



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目: 连续激光与复合激光辐照钢靶的相变烧蚀分析
作者: 王铭, 韩越, 车东博, 王挺峰
收稿日期: 2021-06-24
网络首发日期: 2021-07-19
引用格式: 王铭, 韩越, 车东博, 王挺峰. 连续激光与复合激光辐照钢靶的相变烧蚀分析[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210716.1554.048.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

连续激光与复合激光辐照钢靶的相变烧蚀分析

王铭^{1,2}, 韩越^{1,2}, 车东博^{1,2}, 王挺峰^{1*}

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

² 中国科学院大学, 北京 100039

摘要 本文针对千瓦级的连续激光和连续/调制脉冲复合激光辐照 SUS304 不锈钢靶进行了烧蚀与相变仿真模型的建立, 计算了钢靶在复合激光和连续激光辐照下的温升曲线以及相变分布, 并经过实验得到验证。采用动网格方法描述钢靶的烧蚀过程, 得到钢靶的烧蚀与相变深度随时间变化曲线。将上述结果结合实验进行分析验证, 在温升、相变分布与烧蚀过程方面得到较好吻合。根据仿真和实验结果得知钢靶在上述激光辐照下发生穿孔的方式可按能量密度的高低分为汽化穿孔和熔融穿孔两种方式。在输出功率相同的情况下对 20mm 钢靶进行辐照, 2.55kW/0.85kW 的复合激光较比 3.4kW 连续激光的速度快 41%, 在烧蚀过程中质量迁移方式为熔融和汽化冲压共同作用, 在烧蚀过程中明显的熔融物飞溅现象, 这对激光对钢靶的温升、相变烧蚀过程形成了一定程度的正反馈。

关键词 激光辐照; 钢靶; 相变; 烧蚀; 数值仿真

中图分类号 TK124;O434.3 **文献标志码** A

Analysis of phase change and ablation of steel target irradiated by continuous laser and composite laser

Wang Ming^{1,2}, Han Yue^{1,2}, Che Dong-bo^{1,2}, Wang Ting-feng^{1*}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract In this paper, the simulation of ablation and phase change of SUS304 stainless steel target irradiated by continuous laser and continuous/modulated pulse composite laser and continuous laser is established. The temperature rise curve and phase change distribution of steel target irradiated by composite laser and continuous laser are calculated and verified by experiments. The dynamic grid method refers to the ablation process of steel target, and the curve of the ablation and phase change depth with time is obtained. The above results of temperature rise, phase transition distribution and depth of phase changing are in fair agreement. According to the simulation and experimental results, the perforation of steel target under the above laser irradiation can be divided into two ways: Vaporization perforation and melting perforation according to the power density. When the output power is the same, the speed of the 2.55kW/0.85kW composite laser is 41% faster than that of the 3.4kW continuous laser for the 20mm steel target, and the mass transfer mode is the joint action of melting and vaporization stamping, and the molten material splashing phenomenon

基金项目: 中科院前沿科学重点研究项目 (No. QYZDVSWSLH014)

*E-mail: wtfeng@sina.com

is obvious in the ablation process, which forms a certain degree of positive feedback to the temperature rise and phase change and ablation process of the steel target.

Key words laser irradiation; steel target; phase change; ablation; numerical analysis

OCIS codes 140.3440; 350.1820; 000.6850

1 引言

传热与质量迁移是强激光与金属相互作用的基础。激光打孔为利用通过光束汇聚系统的高能激光束辐照金属靶材,使其在受辐照的局部区域发生温升、相变等热物理现象,从而达到打孔的目的。在激光与金属靶材的相互作用过程中,金属在辐照区域内的相变响应受环境因素(温度、空气流速等)、材料热物理性质(传热系数、比热容等)、材料表面特性(吸收率)以及激光参数(功率、光斑半径、脉冲频率等)影响。随着激光加工技术在工业生产中的应用愈加广泛,许多学者在如何改善激光对金属的辐照效应方面开展了相应的解析模型与数值模拟的研究^[1-5]。

在实际激光对金属靶材进行打孔的过程中,金属的相变熔融物会阻碍激光向金属材料内部辐照,将熔融物从熔池中排出需要消耗部分激光能量,导致了实际激光打孔效率低。早在1978年,美国陆军移动设备研发司令部的 J.A.FOX 与 E.C.Sluss^[6]提出了连续激光与脉冲激光叠加以增加热耦合效率,从而缩短打孔时间的方法,最终得出了可用连续/脉冲复合激光作打孔光源的结论。2001年, C.Lehane 与 H.S.Kwok^[7]提出了将两个 Nd:YAG 泵浦源串联放置在同一谐振腔以实现复合脉冲激光输出,最终达成对不锈钢靶材的高效打孔效果,该技术得以实现是因为二次激光脉冲快速蒸发熔融材料所产生的反冲压力。2009年, C.D.Boley 与 K.P.Cutter 等^[8]对气流对大尺寸激光光斑辐照铝板的影响展开了研究,其试验表明,当激光加热使靶材发生软化时,气流引起的前后表面压力差导致的剪切应力可使材料在远低于熔点的情况下实现对材料的破坏去除。2018年,许本志与齐丽君等^[9]通过理论计算得出了复合激光近场打孔的最佳匹配参量,经其实验验证,复合脉冲激光打孔速率较毫秒脉冲激光单独打孔速率最大提高 3.3 倍。如该文献中所述,在近场辐照的条件下,激光光束通过扩束聚焦系统后,到靶光斑直径为微米量级,峰值功率密度量级为 10^7 W/cm^2 ,因此打孔速度极快,对 5mm 钢板的打孔时间仅需数十毫秒。而与近场辐照不同,对于远场辐照而言,激光光束传输受光学系统和环境因素等多方面限制,最终聚焦于靶面的激光光斑尺寸为毫米量级,因此到靶功率密度较低,且质量迁移方式也有所差异。

本文针对连续/调制脉冲复合激光与连续激光辐照 SUS304 钢质壳体靶材的相变和烧蚀

过程对比开展研究。重点研究在毫米级光斑条件下激光光斑的大小对钢靶热损伤的影响，并结合多物理场耦合仿真和实际实验对钢靶的烧蚀历程开展分析。

2 模型建立

2.1 理论模型

与超快激光对靶材的作用机理不同^[10]，对于脉宽为毫秒量级的调制脉冲激光而言，材料有足够时间建立局部热平衡。因此可将激光能量引入基于傅里叶定律的热传导方程中。在金属靶材的固相阶段，材料内部的温度场可由如下方程表示：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

其中 ρ 为靶材密度， C_p 为靶材热容， T 为温度， t 为时间， k 为热导率， Q 为内热源项。由于金属对激光吸收的趋肤效应，其吸收深度远小于激光波长，因此可将激光热源视为表面热源。因此上述方程可改写为：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2)$$

结合实际试验确定方程的初始条件和边界条件。其中初始条件如下：

$$T_0 = T_{\text{temp}} \quad (3)$$

T_{temp} 表示环境温度。在辐照面处的边界条件如下：

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = AI - h(T - T_{\text{temp}}) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{temp}}^4) \quad (4)$$

其中 A 代表激光在靶材表面的反射率， I 为激光输出光强， h 为对流换热系数， ε 为表面发射率， σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。激光为高斯光源，其在光斑上的光强分布为：

$$I(r, t) = I_0(r, t) \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (5)$$

其中 I_0 为输出的峰值功率密度， r 为光斑内径向位置， r_0 为光斑半径。对于连续/调制脉冲的复合激光， I_0 可由下式表示：

$$I(r, t) = I_{\text{cw}} g_1(t) + I_{\text{pulse}} g_2(t) \quad (6)$$

在式中 I_{cw} 与 I_{pulse} 分别表示连续激光与脉冲激光的峰值功率密度， g_1 与 g_2 分别表示连续激

光与脉冲激光的时域函数，可用矩形波函数表示^[11]：

$$g_1(t) = \begin{cases} 1, t > 0 \\ 0, t = 0 \end{cases}$$

$$g_2(t) = \begin{cases} 1, \Delta t \leq t \leq \Delta t + \tau \\ 0, t < \Delta t, t > \Delta t + \tau \end{cases} \quad (7)$$

在金属靶材的相变阶段，金属先由固相变为液相，在发生相变处的等效热容表示为：

$$C_p = \begin{cases} C_{ps}, T < T_s \\ (1 - \frac{T - T_s}{T_l - T_s}) \cdot C_{ps} + \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \cdot C_{pl} + \frac{L_l}{T_l - T_s}, T_s \leq T < T_l \\ C_{pl}, T \geq T_l \end{cases} \quad (8)$$

其中 C_{ps} 与 C_{pl} 分别代表靶材的固相热容和液相热容， T_s 与 T_l 分别代表靶材的固相点和液相点， L_l 为金属靶材的液相潜热。

当靶材继续温升进入气相阶段时，熔融液体在某一温度下气化的质量变化率可由下式描述^[12]：

$$v_m = \frac{dm}{dt} = \frac{P_0 \exp\{[-L_v / R(1/T - 1/T_b)]\}}{\sqrt{2\pi RT / M}} \quad (9)$$

其中 P_0 为标准大气压强， R 为气体普适常数， M 为金属摩尔质量， T_b 为靶材沸点常数在该温度下，金属靶材在辐照面上的气化速度为：

$$v_{dv} = \frac{v_m}{\rho} \quad (10)$$

同时单位时间、单位面积液体表面因汽化所损失的入射激光能量为：

$$I_{eva} = L_v v_m \quad (11)$$

将上式加入固相阶段中热传导方程在辐照面处的边界条件中，可得在相变过程中热传导方程的边界条件为：

$$-k \frac{\partial T}{\partial t} = AI - h(T - T_{temp}) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{temp}^4) - I_{eva} \quad (12)$$

在下面的仿真计算中，靶材参数的各项热物性如表 1 所示。激光参数如表 2 所示。

表 1 SUS304 不锈钢的热物性参数^{[13][14]}

Table1 Thermal property parameters of SUS304 stainless steel

Parameter	Symbol/unit	Solid phase	Liquid phase
Density	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7200	6900

Specific heat	Cp/(J·K·kg ⁻¹)	711.8	711.8
Thermal conductivity	k/(W/m ⁻¹ ·K ⁻¹)	22	22
Melting point	Tm/K	1700	
Boiling point	Tb/K	3200	
Latent heat of melting	Lm/(J·kg ⁻¹)	2.47×10 ⁵	
Latent heat of evaporation	Lv/(J·kg ⁻¹)	6.34×10 ⁶	

表 2 激光参数

Table2 Laser parameters

Parameter	Symbol/unit	Value
Laser wavelength	λ /nm	1080
Continuous laser power	P0/kW	1.0 2.0 3.0
Modulated pulsed laser power	P1/kW	1.0
Modulated pulse frequency	f/Hz	5
Pulse space ratio	a/1	0.05
Spot radius	r0/mm	5 10

由于模型与实际试验中连续激光功率密度的数量级远小于产生激光支持等离子体的产生阈值 (10^7 W/cm^2)^[15]，因此在模型中假设靶材蒸汽对激光的透过率不产生影响。同时为了简化计算，设靶材料为各向同性物质，其热物性参数在其固相和液相阶段分别取定值，在相变阶段采用上述等效热容法进行平滑过渡。

关于材料对激光的吸收率，本文通过对一维传热方程进行差分后反推^[16]，结合实际激光辐照 SUS304 不锈钢过程中所记录的钢板背面峰值温度-时间数据，可求得吸收率随时间的变化。以 2.8kW 连续激光辐照 9mm SUS304 不锈钢板为例，钢板温升数据如图 1 所示，所求得吸收率随时间变化曲线如图 2 所示。通过计算结果与相关文献^[14]对比，得出吸收率的参考值为 0.05-0.3。在下面模型中根据仿真对比实验的方法对吸收率进行适当调整。

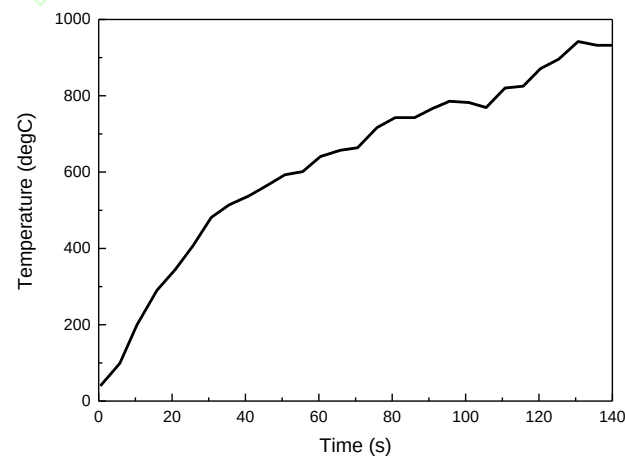


图 1 9mm SUS304 不锈钢靶背面曲线温升

Fig.1 The maximum temperature of rear surface of 9mm SUS304 stainless steel target with 2.8kW output power

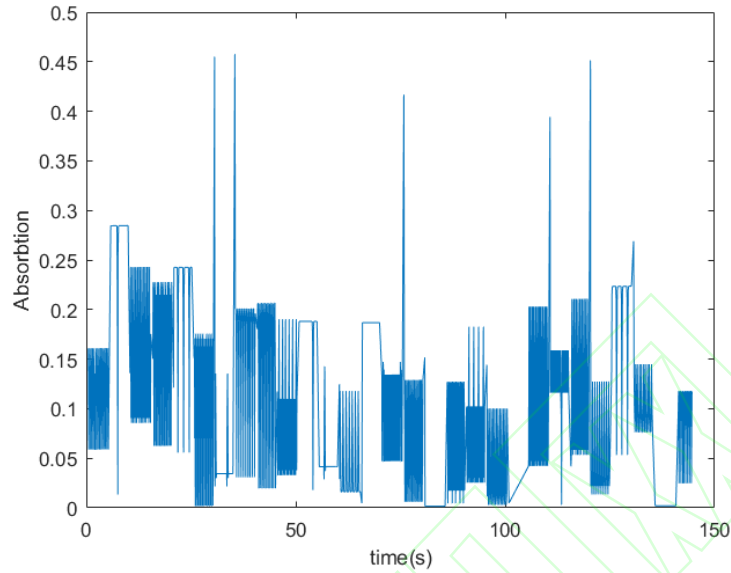


图 2 计算所得钢靶对激光的吸收率曲线

Fig.2 The calculated laser absorption curve of the steel target

2.2 数值模拟

本文基于 COMSOL Multiphysics 软件采用有限元方法进行仿真分析。几何建模采用三维结构，由于试验所用靶材为对称结构，为减少计算量，所采用几何建模如图 3 所示，其中 xz 面为对称截面，在仿真过程中将对称截面设置为绝热面。在仿真过程中，将激光辐照热源视为在辐照面上高斯分布的面热源，为使在辐照区域的计算更为收敛，将辐照区域的网格作密集划分。几何建模与对其网络划分如图 3 所示。

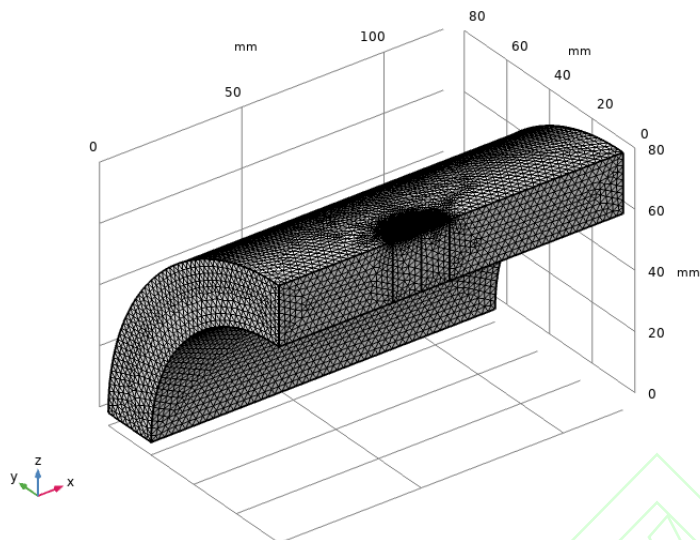


图 3 几何建模与网格划分

Fig.3 Geometric modeling and meshing

图 4 显示了 20mm 厚度的钢板对输出功率 3.0kW 连续激光辐照的热响应。现将光斑半径分别设置为 5mm 和 10mm，输出功率分别设为 1.0kW、2.0kW、3.0kW，靶材受辐照面和后表面中心温度在 300s 内的温升曲线如图 5 所示。

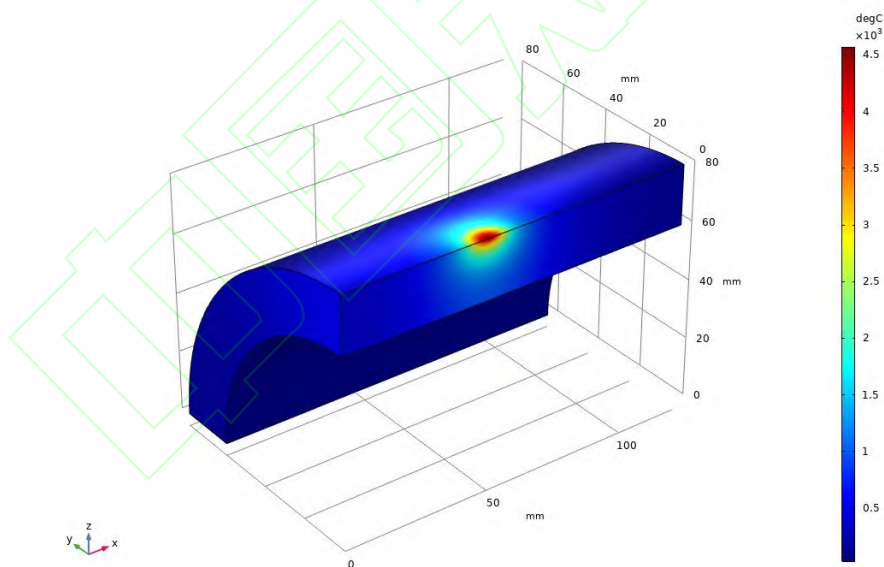
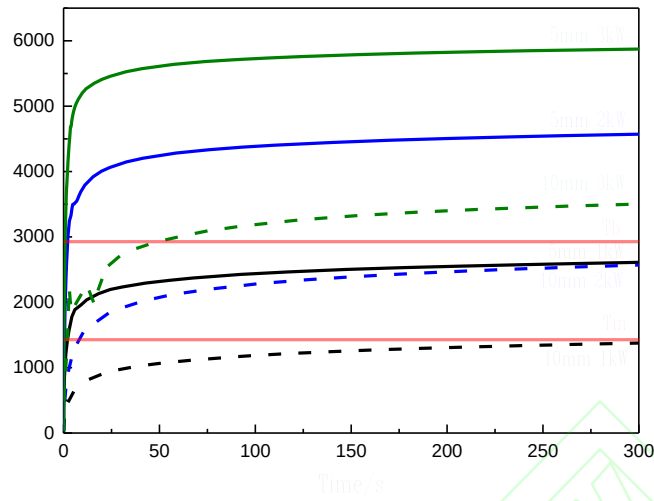
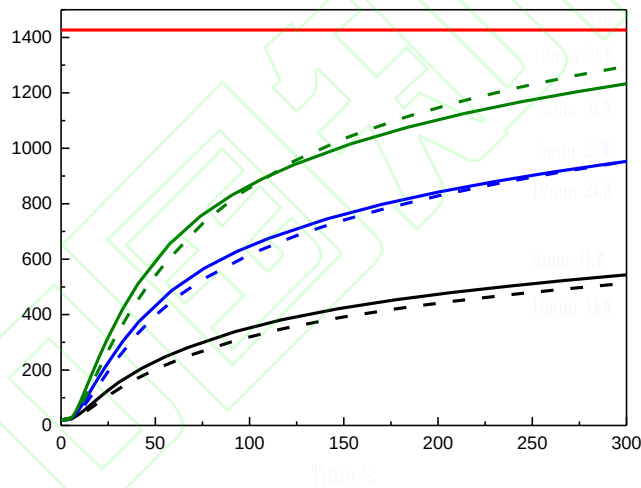


图 4 在光斑半径为 5mm，输出功率为 3.0kW 的连续激光辐照下，20mm 厚度钢板于 300s 温度云图

Fig.4 Under the spot radius of 5mm, the output power of 3.0kW continuous laser irradiation, 20mm-thickness steel plate at 300s temperature distribution



(a) 辐照面
(a) Irradiation surface



(b) 背面
(b) Back surface

图 5 20mm 厚度钢板在输出功率分别为 1.0kW、2.0kW、3.0kW 光斑半径分别为 5mm 与 10mm 的连续激光辐照下，300s 内前后表面最高温度变化

Fig.5 Under the continuous laser irradiation with output power of 1.0kW, 2.0kW, 3.0kW and spot radius of 5mm and 10mm, the maximum temperature of the front and rear surfaces of the 20mm thickness steel plate was changed within 300s

根据图 5 可知，当光斑半径为 10mm 时，输出功率为 1.0kW-2.0kW 的连续激光并未使钢靶表面发生气化，其中 1.0kW 输出功率未使钢靶发生相变。但在 5mm 光斑半径的激光辐照条件下，2.0kW 至 3.0kW 的输出功率均可使钢靶前表面在 25s 内温度超过沸点 T_b ，发生气化响应并形成烧蚀，且相较于 10mm 光斑半径的辐照热响应，5mm 光斑半径、1.0kW 功率的连续激

光可使钢靶发生液化相变。

由于存在靶材辐照面超过汽化温度的结果，仿真过程中必须考虑钢靶的汽化烧蚀效应。根据式(9)与式(10)，可由温度 T 得到钢靶的烧蚀速度 v_{dv} ，在辐照区域内的靶材因激光烧蚀导致厚度减小，从而会对靶材相变产生进一步影响。在实际实验过程中，钢靶的尺寸远大于激光光斑，采用二维模型可以在减少模型计算量的同时描述钢靶受激光辐照而发生相变与烧蚀的过程。对于烧蚀现象的模拟，本文采用变形网格方法进行实现，用烧蚀速度 v_{dv} 定义几何模型边界受温度场影响而发生的 Laplace 位移，在此过程中网格单元数量和模型拓扑性质不发生变化。

考虑烧蚀效应后，钢靶在相同输出功率、不同光斑大小的连续激光辐照下相变与烧蚀响应如图 6 所示。

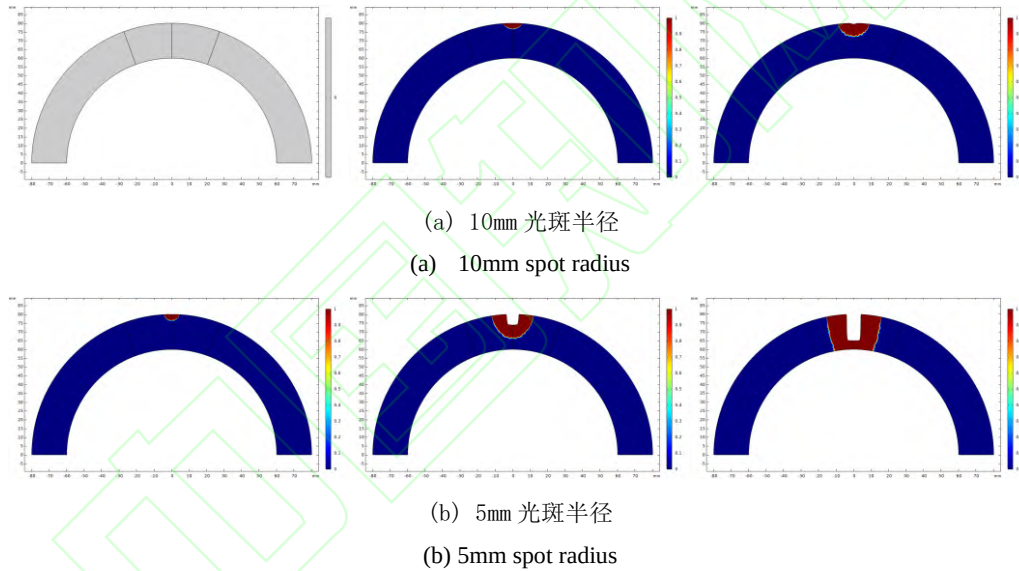


图 6 辐照时间为 60s，在不同光斑半径的条件下，20mm 厚度钢靶对输出功率分别为 1.0kW、2.0kW、3.0kW 的连续激光的相变与烧蚀响应

Fig.6 The phase transformation and ablation response of the 20mm-thick steel target to the continuous laser with output power of 1.0kW, 2.0kW and 3.0kW under the condition of the irradiation time of 60s in different spot radius

可见与三维模型结果相同的是，在 60s 辐照时间内光斑半径为 10mm 的 1.0kW 连续激光未使钢靶发生相变；当激光输出功率为 2.0kW 时，钢靶辐照面下生成最大厚度约为 5mm 的相变区域；增大输出功率至 3.0kW，钢靶相变区域面积增大，并出现少量烧蚀。改变激光光斑半径至 5mm，1.0kW 的连续激光可使钢靶发生小范围的相变；2.0kW 的连续激光可使钢靶形成最大厚度约为 12mm 的相变区域与深度约为 5mm 的烧蚀；3.0kW 的连续激光可使钢靶在辐照区域形成深度约为 15mm 的烧蚀，且其背面发生熔融现象，此时钢靶发生了熔穿（背面中心温度大于 T_m ）。

在上述连续激光辐照条件的基础上，附加毫秒级调制脉冲激光热源。调制脉冲输出功率 1.0KW，脉宽为 10ms，脉冲频率为 5Hz，辐照时间为 20s，此时钢靶的辐照面对连续/调制脉冲激光的热响应如图 7 所示。

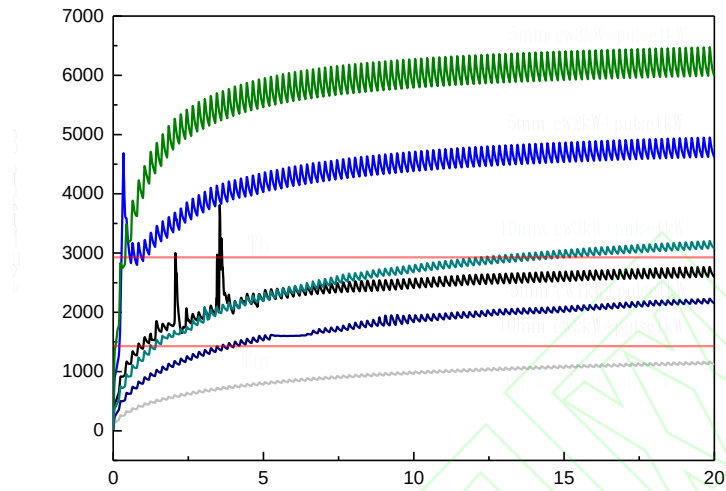
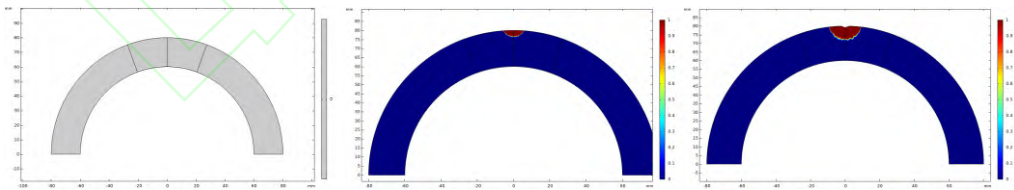


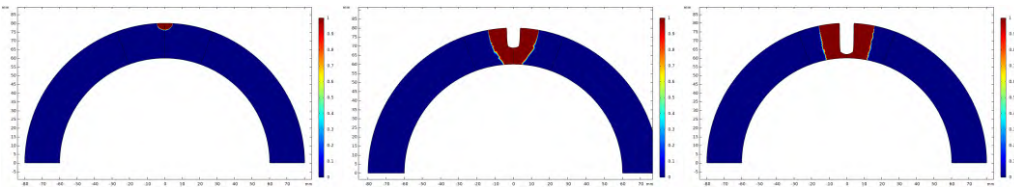
图 7 钢靶辐照面在连续/调制脉冲激光辐照下的最高温度变化

Fig.7 The maximum temperature variation of a steel target irradiated by continuous/modulated pulsed laser

可知在附加调制脉冲之后，由光斑大小不同所导致的温升差异更为显著。当连续激光的输出功率达到 2.0kW 以上时，相较于 10mm 的光斑半径的复合激光所造成的熔融烧蚀（表面温度超过 T_m ），5mm 光斑半径的复合激光会在 5s 内使钢靶表面形成汽化烧蚀（表面温度超过 T_b ）。图 8 显示了钢靶在不同光斑大小条件下，采用相同功率的连续/调制脉冲复合激光辐照 60s 后钢靶的相变与烧蚀结果。



(a) 10mm 光斑半径
(a) 10mm spot radius

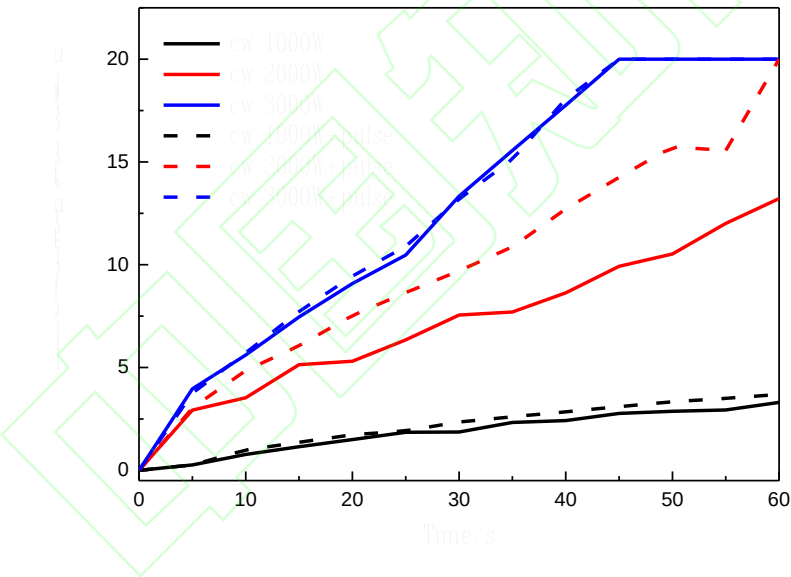


(b) 5mm 光斑半径
(b) 5mm spot radius

图 8 辐照时间为 60s，在不同光斑半径的条件下，20mm 厚度钢靶对输出功率分别为 1.0kW、2.0kW、3.0kW 的连续/调制脉冲复合激光的相变与烧蚀响应

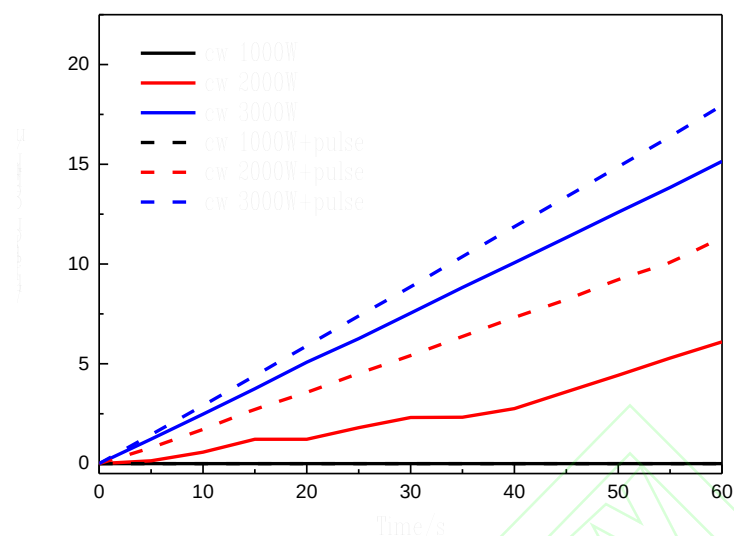
Fig.8 The phase transformation and ablation response of the 20mm-thick steel target to the continuous/modulated pulsed laser with output power of 1.0kW, 2.0kW and 3.0kW under the condition of the irradiation time of 60S in different spot radius

在光斑为 10mm 的情况下，钢靶对复合激光的热响应相较于连续激光无显著差距。当光斑较小时，复合激光对钢靶的烧蚀效率较连续激光有明显提高。图 9 显示了当光斑半径为 5mm 时，在上述辐照过程中不同功率的连续激光与复合激光对钢靶的相变和烧蚀深度对比。在连续激光功率分别为 1.0kW 与 3.0kW 时，钢靶在连续激光与复合激光辐照下的相变过程非常接近，其中输出功率为 1.0kW/1.0kW 的复合激光并未使钢靶产生烧蚀。当复合激光输出功率为 2.0kW/1.0kW 时，钢靶相变深度与烧蚀深度的变化率与相较连续激光都有较大提升，而从烧蚀效率提升角度而言，2.0kW 连续激光与 1.0kW 调制脉冲激光组成的复合激光对钢靶烧蚀效率提升较为突出。



(a) 相变深度

(a) Depth of phase transformation



(b) 烧蚀深度

(b) Depth of ablation

图 9 钢靶在连续激光与复合激光辐照过程中相变深度与烧蚀深度对比
Fig.9 Comparison of phase transformation depth and ablation depth of steel target during continuous laser and composite laser irradiation

3 实验分析

建立平台进行实验，实验按激光输出方式分为两组进行，分别为连续激光组和连续/调制脉冲激光组。实验所采用的激光器为 1080nm Nd-YGA 光纤激光器，最高输出功率 6kW，光束质量 。对于连续激光组，激光光斑半径为 8mm。对于连续/调制脉冲激光组，调制脉冲采用方波调制，设置脉宽 50ms，频率 5Hz，光斑半径为 8mm。两组实验所采用实验方案如表 3 所示。

表 3 实验方案

Table3 Experimental scheme

Experimental group	Serial number	Spot radius/mm	Output power/kW	Thickness /mm
Continuous laser	1	2.5	1.4	7.5
	2	6.5	1.4	7.5
	3	8	3.4	20
Continuous/modulated pulsed laser	1	8	2.55/0.85	20

由热像仪记录钢靶背部温升曲线，如图 10 所示。可见实验和数值仿真吻合程度较好。使用输出功率为 3.4kW 的连续激光和 2.55kW/0.85kW 对 20mm 后的钢靶进行辐照实验，用带有衰减片的摄影机记录辐照过程。钢靶受辐照后能量从辐照面向边界和内部传导，并且由于

内部热阻和边界热损耗等原因,导致出现温度梯度,温度持续提升直至动态平衡后趋于稳定。在超过 2.0kW 的连续激光和连续/调制脉冲复合激光辐照下,壳体沿光束方向发生烧蚀打孔,该过程伴随熔化、汽化导致的质量迁移,当辐照区域的能量密度较大时,还会发生飞溅现象。开始辐照后,在辐照区域发生相变形成小熔池,随着能量的持续注入,熔池扩大,伴随熔池中心出现穿孔,熔融物突破表面张力向溶洞外流出,当背面中心发生熔融时,后表面熔池向内塌陷,直至钢靶被烧穿。贯穿方式可按能量密度的大小分为两种方式,能量密度较大时,钢靶的质量迁移方式主要为汽化蒸发,此时穿孔孔径接近光斑尺寸如图 11(a) 所示;当能量密度较小时,钢靶的质量迁移方式主要为相变熔融物流出,此时穿孔孔径将大于光斑,孔型呈锥形漏斗状,如图 11(b) 所示。可见该过程与上述烧蚀与相变仿真分析结果吻合。

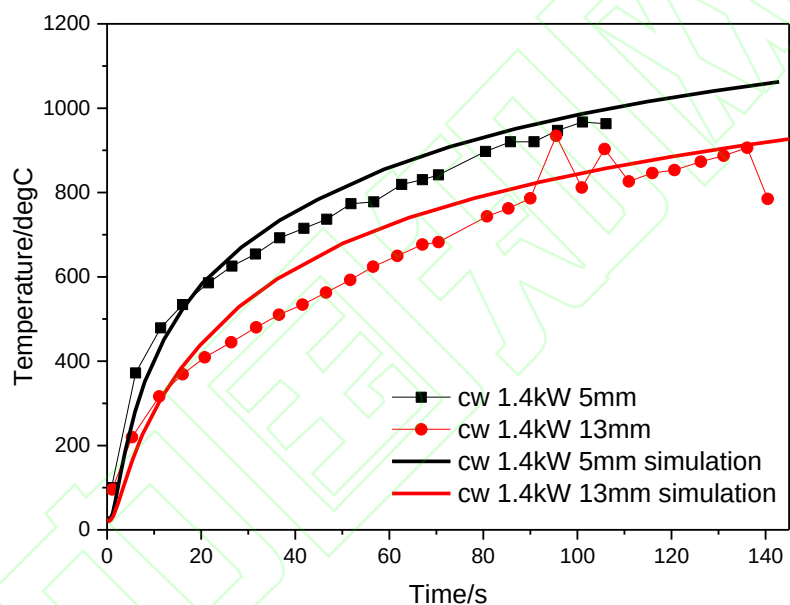
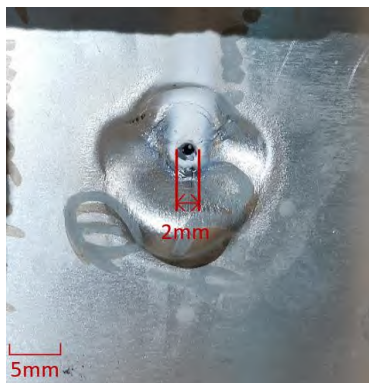


图 10 2.5mm 与 6.5mm 光斑半径 1.4kW 连续激光辐照钢靶背面温升曲线与实验对比

Fig.10 Comparison of temperature rise curve and experiment on back surface of steel target irradiated by 2.5mm and 6.5mm spot radius of 1.4kW continuous laser



(a) 能量密度较大时汽化穿孔



(b) 能量密度较小时熔融穿孔

(a) Vaporization perforation at high energy density (b) Melt perforation at lower energy density

图 11 激光辐照钢靶的两种穿孔方式

Fig.11 Two perforation modes of laser irradiated steel target

使用输出功率为 2.55kW/0.85kW 的复合激光进行辐照,钢靶在辐照区域发生轻微汽化飞溅,在 177s 时钢靶烧穿 20mm 不锈钢靶,时间相比连续 3.4kW 连续激光辐照烧穿缩短 41%。实验数据与模型之间偏差来源于以下方面:1. 材料的吸收率和热物性参数随烧蚀过程的进行而发生变化;2. 模型所设边界条件比较简单,在实际实验过程中系统的边界条件具有不确定性。

4 结 论

本文通过仿真与实验相结合的方法,建立了 SUS304 不锈钢受毫米级光斑的激光辐照过程中温升、相变与烧蚀模型,计算出了连续/调制脉冲复合激光与连续激光辐照过程中钢靶的温升与相变烧蚀过程,分析在不同功率、不同光斑尺寸复合激光与连续激光的温升与相变烧蚀对比。通过仿真与实验结果得以表明:连续激光在附加调制脉冲激光后,光斑尺寸变化会进一步增大钢靶温升差异;在调制脉冲输出功率为 1.0kW,频率 5Hz,占空比为 0.25 的条件下,2.0kW 连续激光附加该脉冲的烧蚀效率有显著提升。在连续激光对钢靶的烧蚀过程中,钢靶的质量迁移方式按光斑大小导致的功率密度高低分为汽化穿孔和熔融穿孔两种方式,附加调制脉冲后,钢靶的烧蚀过程转为熔融和汽化冲压共同作用。该研究有利于加深对钢靶受激光远场辐照下烧蚀过程的认识,对金属的远场激光打孔、激光参数调整等加工过程具有重要意义。

参考文献

- [1] Tosto S . Modeling and computer simulation of pulsed-laser-induced ablation[J]. Applied Physics A, 1999, 68(4):439-446.
- [2] Amoroso S , Ausanio G , Bruzzese R , et al. Characterization of laser ablation of solid targets with near-infrared laser pulses of 100 fs and 1 ps duration[J]. Applied Surface Science, 2006, 252(13):4863-4870.
- [3] Kasparov K N , Ivlev G D , Belozeroval L I , et al. Temperature measurements in the pulsed laser heating of metals[J]. Measurement Techniques, 2011, 53(12): 1376-1379.
- [4] He Y J, Wang W, Xu B Z, et al. Experimental study of compound pulse depth laser drilling[J]. Laser Technology, 2017, 41(03): 380-384.
何雅静,王伟,许本志,等.复合脉冲深度激光打孔的实验研究[J].激光技术,2017,41(03): 380-384.

- [5] Wen K, Li H Z, Ma Z, et al. Effect of spot size on temperature response of aluminum alloy irradiated by continuous laser[J]. Chinese Optics, 2020, 13(05): 1023-1031.
文康,李和章,马壮,等.光斑尺寸对连续激光辐照铝合金温度响应影响研究[J].中国光学,2020,13(05): 1023-1031.
- [6] FOX J A, SLUSS E C. The effect of combining cw laser radiation with pulses [C]/AIAA 16th Aerospace Sciences Meeting.Huntsville,USA: Aircraft Industries Association of America, 1978: 16-18.
- [7] Lehane C , Kwok H S . Enhanced drilling using a dual-pulse Nd:YAG laser[J]. Applied Physics A, 2001, 73(1): 45-48.
- [8] Boley C D , Cutter K P , Fochs S N , et al. Interaction of a high-power laser beam with metal sheets[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(4): 043106.
- [9] Xu B Z, Qi L J, Wang W, et al. Study on optimum matching parameters of compound laser drilling[J]. Laser Technology, 2018, 42(01): 5-10.
许本志,齐丽君,王伟,等.复合激光打孔最佳匹配参量的研究[J].激光技术,2018,42(01):5-10.
- [10] Zhang L. Study on optimum matching parameters of compound laser drilling[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 3-5.
张梁. 毫秒激光致固体靶材表面气化及熔融喷溅的研究[D].南京: 南京理工大学,2018: 3-5.
- [11] Li C, Gao X, An L Y Z, et al. Study on thermal characteristics of aluminum target irradiated by continuous/pulse composite laser beam[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2018, v.41(02):5-10.
李超,高勋,安良友志,等.连续/脉冲复合激光光束辐照铝靶材的热特性研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, v.41(02):5-10.
- [12] Lu J. Physics of laser - material interaction[M]. Beijing: China Machine PRESS, 1996: 48-48.
陆建. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社, 1996: 48-48.
- [13] Guen E L , Carin M , Rémy Fabbro, et al. 3D heat transfer model of hybrid laser Nd : Yag-MAG welding of a S355 steel and experimental validation[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2011, 54(7-8):1313-1322.
- [14] He X , Norris J T , Fuerschbach P W , et al. Liquid metal expulsion during laser spot welding of 304 stainless steel[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2006, 39(3):525.
- [15] Sun C W, Lu Q S, Fan Z X, et al. Laser irradiation effect[J]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 57-64.
孙承伟,陆启生,范正修,等. 激光辐照效应[J]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 57-64.
- [16] Jin Y S, Tan F L, He J, et al. Numerical inversion of reflectivity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(03):549-552.
金云声,谭福利,贺佳,李牧,张永强,张红平,赵剑衡.反射率的数值反演[J].强激光与粒子束,2013,25(03):549-552.

网络首发:

标题: 连续激光与复合激光辐照钢靶的相变烧蚀分析

作者: 王铭, 韩越, 车东博, 王挺峰

收稿日期: 2021-06-24

录用日期: 2021-07-14

DOI: 10.3788/lop59.1114003

引用格式:

王铭, 韩越, 车东博, 王挺峰. 连续激光与复合激光辐照钢靶的相变烧蚀分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1114003.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

拉盖尔-高斯光束在凸台周围的气动光学效应

蒋倩雯 辛煜 张淇博 许凌飞 赵琦

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040101

强激光直接辐照铝靶诱导残余应力的分布特性

黄志伟 张兴权 陈彬 童靳于 方光武 段士伟

安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032

激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021409

超短激光脉冲作用下等离子激元“相变”特性研究

刘鹤元 黄翠莹 黄梅婷 张新平

北京工业大学应用数理学院, 北京 100124

激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121402

基于平面法线向量的三自由度测量方法

方国明 彭起 马浩统 乔山 边疆 陈丰 刘欣城 谭玉凤 贺壁 董理

中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209

激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111201

一维 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池的激光辐照模拟

李广济 陆健 王程民 张宏超 周大勇

南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101601