

## 激光与光电子学进展

## 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的工艺参数影响研究

明兴祖<sup>1,2</sup>, 赖名涛<sup>2\*</sup>, 袁磊<sup>2</sup>, 刘克非<sup>1</sup>, 周贤<sup>1</sup>, 明瑞<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>湖北文理学院机械工程学院, 湖北 襄阳 441053;<sup>2</sup>湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株洲 412007

**摘要** 根据面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的飞秒激光扫描加工中的温度传递过程, 建立了三温传热模型, 并建立了扫描加工中的多脉冲能量累积模型。仿真分析了改变激光能量密度对烧蚀材料时电子晶格温度的变化, 多脉冲加载下电子、晶格和材料表面最高温度的变化, 以及改变扫描速度和扫描间距对加载能量的变化, 结果表明随着能量密度的增大, 电子最高温度从 37000 K 上升至 44000 K、最终平衡温度从 17000 K 上升至 22000 K。在多脉冲的加载下, 随着能量密度的增大, 电子最高温度也有一定程度的增大, 并且材料表面最高温度的平衡温度也会增大, 从 2600 K 上升至 3250 K。随着扫描速度和扫描间距的增大, 多脉冲累积能量有一定的减小, 能量分布尺度在增大。试验分析了不同能量密度、扫描速度和扫描间距对飞秒激光烧蚀面齿轮材料的影响, 并对烧蚀形貌进行了粗糙度分析, 结果表明, 当能量密度为  $4.34 \text{ J/cm}^2$ 、扫描速度为 300 mm/s、扫描间距为 18  $\mu\text{m}$  时, 烧蚀形貌质量较好。该研究为提高飞秒激光扫描加工面齿轮材料的表面形貌质量提供了研究基础。

**关键词** 激光光学; 飞秒激光; 三温传热模型; 扫描速度; 能量累积效应; 扫描间距

中图分类号 TN24

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220544

## Study of Influence of Process Parameters on Femtosecond Laser Ablation of Face Gear Materials

Ming Xingzu<sup>1,2</sup>, Lai Mingtao<sup>2\*</sup>, Yuan Lei<sup>2</sup>, Liu Kefei<sup>1</sup>, Zhou Xian<sup>1</sup>, Ming Rui<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, Hubei, China;<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China

**Abstract** In this paper, a three-temperature heat transfer model was developed based on the temperature transfer process in the femtosecond laser scanning processing of the face gear material 18Cr2Ni4WA, and a multi-pulse energy accumulation model in the scanning process was established. The simulation analyzed the changes of electron lattice temperature when changing the laser energy density on the ablated material, the changes of maximum temperature of electron, lattice and material surface under multi-pulse loading, and the changes of loading energy when changing the scanning speed and scanning interval, and concluded that with the increase of energy density, the maximum temperature of electron increased from 37000 K to 44000 K, and the final equilibrium temperature increased from 17000 K to 22000 K. Under multi-pulse loading, with the increase of energy density, the maximum temperature of electrons also increases to a certain extent, and the equilibrium temperature of the highest temperature of the material surface also increases, from 2600 K to 3250 K. With the increase of scanning speed and scanning interval, the accumulated energy of multi-pulse has a certain decrease, and the energy distribution scale is increasing. The experiments analyzed the effects of different energy densities, scanning speeds, and scanning intervals on the femtosecond laser ablated surface gear material, and the roughness analysis of the ablated morphology was carried out, and it was concluded that the quality of the ablated morphology was better when the energy density was  $4.34 \text{ J/cm}^2$ , the scanning speed was 300 mm/s, and the scanning interval was 18  $\mu\text{m}$ . These provide a research basis for improving the surface morphology quality of the surface gear materials processed by femtosecond laser scanning.

**Key words** laser optics; femtosecond laser; three-temperature heat transfer model; scanning speed; energy accumulation effect; scanning interval

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-03-10; 网络首发日期: 2022-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51975192)、湖南省自然科学基金(2021JJ30214, 2021JJ50042)、“机电汽车”湖北省优势特色学科群开放基金(XKQ2021044, XKQ2021050)、湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队(T201919)

通信作者: \*1941578169@qq.com; \*\*844153340@qq.com

## 1 引言

随着飞秒激光烧蚀金属靶材的研究愈来愈多,对飞秒激光烧蚀金属的加工机制也逐渐清晰,但是目前研究大多是对材料进行点加工,以观测烧蚀凹坑形貌,从而得出飞秒激光对烧蚀形貌的影响规律。对于飞秒激光烧蚀金属材料还有许多问题需要探索,比如如何去减少或避免烧蚀产生的熔融材料堆积形成的重铸层、烧蚀热影响区的减少和避免、对材料进行扫描加工的烧蚀规律研究等。当飞秒激光在加工不同的材料时,其对材料的电离和蚀除机理等也存在较大差异<sup>[1]</sup>。

Wang 等<sup>[2]</sup>研究了单个皮秒脉冲和多脉冲对不锈钢的激光烧蚀情况,利用相爆炸机制建立模型模拟实现即时材料去除。岳端木等<sup>[3]</sup>设计了不同扫描速度和功率下的多脉冲飞秒激光烧蚀 NiTi 合金试验,分析了多脉冲的累积效应对烧蚀阈值的影响规律,通过观察不同加工参数下的烧蚀形貌,分析了飞秒激光烧蚀 NiTi 合金产生热影响区域的原因,在能量密度过大时加工区域产生相爆炸;随后又开展了激光功率、重复频率、离焦量、扫描速度和扫描次数等 5 个激光工艺参数的正交试验,分析了这 5 个激光工艺参数对微孔加工影响,探究了微孔的成形机制以及各参数对微孔加工精度和微观形貌的影响,并最终得出微孔加工精度和微观形貌相对最优的参数组合<sup>[4]</sup>。Kumar 等<sup>[5]</sup>利用 COMSOL 软件,将飞秒激光烧蚀 Ti-6Al-4V 合金材料的温度模型进行了详细的阐述。王文豪等<sup>[6]</sup>提出一种基于 Bezier 曲面分割法的光斑重叠率补偿方法,通过研究平均功率、扫描速度、离焦量等激光工艺参数对 TN85 金属陶瓷激光刻蚀深度和宽度的影响,并得出激光工艺参数的优化组合。林嘉剑等<sup>[7]</sup>考虑到能量累积效应和激光聚焦的变离焦量效应,建立了材料内部的能量吸收模型,通过改变脉冲数和激光功率,研究了飞秒激光烧蚀凹坑直径和深度的变化规律。Park 等<sup>[8]</sup>研究了多个激光烧蚀参数的优化组合,以达到高效切割和最佳精度要求。Pfeiffer 等<sup>[9]</sup>介绍了激光加工参数对各种材料的烧蚀过程的影响,并研究了激光加工具有各种几何形状和分辨率低至几微米的复杂三维微纳结构。崔静等<sup>[10]</sup>利用飞秒激光烧蚀 TC4 合金,观察到随着扫描速度的降低,扫描条纹上方的二级微纳凸起尺寸增大,导致粗糙度增加,扫描条纹侧面出现经典低空间频率条纹。Schnell 等<sup>[11]</sup>详细研究了多脉冲激光光斑重叠和扫描线重叠,以及激光能量密度对 Ti6Al4V 的表面形貌的影响。尚凯文等<sup>[12]</sup>研究不同的工艺参数对复合材料—Tedlar 铝薄膜(厚度为 2  $\mu\text{m}$ )表面微观形貌的影响,通过理论优化得出合理的工艺参数。Bauer 等<sup>[13]</sup>发现了金属的超短脉冲激光扫描加工中,存在两种显著差异的烧蚀效果:表面质量较好时,烧蚀表面的反射率高;而表面质量较低时,烧蚀表面的反射率低得多,表面氧化并覆盖着大约 10  $\mu\text{m}$  的小凸起。

大多学者对材料进行激光扫描加工研究是利用长脉冲连续激光来实现焊接、锈蚀层的清洗、氧化层的抛光等。马明亮<sup>[14]</sup>利用纳秒脉冲激光去除 Q345 钢表面锈蚀,对激光光斑移动路径进行了规划,建立了氧化物的分层清洗模型,并分析了激光能量的传递过程和主要的清洗机理。查榕威等<sup>[15]</sup>模拟激光不同脉宽、激光功率、光斑重叠率下对锈蚀层表面温度场和烧蚀形貌的影响,发现适当地增大脉宽和提高平均功率有利于激光清洗的效率和质量,并发现随着光斑重叠率的提高,激光脉冲之间的热积累会明显增强。

本文分析面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的飞秒激光扫描加工中的温度传递过程,建立了三温传热模型,对扫描过程进行路径规划和移动光源能量累积效应的计算和模拟。

## 2 飞秒激光扫描加工面齿轮材料三温传热模型

飞秒激光辐照在材料表面会发生一系列物理上的现象,当温度达到材料熔化阈值,材料开始由固态变成液态,随着温度的继续升高达到气化阈值,材料开始从液态变成气态,从而被蚀除形成烧蚀坑。在固体传热中,晶格振动起着至关重要的作用。在非磁性材料中,晶格是唯一传递热量的因素,在金属材料中,电子是主要传递热量的因素。本文研究材料为面齿轮 18Cr2Ni4WA,材料成分主要为 Fe。

激光的扫描加工,扫描速度大大的影响着烧蚀的形貌,扫描速度过大时,会存在激光光斑重叠部分的能量累积未能达到材料的烧蚀阈值而只有轻微的损伤,达不到理想的烧蚀效果,而当扫描速度过慢时,会存在大量的激光光斑重叠,意味着在重叠部分会有大量的能量累积,从而导致材料损伤达不到可控的效果,表面会产生大量的微纳凸起,造成表面不平整,严重影响了烧蚀效果。飞秒激光扫描加工面齿轮材料示意图如图 1 所示。

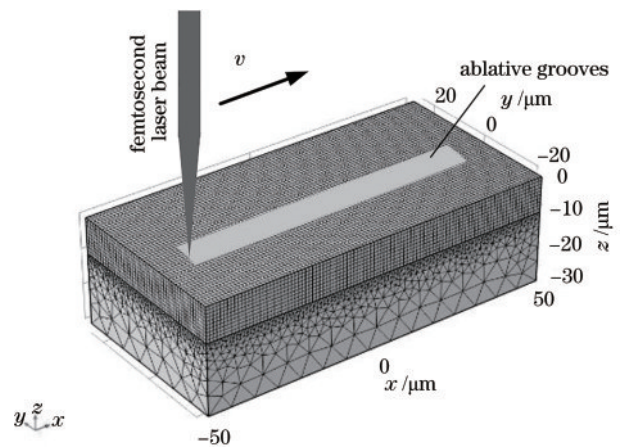


图 1 飞秒激光扫描加工材料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of material processed by femtosecond laser scanning

## 2.1 三温传热模型

在传统的双温模型中,只有光子与电子、电子与晶格之间的能量耦合,在较复杂的合金材料中,会存在晶格与晶格之间的能量传递,飞秒激光脉冲宽度远小于电子晶格弛豫时间,在双温模型的基础上加入晶格与晶格之间的能量传递,在烧蚀金属材料时,首先光子将能量传递给材料中的自由电子,导致自由电子快速升温,达到电子最高温度后,开始快速降温,此时晶格吸收来自电子的能量,快速升温,最后晶格将能量继续传递给晶格,最终三者达到温度平衡,现用如下三温方程表示<sup>[16]</sup>。

$$C_e(T_e) \frac{\partial}{\partial t} T_e = k_e(T_e) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - G(T_e)(T_e - T_1) + S(x, t), \quad (1)$$

$$C_1 \frac{\partial}{\partial t} T_1 = G(T_e)(T_e - T_1) - g(T_1 - T_s), \quad (2)$$

$$C_s \frac{\partial}{\partial t} T_s = g(T_1 - T_s), \quad (3)$$

式中: $T_e$ 、 $T_1$ 和 $T_s$ 分别表示电子温度、高温晶格温度和低温晶格温度; $G$ 和 $g$ 分别为电子与晶格耦合系数和晶格与晶格耦合系数; $S(x, t)$ 为飞秒激光热源项; $C_e$ 、 $C_1$ 和 $C_s$ 分别表示电子温度、高温晶格温度和低温晶格温度。而面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的晶格热容  $C_1$  的公式<sup>[17]</sup>表示为

$$C_1 = 472 + 13.6 \times 10^{-2} T_1 - \frac{2.82 \times 10^6}{T_1^2}, \quad (4)$$

式中: $C_e$ 随电子温度的变化而变化。由下式<sup>[18]</sup>表示为

$$C_e = B_e T_e, \quad (5)$$

式中: $B_e$ 为电子热容系数,可从表 2 中得知。当电子温度高于费米温度时,电子热导率  $k_e$ <sup>[19]</sup>可表示为

$$k_e = k \frac{(\theta_e^2 + 0.16)^{1.25} (\theta_e + 0.44) \theta_e}{(\theta_e^2 + 0.092)^{0.5} (\theta_e^2 + A \theta_1)}, \quad (6)$$

式中: $k$ 为常温下材料的导热系数; $A$ 为常数; $\theta_e = T_e/T_f$ ,  $\theta_1 = T_1/T_f$ <sup>[20]</sup>;  $T_f$ 为费米温度。而电子与晶格的耦合系数  $G$  随着电子和晶格的温度而变化,其表达式<sup>[21]</sup>为

$$G = G_n \left[ \frac{A_e}{B_1} (T_e + T_1) + 1 \right], \quad (7)$$

式中: $G_n$ 为常温下电子晶格的耦合系数; $A_e$ 和 $B_1$ 是电子弛豫时间的材料常数。均可从表 2 中得知。飞秒激光在时间和空间分布可以看成是高斯分布,热源项由下式表示为

$$S(r, t) = \sqrt{\beta/\pi} \frac{F}{\tau_p} (1 - R) \left[ \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_0^2}\right) \right] G(t), \quad (8)$$

式中: $R$ 为材料反射率; $\tau_p$ 为激光脉宽; $F$ 为激光能量密度; $\beta$ 为常数; $r_0$ 为激光聚焦光斑半径; $G(t)$ 为飞秒激光的时间分布函数。

## 2.2 飞秒激光光斑能量累积和路径分析

在三维模型中,热源空间分布函数的半径变化可写成  $x, y$  的函数,具体公式为

$$r = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2, \quad (9)$$

式中: $x_0$ 和 $y_0$ 表示激光光斑坐标值。热源时间分布函数可以写成是周期为  $T$  的周期函数,具体公式为

$$G(t) = \begin{cases} \exp\left\{4 \ln 2 \left[ \frac{(t - 2\tau_p)^2}{(\tau_p)^2} \right]\right\}, & jT \leq t < \tau_p + T, \\ 0, & \tau_p + T \leq t < \tau_p + (j+1)T \end{cases}, \quad (10)$$

$j \in N$

单脉冲激光功率的时间分布关系呈正态分布,单个飞秒激光脉冲时间分布如图 2 所示。

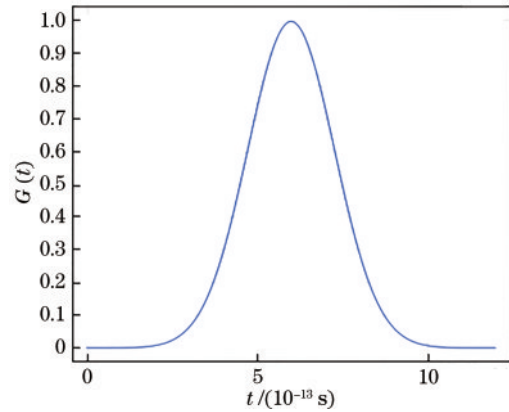


图 2 单脉冲时间分布

Fig. 2 Single pulse time distribution

考虑到激光扫描时为多脉冲加工,每个激光脉冲之间存在时间间隔,多脉冲激光与时间的关系示意图如图 3 所示。

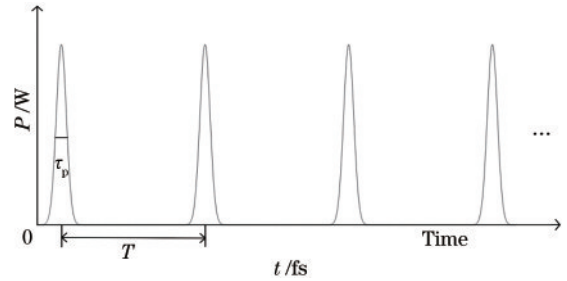


图 3 周期性飞秒脉冲激光高斯分布

Fig. 3 Periodic femtosecond pulsed laser Gaussian distribution

占空比是激光脉冲持续时间与两脉冲间隔时间的比值,当飞秒激光脉宽为 300 fs,重复频率为 100 kHz 时,占空比极低,为  $3 \times 10^{-8}$ ,此时通过有限元软件进行数值模拟较为困难,需进行等效计算,具体扫描路径如图 4 所示。

从图 4 可以看出,光斑重叠部分的面积可以由扇形面积和三角形的面积进行运算求得,具体公式为

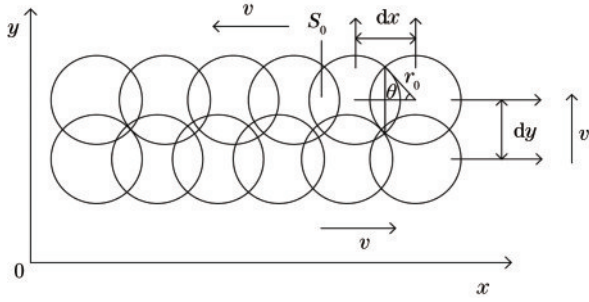


图 4 扫描路径规划

Fig. 4 Scanning path planning

$$\cos \theta = \frac{dx}{2r_0}, \quad (11)$$

$$r_0 = \frac{D}{2}, \quad (12)$$

$$S_0 = \frac{D^2}{2} \times \frac{\arccos\left(\frac{dx}{D}\right)\pi}{180^\circ} - \frac{dx \sqrt{D^2 - dx^2}}{4}, \quad (13)$$

式中:  $dx$  为两脉冲间隔距离;  $D$  为激光光斑直径;  $S_0$  表示沿  $x$  方向相邻两个光斑的重叠面积。一般研究整个扫描过程中, 由于设置的扫描速度不同, 光斑与光斑之间会存在不止两个光斑的重叠, 所以需考虑更多的光斑能量累积效应。

飞秒激光脉冲不同于长脉冲激光, 其脉冲宽度过小, 脉冲周期长, 占空比大, 有限元软件很难进行数值模拟, 故将扫描速度的问题转换成光斑重叠的问题, 当重复频率为 200 kHz 的飞秒激光以速度 100 mm/s 移动时, 两脉冲之间的间隔时间为 5  $\mu$ s, 也就是一个周期  $T$ , 由此两脉冲之间的间隔距离表示为

$$dx = vT. \quad (14)$$

当第  $n$  个脉冲时, 热源项的空间分布半径需将式(7)中的半径修改为

$$r = [x - (n - 1) \times dx]^2 + (y - y_0)^2. \quad (15)$$

研究扫描加工时  $n$  必然大于 2, 将式(14)代入到式(7)中表示两个脉冲之间的能量累积公式为

$$S(x, t) = \sqrt{\beta/\pi} \frac{F}{\tau_p} (1 - R) \cdot \left\{ \exp \left\{ -2 \frac{[x - (n - 1) \times dx]^2 + (y - y_0)^2}{r_0^2} \right\} \right\} G(t). \quad (16)$$

而激光扫描过程中扫描区域的能量密度在  $x$  轴方向的分布可以表示为

$$S(x) = \sum_n F \exp \left\{ \frac{-2 [x - (n - 1) \times dx]^2}{r_0^2} \right\}. \quad (17)$$

移动的激光光斑坐标值  $x_0$  和  $y_0$  随时间的函数规划公式表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0 = \begin{cases} vt, 0 \leq t \leq jl/v \\ jl, jl/v \leq t \leq jl/v + jdy/v \\ -vt + jdy + 2jl, jl/v + jdy/v \leq t \leq 2jl/v + jdy/v \\ 0, 2jl/v + jdy/v \leq t \leq 2jl/v + 2jdy/v \end{cases} \\ y_0 = \begin{cases} 0, 0 \leq t \leq jl/v \\ vt - jl, jl/v \leq t \leq jl/v + jdy/v \\ jdy, jl/v + jdy/v \leq t \leq 2jl/v + jdy/v \\ -vt + 2jdy + 2jl, 2jl/v + jdy/v \leq t \leq 2jl/v + 2jdy/v \end{cases} \end{array} \right. , j \in N, \quad (18)$$

式中:  $j$  为大于零的整数, 取 1、2、3、4 等;  $v$  为激光扫描速度;  $l$  为激光需扫描加工的长度,  $dy$  为每次激光沿着  $y$  方向的扫描间距。通过软件绘制出整个扫描路径的函数图如图 5 所示。

图 5(a) 为激光在材料上沿着  $x$  方向的移动路径, 以 100 mm/s 的速度加工完整个长度, 然后在  $y$  方向移动一个扫描间距  $dy$  后以原速度返回, 如此往复, 直至完成整个面的烧蚀过程。图 5(b) 为激光光斑在材料

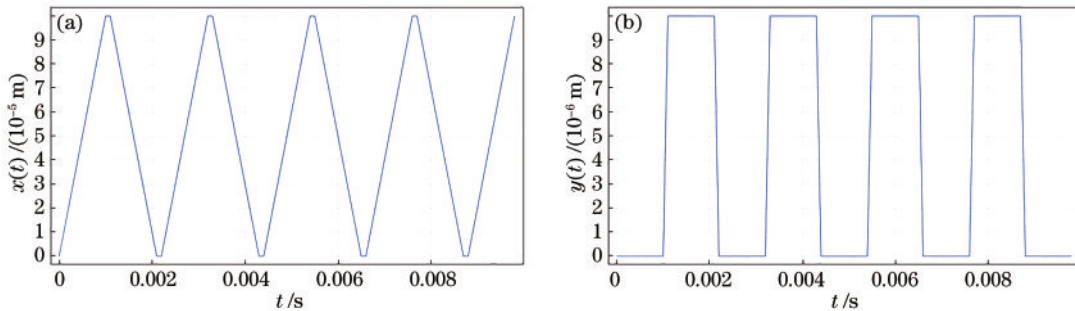


图 5 激光扫描路径函数。(a)  $x$  方向; (b)  $y$  方向

Fig. 5 Laser scan path function. (a)  $x$ -direction; (b)  $y$ -direction

表面  $y$  坐标的变化图, 首先激光沿  $x$  方向加工,  $y$  坐标值不会变化, 到达材料另一端, 以  $100 \text{ mm/s}$  的速度移动  $dy$  的距离后保持  $y$  坐标值不变, 沿  $x$  方向返回加工, 直至完成整个齿面的加工。

### 3 三温传热模型和能量累积模型仿真

对于面齿轮材料, 建立  $300 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$  的长方体, 在激光辐照面将网格做细化处理, 随着深度的增加, 逐渐粗化网格。将激光照射点的初始坐标设置成  $(0, 0, 0)$ , 具体材料参数和激光参数如表 1<sup>[22]</sup> 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Lattice heat capacity $C_s / (\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	$2.44 \times 10^6$
Electroacoustic coupling coefficient at room temperature $G_{\pi} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	$1.3 \times 10^{18}$
Electron specific heat coefficient $B_e / (\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-2})$	706.4
Material constants for electron relaxation time $A_e / (1 \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$1.22 \times 10^7$
Material constants for electron relaxation time $B_l / (1 \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$1.23 \times 10^{11}$
Thermal conductivity $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	78.4
Lattice-to-lattice coupling coefficient $g / (\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	$3 \times 10^{17}$
Reflectance $R$	0.64
Fermi temperature $T_f / \text{K}$	$1.28 \times 10^5$
Latent heat of evaporation $L_v / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	6288
Melting temperature $T_m / \text{K}$	1724
Evaporation temperature $T_v / \text{K}$	3023
Spot radius $r_0 / \mu\text{m}$	20
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7800

#### 3.1 单脉冲下改变能量密度电子晶格温度变化

通过三温方程式(1)~(3), 设置脉宽为  $800 \text{ fs}$  改变激光能量密度为  $4.34 \text{ J/cm}^2$  和  $5.78 \text{ J/cm}^2$ , 得到电子与晶格、晶格与晶格之间的温度传递变化曲线如图 6 所示。

从图 6(a)可以看出, 电子在极短时间内达到最高温度  $37000 \text{ K}$ , 而后温度开始降低, 晶格温度上升, 最终在  $6 \text{ ps}$  时达到平衡温度, 为  $17000 \text{ K}$ 。而图 6(b)中, 电子达到最高温度为  $44000 \text{ K}$ , 最终三者经过  $8 \text{ ps}$  达到平衡温度  $22000 \text{ K}$ 。实际中, 电子晶格温度达到平衡温度后, 再通过傅里叶传热温度开始降低, 最终达到初始温度。对比图 6(a)和(b)发现, 随着能量密度的增大, 电子达到的最高温度在增大, 三者达到的最终平衡温度也有所增大, 耦合时间也有略微的增加。而这导致烧蚀材料表面产生大量的氧化物和熔融物, 在激光

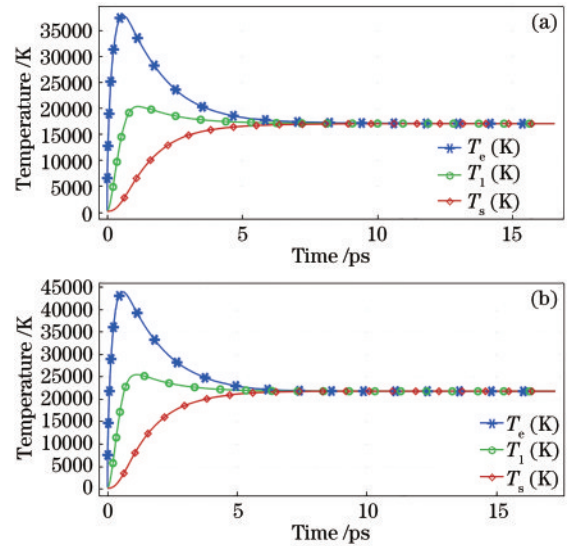


图 6 不同能量密度电子晶格温度变化曲线。(a)  $4.34 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $5.78 \text{ J/cm}^2$

Fig. 6 Temperature variation curves of electron lattice at different energy densities. (a)  $4.34 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $5.78 \text{ J/cm}^2$

扫描加工过程中, 这种现象的存在使得烧蚀表面的形貌得不到理想的效果。

#### 3.2 多脉冲下改变能量密度电子晶格温度变化

设置能量密度为  $4.34 \text{ J/cm}^2$  和  $5.78 \text{ J/cm}^2$ , 重复频率为  $500 \text{ kHz}$ , 通过式(1)~(3)研究 20 个脉冲加载后, 电子晶格温度和材料表面最高温度的变化, 如图 7 所示。

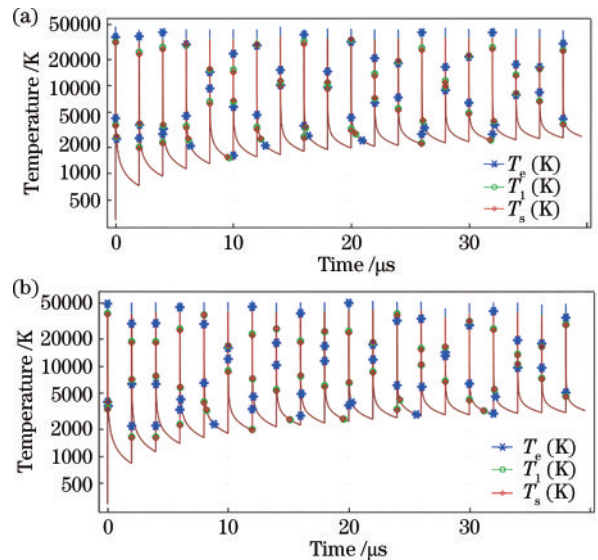


图 7 20 个脉冲不同能量密度下电子晶格温度累积。(a)  $4.34 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $5.78 \text{ J/cm}^2$

Fig. 7 Electron lattice temperature accumulation at different energy densities for 20 pulses. (a)  $4.34 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $5.78 \text{ J/cm}^2$

图 7 中曲线表示材料表面的最高温度。从图 7(a)可以看出: 当第一个脉冲加载到材料时, 电子最高温度达到接近  $40000 \text{ K}$ , 与晶格耦合, 将温度传递给晶格,

材料表面最高温度经过快速升温和降温,最终在一个脉冲间隔时间后达到最低;在第二个脉冲到来时,温度在平衡温度的基础上,材料表面的最高温度又开始上升,如此反复,最终材料表面温度达到最终平衡温度 2600 K 后保持不变。而图 7(b)中,第一个脉冲加载到材料,电子温度达到 52000 K,材料表面最高温度相对于较低能量密度时更高,经过多个脉冲加载后,最终材料表面最高温度为 3250 K。由此可以得出,对于飞秒激光扫描加工面齿轮材料过程中,能量密度越高,电子温度越高,最终材料表面温度也会有较大上升,会对扫描烧蚀的表面形貌产生影响,产生更多的熔融物。

### 3.3 改变扫描速度激光能量累积变化

扫描速度对飞秒激光扫描加工面齿轮材料有着重要影响。扫描速度影响着相邻两光斑之间的能量累积效应,从而将直接影响烧蚀材料的表面质量。在激光扫描过程中,一个束斑尺度内的脉冲数  $m$  可以表示为

$$m = \frac{D}{v} \times f. \quad (19)$$

根据式(19),当聚焦光斑直径和激光重复频率一定时,一个束斑尺度内的脉冲数随着激光扫描速度的增大而减少。由此可见,扫描速度的大小,直接决定了在一定的尺度内的脉冲累积的数量,脉冲数越多,能量累积越明显,会给烧蚀材料表面产生不好的影响。

在光斑半径为 20  $\mu\text{m}$ 、重复频率为 500 kHz 的条件下,根据式(19)计算得到不同扫描速度下的光斑尺度内的脉冲数如表 2 所示。

表 2 不同扫描速度下的光斑尺度内的脉冲数

Table 2 Number of pulses within the spot scale at different scanning speeds

Scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	110	150	200	300
Number of pulses in spot scale	91	67	50	33

在能量密度为 1.19 J/cm<sup>2</sup>,重复频率为 500 kHz 条件下,改变扫描速度为 110 mm/s、150 mm/s、200 mm/s 和 300 mm/s,为研究移动飞秒激光对面齿轮材料烧蚀形貌的影响,分别在激光移动方向和烧蚀线宽方向做能量强度的累积分析。在激光移动方向,即  $x$  方向上将扫描速度影响能量的累加转换成脉冲间隔距离之间能量密度的累加;在烧蚀线宽方向,即  $y$  方向上将扫描速度转换成一个光斑尺度内的相应脉冲数的能量密度的累积。根据式(16)分别得到如图 8(a)和(b)所示的能量强度累加曲线图。

图 8(a)表示激光移动时在移动方向上的能量强度累加,横坐标表示激光移动方向,用  $x$  表示。从图 8(a)可以看出,在相同激光参数下,随着扫描速度的增大,激光能量分布尺度在逐渐增大,能量累积最高值在逐渐减小。图中:实线为在扫描速度为 110 mm/s 的情况下,在一个光斑尺度内的能量强度最终达到最高为 137 J/cm<sup>2</sup>,然后最高能量强度保持不变,经过 300

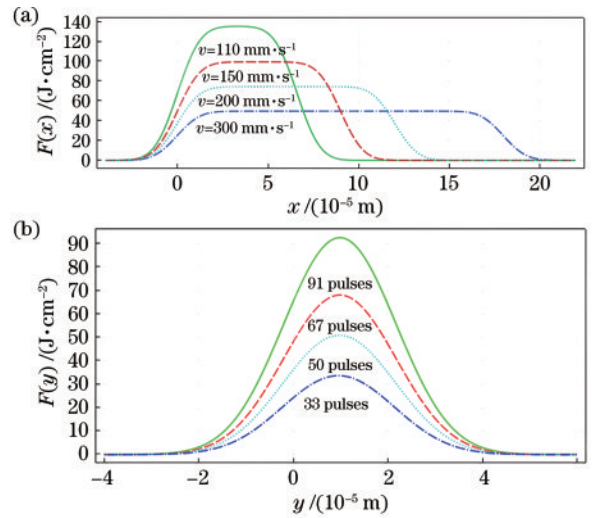


图 8 不同扫描速度下  $x$  和  $y$  方向的能量累积强度分布。

(a)  $x$  方向; (b)  $y$  方向

Fig. 8 Energy accumulation intensity distribution in  $x$  and  $y$  directions at different scanning speeds. (a)  $x$ -direction; (b)  $y$ -direction

个脉冲后在  $x$  方向上能量分布尺度在 100  $\mu\text{m}$ ;虚线表示扫描速度为 150 mm/s 的能量累积图,此时能量累积最高值达到 100 J/cm<sup>2</sup>,分布尺度为 130  $\mu\text{m}$ ;点虚线表示扫描速度为 200 mm/s,此时能量累积最高值为 75 J/cm<sup>2</sup>,分布尺度为 160  $\mu\text{m}$ ;点划线表示扫描速度为 300 mm/s,在一个光斑尺度内,能量强度只达到最高 50 J/cm<sup>2</sup>,相对扫描速度慢时,能量强度大大的减小,并且经过 300 个脉冲后在  $x$  方向上能量分布尺度为 220  $\mu\text{m}$ 。这种随着扫描速度的变化而导致的能量强度累积的最高值和尺度的变化会在飞秒激光扫描烧蚀面齿轮材料时,对其烧蚀表面形貌产生不同的影响。图 8(b)中横坐标表示扫线加工时与激光扫描方向垂直的方向,即线宽方向,此处用  $y$  表示。从图 8(b)可以看出,随着扫描速度的增大,即在一个光斑尺度内脉冲数增多,在线宽方向的能量累积最高值在逐渐减小,从 95 J/cm<sup>2</sup>减少到 35 J/cm<sup>2</sup>,整个分布尺度也在减小,与试验测得线宽值有相同规律。

### 3.4 改变扫描间距激光能量累积变化

在能量密度为 2.377 J/cm<sup>2</sup>,重复频率为 500 kHz 条件下,改变扫描间距为 9  $\mu\text{m}$ 、12  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$  和 18  $\mu\text{m}$ ,根据式(16)得到如图 9 所示的能量强度累加图。

图 9 中横坐标表示扫面加工时与扫道  $x$  方向垂直的方向,此处用  $Y$  表示。从图 9 可以看出,在相同激光参数下,随着扫描间距的增大,激光能量分布尺度在逐渐增大,能量累积最高值在逐渐减小。图中:点虚线表示扫描间距为 9  $\mu\text{m}$  时的能量累积图,此时能量强度累积最高值达到 6.6 J/cm<sup>2</sup>,在 5 个扫描间距的条件下,在  $Y$  轴方向的能量强度分布尺度为 90  $\mu\text{m}$ ;虚线表示扫描间距为 12  $\mu\text{m}$  时的能量累积图,能量强度累积最高值达到 5 J/cm<sup>2</sup>,能量强度分布尺度为 100  $\mu\text{m}$ ;点划线表

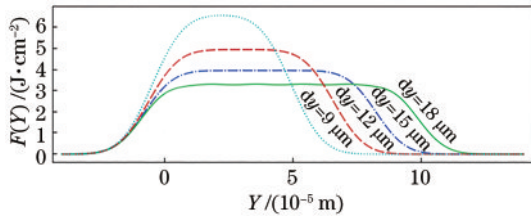


图 9 不同扫描间距的能量累积强度分布

Fig. 9 Energy accumulation intensity distribution of different scanning intervals

示扫描间距为 15 μm, 能量强度累积最高值达到 4 J/cm<sup>2</sup> 后不变, 能量强度分布尺度为 120 μm; 实线表示扫描间距为 18 μm, 此时在 5 个扫描间距的条件下, 能量强度最高累积值相对前者有略微的减小, 在 3.3 J/cm<sup>2</sup> 上下有小幅的波动, 在两脉冲间隔距离中间会有一个比初始能量强度高但比最高累积值低的强度值, 整个沿 Y 轴方向的能量轻度分布尺度为 140 μm。这种情况说明飞秒激光扫描加工面齿轮材料时, 适当地增大扫描间距可使扫道与扫道之间的微纳凸起变少。

#### 4 飞秒激光扫描加工面齿轮试验

试验采用飞秒激光加工设备, 激光器为 FemtoYL-100, 激光中心波长为 1030 nm, 经透镜聚焦垂直辐照在材料表面。聚焦光斑半径控制在 20 μm, 采用德国 RAYLASE 振镜作三维振镜, 用以灵活调节激光加工点的 x、y、z 坐标值。利用红外测距仪保证每一次加工离焦量都一致, 并对材料进行定位。实际飞秒激光加工设备如图 10 所示。

加工完成后, 对材料烧蚀区域进行观测, 试验测量仪器采用三维超景深设备 HIROX KH-7700, 将观测的形貌放大 4×700 倍, 从沟槽底部向上逐层进行图像采集, 直至达到材料表面高度, 再合成烧蚀沟槽形貌图, 测量精度为 0.001 μm, 设备如图 11 所示。

飞秒激光扫描加工面齿轮材料时, 扫描速度不同, 两激光脉冲之间的间隔距离也有所不同, 整个飞秒激光扫描示意图如图 12 所示。

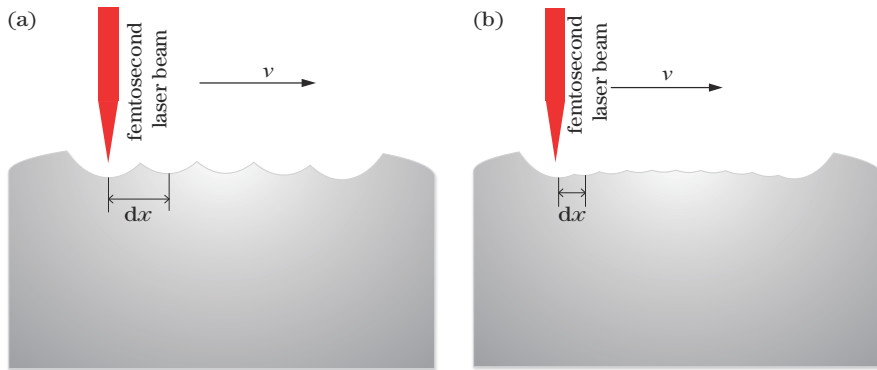


图 12 不同扫描速度烧蚀形貌示意图。(a)高扫描速度;(b)低扫描速度

Fig. 12 Schematic diagram of ablation morphology at different scanning speeds. (a) High scanning speed; (b) low scanning speed

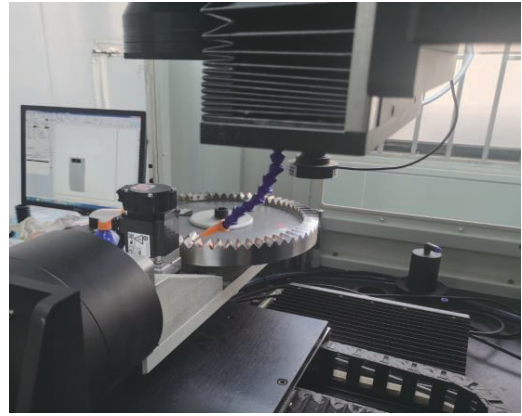


图 10 飞秒激光加工面齿轮

Fig. 10 Femtosecond laser processing of face gears

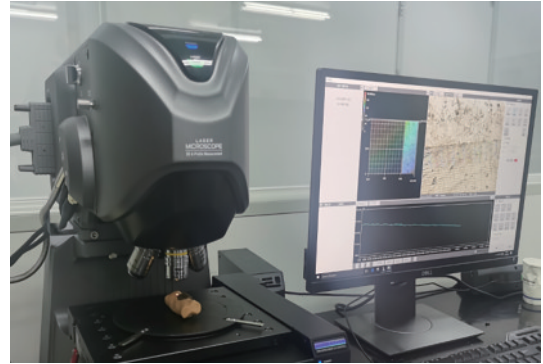


图 11 超景深测量仪

Fig. 11 Super depth of field measuring instrument

当扫描速度过大[图 12(a)]时, dx 过大, 光斑重叠率相对而言较小, 能量累积少, 导致重叠部分材料未能达到烧蚀阈值而未形成有效烧蚀; 当扫描速度过小[图 12(b)]时, dx 过小, 光斑重叠率较大, 能量累积效应更明显, 会造成重叠部分损伤严重, 从而导致烧蚀效果不理想。将重叠部分与整个光斑直径的比值记为激光光斑重叠率  $\phi$ , 由下式<sup>[23]</sup>计算得到

$$\phi = \left(1 - \frac{v}{df}\right) \times 100\% , \quad (20)$$

式中:  $v$  为激光扫描速度;  $d$  为光斑直径;  $f$  为激光重复

频率。由式(20)可以看出,光斑重叠率与扫描速度成反比,一般,试验中在不改变激光重复频率和光斑直径的条件下,光斑重叠率只与激光扫描速度有关,当进行多脉冲扫描加工,扫描速度增大时,光斑重叠区面积减小,意味着单位面积内累积的激光脉冲数少,从而单位面积材料能量吸收少,不同扫描速度下飞秒激光烧蚀会造成材料不同的微纳结构。

在光斑半径为  $20\ \mu\text{m}$ ,重复频率为  $500\ \text{kHz}$  的条件下,根据式(20)计算出不同扫描速度下的光斑重叠率,如表3所示。

表3 不同扫描速度下的光斑重叠率

Table 3 Spot overlap rate at different scanning speeds

Scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	110	150	200	300
Spot overlap rate $\varphi / \%$	98.9	98.5	98	97

由表3可知,在设置的激光参数和扫描速度下,光斑重叠率高达95%以上,说明单位面积内大量的脉冲

累积,造成能量累积过多,会导致烧蚀凹槽具有大量的微纳凸起。

#### 4.1 扫线加工试验

试验中设置的功率需转换成理论功率后再利用下式转换成能量密度  $F$ 。

$$E = \frac{P}{f}, \quad (21)$$

$$F = \frac{E}{S}, \quad (22)$$

式中: $E$ 表示激光单脉冲能量(J); $P$ 表示激光理论功率(W); $S$ 表示激光聚焦光斑面积( $\text{cm}^2$ )。材料为面齿轮18Cr2Ni4WA,将材料切割抛光处理后,放在飞秒激光加工平台上,设置激光功率为  $100\ \text{W}$ ,重复频率为  $500\ \text{kHz}$ ,将其转换成能量密度为  $1.19\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,脉宽设置为  $300\ \text{fs}$ ,扫描速度分别为  $110\ \text{mm}/\text{s}$ 、 $150\ \text{mm}/\text{s}$ 、 $200\ \text{mm}/\text{s}$ 、 $300\ \text{mm}/\text{s}$ ,得到如图13所示的烧蚀形貌图。

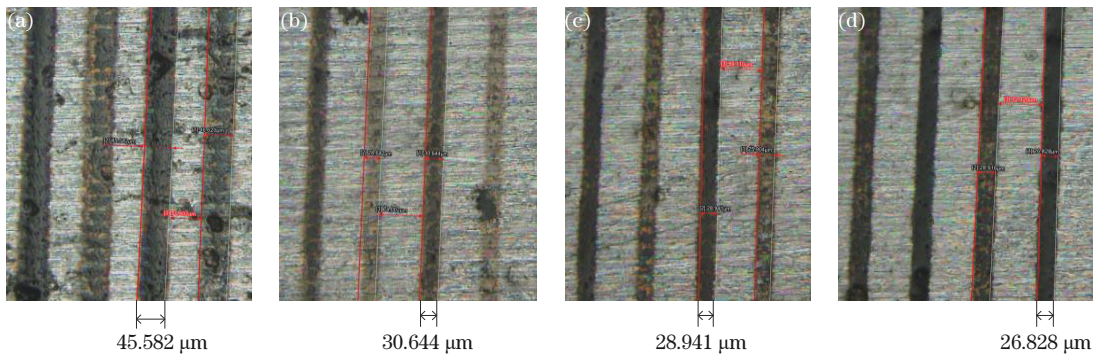


图13 不同扫描速度烧蚀形貌。(a)  $110\ \text{mm}/\text{s}$ ; (b)  $150\ \text{mm}/\text{s}$ ; (c)  $200\ \text{mm}/\text{s}$ ; (d)  $300\ \text{mm}/\text{s}$

Fig. 13 Ablation morphologies at different scanning speeds. (a)  $110\ \text{mm}/\text{s}$ ; (b)  $150\ \text{mm}/\text{s}$ ; (c)  $200\ \text{mm}/\text{s}$ ; (d)  $300\ \text{mm}/\text{s}$

通过三维超景深设备对烧蚀材料表面进行测量得到的烧蚀宽度如表4所示。

表4 不同扫描速度下的烧蚀沟槽的宽度

Table 4 Width of ablation grooves at different scanning speeds

Scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	110	150	200	300
Width / $\mu\text{m}$	45.582	30.644	28.941	26.828

从图13可以看出,脉宽为  $300\ \text{fs}$  时,烧蚀沟槽两侧的热影响区较小,并且当其他激光参数一定时,扫描速度为  $110\ \text{mm}/\text{s}$ ,烧蚀沟槽内产生的熔融材料相对更多,具有大量的微纳凸起,沟槽内部不平整。此时激光光斑重叠率接近99%,在同一位置累积的激光脉冲数较多,单位面积材料吸收的能量多,导致电子最高温度更高,产生如图13所示的加工形貌。反观扫描速度为  $300\ \text{mm}/\text{s}$  时,烧蚀沟槽相对平整,此时光斑重叠率也很高,为97%,但一个光斑尺度内的脉冲数更少,电子最高温度相对更低,能量累积效应更小,烧蚀形貌相对较好一点。

从表4可以看出,随着扫描速度的增大,烧蚀沟槽

的宽度减小,这是因为在较高扫描速度下,相同烧蚀沟槽长度,整个过程中的能量累积效应更小,在沟槽宽度方向上的损伤更轻微。

#### 4.2 改变扫描速度对烧蚀形貌的影响

在功率值为  $300\ \text{W}$ ,重复频率为  $500\ \text{kHz}$ ,转换成能量密度为  $3.565\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,脉宽为  $800\ \text{fs}$ ,扫描间距固定为  $10\ \mu\text{m}$  条件下,改变扫描速度为  $100\ \text{mm}/\text{s}$ 、 $120\ \text{mm}/\text{s}$ 。得到如图14所示的烧蚀面形貌图。

从烧蚀形貌可以看出,烧蚀形貌周围热影响区较大,随着扫描速度的增大,烧蚀面与未加工面的高度差,即烧蚀深度,由  $24.055\ \mu\text{m}$  减少到  $17.827\ \mu\text{m}$ ,表面更加平整,这是由于扫描速度增大时,相对而言,同一位置的能量累积较少,电子最高温度相对较低,而电子最高温度对烧蚀材料的形貌特征有着较大的影响,对材料产生的烧蚀程度较小。

#### 4.3 改变能量密度对烧蚀形貌的影响

在重复频率为  $300\ \text{kHz}$ ,脉宽为  $800\ \text{fs}$ ,扫描速度为  $120\ \text{mm}/\text{s}$ ,扫描间距固定为  $5\ \mu\text{m}$  条件下,改变激光能量密度为  $4.34\ \text{J}/\text{cm}^2$  和  $5.78\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,对面齿轮表面



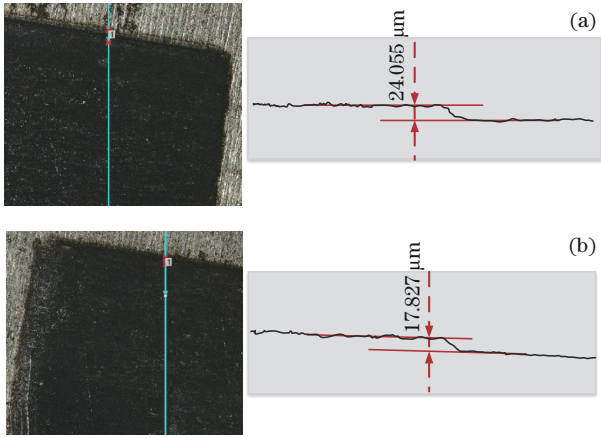


图 14 不同扫描速度烧蚀形貌。(a) 100 mm/s; (b) 120 mm/s  
Fig. 14 Ablation morphologies at different scanning speeds.  
(a) 100 mm/s; (b) 120 mm/s

进行扫描加工,得到如图 15 所示的形貌图。

由图 15 可知,烧蚀形貌周围热影响区较大,随着能量密度的增大,激光烧蚀深度增大,由  $17.604 \mu\text{m}$  增大到  $18.525 \mu\text{m}$ 。但是由于激光功率过大,在两种参数下,均出现烧蚀区域光滑度不如未烧蚀区域的光滑度:一方面这是由于当扫描间距一定时,随着能量密度的增大,烧蚀材料的电子最高温度增大,下一个脉冲加载到材料时,上一个脉冲产生的残余热量还没来得及完全扩散,残余热量累积在材料表面,材料温度逐渐升高,材料表面产生严重的氧化和熔融物的产生;另一方面是由于扫描间距的设定过小或者过大,扫道之间产生的熔融材料过多堆积,烧蚀表面不平整。从图 15(a)和(b)可以看出,扫描间距一定时,随着激光能量密度的增大,烧蚀面的光滑度有一定程度的变好。显然,这种不利于烧蚀面平整度的热量累积必须要尽可能地避免或减少,扫道间距也需取得最佳值。

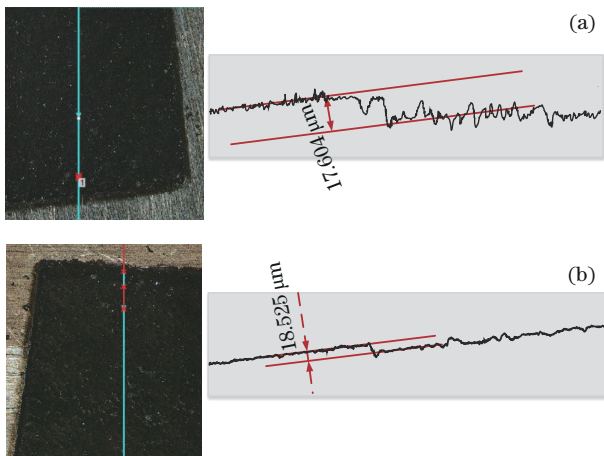


图 15 不同能量密度烧蚀形貌。(a)  $4.34 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $5.78 \text{ J/cm}^2$   
Fig. 15 Ablation morphologies at different energy densities.  
(a)  $4.34 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $5.78 \text{ J/cm}^2$

#### 4.4 改变扫描间距对烧蚀形貌的影响

在脉宽为 300 fs,重复频率为 500 kHz,功率为 200 W,转换成能量密度为  $2.377 \text{ J/cm}^2$ ,扫描速度为 150 mm/s 条件下,改变扫描间距为  $9 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$  和  $18 \mu\text{m}$ ,得到如图 16 所示的烧蚀形貌图。

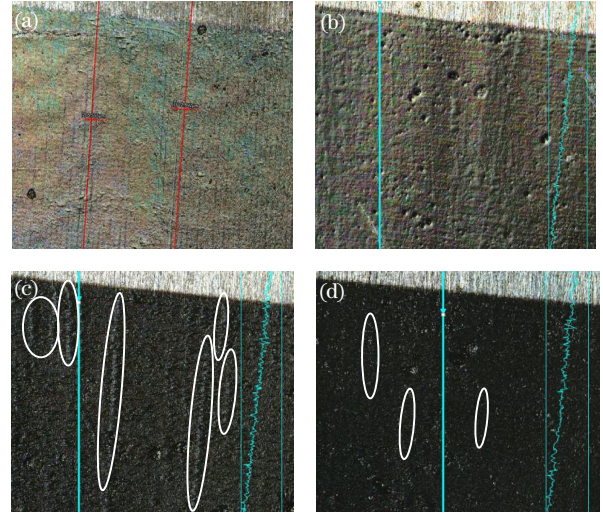


图 16 不同扫描间距烧蚀形貌。(a)  $9 \mu\text{m}$ ; (b)  $12 \mu\text{m}$ ; (c)  $15 \mu\text{m}$ ;  
(d)  $18 \mu\text{m}$   
Fig. 16 Ablation morphologies of different scanning intervals.  
(a)  $9 \mu\text{m}$ ; (b)  $12 \mu\text{m}$ ; (c)  $15 \mu\text{m}$ ; (d)  $18 \mu\text{m}$

图 16(a)和(b)是为了更清楚地观测烧蚀表面,经过超景深设备颜色处理后的形貌图,图 16(c)和(d)是超景深设备观测的原始颜色的烧蚀形貌图。图 16(c)和(d)中白色圈代表烧蚀表面明显凸起区域,从烧蚀形貌图可以看出,烧蚀形貌周围热影响区域较小,在其他激光参数保持不变的条件下,随着扫描间距的增大,烧蚀面的平整度变好,在图 16(a)和(b)中,烧蚀表面存在大量的扫道之间的凸起,在每个扫道加工后,由于间距较小,每条扫道产生的熔融材料堆积在扫道两侧,扫道之间的熔融材料叠加,烧蚀形貌不平整。当扫描间距达到  $25 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ ,甚至更大时,由于扫描间距较大,能量累积未达到烧蚀阈值,两相邻沟槽间存在大量未烧蚀的材料,烧蚀形貌效果更不佳。分析得知,扫道之间的间距不可设置过小。相比之下,设置扫描间距为  $18 \mu\text{m}$  较好。

#### 4.5 飞秒激光加工材料表面粗糙度分析

将激光重复频率设置为 100 kHz,功率值设置为 83 W 和 67 W,转换成能量密度分别为  $1.66 \text{ J/cm}^2$  和  $1.34 \text{ J/cm}^2$ ,扫描速度设置为 50 mm/s,脉宽为 800 fs,扫描间距设置为  $5 \mu\text{m}$  和  $10 \mu\text{m}$ ,经过测量表面粗糙度,得到如图 17 所示的测量图。

图 17 为不同能量密度和不同扫描间距下烧蚀形貌的粗糙度分析,可以看出,随着扫描间距的增大,粗糙度有略微的降低,随着功率的减小,粗糙度也有略微的降低。相比之下,选择能量密度为  $1.34 \text{ J/cm}^2$ ,间距

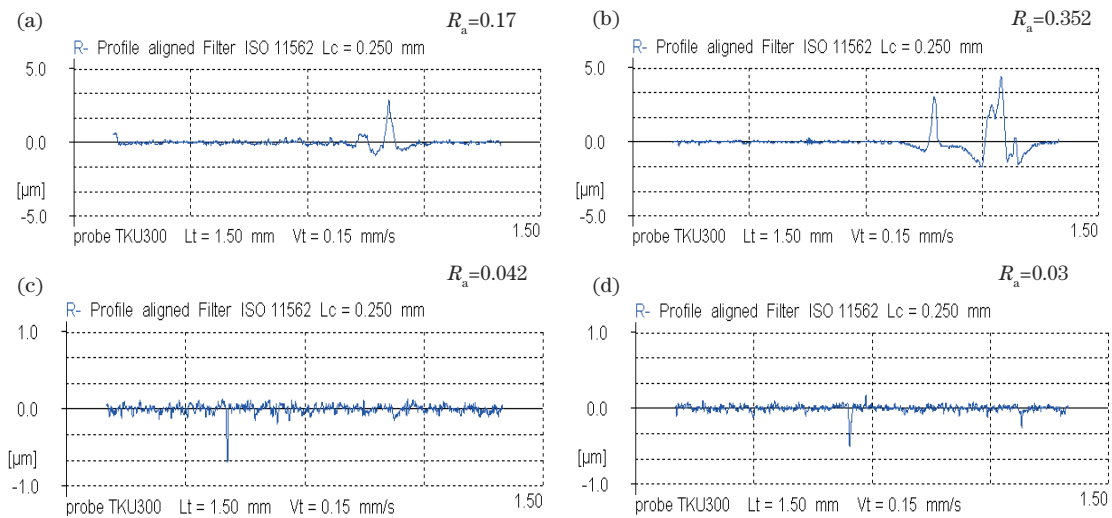


图 17 不同参数下烧蚀材料表面粗糙度。(a)能量密度  $1.66 \text{ J/cm}^2$ , 间距  $5 \mu\text{m}$ ; (b)能量密度  $1.66 \text{ J/cm}^2$ , 间距  $10 \mu\text{m}$ ; (c)能量密度  $1.34 \text{ J/cm}^2$ , 间距  $5 \mu\text{m}$ ; (d)能量密度  $1.34 \text{ J/cm}^2$ , 间距  $10 \mu\text{m}$

Fig. 17 Surface roughness of ablated material with different parameters. (a) Energy density is  $1.66 \text{ J/cm}^2$ , interval is  $5 \mu\text{m}$ ; (b) energy density is  $1.66 \text{ J/cm}^2$ , interval is  $10 \mu\text{m}$ ; (c) energy density is  $1.34 \text{ J/cm}^2$ , interval is  $5 \mu\text{m}$ ; (d) energy density is  $1.34 \text{ J/cm}^2$ , interval is  $10 \mu\text{m}$

$10 \mu\text{m}$  较为合适。

## 5 结 论

本文针对飞秒激光扫描烧蚀面齿轮材料过程中的能量累积,建立了移动的飞秒激光热源模型和电子与晶格、晶格与晶格之间的三温传热模型,利用软件对三温传热模型计算,得到了不同激光能量密度下电子晶格温度的变化,多脉冲加载下电子、晶格和材料表面最高温度的变化以及移动的热源能量累积变化。试验分析了不同能量密度、扫描速度、扫描间距下飞秒激光烧蚀面齿轮材料的影响,最后对烧蚀形貌进行了粗糙度分析。得到如下结论:

1) 改变飞秒激光能量密度,对电子最高温度有着较大影响,随着能量密度的增大,电子最高温度有较大的上升,最终电子与晶格、晶格与晶格达到的平衡温度也有较大上升,由  $17000 \text{ K}$  上升到  $22000 \text{ K}$ 。而大量脉冲加载时,随着能量密度的增大,材料表面最高温度最终达到的平衡温度会增大,由  $2600 \text{ K}$  上升到  $3250 \text{ K}$ 。

2) 建立了飞秒激光扫描加工过程中激光能量强度的累加模型,发现扫描速度设置过小导致了能量累积的最大值剧烈增大,达到  $137 \text{ J/cm}^2$ ,但是随着扫描速度的增大,能量累积的强度还是会有所减小,横向分布尺度有所增大。在  $y$  轴方向同样有类似情况,随着扫描间距的增大,能量累积最高值略微减小,分布尺度有所增大,在扫描间距为  $18 \mu\text{m}$  时,能量累积最高值有上下波动,说明两扫描隧道之间能量累积有所降低。

3) 改变扫描速度对面齿轮进行飞秒激光扫描加工,发现随着扫描速度的增大,烧蚀宽度逐渐减小,烧蚀形貌逐渐平整。改变能量密度,发现烧蚀材料表面

烧蚀深度增大,并且烧蚀表面极其不平整。在激光能量密度为  $2.377 \text{ J/cm}^2$  时改变扫描间距,发现在扫描间距为  $9 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{m}$  和  $15 \mu\text{m}$  的情况下,扫道之间存在大量熔融物凸起,在扫描间距  $18 \mu\text{m}$  时烧蚀形貌较好。最终对烧蚀表面进行粗糙度测量,得出在能量密度为  $1.34 \text{ J/cm}^2$  时,扫描间距为  $10 \mu\text{m}$  较为合适。

## 参 考 文 献

- [1] 吴雪峰,梅三林. 飞秒激光加工机理及仿真研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1900005.  
Wu X F, Mei S L. Research progress in femtosecond laser machining mechanism and simulation analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1900005.
- [2] Wang X S, Huang Y K, Li C Y, et al. Numerical simulation and experimental study on picosecond laser ablation of stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106150.
- [3] 岳端木,孙会来,刘泽林,等. 飞秒激光加工镍钛合金的烧蚀阈值实验研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 441-446.  
Yue D M, Sun H L, Liu Z L, et al. Experimental study on ablation threshold of NiTi shape memory alloy specimen by femtosecond laser processing[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(4): 441-446.
- [4] 岳端木,孙会来,杨雪,等. 飞秒激光环切加工不锈钢微孔工艺及其质量控制神经网络模型[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 20200446.  
Yue D M, Sun H L, Yang X, et al. Annular drilling process and quality control neural network model of stainless steel micro-hole with femtosecond laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 20200446.
- [5] Kumar K K, Samuel G L, Shunmugam M S. Theoretical and experimental investigations of ultra-short

- pulse laser interaction on  $Ti_6Al_4V$  alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 266-275.
- [6] 王文豪, 季凌飞. 二维振镜超快激光高精加工球面等角螺旋槽研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402016.  
Wang W H, Ji L F. High-precision machining of spherical equiangular spiral groove using two-dimensional galvanometer ultrafast laser system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402016.
- [7] 林嘉剑, 明瑞, 李学坤, 等. 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的形貌特征研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402017.  
Lin J J, Ming R, Li X K, et al. Study on morphology characteristics of femtosecond laser-ablated face gear materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402017.
- [8] Park C, Farson D F. Precise machining of disk shapes from thick metal substrates by femtosecond laser ablation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9): 2049-2056.
- [9] Pfeiffer M, Engel A, Weißmantel S, et al. Microstructuring of steel and hard metal using femtosecond laser pulses[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 60-66.
- [10] 崔静, 张杭, 路梦柯, 等. 飞秒激光诱导 TC4 表面微观组织研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(9): 1035-1042.  
Cui J, Zhang H, Lu M K, et al. Study on microstructure of TC4 surface induced by femtosecond laser[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(9): 1035-1042.
- [11] Schnell G, Duenow U, Seitz H. Effect of laser pulse overlap and scanning line overlap on femtosecond laser-structured  $Ti_6Al_4V$  surfaces[J]. Materials, 2020, 13(4): 969-984.
- [12] 尚凯文, 吴敢, 刘孝丽, 等. Tedlar 复合材料表面飞秒激光刻蚀铝薄膜技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002117.  
Shang K W, Wu G, Liu X L, et al. Femtosecond laser etching of aluminum film on Tedlar composite surfaces [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002117.
- [13] Bauer F, Michalowski A, Kiedrowski T, et al. Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1035-1043.
- [14] 马明亮. 脉冲激光去除 Q345 钢表面锈蚀的技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.  
Ma M L. Technical study on Q345 steel rust by pulsed laser cleaning[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [15] 查榕威, 余立冬, 李奔, 等. 基于图像处理和 LIPS 分析的金属表面激光清洗过程监控[J]. 光子学报, 2021, 50(7): 257-267.  
Zha R W, Yu L D, Li B, et al. Laser cleaning process monitoring of metal surface based on image processing and LIPS analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7): 257-267.
- [16] Lee S H, Lee J, Kang K G, et al. Three-temperature modeling of carrier-phonon interactions in thin GaAs film structures irradiated by picosecond pulse lasers[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006, 20(8): 1292-1301.
- [17] Mills K C, Su Y C, Li Z S, et al. Equations for the calculation of the thermo-physical properties of stainless steel[J]. ISIJ International, 2004, 44(10): 1661-1668.
- [18] Christensen B H, Vestentoft K, Balling P. Short-pulse ablation rates and the two-temperature model[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(15): 6347-6352.
- [19] Cheng C W, Wang S Y, Chang K P, et al. Femtosecond laser ablation of copper at high laser fluence: modeling and experimental comparison[J]. Applied Surface Science, 2016, 361: 41-48.
- [20] 王文亭, 张楠, 王明伟, 等. 飞秒激光烧蚀金属靶的冲击温度[J]. 物理学报, 2013, 62(21): 210601.  
Wang W T, Zhang N, Wang M W, et al. Shock temperature of femtosecond laser ablation of solid target [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(21): 210601.
- [21] Li Z, Wang C, Kang W, et al. Temperature and compression effects on electron heat capacity and electron-phonon coupling in aluminum and beryllium: insights from *ab initio* simulations[J]. Physics of Plasmas, 2015, 22(11): 112705.
- [22] 王震, 付文静, 张蓉竹. 飞秒激光多脉冲烧蚀金属铁的数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 0706002.  
Wang Z, Fu W J, Zhang R Z. Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 0706002.
- [23] 丁莹, 丁焯, 曹婷婷, 等. 飞秒激光加工 K24 高温合金的仿真与试验分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(7): 131-138.  
Ding Y, Ding Y, Cao T T, et al. Numerical simulation and experimental analysis on femtosecond ablation of K24 superalloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(7): 131-138.