



·强激光物理与技术·

气氛环境对真空窗口紫外激光诱导 损伤阈值的影响机制*

柴向旭, 王冠中, 田晓琳, 王礼权, 田野, 敬域堃, 曾发, 周松, 陈远斌

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 基于氟橡胶圈密封测试了熔石英真空窗口在 351 nm 激光辐照下的激光诱导损伤阈值(LIDT), 实验发现真空窗口和氟橡胶圈紧密接触后 LIDT 下降约 50%, 氟橡胶圈经多次挤压后, 其对真空窗口 LIDT 的影响显著减弱, 在此基础上对比了大气、 10^3 Pa 和 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa 下真空窗口的 LIDT, 结果显示随着气压降低真空窗口 LIDT 显著下降且气压再次升高后其 LIDT 未有提升。基于钢丝密封对比测试了真空窗口在不同气压下的 LIDT, 结果未发现气体含量差异对真空窗口 LIDT 的影响。对比两种密封材料测试结果, 认为真空窗口 LIDT 下降是由氟橡胶圈污染引起, 且低气压下有机物释放加剧。

关键词: 气氛环境; 真空窗口; 激光诱导损伤阈值; 有机污染; 351 nm

中图分类号: O437

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220119

Influence mechanism of atmosphere on the damage threshold induced by ultraviolet laser in vacuum window

Chai Xiangxu, Wang Guanzhong, Tian Xiaolin, Wang Liquan, Tian Ye,
Jing Yukun, Zeng Fa, Zhou Song, Chen Yuanbin

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Vacuum window (VW) damage is the bottleneck restricting the load capacity of high-power laser device, and the influence of vacuum environment is worthy of attention. Firstly, based on the fluororubber ring seal, the laser-induced damage threshold (LIDT) of fused silica VW irradiated by the 351 nm laser was measured. It is found that the LIDT of the VW decreases by about 50% after the close contact with the fluororubber ring. After repeated extrusion, the influence of the fluororubber ring on the LIDT of the VW is significantly weakened. On this basis, the LIDTs of the VW under atmosphere, 10^3 Pa and $10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa are compared. The results show that the LIDT of vacuum window decreases significantly with the decrease of air pressure, and the LIDT does not increase after the air pressure rises again. In addition, the LIDT of the VW under different air pressure is tested based on indium ring sealing, while the effect of air pressure difference on the LIDT is not found. Comparing the results of the two sealing materials, it is considered that the LIDT decreasing of the VW is mainly caused by the release of organic contamination from fluororubber ring and the release of organic matter will be intensified under low pressure.

Key words: atmosphere environment, vacuum window, laser-induced damage threshold, organic contamination, 351 nm

高功率激光装置能够在实验室中产生超强的电磁场和压强等极端物态条件, 为高能量密度物理的研究提供条件, 代表性的大型激光装置为美国 NIF 装置, 该类激光装置通常采用三倍频紫外激光作为工作波长以提高激光束靶耦合效率^[1]。激光装置中用于隔离真空的熔石英窗口在承受气体压力同时处于高强度紫外激光辐照下, 在线运行结果表明其后表面损伤尤为严重, 成为制约装置输出能力的瓶颈^[2-4]。针对真空窗口紫外抗损伤能力下降的问

* 收稿日期: 2022-04-23; 修订日期: 2022-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51902299); 激光聚变研究中心青年人才基金项目(RCFPD4-2020-4)

联系方式: 柴向旭, chai_xiangxu@126.com。

通信作者: 王礼权, wanglq1013@caep.cn。

题,国内外开展了系列研究。法国 Clémence Gingreau 等人^[5]对比了 1~30 MPa 压力下熔石英元件的激光诱导损伤阈值(LIDT),未发现压力对 LIDT 的影响。徐世珍等人^[6]基于小口径密闭腔室在 351 nm 下研究了气氛环境对熔石英 LIDT 的影响,发现与 10^5 Pa 气压时相比,气压小于 10^3 Pa 时的 LIDT 下降了 28%~41%。S. G. Demos 等人^[7]发现熔石英材料在真空环境下紫外激光长发次辐照后荧光光谱发生了“红移”,分析认为此时熔石英材料表面形成了氧空位缺陷。有研究认为真空下产生氧空位对熔石英元件的抗损伤性造成了显著的负面影响,真空“脱氧”是引起真空窗口激光诱导损伤的重要原因^[6,8]。除了表面缺陷外,创造真空环境的过程中需要采用橡胶密封材料及机组抽气,该环节可能引入有机污染;另外,置于真空环境后材料表面原有的平衡状态被破坏,吸附在材料表面的有机污染物等将会脱附并在腔体内扩散,分子态有机污染将在元件表面吸附^[9-10]。熔石英材料对紫外光吸收较小,但是吸附在元件表面的有机污染通常在紫外区有显著的吸收带,紫外光通过时有机污染对紫外光的强吸收将导致表面局部“热爆炸”从而引发损伤,吸附的有机污染是元件表面损伤的前驱体。真空腔体中的污染对真空窗口损伤性能的影响需要重视,此外真空“脱氧”和表面污染在真空窗口的损伤过程中的各自作用需要进一步明确。本文基于离线小气氛室首先针对橡胶圈有机物挥发对真空窗口损伤性能的影响进行了验证,在此基础上与无有机物挥发的钢丝密封结果进行了对比,阐明了影响真空窗口 LIDT 的主要因素。

1 实验装置

熔石英材料为 Corning 7980,样片尺寸 100 mm×100 mm×10 mm,样片表面经精细抛光,表面粗糙度 ≤ 1 nm,冷加工后样片表面存在裂纹、残留杂质等缺陷,利用 HF 酸刻蚀可有效去除表面加工缺陷,提升元件的 LIDT^[11]。样片在 LIDT 测试前利用高纯度 HF 酸在超声波环境下进行表面刻蚀并经去离子水清洗(AMP 处理),刻蚀深度约为 6.5 μm ,之后部分样品镀了 SiO_2 胶体减反膜。

样片 LIDT 测试装置如图 1 所示,基频光由 Nd:YLF 激光器产生,经三倍频组件后激光波长为 351 nm,光斑近场高斯分布,等效脉宽 3 ns,光束经透镜会聚后穿过气氛室腔体,前窗口处光斑直径为 7 mm,光斑调制度约为 2。激光控制系统可实现对基频输出能量控制,三倍频激光能量同步跟随变化,测量系统可获得前窗口位置的三倍频激光通量,通过反馈控制可实现对测试点三倍频激光通量的控制。LIDT 测试采用 R-on-1 模式,即不断增加测试点的激光通量(激光通量取光斑平均通量)直至发生损伤,激光通量提升台阶为 $2 \text{ J}/\text{cm}^2$,以样片出现损伤的最小激光通量作为其 LIDT。金属材质气氛室腔体尺寸约为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,腔体加工完成后对内部进行洁净清洗及烘烤处理,腔体前后各有一窗口用于安装样片,样片安装于气氛室腔体前窗口,与密封介质接触后采用螺钉压紧,气氛室腔体上部留有抽气接口,利用普发隔膜真空泵和分子泵组合进行抽气,气氛室内部采用微纳光纤检测腔内分子态污染,污染响应阈值约为 $50 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ ^[12]。气氛室腔体置于三维调节平台,可调节测试点位置,每次后前窗口旋转 180° 利用损伤检测系统对其后表面损伤情况进行检测,图像检测分辨率为 $2 \mu\text{m}$ 。

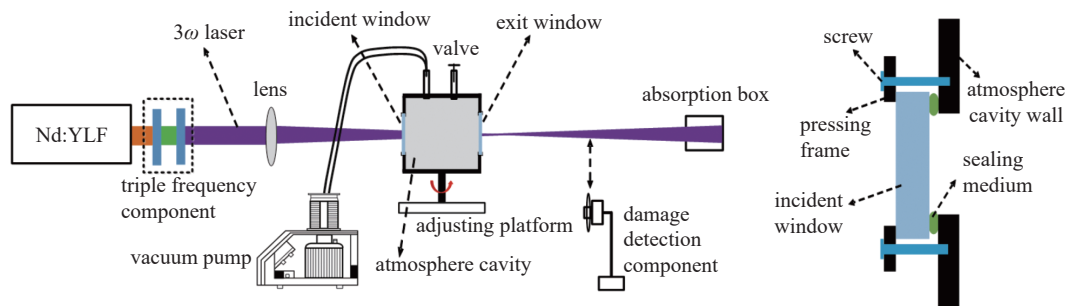


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for the VW LIDT test

图 1 真空窗口 LIDT 测试装置示意图

2 实验结果

2.1 样片初始 LIDT

本文需要验证气氛环境对真空窗口 LIDT 的影响,一方面需排除表面加工缺陷等其他因素的影响,另一方面需使得样片初始 LIDT 处于较高水平,使得熔石英表面处于非稳态,对环境变化具有较高的敏感性。样片 AMP 处理后选取了 2 件样片(1#样片未镀膜,2#样片一半区域镀膜)进行了初始 LIDT 标定,样片置于调节平台上开放空间,周围为万级洁净环境。1#样片典型损伤形貌如图 2(a)所示,表面损伤区域有一定的纹路分布,与光斑强区对应,损伤位置处基底材料被激光剥离导致表面不平整,白光下观察表现为“黑斑”。3 ns 下样片 LIDT 测试结果如图 2(b)

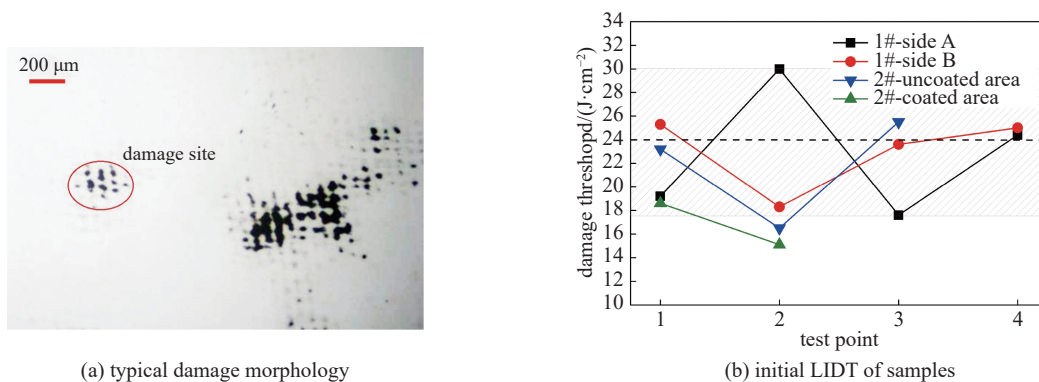


Fig. 2 Typical damage morphology and initial LIDT of samples

图 2 样片的典型损伤形貌与初始 LIDT

所示,可以看出元件不同测试点 LIDT 在 16~30 J/cm² 范围内波动,均值达到了 24 J/cm²,且不同样片的 LIDT 接近。该结果与 NIF 最近报道的 AMP 处理工艺水平接近,该结果表明,样品经过 AMP 处理后有效去除了表面加工缺陷,同时酸刻蚀过程中的产物再沉积问题得到有效控制^[13]。通常认为,熔石英元件 LIDT 小于 10 J/cm² 时损伤主要由表面加工残留缺陷引起,元件 LIDT 大于 10 J/cm² 时表面附加痕量污染及结构缺陷将起主要作用,因此本批次样片可以用于探测气氛环境变化对 LIDT 的影响。

2.2 真空腔体环境下 LIDT 验证

氟橡胶中氟原子可以把 C—C 主链很好地屏蔽以保证 C—C 链的稳定性,使其具有优异化学稳定性及力学性能,其中 26 型氟橡胶具有低的出气率和质损率,被广泛用于制造密封介质^[14-15]。本实验采用了 26 型氟橡胶 O 型圈进行真空窗口密封,3#样片一半区域镀膜一半区域未镀膜,其装入腔体前窗口与橡胶圈接触后用螺钉周圈压紧后密封,其 LIDT 测试分为四个阶段:镀膜区气压 30 Pa→镀膜区气压 10³ Pa→镀膜区大气(约 10⁵ Pa)→未镀膜区大气,实验结果见图 3(a)。可以看出,3#样片镀膜区在不同气压下及大气下未镀膜区的 LIDT 均在 7~12 J/cm² 范围内波动,相比于初始 LIDT 标定值下降显著,该结果表明经过真空密封及低气压过程后 3#样片后表面可能已被污染。然而,腔体内微纳光纤检测结果显示光纤透过率随时间无显著变化,未探测到腔体内的污染,这可能与微纳光纤灵敏度探测灵敏度不够有关。之后,将 4#样片置入腔体内静止 24 h 后将样片置于开放平台上测试 LIDT,结果显示 4#样片 LIDT 仍大于 20 J/cm²,与初始 LIDT 标定值无显著差异,证实了静态下腔内污染不严重,此时橡胶圈密封过程是否会引发元件表面污染成为怀疑对象。

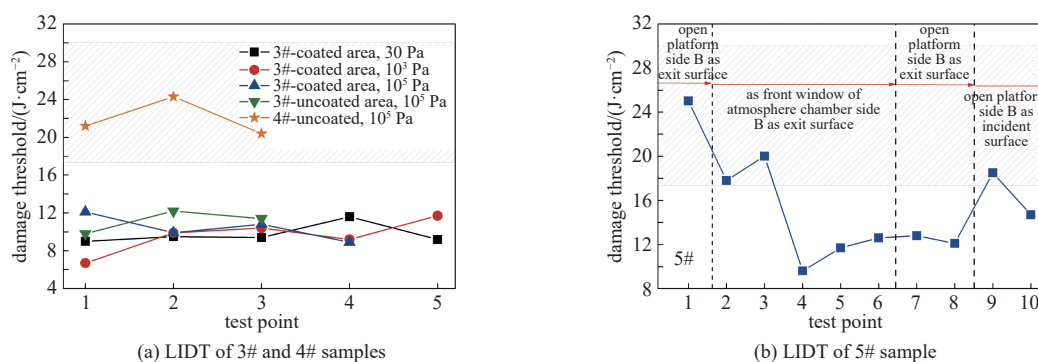


Fig. 3 LIDT of samples under rubber ring sealing condition

图 3 橡胶圈密封条件下样片的 LIDT

为减少变量,之后的 5#~11#样片均未镀膜。采用未镀膜 5#样片在大气环境下进行了进一步验证,测试结果见图 3(b)。样片在开放平台 LIDT > 20 J/cm²,置于气氛室腔体前窗口采用橡胶圈压紧密封(B 面为后表面)后样片的 LIDT 逐渐降至 10~12 J/cm²,复现了 3#样品的结果;之后,将样片置于开放平台测试,此时样片无夹持应力,但 5#样片的 LIDT 仍较低,相比于夹持状态 LIDT 未有提升,这表明夹持应力并不是导致其 LIDT 下降的主要原因;接着又将 5#样片翻面测试,即原腔体接触面-B 面由后表面改为前表面,实验结果显示此时 5#样片 B 面先发生损伤,其 LIDT 仍低于 B 面初始 LIDT。根据表面损伤理论,透光介质前后表面光束反射特性差异导致熔石英元件前表面 LIDT 远高于后表面,元件损伤通常发生在后表面^[16],但与橡胶圈接触后 B 面为前表面时也率先发生了损伤,该

结果进一步证实了 B 面接触橡胶圈后表面被污染, 导致其 LIDT 显著下降。

为了进一步判断样片与橡胶圈接触过程中具体环节的影响, 在大气环境下采用 6# 样片分过程开展 LIDT 测试: 开放平台→气氛室腔体前窗口胶圈接触(无加持)→气氛室腔体前窗口胶圈接触(压紧密封), 测试结果见图 4。可以看出, 6# 样片经过 AMP 后 LIDT 较高, 处于 AMP 后基板标定结果范围内, 样片安装于腔体前窗口接触橡胶圈未夹持时 LIDT 无显著变化, 通过螺钉将样片与橡胶圈压紧密封后, 样片 LIDT 发生了显著下降, 该结果表明橡胶圈压紧过程是导致元件 LIDT 下降的主要原因。橡胶圈压紧后橡胶发生形变导致体积减小, 内部的有机分子被挤出后迅速污染了样片后表面。

在此基础上, 基于橡胶圈密封对比了样片在不同气压下的 LIDT, 结果如图 5 所示。首先利用 7# 样片验证了大气和 $\sim 10^3$ Pa 气氛差异对 LIDT 的影响, 测试是采用气体循环抽放(大气→ 10^3 Pa→大气)的方式。相比于大气环境 10^3 Pa 气氛下样片的 LIDT 进一步下降, 之后在 10^3 Pa 和大气环境下样片的 LIDT 无显著差异。利用 8# 样片又对比了大气、 10^3 Pa 及 10^{-2} Pa 气氛条件下的 LIDT, 各条件下的 LIDT 为多点平均值, 测试结果显示大气和 10^3 Pa 下的 LIDT 无显著变化, 气压降至 10^{-2} Pa 后 LIDT 显著下降至 14 J/cm^2 , 且气压再次升高后其 LIDT 未有提升。9# 样片测试时首先将气压降至 10^{-2} Pa, 可以看出其 LIDT 直接降至 15 J/cm^2 , 与 8# 样片在 10^{-2} Pa 下的结果接近, 在 10^3 Pa 和 10^{-2} Pa 反复抽放后样片 LIDT 又逐渐降至 12 J/cm^2 。

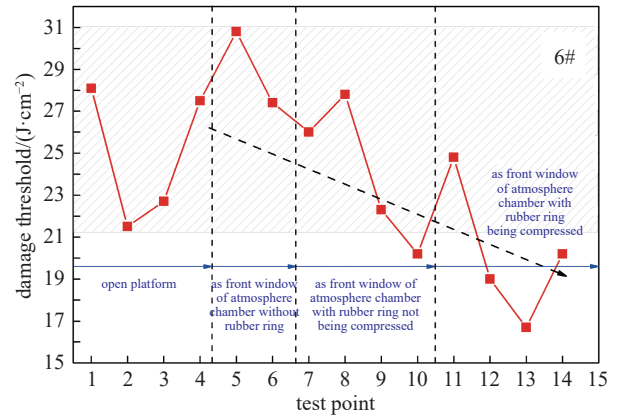
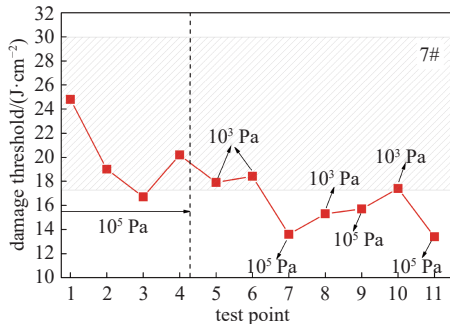
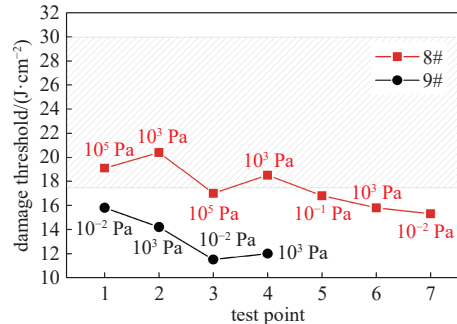


Fig. 4 Influence of rubber ring sealing process on LIDT of 6# sample

图 4 橡胶圈密封过程对 6# 样片 LIDT 的影响



(a) LIDT of 7# sample

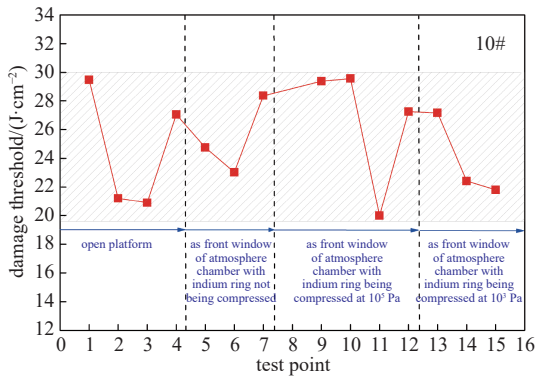


(b) LIDT of 8# and 9# samples

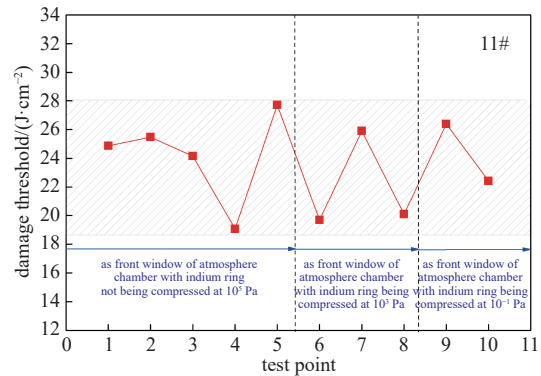
Fig. 5 LIDT of samples under different air pressure when rubber ring is sealed

图 5 橡胶圈密封时样片在不同气压下的 LIDT

金属钢具有较好的延展性且不释放有机污染, 适合作为真空密封材料。本实验又采用了钢丝进行真空窗口密封, 在此条件下对比了样片在不同条件下的 LIDT。10# 样片测试过程为: 开放平台(大气)→气氛室腔体前窗口钢丝接触(大气)→气氛室腔体前窗口钢丝密封(大气)→气氛室腔体前窗口钢丝密封(10^3 Pa), 结果如图 6(a) 所示, 可



(a) LIDT of 10# sample



(b) LIDT of 11# sample

Fig. 6 LIDT of samples when indium ring is sealed

图 6 钢丝圈密封时样片的 LIDT

以看出,采用钢丝密封时样片 LIDT 保持较为稳定,在大气和 10^3 Pa 条件下 LIDT 无显著变化。11#样片测试过程为:气氛室腔体前窗口钢丝密封(大气)→气氛室腔体前窗口钢丝密封(10^3 Pa)→气氛室腔体前窗口钢丝密封(10^{-1} Pa),测试结果如图 6(b)所示,结果显示钢丝密封后样片在大气、 10^3 Pa 及 10^{-1} Pa 下 LIDT 仍无显著变化。该结果表明,采用钢丝密封可有效避免真空污染,使得元件在不同气压下均保持较高 LIDT 状态。

3 分析与讨论

已有研究表明在低真空中橡胶材料放出的气体成分中含有大量的高分子有机物质,26 型氟橡胶在 10^{-2} Pa 的质损率随时间逐渐增加,1 h 质损率达 0.22%,但有机物释放速率逐渐减小^[15,17]。本实验结果证实了采用氟橡胶圈密封将会污染元件表面,导致 LIDT 显著下降,其中样片和橡胶圈接触后挤压过程影响最为显著。3#样片初始接触时橡胶圈污染引起了样片 LIDT 下降约 50%,而 6#样片测试时橡胶圈经过了数次挤压,橡胶圈对其 LIDT 的影响显著减弱,样片 LIDT 可保持约 18 J/cm^2 较高状态,该结果表明氟橡胶圈挤压过程可以加速有机物释放,多次挤压后有机物释放量将显著减少,这与文献 [15] 结果相符。另外,本实验中 3#样片一半区域镀 SiO_2 胶体减反膜,该种化学膜为几十 ns 厚的疏松孔状结构,相比于体材料更容易吸附污染,由于初始采用橡胶圈时有机物释放量较大,导致 3#样片镀膜区和未镀膜区均污染较为严重,两个区域的 LIDT 均由 $>20 \text{ J/cm}^2$ 下降到了 10 J/cm^2 ,该结果也表明在污染较为严重的情况下镀膜和未镀膜区的污染吸附性能差异未能有效显现。

在此基础上,本实验又对比了大气、 10^3 Pa 和 10^{-2} Pa~ 10^{-1} Pa 下样片的 LIDT,结果显示在一定气压下样片的 LIDT 将达到一定的“稳态”,降低气压后其 LIDT 将降低至另一个“稳态”。实验中 7#~9#样片测试时采用了多种气压状态切换的方式,低气压下的 LIDT 并未随着气压升高而升高,最低气压下的“稳态”是橡胶圈的最终“稳态”。该现象一方面可能是和橡胶圈在不同气压下有机物释放特性有关,低气压下其有机污染释放加剧,导致了气压降低真空窗口 LIDT 的下降。另外,也有研究表明高真空环境下熔石英表面易受紫外激光激励形成低结合能的 O1s 缺陷,这种非稳定结构在后续紫外脉冲激光辐照下会出现 Si-O 键断裂而产生氧空位,导致其 LIDT 下降^[8]。为了进一步验证低气压下“污染加剧”和“真空脱氧”在真空窗口损伤中发挥的作用,本研究又采用钢丝密封开展了对比验证。采用钢丝密封后样片在低气压的 LIDT 未有下降,该结果表明腔室内污染得到有效控制,进一步反证了橡胶圈密封引入有机污染问题。本实验 LIDT 测试时采用的 R-on-1 模式,测试点经过了数发次紫外激光辐照,元件表面可能产生了氧空位缺陷,但是测试结果显示其 LIDT 并未下降,因此,本实验并未观察到“脱氧”机制的显著作用,这也可能与辐照发次数量较少,“脱氧”导致的缺陷累积量不足以引发显著损伤。综上所述,本研究结构表明低气压下真空窗口 LIDT 下降主要是由污染机制导致。

本文结果表明密封介质的污染对真空窗口的 LIDT 有显著影响,这可能是导致高功率激光装置上真空窗口严重损伤的关键因素。金属密封可有效减少真空污染,但在实际工程应用中金属密封需较大夹持力且易引起熔石英元件面型畸变甚至破裂,风险较高。氟橡胶圈由于其独特的优势被广泛应用作密封介质,但是其有机污染需要严格控制,挤压及真空中放置可以加速老化,降低有机物释放量,对真空窗口 LIDT 的影响可控制在一定范围内。另外,为进一步规避有机污染的影响,对真空中产生的有机污染可以采取在线洁净的方式去除,例如 NIF 针对空间滤波器中的有机污染采用了在腔体中放置 SiO_2 胶体吸附的方式,取得了良好效果^[1]。

4 结论

本文研究了不同气压(大气、 10^3 Pa 和 10^{-2} Pa~ 10^{-1} Pa)下真空窗口的 LIDT,实验发现真空密封过程中氟橡胶圈释放的有机物导致真空窗口 LIDT 显著下降,挤压及低气压下放置可加剧有机物释放,经过多次挤压及低气压放置后有机物释放量显著减少,对元件 LIDT 的影响减弱。在此基础上采用了钢丝密封进行测试,发现采用钢丝密封后真空窗口 LIDT 可保持较高状态,在不同气压下 LIDT 无显著差异,钢丝密封后未发现“真空→氧缺陷→激光诱导损伤”的直接关联,反证了“真空→密封圈污染→激光诱导损伤”因果关联,因此在高功率激光装置中橡胶圈有机物释放需要严格管控,使用前进行老化处理可有效降低对真空窗口损伤的影响。

致谢 感谢激光聚变研究中心刘太祥、严鸿维、苗心向等人对样片 AMP 处理及污染检测方面提供的帮助,感谢丁磊、李平在损伤测试方面提供的帮助和建设性意见。

参考文献:

- [1] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF Laser [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.

- [2] Carr C W, Bude J, Miller P E, et al. Damage sources for the NIF Grating Debris Shield (GDS) and methods for their mitigation[C]//Proceedings of SPIE 10447, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2017. 2017: 1044702.
- [3] Liao Z M, Carr C W, Cross D, et al. Damage performance of fused silica debris shield at the National Ignition Facility[C]//Proceedings of SPIE 11173, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2019. 2019: 111730Y.
- [4] Chai Xiangxu, Li Ping, Zhao Junpu, et al. Laser-induced damage growth of large-aperture fused silica optics under high-fluence 351 nm laser irradiation[J]. *Optik*, 2021, 226: 165549.
- [5] Gingreau C, Lantermier T, Lamaignère L, et al. Impact of mechanical stress induced in silica vacuum windows on laser-induced damage[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1706-1709.
- [6] 徐世珍, 郑万国, 孙久勋, 等. 环境气氛压强对熔石英紫外激光损伤阈值的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(10): 1649-1652. (Xu Shizhen, Zheng Wanguo, Sun Jiuxun, et al. Effect of gas atmosphere and pressure on 351 nm laser-induced damage threshold of fused silica[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(10): 1649-1652)
- [7] Demos S G, Burnham A, Wegner P, et al. Surface defect generation in optical materials under high fluence laser irradiation in vacuum[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(6): 566-567.
- [8] 黄进, 周信达, 周晓燕, 等. 真空紫外激光辐照对熔石英表面氧空位的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(12): 1393-1398. (Huang Jin, Zhou Xinda, Zhou Xiaoyan, et al. Oxygen-deficiency of fused silica surfaces induced by ultra violet pulsed laser irradiation in high vacuum[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2014, 34(12): 1393-1398)
- [9] 夏莉, 李蔚. 低温容器材料在真空状态下放气率的研究进展[J]. *制冷与空调*, 2016, 30(5): 595-598. (Xia Li, Li Wei. Review of outgassing rate of the cryogenics-vessel material in vacuum[J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2016, 30(5): 595-598)
- [10] 苗心向, 袁晓东, 吕海兵, 等. 激光装置污染物诱导光学元件表面损伤实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42: 0602001. (Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Lü Haibing, et al. Experimental study of laser-induced damage of optical components surface owing to particle contamination in high power laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 0602001)
- [11] Liu Taixiang, Yang Ke, Zhang Zhuo, et al. Hydrofluoric acid-based etching effect on surface pit, crack, and scratch and laser damage site of fused silica optics[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10705-10728.
- [12] 苗心向, 袁晓东, 吕海兵. 基于微纳光纤的气溶胶探测应用技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 114103. (Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Lü Haibing. Contamination particles sensor based on microfiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 114103)
- [13] Bude J, Miller P, Baxamusa S, et al. High fluence laser damage precursors and their mitigation in fused silica[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5839-5851.
- [14] 于宏伟, 张蕊, 戎媛, 等. 氟橡胶结构及热稳定性研究[J]. *特种橡胶制品*, 2020, 41(5): 59-64. (Yu Hongwei, Zhang Rui, Rong Yuan, et al. Structure and thermal stability of fluororubber[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2020, 41(5): 59-64)
- [15] 刘玉魁, 杨建斌, 肖详正. 真空工程设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016. (Liu Yukui, Yang Jianbin, Xiao Xiangzheng. Design of vacuum engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016)
- [16] Boling N L, Crisp M D, Dubé G. Laser induced surface damage[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(4): 650-660.
- [17] 冯焱, 董猛, 成永军. 橡胶材料在真空环境下的放气性能研究[C]//中国真空学会2014学术年会论文摘要集. 2014: 129-134. (Feng Yan, Dong Meng, Cheng Yongjun. Investigation of outgassing characteristic for synthetic rubber materials[C]//Proceedings of 2014 Academic Annual Meeting of the Chinese Vacuum Society. 2014: 129-134)