

激光与光电子学进展

单晶锗超精密切削表面粗糙度工艺优化与试验研究

程铂涵¹, 杨晓京^{1*}, 郭彦军¹, 姚同¹, 康杰²¹昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500;²云南北方光学科技有限公司, 云南 昆明 650217

摘要 为了提高单点金刚石切削单晶锗的表面质量,进行了三因素四水平的正交试验,并采用方差分析和极差分析,研究了在单晶锗表面质量分布不均匀条件下表面粗糙度受切削参数的影响。试验结果显示:主轴转速对表面粗糙度值影响明显,而且贡献率最高,主轴转速越大,则表面粗糙度值也越小。获得的最优切削参数组合为主轴转速为 3800 r/min、进给速率为 2 mm/min、最大切削深度为 5 μm 。在此切削条件下得到了表面粗糙度为 2.4 nm 的高精度单晶锗,在扫描电镜下观察其表面质量较好,且表面也比较平滑,切削过程中的切屑呈带状,材料在塑性范围内去除。

关键词 材料;单晶锗;单点金刚石切削;切削参数;表面粗糙度

中图分类号 O484

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221420

Process Optimization and Experimental Research on Surface Roughness of Single-Crystal Germanium for Ultra-Precision Cutting

Cheng Bohan¹, Yang Xiaojing^{1*}, Guo Yanjun¹, Yao Tong¹, Kang Jie²

¹Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;

²Yunnan KIRO Photonics Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China

Abstract In order to improve the surface quality of single-point diamond cutting single-crystal germanium, the orthogonal experiment of three factors and four levels is carried out, and the effect of cutting parameters on the surface roughness under the condition of uneven surface quality distribution of single-crystal germanium is studied by variance analysis and range analysis. The test results show that the contribution rate is the highest when the spindle speed has obvious influence on the surface roughness value, indicating that the larger the spindle speed is, the smaller the surface roughness value is. As a result, an optimal combination of the cutting parameters obtained is that a spindle speed of 3800 r/min, feed rate of 2 mm/min, and maximum cutting depth of 5 μm . Under this cutting condition, high-precision single-crystal germanium with a surface roughness of 2.4 nm is obtained. Next, the surface quality is good and the surface is relatively smooth according to the scanning electron microscope. The chips during cutting are banded, and the material is removed in the plastic range.

Key words materials; single-crystal germanium; single-point diamond cutting; cutting parameters; surface roughness

1 引言

在光学领域,锗作为一种重要的半导体材料,具有超宽中红外光学透明窗口、超大折射率、良好的中红外透明传输特性、光电特性与非线性特性等特点^[1-2],被广泛用作中红外集成光路的理想材料、可调谐全固态中红外激光核心部件,以及用于制备光放大器、非线性器件与硅基光波导等^[2-4]。单晶锗加工复杂表面元件

时,要求表面粗糙度达到纳米级,面形精度达到亚微米级,因此也展现出更宽阔的应用空间^[5]。单晶锗具有各向异性、韧性低、脆性大的特点,硅的韧性约为其的两倍,因此产生的裂纹更广泛,并且在加工中经常发生基于解理表面和亚表面损伤,导致表面质量较差^[6-7]。单晶锗在加工后表面质量分布不均匀是晶体锗各向异性导致^[5],表面粗糙度呈现出亮区与暗区交错分布特征,从而影响了加工后的表面质量,降低了镜片的成像

收稿日期: 2022-04-26; 修回日期: 2022-05-24; 录用日期: 2022-06-14; 网络首发日期: 2022-06-24

通信作者: *xjyang@vip.sina.com

质量^[8]。

国内外的许多学者针对单晶锗材料微纳米切削过程中的脆塑转变与单点金刚石车削技术进行了相关研究。耿瑞文等^[9]对单晶锗进行恒载荷与变载荷纳米刻划试验,提出一种理论模型,可以用于计算单晶锗脆塑转变临界深度。罗良等^[10]采用分子动力学研究了单晶锗的各向异性对切削温度与切削力的影响。Kiran 等^[12]采用纳米压痕试验,研究了在施加压力的过程中单晶锗经历的一系列相变。Pham 等^[11]采用分子动力学模拟方法研究了锗在压痕过程中结构、变形行为、硬度、弹性模量的相关性。杨晓京等^[13-14]研究了切削速度对单晶锗表面质量影响,研究表明切削速度与表面粗糙度关系成反比。王胜等^[15]研究了工艺参数对 45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层洛氏硬度、圆柱度、表面粗糙度值、宏观形貌、显微组织以及切屑形态的影响。

单点金刚石车削 (SPDT) 常用于加工锗、硅、硫化锌等红外材料,是一种可获得纳米级表面粗糙度与亚微米的加工方式^[16-17]。单点金刚石车削 (SPDT) 与传统加工光学零件的研磨与抛光方法相比,其具有加工精度高、效率高、成本低等优势^[18]。该技术加工晶体光学元件,不仅能够保证元件的加工质量与高精度面形,还可以避免研磨抛光时磨粒的嵌入以及有利于提高激光破坏阈值,由此可以减轻晶体元件的亚表面损伤^[19]。

目前有关单晶锗的研究,大多聚焦在用刻划试验方法计算其脆塑转变深度,以及运用分子动力学等方

式研究亚表面变形和各向异性等分析,在一些超精密切削研究中,虽提出了单晶锗的加工参数及其对表面粗糙度影响趋势,却仍未能在单晶锗表面质量分布不均匀条件下进行深入研究。因此本文进行了三因素四水平的正交设计切削试验,在切削后分别对单晶锗表面扇形分布状的表面粗糙度进行了实测分析以及加工后的表面粗糙度所受切削参数影响状况,并应用方差分析和极差分析的方法,对切削参数所影响表面粗糙度进行了显著性分析,最后得到了一组最优切削参数。

2 试验条件与方案

本研究中试验材料所采用的单晶锗片,其表面晶向为 (100), 工件尺寸大小为 $\Phi 25.4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。试验设备如图 1 所示。采用德国 Innolite 的 IL600 单点金刚石车床,最大主轴转速可达 6000 r/min。金刚石刀具参数如下: 刀尖圆弧半径为 0.5 mm, 后角为 10° , 前角为 10° 。

切削试验示意图如图 2 所示,所用的单点金刚石车床的布局形式为 T 型布局,加工所用车床共有 3 个运动轴,分别是两个直线运动的 X 轴与 Z 轴,以及随着控制角度变化而进行旋转运动的 C 轴。在整个加工过程中,单晶锗片采用弹性夹具装夹,并通过真空卡盘安装在 X 轴,同时可以随着主轴一起旋转与进行 X 方向的位移。材料的去除方式是通过 C 轴与 X 轴联动,对材料进行加工去除。



图 1 加工单晶锗所用的单点金刚车床

Fig. 1 Single-point diamond lathe used for processing single-crystal germanium

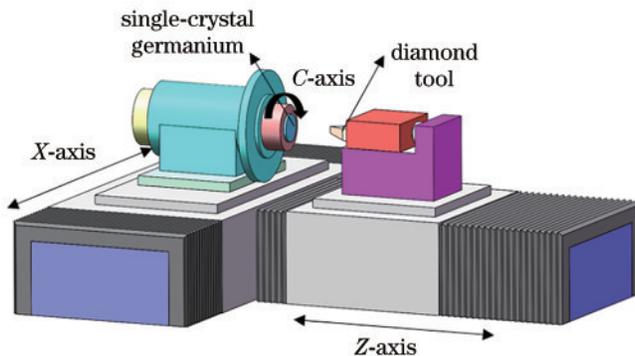


图 2 切削试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of turning experiment

切削试验是在选择不同的切削参数情况下,对单晶锗材料表面进行一系列端面切削加工,最终实现在塑性域加工。本研究开展了三因素四水平的正交试验,采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表,其中正交试验的参数如表 1 所

表 1 切削试验加工参数

Table 1 Machining parameters of turning experiment

Factors	Code	Level			
		1	2	3	4
Spindle speed $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	A	1500	2200	3000	3800
Feed rate $f / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	B	2	8	14	20
Cutting depth $a_p / \mu\text{m}$	C	5	10	15	20
Environment temperature / $^\circ\text{C}$		20			

示。整个试验过程在全程连续冷却条件下进行,每组试验进行后对单晶锗片的表面粗糙度进行测量,检测设备采用的是 Taylor Hobson PGI 1240 接触式机械轮廓仪,测量方法为对同一片单晶锗片选择 6 个不同的

方向进行测量表面测粗糙度 R_a 值,这 6 个方向相互间隔 60° 。将 0° 、 120° 、 240° 取在暗区, 60° 、 180° 、 300° 取在亮区。图 3(a) 为 Taylor Hobson PGI 1240 接触式机械轮廓仪,图 3(b) 为单晶锗片测量方向示意图。

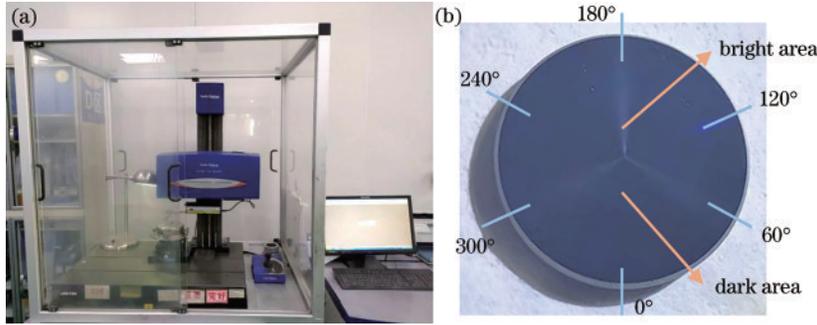


图 3 试验设备和结果。(a) Taylor Hobson PGI 1240 接触式机械轮廓仪; (b) 单晶锗片测量方向示意图

Fig. 3 Experimental equipment and results. (a) Taylor Hobson PGI 1240 contacting mechanical profiler; (b) schematic diagram of measurement direction of single-crystal germanium wafer

3 试验结果与分析

如表 2 所示,本研究单点金刚石车削单晶锗片共进行了 16 组试验的方案,图 5 为单晶锗片每次试验后不同方向的表面粗糙度 R_a 值,分析了单晶锗表面粗糙度 R_a 值受切削参数变化的影响趋势。从图 5 中不难看出,亮区所在测量角度 (60° 、 180° 、 300°) 的表面粗糙度普遍大于暗区所在测量角度 (0° 、 120° 、 240°) 的表面粗糙度。

表 2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal experimental scheme

No.	Spindle speed $f/(r \cdot \text{min}^{-1})$	Feed rate $n/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	Cutting depth $a_p/\mu\text{m}$	Dark area R_a/nm	Bright area R_a/nm
1	1500	2	5	5.03	6.90
2	1500	8	10	4.83	8.03
3	1500	14	15	10.53	12.57
4	1500	20	20	15.50	18.07
5	2200	2	10	4.57	7.23
6	2200	8	5	5.80	8.60
7	2200	14	20	10.33	14.00
8	2200	20	15	14.83	17.87
9	3000	2	15	4.83	5.53
10	3000	8	20	4.27	4.93
11	3000	14	5	6.90	9.63
12	3000	20	10	11.17	13.10
13	3800	2	20	4.90	6.23
14	3800	8	15	4.30	4.50
15	3800	14	10	5.97	8.90
16	3800	20	5	9.33	11.47

3.1 表面粗糙度的方差分析

为了研究单点金刚石车削技术的切削参数中切削深度、进给速率与主轴转速分别对单晶锗片在亮区与暗区的表面粗糙度 R_a 影响规律,本文对正交试验中表

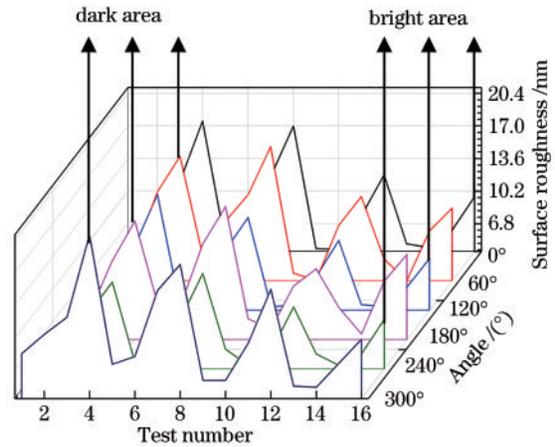


图 5 单晶锗片在各个方向的表面粗糙度值

Fig. 5 Surface roughness values of single-crystal germanium sheets in all directions

面粗糙度 R_a 值进行方差分析。

综合表 3、表 4 的方差分析结果,不难看出影响最显著的是进给速率 n , 主轴转速 f 与切削深度 a_p 的影响程度相对于进给速率 n 的影响很小。同时,切削参数影响表面粗糙度 R_a 值主次关系受单晶锗片表面质量分布不均匀的影响较小,但在影响程度上有所不同,进给速率 n 影响最显著的是在表面粗糙度较小的暗区,贡献率可达 78.57%, 主轴转速 f 对表面粗糙度较大的亮区比暗区稍加显著,而切削深度 a_p 对两种区域表面粗糙度的影响显著程度都不高,在两种区域内的贡献率分别为 1.58% 与 3.51%。

3.2 表面粗糙度的极差分析

为了研究单点金刚石车削技术的切削参数中主轴转速 f 、切削深度 a_p 与进给速率 n 分别对单晶锗在不同区域中表面粗糙度 R_a 影响规律以及得到最优切削参数组合,应用极差分析对切削参数所影响表面粗糙度进行了水平优劣分析。

表 3 单晶锗亮区表面粗糙度 R_a 的方差分析表Table 3 Analysis of variance table of surface roughness R_a of single-crystal germanium in bright area

Parameters	DF	SS	MS	F value	P value	Contribution /%
Spindle speed $f / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3	53.562	17.854	19.910	0.002	18.47
Feed rate $n / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	3	209.432	69.811	77.830	0	75.06
Cutting depth $a_p / \mu\text{m}$	3	7.056	2.352	2.620	0.145	1.58
Error	6	5.382	0.897			4.88
Total	15	275.431				100.00

表 4 单晶锗暗区表面粗糙度 R_a 的方差分析表Table 4 Analysis of variance table of surface roughness R_a of single-crystal germanium in dark area

Parameters	DF	SS	MS	F value	P value	Contribution /%
Spindle speed $f / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3	25.326	8.442	16.94	0.002	11.18
Feed rate $n / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	3	168.995	56.332	113.05	0	78.57
Cutting depth $a_p / \mu\text{m}$	3	15.867	5.289	10.61	0.008	6.74
Error	6	2.990	0.4983			3.51
Total	15	213.178				100.00

表 5 亮区表面粗糙度 R_a 的极差分析表Table 5 Range analysis table of surface roughness R_a in bright area

Level	Spindle speed (A) / $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Feed rate (B) / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	Cutting depth (C) / μm
1	11.392	6.475	9.150
2	11.925	6.517	9.317
3	8.300	11.275	10.117
4	7.775	15.125	10.808
Max-min (R)	4.150	8.650	1.658
Rank	2	1	3

表 6 暗区表面粗糙度 R_a 的极差分析表Table 6 Range analysis table of surface roughness R_a in dark area

Level	Spindle speed (A) / $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Feed rate (B) / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	Cutting depth (C) / μm
1	8.975	4.833	6.767
2	8.883	4.800	6.633
3	6.792	8.433	8.625
4	6.125	12.708	8.750
Max-min (R)	2.850	7.908	2.117
Rank	2	1	3

从表 5、表 6 的亮区与暗区表面粗糙度极差分析中可知,表面粗糙度 R_a 值受切削参数的影响主次关系为:进给速率 n 、主轴转速 f 、切削深度 a_p 。从图 5 的亮区与暗区切削参数影响表面粗糙度 R_a 值主效应图可以得出一组最优参数:亮区中得最优参数为 A4B1C1,即主轴转速 f 选择 3800 r/min,进给速率 n 选择 2 mm/min,切削深度 a_p 选择 5 μm ;暗区中最优参数为 A4B2C2,即主轴转速 f 选择 3800 r/min,进给速率 n 选择 8 mm/min,切削深度 a_p 选择 10 μm 。

3.3 切削参数影响表面粗糙度趋势

如图 6 中亮区、暗区切削参数影响表面粗糙度值 R_a 主效应图所示,图中黑色圆线表示主轴转速,主轴转速影响两种区域的表面粗糙度在总体上随着主轴转速

上升而降低,并在极差分析后两种区域的最优主轴转速为 3800 r/min。从切削过程中切屑排出角度分析,这可能是因为:当主轴转速较低时,切屑排出速度不够快,导致切屑进一步堆积,从而影响加工后表面质量;当主轴转速较高时,切屑排出速度快,堆积情况减少,从而提高加工后的表面质量。另一方面,从金刚石刀具前刀面在切削范围内的摩擦角度与形变分析:当主轴转速处于低速状态时,切削力较大,导致刀具-工件系统振动较强,因此影响了加工后表面质量;随着主轴转速的升高,切削过程中的切削力减小,引起刀具-工件系统振动减弱,从而提高加工后表面质量。

如图 6 中亮区、暗区切削参数影响表面粗糙度值 R_a 主效应图所示,图中红色圆线代表进给速率,两种区

域中进给速率与表面粗糙度之间的关系成正比。在进给速率处于低速状态时,表面粗糙度变化较小,而当进给速率较高时,表面粗糙度变化极为显著。从尺寸效应角度分析可知:在进给速率较小时,由于剪切角的存在,切削力不大,材料很少发生脆性断裂,因此加工后的表面质量较高;在进给速率较大时,剪切角减小甚至可能消失,此时材料会发生脆性断裂,进而使加工后表面质量较差。此外,当单晶锆属于硬脆材料,进给速率较高时,切削温度也会随之升高,刀具磨损严重,从而导致表面质量较差。进给速率较低时,当低于最大未变形切屑厚度时会出现耕犁现象,此时的切削比能较

大,效率过低。

如图 6 中亮区、暗区切削参数影响表面粗糙度值 R_a 主效应图所示,图中蓝色圆线表示切削深度,两种区域中切削深度与表面粗糙度之间的关系总体相同,随着切削深度增加而增加。从切削层面积分析,随着切削深度的增加,切削层面积增加,刀具与工件之间的摩擦增加,切削力也随之增大,导致加工后表面粗糙度增大。从切屑方面分析,切削温度与切削深度关系成正比,当切削深度逐步增加时,切削温度升高,使得切屑并未完全剥离工件表面,导致表面粗糙度增加。

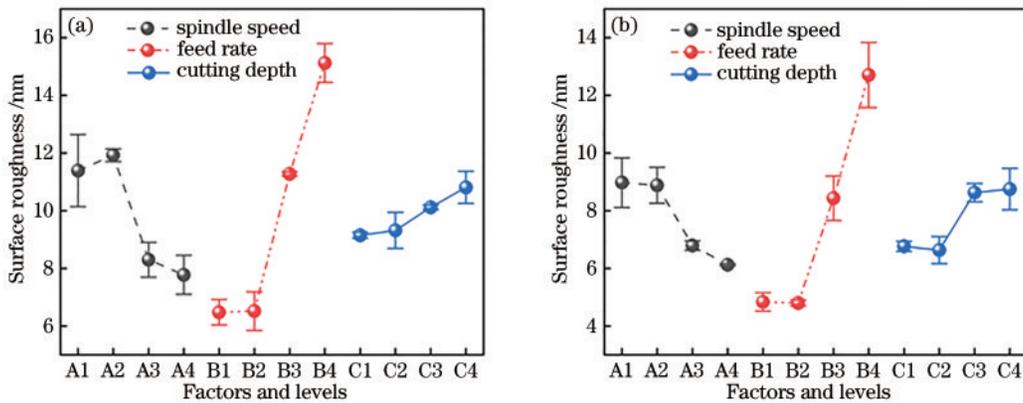


图 6 切削参数影响表面粗糙度值 R_a 主效应图。(a)亮区;(b)暗区

Fig. 6 Main effect diagrams of cutting parameters affecting surface roughness R_a value. (a) Bright area; (b) dark area

根据上述在表面质量分布不均匀条件下切削参数影响表面粗糙度的极差分析,得到了一组最优切削参数,即主轴转速 3800 r/min,进给速率 2 mm/min,切削深度 5 μm 。主轴转速在两种区域上影响趋势总体上都为随着主轴转速升高表面粗糙度降低,最优主轴转速为 3800 r/min。两种区域中的最优进给速率不同,在亮区与暗区主效应图中,在进给速率处于较低状态时的表面粗糙度值分别为 6.475 nm、6.517 nm 与 4.833 nm、4.8 nm,两种条件下的表面粗糙度值相差并不大,但两种条件下的平均值比进给速率 2 mm/min 时的更小,所以选择 2 mm/min 为最优进给速率。在切削深度为 5 μm 和 10 μm 时,亮区与暗区的表面粗糙度值分别为 9.15 nm、9.317 nm 与 6.767 nm、6.633 nm,两种条件下的表面粗糙度值相差并不大,但两种条件下的平均值是切削深度 5 μm 时的更小,所以选择 5 μm 为最优切削深度。

3.4 最优切削参数试验加工

前文研究了在单晶锆片表面质量分布不均匀的条件下,切削参数影响表面粗糙度趋势。研究结果表明,在较高的主轴转速与较低的进给速率与切削深度的条件下,在单晶锆脆塑区域都能获得较好的表面质量。为了验证本研究结果的有效性,还需要采用最优切削参数对单晶锆片进行切削试验并进行检测,最优切削

参数如下:主轴转速 $n=3800$ r/min,进给速率 $f=2$ mm/min,切削深度 $a_p=5$ μm 。采用 Taylor Hobson PGI 1240 接触式机械轮廓仪对试验后的单晶锆片进行表面形貌测量,测量结果如图 7 所示,表面粗糙度 R_a 值为 2.4 nm。最后采用扫描电镜对最优切削参数切削试验后单晶锆片表面形貌进行测量,图 8(a)为测量后的结果,从图中不难看出,在最佳切削参数条件下表面质量较好,表面相对比较光滑。图 8(b)为在扫描电镜下观测切削试验过程中收集的单晶锆切屑,可以看出,长度与宽度分别约为 36 μm 和 7.7 μm ,切屑呈连续带状,说明材料在塑性域内去除。

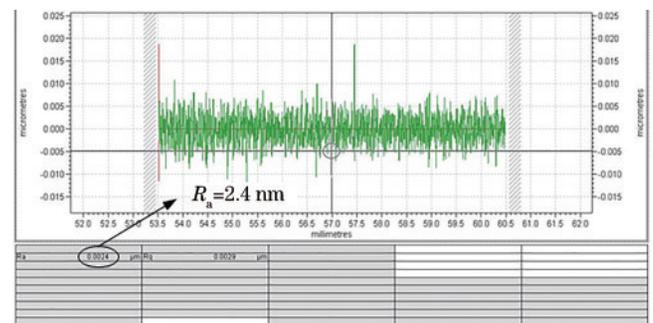


图 7 最优切削参数条件下的表面粗糙度 R_a 值

Fig. 7 Surface roughness R_a values under optimal cutting parameters

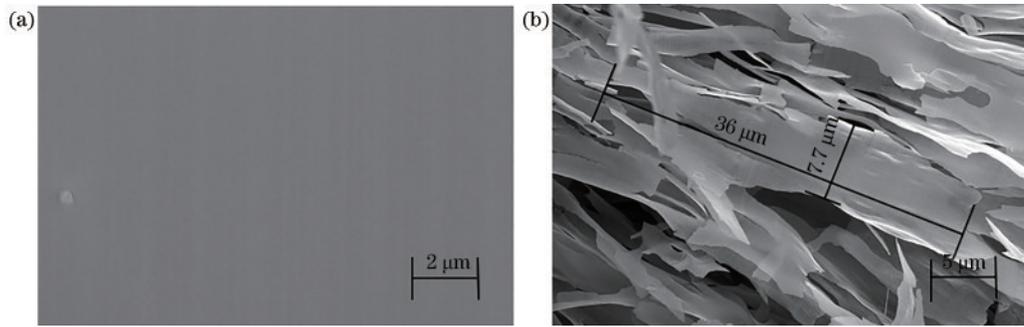


图 8 最优切削参数条件下的形貌图。(a) 表面形貌；(b) 切屑形貌

Fig. 8 Topography under optimal cutting parameters. (a) Surface topography; (b) chip topography

4 结 论

本文采用正交设计切削试验,研究了在单晶锗片表面质量分布不均匀的条件下,切削参数影响表面粗糙度趋势。得到以下结论:

1) 切削参数中影响表面粗糙度最显著的因素是进给速率 n ,而主轴转速 f 与切削深度 a_p 的影响程度相对于进给速率 n 的影响很小,表面粗糙度较小的暗区受进给速率 n 的影响较大,表面粗糙度较大的亮区受主轴转速 f 的影响比暗区稍加显著。

2) 极差分析表明,表面粗糙度 R_a 值受切削参数的影响主次关系为进给速率 n 、主轴转速 f 、切削深度 a_p 。主轴转速的变化与表面粗糙度趋势成反比,进给速率 n 与切削深度 a_p 的变化与表面粗糙度成正比。

3) 综合分析,最优切削参数组合为主轴转速 $n=3800$ r/min,进给速率 $f=2$ mm/min,切削深度 $a_p=5$ μ m,加工后的表面粗糙度可达 2.4 nm。

参 考 文 献

- [1] 何建,陈娜,陈振宜,等.激光热处理对硅锗芯石英包层光纤成分分布的影响[J].激光与光电子学进展,2021,58(3):0306001.
He J, Chen N, Chen Z Y, et al. Effects of laser thermal processing on composition distribution of SiGe core silica cladding fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0306001.
- [2] 郭荣翔,高浩然,程振洲,等.中红外锗基集成光电子研究进展[J].中国激光,2021,48(19):1901002.
Guo R X, Gao H R, Cheng Z Z, et al. Advances on mid-infrared germanium integrated photonics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1901002.
- [3] 袁泽锐,窦云巍,方潘,等.大口径超低吸收系数中红外磷锗锌晶体与器件制备[J].中国激光,2022,49(1):0101023.
Yuan Z R, Dou Y W, Fang P, et al. Fabrication of mid-infrared ZnGeP₂ crystals and devices with large apertures and ultra-low absorption coefficients[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101023.
- [4] Ji X Y, Lei S M, Yu S Y, et al. Single-crystal silicon optical fiber by direct laser crystallization[J]. ACS Photonics, 2017, 4(1): 85-92.
- [5] 苗实,史国权,石广丰,等.单晶锗各向异性对加工表面粗糙度的影响[J].机械科学与技术,2017,36(1):89-94.
Miao S, Shi G Q, Shi G F, et al. Effect of germanium single-crystal anisotropy on roughness of cutting surface[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(1): 89-94.
- [6] 姜峰,李剑峰,孙杰,等.硬脆材料塑性加工技术的研究现状[J].工具技术,2007,41(8):3-8.
Jiang F, Li J F, Sun J, et al. Research actualities of ductile machining for hard and brittle materials[J]. Tool Engineering, 2007, 41(8): 3-8.
- [7] 杜鹃,李占杰,宫虎,等.硬脆材料加工诱导崩边断裂的机理分析及控制方法研究[J].机械科学与技术,2013,32(10):1451-1455.
Du J, Li Z J, Gong H, et al. Study on the mechanisms and control method of edge chipping fracture in the machining of brittle and hard materials[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(10): 1451-1455.
- [8] 夏晓光,张宇.锗单晶的各向异性对单点金刚石切削的影响[J].新技术新工艺,2014(2):110-112.
Xia X G, Zhang Y. Effects of germanium single-crystal anisotropy in SPDT[J]. New Technology & New Process, 2014(2): 110-112.
- [9] 耿瑞文,杨晓京,谢启明,等.基于划刻实验的单晶锗材料去除机理研究[J].无机材料学报,2019,34(8):867-872.
Geng R W, Yang X J, Xie Q M, et al. Material removal mechanism of monocrystalline germanium based on nano-scratch experiment[J]. Journal of Inorganic Materials, 2019, 34(8): 867-872.
- [10] 罗良,杨晓京,刘宁,等.单晶锗纳米切削温度场分布及各向异性对切削温度的影响研究(英文)[J].稀有金属材料与工程,2019,48(4):1130-1134.
Luo L, Yang X J, Liu N, et al. Nano-cutting temperature field distribution and the influence of anisotropy on cutting temperature of single crystal germanium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(4): 1130-1134.
- [11] Pham V T, Fang T H. Interfacial mechanics and shear deformation of indented germanium on silicon (001) using molecular dynamics[J]. Vacuum, 2020, 173: 109184.

- [12] Kiran M S R N, Haberl B, Bradby J E, et al. Nanoindentation of silicon and germanium[M]// Semiconductors and semimetals. Amsterdam: Elsevier, 2015, 91: 165-203.
- [13] 杨晓京, 刘浩, 赵彪, 等. 切削速度对单晶锗脆塑转变的影响[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(4): 80-84.
Yang X J, Liu H, Zhao B, et al. Effect of cutting speed on brittle plastic transition of single crystal germanium[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(4): 80-84.
- [14] 赵彪. 单晶锗微纳米切削脆塑转变机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
Zhao B. Research on brittle-ductile transition mechanism of single crystal germanium in micro-nano scale[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [15] 王胜, 郑志谊, 周明安, 等. 45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层的工艺参数对熔覆层车削性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114010.
Wang S, Zheng Z Y, Zhou M G, et al. Influence of laser cladding parameters on turning performance of laser-cladded 316 stainless steel coating on 45 steel surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114010.
- [16] 隋博, 霍富荣, 李闯, 等. 红外衍射光学模芯的超精密车削工艺与优化[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 1312004.
Sui B, Huo F R, Li C, et al. Ultra-precision turning process and optimization of infrared diffraction optical mold insert[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 1312004.
- [17] 高翔, 李闯, 坎金艳, 等. CaF₂ 衍射光学元件的金刚石车削工艺优化[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2205001.
Gao X, Li C, Kan J Y, et al. Optimization of diamond turning process for CaF₂ diffractive optical elements[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2205001.
- [18] Mukaida M, Yan J W. Ductile machining of single-crystal silicon for microlens arrays by ultraprecision diamond turning using a slow tool servo[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 115: 2-14.
- [19] 康战, 聂凤明, 刘劲松, 等. 红外光学元件的单点金刚石精密数控车削加工技术研究[J]. 新技术新工艺, 2010(4): 76-79.
Kang Z, Nie F M, Liu J S, et al. Research on single point diamond precision numerical control turning technique for infrared crystal optical parts[J]. New Technology & New Process, 2010(4): 76-79.