

纳秒激光诱导 K9 光学元件体损伤增长特性

蒋勇^{1,3,4*}, 张远恒¹, 刘欣宇¹, 古廷威¹, 周照明¹, 张敦祥¹, 陈世龙¹,
刘娟¹, 邱荣^{1,3,4}, 王毕艺², 官上洪², 郭德成^{1,3,4}, 王慧丽^{1,3,4}

¹西南科技大学理学院, 四川 绵阳 621010;

²光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308;

³西南科技大学中国工程物理研究院激光聚变研究中心极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010;

⁴四川省军民融合研究院, 四川 绵阳 621010

摘要 针对激光诱导 K9 玻璃元件体损伤问题, 利用在线成像技术获得激光诱导体损伤时的侧面和正面图像, 并分析体损伤中成丝损伤的特点及成丝损伤中成核损伤和裂纹对损伤增长的影响。结果表明, 当激光辐照能量大于体损伤阈值时, 体损伤会以成丝损伤、成核损伤及损伤增长的形式出现, 但只有最靠近入射激光方向的成核损伤点会在后续激光辐照下出现持续增长现象。成核损伤在损伤增长过程中的裂纹更多向纵向和逆激光传播方向扩展。同时, 在相同能量的激光辐照下, 损伤面积的增长强烈依赖于成丝损伤点的长度, 且从侧面方向观察到的损伤点的损伤增长系数大于从正面方向观察到的。研究结果为对 K9 玻璃元件体损伤及其在后续激光辐照下的损伤增长规律研究提供了参考性。

关键词 激光光学; K9 光学元件; 激光诱导损伤; 损伤增长; 裂纹; 成丝

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1614003

Bulk Damage Growth Characteristics of K9 Glass Induced by Nanosecond Laser

Jiang Yong^{1,3,4*}, Zhang Yuanheng¹, Liu Xinyu¹, Gu Tingwei¹, Zhou Zhaoming¹,
Zhang Dunxiang¹, Chen Shilong¹, Liu Juan¹, Qiu Rong^{1,3,4}, Wang Biyi²,
Guan Shanghong², Guo Decheng^{1,3,4}, Wang Huili^{1,3,4}

¹School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

²Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjing 300308, China;

³Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Research Center of Laser Fusion,
China Academy of Engineering Physics, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China;

⁴Sichuan Civil Military Integration Institute, Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract To address the problem of bulk damage of K9 optical components induced by laser irradiation, the on-line imaging technology is used to obtain front- and side-view images of laser-induced bulk damage. The characteristics of filament damage in bulk damage, influence of nucleation damage in filament damage, and effect of crack on damage growth are investigated. Results indicate that when the irradiation energy is larger than the bulk damage threshold, the bulk damage appear in the forms of filament damage, nucleation damage, and damage growth. However, only the nucleation damage site closest to the direction of the incident laser beam continues to grow under subsequent laser irradiation. Moreover, in the damage-growth process, the cracks of nucleation damage propagate along the longitudinal and reverse directions of propagation of the laser beam. Further, under the same laser irradiation, the growth of damage area strongly depends on the length of the filament damage site. Moreover, the damage-growth coefficient of the damage site observed in the side direction is larger than that observed in the front

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-05-06; 录用日期: 2020-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(61705205, 11972313, 61775235, 61505170)、大学生创新创业计划(S201910619039, S201910619073)、国防基础科研计划(JCKY2020210C005)、西南科技大学龙山人才计划(17LZX669, 18LZX516)

* E-mail: y_jiang@swust.edu.cn

direction. These results can provide a reference for investigating bulk damage and damage growth mechanisms under subsequent laser irradiation of K9 optical components.

Key words laser optics; K9 optical component; laser-induced damage; damage growth; crack; filamentation

OCIS codes 140.3330; 160.6030; 260.7190

1 引 言

随着高功率激光装置的快速发展和人们对具有高负载能力光学元件的需求,熔石英和 K9 等玻璃元件作为屏蔽片、透镜及 pick-off 镜,因具有优良的光学和物理性能而被大量用于激光系统中^[1-2]。但这些光学元件的表面或者体内在强激光辐照下极易发生损伤,并且有些初始损伤在后续激光辐照下会发生损伤增长现象,最终造成不可逆的功能性破坏^[3]。目前,光学元件的损伤问题已成为限制激光功率提高的关键因素之一^[1,4],因此研究这些光学元件的损伤特性及其损伤增长情况对高功率激光器的正常运作和损伤预测具有重要意义。

目前已有大量关于 K9 玻璃元件表面损伤的研究^[5-7],而关于体损伤的研究鲜有报道。韩敬华等^[8]利用纳秒激光脉冲辐照 K9 玻璃,分析得其体损伤形貌是前端较大、后端逐渐减小的纺锤型,并认为这样的形貌可能是由自由电子对激光能量的吸收、激光能量在轴向空间的沉积及冲击波压强等因素引起的。Song 等^[9]对激光产生的冲击波诱导 K9 玻璃的损伤进行研究,指出材料在冲击波的中心区域和周围区域分别经历了不同的加载模式,最后使玻璃表面损伤形貌产生差异。邱荣等^[10]利用超快时间分辨阴影图的方法,认为体损伤同时存在点缺陷吸收爆炸和自聚焦成丝两种机制,且自聚焦效应决定损伤长度、点缺陷吸收爆炸决定损伤区的宽度。贾俊等^[11]将激光脉冲聚焦在 K9 玻璃表面,认为产生

带有点状损伤的丝状破坏是由动态自聚焦作用和内部缺陷或颗粒对激光的吸收引起的。Wang 等^[12]基于瞬态热传导三维模型和有限元法软件 ANSYS,研究了脉冲激光照射 K9 玻璃的损伤特征,指出 K9 玻璃的热应力损伤主要由环向应力决定,玻璃表面的环向应力由压应力变为拉应力,而径向热应力则总是以压应力的形式出现。同时结果也表明,在低于熔化温度的情况下,K9 玻璃体损伤的发生早于表面损伤。

上述研究多注重于对 K9 玻璃初始体损伤形貌和损伤机理的研究,而对其体损伤增长特性的研究鲜有报道。基于此,本文针对 K9 玻璃体损伤增长问题,重点分析 K9 玻璃内不同尺寸的初始体损伤在后续激光辐照下的增长特性,及裂纹和应力对体损伤增长规律的影响。

2 实验装置

实验系统主要由激光器、能量卡计、准直光源、聚焦透镜、样品载物台(三维可调,步进精度为 $1\ \mu\text{m}$)、计算机及成像 CCD 等组成,如图 1 所示。实验所用激光器为 Nd:YAG 激光器(LAB-190-10, Spectra-Physics 公司),输出激光波长为 $355\ \text{nm}$,脉宽为 $10\ \text{ns}$,能量波动为 5% ,光斑呈高斯空间分布。光束经焦距为 $1\ \text{m}$ 的透镜后聚焦在样品体内,光束品质分析仪测量对应位置的光斑大小,为 $0.12\ \text{mm}^2$ 。系统中 CCD1 主要用于侧面观察损伤点的图像,CCD2 主要用于正面观察损伤点的图像,

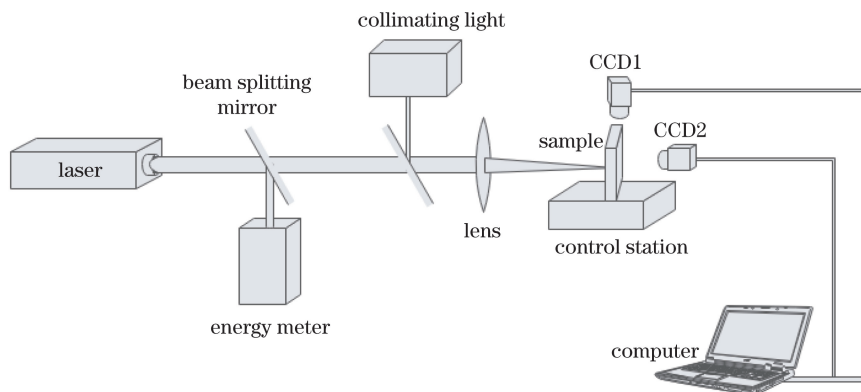


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

为避免激光损伤 CCD2, 将 CCD2 与样品法线方向之间的夹角调整成 15° 。实验样品为 K9 光学玻璃, 尺寸为 $100\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 六面精抛光, 并规定激光入射样品前表面, 激光出射面为样品后表面。

3 实验结果与讨论

3.1 损伤测试阈值

光学元件自身的不均匀性和光束飘移会使聚焦光斑在元件体内波动, 造成元件损伤阈值和损伤位置存在一定的波动^[13]。实验采用 R-on-1 方式测试样品的体损伤阈值, 取导致损伤的对应发次及倒数第 2 发次的两发次激光能量之和的平均值作为该辐照点的初始损伤阈值。对每个样品至少测试 10 个点, 取所有能量波动较小的损伤阈值的平均值作为该样品的总体 R-on-1 损伤阈值。最终测得样品的体损伤阈值约为 16.62 J/cm^2 。以此能量密度作

为参考, 在体内制造具有不同形貌的初始体损伤点, 并继续以此能量辐照初始体损伤点, 判断其损伤增长规律。

3.2 损伤增长

图 2 和图 3 分别为在后续激光辐照下一典型体损伤在增长过程中的侧面 (CCD1 拍摄) 和正面 (CCD2 拍摄) 图像。其中图 2(a) 和图 3(a) 为初始体损伤图, 为与后续体损伤增长对应的激光发次区分开, 将初始体损伤图视为第 0 发次激光辐照图。可以看出, 因激光光斑的尺寸较小, 体损伤首先以丝状损伤的形式产生于样品中心区域, 如标识 1 所示, 且越靠近后表面, 丝状损伤的尺寸越小, 类似于纺锤体, 长度约为 $913\text{ }\mu\text{m}$, 并伴随轻微的后表面损伤, 如标识 2 所示。当激光以相同能量继续辐照损伤点, 如图 2(b) 所示, 成丝损伤程度增强, 且丝状损伤向前表面发展, 丝状长度约为 $1228\text{ }\mu\text{m}$, 宽度也进一步增加, 同时后表面损伤程度也继续增强。

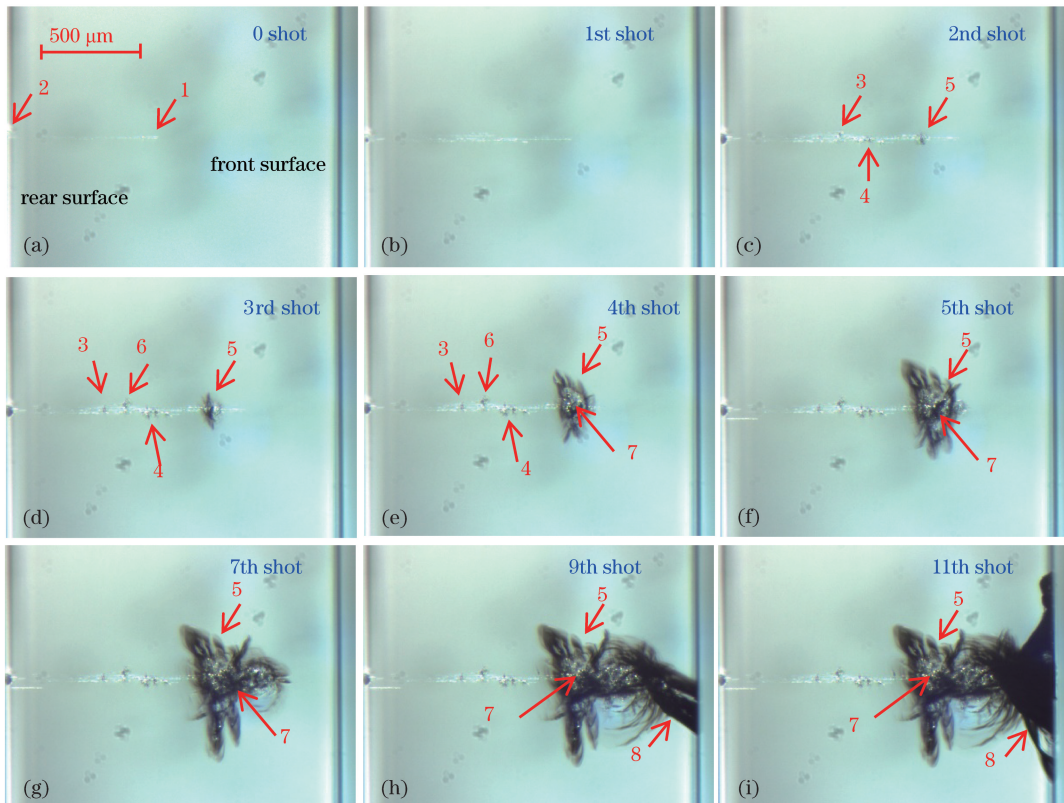


图 2 体损伤的侧面图

Fig. 2 Side-view images of bulk damage

当第 2 发次激光辐照后, 损伤已发生明显变化, 丝状损伤和后表面损伤程度继续增强且继续向前表面扩展, 丝状长度约为 $1435\text{ }\mu\text{m}$, 丝状损伤上已出现较为明显带有裂纹的损伤点, 称此为成核损伤, 在标识 3、4、5 位置处出现了较为明显的成核损伤, 如

图 2(c) 所示。其中标识 5 位置处的成核损伤程度最严重, 标识 4 位置处次之, 标识 3 位置处相对较弱。当第 3 发次激光辐照成丝损伤后, 丝状损伤和后表面损伤没有明显变化, 但标识 3、4、5 位置处的成核损伤程度发生较为明显的变化, 其中标识 3 和

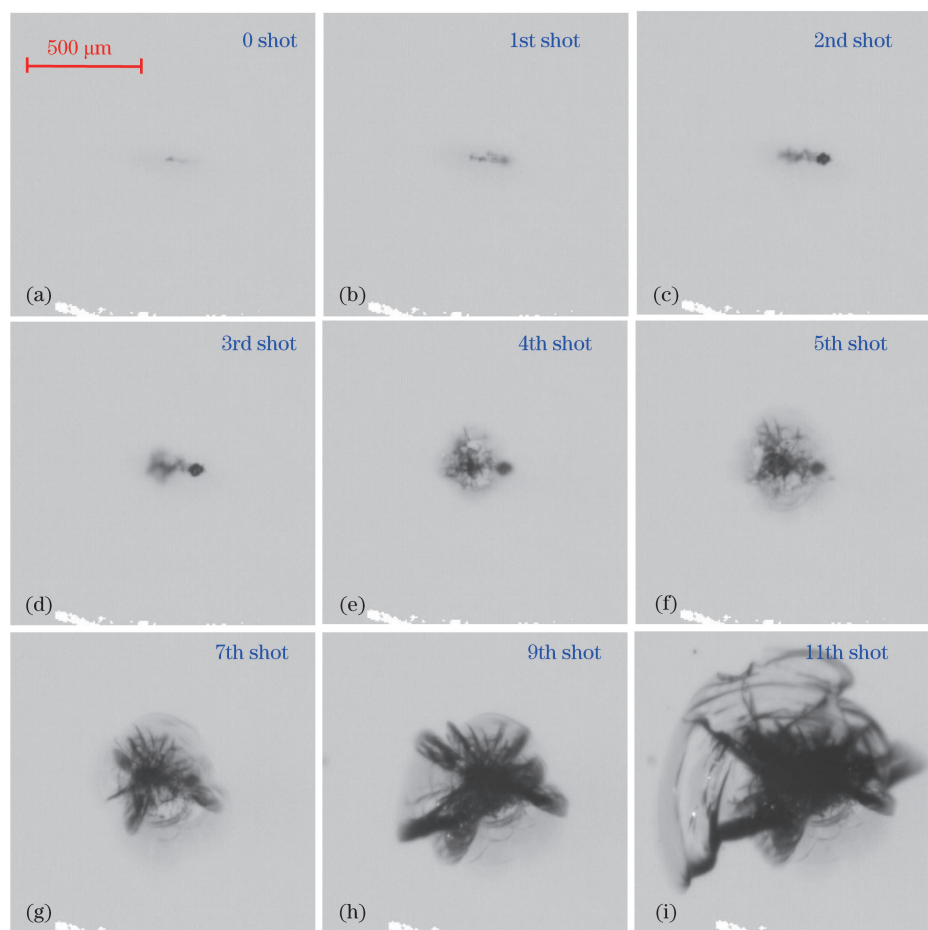


图 3 体损伤的正面图

Fig. 3 Front-view images of bulk damage

标识 4 位置处的成核损伤程度稍微增强,而标识 5 位置处的成核损伤已经发生成核损伤增长现象,且伴随诸多微小裂纹,同时值得注意的是,在标识 6 位置处出现新的成核损伤,如图 2(d)所示。

当第 4 发次激光辐照后,丝状损伤、后表面损伤、标识 3、4、6 位置处的成核损伤已无明显变化,但标识 5 位置处的成核损伤增长现象进一步加强,裂纹数量和尺寸也进一步增加和扩展,且在成核损伤的中心区域(标识 7 所示)出现了大量细碎的损伤颗粒物,如图 2(e)所示。随着辐照发次的继续增加,如图 2(f)~(h)和图 3(f)~(h)所示,裂纹和细碎颗粒物的尺寸和数量迅速扩展和增加,进而导致侧面和正面损伤增长的影响区域迅速扩大。同时随着损伤区域向前表面的扩展,前表面损伤点形成,如图 2(h)中标识 8 位置处所示。当激光继续辐照时,会出现更大区域的前表面损伤,如图 2(i)中标识 8 位置和图 3(i)所示。

为进一步研究辐照激光发次对损伤区域的影响,测试每发次激光辐照后的损伤点侧面和正面的

面积,得到损伤点面积与辐照激光发次的关系,如图 4 所示。可以看出,不论是从侧面还是正面,获得的损伤点的面积的总体变化规律与光学元件表面损伤增长分布规律相同,服从指数增长分布规律^[14];从侧面观察得到的面积小于从正面观察到的面积。且从图 4(a)可以看出,随着辐照激光发次的增加,在第 10 发次激光辐照及以后发次激光辐照过程中,损伤面积并未完全呈指数增长趋势。

为进一步验证不同初始体损伤形貌在后续激光辐照下的增长特性,图 5 和图 6 分别展示了对不同尺寸的成丝损伤点进行损伤增长的测试结果。为便于区分,分别将图 5 和图 6 所示点称为特征损伤点 2 和特征损伤点 3。两特征损伤点的初始体损伤均为丝状损伤,其长度分别约为 240 μm 和 1920 μm 。

特征损伤点 2 的初始丝状损伤长度较短,在后续激光辐照下,因辐照激光能量较大,丝状损伤增长的幅度较大,其丝状损伤长度增加到约 1500 μm ,如图 5(b)所示。且在后续激发辐照下,长度没有明显增加,如图 5(c)所示。但值得注意的是,在较高的

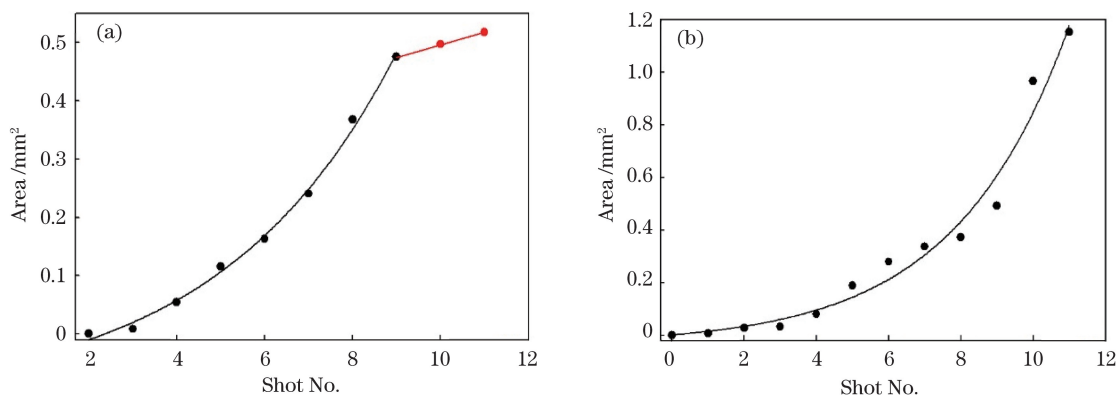


图 4 不同方向下损伤点面积与辐照激光发次的关系。(a)侧面;(b)正面

Fig. 4 Relationship between damage site area and irradiation number at different directions.

(a) Side-view; (b) front-view

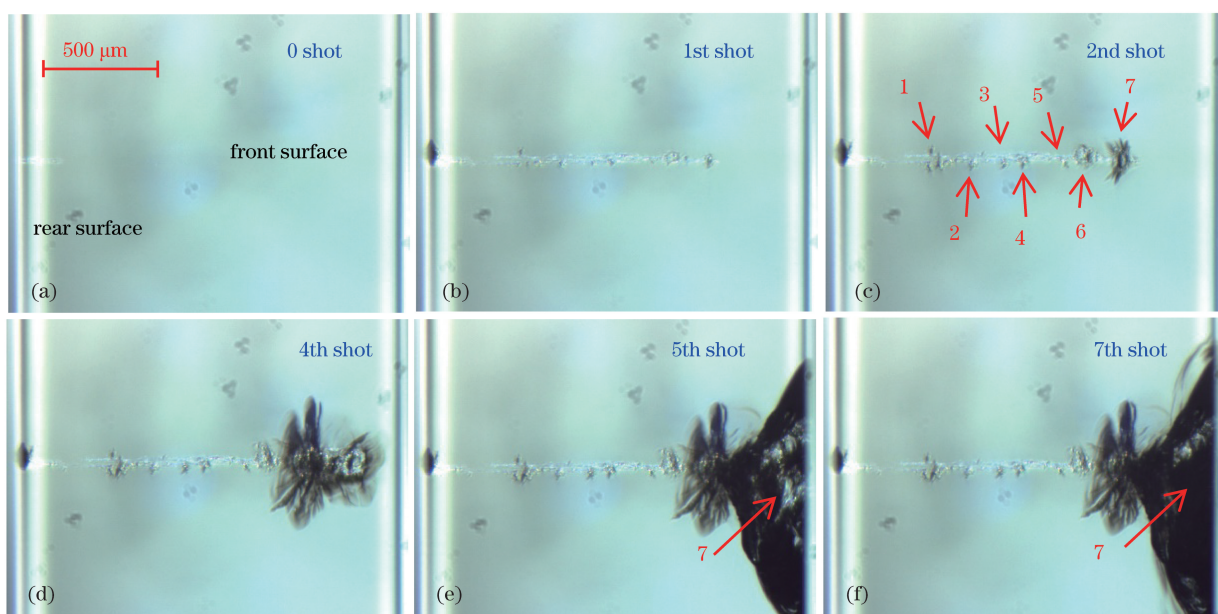


图 5 特征损伤点 2 的侧面图像

Fig. 5 Side-view images of typical damage site 2

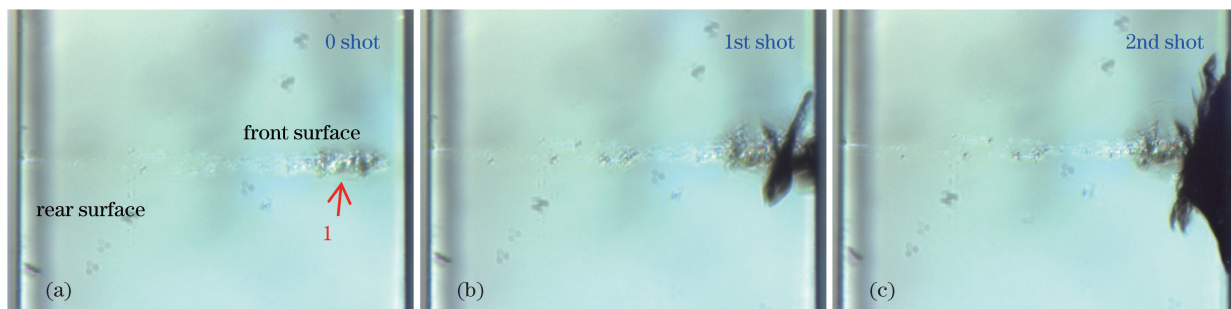


图 6 特征损伤点 3 的侧面损伤图像

Fig. 6 Side-view images of typical damage site 3

激光能量辐照下,出现了类似图 2 所示的损伤现象,丝状损伤上出现多个成核损伤点,且在第 2 发次激光辐照下,成核损伤点明显,如图 5(c)所示,并且只有最靠近激光入射方向的那个损伤点的裂纹及损伤

面积(标识 7)会在后续激光辐照下持续增长,直至达到前表面损伤。对于特征损伤点 3 而言,因成丝损伤点尺寸较大,且损伤严重,在后续激光辐照下,损伤发展速度更快,导致达到前表面损伤所需的激

光发次减少。

图 7 为特征损伤点 2 和 3 在不同方向上的损伤面积随激光发次增加的变化曲线图,可以看出,与

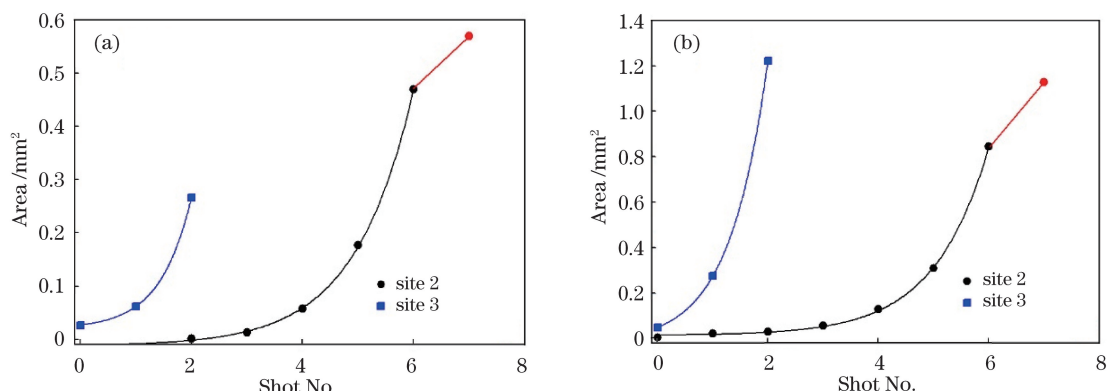


图 7 不同方向下损伤面积随激光发次增加的变化趋势。(a)侧面;(b)正面

Fig. 7 Change trend of damage area with increase of irradiation number at different directions.

(a) Side-view; (b) front-view

3.3 讨 论

从图 2、5、6 可以看出,在小光斑激光辐照下,体损伤主要以成丝损伤的形式出现,但随着激光辐照发次的增加,成丝损伤点上会出现多个成核损伤点,且靠近激光入射方向处的成核损伤点的损伤程度会在后续激光辐照下进一步增强。产生这样现象的主要原因是靠近激光入射方向的成核损伤点对入射激光具有屏蔽效应。成丝损伤点上包含很多碎裂的颗粒,当激光入射至成丝损伤处,靠近激光入射方向的颗粒吸收大量的激光能量,从而产生大量的等离子体,等离子体对后续激光强烈的吸收作用及熔融区域中细碎的颗粒物质对激光的散射使激光的传输受到阻碍,激光能量的损耗使得后端损伤增长率减小,这也是图 2 中标识 3、4、6 位置,及图 5 中标识 1~6 位置处成核损伤面积无法继续增加的主要原因。

从图 4 和图 7 的损伤增长曲线可以看出,无论哪种类型的丝状损伤,其在损伤增长过程中的损伤面积总是随激光辐照发次增加呈指数形式增长,即 $A = A_0 e^{\alpha N}$ 形式,其中 A 为损伤面积, A_0 为初始损伤尺寸, α 为损伤增长系数, N 为辐照发次。表 1 给出了图 2(site 1)、site 2、site 3 三个特征损伤点在侧面和正面的损伤增长系数、相应丝状损伤的初始尺寸和最终尺寸。因丝状损伤在激光辐照初期也在增长,此处重点关注丝状损伤的最终尺寸与损伤面积增长系数的关系。由表 1 可以看出,丝状损伤点的尺寸越长,导致丝状损伤的宽度越长,进而导致成核损伤点在后续损伤增长过程中具有越大的损伤面积增长系数;从侧面观察到的损伤面积增长系数大于

图 4 所示的结果一致,侧面和正面损伤点面积随激光辐照发次增加仍呈指数增长趋势。但损伤点尺寸不一致,导致曲线增长率不一致。

从正面观察到的增长系数。图 8 为初始体损伤长度与损伤面积增长系数的关系,可以看出,丝状损伤尺寸与损伤面积增长系数呈正比例关系,进而可知,如果光学元件体内的丝状损伤越长,必然会有较严重的损伤增长过程,这会对光学元件的透光功能产生严重影响。

表 1 成丝损伤尺寸与损伤增长系数

Table 1 Size of filament damage and damage growth coefficient

Site	Filament size / μm		Growth coefficient	
	Original	Final	Side-view	Front-view
1	913	1228	0.597	0.472
2	240	1500	1.232	0.783
3	1920	1920	1.916	1.651

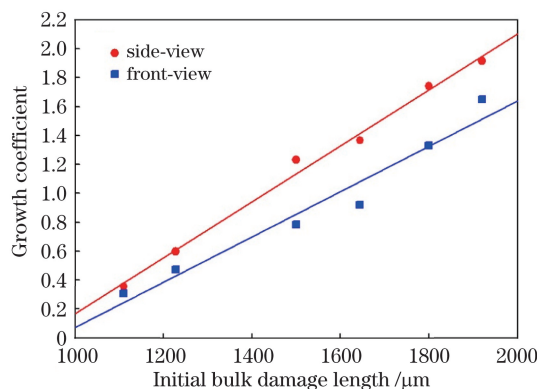


图 8 初始体损伤长度与损伤增长系数的关系

Fig. 8 Relationship between initial bulk damage length and damage growth coefficient

表 1 和图 8 中的结果表明,侧面方向观察到的

损伤增长系数大于正面方向观察到的,这归因于体损伤过程中的颗粒物吸收激光导致的等离子体及相应裂纹扩展过程。从图 2 和图 5 中可以看出,在损伤增长初始,成核损伤点内的碎裂颗粒物较小,裂纹较细,如图 2(d)标识 5 和图 5(c)标识 7 对应位置的损伤点所示。随着激光辐照发次的增加,成核核心

区域的碎裂颗粒物增多,能吸收更多的激光能量,最后转换为热应力。图 9 为成丝损伤点周围的应力分布,可以看出,应力大量存在于裂纹周围,且辐照激光发次越多,损伤越厉害,应力也就越强,最终导致更多裂纹在横向和纵向上加速扩展,从而具有更大的损伤增长系数。

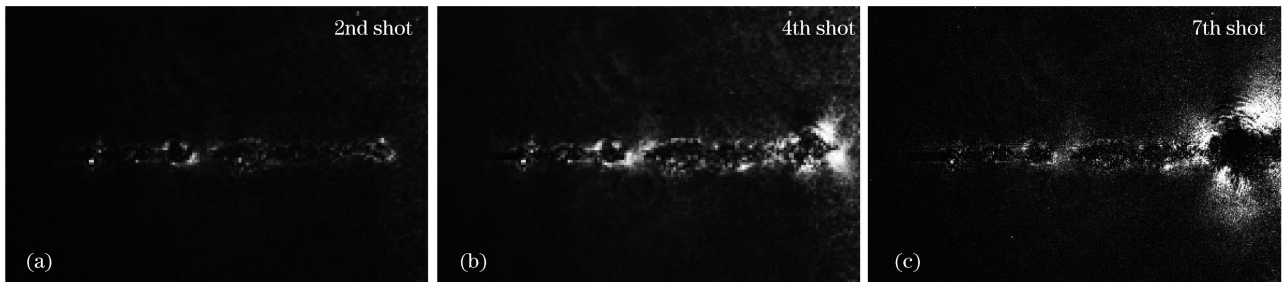


图 9 成丝损伤点周围的应力分布

Fig. 9 Stress distribution around filament damage sites

同时从图 4 和图 7 可以看出,当成丝损伤扩展成表面损伤时,受激光光斑尺寸的限制,侧面和正面上的损伤面积不再遵循指数增长分布。当表面损伤尺寸大于光斑尺寸时,其表面横向尺寸不再快速增长,而是如图 5(e)中标识 7 所示,损伤点中还有一部分透明的碎裂物质,在后续的激光下,大部分激光能量被这些碎裂物质吸收而喷射到空气中,仅少部分能量被转化,以扩展裂纹尺寸并形成新的裂纹。

4 结 论

利用波长为 355 nm 的脉冲激光,将以 R-on-1 方式测试得到的损伤阈值作为参考激光能量,研究 K9 玻璃体损伤的特点及增长演化规律。研究过程中主要采用从侧面和正面方向上观察激光辐照后体损伤的形式,结果表明,由于 K9 元件自身的不均匀性和光束飘移,聚焦光斑在元件体内波动,即使在相同的激光能量辐照下,体损伤位置和损伤形貌都存在很大的差异性。体损伤首先以丝状形式出现,然后扩展到一个稳定的尺寸,当后续激光继续辐照时,在丝状损伤上会出现成核损伤点。且在逆激光传播方向上,最近的成核损伤点因吸收大量的激光能量而出现损伤增长,同时由于等离子体屏蔽效应,后续的成核损伤点无法继续增长。另外,成核损伤点吸收大量激光能量后出现更大的热应力,进一步促进了裂纹的快速扩张,进而导致损伤面积增加。值得注意的是,本文仅仅研究了在相同激光能量辐照下 K9 元件体损伤增长的特点及规律,而关于不同激光能量辐照下成核损伤点的损伤增长系数、

裂纹扩展与应力的关系等问题,还需要进一步探索与研究。

参 考 文 献

- [1] Zheng W G, Wei X F, Zhu Q H, et al. Laser performance of the SG-III laser facility [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2016, 4: e21.
- [2] Bettil R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J], Nature Physics, 2016, 12: 435-448.
- [3] Cao Z, He H B, Hu G H, et al. Time-resolved investigation of multiple-pulse laser-induced bulk damage in fused silica[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0803001.
曹珍, 贺洪波, 胡国行, 等. 多脉冲激光诱导熔石英体损伤的时间分辨研究[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0803001.
- [4] Ping Y, Smalyuk V A, Amendt P, et al. Enhanced energy coupling for indirectly driven inertial confinement fusion[J]. Nature Physics, 2019, 15(2): 138-141.
- [5] Tang E L, Lin X C, Han Y F, et al. Experimental research on thermal-dynamic damage effect of K9 optical lens irradiated by femtosecond laser[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2020, 11(2): 277-284.
- [6] Wang X, Shao J Z, Li H, et al. Analysis of damage threshold of K9 glass irradiated by 248-nm KrF excimer laser[J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 027102.
- [7] Zhang Z, Huang J, Geng F, et al. Transient absorption and luminescence spectra of K9 glass at sub-damage site by ultraviolet laser irradiation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials

- and Atoms, 2014, 318: 219-222.
- [8] Han J H, Feng G Y, Yang L M, et al. Study on the morphology of laser induced damage in K9 glass by focused nanosecond pulse [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5558-5564.
韩敬华, 冯国英, 杨李茗, 等. 纳秒激光在 K9 玻璃中聚焦的损伤形貌研究 [J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5558-5564.
- [9] Song Y F, Yu G Y, Jiang L L, et al. Shock induced damage and damage threshold of optical K9 glass investigated by laser-driven shock wave [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(7): 073103.
- [10] Qiu R, Wang J B, Ren H, et al. Dynamic process of nanosecond laser damage of fused silica [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(11): 2882-2886.
邱荣, 王俊波, 任欢, 等. 纳秒激光诱导损伤熔石英玻璃的动力学过程 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(11): 2882-2886.
- [11] Jia J, Feng G Y, Han J H, et al. Bulk damage of high intensity laser and K9 optical glass [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 46-48.
贾俊, 冯国英, 韩敬华, 等. 高强度纳秒激光与 K9 光学玻璃体损伤的实验研究 [J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4): 46-48.
- [12] Wang F, Gao F, Zhang X, et al. Characteristics of laser-induced damage in K9 glass based on ANSYS [J]. Applied Optics, 2019, 58(13): 3388-3392.
- [13] Liu H J, Wang F R, Luo Q, et al. Experimental comparison of damage performance induced by nanosecond 1ω laser between K9 and fused silica optics [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(7): 076103.
刘红婕, 王凤蕊, 罗青, 等. K9 和熔石英玻璃纳秒基频激光损伤特性的实验对比研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(7): 076103.
- [14] Jiang Y, Yuan X D, Wang H J, et al. Effect of thermal annealing on damage growth of mitigated site on fused silica [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(4): 044209.
蒋勇, 袁晓东, 王海军, 等. 退火对熔石英表面损伤修复点损伤增长的影响 [J]. 物理学报, 2016, 65(4): 044209.