

皮秒激光烧蚀 K9 玻璃后表面损伤研究

郝艳飞^{1,2}, 孙明营^{1*}, 时双¹, 潘雪¹, 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 考察了利用皮秒激光烧蚀切割 K9 玻璃过程中后表面的烧蚀损伤现象, 比较了前、后表面的烧蚀特性, 分析了激光能量密度、扫描次数和扫描速度等因素对后表面损伤的影响。根据后表面烧蚀形貌和质量, 优化了激光单行单次扫描时的激光能量密度和扫描速度等参数。讨论了后表面烧蚀损伤的机理, 提出了抑制后表面损伤的方法。实验结果表明, 激光聚焦在前表面进行烧蚀切割时, 后表面会出现严重的烧蚀损伤, 且后表面烧蚀形貌和规律与前表面的显著不同。

关键词 激光制造; 后表面损伤; 皮秒激光; 烧蚀; K9 玻璃

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0102015

Research on Rear Surface Damage in Picosecond Laser Ablation of K9 Glass

Hao Yanfei^{1,2}, Sun Mingying¹, Shi Shuang¹, Pan Xue¹, Zhu Jianqiang¹

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The rear surface ablation damage phenomenon is investigated in the process of picosecond laser ablation cutting of K9 glass. The ablation qualities on the front and rear surfaces are compared, and the influences of laser fluence, scanning times and scanning speed, etc., on the rear surface damage are studied. Based on the ablation morphology and quality on the rear surface, the laser fluence, scanning speed, and other parameters at the cutting condition of single line and single pass are optimized. The ablation and damage mechanism of rear surfaces is discussed and the potential approach to suppress the rear surface damage is proposed. Experimental results show that, when the laser beam is focused on the front surface and the ablation cutting occurs, the rear surface is seriously ablated and damaged, and the morphology and ablation rule on rear surface are significantly different from those on front surface.

Key words laser manufacturing; rear surface damage; picosecond laser; ablation; K9 glass

OCIS codes 140.3440; 140.3390; 160.3380; 140.3380

1 引言

超短脉冲激光与宽禁带材料相互作用时具有显著优势^[1]: 能量沉积与材料去除两个物理过程在时间尺

收稿日期: 2016-08-21; 收到修改稿日期: 2016-09-23

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室开放研究基金(SKL2014KF05)、中国科学院高功率激光物理重点实验室基金(CXJJ-16S040)

作者简介: 郝艳飞(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光损伤机理方面的研究。E-mail: xueersi138@sina.com

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: sunmy@siom.ac.cn

度上是分离的,热效应较小;材料对激光能量的非线性吸收有利于实现微纳米尺度的精细加工。因此,超短脉冲激光烧蚀在透明介质微加工中应用广泛^[2-3],包括切割、钻孔、微结构制造等。利用超短脉冲激光烧蚀切割玻璃是重要应用之一^[4-8]。烧蚀切割时超短激光脉冲常聚焦在样品前表面,烧蚀速率和质量是两个关键指标,国内外学者广泛研究了激光和系统参数等对烧蚀切割速率和质量的影响^[4-7]。烧蚀过程会引入附带的损伤,因此在提高微加工速度的同时,保证切割质量极其重要。超短脉冲激光与透明介质相互作用时热效应较小,但前表面烧蚀切割时烧蚀坑附近仍会存在一定厚度的热影响区域,甚至存在微裂纹^[8-10]。当切割玻璃样品的厚度小于激光瑞利长度时,激光束在样品中传输可近似为平行光束,前表面烧蚀过程中透射的激光束会入射到后表面,在后表面产生附带损伤^[6,11-12],降低了烧蚀切割质量,需要额外的工序进行再处理。因此,研究后表面损伤的诱因和规律对于解决超快激光烧蚀切割玻璃过程中的后表面损伤问题具有重要意义。

本文对皮秒激光聚焦在 K9 玻璃前表面进行烧蚀切割时后表面的烧蚀损伤规律与特点进行了研究,探究了后表面烧蚀损伤的物理机理。

2 实验装置和方案

实验采用自主搭建的皮秒激光系统^[13],主要包括锁模振荡器、再生放大器和四程放大器。激光系统参数为:输出的激光脉宽 8.6 ps,光束直径 3 mm,中心波长 1053 nm,重复频率 1 Hz,水平偏振,脉冲能量 10 mJ,能量输出稳定性优于 1%。皮秒激光烧蚀实验装置示意图如图 1 所示,其中 HR 为高反镜,CCD 为电荷耦合器件。皮秒激光系统输出的激光脉冲经过半波片和偏振片组成的能量控制系统,被焦距为 100 mm 的透镜聚焦后,入射到玻璃样品。样品放置在三维位移平台上,位移精度为 0.1 μm ,最大位移速度为 30 mm/s。能量监测系统和光束分析系统可分别在线监测激光脉冲能量和样品表面的激光光斑。经过透镜聚焦后样品表面的激光焦斑为近高斯分布,如图 2(a)所示,焦斑半径为 50 μm ,面积为 0.0039 mm^2 。在线显微成像系统可实时观测样品前后表面的烧蚀情况。

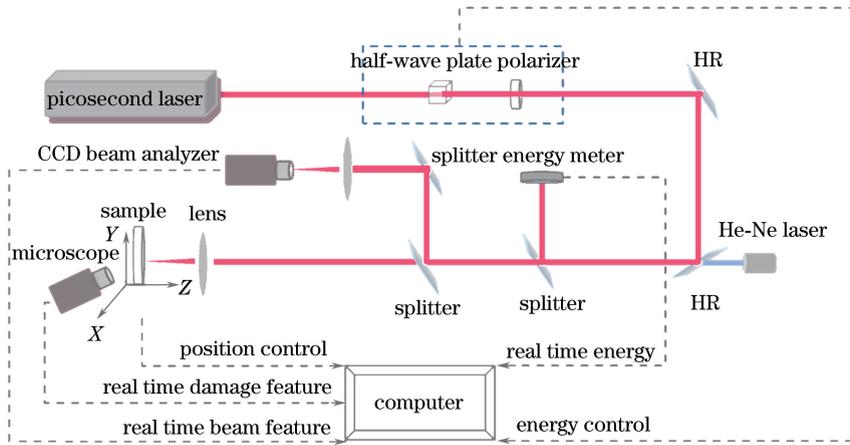


图 1 皮秒激光烧蚀实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for picosecond laser ablation

实验中使用直径为 30 mm、厚度为 3 mm 的 K9 玻璃作为样品,当入射光波长为 1053 nm 时,样品折射率为 1.51。实验前所有样品放入纯度大于 99.9%(体积分数)的无水乙醇中超声清洗 3 min,然后置于超净间自然风干。激光垂直于样品表面入射,通过控制位移平台的移动来实现激光在样品表面的扫描烧蚀,激光脉冲在样品表面的扫描方式如图 2(b)所示。激光聚焦在玻璃样品前表面,前表面为激光入射面,后表面为激光出射面。焦斑半径为 50 μm ,而瑞利长度约为 7.4 mm,远大于样品厚度(3 mm),激光光束在样品体内传输时近似为平行光束。考虑离焦产生的有效光斑面积变化,前表面能量密度为后表面的 1.16 倍,前后表面的能量密度基本相同,因此,文中涉及的入射激光能量密度均采用前表面的能量密度表示。实验后对皮秒激光烧蚀样品进行详细表征,利用数码显微镜对样品表面的烧蚀区域进行二维损伤形貌表征和三维轮廓测量,并利用扫描电子显微镜对损伤微观形貌进行了观测。

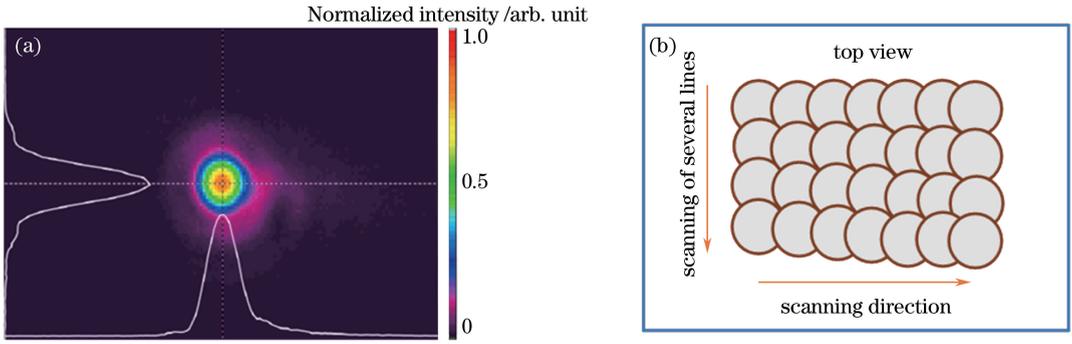


图 2 (a) 皮秒激光光束远场光斑形貌; (b) 激光烧蚀切割扫描方式

Fig. 2 (a) Far-field light spot morphology of picosecond laser beam; (b) scanning scheme of laser ablation cutting

3 实验结果

为了研究皮秒激光烧蚀玻璃过程中后表面烧蚀机理和规律,首先研究了单脉冲和多脉冲辐照固定样品时前表面和后表面的烧蚀特性,并基于单脉冲激光烧蚀实验结果获得了烧蚀阈值能量密度;然后研究了不同激光能量密度和扫描参数时的烧蚀规律,对后表面的烧蚀切割质量进行了初步参数优化;最后对实验结果进行了深入讨论。

3.1 烧蚀阈值

样品表面的激光光斑的能量呈高斯分布,如图 2(a)所示。由能量密度与光束半径和烧蚀阈值的关系^[14]可知,烧蚀坑直径 D 与激光峰值能量密度 F 的关系为

$$D^2 = 2\omega_0^2 (\ln F - \ln F_{th}), \quad (1)$$

式中 ω_0 为光束束腰半径, F_{th} 为烧蚀阈值能量密度。烧蚀坑横向尺寸随激光能量密度的增大而增加。因此,将单激光脉冲作用下烧蚀直径 D 为 0 时对应的能量密度值作为实验中测量的激光烧蚀阈值。在 $4 \sim 40 \text{ J/cm}^2$ 之间选取了 11 个能量密度,对 K9 玻璃样品进行了单脉冲激光辐照烧蚀。根据烧蚀坑尺寸与激光能量密度的关系,分别获得了 K9 玻璃前表面和后表面的烧蚀损伤阈值,拟合曲线如图 3 所示。由拟合曲线与横坐标轴的交点可以得到前表面烧蚀阈值为 8.57 J/cm^2 ,后表面烧蚀阈值为 3.82 J/cm^2 ,前表面烧蚀阈值是后表面烧蚀阈值的 2.24 倍。由于 K9 玻璃的折射率大于空气的折射率,激光正入射时,激光脉冲在玻璃前表面反射时产生了 π 的附加相移,反射与入射的激光电场振幅相干减弱;而在后表面反射时没有发生相位变化,电场振幅相干增强,导致后表面附近产生了较强的电场干涉增强效应,使得后表面的激光强度为前表面的 1.5 倍左右^[15]。因此考虑到测量误差,激光强度在后表面的干涉增强是后表面烧蚀阈值较低的主要原因。

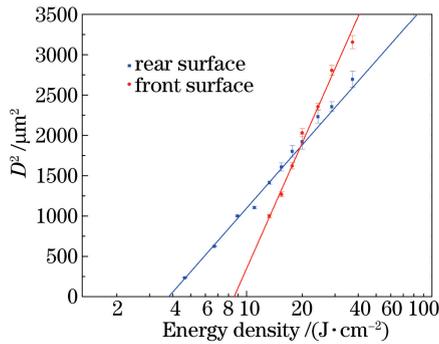


图 3 K9 玻璃前表面和后表面烧蚀阈值测量结果

Fig. 3 Measurement results of ablation thresholds on front and rear surfaces of K9 glass

利用基于(1)式的拟合曲线来确定烧蚀阈值的方法应用于后表面时具有一定的局限性。首先,当样品前表面在高能量密度脉冲作用下发生烧蚀损伤时,光束中心区域的激光能量被消耗,经过衍射传输到后表面的激光束不再是严格的高斯光束,不再满足(1)式的前提假设,所以基于(1)式确定的后表面烧蚀阈值存在一定

的偏差。但是,实验过程中采用基于一对一损伤测试方法测量了后表面激光烧蚀阈值,其结果与通过拟合曲线确定的烧蚀阈值基本一致。所以采用图 3 所示的拟合曲线方法得到的后表面烧蚀阈值具有一定的可信度。其次,玻璃平板对聚焦光束可能存在一定的变换作用,即平板前表面对入射光束的折射效应和平板厚度对聚焦光束的离焦效应。如第 2 节所述,激光聚焦在前表面,激光焦斑半径为 $50\ \mu\text{m}$,激光瑞利长度约为 $7.4\ \text{mm}$,远大于样品的厚度,因此激光光束入射到样品表面时和在玻璃平板体内传输时均可认为是平行光束。激光束在平板前表面入射时近似为垂直入射,前表面对入射光束的折射效应可以忽略。后表面光斑面积约为前表面的 1.16 倍,前表面能量密度是后表面的 1.16 倍。因此前后表面光束面积的变化对烧蚀阈值的影响较小,可以忽略。

随着激光能量密度的增加,样品前表面和后表面的烧蚀坑直径的变化情况也不相同,如图 3 所示。随着激光能量密度的增加,激光烧蚀首先发生在后表面;继续增加能量密度,前表面开始出现烧蚀坑点,此时样品的前表面和后表面均发生了烧蚀。但前表面烧蚀是预期的,而后表面烧蚀是附带的损伤。随着能量密度的进一步增加,前表面烧蚀面积的增长速度明显大于后表面,并且在 $20\ \text{J}/\text{cm}^2$ 左右时,前表面烧蚀坑直径超过后表面。

3.2 样品固定时前表面和后表面的烧蚀特性

为了较清晰地分析后表面烧蚀损伤特性和机理,简化了相关实验参数,即激光辐照时,玻璃样品相对激光脉冲固定;与激光钻孔类似,研究了单脉冲和多脉冲激光辐照后,玻璃样品前表面和后表面的烧蚀规律。当激光能量密度为 $13.3\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,单脉冲与多脉冲激光辐照后,样品前表面与后表面烧蚀弹坑区域形貌图以及相应的烧蚀坑二维轮廓如图 4 所示。图 5 为图 4 红线标记处横切面的烧蚀坑二维轮廓图。在单脉冲作用下,前表面烧蚀形貌为凸起的包络,后表面烧蚀形貌为下凹的不规则包络面。随着脉冲数目的增加,前表面和后表面烧蚀坑的直径和深度均增大。无论是单脉冲还是多脉冲烧蚀过程,烧蚀坑形貌变化最剧烈的位置均在激光光斑中心位置。

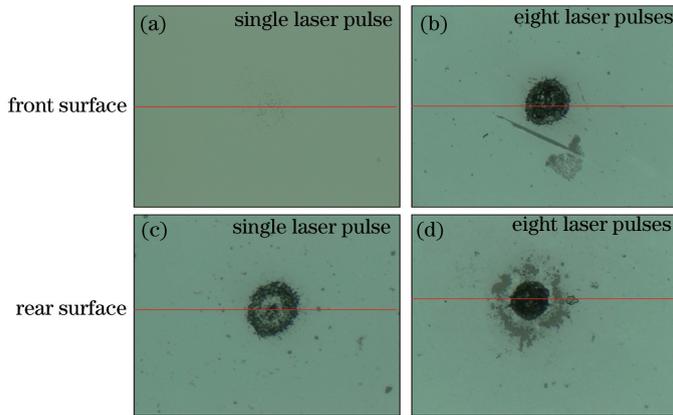


图 4 当能量密度为 $13.3\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,单脉冲和 8 个脉冲激光辐照后的(a)(b)前表面和(c)(d)后表面的烧蚀形貌

Fig. 4 Ablation morphologies of (a)(b) front and (c)(d) rear surfaces irradiated by single pulse and eight pulses with laser fluence of $13.3\ \text{J}/\text{cm}^2$

在不同激光能量密度下,后表面烧蚀坑深度与脉冲数目的关系如图 6 所示。不同能量密度辐照时,烧蚀深度随脉冲数目的变化趋势为类对数增长。当脉冲数量小于 5 时,烧蚀弹坑的轮廓近似为山丘形状,如图 4(c)所示;随着脉冲数目增加,烧蚀坑深度增大,轮廓逐渐变为角锥的形状,如图 4(d)所示;当脉冲数目大于 30 时,烧蚀坑演变为喇叭形状,深度趋于饱和。后表面烧蚀深度饱和效应是前表面烧蚀坑对透射到后表面的激光束的调制效应决定的。当脉冲数目较小时,烧蚀坑较小,入射到后表面的激光能量密度基本相同,因此烧蚀坑深度随着脉冲数目的增加而增大。随着脉冲数目的继续增加,前表面烧蚀坑的深度和宽度均快速增大,烧蚀坑对激光束的衍射效应使得入射到后表面的激光束有效直径增加,但激光能量密度峰值位置逐渐向外移动,偏离烧蚀坑深度最大的位置。因此,随着脉冲数目的增加,后表面烧蚀坑的深度最终趋于饱和。

由图 4、6 可知,脉冲数目和能量密度等实验参数对前表面和后表面烧蚀区域的形貌、尺寸产生了重要影

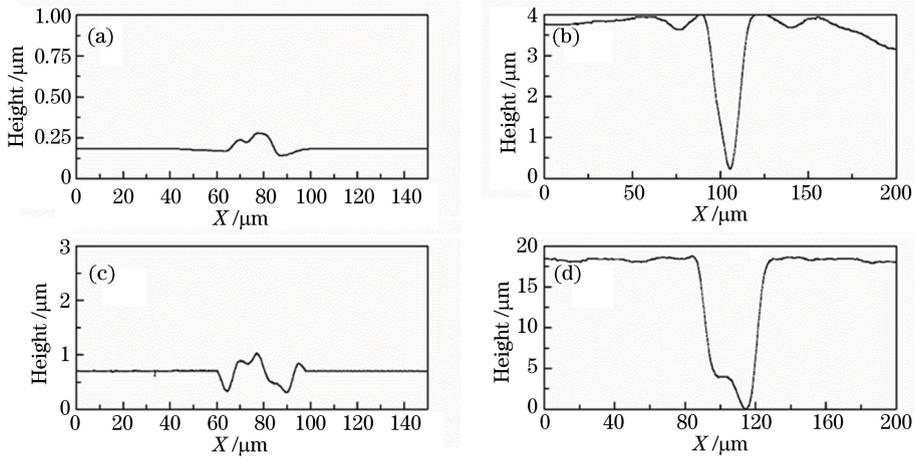


图 5 图 4 红线标记处的烧蚀坑横切面的二维轮廓

Fig. 5 2D cross-sectional profiles of ablation craters indicated by red lines in Fig. 4

响,表明烧蚀物理过程随着实验参数的变化而变化。在单脉冲作用下,当激光能量密度略高于前表面烧蚀阈值时,前表面和后表面烧蚀形貌显著不同,如图 4 所示。前表面烧蚀过程中沉积的激光能量较少,脉冲过后样品表面发生熔融等热力学过程,材料发生形变,烧蚀形貌为一个较小的凸起。前表面烧蚀区域对激光能量的吸收效应可以等效地视为光束中心存在遮光区域,被遮挡后的激光束传输到后表面过程中存在衍射效应。激光束的时空调制和后续衍射效应决定了激光强度在后表面的不规则分布,因此后表面烧蚀形貌是不规则的烧蚀坑形状。随着激光脉冲数目的增加,前表面烧蚀坑深度逐渐增加,其横截面的二维轮廓图为类抛物线形状,这与常规的激光烧蚀钻孔和切割的效果类似;激光在烧蚀坑表面的反射、折射和干涉在烧蚀坑形貌的演化过程中起着决定性作用^[9]。由于前表面烧蚀坑深度随脉冲数目的增加而增大,烧蚀坑对激光束的折射和衍射等调制效应随脉冲数目也在不断变化,不同脉冲辐照在后表面的激光强度分布也不相同,因此后表面烧蚀过程比较复杂,烧蚀坑形貌也不规则。

随着激光能量密度的增加,前表面烧蚀强度增强,烧蚀坑深度增加,烧蚀坑形貌基本相同。但在激光能量密度增加的过程中,前表面透过样品进入体内的激光峰值强度基本保持不变,而入射到后表面的激光峰值强度由前表面的调制和衍射效应决定。由图 6 可知,随着激光能量密度的增加,后表面烧蚀强度也逐渐增强,烧蚀坑深度逐渐增大,表明随着激光能量密度的增加,入射到后表面的激光峰值强度或能量密度也增大。但不同能量密度时峰值的空间位置可能发生变化,导致后表面烧蚀形貌更加复杂。

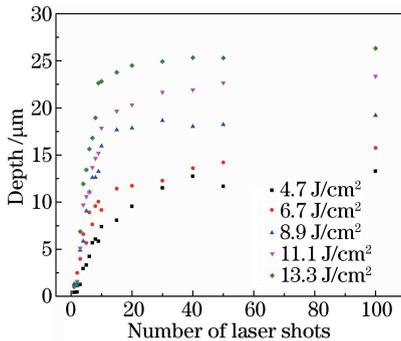


图 6 在不同激光能量密度下,K9 玻璃后表面烧蚀深度随脉冲数目的变化

Fig. 6 Variation of ablation depth of K9 glass rear surface with number of laser shots under different laser fluences

当激光能量密度分别为 4.5 J/cm^2 和 37.3 J/cm^2 时,单脉冲辐照后表面烧蚀区域扫描电子显微镜 (SEM) 图片如图 7 所示。可以看到,外围能量密度较小,损伤形貌为类颗粒散状分布的斑点结构;在能量密度较大的激光中心,能够观察到热熔形成的特征形貌,如图中红色椭圆圈所示。比较不同能量密度下烧蚀形貌可以发现,熔融形貌在高能量密度下更为明显,表明皮秒激光烧蚀 K9 玻璃后表面时,在能量沉积之后,能量密度较高区域的局部温度超过了软化温度,发生了热熔过程^[16-18]。

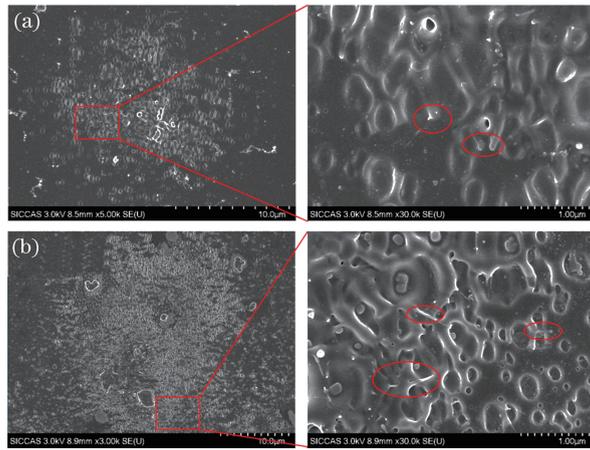


图 7 当激光能量密度为(a) 4.5 J/cm² 和 (b) 37.3 J/cm² 时,K9 玻璃后表面单发损伤扫描电镜图
 Fig. 7 SEM images of K9 glass rear surface after single shot with laser fluence of
 (a) 4.5 J/cm² and (b) 37.3 J/cm², respectively

3.3 扫描烧蚀切割形貌

在皮秒激光烧蚀切割过程中,为了获得较深的烧蚀深度,即抑制切割饱和效应,采用图 2(b)所示的多行多次扫描烧蚀方法^[11]。激光脉冲在样品表面沿着一条直线以固定的速率进行扫描,然后沿着垂直于扫描直线的方向平移,平移间距与单行扫描过程中相邻脉冲的间距相同。这样平移 m 行,即可得到 m 行单次的扫描烧蚀结果。然后回到起点,循环扫描烧蚀 n 次,即可得到 m 行 n 次的扫描烧蚀结果。通过改变扫描行数 m 和扫描次数 n ,研究单行单次、单行多次、多行单次和多行多次扫描时前表面和后表面的烧蚀规律。当脉冲重复频率固定时,相邻脉冲的空间重叠率取决于样品的位移速率^[10]。

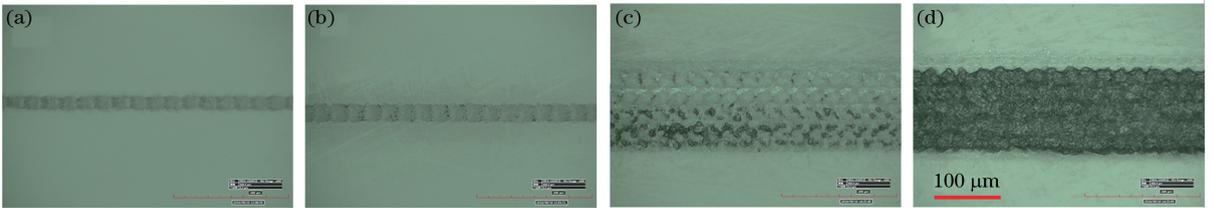


图 8 当能量密度为 17.3 J/cm² 和扫描速度为 0.03 mm/s 时,前表面烧蚀形貌图。
 (a) $m=1, n=1$; (b) $m=1, n=2$; (c) $m=10, n=1$; (d) $m=10, n=2$

Fig. 8 Ablation morphology of front surface at laser fluence of 17.3 J/cm² and scanning speed of 0.03 mm/s.
 (a) $m=1, n=1$; (b) $m=1, n=2$; (c) $m=10, n=1$; (d) $m=10, n=2$

当激光能量密度为 17.3 J/cm²、扫描速度为 0.03 mm/s 时,前表面烧蚀切割形貌图如图 8 所示。此时,脉冲空间重叠率为 70%。在能量密度和扫描速度不变的情况下,增加扫描行数会增加烧蚀区域的宽度,而增加扫描次数会增加烧蚀深度。在实际烧蚀应用中,扫描行数(即烧蚀区域横向尺寸)是固定的,可通过不断增加扫描次数来实现切割的效果。图 8 表明,增加扫描行数或次数均不会在前表面引入附带的边缘碎裂等损伤形貌。与图 8 对应的后表面烧蚀损伤形貌图如图 9 所示。对比图 8、9,后表面烧蚀形貌相较于前表面

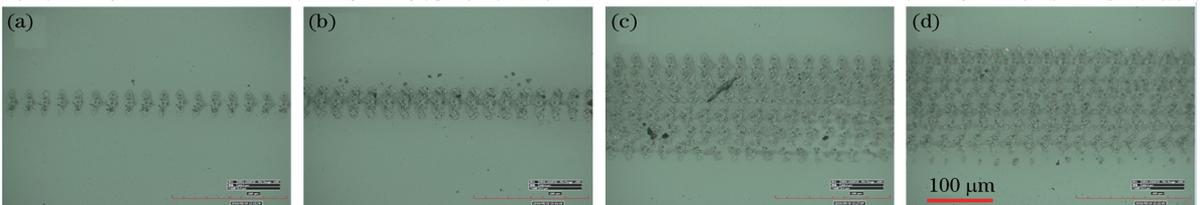


图 9 对应于图 7 的后表面烧蚀损伤形貌。(a) $m=1, n=1$; (b) $m=1, n=2$; (c) $m=10, n=1$; (d) $m=10, n=2$
 Fig. 9 Ablation morphology of rear surface corresponding to those in Fig. 7. (a) $m=1, n=1$;
 (b) $m=1, n=2$; (c) $m=10, n=1$; (d) $m=10, n=2$

非常不规则,更为重要的是烧蚀区域宽度大于前表面,这是前表面烧蚀坑对后续激光束的衍射效应造成的。对比图 9(a)与图 9(b)、图 9(c)与图 9(d)可知,增加扫描次数也会增加烧蚀区域的不规则性与宽度。因此,随着扫描行数和次数的增加,后表面烧蚀形貌越来越恶化,这是前表面烧蚀切割的附带损伤造成的。通过优化激光和扫描参数,可减弱后表面损伤程度,提高后表面烧蚀质量。

3.4 切割质量的参数优化

在图 2(b)的扫描方式中,为了有效切割玻璃样品,实验中激光脉冲需要一定的空间重叠率。通过控制激光在样品表面的扫描速度来研究脉冲空间重叠率对后表面烧蚀损伤的影响。在不同激光能量密度和扫描速度下,单行单次扫描烧蚀后,后表面烧蚀损伤形貌如图 10 所示。图 10(a)所示的后表面烧蚀坑道较规则,周围没有出现碎裂或裂纹,被认定为切割质量较好的情况。图 10(b)所示的后表面烧蚀坑道边缘出现了多处破碎区域和块状剥离,这种形貌会降低切割后样品的抗压强度,被认定为质量较差的后表面烧蚀。图 10(c)为较高扫描速度,即较低重叠率时的后表面烧蚀形貌,烧蚀坑点不连续且较为规则,也被认定为后表面质量较好的情况。

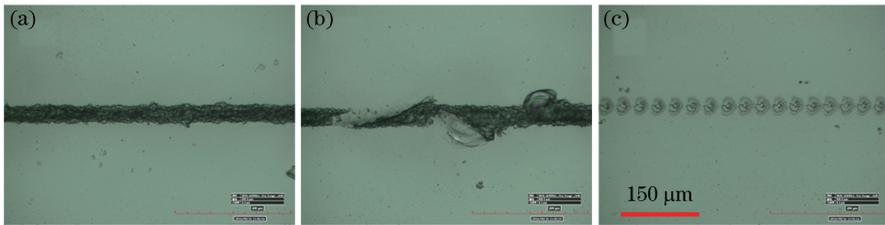


图 10 不同激光能量密度、扫描速度和脉冲空间重叠率下,单行单次扫描烧蚀后的后表面形貌图。

(a) 11.1 J/cm^2 , 0.01 mm/s , 90% ; (b) 13.2 J/cm^2 , 0.01 mm/s , 90% ; (c) 13.2 J/cm^2 , 0.02 mm/s , 80%

Fig. 10 Rear surface morphologies after single line and single pass ablation under different laser fluences, scanning speed, and pulse spatial overlap ratios. (a) 11.1 J/cm^2 , 0.01 mm/s , 90% ; (b) 13.2 J/cm^2 , 0.01 mm/s , 90% ; (c) 13.2 J/cm^2 , 0.02 mm/s , 80%

与单点烧蚀过程相比,扫描烧蚀切割时后表面烧蚀过程更加复杂,损伤形貌差异较大,主要原因是脉冲之间的烧蚀累积效应、温度和应力分布等材料特性沿扫描方向的演化。首先,相邻激光脉冲在后表面的烧蚀区域存在较大的空间重叠,较早的激光脉冲对后表面材料的烧蚀效应会影响后续脉冲的烧蚀过程。较早的脉冲烧蚀导致后表面材料的折射率、吸收系数和热力学特性均发生了一定程度的变化,后续脉冲辐照到已被改性的区域时,材料的不确定性增加,后表面烧蚀过程和结果与较早脉冲不同。其次,与单点钻孔相比,后表面烧蚀沿一维扫描方向移动,材料的热力学特性沿扫描方向也存在特征分布。基于这两方面的原因,扫描烧蚀时后表面损伤形貌随激光能量密度和扫描参数而变化,当脉冲能量密度或重叠率达到一定程度时,脉冲之间的烧蚀累积会导致后表面破碎和块状剥离等损伤形貌,如图 10(b)所示。将图 10(b)与图 10(a)、(c)比较可知,增加脉冲能量密度和重叠率均会影响后表面损伤形貌。当增加脉冲能量密度时,后表面烧蚀过程中沉积的能量会增加,能量密度高于烧蚀阈值的区域扩大,增加了有效的脉冲重叠率。

基于图 10 给出的三种后表面烧蚀形貌以及定义的相应后表面质量,图 11 给出了单行单次($m = 1$, $n = 1$)不同扫描速率与能量密度下,样品后表面的烧蚀质量结果。其中 \times 表示后表面烧蚀区域存在明显的块状剥离或者破碎裂痕,与图 10(b)对应; \surd 表示后表面烧蚀坑道较为规则,后表面质量较高,与图 10(a)、(c)对应。当固定激光能量密度时,减小扫描速率,即增加了辐照在某个位置的有效脉冲数目,会在后表面产生破碎性形貌。当固定扫描速率时,增加激光能量密度,相邻脉冲之间的高能量密度重叠区域增加,即增加了有效辐照脉冲数目,因此也会产生低质量的后表面烧蚀形貌。如图 11 所示,对激光能量密度和扫描速率进行二维参量分析,可以得到后表面烧蚀质量较高的参数分布区域,即图中曲线上方区域。因此,通过控制激光能量密度和扫描速率等参数,可以实现对后表面烧蚀损伤形貌的控制,提高烧蚀切割样品的后表面质量。

受实验中激光器条件的限制,激光脉冲重复频率最高为 1 Hz 。虽然 1 Hz 的重复频率小于超快激光烧蚀切割中常用的 $10 \sim 500 \text{ kHz}$ ^[5,10-11],但通过控制扫描烧蚀速度可得到相同的脉冲空间重叠率,即 $0 \sim 90\%$ 。当脉冲重复频率不同但空间重叠率相同时,扫描烧蚀过程主要的区别在于相邻脉冲辐照在样品上的时间间

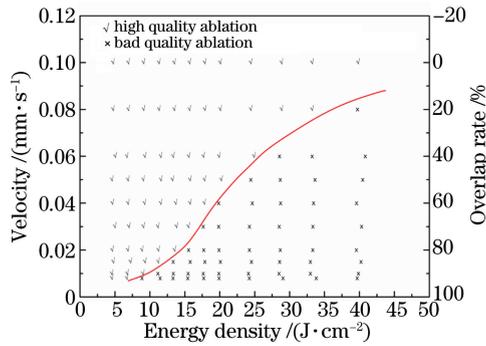


图 11 在不同扫描速率和能量密度下的单行单次 ($m=1, n=1$) 扫描烧蚀后的样品后表面烧蚀质量分布

Fig. 11 Ablation quality distribution of rear surface after single line and single pass ablation ($m=1, n=1$) under different scanning speed and laser fluences

隔。皮秒激光能量沉积在数十皮秒范围内,后续的能量扩散和材料去除在数十纳秒范围内。当脉冲时间间隔小于 $1 \mu\text{s}$ 时,脉冲重复频率对烧蚀过程基本没有影响,脉冲空间重叠率成为表征烧蚀切割的主要参量。

3.5 后表面损伤机理讨论

当激光聚焦在样品前表面进行烧蚀微加工时,K9 玻璃对激光能量的吸收率是激光强度的非线性函数。材料通过多光子电离和雪崩电离等过程吸收光子能量,并产生高密度的自由电子。当激光强度达到一定阈值时,材料会对激光进行强吸收。当峰值强度大于吸收阈值的激光脉冲与透明介质作用时,激光强度大于吸收阈值的部分会被吸收和反射^[19],但仍有部分激光能量进入样品体内。在时间上,前表面烧蚀时脉冲的前沿会进入玻璃体内传输并入射到后表面^[20]。在空间上,只有光斑中心的激光强度高于阈值的区域才会发生烧蚀。因此,前表面烧蚀时,透过前表面进入玻璃体内的激光束在时间和空间上均受前表面烧蚀的调制,即烧蚀区域的激光能量被吸收,产生了遮光效应。虽然入射到后表面的激光强度低于材料的吸收阈值,实验中也并没有观察到自聚焦等非线性效应,不存在激光与玻璃体或后表面附近材料的相互作用,但激光在样品后表面—空气界面处会发生反射现象。玻璃样品放在空气环境中进行烧蚀实验,玻璃样品的折射率 1.5 大于空气的折射率 1.0,当激光束入射到前表面时发生外反射,电场发生了 π 的相位突变,反射脉冲与入射脉冲干涉后电场强度减弱。而激光束入射到后表面时发生内反射,电场并没有发生相位变化,反射脉冲与入射脉冲电场强度产生干涉增强^[15],导致后表面的激光强度约为前表面的 1.5 倍左右。因此,在后表面干涉增强后,前表面烧蚀过程中透射的激光脉冲的强度高于玻璃对激光能量非线性吸收的阈值强度。通过多光子电离和雪崩电离等过程,激光能量在后表面沉积,诱发了烧蚀过程,并产生了烧蚀损伤形貌。因此,激光强度在后表面的干涉增强是后表面烧蚀的主要诱因,也是后表面烧蚀阈值低于前表面的原因。

前表面烧蚀过程对激光束的调制效应对后表面烧蚀特性有重要影响。如图 4 所示,单脉冲和多脉冲作用时,后表面烧蚀坑形状的复杂性说明了后表面激光强度分布的复杂性。但这种调制效应对单脉冲作用时后表面烧蚀坑的横向尺寸的影响并不明显,如图 3 所示。这是因为烧蚀横向尺寸由激光强度横向分布直接决定,而激光强度分布与前表面烧蚀区域尺寸、样品厚度等密切相关,所以后表面横向烧蚀尺寸随激光能量密度的变化不能直接反映前表面烧蚀对激光束的调制效应。关于前表面烧蚀对激光束的调制过程和调制光束诱致后表面烧蚀的物理过程,会在后续工作中开展进一步的理论模拟和实验研究。

激光在前表面烧蚀微加工时,后表面发生烧蚀损伤会降低激光加工的质量。其直接原因是激光焦斑尺寸较大,瑞利长度大于样品的厚度,激光束在样品中的传输类似于平行光束,使得激光强度传输到后表面时仍然很高。激光强度在后表面反射、干涉增强后,会诱致后表面产生烧蚀损伤。因此,为了避免激光表面微加工中后表面损伤问题,可以减小激光焦斑,使瑞利长度远小于样品的厚度。激光从前表面传输到后表面时已经散焦,激光强度大幅度削弱,远低于烧蚀阈值。但超快激光微加工的重要应用之一就是超薄玻璃的切割加工,最小厚度约为 0.3 mm ^[10-11],即使激光焦斑减小至 $10 \mu\text{m}$ 左右,仍存在后表面损伤问题^[11];而且减小焦斑会增加扫描烧蚀的行数,从而降低切割的效率。因此,只通过控制激光焦斑不能完全避免后表面损伤问题,需要考虑其他手段来降低激光在后表面的干涉增强效应,如减少样品与环境的折射率差。总之,为了抑

制或减弱烧蚀切割时的后表面损伤,采用控制光束聚焦和减弱后表面的干涉增强效应相结合的方法,是一种重要的解决方案。后续研究将围绕抑制后表面损伤展开。

4 结 论

研究了皮秒烧蚀切割 K9 玻璃过程中后表面的烧蚀损伤特性,发现后表面烧蚀形貌和规律与前表面显著不同。当单点单脉冲激光烧蚀时,前表面烧蚀阈值为 8.57 J/cm^2 ,后表面烧蚀阈值为 3.82 J/cm^2 ,前者为后者的 2.24 倍;随着激光能量密度的增大,前表面烧蚀坑直径的增大速率大于后表面的。当单点多脉冲激光烧蚀时,后表面烧蚀深度随着脉冲数目的增加而增大,并在 30 个脉冲后趋于饱和。激光扫描烧蚀切割时,后表面烧蚀宽度大于前表面的,后表面烧蚀形貌不规则。分析了激光能量密度、扫描次数、扫描速度等参数对后表面烧蚀损伤特性的影响,根据后表面的烧蚀形貌,初步优化了激光单行单次扫描时的激光能量密度和扫描速度等参数,得到了切割质量较好的参数分布范围。前表面烧蚀过程对激光光束在时间和空间上均进行了调制,激光强度在后表面的干涉增强效应是后表面发生烧蚀损伤的主要原因。为了抑制或减弱超快激光烧蚀微加工中的后表面损伤,提出了两种解决方法,即控制光束聚焦和减弱后表面干涉增强效应。

参 考 文 献

- [1] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 219-225.
- [2] Della V G, Osellame R, Laporta P. Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 11(1): 013001.
- [3] Wang Yuqian, Zhang Junzhan, Liu Yongsheng, *et al.* Effect of femtosecond laser parameters on TiC ceramic micro-hole drilling[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003010.
王禹茜, 张军战, 刘永胜, 等. 飞秒激光工艺参数对加工 TiC 陶瓷微孔的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003010.
- [4] Mishchik K, Leger C J, Caulier O D, *et al.* Ultrashort pulse laser cutting of glass by controlled fracture propagation [J]. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2016, 11(1): 66-70.
- [5] Nolte S, Will M, Augustin M, *et al.* Cutting of optical materials by using femtosecond laser pulses[C]. SPIE, 2001, 4440: 152-160.
- [6] Vanagas E, Kawai J, Tuzhilin D, *et al.* Glass cutting by femtosecond pulsed irradiation[J]. *Journal of Micro/Nanolithography Memes and Moems*, 2004, 3(2): 358-363.
- [7] Butkus S, Paipulas D, Kaskelyte D, *et al.* Improvement of cut quality in rapid-cutting of glass method via femtosecond laser filamentation[J]. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2015, 10(1): 59-63.
- [8] Nikumb S, Chen Q, Li C, *et al.* Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers[J]. *Thin Solid Films*, 2005, 477(1): 216-221.
- [9] Sun M, Eppelt U, Russ S, *et al.* Numerical analysis of laser ablation and damage in glass with multiple picosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 7858-7867.
- [10] Sun M, Eppelt U, Hartmann C, *et al.* Damage morphology and mechanism in ablation cutting of thin glass sheets with picosecond pulsed lasers[J]. *Optics and Laser Technology*, 2016, 80: 227-236.
- [11] Russ S, Siebert C, Eppelt U, *et al.* Picosecond laser ablation of transparent materials[C]. SPIE, 2013, 8608: 86080E.
- [12] Collins A, Rostohar D, Prieto C, *et al.* Laser scribing of thin dielectrics with polarized ultrashort pulses[J]. *Optics and Lasers Engineering*, 2014, 60: 18-24.
- [13] Peng Yujie, Pan Xue, Wang Jiangfeng, *et al.* Research of high stability high performance picoseconds pump laser for optical parametric amplification[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802009.
彭宇杰, 潘 雪, 王江峰, 等. 高稳定高性能皮秒光参量放大器抽运源研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802009.
- [14] Mannion P, Magee J, Coyne E, *et al.* Ablation thresholds in ultrafast laser micromachining of common metals in air [C]. SPIE, 4876: 470-478.
- [15] Crisp M D, Boling N L, Dube G. Importance of Fresnel reflections in laser surface damage of transparent dielectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(8): 364-366.
- [16] Li Donghai. Studies on the interaction and damage theory of ultra-short laser with materials [D]. Mianyang: China

Academy of Engineering Physics, 2010.

李东海. 短脉冲激光对材料的作用及破坏机理研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.

- [17] Dausinger F, Hugel H, Konov V I. Micromachining with ultrashort laser pulses: From basic understanding to technical applications[C]. SPIE, 2003, 5147: 106-115.
- [18] Strigin M B, Chudinov A N. Laser processing of glass by picosecond pulses[J]. Quantum Electronics, 1994, 24(8): 732-735.
- [19] Sun M, Eppelt U, Schulz W, *et al.* Ultrafast reflection and secondary ablation in laser processing of transparent dielectrics with ultrashort pulses[J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 051512.
- [20] Feit M D, Komashko A M, Rubenchik A M. Ultra-short pulse laser interaction with transparent dielectrics [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2004, 79(7): 1657-1661.