

激光诱导损伤对熔石英玻璃弯曲强度弱化影响及安全设计

靳 赛¹, 刘小根², 齐 爽², 赵润昌¹, 李志军¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900; 2. 中国建筑材料科学研究总院有限公司 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 激光诱导损伤是导致熔石英真空光学元件突发破裂的根本原因。本工作采用神光-III原型装置终端光学组件的熔石英真空光学元件制作了标准样品, 统计分析了熔石英玻璃样品表面损伤形貌特征, 探究了激光诱导损伤对熔石英玻璃样品弯曲强度的影响。结果表明: 激光诱导熔石英玻璃损伤点形貌为典型的半椭球体, 损伤点深度随其长度增大呈上升趋势, 深度极限基本不超过 2 mm; 损伤点对熔石英玻璃弯曲强度影响非常明显, 含损伤点的样品平均弯曲强度仅为不含损伤点样品平均弯曲强度的 41%。随着损伤点长度和深度增大, 熔石英玻璃的弯曲强度总体呈下降趋势, 但当损伤点长度大于 15 mm, 弯曲强度下降趋势明显缓和, 损伤点长深比对弯曲强度无明显影响。熔石英玻璃真空窗口光学元件安全设计, 应考虑玻璃弯曲强度离散性及持久应力作用综合影响, 且在损伤点位置处的最大弯曲拉应力不应超过其弯曲强度设计值。

关 键 词: 真空窗口光学元件; 熔石英玻璃; 激光诱导损伤; 弯曲强度; 安全设计

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

Fused Silica Glass: Laser-induced Damage on Bending Strength Weakening and Safety Design

JIN Sai¹, LIU Xiaogen², QI Shuang², ZHAO Runchang¹, LI Zhijun¹

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: Laser-induced damage is the fundamental cause of sudden rupture of fused silica vacuum optical elements. To investigate this damage on bending strength weakening to find safety design method, standard samples were made with fused silica vacuum optical elements in the final optics assembly of the SG-III prototype laser facility. The surface damage morphological characteristics of fused silica glass samples were statistically analyzed, and the influence of laser-induced damage on bending strength of fused silica glass samples was investigated. The results show that the damage morphology of laser-induced fused silica glass is typically semi-ellipsoid, the depth of the damage point increases with its length which is no more than 2 mm; The damage point has obvious influence on the bending strength of fused silica glass, whose average bending strength with damage point is only 0.41 times that of the samples without damage point. With increase of the length and depth of the damage point, the bending strength of the samples generally decrease. But when the length of the damage point exceeding 15 mm, its bending strength downward trend is

收稿日期: 2022-10-17; 收到修改稿日期: 2022-11-18; 网络出版日期: 2022-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(52072356, 52032011) National Natural Science Foundation of China (52072356, 52032011)

作者简介: 靳 赛(1990-), 男, 工程师. E-mail: saga_jinsai@163.com

JIN Sai (1990-), male, engineer. E-mail: saga_jinsai@163.com

通信作者: 刘小根, 教授. E-mail: xtlxg@163.com

LIU Xiaogen, professor. E-mail: xtlxg@163.com

significantly moderated, the ratio of length to depth of the damage point has no obvious effect on the bending strength. These data suggest that designing safe optical elements of fused silica glass vacuum window should comprehensively take into account dispersion of glass bending strength, persistent effect of the stress, and the maximum bending tensile stress distributed near the damage point should not exceed the design value of bending strength.

Key words: vacuum window optical element; fused silica glass; laser-induced damage; bending strength; safety design

惯性约束聚变(ICF)^[1]在国防和未来能源问题解决领域具有极为重要的应用价值和战略意义,是当前国际上的重大前沿科研领域。目前世界上已建成的典型工程案例有美国国家点火装置(NIF)^[2]、法国兆焦耳激光装置(LMJ)^[3]及我国神光系列装置^[4]等。作为惯性约束聚变装置核心部件,高功率激光驱动器在其光束焦点位置处易在空气中被击穿。因此,激光光路运行箱体必须保证具备足够的真空度(10^{-4} ~ 10^{-3} Pa)。熔石英玻璃具备透光性好、物理力学性能稳定、气体渗透率低等优点,被大量应用在激光驱动器系统两端作为真空窗口光学元件,用以实现激光靶室真空隔离及透光。

在服役过程中,真空窗口光学元件会受到高通量激光辐照作用,造成熔石英玻璃光学元件产生激光诱导损伤^[5-6],尤其是暴露于真空环境中的表面更容易出现损伤并迅速扩展^[7],严重影响激光光束质量。目前“等离子体火球爆炸”模型较好地解释了熔石英损伤的物理过程^[8]。该模型认为熔石英玻璃的杂质缺陷会吸收激光能量,使周围材料发生气化而被电离形成高温等离子体。高温等离子体吸收后续的激光能量使其自身急剧加热瞬态升温,在烧蚀熔石英材料的同时向外膨胀发生微爆炸。微爆炸产生的冲击波对材料产生机械破坏,导致材料剥离和微喷,形成初始损伤点。对于周边夹持的真空窗口光学元件而言,其在服役过程中一直受到近一个大气压差作用,致使熔石英玻璃表面损伤点在高应力长期作用下易发生疲劳扩展并向内发展,最终导致熔石英玻璃承载能力下降并破裂失效,给惯性约束聚变装置带来极大的安全风险以及难以承受的损失。因此,熔石英玻璃的损伤失效是真空窗口光学元件在设计、运行及维护中应重点关注的问题。

为避免真空窗口光学元件的突发破裂,维护人员需对其激光诱导的损伤程度进行定期检查,通常以表面损伤点尺寸或面积大小作为度量损伤程度的标准^[9-10],并根据损伤严重程度确定是否需要真空窗口光学元件进行更换。然而,对于昂贵的熔石

英玻璃光学元件而言,如何以表面损伤尺寸大小来确定更换标准一直是一个难题。Campbell等^[11-12]基于断裂力学理论,研究了Nova和Beamlet装置真空透镜和靶室真空窗口损伤面积与透镜峰值应力关系,探讨了二次裂纹增长行为,给出了真空光学元件的安全厚度设计标准。Rigatti等^[13]认为朝真空一面的膜层退化是造成真空光学元件损伤的重要原因,同时基于Campbell的研究结果给出了防止元件断裂所容许的最大缺陷尺寸。Clemence等^[14]研究了真空窗口光学元件承受的机械应力对激光诱导损伤的影响,发现承受不同大小机械应力的真空窗口光学元件激光损伤阈值没有明显的差异。事实上,由于真空窗口元件在大气负压作用下,呈典型的薄板弯曲,因此分布在熔石英玻璃光学元件外表面的损伤点对真空窗口光学元件的承载性能影响主要表现在降低熔石英玻璃的弯曲强度,且脆性材料大都采用弯曲强度设计值作为反映材料抵抗破坏的临界参数。玻璃和陶瓷等脆性材料失效一般可以采用强度衰减理论来评价^[15],因此,研究损伤点对熔石英玻璃材料强度本身的衰减更具意义。BAO等^[16]针对脆性材料的强度特点,提出了“均强度准则”并应用该理论解释了弯曲强度的尺寸效应。刘小根等^[17-18]基于“均强度准则”理论,研究了应力梯度、表面和体积缺陷对玻璃弯曲强度的影响及玻璃内部杂质附近的应力集中。胡锐峰等^[19]通过纳秒激光脉冲诱导熔石英玻璃产生断裂,并使用多光谱手段对断裂前后的样品进行检测,从微观上解释了熔石英玻璃断裂形貌及内部相变结构成因。

激光诱导熔石英玻璃元件损伤区域附近,因玻璃材料受高温熔融乃至等离子体冲击波作用,导致损伤缺陷形貌复杂多变^[20-21],且损伤点附近存在较大的残余应力,影响因素复杂,难以完全通过理论模型准确分析熔石英玻璃元件表面损伤点对其强度的影响。本工作通过试验研究了损伤点对熔石英玻璃弯曲强度的影响,给出了不同损伤点尺寸对应的熔石英玻璃弯曲强度设计值,以此为熔石英玻璃真空窗口光学元件更换退役提供参考依据。

1 实验方法

1.1 实验材料

选用由中国工程物理研究院激光聚变研究中心提供的神光-III 原型装置终端组件内退役的熔石英玻璃真空窗口元件(尺寸为 340 mm×340 mm×30 mm), 熔石英玻璃表面含多个激光诱导损伤点, 如图 1 所示。激光诱导损伤点产生条件: 辐照激光波长为 351 nm, 常规辐照通量为 800 J/ns, 光束口径为 290 mm×290 mm。

1.2 样品加工

直接在含损伤点的熔石英玻璃光学元件上, 采用水刀切割截取玻璃样品, 样品尺寸及边部处理满足 GB/T 37781-2019^[22]相关规定, 含损伤点样品要求其非切割面表面中心位置必须含有一个足以影响其弯曲强度的损伤点, 损伤点形貌及尺寸在熔石英玻璃光学元件上随机选取, 样品示意图及加工后的照片如图 2 所示。含损伤点的有效样品共计制备了 35 个, 另制备了 20 个不含损伤点的样品, 以进行弯曲强度对比试验。



图 1 含损伤点熔石英玻璃真空窗口光学元件照片
Fig. 1 Photo of optical elements with damage points in the fused silica glass vacuum window

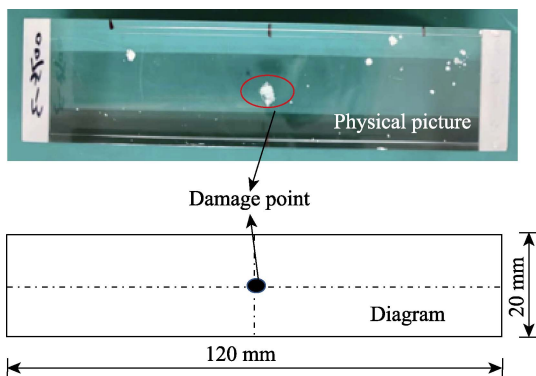


图 2 样品示意图及实物照片
Fig. 2 Diagram and physical picture of the sample

1.3 损伤点形貌尺寸表征

损伤点形貌尺寸是影响样品弯曲强度的重要因素之一。损伤点三维形貌可近似为半椭球形, 其长轴方向横截面可近似为半椭圆形(半币形)形貌, 如图 3 所示。采用 KEYENCE VHX-970F 超景深三维显微系统, 对样品中的损伤点的最大尺寸(2a)和深度(c)进行测量, 精确至 0.1 mm, 典型测量图片如图 4 所示。

1.4 弯曲强度测试

采用三点弯曲法, 按 GB/T 37781-2019 相关规定, 测试样品的弯曲强度。测试时, 要求带损伤点的一面朝下, 且损伤点位置在上压辊的正下方几何中心。记录样品断裂时的最大载荷 P , 根据公式(1)计算得到样品的弯曲强度。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{1}$$

其中, P 为断裂时刻对应的载荷, L 为样品下支承跨距, b 为样品的宽度, d 为样品的厚度。

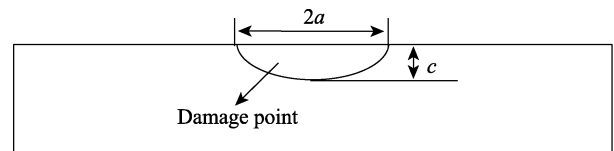


图 3 样品上损伤点形貌示意图
Fig. 3 Diagram of the damage point in a sample

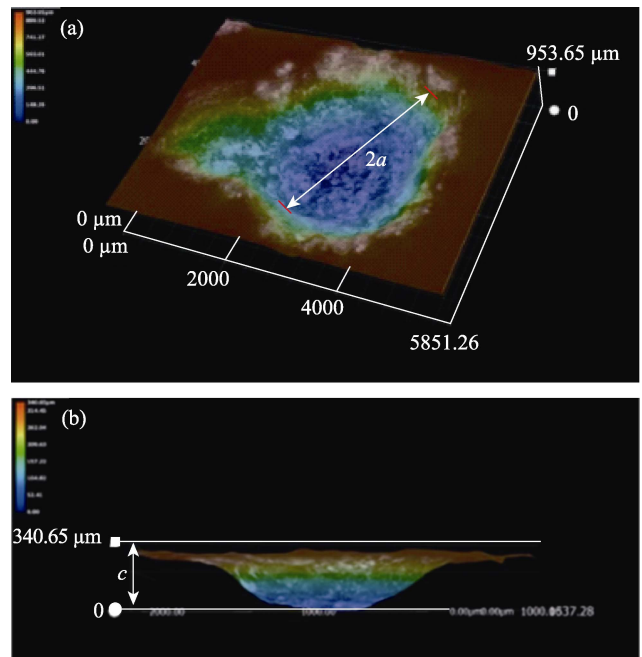


图 4 损伤点形貌尺寸测量
Fig. 4 Measurement of morphology and size of damage point
(a) Maximum size (2a); (b) Maximum depth (c)

2 结果与讨论

2.1 损伤点长度与深度关系

为了确定激光诱导熔石英玻璃半椭球形损伤点的形状因子变化, 测量了各样品中损伤点的损伤长度($2a$)与深度(c), 结果汇总如图 5 所示。由图 5 可知, 当损伤点长度小于 15 mm 时, 随着损伤点长度增大, 损伤点深度也呈上升趋势; 当损伤点长度超过 15 mm 时, 其深度并不会继续增大, 而是基本稳定在一个区域。大部分损伤点深度集中在 0.4~1.5 mm 范围内, 即使熔石英玻璃表面各损伤点连成一片, 其整体深度也基本不超过 2 mm。究其原因, 大面积损伤可能是由激光多次诱发的小损伤点累积并连成一片所导致的。对于单个损伤点而言, 其形貌长度与深度比值($2a/c$)基本处于 2~15 之间, 再次验证了损伤形貌为典型的半椭球体。

2.2 损伤点对熔石英玻璃弯曲强度影响

分别对含损伤点(总体分为一组, 共 35 个样品, 根据 $2a$ 的范围, 如 2, 4, 6, 8, 10 mm 以上归为 5 类)和不含损伤点的样品(分两组, 每组 10 个样品)进行弯曲强度测试, 其弯曲强度平均值结果如图 6 所示。

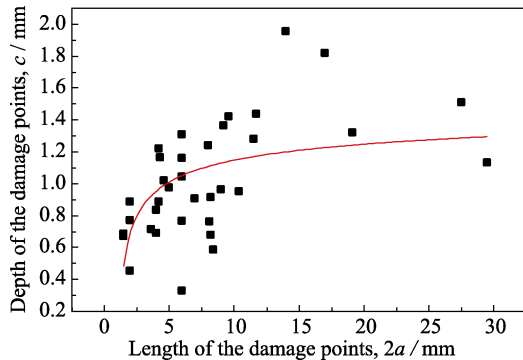


图 5 各测试样品中损伤点损伤长度($2a$)与深度(c)分布
Fig. 5 Damage length ($2a$) and depth (c) of the damage points in various samples

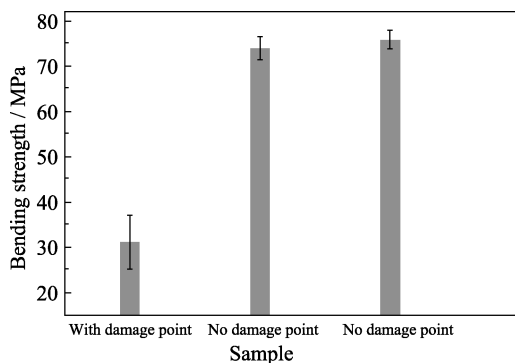


图 6 含损伤点和不含损伤点样品平均弯曲强度的测试结果
Fig. 6 Test results of average bending strength of the samples with and without damage point

图 6 显示出含损伤点的样品弯曲强度明显低于不含损伤点的样品。含损伤点的样品弯曲强度平均值为 31.16 MPa, 不含损伤点样品弯曲强度平均值为 75.9 MPa, 含损伤点样品平均弯曲强度仅为不含损伤点样品平均弯曲强度的 41%, 说明损伤点对熔石英玻璃弯曲强度影响非常明显。通过测试结果计算得到的含损伤点样品的标准偏差较大, 这主要是因为制作样品时故意对损伤点形貌尺寸进行了随机选取, 各样品中的损伤点形貌尺寸相差较大, 从而导致其对应的样品弯曲强度也相差较大, 且测试的强度结果也不适用 Weibull 理论进行统计分析。

2.3 损伤点长度对熔石英玻璃弯曲强度影响

图 7 给出了含损伤点样品的损伤点长度($2a$)与其弯曲强度对应关系, 由图中可以看出, 随着损伤点长度的增大, 其弯曲强度总体呈下降趋势, 当损伤点长度超过 15 mm 后, 其弯曲强度下降趋势明显得到缓和, 这与超过该尺寸后, 损伤点深度变化很小有关。

采用 Excel 软件, 先对各样品的损伤点长度及其对应的弯曲强度进行对数处理, 发现损伤点长度的对数与其对应的弯曲强度成线性关系, 且线性拟合度达到 0.9987。拟合后得到的线性公式如下:

$$Y = -0.1397 \lg X + 1.6005 \quad (2)$$

式中, X 为损伤点长度(mm), Y 为弯曲强度(MPa)。基于公式(2), 可以通过样品的损伤点长度来预测其弯曲强度值, 其关系曲线见图 8 所示。

根据图 8 结果, 反演得到不同损伤点尺寸对应的熔石英玻璃弯曲强度值见表 1。由于熔石英玻璃表面损伤点长度尺寸容易被检测并量化, 该表所列弯曲强度可作为实际服役过程中, 激光诱导的熔石英玻璃真空窗口光学元件损伤点对其强度弱化程度评判, 从而指导熔石英玻璃真空窗口元件更换。

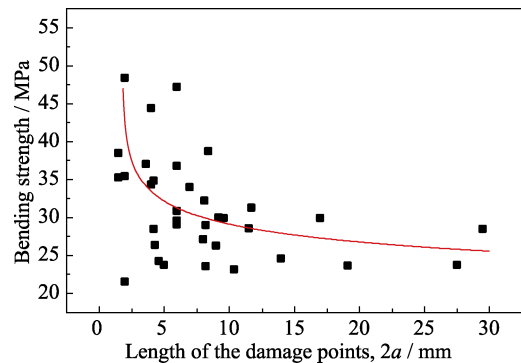


图 7 损伤点长度与样品弯曲强度对应关系
Fig. 7 Relationship between damage point length and bending strength of the samples

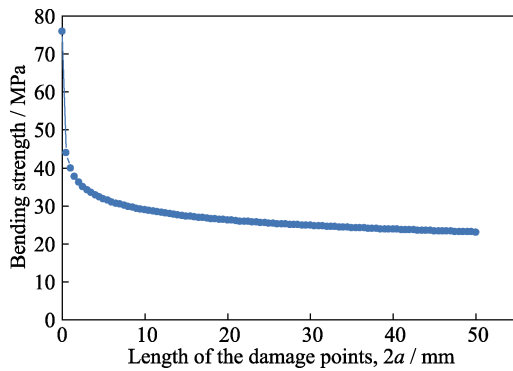


图 8 通过拟合处理获得的损伤点长度与样品弯曲强度对应关系曲线

Fig. 8 Fitting curve between damage point length and bending strength of the samples

表 1 不同损伤点尺寸对应的熔石英玻璃弯曲强度反演值

Table 1 Inversion values of bending strength of fused silica glass corresponding to different damage point sizes

Length/mm	Bending strength/MPa	Length/mm	Bending strength/MPa
0	75.9	21	26.05
1	39.86	22	25.88
2	36.18	23	25.72
3	34.19	24	25.57
4	32.84	25	25.42
5	31.83	26	25.28
6	31.03	27	25.15
7	30.37	28	25.02
8	29.81	29	24.90
9	29.32	30	24.78
10	28.89	31	24.67
11	28.51	32	24.56
12	28.17	33	24.45
13	27.85	34	24.35
14	27.57	35	24.25
15	27.30	36	24.16
16	27.06	37	24.07
17	26.83	38	23.98
18	26.62	39	23.89
19	26.42	40	23.81
20	26.23	-	-

2.4 损伤点深度对熔石英玻璃弯曲强度影响

图 9 给出了含损伤点样品的损伤点深度(c)与其弯曲强度对应关系, 由图中可以看出, 随着损伤点深度的增大, 含损伤点样品的弯曲强度总体上呈下降趋势, 但随着损伤深度增加, 其弯曲强度下降趋势也趋于缓和。这主要是由受弯构件越接近厚度方向中性轴(越深)区域, 其承担载荷的贡献值越小而导致的。

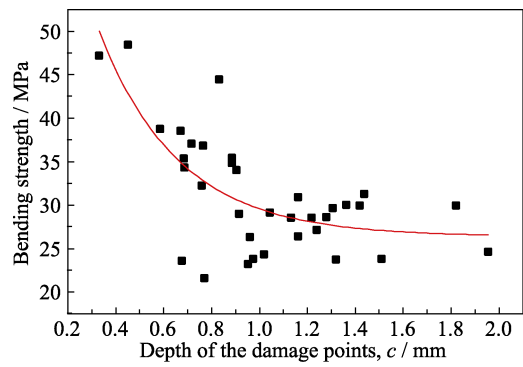


图 9 损伤点深度与样品弯曲强度对应关系

Fig. 9 Relationship between damage point depth and bending strength of the samples

由于熔石英玻璃真空窗口光学元件损伤点深度难以使用在线非接触式方法进行准确测量, 因此, 在实际操作过程中, 采用损伤点深度来评价其对弯曲强度的影响存在一定困难。

2.5 损伤点长深比($2a/c$)对熔石英玻璃弯曲强度影响

图 10 给出了含损伤点样品的损伤点长深比($2a/c$)与其弯曲强度的关系, 由图中可以看出, 损伤点长深比与弯曲强度比值并无明显增大或减小趋势, 长深比对弯曲强度无明显影响。也就是说, 损伤点的几何形状(半椭球体形状因子)对熔石英玻璃弯曲强度影响不明显。

2.6 含损伤点熔石英玻璃真空窗口光学元件安全设计

2.6.1 基于熔石英玻璃弯曲强度理论的真空窗口元件安全设计

熔石英玻璃真空窗口光学元件承受近一个大气压差作用, 受拉应力一面(朝真空面)的损伤点是导致其破裂失效的最直接原因。因此, 为预防其破裂失效, 进行安全设计时必须保证损伤点附近的熔

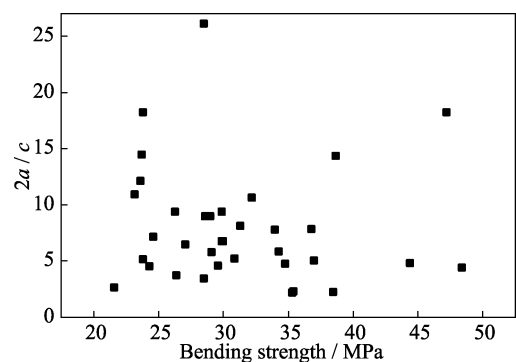


图 10 损伤点长深比($2a/c$)与样品弯曲强度对应关系

Fig. 10 Relationship between $2a/c$ values of the damage point and bending strength of the samples

石英玻璃弯曲强度设计值不得超过该对应处大气压差导致的最大弯曲应力(可通过理论或有限元计算获得)。由 Griffith 建立的传统脆性材料裂纹扩展理论表明,裂纹在持续外力下扩展取决于表面能是否持续不变。真空窗口光学元件在服役过程中,在真空负压持久应力下,承受的弯曲应力属于长期荷载,伴随其整个服役过程。因此,真空窗口光学元件熔石英玻璃强度安全系数,除应考虑石英玻璃强度离散安全系数 K_1 外,还应考虑持久应力作用下的安全系数 K_2 ,其综合安全系数 $K = K_1 \times K_2$ 。对于玻璃材料而言,考虑失效概率为 0.1% 的情况下,其强度的安全系数 K_1 一般可取值为 2.5。考虑持久应力作用下的安全系数 K_2 按下式计算^[23-24]。

$$K_2 = 1 / \left[\frac{t_R}{t_D} \frac{1}{N+1} \right]^{1/N} \quad (3)$$

其中, t_R 为玻璃强度实验中加载持续时间, t_D 为玻璃服役过程中受载荷持续时间。对于玻璃材料, N 值可取 16~18, 本文取值为 17。

对本研究采用的熔石英玻璃样品进行弯曲强度测量,加载速率为 $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ 。已知表面不含损伤点玻璃试样的平均弯曲强度为 75.9 MPa,推算出样品加载持续平均时间为 38 s。将以上数据代入公式(3),得到熔石英玻璃不同受载持续时间下的 K_2 及 K 计算值见表 2。

将表 1 弯曲强度值除以表 2 中的综合安全系数,即可得到含不同尺寸损伤点,不同服役时间的熔石英玻璃弯曲强度设计值。通过比较该值与大气压差作用下导致的真空窗口光学元件在损伤点位置处的最大弯曲拉应力值,以确定该损伤点是否存在安全隐患,并以此结果评估熔石英玻璃真空窗口光学元件的使用寿命及是否需要更换。

表 2 不同受载持续时间下的 K_2 及 K 值

Table 2 K_2 and K values of the fused silica glass under various load action time

Load action time	K_1	K_2	K
$\leq 1 \text{ min}$	2.5	1.00	2.50
1 d	2.5	1.85	4.63
30 d	2.5	2.27	5.68
180 d	2.5	2.50	6.25
1 a	2.5	2.63	6.58
3 a	2.5	2.78	6.95
5 a	2.5	2.94	7.35

2.6.2 基于断裂力学理论的真空窗口光学元件安全设计

真空窗口光学元件表面损伤裂纹为典型的表面裂纹,可简化为半椭圆形(半币形)裂纹。由于真空窗口光学元件受均布载荷作用,且形状为矩形或圆形,其表面受力为典型的双向应力状态,因此损伤点(裂纹)的力学特征为典型的张开型裂纹(I 型)。对于该类裂纹,根据断裂力学理论 Griffith 法则,应力强度因子计算式如下:

$$K_I = f \sigma \sqrt{\pi 2a} \quad (4)$$

其中, σ 为损伤点处应力大小, f 为裂纹的几何形状因子,工程近似值可取 1.1。

由公式(4)可得真空窗口光学元件的临界损伤尺度,作为判断元件是否发生破裂风险的判据(破裂判据):

$$K_I = 1.1 \sigma_{\max} \sqrt{\pi 2a} \leq K_{IC} \quad (5)$$

其中, σ_{\max} 为损伤点失稳时刻对应的最大应力(容限应力值), K_{IC} 为临界应力强度因子,对于熔石英玻璃材料而言,可取值为 $0.75 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

根据公式(5),可得到熔石英玻璃真空窗口元件安全使用下不同损伤点尺寸($2a$)及其对应的容限应力值。

基于以上理论,以目前典型应用规格的熔石英玻璃真空窗口元件(长宽尺寸均为 340 mm、厚度为 30 mm)为计算对象,通过实测一个大气压差作用下真空面板中心处的最大弯曲拉应力为 4.52 MPa,基于强度理论,考虑 1 年使用寿命期的安全系数,得到在真空面板中心处表面容许的缺陷最大尺寸为 8.0 mm 左右。基于断裂力学理论,得到在该处表面容许的缺陷最大尺寸为 7.2 mm 左右。由于激光诱导的损伤裂纹尖端具有钝化效应,因此,在相同条件下,采用基于强度理论获得的熔石英玻璃真空窗口光学元件容许损伤点最大尺寸比断裂力学理论结果值大。

3 结论

1)激光诱导熔石英玻璃损伤点形貌为典型的半椭球体,随着损伤点长度的增大,损伤点深度也呈上升趋势。当损伤点长度大于 15 mm 时,其深度基本趋于稳定且不超过 2 mm;

2)实测结果表明,损伤点对熔石英玻璃弯曲强度影响非常明显,含损伤点的样品平均弯曲强度仅为不含损伤点样品平均弯曲强度的 41%;

3)随着损伤点长度和深度增大,熔石英玻璃弯曲强度总体呈下降趋势,但损伤点长度大于15 mm后,其弯曲强度下降趋势明显缓和,损伤点长深比对弯曲强度无明显影响;

4)熔石英玻璃真空窗口光学元件安全设计应考虑弯曲强度离散性及持久应力作用综合影响,且在损伤点位置处的最大弯曲拉应力不应超过其弯曲强度设计值。

参考文献:

- [1] JOHN N, LOWELL W, ALBERT T, *et al.* Laser compression of matter to super high densities: thermonuclear (CTR) applications. *Nature*, 1972, **239**: 139.
- [2] EDWARDS M J. The ignition physics campaign on NIF: status and progress. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, **688**: 012017.
- [3] MIQUEL J L, PRENE E, LMJ & PETAL status and program overview. *Nuclear Fusion*, 2019, **59**(3): 032005.
- [4] ZHENG W G, WEI X F, ZHU Q H, *et al.* Laser performance of the SG-III laser facility. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, **4**: 5.
- [5] 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. *Optics Express*, 2010, **18**(19): 19966.
- [6] HUANG W Q, HAN W, WANG F, *et al.* Laser-induced damage growth on larger aperture fused silica optical components at 351 nm. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(1): 17901.
- [7] 张立卫. 应力条件下真空光学窗口激光损伤研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2021.
- [8] PAPERNOV S, SCHMID A W, OLIVER J B, *et al.* Damage thresholds and morphology of the front-and-back-irradiated SiO₂ thin films containing gold nanoparticles as artificial absorbing defects. *Proceedings of SPIE*, 2008, **6720**: 67200G.
- [9] 史亚莉, 陶显, 周信达, 等. 光学元件激光损伤在线检测装置. 红外与激光工程, 2018, **47**(4): 23.
- [10] DIAZ R, CHAMBONNEAU M, GRUA P, *et al.* Influence of vacuum on nanosecond laser induced surface damage morphology in fused silica at 1064 nm. *Applied Surface Science*, 2016, **362**: 290.
- [11] CAMPBELL J H, EDWARDS G J, MARION J E. Damage and fracture in large aperture fused silica vacuum spatial filter lenses. *Proceedings of SPIE*, 1995, **2633**: 522.
- [12] SURATWALA T I, CAMPBELL J H, STEELE W A, *et al.* Fail safe design for square vacuum barrier windows. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3492**: 740.
- [13] RIGATTI A L, SMITH D J, SCHMID A W, *et al.* Damage in fused silica spatial filter lenses on the OMEGA laser system. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3578**: 472.
- [14] CLEMENCE G, THOMAS L, LAURENT L, *et al.* Impact of mechanical stress induced in silica vacuum windows on laser induced damage. *Optics Letters*, 2018, **43**(8): 1706.
- [15] 金宗哲, 包亦望. 脆性材料力学性能评价与设计. 中国铁道出版社, 1996.
- [16] BAO Y W, JIN Z. Size effects and a mean strength criterion for ceramics. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1993, **16**(8): 829.
- [17] 刘小根, 刘正权, 包亦望, 等. 玻璃弯曲强度的厚度效应及超薄玻璃弯曲强度测试技术. 硅酸盐学报, 2016, **44**(11): 1641.
- [18] LIU X G, BAO Y W, WAN D T, *et al.* Critical size on spontaneous breakage of tempered glass initiated by NiS particle. *Journal of Inorganic Materials*, 2020, **35**(2): 211.
- [19] 胡锐峰, 韩敬华, 冯国英, 等. 使用多光谱手段研究熔石英断裂机理. 光谱学与光谱分析, 2017, **31**(11): 3327.
- [20] WONG J, FERRIERA J, LINDSEY E, *et al.* Morphology and microstructure in fused silica induced by high fluence ultraviolet 3 ω (355 nm) laser pulses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, **352**(3): 255.
- [21] WANG K, MA B, HAN J Q, *et al.* Morphological and damage growth characteristics of shell-type damage of fused silica optics induced by ultraviolet laser pulses. *Applied Optics*, 2019, **58**(32): 8882.
- [22] GB/T 37781-2019, 玻璃材料弯曲强度试验方法.
- [23] FISCHER A C, COLLINS R E. Architectural glazing: design standards and failure models. *Building and Environment*, 1995, **30**(1): 29.
- [24] 刘向阳, 刘锡良, 陈志华. 玻璃材料与新型建筑. 天津大学学报, 2001, **34**(1): 77.