材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024022102

高反镜表面颗粒物在连续激光辐照下的吸收特性

江文昌[1,2,3,4]，史建亮[1,2,3*]，杨欣欣[1,2,3]，任　戈[1,2,3]

（1. 中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室，成都 610209；2. 中国科学院光束控制实验室，成都 610209；
3. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；4. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 光学元件表面吸收损耗是衡量光学元件光学性能的重要指标，颗粒污染物附着通常会引起光学元件表面吸收损耗大幅增加。基于红外热像仪温升检测方法，研究了几种典型颗粒污染物对高反镜表面吸收损耗的影响，并根据颗粒污染物分布特点建立阶梯式分布吸收和离散分布吸收模型。考虑测温精度受红外热像仪空间分辨率的影响，提取单像素点内温升数据进行有限元分析，获取精度与单像素点相当的镀膜元件表面局部吸收损耗，结合显微镜下扫描结果进一步优化仿真模型，从而获得了薄膜元件表面颗粒污染物的吸收损耗。

关键词： 颗粒污染物；连续激光；红外热像仪；有限元；吸收损耗

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0601－06

Absorption Characteristics of Particles on the Surface of A Highly Reflective Mirror under Continuous-Wave Laser Irradiation

JIANG Wenchang[1,2,3,4], SHI Jianliang[1,2,3], YANG Xinxin[1,2,3], REN Ge[1,2,3]

（1. National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 2. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN）

Abstract: The surface absorption loss of an optical component is an important index used to measure its optical performance. The attachment of pollutant particles usually causes a significant increase in the surface absorption loss of an optical component. This study used the temperature rise detection method of an infrared thermal imager to investigate the influence of several typical pollution particles on the surface absorption loss of a highly reflective mirror. Stepped and discrete distribution absorption models were established based on the distribution characteristics of these pollutant particles. Considering that the temperature measurement accuracy was affected by the spatial resolution of the infrared thermal imager, the temperature rise data for a single pixel were extracted for a finite element analysis, and the local absorption loss on the surface of the coated element with an accuracy equivalent to that of a single pixel was obtained. Microscopy scanning results were used to further optimize the simulation model and obtain the absorption loss of particulate pollutants on the surface of a thin film element.

Key words: particulate pollutants; continuous laser; infrared thermal imaging instrument; finite element; absorption loss

收稿日期：2024－02－21.

基金项目：国家自然科学基金项目(11804339).

* **通信作者：**史建亮

0　引言

镀膜光学元件是高性能激光系统的关键部位之一，在实际应用过程中，暴露在外部环境中的光学薄膜元件容易受到大气降尘等杂质颗粒污染[1-3]。特别对于高反镜这种高精度光学元件，颗粒污染物的存在会加剧表面损伤风险[4-6]，降低损伤阈值，增加光电设备使用成本。

国内外研究人员针对激光辐照表面杂质诱导薄膜元件热损伤问题开展了大量研究，激光诱导损伤类型与激光模式相关，在连续激光辐照下通常表现为熔化损伤或热应力损伤[6-9]。Pamler 等[10]研究了杂质缺陷诱导光学元件热损伤问题，并对极限缺陷尺寸与吸收通量密度的关系进行了理论分析。Génin 等[11]研究了杂质颗粒的光场调制导致的激光诱导损伤问题。叶慧和江勇等[12-13]对熔石英表面颗粒的场调制作用进行了详细研究，结果表明场增强因子与颗粒尺寸、形状、位置、激光波长存在重要相关性。Raman 等[14]研究了激光作用下透明颗粒诱导表面损伤问题，结果表明金属颗粒沉积能量至少为透明颗粒沉积能量的两倍。陈家轩等[15]研究了固体类无机污染物对 Al_2O_3 表面的影响，表明当 Al_2O_3 表面存在污染物时，更容易发生激光损伤，且不同种类、不同尺寸的污染物对 Al_2O_3 表面激光损伤的影响不同。张文峰等[16]利用有限元方法研究了长波激光对蓝宝石的热应力损伤特性。徐娇等[17]用实验和有限元仿真研究了表面杂质诱导薄膜元件热损伤及统计特性，但没有考虑粉尘密度引起的孔隙吸收差异。荆建行等[18]将红外热像仪测量与有限元方法结合，提供了一种新的薄膜吸收测试方法，但未分析存在污染时的局部吸收对测量的影响。为了有效评估受污染光学表面损伤风险，研究不同颗粒污染物对光学元件表面吸收损耗的影响很有必要。

本文研究了 SiO_2，Al_2O_3，Fe_2O_3 和 410 不锈钢（中国国际标准统一代号 S41010）球形颗粒这四种典型颗粒污染物对高反镜表面吸收损耗的影响，通过实验和有限元方法分析受污染表面在强激光辐照下的温度变化，得到高反镜表面不同颗粒污染物的吸收损耗，对控制高反镜表面损伤有重要意义。

1　理论模型

对反射率在 99.9%以上，基底为低吸收材料的高反镜（HRM），基底吸收远低于膜层吸收，可认为样品的吸收损耗仅为表面膜层吸收。一束半径为 r 的高斯分布光束照射直径为 D 厚度为 d 样品表面，无内热源时样品内部温度分布满足的热传导方程[19]：

$$\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t}-\frac{K}{c\rho}\nabla^2 T=0 \tag{1}$$

式中，r 为距激光辐照中心径向距离，z 为样品内部点到镀膜前表面的垂直距离，K 为材料导热系数，c 为材料比热容，ρ 为材料密度，t 为时间变量。

测试样品在前表面存在光热吸收和对流传热损耗，侧面和后表面只存在对流传热损耗。则对应热传导边界条件为：

$$K\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t}+h\left(T(r,z,t)\big|_{z=0}-T_f\right)=-Q(r,t) \tag{2}$$

$$K\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t}+h\left(T(r,z,t)\big|_{z=0}-T_f\right)=0 \tag{3}$$

$$K\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t}+h\left(T(r,z,t)\big|_{z=d}-T_f\right)=0 \tag{4}$$

式中，h 为样品与环境间的对流传热系数，T_f 为环境温度，Q 为薄膜吸收功率密度，假设激光辐照前样品与环境处于热平衡状态，初始条件可表示为：

$$T(r,z,t)\big|_{t=0}=T_f \tag{5}$$

建立仿真模型时为确保尽可能使模型准确的同时使其简化，对随机密集分布的颗粒污染物表面热源采用如下条件近似建立图 1 所示阶梯式吸收模型。(1)用单像素点内的面吸收代替密集分布的颗粒吸收；(2)将其余颗粒吸收作为背景热源添加至其余表面；理由如下：红外热像仪无法区分单像素点内的多个点热源，测量结果为区域平均值，同种颗粒物在激光均匀辐照下最大温升出现在最大颗粒团所在位置，单个小颗粒引起的温升很小且大部分离最高温升点距离较远，其作用表现为使激光辐照区域整体温升，分布越均匀近似程度越高。则当高斯分布激光辐照薄膜样品时，Q 可表示为：

$$Q(r,t)=A(r)I_0\exp\left(-\frac{2r^2}{a^2}\right) \tag{6}$$

$$A(r)=\begin{cases}A_1, r<r_0\\ A_2, r\geqslant r_0\end{cases} \tag{7}$$

式中，I_0 为激光峰值功率密度，$A(r)$ 为入射激光在半径为 r 位置的表面吸收率，r_0 为单像素点等效圆半径。对于洁净表面认为薄膜表面各处均匀吸收，则 $A(r)$ 为定值 A_0。

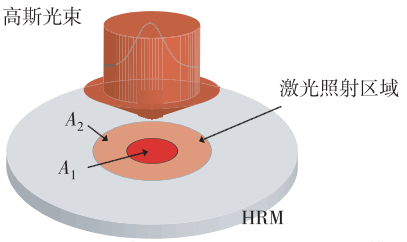


图 1 随机密集分布颗粒阶梯式吸收模型

为将颗粒表面吸收损耗与区域吸收损耗建立联系，假设颗粒表面吸收损耗 A_P 为定值，则均匀分布颗粒在区域内吸收损耗 A 与颗粒覆盖率 φ 和颗粒表面吸收损耗 A_P 可表示为：

$$A = A_0 \cdot (1-\varphi) + A_P \cdot \varphi \tag{8}$$

对少量离散分布的大尺寸颗粒，将每个颗粒作为单独热源 Q 加载到激光辐照表面，建立如图 2 所示少量颗粒离散分布的离散化分布吸收模型。

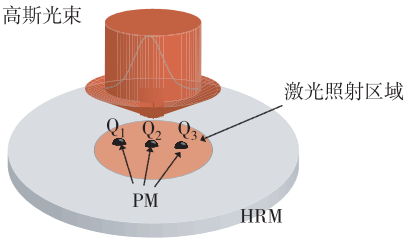


图 2 颗粒物(PM)离散分布吸收模型

2 颗粒污染物激光辐照实验

实验样品为厚度为 35 mm，直径 Φ 为 270 mm 的高反镜，表面膜层为离子辅助溅射镀制的 Ta_2O_5/SiO_2 低吸收 45°高反膜，基底材料为石英晶体。实验选取 4 种典型颗粒作为污染物引入，分别为 SiO_2，Al_2O_3，Fe_2O_3 颗粒以及 410 不锈钢颗粒，其中 SiO_2，Al_2O_3，Fe_2O_3 单颗粒平均尺寸为 10 μm，410 不锈钢颗粒平均尺寸为 100 μm。实验设备：1 064 nm 波段连续激光器(输出功率可调)、吸收池、FLIR T1040-28°热像仪、聚焦透镜。

实验示意图如图 3 所示，并搭建如图 4 所示实验光路：激光输出后经聚焦透镜收束，在高反镜表面

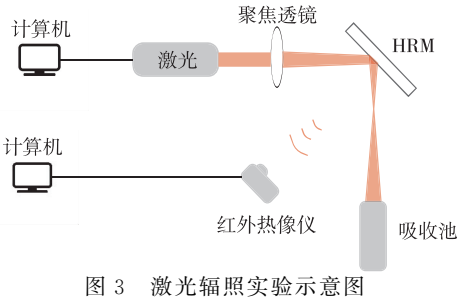


图 3 激光辐照实验示意图

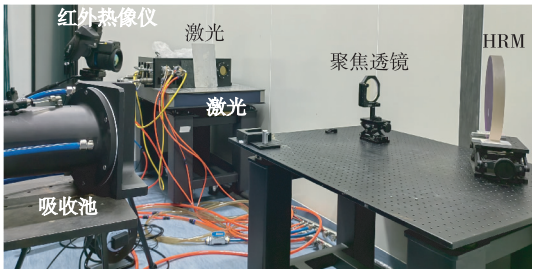
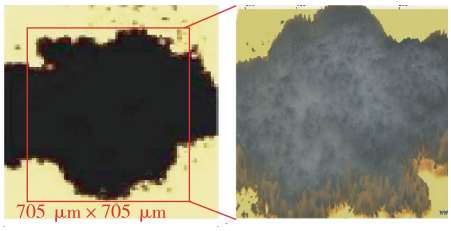


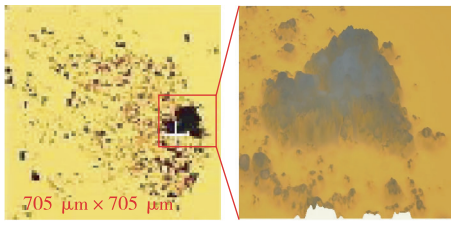
图 4 激光辐照实验装置实物照片

光斑直径为 20 mm，反射激光经吸收池将剩余能量完全吸收。红外热像仪用于获取激光辐照过程中样品表面温升数据。

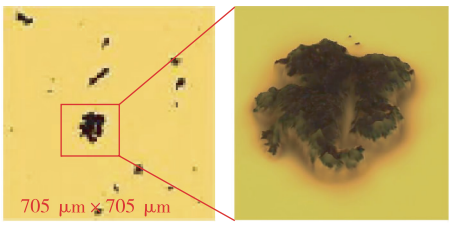
实验过程中优先测量洁净表面温升作为实验对照，所采用样品为低吸收高反镜，正常状态下温升较低易受环境波动影响，选择在环境温度相对稳定时进行激光辐照实验。颗粒污染物在样品表面选定区域随机附着模拟在恶劣环境颗粒污染情况，在ZET



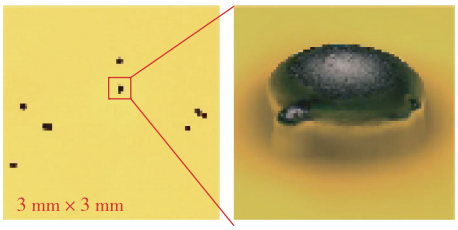
(a) Al_2O_3 (e) Al_2O_3 局部三维形貌



(b) SiO_2 (f) SiO_2 局部三维形貌



(c) Fe_2O_3 (g) Fe_2O_3 局部三维形貌



(d) 410 不锈钢 (h) 其局部三维形貌

图 5 颗粒污染物附着情况

A-100 光学显微镜下观测到受污染最严重区域颗粒物附着情况如图 5 所示。不锈钢球形颗粒较大附着量较少，其余颗粒均大量附着，统计该区域 Al_2O_3，SiO_2 和 Fe_2O_3 颗粒物覆盖率 φ 分别为 65%，29%，7%。

实验所采用激光器为可调激光器，激光功率可在不同档位下连续变化，为尽量避免实验过程中样品损伤影响后续测量，根据颗粒吸收特性采取高低两个档位出光，在相应档位下按百分比调节实际出光功率。Al_2O_3 和 SiO_2 颗粒吸收普遍较低采用高档位输出模式，高吸收颗粒 Fe_2O_3 和 410 不锈钢颗粒则采用低档位输出模式，使用红外热像仪获取表面温度数据，表面最高温度如图 6 所示。计算激光辐照过程表面最高温升，不同功率密度激光辐照下样品表面 10 s 温升结果如图 7 所示。结果显示 SiO_2 颗粒对镜面表面吸收损耗影响极小与洁净表面相比几乎无变化，Al_2O_3 颗粒满功率下最大温升为 6 ℃；Fe_2O_3 和 410 不锈钢颗粒在功率密度远低于 Al_2O_3 颗粒功率密度下获得更高温升，表明高吸收颗粒是镜面异常温升的重要来源之一。

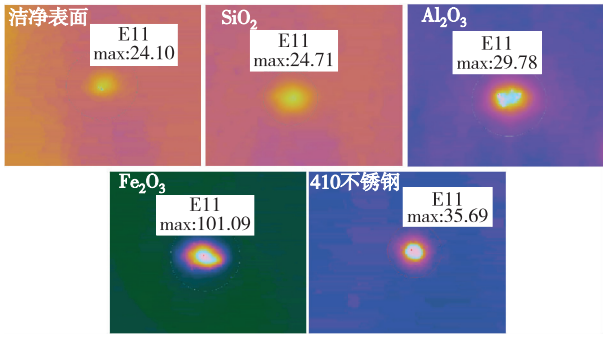
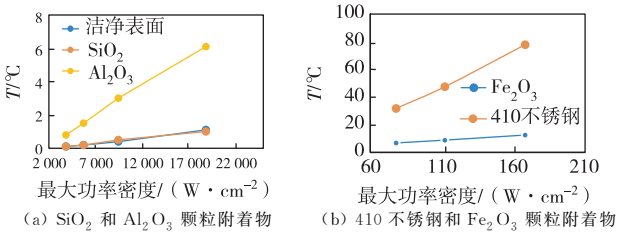


图 6　激光辐照过程样品表面最高温度



（a）SiO_2 和 Al_2O_3 颗粒附着物　（b）410 不锈钢和 Fe_2O_3 颗粒附着物

图 7　受污染表面在 10 s 激光辐照下的表面温升情况

3　有限元仿真分析

采用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 中固体传热模块进行仿真计算，材料相关热物理参数由软件材料库提供，由式(2)～(5)设定模型边界条件和初始值，热源设置则按所采用模型独立设置，对阶梯式吸收模型以面热源形式作用于石英基底表面，并按式(6)设置热源函数；离散分布模型则将每个颗粒物都作为独立热源 Q 作用于石英基底表面。

3.1　洁净镜面及 SiO_2 颗粒吸收损耗仿真分析

洁净镜面表面吸收主要为膜层吸收，理想膜层激光辐照区域各点吸收率均匀分布，且由于洁净镜面温升较低，通过热像仪测量受环境波动影响较大，可通过取平均温升为最高温升 1/3 区域，并取与参考区域温度平均值温度差值来消除由环境波动引起的偏差[18]。将满功率激光 10 s 辐照结果处理后如图 8 所示，温度变化曲线得到改善。对于洁净表面激光辐照过程，使用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立二维轴对称模型进行计算。洁净表面的吸收损耗 $A(r)$ 为定值 A_0，通过调节表面吸收率 A 和对流传热系数 h 进行仿真拟合，结果如图 9 所示，设定初始温度 $T=T_f=23$ ℃，可得洁净状态下表面吸收率为 $A_0=5.49$ ppm。为消除环境温度波动对热像仪温度测量结果的影响，选取参考区域平均温度对热像仪测量结果进行修正，发现 SiO_2 颗粒附着前后温度变化曲线对比如图 10 所示，由实验测量结果可知 SiO_2 颗粒附着前后表面温度变化差异较小，满功率照射 10 s 最大温升差值约为 0.1 ℃小于实验环境自然波动，表明 SiO_2 颗粒对镜面吸收损耗影响极低可忽略。

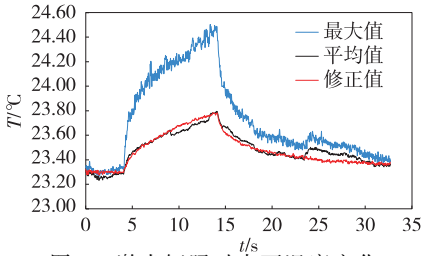


图 8　激光辐照时表面温度变化

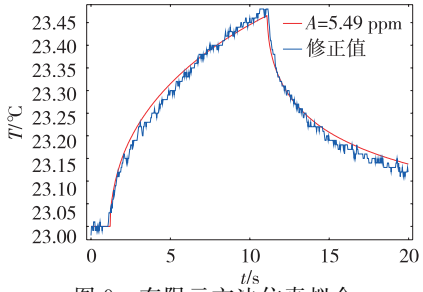


图 9　有限元方法仿真拟合

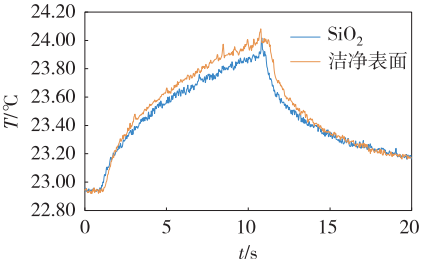


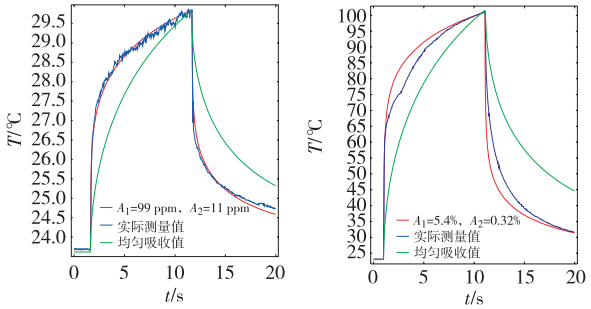
图 10　修正后洁净表面和 SiO_2 颗粒附着后温度变化

3.2 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 颗粒仿真分析

使用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立二维轴对称模型，实验所采用热像仪 FLIR T1040-28°空间分辨率为 0.48 mrad，距离为 1.5 m 时单像素点对应样品表面 705 μm×705 μm 矩形区域，等面积圆半径为 r_0=398 μm。根据颗粒分布特点采用如图 1 所示阶梯式分布吸收模型在样品表面添加载荷，仿真计算所得各功率下单像素点内吸收率如表 1 所示，偏差在 10%以内，且颗粒聚集中心吸收损耗明显高于周围区域，其中满功率下仿真与实验测量数据拟合情况如图 11 所示(图中实验测量温度变化曲线均为考虑环境波动修正后的结果)。与均匀吸收模型相比，采用吸收损耗阶梯式分布模型计算得到的温升曲线与实际测量曲线拟合精度更高，表明阶梯式分布模型是对随机分布密集颗粒的有效近似，能准确反映受污染表面局部吸收损耗。结合颗粒覆盖率由式(8)可得颗粒表面吸收损耗为 $A_P(Al_2O_3)$=142 ppm，$A_P(Fe_2O_3)$=74.3%。

表 1 不同激光功率下计算所得表面吸收率

颗粒	最大功率密度/(W·cm^{-2})	A_1/ppm	A_2/ppm
Al_2O_3	5 838	90	13
	9 730	93	13
	19 460	99	11
Fe_2O_3	284	5.3×10^4	2.2×10^3
	405	4.9×10^4	3.1×10^3
	608	5.4×10^4	3.2×10^3



(a) Al_2O_3 (b) Fe_2O_3

图 11 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 颗粒激光辐照 10 s 温度变化曲线

3.3 410 不锈钢颗粒仿真分析

采用 410 不锈钢颗粒近似为球形，单颗粒物直径远大于其他颗粒物，由显微镜观察可知其附着在镜面上无堆积，数量较少且相对分散，因此按离散分布模型使用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行计算，颗粒分布如图 12 所示。取边长为 705 μm 包含单个颗粒的矩形区域，取其矩形区域温度平均值与热像仪单像素点温度对应，仿真拟合结果与实验测量结果对比如图 13 所示，可得单个 410 不锈钢颗粒表面吸收率为 17.3%。



图 12 410 实际测量值颗粒仿真模型分布

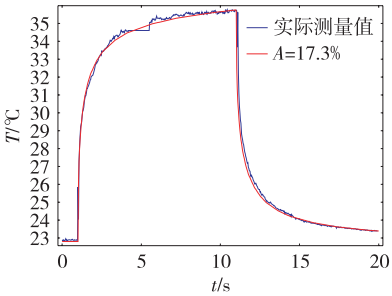


图 13 410 不锈钢颗粒激光辐照 10 s 温度变化曲线

通过上述有限元数据分析可得高反镜表面颗粒污染物表面吸收损耗如图 14 所示。对比三种颗粒吸收模型可以发现采取离散分布模型的 410 不锈钢颗粒仿真结果，可直接获得单个 410 不锈钢颗粒表面吸收率。其次为低吸收 Al_2O_3 颗粒和 Fe_2O_3 颗粒仿真拟合曲线与实际测量存在一定差异，但拟合所得单像素点内吸收率偏差仍在 10%以内。表明该仿真模型具备一定合理性，结果可信度高，可用于分析高反镜表面局部吸收损耗分布特征。

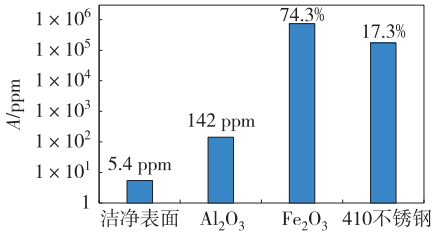


图 14 颗粒物表面吸收损耗

4 结论

本文通过对不同颗粒污染物附着时的表面温度进行测量，确定大气尘埃中高吸收颗粒是导致镜面异常温升的重要原因，并排除在 1 064 nm 波段 SiO_2 和 Al_2O_3 颗粒的吸收风险。考虑红外热像仪的空

间分辨率对局部吸收损耗测量的影响，针对颗粒分布特点建立阶梯式分布和离散化分布两种吸收模型，并进行有限元仿真计算，获得了颗粒污染物表面吸收损耗。仿真结果表明受污染镜面吸收损耗分布呈现明显局域化特征，颗粒聚集中心吸收损耗明显高于周围区域。对比仿真与实验测量结果，验证了模型的有效性，为高反镜表面损伤控制提供了理论支持。

参考文献：

[1] Wang M, Wang B, Miao X, et al. Status of cleanliness maintaining in target beam enclosures in SG Ⅲ facilities and contamination sources analysis[J]. Proc. SPIE, 2014, 9280: 54-60.

[2] 肖　静，张　彬. 光学元件污染对红外光学系统信噪比的影响分析[J]. 红外与激光工程，2012，41(4)：1010-1016.
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.

[3] 黄　聪，游兴海，张　彬. 光学元件表面洁净度对其表面散射特性的影响[J]. 红外与激光工程，2019，48(1)：243-249.
Huang Cong, You Xinghai, Zhang Bin. Influence of surface cleanliness of optical element on its surface scattering characteristics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 243-249.

[4] 孙晓艳，雷泽民，卢兴强，等. 表面颗粒污染物诱导薄光学元件初始损伤的机理[J]. 物理学报，2014，63(13)：136-144.
Sun Xiaoyan, Lei Zemin, Lu Xingqiang, et al. Mechanism of original damage of thin optical components induced by surface particle contamination[J]. Acta Physical Sinica, 2014, 63(13): 136-144.

[5] Li Y, Miao X, Fang Z, et al. Damage behaviors of silica microparticles on fused silica optics under 355 nm high fluence laser[J]. Int. J. Mod. Phys. B, 2022, 36(12n13): 2240068.

[6] Ye H, Cui Z, Yin L, et al. Light-field-enhanced laser damage model for polishing-produced particles in fused silica optical surface[J]. Opt. Laser Technol., 2024, 168: 109905.

[7] 倪晓武，陆　建，贺安之. 激光场对光学薄膜的作用[J]. 强激光与粒子束，1992，4(4)：510-512.
Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. The effect of laser field on optical thin films[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1992, 4(4): 510-512.

[8] Zhao Q, Fan Z, Wang Z. Role of interface absorption in laser-induced local heating of optical coatings[J]. Opt. Eng., 1997, 36(5): 1530-1536.

[9] 赵　强，范正修. 光学薄膜激光损伤机理及阈值改善[J]. 强激光技术进展，1995，5：44-48.
Zhao Qiang, Fan Zhengxiu. Laser damage mechanism and threshold improvement of optical films[J]. Advances in Intense Laser Technology, 1995, 5: 44-48.

[10] Palmer J R. Continuous wave laser damage on optical components[J]. Opt. Eng., 1983, 22(4): 435-446.

[11] Génin F O, Feit M D, Kozlowski M R, et al. Rear-surface laser damage on 355 nm silica optics owing to Fresnel diffraction on front-surface contamination particles[J]. Appl. Opt., 2000, 39(21): 3654-3663.

[12] Ye H, Cui Z, Li Z, et al. Generation of chemical deposits on fused silica optics and their modulation on the light intensity distribution[J]. Appl. Opt., 2022, 61(36): 10669-10680.

[13] Jiang Y, Zhang B, Liu H, et al. Light field modulation of ejected SiO_2 particles on fused silica surface[J]. Eur. Phys. J. D, 2021, 75: 1-12.

[14] Raman R N, Demos S G, Shen N, et al. Damage on fused silica optics caused by laser ablation of surface-bound microparticles[J]. Opt. Express, 2016, 24(3): 2634-2647.

[15] 陈家轩，秦建波，张　帅. 固体污染物对 Al_2O_3 激光诱导热损伤影响的仿真研究[J]. 凝聚态物理学进展，2019，8(3)：69-75.
Chen Jiaxuan, Qin Jianbo, Zhang Shuai. Simulation study on the effect of solid contaminants on the laser-induced hot damage of Al_2O_3[J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2019, 8(3): 69-75.

[16] 张文锋，郭云芝，燕　飞，等. 蓝宝石长波连续激光热力学损伤特性研究[J]. 航空兵器，2016，4(2)：52-55.
Zhang Wenfeng, Guo Yunzhi, Yan Fei, et al. Study on thermodynamics damage characteristics of sapphire from CW laser[J]. Aero Weaponry, 2016, 4(2): 52-55.

[17] 徐　娇，钟哲强，黄人帅，等. 表面杂质诱导薄膜元件的热损伤及其统计特性分析[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(10)：413-420.
Xu Jiao, Zhong Zheqiang, Huang Renshuai, et al. Thermal damages on thin-film components induced by surface impurities and its statistic characteristics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 413-420.

[18] 荆建行，孔明东，王　强，等. 基于红外热像仪的光学薄膜吸收测试方法[J]. 光电工程，2021，48(6)：87-93.
Jin Jianhang, Kong Mingdong, Wang Qiang, et al. Measurement of absorption loss of optical thin-film by infrared thermal imaging[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(6): 87-93.

[19] 顾泽同. 工程热应力[M]. 北京：国防工业出版社，1987.

作者简介：

江文昌(1996—)，男，江西省九江市人，硕士研究生，主要从事激光与物质相互作用和激光系统多物理场仿真方面的研究；

史建亮(1979—)，男，博士，副研究员，硕士生导师，主要研究方向为光机系统集成与仿真技术等。