

doi:10.3788/gzxb20174610.1014003

## 工程陶瓷表面抗激光损伤能力研究

李兆岩<sup>1,2</sup>, 孙明营<sup>2</sup>, 郝艳飞<sup>2</sup>, 庞向阳<sup>2</sup>, 刘志刚<sup>2</sup>, 章亚男<sup>1</sup>

(1 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理重点实验室, 上海 201800)

**摘 要:** 实验研究了纳秒激光辐照下不同材料的工程陶瓷表面的抗激光损伤能力, 并与不锈钢、铝合金等金属材料进行了对比。结果表明, 不同材料的工程陶瓷表面抗激光损伤特性不同; 氧化铝陶瓷的损伤阈值最高, 氮化硅陶瓷的损伤阈值较低。与金属材料相比较, 工程陶瓷表面损伤阈值比不锈钢和铝合金高。由于材料的熔点和热传导率等热力学特性不同, 不同的陶瓷材料具有不同的损伤阈值和损伤形貌。理论分析了不同材料抗激光损伤阈值的差异; 陶瓷材料的吸收系数远远小于金属材料, 吸收系数通过影响能量沉积区域和有效热扩散速率影响材料温度的演化过程, 最终影响着材料的激光损伤阈值和损伤特性。实验结果为高功率激光装置中对抗激光损伤能力要求较高的机械支撑材料的选择提供了指导。

**关键词:** 高功率激光器; 激光技术; 工程陶瓷; 损伤阈值; 光学损伤

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)10-1014003-8

## Laser Damage Resistance of Engineering Ceramics

LI Zhao-yan<sup>1,2</sup>, SUN Ming-ying<sup>2</sup>, HAO Yan-fei<sup>2</sup>, PANG Xiang-yang<sup>2</sup>, LIU Zhi-gang<sup>2</sup>, ZHANG Ya-nan<sup>1</sup>

(1 School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(2 Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Laser damage resistance of different kinds of engineering ceramics under nanosecond laser irradiation were studied and compared with those of stainless steel and aluminum alloy. The results show that the laser damage characteristics of different materials are different. The damage threshold of alumina ceramics is the highest, while the damage threshold of silicon nitride ceramics is lowest. Compared with metal materials, the damage thresholds of engineering ceramics are higher than those of stainless steel and aluminum alloy. Due to the difference of the melting point and thermal conductivity, different kinds of ceramic material have different damage morphologies. The difference of laser damage threshold of different materials was analyzed theoretically; the absorption coefficient of ceramic materials is less than metals. The absorption coefficient have an effect on the energy deposition area and heat diffusion rate influencing the evolution process of the temperature, which ultimately affect the laser damage threshold value and damage characteristics of materials. The experimental results provide guidance for the selection of mechanical support materials for high power laser devices.

**Key words:** High power laser; Laser technique; Engineering ceramic; Damage threshold; Laser damage

**OCIS Codes:** 140.3330; 140.3440; 160.3900; 350.182

## 0 引言

随着惯性约束聚变高功率激光驱动器能量的不断提高, 光学元件的损伤已经成为限制激光驱动器负载

基金项目: 中国科学院高功率激光物理重点实验室基金(No. CXJJ-16S040)、脉冲功率激光技术国家重点实验室开放研究基金(No. SKL2014KF05)和国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 61505228)资助

第一作者: 李兆岩(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为惯性约束聚变装置中洁净控制. Email: droiylee@126.com

导师(通讯作者): 章亚男(1962-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光机电一体化技术. Email: ynzhang@shu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-16; 录用日期: 2017-06-13

<http://www.photon.ac.cn>

能力提升的瓶颈,金属污染物是诱致光学元件损伤的重要诱因<sup>[1-4]</sup>.金属材料是高功率激光器驱动器的重要结构支撑材料,杂散激光不可避免地辐照在金属表面.由于金属的激光损伤阈值比较低,当杂散激光能量密度大于金属损伤阈值时,金属表面产生烧蚀并溅射.溅射产生的液滴或颗粒可能附着在光学元件表面上,当激光辐照时溅射物吸收激光能量诱致光学元件损伤,从而降低了光学元件的使用寿命.为了解决这个问题,目前主要有两种可行途径:一方面通过合理地管理激光装置内的杂散光,减少辐照在金属表面的激光能量密度;另一方面,提高关键辅助材料的激光损伤阈值<sup>[5]</sup>.虽然目前通过优化表面处理工艺等手段可以提高金属表面的损伤阈值<sup>[6]</sup>,但是在高能量密度杂散光辐照的关键区域,采用具有较高损伤阈值的材料替代较低损伤阈值的金属是一种具有前景的途径,其中,工程陶瓷具有极大的优势.

工程陶瓷作为工程技术领域高速发展的材料,在航天航空、电子通信、新能源等领域具有重要发展前景.与金属材料相比,工程陶瓷材料的硬度高、熔点高,具有耐磨损、耐腐蚀的优良特性.在工程陶瓷中,氧化铝陶瓷熔点高,耐高温;氮化硅材料具有较高的抗氧化性和耐腐蚀特性;氧化锆陶瓷抗弯强度高,可达  $15\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  以上,与钢的强度相当<sup>[7-8]</sup>.因此工程陶瓷材料可以作为金属的替代材料,在激光领域有重要的应用价值.刘文彬等人研究了氮化硅陶瓷的处理方式与热震性的关系,对陶瓷的热导率、微结构进行了研究,采用热等静压处理能够消除残余空隙,有利于提高陶瓷的强度、热导率和抗热震性能<sup>[9]</sup>.孙智龙等人对激光加工制作的氧化铝陶瓷的损伤阈值进行实验计算,解决了氧化铝陶瓷的加工切割问题<sup>[10]</sup>.张保国等人<sup>[11]</sup>以激光能量在材料表面吸收为切入点,阐述了在激光加工领域工程陶瓷与激光的相互作用<sup>[12-13]</sup>,但不同材料工程陶瓷的抗激光损伤性能鲜有报道.本文研究了几种常用陶瓷材料的损伤阈值,包括氧化铝陶瓷、氮化硅陶瓷、滑石瓷、氧化锆陶瓷等.分析了纳秒激光辐照下不同材料种类陶瓷的损伤特性,与目前常用的铝合金和不锈钢等金属材料进行了比较,为高功率激光装置中工程陶瓷的应用和材料选择提供实验依据.

## 1 实验样品与过程

### 1.1 实验样品

实验采用了三种工程陶瓷材料:氧化锆陶瓷、氮化硅陶瓷、氧化铝陶瓷以及两种金属材料:5052 铝合金和 304 不锈钢.同时采用了一种普通陶瓷材料滑石瓷与工程陶瓷材料进行对比.三种工程陶瓷材料采用静压烧结制成,物理特性如表 1 所示<sup>[7,14-17]</sup>.其中氧化铝陶瓷含有 95% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,熔点较高,为  $2050^\circ\text{C}$ ,具有耐高温、耐腐蚀的优良特性.氧化锆陶瓷主要由  $\text{ZrO}_2$  组成,由于  $\text{ZrO}_2$  的熔点较高,氧化锆陶瓷的熔点也比较高.氮化硅陶瓷主要由硅和氮之间的共价键构成,具有良好的抗氧化和耐磨特性,在机械结构中具有独立优势.滑石瓷是以矿物滑石 ( $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 为主要原料,经过高温烧结制作而成.由于主要成分氧化镁的熔点较高,滑石瓷的熔点也比较高<sup>[7-8]</sup>.与陶瓷材料相比,金属材料的物理性质差距较大.不锈钢和铝合金材料的熔点较低,其中铝合金的熔点只有  $600^\circ\text{C}$ ,而且对激光的吸收系数较大,在激光辐照过程中容易吸收激光能量而发生熔融现象.但是铝合金材料的热传导率比较突出,热力学过程与其余材料存在不同.

表 1 不同待测样品的物理参数  
Table 1 Physical parameters of different samples

	Main component	Density $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Specific heat capacity $/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Thermal conductivity $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Melting point/ $(^\circ\text{C})$	Absorption coefficient/ $\text{m}^{-1}$	Reflectivity at 351 nm
Zirconia ceramics	$\text{ZrO}_2$	5.9	425	2	2 200	$5.0 \times 10^5$	0.57
Silicon nitride	$\text{Si}_3\text{N}_4$	3.2	900	18	1 900	$2.8 \times 10^5$	0.13
Talc porcelain	$\text{MgO}/\text{SiO}_2$	2.8	921	2.5	1 700	$2.5 \times 10^5$	0.50
Alumina ceramic	$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.6	880	22	2 050	$6.2 \times 10^5$	0.75
Stainless steel	$\text{Fe}/\text{C}/\text{Cr}$	2.7	468	16	1 427	$9.0 \times 10^7$	0.94
Aluminum alloy	$\text{Al}/\text{Mg}/\text{Cu}$	7.7	900	201	600	$5.0 \times 10^7$	0.92

由于材料特性不同,不同种类陶瓷的表面形貌也不相同,如图 1 所示.陶瓷材料的表面经过干压成型,光滑明亮.干压成型是目前市场上比较普遍的陶瓷表面处理方式,适合大批量陶瓷元件生产.干压成型的氮化硅陶瓷经过简单的机械抛光处理.从图 1(a) 可以看到,氧化锆的表面结构比较特殊,由边长  $50 \sim 100 \mu\text{m}$  不等的块状结构排列组成.氮化硅整体呈黑色,有整齐排列的线条.滑石瓷和氧化铝外观呈白色,在显微镜下可

以看到表面凹凸不平,这是干压成型的结果.从图 1(e)、(f)可以看到,金属材料的表面经过机械抛光处理,表面光亮高.实验前所有样品经过了超声清洗和酒精擦拭,避免了表面污染物对样品本体抗激光损伤特性的影响.

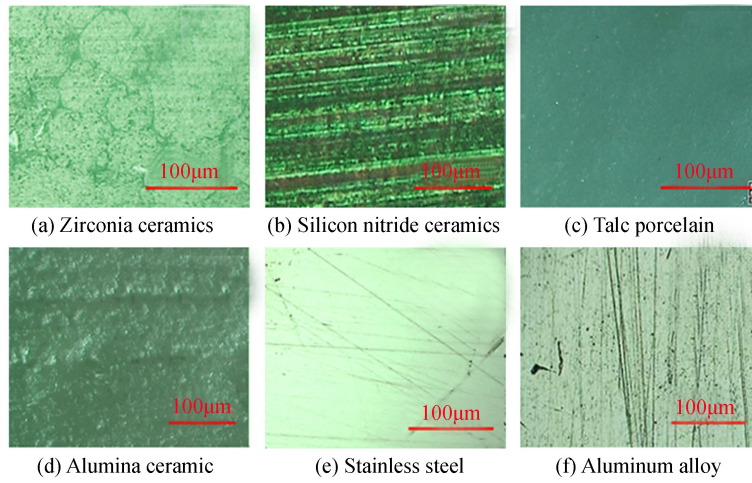


图 1 不同待测样品的表面形貌

Fig.1 Surface morphology of different samples

## 1.2 实验装置和实验方法

实验采用波长为 1 064 nm 的纳秒激光器作为光源,图 2 为损伤阈值实验装置示意图.纳秒激光器产生的基频光束首先通过两块 BBO 晶体转换为 351 nm 激光,然后依次通过色分离反射镜、取样镜、透镜最终辐照到样品表面.取样镜将小部分能量反射进入能量计,对辐照在样品表面的激光能量进行实时监测.351 nm 激光的能量可调,脉冲宽度为 6 ns,重复频率为 1 Hz.透镜的焦距为 75 cm,激光束的焦点位于样品表面.

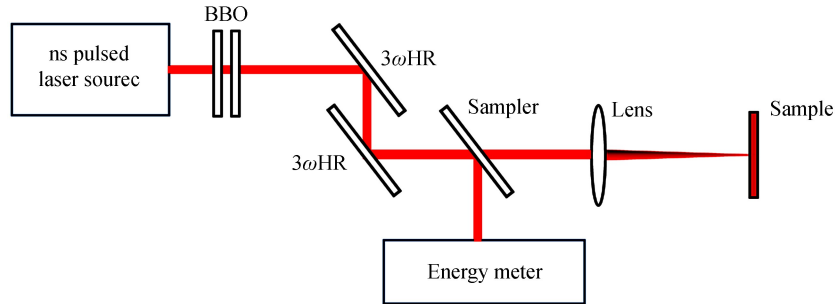


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup

辐照在样品表面的激光能量密度分布基本上为高斯分布<sup>[18]</sup>,可以推导出激光峰值能量密度  $F$  与烧蚀点直径  $D$  之间的关系为

$$D^2 = 2\omega_0^2 (\ln F - \ln F_{th}) \quad (1)$$

式中  $F_{th}$  为损伤阈值能量密度,  $\omega_0$  是光束焦斑半径.材料损伤直径的平方值与损伤点的能量密度的对数线性相关.因此可以通过实验测量每一个能量密度  $F$  对应的损伤直径  $D$ ,对  $\ln F$  与  $D^2$  的值进行线性拟合,从而求得  $D^2 - \ln F$  的线性函数.材料的损伤直径  $D$  等于 0 时,对应的能量密度值即为材料的损伤阈值.

因此,实验采用 1-on-1 的损伤阈值处理方式,即每个点辐照一次,每个能量水平辐照 10 个点,在数据处理过程中进行统计分析,从而减小样品表面缺陷在损伤阈值测量中引入的误差.通过能量控制系统,改变辐照在样品表面的激光能量密度,从而得到不同能量密度下的损伤点.通过高倍显微镜对损伤点进行表征,获得损伤点尺寸和形貌;经过数据处理可以得到损伤点直径的平方  $D^2$  与能量密度的对数  $\ln F$  的拟合曲线,最终计算得到样品表面的损伤阈值.

## 2 实验结果

### 2.1 损伤阈值测量

首先测试了不同样品表面激光损伤阈值.利用纳秒紫外激光对不同材料表面进行辐照,获得一系列能量密度形成的损伤点,测量不同能量密度的损伤点的直径.将损伤点直径和能量密度进行线性拟合可以得到 $D^2$ 关于 $\ln F$ 的线性关系,如图3(a)所示.通过拟合得到的表达式,计算出不同材料的损伤阈值,如图3(b)所示.工程陶瓷中,氧化铝陶瓷表面损伤阈值是 $4.89\text{J}/\text{cm}^2$ ,是三种陶瓷材料中损伤阈值最高的;氧化锆材料的表面损伤阈值为 $2.64\text{J}/\text{cm}^2$ ;氮化硅材料的表面损伤阈值为 $2.38\text{J}/\text{cm}^2$ ;滑石瓷的表面损伤阈值为 $3.74\text{J}/\text{cm}^2$ ;不锈钢的损伤阈值为 $1.72\text{J}/\text{cm}^2$ ;铝合金的损伤阈值为 $1.56\text{J}/\text{cm}^2$ .与工程陶瓷材料相比,金属材料的损伤阈值较低.

由于不同材料的组成成分和物理化学特性不同,不同的材料的损伤阈值有一定差异.氧化铝陶瓷和滑石瓷的损伤阈值较高,在能量密度比较低的情况下损伤不明显,损伤尺寸容易产生误差,所以在拟合时选取能量密度较高的损伤点,如图3(a)所示.在相同激光能量密度时,不同材料的损伤尺寸不同.不锈钢和铝合金的损伤点尺寸大于工程陶瓷的损伤点.

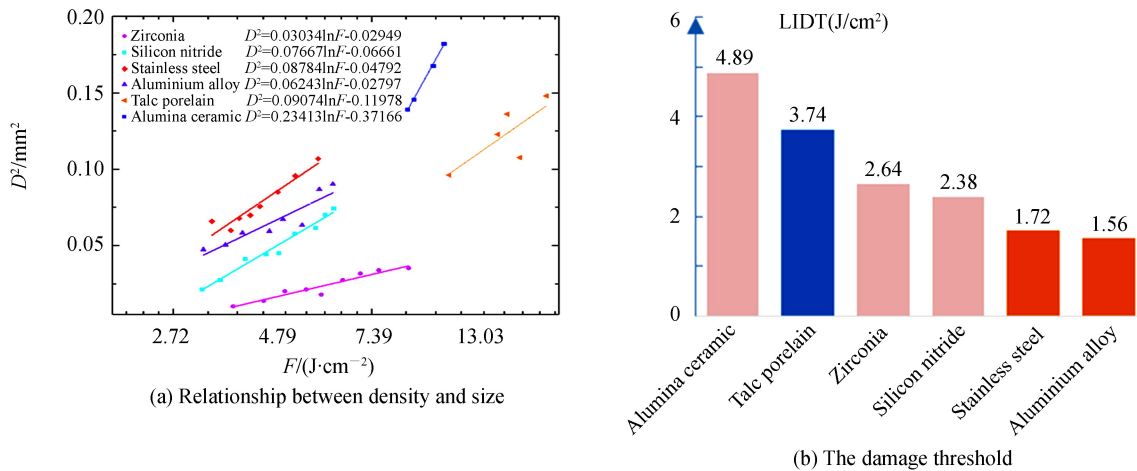


图3 不同材料的损伤特性

Fig.3 Damage characteristics of different materials

### 2.2 表面损伤形貌

当激光能量密度大于材料的损伤阈值时,不同材料的表面将会产生不同程度的损伤形貌,如图4所示.氧化铝陶瓷和滑石瓷的表面损伤主要是表面温度改变引起的热效应去除.氧化锆陶瓷的烧蚀形状与光斑形

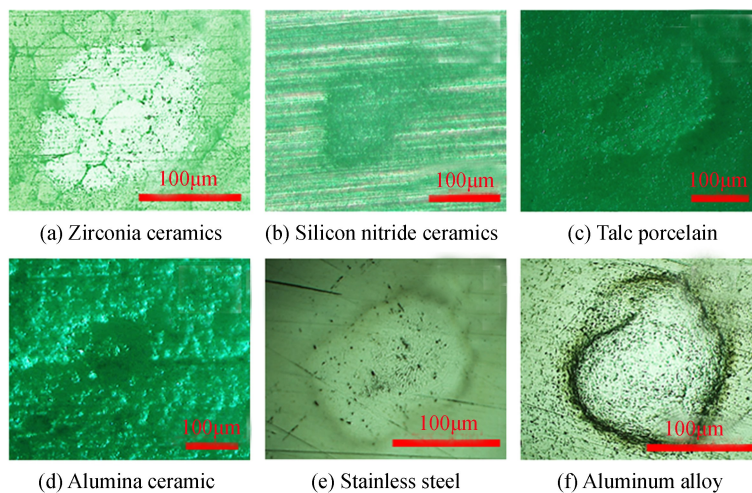


图4 不同材料的损伤形貌

Fig.4 Damage morphology of different materials

状类似,与图 1 比较可以发现,氧化锆表面的不规则排列依然存在,表明激光烧蚀深度较小;这种损伤形貌直观感觉像是表面膜层被去除,但经过比较分析不同能量密度激光产生的损伤形貌可以发现,损伤形貌并没有发生较大的变化,这也一定程度上证实了氧化锆表面本体发生了损伤.氮化硅陶瓷整体呈黑色,表面有明显的蚀坑,通过显微镜可以看到是烧蚀区域内存在大量的颗粒.

从图 4 可以看出,两种金属材料的表面损伤程度比工程陶瓷严重.铝合金材料烧蚀面积与激光能量密度的高斯分布一致,在整个图像中有大量的点状烧蚀损伤,而且烧蚀点的密度会随着激光能量密度的增高而增加.不锈钢表面中间区域内存在条纹状微结构,中间部分发生了熔融现象.

### 2.3 实验结果分析和讨论

激光束入射到工程陶瓷和金属表面时,发生的现象包括反射、吸收和散射等,与材料本身的物理特性密切相关,如密度、吸收系数、热容、热传导率.被吸收的激光能量使得材料表面温度升高,同时向周围区域扩散.当温度到达材料的熔点时发生熔融现象.如果材料表面持续吸收热量,材料将会气化蒸发、形成等离子体.不同的材料由于组成成分不同,热力学特性不同,烧蚀的过程也会不同,所以在相同的能量辐照下的损伤阈值也会不同<sup>[15]</sup>.材料表面对激光能量的吸收和后续的热扩散过程可以采用热扩散方程<sup>[19]</sup>来分析,即

$$C_p \rho \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T(x, y, z, t) + Q(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中,  $C_p$  为比热容,  $\rho$  为质量密度,  $\kappa$  为热导率,  $z$  为激光传输方向,  $x$  和  $y$  为垂直于光轴的横向方向.材料表面位于  $z=0$ , 激光束中心位于  $(x, y) = (0, 0)$ .  $Q$  为激光能量沉积的功率密度,激光聚焦在材料表面的时空分布均为高斯形状,其表达式为

$$I(x, y, t) = I_0 \text{Exp}\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] \text{Exp}\left[-4 \ln 2 \frac{t^2}{t_p^2}\right] \quad (3)$$

式中,  $I_0$  为激光峰值光强,  $\omega_0$  为光斑半径,  $t_p$  为脉冲宽度.激光能量在材料体内的沉积可以采用朗伯-比尔定律(Beer-Lambert Law)来描述,因此可以得到

$$Q(x, y, z, t) = (1-R) I_0 \alpha \text{Exp}\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] \text{Exp}[-\alpha z] \text{Exp}\left[-4 \ln 2 \frac{t^2}{t_p^2}\right] \quad (4)$$

式中,  $R$  为表面反射率,  $\alpha$  为吸收系数.激光光斑中心强度最大,材料吸收激光能量后温度变化也最大,因此是最容易损伤的位置.由式(2)~(4)可以得到,光斑中心区域温度  $T(0, 0, z, t)$ , 记为  $T_z(z, t)$ , 随时间  $t$  和传输距离  $z$  的变化可以近似为<sup>[20]</sup>

$$T_z(z, t) = T_0 + \frac{(1-R) I_0 \alpha}{C_p \rho} \text{Exp}[-\alpha z] \int_0^t \frac{\omega_0^2 \text{Exp}[\alpha^2 D(t-t')]}{(\omega_0 + \sqrt{4D(t-t')})} \text{Exp}\left[-4 \ln 2 \frac{t'^2}{t_p^2}\right] \text{Erfc}[\alpha \sqrt{D(t-t')}] dt' \quad (5)$$

式中,  $T_0$  是环境和材料初始温度,  $D = \kappa / (C_p \cdot \rho)$  为热扩散率, Erfc 为互补误差函数.由式(5)可知,表面温度  $T$  与表面反射率  $R$ 、激光峰值强度  $I_0$ 、吸收系数  $\alpha$ 、比热容  $C_p$ 、质量密度  $\rho$ 、热导率  $\kappa$  等参数密切相关,不同材料的相关参数如表 1 所示.基于式(5),可以获得激光光斑辐照中心区域的表面温度随着时间和传输距离的变化规律.

每种工程陶瓷的组成成分不同,因此物理性质如熔点、热传导系数、吸收系数等都有一定的区别,而且与金属的性质相差较大.为了分析不同材料的损伤阈值与热力学参数的关系,基于式(5)中热扩散模型,分析了相同激光通量( $1.6 \text{ J/cm}^2$ )时,材料表面峰值温度随时间的演化过程,如图 5(a)所示;为了清晰地与熔点比较从而判断损伤阈值,图中每种材料对应的温度分别采用对应的熔点进行了归一化处理.四种陶瓷材料的温度变化趋势基本一致,分别在  $t = 0.97t_p$ ,  $1.26t_p$ ,  $1.18t_p$ ,  $1.1t_p$  时刻达到最大值,峰值过后温度随着时间的弛豫速率较慢.金属材料的温度变化趋势与陶瓷材料显著地不同.首先,达到峰值温度的时刻较早,不锈钢和铝合金材料的表面温度分别在  $t = 0.36t_p$  和  $0.33t_p$  达到最大值,即温度升高速率较快;其次,峰值过后,温度弛豫速度较快.通过表 1 和式(5)可以分析得到,吸收系数是影响工程陶瓷与金属损伤阈值的关键因素,相差两个数量级,从两个方面对温度的演化产生重要的影响.首先,如表 2 所示,吸收系数与穿透深度成反比,即吸收系数越大,有效沉积厚度越小,即激光能量沉积的区域越小,温升越快,且温度升高幅度较大.其次,由式(5)可知,吸收系数与热扩散率的乘积决定着热扩散速度,因此对于金属,吸收系数较大,有效的热扩散速率较

大,温度衰减的速度较快,如图 5(a)中不锈钢和铝合金表面温度对应的曲线所示.因此,吸收系数对温度升高同时产生了积极和消极的影响.

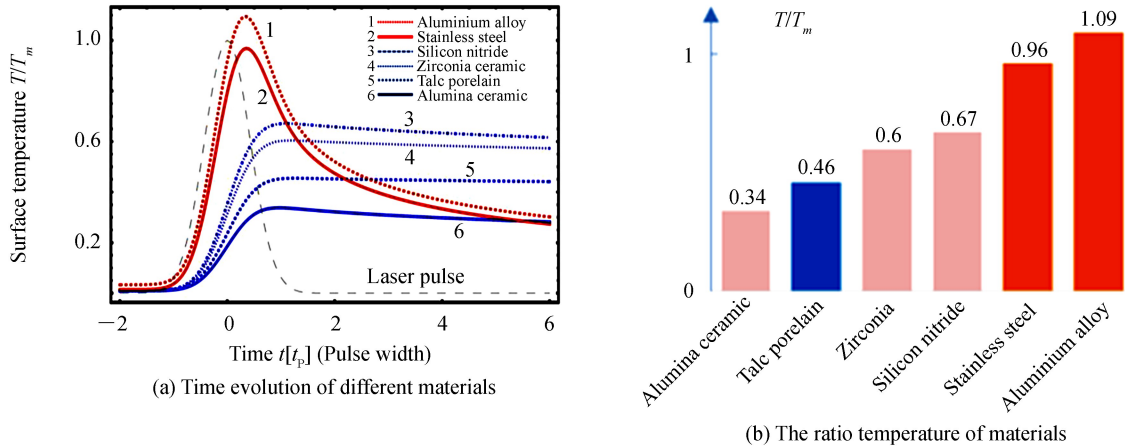


图 5 扩散方程仿真结果

Fig.5 Simulation results by diffusion equation

如果将考虑热扩散率时峰值温度记为  $T_D$ ,将不考虑热扩散过程(即  $D=0$ )时峰值温度记为  $T_{ND}$ ,则在相应损伤阈值通量激光辐照时,不同材料的  $T_{ND}/T_D$  对比结果如表 2 所示.结果表明,热扩散过程对激光辐照陶瓷材料过程中作用较小,可以忽略,而对金属材料十分重要.如表 2 所示,陶瓷材料的热扩散长度大于激光穿透深度,而金属材料的热扩散长度远远大于激光穿透深度,这也进一步解释了热扩散过程对陶瓷材料激光损伤的作用较弱,而对金属材料较为重要.另一方面,同材料的密度和热容乘积差别不大,如表 2 所示,工程陶瓷材料与金属材料没有差距,因此它们不是影响温度演化的关键因素.

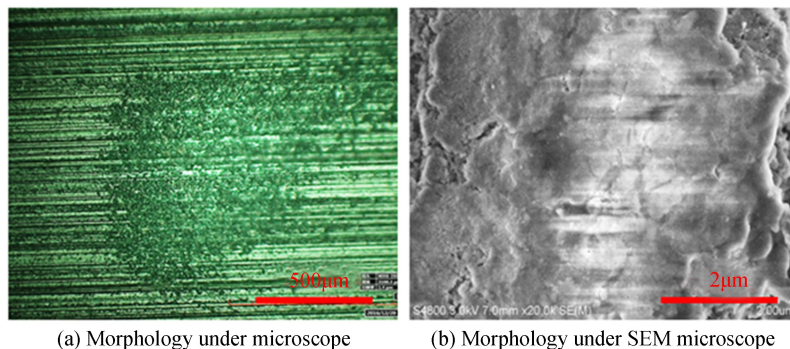
图 5(b)为不同材料的峰值温度与熔点相比较的结果,表明相同激光通量辐照时不同材料表面的相对峰值温度不同,其中  $T_m$  为材料熔点;与图 3(b)中损伤阈值相比较,相对峰值温度越大,损伤阈值越低.总体上,金属的熔点较低,陶瓷的熔点较高,且不同陶瓷之间的熔点差别不大.金属的吸收系数比陶瓷材料的高两个数量级左右,强烈地影响了材料表面的温度演化过程,从而影响了损伤特性.不同种类陶瓷材料的损伤阈值与具体的表面反射率、吸收系数和热力学参数相关.

表 2 工程陶瓷材料与金属材料的关键参数比较分析

Table 2 Parameters comparison and analysis of engineering ceramic materials and metal materials

	Alumina ceramic	Talc porcelain	Zirconia ceramics	Silicon nitride	Stainless steel	Aluminum alloy
$C_p \rho / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	3.17	2.58	2.51	2.88	3.60	2.43
Diffusion length $l_d / \mu\text{m}$	0.41	0.15	0.14	0.39	0.33	1.41
Peneration depth $\delta / \mu\text{m}$	1.61	4.0	2.0	3.57	0.01	0.02
$T_{ND} / T_D$	1.08	0.96	0.98	1.00	16.30	37.21

与氧化物陶瓷不同,氮化硅陶瓷在受到激光辐射时的烧蚀过程比较特殊.图 6(a)是氮化硅陶瓷在能量密度为  $10.51 \text{ J/cm}^2$  作用下的损伤形貌的显微照片,图 6(b)为对应的电子扫描显微镜照片.351 nm 激光辐照



(a) Morphology under microscope

(b) Morphology under SEM microscope

图 6 氮化硅陶瓷的烧蚀形貌

Fig.6 Ablation morphology of silicon nitride

下,由于光子能量高,激光与氮化硅陶瓷材料相互作用较为强烈,不仅熔化而且发生了升华现象,产生了分解,产生了气态的  $N_2$  和 Si,而部分气态 Si 会附着在烧蚀区域表面形成一层较薄的重铸层<sup>[17]</sup>.由以上的分析可以看到,不同陶瓷材料的损伤特性与陶瓷材料本身的组成以及物理特性有着密切的关系.这些特性决定了激光辐照时能量的吸收量和热扩散过程,导致材料表面受到激光辐照的损伤有着较大差异,最终影响了陶瓷材料的损伤阈值.

相同辐照下金属材料的损伤形貌要比陶瓷材料更加明显.金属材料的熔点较低,在相同的能量密度下,金属表面更容易损伤.从图 4(f)可以看出,铝合金材料的损伤形貌最明显.由于铝合金材料的热传导系数高,能量容易传递,所以铝合金材料的损伤点周围有大量微小的损伤点,并且随着能量密度的增加,损伤点的密度也会增加.不锈钢材料的表面损伤形貌与铝合金材料显著不同.不锈钢材料的热传导系数低,能量沉积后热扩散较慢,烧蚀区域瞬态温度较高,激光脉冲后沿与高温等离子相互作用,形成了具有如图 4(e)所示的条纹状结构的损伤形貌,与铝合金的损伤形貌相差较大.总的来说,不同的组成成分和热力学特性决定了材料在激光辐射下的损伤特性,工程陶瓷材料在抗损伤方面比金属材料更优势.

### 3 结论

本文研究了不同工程陶瓷材料的抗激光损伤能力,并与不锈钢、铝合金材料进行了对比.不同材料的损伤阈值和损伤形貌均与材料的熔点、热导率等参数密切相关,不同材料的损伤形貌存在较大的差异.实验发现,工程陶瓷材料的抗激光损伤阈值高于金属材料;氧化铝陶瓷的损伤阈值较高,氮化硅陶瓷的损伤阈值偏低.理论分析了不同材料的热力学参数对抗激光损伤特性的影响,结果表明,吸收系数通过影响能量沉积区域和有效热扩散速率影响材料温度的演化过程,最终影响着材料的激光损伤阈值和损伤特性.陶瓷材料的激光损伤诱发过程中,热扩散过程的影响较小,而热扩散过程严重影响着金属表面的抗激光损伤特性.氧化铝陶瓷加工工艺简单,损伤阈值高,是高功率激光系统中可以重点考虑的金属替代材料.为了进一步提高工程陶瓷表面抗激光损伤阈值,后续将开展表面处理工艺对工程陶瓷抗激光损伤能力影响的研究.

#### 参考文献

- [1] SOILEAU M J. 40 year retrospective of fundamental mechanisms[C]. SPIE, 2008, **7132**: 713201.
- [2] MIAO Xin-xiang, CHENG Xiao-feng, YUAN Xiao-dong, *et al.* Laser-induced damage of fused silica initiated by Cu contamination particles on surface[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1740-1744.  
苗心向,程晓锋,袁晓东,等.熔石英表面铜颗粒污染激光诱导损伤[J].强激光与粒子束,2010,**22**(8): 1740-1744.
- [3] WANG Li-bin, MA Wei-xin, JI Lai-lin, *et al.* Influence of metal particles on damage threshold of fused silica at  $3\omega$  [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(5): 0502004.  
王立斌,马伟新,季来林,等.三倍频激光下金属颗粒对熔石英元件损伤阈值的影响[J].中国激光,2012,**39**(5): 0502004.
- [4] MIAO Xin-xiang, YUAN Xiao-dong, WANG Cheng-cheng, *et al.* Laser induced damage in fused silica contaminated by Al film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(7): 1653-1656.  
苗心向,袁晓东,王成程,等.表面Al膜污染物诱导熔石英表面损伤特性[J].强激光与粒子束,2010,**22**(7): 1653-1656.
- [5] HAN Feng-ming, XU Shi-zhen, SONG Wen-liang, *et al.* Study of nanosecond laser ablation on Aluminum and stainless steel targets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(2): 0203005.  
韩丰明,徐世珍,宋文亮,等.纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性研究[J].中国激光,2016,**43**(2): 0203005.
- [6] SHI Shuang, SUN Ming-ying. Effect of surface treatment technology on laser damage resistance of Aluminium alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(12): 02001.  
时双,孙明营.表面处理工艺对铝合金抗激光损伤能力的影响研究[J].中国激光,2016,**43**(12): 02001.
- [7] XIAO Han-ning, GAO Peng-zhao. High performance structural ceramics and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 83-90.  
肖汉宁,高朋召.高性能结构陶瓷及其应用[M].北京:化学工业出版社,2006: 83-90.
- [8] XIAO Han-ning, LIU Jing-xiong, GUO Wen-ming, *et al.* Technological state and industrial development of engineering ceramics[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2016, **40**(6): 1-7.  
肖汉宁,刘井熊,郭文明,等.工程陶瓷的技术现状与产业发展[J].机械工程材料,2016,**40**(6): 1-7.
- [9] SUN Zhi-long, CAI Zhi-xiang, YANG Wei, *et al.* Laser cutting and scribing of 96% Alumina ceramic substrate and parameter optimization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(10): 211-218.

- 孙志龙, 蔡志祥, 杨伟, 等. 96%氧化铝陶瓷基板的激光切割划片及工艺优化[J]. 激光与光电子学进展, 2015, **52**(10): 211-218.
- [10] LIU Wen-bin, XIONG Ning, WANG Tie-jun, *et al.* Study on thermal shock resistance of silicon nitride ceramics prepared by sintering-HIP technique[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, **34**(1): 213-216.  
刘文彬, 熊宁, 王铁军, 等. 氮化硅陶瓷的热等静压处理与抗热震性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, **34**(1): 213-216.
- [11] ZHANG Bao-guo, TIAN Xin-li, SHE An-ying, *et al.* Research progress on principle and application of laser machining for engineering ceramics[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2012, **10**: 5-10.  
张保国, 田欣利, 余安英, 等. 工程陶瓷材料激光加工原理及应用研究进展[J]. 现代制造工程, 2012, **10**: 5-10.
- [12] KIM J D, LEE S J. Characteristics of laser assisted machining for silicon nitride ceramic according to machining parameters[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, **25**(4): 995-1001.
- [13] HONG Lei, LI Li-jun. A study of laser cutting engineering ceramics[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**: 531-538.
- [14] ATANASOV P A, EUGENIEVA E D, NEDIALKOV N N. Laser drilling of silicon nitride and alumina ceramics: A numerical and experimental study [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89** (4): 2013-2016.
- [15] YAN Yin-zhou, JI Ling-fei, BAO Yong, *et al.* An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, **212**: 1257-1270.
- [16] NICOLAS G, AUTRIC M, MARINE W, *et al.* Laser induced surface modifications on ZrO<sub>2</sub> ceramics [J]. *Applied Surface Science* 1997, **109**(110): 289-292.
- [17] ATANASOV P A, IMAMOVA S E, HUEGEL H, *et al.* Optical parameters of silicon carbide and silicon nitride ceramics in 0.2-1.3 $\mu$ m spectral range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **88**(8): 4671-4675.
- [18] AN Lian-sheng. Applied optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008: 226-227.  
安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 226-227.
- [19] ANOOP N S, NARENDRA B D. Laser machining of structural ceramics-A review[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, **29**(6): 969-993.
- [20] HAN Jing-hua, LI Ya-guo, ZHANG Qiu-hui, *et al.* Phase explosion induced by high-repetition rate pulsed laser[J]. *Applied Surface Science*, 2010, **256**(22): 6649-6654.