

飞秒激光精密减薄石英玻璃凹槽实验

吴东江 周思雨 马广义 姚龙元

大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要 为实现石英玻璃表面凹槽的飞秒激光精密减薄加工,采用线扫描-面减薄的工艺手段,研究脉冲能量对烧蚀线槽形貌的影响,并以此为基础开展不同烧蚀线重叠率 δ 的单层凹槽减薄实验,通过激光共聚焦显微镜对凹槽的槽深、侧壁角和底面粗糙度等形貌特征进行观测和分析。研究表明,当 $40\% \leq \delta \leq 80\%$ 时,随着 δ 的增大,凹槽深度增大、侧壁角减小;当 $\delta=40\%$ 时,凹槽的槽深、槽宽、侧壁角分别为 $14.56 \mu\text{m}$ 、 $261.8 \mu\text{m}$ 和 59.1° 。凹槽底面粗糙度 R_a 和 R_z 随 δ 的增大而减小,当 δ 为80%时分别达到最小值 $0.19 \mu\text{m}$ 和 $1.23 \mu\text{m}$;平行于扫描速度方向的轮廓算数平均偏差 R_a' 和微观不平度十点高度 R_z' 随 δ 的增大呈现先减小后增大的趋势,当 δ 为80%时, $R_a' \approx R_a$ 、 $R_z' \approx R_z$;轮廓三维均方根偏差 S_q 随 δ 的增大逐渐减小,最小值为 $0.16 \mu\text{m}$ 。

关键词 激光技术; 飞秒激光; 石英玻璃; 烧蚀形貌; 表面粗糙度

中图分类号 TN249; O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0303009

Experiment of Quartz Glass Flute Precise Thinning by Femtosecond Laser

Wu Dongjiang Zhou Siyu Ma Guangyi Yao Longyuan

Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract In order to realize the precisely thinning of flute on the surface of quartz by femtosecond laser, the line-surface ablation process means are taken to study the effects of the pulse energy on the ablation morphology of groove, and the ablation experimental research of flute with different line overlap rates δ are carried out. The laser scanning confocal microscope is used to observe and analyze the depth, bottom surface roughness and other morphology features of flute. The results show that when the line overlap rate δ satisfies $40\% \leq \delta \leq 80\%$, with the increase of δ , the depth and sidewall angle of flute decrease, when δ is 40%, the depth, width and sidewall angle of groove is $14.56 \mu\text{m}$, $261.8 \mu\text{m}$ and 59.1° , respectively. The bottom surface roughness decreases as well, when δ is 80%, R_a and R_z reach the minimum of $0.19 \mu\text{m}$ and $1.23 \mu\text{m}$, respectively. The profile fluctuation parallel to scanning speed increases at first then decreases, when $\delta=80\%$, $R_a' \approx R_a$, $R_z' \approx R_z$; The root mean square of bottom surface S_q decreases with the increase of δ , S_q reaches the minimum of $0.16 \mu\text{m}$ when δ is 80%.

Key words laser technique; femtosecond laser; quartz glass; ablation morphology; surface roughness

OCIS codes 140.3390; 230.4000; 320.2250

1 引 言

飞秒激光加工具有阈值效应明显、热影响区极小、能突破衍射极限精度和对透明材料进行三维加工等特点,因而广泛应用于微纳制造领域^[1-4]。但在某些器件表面同样较多涉及到相对宏观尺度结构的制备,如

收稿日期: 2014-09-11; 收到修改稿日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51175061)、创新研究群体科学基金资助项目(51321004)、国家青年科学基金(51402037)、中国博士后科学基金(2014M551072)

作者简介: 吴东江(1964—),男,教授,主要从事激光精密制造技术领域的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

石英玻璃表面大面积凹槽的减薄等,由于石英材料具有高硬易碎的特性,传统的加工方法很难在其表面实现精密去除,飞秒激光由于具有上述特征,为在石英材料表面进行大面积凹槽制备提供了一种新方法。

相关学者对石英玻璃的飞秒激光加工开展了广泛的研究,主要包括飞秒激光改性后腐蚀、水辅助飞秒激光烧蚀和飞秒激光直接烧蚀去除三种方法。改性后腐蚀的加工方法可以进行任意复杂空心结构的加工,Bellouard等^[5]利用飞秒激光改性后腐蚀的方法在石英玻璃内部和表面分别制备大深宽比的通道和微槽等结构。水辅助烧蚀方法可以使得加工过程中产生的碎屑及时被带离,保证加工的持续进行,Li等^[6]利用水辅助飞秒激光烧蚀的方法,在石英玻璃后表面进行钻孔,得到直径为4 μm ,深度大于200 μm 的深孔。上述两种方法的加工精度虽然较高,对高深宽比通道等复杂微纳结构的加工具有较大优势,但改性腐蚀的方法腐蚀时间一般在3 h以上,加工效率低,同时具有腐蚀速度不均匀等缺点;水辅助烧蚀工艺复杂,且对加工设备要求高。在制备石英玻璃表面宏观大面积凹槽时,要求较高的加工效率,同时碎屑有足够的空间排出,因此采用加工效率较高、工艺和设备相对简单的飞秒激光直接去除工艺更具优势。

飞秒激光直接去除线槽结构的研究较多^[7-9],主要集中在激光加工参数对线槽烧蚀形貌影响规律的分析。但相关文献报道中对飞秒激光直接烧蚀制备大面积表面凹槽的研究较少,仅有吴东江等^[10]研究了偏振态对飞秒激光加工石英玻璃表面质量的影响,但其烧蚀面存在两边低的特征,使得底面平整度较低,且没有对凹槽几何特征进行研究。因此鉴于实际需求,有必要开展飞秒激光直接烧蚀制备大面积、小槽深、大侧壁角和高底面平整度凹槽的实验研究。

本文以石英玻璃为研究对象,基于线扫描-面减薄的工艺手段,首先确定优化的线槽烧蚀参数,并在此参数下开展不同线重叠率的单层凹槽减薄实验,对凹槽的形状及底面形貌进行观察分析,为凹槽微结构的精密加工提供指导。

2 实验方法

采用北京理工大学机械与车辆工程学院提供的高功率飞秒激光系统,该系统由飞秒激光振荡器和啁啾脉冲放大系统组成。其中,飞秒激光振荡器为美国Spectral Physics公司的钛蓝宝石自锁模飞秒激光器;飞秒激光放大系统则为钛蓝宝石再生激光放大系统,输出脉宽35 fs,中心波长800 nm,重复频率1 kHz,光强近高斯分布,偏振方向平行于扫描速度方向,激光平均功率在0~3 W内连续可调,并由功率计进行能量在线检测;光斑直径为8 mm的脉冲光束通过焦距为3.1 mm、数值孔径为0.45的透镜垂直聚焦到样品前表面,聚焦后光斑束腰半径为6 μm 。实验采用德国Physik Instrumente公司的移动平台,型号为M-840.5DG,X、Y轴移动精度为1 μm ,Z轴为0.5 μm ,实验过程中,飞秒激光位置固定,激光束沿Z轴传播,加工通过样品的相对运动实现;利用CCD实时监控加工状况。

实验材料为10 mm×10 mm×1 mm石英玻璃,表面粗糙度值为25 nm,实验前、后均用无水乙醇和去离子水超声清洗。利用光学显微镜(Olympus-MX40F)和激光共聚焦显微镜(Olympus-OLS4000)对加工凹槽形状及形貌进行观测和测量。

3 结果与分析

3.1 线槽烧蚀形貌分析

石英玻璃表面凹槽的加工以线槽烧蚀为基础,得到优化的线槽烧蚀参数是实现高质量凹槽高效加工的必要条件。为了避免扫描速度过大导致的线槽不连续性和扫描速度过小引起的热累积效应,优化扫描速度 ν 为0.2 mm/s。脉冲能量是飞秒激光烧蚀过程中的主要参数,其直接影响了材料的去除率和烧蚀形貌,通过激光共聚焦显微镜拍摄不同脉冲能量 E_p 下的凹槽烧蚀形貌,如图1所示。

图1(a)中脉冲能量 E_p 为4 μJ ,石英玻璃表面的辐照能量密度较小,材料的去除方式主要为蒸发和库伦爆炸^[11],加工表面光洁度高,几乎无再沉积颗粒,线槽底面出现狭窄的平面特征,底部烧蚀物的自由度较大,烧蚀物较易从底面喷射,因此线槽具有良好的烧蚀形貌,测量此参数下线槽宽度为4.7 μm ,深宽比约为2。图1(b)中 E_p 为8 μJ ,去除方式以库伦爆炸为主,同时伴有轻微的液相爆破,线槽同样具有较好的烧蚀形貌,槽宽为

10 μm , 深宽比约为0.6。图1(c)~(e)中 E_p 分别为12、16、20 μJ , 此时激光能量密度较大, 液相爆破主导整个烧蚀过程^[12], 材料去除率虽然较高, 但加工过程中产生的熔融烧蚀物凝固后滞留在线槽内部, 使得线槽底部粗糙度较大, 同时导致线槽边缘直线度显著下降, 线槽烧蚀形貌变差。分析可知, 图1(a), (b)具有良好的烧蚀形貌, 且图1(b)中线槽深宽比明显小于图1(a), 采用较小深宽比的线槽进行凹槽减薄可以在提高加工效率的同时大幅降低槽深。因此采用扫描速度为0.2 mm/s、脉冲能量为8 μJ 的加工参数来进行凹槽减薄实验, 可以在获得良好烧蚀形貌的同时提高加工效率、降低凹槽深度。

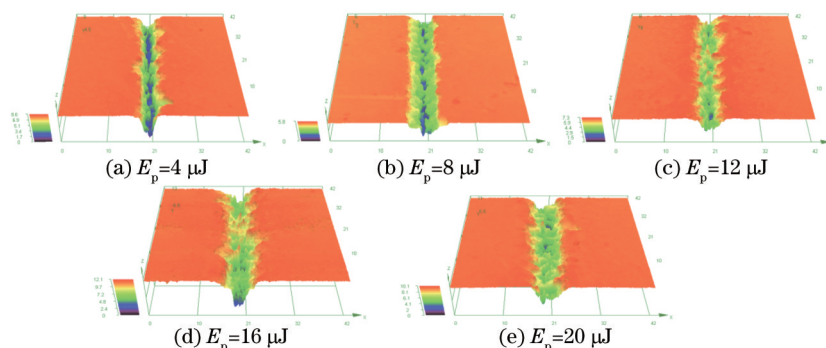


图1 不同脉冲能量的线槽三维烧蚀形貌

Fig.1 Three-dimensional ablation morphology of grooves with different pulse energy

3.2 凹槽烧蚀形状分析

基于上述线烧蚀优化参数, 在脉冲能量为8 μJ , 扫描速度为0.2 mm/s条件下研究不同线重叠率 δ 的凹槽加工质量。由于工作台在起停阶段扫描速度较小、脉冲重叠率较高, 会导致烧蚀凹槽底面呈现中间高两边低的凸起特征^[10], 为了得到平整的烧蚀底面, 采用较大的扫描长度, 并对扫描速度达到稳定处的凹槽中心位置进行研究, 凹槽的大小为1200 $\mu\text{m} \times 260 \mu\text{m}$ 。分别采用 δ 为40%、60%和80%的线重叠率进行凹槽去除实验, 将样品放入无水乙醇中超声清洗30 min后, 利用光学显微镜对3个凹槽的整体形貌进行观测, 如图2所示。

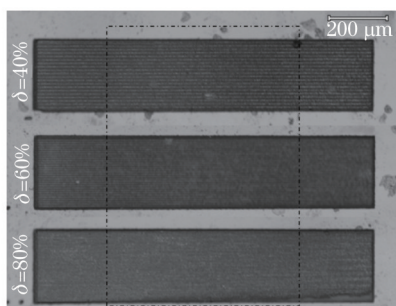


图2 超声清洗后的凹槽整体形貌

Fig.2 Morphology of flutes after ultrasonic cleaning

观察图2中虚线框内凹槽中心位置的三维图像如图3所示, 可以看出烧蚀凹槽底面平面度较高, 并未呈现由于工作台加速和减速所造成的凸起特征, 且凹槽边缘具有很高的直线度。当 δ 为40%和60%时, 凹槽底面存在平行于扫描速度方向的条纹结构, 随着 δ 的增大, 条纹间距逐渐减小, 当 $\delta = 80\%$ 时, 从图3(c)中几乎观察不到明显条纹结构。

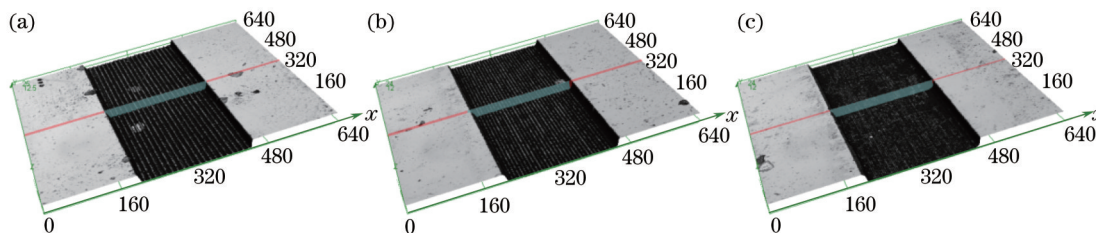


图3 不同线重叠率的凹槽三维形貌

Fig.3 Three-dimensional morphology of flutes with different line overlap rates

凹槽的加工精度主要由槽深、槽宽和侧壁角的尺寸精度来保证,因此对不同重叠率下凹槽加工形状研究具有重要意义,对图3所示凹槽中心位置处的截面形状进行分析,由于凹槽截面为对称图形,只提取左侧截面轮廓曲线如图4所示。凹槽的侧壁轮廓存在显著波动,线重叠率越大,侧壁波动越剧烈。其原因在于,对于固定的烧蚀线宽,选用的线重叠率越大,达到相对稳定的烧蚀深度所需的叠加线条数越多,对侧壁造成的冲击次数也越多,同时侧壁轮廓在横向的投影长度越长,因此侧壁轮廓波动越剧烈。为定量表征侧壁的倾斜程度,按照图4所示的测量方式测量凹槽侧壁倾角 α 的大小,同时将不同线重叠率下烧蚀凹槽的槽深 H 、槽宽 W 和侧壁角 α 值列于表1,其中槽深为样品表面到凹槽底面波动中心线的距离。

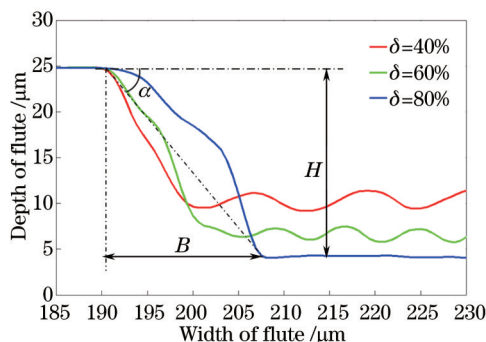


图4 凹槽横截面轮廓曲线

Fig.4 Cross section shape of flutes

分析表1可知,3个凹槽宽度精度较高,与规定的260 μm 槽宽的相对误差均在5%以内。槽深随线重叠率的减小而逐渐增大,且增幅变缓,其主要原因是烧蚀深度较大时,光斑聚焦平面与加工表面的垂直距离较大,激光束发散程度越高,烧蚀能力越弱,因此烧蚀深度增加不明显,可以预测当由于线重叠率的增大使得烧蚀深度超过焦深时,槽深将不再随线重叠率而变化。虽然 H 随 δ 的增加而增加,但由于线间距不同,使得底面达到平稳波动所需要长度 B 同样随 δ 的增加而增加,且 H 增幅小于 B ,因此凹槽的侧壁角反而随线重叠率的增大而减小。综上所述,减小线重叠率既可以减小凹槽深度又可以增大侧壁角,同时能保证凹槽宽度精度,有利于提高凹槽加工质量。

表1 凹槽的形状特征参数值

Table 1 Shape characteristic parameters of flutes

δ	$W / \mu\text{m}$	$H / \mu\text{m}$	$\alpha / (^\circ)$
40%	261.8	14.56	59.1
60%	265.7	18.01	57.7
80%	268.6	20.51	47.8

3.3 底面烧蚀形貌分析

凹槽底面的平整度对槽深的加工精度控制具有直接影响,因此对凹槽底面加工形貌的研究具有重要意义。利用激光共聚焦显微镜观测凹槽底部烧蚀形貌,如图5所示。从图5(a)、(b)中可以看出 δ 为40%和60%时,烧蚀凹槽具有明显的条纹结构,且条纹波峰处沿着扫描速度方向存在微小的波动,这种波动是由于沿着扫描速度方向的单脉冲冲击造成的。从图5(c)中可以发现 δ 为80%的底面同样存在条纹结构,但条纹波动周期和幅值明显减小。

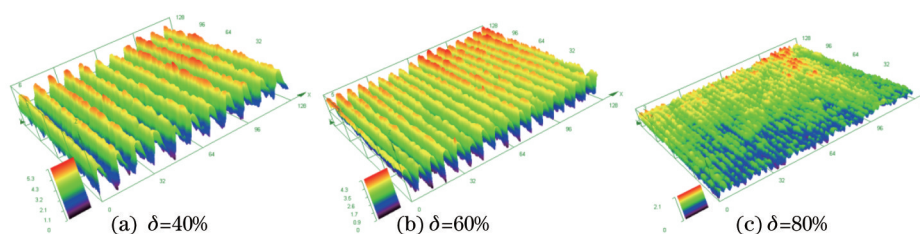


图5 不同线重叠率凹槽底面三维烧蚀形貌

Fig.5 Three-dimensional morphology of bottom surfaces with different line overlap rates

底面条纹的俯视图如图6所示,从图中可以更清晰地看到明暗相间的规则条纹结构,条纹周期 λ 随 δ 的增大而增大, δ 为40%、60%和80%时所对应线偏移间距 Δd 分别为6、4、2 μm ,测量可知其底面条纹周期 λ 分别为12、8、4 μm ,底面条纹波动周期为烧蚀线间距的两倍。

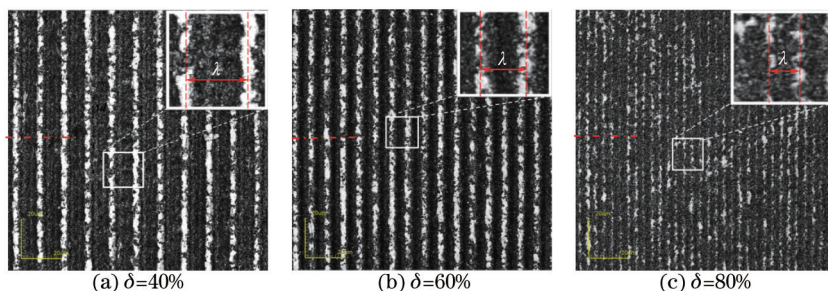


图6 不同线重叠率凹槽的底面俯视图

Fig.6 Top views of bottom surfaces with different line overlap rates

若每一条扫描烧蚀线对凹槽的加工作用相同,其叠加后的凹槽底面条纹的周期 λ 应与线间距 Δd 相等,为了研究两倍于线间距的条纹周期形成原因,提取图6虚线位置处的底面条纹轮廓曲线如图7(a)所示,对 δ 为40%的轮廓曲线进行分析,波动曲线中的两个波谷之间的距离即为波动周期12 μm ,而一个周期内又存在两个较小的波动,其周期为6 μm ,与线间距相同。此结果表明每一条烧蚀线都对凹槽的形成产生影响,但影响程度不同:在扫描方向上脉冲重叠率较高,第一条扫描脉冲会对其烧蚀位置及其附近区域产生较大影响,使得加工表面对激光的吸收率降低,同时使石英玻璃的内部微结构和晶态等产生改变,形成变质层^[13],变质后的材料较难被随后的第二条扫描脉冲所去除,导致第二条扫描去除量和影响区域都较小,几乎不会对第三条扫描脉冲的烧蚀产生影响,如此深浅交替的线烧蚀叠加方式导致了两倍于线间距的底面波动周期的产生,其示意图如图7(b)所示。图7(a)、(b)中圈出的曲线变化规律相同,验证了理论解释的正确性。同时可以预测,当线重叠率减小到一定程度时,变质层几乎不会对后续加工产生影响,周期为扫描间距两倍的现象会消失。从图7(a)中还可以发现,随着线重叠率的增大,条纹的波动幅值也呈现减小趋势。

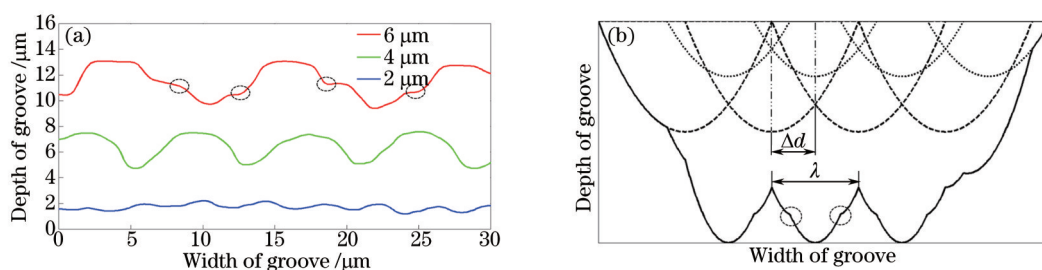


图7 凹槽横截面轮廓曲线。(a)垂直于 ν 方向条纹;(b)凹槽烧蚀过程示意图

Fig.7 Cross section profile curve of the flutes. (a) Cross-section of stripe; (b) diagram of ablation

测量不同线重叠率烧蚀底面的轮廓算数平均偏差 R_a 和微观不平度十点高度 R_z 的大小如图8(a)所示,由于底面沿扫描速度方向存在明显的定向条纹特征,因此选取粗糙度的测量方向为垂直扫描速度方向。从图中可以看出 R_a 和 R_z 随 δ 的增大而显著降低,在 δ 为80%时分别达到最小值0.19 μm 和1.23 μm 。说明采用较高的 δ 可以显著降低底面条纹波动,从而得到较小的底面粗糙度,但 δ 的数值不宜过大,否则会出现由于脉冲重叠率过高而导致的熔融结构^[10],相反会大幅提高底面粗糙度。

为定量比较平行和垂直于扫描速度方向的轮廓波动程度,对平行 ν 方向轮廓算数平均偏差 R_a' 和微观不平度十点高度 R_z' 进行测量,其随 δ 的变化规律如图8(b)所示,由于 δ 为40%和60%时平行于 ν 方向的脉冲重叠率远高于垂直方向,因此 R_a' 和 R_z' 的数值远小于 R_a 和 R_z ,二者随 δ 的增大呈现先减小后增大的趋势,在 $\delta=60\%$ 时分别达到最小值0.14 μm 和0.91 μm ,分析认为,随着 δ 的增大,脉冲重叠率增大;当 $40\% \leq \delta \leq 60\%$ 时,脉冲重叠率不是很高,脉冲作用次数的增多有利于 ν 方向轮廓波动的减弱^[14],使得 R_a' 和 R_z' 数值下降;当 $60\% < \delta \leq 80\%$ 时,脉冲的重叠率过大,过于剧烈的微爆烧蚀反而会增大 R_a' 和 R_z' 数值。当 $\delta=80\%$ 时, $R_a \approx R_a'$ 、 $R_z \approx R_z'$,说明此时凹槽底面两个方向的轮廓波动程度近似相同。

传统上用于表面特征评定的粗糙度测量仅基于一段二维轮廓,尚不能全面准确地反映凹槽底面形态。三维粗糙度参数从区域表面而非轮廓轨迹获得,具有整体特性,因此其统计特性好、误差小,与二维分析法相比具有明显的优势。运用 S_q 值作为三维粗糙度表征参数,其中 S_q 为取样区域的表面三维均方根偏差,其计算式为

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy} \quad (1)$$

式中取样区域 A 为处于凹槽中心位置的大小为 $230 \mu\text{m} \times 230 \mu\text{m}$ 的矩形区域, $z(x,y)$ 表示坐标为 (x,y) 的取样点相对于名义高度的偏距。 S_q 随线重叠率的变化规律如图8(c)所示,随着线重叠率的增大, S_q 呈近线性减小规律,当线重叠率为80%时达到最小值 $0.16 \mu\text{m}$,说明随着 δ 的增大,底面的整体平整度提高。

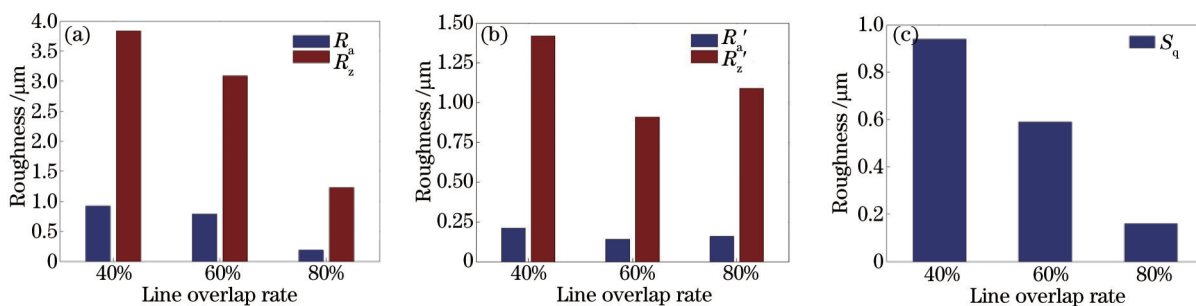


图8 凹槽底面粗糙度参数随线重叠率的变化规律。(a) R_a 和 R_z 值;(b) R_a' 和 R_z' 值;(c) S_q 值

Fig.8 Relationship between roughness of bottom and line overlap rate. (a) R_a and R_z perpendicular to ν ; (b) R_a and R_z parallel to ν ; (c) S_q

可见,在一定范围内,采用较大的线重叠率会减小底面粗糙度,但同时会带来槽深增大、侧壁角减小、加工效率降低等影响,因此在加工中应根据实际要求,权衡线重叠率对凹槽形状和底面粗糙度的影响,选取最优的线重叠率参数。

4 结 论

基于线扫描叠加烧蚀的工艺手段,研究了飞秒激光减薄石英玻璃凹槽的形状及形貌特征,并对不同线重叠率烧蚀凹槽的槽深、槽宽和底面粗糙度等参数进行定性和定量的对比分析,得到以下结论:

- 1) 当 ν 为 0.2 mm/s 时,随着脉冲能量的增大,烧蚀线槽形貌逐渐变差、深宽比逐渐减小,当脉冲能量为 $8 \mu\text{J}$ 时,能够得到烧蚀形貌较好且深宽比较小的线槽,此参数适用于凹槽加工。
- 2) 当烧蚀线重叠率满足 $40\% \leq \delta \leq 80\%$ 时,随着 δ 的增大,凹槽的烧蚀深度增大、侧壁角减小、槽宽几乎不变, δ 为40%时凹槽的槽深、槽宽和侧壁角分别为 $14.56 \mu\text{m}$ 、 $261.8 \mu\text{m}$ 和 59.1° 。
- 3) 当烧蚀线重叠率满足 $40\% \leq \delta \leq 80\%$ 时,随着 δ 的增大,凹槽底面粗糙度逐渐减小;当 δ 为80%时, R_a 和 R_z 的最小值分别为 $0.19 \mu\text{m}$ 和 $1.23 \mu\text{m}$,且底面条纹波动周期为线间距的二倍; ν 方向的 R_a' 和 R_z' 在 δ 为60%时分别达到最小值 $0.14 \mu\text{m}$ 和 $0.91 \mu\text{m}$;底面三维均方根偏差 S_q 在 δ 为80%时取得最小值 $0.16 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al.*. Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, (1): 0103003.
杨 焕,黄 珊,段 军,等. 飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J]. 中国激光, 2013, (1): 0103003.
- 2 Zhang Xuejiao, Ye Qing, Qu Ronghui, *et al.*. Research on damage on transparent electro-optic ceramic surface induced by nanosecond and femtosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0706002.
张学娇,叶 青,翟荣辉,等. 纳秒和飞秒激光对透明光电陶瓷表面损伤研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0706002.
- 3 Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0201001.
夏 博,姜 澜,王素梅,等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.
- 4 Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 219-225.

- 5 Bellouard Y, Said A, Dugan M, *et al.*. Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching[J]. *Opt Express*, 2004, 12(10): 2120-2129.
- 6 Li Y, Itoh K, Watanabe W, *et al.*. Three-dimensional hole drilling of silica glass from the rear surface with femtosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(23): 1912-1914.
- 7 Zhu Z Q, Li G Q, Li J W, *et al.*. Self-driven flow in surface grooves fabricated by femtosecond laser[J]. *Surf Coat Tech*, 2014, 242: 246-250.
- 8 Hendricks F, der Au J A, Matylitsky V V. High aspect ratio microstructuring of transparent dielectrics using femtosecond laser pulses: method for optimization of the machining throughput[J]. *Appl Phys A*, 2014, 117(1): 149-153.
- 9 Yang Chengjuan, Mei Xuesong, Wang Wenjun, *et al.*. Femtosecond laser ablation on gold-chromium film[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 61-65.
杨成娟, 梅雪松, 王文君, 等. 金铬薄膜的飞秒激光烧蚀加工[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 61-65.
- 10 Wu Dongjiang, Yao Longyuan, Ma Guangyi, *et al.*. Influence of polarization state on surface quality of femtosecond laser ablation quartz glass[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(2): 021006.
吴东江, 姚龙元, 马广义, 等. 偏振态对飞秒激光加工石英玻璃表面质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(2): 021006.
- 11 Zhao Qingliang, Jiang Tao, Dong Zhiwei, *et al.*. Ablation threshold and material removal mechanisms of SiC processed by femtosecond laser[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(21): 172-177.
赵清亮, 姜涛, 董志伟, 等. 飞秒激光加工SiC的烧蚀阈值及材料去除机理[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(21): 172-177.
- 12 Qi Litao, Hu Jinping, Yu Xinwei. Experimental study on femtosecond laser micromachining of microstructures on sapphire[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology*, 2012, 22(3): 297-302.
齐立涛, 胡金平, 于信伟. 飞秒激光在蓝宝石晶体表面加工微细结构的实验研究[J]. *黑龙江科技学院学报*, 2012, 22(3): 297-302.
- 13 Wang Yanshen, Wang Bo, Dong Shen, *et al.*. High-energy femtosecond laser induced collateral damage on silicon and glass[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(B5): 44-47.
王延深, 王波, 董申, 等. 高能量飞秒激光脉冲对硅和玻璃的附带损伤[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(B5): 44-47.
- 14 Crawford T H R, Borowiec A, Haugen H K. Femtosecond laser micromachining of grooves in silicon with 800 nm pulses[J]. *Appl Phys A*, 2005, 80(8): 1717-1724.

栏目编辑: 宋梅梅