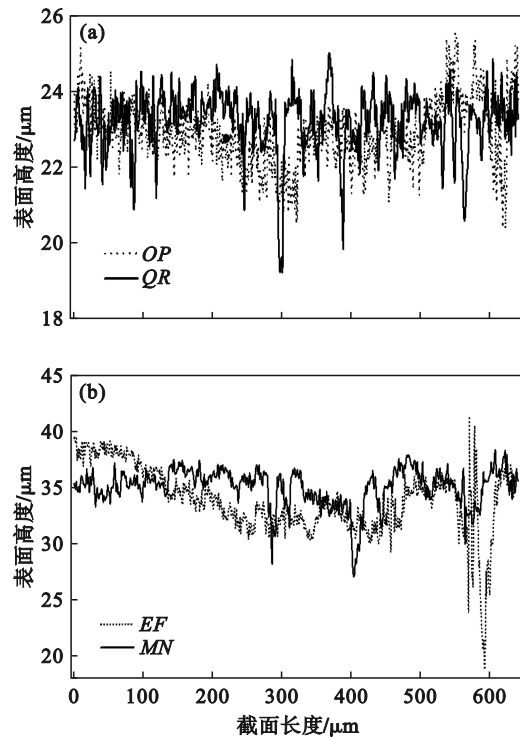
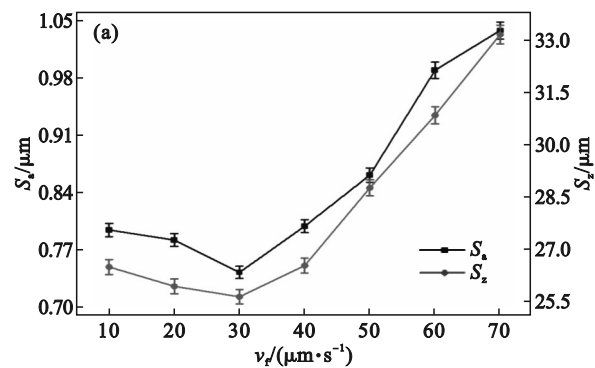


图 7 微铣削进给速度对蓝宝石表面截面(图 6)轮廓形貌的影响规律
Fig. 7 Effect of micro-milling feed speed on surface cross-sectional(Fig. 6) profile of sapphire
(a)— $v_f=10 \mu\text{m/s}$; (b)— $v_f=60 \mu\text{m/s}$.



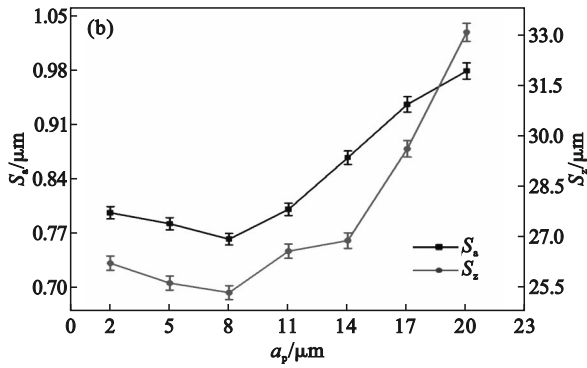


图 8 微铣削进给速度和深度对蓝宝石表面粗糙度 S_a 和 S_z 的影响规律

Fig. 8 Effects of micro-milling feed speed and depth on surface roughness S_a and S_z of sapphire

(a)—进给速度; (b)—微铣削深度.

2.3 硬脆材料蓝宝石微铣削力研究

微铣削力作为研究聚晶金刚石螺旋微铣刀加工蓝宝石材料的重要参数,其由微铣刀与硬脆材料工件物理接触及与切屑的摩擦所引起.蓝宝石微铣削加工过程中 3 个方向上的微铣削力与工件的表面完整性和微铣刀的磨损密切相关.因此需要开展聚晶金刚石螺旋微铣刀加工蓝宝石材料的微铣削力研究.采用 FC3D60-20N 三向测力仪实时监测聚晶金刚石螺旋微铣刀加工蓝宝石的力信号,得出进给速度和微铣削深度对微铣削力的影响规律如图 9 所示,其中垂直于进给方向的力为 F_x ,平行于进给方向的力为 F_y ,轴向方向的力为 F_z .由图 9a 可以看出, F_z 明显大于 F_x 和 F_y ,且随着进给速度的增加, F_y 和 F_z 均出现增大的趋势,而 F_x 变化趋势不明显.当进给速度从 $10 \mu\text{m/s}$ 增加到 $70 \mu\text{m/s}$ 时,三向微铣削力呈现先减小后增大的趋势,当进给速度为 $10 \mu\text{m/s}$ 时,微铣削力 F_x, F_y 和 F_z 分别为 $0.15, 0.07$ 和 0.34 N ;当进给速度为 $70 \mu\text{m/s}$ 时,微铣削力 F_x, F_y 和 F_z 分别增加到 $0.18, 0.17$ 和 0.54 N .这主要是由于随着进给速度增大,微铣削体积和厚度相应增大,单位时间内的功耗增大,微铣削力也随之增加.如图 9b 所示,当微铣削深度从 $2 \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $20 \mu\text{m}$ 时,聚晶金刚石螺旋微铣刀的微铣削力随深度的增加先减小后增大.当铣削深度为 $8 \mu\text{m}$ 时,聚晶金刚石螺旋微铣刀的微铣削力 F_x, F_y 和 F_z 达到最小,三向分力分别为 $0.12, 0.08$ 和 0.32 N ;当微铣削深度为 $20 \mu\text{m}$ 时,铣削力达到最大值,微铣削力 F_x, F_y 和 F_z 分别为 $0.21, 0.10$ 和 0.45 N .

随着微铣削深度的增加,聚晶金刚石螺旋微铣刀的最大未变形切削厚度增大,微铣削力增加;此外,随着微铣削深度增大,接触弧长变长,微铣削材

料的体积相应增大,材料去除量增大,微铣削力增加.由此可见,聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀加工蓝宝石材料过程中,轴向方向的力 F_z 明显大于 F_x 和 F_y ,且随着进给速度的增加, F_y 和 F_z 均出现增大的趋势,而 F_x 变化趋势不明显.随着微铣削深度 a_p 增加, F_x 和 F_z 均出现增大的趋势,而 F_y 变化趋势不明显.

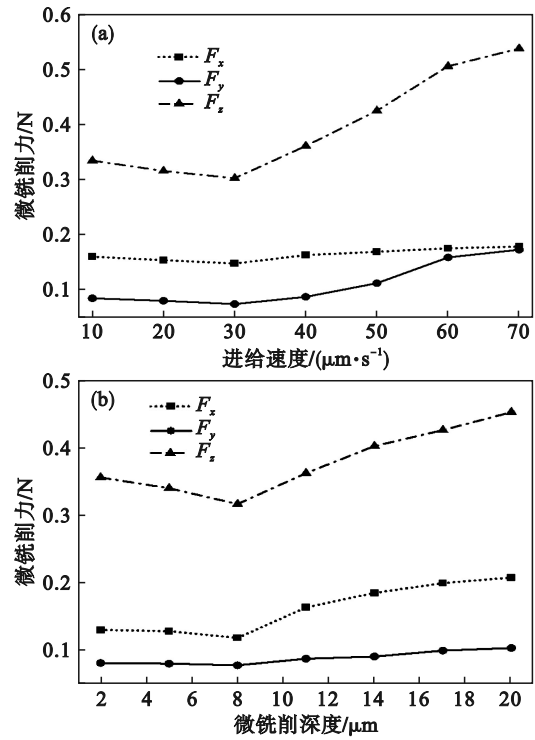


图 9 微铣削进给速度和深度对微铣削力的影响

Fig. 9 Effect of micro-milling feed speed and depth on micro-milling force

(a)—微铣削进给速度; (b)—微铣削深度.

2.4 聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀磨损研究

微铣刀的磨损相对常规宏观尺度的铣刀磨损尽管在数量级上很小,然而相对其本身的特征尺寸及微小零件的加工精度而言,这种很小的刀具磨损量将会造成较大的加工误差并且严重影响微铣刀的使用寿命.因此,需要开展聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀加工蓝宝石的磨损机理和磨损形式研究.加工后的聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀如图 10 所示.可以看出,微铣削加工后的聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀出现了较为明显的底面破损现象.这是因为在微铣削加工蓝宝石过程中,螺旋微铣刀、切屑和蓝宝石工件之间不断发生挤压和摩擦;微铣削加工中聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀受到不断冲击性载荷,而最先与蓝宝石工件发生接触的为微铣刀的刀刃部分,导致此处发生应力集中现象并产生微裂纹.由于微铣刀刀

具尺寸较小,而刀刃结构更加微小,导致微裂纹从一个自由表面扩展到另一个自由表面时即产生崩刃现象.由此可见,聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀在微铣削蓝宝石材料时刀具抗磨损能力强,主要的刀具磨损形式是微铣刀底面破损.

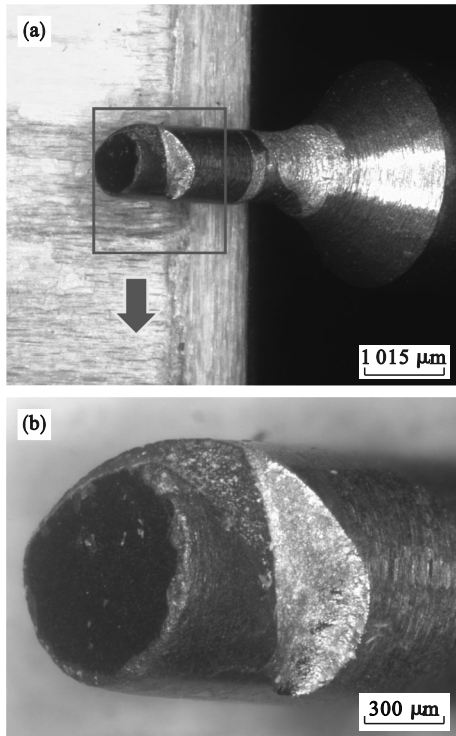


图 10 微铣削加工后聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀磨损的表面形貌观测结果

Fig. 10 Observation results of wear surface morphology of polycrystalline diamond single-edged helical micro end mill after micro-milling

(a)—加工后的聚晶金刚石微铣刀二维形貌;
(b)—加工后的聚晶金刚石微铣刀局部形貌.

3 结 论

1) 采用电火花车削工艺制备出直径约为 1 mm、螺距为 2 mm、螺旋槽深度为 120 μm 的聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀.微铣刀的聚晶金刚石部分和硬质合金部分的表面光滑,其表面形貌起伏变化范围分别可以控制在 15, 10 μm 以内,基本满足设计要求.

2) 聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀加工蓝宝石材料过程中,轴向方向的力 F_z 明显大于 F_x 和 F_y ,且随着进给速度的增加, F_y 和 F_z 均呈现增大的趋势,而 F_x 变化趋势不明显.随着微铣削深度 a_p 的增加, F_x 和 F_z 均呈现增大的趋势,而 F_y 变化趋势

不明显.

3) 聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀加工蓝宝石材料的表面质量与进给速度、微铣削深度存在非线性映射关系.表面粗糙度参数 S_a 和 S_z 随着微铣削深度的增加呈现先减小后增大的变化趋势.蓝宝石材料微铣削的面粗糙度 S_a 可稳定控制在 0.76~1.00 μm ,且聚晶金刚石单刃螺旋微铣刀的抗磨损性能良好,其磨损形式主要以微铣刀底面破损为主.

参考文献:

- [1] 陈明君, 陈妮, 何宁, 等. 微铣削加工机理研究的新进展 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 161-172.
(Chen Ming-jun, Chen Ni, He Ning, et al. The research progress of micro-milling in machining mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(5): 161-172.)
- [2] Wang M H, Zhang R Y, Shang Y C, et al. Micro-milling microstructures in air-shielding ultrasonic assisted electrochemical machining [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 97: 171-184.
- [3] Jahan M P, Ma J F, Hanson C, et al. Experimental and numerical investigation of cutting forces in micro-milling of polycarbonate glass [J]. *Machining Science and Technology*, 2020, 24(3): 366-397.
- [4] 高奇, 巩亚东, 周云光, 等. 单晶镍基高温合金 DD98 微铣削表面质量试验 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 385-389.
(Gao Qi, Gong Ya-dong, Zhou Yun-guang, et al. Experiment on surface quality in micro-milling of single crystal Ni-based superalloy DD98 [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2017, 38(3): 385-389.)
- [5] Hanson C, Hiwase P, Chen X B, et al. Experimental investigation and numerical simulation of burr formation in micro-milling of polycarbonates [J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 34: 293-304.
- [6] Edem I F, Balogun V A. Sustainability analyses of cutting edge radius on specific cutting energy and surface finish in side milling processes [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(9): 3381-3391.
- [7] Sun Y, Jin L Y, Gong Y D, et al. Experimental evaluation of surface generation and force time-varying characteristics of curvilinear grooved micro end mills fabricated by EDM [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 73: 799-814.
- [8] Egashira K, Hosono S, Takemoto S, et al. Fabrication and cutting performance of cemented tungsten carbide micro-cutting tools [J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(4): 547-553.
- [9] Chen G L, Wu Y J E, Cheng J C, et al. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM [J]. *Precision Engineering*, 2007, 31(2): 122-129.
- [10] 杨正杰, 张勇斌, 徐凌羿. 微铣刀制备技术与实验研究 [J]. 电加工与模具, 2016(3): 56-61.
(Yang Zheng-jie, Zhang Yong-bin, Xu Ling-yi. Preparation technology and experimental study of micro milling tools [J]. *Electromachining & Modle*, 2016(3): 56-61.)

(下转第 115 页)