红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

可在线应用的大口径溶胶-凝胶膜光学元件激光清洗工艺研究（特邀）

王静轩　张继花　李玉海　廖威　王成程　袁晓东

In-situ laser cleaning of large-aperture optical components with sol-gel film (*invited*)

Wang Jingxuan, Zhang Jihua, Li Yuhai, Liao Wei, Wang Chengcheng, Yuan Xiaodong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20220739

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间遥感相机大口径变方位反射镜设计

Design of large-aperture variable-direction mirror for space remote sensing camera

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20200008　https://doi.org/10.3788/IRLA20200008

38CrMoAl材料表面污染物激光清洗技术

Laser cleaning technology of 38CrMoAl material surface pollutants

红外与激光工程. 2018, 47(7): 706004　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0706004

大口径空间反射镜的重力卸载优化方法

Optimization method for large-aperture space mirror’s gravity unload

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20200103　https://doi.org/10.3788/IRLA20200103

光学元件激光损伤在线检测装置

An online laser-induced flaw inspection device for optical elements

红外与激光工程. 2018, 47(4): 417003　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0417003

用于空间望远镜的大口径高衍射效率薄膜菲涅尔衍射元件

Large-diameter high-efficiency diffractive Fresnel membrane elements for space telescope

红外与激光工程. 2017, 46(9): 920001　https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0920001

基于dOTF的大口径透射光学元件检测技术

Large aperture transmission optical element detection method based on dOTF

红外与激光工程. 2021, 50(6): 20200358　https://doi.org/10.3788/IRLA20200358

可在线应用的大口径溶胶-凝胶膜光学元件激光清洗工艺研究 (特邀)

王静轩[1], 张继花[2], 李玉海[3], 廖　威[1], 王成程[1], 袁晓东[1*]

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心，四川 绵阳 621900；
2. 成都航空职业技术学院 工程实训中心，四川 成都 610100；
3. 哈尔滨工业大学 机电工程学院，黑龙江 哈尔滨 150000)

摘　要：在高功率激光装置中,光学元件表面的污染物会降低光束质量甚诱导光学元件损伤。针对装置中受污染的镀有 SiO_2 溶胶-凝胶增透膜的大口径真空隔离片 (430 mm×430 mm),使用波长为 355 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器模拟在线激光清洗实验。实验中采用了单发次激光干式清洗与气流置换系统辅助的激光清洗系统,研究了关键特征参数对激光在线清洗效果的影响规律,获得了可用于激光在线清洗的工艺参数。光学元件的处理采用光学显微镜、暗场成像法表征以及图像处理软件分析。实验结果表明,激光在线清洗光学元件存在最佳工艺窗口。通过气流置换辅助的激光清洗方法后,相较于单纯的单发干式激光清洗,激光清洗能力有大幅提升。因此,气流置换系统辅助单发激光清洗能有效提高其清洗能力,为高功率激光装置中大口径光学元件表面污染物在线去除提供了一种有效手段。

关键词：激光清洗；　在线；　大口径；　光学元件；　气流辅助
中图分类号：TN249　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3788/IRLA20220739

In-situ laser cleaning of large-aperture optical components with sol-gel film (*invited*)

Wang Jingxuan[1], Zhang Jihua[2], Li Yuhai[3], Liao Wei[1], Wang Chengcheng[1], Yuan Xiaodong[1*]

(1. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
2. Engineering Training Center, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China;
3. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: In high-power laser facilities, contaminants on the surface of optical components can reduce beam quality and even induce damage to optical components. For the contaminated large-aperture vacuum separator (430 mm×430 mm) coated with SiO_2 sol-gel antireflection film in the facility, a Nd:YAG pulsed laser with a wavelength of 355 nm was performed in laser cleaning experiment. The experiment adopted a single-shot laser dry cleaning and a laser cleaning system assisted by an airflow replacement system. The influence of key characteristic parameters on in-situ laser cleaning was studied, and the process parameters that could be used for laser in-situ laser cleaning were obtained. The processing of optical elements was characterized by microscope, dark field imaging and image processing software analysis. The experimental results suggest that there is an optimal process window for laser in-situ cleaning of optical components. After the laser cleaning method assisted by airflow replacement, the laser cleaning ability is greatly improved compared with the simple single-shot dry laser cleaning. Therefore, the single-shot laser cleaning assisted by the airflow displacement system can

收稿日期:2022−10−25;　**修订日期**:2022−12−15
作者简介:王静轩,男,助理研究员,博士,主要从事激光清洗和激光表面处理相关方面的研究。
通讯作者:袁晓东,男,研究员,博士,主要从事激光技术和洁净工程相关方面的研究。

effectively improve its cleaning ability and provide an effective means for the in-situ removal of contaminants on the surface of large-aperture optical components in high-power laser facilities.

Key words: laser cleaning; in-situ; large-aperture; optical components; airflow assist

0 引 言

SiO_2 溶胶-凝胶化学膜因抗激光损伤阈值高、成本低和易于制作等优点，广泛应用于各类强激光系统中大口径光学元件表面作为减反射薄膜[1−2]。但溶胶-凝胶薄膜具有疏松多孔的纳米结构，孔内充满丰富的悬挂键，因此很容易吸附各类污染物[3−5]。溶胶-凝胶薄膜这种易污染特性限制了它在非常严苛的环境中[5−8] 的应用范围。在大型高功率固体激光装置中，通常要求溶胶-凝胶化学膜的使用环境为优于 ISO5 级，为此在大型高功率固体激光装置的建设与运行中花费了巨大的成本。

然而，在激光装置运行过程中，受多种因素的影响，溶胶-凝胶化学膜通常会受到污染，导致光学元件性能下降，甚至导致元件损伤。大口径光学元件表面的污染物主要来自两个方面：一方面是高功率激光引起的杂散光辐照装置内壁产生的气溶胶挥发，二是由于光学元件表面损伤导致的颗粒喷溅[9−10]。溶胶-凝胶化学膜在被污染后，不仅会降低光学元件的透过率，还会诱导新的损伤，极大地降低了激光装置的负载能力[11−12]。目前的大型高功率固体激光装置通常采用在线替换的方式，将已经损伤的大口径光学元件更换。通过离线清洗，损伤修复和重新涂膜等手段恢复元件的光学性能和抗激光损伤阈值，延长元件的使用寿命[13]。这种策略需要一套复杂的工程支撑体系来保障装置的运行，并且更换过程中增加了意外损伤和二次污染的风险，使得大口径光学元件的洁净工作变得极其困难。因此，针对大型高功率固体激光装置急需发展一种可在线去除大口径光学元件表面污染物的清洗手段，不用更换元件的同时解决化学膜的污染问题。激光清洗作为一种新型清洗技术，在不损伤熔石英基底的情况下，能够有效去除表面的微米至亚微米量级的颗粒污染物[14−15]，并可广泛应用于油脂、薄膜等各类污染物去除[16−17]。此外，激光清洗具有的无机械接触、可准确定位清洗等特点，为在线去除大口径光学元件表面污染物提供了一种潜在的手段。

在光学元件的激光清洗研究中，普遍使用人工制备污染的实验方式探究小尺寸清洗工艺参数。这与装置中实际运行的大口径光学元件的污染状态存在显著差异，而针对实际装置运行下污染的元件开展激光清洗工艺研究尚较为欠缺，此外，在线应用需考虑污染颗粒在密闭空间重新吸附的问题，需考虑引入辅助手段提高激光清洗能力。针对上述研究中的不足之处，文中以大型高功率激光装置中受污染的镀 SiO_2 增透膜的大口径真空隔离片为研究对象，首先对其中心通光区域和边缘区域的污染状态进行了量化表征。随后开展了单发次干式激光清洗工艺实验研究，获得了影响激光清洗效果的关键因素和工艺参数。最后瞄准在线清洗应用需求，提出了气流置换系统辅助的激光清洗方法并开展实验研究，取得了可用于激光在线清洗的工艺参数，进一步提升了激光清洗效果，拓宽适用范围，为在线清洗的工程应用场景提供技术基础。

1 理论分析

1.1 颗粒吸附力

干燥环境球形颗粒与平面基底间的吸附力以范德华力为主。然而，由于颗粒材料或多或少都具有顺从性，在吸附力的作用下，近似为球形的颗粒会产生形变，称之为吸附形变。

颗粒的尺寸与材料不同时，吸附形变模型也就不同。目前被广泛使用、通用的形变理论模型分别为 1971 年由 Johnson 等人提出的 JKR 接触模型和 1975 年由 Derjaguin 等人提出的 DMT 接触模型[18]。对于光学元件表面的典型颗粒污染物，通常采用 DMT 模型进行解释。DMT 模型给出了形变产生的接触半径 r_c 与颗粒半径 R 之间的关系式：

$$r_c=\sqrt[3]{\left(\frac{A_{132}R^2}{8E^*H^2}\right)} \tag{1}$$

其中，系统 Hamaker 常数 A_{132} 的计算方法由公式 (2) 给出；E^*计算方法由公式 (3) 给出：

$$A_{132}=A_{12}+A_{33}+A_{13}+A_{32}=\left(\sqrt{A_{11}}-\sqrt{A_{33}}\right)\left(\sqrt{A_{22}}-\sqrt{A_{33}}\right) \tag{2}$$

$$\frac{1}{E^*}=\frac{1-\sigma_1^2}{E_1}+\frac{1-\sigma_2^2}{E_2} \tag{3}$$

式中：A_{ii} 为物质 i 的真空 Hamaker 常数；A_{ij} 为物质 i 与物质 j 之间相互作用的 Hamaker 常数；E_1、E_2 分别为颗粒与基底的杨氏模量；σ_1、σ_2 分别为颗粒与基底的泊松系数。

在计算范德华力时，形变量的受力也需要考虑在内。此时的范德华力 F_v' 可表示为：

$$F_v' = \frac{A_{132}R}{6H^2}\left(1+\frac{r_c^2}{RH}\right) \tag{4}$$

根据公式 (4)，可对光学元件表面典型颗粒污染物所受的吸附力数值进行计算。

计算熔石英基底与二氧化硅颗粒间的范德华力时，从结构上来讲，熔石英本身就是浓度高于 99% 的非晶态二氧化硅，熔石英与二氧化硅颗粒两者力学性能类似，因此基底与颗粒的杨氏模量、泊松系数可近似视为相同值，其杨氏模量为 70 GPa，泊松系数为 0.17。熔石英基底的 Hamaker 常数为 6.6×10^{-20} J，空气的 Hamaker 常数为 1.94×10^{-20} J，微米与亚微米级颗粒与基底间的距离通常取为 0.4 nm。根据上述公式即可对形变引起的接触半径与范德华力进行计算。经计算，微米与亚微米级污染颗粒受到的吸附力大小为 10^{-10}~10^{-7} N 量级。

1.2 干式激光清洗移除过程

对于光学元件表面典型 SiO_2 颗粒污染物的去除形式为颗粒对激光强吸收，基底弱吸收。当颗粒温度升高时，瞬态热效应产生向外的热膨胀加速度即相当于颗粒受到热膨胀带来的应力，当应力大于颗粒吸附力时，颗粒达到激光清洗的脱附条件，可以实现污染颗粒的去除。

位于高斯光束的光斑中心的污染颗粒，微米级的颗粒尺寸远小于光斑尺寸，因此，可利用颗粒的平均温升来近似估算热膨胀应力，计算一个脉宽时间内的热膨胀应力时，由于脉宽很短，仅为纳秒级别，因此颗粒比热容等随温度变化的参量也可近似地取一个定值进行定性估算。其升高的温度 ΔT 可近似表示为：

$$\Delta T = \frac{\eta F_l}{\rho c \mu} \tag{5}$$

式中：η 为颗粒对激光的吸收率；F_l 为激光能量密度；ρ 为颗粒密度；c 为颗粒比热容；μ 为热穿透深度。一个脉宽时间内热穿透深度 μ 可表示为：

$$\mu = \sqrt{4\alpha\tau} \tag{6}$$

式中：α 为颗粒的热扩散率；τ 为激光脉宽。由温升 ΔT 引起的热膨胀位移 H' 可表示为：

$$H' = 2\beta R\Delta T \tag{7}$$

式中：β 为颗粒的热膨胀系数。一个脉宽内作用于颗粒的热应力 F' 为：

$$F' = \frac{2\pi\rho R^3 H'}{3\tau^2} \tag{8}$$

通过以上的方法可以对颗粒受到的热膨胀应力进行定性估算。激光清洗 SiO_2 颗粒时所需要用到的参数如表 1 所示。

表 1 计算所需的 SiO_2 颗粒的热物性参量

Tab.1 Thermal and physical parameters of SiO_2 particles used in calculation

Parameter	Value
ρ/g·cm^{-3}	2.5
c/J·(kg·K)$^{-1}$	730
α/cm^2·s^{-1}	0.06
β/K^{-1}	0.5×10^{-6}

颗粒对波长为 355 nm 的激光吸收率 η 约为 60%，激光脉宽 τ 为 10 ns，颗粒半径 R 取典型值 1 μm。对于半径为 1 μm 的颗粒以 0.1~0.8 J/cm^2 的能量密度进行干式激光清洗时，颗粒的平均温升约为 10^3 K 量级，颗粒受到的热应力约为 10^{-9}~10^{-7} N 量级。当激光能量密度为 0.042 J/cm^2 时，光学表面半径 1 μm 的 SiO_2 颗粒受到的吸附力与热应力相等，可判定为理论起始清洗阈值。当激光能量密度为 2.9 J/cm^2 时基底温度达到熔点，即造成激光损伤，判定为理论基底损伤阈值。综上所述，激光清洗光学元件表面微米级 SiO_2 污染颗粒的理论工艺区间为激光能量密度 0.042~2.9 J/cm^2。

2 实验条件与过程

2.1 实验样品表征

实验样品为某大型激光装置中使用的终端隔离窗口，在波段为 1 053 nm 和 351 nm 处激光增透。装置与周围环境隔离，在大气环境运行。使用光学显微镜观察可知，样片表面的污染状态主要可分为两个等级，且两者之间差异较大，分别为边缘污染区域及中心通光区域。通过其暗场成像图可对颗粒数量与尺

寸进行分析，如图 1 所示。统计分析结果表明，颗粒污染颗粒半径主要集中于 1~25 μm 范围，如图 2 所示。但通光区域污染状态明显优于污染区域，通光区域污染颗粒的尺寸也明显小于污染区域的颗粒。这是由于尽管两个区域处于同样的污染环境下，但在大型高功率激光装置的实际运行过程中，激光辐照对通光区域起到了一定程度上的激光清洗效果。将受污染的真空隔离片与制备获得的镀膜熔石英样品污染状态进行对比，不同尺寸范围的污染颗粒分布规律一致性较好，半径 15 μm 以下的颗粒均占颗粒总数的 95% 以上。从污染密度的规律分析，受污染真空隔离片的中心通光区域与自行制备的低污染密度基本相同，边缘污染区域污染密度介于制备获得高、低污染密度之间。

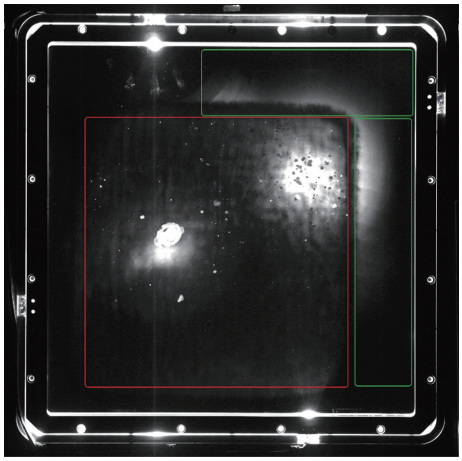

图 1 受污染的大口径真空隔离片表面污染状态暗场成像图

Fig.1 Dark field image of contaminated large-aperture vacuum separator

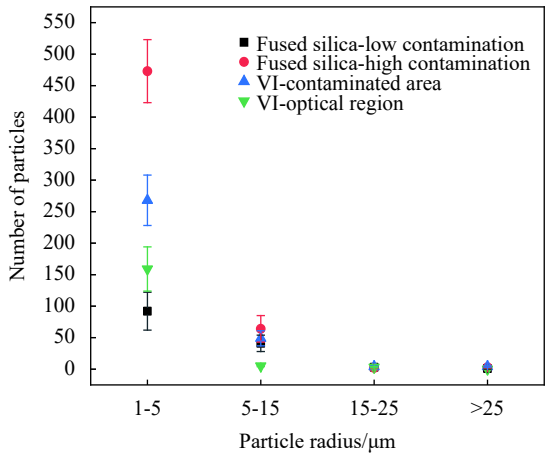

图 2 受污染大口径真空隔离片的表面污染颗粒数量

Fig.2 Number of surface particles on the contaminated large-aperture vacuum separator

对受污染真空隔离片进行 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 技术分析，其全谱如图 3 所示。受污染真空隔离片污染颗粒的主要组成元素为 C、O、Si、S，成分上以 SiO_2、有机物、硫化物为主。综上所述，自行制备的颗粒污染与实际大型高功率激光装置的颗粒污染的污染状态相似，前者的清洗结论可用作后者的实验依据与基础。

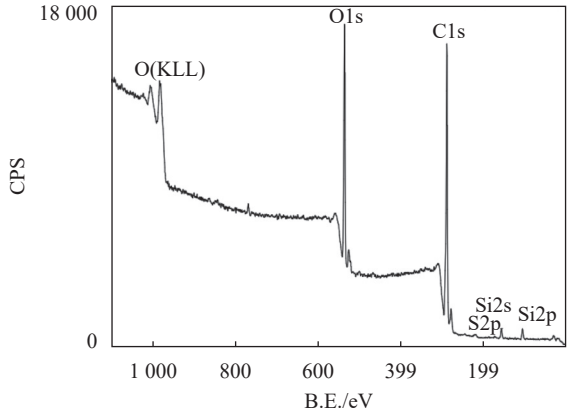

图 3 大口径真空隔离片表面污染物的 XPS 表征全谱图 (CPS: 每秒计数; B.E.: 电子束缚能)

Fig.3 X-ray photoelectron spectroscopy of surface particles on the contaminated large-aperture vacuum separator (CPS: Counts per second; B.E.: Binding energy)

2.2 实验装置

激光清洗实验使用高能量脉冲灯泵浦 Nd:YAG 激光器)，最高可输出 1.8 J 脉冲能量的激光。选择在三倍频模式工作，输出激光波长为 355 nm，脉宽为 10.7 ns。针对高能量激光装置中受污染大口径真空隔离片的边缘污染区域与中心通光区域分别进行单发干式激光清洗。实验光路示意图如图 4 所示。

选取单点作用模式，取激光能量为 40~200 mJ，光斑面积为 7 mm^2 (椭圆形，长、短轴为 3.4 mm×2.6 mm @ $1/e^2$)，计算得实验所用激光能量密度为 0.57~2.86 J/cm^2。清洗过程中使用原位检测对比方法，将污染区域栅格化并进行标记，保证清洗前后的表征区域相同。

使用光学显微镜观察清洗前后基底表面的洁净状况。使用暗场显微成像方法获得污染状态图像，二值化处理后使用数据平台软件分析，得到目标区域的颗粒数量与尺寸分布，对清洗样品上残留的污染颗粒

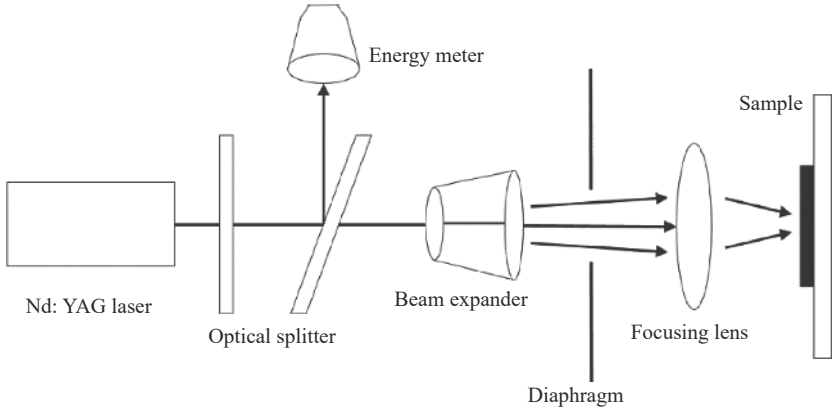

图 4 激光清洗大口径光学元件实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the laser cleaning system for large aperture optics

以 1~5 μm、5~15 μm、15~25 μm、25 μm 以上四种颗粒半径范围分类统计。图像分析过程采用 Image-Pro Plus 图像分析平台，主要步骤如下：通过用户编程的宏定义和插件，首先设定系统灰度分级，由于是暗场成像，设置 255 为纯白，0 为纯黑。随后确定背景的灰度，在背景区域选择三个采样点，计算出平均灰度，再设置合适的阈值范围 (研究中，根据背景亮度值，暗场图片阈值设置为 85)，生成二值化图片，通过统计显微镜照片中的污染颗粒所占的像素数量，从而对微粒的数量和半径进行统计。

3 实验结果与分析

3.1 大口径溶胶-凝胶膜光学元件激光清洗工艺实验

针对高能量激光装置中受污染大口径真空隔离片的边缘污染区域与中心通光区域分别进行单发干式激光清洗。经过图像分析软件对清洗效果进行分析，获得不同激光能量密度下作用真空隔离片后残留颗粒数量曲线，如图 5(a) 和 (b) 所示。统计结果表明：污染区域与通光区域的清洗起始阈值均为 0.57 J/cm^2，均在激光能量密度为 2.28 J/cm^2 时清洗效果最好，对半径为 5 μm 以上的污染颗粒去除效果最明显。当能量密度达到 2.85 J/cm^2 时，颗粒统计数量增长并不显著，以上结论与镀膜熔石英样品的实验结论基本一致。在同样的激光工艺参数下，中心通光区域的清洗效果明显低于边缘污染区域，这是由于中心通光区域在激光装置实际运行时受到一定激光清洗的效果，残留的污染颗粒与基底的吸附效应更强，更难以去除，因此清洗效果较弱。

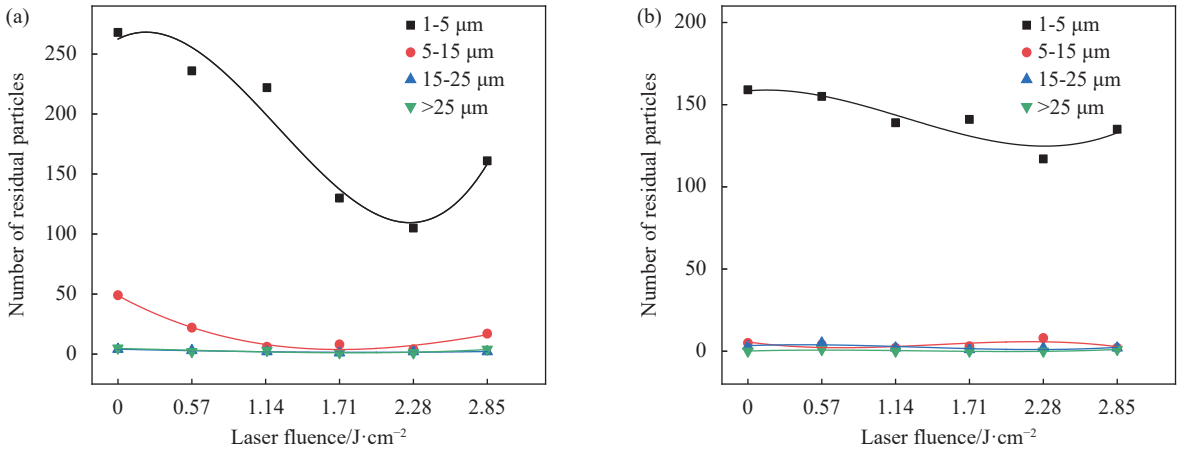

图 5 不同激光能量密度下作用真空隔离片后残留颗粒数量曲线。(a) 边缘污染区域；(b) 中心通光区域

Fig.5 Number of residual particles on the contaminated vacuum separator after laser cleaning process under different laser energy density. (a) Border zone of vacuum separator; (b) Central zone of vacuum separator

由图 5 (a) 和 (b) 可知，当以激光清洗后颗粒的总残留数量为判据时，激光能量在 2.28 J/cm^2 时颗粒去除效果最佳。但此时基底已产生了激光损伤的痕迹，而 1.71 J/cm^2 时基底表面状态良好，无膜层损伤现象，这表明对于边缘污染区域而言，单发激光清洗的最佳能量密度为 1.71 J/cm^2。图 6 为真空隔离片非通光区域的激光清洗前后暗场成像图。使用类似的方法对中心通光区域的损伤状况进行观察可知，2.28 J/cm^2 时未对通光区域基底造成损伤，这也同样表明，污染物密度越高，基底的损伤阈值越低。图 7 为真空隔离片中心通光区域的激光清洗前后暗场成像图。对最佳能量密度下的颗粒去除率进行计算，边缘污染区域的颗粒去除率为 57.67%，这与镀膜熔石英样品的颗粒去除率规律保持一致。

将大口径真空隔离片与镀膜熔石英样品的单发激光清洗结论进行对照，对照结果如表 2 所示。两种样品由于污染状态略有差距造成基底损伤阈值与清洗工艺区间不同，去除率略有不同，但规律性结论基本吻合。

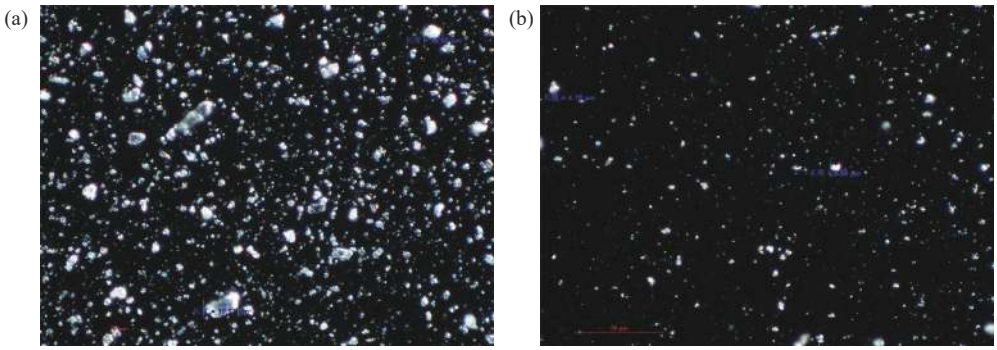

图 6 真空隔离片非通光区域的激光清洗前后暗场成像图。(a) 未激光清洗；(b) 激光清洗后 (激光能量密度为 1.71 J/cm^2)

Fig.6 Dark field image of border zone on vacuum separator before and after laser cleaning. (a) Unprocessed; (b) Post processed with laser cleaning method (1.71 J/cm^2 laser density)

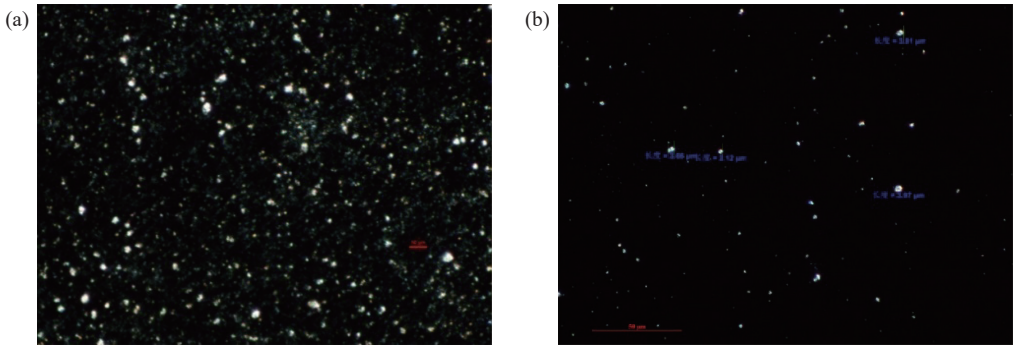

图 7 真空隔离片中心通光区域的激光清洗前后暗场成像图。(a) 未激光清洗；(b) 激光清洗后 (激光能量密度为 1.71 J/cm^2)

Fig.7 Dark field image of central zone on vacuum separator before and after laser cleaning. (a) Unprocessed; (b) Post processed with laser cleaning method (1.71 J/cm^2 laser density)

表 2 大口径真空隔离片与小尺寸镀膜熔石英样品的单发激光清洗参数对比

Tab.2 Single-shot laser cleaning parameters comparison of small size coated fused silica and large-aperture vacuum separator

Samples	Range of laser cleaning parameters/J·cm^{-2}	Optimal laser energy density/J·cm^{-2}	Removal rate
Small size coated fused silica	0.57-2.45	1.72	54.61%
Large-aperture vacuum separator	0.57-2.28	1.71	57.67%

3.2 气流置换系统辅助的激光清洗实验

激光清洗实验过程中，大量的脱附颗粒可能会对激光清洗的效果造成影响。尤其是针对大口径光学元件的激光清洗场景，需要考虑清洗二次产物的空间弥散及再吸附问题，

自研的气流置换系统的原理是通过高速伺服电机驱动叶轮风机高速旋转，系统内部出现瞬时真空，和外界的大气环境形成负压差，高速吸入激光清洗过程中产生的大量脱附颗粒，提升清洗效果，避免二次污染。与常用的侧面吹扫气流方案不同，侧面吹扫方案使用为正压气流吹扫，虽然可将脱附颗粒吹离表面，但会造成颗粒在空间的弥散，特别是大口径光学元件安装于密闭的光传输管道中，会带来密封环境污染和二次附着问题。而气流置换方法采用负压原理，系统本身集成了多级 HEPA 过滤循环单元，可及时回收激光清洗过程的脱附颗粒避免二次污染，对可在线的工程应用具有重要意义。

与 2.2 节的实验设置相同，使用波长为 355 nm、脉宽为 10 ns 的 Nd: YAG 脉冲激光器，于样片下侧平行夹持放置真空度为 18 kPa、流速为 15 m/s 的气流置换系统，与光斑位置的直线距离约为 4 cm，所使用的气体种类为洁净的压缩空气。选取大口径真空隔离片表面的边缘污染区域进行激光清洗实验，实验方案如图 8 所示。

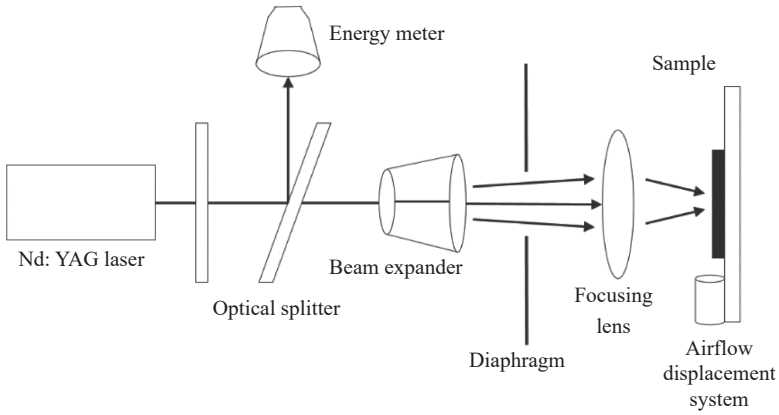

图 8 气流置换系统辅助的激光清洗大口径光学元件实验装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of the large aperture optics laser cleaning setup with the airflow displacement system

选取单点作用模式，取激光能量为 40~200 mJ，光斑面积为 7 mm^2 (椭圆形，长、短轴为 3.4 mm×2.6 mm @1/e^2)，计算得实验所用激光能量密度约为 0.57~2.86 J/cm^2。对两种样品进行气流置换系统辅助的单发干式激光清洗实验，使用光学显微镜、暗场成像法、图像分析软件对清洗样品上残留的污染颗粒以 1~5 μm、5~15 μm、15~25 μm、25 μm以上四种颗粒半径范围分类统计。实验参数条件保持与单发干式激光清洗时相同，据此可通过控制变量法对气流置换系统的辅助效果进行分析，并与单发干式激光清洗的清洗效果进行对比。

根据前期研究表明，单独使用气流置换系统进行实验时，无法对此类污染状况产生清洗效果。气流置换辅助单发激光清洗的结果如图 9 所示。

由图 9 可知，从激光去除颗粒比例趋势上来看，加入气流置换系统前后颗粒去除率规律性基本一致，激光通量峰位位置相同；从数值上看，颗粒去除率提升了 5%~30%。结合光学显微镜可知，加入气流置换

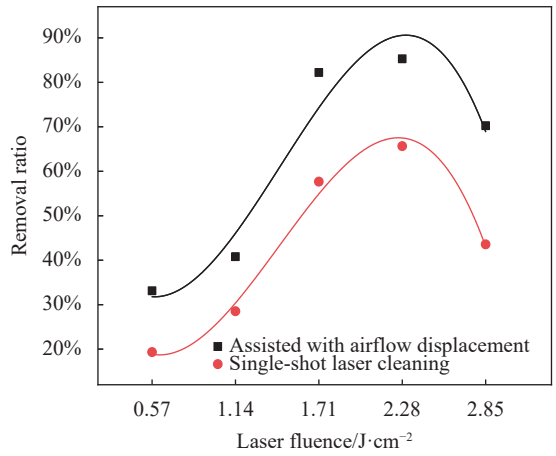

图 9 加入气流置换前后不同样品颗粒激光清洗去除率对比

Fig.9 Comparison of surface particles removal rate of different samples laser cleaning with or without the airflow displacement method

系统对基底损伤阈值不会造成影响。此时大口径真空隔离片的最佳工艺参数为 1.71 J/cm^2，颗粒去除率为 82.21%，相较于单纯的单发干式激光清洗，去除率提高了 24.54%。这表明气流置换系统辅助单发激光清洗能有效提高其清洗效果。

以大口径真空隔离片为例，图 10 (a)~(d) 给出了在最佳激光清洗能量密度 1.71 J/cm^2 下，加入气流置换系统前后的明场与暗场光学显微镜图片。结果表明，气流置换系统辅助的单发干式激光清洗的效果良好，有效减少了颗粒的重附着现象。图 10 (a) 为仅有单发激光清洗时的暗场图，图 10(b) 为气流置换系统辅助的单发激光清洗的暗场图。结果表明，气流置换系统辅助带来的清洗效果提升明显，并能够在单发次激光清洗的基础上有效减少粒径为 1~5 μm 的污染颗粒的残留数量。

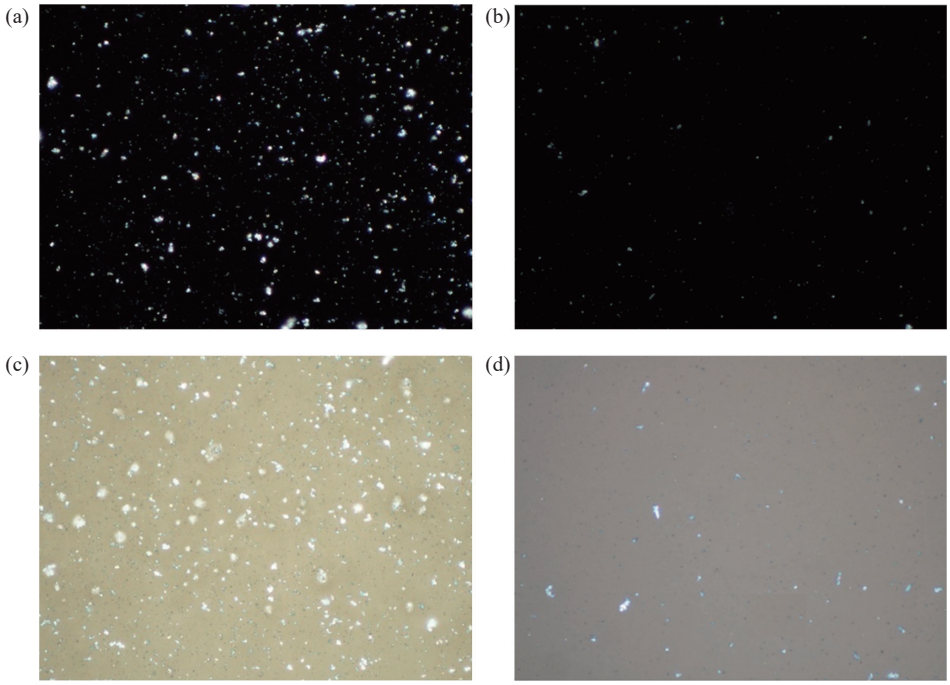

图 10 气流置换辅助激光清洗的效果对比显微镜成像图。(a) 无气流置换-暗场；(b) 有气流置换-暗场；(c) 无气流置换-明场；(d) 有气流置换-明场

Fig.10 Microscopy comparison of surface particles with or without the airflow displacement method. (a) Dark field microscopy without the airflow displacement; (b) Dark field microscopy with the airflow displacement; (c) Bright field microscopy without the airflow displacement; (b) Bright field microscopy with the airflow displacement

4 结 论

文中以大型高功率激光装置中受污染的镀 SiO_2 增透膜的大口径真空隔离片为研究对象，开展了单发次干式激光清洗工艺实验研究，并瞄准在线原位清洗应用需求，提出了气流置换系统辅助的激光清洗方法并开展实验研究。经光学显微镜、暗场成像法与图像处理软件分析，得出干式激光清洗最佳激光能量密度为 1.71 J/cm^2，总颗粒去除率约为 57.67%，采用气流置换辅助的激光清洗方法后，总颗粒去除率提升至 82.21%，相较于单纯的单发干式激光清洗，去除率提高了近 24.54%，且能够有效地对半径为 5 μm 以上的污染颗粒实现完全去除，表明气流置换系统辅助单发激光清洗能有效提高其清洗效果，有效减少颗粒的重附着现象。

参考文献：

[1] Huang L, Yan H, Yan L, et al. Improvement of the environmental stability of sol-gel silica anti-reflection coatings [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2022, 101(3): 630-636.

[2] Tian H, Zhang L, Xu Y, et al. Comparision of silica anti-reflective films obtained via a sol-gel process in the presence of PEG or PVP [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(5):

1197.

[3] Li Y, Bai Q, Guan Y, et al. In situ plasma cleaning of large-aperture optical components in ICF [J]. ***Nuclear Fusion***, 2022, 62(7): 076023.

[4] Wang S Y, Yan H W, Li D J, et al. TEM and STEM studies on the cross-sectional morphologies of dual-/tri-layer broadband SiO_2 antireflective films [J]. ***Nanoscale Research Letters***, 2018, 13: 49.

[5] Yin J, Cao Y. Research of laser-induced damage of aluminum alloy 5083 on micro-arc oxidation and composite coatings treatment [J]. ***Optics Express***, 2019, 27(13): 18232-18245.

[6] Li Y, Bai Q, Sun H, et al. Research progress on contamination damage and cleaning technology of large-aperture diffraction grating [J]. ***Journal of Mechanical Engineering***, 2022, 58(9): 270-282. (in Chinese)

[7] Yang L, Xiang X, Miao X X, et al. Influence of outgassing organic contamination on the transmittance and laser-induced damage of SiO_2 sol-gel antireflection film [J]. ***Optical Engineering***, 2015, 54(12): 126101.

[8] Li Y, Bai Q, Yao C, et al. Long-lasting antifogging mechanism for large-aperture optical surface in low-pressure air plasma in-situ treated [J]. ***Applied Surface Science***, 2022, 581: 152358.

[9] Wu G M, Shen J, Zou L P. Laser-induced damage on ordered and amorphous sol-gel silica coatings [J]. ***Optical Materials Express***, 2014, 4(12): 2478.

[10] Yang L, Xiang X, Yuan X D, et al. Bulk damage and stress behavior of fused silica irradiated by nanosecond laser [J]. ***Optical Engineering***, 2014, 53(4): 047103.

[11] Yu J X, Xiang X, He S B, et al. Laser-induced damage initiation and growth of optical materials [J]. ***Advances in Condensed Matter Physics***, 2014, 1(1): 364627.

[12] Guo Y J, Zu X T, Jiang X D, et al. Laser-induced damage mechanism of the sol–gel single-layer SiO_2 acid and base thin films [J]. ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms***, 2008, 266(12-13): 3190.

[13] 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.

[14] Yu H B, Wang C M, Zhang W, et al. Present status and outlook of laser cleaning application development [J]. ***Electric Welding Machine***, 2014, 44(10): 80-84. (in Chinese)

[15] Chen J F, Zhang Y K, Kong D J, et al. Research progress of cleaning tiny particles by short pulsed laser [J]. ***Laser Technology***, 2007, 31(3): 301-305. (in Chinese)

[16] Liu H, Miao X X, Yang K, et al. Atmosphere pressure plasma cleaning of grease contamination on sol-gel SiO_2 coating [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2015, 27(11): 112008. (in Chinese)

[17] Li Y, Ye Y, Liu H, et al. Time-resolved imaging for investigating laser-material interactions during laser irradiation cleaning on murals [J]. ***Optics & Laser Technology***, 2023, 157: 108679.

[18] Ramakrishna S N, Nalam P C, Clasohm L Y, et al. Study of adhesion and friction properties on a nanoparticle gradient surface: Transition from JKR to DMT contact mechanics [J]. ***Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids***, 2013, 29(1): 175-182.