

文章编号 1004-924X(2026)10-1556-12

超薄玻璃飞秒激光切割工艺优化与热损伤抑制

刘晓娟¹, 张 龙^{2*}, 陈贵霖³, 何 攀²

(1. 晋中学院 机械系, 山西 晋中 030600;

2. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715;

3. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030000)

摘要:为推动汽车轻量化与智能化发展,以车用超薄玻璃为研究对象,系统探究切割微观形貌、材料烧蚀阈值与工艺参数之间的耦合关系,旨在实现高质量低损伤的飞秒激光切割。首先,使用波长为 1 030 nm 的红外飞秒激光对 0.55 mm 钠钙玻璃和高铝玻璃进行直线划刻,探索单光束飞秒激光核心工艺参数对切割形貌的影响。然后,采用面积推算法求解两种玻璃在 0.05 MHz, 0.2 MHz 和 0.5 MHz 下的烧蚀阈值,解析两种玻璃的激光加工差异,揭示烧蚀阈值演化规律。接着,排除不可行工艺区间,初步确定工艺参数窗口,基于 BP 神经网络建立预测模型,进一步优化工艺参数选取。最后,使用合理工艺参数对两种玻璃进行自下而上全厚度切割。实验结果表明,在 0.2 MHz 下,高铝玻璃因烧蚀阈值低于钠钙玻璃,更易产生分布均匀的直线划痕,表现出更高的裂纹倾向;其切割截面表面粗糙度 R_a 值为 0.50 μm , 低于钠钙玻璃的 0.75 μm , 表现出更优的断面质量,二者均满足车用玻璃精密切割要求。结论认为,本文提出的融合切割形貌特征、烧蚀阈值分析和模型预测的工艺优化方案,实现了加工过程热损伤的有效抑制,在超薄玻璃切割中具有良好的可行性与可靠性。

关键词:飞秒激光;车用超薄玻璃;烧蚀阈值;工艺优化;精密切割

中图分类号:TN249;U463.835 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263410.1556 CSTR:32169.14.OPE.20263410.1556

Optimization of femtosecond laser cutting process and suppression of thermal damage for ultra-thin glass

LIU Xiaojuan¹, ZHANG Long^{2*}, CHEN Guilin³, HE Pan²

(1. Department of Mechanical Engineering, Jinzhong University, Jinzhong 030600, China;

2. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030000, China)

* Corresponding author, E-mail: zhanglong1005@swu.edu.cn

Abstract: This study systematically investigates the interplay among cutting micro-morphology, material ablation thresholds and process parameters for automotive ultra-thin glass, with the aim of enabling high-quality, low-damage femtosecond laser cutting in support of automotive lightweighting and intelligence. Initially, linear scribing was performed on 0.55 mm thick soda-lime glass and high-alumina glass with a 1 030 nm infrared femtosecond laser to elucidate the relationship between key process parameters and the

收稿日期:2026-02-13;修订日期:2026-03-23.

基金项目:西南大学人才引进项目(No. SWU-KR24009)

cutting morphology. Subsequently, the diameter-squared extrapolation method was employed to determine the ablation thresholds of both glasses at repetition rates of 0.05 MHz, 0.2 MHz, and 0.5 MHz. The differences in laser machinability of the two glasses were characterized, and the underlying mechanisms governing the evolution of the ablation thresholds was revealed. Thereafter, infeasible process regions were excluded to preliminarily identify the process parameter window. Based on a BP neural network, a prediction model was established to further optimize the selection of process parameters. Ultimately, bottom-up full-thickness cutting of ultra-thin glass was realized using the optimized process parameters. The experimental results at 0.2 MHz indicate that the ablation threshold of high-alumina glass is lower than that of soda-lime glass, rendering it more susceptible to uniformly distributed linear scratches and a higher crack propensity. The Surface roughness R_a of the cut cross-section is $0.50 \mu\text{m}$ for aluminosilicate glass, which is lower than $0.75 \mu\text{m}$ for soda-lime glass, indicating superior cross-sectional quality. Both materials meet the surface quality requirements for precision cutting of automotive glass. It is concluded that the proposed process optimization strategy-integrating cutting topography, ablation threshold analysis, and model prediction-effectively suppresses thermal damage during processing, which validates its strong feasibility and reliability for ultra-thin glass cutting.

Key words: femtosecond laser; ultra-thin automotive glass; ablation threshold; process optimization; precision cutting

1 引言

汽车轻量化是我国政策驱动的产物和市场需求发展的趋势,《节能与新能源汽车技术路线图 3.0》明确要求 2030 年整车减重 30%,汽车玻璃作为汽车必备件,承载着节能减耗、提升动力性能的关键作用。汽车玻璃几乎占据车身面积的 50%,随着天窗、全景天幕取代传统车顶的普及,占比将继续扩大,因此降低汽车玻璃厚度和优化材料结构成为汽车轻量化的重要举措^[1-2]。

前挡风玻璃(简称前挡)作为汽车玻璃的主要构成部分,不仅为驾乘人员提供核心防护屏障,保证车辆撞击时的人员安全,还具有隔热降噪、阻挡紫/红外线等功能;此外,集聚了越来越多的智能技术,如抬头显示(Head-Up Display, HUD)技术、电/光致变色和加热除霜技术等^[3-4]。前挡通常采用夹层玻璃,内外两层是普通玻璃或钢化玻璃,每层玻璃厚 2.1 mm,中间夹有一层聚乙烯醇丁醛(Polyvinyl Butyral, PVB)膜,膜厚 0.76 mm。但近几年超薄化趋势明显,如小米 YU7 较传统汽车玻璃厚度削减了 50% 以上^[5-7]。不占主导地位的钢化玻璃、聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)等前挡材质,其厚度也愈加轻薄,如极氪 001 使用 4 mm 厚的双层钢化玻璃作为前

挡,首款通过 EMARK 认证的 6 mm PC 前挡也诞生。福耀玻璃研发出适用汽车门窗、后窗和天窗的内层玻璃厚 0.7 mm,整体厚度小于 3.5 mm 的夹层玻璃,以及适用门窗和后窗的 2.6 mm 以下特殊钢化工艺浮法玻璃。

超薄夹层玻璃的主流基底是硅酸盐玻璃,具有硬度高、脆性大等特性^[8-9]。对单层超薄玻璃切割是汽车车窗玻璃生产过程的必须工序,若使用传统的机械切割方法,极易出现崩边、裂纹等现象,面临难加工、边缘质量差、报废率高等挑战,且切割后的玻璃平均强度仅为切割前的 60%^[10-11]。

Ahsan 等^[12]总结 CO_2 激光技术、纳秒激光技术、皮秒激光技术和飞秒激光技术切割玻璃的特点,发现它们的热影响区逐渐变小,边缘开裂可能性逐步降低,纳秒激光切割区域周围有明显的碎片,而飞秒激光技术热影响极小,几乎不会形成毛刺或微裂纹,属于高精度、无碎片切割。Hyesung 等^[13]自下而上切割 $100 \mu\text{m}$ 硼硅酸盐超薄玻璃,通过消除次表面和后表面损伤提升边缘强度;Yuhang 等^[14]采用超快激光复合切割 $300 \mu\text{m}$ 无碱硼硅酸盐超薄玻璃,依次进行内改性、表面划刻和机械分离,获得粗糙度 $R_a 0.148$ 的表面。Butkus 等^[15]通过实验证明飞秒激光细丝直接烧

蚀 1 mm 熔融二氧化硅可以提高切割质量,且水层越薄效果越好。Shin 等^[16]利用飞秒激光贝塞尔光束内部划切破碎方法切割 100 μm 硼硅酸盐超薄玻璃,两侧边缘强度良好,前后边缘强度分别为 370 MPa 和 400 MPa。现有研究多聚焦于硼硅酸盐超薄玻璃的切割方法,针对车用超薄钠钙玻璃和高铝玻璃的相关探究不够系统深入。

本文以车用超薄玻璃为研究对象,采用飞秒激光开展精密切割实验,探究工艺参数对材料切割质量的影响,完成切割工艺参数优化,并实现玻璃全厚度精密切割,为车用超薄玻璃的规模化、高可靠制造提供关键技术参考。

2 实验基础和实验方法

2.1 实验材料与设备

实验基材选用 20 mm \times 20 mm \times 0.55 mm 的超薄钠钙玻璃和高铝玻璃,先将其置于超声波清洗设备中清洗以去除表面附着的灰尘、油污及杂质,然后使用蔡司镜片镜头清洁湿巾擦拭,以便快速干燥且无水渍痕迹残留,样品的重要组成成分和性能指标见表 1。

表 1 硅酸盐玻璃特性

Tab. 1 Characteristics of silicate glass

Parameters	Soda-lime glass	High-alumina glass
$\text{SiO}_2/(wt\%)$	71.5~72.5	59~62
$\text{Al}_2\text{O}_3/(wt\%)$	0.5~1.5	15~18
Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.5	2.5~2.6
Vickers hardness	480~550	600~720
Transmittance/%	90	≥ 91
Flexural strength/MPa	16~60	120~150
Softening point/ $^{\circ}\text{C}$	720~740	920~950

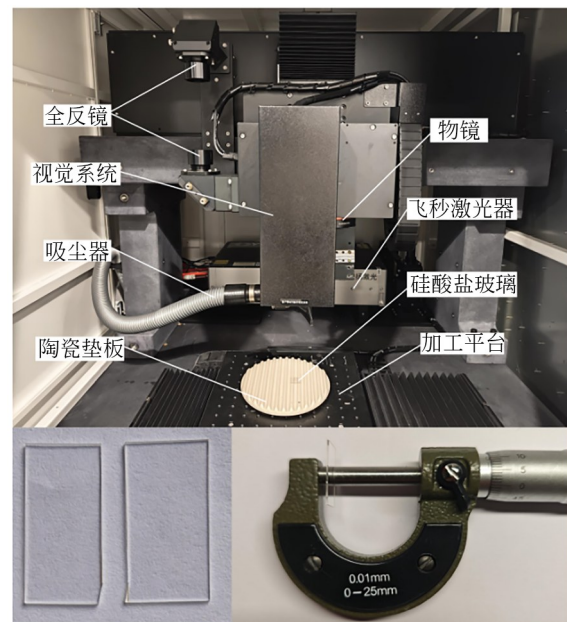
实验在上海津甯/广东华中科技大学工业技术研究院研发的 GLFs-MF20 飞秒激光微纳加工平台上进行,采用安扬 FemtoYLTM 飞秒激光器为核心激光光源,其主要技术参数如表 2 所示。飞秒激光经全反镜初步转向与准直后导向光束调节模块,由半波片与分光棱镜调节偏振、扩束镜调整直径的光束,进入振镜扫描模块完成高速二维偏转、聚焦与像差补偿,以实现样品表面微纳

结构的高精度、一致性精密加工,如图 1 所示。

表 2 激光器主要技术参数

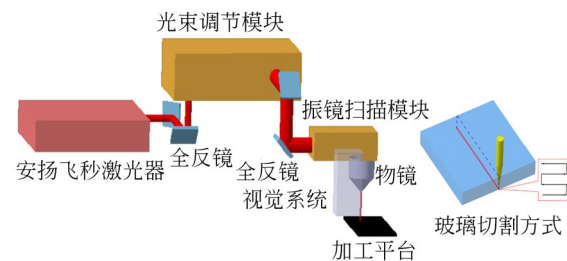
Tab. 2 Laser specifications

技术参数	数值
Pulse duration/fs	313
Infrared center wavelength/nm	1 032
0.05 MHz maximum power/W	2.82
0.2 MHz maximum power/W	12.82
0.5 MHz maximum power/W	20.47
Number of pulses	1~5
Repetition rate/MHz	0.025~5



(a) 加工场景

(a) Processing scenario



(b) 飞秒激光加工示意图

(b) Schematic diagram of femtosecond laser processing

图 1 飞秒激光加工实验

Fig. 1 Femtosecond laser processing experiment

将飞秒激光加工完成后的玻璃样品,采用蔡司共聚焦全自动显微镜进行形貌特征表征分析

及关键几何参数测量。Axio Imager. Z2m 显微镜基座搭配 LSM 扫描模块,可实现激光逐点扫描、共聚焦光学切片及 3D 成像。

2.2 实验原理

飞秒激光切割玻璃的本质是基于非线性光-物质相互作用,实现能量瞬态沉积和材料烧蚀。极高峰值功率密度的飞秒脉冲,通过多光子电离和隧道电离产生自由电子,经雪崩电离放大,在材料焦点体积内瞬间生成高密度电子-空穴等离子体^[17-18]。由于飞秒激光脉冲宽度远小于电介质中的电子-声子耦合时间,激光能量在电子系统中快速完成瞬态沉积后,通过电子-声子相互作用缓慢传递给晶格,从而实现近乎无热扩散的冷加工^[19]。当激光能量密度远大于材料烧蚀阈值时,能量沉积导致材料局部温度远高于气化温度,主要产生热气化去除;当激光能量密度接近于烧蚀阈值时,聚焦区域形成的高密度等离子体在极大的库伦力作用下解离,主要引发库仑爆炸;根据烧蚀表面质量和激光能量密度大于烧蚀阈值的程度,区分为强烧蚀和弱烧蚀^[20]。

在飞秒激光加工中,若材料吸收的激光能量密度超过热气化与库仑爆炸所需的能量密度阈值,多余能量将引发热量累积,使材料发生热影响区、熔融重铸层、热应力裂纹等热损伤现象^[21-22]。热影响区是晶格温度未达到熔点时,仅发生结构弛豫、热软化与弱热效应的区域,典型形貌特征是在加工边缘外围出现折射率改性晕圈;当晶格温度达到熔点以上形成熔融重铸层,产生材料熔融再凝固的光亮形貌;当温度梯度引发的巨大热应力超过玻璃断裂强度时,会在加工边缘形成细条状裂纹。

2.3 实验方法

激光功率、重复频率、扫描速度与扫描次数作为材料烧蚀的核心关键参数,直接决定飞秒激光切割玻璃的效率和表面质量。激光功率与重复频率关系到烧蚀过程中单个脉冲能量的输入,是飞秒激光加工中的核心主控参数。激光功率 P 与单脉冲能量 E_p 的关系为:

$$P = E_p f, \quad (1)$$

其中, f 为重复频率。

扫描速度、扫描次数通过改变材料作用区域的有效脉冲叠加数量,决定激光能量的空间分布

状态,是与激光功率、重复频率同等重要的关键调控参数。有效脉冲数 N 为:

$$N = k \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{f \omega_0}{v}, \quad (2)$$

其中: k 为扫描次数, v 为扫描速度, ω_0 为聚焦光斑半径。

鉴于本文立足玻璃切割的研究,同时考虑到操作简便及方法普适性,计算玻璃烧蚀阈值的实验采用在玻璃表面划刻直线替代面积推算法中的打点烧蚀^[23]。飞秒激光聚焦光斑能量呈高斯分布,材料的烧蚀阈值 φ_{th} 与中心峰值能量密度 φ_0 的关系为:

$$\varphi_{th} = \varphi_0 \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right), \quad (3)$$

其中: D 为烧蚀区域的直径,采用实验测量的划刻直线宽度进行表征。为减小随机误差、提高结果可靠性,每组工艺参数下重复测量 3 次,并以三次测量结果的平均值作为最终实验数据。

单脉冲能量 E_p 与中心峰值能量密度 φ_0 关系为:

$$E_p = \frac{\pi \omega_0^2}{2} \varphi_0. \quad (4)$$

将式(4)代入整理后的式(3)得:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{th}}\right) = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{E_p}{E_{th}}\right), \quad (5)$$

其中, E_{th} 是单脉冲能量阈值。

因此烧蚀区域直径的平方 D^2 与单脉冲能量的对数 $\ln E_p$ 满足线性关系:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln E_p - 2\omega_0^2 \ln E_{th}. \quad (6)$$

在面积推算法实验中,首先需设置多组激光单脉冲能量对试样表面进行直线划刻,然后利用显微镜测量每组脉冲能量对应的刻线宽度,再以刻线宽度的平方 D^2 为纵轴 Y ,单脉冲能量的对数 $\ln E_p$ 为横轴 X 进行线性拟合,最后利用拟合线截距和公式(4)求得材料烧蚀阈值,由拟合线斜率求得聚焦光斑半径。

材料烧蚀阈值与脉冲数有关,公式(2)可知,有效脉冲数与扫描次数、重复频率正相关,与扫描速度负相关,因此计算玻璃的烧蚀阈值需预先设定这三个参数,再使用不同激光功率加工玻璃。

3 实验结果与讨论

3.1 不同激光功率下的切割形貌特征对比分析

实验 1 采用表 2 所列技术参数的单路红外飞秒激光,对置于陶瓷垫板固定位置的钠钙玻璃和高铝玻璃进行直线划刻,先设定焦点位置是 35 mm,产品厚度是 17.5 mm,使划痕位于玻璃下表面,再保持单脉冲作用、单扫描次数、100 mm/s 扫描速度、0.2 MHz 重复频率等工艺参数恒定,梯度改变激光功率变量,逐一记录不同激光功率对应的直线划痕宽度与深度。由图 2(a)可知,钠钙玻璃在 8.55~11.75 W 功率区间,划痕宽度呈单调递增趋势,原因是随着激光功率升高,单脉冲能量、激光能量密度同步增大,致使库仑爆炸或热气化效应持续加剧,晶格崩解范围不断拓宽;高铝玻璃在 7.48~10.68 W 功率范围内划痕

宽度呈先升高后降低的变化规律,说明激光功率为 10.68 W 时,形成等离子体屏蔽,到达玻璃表面的实际能量降低,横向烧蚀范围减小。由图 2(b)可知,两种玻璃的划痕深度数值波动幅值较小,表示激光功率对划痕深度影响不显著,钠钙玻璃的深度均值为 18.71 μm ,略高于高铝玻璃的深度均值 17.61 μm 。

研究发现,在钠钙玻璃直线划刻过程中,当激光功率为 6.41 W 和 7.48 W 时,玻璃表面几乎未形成可通过显微镜观测到的划痕,随着飞秒激光功率升高,划痕的直线度、清晰度逐步提升,如图 3(a)所示。功率为 11.75 W 时,直线切缝区域产生明显的熔融重铸层,功率为 12.82 W 时,划痕长度方向连贯但宽度不均匀,局部区域存在不规则墨泽状痕迹,边缘有“毛刺状”和“细条状”裂纹。在高铝玻璃直线划刻实验中,功率 6.41 W

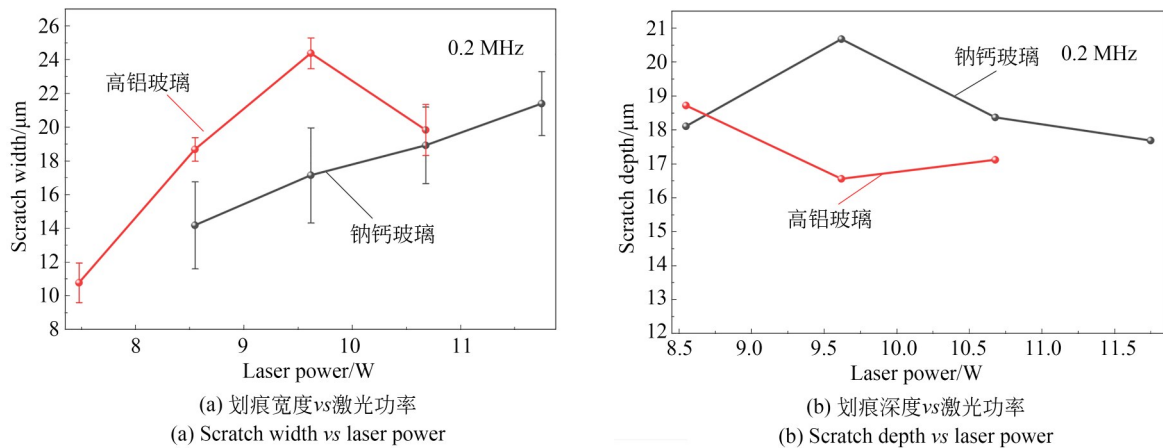
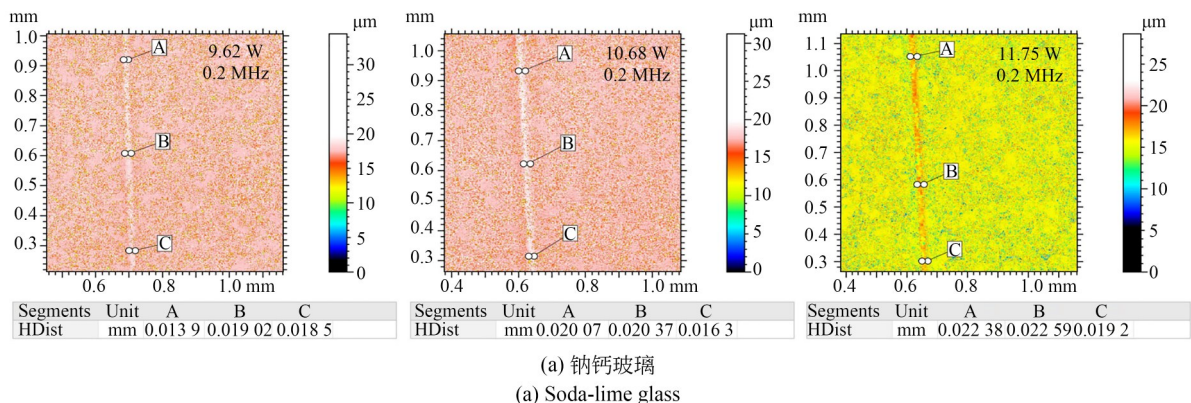


图 2 0.2 MHz 不同激光功率对直线划痕的影响
Fig. 2 Effect of laser powers on linear scratches at 0.2 MHz



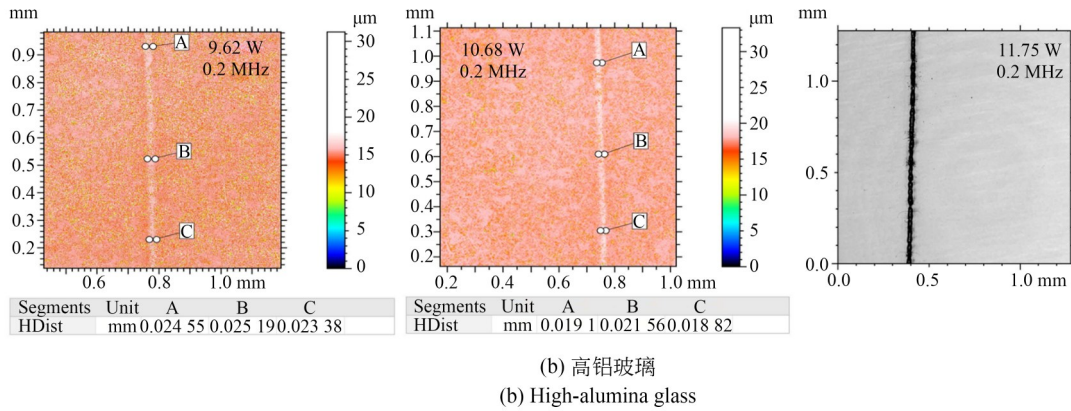


图 3 0.2 MHz 不同激光功率的直线划痕特征

Fig. 3 Linear scratch characteristics of different laser powers at 0.2 MHz

时无清晰划痕,随着激光功率持续增大,边缘轮廓逐渐连续,如图 3(b)所示。功率为 11.75 W 和 12.82 W 时,表面均出现 20~30 μm 的“毛刺状”裂纹,边缘极不规整,说明激光能量密度过高,发生热应力微裂纹。其他工艺参数一致的情况下,飞秒激光功率较低时,高铝玻璃与钠钙玻璃相比,表面更易加工出直线划痕;随着飞秒激光功率增加,高铝玻璃比钠钙玻璃划痕更均匀;当激光功率较高时,高铝玻璃表面更易产生裂纹。

3.2 烧蚀阈值对比分析

剔除实验 1 测得的等离子体屏蔽点和裂纹点数据,利用 2.3 实验方法计算单扫描次数、单脉冲作用、0.2 MHz 重复频率、100 mm/s 扫描速度工

况下两种玻璃的烧蚀阈值,如图 4(a)所示。求得钠钙玻璃的烧蚀阈值是 5.38 J/cm²,大于高铝玻璃的烧蚀阈值 2.36 J/cm²。基于此结果,可进一步对图 3 所示的同等激光功率下,高铝玻璃比钠钙玻璃更易产生划痕或裂纹,即对图 2(a)所示的高铝玻璃划痕宽度大于钠钙玻璃现象进行科学阐释,原因是高铝玻璃比钠钙玻璃的烧蚀阈值低,更易去除材料或产生热损伤。

实验 2 是保持其他工艺参数不变,分别在 0.05 MHz 和 0.5 MHz 重复频率,使用不同激光功率加工两种玻璃,记录直线划刻的划痕宽度和深度。如图 5 所示,0.05 MHz 低重复频率下,只有 2.34~2.82 W 功率范围内可检测到宽度小于 20 μm 的直线划痕;0.5 MHz 高重复频率下,

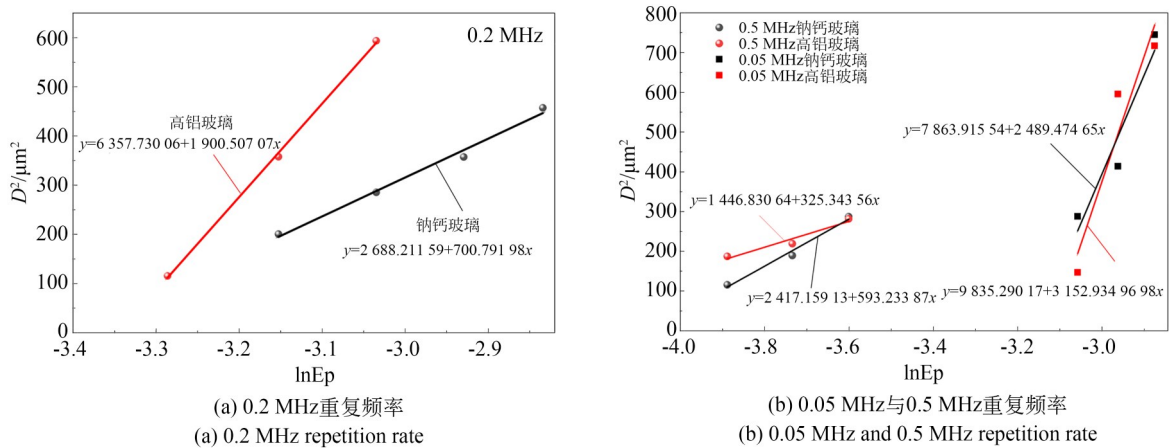


图 4 烧蚀阈值求解拟合线

Fig. 4 Fitting line for ablation threshold determination

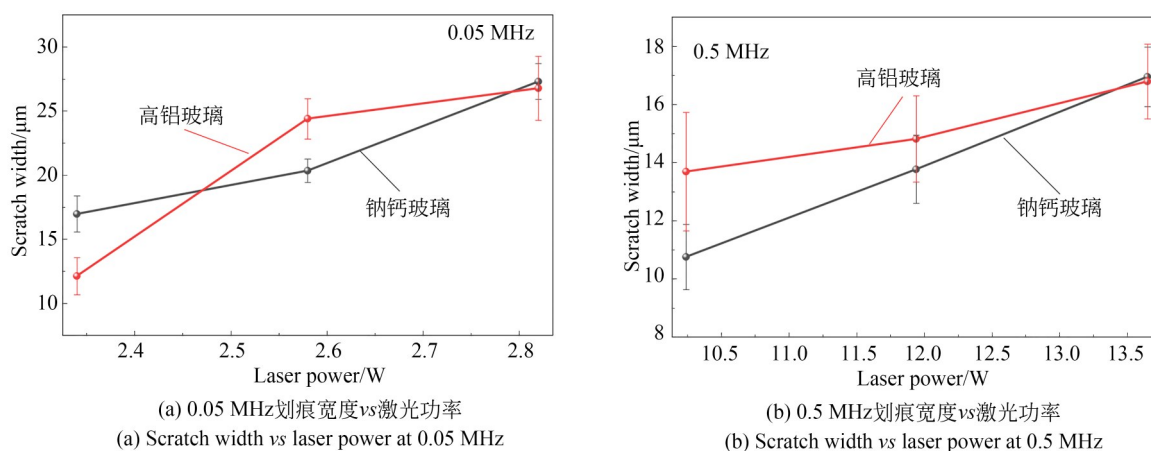


图5 不同重复频率对直线划痕的影响

Fig. 5 Effect of repetition rate on linear scratches

13.65 W 功率以上区间由于热累积效应产生显著裂纹;可测的有效区间内直线划痕宽度都随功率增加不断增大,划痕深度仍然在 16.38~24.46 μm 波动。实验求得的钠钙玻璃在 0.05 MHz, 0.5 MHz 重复频率下烧蚀阈值分别是 2.17 J/cm², 3.65 J/cm², 求得的高铝玻璃在 0.05 MHz, 0.5 MHz 重复频率下烧蚀阈值分别是 1.79 J/cm², 4.59 J/cm²。

由公式(2)和拟合直线斜率计算的有效脉冲数如表 3,可知两种玻璃呈现截然不同的烧蚀阈值演化规律——钠钙玻璃表现为“先升后降”的阶段性变化,峰值出现在 0.2 MHz,有效脉冲数是 50,高铝玻璃则呈现“持续升高”的反孵效应。钠钙玻璃中 Na⁺, Ca²⁺ 等网络修饰体的引入,不仅降低了网络聚合度,而且通过填充网络间隙提高了原子堆积密度;在低脉冲数激光作用

下,这种相对开放的结构容易形成致密层^[24-25],使烧蚀阈值升高;但当脉冲数超过临界值后,钠钙玻璃表面常会出现气泡、纳米光栅等典型形貌特征^[26-27],使表层疏松、能量吸收增强,从而烧蚀阈值降低。高铝玻璃中的 Al³⁺ 以 [AlO₄]⁻ 四面体形式参与网络结构,使其具有较高的网络聚合度和热稳定性^[28-29];在多脉冲数激光作用下,前序脉冲在亚表面诱导的永久改性仍以致密化与强化为主,因此随着有效脉冲数的增加,高铝玻璃的烧蚀阈值逐步升高。

两种玻璃的有效脉冲数依赖行为可用竞争模型描述:

$$\varphi_{\text{th}}(N) = \varphi_{\text{th}}(1) + \Delta\varphi_s(N) - \Delta\varphi_f(N), \quad (7)$$

其中: $\varphi_{\text{th}}(N)$ 为 N 个激光脉冲烧蚀阈值, $\varphi_{\text{th}}(1)$ 为初始烧蚀阈值, $\Delta\varphi_s(N)$ 为强化项, $\Delta\varphi_f(N)$ 为

表 3 有效脉冲数与烧蚀阈值的关系

Tab. 3 Relationship between effective pulse and ablation threshold

Materials	Repetition rate/ MHz	Slope of the fit- ted line	Spot radius / μm	Effective number of pulses	Ablation thresh- old/(J·cm ⁻²)
Soda-lime glass	0.05	2 489.47	35.28	22	2.17
	0.2	790.79	19.88	50	5.38
	0.5	593.23	17.22	108	3.65
High-alumina glass	0.05	3 152.93	39.70	25	1.79
	0.2	1 900.51	30.83	77	2.36
	0.5	325.34	12.75	80	4.59

疲劳项。总烧蚀阈值是强化过程(如亚表面致密化)和疲劳过程(如缺陷或纳米光栅累积)相互竞争的结果。对于钠钙玻璃前期强化过程主导,后期疲劳过程占优,因此烧蚀阈值随着有效脉冲数增大,出现“先升后降”的变化规律;高铝玻璃的强化效应远大于疲劳效应,因此烧蚀阈值不断升高。两种玻璃的烧蚀阈值演化规律与石英玻璃存在显著差异:石英玻璃在脉冲数 $N=1\sim 100$ 时呈现断崖式下降,在 $N>100$ 时下降趋势平缓^[18]。

3.3 切割工艺参数优化及验证

实验 3 固定其余工艺参数不变,通过改变飞

秒激光重复频率(0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 MHz)与激光功率,对两种玻璃进行直线划刻,记录其在不同参数条件下的材料响应(材料改性、材料去除、热致损伤)。

表 3 所示重复频率对烧蚀阈值的影响,使得相同激光功率在不同重复频率下,产生不同材料响应,如 0.1 MHz~6.12 W, 0.1 MHz~6.74 W, 0.1 MHz~7.35 W 参数下材料去除, 0.2 MHz~6.41 W, 0.2 MHz~7.48 W 参数下材料改性。如表 4 所示,初步确定的材料去除有效区间为: 0.1 MHz:6.12 W~7.35 W, 0.2 MHz:8.55 W~10.68 W, 0.3 MHz:8.46 W~10.88 W。

表 4 数据集预处理

Tab. 4 Dataset preprocessing

No.	Repetition rate/MHz	Laser power/W	Material response	Numerical code	Predicted value
1	0.025	1.27	Modification	0	
2	0.025	1.39	Modification	0	
3	0.025	1.52	Modification	0	
4	0.05	2.35	Modification	0	-0.209 5
5	0.05	2.58	Modification	0	
6	0.05	2.82	Modification	0	
7	0.1	3.68	Modification	0	
8	0.1	4.29	Modification	0	
9	0.1	4.9	Modification	0	
10	0.1	5.51	Modification	0	
11	0.1	6.12	Removal	0.5	
12	0.1	6.74	Removal	0.5	
13	0.1	7.35	Removal	0.5	
14	0.2	6.41	Modification	Exclude	
15	0.2	7.48	Modification	Exclude	
16	0.2	8.55	Removal	0.5	
17	0.2	9.62	Removal	0.5	
18	0.2	10.68	Removal	0.5	0.648 553
19	0.2	11.75	Damage	1	
20	0.2	12.82	Damage	1	
21	0.3	7.25	Modification	0	
22	0.3	8.46	Removal	0.5	
23	0.3	9.67	Removal	0.5	
24	0.3	10.88	Removal	0.5	
25	0.3	12.08	Damage	1	
26	0.3	13.29	Damage	1	0.920 149
27	0.3	14.5	Damage	1	

考虑到 BP 神经网络训练过程为随机取样,而重复频率是设备预设的有限离散档位,若将其直接视作连续特征做归一化输入模型,会破坏固有物理逻辑、引发特征空间物理意义失真。因此本文以实验 3 获得的 27 组实验数据作为样本,舍弃重复频率输入变量和个别干扰点(0.2 MHz~6.41 W, 0.2 MHz~7.48 W),依托 Python 软件以激光功率作为输入特征,材料响应作为输出表征,随机选取 3 组数据作为测试集,其余 22 组数据作为训练集,实现 BP 神经网络的构建、训练与验证。如表 4 所示,将材料响应状态进行数字化编码,材料改性定义为模型输出值 0,材料去除定义为模型输出值 0.5,热致损伤定义为模型输出值 1,预测结果显示,当预设编码为 0 时,模型预测值为 -0.209 5,接近于 0;当预设编码为 0.5 时,模型预测值为 0.648 533;当预设编码为 1 时,模型预测值为 0.920 149。模型预测结果与实验数据基本吻合,表明所构建的 BP 神经网络模型在 0.025~0.3 MHz 范围内能精准映射工艺参数与材料响应的非线性关联,可实现飞秒激光加工热损伤行为的有效预测。

实验 4 选用单脉冲作用—单扫描次数—200 mm/s 扫描速度—10.68 W 激光功率—0.2 MHz 重复频率,自下而上分层切割 0.55 mm 超薄玻璃,使材料瞬间热气化产生的气化产物与相爆炸产生的等离子体在重力作用下定向排出。通过加工产物与入射激光的空间隔离,有效规避残留产物的光路遮挡和加工表面二次划伤问题,抑制玻璃上表面因承受等离子体反冲力与热应力引发的微裂纹。

飞秒激光对玻璃进行分层加工的过程是先在 EZCAD 软件中绘制 0.1 mm×20 mm 矩形矢量图;再进行二维对象分层切片,考虑到加工效率与加工效果,设置图层间距 30 μm,扫描速度 200 mm/s,大于 3.1 中直线划刻的均值深度和扫描速度,填充类型使用首尾自动连接的弓形填充以减少振镜空跑,层数达 18 层,移动路径线间距设定为 0.01 mm,总加工时间约 40 s。

如图 6 所示是自下而上全厚度切割产生的形貌图,玻璃上表面边缘轮廓连续平直,玻璃下表面存在尺寸不等且均小于十微米的纵向崩边,截面表现出明暗相间的条纹状纹理,在 50 倍显微镜

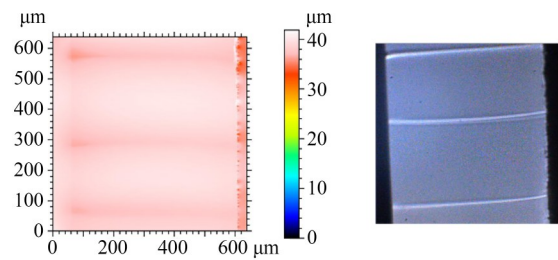


图 6 飞秒激光玻璃切割形貌图

Fig. 6 Femtosecond laser glass cutting morphology

下,测量切割后钠钙玻璃和高铝玻璃的截面表面粗糙度 R_a 值分别为 0.745 9 μm 和 0.503 5 μm,符合汽车前挡风玻璃的行业要求。高铝玻璃由于含有大量的 Al_2O_3 ,硬度和刚度优于钠钙玻璃,因此切割截面质量表现更优。

3.4 挑战与展望

本实验选取小尺寸超薄玻璃样品开展飞秒激光切割基础研究,探索激光功率、重复频率等工艺参数与划痕形貌、烧蚀阈值的关联规律,为车用玻璃激光切割工艺开发提供基础数据支撑。为进一步明确工艺适用边界与潜在改进方向,本节将从以下三个方面展开讨论:

其一,实际车用玻璃多为大尺寸板材,在工业化应用过程中面临光路能量分布不均、焦平面偏移、加工效率低等问题,后续需进一步优化光路校正系统、设计高精度玻璃装甲装置、匹配高效工艺参数,推动飞秒激光切割技术在车用玻璃领域的实际工程化应用。

其二,玻璃厚度对加工热累积与热扩散特性影响显著,因此本文建立的激光工艺参数窗口仅适用于 0.55 mm 超薄玻璃,无法直接推广于常规厚玻璃的加工。

其三,如表 3 显示,当高铝玻璃的重复频率从 0.2 MHz 增至 0.5 MHz 时,对应的有效脉冲数仅由 77 增至 80,变化幅度很小,但烧蚀阈值却从 2.36 J/cm² 显著上升至 4.59 J/cm²。该现象可能与致密化饱和^[30]有关,当表面结构趋近饱和致密态时,能量沉积与吸收方式发生改变,需要更高的能量密度才能击穿该致密层,从而烧蚀阈值陡增。然而,关于这一突变的具体微观机制,目前缺乏直接的实验证据,仍有待进一步的显微结构与成分表征加以确认。

4 结 论

本研究形成了一个从加工机理到工艺实现的完整闭环:首先,通过直线划刻实验和烧蚀阈值计算,揭示飞秒激光与钠钙玻璃/高铝玻璃的相互作用规律;然后基于BP神经网络建立激光加工工艺参数的预测模型;最后采用自下而上全厚度逐层切割工艺,获得形貌规整的高精度切割截面,为飞秒激光加工钠钙玻璃与高铝玻璃提供了关键的工艺选择与优化依据。

(1)在0.05 MHz,0.2 MHz和0.5 MHz重复频率下的有效区间内(排除热损伤与等离子体屏蔽区间),两种玻璃的划痕宽度均随激光功率增加呈持续增大趋势。

(2)在0.2 MHz重复频率下,使用面积推算法求得高铝玻璃的烧蚀阈值是 2.36 J/cm^2 ,低于钠钙玻璃的烧蚀阈值 5.38 J/cm^2 ,因此在其他工艺参数相同、激光功率较低时,高铝玻璃较于钠钙玻璃,表面更易加工出直线划痕;随着激光功率增加,高铝玻璃比钠钙玻璃划痕更均匀;激光功率较高时,高铝玻璃表面更易产生裂纹。

(3)对0.05 MHz,0.2 MHz和0.5 MHz重复频率下求得的烧蚀阈值进行类比,发现钠钙玻璃的烧蚀阈值随有效脉冲数的增加先升高后减小,高铝玻璃的烧蚀阈值则持续增大,此规律与两种玻璃的结构成分有直接关系。

(4)明晰材料改性、材料去除、热致损伤三类特征分区,剔除无效加工与高危缺陷区间,初步获得稳定的工艺参数窗口;基于BP神经网络构建飞秒激光加工工艺参数与材料响应行为之间的非线性预测模型,通过模型优选适配加工参数,实现加工过程热损伤的有效抑制。

(5)选用 $10.68 \text{ W} \sim 0.2 \text{ MHz}$ 激光工艺参数自下而上全厚度切割两种玻璃,得到的边缘轮廓连续平直、截面表面粗糙度 R_a 值小于 $1 \mu\text{m}$,高铝玻璃切割截面的表面粗糙度 R_a 较钠钙玻璃降低约32%。

作者贡献声明:

刘晓娟:测量方法的提出,论文构思和撰写;

张龙:论文审核与编辑写作;

陈贵霖:测量实验数据;

何攀:数据整理和分析。

参考文献:

- [1] 张雅慧. 汽车玻璃也做时髦精[N]. 中国汽车报, 2024-07-22 (024).
ZHANG Y H. Automotive glass is also a fashionista [N]. *China Automotive News*, 2024-07-22 (024). (in Chinese)
- [2] 刘志海. 我国汽车玻璃行业现状及进出口贸易[J]. 玻璃, 2025, 52(10): 8-15.
LIU Z H. The status quo and import and export trade of China's automotive glass industry [J]. *Glass*, 2025, 52(10): 8-15. (in Chinese)
- [3] 余俊. 汽车HUD关键光学组件的微纳级加工与表面质量优化[J]. 大众汽车, 2025, (8): 28-30.
SHE J. Micro-nano machining and surface quality optimization of key optical components for automotive hud [J]. *Volkswagen*, 2025, (8): 28-30. (in Chinese)
- [4] 刘亚楠. 电致变色玻璃在汽车领域的应用现状和发展趋势[J]. 汽车与新动力, 2025, 8(4): 4-7.
LIU Y N. Application status and development trend of electrochromic glass in automobile field [J]. *Automobile and New Powertrain*, 2025, 8(4): 4-7. (in

Chinese)

- [5] 杨文叶,王立,吴亮发,等. 聚碳酸酯(PC)有机玻璃的性能及其在轻量化车窗上应用的研究[J]. 汽车实用技术, 2018, 43(17): 143-146.
YANG W Y, WANG L, WU L F, *et al.* Properties of Polycarbonate (PC) Plexiglass glass and its application on lightweight window [J]. *Automobile Applied Technology*, 2018, 43(17): 143-146. (in Chinese)
- [6] HONG S, KIM Y, OH J. Automobile laminated glass window embedded transmitarray and ray tracing validation for enhanced 5G connectivity [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(8): 6671-6682.
- [7] 刘礼文. 蓝思科技:一块透明玻璃里的“创新密码”[N]. 上海证券报, 2025-08-13 (006).
LIU L W. The innovation code in transparent glass by LENS Technology [N]. *Shanghai Securities News*, 2025-08-13 (006). (in Chinese)
- [8] KUMAR S, SINGH K, KUMAR D. Structure-property correlation of silicate glasses for automobile applications [J]. *Journal of Non-Crystalline Sol-*

- ids, 2024, 639: 123084.
- [9] WEI J C, HE W B, LIN C T, *et al.* Optimizing process parameters of *in-situ* laser assisted cutting of glass - ceramic by applying hybrid machine learning models [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, 62: 102590.
- [10] MOHAMMADI H, POYRAZ H B, RAVINDRA D, *et al.* Surface finish improvement of an unpolished silicon wafer using micro-laser assisted machining [J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2015, 7(2): 107.
- [11] 倪江涛, 邢奥伟, 麻黎娟, 等. 玻璃材料的激光切割分离研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2025, 62(9): 31-46.
- NI J T, XING A W, MA L J, *et al.* Research progress on laser cutting separation of glass materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025, 62(9): 31-46. (in Chinese)
- [12] MARKAUSKAS E, ZUBAUSKAS L, RAČIUKAITIS G, *et al.* Femtosecond laser cutting of 110 - 550 μm thickness borosilicate glass in ambient air and water [J]. *Micromachines*, 2023, 14(1): 176.
- [13] SHIN H, NOH J, KIM D. Bottom-up cutting method to maximize edge strength in femtosecond laser ablation cutting of ultra-thin glass [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106921.
- [14] LUO Y H, XIE X Z, ZHANG Z C, *et al.* Ultrafast laser composite cutting ultra-thin glass [J]. *Optics Communications*, 2024, 555: 130224.
- [15] BUTKUS S. Rapid cutting and drilling of transparent materials *via* femtosecond laser filamentation [J]. *Journal of Laser Micro*, 2014, 9(3): 213-220.
- [16] SHIN H, KIM D. Strength of ultra-thin glass cut by internal scribing using a femtosecond Bessel beam [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 129: 106307.
- [17] 刘姿廷, 袁一鸣, 李子越, 等. 飞秒激光与透明硬质材料的相互作用: 从相变机理到永久光存储 [J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813005.
- LIU Z T, YUAN Y M, LI Z Y, *et al.* Interaction between ultrafast laser and transparent hard materials: from phase change mechanism to eternal optical data storage [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1813005. (in Chinese)
- [18] 苏天颜, 刘超, 全宏升, 等. 熔融石英玻璃飞秒激光微纳加工研究 [J]. *光学技术*, 2023, 49(6): 664-672.
- SU T Y, LIU C, QUAN H S, *et al.* Research of femtosecond laser micronano processing of fused quartz glass [J]. *Optical Technique*, 2023, 49(6): 664-672. (in Chinese)
- [19] 范瑞光. 低注量飞秒激光加工聚晶金刚石的材料去除机理与表面质量研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2025.
- FAN R G. *Study on Material Removal Mechanism and Surface Quality of Polycrystalline Diamond Processed by Low Fluence Femtosecond Laser* [D]. Nanning: Guangxi University, 2025. (in Chinese)
- [20] BUTKUTĖ A, JONUŠAUSKAS L. 3D manufacturing of glass microstructures using femtosecond laser [J]. *Micromachines*, 2021, 12(5): 499.
- [21] ITO Y, SHINOMOTO R, NAGATO K, *et al.* Mechanisms of damage formation in glass in the process of femtosecond laser drilling [J]. *Applied Physics A*, 2018, 124(2): 181.
- [22] ORLANDINI A, BARALDO S, PORTA M, *et al.* Ablation threshold estimation for femtosecond pulsed laser machining of AISI 316L [J]. *Procedia CIRP*, 2022, 107: 617-622.
- [23] 张宇, 熊宝星, 葛子轶, 等. 飞秒激光辐照 Inconel 600 镍合金的烧蚀阈值研究 [J]. *中国激光*, 2025, 52(24): 2402207.
- ZHANG Y, XIONG B X, GE Z Y, *et al.* Study on ablation threshold of inconel 600 nickel alloy irradiated by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(24): 2402207. (in Chinese)
- [24] 蒋新朝, 刘树江, 沈建兴. 钠钙硅玻璃的网络连接程度对力学性能的影响 [J]. *陶瓷学报*, 2020, 41(5): 722-728.
- JIANG X C), LIU S J, SHEN J X. Effect of network connectivity on mechanical properties of soda lime silica glass [J]. *Journal of Ceramics*, 2020, 41(5): 722-728. (in Chinese)
- [25] LOCKER S, CLARK J A, SUNDARAM S K. Structural modifications of soda-lime silicate glasses using femtosecond pulse-laser irradiation [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2021, 12(1): 25-35.
- [26] LAI S Y, EHRHARDT M, LORENZ P, *et al.* Submicron bubbles/voids formation in the subsurface region of soda-lime glass by single pulse fs laser-induced spallation [J]. *Applied Surface Sci-*

- ence, 2020, 502: 144134.
- [27] AHSAN M S, DEWANDA F, LEE M S, *et al.* Formation of superhydrophobic soda-lime glass surface using femtosecond laser pulses [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 265: 784-789.
- [28] 王超凡, 钟聪, 胡浩, 等. Al₂O₃取代SiO₂对铝硅酸盐玻璃结构和性能影响的分子动力学[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(4): 886-893.
WANG C F, ZHONG C, HU H, *et al.* Effect of Al₂O₃ substituting SiO₂ on structure and properties of aluminosilicate glass *via* molecular dynamics analysis [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(4): 886-893. (in Chinese)
- [29] CUI J D, CAO X, SHI L F, *et al.* The effect of substitution of Al₂O₃ and B₂O₃ for SiO₂ on the properties of cover glass for liquid crystal display: Structure, thermal, visco-elastic, and physical properties [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2021, 12(3): 443-456.
- [30] SHCHEBLANOV N S, POVARNITSYN M E, MISHCHIK K N, *et al.* Raman spectroscopy of femtosecond multipulse irradiation of vitreous silica: Experiment and simulation [J]. *Physical Review B*, 2018, 97(5): 054106.

作者简介:

刘晓娟(1986—),女,山西平遥人,硕士研究生,讲师,2012年于内蒙古科技大学获得硕士学位,主要从事飞秒激光微纳加工的研究。E-mail: 493080569@qq.com

通讯作者:

张龙(1988—),男,四川德阳人,博士后,副教授,2011年于华南农业大学获得硕士学位,2014年于华南理工大学获得博士学位,2020于上海交通大学博士后出站,现为西南大学工程技术学院副教授,主要从事精密超精密制造,原子级表面制造,激光微纳制造等方面的研究。E-mail: zhanglong1005@swu.edu.cn