

高功率激光装置光传输管道污染规律及 对光学表面损伤性能的影响^{*}

苗心向, 袁晓东, 吕海兵, 程晓锋, 贺 群, 周 海, 郑万国, 周国瑞

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 研究高功率激光装置光传输管道内部洁净度变化规律, 分析其对内部重要光学元件光学性能的影响规律, 提出污染控制措施。对光传输管道内部的气溶胶进行采样, 并利用空气品质分析仪及扫描电镜对其进行分析, 得到光传输管道内部洁净度变化规律和污染源; 采用内部放置透射膜元件的方法, 研究洁净度等级水平对透射膜的微观结构和透射率的影响, 并利用“1-on-1”的测试方式进行透射膜元件的损伤阈值测试。研究结果表明: 光传输管道内部的洁净度在激光辐照后迅速上升至万级水平, 透射膜元件在此环境下其透过率严重下降, 下降幅度为 2.5%, 且表面微观形貌发生变化。光学透射薄膜表面损伤阈值随表面污染水平呈现线性下降规律, 最大下降幅度约为 10%。污染监测和成分分析结果表明管道内部灰尘及杂散光或者鬼光束辐照金属产生的等离子体是管道内污染的主要源头, 在此基础上提出了正压密封保持的技术手段确保内部光学表面洁净度水平, 延长使用寿命。

关键词: 高功率激光装置; 损伤; 气溶胶; 污染

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB201527.032033

用于 ICF 驱动的高功率激光装置中包括 400 多个大口径光学元件, 除了部分安装在密封的真空箱体内部, 其余大部分透镜和反射镜以及承载这些光学元件的金属框架都暴露在光传输管道内洁净空气中。尽管光传输管道内部的所有光学元件和机械元件都经过在百级(每平方米内粒径大于或者等于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的粒子数不超过 1000 个)环境中清洗、装校和运行, 光传输管道内部的环境在静态情况下也可以达到百级, 但是经过打靶后, 光传输管道内部的环境会出现突然恶化的情况。内部工作的光学元件经过长期使用后, 表面沉积大量的污染物, 表面洁净度急剧劣化, 并且发现由表面污染导致的光学元件的损伤^[1-3]。J. Honig 等人根据 Nova, Amp-lab 和 NIF 的数据研究表明^[4], 激光装置内部的密封材料、元件清洗后表面或者亚表面残余污染物或者腔内的其他材料在强激光的辐照下, 形成大量的 μm 量级的气溶胶, 悬浮的气溶胶在缓慢的沉降过程中容易凝结在元件表面, 造成元件表面污染, 而在强激光的辐照下, 可能造成表面损伤; 随后又研究了 NIF 装置内部的污染源及控制方法。法国 LMJ 装置研究人员 Palmier 等人根据 LMJ 装置内部污染状态, 研究分析了光学表面颗粒污染物对元件损伤阈值的影响规律^[2]。而国内这方面的研究还处于起步阶段^[5-7]。本文主要针对神光Ⅲ激光装置内部的污染状况进行监控及分析, 并对光传输管道内部最容易受损的部分光学元件表面化学膜受到污染影响情况进行了研究, 分析了污染后导致的光学表面透过率和损伤阈值下降规律及污染源。在此基础上提出了正压保持的洁净控制思想。

1 实验过程

1.1 环境的监控

利用颗粒计数器监控激光装置光传输通道内部的气体环境状况。颗粒计数器原理是探测激光经尘埃粒子散射后被光敏元件接受并产生脉冲信号, 该信号被输出、放大并进行数字信号处理。光散射与颗粒大小、光波波长、微粒及微粒对光的吸收特性等因素有关, 其中微粒散射光的强度随微粒的表面积增加而增大。利用颗粒计数器在激光装置高通量运行过程中对光传输管道内部的不同位置进行数据采集, 并进行对比分析洁净度水平的变化规律趋势。

1.2 光学样片的制备和表征

在百级洁净实验室中采用提拉法镀膜, 先将洁净 K9 玻璃基片浸入溶胶 SiO_2 中浸泡 1 min, 再以一定的速

^{*} 收稿日期: 2014-08-26; 修订日期: 2014-11-13

作者简介: 苗心向(1984—), 男, 助理研究员, 从事高功率激光装置光学元件表面污染的研究; miaoxinxiang.714@163.com。

通信作者: 周国瑞(1983—), 男, 助理研究员, 从事高功率激光装置洁净监测与分析; zhougr@caep.cn。

度平稳的拉出溶液,镀上 SiO_2 薄膜。

用紫外可见分光光度计(TU-1810 型)测量镀膜 K9 玻璃的透过率;用光学显微镜(Nikon ECLIPSE E600)和原子力显微镜(XE-100)观测样片表面形貌,分析化学膜形态和性能的改变。

1.3 污染源分析及损伤性能测试

采用碳胶带对光学表面颗粒污染物进行取样,然后利用扫描电镜对成分进行分析。实验中使用日本电子株式会社生产的扫描电镜,型号为 JEOL JSM-5610LV,其主要特点为全数字化控制系统,高分辨率、高精度的变焦聚光镜系统,放大倍数 $18 \sim 300\,000$,配备了 JED-2300 型能谱仪。对于污染对光学表面损伤阈值的研究,采用 1-on-1 的损伤测试方式,对污染后的化学膜表面进行损伤性能测试,并以是否发生等离子体闪光为判断损伤是否发生的依据^[8]。

2 结果与讨论

2.1 洁净度标准

洁净度测试有很多方法,但是美国的 NIF 采用 Federal Standard 209 作为空气内气溶胶洁净度的标准^[4]。如果空气中的气溶胶沉积在元件表面,元件表面就会形成遮光点,造成光束的衍射和下游元件的损伤。美国 NIF 定义的光学元件表面洁净度标准是散射光强不超过 2.5×10^{-4} ,这样才不会造成下游元件的损伤。研究结果表明污染物引起的损伤点尺寸可以达到污染物颗粒尺度的 7.7 倍左右(其中激光脉冲的能量为 5 J/cm^2)。

空气中气溶胶含量与空气洁净度等级关系可以表示为

$$f_{\text{vol}}(x) = N \left(\frac{0.5}{x} \right)^{2.2} \quad (1)$$

式中: $f_{\text{vol}}(x)$ 为单位体积内的气溶胶浓度; N 为洁净度等级水平; x 为颗粒的直径,单位 μm 。

函数 $f_{\text{vol}}(x)$ 的图像如图 1 所示,图中横坐标为颗粒直径,纵坐标为单位体积内的气溶胶颗粒浓度。数学表达式中的指数 2.2 是各种测试环境和测试方式的经验值,不同环境可能有不同的指数因子,如果环境品质较好,指数可能大于 2.2,如果环境品质较差,指数可能小于 2.2。

2.2 激光装置运行阶段洁净度分析

图 2 为激光装置运行阶段打靶以后光传输管道内部的洁净度状况分布图。由图 2(a)可知,在静态的情况下,管道内部的洁净度为百级以下,环境品质非常高。但是经过强激光辐照以后,光传输管道内部的洁净度迅速下降至万级, $0.3 \mu\text{m}$ 粒径的颗粒浓度已经超过 10^3 ,而 $0.5 \mu\text{m}$ 粒径的颗粒浓度也达到 800 个左右,根据公式(1),打靶过后环境洁净度为万级,且气溶胶粒子沉降速度非常缓慢,大量的气溶胶颗粒长期悬浮在光传输管道内,沉积在光学元件表面的几率大大提升。图 3 为装置激光能量与管道洁净度之间的关系,由图可知,管道内洁净度等级水平与激光能量呈线性关系, $Y = 0.462\,4X - 98.9$,其中

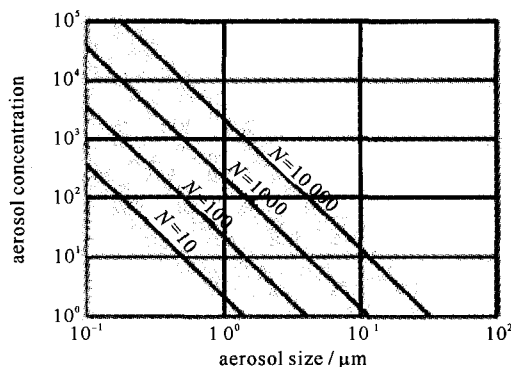


Fig. 1 Cumulative distribution of aerosol particles

图 1 气溶胶颗粒直径与环境品质关系图

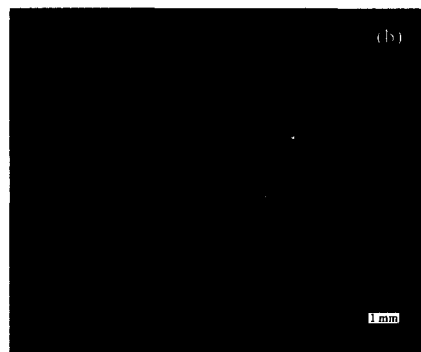
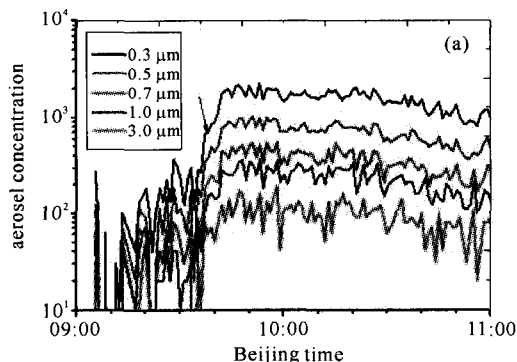


Fig. 2 Aerosols concentrations during the laser shots and the morphologies of the surface

图 2 激光辐照期间气溶胶变化曲线和表面形貌图

X 为激光能量, Y 为气溶胶浓度。通过数据拟合可知当激光能量小于 214 J 时不会产生 $0.5\ \mu\text{m}$ 尺度的颗粒污染物。在激光能量小于 300 J 时, 管道内洁净度等级水平为 100 级, 此时激光能量不会引起管道内部洁净度的变化, 洁净度维持在百级量级。当激光能量高于 300 J 时, 光传输管道内开始产生气溶胶颗粒, 引起内部洁净度快速下降。当激光能量超过 1000 J 时, 管道内的洁净度等级水平已经达到万级。此时, 气溶胶弥漫整个光传输管道, 根据微粒子自由扩散理论, 会有大量的尘埃颗粒堆积在光学元件表面, 沉积速度约为 $(0.25 \pm 0.03)\ (\text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})^{[9]}$ 。在激光装置运行一段时间, 通过暗场成像在光学表面发现沉积的气溶胶颗粒^[10], 如图 2(b) 所示。此类光学表面的污染物会引起光学表面发生损伤。

2.3 管道内气溶胶对光学元件性能的影响

在高功率激光装置中, 存在大量的光学元件, 为了保证装置的高通量运行, 溶胶-凝胶法制备的二氧化硅增透膜已经成为必不可少的光学薄膜, 广泛应用于激光装置的各种透射光学元件表面, 如空间滤波器窗口、靶室窗口或者打靶透镜等。但是由于化学膜质地脆弱, 又疏松多孔, 更容易受到气溶胶的污染, 从而影响其使用寿命。为了研究气溶胶对光学元件化学膜性能的影响, 在光学元件表面使用提拉法制备化学膜, 利用分光光度计和原子力显微镜观察其透过率和微观形态的变化, 并进行损伤阈值测试。

在 K9 基片表面制备厚度为 200 nm 的 SiO_2 薄膜, 并将样片放置在光传输管道内部, 透过率图谱如图 4 所示, 化学膜的透过率随时间的推移呈现下降趋势。透过率从 98.6% 下降至 96.1%, 下降最大降幅为 2.5%。其中透射率在放置两周和三周时透射率下降最大, 分别为 0.5% 和 1.4%。可能的原因是在第三周时打靶次数多 (约 12 发次), 管道内部污染物较多, 所以引起的透射率下降幅度较大。化学膜透射率的下降与环境内部气溶胶的浓度密切相关。

图 5 为化学膜在放入光传输管道内前后的原子力显微形貌图, 由图可以看出化学膜总体表现为疏松多孔, 但通过对比可以发现, 在管道内部放置一段时间后, 化学膜的表面均方根粗糙度由 4.069 nm 变为 3.544 nm, 放置后的化学膜表现得更为致密, 表面结构变得更为平整, 可能的原因是化学膜吸附管道内部的气溶胶而变得表面结构致密。管道内部的气溶胶对化学膜的微观结构有较大影响^[11]。

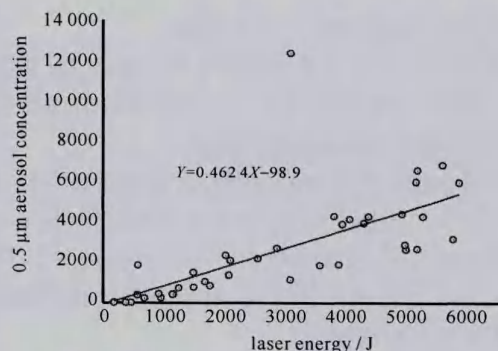


Fig. 3 Aerosols concentrations as a function of laser energy

图 3 管道洁净度与激光能量之间的关系

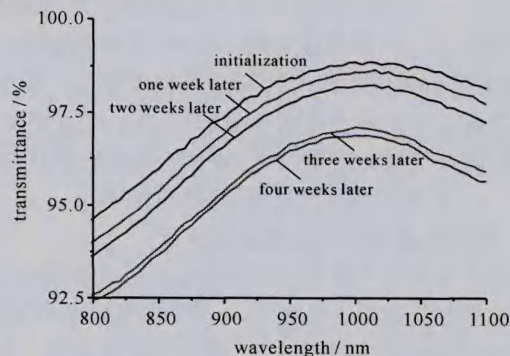


Fig. 4 Transmittance spectra of K9 glass coated with SiO_2 film

图 4 K9 基片透过率图谱

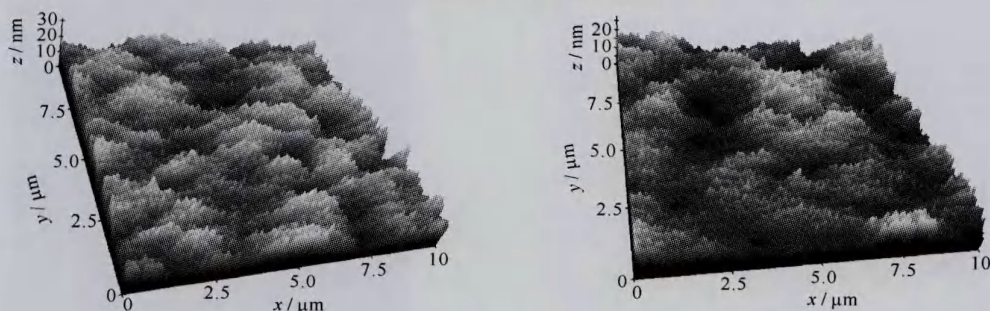


Fig. 5 AFM images of the surface morphology: before and after putting in the beam path

图 5 化学膜在放置前后的扫描探针显微镜照片

图 6 为污染后的化学膜在激光辐照下的损伤形貌。由显微形貌可知,膜层表面表现为剥落状损伤,同时光学表面也发生损伤。在整个实验过程中没有发现膜层损伤而基底不损伤的情况,与电子科技大学郭袁俊的实验结果一致^[12]。化学膜元件的损伤阈值测试结果表明:未受到污染的化学膜元件的损伤阈值为 31.9 J/cm^2 ,而放置在光传输管道一周、二周、三周和四周后的化学膜元件的损伤阈值分别为 $30.9, 29.6, 30.3, 28.7 \text{ J/cm}^2$ 。污染后的化学膜元件损伤阈值随着透过率的下降呈现轻微下降趋势,下降幅度最大的为在光管道放置四周的光学样片,其损伤阈值约为 28.7 J/cm^2 ,最大下降幅度为 10% ,对应透过率下降为 2.5% 。中间出现的损伤阈值波动(第二周与第三周)可能是激光器能量波动引起的。测试结果与 R. Pareek 报道的小尺度气溶胶污染物会降低化学膜透过率,但对其损伤阈值影响不大的结论一致^[13]。因此,激光装置内的污染物对光学表面化学膜的透过率影响较大,对损伤阈值影响不大。

2.4 污染源分析与洁净度改进方式

光传输管道内部的污染物极大地降低了化学膜元件的透过率,降低了装置的运行效率。针对目前激光装置的状况,影响高功率激光装置内部洁净度的因素很多,目前主要研究集中在表面残余的有机物和杂散光辐照元件表面产生的气溶胶^[3,9,13]。为此,针对光学表面和光传输管道内部的三个位置的大尺度污染物采用导电胶带取样,并利用扫描电镜(SEM)分析其成分,测试结果如图 7 所示。由图可知,激光装置内污染物颗粒的化学成分可以分为三类:有机物、金属及矿物质。由成分配比可以看出三个位置区域内的颗粒污染物几乎具有大致相同的成分配比,有机物、金属及矿物质所占的比例分别为 $40\%, 20\%$ 和 40% 。结合装置实际运行情况,经分析此类颗粒污染的来源有三类:激光照射在机械元件表面喷溅出的微粒子(图 8),呈现圆球状结构,尺度在 $10 \mu\text{m}$ 量级,原因是激光辐照金属表面产生等离子体喷溅,并伴随金属熔融烧蚀;洁净室内的颗粒污染物在作业过程中由作业人员带入洁净箱体内,沉积在光学元件表面;精密装配过程中结构件相互摩擦而产生的颗粒^[14]。

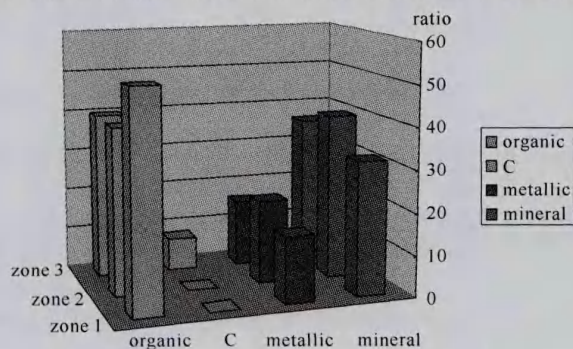


Fig. 7 Particle distribution as a function of their chemical composition

图 7 颗粒污染物成分分析

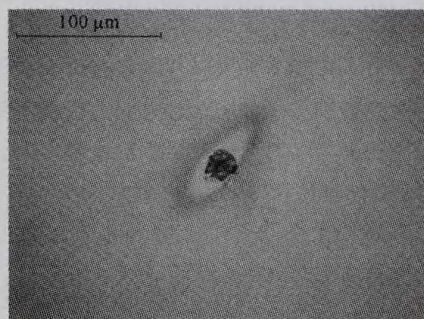


Fig. 6 Microscope image of damage morphology for coating on K9 glass

图 6 化学膜表面损伤形貌



Fig. 8 SEM images of the particles after laser irradiation

图 8 金属溅射污染物微观形貌

为了保证激光装置内部洁净度等级水平,采取对激光装置光束管道内部增设正压,即光束管道内部充入大量的洁净空气,充气量达到 $260 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上,光束管道内部维持正压,剩余压强大于 10 Pa ,使得产生的气溶胶污染物迅速被吹到管道外,保持了装置良好的洁净度环境,改进后的结果如图 9 所示。通过这种方式,降低了气溶胶污染物沉积在光学表面的几率和沉降时间,确保了光学表面的高透过率维持较长的生命周期。并采用新的洁净方式,如高压喷淋清洗系统,超声波清洗系统,并加强维护管理和环境监控^[15-18],管道内部的洁净度得到有效控制,达到 NIF 装置的同等水平。

3 结 论

通过采集光传输管道内部的气溶胶分布状况,并针对光传输管道内部的易损元件表面的化学膜进行分析,得出化学膜透过率下降约为 2.5%,表面结构变得更致密,损伤阈值变化不大,最大下降幅度约为 10%,气溶胶污染对化学膜影响非常严重。结合国内外高功率激光装置的洁净度研究,采用 SEM 的方式得出光传输管道内部的气溶胶污染物的主要来源:安装调试过程中沉积在表面的灰尘等污染物;洁净不彻底残余在表面的非挥发性残余和散射光束照射引起金属构件表面损伤而引起的污染。在此基础上,提出了洁净正压保持的技术措施来维持光传输管道内部的洁净度水平。

参考文献:

- [1] MacIlwain C. Laser project faces optics hurdle[J]. *Nature*, 1990, **401**(6750):201-202.
- [2] Palmier S, Tovenia I, Courchinoux R, et al. Laser damage to optical components induced by surface chromium particles[C]//Proc of SPIE. 2005, **5647**:156-164.
- [3] Guehenneux G, Bouchut P, Veillerot M, et al. Impact of outgassing organic contamination on laser-induced damage threshold of optics effect of laser conditioning[C]//Proc of SPIE. 2005;**59910F**.
- [4] Honig J. Cleanliness improvements of National Ignition Facility amplifiers as compared to previous large-scale lasers[J]. *Opt Eng*, 2004, **43**(12):2904-2911.
- [5] 余颖,赵峰,李文博,等. 高功率激光装置中的气载分子污染物测量和分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(8):1153-1156. (Yu Ying, Zhao Feng, Li Wenbo, et al. Measurement and analysis of airborne molecular contaminations in high power laser facility. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(8):1153-1156)
- [6] 於海武,郑万国,唐军,等. 高功率激光器放大器片腔洁净度实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(3):272-276. (Yu Haiwu, Zheng Wanguo, Tang Jun, et al. Investigation of slab cavity cleanliness of high power laser amplifiers. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(3):272-276)
- [7] 苗心向,程晓锋,袁晓东,等. 熔石英表面铜颗粒污染激光诱导损伤[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(8):1740-1744. (Miao Xinxiang, Cheng Xiaofeng, Yuan Xiaodong, et al. Laser-induced damage of fused silica initiated by Cu contamination particles on surface. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8):1740-1744)
- [8] GB/T 16601-1996. 光学表面激光损伤阈值测试方法[S]. 1997. (GB/T 16601-1996. Test methods for laser induced damages threshold of optical surfaces. 1997)
- [9] Palmier S, Garcia S, Rullier J L. Method to characterize superficial particulate pollution and to evaluate its impact on optical components under a high power laser[J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**:084203.
- [10] 赵龙彪,秦朗,周国瑞,等. 大口径高通量实验平台反射镜在线洁净控制技术[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(18):3215-3219. (Zhao Longbiao, Qin Lang, Zhou Guorui, et al. Method of online cleanliness control for upward-facing transport mirrors in integration test bed. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(18):3215-3219)
- [11] Bien-Aime K, Pereira A, Belin C, et al. Impact of outgassing organic contamination on laser induced damage of optics[C]//Proc of SPIE. 2009;**75040V**.
- [12] Guo Yuanjun, Zu Xiaotao, Jiang Xiaodong, et al. Experimental research of laser-induced damage of the monolayer ZrO_2 PVD and sol-gel films[J]. *Opt Laser Technol*, 2008, **40**(5):677-681.
- [13] Pareek R, Kumbhare M N. Effect of oil vapor contamination on the performance of porous silica sol-gel antireflection-coated optics in vacuum spatial filters of high-power neodymium glass laser[J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**:023801.
- [14] Palmier S, Garcia S, Laignere L, et al. Surface particulate contamination of the LIL optical components and their evolution under laser irradiation[C]//Proc of SPIE. 2007;**64030V**.
- [15] 程晓锋,苗心向,陈远斌,等. 神光-III 主机激光装置片状放大器洁净控制进展[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(1):1-2. (Cheng Xiaofeng, Miao Xinxiang, Chen Yuanbin, et al. Development on cleanliness control of slab amplifiers for Shenguang-III laser driver. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(1):1-2)
- [16] Lu Y F, Zhen Y W, Song W D. Characterization of ejected particles during laser cleaning[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **8**(1):549-552.
- [17] Sommer S C, Stowers I F, Van Doren D E, et al. Clean construction protocol for the National Ignition Facility beam path and utilities[R].

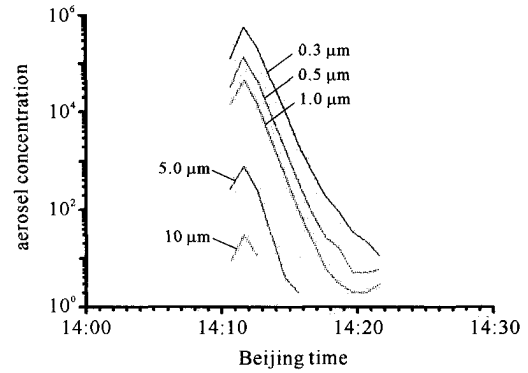


Fig. 9 Cleanliness of the beam path

图 9 激光装置管道内部洁净度监测

UCRL-JC-145251, 2002.

- [18] 程晓锋,王洪彬,苗心向,等. 高功率固体激光驱动器污染控制及片状放大器洁净度改进[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(5):1147-1151.
(Cheng Xiaofeng, Wang Hongbin, Miao Xinxiang, et al. Contamination control for high-power solid-state laser drive and improvement of cleanliness in slab amplifiers. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(5):1147-1151)

Contamination in beampath and laser induced damage of optics in high power laser system

Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Lü Haibing, Cheng Xiaofeng, He Qun,
Zhou Hai, Zheng Wanguo, Zhou Guorui

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 988-5, Mianyang 621900, China)

Abstract: To obtain the cleaning methods in high power laser system, the beampath cleanliness experiments and the effects of laser induced damage owing to contamination are studied. The numbers and components of the aerosols are analyzed using the commercial particle counters and SEM. The SiO_2 film on K9 is put in the beampath for a certain time, and the transmittance spectra and the morphologies are studied. The laser induced damage threshold of the K9 glass is studied using the “1-on-1” method. The results show that the aerosols keep high concentrations about 7 class after one laser shot with the energy about 5000 J. In this environment, the transmittance of the film descends seriously (about 2.5%), and the aerosols moved onto the surface for clearance in the film. The laser induced damage threshold fluence descends linearly with the cleanliness level of the surface to the maximum decrease of about 10%. The dust and the metal particles are the main contaminations in the beampath, and the source of typical airborne molecular contaminations is discussed and the removal methods are suggested to prolong the life of optics.

Key words: high power laser facility; optical component damage; airborne; cleanliness

PACS: 68.35.B-; 81.65.Cf; 52.57.-z; 42.60.-v