

## 膜层材料与技术

## 连续光纤激光对铁基材料推力分析

骆芳<sup>1,2,3</sup>, 卢献钢<sup>2,3</sup>, 杨高林<sup>2,3</sup>, 姚建华<sup>2,3</sup>

(1.浙江工业大学 之江学院, 浙江 绍兴 312030; 2.浙江工业大学 a.激光先进制造研究院 b.机械工程学院, 杭州 310014; 3.高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 杭州 310014)

**摘要:** **目的** 通过悬臂梁振动测量连续光纤激光作用铁基材料产生的推力。**方法** 利用 1500 W 振镜式光纤激光器, 以一定的激光工艺参数沿宽度方向单道扫描靶材, 采用动态分析三维显微系统记录薄带的振动情况, 通过对连续波激光推力作用下悬臂梁振动过程的理论分析, 建立了铁基材料受到的推力物理模型, 并通过实验验证理论公式的准确性, 最后研究了推力与激光参数、靶材等之间关系。**结果** 在不同悬臂梁长度系统下, 当激光功率为 900 W、扫描速度为 3 m/s 时, 测得钢片受到的平均推力为 2.43 mN, 该物理模型的结果具有较好的重复性。推力由靶材特性和激光工艺参数共同决定, 在靶材不被击穿的情况下, 激光功率从 300 W 增大到 1500 W 时, 钢片受到的推力从 0.41 mN 增加到 12.32 mN。扫描速度从 4 m/s 下降到 1 m/s 时, 钢片受到的推力为 8.69~15.67 mN。粒径小的粉末更容易被气化, 产生较大的推力。粉末颗粒由于推力获得的加速度高出重力加速度数倍, 大直径的粉末颗粒运动受激光推力的影响更小。**结论** 通过悬臂梁振动测量得到的推力具有较高的准确性, 合理规划激光工艺参数和粉末粒径可以减小推力的影响。这为激光熔覆过程中粉末受到激光推力作用的测量和应用方面提供了一定理论依据。

**关键词:** 推力; 悬臂梁; 振动; 连续激光; 熔覆

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)08-0316-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.08.037

Thrust Analysis of Continuous-wave Fiber Laser  
Effect on Iron-based MaterialLUO Fang<sup>1,2,3</sup>, LU Xian-gang<sup>2,3</sup>, YANG Gao-lin<sup>2,3</sup>, YAO Jian-hua<sup>2,3</sup>

(1.Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Shaoxing 312030, China; 2.a.Institute of Laser Advanced Manufacturing, b.School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3.Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment under Zhejiang Province-Ministry of Education, Hangzhou 310014, China)

**ABSTRACT:** The work aims to measure the thrust induced on the iron-based material by continuous-wave (CW) fiber laser via

收稿日期: 2020-03-08; 修订日期: 2020-07-13

**Received:** 2020-03-08; **Revised:** 2020-07-13

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFB1103600); 国家自然科学基金(51705460); 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19E050024)

**Fund:** Supported by the National Key Research and Development Plan (2017YFB1103600), the National Natural Science Foundation of China (51705460), the Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province (LGG19E050024)

**作者简介:** 骆芳(1966—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为激光表面改性。

**Biography:** LUO Fang (1966—), Female, Doctor, Professor, Research focus: laser surface modification.

**通讯作者:** 杨高林(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光增材制造。邮箱: ygaolin@163.com

**Corresponding author:** YANG Gao-lin (1980—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: laser additive manufacturing. E-mail: ygaolin@163.com

**引文格式:** 骆芳, 卢献钢, 杨高林, 等. 连续光纤激光对铁基材料推力分析[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 316-323.

LUO Fang, LU Xian-gang, YANG Gao-lin, et al. Thrust analysis of continuous-wave fiber laser effect on iron-based material[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 316-323.

analyzing cantilever vibration. The target was scanned by 1500 W galvanometer-type fiber laser in a single track along the width direction of the specimen with certain laser process parameters. The vibration of the ribbons was monitored by a three-dimensional dynamic analysis microsystem. Based on theoretical analysis of cantilever vibration under CW fiber laser thrust, a physical model of thrust on iron-based materials was constituted and accuracy of the theoretical formula was verified by experiments. Finally, the relationship between thrust, laser parameters and target material was studied. For the system of different cantilever lengths, when the laser power was 900 W and the scanning speed was 3 m/s, the average thrust of the steel plate was 2.43 mN. Thus, the results of the physical model showed good repeatability. The thrust was determined by the target characteristics and laser process parameters. When the target was not broken down and the laser power was from 300 W to 1500 W, the thrust of the steel plate increased from 0.41 mN to 12.32 mN. When the scanning speed decreased from 4 m/s to 1 m/s, the thrust of the steel plate was 8.69 mN to 15.67 mN, and the powder with small particle size was more likely to be driven by vaporization, generating larger thrust. The acceleration of powder particles due to thrust was several times higher than that of gravity, and the movement of powder particles in larger size was less affected by laser thrust. The thrust measured via cantilever vibration is relatively accurate and reasonable planning of laser process parameters and powder particle size can reduce the impact of thrust, thus providing certain theoretical basis for the measurement and application of laser thrust on powder in the process of laser cladding.

**KEY WORDS:** thrust; cantilever; vibration; continuous wave laser; laser cladding

送粉式激光熔覆技术是一种先进的材料表面改性技术,其具有能量高、稀释率低、热影响区小的特点,在航空航天、模具、汽车制造等领域都有极好的应用前景<sup>[1-4]</sup>。在送粉式激光熔覆技术中,通常认为过光的粉末只受激光的热作用,粉末的运动由载粉气的喷射控制<sup>[5]</sup>。Gulyaev 等<sup>[6-7]</sup>的实验证明,过光的粉末也会受到激光产生的推力作用,使粉末的运动行为发生改变。激光对粉末的推力作用主要是激光加热粉末导致的气化和等离子体急速膨胀。目前针对这方面的研究基本上都是基于粉末的运动轨迹,尚无激光作用下粉末受到的推力的测量。激光对于靶材的推力方面的研究目前主要有两方面:1)激光冲击强化。靠高能量的短脉冲激光产生瞬时高压,使靶材产生塑性变形<sup>[8-11]</sup>。2)利用高功率激光烧蚀靶材产生的推进力,实现小型飞行器的发射<sup>[12-14]</sup>。上述研究中的推力和激光熔覆中的推力基本原理接近,且都是采用高瞬时功率的短脉冲激光。激光产生的推力作用时间很短,因此对激光产生的推力需要特殊的设备进行测量,而传统测量激光的设备都是针对使用短脉冲激光的冲击强化技术,测量的力很大。例如激光熔覆中,连续波激光产生的力要比短脉冲激光产生的冲击力小数个量级,传统设备难以测量,所以需要设计可以测量连续波激光产生的微小推力的系统。

本文以激光熔覆常用的铁基材料为例,研究连续波激光扫描铁基材料时产生的推力。本文参考冲击摆锤的激光推力测试方法,采用非晶薄带作为悬臂梁,进行连续激光推力的测量。非晶薄带具有热稳定性良好、弹性模量高和缺少室温塑性等特点<sup>[15]</sup>,可以在大幅度减少测试系统质量的情况下,快速且准确地反映冲击振动过程。利用动态分析三维显微系统(CCD)记录试验结果,推导连续光纤激光作用在靶材上的推

力与薄带振幅的关系,同时分析激光工艺参数对靶材所受推力的影响,为充分理解激光熔覆的物理过程提供一些理论依据。

## 1 试验

试验采用市售工业用的 Fe 基非晶薄带(成分为  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ , 工业牌号为 1K101)作为悬臂梁,薄带宽 8 mm,厚度 0.03 mm,称得每毫米长的薄带平均质量为  $2.067 \times 10^{-3}$  g。采用的粘接剂成分为硅酸钠、氧化锌,稀释液为去离子水,硅酸钠、氧化锌、去离子水质量比为 1:0.2:4,将其按比例混合并搅拌均匀,得到粘接剂混合液。

试验采用两种靶材:一种直接以不锈钢钢片作为靶材,可保护薄带不被激光直接烧穿。将厚度为 0.12 mm 和 0.6 mm 的钢片按尺寸 2 mm×8 mm 线切割成靶材,称得 0.12 mm 厚的钢片质量为  $1.5 \times 10^{-2}$  g,0.6 mm 厚的钢片质量为  $7.4 \times 10^{-2}$  g,利用粘接剂将钢片固定在悬臂梁末端,阴干后使用。另一种以铁基自熔性合金粉末作为靶材,用以预测粉末所受到的推力大小。采用粒径分别为 10~45  $\mu\text{m}$ 、10~75  $\mu\text{m}$ 、48~75  $\mu\text{m}$  的铁基粉末作为靶材。试验前,先将粉末与粘接剂混合,粉末与粘接剂的质量比为 5:1,在切割的 0.12 mm 厚的钢片上预置厚度为 100、200、300  $\mu\text{m}$  的粉末层,再使用粘接剂将靶材固定在悬臂梁末端,阴干后使用,粘接剂质量可忽略。

图 1 为试验装置示意图。薄带一端固定在支架上,另一端为悬臂梁,薄带厚度仅 0.03 mm,激光直接作用薄带,会使其直接烧穿,因此需要靶材保护薄带不被烧穿。在系统中,常见冲量摆法的摆锤质量都在数十克左右<sup>[16-18]</sup>,而试验中悬臂梁的总质量仅为

0.067~0.15 g, 这可以将较小推力产生的运动有效放大。激光器采用美国 IPG 公司生产并配备振镜控制系统的连续波光纤激光器, 激光沿薄带宽度方向单道扫描靶材。激光器额定功率为 1500 W, 输出功率稳定性为  $\pm 0.3\%$ , 激光波长为 1070 nm, 焦距为 517 mm, 光斑直径为 0.25 mm。试验采用的激光工艺参数如表 1 所示, 其中,  $L$  为悬臂梁长度。激光作用

靶材时亮度较高, 为保护光学采集系统, 采用自制挡板遮挡靶材高亮部分。薄带发生振动时, 采用基恩士公司生产的 VW-6000/5000 动态分析三维显微系统 (CCD) 采集并处理薄带悬臂梁振动的位置信息。图 2 为悬臂梁振动示意图。本文取三个悬臂梁长度, 分别为 25、30、35 mm,  $y$  为激光作用下薄带末端向下移动的距离。

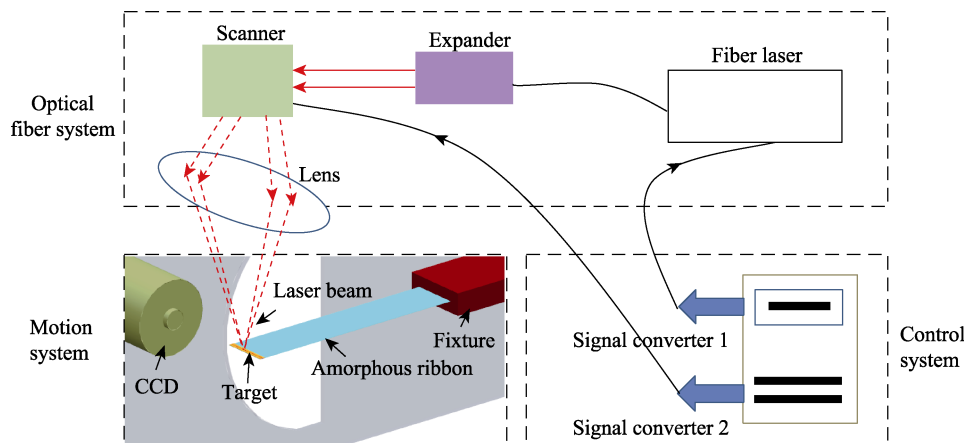


图 1 试验装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of test device

表 1 激光工艺参数  
Tab.1 Laser process parameters

No.	Power/ W	Scan velocity/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Steel thickness/ mm	$L$ / mm	Powder size/ $\mu\text{m}$
1	300	3	0.12	30	
2	600	3	0.12	30	
3	900	3	0.12	30	
4	1200	3	0.12	30	
5	1500	0.5	0.12	30	
6	1500	1	0.12	30	
7	1500	2	0.12	30	
8	1500	3	0.12	30	
9	1500	4	0.12	30	
10	900	3	0.12	25	
11	900	3	0.12	35	
12	900	3	0.6	25	
13	900	3	0.6	30	
14	1500	3	0.12	30	$\phi 10 \sim \phi 45$
15	1500	3	0.12	30	$\phi 10 \sim \phi 75$
16	1500	3	0.12	30	$\phi 48 \sim \phi 75$

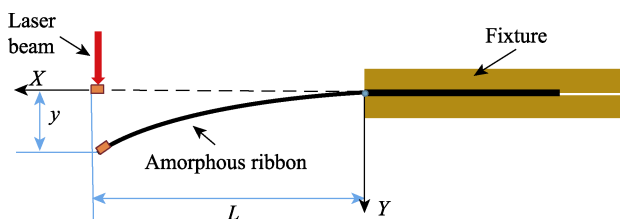


图 2 悬臂梁振动示意图  
Fig.2 Schematic diagram of cantilever vibration

## 2 结果及分析

### 2.1 薄带振动行为

图 3 为不同激光功率下, 连续光纤激光单道扫描钢片靶材时, 薄带的振动过程。其中钢片厚度为 0.12 mm, 臂梁长度为 30 mm, 扫描速度为 3 m/s。当激光功率为 300 W 时, 薄带没有发生运动, 如图 3a 所示。激光功率为 600、900、1200 W 时, 薄带开始先由起始 1 位置下弯到 3 位置, 然后向上运动到 2 位置, 最后在 2 位置和 3 位置之间做欠阻尼运动, 直至停止, 如图 3b—d 所示。

图 4 为在不同扫描速度下, 连续光纤激光单道扫描钢片靶材时, 薄带的振动过程曲线。其中, 悬臂梁长度 30 mm, 钢片厚度 0.12 mm, 激光功率 1500 W, CCD 以 250 帧记录薄带末端的移动过程。可以看出, 当扫描速度减小时, 振幅明显增大。但当扫描速度为 0.5 m/s 时, 靶材被烧穿, 振幅骤降。另外, 在不同扫描速度下, 薄带的振动周期基本一致。

图 5 为在不同悬臂梁长度下, 连续光纤激光单道扫描厚度 0.12 mm 的钢片靶材时, CCD 以 500 帧记录的薄带振动过程曲线。其中, 激光功率 900 W, 扫描速度 3 m/s。可以看出, 薄带的振动过程类似于简谐振动。悬臂梁长度为 25 mm 时, 薄带初始振幅为 0.78 mm; 悬臂梁长度为 30 mm 时, 薄带初始振幅为 1.14 mm; 悬臂梁长度为 35 mm 时, 薄带初始振幅为 1.42 mm。在相同激光参数下, 随着悬臂梁长度增大,

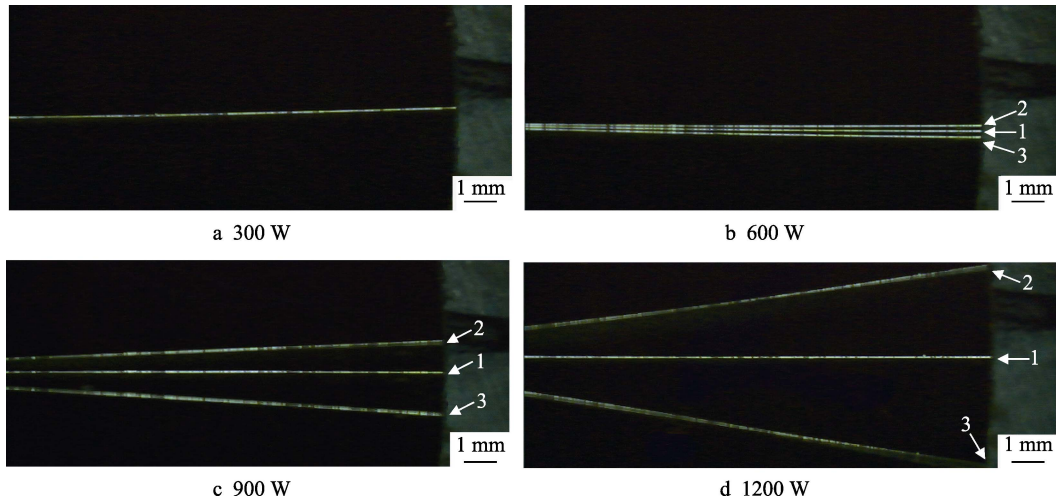


图 3 不同激光功率下薄带的振动过程

Fig.3 Vibration process of ribbons under different laser power

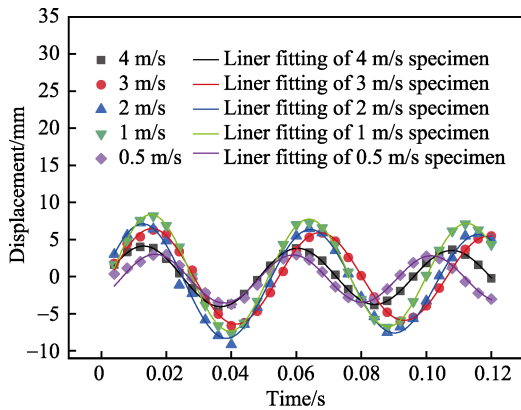


图 4 不同扫描速度下薄带的振动过程曲线

Fig.4 Vibration process curves of ribbons at different scanning speed

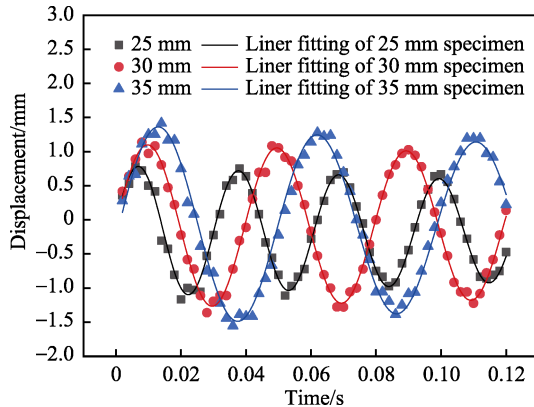


图 5 不同悬臂梁长度下薄带的振动过程曲线 (靶材厚度 0.12 mm)

Fig.5 Vibration process curves of ribbons with different cantilever beam length (target thickness is 0.12 mm)

薄带初始振幅增大, 周期也增大。

图 6 为在不同悬臂梁长度下, 连续光纤激光单道扫描厚度 0.6 mm 的钢片靶材时, CCD 以 500 帧记录的薄带振动过程曲线。其中, 激光功率 900 W, 扫描速度 3 m/s。悬臂梁长度为 25 mm 时, 薄带初始振幅

为 0.64 mm; 悬臂梁长度为 30 mm 时, 薄带初始振幅为 0.89 mm。对比图 5 可以看出, 当靶材厚度增大后, 振动周期增大, 但薄带初始振幅随之减小。

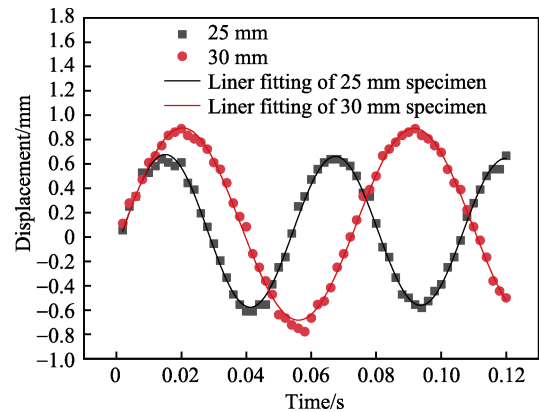


图 6 不同悬臂梁长度下薄带的振动过程曲线 (靶材厚度 0.6 mm)

Fig.6 Vibration process curves of ribbons with different cantilever length (target thickness is 0.6 mm)

## 2.2 薄带振动物理模型

激光作用的力有两方面: 一方面激光会加热靶材产生应力, 但靶材自身的应力不会改变靶材整体的运动行为; 另一方面, 激光产生的气化和等离子体膨胀造成的推力, 引起薄带做自由振动。振动过程中, 薄带在平衡位置处的弹性回复力为零, 此时薄带的最大动量即为激光形成的动量。因此, 本文研究激光单道扫描靶材造成的薄带振动过程。由图 2 可知, 薄带是一个悬臂梁。 $y$  为薄带末端垂直下移距离, 称作挠度。根据材料力学相关理论, 薄带末端的垂直下移距离  $y$  与悬臂梁受到的压力  $f_0$  之间的关系为<sup>[19]</sup>:

$$y = \frac{L^3}{3EI} f_0 \quad (1)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $I$  为惯性矩。由式(1)可知,

$y$  与  $f_0$  成线性关系, 即薄带的振动属于简谐振动。考虑空气阻力作用, 其振动应为欠阻尼的简谐振动。因此, 薄带振动方程可表示为:

$$y = \alpha \exp(-\beta t) \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为有阻尼时的固有自振频率;  $\beta$  为阻尼因数;  $t$  为振动时间;  $\alpha$  为振幅参数。由于振动时, 薄带的运动平衡位置与薄带静止位置有偏差, 因此引入常量  $\delta$  进行修正。另外, 由于薄带起始振动时间与记录的起始时间有偏差, 因此引入常量  $\eta$ , 系统从  $\eta$  时间开始振动。对式(2)修正后, 薄带振动方程为:

$$y = \alpha \exp[-\beta(t-\eta)] \sin[\omega(t-\eta)] + \delta \quad (3)$$

式中:  $\delta$  为薄带运动平衡位置与薄带静止位置的偏差;  $\eta$  为薄带振动起始时间。其中, 有阻尼时的固有自振频率  $\omega$  为:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (4)$$

式中:  $\omega_0$  为振动系统的固有圆频率;  $\beta$  与阻力系数  $\tau$  成正比, 而  $\tau$  是阻力和速度之间的系数。由式(3)对时间  $t$  求导, 即可获得薄带末端线速度  $v$ 。

$$v = \alpha \omega \exp[-\beta(t-\eta)] \cos[\omega(t-\eta)] - \alpha \beta \exp(\beta \eta) \exp(-\beta t) \sin[\omega(t-\eta)] \quad (5)$$

薄带从  $\eta$  时间开始振动, 随后薄带末端线速度  $v$  会受到空气阻力的影响。当  $t=\eta$ , 薄带振动处于初始平衡位置, 把  $t=\eta$  代入式(5)即可得到薄带初始平衡位置线速度  $v_0$  表达式 (式(6))。

$$v_0 = \alpha \omega \quad (6)$$

薄带振动由激光作用靶材形成, 激光冲量等于薄带振动处于平衡位置时的动量。考虑空气阻力的影响, 薄带动量会逐渐减少, 因此薄带振动处于初始平衡位置时的动量最大, 此时的动量即为激光冲量。这里已知  $v_0$ 、激光的作用时间  $T_1$ , 假设激光的推力  $f_1$  为恒力, 结合角动量定理<sup>[20-21]</sup>, 薄带动量与  $f_1$  的关系式为:

$$J\phi = f_1 L T_1 \quad (7)$$

式中:  $\phi$  为薄带振动处于初始平衡位置的角速度;  $J$  为悬臂梁转动惯量。根据式(6)、(7)可推导出激光的推力为:

$$f_1 = \frac{J\phi}{L T_1} = \frac{J\alpha\omega}{L^2 T_1} \quad (8)$$

## 2.3 薄带物理模型验证

上述振动物理模型需要验证式(3)运动方程与实际振动行为是否一致, 同时由于振幅最高和最低点可能不在 CCD 采集的帧画面上, 需要尽量提升精度。因此根据式(3)对图 5、图 6 的薄带振动过程进行曲线拟合, 经过拟合获得振幅参数  $\alpha$ 、自振频率  $\omega$ 、阻尼因数  $\beta$ 、记录时间起点和激光作用时间起点的差异产生的薄带振动起始时间  $\eta$ 、薄带运动平衡位置与薄带静止起始位置的偏差  $\delta$ 。可以看到, 拟合的方程曲线

与实际振动过程一致。薄带欠阻尼简谐振动曲线的各参数拟合值如表 2 所示。

表 2 薄带欠阻尼简谐振动曲线的各参数拟合值  
Tab.2 Fitting values of each parameter of underdamped motion curve

No.	$\alpha/\text{mm}$	$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$\beta$	$\eta/\text{s}$	$\delta/\text{mm}$
3-1	0.364 14	157.889 62	0.970 46	1.233 42	-0.094 29
3-2	0.516 05	155.671 47	0.640 49	1.252 06	0.055 03
3-3	0.439 96	152.110 74	1.095 15	0.992 99	0.037 89
10	0.105 56	203.829 27	2.251 98	0.985 63	-0.173 49
11	0.857 65	118.156 58	0.639 91	0.852 98	0.001 92
12	0.420 95	119.840 54	0.491 41	0.840 83	0.046 14
13	0.790 86	88.122 73	0.056 75	0.002 57	0.105 31

从式(8)看出, 激光推力表达式的未知量有固有自振频率  $\omega$  和振幅参数  $\alpha$ 。在不同系统中,  $\omega$  值与悬臂梁长度和靶材质量有关。在相同系统中,  $\omega$  值理论上应该一样, 但 No.3-1—No.3-3 拟合的  $\omega$  值存在些许差异。原因可能是在两个方面: 一是由于每一根薄带自身存在差异, 二是测量精度的限制。

另外, 表 2 中拟合的振幅参数  $\alpha$  远小于实际的振幅, 且拟合的薄带振动起始时间  $\eta$  明显大于周期。从图 5、图 6 可以看出,  $\eta$  值远小于薄带振动周期的四分之一。对拟合方程式(3)分析可知, 参数  $\eta$  同时出现在振幅项和周期项里。在周期项中,  $N$  倍的周期变化对函数没有影响, 但会引起振幅项的变化, 所以参数  $\eta$  其实有一组解, 而拟合出的  $\eta$  值仅为其中的一个解。因此可将参数  $\eta$  值进行常量分离, 其表达式为:

$$\eta = \varepsilon + N T_2 \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon$  为实际振动起始时间;  $T_2$  为振动周期时间。将式(9)代入到式(3)可得薄带运动方程为:

$$y = \alpha \exp(\beta N T_2) \exp[-\beta(t-\varepsilon)] \sin[\omega(t-\varepsilon-N T_2)] + \delta \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \alpha \exp(\beta N T_2) \quad (11)$$

式中:  $\alpha_1$  为修正后真实欠阻尼简谐运动的振幅。薄带欠阻尼简谐振动曲线的各修正参数如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 实际薄带振动起始时间  $\varepsilon$  远小于周期  $T_2$ 。修正后, 真实欠阻尼简谐运动的振幅  $\alpha_1$  和图 5、图 6 中的最高和最低点基本一致, 因此在后面试验中, 可根据帧画面最高、最低点获得的振幅直接代入方程(8), 计算推力。

转动惯量  $J$  为薄带的转动惯量  $J_b$  与钢片的转动惯量  $J_t$  之和, 即:

$$J = J_b + J_t \quad (12)$$

$$J_b = \frac{1}{3} m_1 L^2 \quad (13)$$

$$J_t = \frac{1}{12} m_t b^2 + m_t \left( L - \frac{b}{2} \right)^2 \quad (14)$$

式中:  $m_1$  为悬臂梁薄带部分质量;  $m_t$  为靶材质

量； $b$  为靶材的宽度，为 2 mm。根据式(8)，可得修正后的连续光纤激光推力为：

$$f_1 = \frac{J\alpha_1\omega}{L^2T_1}$$

(15)

表 3 为薄带欠阻尼简谐振动曲线的各修正参数结果，将力除以光斑的面积，即可获得压强  $p$ 。可以看出，测得的压强  $p$  最大为  $5.26\times10^4$  Pa，而激光冲击强化产生的峰值压强通常为  $5\times10^8\sim3\times10^9$  Pa<sup>[11]</sup>，因此

这与激光冲击强化相比要小很多。  
表 2 和表 3 中，已知 7 个试样都在激光功率 900 W，扫描速度 3 m/s 下测量，激光参数一样，理论上产生的推力也应一样。经表 3 统计，连续光纤激光作用在钢片上的推力平均为 2.43 mN，在不同悬臂梁系统（即不同悬臂梁长度以及靶材配重）下测出来的推力基本一致。所以，这种测力方法与系统本身关系不大，是比较可靠的。

表 3 薄带欠阻尼简谐振动曲线的各修正参数  
Tab.3 Modified parameters of the underdamped simple harmonic vibration curve

No.	$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$\varepsilon/\text{s}$	$T_2/\text{s}$	$\alpha_1/\text{mm}$	$T_1/\text{ms}$	$f_1/\text{mN}$	$p/\text{Pa}$
3-1	$3.12\times10^{-8}$	$2.19\times10^{-4}$	0.039 79	1.205 60	2.667	2.48	$5.05\times10^4$
3-2	$3.12\times10^{-8}$	$8.43\times10^{-4}$	0.040 36	1.150 09	2.667	2.33	$4.75\times10^4$
3-2	$3.12\times10^{-8}$	$1.63\times10^{-3}$	0.041 31	1.302 93	2.667	2.58	$5.26\times10^4$
10	$1.94\times10^{-8}$	$7.93\times10^{-4}$	0.030 83	0.973 29	2.667	2.31	$4.71\times10^4$
11	$4.69\times10^{-8}$	$2.15\times10^{-3}$	0.053 18	1.478 30	2.667	2.51	$5.11\times10^4$
12	$5.34\times10^{-8}$	$1.96\times10^{-3}$	0.052 43	0.635 71	2.667	2.44	$4.97\times10^4$
13	$8.09\times10^{-8}$	$2.57\times10^{-3}$	0.071 30	0.790 86	2.667	2.35	$4.79\times10^4$
Mean value						2.43	$4.95\times10^4$

2.4 连续波激光产生的推力分析

厚度 0.12 mm 的钢片作为靶材，扫描速度 3 m/s，悬臂梁长度 30 mm 的条件下，根据 CCD 帧画面获得悬臂梁薄带的初始最大振幅，由式(8)计算得到推力，如图 7 所示。从图 7 中可以看出，随着激光功率的提升，激光推力逐渐增大，且增大的幅度也增加。

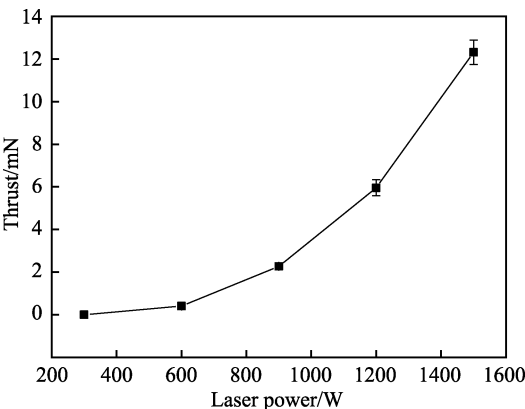


图 7 连续光纤激光在不同激光功率下单道扫描钢片时产生的推力  
Fig.7 Thrust produced on steel plate by CW fiber laser through single track scanning at different laser power

厚度 0.12 mm 的钢片作为靶材，激光功率 1500 W，悬臂梁长度 30 mm 的条件下，同样根据上述方法得到推力，如图 8 所示。当扫描速度为 0.5 m/s 时，靶材连同薄带被直接烧穿、掉落，只有侧壁上被气化，产生垂直于薄带方向的合力，才会使薄带振动，因此薄带的振幅显著减小，导致测量结果偏小。从图 8 中

可以看出，在靶材未被烧穿的情况下，激光的推力随着扫描速度的增加而减少。

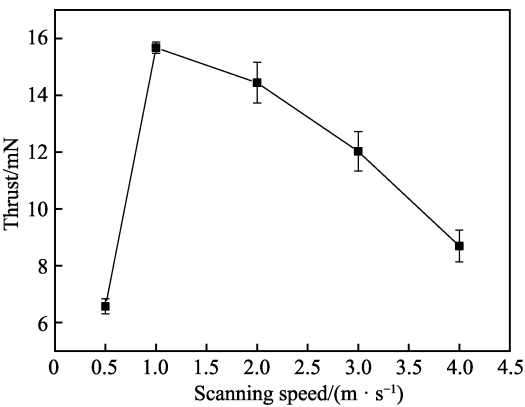


图 8 连续光纤激光在不同扫描速度下单道扫描钢片时产生的推力  
Fig.8 Thrust produced on steel plate by CW fiber laser through single track scanning at different scanning speed

推力不仅与激光工艺参数有关，也与靶材自身的物质条件有关。图 9 为以不同层厚和粒径粉末作为靶材条件下，连续光纤激光单道扫描时产生的推力。其中，激光功率为 1500 W，扫描速度为 3 m/s，悬臂梁长度为 30 mm。从图 9 中可以看出，不同粉末厚度对推力的影响不大，其原因在于试验预置的粉末层太厚，而粉末的热导率又比较低，以致激光基本上没有烧穿粉末层。另外，如图 9 所示，粉末粒径范围  $\phi48\sim\phi75\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\phi10\sim\phi45\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\phi10\sim\phi75\text{ }\mu\text{m}$  的粉末层受到的平均推力分别为 9.92、15.78、13.25 mN。由此可知，推力主要与粉末的粒径有关。激光辐照后，颗



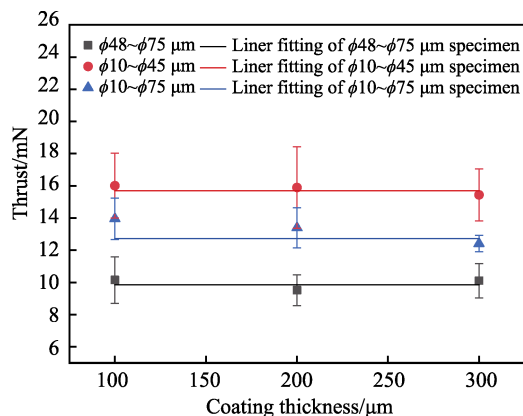


图9 连续光纤激光单道扫描不同层厚和粒径粉末时的推力  
Fig.9 Thrust on different layer thickness and powder particle size by CW fiber laser through single track scanning

粒被加热, 颗粒向外传导热量主要靠颗粒与颗粒之间的相切接触, 因此向外传热慢。而颗粒内部导热快, 单颗粉末接收的能量与其直径的平方和体积的三次方成正比, 因此粒径小的粉末更容易气化, 产生的推力也越大。另外, 在图8中, 根据式(15)得到当激光功率为 1500 W、扫描速度为 3 m/s 时, 0.12 mm 厚的钢片受到的平均推力为 12.02 mN。理论上, 粉末对激光能量的吸收率比钢片高, 热导率比钢片小, 因此

受激光扫描时, 被扫描区域粉末的气化程度要高于钢片, 但使用钢片的实际试验结果高于粉末粒径范围  $\phi 48 \sim \phi 75 \mu\text{m}$  的粉末层受到的平均推力, 这可能是由于大粒径粉末更容易产生飞溅现象, 而飞溅的靶材没有对悬臂梁产生相应的冲量<sup>[22]</sup>。

熔覆时, 需要分析单颗粉末的物理状态。根据激光光斑面积和测得的连续光纤激光单道扫描不同层厚和粒径粉末时的推力, 即可算出此时在光斑的单位面积中, 所产生的压强  $p_1$  为:

$$p_1 = \frac{4f_1}{\pi d_1^2} \quad (16)$$

式中:  $d_1$  为光斑直径。粉末的横截面积可近似看作激光照射的面积, 则单颗粉末受到的力  $f_2$  为:

$$f_2 = \frac{p_1 \pi d_2^2}{4} \quad (17)$$

式中:  $d_2$  为粉末颗粒平均直径。试验铁基粉末的密度为  $\rho = 7.98 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 因此可以获得单颗粉末的加速度, 如表4所示。从表4可以看出, 粉末的加速度高出重力加速度数倍, 由此可见, 激光产生的推力可以对粉末的运动产生较大的影响。粉末颗粒的直径越大, 推力越大, 但加速度反而减小, 即大颗粒粉末的运动受激光推力的影响更小。

表4 单颗粉末的物理状态  
Tab.4 Physical state of single particle powder

Number	Power/W	Scanning speed/(m·s <sup>-1</sup> )	L/mm	d <sub>2</sub> /μm	f <sub>1</sub> /mN	p <sub>1</sub> /Pa	f <sub>2</sub> /mN	a/(m·s <sup>-2</sup> )
14	1500	3	30	27.5	15.71	3.20×10 <sup>5</sup>	0.190	1.81×10 <sup>8</sup>
15	1500	3	30	42.5	12.72	2.59×10 <sup>5</sup>	0.368	3.97×10 <sup>7</sup>
16	1500	3	30	61.5	9.85	2.01×10 <sup>5</sup>	0.596	1.01×10 <sup>7</sup>

### 3 结论

1) 利用悬臂梁的简谐振动, 对连续光纤激光作用靶材时产生的推力进行研究, 由此提出了基于悬臂梁振动的连续光纤激光推力计算物理模型。模型与初始振幅  $\alpha_1$ 、转动惯量  $J$ 、固有自振频率  $\omega$ 、悬臂梁长度  $L$  和激光作用时间  $T_1$  等因素有关, 通过三种不同长度的悬臂梁系统测试发现, 在激光功率为 900 W、扫描速度为 3 m/s 时, 测得的平均推力为 2.43 mN, 推力值结果一致性较高, 所建立的模型准确可靠。

2) 在靶材不被激光气化烧穿的情况下, 随着激光能量密度上升, 连续光纤激光对靶材的推力显著增加。其中在激光功率为 1500 W、扫描速度为 1 m/s 下, 钢片所受推力可达 15.67 mN。

3) 激光产生的推力可以对粉末的运动产生较大的影响。在激光功率为 1500 W、扫描速度为 3 m/s 时, 单颗粉末的加速度高出重力加速度数倍, 大颗粒粉末的运动受激光推力的影响相对较小。

### 参考文献:

- [1] 张净宜, 邱长军, 贺沅玮, 等. 不同 Ni 含量铁基激光熔覆层组织和性能的研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 221-225.  
ZHANG Jing-yi, QIU Chang-jun, HE Yuan-wei, et al. Microstructure and properties of Fe-based laser cladding with different Ni content[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 221-225.
- [2] 李守彪, 万明奇, 沈亮, 等. 激光熔覆 Ni 基纳米复合涂层的冲蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 119-126.  
LI Shou-biao, WAN Ming-qi, SHEN Liang, et al. Seawater erosion-corrosion resistance of Ni-based composite coatings by laser cladding[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(4): 119-126.
- [3] 冯晓甜, 顾宏, 周圣丰, 等. 送粉式激光增材制造 TC4 钛合金熔覆层组织及电化学腐蚀行为的研究[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 44-53.  
FENG Xiao-tian, GU Hong, ZHOU Sheng-feng, et al. Microstructure and electrochemical corrosion behavior of TC4

- titanium alloy cladding layer prepared with powder feeding laser additive manufacturing[J]. Chinese journal of lasers, 2019, 46(3): 44-53.
- [4] SUN Jia-yu, ZHAO Yu, YANG Lin, et al. Effect of shielding gas flow rate on cladding quality of direct laser fabrication AISI 316L stainless steel[J]. Journal of manufacturing processes, 2019, 48: 51-65.
- [5] 张庆茂, 刘文今, 杨森, 等. 激光与熔覆粉末作用效率的计算及影响因素[J]. 激光技术, 2002(3): 170-173.  
ZHANG Qing-mao, LIU Wen-jin, YANG Sen, et al. Calculation of the interaction efficiency between the laser beam and the cladding powder and effective factors[J]. Laser technology, 2002(3): 170-173.
- [6] SERGACHEV D V, KOVALEV O B, GRACHEV G N, et al. Diagnostics of powder particle parameters under laser radiation in direct material deposition[J]. Optics and laser technology, 2020, 121: 105842.
- [7] GULYAEV I P, KOVALEV O B, PINAEV P A, et al. Optical diagnostics of radiation interaction with the powder stream laterally transported during laser cladding[J]. Optics and lasers in engineering, 2020, 126: 105877.
- [8] YIN Mei-gui, CAI Zhen-bing, LI Zhen-yang, et al. Improving impact wear resistance of Ti-6Al-4V alloy treated by laser shock peening[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(7): 1439-1448.
- [9] 汪军, 李民, 汪静雪, 等. 激光冲击强化对 304 不锈钢疲劳寿命的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 100-107.  
WANG Jun, LI Min, WANG Jing-xue, et al. Effects of laser shock processing on fatigue life of 304 stainless steel[J]. Chinese journal of lasers, 2019, 46(1): 100-107.
- [10] 陈彬, 张兴权. 激光冲击强化对回转支承用钢 42CrMo 表面性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 62-68.  
CHEN Bin, ZHANG Xing-quan. Effect of laser shock peening on surface performance of slewing bearing steel 42CrMo[J]. Surface technology, 2019, 48(2): 62-68.
- [11] 王金刚. 激光冲击强化中等离子体冲击波压力的计算[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2010.  
WANG Jin-gang. Calculation of plasma shock wave pressure in laser shock[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2010.
- [12] YU Hai-chao, LI Han-yang, WU Xiao, et al. Dynamic testing of nanosecond laser pulse induced plasma shock wave propulsion for microsphere[J]. Applied physics A—Materials science & processing, 2020, 126(1): 1-8.
- [13] 周伟静, 洪延姬, 叶继飞. 激光微推力器多脉冲作用下的力学性能测量方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S2): 10-15.  
ZHOU Wei-jing, HONG Yan-ji, YE Ji-fei. Mechanical performance measurement method for laser microthruster working in multi-pulse mode[J]. Infrared and laser engineering, 2016, 45(S2): 10-15.
- [14] 陈川, 龚自正, 杨武霖, 等. 空间碎片几何形状对激光烧蚀冲量的影响规律[J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 4-15.  
CHEN Chuan, GONG Zi-zheng, YANG Wu-lin, et al. Influence of geometry of space debris on laser ablation impulse[J]. Chinese journal of high pressure physics, 2018, 32(4): 4-15.
- [15] SURYANARAYANA C, INOUE A. Iron-based bulk metallic glasses[J]. International materials reviews, 2013, 58(3): 131-166.
- [16] 金云声, 张兴卫, 谭福利, 等. 干涉式冲量摆测试装置及其双精度数据处理方法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 138-143.  
JIN Yun-sheng, ZHANG Xing-wei, TAN Fu-li, et al. Testing device based on interferometric ballistic pendulum and its double precision data processing method[J]. Acta optica sinica, 2017, 37(5): 138-143.
- [17] 文明, 洪延姬, 王军, 等. 基于复摆模型的高速摄影冲量耦合系数测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2006(7): 1061-1065.  
WEN Ming, HONG Yan-ji, WANG Jun, et al. High speed photography measurement of impulse coupling coefficient based on compound pendulum model[J]. High power laser and particle beams, 2006(7): 1061-1065.
- [18] 陈静, 谭荣清, 郑义军, 等. 激光推进冲量耦合系数测量方法比较[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 871-874.  
CHEN Jing, TAN Rong-qing, ZHENG Yi-jun, et al. Comparison of measurement methods of impulse coupling coefficient for laser propulsion[J]. High power laser and particle beams, 2011, 23(4): 871-874.
- [19] 王向东, 邓爱民. 材料力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 125-129.  
WANG Xiang-dong, DENG Ai-min. Mechanics of material[M]. Beijing: China Water Power Press, 2014: 125-129.
- [20] 王铎, 孙毅, 程靳. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 259-287.  
WANG Duo, SUN Yi, CHENG Jin. Theoretical mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 259-287.
- [21] 漆安慎, 杜婵英. 力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 148-168.  
QI An-shen, DU Chan-ying. Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 148-168.
- [22] 薛永泰, 窦志国, 叶继飞, 等. “飞溅”对力学效应影响实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10): 137-140.  
XUE Yong-tai, DOU Zhi-guo, YE Ji-fei, et al. Experimental study on influence of splashing behavior on mechanical effects[J]. High power laser and particle beams, 2014, 26(10): 137-140.