

引用格式: MING Xing-zu, JIN Lei, XIAO Yong-bo, *et al.* Femtosecond Laser Ablation Characteristics of Gear Material 20CrMnTi[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1214002

明兴祖, 金磊, 肖勇波, 等. 齿轮材料 20CrMnTi 的飞秒激光烧蚀特征[J]. 光子学报, 2020, 49(12):1214002

## 齿轮材料 20CrMnTi 的飞秒激光烧蚀特征

明兴祖<sup>1,2</sup>, 金磊<sup>2</sup>, 肖勇波<sup>2</sup>, 林嘉剑<sup>2</sup>, 周贤<sup>1</sup>, 明瑞<sup>2</sup>

(1 湖北文理学院 机械工程学院, 湖北 襄阳 441053)

(2 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 研究了螺旋锥齿轮材料 20CrMnTi 的飞秒激光烧蚀机理, 以及单脉冲飞秒激光在不同能量密度下的齿面烧蚀特征. 考虑材料的能量动态吸收效应和光子-电子-晶格系统的相互耦合作用, 建立能量耦合模型, 仿真得到烧蚀齿轮材料的能量密度至少为 67 mJ/cm<sup>2</sup>, 材料去除区域发生在烧蚀深度 40 nm 以内. 实验结果表明, 齿面温度超过齿轮材料的气化温度后, 齿面能够保持良好的烧蚀形貌, 粗糙度的变化值小于 0.021 μm, 验证了理论仿真的有效性. 研究结果可为提高飞秒激光精微加工螺旋锥齿轮的齿面质量提供参考.

**关键词:** 飞秒激光加工; 螺旋锥齿轮; 能量耦合模型; 能量密度; 烧蚀特征

中图分类号: TN24

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204912.1214002

### Femtosecond Laser Ablation Characteristics of Gear Material 20CrMnTi

MING Xing-zu<sup>1,2</sup>, JIN Lei<sup>2</sup>, XIAO Yong-bo<sup>2</sup>, LIN Jia-jian<sup>2</sup>, ZHOU Xian<sup>1</sup>, MING Rui<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei 441053, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

**Abstract:** The ablation mechanism of spiral bevel gear material 20CrMnTi and the ablation characteristics of tooth surface by monopulse femtosecond laser at different energy densities are studied. Considering the dynamic energy absorption effect of material and mutual coupling interaction of photon-electron-lattice system, the energy coupling model is established. The simulation results show that the energy density of ablated gear material is at least 67 mJ/cm<sup>2</sup>, and the material removal occurs in the area within the ablation depth 40 nm. Experimental results show that when the tooth surface temperature exceeds the vaporization temperature of gear material, a good ablative morphology of tooth surface can be maintained, and the variation value of roughness is less than 0.021 μm, which verifies the effectiveness of theoretical simulation. These results could provide a reference for improving the tooth surface quality of spiral bevel gear with micro-precise machining of femtosecond laser.

**Key words:** Femtosecond laser machining; Spiral bevel gear; Energy coupling model; Energy density; Ablation characteristics

**OCIS Codes:** 140.3390; 140.3440; 140.3538; 140.7090; 160.3900

## 0 引言

螺旋锥齿轮传动作为一种新型的齿轮传动结构, 是实现空间相交或交错传动的关键部件, 具有重合度

基金项目: 国家自然科学基金(No.51975192), 湖北省自然科学基金(No.2019CFB632), 湖北文理学院学科开放基金(No.XK2020001)

第一作者: 明兴祖(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光精微加工理论与技术. Email: mxz9036@126.com

通讯作者: 明瑞(1992—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为齿轮激光加工技术. Email: 1036756349@qq.com

收稿日期: 2020-07-07; 录用日期: 2020-08-30

<http://www.photon.ac.cn>

大、承载能力强、传动平稳好等优势<sup>[1]</sup>,国内已自主研发了面向螺旋锥齿轮制造的六轴五联动数控铣齿机,并制造出了世界上最大规格的螺旋锥齿轮磨齿机<sup>[2]</sup>.邓效忠等<sup>[3-4]</sup>通过研究机床的运动参数与齿面误差的关系,开发出一种齿面误差自动识别的基本系统,建立了关于四轴联动数控铣齿机运动参数的修正模型.国内螺旋锥齿轮的加工精度仅能达到4~5级,比国外要低2级左右.传统的机械磨削、铣削等加工方式,制约了螺旋锥齿轮高质、高效制造的发展方向,影响了螺旋锥齿轮的运转寿命、使用性能等,需要探求新的精密制造方法.

对于螺旋锥齿轮加工齿面特征,梁志强等<sup>[5]</sup>研究了齿轮磨削后的表面形貌,通过白光干涉仪观测,随着磨削深度的增大,齿轮表面的划痕逐渐加深,磨削后的齿面质量降低,并且磨削过程中的齿面温度较高,易产生磨削烧伤、裂纹等缺陷,严重影响了齿面的粗糙度与精度.王延忠等<sup>[6]</sup>对铣削工艺中齿面存在的残余应力进行了研究,随着切削深度的增大,残余应力逐渐累加,对齿轮的切削质量与使用性能会有一些影响.

飞秒激光加工技术是一种新型加工方法,与长脉冲激光加工相比较,能够通过极高的峰值功率与极短的作用时间来精微去除材料,烧蚀时热影响区小<sup>[7]</sup>,具有加工区域精确、加工方式灵活、加工精度高等特点,已应用于大面积烧蚀合金材料<sup>[8]</sup>.本文采用飞秒激光加工技术,对留有微米级加工余量的螺旋锥齿轮材料进行最后工序的精微烧蚀加工,通过能量耦合模型仿真和实验,研究齿轮材料20CrMnTi的飞秒激光烧蚀特征.

## 1 齿轮材料与飞秒激光烧蚀机理

螺旋锥齿轮常用材料20CrMnTi是一种良好的渗碳钢,具有冲击韧性好、强度高、抗疲劳性能好等优点,其化学成分如表1所示.

表1 齿轮材料20CrMnTi化学成分  
Table 1 Chemical composition of gear material 20CrMnTi

Element	C	Cr	Mn	Si	P	S	Ti
Mass fraction/%	0.20	1.10	0.91	0.27	0.015	0.009	0.09

飞秒激光烧蚀过程中能量吸收为非线性吸收,飞秒激光能量强度在不同尺度上的作用机制影响材料的去除情况<sup>[9]</sup>.飞秒激光的去除机理与纳秒激光加工不同,它主要是通过光子-电子-晶格系统的相互耦合作用完成烧蚀,从源头上避免了热损伤的产生<sup>[10]</sup>.图1为齿轮材料的飞秒激光烧蚀机理,当高斯脉冲光束作用在齿轮材料表面时,由于飞秒激光的脉冲极短,材料表层的电子通过韧致辐射作用吸收激光光子能量,导致电

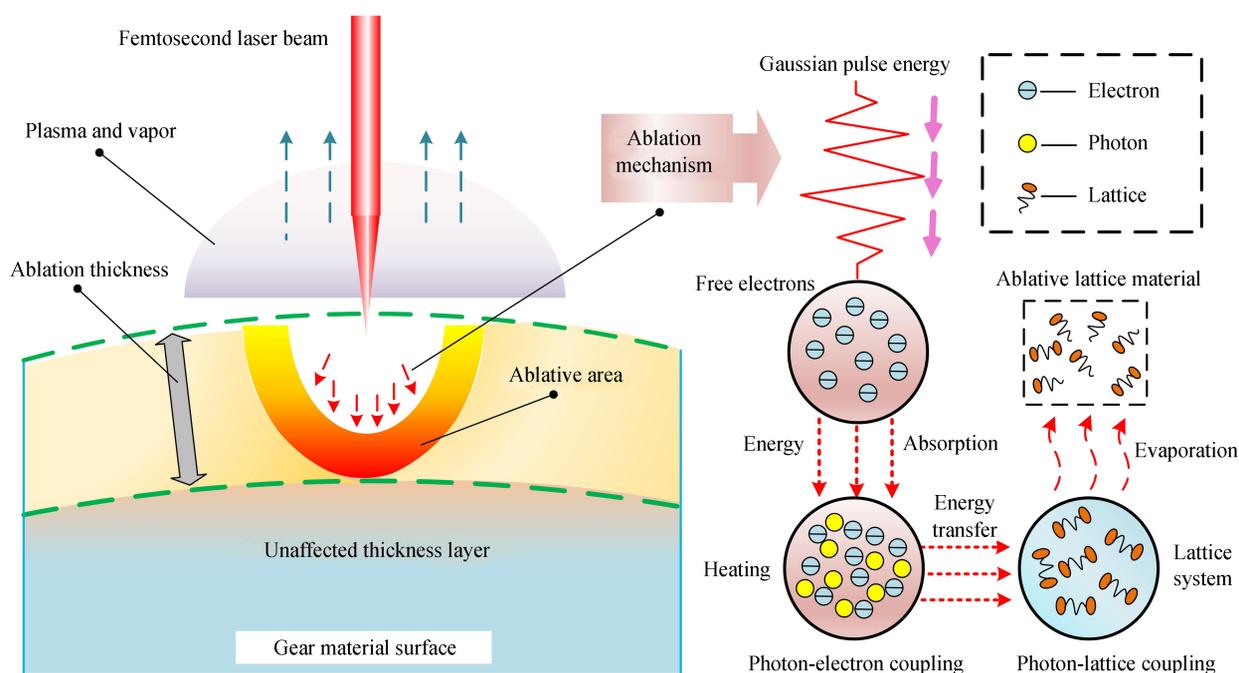


图1 齿轮材料的飞秒激光烧蚀机理  
Fig. 1 Femtosecond laser ablation mechanism of gear material

子与光子碰撞耦合加热,电子的温度会快速升高;能量传导后经电子-晶格耦合传递给晶格;当晶格吸收足够大的能量时,材料会发生熔化、蒸发、气化等现象,当齿轮材料的电子与晶格的平衡温度达到材料的熔化温度时,金属就会出现烧蚀现象,最终齿轮材料加工余量被去除。

## 2 飞秒激光烧蚀能量耦合模型

研究飞秒激光烧蚀齿轮材料20CrMnTi时,能量耦合模型采用双温模型,研究光子与电子、电子与晶格的相互作用,确定单脉冲激光能够高效烧蚀去除材料的激光能量。双温模型可表示为<sup>[11]</sup>

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

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = G(T_e - T_i) \quad (2)$$

式中,  $C_e$  为电子热容;  $T_e$  为电子系统温度;  $t$  为时间;  $\kappa_e$  为电子热导率;  $x$  为垂直于材料表面方向距离;  $G$  为电子与晶格的耦合系数,表示电子与晶格之间能量相互作用的特征参数;  $T_i$  为晶格系统温度;  $S(x, t)$  为与激光脉冲相对应的热源项;  $C_i$  为晶格热容。

式(1)表示电子温度随时间的变化规律,式(2)表示齿轮材料晶格温度随时间的变化规律。在飞秒的时间尺度内,忽略了晶格与晶格之间的能量传递<sup>[12]</sup>。

采用激光高斯光束的能量分布如图2所示,该光源的飞秒脉冲激光不用考虑激光脉冲能量在宽度上的分布情况,可简化运算难度<sup>[13]</sup>。

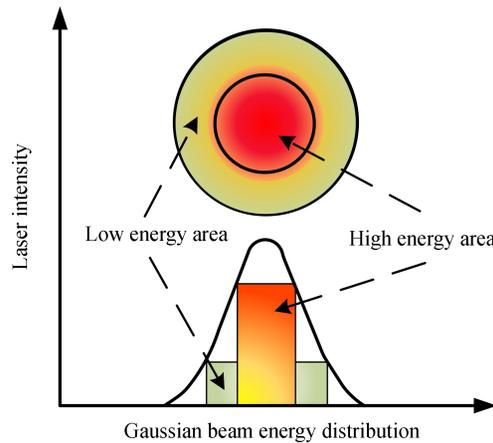


图2 高斯光束的能量分布

Fig. 2 Energy distribution of Gaussian beam

热源项  $S$  的表达式为

$$S(x, t) = \frac{Ab'F}{\sqrt{\pi/\ln(2)\tau_L}} \exp[-4\ln(2)(t-t_0)/\tau_L]^2 \exp(-b'x) \quad (3)$$

式中,  $A$  为消光系数,  $b'$  为齿轮材料的吸收系数,  $F$  为激光能量密度,  $\tau_L$  为飞秒激光脉冲宽度,  $t_0$  为脉冲初始时刻。

电子热导率  $k_e$  一般被认为是常数<sup>[14]</sup>,当飞秒激光照射到金属材料表面时,电子温度会超过费米温度,电子热导率可表示为

$$k_e = k \frac{(\theta_e^2 + 0.16)^{1.25} (\theta_e^2 + 0.44) \theta_e}{(\theta_e^2 + 0.092)^{0.5} (\theta_e^2 + \beta \theta_i)} \quad (4)$$

式中,  $k$  为材料导热系数;  $\theta_e$  为电子温度与费米温度的比值,  $\theta_i$  为晶格温度与费米温度的比值;  $\beta$  为电子导热材料常数。

当电子温度较低时,如纳秒激光烧蚀时,齿轮材料的吸收率可视为常数。飞秒激光烧蚀过程中,材料表

层的电子瞬时加热到高温高压,当齿面吸收的能量足够大时,材料的吸收系数和吸收率是动态变化的.因此,在飞秒激光烧蚀模型的建立中,需要考虑吸收率的动态变化.由文献[15]可知,材料的吸收系数与材料的电阻温度系数、波长、温度等有关,吸收系数 $b'$ 可表示为

$$b' = 2 \sqrt{\frac{\pi\sigma(T_e)}{c\epsilon_0\lambda_0}} \quad (5)$$

式中, $c$ 为激光传播速度, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $\lambda_0$ 为激光波长.在激光辐射条件下, $\sigma(T_e)$ 是电子系统温度的线性函数,可表示为<sup>[15]</sup>

$$\sigma(T_e) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(T_e - T_0)} \quad (6)$$

式中, $\sigma_0$ 为材料在 300 K 时的电导率, $\alpha$ 为材料的电阻温度系数, $T_0$ 为未发生烧蚀时材料的初始温度.

当飞秒激光垂直照射到材料时,齿轮材料的吸收率主要与电阻温度系数、激光波长、齿面温度等有关,吸收率可以表示为

$$\beta(T_e) = 2 \sqrt{\frac{c\pi\epsilon_0 + \alpha c\pi\epsilon_0(T_e - T_0)}{\sigma_0\lambda_0}} \quad (7)$$

### 3 数值求解与仿真分析

采用有限差分法对双温方程进行数值求解,激光脉冲宽度为 800 fs,取沿光束方向的深度步长为 1 nm,时间步长为 1 fs.初始条件:未发生烧蚀前,电子与晶格的温度均为 300 K.边界条件:烧蚀前后材料底层的电子温度与晶格温度均为 300 K.结合表 2 的计算参数<sup>[16-19]</sup>,对双温方程式(1)、(2)进行求解,取值不同的能量密度后,可得到飞秒激光烧蚀材料 20CrMnTi 表面温度场的变化规律.

表 2 飞秒激光仿真参数

Table 2 Femtosecond laser simulation parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Electron heat capacity $C_e / (\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3})$	706.4	Material conductivity $\sigma_0 / (\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	$1 \times 10^7$
Lattice heat capacity $C_l / (\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3})$	$3.5 \times 10^6$	Material density $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 800
Temperature coefficient of resistance $A / \text{K}^{-1}$	$6.51 \times 10^{-3}$	Coupling coefficient $G / (\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	$1.3 \times 10^{18}$
Melting temperature $T_m / \text{K}$	1 724	Pulse width $\tau / \text{s}$	$300 \times 10^{-15}$
Evaporation temperature $T_n / \text{K}$	3 023	Thermal conductivity coefficient $k$	78.4
Laser transmission speed $c / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$3.8 \times 10^8$	Vacuum dielectric constant $\epsilon_0 / (\text{F}\cdot\text{m}^{-1})$	$8.85 \times 10^{-12}$
Laser wavelength $\lambda_0 / \text{m}$	$1.03 \times 10^{-6}$	Fermi temperature $T_f / \text{K}$	$1.28 \times 10^5$

如图 3 所示,电子系统温度达到峰值温度后,通过电-声耦合的作用,电子系统所吸收的激光能量向齿轮材料的晶格系统传递.此时电子系统的温度由于热扩散作用而逐渐降低,晶格系统由于吸收能量,温度逐渐增加,之后两个系统趋于热平衡状态,整个能量耦合的非平衡过程在 10 ps 左右完成.

当能量密度为 19 mJ/cm<sup>2</sup>时,如图 3(a)所示,电子系统经过 0.48 ps 后达到的峰值温度约为 3 550 K,两个系统的温度在 2.3 ps 后趋于热平衡状态,平衡温度约为 1 400 K,未达到晶格的熔化温度,材料未发生烧蚀.

当能量密度为 31 mJ/cm<sup>2</sup>时,如图 3(b)所示,电子系统经过 0.50 ps 后达到的峰值温度约为 4 500 K,两个系统的温度在 3.2 ps 后趋于热平衡状态,平衡温度约为 1 850 K,达到晶格的熔化温度,此时齿轮材料开始熔化,部分材料由固态转化为液态,并出现蒸发现象.

当能量密度达到 67 mJ/cm<sup>2</sup>,如图 3(c)所示,电子系统经过 0.52 ps 后的峰值温度约为 7 500 K,两个系统的平衡温度在 3.9 ps 后,趋于热平衡状态,此时的平衡温度约为 3 100 K,达到了晶格的气化温度,晶格材料在高温高压下快速气化或形成等离子喷发,部分固态或液态吸收能量快速转化为气态,材料去除效率高.

当能量密度达到 105 mJ/cm<sup>2</sup>时,如图 3(d)所示,两个系统的温度在 4.6 ps 后趋于热平衡状态,此时的平衡温度约为 4 050 K,远大于齿轮材料的熔化温度与气化温度,材料的去除效率比前面三种能量的去除效率要高.但能量密度增加,电子与晶格温度达到平衡所需的豫驰时间增加,晶格温度达到最大值后会缓慢下

降. 由于电子中热能的传播速度比晶格中热能的传播速度快得多, 故平衡状态下电子温度要略低于晶格温度.

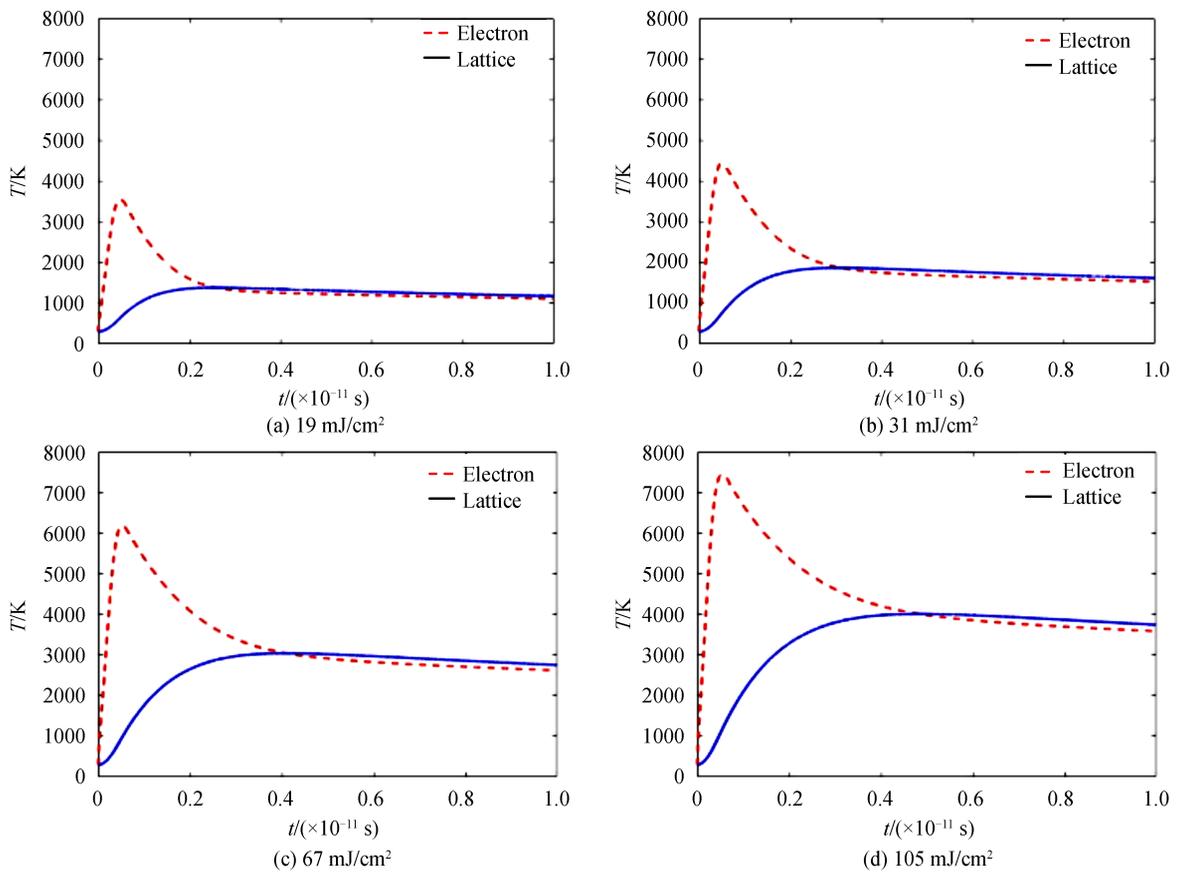
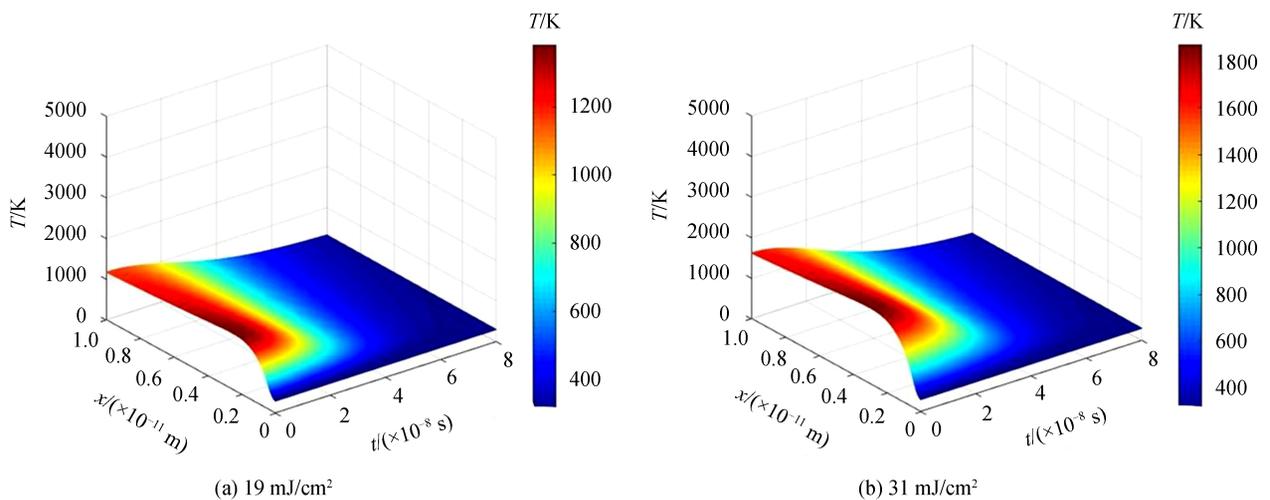


图3 电子与晶格系统温度场变化  
Fig. 3 Temperature field change of electron and lattice system

分别模拟了在  $19 \text{ mJ/cm}^2$ 、 $31 \text{ mJ/cm}^2$ 、 $67 \text{ mJ/cm}^2$  和  $105 \text{ mJ/cm}^2$  等不同能量密度下晶格系统温度场的三维分布, 结果如图 4. 可看出, 当飞秒激光烧蚀齿轮材料表面时, 晶格温度与时间、传递深度有关. 晶格温度随着能量密度的增大显著提高, 沿着深度方向逐渐降低. 在沿着激光束方向, 深度在  $40 \text{ nm}$  以上的晶格区域产生材料去除作用, 在  $40 \text{ nm}$  以下的晶格区域基本不烧蚀材料. 因此, 飞秒单脉冲的烧蚀作用只发生在材料表面, 对材料内部的影响并不明显.



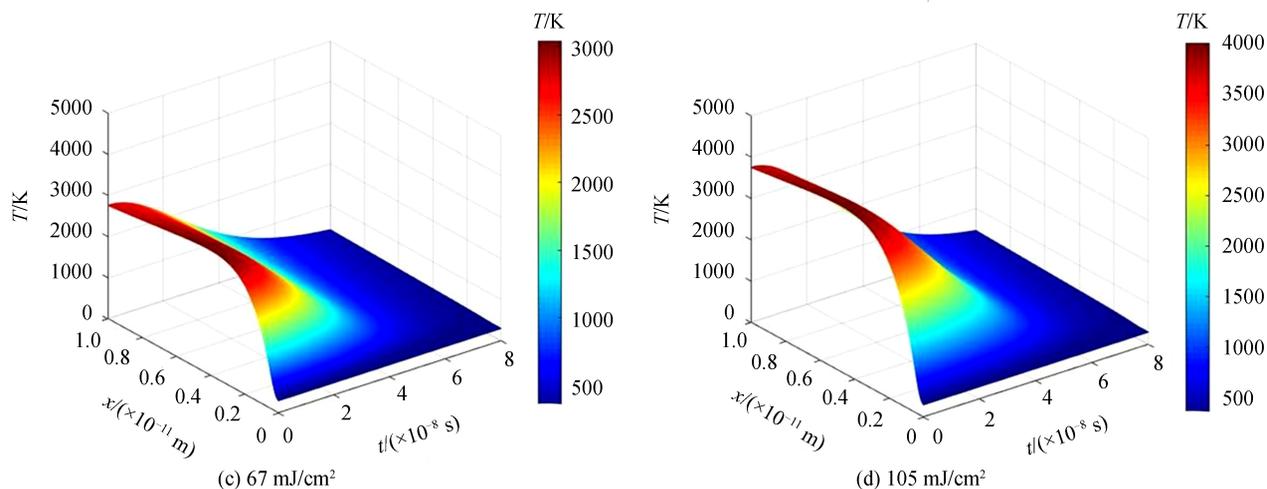


图4 晶格系统温度场的三维分布

Fig. 4 Three-dimensional distribution of temperature field in lattice system

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验系统与试件

实验采用的飞秒激光微加工系统如图5所示,主要由激光器、导光组件、振镜系统、三维移动平台、CCD系统及计算机控制系统等部分组成.该激光器的波长为1 030 nm,脉宽为800 ns,最大脉冲激光能量为50  $\mu$ J.

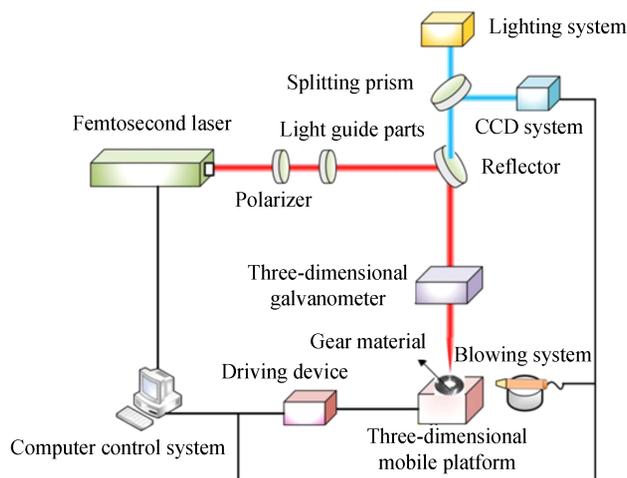


图5 飞秒激光微加工系统

Fig. 5 Femtosecond laser micromachining system

实验试件为螺旋锥齿轮经高速铣削后的半成品齿坯料,通过电火花数控线切割机床切割成齿轮薄片,然后用砂纸对单齿切片表面进行打磨、抛光处理,清洗后得到实验齿坯试件,采用飞秒激光垂直照射切片齿面.

### 4.2 烧蚀形貌实验分析

飞秒激光微加工齿面后,采用光学显微镜DMM-300C型,观测在19  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、31  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、67  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 和105  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 等不同能量密度下齿面的烧蚀圈形貌特征,如图6所示.实验发现,随着飞秒激光能量的增大,齿轮表面烧蚀尺寸特征愈加明显.当注入能量为19  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 进行烧蚀时,材料表面没有明显的烧蚀现象;当能量密度增大至31  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,烧蚀区域开始形成并且面积逐渐增大,形成的烧蚀圈直径约为11  $\mu\text{m}$ ,当能量密度达到105  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,烧蚀区域呈现出愈加明显的形貌特征,形成的烧蚀圈直径约为23  $\mu\text{m}$ ,烧蚀区域面积随着能量密度的增大而增大.

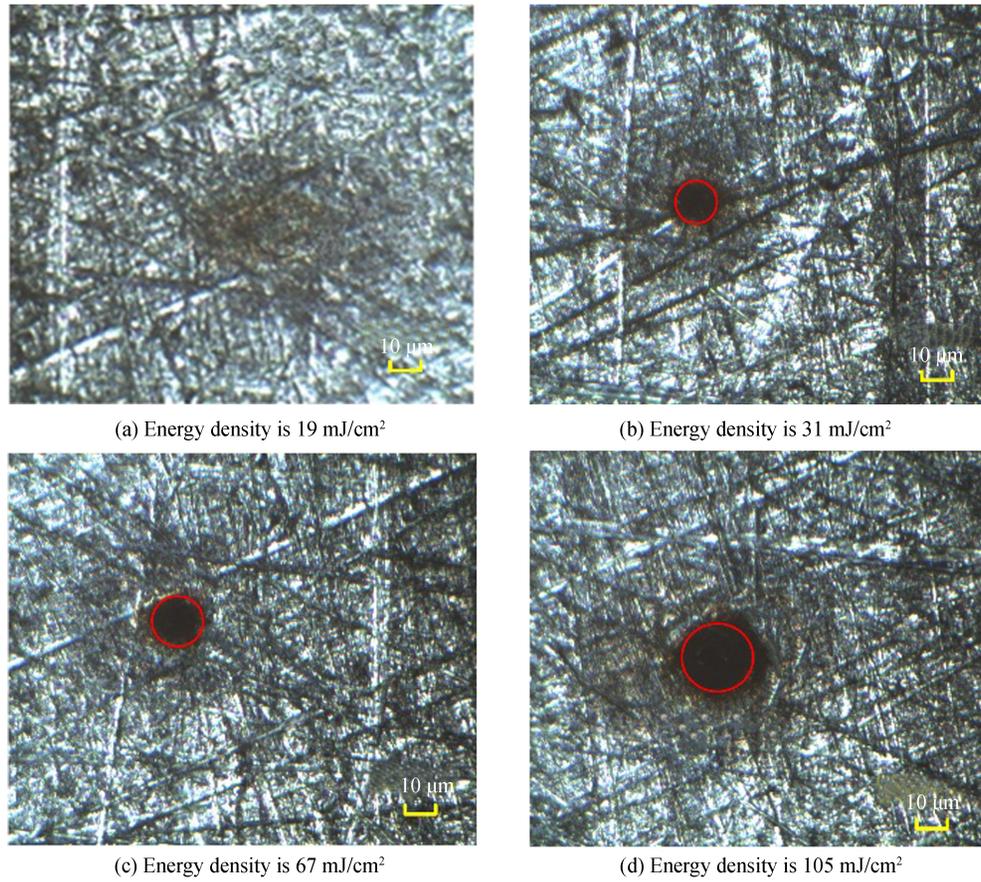


图6 在不同能量密度下的烧蚀圈形貌特征

Fig. 6 Characteristics of ablative ring morphology at different energy densities

依次选择达到齿轮材料熔化温度、气化温度、高于气化温度的能量密度,采用扫描式电子显微镜 FEI Quanta 200 型观测不同能量密度下烧蚀坑口微观形貌.如图 7(a)所示,当能量密度为 31 mJ/cm<sup>2</sup>时,在烧蚀坑口有大块的颗粒形成,较多的熔融物堆积在坑口,并且烧蚀坑的内壁不平整,烧蚀坑附近影响的区域较大,整个烧蚀坑附近的烧蚀形貌较为粗糙;当能量密度达到 67 mJ/cm<sup>2</sup>时,如图 7(b)所示,烧蚀坑口形成的颗粒较少,没有明显的堆积物形成,烧蚀坑内壁的形状较为平整,烧蚀坑附近影响的区域小;当能量密度为 105 mJ/cm<sup>2</sup>时,如图 7(c)所示,烧蚀坑口没有明显的堆积物产生,烧蚀坑附近区域影响的范围更小,并且烧

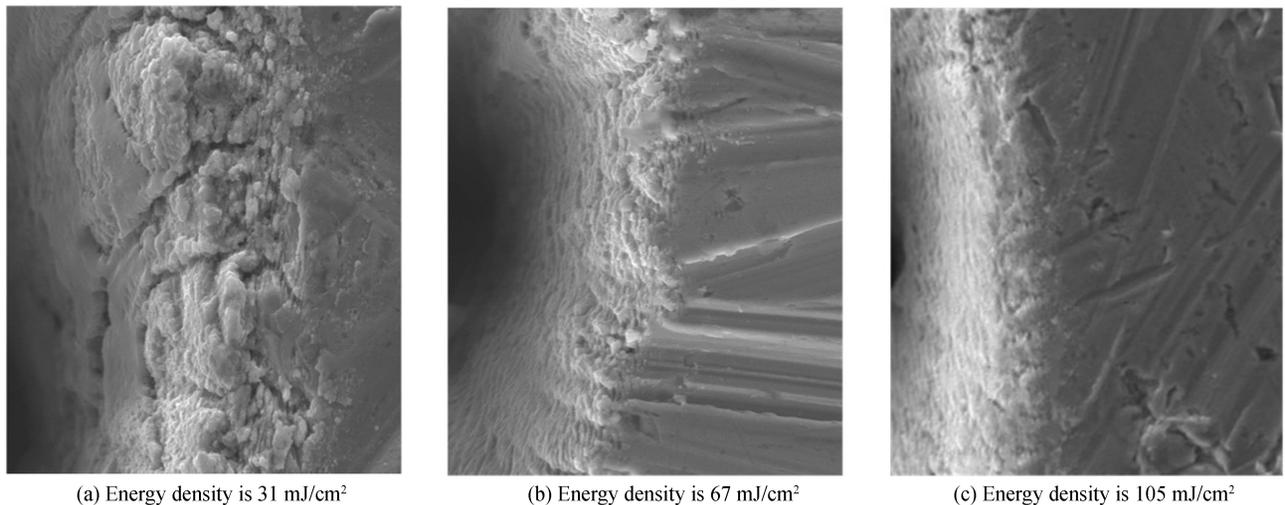


图7 不同能量密度下烧蚀坑口微观形貌

Fig. 7 Micro morphology of ablation pit at different energy densities

蚀坑的内壁更为平整,整个烧蚀坑口附近的烧蚀形貌较为平滑.由上述分析可知,激光输入的能量密度应达到齿轮材料气化温度的能量密度,即能量密度不小于  $67 \text{ mJ/cm}^2$ ,可保证飞秒激光加工过程中,烧蚀附近区域保持良好的形貌特征.

激光能量密度为  $67 \text{ mJ/m}^2$  时的烧蚀凹坑全貌、坑壁坑底形貌分别如图 8(a)、(b) 所示.由图 8(a) 可知,飞秒激光烧蚀作用区域较小,周围有一些机械划痕,烧蚀凹坑相对平整;由图 8(b) 可知,烧蚀凹坑侧壁上没有明显的飞溅物、熔融物等,整个烧蚀凹坑从坑顶到坑底的内圈直径逐渐减小,这是由高斯脉冲能量正态分布造成的,沿坑壁向下能量逐渐减小.

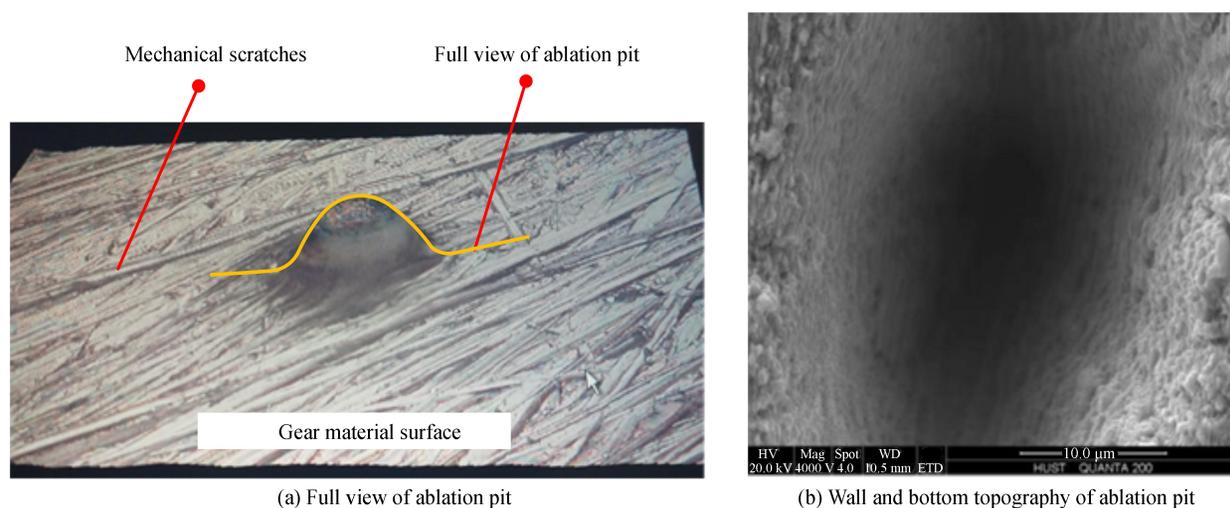


图 8 烧蚀凹坑全貌、坑壁坑底形貌

Fig. 8 Full view, wall and bottom topography of ablation pit

#### 4.3 烧蚀凹坑深度实验分析

为研究不同能量密度对烧蚀凹坑深度的影响,使用三维超景深检测系统 VHX-600 型测量不同能量密度  $I$  下的烧蚀凹坑深度  $H$ ,如图 9 所示,烧蚀凹坑深度值随着激光能量密度的增大而增大,与图 4 仿真结果基本一致.齿轮材料的表面温度达到熔化温度时的烧蚀深度为  $8.72 \text{ nm}$ ,达到临界温度时的烧蚀凹坑深度为  $30.15 \text{ nm}$ ,继续增大激光能量密度会使烧蚀凹坑深度有所增加.

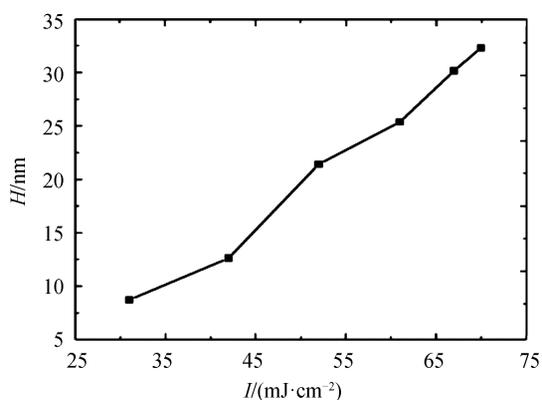


图 9 不同能量密度下的烧蚀凹坑深度

Fig. 9 Ablative pit depths at different energy densities

#### 4.4 烧蚀凹坑附近表面粗糙度实验分析

烧蚀坑附近的表面粗糙度  $R_a$  可以客观反映被测烧蚀材料表面的微观几何特性<sup>[20]</sup>.  $R_a$  越小,表示峰谷的幅度越小、表面越平滑.粗糙度测量仪导线长度为  $0.1 \text{ mm}$ ,测量图 8(a) 中烧蚀凹坑周边区域的粗糙度,结果如图 10 所示.图 10(a) 为没有激光能量作用下齿轮材料的粗糙度,  $R_a$  平均值为  $0.250 \text{ μm}$ ,此时没有烧蚀材料.

图10(b)是在能量密度为 $31\text{ mJ/cm}^2$ 作用下测量的粗糙度, $R_a$ 平均值为 $0.357\text{ }\mu\text{m}$ ,此时齿轮材料表面温度达到了熔化温度,由图中波形可知,齿轮材料坑口的粗糙度值波动较大,主要原因是熔化的熔融物堆积在烧蚀坑周围;图10(c)是在能量密度为 $67\text{ mJ/cm}^2$ 作用下测量的粗糙度, $R_a$ 平均值为 $0.271\text{ }\mu\text{m}$ ,此时齿面温度达到气化温度,在烧蚀坑附近的堆积物较少,能够保持良好的粗糙度;图10(d)是在能量密度为 $105\text{ mJ/cm}^2$ 作用下测量的粗糙度, $R_a$ 平均值为 $0.26\text{ }\mu\text{m}$ ,此时齿面温度远高于气化温度,烧蚀坑附近基本无残留物出现,接近初始状态下的粗糙度值.由可发现,飞秒激光精微加工对材料表面粗糙度的影响小,当激光能量密度达到 $67\text{ mJ/cm}^2$ 后,即齿轮材料的齿面温度大于气化温度时,能够保证齿轮加工表面具有较好的表面粗糙度.

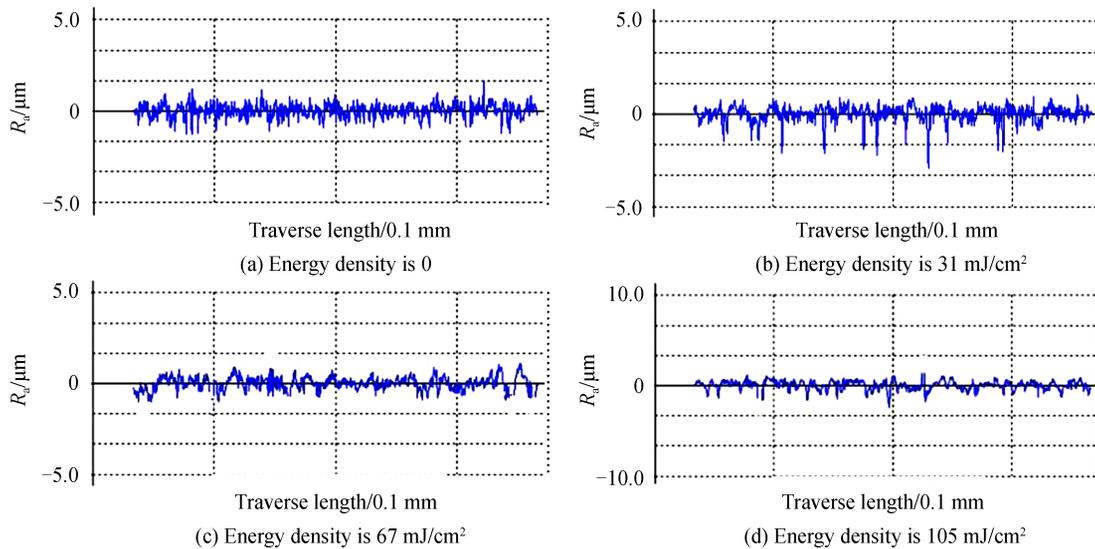


图10 不同能量密度下的表面粗糙度

Fig. 10 Surface roughness at different energy densities

## 5 结论

研究了飞秒激光精微加工螺旋锥齿轮材料20CrMnTi的烧蚀机理,考虑材料动态吸收效应和光子-电子-晶格系统的相互耦合作用,采用双温模型仿真得出烧蚀齿轮材料的临界温度所需要的能量为 $67\text{ mJ/cm}^2$ ,此时单脉冲激光去除材料的厚度为 $30.15\text{ nm}$ ,且随着激光能量密度的增大,齿面温度、烧蚀坑深度等均增大.经过实验验证,当电子与晶格的平衡温度达到材料的气化温度时,材料烧蚀坑的坑口、坑壁等较为平整,能够保持齿面良好的形貌和粗糙度.针对齿轮材料的烧蚀特征,调整合适的能量密度,有效去除齿面加工余量,可为提高螺旋锥齿轮加工质量提供参考.

### 参考文献

- [1] WANG S, ZHOU Y, TANG J, *et al.* An adaptive geometric meshing theory for the face-milled generated spiral bevel gears[J]. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2019, **83**(3): 775-780.
- [2] WANG Zhi-yong, LIU Wei, ZENG Tao, *et al.* On-machine measuring of tooth profile errors for the pinion of spiral bevel gears based on grinding machine[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tools*, 2015 (11): 122-126.  
王志永,刘威,曾韬,等.基于磨齿机的螺旋锥齿轮小轮齿形误差的在机测量[J].制造技术与机床,2015(11): 122-126.
- [3] LI Tian-xing, DENG Xiao-zhong, LI Ju-bo, *et al.* Automatic feedback correction and deviation analysis for tooth surface of spiral bevel and hypoid gear[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, **26**(5): 1194-1200.  
李天兴,邓效忠,李聚波,等.螺旋锥齿轮齿面误差分析与自动反馈修正[J].航空动力学报,2011, **26**(5): 1194-1200.
- [4] LI Tian-xing, DENG Xiao-zhong, ZHOU Guang-cai, *et al.* Application and tooth surface quality inspection of small module bevel gear[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2012, **36**(2): 1-5.  
李天兴,邓效忠,周广才,等.小模数锥齿轮齿面质量检测及应用技术[J].机械传动,2012, **36**(2): 1-5.
- [5] LIANG Zhi-qiang, HUANG Di-qing, ZHOU Tian-feng, *et al.* Simulation and experimental research on grinding surface topography of spiral bevel gear[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, **55**(3): 191-198.  
梁志强,黄迪青,周天丰,等.螺旋伞齿轮磨削表面形貌仿真与试验研究[J].机械工程学报,2019, **55**(3): 191-198.

- [6] WANG Yan-zhong, WU Lin-feng, CHEN Yan-yan, *et al.* Analysis of milling processing residual stress of aviation spiral bevel gear[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2012, **36**(11): 82-85.  
王延忠,吴林峰,陈燕燕,等.航空弧齿锥齿轮铣削加工残余应力分析[J].机械传动,2012,**36**(11):82-85.
- [7] CAO Xiao-wen, ZHANG Lei, YU Yong-sen, *et al.* Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(1): 0102004.  
曹小文,张雷,于永森,等.飞秒激光制备微光学元件及其应用[J].中国激光,2017,**44**(1):0102004.
- [8] NEUENSCHWANDER B, JAEGGI B, ZAVEDEEV E V, *et al.* Heat accumulation effects in laser processing of diamond-like nanocomposite films with bursts of femtosecond pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, **126**(11): 115301.
- [9] MA Yu-ping, ZHANG Yao, WEI Chao, *et al.* Surface polishing of CVD diamond coating by femtosecond laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, **27**(1):164-171.  
马玉平,张遥,魏超,等.飞秒激光抛光CVD金刚石涂层表面[J].光学精密工程,2019,**27**(1):164-171.
- [10] XU Yuan, NING Ren-xia, BAO Jie, *et al.* Mechanism analysis of ablation of metal by femtosecond pulsed laser[J]. *Laser & Infrared*, 2019, **49**(4):432-437.  
许媛,宁仁霞,鲍婕,等.飞秒脉冲激光烧蚀金属的机理分析[J].激光与红外,2019,**49**(4):432-437.
- [11] WU He. Mechanism and numerical simulation of femtosecond laser ablating metals and alloy[D]. Hengyang: University of South China, 2010:2-15.  
吴鹤.飞秒激光烧蚀金属与合金的机理及数值模拟[D].衡阳:南华大学,2010:2-15.
- [12] ZHANG Duan-ming. Kinetic principle of pulsed laser deposition[M]. Beijing: Science Press, 2011.  
张端明.脉冲激光沉积动力学原理[M].北京:科学出版社,2011.
- [13] CAO Ting-ting. Reserch of the hole drilling of K24 superalloy technology by femtosecond laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016:11-20.  
曹婷婷.K24高温合金飞秒激光孔加工技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016:11-20.
- [14] KRÁSA J. Gaussian energy distribution of fast ions emitted by laser-produced plasmas[J]. *Applied Surface Science*, 2013, **272**: 46-49.
- [15] DING Wen-yu, WANG Bang-fu, WANG Zhong-wang. Mechanism and simulation analysis of gold foil ablated by femtosecond laser[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, **47**(6):92-97.  
丁雯钰,汪帮富,王中旺.飞秒激光烧蚀金箔机理及模拟分析[J].机床与液压,2019,**47**(6):92-97.
- [16] SUN Cheng-wei. Laser irradiation effect[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.  
孙承伟.激光辐照效应[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [17] BILLINGS B H, FREDERIKSE H P R. American institute of physics handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [18] WANG Zhen, FU Wen-jing, ZHANG Rong-zhu. Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(7): 0706002.  
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.
- [19] FANG Ran-ran. Dynamics research of high-energy laser ablation of target [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.  
房然然.高能激光烧蚀靶材动力学研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [20] WANG Long, TANG Xiu-jian, WANG Liu-ying, *et al.* Mechanism of grinding-induced burns and cracks in 20CrMnTi steel gear[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, **34**(10): 1143-1150.