天文望远镜反射镜面的飞秒激光清洁

劳召欣, 李家文*, 胡衍雷*, 李国强, 张晨初, 吴东, 褚家如, 黄文浩

中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: jwl@ustc.edu.cn; huyl@ustc.edu.cn

2015-09-05 收稿, 2015-10-28 修回, 2015-12-01 接受, 2016-01-18 网络版发表

中国科学院天文光学技术重点实验室开放课题(CAS-KLAOT-KF201505)资助

摘要 金属镜面反射镜是反射式天文望远镜中成像系统的核心部件, 反射镜定期清洗是天文望远镜维护中的一项重要工作。目前采用的干冰人工清洗方法工序繁杂, 成本较高, 还需要定期使用清洁剂和清洁布擦拭的方法去除难以清洗的污染物, 容易损伤镜面。针对以上缺点, 本文利用放大级飞秒脉冲激光器, 对天文望远镜中反射表面上黏附的微米级灰尘颗粒进行了清洁研究。首先研究了飞秒激光与反射铝镜的作用规律, 通过调节激光能量密度, 对清洗后的铝镜表面形貌进行观测, 得出实验用铝镜的飞秒激光损伤阈值为 60 mJ/cm^2 。通过改变激光能量等扫描参数, 对清洁前后的铝镜镜面附着物进行分析, 得到最优的清洁参数。结果表明, 当激光能量密度为 $30\sim 55 \text{ mJ/cm}^2$ 时, 飞秒激光对微米级灰尘颗粒有良好的清洁效果。在可见光范围内, 清洁后的反射镜镜面反射率获得了明显的提升。最后, 通过对灰尘颗粒及铝镜基底的能谱分析, 对飞秒激光的清洁机理进行了讨论, 在灰尘颗粒的激光清洁中热膨胀因素占据主导作用。飞秒激光清洁在天文望远镜的清洁领域有着良好的应用前景。

关键词 飞秒激光, 天文望远镜, 激光清洁, 金属反射镜

激光清洁技术是基于由高强度的激光束与污染物、基底之间的相互作用所导致的物理化学反应。作为一种有效的清洁手段, 激光清洁已经被成功应用于模具、武器装备、飞机旧漆蒙皮、楼宇外墙、电子工业、精密机械工业的精确去酯、核电站反应堆内管道的清洁等领域。目前的激光清洁的研究对象主要集中在文物^[1]、金属镜面2个方面, 例如应用于国际热核聚变实验堆(ITER)检测系统中的金属镜面^[2]。瑞士巴塞尔大学Wisse等人^[3]在真空中对金属镜面上的核聚变沉积层进行了一系列的清洗实验, 结果表明激光清洁可以有效去除金属镜面上的聚变沉积层。大连理工大学Hai等人^[4]对托卡马克核聚变装置环流器二号(HL-2A)金属反射镜上的钴沉积层进行清洗, 可以使 $600\sim 1000 \text{ nm}$ 波段的反射率恢复到80%。中国工程研究院苗心向等人^[5]使用紫外激光对强激光装置

中的光学元件进行清洗处理, 通过对微观形貌和通光口径的分析, 发现紫外激光清洗在安全性和适用性上均优于化学刻蚀清洗方法。由于飞秒激光与目标物质作用时间极短, 小于金属晶格的热传导时间, 能将能量集中在极小的时间尺度上, 对加工目标作用区域外造成额外损伤的可能性大大降低。近年来, 飞秒激光在激光清洁领域的应用得到了多国研究者的关注。2012年, 韩国Park等人^[6]使用飞秒激光诱导产生等离子体对硅片上的纳米颗粒进行了清洗实验, 在不对硅片产生损伤的情况下清洗效率可以达到98%。2013年, 西班牙Rivas等人^[7]在清洗建筑用花岗岩上的有机污染层时, 发现飞秒激光有着比纳秒激光更高的去除效率。德国Bonse等人^[8]使用中心波长 790 nm , 脉宽 30 fs 的激光器去除硅片上的氮化硅层, 同样取得了良好的效果。

引用格式: 劳召欣, 李家文, 胡衍雷, 等. 天文望远镜反射镜面的飞秒激光清洁. 科学通报, 2016, 61: 622–629

Lao Z X, Li J W, Hu Y L, et al. Femtosecond laser cleaning the surface of reflective mirror in telescope (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 622–629, doi: 10.1360/N972015-01012

天文望远镜工作在野外大气环境中,其反射镜表面常被灰尘、鸟粪等污染,从而影响天文观测的成像质量.目前大型天文望远镜金属镜面的清洗多采用干冰清洁方式,清洗原理是利用固体干冰颗粒高速运动产生的冲击力,结合干冰本身极低温使污秽龟裂以及升华所产生的膨胀,来实现物体表面污染物的去除.此方法优点是对镜面浮灰的清洗效果很好,对镜面损伤很小,能使降低到80%~90%的反射率得到3%左右的提升.但由于人工清洁方式操作复杂,清洁成本费用高,而且不易清除长时间积存的灰尘和鸟粪等物质,还需要定期用水和清洁剂对镜子表面进行擦拭清洗,很容易损伤镜面.

本文尝试使用飞秒激光清洗天文望远镜金属反射镜镜面黏附的微米级灰尘颗粒,旨在探索一种简便、易实现自动化操作的天文望远镜清洗方法.通过实验得到了天文望远镜所用铝镜的激光损伤阈值和清洗微米级灰尘颗粒的激光能量阈值,研究了激光能量密度等参数对清洗效果的影响,并通过电镜能谱分析对灰尘去除机制作出了探讨.

1 实验

实验装置如图1所示,激光器为美国Coherent公

司的Legend Elite激光器,其中心波长800 nm,脉宽120 fs,重复频率为1 kHz.光束经过1个光阑和光闸后,由半波片和偏振片调节能量,再经过提升镜之后到达高速扫描振镜.通过偏振片和半波片的配合调节能量,实验中的能量测量使用Coherent(FM10)功率计在半波片后测量.扫描振镜的聚焦透镜焦距为63 mm,进入透镜的光束直径为10 mm,焦点直径约22 μm .由于焦点处能量密度过大,因此本实验采用离焦方式,即样品放置在焦点下方2 mm处,样品上光斑的实际直径为200 μm .实验所用反射镜样品由南京天文光学研究所提供,反射面为玻璃上镀厚度200 nm的铝层.样品放置在室外进行污染1周,对表面黏附的灰尘颗粒进行清洁实验.对污染物进行电子能谱分析,以测定污染物成分,对清洗后的样品使用图像处理技术分析样品污染物颗粒的变化情况.实验中扫描振镜的扫描间隔设置为22 μm ,采用一次扫描清洗的方式,扫描速度设置为20 mm/s.

2 结果与讨论

选择合适的激光能量是进行激光清洁的前提条件,为了在保证金属反射镜没有表面损伤的情况下有效去除污染物,首先要找出所用样品的激光损伤

图 1 (网络版彩色)(a) 实验装置图. (b) 样品处光束示意图. 扫描振镜焦点处的能量过强, 因此实验采用离焦方式. 通过调节离焦量(ΔZ)控制样品上光斑大小. (c) 铝镜样品清洗前和清洗后的光学显微镜图片

Figure 1 (Color online) (a) The setup of experiment. (b) Magnified sketch of local beam close to the sample. A defocus scheme was taken because the energy of focus is too large. And, the size of spot on the sample was adjusted by regulating the defocusing amount (ΔZ). (c) The optical image of polluted sample and cleaned sample

阈值. 实验中发现黏附灰尘颗粒的铝镜损伤阈值降低现象. 未经污染铝镜的激光损伤阈值为71 mJ/cm²左右, 而污染后的铝镜损伤阈值则降到了58 mJ/cm²左右. 如图2所示, 未污染样品在用68 mJ/cm²的能量密度进行清洗时, 反射镜面保持完好; 用60 mJ/cm²清洗污染样品时, 灰尘颗粒周围出现明显缺陷, 而没有黏附灰尘颗粒的位置则保持完好, 符合文献[9]中近场增强效应的分析模型.

因此选择30~55 mJ/cm²的能量密度进行清洗实验, 图3为清洗区域和相邻的污染区域的SEM图. 图3显示污染物颗粒直径从几百纳米到几十微米. 清洗后区域的放大图表明污染物颗粒被去除, 同时镜子反射面保持完好. 由于污染相对均匀, 因此在进行清洗结果分析时, 可以将相邻的未清洗区域的灰尘颗粒分布状况作为清洗区域清洗前的分布.

对清洗后的样品进行光学显微观察, 然后通过图像处理的方法进行分析, 得到的一系列清洗结果

图2 激光清洗区域的扫描电子显微镜(SEM)图. (a) 未污染样品; (b) 污染样品

Figure 2 SEM images of cleaning area. (a) Non-polluted sample; (b) polluted sample

图3 激光清洗前/后的反射镜SEM图. (a), (b) 污染区域; (c), (d) 用52 mJ/cm²能量密度清洗后的区域

Figure 3 SEM images of adjacent polluted and cleaned area. (a), (b) Polluted area; (c), (d) cleaned area with energy density 52 mJ/cm²

如图4所示. 图4(a)~(d)为光学显微镜图片, 图中黑色虚线左侧为污染区域, 右侧为清洗区域. 按照直径大小将灰尘颗粒分为<5, 5~10, 10~20和>20 μm 4种, 在对应的图4(a)~(d)中选取相同大小的区域, 进行灰尘颗粒数目统计, 结果如图4(e)~(h)所示.

为了表示清洗效果, 定义了清洗效率 P . 某污染区域内的灰尘颗粒数目为 A , 相同面积的相邻清洗区域内灰尘颗粒数目为 B , 则清洗效率 P 用式(1)表示:

$$P = \frac{A - B}{A} 100\%. \quad (1)$$

使用不同能量密度进行清洗时, 对不同直径大小灰尘颗粒的清洗效率如表1所示.

从图4中颗粒物数目的统计来看, 由于>20 μm的污染物数目非常少(<5 μm颗粒数目的1%), 统计结果会表现出一定随机性, 因此在讨论表1的清洗效率变化时, 仅讨论直径<20 μm灰尘颗粒数目的变化. 如表1所示, 当颗粒物直径小于20 μm时, 总体来看, 在同一能量下, 清洗效果表现出污染物直径越大, 清洗效率越高的趋势.

天文望远镜镜面清洗的主要目的是为了恢复金属反射镜的光学反射性能. 为了测量激光清洗对反射镜性能的影响, 搭建了简易的测量装置, 如图5(a)所示. 测量装置由一个可以连续调节光源波长的扫描光源和用于搜集反射/散射光线的能量计组成. 在实际测量中光源和能量计都处在样品上方接近垂直的位置, 图5为了便于作图和理解增大了二者的夹角. 图5(b)对试验样品在400~800 nm波段范围的反射性能进行了测量. 左侧的纵轴表示搜集到的归一化后的相对光强. 结果表明, 经过1周污染后样品的反射性能有明显下降. 右侧纵轴表示以未污染的镜子反射光强为基准, 经过清洗后的样品反射率恢复. 从图5可以看出, 反射率在400~500 nm波段提升较高, 而在500~800 nm波段只有2%左右的提升, 略低于干冰清洗3%的反射率提升. 经过清洗后的铝镜反射性能有所提升, 但并不明显, 这是因为测量时能量计搜集的所有光强中包含了一部分颗粒的散射光. 如图5(a)所示, 光源发出的光经未污染样品反射后, 绝大部分都被能量计搜集, 测得反射光线能量为 P_1 . 而对于污染后的样品, 由于反射镜表面黏附了较多的灰尘, 因此光源发出的光有一部分被灰尘散射, 有一部分散射的光线同样会被能量计搜集, 此时能量计测得的能量即是反射光线能量 P_2 与部分散射光线的总能量.

图4 不同能量密度清洗后反射镜表面的光学图片。(a)~(d) 光学显微镜图片, 虚线左侧为污染区域, 右侧为清洗区域。清洗能量依次为 40 (a), 45 (b), 50 (c), 55 mJ/cm² (d)。(e)~(h) 清洗前后不同直径大小的灰尘颗粒数目

Figure 4 Optical images of cleaned mirror with different cleaning energy. (a)~(d) The area in the left of the dashed are polluted, and the right are cleaned with energy density 40 (a), 45 (b), 50 (c), and 55 mJ/cm² (d). (e)~(h) Corresponding number of dust particles with different diameter before and after cleaning

同样, 对于清洗后的样品, 能量计所测得的能量为样品清洗后反射光线 P_3 和部分散射光线(S_i)的总能量。

污染样品中的灰尘颗粒明显多于清洁后的样品, 因此污染样品所测总能量中的散射光线能量大于清洁

表1 不同能量密度下,不同直径灰尘颗粒的清洗效率 $P(\%)$ Table 1 Cleaning efficiency ($P, \%$) of different dust particles diameter with different energy density

能量 (mJ/cm ²)	颗粒直径 (μm)			
	<5	5~10	10~20	>20
40	43.5	60.8	84.2	100
45	65.2	79.6	53.7	66.7
50	68.5	79.1	82.2	66.7
55	74.9	81.8	93.2	80.0

后的样品. 由于测得的总能量 $P_2+S_2+S_3>P_3+S_6$, 据此可以推测, 对反射镜面的实际清洗效果要略好于图线所表示的结果.

为了进一步研究清洗样品反射率变化的原因, 使用波长为532 nm的激光器作为测试光源, 在不同的激光入射角度下测量了样品对激光的反射作用, 得到的结果如图5(c)所示. 横轴表示测试激光的入射

角度; 左侧纵轴表示功率计收集到的光强, 右侧纵轴为归一化后的反射率. 在各测量角度下, 经激光清洗后样品的反射光强均高于污染样品. 为了排除测量时光源强度变化及测量角度变化对结果的影响, 以各角度下未污染样品反射的光强为基准, 对污染样品和清洗后样品反射的光强作了归一化处理(图5中红色、蓝色虚线). 污染样品经激光清洗后, 反射率有比较明显的提升. 与此同时, 反射率随着测量角度的改变有轻微的变化, 说明样品上污染颗粒的散射对测量结果有轻微影响.

目前激光干式清洗微米级颗粒的机理主要有3种^[10]: (1) 热膨胀理论, 即激光的能量被材料吸收, 造成附着颗粒和基底的短时膨胀, 使得黏附的颗粒受到1个瞬时冲击力. 颗粒受到瞬时作用力的作用脱离基底, 基底材料在瞬时膨胀后在很短的时间内恢复, 从而保证在去除污染物的同时不对基底材料造

图5 (a) 反射率测量装置示意图. (b) 反射率测量结果. 红色、黑色、绿色曲线分别表示未污染、污染和清洗后的样品反射光强, 蓝色表示相对未污染样品的反射率变化. (c) 532 nm的激光作为测试光源, 在不同入射角度下, 样品反射的光强及归一化的反射率

Figure 5 (a) The schematic of device to measure the reflectivity. (b) The reflectivity change. The red, black, green curves represent the reflected light intensity of non-pollution, contamination and cleaned sample respectively. The blue curve indicates the change of reflectance with respect to the non-pollution sample. (c) The relationship between the angle of laser, whose wavelength is 532 nm, and the reflected power of sample

成损伤; (2) 热消融理论, 即激光的能量被材料吸收后, 污染物直接灼烧或气化^[2~4]. 该机制要求基底材料与污染物对所使用的光源吸收系数相差明显, 同时基底材料的熔点要高于污染物, 否则很可能损伤基底; (3) 其他理论, 如光压^[10]和表面等离子体作用^[6], 这些模型主要是为了解释激光清洁中纳米级颗粒的去除; 但这些理论由于作用力较小, 很难有效解释实验中微米级颗粒的去除规律. 本实验主要研究小于20 μm尺度的微米级颗粒的去除, 因此主要讨论热膨胀和热消融理论的影响.

图6是对样品进行的电子能谱分析. 取样点分别为SEM图的箭头所示处, 从能谱图可以看出, 灰尘颗粒的成分为氧和硅, 由此推测灰尘颗粒的成分主要为二氧化硅. 由于二氧化硅的熔点为1670℃, 远高于铝的熔点(670℃), 且本实验采用离焦的方法, 灰尘颗粒大小从几微米到几十微米, 激光脉冲的能量不会再集中于灰尘颗粒中. 在激光清洁区域的灰尘颗粒被去除, 而铝镜表面保持完好, 因此排除了热消

融机制占主导作用的可能.

从表1可以看出, 在去除直径小于20 μm的3种颗粒污染物时, 表现出同一能量密度下, 颗粒直径越大, 清洗效率越高的趋势; 这是因为激光清洁主要是克服微粒与铝镜表面的范德华力^[11]. 对于半径为 R 的球形颗粒与无限厚的厚板, 二者间的范德华力 F 由式(2)决定^[12],

$$F = \frac{A_{132}R}{12H^2}, \quad (2)$$

其中, H 是颗粒与基体之间的距离, A_{132} 是污染颗粒1与基底(铝镜)2在介质(空气)3中相互作用的Hamaker常数. 由于颗粒黏附在铝镜表面, 因此 $H=R$, 式(2)可简化为

$$F = \frac{A_{132}}{12R}, \quad (3)$$

即清洁灰尘颗粒需要克服的范德华力 F 与颗粒半径成反比, 从而可以推测在灰尘颗粒的清除中, 热膨胀机理占据了主导作用.

3 结论

本文使用飞秒激光对黏附在铝镜表面的微米级灰尘颗粒进行了清洁实验, 取得了良好的清洁效果. 实验中得到的铝镜飞秒激光损伤阈值为60 mJ/cm², 在能量密度为55 mJ/cm²时清洁效果良好, 单次清洗对5 μm以下的灰尘颗粒清洁效果即可以达到75%; 对5~10 μm的颗粒清洁效果可以达到80%以上. 灰尘颗粒直径在20 μm以下时, 表现出在同一能量下灰尘颗粒越大, 清洗效果越好的趋势. 在使用50 mJ/cm²的能量密度对铝镜进行清洁时, 可以使可见光波段的反射率得到2%左右的提升, 与干冰清洁的效果相当.

目前使用飞秒激光对金属反射镜进行清洁的主要限制是清洗效率较低, 可以通过搭建大行程的三维运动台带动清洁光束来解决. 实验中的清洁面积较小, 因此不必考虑灰尘颗粒被弹离铝镜表面后落回镜面出现二次污染的情况, 但后期进行大面积清洗时, 需要增加负压吸附装置, 使脱离镜面的污染物被及时收集. 激光清洁可以作为天文望远镜金属反射镜面的一种操作方便可自动化程度高的清洁手段.

图6 清洗后灰尘颗粒的电子能谱分析图

Figure 6 The electron energy spectrum analysis diagram of dust particles in the cleaned area

致谢 感谢中国科学院南京天文光学研究所张勇研究员为实验提供样品.

参考文献

- 1 Siano S, Agresti J, Cacciari I, et al. Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: State of the art and new insights on the use of the Nd:YAG lasers. *Appl Phys A*, 2012, 106: 419–446
- 2 Amol S, Ambar C, Mohammed H M, et al. Cleaning of carbon layer from the gold films using a pulsed Nd:YAG laser. *Appl Surf Sci*, 2013, 283: 612–616
- 3 Wisse M, Marot L, Eren B, et al. Laser damage thresholds of ITER mirror materials and first results on *in situ* laser cleaning of stainless steel mirrors. *Fusion Eng Des*, 2013, 88: 388–399
- 4 Hai R, Xiao Q, Zhang L, et al. Characterization and removal of co-deposition on the first mirror of HL-2A by excimer laser cleaning. *J Nuclear Mater*, 2013, 436: 118–122
- 5 Miao X X, Cheng X F, Wang H B, et al. Experiment oil cleaning side of large-aperture optics in high power laser system (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2013, 45: 890–894 [苗心向, 程晓锋, 王洪彬, 等. 高功率激光装置大口径光学元件侧面清洗实验. *强激光与粒子束*, 2013, 454: 890–894]
- 6 Park J K, Yoon J W, Cho S H. Removal of nanoparticles from a silicon wafer using plasma shockwaves excited with a femtosecond laser. *Appl Surf Sci*, 2012, 258: 6379–6383
- 7 Rivas T, Lopez A J, Ramil A, et al. Comparative study of ornamental granite cleaning using femtosecond and nanosecond pulsed lasers. *Appl Surf Sci*, 2013, 278: 226–233
- 8 Bonse J, Mann G, Krüger J, et al. Femtosecond laser-induced removal of silicon nitride layers from doped and textured silicon wafers used in photovoltaics. *Thin Solid Films*, 2013, 542: 420–425
- 9 Luk'yanchuk B S, Arnold N, Huang S M, et al. Three-dimensional effects in dry laser cleaning. *Appl Phys A*, 2003, 77: 209–215
- 10 Chen L, Yang Y Q. Laser cleaning technology and its applications (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2004, 3: 274–277 [陈林, 杨永强. 激光清洁技术及其应用. *红外与激光工程*, 2004, 3: 274–277]
- 11 Wu D J, Xu Y, Wang X Y, et al. Experimental and theoretical study on laser cleaning Al_2O_3 particle on silicon wafer surface (in Chinese). *Optics Precision Eng*, 2006, 5: 764–770 [吴东江, 许媛, 王续跃, 等. 激光清洗硅片表面 Al_2O_3 颗粒的试验和理论分析. *光学精密工程*, 2006, 5: 764–770]
- 12 Zhang C S. *Powder Technology and Equipment* (in Chinese). Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2007. 17 [张长森. 粉体技术及设备. 上海: 华东理工大学出版社, 2007. 17]

Femtosecond laser cleaning the surface of reflective mirror in telescope

LAO ZhaoXin, LI JiaWen, HU YanLei, LI GuoQiang, ZHANG ChenChu, WU Dong, CHU JiaRu & HUANG WenHao

CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and design of Materials, Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Metallic mirror is the core component of the imaging system in the reflective astronomical telescope. However, because the telescopes are usually located in the wild, they are often contaminated by dust and other pollutants which will greatly reduce the imaging quality. Therefore, the surface of reflective mirror in telescope should be cleaned routinely in order to recover high performance of telescope. Currently, the artificial ice cleaning is the most common method employed in the cleaning of mirror surface, which is complicated and costly. Besides, the micron particles adhered on the surface of the mirror are especially difficult to be removed by dry ice flow when their diameters are less than 20 μm because of the Van der Waals' force between the particles and metal mirror. Moreover, an ordinary method with wipe and cleanser is also used in which the friction between wipe and mirror may damage the telescope. To overcome these shortcomings, this work proposed a laser cleaning strategy in which amplified femtosecond pulsed lasers was used to clean the reflecting mirror surface. As a new cleaning method, laser cleaning technology which is non-contact and frictionless has been applied successfully in the cleaning of industrial molds, buildings, precision machinery components. For the advantages of femtosecond laser, such as short pulse duration, small thermal effects, high pulse energy, it has been used in the cleaning of cultural relics and has good achievement in recent years. This article firstly studied the interaction between the femtosecond laser and the reflective aluminum mirror. The laser damage threshold of aluminum mirror was measured about 60 mJ/cm^2 , which would reduce to 57 mJ/cm^2 for dirty mirror because of the microparticles adhered on the surface of reflector mirror. Then, by optimizing laser parameters including the scan rate, the scan pitch, and the laser energy, it could be found that when the laser energy density ranges from 30 to 55 mJ/cm^2 , micron dust particles with diameters less than 20 μm on mirror surface could be cleaned with excellent clean effect and the reflectivity in the visible light region has been greatly improved. Finally, through the dust particles and aluminum mirror substrate spectrum analysis, we ruled out that the removed microparticles were thermal melted by laser energy. The results indicated that thermal expansion plays the key role in laser cleaning of metal mirror. This work shows that femtosecond laser cleaning has a good effect on the removing of micron particles. As a simple and easy way, femtosecond laser cleaning has a good prospect in cleaning of astronomical telescope.

femtosecond laser, telescope, laser cleaning, metal mirrors

doi: 10.1360/N972015-01012