

# 提高抗激光损伤性能技术研究进展

刘爽<sup>1</sup>, 高雪松<sup>2\*</sup>, 田宗军<sup>1</sup>, 赵全忠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学机电学院, 南京 江苏 210016;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘要** 讨论了国内外提高抗激光损伤性能的技术方法, 指出不同方法的优势。主要从微观组织、材料体系、涂层制备方法、损伤阈值、反射率和吸收率等几个角度展开论述。综述了不同材料制备的涂层提高抗激光损伤性能的研究进展, 从微观组织、组织颗粒、新研究方法方面展望未来的研究方向; 研究颗粒直径对抗激光损伤性能的影响, 并将 MATLAB、ANSYS 等软件应用到提高抗激光损伤性能研究领域。

**关键词** 材料; 抗激光损伤性能; 激光材料制造; 微观形貌; 保护涂层

中图分类号 V261.8; TJ95

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.110002

## Research Advances in Improving Laser Damage Resistance

Liu Shuang<sup>1</sup>, Gao Xuesong<sup>2\*</sup>, Tian Zongjun<sup>1</sup>, Zhao Quanzhong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Mechatronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing, Jiangsu 210016, China;

<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** The technical methods of improving the anti-laser damage performance in the world are discussed. The advantages of different methods to improve the laser damage resistance are pointed out. Microstructure, material system, coating fabrication method, damage threshold, reflectivity, absorptivity, etc. are mainly illustrated. We summarize the research progress in manufacturing different materials coatings to improve the anti-laser damage performance. From the perspectives of microstructure, particles, and new research methods, the future research directions are prospected as follows: the effect of particle diameter on laser damage performance will be studied, and such programs as MATLAB and ANSYS will be used in the anti-laser damage performance research.

**Key words** materials; laser damage resistance; laser material processing; microstructure; protective coatings

**OCIS codes** 160.3380; 330.3350; 230.4000; 310.1515

## 1 引言

我国激光武器的研究始于 20 世纪 60 年代。1964 年我国最早的激光科学研究基地——中国科学院上海光学精密机械研究所成立, 以此为标志开始了我国高能激光器、激光装备、激光武器的系统研究之路<sup>[1]</sup>。经过半个世纪的发展, 我国激光武器取得巨大成就。2014 年“低空卫士”激光防御系统正式亮相, 成功击落固定翼、多旋翼、直升机等多种小型航空器 30 余架次, 击落率 100%。随着国产高性

能超大功率激光器研究的进步, 如中国科学院上海光学精密机械研究所研制的神光 2 激光器已实现全球同类激光器迄今为止最大功率( $10^{15}$  W)的输出, 我国的激光武器将向功率更大、集成化程度更高的方向发展, 为全军提供更先进的防御手段<sup>[2]</sup>。

随着高功率激光武器逐渐进入实战应用阶段, 激光防护技术的研究备受关注。激光防护技术主要通过材料技术实现, 比如薄膜类、结构类、涂层类。薄膜类主要应用于卫星光学系统和传感器激光防护, 方法以镀膜为主。结构类主要是改变结构实现

收稿日期: 2018-03-29; 修回日期: 2018-05-22; 录用日期: 2018-05-28

基金项目: 江苏省基础研究科学基金(BK20161476)、国家自然科学基金青年科学基金(51605473)、江苏省科技项目(BE2015029)

\* E-mail: gaouxuesong@siom.ac.cn

功能一体化,进而达到防护目的。近些年激光武器的功率极大,对激光防护技术要求极高,因此国内外掀起了抗激光防护涂层材料的研究热潮<sup>[3]</sup>。

## 2 材料体系研究进展

石墨具有高熔点、高热导率,但其线膨胀系数较低。该材料已应用在聚变装置中,作为第一壁挂瓦和偏滤器板材料使用。面对等离子体材料(PEM)时石墨在工作过程中会出现两个现象,一个是溅射腐蚀现象,另一个是高热负荷热冲击。溅射腐蚀会导致等离子的不稳定,产生化学溅射和辐照升华。高热负荷热冲击会导致材料表面局部温度迅速升高,致使材料发生局部升华、熔化,严重时会有剥落现象。如果发生材料剥落,有可能造成极端等离子体破裂,意味着局部可能在毫秒量级时间内,受到高达  $100 \text{ mJ/m}^2$  能量密度的热冲击,也就是说石墨具有良好的抗热冲击性能<sup>[4]</sup>。

一般来说,抗激光损伤材料主要是陶瓷。陶瓷材料具有良好的高温稳定性、低而稳定的热传导系数,是综合性能较好的激光防护涂层之一,具有优异的抗激光损伤性能<sup>[5-12]</sup>。姜玲燕等<sup>[9]</sup>针对石墨、阳极氧化铝、国外某氧化铝及黑色微弧氧化铝涂层的抗连续激光损伤性能,对比测定了抗激光损伤阈值和反射率,结果表明氧化铝的抗激光损伤性能优于石墨,损伤阈值可达  $16 \text{ kW/cm}^2$ ;反射率测试结果表明微弧氧化铝对激光的吸收大于阳极氧化铝。张天宇等<sup>[10]</sup>针对铝合金基材设计了  $\text{ZrO}_2$  陶瓷涂层,涂层厚度为  $0.3 \text{ mm}$ ,采用平均功率密度  $700 \text{ W/cm}^2$  的激光辐照  $60 \text{ s}$ ,样品没有熔化,辐照区域颜色变白,对近红外光的反射率变大。

目前诸多学者还通过改进涂层结构来提高抗激光损伤性能。国外学者采用降低涂层表面粗糙度的方法提高涂层对激光的反射率,进而提高抗激光损伤性能。还有一些学者将化学方法运用到此领域,一般方式是腐蚀涂层进而提高其抗激光损伤阈值,改善抗激光损伤性能。在抗激光损伤材料体系建立的过程中,产生一些看似和材料无关的方法,但这些方法都是在材料的基础上演变而来。综上所述,抗激光损伤的材料体系的发展已经超出了材料本身,未来一定还会出现抗激光损伤性能更佳的材料,也很可能是在现有材料的基础上加以改进和创造。

## 3 抗激光损伤涂层制造方法进展

目前涂层的制作方法很多,相关研究也是不计

其数,但只针对涂层抗激光损伤性能的研究并不多见,近几年国内外学者在这一领域的研究逐渐增多。涂层的制作方法一般为树脂涂层、空气喷涂、等离子喷涂、激光熔覆等。从涂层的发展可以看出,其性能在不断提高。激光熔覆制作的涂层属于冶金结合,其结合强度、组织结构等都优于其他方法制备的涂层。

### 3.1 石墨改性酚醛树脂涂层

将鳞片石墨添加到酚醛树脂中,使用分散机对其分散  $30\sim 60 \text{ min}$ ,制得分散均匀的涂布浆料;使用体式涂布机将制得的浆料均匀涂覆在铝合金基体表面,涂覆速度为  $20\sim 40 \text{ mm/s}$ ,涂覆温度为  $30\sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,涂覆厚度为  $1 \text{ mm}$ 。然后放入烘箱中进行固化,固化工艺参数为  $40\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$  保温  $5 \text{ h}$ ,然后  $80\sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$  保温,即可制得鳞片石墨改性酚醛树脂涂层。结果表明,酚醛树脂涂层在激光辐照初期会裂解生成石墨化程度较高且相对致密的残炭,辐照后期会生成石墨化程度较低且多孔疏松的残炭,后者以其高黏附性、低热导性可以更有效地提高激光辐照后涂层的结合强度,减轻激光对树脂的损伤<sup>[13]</sup>。

### 3.2 空气喷涂

以有机硅树脂、聚碳硅烷为黏结剂,添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、BN、玻璃粉、碳纤维等填料形成混合浆料,并通过研磨的方式制成粉末,粉末颗粒度为  $40\sim 50 \mu\text{m}$ 。选取表面经过磷化的钢板,采用空气喷涂法,在钢板表面制备涂层,空气压力为  $0.4 \text{ MPa}$ 。在室温下放置  $48 \text{ h}$ ,然后在  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  下烘烤  $2 \text{ h}$  固化成膜。邹洋等<sup>[14]</sup>按一定比例混合  $\text{TiO}_2$  和硅酸钾,通过空气喷涂的方式在  $20 \text{ mm}\times 20 \text{ mm}\times 1 \text{ mm}$  的铝合金表面制作涂层,将其置于空气中  $24 \text{ h}$ ,之后再再进行烘干固化处理,烘干温度为  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,烘干时间为  $6 \text{ h}$ 。最终获得厚度为  $200 \mu\text{m}$  的涂层。

### 3.3 等离子喷涂

国内某学者在  $3 \text{ mm}$  厚铝板表面喷涂了  $0.6 \text{ mm}$  的  $\text{ZrO}_2$  涂层,并进行了抗激光性能测试,结果表明涂层可以承受波长为  $1.319 \mu\text{m}$ 、功率密度为  $510 \text{ W/cm}^2$  的连续激光辐照  $3.6 \text{ s}$ ,未发现损伤。张天宇等<sup>[7,10]</sup>采用等离子喷涂工艺,在  $2.5 \text{ mm}$  铝合金薄板表面制作了  $0.3 \text{ mm}$  厚的  $\text{ZrO}_2$  陶瓷涂层。

### 3.4 纳米涂层

王宁等<sup>[15]</sup>利用纳米 YSZ 粉末作为陶瓷涂层原料,分别采用等离子喷涂和电子束物理气相沉积技术制备纳米陶瓷涂层,研究表明,引入纳米结构使涂层具有更高的抗高温性能和更强的抗剥落能力。郝云飞等<sup>[16]</sup>制备纳米氧化锆热障涂层,结果表明与常

规热障涂层相比,纳米结构涂层拥有更好的抗热冲击性能。这主要得益于纳米结构涂层在组织结构、晶粒度、物相组成等方面的改善,从而有更多的应力释放机制<sup>[17]</sup>。王红英等<sup>[18]</sup>应用激光重熔等离子喷涂制备纳米陶瓷涂层,进一步提升了涂层质量,并显著提升了涂层的抗热冲击性能。

### 3.5 其他技术

在提高抗激光损伤性能技术的发展中,不乏一些新技术的出现,譬如基材表面划痕技术、腐蚀界面技术、反应离子刻蚀技术和镜面技术等<sup>[19-27]</sup>。Sun等<sup>[21]</sup>使用离子刻蚀技术提高涂层的抗激光损伤性能;Chai等<sup>[19]</sup>运用电子束技术制备 SiO<sub>2</sub> 涂层,结果表明在制备涂层前对基材表面进行氢氟酸腐蚀会对增强基材与涂层的结合力起到一定的作用,并可提高涂层抗激光损伤阈值,也就是说,此方法提高了涂层抗激光损伤性能。

## 4 抗激光损伤性能检测方法研究进展

### 4.1 抗激光损伤阈值

抗激光损伤阈值(LIDT)是衡量抗激光损伤性能的重要参数之一,单位一般记为 J/cm<sup>2</sup>。Žukauskas等<sup>[28]</sup>运用 LIDT 参数研究激光 3D 微/纳米刻蚀对抗激光损伤性能的影响(图 1),材料包括环氧基光刻胶(SU-8)、有机-无机杂交聚合物(OrmoComp and SZ2080)、热聚合物(PDMS)和丙烯酸盐(PMMA)。分别采用纳秒激光和飞秒激光对基材 SZ2080、SZ2080 + PI、OrmoComp、SU-8、

PDMS 和 PMMA 进行激光辐照,并测得各自的抗激光损伤阈值。对比分析表明,在纳秒激光和皮秒激光作用下,PMMA 的抗激光损伤阈值均为最大,即 PMMA 具有最强的抗激光损伤性能。引入激光 3D 微/纳米刻蚀技术,对比分析无刻蚀与刻蚀对抗激光损伤阈值的影响,结果表明激光 3D 微/纳米刻蚀对抗激光损伤性能产生一定的影响。图 1(a)中在  $n=2$  和  $n=3$  的情况下,可以观察到损伤阈值从 0.65 J/cm<sup>2</sup> 增加到 0.9 J/cm<sup>2</sup>,这表明多光子吸收可能是光学击穿的主导过程<sup>[29]</sup>。

李鹏等<sup>[30]</sup>采用等离子体增强化学蒸气沉积(PECVD)技术在 BK7 玻璃基板上沉积不同厚度的单层 SiO<sub>2</sub> 和 SiN<sub>x</sub> 光学薄膜,并对两种薄膜进行抗激光损伤阈值的测试,结果表明 PECVD 技术提高了薄膜损伤阈值,其原因在于 PECVD 技术制备的薄膜纯度较高,且薄膜的厚度均匀性大于 95%,附着力高,其消光系数达到高纯体材料的水平。分别绘制 SiO<sub>2</sub> 和 SiN<sub>x</sub> 薄膜厚度与损伤阈值的关系曲线,结果表明,对 SiO<sub>2</sub> 材料来说厚度对其抗激光损伤阈值的影响较小,而对 SiN<sub>x</sub> 薄膜来说厚度对抗激光损伤阈值的影响较大。从图 2 可以明显看出,薄膜的厚度越大,损伤阈值越小,原因在于薄膜的驻波场会随着薄膜的厚度变化而变化。Xu 等<sup>[31]</sup>采用电子束沉积的方式制备 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 涂层,并从亚化学计量缺陷、结构缺陷、结合强度三方面对 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 涂层抗激光损伤阈值进行讨论,结果表明 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 涂层抗激光损伤阈值比 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 涂层小<sup>[32]</sup>。

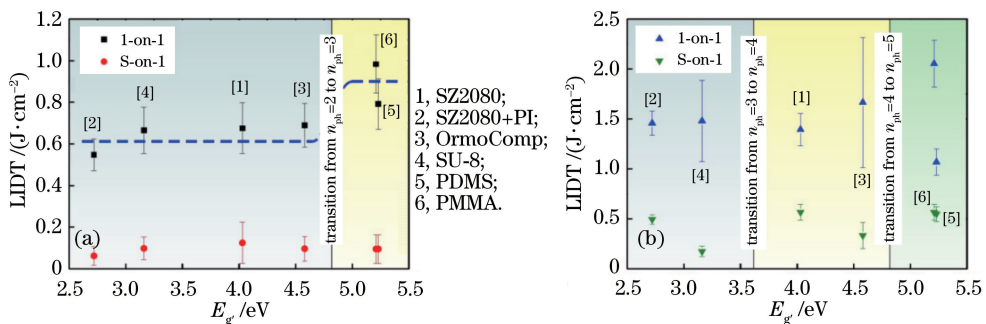


图 1 损伤阈值曲线图。(a) 515 nm;(b) 1030 nm

Fig. 1 Curves of LIDT. (a) 515 nm; (b) 1030 nm

Chai等<sup>[19]</sup>运用电子束技术制备 SiO<sub>2</sub> 涂层,结果表明在制备涂层前对基材表面进行氢氟酸腐蚀对增强基材与涂层的结合力起到一定的作用,并且提高了涂层抗激光损伤阈值,该方法提高了涂层抗激光损伤性能。Li等<sup>[5]</sup>研究了 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 和 He 三种气体对光膜抗激光损伤性能的影响(图 3),结果表明

He 对光膜的抗激光损伤阈值几乎没有影响,O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 及空气提高了抗激光损伤阈值,即增强了光膜抗激光损伤性能,原因在于真空环境中 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 的高压对真空产生阻力,从而增加了激光诱导损伤阈值。Xing等<sup>[32]</sup>采用同时蒸发界面的方法制得高反射率涂层,进而增强了涂层的抗激光损伤性能(图 4)。

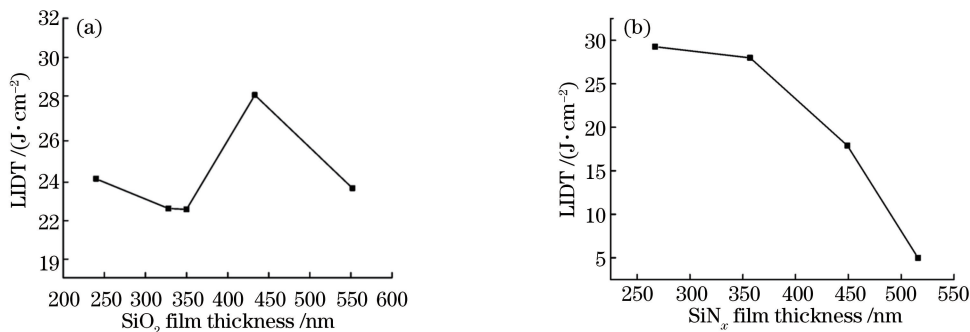


图 2 两种光学薄膜厚度与 LIDT 的关系

Fig. 2 Relationship between the thickness of optical thin film and LIDT

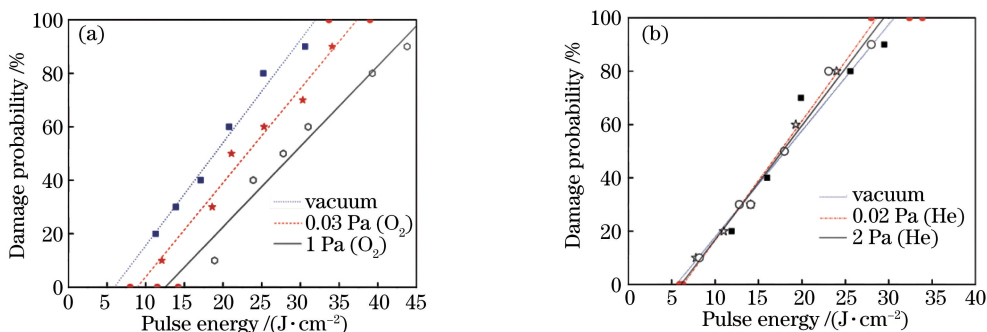


图 3 不同环境下的抗损伤能力。(a)氧气;(b)氦气

Fig. 3 Anti-damage probability under different environments. (a)  $\text{O}_2$ ; (b) He

综上所述,抗激光损伤阈值是检测抗激光损伤性能的重要参数之一。该参数不局限于连续激光的检测,也可应用于纳秒和飞秒脉冲激光的检测。国内外学者均运用损伤阈值这一参数评价材料的抗激光损伤性能。

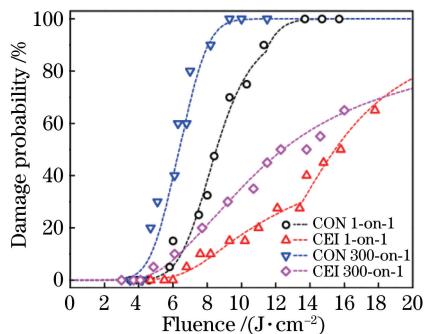


图 4 CON 和 CEI 涂层抗激光损伤能力

Fig. 4 Anti-damage probability of CON and CEI coatings

## 4.2 反射率

反射率体现的也是材料吸收率,二者呈反比关系。材料吸收激光的能力强,说明其抗激光损伤性能较差。张天宇等<sup>[10]</sup>分别对未辐照和辐照的  $\text{ZrO}_2$  涂层进行反射率检测,结果表明,辐照区的反射率明显大于未辐照区的反射率,如图 5 所示,这说明辐照增强了  $\text{ZrO}_2$  涂层的抗激光损伤性能。姜玲燕等<sup>[9]</sup>

对比测定了石墨、阳极氧化铝、国外某氧化铝及黑色微弧氧化铝涂层的抗激光损伤阈值和反射率,结果表明氧化铝的抗激光损伤性能优于石墨,反射率测试结果表明微弧氧化铝对激光的吸收大于阳极氧化铝。邹洋等<sup>[14]</sup>研究了颗粒大小对 KS-T 涂层抗激光损伤性能的影响,结果发现,颗粒越细小涂层的反射率越大(图 6),但当颗粒太过细小时,涂层内部的毛细管力会增大,进而导致微裂纹的产生,造成抗激光损伤性能降低,也就是说,会使反射率减小。研究者还发现颜料体积浓度(PVC)对涂层反射率的影响,当 PVC 值在一定范围内时,涂层反射率随 PVC 增大而增大,当 PVC 值超过一定值时,涂层的反射率随 PVC 增大而减小。

## 4.3 吸收率

Mende 等<sup>[33]</sup>分别对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlF}_3$  涂层进行激光辐照实验,绘制光子能量、吸收率和元素含量三个参数的正交曲线(图 7),结果表明,元素含量对吸收率有一定影响,Al+Si 的含量低于 19%时,对激光的吸收率影响较大,吸收的能量较高,F+O 含量低于 46%时,光子的损失较少,说明吸收光子的能力增强。Xu 等<sup>[31]</sup>研究了电子束流对  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  涂层抗激光损伤性能的影响(图 8),取五个试样进行涂层吸收率测试,其中 1/2/

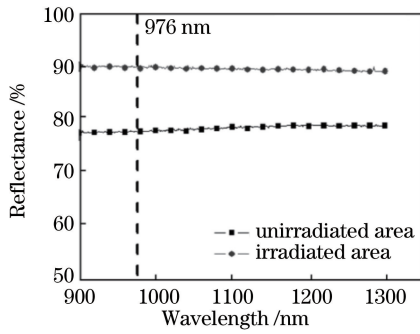


图5 辐照区与未辐照区涂层的表面反射率谱  
Fig. 5 Surface reflectance spectra of the coating in the irradiated and non-irradiated regions

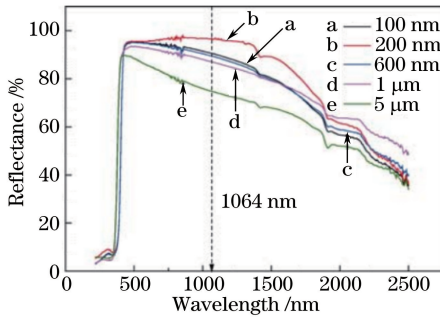


图6 颗粒大小对反射率的影响

Fig. 6 Effect of particle size on reflectivity

3/4号试样对应不同的电子束流,结果表明随着电子束流的增大,涂层的吸收率增大,且4号试样的吸收率最大,但电子束流过大会导致吸收率迅速降低。电子束流对涂层的抗激光损伤性能影响较大<sup>[31-35]</sup>,原因在于电子束流使氧气含量较低,涂层产生细小缺陷,对光有很好的吸收作用,从而增强了涂层对激光的吸收。

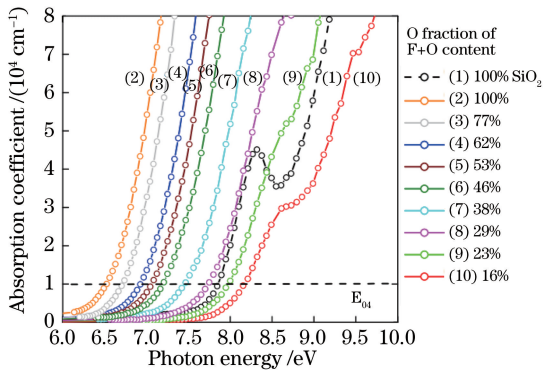


图7 元素含量对吸收率的影响

Fig. 7 Effect of element content on absorptivity

#### 4.4 组织分析

从事材料学术类研究的学者经常运用组织分析研究微观晶体和组织形貌,比如树枝晶、等轴晶、马氏体和奥氏体等,将组织分析运用于抗激光损伤性能的研究较少。邹洋等<sup>[14]</sup>从KS-T涂层激光辐照

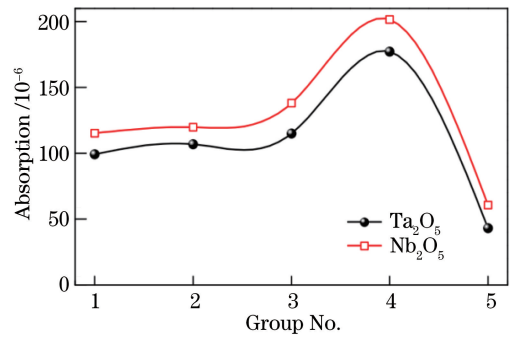


图8 电子束流对Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>涂层吸收率的影响  
Fig. 8 Effect of heat treatment on absorptivity of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> coatings

前后的微观组织形貌可以看出,以TiO<sub>2</sub>为颜料和硅酸钾为黏结剂的抗激光烧蚀涂层(简称KS-T)中TiO<sub>2</sub>纳米颗粒形成了强反射率单元,在激光辐照过程中TiO<sub>2</sub>颗粒没有发生长大现象,表明KS-T涂层具有非常出色的抗激光烧蚀性能。Liang等<sup>[36]</sup>分别对样品PDZT009(单组分)、PDZT50(0~60 mol)、PDZT100(60~100 mol)进行激光辐照实验,从微观形貌分析得到三个样品的形貌相似,此形貌由激光的高斯分布导致,从形貌可以看出,溶胶-凝胶工艺使薄膜的抗激光损伤性能大幅度增强。李鹏等<sup>[30]</sup>分析了薄膜的厚度与微观组织形貌之间的关系,结果发现,在激光辐照作用下,随着薄膜厚度的增大,从微观组织可以看出薄膜依次经历了轻度损伤、严重损伤和彻底损坏。Mende等<sup>[33]</sup>使用Nomarski微干涉差显微镜(NM)、扫描电子显微镜(SEM)对激光辐照的Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>涂层进行组织分析(图9),包括Si元素含量和钽元素含量对涂层抗激光损伤性能的影响,通过SEM、NM分析可知,当钽元素质量分数低于65%时,钽元素对涂层抗激光损伤性能影响较小,当其质量分数超过75%时,涂层表面出现烧蚀熔化现象,且随着含量增大烧蚀直径变大,熔化区域尺寸反而变小。Suratwala等<sup>[37]</sup>研究了氢氟酸腐蚀涂层表面对抗激光损伤性能的影响,从激光烧蚀组织结构分析得知,相同功率密度能量对腐蚀表面的烧蚀程度较轻,这表明腐蚀表面的抗激光损伤性能得到提高。Xing等<sup>[32]</sup>针对共蒸发界面涂层抗激光烧蚀性能进行了研究(图10),CON代表常规涂层,CEIs代表共蒸发界面涂层。从激光烧蚀的宽度和深度可以明显看出,CEIs涂层的抗激光损伤性能强于CON涂层。这是由于CEIs增强了涂层的结合强度,同时降低了涂层的机械应力,有效抑制了层间破坏和损伤发展<sup>[33-43]</sup>。

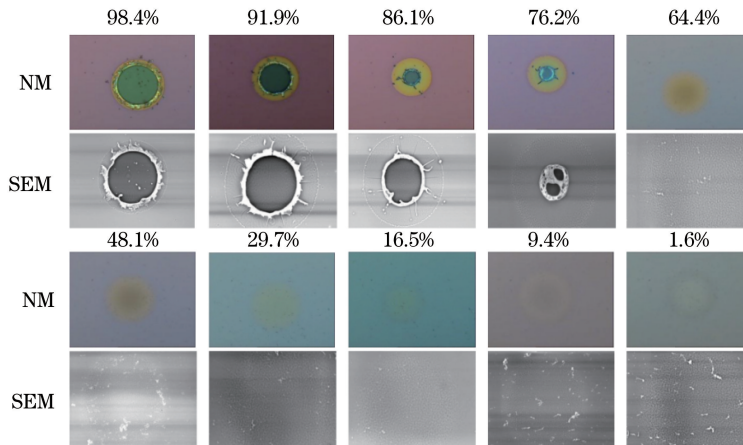


图9 激光损伤形貌的 SEM 和 NM 图像

Fig. 9 Laser damage morphologies in SEM and NM images

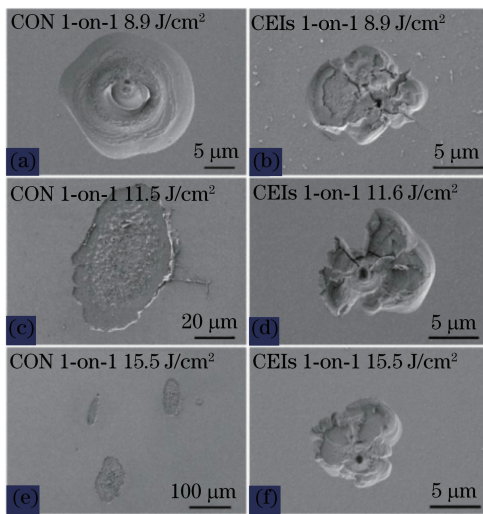


图10 CON 和 CEIs 涂层的损伤形貌

Fig. 10 Laser damaged morphologies of CON and CEIs coatings

国内外研究人员主要应用以上四种方法来检测抗激光损伤性能,从时间分析,起初主要以宏观形貌、反射率、抗激光损伤阈值作为主要研究方法,分析较为简单,例如从宏观形貌观察表面激光烧蚀程度判断抗激光损伤性能好坏,从反射率可以明显分析得到反射激光的能力。目前很多研究人员开始运用 NM 分析组织形貌,利用模拟的方法更形象地分析热量、应力、裂纹等<sup>[40,44-45]</sup>,有些国外学者甚至分析晶粒结构对抗激光损伤性能的影响。

## 5 结束语

材料体系从石墨到树脂,再从树脂到陶瓷涂层,在陶瓷涂层的基础上又加以改进和创新,得到新的涂层来提高材料对激光的抗损伤性能。涂层的制作

方法有烧结法、空气喷涂法、热喷涂和等离子喷涂法和激光熔覆或激光重熔工艺制造纳米涂层法,电子束法也是其中一个重要的方法。其中烧结法、空气喷涂法、热喷涂法涂层与基材均为物理结合,结合强度较低。激光熔覆和电子束法制造的涂层与基材为冶金结合,结合强度高。评价抗激光损伤性能指标有抗激光损伤阈值、反射率、吸收率、宏观组织和微观组织分析等。提高抗激光损伤性能的方法有腐蚀法、飞秒激光刻蚀法等。

抗激光损伤性能的研究越来越多,提高抗激光损伤性能的方法也越来越广,但研究的深度没有明显改变,很多研究采用的依然是抗激光损伤阈值、反射率、微观组织分析等一些常规方法。晶粒的微观结构对涂层抗激光损伤性能很有意义,可以从晶粒的微观结构角度<sup>[46-48]</sup>,利用 MATLAB 软件对其热量密度、损伤过程、损伤机理进行全面的分析。另外,可以引入其他领域的技术,例如超声波、热处理等<sup>[49-54]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] Li B, Chen J, Wang W G, *et al.* High power anti-missile laser weapons for aerial defense[J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 352-357.  
李博, 陈健, 王伟国, 等. 防空反导高能激光武器[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 352-357.
- [2] Gan F X. Review the emergence and development of laser technology in early stage in China[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2183-2187.  
干福熹. 回顾中国激光的诞生及早期发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2183-2187.
- [3] Li J, Zhang J D, Zhang Y Z, *et al.* Development and

- characterization of high-temperature and laser ablation resistant coating[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(1): 34-38.
- 李静, 张金栋, 张玉忠, 等. 耐高温抗激光烧蚀涂层研制与性能表征[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(1): 34-38.
- [4] Chen J M, Liu X, Xiao Z X, *et al.* Thermal shock behavior of doped graphites tested by high energy laser beam and electron beam[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2002, 22(1): 47-52.
- 谌继明, 刘翔, 肖征贤, 等. 掺杂石墨在激光束和电子束作用下的热冲击行为[J]. *核科学与工程*, 2002, 22(1): 47-52.
- [5] Li Y, Ling X, Wang G, *et al.* Improvement of the laser-induced damage resistance of optical coatings in vacuum environments[J]. *Optik*, 2013, 124(21): 5154-5157.
- [6] Li D R, Wang F C, Ma Z, *et al.* Mechanism of thermal shock damage by laser irradiation on TiO<sub>2</sub> ceramic coating [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(5): 527-529.
- 李东荣, 王富耻, 马壮, 等. TiO<sub>2</sub> 涂层激光热冲击损伤机理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(S2): 527-529.
- [7] Zeng Y, Zhang Y F, Ding C X. Thermal shock behavior of plasma sprayed boron carbide coatings [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1999, 27(5): 545-550.
- 曾毅, 张叶方, 丁传贤. 等离子喷涂碳化硼涂层热冲击性能研究[J]. *硅酸盐学报*, 1999, 27(5): 545-550.
- [8] Niu Y X, Huang F, Duan X F, *et al.* Thermal shock effect on diamond-like carbon thin films induced by pulsed-laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(10): 4816-4821.
- 牛燕雄, 黄峰, 段晓峰, 等. 脉冲激光对类金刚石(DLC)薄膜的热冲击效应研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(10): 4816-4821.
- [9] Jiang L Y, Lu Y D, Xin J G. Experimental study on the anti-damage characteristic of several different coatings for CO<sub>2</sub> laser[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(3): 298-301.
- 姜玲燕, 陆耀东, 辛建国. 几种不同涂层抗 CO<sub>2</sub> 激光损伤性能的实验研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(3): 298-301.
- [10] Zhang T Y, Kong B, Chen M S, *et al.* Anti-laser performance test of aluminum alloy plates reinforced by ceramic coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 50-55.
- 张天宇, 孔斌, 陈敏孙, 等. 陶瓷涂层加固铝合金薄板的抗激光性能测试[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(6): 50-55.
- [11] Liang L P, Zhang L, Sheng Y G, *et al.* Studies on the laser-induced damage resistance of sol-gel derived ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> composite high refractive index films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(6): 3596-3601.
- 梁丽萍, 张磊, 盛永刚, 等. 溶胶-凝胶 ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 高折射率光学膜层的抗激光损伤性能研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(6): 3596-3601.
- [12] Ling X, Liu X F, Wang G, *et al.* Influence of oxygen partial pressure on laser-induced damage resistance of ZrO<sub>2</sub> films in vacuum [J]. *Vacuum*, 2015, 119: 145-150.
- [13] Ma C, Ma Z, Gao L H, *et al.* Laser damage mechanism of flake graphite modified phenolic resin coating[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 249-255.
- 马琛, 马壮, 高丽红, 等. 激光对鳞片石墨改性酚醛树脂涂层的损伤机理[J]. *中国光学*, 2017, 10(2): 249-255.
- [14] Zou Y, Zhao L L, You L J, *et al.* Preparation and numerical simulation investigation of high reflectance anti-laser ablation coating [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2016, 31(8): 869-875.
- 邹洋, 赵丽丽, 游丽君, 等. 高反射率抗激光烧蚀涂层的制备及数值模拟研究[J]. *无机材料学报*, 2016, 31(8): 869-875.
- [15] Wang N, Zhao W X, Wang P, *et al.* Nanostructured thermal barrier coatings by APS and EB-PVD and their properties [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(3): 157-162.
- 王宁, 赵维勋, 王平, 等. 纳米结构热障涂层的制备与性能研究[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(3): 157-162.
- [16] Hao Y F, Tang W J, Wang H Y, *et al.* Analysis of microstructure and thermal shock resistance of nanostructured zirconia thermal barrier coatings[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(3): 109-112.
- 郝云飞, 汤伟杰, 王红英, 等. 纳米氧化锆热障涂层组织结构和抗热冲击性能分析[J]. *焊接学报*, 2010, 31(3): 109-112.
- [17] Cho B, Lyu A. Laser-induced damage resistance of 266 nm AR coatings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8885: 888524.
- [18] Wang H Y, Tang W J, Li Z J, *et al.* Investigation of

- thermal shock resistance of the nanostructured zirconia thermal barrier coatings treated by laser glazing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 91-94.
- 王红英, 汤伟杰, 李志军, 等. 激光重熔纳米氧化锆热障涂层的抗热冲击性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 91-94.
- [19] Chai Y, Zhu M, Yi K, *et al.* Experimental demonstration of laser damage caused by interface coupling effects of substrate surface and coating layers[J]. Optics Letters, 2015, 40(16): 3731-3734.
- [20] Qiu S R, Wolfe J E, Feit M D, *et al.* Impact of substrate surface scratches on the laser damage resistance of multilayer coatings[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7842: 78421X.
- [21] Sun L, Liu H, Huang J, *et al.* Reaction ion etching process for improving laser damage resistance of fused silica optical surface[J]. Optics Express, 2016, 24(1): 199-204.
- [22] Wolfe J E, Qiu S R, Stolz C J. Fabrication of mitigation pits for improving laser damage resistance in dielectric mirrors by femtosecond laser machining [J]. Applied Optics, 2011, 50(9): 457-462.
- [23] Schiltz D, Patel D, Emmert L, *et al.* Modification of multilayer mirror top-layer design for increased laser damage resistance [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9237: 92371G.
- [24] Liao W, Zhang C, Sun X, *et al.* Full aperture CO<sub>2</sub> laser process to improve laser damage resistance of fused silica optical surface [J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2014, 2014: 164-168.
- [25] Dai W, Xiang X, Jiang Y, *et al.* Surface evolution and laser damage resistance of CO<sub>2</sub> laser irradiated area of fused silica [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2011, 49(2): 273-280.
- [26] Mikami K, Motokoshi S, Fujita M, *et al.* Temperature dependences of laser-induced damage resistance for dielectric materials [J]. IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems, 2012, 132(1): 83-88.
- [27] Yang M H, Zhao Y A, Su H H, *et al.* Influence of subsurface cracks on laser damage resistance of anti-reflection coated fused silica[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0807001.
- 杨明红, 赵元安, 苏涵韩, 等. 基底亚表面裂纹对减反射膜激光损伤阈值的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0807001.
- [28] Žukauskas A, Batavičiūtė G, Ščiuka M, *et al.* Characterization of photopolymers used in laser 3D micro/nano-lithography by means of laser-induced damage threshold [J]. Optical Materials Express, 2014, 4(8): 1601-1616.
- [29] Vanda J, Evcik J, Pupka E, *et al.* Comparative LIDT measurements of optical components for high-energy HiLASE lasers[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2016, 4(1): 11-20.
- [30] Li P, Hang L X, Xu J Q, *et al.* Laser-induced damage resist properties of monolayer optical thin films prepared by PECVD technology[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2): 206-213.
- 李鹏, 杭凌侠, 徐均琪, 等. PECVD 技术制备单层光学薄膜抗激光损伤特性研究[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 206-213.
- [31] Xu C, Xu L M, Zhang H Z, *et al.* Comparative studies on the laser damage resistance of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films performed under different electron beam currents[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(6): 064211.
- [32] Xing H, Zhu M, Chai Y, *et al.* Improving laser damage resistance of 355 nm high-reflective coatings by co-evaporated interfaces [J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1253-1256.
- [33] Mende M, Balasa I, Ehlers H, *et al.* Relation of optical properties and femtosecond laser damage resistance for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlF<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> composite coatings[J]. Applied Optics, 2014, 53(4): 383-391.
- [34] Wolf R, Zscherpe G, Welsch E, *et al.* Absorption-influenced laser damage resistance of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> coatings [J]. Optica Acta, 1986, 33(7): 919-924.
- [35] Mende M, Schrameyer S, Ehlers H, *et al.* Laser damage resistance of ion-beam sputtered Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> mixture optical coatings[J]. Applied Optics, 2013, 52(7): 1368-1406.
- [36] Liang L, Yao X, Lei Z, *et al.* Annealing effect on the optical properties and laser-induced damage resistance of solgel-derived ZrO<sub>2</sub> films[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(5): 1066-1074.
- [37] Suratwala T I, Miller P E, Bude J D, *et al.* HF-based etching processes for improving laser damage resistance of fused silica optical surfaces[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 94(2): 416-428.
- [38] Sun J, Li X, Zhang W, *et al.* Laser-induced damage resistance of AlF<sub>3</sub> films [J]. Proceedings of SPIE,



- 2013, 8786: 878620.
- [39] Chen S, Li D, He H, *et al.* Effects of electric field distribution and pulse duration on the ultra-short pulse laser damage resistance of laser coatings [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7842: 78420D.
- [40] Zhao D F, Wu R, Lin Z Q, *et al.* Acid etching combined with ultrasonic for improving laser damage threshold of fused silica [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2015, 27(1): 105-110.  
赵东峰, 邬融, 林尊琪, 等. 声波辅助酸蚀提高熔石英损伤阈值 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(1): 105-110.
- [41] Hu G, Yang M, Shao J, *et al.* Influence of subsurface defects on 355 nm laser damage resistance of monolayer and multilayer coatings [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7504: 75040D.
- [42] Nguyen H T, Britten J A. Improvement of laser damage resistance and diffraction efficiency of multilayer dielectric diffraction gratings by HF etchback linewidth tailoring [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7842: 78421H.
- [43] Chen X, Zhao L, Fu X, *et al.* Effect of oxygen vacancies on the laser-induced damage resistance of  $Y_{0.26}Hf_{0.74}O_x$  thin films [J]. Optics Letters, 2014, 39(22): 6470-6473.
- [44] Yu Z K, He H B, Qi H J, *et al.* Characteristics of 355 nm laser damage in bulk materials [J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(6): 067801.
- [45] Cheng J, Chen M, Liao W, *et al.* Influence of surface cracks on laser-induced damage resistance of brittle  $KH_2PO_4$  crystal [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28740-28755.
- [46] Lv L, Ma P, Huang J Y, *et al.* Research on laser-induced damage resistance of fused silica optics by the fluid jet polishing method [J]. Applied Optics, 2016, 55(9): 2252-2258.
- [47] Mangote B, Gallais L, Commandré M, *et al.* Femtosecond laser damage resistance of oxide and mixture oxide optical coatings [J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1478-1480.
- [48] Gallais L, Cheng X, Wang Z. Influence of nodular defects on the laser damage resistance of optical coatings in the femtosecond regime [J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1545-1548.
- [49] Li X G, Gross M, Oreb B, *et al.* Increased laser-damage resistance of sol-gel silica coating by structure modification [J]. The Journal of Physical Chemistry, 2012, 116(34): 18367-18371.
- [50] Cheng X F, Miao X X, Wang H B, *et al.* Surface contaminant control technologies to improve laser damage resistance of optics [J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2014, 2014: 210-216.
- [51] Negres R A, Bass I, Stanion K A, *et al.* Apparatus and techniques for measuring laser damage resistance of large-area, multilayer dielectric mirrors for use with high energy, picosecond lasers [C] // Lasers and Electro-Optics. IEEE, 2015: 1-2.
- [52] Nguyen D N, Emmert L, Rudolph W, *et al.* The reduction of laser damage resistance of optical coatings to sub-picosecond pulse trains under vacuum [C] // Lasers and Electro-Optics, IEEE, 2011: 1-2.
- [53] Liu W W, Wei Z Y, Yi K, *et al.* Post-processing treatments to improve the laser damage resistance of fused silica optical surfaces and  $SiO_2$  coatings [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(4): 041407.
- [54] Natoli J Y, Wagner F, Gallais L, *et al.* Relevance of the choice of diagnostic methods to investigate laser damage resistance in optical material [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8206: 82061J.