

文章编号 1004-924X(2016)增-0041-09

## 高斯型扰动对光纤高能连续激光致 Al/Ti 合金 热损伤特性的影响

赖盛英<sup>1</sup>, 韩冰<sup>2</sup>, 陆建<sup>1\*</sup>, 倪晓武<sup>1</sup>, 沈中华<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学理学院, 江苏南京 210094;

2. 南京理工大学先进发射协同创新中心, 江苏南京 210094)

**摘要:**为了分析高功率光纤连续激光束远距离传输到达靶面对金属板材料的损伤效果,利用强光阵列探测器系统对高功率连续光纤激光聚焦光束经不同距离传输后激光光斑质心抖动进行了实验研究,分析了光斑抖动漂移对远场金属板损伤效果的影响。将实验测得的抖动结果作为激光抖动源进行了有限元数值模拟,并与光斑无抖动情况下的温度分布进行对比。实验结果显示:随着传输距离的增大,抖动漂移的幅度不断增强;在同一传输路径下,水平 X 方向的抖动偏差量明显低于铅直 Y 方向的抖动偏差;远场光斑因抖动呈现椭圆分布,而激光作用远场金属板后靶面损伤形貌呈椭圆,并出现约 20° 的偏转。随着传输距离的不断增大,当光斑质心抖动偏移量大于光斑半径时,金属板最高温下降率达到了 10% 以上。结果表明,高功率连续光纤激光束经远距离传输后光束质量变差,使得激光与靶面耦合效率降低,影响激光远距离损伤金属板效能。

**关键词:**连续激光;质心抖动;光斑抖动;远场损伤;有限元法

**中图分类号:**O436 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0041

## Influence of Gaussian jitter on thermal damage in aluminum and titanium alloys induced by high-power CW fiber laser

LAI Sheng-ying<sup>1</sup>, HAN Bing<sup>2</sup>, LU Jian<sup>1\*</sup>, NI Xiao-wu<sup>1</sup>, SHEN Zhong-hua<sup>1</sup>

(1. College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Advanced Launching Co-innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail: lujian@njust.edu.cn

**Abstract:** In order to analysis the interaction between the metal plate and high-power CW fiber-laser beam through a long distance transmission, the laser beam jitter induced by the interaction on a high-power array detector with a high power CW fiber laser at different distances was researched experimentally, where the effect of the laser jitter on the damage of the metal plate was analyzed. The jitter and jitter-free models of the far-field damage of metal plates were built in simulation, and the temperature distribution between the jitter and jitter-free mode is compared by the finite element method. It shows that the jitter amplitude grows gradually with the increase of the transmission distance. At the same transmission path, the deviation along horizontal direction X is lower than that in the vertical di-

收稿日期:2016-05-13;修订日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11402120);江苏省自然科学基金青年基金资助项目(No. BK20140796)

rection Y. Due to laser spot jitter, the far-field spot presents elliptical distribution, which leads to elliptical damage morphology on the plate and a beam deflection about  $20^\circ$ . When the spot centroid offset is greater than the spot radius, the maximum temperature drop rate of the metal plate reaches more than 10% by the original position. The experiments and simulations demonstrate that the high-power CW laser beam quality declined after a long distance transmission which may reduce the energy coupling efficiency and affect the laser material interaction efficiency.

**Key words:** CW laser; laser spot random jitter; spot centroid flatter deviation far-field damage; finite element method

## 1 引言

近年来,激光在激光打孔<sup>[1]</sup>、切割<sup>[2]</sup>、焊接<sup>[3]</sup>、激光微加工<sup>[4]</sup>以及激光传输<sup>[5]</sup>、测量<sup>[6]</sup>、激光武器<sup>[7]</sup>等领域得到了广泛的应用。而光斑抖动或漂移一直是连续激光远距离与物质相互作用,例如激光测量<sup>[8]</sup>、成像<sup>[9]</sup>、通讯<sup>[10]</sup>和跟踪<sup>[11]</sup>应用中影响较大的一个因素。远场激光与物质相互作用时,激光经过长距离的湍流大气传输将发生光斑抖动漂移、光束偏转、扩展和畸变等,使得激光到达远场的光斑模式发生很大的变化,光斑质心抖动剧烈,并且抖动范围随着传输距离的增加而不断增大。J. A. Fleck 等数值模拟研究了高能连续激光大气传输的热晕效应<sup>[12]</sup>。Federico Dios 等人研究了地基到卫星的激光通讯领域中光束漂移和到达角起伏的影响<sup>[5,13]</sup>。饶瑞中、钱仙妹等采用阵列探测系统对聚焦光束的光斑抖动漂移进行了实验研究,并分析了漂移对高斯光束闪烁的影响<sup>[14-15]</sup>。钱方和张少迪等在激光成像领域研究了光斑动态特征变化的无参考激光干扰评估方法以及提高远距离光斑位置测量精度法<sup>[8-9]</sup>。在激光半主动制导领域,由于目标运动、人为操作抖动、照射器或武器平台振动以及大气传输扰动等多种因素的影响,激光照射瞄准点光斑质心位置会发生实时变化产生瞄准指示误差,这一随机误差对系统命中精度有严重的影响<sup>[11,16-17]</sup>。同时,激光控制系统的噪声也会影响激光光斑,该影响经过长距离传输的放大,光束质量逐渐变差,直接影响到靶激光与靶材相互作用的效率。因此,进行光斑质心抖动研究对于分析激光与远场靶材的相互作用具有十分重要的意义。

本文在理论分析光斑质心抖动产生的基础上,采用强光阵列探测器分别测得近场及远场光斑质心的抖动情况,基于统计学的方法处理抖动模式,并利用有限元法数值模拟在这些抖动模式下金属板的温度分布变化,对比无抖动情况下金属板的最大温升以及远场激光对金属板的损伤结果,研究光斑抖动范围增加对激光辐照金属板毁伤效能的影响。

## 2 光斑质心抖动模式

### 2.1 光斑质心理论

对于空间分布为高斯分布的连续激光束,其光强分布可用函数表示为:

$$I(x) = I_0 \exp\left[-\frac{x^2}{r_0^2}\right]. \quad (1)$$

光斑抖动示意图如图 1 所示<sup>[18]</sup>,抖动后的光强分布可表示为:

$$I'(x, t) = I_0 \exp\left[-\frac{(x - x_0(t))^2}{r_0^2}\right], \quad (2)$$

其中:  $I_0$  为光斑中心极大值处的光强,  $I(x)$  为距离中心  $x$  处的光强,  $I'(x, t)$  为光斑质心的抖动后的光强分布,  $x_0(t)$  为每一时刻光斑质心的抖动偏差,  $r_0$  为光斑半径。理想情况下,激光光斑落在靶面上是个圆,其中心即为圆的中心,但实际激光出光后经过一系列外界因素的影响出现光斑抖动。首先是由于激光器输出的激光界面能量分布不是理想的 TEM<sub>00</sub> 模,因此需要光斑质心而不是圆心来表示光斑中心;其次是由于远距离传输造成的激光模式随机改变,质心发生抖动;另外,光束偏折、发射器振动等抖动叠加在质心抖动上,造成达到靶面光斑中心出现偏差而偏移原来的中心点,靶面能量分布不均匀,靶面上得到的并不是标准圆,因此采用光斑的能量质心表示光斑的中心位置。

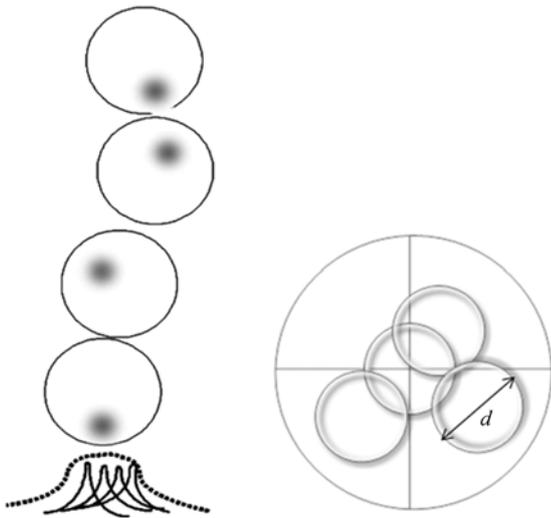
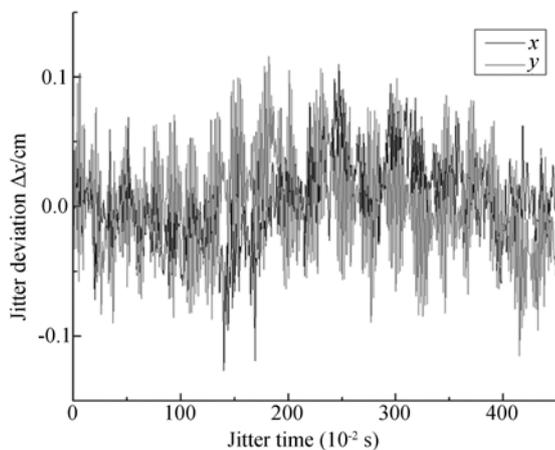


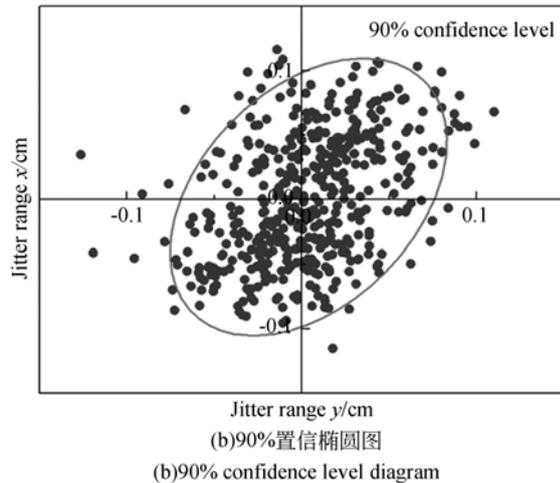
图 1 光斑质心抖动漂移示意图,  $d$  为光斑直径, 左图小点为质心, 其相对位置变化表明抖动偏移  
Fig.1 Schematic diagram of laser spot jitter, where  $d$  is spot radius and left little point is the center of mass which indicates relative position jitter deviation

### 2.2 连续激光光斑质心位移

通过强激光阵列探测系统在场外测得近地面近场及远场光斑质心抖动。其中, 近场测试距离为 10 m, 远场测试距离为 500 m, 室外温度为 28 °C, 能见度为 20 km, 实验采用连续光纤激光器, 激光波长  $\lambda=1\ 064\ \text{nm}$ , 焦平面处 63.2% 的环能量半径  $r_0=2\ \text{cm}$ 。在近场和远场, 所用为同一强光阵列探测器, 数据采集帧频为 100 Hz。在近场光斑质心的抖动偏差如图 2 所示。



(a)近场光斑X、Y方向偏差图  
(a)Peivation of near-field laser beam spot in x,y direction

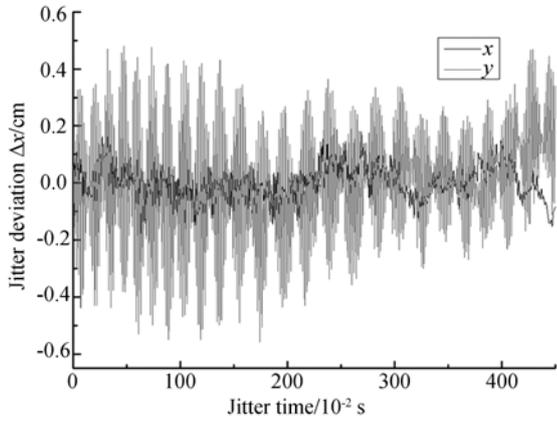


(b)90%置信椭圆图  
(b)90% confidence level diagram  
图 2 近场光斑质心抖动偏差图  
Fig.2 Near-field laser beam spot deviation caused by mass center jittering

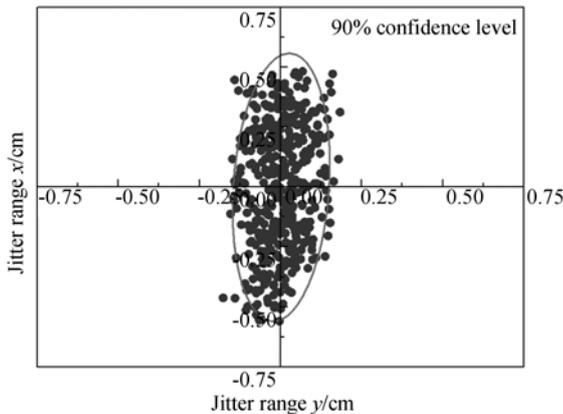
置信水平即置信度, 是指参数值落在样本统计值某一区域内的概率。图 2 中椭圆即为质心抖动点落在总体抖动探测点占 90% 概率水平的范围。椭圆越小, 则说明探测点越集中, 即质心抖动范围越小。从图 2 中可发现, 近场光斑 X 和 Y 方向质心抖动的偏差范围分别为  $\pm 0.075\ \text{cm}$  和  $\pm 0.1\ \text{cm}$ , Y 方向的抖动偏差明显高于 X 方向。

当激光束传输距离至 500 m 时, 光斑质心的抖动偏差如图 3 所示。从图 3 中发现, 远场光斑 X 和 Y 方向质心抖动的偏差范围分别为  $\pm 0.15\ \text{cm}$  和  $\pm 0.5\ \text{cm}$ , Y (铅直) 方向抖动偏差也明显高于 X (水平) 方向。对比近场光斑抖动发现, 近地面光束传输随着传输距离的增大, 激光光斑质心的抖动偏差也逐渐增大, 并且 Y 方向抖动范围总是高于 X 方向。造成这一偏差的原因可能有以下几个方面: 一是激光器控制系统发射器振动造成 Y 方向的随机抖动<sup>[19]</sup>; 二是激光在远距离大气湍流的传输过程中, 传输路径环境的影响, 如大气温度、湿度、压强、气流及空气中气溶胶粒子散射等造成光束偏折、到达远场光束质量变差, 光斑质心抖动范围增大。通常认为引起光束远距离传输抖动漂移的各种抖动源是相互独立的, 因此当考虑到达靶面光斑质心抖动的影响时, 可以考虑将大气湍流引起的光束偏折与发射系统抖动叠加。而铅直方向抖动大于水平方向的最主要原因还是由于近地面大气湍流在水平 X 方向与铅直 Y 方向上的差别。近地面激光束传输过程中, 光斑抖

动漂移源于折射率梯度的变化,在水平方向,只存在随机变化;而在铅直方向,除随机变化外,还存在由于空气密度的高度分布而造成的系统的梯度变化<sup>[14]</sup>。



(a)远场光斑X、Y方向偏差图  
(a) Deviation of far-field laser beam spot in x,y direction



(b)90%置信椭圆图  
(b) 90% confidence level diagram

图 3 当激光传导前大至 500 m 时光斑质心的抖动情况

Fig. 3 Jitter of laser spot mass center transmittance distance of 500 m

在光波和电磁波波段,折射率  $n$  可以表述为温度  $T$ 、气压  $P$  的函数,即:

$$n - 1 = 79 \frac{P}{T} \times 10^{-6}. \quad (3)$$

在光波波段折射率受湿度变化的影响较小,可以忽略。按照小扰动法分别将折射率  $n$ 、温度  $T$  和气压  $P$  分解为平均项和起伏项:  $n = \bar{n} + n'$ ,  $T = \bar{T} + T'$ ,  $P = \bar{P} + P'$ , 代入式(3)可以得到折射率起伏项的表达式<sup>[20]</sup>:

$$n' = 79 \left[ \frac{P'}{P} - \frac{T'}{T} \right] \left[ \frac{\bar{P}}{\bar{T}} \right] \times 10^{-6}. \quad (4)$$

在实际大气中一般有  $P'/P \ll T'/T$ , 因此分析折射率的起伏主要研究温度变化的影响,其他参量如气压、湿度等影响可以忽略,由此折射率起伏为:

$$n' = -79 \left[ \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} \right] T' \times 10^{-6}, \quad (5)$$

$$C_n^2 = \left[ 79 \frac{P}{T^2} \right]^2 C_T^2. \quad (6)$$

式中:  $C_n^2$ ,  $C_T^2$  分别为折射率和温度的结构常数。在大气中折射率的测量比较困难,而温度及其起伏量测量却比较容易;因此在测量折射率常数时通常测量温度起伏,再用平均温度和气压来计算得到折射率的结构常数。式(6)对温度偏微分可以得到:

$$\frac{\partial C_n^2}{\partial T} = -4 \times 79^2 \frac{P^2}{T^5} C_T^2. \quad (7)$$

由此得到由于温度变化产生的折射率结构常数偏差为:

$$\Delta C_n^2 = -4 \times 79^2 \frac{P^2}{T^5} C_T^2 \Delta T, \quad (8)$$

除以式(6)可得到相对误差为:

$$\frac{\Delta C_n^2}{C_n^2} = -4 \times \frac{\Delta T}{T}. \quad (9)$$

由式(9)可知,大气温度的偏差直接影响折射率的结构常数,温度偏差越大,折射率结构常数的误差也越大,而温度越高,误差越小。激光传输路径上温度为位置的函数,即  $T = T(x, y, z)$ 。对于近地面传输激光束,光束传输路径不同高度温度差造成折射率梯度改变,进而引起到达靶面光斑产生铅直方向高于水平方向的抖动。这一抖动严重影响了激光到达靶面的能量耦合过程,使得激光作用靶面的效率大大降低。

### 3 远场实验结果与分析

从上述分析的激光光斑质心抖动模式发现,抖动具有随机性以及 X、Y 方向的不对称性,且 Y 方向偏差大于 X 方向,由此可以预测抖动后的光斑应呈现椭圆光斑形貌而非标准圆形。在远场激光与靶材相互作用的过程中,本文选取 3 种金属靶材,分别为铝合金 2A12-T4、不锈钢 316L 和钛合金 TC4。这 3 种金属的主要物理参数如表 1 所示<sup>[21]</sup>。

表 1 三种金属热力学参数

Tab. 1 Thermodynamic parameters of three metals

Metal	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$	Thermal conductivity/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$			Specific heat ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Absorptivity	Melting point/K	Tensile strength/MPa
		100 °C	300 °C	500 °C				
2Al · 12-T4	2 770	113	97	80	917	0.059	933	470
316L	7 870	15.1	18.4	20.9	502	0.307	1 370	480
TC4	4 500	16.3	16.7	18.0	500~800	0.257	1 668	539

三种金属材料在远场激光作用下前后表面的损伤形貌如图 4~图 5 所示。

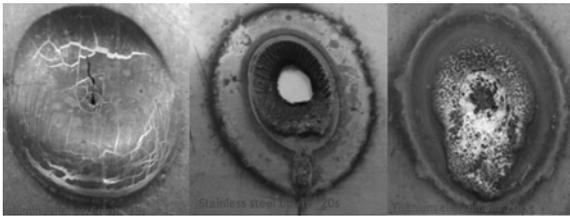


图 4 三种金属前表面远场激光损伤形貌图

Fig. 4 Front surface damage morphologies of three metals

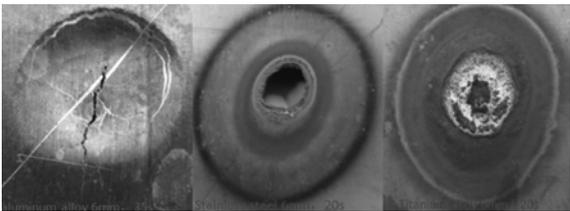


图 5 三种金属后表面远场激光损伤形貌图

Fig. 5 Rear surface damage morphologies of three metals

由图 4 和图 5 可看出,实际到达靶面的光斑并非一标准圆形,而是呈现为一个向左偏约  $20^\circ$  的椭圆型,后表面偏移方向与正表面相反。从铝合金损伤结果发现,激光作用结束后铝合金发生熔融,熔融物质由于重力的影响向下方堆积形成上薄下厚的近水滴状形貌,椭圆中心偏上方向首先出现熔融,并在冷却过程中由于热应力的影响出现裂纹。在正表面,裂纹的主要方向为由中心点向上生长,而在后表面裂纹主要方向表现为由中心点向下生长,横向裂纹少。而由不锈钢和钛合金的损伤形貌可知这两种金属发生熔融后并未出现明显裂纹。这可能是由于铝合金热导率比其它两种金属高得多,同一厚度的 3 种金属在相同激光辐照下铝合金热扩散速率最快,即使激光辐照时间长于不锈钢与钛合金,其熔融深度和熔池

大小却并没有不锈钢和钛合金明显。观察不锈钢和钛合金的损伤形貌发现,由于这两种金属的掺杂物质不同,前后表面均出现不同程度的氧化反应,由于温度的不同,由熔池中心向外出现环状氧化层,并且熔池和氧化层均呈现椭圆形。这一形貌与上一节的椭圆形光斑质心抖动偏差相符,说明远场光斑的质心抖动使到达靶面的光斑呈椭圆形,激光与金属相互作用过程中不论是熔池形状还是周围的热影响区域均为椭圆形,而非标准圆形,并且热影响区域明显大于近场抖动范围小或者实验室内无抖动模式下的损伤热影响区。

## 4 计算方法与分析

远场连续激光辐照金属靶材,到达靶面激光光斑质心随着激光束传输距离会发生不同程度的抖动偏差。根据实验金属板厚度及光斑半径的大小,利用有限元方法数值模拟标准光斑、近场抖动光斑以及远场抖动光斑条件下的温升分布,对比传输距离造成的金属板温升的影响,并以此预估有效打靶的最大光斑抖动范围。

### 4.1 计算方法

由于激光束空间分布为高斯分布,而光斑质心为在中心点向四周的随机抖动,为简化计算,将计算模型设为二维模型,如图 6 所示,选取 Y 方向抖动偏差计算抖动温升,如图 7 所示。热传导方程为:

$$\rho C \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right], \quad (10)$$

式中:  $T(x, y, t)$  为靶材温度,  $\rho$  为金属板密度,  $C$  为比热容,  $k$  为热传导率, 3 种金属的热力学参数如表 1 所示。当金属板对激光的吸收深度小时可设为表面吸收,则边界条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = A_s I'(x, t), z = 0, \quad (11)$$

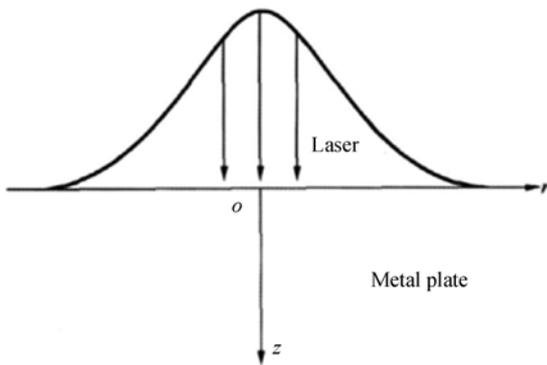


图 6 激光与金属板相互作用示意图

Fig. 6 Schematic diagram of interaction between laser and metal plate

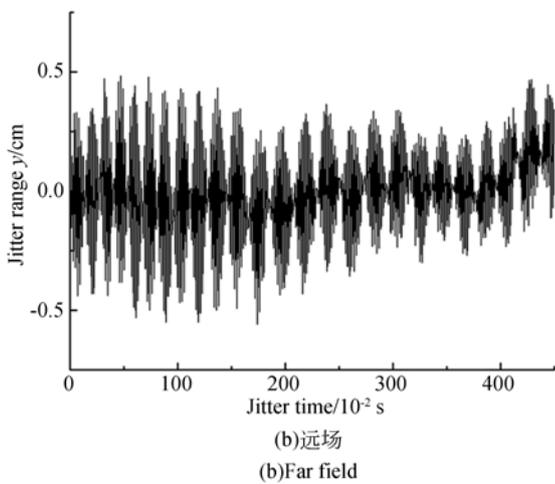
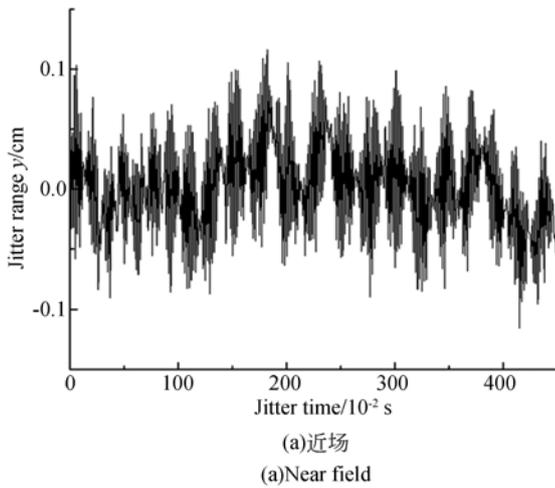


图 7 近场与远场 Y 方向光斑质心的抖动偏差

Fig. 7 Near-field and far-field laser spot deviation in Y direction

式中:  $A_s$  为金属在固态时对激光的吸收率。假设初始时刻金属板温度分布均匀且为环境温度,在

激光辐照时,热导率  $k$  决定了材料温度在深度上的分布形式,激光束横截面的光强空间分布  $I'(x, t)$  决定了温度在表面的分布形式,所以初始条件为:

$$T(x, y, t) = T_0, t = 0. \quad (12)$$

#### 4.2 数值模拟结果与分析

利用有限元法数值模拟铝合金和钛合金两种金属板前后表面和中心点的温度变化,板厚 6 mm,激光作用时间为 4.5 s,光斑半径为 2 cm,板周围与环境的对流换热系数为  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1})$ 。图 8~图 10 描述了在功率密度为  $1000 \text{ W}/\text{cm}^2$  的激光辐照下,金属板前后表面的温度变化曲线,其中  $q_0$  是指光斑质心无抖动下的温升曲线,  $q_{\text{near}}$  是指近场抖动下的数值计算温升曲线,  $q_{\text{far}}$  为远场抖动下的温升,  $q_{5\text{far}}$  和  $q_{10\text{far}}$  分别为预估的 5 倍和 10 倍远场抖动范围下的温升曲线。

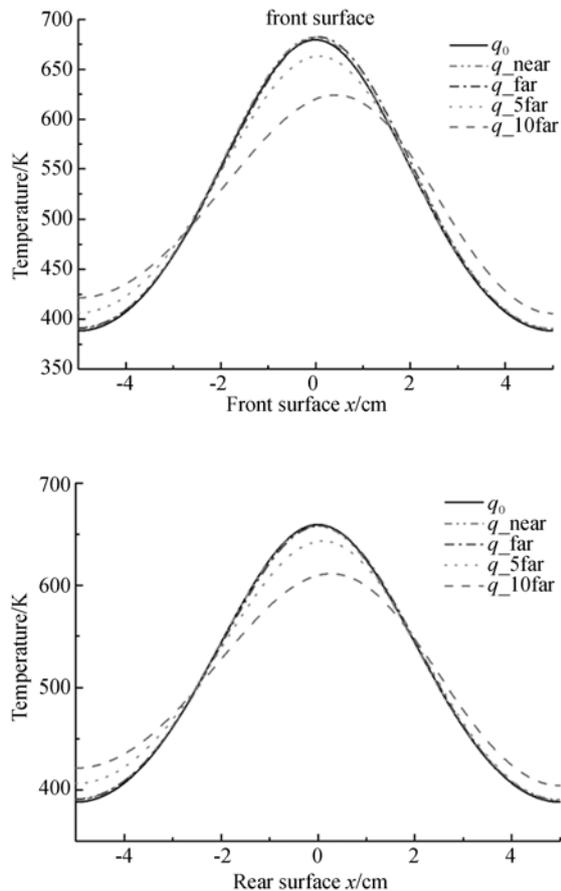


图 8 铝合金板上下表面不同抖动范围下的温升变化

Fig. 8 Temperature at front and rear surfaces of aluminum alloy under different jitter ranges

如图 8~图 10 所示,由于铝合金和钛合金两种金属的热传导系数不同,以及光斑质心的抖动,导致在入射激光能量一定时前后表面的温升变化有显著区别。在近场光斑质心的抖动范围约为  $\pm 0.1$  cm 时,两种金属的最高温度均略有下降,但最高温中心点的位置不变。当加载远场质心抖动时,抖动范围约为  $\pm 0.5$  cm,铝合金上表面的最高点位于原点,而后表面最高温的位置由中心点向右偏移约 0.05 cm。如图 9 所示,钛合金在  $\pm 0.5$  cm 的抖动偏差加载下,除了温度略下降外,上下表面温升的最高点向右偏移约 0.05 cm,而后表面向左偏移约 0.1 cm。由此说明,在近场和 500 m 远场范围内,由光斑质心抖动偏差造成的金属板中心点温度偏移量较小,并不会对激光与金属靶材的相互作用产生较大的影响。

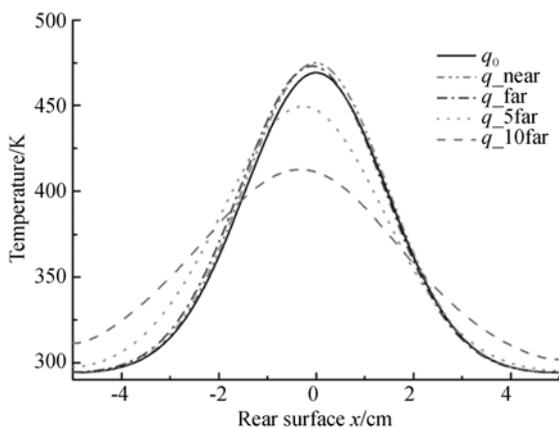
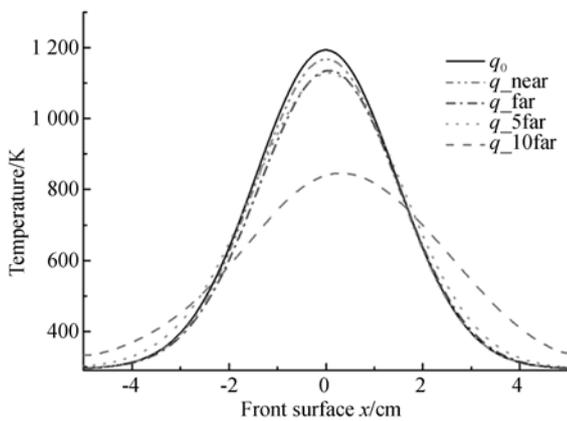
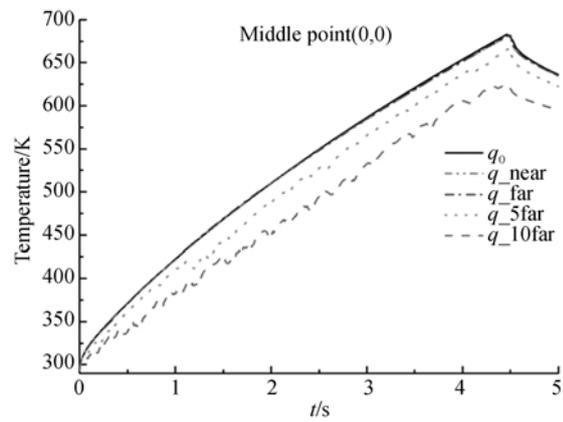
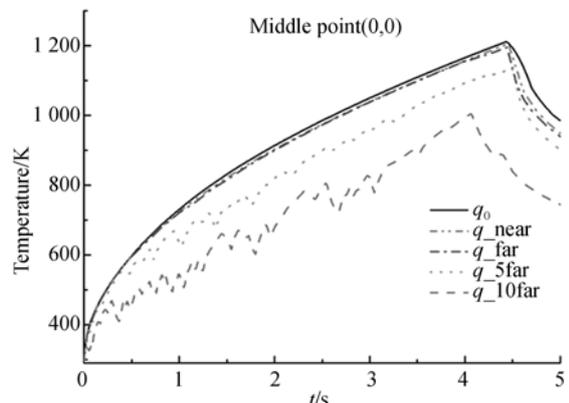


图 9 钛合金板上下表面不同抖动范围下的温升变化  
Fig. 9 Temperature at front and rear surfaces of titanium alloy under different jitter ranges

而当激光传输距离远大于 500 m 或者传输路径大气环境恶劣造成光束抖动、扩展和畸变等,



(a)铝合金  
(a)Aluminum alloy



(b)钛合金  
(b)Titanium alloy

图 10 不同抖动范围下金属板中心点的温升分布曲线

Fig. 10 Temperature distribution at middle point under different jitter ranges

原始的激光光斑半径为 2 cm,在数值模拟上加载激光远距离传输造成的光斑质心抖动达到 5 倍的远场抖动范围或者更高的 10 倍抖动范围,即约为  $\pm 2.5$  cm 和  $\pm 5$  cm,预估此时抖动偏差造成的温升变化的影响,即为图 8~图 10 中  $q_{5far}$  和  $q_{10far}$  的温升曲线。从图中发现,铝合金板在增大光斑质心抖动范围时,激光作用结束时温度下降量分别约为 2.5% 和 8.8%,最高温点偏移量约为 0.05 和 0.4 cm,而钛合金的温度下降量分别约为 5.5% 和 29.7%,最高温点偏移量约为 0.05 cm 和 0.3 cm。对比两种金属板的温升规律也可发现,光斑抖动对激光与金属板相互作用的影响与金属板材料性质相关,尤其是热传导系数。由此可以看出,光斑抖动范围越大,温度下降越快,最高温点偏移中心点的距离也越远。如果在

激光远距离传输过程中未对激光束进行自适应光学技术等优化,则当光斑抖动范围增大到一定范围时,抖动造成的偏移量会严重影响激光损伤效率。

## 5 结 论

本文从光斑质心理论出发,利用强光阵列探测器系统进行了高功率连续光纤激光聚焦光束光斑抖动漂移对远场金属板的损伤实验研究,并将实验测得的抖动结果作为激光抖动源进行了有限元法数值模拟。对比不同传输距离下光斑质心的抖动偏差,结果表明随着传输距离的增大,抖动漂移的幅度不断增强;在同一传输路径条件下,由于近地面大气湍流在水平方向与铅直方向上的差别,使得 X 方向的抖动偏差量明显低于 Y 方向的抖动偏差;远场光斑因抖动呈现椭圆分布,而激光

作用远场金属板后靶面损伤形貌呈椭圆,并发生向左约  $20^\circ$  的偏转。利用有限元法数值模拟激光光斑抖动量分别为  $\pm 0.1, \pm 0.5, \pm 2.5, \pm 5.0$  cm, 63.2% 环围能量半径时金属板的温度分布,对比光斑无抖动情况下的温度分布,结果显示当传输距离不断增大使得光斑质心抖动偏移量大于光斑半径时,金属板的最高温升下降率达到 10% 以上。

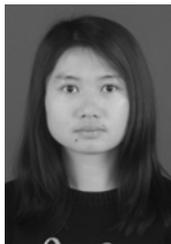
由于外场实验条件的限制,探测距离较短,仅探测了近场约 10 m 和远场 500 m 两个距离点处的抖动情况,虽然测量结果能在一定程度上反映抖动的变化趋势,但在定量方面尚需改进。此外,激光传输路径对温度、湿度、风速和水平高度等外部环境特别敏感,本次实验结果仅能说明在此种大气环境中光束传输呈现此种特性,若要系统地说明抖动规律,还需大量实验验证。

## 参考文献:

- [1] 秦渊,毕娟,倪晓武,等. 毫秒激光金属打孔的解析和实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 340-347.  
QIN Y, BI J, NI X W, *et al.*. Analysis and experiment on millisecond pulsed laser drilling of metals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 340-347. (in Chinese)
- [2] GOLNABI H, BAHAR M. Investigation of optimum condition in oxygen gas-assisted laser cutting [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(4): 454-460.
- [3] USOV S V, MINAEV I V. High-power impulse YAG laser system for cutting, welding and perforating of super hard materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1-3): 541-545.
- [4] YAHNG J S, NAM J R, JEOUNG S C. The influence of substrate temperature on femtosecond laser micro-processing of silicon, stainless steel and glass [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(7): 815-820.
- [5] RODRIGUEZ-GOMEZ A, DIOS F, RUBIO J A, *et al.*. Temporal statistics of the beam-wander contribution to scintillation in ground-to-satellite optical links: an analytical approach[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(21): 4574-4581.
- [6] DIRNAGL U, KAPLAN B, JACEWICZ M, *et al.*. Continuous measurement of cerebral cortical blood flow by laser-Doppler flowmetry in a rat stroke model[J]. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 1989, 9(5): 589-596.
- [7] BOLEY C D, RUBENCHIK A M. Modeling of antimortar lethality by a solid-state heat-capacity laser [J]. *J. Directed Energy*, 2006, 2: 97-106.
- [8] 张少迪,孙宏海. 远距离激光光斑位置高精度测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 188-196.  
ZHANG SH D, SUN H H. High precision method of long-ranged laser spot position measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 188-196. (in Chinese)
- [9] 钱方,孙涛,郭劲,等. 结合激光功率和光斑位置的多帧动态干扰效果评估[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 7-15.  
QIAN F, SUN T, GUO J, *et al.*. Dynamic assessment of laser-dazzling effects based on the laser power and spot position of multi-frame images[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 7-15. (in Chinese)
- [10] TOYOSHIMA M. Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications[J]. *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis.*, 2006, 23(9): 2246-2250.
- [11] 徐宏林,陈战旗,郭略,等. 目标指示误差对激光制导武器命中精度的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 44-46.  
XU H L, CHEN ZH Q, GUO L, *et al.*. Analysis of the influence of target designation error on the laser homing guidance weapon hit accuracy [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(3): 44-46. (in Chinese)

- [12] FLECK Jr J A, MORRIS J R, FEIT M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. *Applied Physics*, 1976, 10(2): 129-160.
- [13] DIOS F, RUBIO J A, RODRIGUEZ A, *et al.*. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(19): 3866-73.
- [14] 饶瑞中,王世鹏,刘晓春,等. 湍流大气中激光束漂移的实验研究 [J]. *中国激光*, 2000, 27(11): 1011-1015.  
RAO R ZH, WANG SH P, LIU X CH, *et al.*. Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11): 1011-1015. (in Chinese)
- [15] 钱仙妹,朱文越,饶瑞中. 漂移对聚焦高斯光束闪烁影响的数值模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(2): 193-196.  
QIAN X M, ZHU W Y, RAO R ZH. Simulation of effects of beam wander on scintillation index of a focused Gaussian-beam [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 193-196. (in Chinese)
- [16] 沈浩,祁载康. 激光光斑抖动对激光半主动制导精度的影响 [J]. *北京理工大学学报*, 2008, 28(2): 108-110,172.  
SHEN H, QI Z K. Fluence of laser spot random flutter on the precision of laser semiactive guidance [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(2): 108-110,172. (in Chinese)
- [17] 范承玉,宋正方. 大气湍流对激光跟踪系统角精度的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 1995, 7(4): 543-548.  
FAN CH Y, SONG ZH F. Effect of atmospheric turbulence on precision of laser tracking system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(4): 543-548. (in Chinese)
- [18] ANDREWS L C, PHILIPS R L, SASIELA R J, *et al.*. Beam wander effects on the scintillation index of a focused beam [C]. *Defense and Security*, 2005: 28-37.
- [19] 黄印博,王英俭. 跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响 [J]. *光学学报*, 2005, 2(25): 152-156.  
HUANG Y B, WANG Y J. The effect of tracking jitter on the beam spreading induced by atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 2(25): 152-156. (in Chinese)
- [20] 孙刚,翁宁泉,肖黎明,等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响 [J]. *光学学报*, 2004, 5(24): 592-596.  
SUN G, WENG N Q, XIAO L M, *et al.*. Profile and character of atmospheric temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 5(24): 592-596. (in Chinese)
- [21] QIN Y, CHEN Y, NI X, *et al.*. Axisymmetric numerical simulation of plastic damage in aluminum alloy induced by long pulsed laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(3): 361-367.

## 作者简介:



赖盛英(1990-),女,福建人,博士研究生,2009年于南京理工大学获得学士学位,主要从事远距离激光传输光斑抖动致远场金属材料热力损伤的研究。E-mail: fjctlsy@126.com



倪晓武(1955-),男,江苏人,教授,博士生导师,1988年于华东工学院应用物理系获得博士学位,长期从事激光武器毁伤机理、激光与物质相互作用机理、光子生物医学及其作用机理和测试方法等领域的教学和科研工作。E-mail: jsnjnxw@gmail.com



沈中华(1973-),女,江苏吴江人,教授,博士生导师,1999年于南京理工大学获得博士学位,主要从事激光超声的激发机理及相关检测技术、大能量和高功率激光与物质相互作用过程中涉及的热学、力学、等离子体和冲击波效应以及相关的光学测试技术等方面的研究。E-mail: shenzh@mail.njust.edu.cn

## 通讯作者:



陆建(1965-),男,江苏海安人,教授,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用机理及光电测试技术研究、激光等离子体瞬态光电测试技术、激光的力学、热学校应及其物理机制等研究。E-mail: lujian@njust.edu.cn