

中红外高功率激光系统强光元件热损伤特性

韩凯*, 闫宝珠, 许晓军, 刘泽金

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 依托闭腔式氟化钷中红外高能激光器, 测量了元件表面污染物在连续波高能激光 (3.16 kW/cm^2) 辐照下的温度, 测量发现污染物在 1s 内达到了热平衡, 温度维持在 1720 K; 建立了描述强光辐照下污染物热平衡过程的物理模型, 分析了污染物导致强光元件热损伤的物理机制; 研究发现污染物的尺度对强光元件的热损伤具有重要影响. 对于中红外高反射强光学元件, 若污染物的尺度小于 $20 \mu\text{m}$ 一般不会造成强光元件的损伤, 若污染物的尺度大于 $200 \mu\text{m}$ 一般会导致强光元件的损伤. 研究结果对于提高强光元件的抗损伤性能, 保障中红外高能激光系统稳定运行具有重要意义.

关键词: 中红外高能激光系统; 热损伤; 临界尺度; 闭腔式激光器

中图分类号: O434.3 **文献标识码:** A

Thermal damage mechanism of the optical element used in mid-infrared high power laser system

HAN Kai*, YAN Bao-Zhu, XU Xiao-Jun, LIU Ze-Jin

(College of OptoElectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Based on the closed-cavity mid-infrared laser, the temperature of the contaminant was measured when it was irradiated by a cw high energy laser with power intensity 3.16 kW/cm^2 . It was found that the contaminant achieves thermal equilibrium in a second and then the temperature stays at 1720 K. A physical model was established to describe the process of the thermal equilibrium. The mechanism of the mirror's thermal damage was analyzed. It shows that the contaminant size plays an important role in the thermal damage of the optical mirror. Only when the contaminant size is smaller than a critical size ($\sim 20 \mu\text{m}$), the contaminant may reach thermal equilibrium and the optical mirror work well in the high energy laser system. If the contaminant size is quite large ($> 200 \mu\text{m}$), the optical mirror will be damaged under the irradiation of high energy laser. The results are of great help for improving the anti-damage capability of the mirror and maintaining the security of the high energy laser system.

Key words: mid-infrared high energy laser system, thermal damage, critical size, closed-cavity laser

PACS: 42.60.-v, 44.40.+a, 61.80.-x, 42.55.Ks

引言

超低吸收强光元件是中红外高能激光系统的关键元器件, 其吸收性能直接影响着中红外高能激光系统的输出光束质量、系统可靠性和系统寿命^[1-2]. 由于基底疵病、膜层缺陷、表面污染物等因素的影响, 强光元件表面的吸收率并不是处处相等的, 而是

存在着若干吸收峰. 在连续波强激光辐照下, 这些吸收峰吸收了激光能量, 成为局部“热源”, 随着热量的不断积累, 容易导致光学薄膜的熔融损伤, 甚至造成整个中红外高能激光系统灾难性的破坏^[3-4].

基底疵病、膜层缺陷的尺度较小, 一般小于微米量级; 而污染物具有很宽的尺度谱, 从亚微米量级一直延伸到毫米量级^[5-7]. 此外, 污染物产生的环节更

收稿日期: 2016-05-09, 修回日期: 2016-10-07

Received date: 2016-05-09, revised date: 2016-10-07

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2015AAXX3037)

Foundation items: Supporte by National Hi-tech Research and Development Program of China (863 Program) 2015AAXX3037)

作者简介 (Biography): 韩凯 (1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为高能激光技术及应用.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hankai0071@nudt.edu.cn

加广泛,强光元件在制造、保存、转运、使用环节中都有可能沾染污染物,即使在使用前对强光元件进行了充分清洁,在 高能激光系统运行过程中仍可能有新的污染物附着到强光元件上^[8-9]. 这些因素对污染物的防控造成了一定的难度. 当前,对污染物造成光学元件损伤的研究主要集中在高峰值功率脉冲激光作用的场合;对于高平均功率连续激光作用下,污染物造成强光元件热损伤的研究相对较少^[10-12]. 本文依托闭腔式氟化氙中红外高能激光器,测量了强光元件表面的污染物在中红外连续波高能激光辐照下的温度;建立了理论模型,分析了污染物在强光辐照下的热量输运过程,阐明了污染物尺度对强光元件热损伤的影响.

1 污染物在强光辐照下的温度测量

强光元件经过清洁后,一般不会有 大尺度的污染物附着,但是在高能激光系统运行过程中,不可避免地存在偶发状况,若从外部环境中飘来的大尺度污染物附着到元件表面,极易造成强光元件的损伤^[13-14]. 文献[15]描述的氟化氙闭腔激光器并非工作在超净间中,而是工作在普通的厂房里,空气中漂浮的灰尘较多,灰尘就是一种非常常见的污染物^[15]. 关闭闭腔激光器的气体过滤净化装置,在其出光运行过程中,可采用可见光相机 (Camara, 1500M-CL, THORLABS Inc.) 监测光路中灰尘飞舞的状况. 当闭腔激光器运行时,闭腔盒中的压强维持在 100 ~ 120 Pa 之间,处于近真空状态;闭腔激光器工作中红外波段,输出波长为 3.6 ~ 4.1 μm ;辐照在腔镜上的功率密度达到 3.16 kW/cm^2 ,光斑尺寸为 2.1 cm^2 . 增益气体和稀释气体在高速流动过程中会把闭腔盒中的灰尘吹扬起来,采用可见光相机监视腔镜附近的灰尘,相机的积分时间设置为 20 ms. 图 1 展示了强激光辐照下腔镜附近灰尘飞舞的

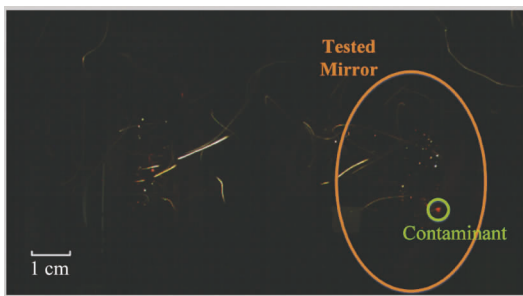


图 1 中红外闭腔式高能激光器运行时灰尘飞舞的照片
Fig. 1 The flying dust irradiated by mid-infrared high energy laser

情景.

在强激光辐照下,某些灰尘吸收了激光能量后,温度急剧上升,热辐射光谱中出现了可见光成分. 部分高温的灰尘被闭腔中的气流吹动飞舞,在相机视场内形成了一些亮线;部分高温的灰尘附着到了腔镜上,形成了一些亮点. 在腔镜右下方附着的灰尘尺度较大,从相机拍摄的照片判断,该灰尘的尺度在 0.5 ~ 1 mm 之间. 闭腔激光器 20 s 出光结束后,打开闭腔盒,观察附着了灰尘的腔镜,发现大尺度灰尘附着处的光学薄膜出现了严重的损坏,如图 2 所示.

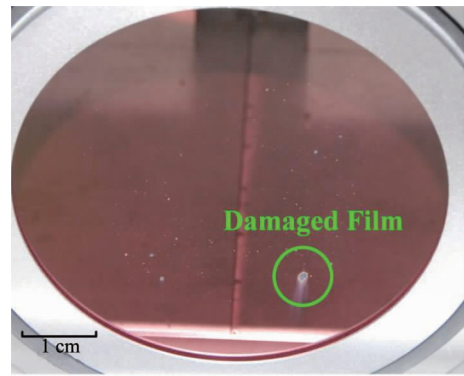


图 2 大尺度灰尘导致的强光镜损伤
Fig. 2 The damage of the mirror caused by large dust

从图 2 可以看出,大尺度灰尘附着的位置出现了严重的损伤,其它灰尘附着的位置也出现了一定程度的损伤. 为了进一步分析污染物造成强光元件损伤的物理机制,在线测量了污染物在强光辐照下的温升情况. 在闭腔激光器出光前,对反射镜和闭腔盒进行充分的清洁,只在反射镜上保留一颗小尺度 (半径约为 10 μm) 的灰尘,如图 4 所示. 在闭腔激光器出光过程中,测量了腔镜表面附着的灰尘的辐射光谱,同时采用可见光相机 (Camara, 1500M-CL, with C-Mount Lens, THORLABS Inc.) 监视灰尘在强光辐照下的发光情况. 光谱测量设备由自搭的微区成像系统和可见光光谱仪 (OSA, QEPRO-ABS, Ocean Optics Inc.) 组成,测量光路如图 3 所示.

首先在闭腔激光器未出光时,用可见光把灰尘照亮,然后仔细调节微区成像系统的位置和指向,使之精确地对准腔镜上附着的灰尘,如图 4 所示. 自搭的微区成像系统能够高效、准确的收集远距离外 (1.5 m) 某一微区的光辐射能量,指向精度达到 1",探测区域的尺寸为 $\Phi 2.4 \text{ mm}$.

闭腔激光器运行时,打开气体过滤净化装置,尽可能地避免在出光过程中引入新的灰尘. 激光振荡

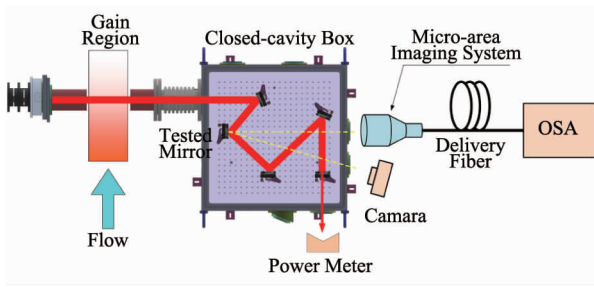


图3 强光辐照下灰尘热辐射光谱的测量
Fig. 3 Measurement of the thermal radiation of the dust irradiated by high energy laser

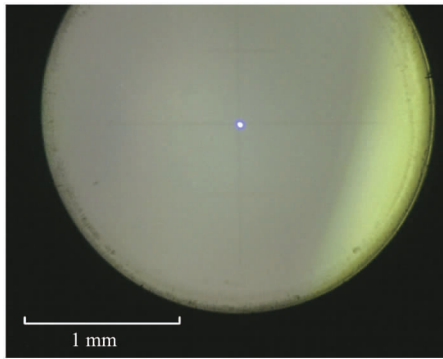


图4 采用微区成像系统对准腔镜表面的灰尘
Fig. 4 Aiming at the dust with micro-area imaging system

建立后,元件表面的灰尘在强光的辐照下,温度升高,向外热辐射出可见光.从可见光相机记录的灰尘热辐射图像中可以看出,在强激光的辐照下,镜面的灰尘已经向外辐射出了可见光.但灰尘的热辐射能量非常微弱,因此,光谱测量时将光谱仪的积分时间设置为 500 ms,这样在闭腔激光器出光 10 s 的过程中,可记录 20 条光谱曲线,测量结果如图 5 所示.

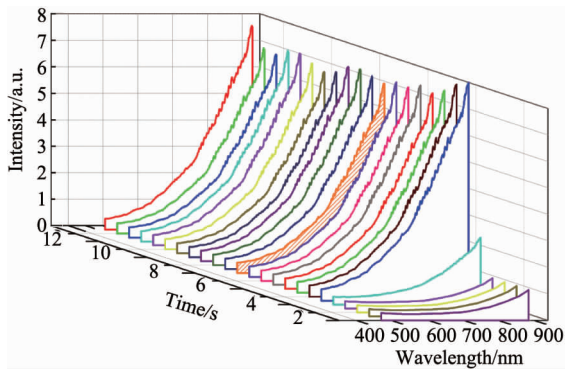


图5 强光辐照 10 s 过程中元件表面灰尘的热辐射光谱
Fig. 5 The thermal radiation spectra of the dust irradiated by mid-infrared high energy laser in 10 s

图 5 展示了闭腔激光器 10 s 出光过程中,腔镜表面灰尘的热辐射光谱.图中的各条光谱数据已根

据微区成像系统和传能光纤的光谱透过率数据做了标定.从图 5 中可以看出,元件表面污染物在强光的辐照下,向外辐射的光谱为单纯的热辐射谱,并未出现谱线结构.这说明强光辐照仅仅导致了元件表面污染物温度的升高,并未出现等离子体激发过程和燃烧过程.假定元件表面污染物为灰体,根据灰体辐射式(1),对光谱曲线做热辐射温度拟合,可得到元件表面污染物的温度^[16].

$$E(\lambda, T) = \varepsilon \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}, \quad (1)$$

式中, T 为绝对温度; λ 为波长; h 为普朗克常数, 6.626×10^{-34} (J · s); ε 为灰体的辐射率; c 为真空中的光速 3×10^8 (m/s); k 为玻耳兹曼常数 1.38×10^{-23} (J/K); $E(\lambda, T)$ 代表温度为 T 的灰体材料在波长 λ 处的光谱辐射强度,单位为 $W/(m^2 \cdot \mu m)$. 对出光过程中采集到的每一条光谱曲线做热辐射温度拟合,可得到污染物在出光过程中的温度变化曲线,如图 6 所示.

此处需要说明,在常温状态下,灰尘的热辐射极

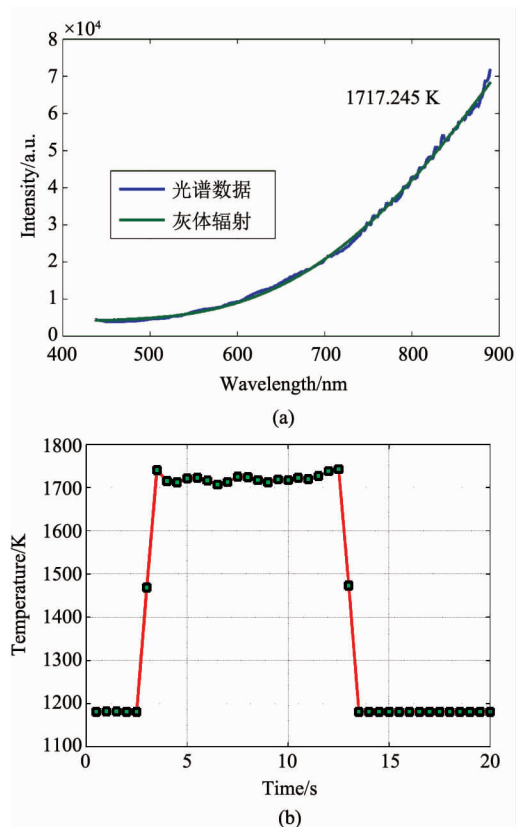


图6 腔镜表面的灰尘在强光辐照下的温度 a. 热辐射光谱的温度拟合, b. 辐照 10 s 过程中污染物的温度变化
Fig. 6 Temperature of the dust irradiated by the mid-infrared high energy laser a. The temperature fitting of the spectrum data, b. The evolution of the dust's temperature in 10 s

其微弱,光谱仪采集的热辐射信号被淹没在噪声里,图 6(b)中未出光(0~3 s)和出光结束后(14~20 s)显示的温度 1 200 K 是对噪声做热辐射温度拟合的结果,并不代表真实的温度数据.从图 6(b)中可以看出,当强光照到灰尘上后,灰尘的温度迅速(<1 s)上升到 1 720 K,并且在出光过程中保持稳定.也就是说,在强光辐照下,腔镜表面的灰尘达到了很高的温度.然而,通过热像仪观察,腔镜整体仍处于常温状态,这样灰尘一定会通过热传导的方式向腔镜的膜层传输能量,使腔镜在灰尘附着处产生了吸收峰.

2 污染物造成强光元件热损伤的物理模型

在强光辐照下尺度很小的污染物会蒸发掉,尺度稍大的污染物会在某个温度值上达到热平衡.对于中红外闭腔激光器腔镜上的污染物而言,由于整个腔镜处于近真空(100~120 Pa)的环境中,那么污染物与周围环境热量交换的渠道主要有两个:一是通过热辐射与周围环境换热,二是将热量以热传导的方式传递给腔镜的高反射膜.强光元件表面污染物在强光辐照下的能量状态可用式(2)描述.

$$q_1 S_1 \eta dt + \sigma T_0^4 S_0 \alpha_{T_0} dt = q_2 S_2 dt + \sigma T^4 S_0 \varepsilon_T dt + \rho V C_p dT \quad (2)$$

式中 q_1 表示强激光的辐照功率密度,单位为 kW/cm^2 ; S_1 表示污染物垂直于激光方向的截面积; η 表示污染物对强激光的综合吸收率; dt 表示强光辐照的时间微元; s 为斯特藩—玻耳兹曼常数 $5.669 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_0 表示周围环境在 t 时刻的温度, T 表示污染物在 t 时刻的温度; S_0 表示污染物的表面积; α_{T_0} 表示污染物对温度为 T_0 的热辐射的吸收率; q_2 表示污染物向膜层传导的平均热流密度,单位为 kW/cm^2 ; S_2 表示污染物与膜层的实际接触面积; ε_T 表示污染物在温度 T 下的热辐射率; ρ 表示污染物的密度; V 表示污染物的体积; C_p 表示污染物的定压热容.式(2)左边第二项与其它项相比是一个小量,可以忽略;当污染物在强光辐照下达到热平衡时,污染物的温度不再随时间变化,即 $\frac{dT}{dt} = 0$.那么在热平衡条件下,式(2)可进一步简化为,

$$q_1 S_1 \eta = q_2 S_2 + \sigma T^4 S_0 \varepsilon_T \quad (3)$$

式(3)表示在热平衡状态下元件表面污染物吸收了激光能量后,通过两种渠道散热,一种是将热量传导给膜层,另一种是通过热辐射把能量散发到周围环境中.其中,元件表面污染物向膜层导热的热流密度

q_2 关系到强光元件的损伤.式(3)中的参数 S_1 、 η 、 S_2 、 S_0 、 ε_T 强烈的依赖于污染物的材质、尺度、形状以及与膜层的粘附状态^[17].为了顺利求解式(3),须对物理模型做必要的假设.通过物质成分分析,厂房中的灰尘以 SiO_2 为主^[8],式(3)中相关的热物性参数、光学参数设置为 SiO_2 的相应参数.污染物的形状千差万别,难以统一描述,此处假定污染物为球形.强激光的辐照功率密度 q_1 设定为 $3.16 \text{ kW}/\text{cm}^2$,根据上节的测量结果,元件表面污染物在 1 720 K 达到了热平衡,即 $T = 1 720 \text{ K}$, SiO_2 球在 1 720 K 下的热辐射率 ε_T 为 0.75.污染物与膜层之间能够传导热流的实际接触面积 S_2 取决于污染物与膜层之间的微观粘附状态.文献[18]描述了这种粘附传热的情况,由于两种接触物体并非绝对光滑,而是存在一定的粗糙度,因此能够真实传导热流的面积远小于两种物体的表观接触面积^[18].通常情况下,互相粘附的两种物体之间的实际接触面积为表观接触面积的千分之一量级.此处假定实际接触面积 S_2 为污染物横截面积 S_1 的 1‰.

污染物对激光的综合吸收率 η 是与污染物的尺度 r 紧密相关的,依赖关系须根据污染物尺度 r 与辐照激光波长 λ 的相对大小,分别采用几何光学理论和 Mie 散射理论求解.对于中心波长为 $3.8 \mu\text{m}$ 的氟化氙中红外激光,当污染物的半径 $r > 10 \mu\text{m}$ 时,采用几何光学理论求解.将辐照激光视为具有各自独立路径的平行光线的集合,激光束入射到 SiO_2 球表面上后,一部分反射到周围空间,另一部分入射进 SiO_2 球,在球内部传播一段距离后,在球的内表面处产生二次反射,如图 7 所示.

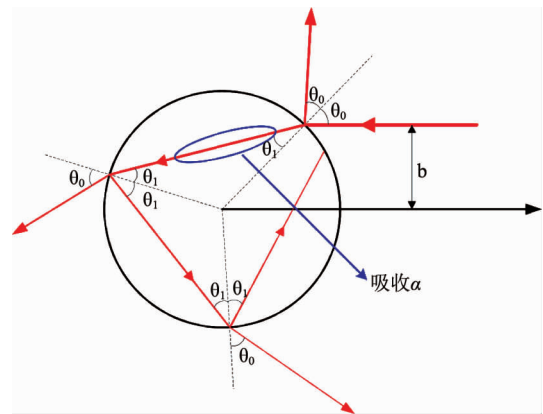


图 7 球形污染物吸收激光能量示意图

Fig. 7 The scheme of the laser energy absorbed by the spherical contaminant

根据图 7 给出的几何关系可以求得综合吸收率

η 与污染物的尺度 r 的依赖关系为,

$$\eta = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r \frac{(1-R)(1-e^{-\alpha d})}{1-Re^{-\alpha d}} 2\pi b \cdot db, \quad (4)$$

式中, b 为入射光相对于球心的截距, α 为污染物对激光的线性吸收系数, 此处 $\alpha = 0.4 \text{ cm}^{-1}$, R 为激光在污染物界面上的反射率, 可根据菲涅耳公式可求得. 这样就可以求出当污染物半径 $r > 10 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 综合吸收率 η 与污染物的尺度 r 的依赖关系

当污染物的尺度较小 ($r < 10 \text{ }\mu\text{m}$) 时, 污染物的尺度可与辐照激光波长相比拟, 激光的波动性无法忽略, 须采用 Mie 散射理论求解综合吸收率 h . 根据 Mie 散射理论, 综合吸收率 η 可表示为吸收截面与几何截面之比, 即,

$$\eta = \frac{\sigma_{ab}}{\pi r^2} = Q_{ab} = Q_{ex} - Q_{sc}, \quad (5)$$

上式中, σ_{ab} 为污染物的吸收截面, Q_{ab} 、 Q_{ex} 、 Q_{sc} 分别为污染物的吸收效率因子、消光效率因子和散射效率因子, 其表达式为,

$$Q_{sc} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 - |b_n|^2), \quad (6)$$

$$Q_{ex} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [Re(a_n + b_n)], \quad (7)$$

式中, $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$ 为污染物粒子的尺度参数; a_n 和 b_n 是以尺度参数 x 和相对折射率 m 为宗量的复函数. 这样根据式(5)~(7)就可以求出, 当污染物半径 $r < 10 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 综合吸收率 η 与污染物的尺度 r 的依赖关系.

当污染物尺度小于 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 污染物对激光的吸收能力极其微弱 (< 0.01), 随着污染物尺度的增大, 污染物的综合吸收率近似以指数方式增大; 当污染物的尺度增大到毫米量级时, 污染物的综合吸收率趋向于 1.

3 污染物尺度对强光元件热损伤的影响

根据 3 节给出的物理模型, 分别计算了半径为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $200 \text{ }\mu\text{m}$ 的污染物 (以球形 SiO_2 灰尘为例) 在强光辐照下的散热方式, 结果如图 8 所示.

从图 8 可以看出, 在强光辐照下, 小尺度和大尺度污染物的散热渠道差异很大. 主要体现在两个方面. 一方面是散热总量不同, 小尺度污染物的散热总量较小, 大尺度污染物的散热总量很大, 半径为 $200 \text{ }\mu\text{m}$ 的污染物的散热总量比半径为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 的污染物大 6842 倍; 另一方面, 总散热量在两种散热渠道上

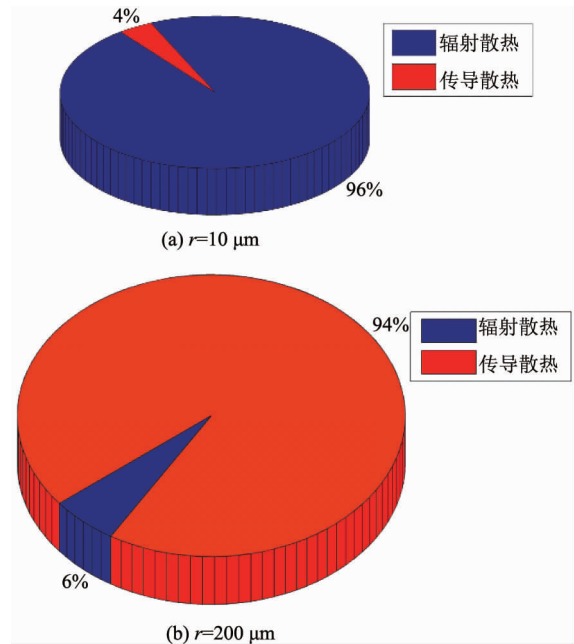


图 8 不同尺度污染物的散热状况

Fig. 8 The heat dissipation of various contaminants

分配的比例不同, 小尺度污染物主要靠自身的热辐射进行散热, 大尺度污染物主要靠向膜层传导热量散热. 半径为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 的污染物辐射散热量占散热总量的 96%, 传导散热量只占散热总量的 4%, 半径为 $200 \text{ }\mu\text{m}$ 的污染物辐射散热量只占散热总量的 6%, 传导散热量占散热总量的 94%. 因此, 大尺度污染物传导给膜层的热量远远大于小尺度污染物传导给膜层的热量.

从式(3)可以看出, 当污染物尺度增大时, 其截面积以 2 次方形式增大, 综合吸收率近似以指数形式增大, 这意味着污染物的散热总量 ($q_1 \cdot S_1 \cdot \eta$) 急剧增大; 污染物的辐射散热量 ($\sigma \cdot T^4 \cdot S_0 \cdot \varepsilon_r$) 与污染物尺度的 2 次方成正比, 与温度的 4 次方成正比, 那么随着污染物尺度的增大, 辐射散热量的增加相对缓慢, 污染物传导给膜层的热量则急剧增大. 在强辐照下, 污染物导致强光元件出现热损伤的原因就在于污染物向强光元件的膜层传导了过多的热量, 超过了膜层的损伤阈值.

然而, 实际污染物的成分可能多种多样, 实际污染物的形状更是千差万别, 采用球形 SiO_2 灰尘的热物性参数不足以准确描述实际污染物的辐射散热能力. 因此, 根据式(3)计算了两种极端情况下污染物传导给光学薄膜的热流密度, 一种情况是污染物仅通过热传导的方式散热, 自身的热辐射量为零 (T 很小或 ε_r 为 0); 另一种情况是污染物以最大热辐射

能力散热 (T 为污染物的沸点, ε_T 为 1). 那么, 污染物向光学薄膜传导热量的热流密度应处于这两种极端情况画出的边界线之间. 另外, 根据文献 [19] 的研究, 对于中红外高反射光学薄膜 (YbF₃/ZnSe 周期介质膜), 污染物向膜层导热热流密度须小于 3 kW/cm², 否则会引起膜层的熔融破坏^[19], 据此可设置一条安全线, 污染物向膜层导热热流密度在安全线以下才能保证膜层不受损伤, 如图 9 所示.

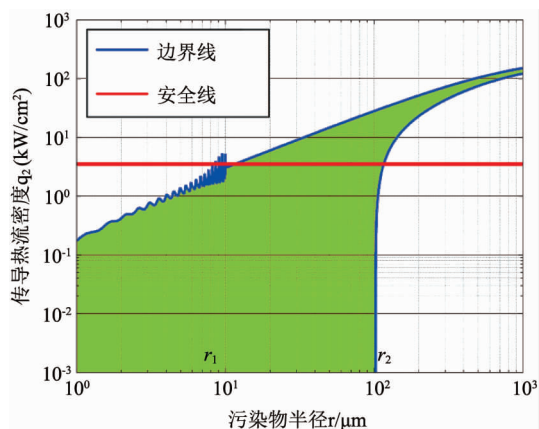


图 9 污染物向膜层导热热流密度与污染物尺度的关系
Fig. 9 The dependence of the heat flux on the contaminant size

从图 9 中可以看出, 存在两个临界尺度 r_1 、 r_2 . 半径小于 r_1 的污染物向膜层导热热流密度均在安全线以下, 这意味着半径小于 r_1 的小尺度污染物均不会造成膜层损伤; 半径大于 r_2 的污染物向膜层导热热流密度均在安全线以上, 这意味着半径大于 r_2 的大尺度污染物一定会造成膜层的损伤; 半径介于 r_1 和 r_2 之间的污染物可能会造成膜层损伤, 也可能不会造成膜层损伤, 这要根据实际污染物的材质、形状、微观接触状态进行更加细致、具体的研究. 对于中红外高反射光学薄膜的情况, r_1 为 10.8 μm , r_2 为 102 μm .

4 结论

污染物是造成强光光学元件热损伤的重要原因. 依托高平均功率氟化氙中红外闭腔激光器, 观察了强光元件表面污染物在中红外强激光辐照下的状态, 并且测量了小尺度污染物在强光辐照下发出的热辐射光谱. 结果表明, 污染物在强激光的辐照下, 温度急剧升高, 很快达到热平衡状态, 平衡温度为 1720 K. 依据强光辐照下污染物的热平衡条件, 建立了污染物造成强光元件表面损伤的物理模型, 分析

了污染物导致强光元件热损伤的物理机制, 计算了在中红外强激光辐照下不同尺度的污染物向膜层传导热量的热流密度. 研究发现, 存在两个临界尺度 r_1 、 r_2 , 当污染物的半径小于 r_1 时, 强光辐照下污染物传导给元件表面膜层的热流密度较小, 一般不会造成元件膜层的损伤, 当污染物的半径大于 r_2 时, 污染物传导给元件表面膜层的热流密度很大, 通常会造元件膜层的损伤. 对于中红外高反射光学薄膜的情况, r_1 为 10.8 μm , r_2 为 102 μm . 研究结果对于避免污染物造成强光光学元件热损伤、保障氟化氙中红外高能激光系统稳定运行具有重要意义.

References

- [1] Alexander J G, Arthur H G. Laser induced damage of optical elements-a status report [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12** (4): 637-649.
- [2] Manenkov A A. Fundamental mechanisms of laser-induced damage in optical materials: today's state of understanding and problems [J]. *Opt. Engineering*, 2014, **53** (1): 10901.
- [3] Roger M Wood. *Laser-Induced Damage of Optical Materials* [M]. London: Institute of Physics Publishing, 2003, 12-25.
- [4] Carr C W, Radousky H B, Demos S G. Wavelength dependence of laser-induced damage: determining the damage initiation mechanisms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91** (12): 1204-1207.
- [5] 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.
- [6] Zhang Q H, Pan F, Luo J, et al. Optical and laser damage properties of HfO₂/Al₂O₃ thin films deposited by atomic layer deposition [J]. *J. Alloys Compd.*, 2016, **659**: 288-294.
- [7] Sudrie L, Couairon A, Franco M, et al. Femtosecond laser-induced damage and filamentary propagation in fused silica [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89** (18): 186601.
- [8] Zheng W G, Zu X T, Yuan X D, et al. *Laser-induced damage of the high power laser device and related physical problems* [M]. Beijing: Science Press (郑万国, 祖小涛, 袁晓东, 等. 高功率激光装置的负载能力及其相关物理问题. 北京: 科学出版社), 2014, 190-200.
- [9] Cheng X F, Miao X X, Wang H B, et al. Surface contaminant control technologies to improve laser damage resistance of optics [J]. *Adv. Condens. Matter Phys.*, 2014, **41**: 974245.
- [10] ZHU Ren-Jiang, PAN Ying-Jun, ZHANG Peng, et al. Numerical analysis of thermal effects in semiconductor disk laser with heatspreader [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (朱仁江, 潘英俊, 张鹏, 等. 半导体薄片激光器窗口散热模式的热效应. *红外与毫米波学报*), 2014, **33** (3): 272-277.
- [11] Xing H, Zhu M, Chai Y, et al. Improving laser damage resistance of 355nm high-reflective coatings by co-evaporated interfaces [J]. *Opt. Lett.*, 2016, **41** (6): 1253.
- [12] ZHU Zhi-Wu, CHENG Xiang-Ai, WANG Dong, et al.

- Damage and its mechanism to the visible wavelength filter irradiated by femtosecond laser [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (朱志武, 程湘爱, 王东, 等. 多波长飞秒激光损伤可见光滤光片的实验及机理. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(4): 330 - 335.
- [13] ZHU Rong-Zhen, WANG Rui, JIANG Tian, *et al.* Research of laser irradiation effect on monocrystalline silicon solar cells and single junction GaAs solar cells[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (朱荣臻, 王睿, 江天, 等. 单晶 Si、单结 GaAs 太阳能电池的激光损伤特性对比研究. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(4): 479 - 485.
- [14] Qiu S R, Norton M A, Raman R N, *et al.* Impact of laser-contaminant interaction on the performance of the protective capping layer of 1 omega high-reflection mirror coatings[J]. *Appl. Opt.*, 2015, **54**(29): 8607 - 8616.
- [15] Fang X T, Yuan S F, Liu W G, *et al.* Absorption measurement of optical thin films under high power density with a Closed Cavity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2015, **13**(3): 033101.
- [16] YU Qi-Zheng. *Principle of radiation heat transfer* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press (余其铮. *辐射换热原理*, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社), 2000:101 - 115.
- [17] Holman J P. *Heat transfer (10th Edition)* [M]. New York: Addison Wesley Press, 2014, 317 - 417.
- [18] MA Qing-Fang, FANG Rong-Sheng, XIANG Li-Cheng, *et al.* *Practical handbook of thermophysical properties* [M]. Beijing: China Agricultural Machinery Press (马庆芳, 方荣生, 项立成, 等. *实用热物性手册*, 北京: 中国农业机械出版社), 2003:965 - 1068.
- [19] HUANG Wei. Study on thin film technology for mid-far-infrared laser coatings [D] Chengdu: Sichuan University (黄伟 中远红外激光薄膜技术研究. 成都: 四川大学), 2005:46 - 72.