

光学元件表面洁净度对其表面散射特性的影响

黄 聪,游兴海,张 彬

(四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065)

摘 要: 针对光学系统在实际工作中元件表面污染粒子对光的散射问题,以空气中 Al_2O_3 污染粒子为例,基于米氏散射理论,模拟和分析了元件表面双向反射分布函数(BRDF)随散射角的变化规律,进而定量计算了元件表面全积分散射值(TIS)。在此基础上,进一步分析了影响表面洁净度的三个主要因素(空气洁净度、工作面朝向和曝露时间)对元件表面 BRDF 及其 TIS 值的影响。结果表明,空气洁净度等级、工作面放置方向和曝露时间等对元件表面散射量的影响均较为明显。其中,工作面的放置方向对元件表面的散射影响尤为突出,水平向上放置($TIS=1.93\times 10^{-4}$)较之垂直放置时($TIS=8.07\times 10^{-5}$)散射量增大一个量级,而较之工作面水平向下放置时($TIS=3.12\times 10^{-6}$)增大两个量级。最后,以卡塞格伦望远镜为例,针对其主镜的污染容限问题,分析了不同空气洁净度条件下主镜表面洁净度达到污染容限所用的曝露时间,可为实际工作中污染控制和保证系统对微弱目标信号的有效探测提供参考。

关键词: 散射; 光学元件; 米氏散射理论; 空气洁净度; 表面洁净度

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0120002

Influence of surface cleanliness of optical element on its surface scattering characteristics

Huang Cong, You Xinghai, Zhang Bin

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aimed at the light scattering problem from the particles on optical surfaces of the systems in practical applications, and taken Al_2O_3 particles in air as an example, the variations of the bidirectional reflection distribution function (BRDF) with the scattering angle on the surfaces of optical components were simulated and analyzed based on Mie scattering theory, and then the total integral scattering (TIS) value of the surface was calculated quantitatively. On this basis, the effect of the BRDF and the TIS value were further analyzed under the conditions of different air cleanliness levels, the direction of the optical component surface, the exposure time. The results indicate that, the air cleanliness levels, the direction of the optical component surface and the exposure time have effect on scattering of the optical surface, in which the direction of optical components has significant impact on the scattering of the surfaces. When the particles buildup on horizontal upward facing surfaces($TIS=3.93\times 10^{-3}$), the amount of

收稿日期:2018-08-05; 修订日期:2018-09-10

基金项目:天津市薄膜光学重点实验室开放基金课题(kjwx170620);

合肥知常光电科技有限公司超光滑表面无损检测安徽省重点实验室资助课题(CGHBMWSJC06)

作者简介:黄聪(1993-),男,硕士生,主要从事光学系统优化与杂光分析等方面的研究。Email:huangcongplus@163.com

导师简介:张彬(1969-),女,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。Email:zhangbinff@sohu.com

scattering increases by an order of magnitude compared with that of the vertical ones ($TIS=4.07\times 10^{-4}$), and increases by two orders of magnitude compared with that of the downward ones ($TIS=5.22\times 10^{-5}$). Finally, based on the Cassegrain telescope, aimed at the tolerance of the particles on the primary mirror, the exposure time reaching the tolerance was carried out with different air cleanliness levels. The results can provide reference for particle control and reliability for effective detection of the weak signal in practice.

Key words: scattering; optical element; Mie scattering theory; air cleanliness; surface cleanliness

0 引言

光学元件作为光学系统的重要组成部分,其表面散射特性将对系统的探测性能产生重要影响。在实际应用中,诸多光学系统均要求光学元件表面的散射尽可能低,以减少对系统性能的影响^[1-2]。然而,大型光学系统多工作在复杂天气条件和外界环境中,致使大量元件直接暴露于外界环境中,在工作和运行期间系统自身和周围环境的污染物会污染光学元件表面,改变元件的散射特性,从而影响光学系统的探测能力。

光学元件放置在外界环境中时,表面洁净度会受到空气洁净度、曝露时间以及元件工作面朝向的影响。光学系统的探测性能也将受到表面洁净度的影响和限制,因而在对光学系统污染容限进行分析时,需要明确空气洁净度等级、元件工作面朝向、曝露时间等对光学元件表面洁净度的影响。

加工质量好的光学元件表面的散射主要源于元件表面的微观粗糙度,而沉积在元件表面的颗粒污染物会加重其表面的散射。元件表面散射特性的相关研究已有诸多报道,其中,最主要的分析手段是双向散射分布函数(BSDF)。国外已有学者从理论和实验两方面对元件表面散射特性进行了大量的研究和报道,分析了不同表面微观粗糙度和镜面污染颗粒对镜面散射分布的影响^[3-4]。在国内,马晶对光学元件表面污染的沉积及表面污染的检测装置进行了研究^[5],宋源详细介绍了反射镜表面污染的清洗方法^[6]。

文中基于米氏散射理论,分析了不同空气洁净度等级、元件工作面朝向、曝露时间对元件表面洁净度的影响及规律,进而分析了污染镜面的散射特性。最后,以卡塞格伦望远镜的主镜为例,通过分析不同空气洁净度下光学元件曝露时间对光学系统探测性

能的影响,讨论了主镜的污染容限。

1 理论模型

1.1 镜面颗粒污染物的散射

镜面上的污染物主要由空气中的各种微粒附着在镜面而形成,可近似将各种微粒视为球形粒子,进而用米氏散射描述表面的散射特性。如图 1 所示,单色光沿 Z 轴正向传播,电场振动方向沿 X 轴,磁场振动方向沿 Y 轴,散射角 θ 定义为散射光矢量与 Z 轴正方向的夹角,方位角 φ 定义为散射光在 XOY 平面的投影与 X 轴的夹角, r 为颗粒到观测点的径向距离, λ 表示波长^[7]。

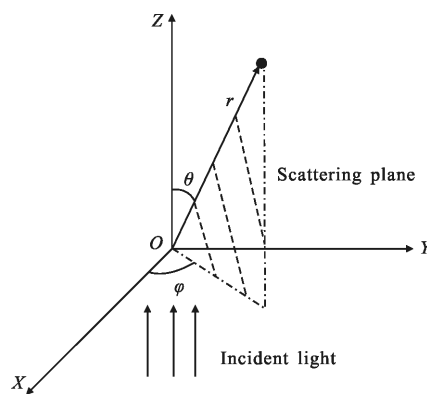


图 1 光散射模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of light scattering model

在 θ 方向上,垂直于散射面的散射光强 $I_{\perp s}$ 与平行于散射面的散射光强 $I_{\parallel s}$ 的函数关系为:

$$I_{\perp s} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \sin^2 \varphi \quad (1)$$

$$I_{\parallel s} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_2 \cos^2 \varphi \quad (2)$$

式中: i_1 、 i_2 为散射强度函数^[8]。

如果 YOZ 平面变成散射平面,则 $\varphi=90^\circ$,此时:

$$I_{\perp s} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \quad (3)$$

公式(3)给出了自由空间中由极化辐射照射的球状颗粒的散射能量。假设上述公式可以预测镜面上的颗粒散射,且散射到前向方向上并由镜面反射的辐射不会受污染颗粒所影响。于是来自镜面污染粒子的散射函数(BRDF)可定义为^[9]:

$$BRDF = \frac{\lambda^2 D}{4\pi^2} i_1 \quad (4)$$

式中: D 为镜面上的颗粒密度(每平方英尺上的粒子数)。

全积分散射(Total Integrated Scatter, TIS)是 BRDF 在半球空间的二重积分^[7]:

$$TIS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} BRDF(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s) \quad (5)$$

式中: θ_i, φ_i 表示入射光的入射角和方位角; θ_s, φ_s 表示散射光的散射角和方位角。

1.2 污染的量度-洁净度

空气洁净度是影响表面洁净度的重要因素之一。美国联邦标准(FED-STD-209D)规定了空气洁净度等级标准:每立方英尺或每立方米空气中,粒子的直径大于或等于 $0.5 \mu\text{m}$ 的粒子数目^[10]。空气中的颗粒尺寸分布满足如下的关系表达式^[11]:

$$\log N_v = -2.197 \log X - 0.662 + \log X_c \quad (6)$$

式中: X 为颗粒的直径(微米量级且 X 大于等于 $0.5 \mu\text{m}$); X_c 为空气洁净度等级; N_v 为每立方英尺中颗粒直径大于等于 X 的粒子数量。

尽管在许多应用中常采用空气洁净度等级来表征实验环境条件,但笔者更关心的是不同洁净度等级下落在光学镜面上的污染颗粒数量。为此,需要讨论洁净室的空气洁净度与元件表面洁净度之间的关系。在实际应用中,用表面洁净度等级(或者表面污染程度)来表示镜面的污染状况。表面洁净度用一个数值来表征,该数值表示每平方英尺的镜面上,粒子数量的平均分布达到 1 个以上的所有粒子中,最大粒子的直径数值^[10]。例如,对于一个表面洁净度等级为 300 的镜面,每平方英尺的镜面上分布的粒子直径的范围为 $1 \sim 300 \mu\text{m}$,直径小的粒子数量较多,直径大的粒子数量较少,而直径为 $300 \mu\text{m}$ 的粒子数量仅为 1 个。镜面上粒子直径与粒子数量的分布近似满足如下规律^[10]:

$$\log N_a = C[(\log X_1)^2 - (\log X)^2] \quad (7)$$

式中: X 为颗粒直径(微米量级且 X 大于等于 1); X_1 为表面洁净度水平; N_a 为元件每平方英尺上颗粒直径大于等于 X 的粒子数量; C 是在 MIL-STD-209D 标准下近似为 0.9260 的归一化常数。根据公式(7),图2给出了在表面洁净度(X_1)已知的情况下颗粒尺寸(X)与粒子数量(N_a)之间的关系。

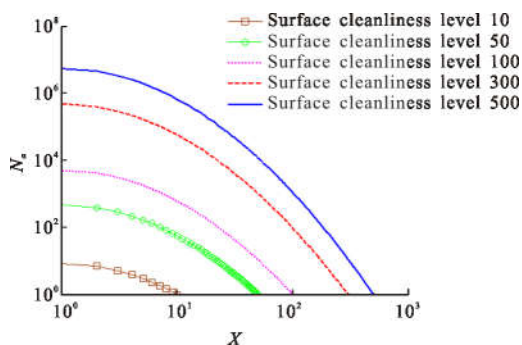


图 2 粒子尺寸与粒子数量的关系

Fig.2 Relationship between particle size and particle number

从图 2 中可以看出,在表面洁净度(X_1)确定的情况下,粒子尺寸(X)越小,粒子数量(N_a)越多;而粒子尺寸(X)越大,则粒子数量(N_a)越少。Hamborg^[12]做了大量关于粒子沉降速率的实验,经验观察得知,当洁净室的空气洁净度已知时,粒子在空气中的沉降规律可表示为:

$$\frac{N}{t} = \rho N_c^{0.773} \quad (8)$$

式中: N 为每平方英尺上粒子直径大于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒数量; t 为元件暴露在洁净室空气中的时间(单位:天); N_c 为每立方英尺中粒子直径大于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒数量。对于普通类型的洁净室(每小时换气 $15 \sim 20$ 次),公式(8)中, $\rho = 2851$ 。

将公式(6)、(7)、(8)相结合,可以计算得到粒子尺寸大于等于 $5 \mu\text{m}$ 时,表面洁净度和空气洁净度之间的关系^[11]:

$$\log X_1 = [1.08(\log \rho + \log t + 0.773 \log X_c - 1.248)]^{1/2} \quad (9)$$

分析公式(9)可知,在元件工作面朝向和暴露时间给定的情况下,元件的表面洁净度随空气洁净度的增大而增大。由参考文献[10]可知:当光学元件垂直水平面放置时,垂直表面上附着的污染微粒大约为水平向上放置时的 10%;而元件工作面水平向下放置时,附着的污染微粒约为水平向上放置时的

1%。为此,在光学元件工作面垂直于水平面放置的情况下,进一步分析光学元件表面洁净度随暴露时间的变化,典型结果如图 3 所示。

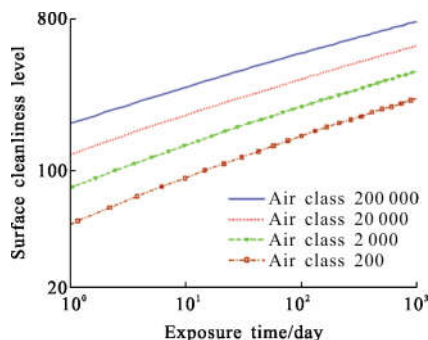


图 3 光学元件表面洁净度随暴露时间的变化

Fig.3 Surface cleanliness of optical components changes with the exposure time

从图 3 中可以看出,在不同的空气洁净度等级下,光学元件达到同一表面洁净度所需的暴露时间是不同的。空气洁净度等级越高所需时间越短,而空气洁净度等级越低则所需时间越长。根据公式(9),可以预估光学元件在不同空气洁净度下达到污染容限所需的时间容限。当元件在空气中的暴露时间超过这一时间容限时,应及时对元件进行清洗和维护。

1.3 元件表面缺陷

光学元件表面上的麻点、擦痕、破边等统称为元件的表面疵病,通常是在元件加工过程中引入的。然而,由于加工工艺的限制,这些缺陷只能尽量减小,而无法完全避免。目前,已有相关实验和理论研究表明,元件表面缺陷尺寸与其密度服从幂指分布,即尺寸越小密度越大^[13-14]:

$$P(r)=A \cdot r^{-m} \quad (10)$$

式中: P 表示缺陷尺寸为 r 时的密度; A 和 m 是与光学元件相关的参数。根据国家标准(GB1185-79)中表面缺陷的检测标准,元件疵病等级由低到高可以分为 I-10、I-20、I-30 等 10 个等级,疵病等级越高,元件加工质量越差。

在光学元件镀膜的过程中,由于基板清洗不彻底、镀膜时洁净室中的粒子污染以及镀膜过程中材料的喷溅等环节均会导致节瘤缺陷的产生。节瘤缺陷具有抛物线边界的柱对称结构,其表面直径与种子的大小和膜层厚度满足如下关系^[15]:

$$h=d, D=(8dT)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中: D 为薄膜表面缺陷的直径; d 为基板缺陷种子的直径; T 为膜层厚度。

元件加工、镀膜等过程中引入的疵病会增大元件面形误差中的中、高频成分,进而使整个表面的散射增大。当光线入射到光学元件表面时,高频误差主要引起大角度散射,中频误差主要引起小角度散射,从而对光学系统的成像质量、散射损伤比等性能造成影响^[16-17]。

系统运行过程中引入的表面污染和镜面制造过程中引入的缺陷会直接增大表面的散射量,进而影响整个光学系统的性能。因此,实际表面的散射量是粗糙度引起的散射量、表面洁净度引起的散射量与表面缺陷引起的散射量之和,即:

$$BRDF=BRDF_r+BRDF_c+BRDF_d \quad (12)$$

式中: r 、 c 、 d 分别代表表面粗糙度、表面洁净度、表面缺陷的双向散射分布函数。图 4 给出了镜面受表面粗糙度、粗糙度+缺陷、粗糙度+缺陷+洁净度影响时的 BRDF 曲线。可以看出,表面缺陷(仅考虑镀膜时节瘤缺陷的复制作用)和洁净度会明显增大镜面的散射量。计算时,假设表面缺陷等级为 II 级,粗糙度引起的 TIS 为 1×10^{-5} ,表面洁净度等级为 300。

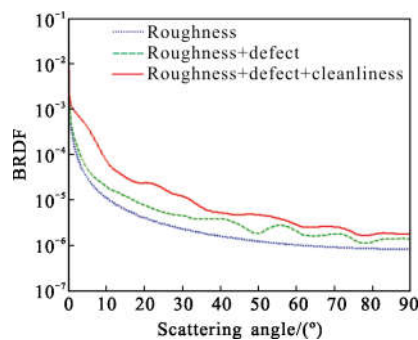


图 4 不同镜面情况下, BRDF 随散射角的分布

Fig.4 Distribution of BRDF with scattering angle in the case of different mirror surfaces

2 表面洁净度与 BRDF 的关系

空气洁净度、工作面的朝向以及暴露时间将直接影响元件的表面洁净度,进而对元件表面的散射特性产生影响。表面粒子分布满足公式(7),因而在表面洁净度给定的情况下可以计算不同粒径的粒子

数目。根据公式 (4) 和 (5), 可以计算单一粒径的 BRDF 和 TIS, 而当表面粒子分布为多粒径时, 则可通过叠加得出整个表面的 BRDF 和 TIS。图 5(a)~(c) 给出了其他条件不变, 而空气洁净度、工作面朝向和曝露时间分别变化时的 BRDF 曲线, 表 1~3 分别列出了相应的 TIS 值。

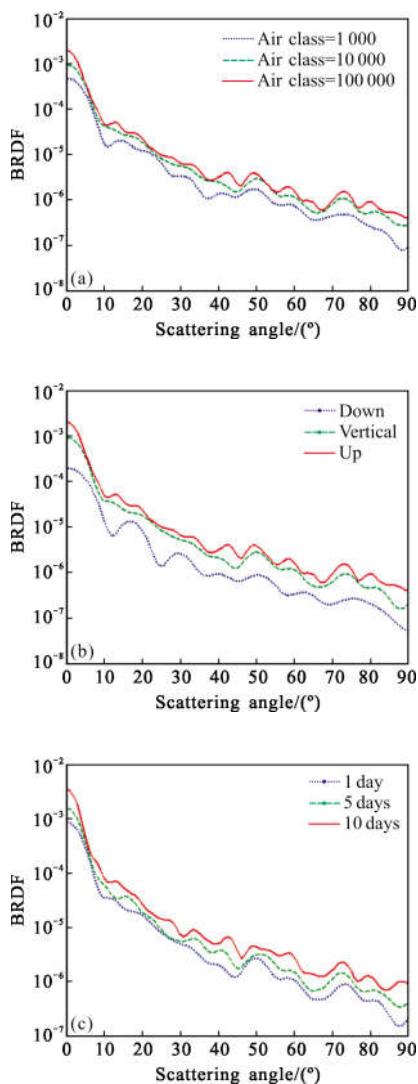


图 5 BRDF 随散射角的变化

Fig.5 Variation of BRDF with scattering angle

表 1 不同空气洁净度等级时的 TIS

Tab.1 TIS for different air cleanliness levels

Air class	1 000	10 000	100 000
Wavelength/ μm	0.632 8	0.632 8	0.632 8
TIS	2.21×10^{-5}	7.90×10^{-5}	1.93×10^{-4}

表 2 不同朝向时的 TIS

Tab.2 TIS for different placement

Placement	Horizontal downward surface	Verticle surface	Horizontal upward surface
Wavelength/ μm	0.632 8	0.632 8	0.632 8
TIS	3.12×10^{-6}	8.07×10^{-5}	1.93×10^{-4}

表 3 不同曝露时间下的 TIS

Tab.3 TIS for different exposure time

Exposure time	1 day	5 days	10 days
Wavelength/ μm	0.632 8	0.632 8	0.632 8
TIS	4.97×10^{-6}	1.34×10^{-5}	3.93×10^{-5}

从图 5 中可以看出, 不同情况下 BRDF 曲线的变化趋势大致相同。当空气洁净度等级越高、曝露时间越长且工作面朝上时, 镜面上的颗粒数量越多, 尺寸越大, TIS 值也就越大。存在大颗粒的情形下, BRDF 曲线走势与没有大颗粒时的走势基本相同, 但其 BRDF 曲线的波动更为明显, 说明大颗粒污染物的存在对镜面的散射特性产生了十分明显的影响。分析表 1 中可知, 当镜面上的粒子数目越多, 尺寸越大, 则 TIS 值越大。其中, 元件工作面的朝向对其表面散射的影响尤为突出, 水平朝上放置较之垂直放置时散射量增大一个量级, 而较之工作面水平朝下放置时增大两个量级。

为了说明文中所提出分析方法的有效性和正确性, 利用文中的分析模型在参考文献[18]给出的相关参数下复算文献给出的 BRDF 曲线, 复算的结果与文献中的实验结果基本一致, 从而验证了文中所提出分析方法的有效性。

在上文的分析计算中作如下简化: (1) 镜面上所有的污染粒子互不重叠, 且粒子之间的间距大于其半径的 3 倍; (2) 所有污染粒子均匀地分布在元件表面; (3) 入射光垂直于镜面入射; (4) 不考虑相干效应和凝结效应。

3 光学元件的污染容限

光学系统在实际的运行过程中, 当光学元件表面的污染程度控制在某一范围内时, 可保证系统的探测性能基本不变, 而当镜面污染程度超过该污染

程度时,系统的探测性能将迅速降低。此时,有必要对系统中光学元件进行清理与维护。这一系统可容许的污染程度即为污染容限,且与系统性能、探测能力及运行环境等因素有关^[1]。因此,需要结合光学系统的实际情况预估光学元件的污染容限,根据这一预估的污染容限及时清洗元件,既保证系统的有效探测能力,又尽可能地节约资源。

参考文献[1]以卡塞格伦望远镜的主镜为例,分析了其主镜的污染容限,该污染容限定义为:污染前后信噪比的相对变化量控制在 10%左右,以保证低信噪比时对微弱信号的有效探测。在所给出的污染容限定义下,为了保证系统的探测性能,主镜上污染微粒的表面覆盖率需控制在 1%(元件表面洁净度约为 630)左右。根据公式(9)可以计算元件在不同空气洁净度下,表面洁净度达到 630 等级的曝露时间。为了研究空气洁净度对主镜污染容限的影响,表 4 给出了主镜工作面水平朝上放置时,不同空气洁净度条件下,主镜表面洁净度达到 630 等级时所需要的曝露时间。

表 4 曝露时间的容限

Tab.4 Tolerance of exposure time

Air class	1 000	10 000	100 000	1 000 000
Exposure time /day	2 145	361	61	10

从表 2 可以看出,随着空气洁净度等级的增加,主镜达到污染容限的曝露时间显著缩短,且当空气洁净度增大一个量级时,主镜表面达到污染容限的时间将减小一个数量级左右。值得指出的是,当主镜处于天气晴朗且没有受到雾霾和粉尘污染的洁净环境时(Air class 约为 1 000 级),主镜达到污染容限长达 7 年。然而,当主镜放置在重度污染的矿区或建筑区域时(Air class 约为 1 000 000 级),仅仅曝露 10 天左右就可以达到污染容限。由此可见,大型光学系统建造地址以及观测时天气条件的选取尤为重要。

4 结 论

基于 Mie 散射理论,分析了镜片表面在不同空气洁净度等级、元件朝向及曝露时间情况下的散射特性,进而给出了光学元件的 BRDF 及其 TIS 值。结

果表明,在相同的曝露时间和朝向情况下,空气洁净度等级越高,元件表面的散射能量越大。在空气洁净度等级及曝露时间不变的情况下,元件工作面水平朝上放置时,其表面的散射能量最大;元件垂直放置时,其散射能量次之;元件工作面水平向下放置时,其表面的散射能量最小。在相同的空气洁净度等级和工作面朝向条件下,元件在空气中的曝露时间越久,其表面的散射能量越大。在此基础上,分析了典型的卡塞格伦望远镜主镜的污染容限问题,定量计算了主镜在不同空气洁净度下,达到污染容限所需要的曝露时间。尽管光学系统中光学元件的污染容限与系统功能、探测任务及运行环境等因素紧密相关,但只要结合光学系统在工程应用中的实际情况,便能合理预估光学元件的污染容限,根据这一预估的污染容限及时清洗和维护元件,既可保证系统的有效探测能力又尽可能地节约人力和物力资源。

参考文献:

- [1] Xiao Jing, Zhang Bin. Influence of the optical components contamination on the signal to noise ratio in infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1010-1016. (in Chinese)
- [2] Sun Tengfei, Zhang Jun, Lv Haibing, et al. Influence of optical mirror pollution on laser transmission characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1444-1448. (in Chinese)
- [3] Mcguire A F, Hapke B W. An experimental study of light scattering by large, irregular particles [J]. *Icarus*, 1995, 113(1): 134-155.
- [4] Paul R Spyak, William L Wolfe. Scatter from particulate-contaminated mirrors. part 2: theory and experiment for dust and $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$ [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(8): 1757-1763.
- [5] Ma Jing, Zhu Funan, Zhou Yanping, et al. Optical surface pollution detection device for dual-use star and earth [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1878-1883. (in Chinese)
- [6] Song Yuan, Lu Qipeng, Gong Xuepeng, et al. Carbon contamination cleaning on the surface of multi-layer film reflector of EUV lithography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(11): 2835-2844. (in Chinese)
- [7] Huang Zhiqiang. Analysis and study of stray light in infrared system [D]. Chengdu: Optoelectronic Technology Research

- Institute, 2006. (in Chinese)
- [8] Kerker M. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation[M]. New York: Academy Press, 1969.
- [9] Young R P. Low-scatter mirror degradation by particle contamination[J]. *Optical Engineering*, 1976, 15(6): 516–520.
- [10] Tribble A C, Boyadjian B, Davis J, et al. Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community[C]//SPIE, 1996, 2864: 4–15.
- [11] Spyak P R, Wolfe W L. Scatter from particulate-contaminated mirrors. part 4: properties of scatter from dust for visible to far-infrared wavelengths [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(8): 1775–1784.
- [12] Hamberg O, Shon E M. Particle size distribution on surfaces in clean rooms [R]. California: Vehicle Engineering Division of the Group of the Aerospace Corporation, 1984.
- [13] Zhou Lidan. Research on Statistical law between optical component "defects" distribution and near-field quality in high power laser system [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009. (in Chinese)
- [14] You Xinghai, Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, et al. Effect of defects of component on stray radiation characteristics of infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0120004. (in Chinese)
- [15] Shan Yongguang, Liu Xiaofeng, He Hongbo, et al. Research progress of nodular defect in optical coatings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1421–1429. (in Chinese)
- [16] Liao Zhibo, Jiao Wenchun, Fu Rimin. Simulation of optical surface in high frequency error analysis of [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1905–1908. (in Chinese)
- [17] Dai Yifan, Wu Dongliang, Wang Guilin. The effect of high frequency error on the ratio of scattering loss in optical processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 2365–2370. (in Chinese)
- [18] Young R P. Mirror-scatter degradation by particulate contamination[C]//SPIE, 1990, 1329: 246–254.