

靶场终端传输反射镜表面洁净控制技术研究

李养帅, 张严峰, 刘志刚, 周申蕾, 孙明营, 朱健强*

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 传输反射镜是高功率激光装置中连接主放大系统与靶场终端的关键组成部分, 实现它的表面洁净控制尤为必要。本课题组基于风刀高速吹扫颗粒物去除技术, 探究了开放式环境下, 风刀安装高度、进气压力、出气口间隙、吹扫次数等工艺参数对靶场终端反射镜表面 Al_2O_3 、灰尘和不锈钢等颗粒物去除效率的影响, 并从实验中捕捉到了颗粒物的动态运动轨迹。研究结果表明: 提高进气压力可以提高颗粒物的去除效率; 当风刀安装高度为 4 mm、进气压力为 1.5 MPa 时, 0.05 mm 或 0.1 mm 的风刀出气口间隙均可实现 90% 以上的平均去除效率; 当进气压力不高于 1.2 MPa 时, 增加吹扫次数并不能提高颗粒物的去除效率; 在去除过程中, 颗粒物沿着高速气流方向直线运动。本次实验结果为靶场终端传输反射镜在线表面洁净控制提供了重要参考和技术支撑。

关键词 光学器件; 传输反射镜; 洁净控制; 颗粒污染物; 风刀

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1301003

1 引言

靶场终端传输反射镜作为高功率激光装置中连接主放大系统与靶场的关键部分, 承担着几焦耳每平方厘米的功率密度, 随着 ICF 聚变研究的深入^[1-3], 传输反射镜未来可能要承担十几焦耳每平方厘米的功率密度, 甚至是数十焦耳每平方厘米的功率密度。在这种情况下, 传输镜表面一旦有污染物, 极易导致反射镜损坏, 所以实现其表面洁净控制尤为重要^[4-5]。研究发现, 颗粒物, 尤其是以有机物、金属和矿物质为主的颗粒物是影响传输反射镜表面洁净度的重要因素之一^[5-9]。造成传输反射镜表面损伤的主要是 30 μm 及以上粒径的颗粒物, 所以, 实现传输反射镜表面颗粒污染物的去除, 尤其是 30 μm 以上颗粒物的去除, 是十分必要的^[8]。

国内外针对传输反射镜表面的洁净控制方法(主要是手工擦拭法和风刀吹扫法)进行了大量研究。风刀吹扫法具有污染物去除效率高、吹扫效果稳定等特点, 尤其适用于人工不易操作的、密闭环境中传输反射镜的清洁, 因而成为洁净控制方法研究的主流。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室在 1.6 MPa 进气压力、0.1 mm 风刀出口间隙、4 mm 风刀安装高度的条件下, 实现了靶场传输反射镜(尺寸为 440 mm \times 690 mm)表面不锈钢、铝和玻璃颗粒(粒径均不小于 55 μm)的有效去除, 去除效率达到 99% 以上^[5, 10-11]; 2013 年, 赵龙彪等^[12]针对尺寸为 610 mm \times 440 mm 的反射镜, 研究了 0.2~0.4 MPa 进气压力、0.1 mm

风刀出口间隙以及不同吹扫时间和吹扫次数下灰尘颗粒物的去除效率, 最高去除效率仅为 67%; 2021 年, 牛龙飞等^[13]针对尺寸为 610 mm \times 440 mm 的反射镜, 研究了不同吹扫工艺下, 氧化铝、铁、二氧化硅等颗粒物(粒径为 40~150 μm)的去除效率, 获得了进气压力为 0.55 MPa 和风刀安装高度为 10 mm 的最佳吹扫参数; 同年, 李玉海等^[14]也进行了相关研究。总的来说, 上述研究要么是进气压力过大, 导致耗气量增加, 相应的气管和气源等要求增加, 使用风险增大, 要么是进气压力过低, 污染物去除效率受限, 并且均未对风刀吹扫后污染物的运动状态及轨迹进行有效说明。风刀吹扫对污染物的去除效率是由进气压力、风刀出气口间隙、风刀安装高度等多因素综合决定的, 所以, 开展基于风刀吹扫的传输反射镜表面颗粒物去除技术研究, 探明工作压力、风刀安装高度、吹扫时间、吹扫次数等因素对颗粒物去除的影响规律, 以及捕捉颗粒物去除过程中的运动轨迹, 对于最终制定一套低风险、切实可行的传输反射镜表面颗粒物在线洁净控制方案具有重要意义。

2 实验安排及设计

2.1 实验介绍

实验是在百级洁净室环境下进行的, 主要采用风刀吹扫法, 研究多因素对传输反射镜表面不同位置、不同尺寸和不同类型颗粒物去除效率的影响规律, 以及去除过程中颗粒物的运动轨迹, 其中的多因素主要为风刀安装高度、进气压力、吹扫次数、出气口间隙。

收稿日期: 2021-10-26; 修回日期: 2021-11-19; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA25020202)、中国科学院青年创新促进会资助项目(2018282)

通信作者: *jqzhu@siom.ac.cn

风刀吹扫系统如图 1 所示,主要包括传输反射镜、载玻片样品、调整机构和风刀,其中风刀安装在调整机构上,位于传输反射镜的一侧。风刀的安装高度通过调整机构进行调节,调节范围为 4~10 mm。传输反射镜按照工作角度进行摆放(与水平面呈 45°)。将反射镜表面按照到风刀距离的远近分成三个区域(近端、中间和远端),每个区域布置 4 块载玻片样品,样品表面均布颗粒污染物。通过载玻片表面颗粒物在风刀吹扫前后的数量变化率来表征不同吹扫工艺下颗粒物的去除效率。风刀型号为 EXAIR 112130SS-0.1,有两种出口间隙(0.05 mm 和 0.1 mm)。

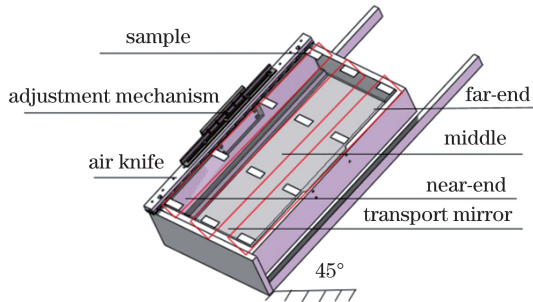


图 1 实验装置

Fig. 1 Testing apparatus

为保证供气流量和压力充足,采用图 2 所示的供气系统。气源为 40 L 标准氮气钢瓶提供的高纯氮气(纯度为 99.999%, GB/T 8980—1996),初装压力为 13.5 MPa。高纯氮气经过大流量减压阀(型号为 R12LG-DHG-52-04,控制压力和流量)后依次通过气管、阀门,最后与风刀相连,实现供气。通过阀门的开闭来控制风刀的吹扫时间和次数。为同时满足风刀对压力和流量的要求,采用 4 个氮气瓶同时供气,风刀采用 4 孔进气。颗粒物的运动轨迹借助手机视频录像采集模式获得。末端风速采用温压流检测仪(型号为 REWF-4000)进行测量。

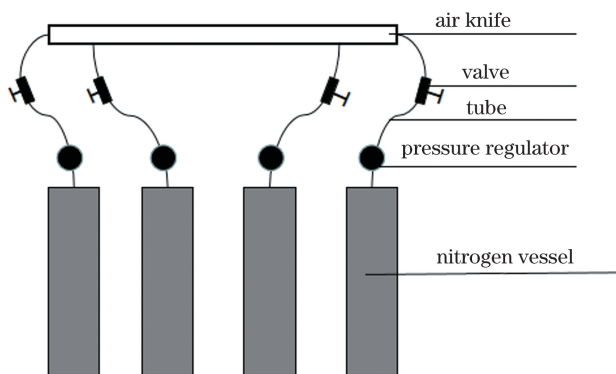


图 2 风刀供气系统

Fig. 2 Nitrogen supply system of air knife

污染物颗粒是 25 μm 及以上粒径的氧化铝粉、不锈钢粉和灰尘,它们对应的获取渠道分别为网购(颗粒物形状不规则)、油光锉锉金属块(未采用市售粉末,主要是因为市售粉末的形状过于规则),以及神光 II 升级

装置(SG-II UP)实验大厅收集。

颗粒物的设置和测量采用分段取样-离线检测法,具体为:1)在离线条件下于 12 块洁净的载玻片样品上均布颗粒物;2)采用徕卡显微镜离线测量 12 块载玻片固定区域颗粒物的粒径和数量;3)将 12 块表面含有颗粒物的载玻片均匀地粘附在传输反射镜的三个区域,每个区域 4 块载玻片;4)调整风刀吹扫工艺参数进行吹扫;5)取下载玻片,在相同的设置参数下,再次采用徕卡显微镜统计颗粒物的数量并测量其粒径;6)计算颗粒物数量和粒径的变化。

反射镜为 SG-II UP 传输反射镜,其尺寸为 690 mm×370 mm×100 mm;载玻片为高品质显微镜载玻片试样(购于江苏世泰实验器材有限公司,规格为 24 mm×60 mm×0.13 mm),由于载玻片极薄(0.13 mm),所以可近似认为颗粒物附着于传输反射镜表面;徕卡显微镜的型号为 DM 4000,具体参数设置如表 1 所示。

表 1 显微检测系统的设定

Table 1 Microscopic inspection system settings

Parameter	Content
Objective	5×
Gain	1.0×
Gamma	0.92
White level	112
Black level	3
Threshold	0-75
Measured diameter/mm	20
Lamp	152

此外,在显微镜载物台上标记出十字线,每次检测时载玻片样品的两条相互垂直的直角边与十字标记线的两条边重合,严格保证载玻片与载物台的位置,并且每次检测时载物台均进行自动校正,使显微镜与载物台的相对位置固定,最终实现实验前后检测区域的固定(或者说相同)。污染物的均布是通过离线抖动粘有污染物颗粒的毛刷实现的。载玻片与传输反射镜光滑表面依靠涂抹酒精溶液的方式实现强力把持(类键合方式)。均布污染物颗粒前,使用百洁布蘸取酒精溶液对载玻片进行清洁处理;处理后,若单个试样测量区域内的颗粒(粒径>25 μm)数量少于 10 个,则忽略不计这些颗粒。

去除率的计算方法如下:设均布后的颗粒数为 N_1 ($N_1 > 1000$),吹扫后的颗粒数为 N_2 ,单个试样的风刀去除效率 $\eta_i = 1 - N_{2i}/N_{1i}$ ($i = 1, 2, \dots, 12$),单个区域(近端、中间或远端)的去除效率为 $\eta_j = \sum \eta_i / 4$ ($j = 1, i = 1, 2, 3, 4; j = 2, i = 5, 6, 7, 8; j = 3, i = 9, 10, 11, 12$),整个传输反射镜的去除效率为 $\eta = \sum \eta_j / 3$ 。

2.2 实验设计与安排

基于文献[4-6]的研究结果,分析不同情况下污染物去除效率的变化规律。具体实验设计与安排如表 2 所示。

表 2 实验设计与安排

Table 2 Experimental design and arrangement

No.	Contaminant type	Inlet pressure /MPa	Installation height /mm	Air knife outlet gap /mm	Purging times
1	Alumina	1.0	4	0.1	1
2	Alumina	1.0	7	0.1	1
3	Alumina	1.0	10	0.1	1
4	Alumina	1.2	4	0.1	1
5	Stainless steel	1.2	4	0.1	1
6	Dust	1.2	4	0.1	1
7	Dust	1.2	4	0.1	1,4
8	Stainless steel	1.2	4	0.1	1,4
9	Alumina	1.5	4	0.1	1
10	Stainless steel	1.5	4	0.1	1
11	Dust	1.5	4	0.1	1
12	Stainless steel	1.0	4	0.05	1
13	Stainless steel	1.2	4	0.05	1
14	Stainless steel	1.5	4	0.05	1

3 实验结果及分析

3.1 测量周期对测量结果的影响

为了降低测量误差,考核了一次实验周期内(约 4 h)实验环境对测量结果的影响。采样试纸测量区域与试样测量区域相同($\Phi 20$ mm),测量结果如图 3 所示。可见:在一次实验周期内,粒径为 $25\sim 50\ \mu\text{m}$ 的颗粒物的数量改变量在 10 个以内(相对测试样品颗粒数为千级来说,10 以内认为可以忽略), $>50\ \mu\text{m}$ 粒径的颗粒物的数量基本没变。因此,可以认为颗粒数没有发生变化,即一个测试周期内环境对测量结果的影响可忽略不计。继续延长采样试纸的静置时间至 3 d, $25\sim 50\ \mu\text{m}$ 粒径范围内的颗粒物的数量为 11, $>50\sim 100\ \mu\text{m}$ 粒径范围内的颗粒物的数量为 1, $>100\ \mu\text{m}$ 粒径的颗粒物的数量为 1。可以看出,采样试纸静置 3 d 后,颗粒数相对于初始测量值的变化仍然可以忽

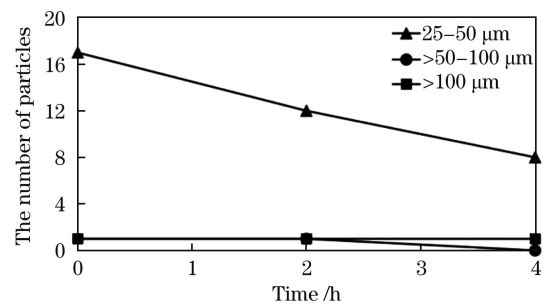


图 3 测量周期对颗粒物数量的影响

Fig. 3 Influence of measurement period on the number of particles

略不计。综上,本文认为实验环境对测量结果无影响。

3.2 风刀安装高度对颗粒物去除效率的影响

表 2 中 1~3 实验号的测试结果如图 4 所示(30 mm 处为近端,185 mm 处为中间,340 mm 处为远端)。由图 4 可知:

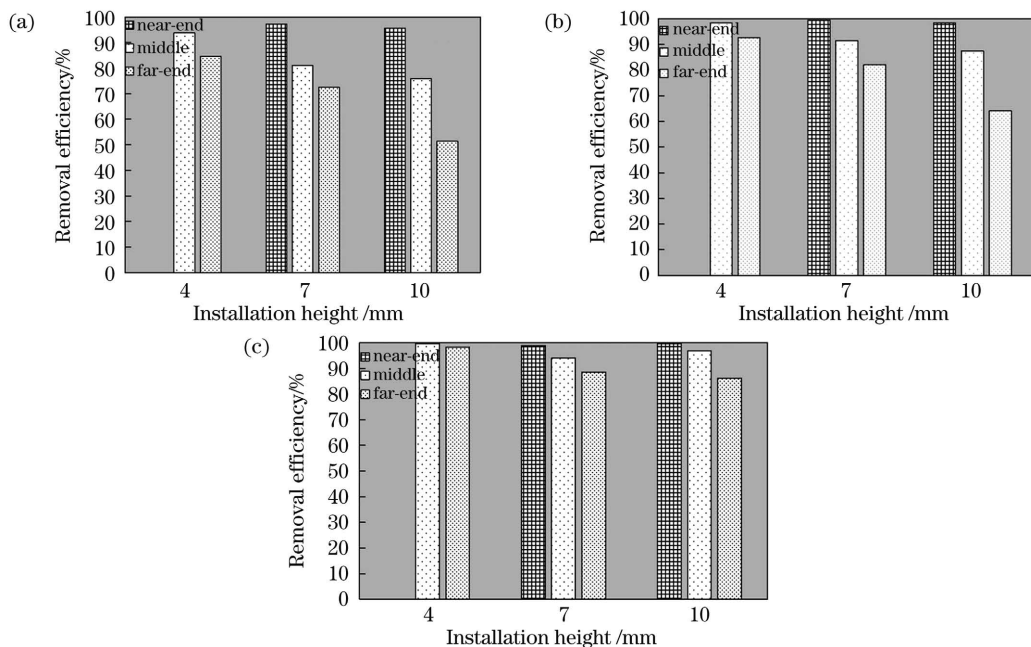


图 4 不同粒径 Al_2O_3 颗粒物的去除效率。(a) $25\sim 50\ \mu\text{m}$; (b) $>50\sim 100\ \mu\text{m}$; (c) $>100\ \mu\text{m}$

Fig. 4 Removal efficiency of Al_2O_3 particles with different sizes. (a) $25\sim 50\ \mu\text{m}$; (b) $>50\sim 100\ \mu\text{m}$; (c) $>100\ \mu\text{m}$

1)对于传输反射镜,近端颗粒物的去除效率高(最高达 97%),远端去除效率低。这主要是因为风刀产生的高速气流的速度沿着传输反射镜面逐渐降低,所以对颗粒物的去除能力下降。

2)颗粒物的尺寸越大,去除效率越高,反之,去除效率越低。这是因为颗粒物主要受重力、范德瓦耳斯力、静电力等多重力的综合作用。根据风刀去除方式的力学模型,固体颗粒越小,去除需要的动压强就越大,即需要的流体速度就越大^[15]。

3)随着风刀安装高度的增加,传输反射镜三个区域的颗粒物去除效率均逐渐降低,并且安装高度越高,颗粒物去除效率的降幅越明显。这是因为,风刀吹出的高速气幕有一定的发散角,越靠近气幕中心平面的位置,风速越大,去除力越强,而越靠近发散角边缘,气流速度越小,并且气流速度递降越明显,去除力越弱^[16]。图 4(a)~4(c)中均无风刀安装高度为 4 mm 时近端颗粒物的去除效率数据,这是因为在相同的实验条件下,相较于风刀安装高度为 7 mm 和 10 mm 的情况,风刀安装高度为 4 mm 时,传输反射镜表面更接近风刀产生的气幕中心平面,因而接收到的风速更大,风速过大产生的作用力超过了试样的把持力,导致近端试样被吹跑。这在一定程度上佐证了风刀安装位置越高去除效率越低的结论。

4)在安装高度为 4 mm 时,传输反射镜前端及中间区域颗粒物的去除效率均不低于 95%,最高可达 99%,但是末端 25~50 μm 颗粒物的去除效率相对较低(84.5%),导致整个传输反射镜末端区域颗粒物的整体去除效率相对较低(91.8%),所以仍需在本次实验的基础上进一步优化工艺参数。另外,本次研究结果也表明传输反射镜末端颗粒物的去除效率是整个传输反射镜去除效率的关键,所以,后续实验(表 2 实验号 4~14)仅研究传输反射镜末端颗粒物的去除效率。

3.3 进气压力对风刀去除效率的影响

在前期研究风刀安装高度对去除效率影响的基础上,进一步提升进气压力至 1.2 MPa(表 2 实验号 4)进行实验,得到了传输反射镜末端区域的测试结果,如

图 5 所示。由图 5 可知,随着进气压力提升,Al₂O₃ 颗粒的去除效率提升,末端整体去除效率可达 94%,其中,>100 μm 粒径的 Al₂O₃ 颗粒的去除效率可达 99%。对于粒径范围为 25~50 μm 的 Al₂O₃ 颗粒,仍需采取措施进一步提升其去除效率,主要考虑增加吹扫次数和进一步提高进气压力。

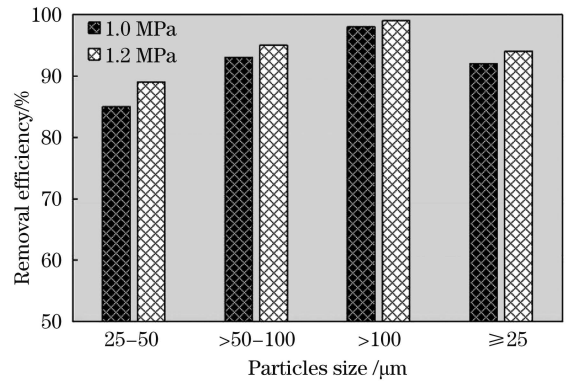


图 5 进气压力对 Al₂O₃ 颗粒物去除效率的影响
Fig. 5 Influence of inlet pressure on removal efficiency of Al₂O₃ particles

3.4 颗粒物种类与去除效率的关系

实验安排参阅表 2 中的实验号 4~6 和 9~11,实验结果如图 6 所示。可见,在两种进气压力下,颗粒物的去除效率呈现相同的规律,即:在三种类型的颗粒中,Al₂O₃ 颗粒(≥25 μm)的整体去除效率最高,而且在三种粒径范围内的去除效率也最高。此外,由图 6 还可以看出:不锈钢(SS)的去除效率较 Al₂O₃ 低,灰尘(dust)的去除效率最低。这主要是因为^[16]:1)不锈钢颗粒物的密度大,相较于 Al₂O₃ 颗粒更难去除;2)灰尘颗粒是神光实验大厅桁架上长年累月积累的,实验大厅历经多次洁净维护,故温湿度历经数次变化,灰尘颗粒的湿度相对较大(与网购 Al₂O₃ 粉末以及现场制备的不锈钢颗粒相比),与镜面之间的把持力增大,从而导致去除效率偏低。此外,搜集的灰尘中也包含了一部分纤维,这也会在一定程度上对实验结果产生影响。因此,后续采用烘干后的无纤维的灰尘颗粒进行进一步实验研究。

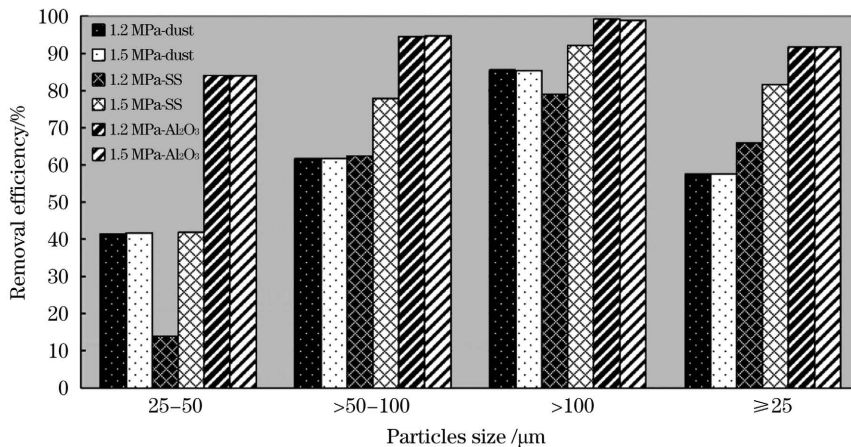


图 6 不同种类颗粒物的去除效率
Fig. 6 Removal efficiency of different types of particles

3.5 风刀吹扫次数对去除效率的影响

采用较难去除的灰尘和不锈钢颗粒为研究对象进行实验,实验安排参阅表 2 中的实验号 7 和 8。由图 7 可以看出,增加吹扫次数(至 4 次),颗粒物的去除效率基本不变。这主要是因为颗粒物的去除需要的外界作用力是有

一定阈值(本文简称为“去除阈值”)的,不同粒径和形状的颗粒物的去除阈值不同,第一次吹扫时产生的作用力超过部分颗粒物的去除阈值时,颗粒物被去除,随着吹扫次数增加,吹扫产生的作用力基本相同,因而第一次吹扫后剩下的高去除阈值颗粒物也不能被去除。

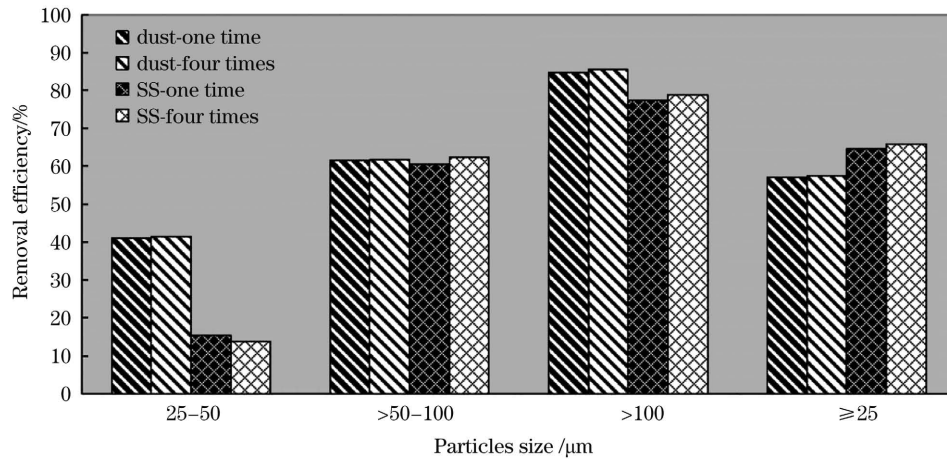


图 7 不同吹扫次数下颗粒物的去除效率

Fig. 7 Removal efficiency of particles under different purging times

3.6 进气压力和风刀出气口间隙对去除效率的影响

进气压力对去除效率影响的实验安排参阅表 2 中的实验号 12~14,实验结果如图 8 所示。当风刀出气口间隙为 0.05 mm 时,不锈钢颗粒的去除效率随着进气压力的提高而增大,当进气压力为 1.5 MPa 时,末端整体去除效率可达 82%。随着颗

粒物粒径的增加,去除效率也逐渐增加。当进气压力为 1.0 MPa 时,末端 25~50 μm 粒径范围内的不锈钢颗粒物的去除效率几乎为 0。这主要是因为此时反射镜末端的风速仅为 39.3 m/s(如图 9 所示),产生的吹扫作用力不足以克服颗粒物与反射镜表面的结合力。

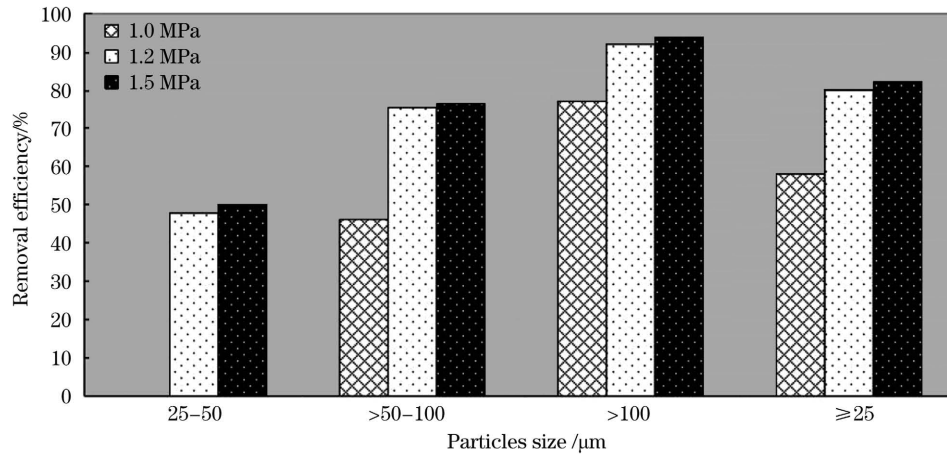


图 8 不同进气压力下不锈钢颗粒物的去除效率

Fig. 8 Removal efficiency of stainless steel particles under different inlet pressures

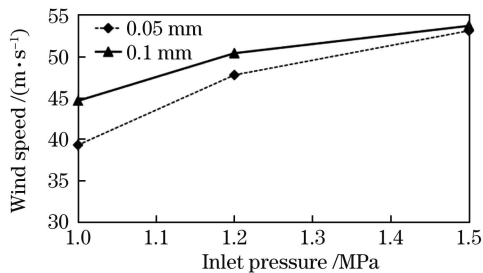


图 9 不同风刀出气口间隙下传输反射镜末端风速与进气压力的关系

Fig. 9 Relationship between wind speed at the end of transmission mirror and inlet pressur under different outlet gaps of air knife

风刀出气口间隙对去除效率影响的实验安排参阅表 2 中的实验号 10 和 14(风刀出气口间隙分别为 0.1 mm 和 0.05 mm,进气压力均为 1.5 MPa,风刀安装高度均为 4 mm),实验结果如图 10 所示。当风刀出气口间隙为 0.1 mm 和 0.05 mm 时,不锈钢颗粒物在 1.5 MPa 进气压力下的去除效率基本相同,分别为 81.5% 和 82%。这主要是因为当进气压力为 1.5 MPa 时,在两种风刀出气口间隙(0.1 mm 和 0.05 mm)下,传输反射镜末端的风速基本相同(如图 9 所示,分别为 53.1 m/s 和 53.7 m/s)。

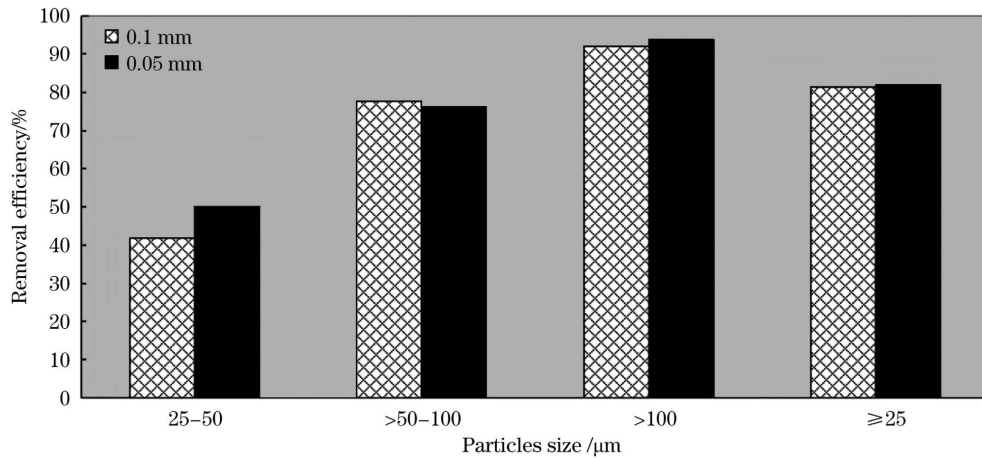


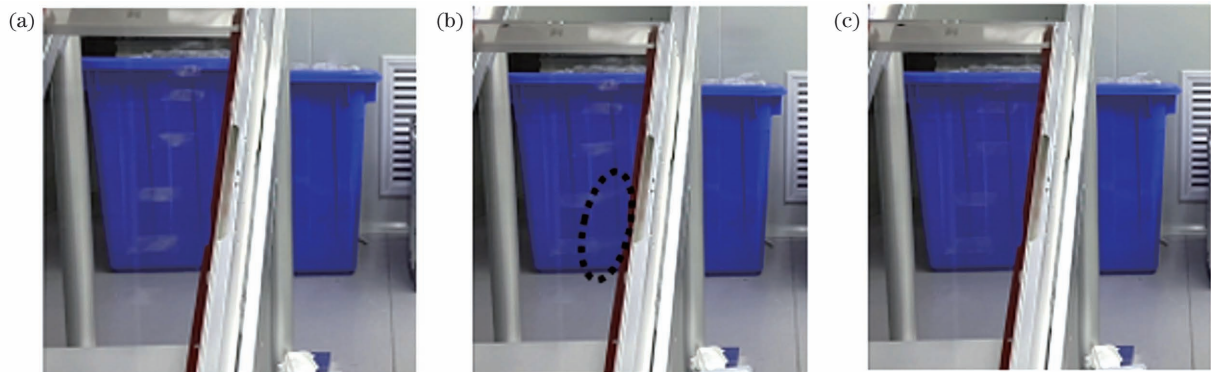
图 10 不同出气口间隙下不锈钢颗粒的去除效率

Fig. 10 Removal efficiency of stainless steel particles under different outlet gaps of air knife

3.7 颗粒物运动轨迹

本次实验记录了传输镜表面颗粒物在吹扫去除过程中的移动轨迹,实验参数为:进气压力 1.5 MPa,风刀出气口间隙 0.1 mm,风刀安装高度 4 mm。具体实验结果如图 11 所示。吹扫前,将 Al_2O_3 颗粒(白色)置于载玻片上,如图 11(a)所示;吹扫过程中,颗粒物沿着高速气流方向快速移动,形成拖尾,如图 11(b)所示

示,最终实现快速去除,如图 11(c)所示。可见,传输反射镜在密闭环境中进行风刀吹扫时,极易造成颗粒物碰壁反弹,进而折返,对传输镜表面造成二次污染。所以,在密闭环境中采用风刀吹扫法进行传输反射镜洁净控制时,有必要在传输反射镜末端添加颗粒物捕获装置^[4],或者增加密闭管道内壁与传输反射镜末端的距离(以减少二次污染物),或者增加风刀吹扫次数。

图 11 Al_2O_3 颗粒的吹扫去除过程。(a)吹扫前;(b)吹扫中;(c)吹扫后Fig. 11 Purging process of Al_2O_3 particles. (a) Before purging; (b) during purging; (c) after purging

4 结 论

通过实验研究了工艺参数对多种类型颗粒物去除效率的影响规律,并且在实验中捕捉到了颗粒物在去除过程中的运动轨迹。研究表明:风刀吹扫法是一种有效的实现传输反射镜表面洁净控制的方法;当风刀出气口间隙为 0.1 mm、进气压力为 1.5 MPa、风刀安装高度为 4 mm 时, Al_2O_3 、不锈钢以及灰尘颗粒物的去除效果较好;在低进气压力(≤ 1.2 MPa)下,增加吹扫次数并不能提高颗粒物的去除效率;颗粒物沿着气流吹扫方向快速水平移动。为了减小周围环境(如湿度等)对实验结果的影响,后续需要对灰尘样品进行干燥和提纯处理。最后,由于本实验是在开放式环境中进行的,所以后续有必要基于开放式环境下获得的不同类型颗粒物去除的较佳工艺参数,以及捕捉到的颗粒物的运动轨迹,在密闭环境中进行进一步研

究,采取主动控制措施,从根本上实现传输反射镜表面的洁净控制。

参 考 文 献

- [1] Li Y S, Wang B Y, Zhang P Z, et al. A novel cleanliness control method for disk amplifiers [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8: e45.
- [2] Consoli F, Tikhonchuk V T, Bardon M, et al. Laser produced electromagnetic pulses: generation, detection and mitigation[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8: e22.
- [3] Danson C N, Malcolm W, Barr J R M, et al. A history of high-power laser research and development in the United Kingdom [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9: e18.
- [4] Li Y S, Zhu J Q, Pang X Y, et al. Numerical simulation of debris-removal trajectories on the transport mirrors in high-power laser systems [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3: e5.
- [5] Gourdin W H, Dzenitis E G, Martin D A, et al. In-situ surface debris inspection and removal system for upward-facing transport mirrors of the National Ignition Facility [J].

- Proceedings of SPIE, 2005, 5647: 107-119.
- [6] Wang M C, Wang B X, Miao X X, et al. Status of cleanliness maintaining in target beam enclosures in SG III facilities and contamination sources analysis[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9280: 92800A.
- [7] 苗心向, 袁晓东, 吕海兵, 等. 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[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(3): 032033.
- Miao X X, Yuan X D, Lü H B, et al. Contamination in beam path and laser induced damage of optics in high power laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(3): 032033.
- [8] 李畅, 庞向阳, 孙明营, 等. 纳秒激光辐照铝合金诱致颗粒物产生规律[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402015.
- Li C, Pang X Y, Sun M Y, et al. Particles generation of aluminum alloy induced by nanosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402015.
- [9] 李养帅, 张军勇, 朱健强, 等. 激光冲击强化对纳秒激光辐照铝合金诱致污染物产生规律的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802010.
- Li Y S, Zhang J Y, Zhu J Q, et al. Effect of laser-shock processing on generation of contamination induced by nanosecond laser irradiation of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802010.
- [10] Stolz C J. Status of NIF mirror technologies for completion of the NIF facility[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7101: 710115.
- [11] Stolz C J, Qiu S R, Negres R A, et al. Transport mirror laser damage mitigation technologies on the National Ignition Facility [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10691: 106910W.
- [12] 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(12): 3215-3219.
- Zhao L B, Qin L, Zhou G R, et al. Method of online cleanliness control for upward-facing transport mirrors in integration test bed[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3215-3219.
- [13] 牛龙飞, 蒋一岚, 苗心向, 等. 大口径反射镜表面颗粒物洁净度控制实验研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12): 246-252.
- Niu L F, Jiang Y L, Miao X X, et al. Experimental study of particles cleanliness control on the surface of large-aperture reflector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(12): 246-252.
- [14] 李玉海, 白清顺, 卢礼华, 等. 大口径透镜模块的颗粒污染物吹扫机理及验证[J]. 光学精密工程, 2021, 29(4): 733-739.
- Li Y H, Bai Q S, Lu L H, et al. Flushing mechanism and verification of particulate contaminant from large-aperture lens module[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(4): 733-739.
- [15] 张志国. 光学元件表面的洁净风刀冲扫技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 8-30.
- Zhang Z G. Research on optical surface clean with air knife purge technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 8-30.
- [16] Li Y S. Cleanliness control technology of high power laser systems [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 1-7.
- 李养帅. 高功率激光装置的洁净控制技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 1-7.

Surface Cleanliness Control Technology of Transport Mirrors in Final Target System

Li Yangshuai, Zhang Yanfeng, Liu Zhigang, Zhou Shenlei, Sun Mingying, Zhu Jianqiang^{*}
*Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract

Objective Transport mirrors are critical components in the high-power laser device that connects the main amplification system and the shooting range. Achieving surface cleanliness control is imperative. Particles, particularly those dominated by organic matter, metals, and minerals, are the most important factors influencing the surface cleanliness of transport mirrors. Particles with sizes $>30\ \mu\text{m}$ are the primary cause of transport mirrors damage. Thus, they should be removed. Manual wiping and air knife purging are common methods for controlling the surface cleanliness of transport mirrors. The air knife purging method is used in many situations due to its high removal efficiency and stable purging effect, especially in a closed environment that is not easy to operate manually. The removal efficiency of the air knife purging method is highly dependent on various process parameters, including the air knife's air inlet pressure and the distance between the air knife outlet and the upper surface of the transmission mirror. Consequently, research on particle removal technology on the surface of transport mirrors based on wind knife purging is being conducted to reveal the influence law of working pressure, installation distance, purging time, purging times, and other factors on particle removal efficiency. The trajectory of particles in the purge removal process is studied and experimentally collected to reduce secondary pollution in the purge removal process. Finally, this research is critical for the final formulation of a low-risk and practical on-line particle cleaning control scheme for transport mirror surfaces.

Methods In this study, alumina, stainless steel, and dust particles were employed. Changing the air knife purging process parameters obtained the particle removal efficiency for each process parameter. Finally, the impact of each process parameter on removal efficiency was determined. Simultaneously, the trajectory of particles in the removal process was experimentally captured. The entire procedure was as follows. First, the transmission mirror's surface was divided into three sections: near, middle, and far ends. Each area had four measurement points that were densely packed with particles. The surface of the transmission mirror was then purged by adjusting process parameters such as air inlet

pressure, installation height, outlet gap, and air knife purging times; the number of particles after purging was then measured off-line under various process parameters. Finally, the impact of process parameters on particle removal efficiency was quantified by calculating the particle change rate before and after purging. Video recording and slow-motion pictures were used to obtain the moving trajectory of particles during the removal process.

Results and Discussions The closer to the air knife's outlet side, the greater the particle removal efficiency, and the larger the particle size, the greater the removal efficiency (Fig. 4). This is primarily because the closer to the air knife, the greater the wind speed. The mechanical model of particle removal method states that the smaller the particles, the greater the dynamic pressure required for removal, i. e., the greater the fluid velocity required. When the installation height of the air knife is 4 mm for Al_2O_3 , the removal effect is good. When the inlet pressure is 1.2 MPa, the transport mirror's overall removal efficiency exceeds 90%. If the inlet pressure is increased further, the removal efficiency improves even more (Fig. 5). Stainless steel particles have a lower removal efficiency than Al_2O_3 particles (Fig. 6), and humidity has a significant impact on dust removal efficiency. When the inlet pressure is less than a certain threshold, increasing the number of purging cycles has no effect on removal efficiency (Fig. 7). When the inlet pressure is 1.5 MPa, the air knife's two inlet gaps (0.05 and 0.1 mm) achieve the same removal effect (Fig. 10). This is primarily due to the fact that the wind speed obtained at the end of the transmission mirror surface is essentially the same (Fig. 9). Finally, during the removal process, the particles move horizontally and quickly along the air flow direction (Fig. 11).

Conclusions The effect of process parameters on the particle removal efficiency of various types of particles is investigated, and the particle movement track in the removal process is recorded. The results show that the air knife purging method is an effective way to control the surface cleanliness of transport mirrors. When the air knife outlet width is 0.1 mm, the inlet pressure is 1.5 MPa, and the air knife installation height is 4 mm, a high removal efficiency of Al_2O_3 , stainless steel, and dust particles can be obtained. Increased purging times cannot improve particle removal efficiency at low inlet pressures (≤ 1.2 MPa); the particles move rapidly and horizontally along the blowing direction of the air flow. Furthermore, the dust samples must be dried and purified to reduce the influence of the surrounding environment, such as humidity, on the experimental results. Obviously, this experiment is being conducted in an open environment. Consequently, more research in a controlled environment is required to fundamentally realize the surface cleanliness control of transport mirrors. For example, active control measures are implemented based on previously obtained good process parameters and particle trajectories.

Key words optical devices; transport mirror; cleanliness control; particle contamination; air knife