



·光学元件激光损伤·

# 纳秒激光诱导光学元件后表面损伤过程中的 爆炸流场及喷溅行为\*

远 航<sup>1</sup>, 梁凌熙<sup>1,2</sup>, 李宇芯<sup>1</sup>, 淡自强<sup>1</sup>, 朱成禹<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 可调谐激光重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 紫外光学元件损伤动力学的研究是关联物质微观结构演化与光学元件宏观性质变化的重要纽带。在光学元件后表面损伤坑形成的过程中, 激光能量沉积导致材料爆炸形成高温高压物质突破表面, 并伴随形成爆炸流场和喷溅射流。爆炸流场与初始起爆强度具有强关联性, 对爆炸流场及喷溅行为进行研究, 可以帮助分析损伤初期的材料状态变化和响应机制, 是损伤动力学研究的必需环节。基于多种时间分辨成像技术, 捕获了损伤发展前期的材料电离和气化响应演化行为, 分析了材料损伤起爆后气化电离等过程的弛豫时间, 并确定各个行为转化的关键时间节点, 描述了损伤区域能量快速释放的物理过程。

**关键词:** 光学元件损伤; 熔石英; 爆炸流场; 喷溅射流; 损伤动力学

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220395

## Evolution of explosion plume on the rear surface of silica elements in nanosecond laser damaging

Yuan Hang<sup>1</sup>, Liang Lingxi<sup>1,2</sup>, Li Yuxin<sup>1</sup>, Dan Ziqiang<sup>1</sup>, Zhu Chengyu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The study of UV laser induced damage dynamics is the key to exploring correlating evolution of optical elements' microstructure and macroscopic properties. In optical elements damage process on the rear surface, the laser energy deposition causes the material to explode with high pressure and high temperature to break through the rear surface, and it is accompanied with explosion plume and jet particles. The explosion plume is greatly affected by the initial laser energy deposition. The study of the explosion plume can help a lot in analyzing the material state change and response mechanism at the initial stage of damage. In this paper, explosion plume on the rear surface is investigated using a two-color interferometric time-resolved side-viewed imaging system. Assisted with the observation of the collected ejection, the material species, distributions and thermodynamic behaviors of ejections are presented. Based on findings, the key transition nodes of the response behaviors during laser induced damage formation are captured and the temporal evolution of plume is described.

**Key words:** optical elements damage, fused silica, explosion plume, particle jet, damage dynamics

实现惯性约束聚变(ICF)需要建造超大规模的高能、高功率激光装置,在ICF驱动过程中,激光驱动器终端光学系统中的光学元件需要承受能量密度超过 $8\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、351 nm波段的紫外激光<sup>[1]</sup>。而随着点火方案更深入的研究,终端光学元件所承受的能量密度将进一步提升,在此过程中,终端系统中的熔石英和KDP晶体构成的光学元件出现损伤的风险远远高于激光系统基频段的光学元件<sup>[2]</sup>。对于常见于熔石英元件后表面的紫外激光损伤,损伤区域的尺寸随辐照发次的累积呈指数增长<sup>[3-4]</sup>,损伤的存在不仅会降低激光能量的输出,还将大幅增加光场的调制对下游光学元件产生威胁,严重影响装置的性能和运行安全。

\* 收稿日期:2022-12-28; 修订日期:2023-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(61905052)

联系方式:远 航, yuanhang@hit.edu.cn。

通信作者:朱成禹, zhuchy@hit.edu.cn。

理清损伤起源机理与损伤发展规律对准确评估装置中元件的运行状态和制定运行策略具有重要的指导意义。为此, 研究者们迫切需要解析紫外光学元件损伤的产生机理, 并建立紫外损伤动力学模型以阐述其发展过程<sup>[5-7]</sup>。在宏观表现方面, 光学元件的表面损伤表现为元件表面的裂痕、损伤坑<sup>[8]</sup>。而微观层面上, 光学元件损伤包含多个复合物理过程, 激光诱导损伤起源于激光能量在光学元件内部的沉积, 吸收激光能量后导致局部材料熔化, 后续进一步发展为逆韧致吸收等离子体起爆, 再形成高温等离子体以及材料喷溅等行为<sup>[9-10]</sup>。可以看到, 光学元件的损伤使材料的微观结构变化, 最终导致元件宏观性质的变化<sup>[11]</sup>, 对于损伤动力学研究, 需要针对其物理发展过程中的多种演化行为进行梳理, 从多个角度对损伤事件进行切入分析, 进而从多尺度的关联中分析元件损伤的要害所在, 进行有针对性的研究与优化<sup>[12]</sup>。

当前工程运行中, 终端光学系统中的光学元件主要以频率转换晶体及熔石英材料加工元件为主, 其中熔石英光学元件的损伤主要集中于其后表面<sup>[13]</sup>。在其后表面损伤形成过程中, 损伤区域材料经历了数个主要的发展阶段: 缺陷诱导初始激光能量沉积导致局部电离起爆, 表面材料的气化和电离, 亚表面过热材料喷发以及材料机械断裂和剥离<sup>[14]</sup>。通过宏观上可观察到伴随于各个阶段的爆炸流场、喷溅射流和体内应力等行为<sup>[7, 9, 15]</sup>。基于 fs 级脉宽的超快激光和探测手段, 在激光辐照后的数百 fs 至数  $\mu\text{s}$  延期内, 以材料电离为主的激光-物质相互作用过程可进行较好的观察<sup>[16]</sup>; 利用时间分辨阴影成像技术, 可以获得熔石英后表面的激光诱导损伤空气冲击波的传播速度, 并根据 Sedov 爆炸波理论评估空气冲击波的能量<sup>[17]</sup>; 利用双延时探针时间分辨成像系统, 可获取熔石英元件后表面激光损伤的喷溅颗粒物的尺寸和飞行速度<sup>[7]</sup>。

分析元件后表面爆炸流场及喷溅射流行为的瞬态物理信息及时间演化状况, 可以揭示损伤材料的能量弛豫机制, 并结合流场内部等离子体温度和密度分析激光能量沉积初始起爆强度, 是解析损伤前期材料内激光沉积诱导爆炸的重要切入点。在这一阶段, 材料的响应行为涉及到损伤物质爆炸、颗粒喷溅和力学破坏等多物理过程。这些动力学行为一方面受初期响应阶段中材料电离及高温等离子体扩展所驱动, 它们的现象可以反映损伤区域材料在初期阶段的物理参数, 另一方面, 它们形成了元件表面的材料去除、改性和机械破坏, 是导致光学元件光学性能劣化并最终失效的直接原因。因此, 对该阶段激光诱导损伤 (LID, Laser Induced Damage) 行为的深入认识, 将有助于完善关于激光损伤动力学物理过程的描述, 使微观尺度的元件损伤起源和响应行为与最终宏观的光学元件损伤相关联。

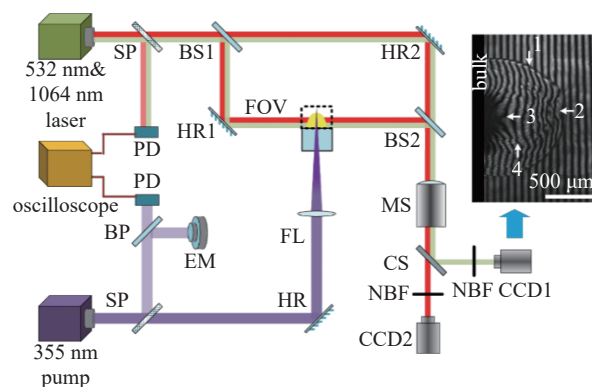
本文以纳秒激光诱导光学元件后表面损伤过程中的爆炸流场及喷溅过程为研究对象, 基于时间分辨成像技术, 结合双波长探针与多种图像分析方法, 获取光学元件损伤后表面爆炸流场及喷溅的时间分辨信息, 以解析激光诱导光学元件后表面损伤过程中的爆炸流场及喷溅行为规律; 通过分析流场内部的物质信息和结构演化, 并结合喷溅物质的统计规律描述了损伤爆炸后的流场动力学过程。

## 1 实验设计

### 1.1 爆炸流场实验

本文采用泵浦光-探针光组合的时间分辨成像以获取激光-材料相互作用过程的瞬态图像信息。实验中, 材料样品首先受到泵浦光的辐照, 能量沉积起爆元件后表面形成喷射流场。在距泵浦光辐照后的一个特定延时期后, 利用探针光穿过泵浦光与材料相互作用的区域, 使其携带激光-物质相互作用的信息, 随后通过显微镜和 CCD 组成的成像系统捕捉探针光, 从而获得该时刻的材料响应图像。通过控制改变探针光相对于泵浦光的延时间隔, 并对具有一定可重复性的物质-材料相互作用过程进行不同延时的多次探针光成像, 将可以获取反映所关注时间段内响应行为演化过程的一系列时间分辨的图像。

实验所用的双波长干涉成像系统构造如图 1 所示。在该系统中, 两种波长即 1064 nm 和 532 nm 激光被用作探针光, 探针光首先被分束镜 (BS) 分为两束, 其中一束作为



BS, beam splitter; HR, reflector; SP, beam sampler; CS, color separator; PD, photon detector; EM, energy meter; NBF, narrow band filter; MS, microscope; FL, focus lens

Fig. 1 Schematic of interference imaging system with dual-wavelength probes

图 1 双波长干涉实验光路

参考光穿过折射率分布相对稳定的大气环境,而另一束探针光穿过泵浦光-材料相互作用区域,探针光和参考光在其后通过第二面分束镜进行合束,从而组成干涉光路。两束光经过显微镜传递,不同波长的激光被色分离镜(CS)导入到对应的 CCD 中,实现双波长的时间分辨干涉成像。

光学元件损伤起爆后将在后表面形成流场,其内部包含丰富的结构细节,主要可以分为四个区域:(1)主冲击波区域,如冲击波的区域 1 所示。该区域位于羽流最外层,条纹向材料表面方向突变式地向左扭曲,这些条纹突变点组成了羽流的外层包络。它们被认为是由于爆炸冲击波对环境气体的挤压形成的压缩空气层,主要成分为高密度中性气体粒子。(2)前端气团区域,如区域 2 所示,这个区域位于冲击波的顶端位置。该处存在中性粒子或阳离子的聚集,导致该区域的折射率上升。(3)微尺寸颗粒喷溅区域,如区域 3 所示。该区域靠近元件表面的羽流中心区,存在第三个条纹强烈向左弯曲的区域,对应于持续的材料喷溅导致的高颗粒密度区域,且越靠近元件表面,喷溅物对探针光的衰减越明显,进而在近表面区域形成阴影区。(4)二次冲击波区域,如区域 4 所示。该区域位于微尺寸颗粒喷溅区域外围,条纹曲率的变化点和扭曲在羽流的内部形成了冲击波包络。二次冲击波的包络可能具有多个层次,它的间断面轮廓较主冲击波要微弱。

在损伤过程中,损伤区域附近空间的物理参数演化和分布情况,是认识损伤事件发展机制的重要数据。在这其中,分析研究损伤冲击波区域的温度、空气压强和自由电子密度的分布和演化,是分析损伤事件中光学元件的物态、等离子体产生及膨胀过程和损伤应力强度的重要手段。而为了获取流场内部的粒子分布信息,需要对所获得的时间分辨干涉图像进行处理,以获取爆炸流场区域内部的相位偏移值的空间分布,进而获取区域折射率分布及物质密度信息。本文针对干涉图像的相位偏移信息提取流程如图 2 所示。

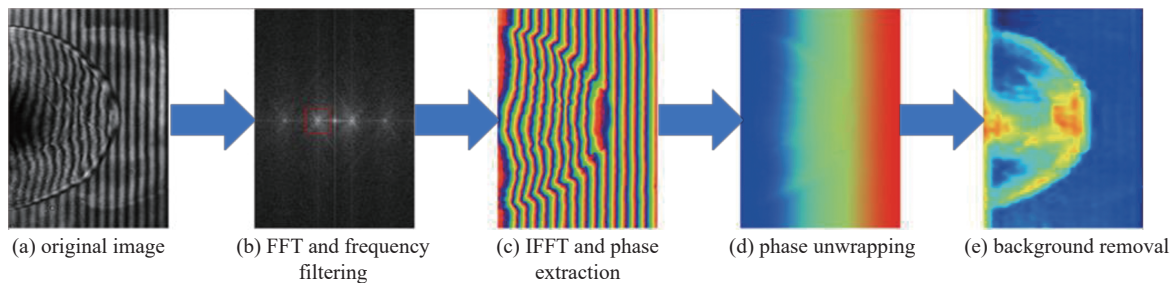


Fig. 2 Extraction processing of phase shift information of interference image

图 2 干涉图像获取流场信息提取流程

对干涉图像进行傅里叶变换以及相位解缠获得连续的相位分布值后,再经过背景相位去除,最终可获得羽流内部的相位分布。基于以上相位分布结果,可以计算得到空间中冲击波的传播状况以及自由电子和气体粒子的密度分布状况。而自由电子密度的分布直接反映出损伤事件中等离子体的演化过程。

### 1.2 喷溅实验

在损伤发展过程中,损伤区域材料的相变、爆炸、机械断裂损伤及冲击应力作用等过程,均有可能产生材料的喷溅物。损伤喷溅作为损伤区域材料去除的重要途径,是构成材料坑洞的主要因素。为了对颗粒喷溅形貌进行观察,需要对喷溅物进行收集,颗粒收集设置示意图如图 3 所示。泵浦光通过 150 mm 焦距的透镜聚焦入射熔石英元件,焦点落在元件后表面以外,以避免熔石英的体内损伤。颗粒主要分布于羽流中心,沿垂直元件后表面的方向朝

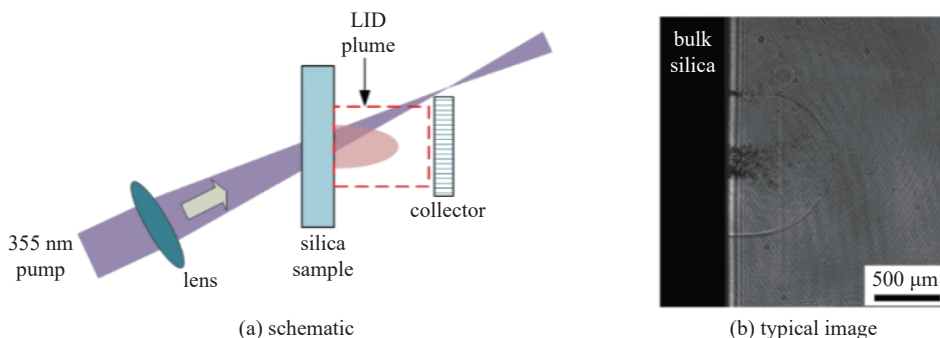


Fig. 3 Schematic of ejected particle collecting setup and typical image of the particle jets

图 3 喷溅颗粒收集设置示意图及喷溅颗粒流的典型图像

空气侧飞行。此外,利用一个垂直元件表面且穿过泵浦光辐照区域的 635 nm 波长激光二极管输出光用作指示光,以标注损伤喷溅流的中心位置。

在元件的后表面以外,采用 50 mm 直径的熔石英圆片作为收集片基底,贴附硅片对出射的喷溅颗粒物进行横向拦截和收集。收集片距离石英样品的距离是 10 mm,随着收集片远离样品后表面,颗粒数量降低,其中大尺寸颗粒的数量下降尤为明显<sup>[18]</sup>。大尺寸固态颗粒产生在损伤后期,不存在熔融特征,且飞行速度较慢,当收集片距离较远时,不容易通过粘附或者冲击嵌入的方式粘附在收集片上,因此收集片的距离尽量靠近样品。所放置的收集片表面与实验样品的后表面平行,且收集片表面区域避开泵浦光的光路辐照,以避免泵浦光造成收集片的损伤并对颗粒分布观察形成干扰。损伤导致的喷溅物吸附于硅片上后,可以直接对硅片样品进行镀金处理,并通过扫描电子显微镜(SEM)进行观察,从而获得附着喷溅物的显微形貌。

## 2 爆炸流场与喷溅分析

### 2.1 爆炸流场内粒子分布和演化

为了进一步分析流场内部的粒子分布规律,将实验中获取的干涉图像进行相位解缠以获取其相位分布。流场内部的羽流最外层为高密度的压缩空气中性粒子,造成折射率上升。在整体分布上,冲击波空间受到最外围的空气压缩层形成的高相位轮廓的约束,其尺寸和形状与冲击波的时间分辨图像相吻合。

区域的折射率上升进而使得相位正向偏移的物质成分可能包括中性粒子和阳离子。其中,电离形成的阳离子的极化率要显著低于中性粒子,因此对折射率的影响要弱于中性粒子。另一方面,由于电离作用产生的自由电子具有导致区域折射率下降的效果,且自由电子密度对应的系数值数量级为  $10^{-22} \text{ cm}^3$ ,在羽流内部主要呈现相位正向偏移的情况下,可知羽流包含的电离物质成分较少,中性粒子密度至少是自由电子和阳离子颗粒密度的 10 倍以上,是构成羽流的主要成分。

经过解缠后的相位分布图像如图 4 所示,延时设定为加载的激光脉冲峰值与探针脉冲峰值之间的延时。在 50 ns 延时时刻,位于羽流前端气团区域(区域 2)与微尺寸颗粒喷溅区域(区域 3)的相位正向偏移区域相互连通,表明在该时刻下,高密度的熔石英颗粒喷射流从元件表面一直贯穿至冲击波的前端。此时颗粒流的内部主要成分为材料气化和微尺寸材料液滴等对探针光的衰减系数较低的物质。这一时刻,损伤区域仍处于高温高压状态,二次爆发过程由材料的剧烈气化行为主导,相变化产物以高于冲击波扩张的速度追赶至冲击波波前,并在前端气团区域(区域 2)不断堆积,使得该处的材料颗粒数量不断增加。

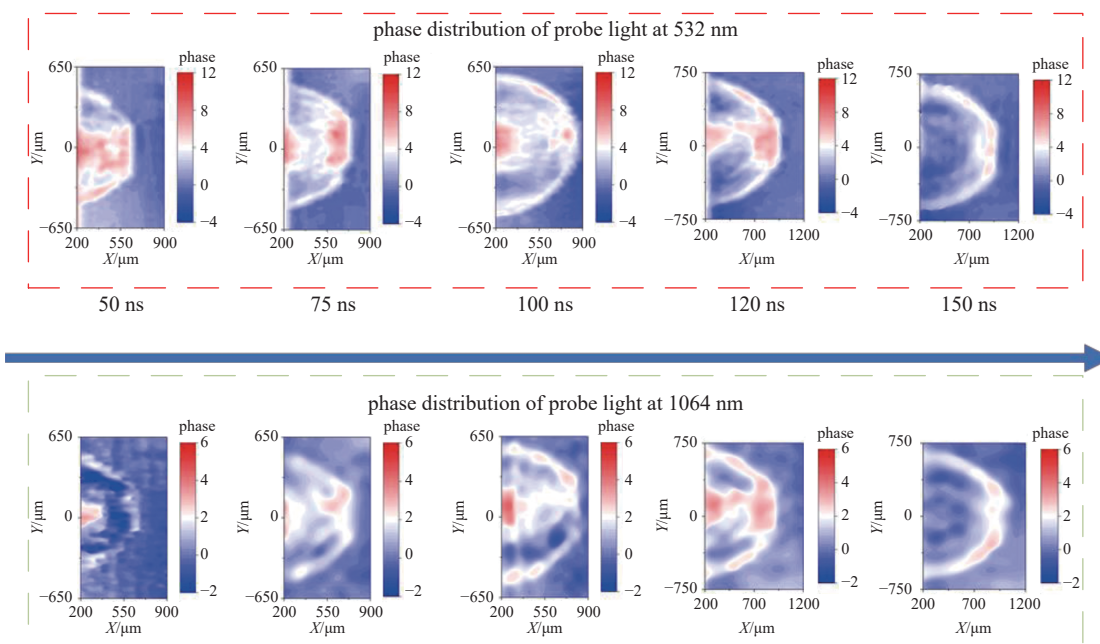


Fig. 4 Phase distribution evolution of the explosion plume

图 4 爆炸流场的相位分布和演化

在 50~125 ns 延时阶段,前端气团区域和微颗粒区域之间出现了由相位正向偏移值下降形成的间隙。此时,元件表面损伤区域的温度和压强随着材料的弛豫过程而降低,导致材料的气化过程衰减,喷射颗粒的飞行速度也

开始下降,从而逐渐落后于主冲击波和前端气团区域的运动和扩张。另一方面,损伤区域温度的下降也使得区域液化材料的粘度升高,新产生的喷溅物从气化物和微尺寸颗粒逐渐转变为更大尺寸的颗粒物,对探针光的衰减效应增强。

在 150 ns 延时时刻,在羽流的内部,包括前端气团和微颗粒喷溅区域,相位偏移值相比于前两个阶段均大幅度减少并接近于 0,损伤造成的喷溅仍在持续。因此,随着损伤区域的进一步冷却,气化过程趋于停止,羽流内原有的气化物和微尺寸液滴也随着羽流的扩展而降温凝结和扩散,对空间折射率的影响下降。熔石英材料气化过程的急剧衰减,意味着在 150 ns 阶段内,损伤区域的温度可能从损伤发展初期的高温迅速冷却至材料的沸点附近<sup>[19]</sup>。

为了对羽流前端气团区域和微颗粒喷溅区域进行进一步分析,针对 50 ns 和 125 ns 两个延时时刻,分别对两个区域的对应位置进行取样,分析该位置上的横向相移分布状况,如图 5 所示。其中红色虚线代表为 1064 nm 探针光获得相位偏移值  $\Delta\phi_{1064}$  的二倍值,以直接和 532 nm 探针光相位偏移值  $\Delta\phi_{532}$  比较。可以看到,在 50 ns 延时时刻,对应损伤产生的初期,如图 5(c) 所示的前端气团区域显示出强烈的双波长相移分布不一致,这种不一致主要由自由电子对不同波长的折射率影响不同所导致,该现象也表明在这一时刻,损伤羽流前端气团充斥着高密度的自由电子。同一时刻下,近表面的微颗粒区域则显示出较为一致的双波长相移分布,显示此时微颗粒中已经以中性粒子成分为主。随着延时增加,前端气团区域的双波长相移分布形状和数值逐渐接近,并在 125 ns 延时时刻基本趋于一致,如图 5(f) 所示,表明前端气团在扩张过程中逐渐冷却,恢复电中性。值得注意的是,在所有延时时刻中,位于主峰两侧的两个侧峰,对应于爆炸形成的压缩空气层,该区域的  $2\Delta\phi_{1064}$  和  $\Delta\phi_{532}$  的值均较为接近,意味着压缩空气层中几乎只含有中性的环境气体。

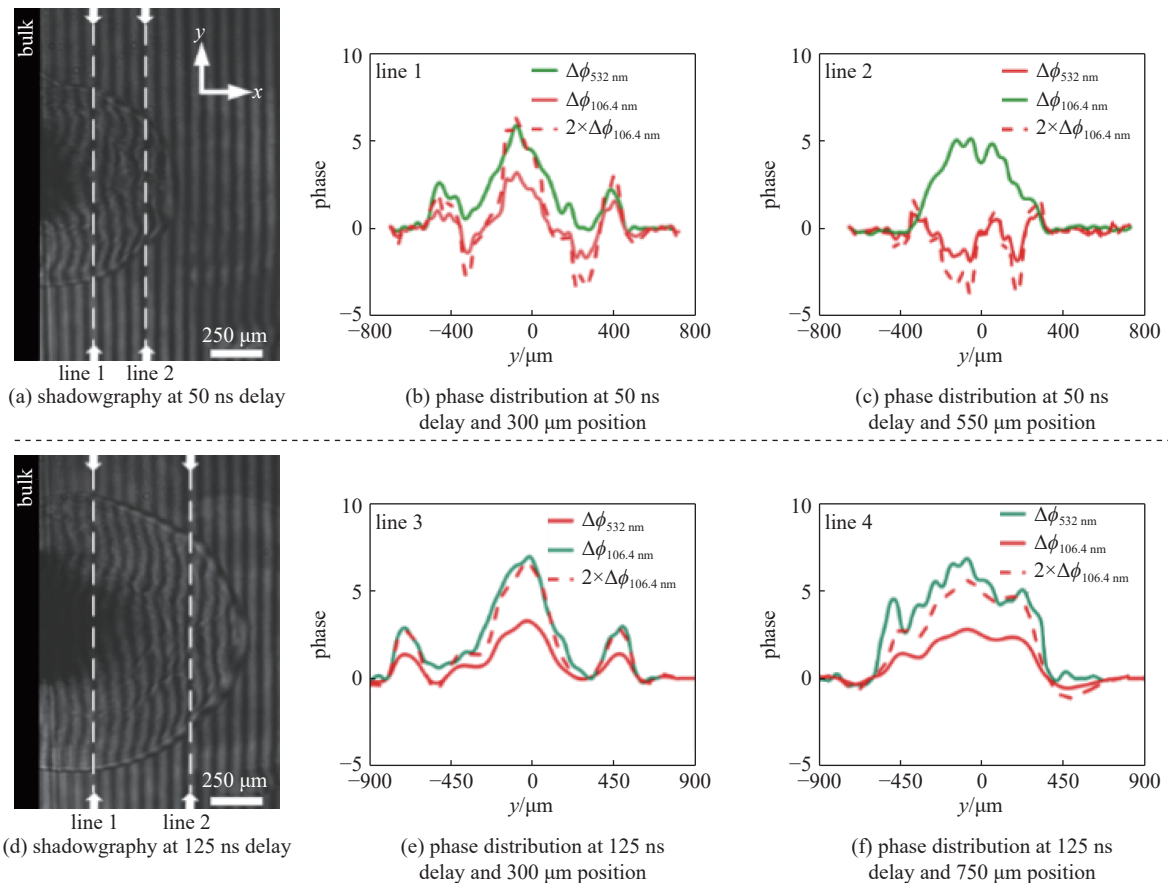


Fig. 5 Lateral distribution of phase shift of dual-wavelength probe at different position from rear surface inside damage plume

图 5 后表面不同位置处的双波长探针相位偏移横向分布

在羽流的形成过程中,首先产生的是表面区域材料剧烈气化形成的气团及气团扩张所形成的主冲击波压缩空气层。所形成的材料气团中包含了部分材料电离形成的等离子体,并占据了冲击波内部的空间。随后,亚表面过热材料爆发并产生持续的微尺寸颗粒喷溅流,喷溅流的口径小于冲击波的横向尺寸,成分以中性的材料颗粒为主。喷溅流进入羽流内部,对原本存在的材料气团产生冲击,大部分的气团物质被喷溅流推向羽流的前端,且随着二次喷溅物质的不断堆积,在前端形成高密度颗粒区域,另有部分的气团物质及其中的等离子体则可能被挤向羽

流的两侧,处于喷溅流和侧面主冲击波空气层之间的区域中。当探针光穿过羽流时,探针光经过了较长距离的气团物质区域,其中存在的等离子体使得该处的探针光相位进一步出现明显的下降,并造成了两种探针光在该处的折射率差异及最终的相位差异。

从流场随时间发展的变化可以发现,流场中心的微颗粒喷溅流具有指向性。相比于主冲击波,微颗粒喷溅流的发展被限制在羽流中心轴线附近,喷射方向垂直于样品表面。喷溅流的运动行为特征同时也驱使着主冲击波在垂直样品表面方向上的发展具有更快的发展速度。

## 2.2 喷溅的行为分析

图6为距离后表面10 mm处收集片拦截获得的喷溅颗粒分布显微图像。可以直观地观察到,较大尺寸的颗粒喷溅物主要聚集在图中所示的直径1.5 mm的黄色虚线圆圈范围内,且颗粒分布的空间密度较高,而相对较小尺寸的颗粒则分布得更为广泛。后文将对收集到的喷溅物颗粒进行扫描电镜成像以分析其颗粒微观结构。

为了进一步分析损伤喷溅颗粒,利用SEM对熔石英后表面紫外损伤所产生的喷溅颗粒进行显微成像,如图7所示,基于喷溅颗粒的尺寸和形貌特征,可以将喷溅物分为四类。

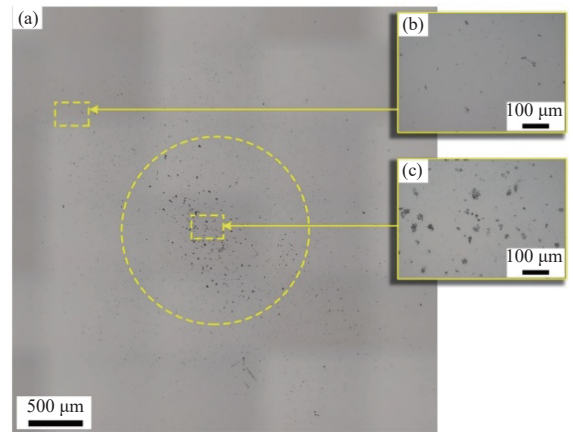


Fig. 6 Ejection distribution on the collecting plate

图6 收集板上的喷溅物分布

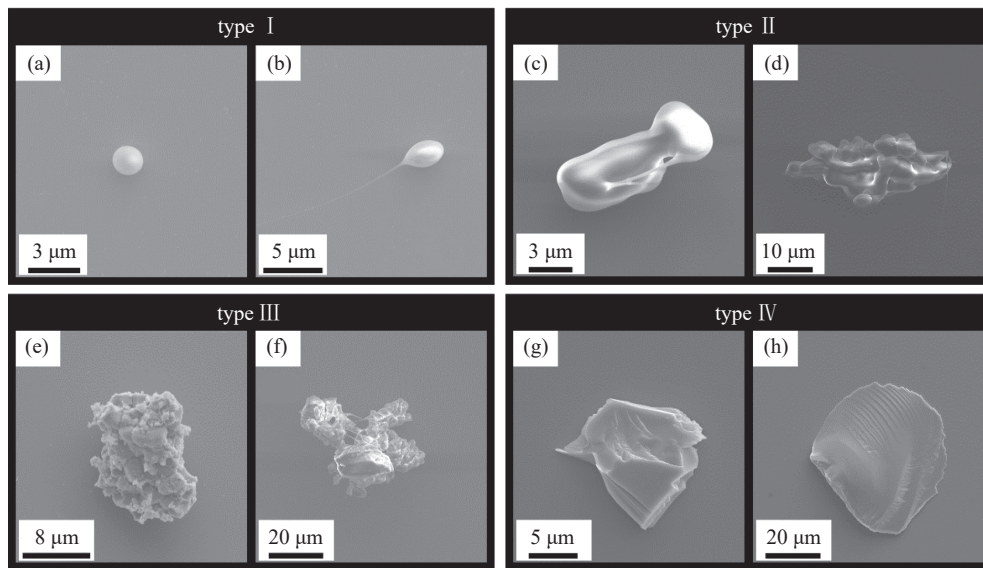


Fig. 7 SEM images of particle ejection generated by UV laser induced rear surface damage of fused silica

图7 熔石英后表面紫外损伤的颗粒喷溅物的SEM图像

第1类喷溅颗粒的形貌如图7(a)和图7(b)所示,这类颗粒主要呈小尺寸液滴状,颗粒主体的直径通常在 $5\ \mu\text{m}$ 以下。颗粒主体轮廓为较光滑的球面,这是由于此类颗粒主要产生于损伤的初期,高温熔融的熔石英材料粘度较低,颗粒的形貌受表面张力的影响而趋近于球形所导致的。

第2类喷溅颗粒的形貌如图7(c)和图7(d)所示,这类颗粒尺寸普遍较第1类颗粒要大,长度介于 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 之间。从形貌上看,这些颗粒的局部轮廓具有部分球状液滴的特征,且其内部存在着部分的丝状纤维网络结构。分析认为,此类颗粒从损伤区域出射时,熔融材料的温度下降,材料的粘度上升,出射的液滴冷却并相互粘附。

第3类喷溅颗粒的形貌如图7(e)和图7(f)所示,相比于前两类颗粒,这两类材料具有较明显的机械损伤造成的断裂形貌,颗粒的尺寸普遍在 $10\ \mu\text{m}$ 以上,且可以发现少量尺寸接近 $50\ \mu\text{m}$ 的相对较大的喷溅颗粒物,该类颗粒主要来源于激光诱导损伤中应力造成的材料机械损伤区域。第3类颗粒主要产生于表面损伤中心熔融区域附近,它的表面粘附了部分液滴状和丝状形貌特征材料,这也意味着机械损伤导致的喷溅颗粒出射时,损伤中心的熔石英材料仍然处于高温熔融状态。

第4类颗粒主要来源于距熔融中心较远的外部区域,如图7(g)和图7(h)所示,部分颗粒的一个表面较为平坦,是通过力学撕裂破坏形成的颗粒。颗粒表面存在多个走向相互平行的裂纹。这种裂纹较符合脆性材料断裂时产生的“河流”花样解理断裂特征,这种断裂常发生在低温、高应变速率和应力集中区域,并主要垂直于最大拉应力作用方向<sup>[20]</sup>。这些断裂沿着相互平行的许多平面以不连续的方式开裂,部分裂纹可能随扩张而相互汇合,总体形成类似河流的纹样。

基于对喷溅颗粒的观察与统计,以直径 $10\ \mu\text{m}$ 作为阈值,对小尺寸颗粒与大尺寸颗粒进行区分。统计过程中尺寸小于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒主要对应于第1类颗粒和尺寸较小的第2类颗粒,它们在羽流截面上分布较广,且密度高,广泛地分布在所观察的收集片范围内,颗粒分布密度较为均匀,未观察到明显的局部聚集特性。而尺寸大于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒主要对应于第3类和第4类颗粒,大尺寸颗粒的分布则明显具有中心聚集性,随半径的增加颗粒分布逐渐减少。

实验对喷溅颗粒的飞行运动图像进行捕获。如图8所示,为一次损伤事件中,通过两束出射延时不同的探针光照明所获得的喷溅颗粒时间分辨图像。实验结果显示,在元件后表面喷射口处,大部分喷溅颗粒的飞行速度在延时前 $200\ \text{ns}$ 阶段为 $1\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级,且随着损伤区域的冷却而降低至 $100\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 甚至 $10\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级。实验平台的高分辨率成像系统景深约为 $3.5\ \mu\text{m}$ ,对于在不同延时时刻的两幅图像中均可观察到的颗粒物,可以认为它们在垂直图像方向上并没有较大的飞行速度分量。

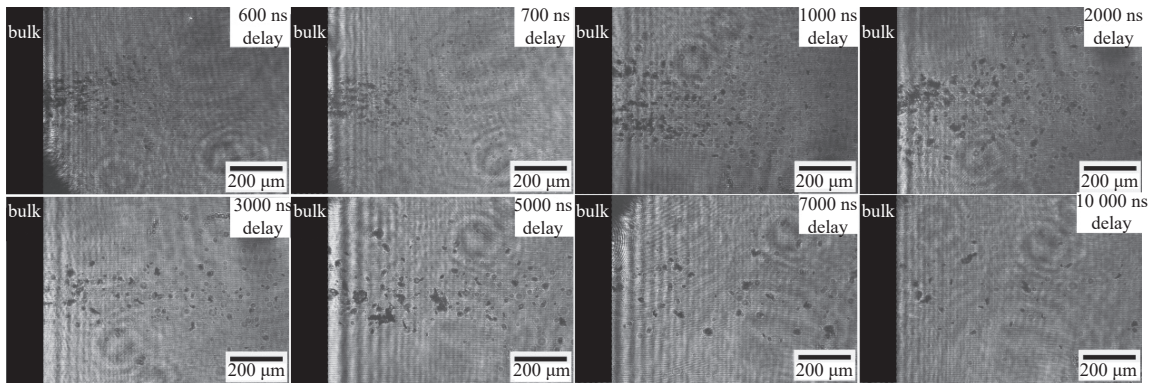


Fig. 8 Images of particle dynamic behavior

图8 喷溅颗粒的飞行运动图像

### 3 爆炸流场与喷溅演化物理过程分析

针对熔石英元件后表面紫外损伤过程,系统分析了能量沉积导致高温高压材料突破后表面产生的爆炸流场随时间尺度的演化,如图9所示,通过结合爆炸流场的物质分布结构演化与损伤喷溅统计信息,梳理损伤爆炸流场与喷溅的动力学物理行为。

延迟 $0\sim 30\ \text{ns}$ 为表面爆炸引起的冲击和气体物质喷射阶段,此过程中冲击波压强在 $10\sim 4\ \text{GPa}$ 区间。此时产生的喷溅颗粒主要呈小尺寸液滴状,颗粒主体的直径通常在 $5\ \mu\text{m}$ 以下。颗粒主体轮廓为较光滑的球面,这是由于此类颗粒主要产生于损伤初期,高温熔融的熔石英材料粘度较低,颗粒的形貌受表面张力的影响而趋近于球形。当熔融材料的液滴从损伤区域处喷溅至空气侧时,部分液滴的一部分可能与损伤区域的熔融材料保持黏连,并在飞行过程中迅速冷却,最终形成一道较细的丝状拖尾。

延迟 $30\sim 80\ \text{ns}$ 为表面下约束的过热物质延迟喷发阶段,此过程中冲击波压强在 $4\sim 0.09\ \text{GPa}$ 区间,该阶段喷射出的颗粒同样具有材料熔融形貌特征,但颗粒的形状更不规则,尺寸普遍更大。同时此类颗粒的尺寸分布范围较广,既有长度约 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物,也存在接近 $40\ \mu\text{m}$ 的较大尺寸颗粒。分析认为,此阶段材料内部的温度已经开始下降,颗粒从损伤区域出射时,材料的粘度上升,形成损伤颗粒的粘连。

延迟 $80\sim 1000\ \text{ns}$ 阶段时,喷射液体材料直至达到热力学稳定液相,此过程中冲击波压强在 $90\sim 0.4\ \text{MPa}$ 区间。此时喷溅颗粒部分呈泡沫状,部分具有较明显的机械损伤造成的断裂形貌,颗粒的尺寸普遍在 $10\ \mu\text{m}$ 以上,同时发现少量尺寸接近 $50\ \mu\text{m}$ 相对较大的喷溅颗粒物,该类颗粒主要来源于激光诱导损伤中应力造成的材料机械损伤区域。此阶段主要为应力破坏过程,激光沉积所形成的过热材料区域的压力可以达到 $\text{GPa}$ 量级,该区域材料的膨胀将对周边的常温材料形成强烈的应力作用,导致周边区域的机械断裂并在表面产生材料的碎片,随后由于应

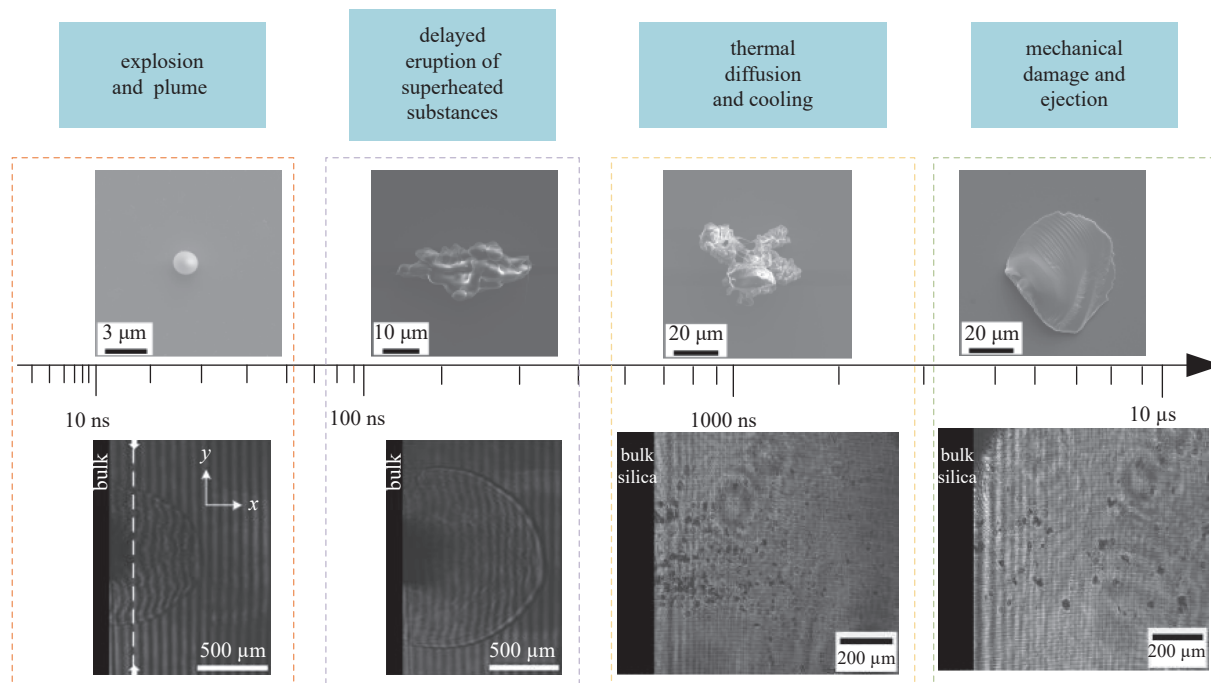


Fig. 9 Optical elements damage process on the rear surface

图9 光学元件后表面损伤行为过程

力冲击或过热材料体积变化等扰动脱离元件形成喷溅物。泡沫状颗粒可能产生于表面损伤中心熔融区域附近,损伤中心的熔石英材料仍然处于高温熔融状态。

延迟大于 1000 ns 主要为应力引起的机械损伤材料喷射过程,此过程中冲击波压强小于 0.6 MPa,该阶段喷射出尺寸在 50  $\mu\text{m}$  以上的碎片状颗粒,其表面有明显的断裂特征,表明喷溅主要来自于爆炸导致材料撕裂。这种裂纹较符合脆性材料断裂时产生的“河流”花样解理断裂特征,这种断裂常发生在低温、高应变速率和应力集中区域,并主要垂直于最大拉应力作用方向。

## 4 结论

本文对光学元件损伤爆炸流场及喷溅进行了时间分辨记录,分析了后表面损伤区域表面材料气化电离、亚表面材料二次喷发和材料的机械断裂剥离行为过程。研究表明,50 ns 延时之前,高温高压的损伤区域首先产生高密度的材料气化和电离物并向外部扩张,形成羽流的空气冲击波和前端气团,其后亚表面过热材料爆发形成中性材料颗粒二次喷发。75~125 ns 延时阶段,随着损伤区域温度和压力下降,二次喷射流逐渐衰减,喷射物速度下降并与前端气团相互脱离。在 150 ns 延时后,损伤区域温度降至材料气化温度以下,二次喷发过程停息,气化物喷射逐渐转变为大尺寸液态和固态颗粒喷溅。由于爆炸因素,材料伴随着由于应力导致的力学机械破坏,该过程的弛豫时间在  $\mu\text{s}$  量级以上。

### 参考文献:

- [1] Spaeth M L, Wegner P J, Suratwala T I, et al. Optics recycle loop strategy for NIF operations above UV laser-induced damage threshold[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 265-294.
- [2] Chambonneau M, Lamaignère L. Multi-wavelength growth of nanosecond laser-induced surface damage on fused silica gratings[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 891.
- [3] Negres R A, Cross D A, Liao Z M, et al. Growth model for laser-induced damage on the exit surface of fused silica under UV, ns laser irradiation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3824-3844.
- [4] Negres R A, Norton M A, Cross D A, et al. Growth behavior of laser-induced damage on fused silica optics under UV, ns laser irradiation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19966-19976.
- [5] Laurence T A, Negres R A, Ly S, et al. Role of defects in laser-induced modifications of silica coatings and fused silica using picosecond pulses at 1053 nm: II. Scaling laws and the density of precursors[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15381-15401.
- [6] Negres R A, Raman R N, Bude J D, et al. Dynamics of transient absorption in bulk DKDP crystals following laser energy deposition[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20447-20458.



- [7] Raman R N, Negres R A, Demos S G. Kinetics of ejected particles during breakdown in fused silica by nanosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 051901.
- [8] Demos S G, Negres R A, Raman R N, et al. Material response during nanosecond laser induced breakdown inside of the exit surface of fused silica[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(3): 444-452.
- [9] Demos S G, Negres R A, Raman R N, et al. Relaxation dynamics of nanosecond laser superheated material in dielectrics[J]. *Optica*, 2015, 2(8): 765-772.
- [10] Kanitz A, Kalus M R, Gurevich E L, et al. Review on experimental and theoretical investigations of the early stage, femtoseconds to microseconds processes during laser ablation in liquid-phase for the synthesis of colloidal nanoparticles[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28: 103001.
- [11] 赵元安, 邵建达, 刘晓凤, 等. 光学元件的激光损伤问题[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 011004. (Zhao Yuan'an, Shao Jianda, Liu Xiaofeng, et al. Tracking and understanding laser damage events in optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 011004)
- [12] 杨李茗, 黄进, 刘红婕, 等. 熔石英元件紫外脉冲激光辐照损伤特性研究进展综述[J]. *光学学报*, 2022, 42: 1714004. (Yang Liming, Huang Jin, Liu Hongjie, et al. Review of research progress on damage characteristics of fused silica optics under ultraviolet pulsed laser irradiation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42: 1714004)
- [13] Huang Jin, Liu Hongjie, Wang Fengrui, et al. Influence of bulk defects on bulk damage performance of fused silica optics at 355 nm nanosecond pulse laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33416-33428.
- [14] 郑万国, 祖小涛, 袁晓东, 等. 高功率激光装置的负载能力及其相关物理问题[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (Zheng Wanguo, Zu Xiaotao, Yuan Xiaodong, et al. Damage resistance and physical problems of high power laser facilities[M]. Beijing: Science Press, 2014)
- [15] Demos S G, Negres R A, Rubenchik A M. Dynamics of the plume containing nanometric-sized particles ejected into the atmospheric air following laser-induced breakdown on the exit surface of a CaF<sub>2</sub> optical window[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 031603.
- [16] Nguyen V H, Kalal M, Suk H, et al. Interferometric analysis of sub-nanosecond laser-induced optical breakdown dynamics in the bulk of fused-silica glass[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 14999-15008.
- [17] Demos S G, Raman R N, Negres R A. Time-resolved imaging of processes associated with exit-surface damage growth in fused silica following exposure to nanosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4875-4888.
- [18] Peng Ge, Zhang Peng, Dong Zhe, et al. Spatial sputtering of fused silica after a laser-induced exploding caused by a 355 nm nd: YAG laser[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 980249.
- [19] Bude J, Guss G, Matthews M, et al. The effect of lattice temperature on surface damage in fused silica optics[C]//Proceedings of SPIE 6270, Laser-induced Damage in Optical Materials. 2007.
- [20] Zhu Chengyu, Liang Lingxi, Yuan Hang, et al. Investigation of stress wave and damage morphology growth generated by laser-induced damage on rear surface of fused silica[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3942-3951.