

# 高功率激光装置中传输镜表面颗粒物去除轨迹的数值模拟

李养帅<sup>1,2</sup> 朱健强<sup>1</sup> 庞向阳<sup>1</sup> 吴永忠<sup>1,2</sup> 焦翔<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 利用 Fluent 软件, 以 N-S 方程和 RNG  $\kappa-\varepsilon$  模型为基础, 采用离散相模型, 对风刀吹扫去除传输镜表面颗粒物污染物的流场, 以及吹扫去除过程中颗粒物的运动轨迹进行了模拟, 并基于模拟仿真结果搭建了颗粒物污染捕捉和收集的装置, 最终提高了传输镜表面污染物的清除效率和洁净度, 并且在一定程度上避免了吹扫过程中污染物颗粒进入周围环境以造成对其他光学元器件的污染。

**关键字** 激光技术; 高功率激光; 污染物去除轨迹; 数值模拟; 传输镜; 洁净度

中图分类号 O355; 0368

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102010

## Numerical Simulation of Debris Removal Trajectories on Transport Mirrors in High Power Laser System

Li Yangshuai<sup>1,2</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup> Pang Xiangyang<sup>1</sup> Wu Yongzhong<sup>1,2</sup> Jiao Xiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** By using N-S equations, RNG  $\kappa-\varepsilon$  model and discrete phase model of Euler-Lagrange method, numerical simulations on the removal trajectories of contaminant particles of different sizes and types on the mirror surface are conducted with the commercial software Fluent. Benefiting from the simulation results, a useful device which can capture and collect debris from the mirror surface online is built. Ultimately the efficiency of cleaning and cleanliness of transport mirrors are improved. And to some extent, the chances that contaminant particles go into the surrounding environment and further pollute other optical components are reduced.

**Key words** laser technique; high power laser; debris removal trajectory; numerical simulation; transport mirrors; cleanliness

**OCIS codes** 350.4990; 350.4600; 220.4880

## 1 引言

高功率激光装置是一种为惯性约束聚变和高能物理研究提供极高温度和压力条件的激光装置<sup>[1]</sup>。而传输镜是装置中引导光束从主放大器到靶室, 并且形成光路的最终关键环节<sup>[2]</sup>。目前这些传输镜在使用过程中需要承担的能量密度为数焦每平方厘米, 但是未来这些传输镜需要承担的能量密度为数十焦每平方厘

收稿日期: 2014-07-10; 收到修改稿日期: 2014-09-03

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究(2010DFB70490)

作者简介: 李养帅(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光学机械设计与制造工艺方面的研究。E-mail: yshli@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光器件设计, 光学精密机械设计与制造工艺等方面的研究。

E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

米,或者更高,在这种情况下,为防止传输镜表面破坏并延长传输镜的使用寿命,严格控制传输镜表面洁净度是很有必要的<sup>[3]</sup>。

目前传输镜表面中常见的污染物大都是自然降尘或者操作者操作过程中遗落的金属屑以及纤维<sup>[4-5]</sup>,常用的在线污染物去除方法有:无尘布擦拭和激光在线清洗<sup>[4,6]</sup>。针对手工擦拭时用力不均等因素常导致硬质污染物划伤传输镜表面以及激光在线清洗具有局限性的缺点,美国利弗莫尔国家实验室设计了一套适用于美国国家点火装置(NIF)装置的传输镜表面杂质在线去除系统<sup>[3,7-8]</sup>。该系统采用风刀产生的高速气流虽然能有效去除 10 μm 及其以上粒度的污染物,但是吹扫后的颗粒物重新返回了环境,易造成其他光学元件受到污染和传输镜表面的二次污染。所以,掌握吹扫过程中污染物的运动轨迹和实现吹扫过程中污染物的在线捕捉是很有必要的。本文对吹扫过程中高速气流的流场进行了模拟,并得到了污染物的运动轨迹,最终建立了污染在线去除和捕捉装置。

## 2 模型建立

计算流体动力学(CFD)是通过计算机数值计算和图像显示,对包含流体和热传导等相关物理现象的系统所做的分析进行数值模拟,是了解流场的重要手段,运用数值分析技术实现对流场基本物理量(如速度、压力、温度、浓度等)的分布以及流体轨迹的预测是现在流体研究的主流。

### 2.1 计算模型

由于要了解流场的情况及污染物颗粒的运动轨迹,采用二维模型能很好的满足这一点。模型包括:压力入口,压力出口和壁面边界等。为了简化模型,假设:1) 流体为稳态的、可压缩的氮气,入口压力稳定;2) 加载的固体颗粒为球体,同种固体颗粒的密度相同且表面光滑;3) 固体颗粒与壁面碰撞时能量没有损失,并且对称反射;4) 只考虑气体作用在固体颗粒上的稳态气动阻力和颗粒自身的重力,忽略 Basset 力和 Saffman 力对颗粒的影响。

二维模型是由商业软件 Gambit 2.4.6 完成的<sup>[9-10]</sup>,采用四边形结构网格划分,共划分 20798 个四边形单元,计算采用耦合隐式求解器,稳态计算方式,Courant Number 为 1,采用二阶迎风格式离散,湍流流动控制方程为 RNG  $\kappa-\varepsilon$  模型,气固两相流场的模拟计算采用离散相模型(DMP),收敛的准则是质量残差和能量残差小于  $10^{-5}$ 。

### 2.2 边界条件及其相关设置

如图 1 所示,当气体以  $\theta$  角度吹扫球形颗粒时,颗粒受到与  $x$  轴成  $\theta$  角的合力  $R$ ,沿  $x$  和  $y$  方向的分别为  $R\cos\theta$  和  $R\sin\theta$ 。 $R\cos\theta$  越大并且  $R\sin\theta$  越小,越有利于污染物颗粒的去除。当  $R$  沿  $x$  轴正方向时,即沿着  $x$  轴正方向吹扫时, $R\cos\theta$  达到最大, $R\sin\theta$  为 0,此时污染物颗粒最易清除。而高速气流经喷嘴喷出后的示意图如图 2 时,类似梯形分布,因其横截面上最大速度位于其中心线  $x$  轴上,所以当待吹扫表面刚好位于  $x$  轴线上时,颗粒物受力最大,最易被去除。所以为使传输镜表面与气流中心线接近或者重合,要选用合适的  $S$  值(风刀上表面与传输镜上表面,如图 3 所示)。此外,当吹扫方向沿  $x$  轴正方向时,气流速度越大, $R$  越大,则颗粒物越易被去除,所以风刀也要选用合适的压力,以获得合适的气流速度。如图 3 所示,气流经风刀吹出,沿着风刀弧形边缘流动,最后改变  $90^\circ$  进入传输镜上表面  $L$ ,然后沿着传输镜上表面  $L$  水平运动。经过一系列实验之后,发现当风刀采用 9 atm 的压力和  $S$  值取 3 mm 时,污染物颗粒除去效果较好,所以模型采用的压力为 9 atm,风刀上表面与传输镜上表面  $L$  的距离  $S$  为 3 mm。

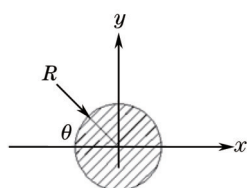


图 1 气体与球形颗粒间作用力

Fig.1 Interaction force between gas and spherical particle

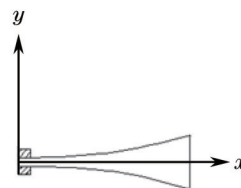


图 2 气流喷出示意图

Fig.2 Schematic diagram of spraying air

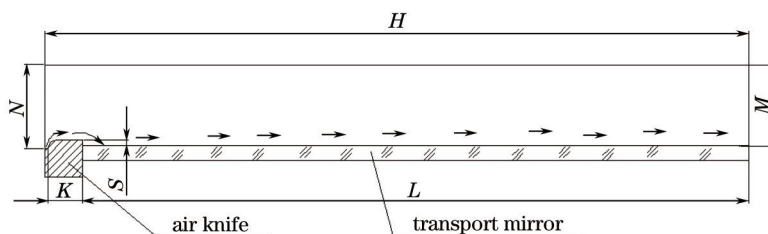


图3 风刀吹扫几何模型

Fig.3 Model of air knife blowing

如图3所示,  $M$ 、 $N$ 、 $S$ 、 $H$ 、 $K$ 、 $L$ 均为边界。风刀的出口为压力入口, Gauge Total Pressure 为 9 atm, Supersonic/Initial Gauge Total Pressure 为 7 atm, 温度为 300 K, 湍流能和耗散率采用默认值 1。

边界  $M$ 、 $H$  和  $N$  为压力出口边界,  $M=48$  mm,  $H=423.05$  mm,  $N=50$  mm, Gauge Total Pressure 为 1 atm, Supersonic/Initial Gauge Total Pressure 为 0 atm, 出口温度为 300 K, 湍流能和耗散率采用默认值 1。

其余边界为用默认参数的无滑移壁面边界, 其中  $K=21.05$  mm, 传输镜上表面  $L$  长度为 400 mm。

污染物颗粒选用 10  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ 、40  $\mu\text{m}$  和 80  $\mu\text{m}$  4 种粒度的灰尘、铝和不锈钢颗粒, 对应密度分别为: 1000  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 2700  $\text{kg}/\text{m}^3$  和 7930  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 均匀分布在传输镜表面。

### 2.3 控制方程

控制方程包括: 流体分析基本方程、湍流流动控制方程和颗粒运动方程<sup>[11-12]</sup>。其中流体分析基本方程包括: 质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。湍流流动控制方程, 采用标准的  $\kappa-\varepsilon$  模型的改进方案 RNG  $\kappa-\varepsilon$  模型。Fluent 中通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒的轨迹。

## 3 数值模拟结果和讨论

### 3.1 流场

结合图3和图4可知, 高速气流经风刀出口吹出, 最大速度可达 574 m/s, 沿风刀弧线边缘进入长度为 400 mm 的传输镜上表面  $L$ , 最终沿着传输镜表面水平流动, 并且速度递减(图3中箭头代表气流)。图5是传输镜边缘(即压力出口  $M$ )上的流体速度。由图5可知, 在距离靠近风刀侧传输镜边缘 400 mm 处的传输镜表面风速仍可达到 25 m/s, 沿着竖直  $y$  方向速度逐渐减小。

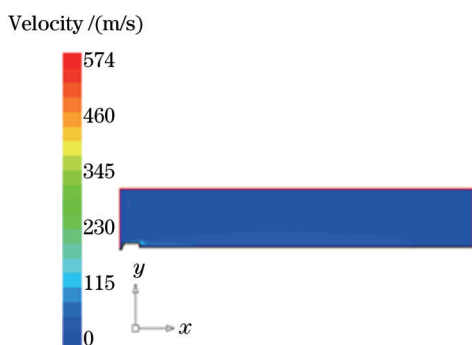


图4 气流模拟结果

Fig.4 Simulation result of flow

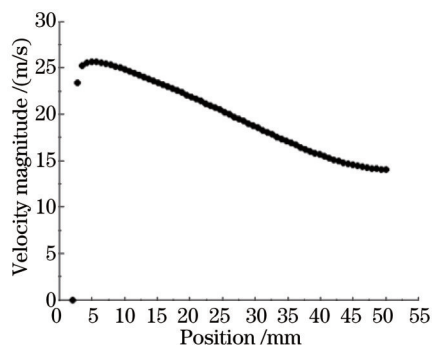


图5 压力出口  $M$  处  $y$  方向速度

Fig.5 Velocity of outlet  $M$  in direction of  $y$  axis

### 3.2 污染物颗粒运动轨迹

以灰尘颗粒为例, 4 种粒度灰尘颗粒沿传输镜表面各布置 200 个, 基于图3所示几何模型和 2.2 节所示边界条件及相关设置, 最终得到灰尘颗粒运动轨迹, 如图6所示, 每种颜色代表一个颗粒, 每条曲线代表一个颗粒的运动轨迹。

从图6可知: 1) 大部分 4 种粒度的灰尘颗粒(图6中黑色)在竖直方向的运动位移很小, 几乎是贴着镜面水平移动(因为传输镜上表面的  $Y$  值为 2 mm, 所以图中最小  $Y$  值为 2 mm), 只有 9 个颗粒的运动路径与其他灰尘

颗粒不同,这是因为在风刀吹扫过程中,传输镜上表面沿水平方向大部分区域静态压力大于等于标准大气压,而距离传输镜靠近风刀边缘0~6 mm范围区域除外,该区域为负压区(如图7所示),并且该区域刚好分布了标号为0~8的9个颗粒;2)9个颗粒的Y值随着路径的增大迅速增大到极大值,而后迅速减小,最后又增大,这是因为在风刀开启时该9个颗粒所在区域瞬间变成负压区,产生回旋涡流,带动颗粒瞬间产生运动,随着Y值的增大和颗粒向前运动,气动推力减弱,重力逐渐占主导,此时颗粒开始减速,而后速度变为0,此时Y值达到极大值,而后沿着Y轴负向移动,即Y值减小,涡流作用加强,当气动推力足以克服重力时,颗粒沿y轴负方向的运动速度逐渐减小直至变为0,而后反向沿着y轴正向运动,此时Y值逐渐变大;3)随着粒度的增大,9个颗粒中达到极大值而后Y值又下降,并且减小为0,这样的颗粒数目增多,这是因为在下降阶段,气动推力的增大,不足以克服由于颗粒粒度增大而导致的重力增大,颗粒最终与玻璃表面发生弹性碰撞,进而反射出去;4)4种粒度下,Y的最大值为21.13 mm,此时灰尘粒度为80 μm。

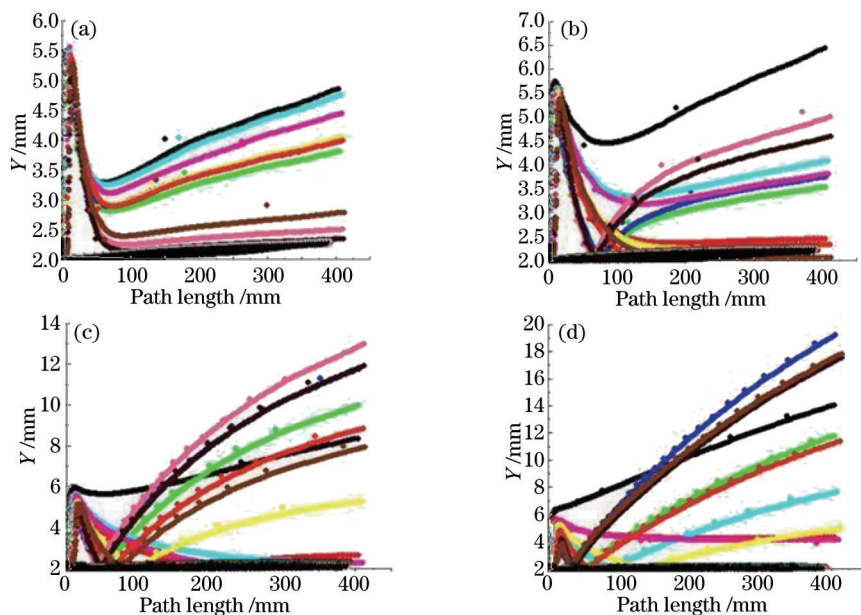


图6 4种粒度下的灰尘运动轨迹曲线。(a)、(b)、(c)和(d)对应的颗粒粒度分别为10 μm、20 μm、40 μm和80 μm  
Fig.6 Trajectories of dust particles in four sizes. Sizes of dust particles in (a), (b), (c) and (d) are corresponding to

10 μm, 20 μm, 40 μm and 80 μm, respectively

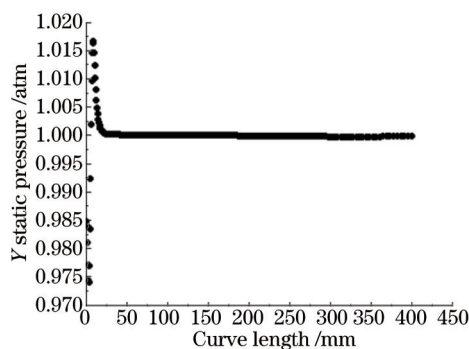


图7 传输镜表面静压曲线

Fig.7 Hydrostatic curve on transport mirror surface

对4种粒度的铝和不锈钢颗粒模拟分析,同样发现:1)大部分4种粒度的铝和不锈钢颗粒在竖直y方向的运动位移均很小,几乎是贴着镜面水平移动,只有9个颗粒的运动路径与其他灰尘颗粒不同;2)9个颗粒中Y值随着路径的增大迅速增大到极大值,而后迅速减小,最后又增大;3)随着铝和不锈钢颗粒粒度的增大,9个颗粒中达到极大值而后Y值又下降,并且减小为0,这样的颗粒数目增大;4)4种粒度下铝和不锈钢颗粒的Y值的最大值分别为25.73 mm和25.74 mm,并且取得最大值时对应的粒度均为80 μm。

对比4种粒度下灰尘、铝以及不锈钢颗粒的Y值最大值可以发现,同种粒度下,随着颗粒密度的增大,Y的最大值也越大,如图8所示。因为密度大的颗粒在传输镜碰撞时的入射角(碰撞入射方向与传输镜法线夹角)较小,进而以较小的反射角(碰撞反射方向与传输镜法线夹角)反射出去,因而Y值也就较大。

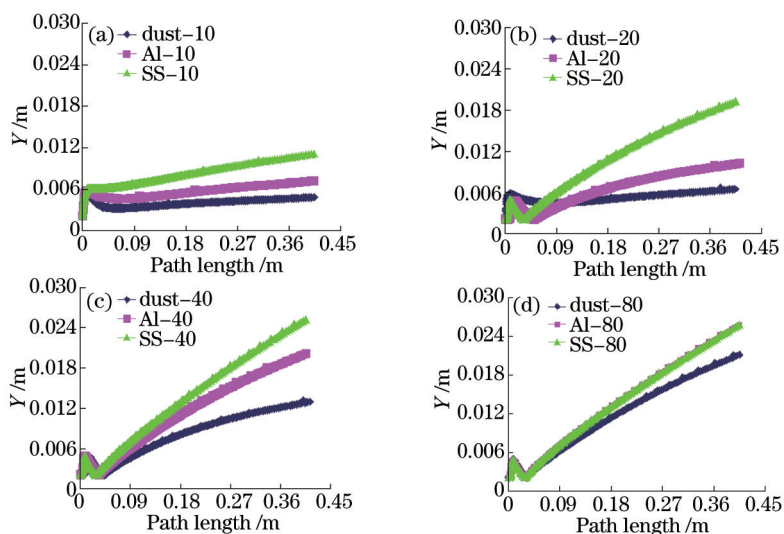


图8 三种颗粒、4种粒度下对应的Y值最大值。(a)、(b)、(c)和(d)中三种颗粒对应的粒度分别为10 μm、20 μm、40 μm和80 μm  
Fig.8 Maximum Y values of three types of particles in four sizes. Sizes of the three types of particles in (a), (b), (c) and (d) are corresponding to 10 μm, 20 μm, 40 μm and 80 μm, respectively

#### 4 传输镜表面污染物吹扫去除和捕捉收集装置及模型的验证

结合以上4种粒度、三种不同类型颗粒运动轨迹的模拟结果,设计了一套用于污染物颗粒捕捉和收集的污染物去除装置(图9)。由于传输镜表面最主要的污染物是灰尘,所以以25~50 μm和50~100 μm范围内灰尘颗粒物为例,对装置进行了性能测试和运用该装置对颗粒轨迹模拟结果进行了验证。

采用尺寸为300 mm×400 mm普通玻璃替代传输镜,为便于显微镜测定灰尘颗粒数,由四块尺寸为150 mm×200 mm的玻璃组成,设置4×4个直径为10 mm的圆形测量区域,测量区域的定位中心位于传输镜待测面的相反面,以“+”表示,其分布如图10所示,为减小实验误差,采用16个测量区域污染物颗粒数的总数代表传输镜表面的颗粒数。另在1#传输镜的前、后、左、右各布置一块相同的但无灰尘颗粒的传输镜,用于吹扫过程中灰尘颗粒走向的监测与判断。采用的风刀是一种商业风刀,上表面与传输镜上表面距离S为3 mm(如图3所示),进气口压力为9 atm。污染物捕捉和收集装置是由集尘罩与一吸尘器相连组成。对比研究了采用污染物捕捉和收集装置采用与否两种情况下传输镜表面灰尘颗粒数的前后变化情况。实验在洁净度等级为千级的超净环境中进行。吹扫前后实验结果如表1所示。

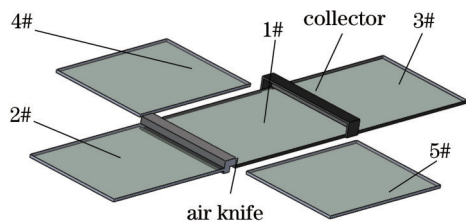


图9 装置及模型验证示意图。1#~5#为传输镜  
Fig.9 Layout of device and model verification. 1#~5# are transport mirrors

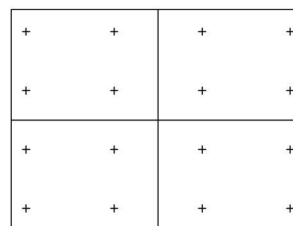


图10 传输镜试样  
Fig.10 Sample of transport mirror

在无污染物捕捉和收集装置时,吹扫后,1#传输镜表面25~50 μm和50~100 μm两种粒度范围内灰尘颗粒数分别由612和632减少为97和55,即分别减少84%和91%,即灰尘颗粒去除效率为84%和91%,说明风刀可以很好的除去传输镜表面污染物,而此时有12%和4%的两种粒度范围内的灰尘颗粒落在2#、3#、4#和5#传输镜表面,即1#传输镜表面的污染物颗粒在吹扫的过程很大部分转移到了周围环境中。

表1 吹扫前后颗粒数

Table 1 Number of particles before and after blowing

No. of the mirrors	Size of the particles/ $\mu\text{m}$	Not using debris collector		Using debris collector	
		Number of particles before blowing	Number of particles after blowing	Number of particles before blowing	Number of particles after blowing
1#	25 ~ 50	612	97	495	79
	50 ~ 100	632	55	668	43
2#	25 ~ 50	0	12	0	15
	50 ~ 100	0	7	0	4
3#	25 ~ 50	0	20	0	15
	50 ~ 100	0	8	0	2
4#	25 ~ 50	0	15	0	9
	50 ~ 100	0	4	0	2
5#	25 ~ 50	0	29	0	6
	50 ~ 100	0	9	0	2

在采用污染物颗粒收集装置时,风刀吹扫后,1# 传输镜表面 25~50  $\mu\text{m}$  和 50~100  $\mu\text{m}$  两种粒度范围内的灰尘颗粒数分别由 495 和 668 减少为 79 和 43,即分别减少 84% 和 94%,即污染去除效率为 84% 和 94%,高于无颗粒收集装置时的 84% 和 91%,说明采用污染物捕捉和收集装置可以提高传输镜表面污染物的去除效率。此时有 9% 和 1% 的两种粒度范围内的灰尘颗粒落在 2#、3#、4# 和 5# 传输镜表面,低于不采用污染物收集装置时的 12% 和 4%,说明颗粒收集装置可以收集颗粒污染物,减少颗粒转移到周围环境中的几率,同时也在一定程度也验证污染物颗粒轨迹模拟结果的正确性。

## 5 结 论

利用软件 Fluent 对高功率激光装置中采用风刀吹扫去除传输镜表面污染物的流场进行了模拟,得到了在吹扫过程中不同粒度和不同类型污染物颗粒在传输镜表面的运动轨迹,并基于模拟仿真结果搭建了传输镜表面污染物吹扫去除和捕捉收集的装置,在一定程度上实现了吹扫过程中灰尘的有效捕捉,避免其进入环境和污染其他光学元器件等,缩短了清扫时间,保证了高功率激光装置中传输镜表面的清洁度。只涉及了水平放置的传输镜,而在实际应用中很多传输镜是非水平放置的,所以仍有一些工作需要进一步进行,同时污染物捕捉和收集装置的集尘罩有待进一步优化设计,从而更好的捕捉吹扫过程中的污染物颗粒,并且进一步验证污染物颗粒轨迹模拟结果的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 Li Hong, Wang Dongfang, Zou Wei, *et al.*. Design of high power laser beam automatic alignment system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002003.  
李 红, 王东方, 邹 伟, 等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002003.
- 2 Mary A Norton, Christopher J Stolz, Eugene E Donohue, *et al.*. Impact of contaminants on the laser damage threshold of 1 $\omega$  HR coatings[C]. SPIE, 2005, 5991: 599100.
- 3 W H Gourdin, E Dzenitis, D Martin, *et al.*. In-situ surface debris inspection and removal system for upward-facing transport mirrors of the National Ignition Facility[C]. SPIE, 2004, 5647: 1-13.
- 4 Baoxu Wang, Meicong Wang, Mingzhi Zhu, *et al.*. Optical surface cleanliness inspection, degradation and maintaining in high power laser system[J]. Advanced Materials Research, 2013, 765-767: 2288-2293.
- 5 Yin Xianhua, Zhuang Yifei, Zhang Yan, *et al.*. Research on the characteristics of the optical element damage caused by surface pollution[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s102006.  
尹宪华, 庄亦飞, 张 燕, 等. 关于表面污染物对光学元件损伤特性的实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s102006.
- 6 Ye Yayun, Qi Yang, Qin Lang, *et al.*. Laser cleaning of contaminations on the surface of stone relics[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0903005.

- 叶亚云, 齐 扬, 秦 朗, 等. 激光清洗石质文物表面污染物[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903005.
- 7 Christopher J Stolz. The national ignition facility: the world's largest optical system[C]. SPIE, 2007, 6834: 683402.
- 8 C J Stolz. Status of NIF mirror technologies for completion of the NIF facility[C]. SPIE, 2008, 7101: 710115.
- 9 Wang Ruijin, Zhang Kai, Wang Gang. The Base and Application Examples of Fluent Technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. 53-54.
- 王瑞金, 张 凯, 王 刚. Fluent技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 53-54.
- 10 Han Zhazhong. Fluent—Simulation Examples and Analysis of Fluid Engineering[M]. Beijing: Beijing Institute of Press, 2009. 31-43.
- 韩占忠. Fluent—流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009. 31-43.
- 11 Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis—CFD Software Principles and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 7-12, 124.
- 王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004, 7-12, 124.
- 12 Li Lei. Experimental Research on the Characteristics of Oil Mist Particle during Transmission[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012. 36.
- 李 垒. 传输过程中油雾颗粒行为的实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012. 36.

栏目编辑: 韩 峰