

# 面齿轮材料的飞秒激光烧蚀动能量热模型与齿面形貌研究

肖勇波<sup>1</sup>, 明瑞<sup>1\*</sup>, 赖名涛<sup>1</sup>, 李学坤<sup>1</sup>, 马玉龙<sup>2</sup>, 明兴祖<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株洲 412007;

<sup>2</sup>湖北文理学院机械工程学院, 湖北 襄阳 441053

**摘要** 飞秒激光精微修正技术是采用具有高能量密度的超短脉宽激光对面齿轮齿面进行精微加工的一种新型加工方法。考虑到齿轮材料成分间互温感应,建立了飞秒激光烧蚀面齿轮材料动能量热模型,仿真分析了飞秒激光修正面齿轮齿面温度场的变化规律,发现随着激光能量密度的增大,电子温度急剧升高,电子温度远大于晶格温度,烧蚀凹坑的深度和直径均增大。实验中观测到烧蚀凹坑的齿面形貌,证实了动能量热模型的正确性,为飞秒激光精微烧蚀面齿轮的研究提供理论指导。

**关键词** 激光光学; 飞秒激光; 互温感应; 动能量热模型; 仿真分析; 温度场; 齿面形貌

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1714001

## Femtosecond Laser Ablation Kinetic Energy Thermal Model and Tooth Surface Topography of Face Gear Materials

Xiao Yongbo<sup>1</sup>, Ming Rui<sup>1\*</sup>, Lai Mingtao<sup>1</sup>, Li Xuekun<sup>1</sup>, Ma Yulong<sup>2</sup>, Ming Xingzu<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei 441053, China

**Abstract** Femtosecond laser microcorrection technology is a new type of processing method that uses a laser with ultrashort pulse-width and high energy density to micromachine the gear tooth surface. Considering the mutual temperature induction between the components of the gear material, a kinetic energy thermal model of the femtosecond laser-ablated surface gear material was established, and the evolution of the temperature field of the tooth surface of the femtosecond laser-modified surface gear was simulated and analyzed. The temperature of electrons rises sharply and is much greater than the lattice temperature and the depth and diameter of ablation pits increase. The tooth surface morphology of the ablated pits was experimentally observed, confirming the correctness of the kinetic energy thermal model, and providing theoretical guidance for the study of femtosecond laser-ablated surface gears.

**Key words** laser optics; femtosecond laser; mutual temperature induction; kinetic energy thermal model; simulation analysis; temperature field; tooth profile

**OCIS codes** 140.3390; 140.3440; 160.3900

收稿日期: 2020-12-12; 修回日期: 2020-12-24; 录用日期: 2021-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(51975192)、湖北省自然科学基金(2019CFB632)、湖北文理学院学科开放基金(XK2020001)

通信作者: \*844153340@qq.com; \*\*mxz9036@126.com

## 1 引言

为了控制面齿轮的齿面形貌,提高加工精度,飞秒脉冲激光加工成为一种突破方向<sup>[1]</sup>。飞秒脉冲激光加工具有精微加工、热影响小等优点,被广泛应用于金属材料的加工及改性等方面<sup>[2-3]</sup>。在飞秒激光与金属材料相互作用的过程中,电子受激吸收光子能量后出现较短的弛豫,达到准热平衡的状态;自由电子的能量通过电子与其他粒子的碰撞转移到晶格中。电子和晶格相互交换能量,几十皮秒后达到平衡温度,晶格处于热化状态,被辐照的部分变成热等离子体,在金属表面出现烧蚀现象<sup>[4]</sup>。因此,常采用两个相互耦合的非线性方程描述电子与晶格的温度变化关系,即双温模型<sup>[5]</sup>。

de Aldana等<sup>[6-7]</sup>提出一种用于多脉冲飞秒激光烧蚀的瞬变电磁模型,当足够数量的脉冲达到饱和之后,得到衍射稳定的最终形状,并观察到烧蚀凹坑周围出现穗状光学损伤区域。Wang等<sup>[8]</sup>提出一种用于预测飞秒到皮秒脉冲宽度范围内多脉冲激光烧蚀的改进模型,采用Drude模型来描述飞秒和皮秒脉冲的吸收过程。Kumar等<sup>[9]</sup>采用由一组耦合偏微分方程组成的双温模型,研究超短脉冲激光与钛合金(Ti6Al4V)的相互作用机理,并利用COMSOL软件进行有限元模拟求解。

本文通过建立动能量热模型来描述飞秒激光烧蚀过程中的物理现象,进而对飞秒激光精微修正后的面齿轮齿面形貌进行模拟。通过COMSOL软件的数值仿真,研究单脉冲激光能量、激光功率等参数对面齿轮精微修正的影响,并通过飞秒激光精微修正面齿轮工艺的实验结果进行验证分析。

## 2 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的传热过程分析

飞秒激光对材料的作用机制随峰值能量密度、脉冲宽度、激光能量和材料的变化而变化<sup>[10]</sup>。飞秒激光烧蚀金属材料时,金属中能量最高的电子占据半满能级,并且价带和导带之间零能隙,电子很容易被激发到导带上,价带中的电子可以从占据态自由激发到非占据态。因此,金属可以吸收任何波长的光子。由于飞秒激光的能量密度极高,金属内部原子发生强场电离,价带中的电子通过多光子吸收或隧穿电离的形式被激发到导带中。然后,这些电子可以被激光场加速并获得足够的能量,从而使其

能够激发价带中的其他电子。这个过程称为碰撞电离,一系列的碰撞电离称为雪崩电离。在通过强场电离“播种”雪崩电离的情况下,材料辐照区域的电子逐渐被电离。

由于电子的质量比原子核轻得多,故激光能量首先被电子吸收。随后,自由电子的能量通过电子与其他粒子的碰撞转移到晶格中。电子和晶格相互交换能量,直到达到相同的温度。这种时间尺度在皮秒级的能量交换过程称为晶格热化。当电子和晶格的平衡温度达到金属熔化温度时,被辐照的部分变成热等离子体向外蒸发,金属出现烧蚀现象,表面形成凹坑<sup>[11]</sup>。

在飞秒激光与金属的相互作用中,飞秒激光作用的持续时间少于温度达到平衡所需的时间,电子和晶格之间存在高度非平衡条件温度,因此不能采用经典的傅里叶定律传热模型方程。可将加热过程可以分为三个阶段,如图1所示。第一阶段对应于光子对电子的散射,其作用时间为几十飞秒。在这个阶段,能量首先被电子吸收,而不是被晶格吸收。第二阶段对应于电子到晶格的能量转移,其作用时间为几十皮秒。第三阶段对应于晶格与晶格的相互作用,其作用时间为几十微秒<sup>[12]</sup>。

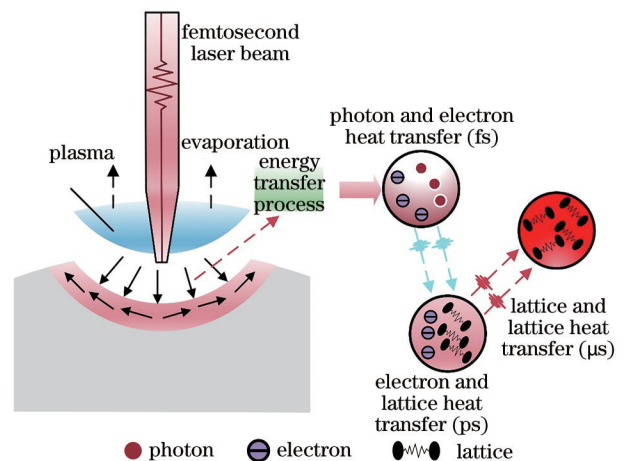


图1 飞秒激光源到晶格的能量传输过程

Fig. 1 Energy transfer process from femtosecond laser source to crystal lattice

## 3 动能量热模型及其网格划分

### 3.1 动能量热模型

飞秒激光与金属材料的相互作用存在不同时间尺度的物理过程,材料成分间互温感应对晶格的作用时间较长,材料相变过程的作用时间次之,激光束吸收过程的作用时间短<sup>[13]</sup>,需要对多步能量传

热过程进行分析。齿轮材料 18Cr2Ni4WA 以铁 (Fe) 基成分为主, 还含有其他化学成分, 故对面齿轮进行飞秒激光修正加工时, 只描述光子与电子、电子与晶格间传热的双温模型不够全面, 需要考虑材料成分间互温感应的影响。材料成分间互温感应效应影响飞秒激光加工过程中材料晶格与晶格间的热传递过程。由表 1 可知, 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 中 Ni 的质量分数为 4.25%, Cr 的质量分数为 1.5%。齿轮材料中主要化学成分 Fe、Ni 与 Cr 间经互温感应后, 达到平衡态的吸收能量模型  $Q_G$  可表示为

$$Q_G = \sum_i U_0 m_i X_i \beta_i, \quad (1)$$

式中:  $U_0$  为材料成分单位质量吸收的能量;  $m_i$  为第  $i$  种成分的质量;  $X_i$  为第  $i$  种成分的质量分数;  $\beta_i$  为第  $i$  种成分的吸收率;  $i$  可为碳 (C) 基成分、铬 (Cr) 基成分和镍 (Ni) 基成分。

由于激光脉冲宽度为飞秒量级, 在脉冲间隔

表 1 齿轮材料 18Cr2Ni4WA 化学成分

Table 1 Chemical composition of gear material 18Cr2Ni4WA

Element	C	Cr	Ni
Mass fraction / %	0.18	1.5	4.25
Absorption rate	0.833	0.361	0.284

内, 电子热传导过程显得十分缓慢<sup>[14]</sup>, 可忽略不计。因此, 描述飞秒激光与物质相互作用的动能量热模型可表示为

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla [k_e \nabla (T_e)] - g (T_e - T_1) + S(r, t), \quad (2)$$

$$C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = g (T_e - T_1) - Q_G, \quad (3)$$

式中:  $T_e$ 、 $T_1$  分别为电子系统和晶格系统的温度;  $C_e$ 、 $C_1$  分别为电子热容和晶格热容;  $g$  为电子与晶格的耦合系数;  $S(r, t)$  为单位体积内的激光热源辐照的功率密度;  $r$  为几何模型中任意位置到激光束中心轴的距离;  $t$  为时间。采用高斯型脉冲激光, 激光热源项的表达式为

$$S(r, t) = \frac{I_0}{\tau_p} (1 - R) \alpha_b \exp(-\alpha_b z) \exp[-2 \times (r/r_0)^2] \exp[-4 \ln 2 \times (t/\tau_p - 1)^2], \quad (4)$$

式中:  $I_0$  为入射激光能量密度的最大值;  $\tau_p$  为脉冲宽度;  $R$  为材料的反射率;  $\alpha_b$  为材料的吸收系数;  $r_0$  为光斑半径。

Huang 等<sup>[15]</sup>得出的电子热导率表达式为

$$k_e = k \frac{(\theta_e^2 + 0.16)^{1.25} (\theta_e^2 + 0.44) \theta_e}{(\theta_e^2 + 0.092)^{0.5} (\theta_e^2 + \beta \theta_1)}, \quad (5)$$

式中:  $k$  和  $\beta$  为常数;  $\theta_e = T_e/T_F$ ,  $\theta_1 = T_1/T_F$ , 其中  $T_e$  为电子温度,  $T_1$  为晶格温度,  $T_F$  为费米温度。

假设能量沉积呈高斯分布, 可用边界热流模拟。热内流公式<sup>[16]</sup>为

$$-n(-k_i \nabla T) = \frac{I_0}{\tau_p} (1 - R) \alpha_b \exp[-2 \times (r/r_0)^2]. \quad (6)$$

在模型的另一个边界上, 假设其为热绝缘边界, 强制正常导电通量为 0, 则有

$$-n(-k \nabla T) = 0. \quad (7)$$

根据动能量热模型的两个非线性方程(2)式和(3)式, 在 COMSOL 软件中建立两个固体传热模块, 其分别对应(8)式和(9)式代表的电子系统与晶格系统, 然后根据飞秒脉冲激光作用下电子-声子系统耦合机制, 通过设置  $g$  将两个固体传热模块进行

耦合, 经过 COMSOL 软件模拟计算, 可得到电子系统和晶格系统在受到激光脉冲作用时温度的变化规律。根据文献<sup>[17]</sup>, 电子系统热源  $Q_e$  及晶格系统热源  $Q_1$  可表示为

$$Q_e = S(r, t) - Q_1, \quad (8)$$

$$Q_1 = g (T_e - T_1). \quad (9)$$

模型的初始条件:  $T_e = T_1 = 300$  K, 模型外表面边界条件由(6)式和(7)式给出; 模型节点数为 2400, 时间步长为 0.01 ps, 求解时间为 30 ps, 相对容差为 0.05。

### 3.2 模型网格划分

激光与金属材料作用效果呈轴对称分布, 故将模型简化为二维轴对称模型进行处理, 并假设齿轮材料各向同性, 忽略材料表面划痕及内部材质不均匀对烧蚀效果的影响。几何模型及网格划分如图 2 所示。其中, 工件厚度为 50  $\mu\text{m}$ , 宽度为 20  $\mu\text{m}$ , 横向为  $r$  方向, 纵向为  $z$  方向。  $r = z = 0$  处为入射激光光斑中心。仿真模型选用映射网格, 在靠近激光入射点的部分, 热穿透深度值最大。网格类型选用自由三角形网格, 最大单元大小设置为 0.1  $\mu\text{m}$ , 最小单元大小设置为  $1 \times 10^{-4}$   $\mu\text{m}$ 。如图 2(b) 所示。



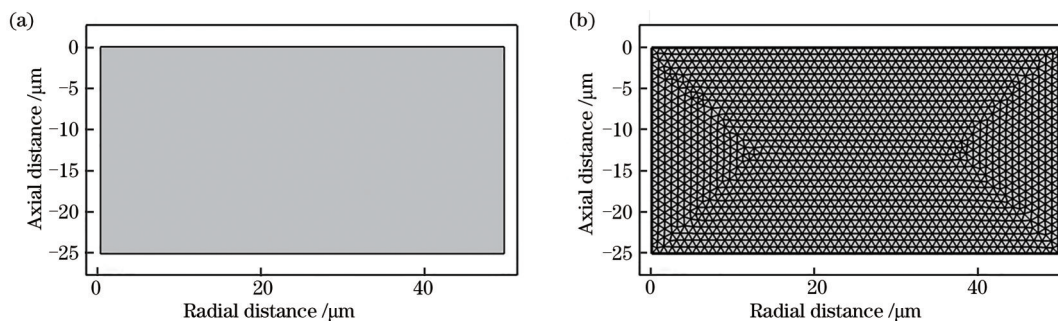


图2 几何模型及网格划分。(a)尺寸形状;(b)网格划分

Fig. 2 Geometric model and meshing. (a)Size shape; (b) meshing

### 4 模型仿真与分析

动能量热模型中使用的材料特性和激光参数<sup>[18]</sup>分别见表2和表3。

结合表2和表3的计算参数,通过COMSOL软件对动能量热模型进行求解,选取不同的能量密度后,对作用时间内所有节点的温度数值进行拟合得到电子系统和晶格系统的温度演变。

表2 材料特性

Table 2 Material characteristics

Parameter	Value	Parameter	Value
Thermal conductivity of electrons $k_e / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	78.4	Density $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7800
Electron heat capacity $C_e / (\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	706.4	Fermi temperature $T_F / \text{K}$	$1.28 \times 10^5$
Lattice heat capacity $C_l / (\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	$3.6 \times 10^6$	Melting temperature $T_m / \text{K}$	1724
Coupling coefficient $g / (\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	$130 \times 10^{16}$	Heat of evaporation $\Omega_{\text{vap}} / (\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	6288
Absorption coefficient $\alpha_b / \text{m}^{-1}$	$4.97 \times 10^7$	Vaporization temperature $T_v / \text{K}$	3023
Reflectivity $R$	0.64		

表3 激光参数

Table 3 Laser parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Laser spot radius $r_0 / \mu\text{m}$	20	Peak laser power $P_{\text{laser}} / \text{W}$	$4 \times 10^9$
Laser fluence $I_0 / (\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	1.04~5.25	Pulse width $\tau_p / \text{fs}$	800
Average power $P_{\text{ave}} / \text{W}$	7	Wavelength $\lambda / \text{nm}$	1030

图3所示为激光能量密度 $I_0$ 分别为 $1.04 \text{ J/cm}^2$ 、 $3.90 \text{ J/cm}^2$ 和 $5.25 \text{ J/cm}^2$ ,脉冲宽度为800 fs,激光光斑半径为 $20 \mu\text{m}$ 时齿面电子和晶格在持续30 ps时间内的温度变化情况。由于电子能量吸收时间标度为飞秒量级,因此当激光能量沉积时,电子被加热,电子温度(图3所示的星号实线)急剧升高,在约22000 K时达到峰值,且远高于晶格温度,电子温度和晶格温度在10 ps时间后达到平衡。由此可见,随着激光能量密度的增大,电子温度的最大值也增大,同时达到平衡后的电子温度升高,达到平衡态需要的弛豫时间更长。在进行800 fs的脉冲持续时间和 $20 \mu\text{m}$ 的激光光斑半径的仿真研究时,使用 $1.04 \sim 5.25 \text{ J/cm}^2$ 范围内的激光能量密度。

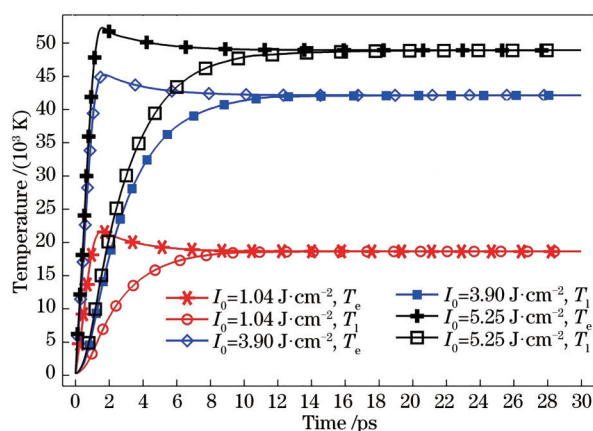


图3 持续30 ps时间内齿面的电子和晶格温度变化情况

Fig. 3 Variation of the electron and lattice temperatures of the tooth surface for a duration of 30 ps

在与图3相同的激光参数下,针对不同的能量密度绘制的齿面沿轴向和径向的晶格温度分布曲线如图4所示。可以看到,当飞秒激光烧蚀齿轮材料表面时,晶格温度与传递轴向距离和径向距离有关。随着能量密度的增大,晶格温度显著提高。晶格温度沿着轴向深度方向和径向距离方向逐渐降低。在轴向距离小于 $5.17\ \mu\text{m}$ 、径向距离小于 $34.01\ \mu\text{m}$ 的晶格区域,当晶格温度大于材料的汽化温度 $3023\ \text{K}$ 时,材料表面出现烧蚀破坏,其余的晶格区域基本不受温度场耦合的影响。由此可见,飞

秒单脉冲的作用只发生在材料表面,对材料内部的影响并不明显,因此飞秒单脉冲激光能够实现面齿轮材料的精微烧蚀加工。

面齿轮材料在晶格温度达到材料汽化温度时出现烧蚀<sup>[19]</sup>,即达到 $18\text{Cr}2\text{Ni}4\text{W}$ 材料的汽化温度( $3023\ \text{K}$ ),可获得烧蚀凹坑剖面。当激光能量密度为 $1.04\ \text{J}/\text{cm}^2$ 和 $5.25\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,齿面烧蚀凹坑剖面(径向和轴向坐标)的轮廓及其温度分布分别为图5(a)、(b)所示,晶格温度分别沿轴向和径向逐渐降低。

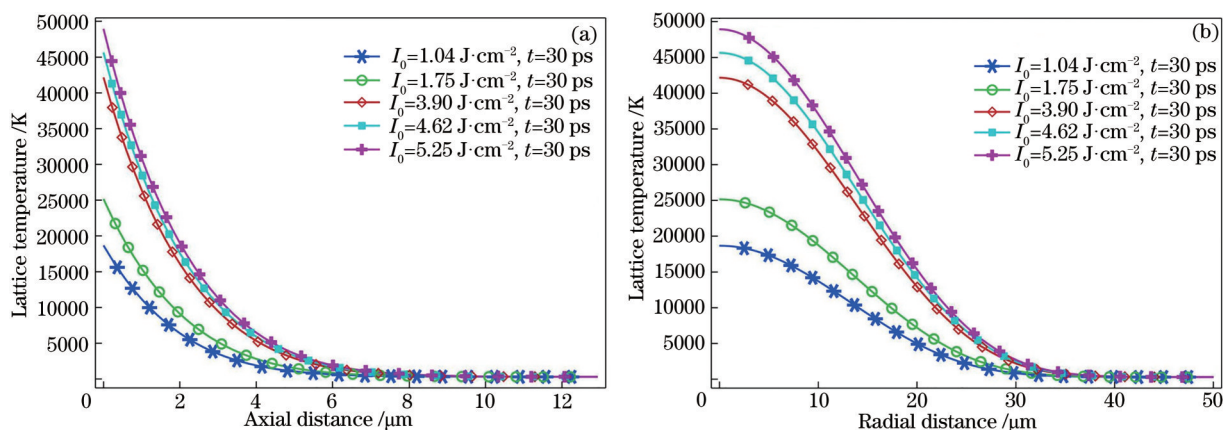


图4 齿面沿轴向和径向的晶格温度分布。(a)轴向;(b)径向

Fig. 4 Lattice temperature distribution of the tooth surface along the axial and radial directions. (a) Axial direction; (b) radial direction

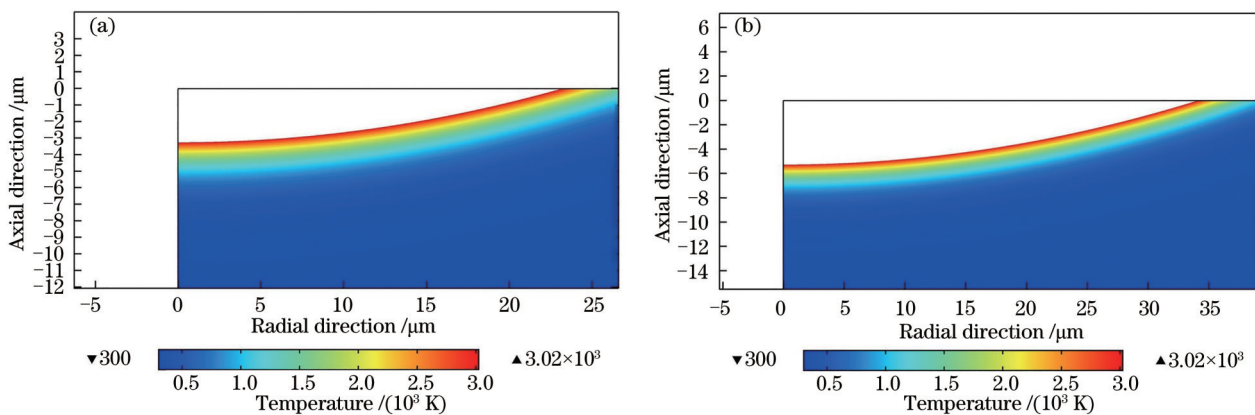


图5 不同激光能量密度下齿面烧蚀凹坑剖面轮廓及其温度分布。(a)  $1.04\ \text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $5.25\ \text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$

Fig. 5 Profile and temperature distribution of tooth ablation pit at different laser energy densities.

(a)  $1.04\ \text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $5.25\ \text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$

## 5 实验及对比分析

### 5.1 实验平台与实验材料

采用飞秒激光加工系统在面齿轮齿面上进行了单次激光烧蚀实验。图6为飞秒激光加工系统的试验装置示意图。该装置主要由飞秒激光器、飞秒激光烧蚀头、激光器控制操作平台、分

光镜、聚焦透镜、三维振镜、激光扩束器、照明系统、CCD监测系统、三维移动平台及计算机等部分组成;采用FemtoYL-100型工业飞秒激光器发出波长为 $1030\ \text{nm}$ 的激光束,飞秒激光器产生持续时间为 $800\ \text{fs}$ 的连续可变脉冲,重复频率为 $100\ \text{kHz}$ ,脉冲数量由激光器控制操作平台控制。

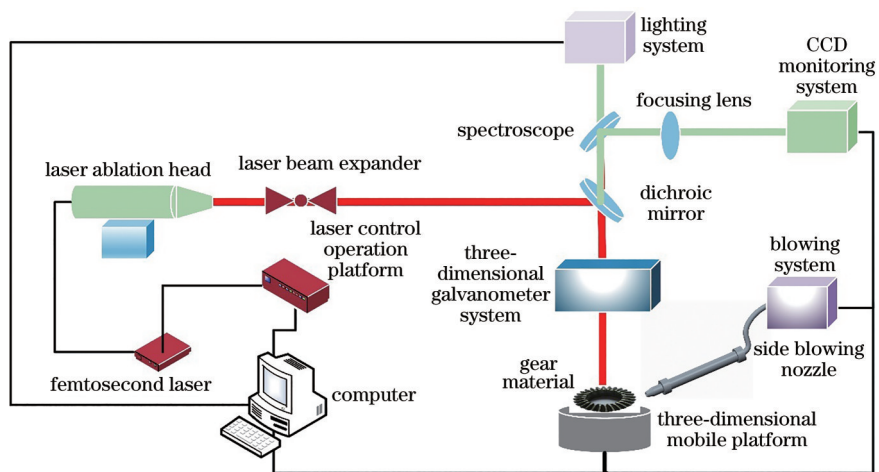


图6 飞秒激光加工系统

Fig. 6 Femtosecond laser processing system

### 5.2 实验结果及分析

从图7所示的烧蚀表面的SEM图像来看,在 $1.04 \text{ J/cm}^2$ 的低激光能量密度下观察到轻微的表面损伤,并出现图7(a)所示的波纹图案结构。如图7(b)

所示,在 $5.25 \text{ J/cm}^2$ 的能量密度下,材料因熔化和蒸发而损坏,细小的溅射颗粒也沉积在凹坑底部的表面上。采用Motic Images Plus 3.0软件在三维超景深显微镜获得的图像(图8)上拟合凹坑直径和深度。激

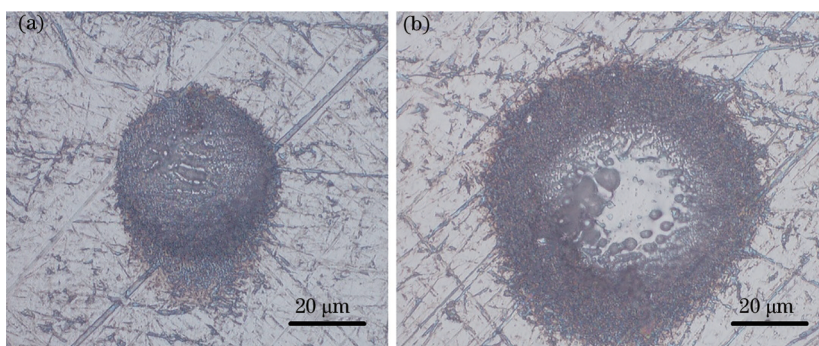


图7 不同激光能量密度下烧蚀凹坑的SEM图像。(a)  $1.04 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $5.25 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$

Fig. 7 SEM images of ablated crater at different laser energy densities. (a)  $1.04 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $5.25 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$

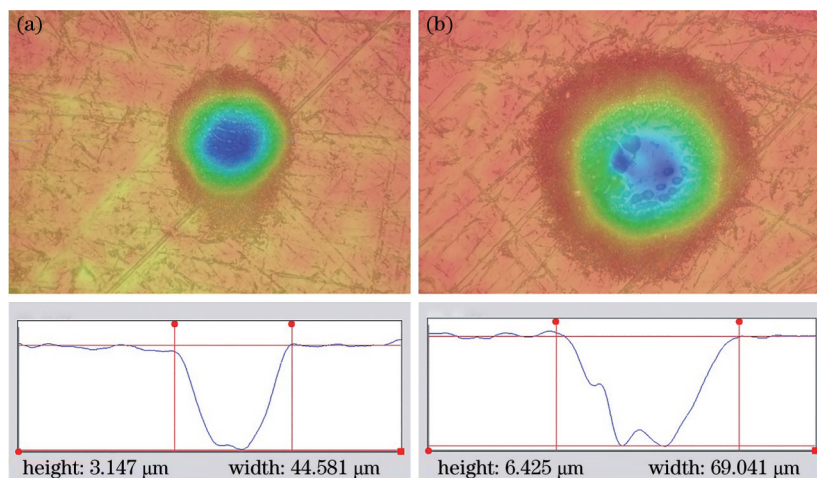


图8 不同激光能量密度下的三维超景深显微镜图像。(a)  $1.04 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $5.25 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$

Fig. 8 Three-dimensional ultra depth of field microscope images of ablated crater at different laser energy densities.

(a)  $1.04 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $5.25 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$



光能量密度分别为  $1.04 \text{ J/cm}^2$  和  $5.25 \text{ J/cm}^2$  时,烧蚀坑直径分别为  $44.581 \mu\text{m}$  和  $69.041 \mu\text{m}$ ,对应的烧蚀深度分别为  $3.147 \mu\text{m}$  和  $6.425 \mu\text{m}$ 。不同激光能量

密度下测得的凹坑直径和烧蚀深度见表4。将表4的数据输入自然对数坐标系中,激光能量密度分别与烧蚀坑直径的平方和烧蚀坑深度呈线性关系。

表4 齿轮材料18Cr2Ni4WA的不同参数的预测值和实验值

Table 4 Predicted and experimental values of different parameters for gear material 18Cr2Ni4WA

Laser power $P/\text{W}$	Laser energy $F/\mu\text{J}$	Laser fluence $I_0/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	Ablation diameter $D/\mu\text{m}$		Ablation depth $H/\mu\text{m}$	
			Predictive value	Experimental value	Predictive value	Experimental value
1.3	13	1.04	46.52	44.581	3.28	3.147
2.2	22	1.75	51.08	50.027	3.98	4.461
4.9	49	3.90	63.86	63.001	4.98	4.228
5.8	58	4.62	67.1	67.564	5.12	5.306
6.6	66	5.25	68.02	69.041	5.17	6.425

### 5.3 实验与仿真对比分析

根据导出的关系式<sup>[20]</sup>可计算理论烧蚀阈值  $F_{th}$

$$F_{th} = \frac{\rho\Omega_{vap}}{\alpha_b(1-R)}, \quad (10)$$

式中: $\rho$ 为密度; $\Omega_{vap}$ 为蒸发热。由(10)式计算得到齿轮材料18Cr2Ni4WA的理论烧蚀阈值为  $0.28 \text{ J/cm}^2$ 。

烧蚀坑直径  $D$  与能量密度  $I_0$  之间存在以下关系<sup>[21]</sup>

$$D^2 = 2r_0^2 \ln\left(\frac{I_0}{F_n}\right), \quad (11)$$

式中: $F_n$ 为烧蚀阈值。由(11)式可知,烧蚀直径的平方与激光能量密度在自然对数坐标系中呈正比

关系。因此,烧蚀阈值 ( $F_n$ ) 可由图9(a)所示的仿真和实验结果确定,方法是延伸虚线和实线与X轴相交,相交点给出了开始烧蚀时所需的最小激光能量密度,并且该最小激光能量密度称为烧蚀阈值。由图9(a)的虚线和实线与X轴的交点分别得出  $0.26 \text{ J/cm}^2$  和  $0.29 \text{ J/cm}^2$  作为基于仿真研究和实验所得的烧蚀凹坑直径的烧蚀阈值。根据图9(b)也可以预测烧蚀阈值,由图9(b)所示的虚线和实线与X轴的交点分别得出  $0.07 \text{ J/cm}^2$  和  $0.11 \text{ J/cm}^2$  作为基于仿真研究和实验所得的烧蚀深度阈值。

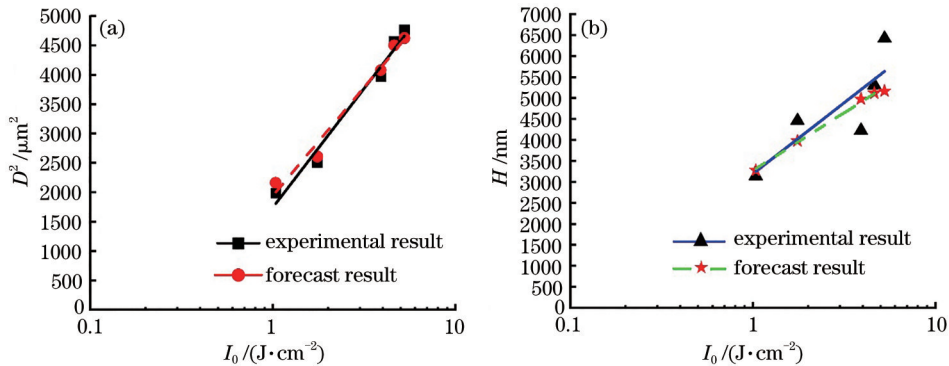


图9 不同激光能量密度下轴对称模型的凹坑直径和烧蚀深度与实验值的比较。(a)  $1.04 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $5.25 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$

Fig. 9 Comparison of the pit diameter and ablation depth of the axisymmetric model with the experimental values at different laser energy densities. (a)  $1.04 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $5.25 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$

## 6 结 论

利用COMSOL软件建立了考虑齿轮材料成分间互温感应的飞秒激光精微修正的动能量热模型,模拟了飞秒激光修正面齿轮齿面温度场的变化规律,预测了齿面烧蚀凹坑的直径和深度,并得到临界烧蚀能量密度分别为  $0.26 \text{ J/cm}^2$  和  $0.07 \text{ J/cm}^2$ 。随着激光能量密度的增大,电子温度急剧升高,且

电子温度远大于晶格温度;烧蚀凹坑深度和直径均增大。经过实验验证,当电子与晶格的平衡温度达到材料的汽化温度时,烧蚀凹坑的坑口、坑壁等较为平整,没有发生热熔化、热扩散等热效应,能够保持较低的齿面粗糙度和良好的齿面平整度。根据测量的凹坑直径和深度,实验确定的临界烧蚀能量密度分别为  $0.29 \text{ J/cm}^2$  和  $0.11 \text{ J/cm}^2$ 。基于凹坑直径分析得到的烧蚀阈值更为可靠,该模型可为提高

面齿轮的表面质量、表面精度提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] Li C, Cheng G H, Razvan S, et al. Investigation of femtosecond laser-induced periodic surface structure on tungsten[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0532001.  
李晨, 程光华, Razvan Stoian, 等. 飞秒激光诱导金属钨表面周期性自组织结构的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0532001.
- [2] Qian F C, Guo Z R, Dong W Q, et al. High-precision synchronous femtosecond and picosecond pulse generation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1001001.  
钱富琛, 郭政儒, 董文乾, 等. 高精度同步飞秒和皮秒脉冲产生技术[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1001001.
- [3] Li Y D, Yin W Y, Dai Y, et al. Research progress on spatio-temporal coupling of femtosecond pulse laser for direct-writing nanograting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111403.  
李跃东, 尹唯一, 戴晔, 等. 飞秒脉冲激光的时空变换影响纳米光栅直写过程的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111403.
- [4] Wei C, Ma Y P, Han Y, et al. Femtosecond laser processing of ultrahard materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190003.  
魏超, 马玉平, 韩源, 等. 飞秒激光加工超硬材料的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190003.
- [5] Yang Q, Du G Q, Chen F, et al. Ultrafast thermal relaxation characteristics in gold film excited by shaped femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 0502005.  
杨青, 杜广庆, 陈烽, 等. 飞秒激光整形脉冲激发金膜的超快热弛豫特性[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0502005.
- [6] de Aldana J R V, Méndez C, Roso L, et al. Propagation of ablation channels with multiple femtosecond laser pulses in dielectrics: numerical simulations and experiments[J]. *Journal of Physics D*, 2005, 38(16): 2764-2768.
- [7] de Aldana J R V, Méndez C, Roso L, et al. Saturation of ablation channels micro-machined in fused silica with many femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2006, 14(3): 1329-1338.
- [8] Wang H, Shen H, Yao Z Q, et al. A two-step model for multiple picosecond and femtosecond pulses ablation of fused silica [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(6): 061004.
- [9] Kumar K K, Samuel G L, Shunmugam M S, et al. 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.
- [10] Balling P, Schou J. Femtosecond-laser ablation dynamics of dielectrics: basics and applications for thin films[J]. *Reports on Progress in Physics. Physical Society (Great Britain)*, 2013, 76(3): 036502.
- [11] Mao S S, Quéré F, Guizard S, et al. Dynamics of femtosecond laser interactions with dielectrics [J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(7): 1695-1709.
- [12] Leitz K H, Redlingshöfer B, Reg Y, et al. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 230-238.
- [13] Shi X S, Jiang L, Li X, et al. Femtosecond laser-induced periodic structure adjustments based on electron dynamics control: from subwavelength ripples to double-grating structures [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3743-3746.
- [14] Ni X C, Wang Q Y. Finite difference method for thermal analysis of femtosecond-picosecond pulse laser ablation on metal surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(3): 277-280.  
倪晓昌, 王清月. 飞秒、皮秒激光烧蚀金属表面的有限差分热分析[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 277-280.
- [15] Huang J, Zhang Y W, Chen J K, et al. Ultrafast solid-liquid-vapor phase change in a thin gold film irradiated by multiple femtosecond laser pulses[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(13/14): 3091-3100.
- [16] Ji P F, Zhang Y W. Multiscale modeling of femtosecond laser irradiation on a copper film with electron thermal conductivity from *ab initio* calculation [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 2017, 71(2): 128-136.
- [17] Lei C X, Ren Y P, Gan Y, et al. Effect of optical properties on the thermal responses of copper films induced by ultrafast lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(7): 071006.  
雷春霞, 任云鹏, 干湧, 等. 光学性质对超快激光辐照下铜膜热响应的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(7): 071006.
- [18] Wang Z, Fu W J, Zhang R Z, et al. Numerical



- simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 74-78.
- 王震, 付文静, 张蓉竹, 等. 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): 74-78.
- [19] Cheng J, Perrie W, Sharp M, et al. Single-pulse drilling study on Au, Al and Ti alloy by using a picosecond laser[J]. *Applied Physics A*, 2009, 95(3): 739-746.
- [20] Nielsen J B, Savolainen J M, Christensen M S, et al. Ultra-short pulse laser ablation of copper, silver and tungsten: experimental data and two-temperature model simulations[J]. *Applied Physics A*, 2011, 103(2): 447-453.
- [21] Chen G Y, Zhu Z C, Yin J, et al. Experiment on ablation threshold of single crystal diamond produced by femtosecond laser processing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0402001.
- 陈根余, 朱智超, 殷起, 等. 单晶金刚石飞秒激光加工的烧蚀阈值实验[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402001.