

文章编号:1001-5078(2023)01-0041-10

· 激光应用技术 ·

能量耦合模型的飞秒激光烧蚀面齿轮形貌研究

明兴祖^{1,2}, 马玉龙¹, 贾松权¹, 周贤¹, 刘克非¹, 明瑞²

(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: 飞秒激光精微加工面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 是去除材料的先进制造方法。本文依据烧蚀凹坑的深度与宽度和激光能量密度的关系得到材料的烧蚀阈值和影响重叠率的因素。考虑齿轮材料成分间互温感应效应与多脉冲激光累积效应, 建立材料的能量复耦合模型。通过改变激光能量密度和脉冲数, 研究飞秒激光烧蚀凹坑及齿面形貌表面的变化规律, 得出脉冲数对烧蚀效果影响小, 激光能量密度为 1.730 J/cm^2 激光功率为 1.9 W 脉冲数 $N=3000$ 进行烧蚀效果最好可得到最优的实际烧蚀面深度为 $17.604 \mu\text{m}$ 。

关键词: 飞秒激光; 面齿轮; 烧蚀阈值; 重叠率; 形貌特征

中图分类号: 0436; TN249 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.006

Research on surface gear topography of femtosecond laser ablation based on energy coupling model

MING Xing-zu^{1,2}, MA Yu-long¹, JIA Song-quan¹, ZHOU Xian¹, LIU Ke-fei¹, MING Rui²

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

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

Abstract: Femtosecond laser micro-machining of face gear material 18Cr2Ni4WA is an advanced manufacturing method for removing materials. In this paper, according to the relationship between the depth and width of ablation pits and laser energy density, the ablation threshold of materials and the factors affecting the overlap ratio are obtained. Considering the inter-temperature induction effect between gear material components and the accumulation effect of multi-pulse laser, the energy complex coupling model of the material is established. By changing the laser energy density and the number of pulses, the change rule of femtosecond laser ablation pits and tooth surface topography is studied. It is concluded that the number of pulses has little effect on the ablation effect, and the laser energy density is 1.730 J/cm^2 , the laser power is 1.9 W , the pulse number $N=3000$, and the best ablation effect can be obtained, and the optimal actual ablation surface depth is $17.604 \mu\text{m}$.

Keywords: femtosecond laser; surface gear; ablation threshold; overlap ratio; morphology

1 引言

面齿轮广泛应用于航空航天、工程机械、重大装置等高端传动领域。面齿轮的齿型复杂, 技术要求高, 生产难, 国外面齿轮先进制造技术对我国进行封

锁, 国内机械加工精度比国外低 2 级精度左右^[1-2]。

飞秒激光具有的脉冲长度较短、峰值功率高、而且对周围物料的热影响较小, 因此几乎没有在长脉冲激光加工中的等离子体屏蔽效应^[3-4]。微纳级别的材

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51975192); 湖南自然科学基金项目 (No. 2021JJ30215; No. 2021JJ50042);

“机电汽车”湖北省优势特色学科群开放基金资助项目 (No. XKQ2021044; No. XKQ2021050) 资助。

作者简介: 明兴祖 (1964 -), 男, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为激光精微加工理论与技术。E-mail: mxz9036@126.com

通讯作者: 马玉龙 (1995 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光微纳加工技术。E-mail: 18815539350@163.com

收稿日期: 2022-03-01; 修订日期: 2022-04-12

料加工精度可突破衍射限制,对各种材质都能进行超精细加工^[5-6]。因此,飞秒激光与精微加工面齿轮将形成一个完整的精密制造方式^[7]。

目前,飞秒激光加工金属主要是一些单质金属或是成分简单的半导体和合金,对 18Cr2Ni4WA 合金渗碳钢的研究较少。Mannion P T 等人^[8]研究了烧蚀阈值与施加在同一点上的脉冲数之间的关系,并提出了单脉冲和多脉冲之间的孵化系数。Kumar K K 等人^[9]利用 COMSOL 软件建立了二维轴对称模型,研究了 Ti6Al4V 合金的超短激光烧蚀。Lickschat P 等^[10]用超短脉冲激光器研究了不锈钢和硬质合金的烧蚀特性,结果表明较短的激光脉冲提高了烧蚀过程的效率。明瑞等^[11]研究了面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的电子和晶格亚系统的能量耦合作用,利用双温模型,仿真分析了激光脉冲宽度、平均功率对电子温度和晶格温度的影响规律,并通过实验数据分析了脉冲数和平均功率对面齿轮材料微观形貌的影响。

本文以面齿轮材料为研究对象,经理论模型与实验分析结合,研究飞秒激光烧蚀面齿轮材料的烧蚀特性及传热过程,为提高面齿轮加工质量提供技术参考。

2 实验材料及方法

面齿轮材质为 18Cr2Ni4WA 是一种低碳合金渗碳钢,硬度大、弹性好好、淬透性较好,Fe 为主要成分,还含有质量分数为 4.25 % 的 Ni、1.5 % 的 Cr、1.0 % 的 W 等其他化学成分。表 1 为面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的物理参数。

表 1 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of face gear material 18Cr2Ni4WA

Density $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	Boiling point T_b/K	Melting point T_m/K	Material absorptivity β_1
7.91	3134	1724	0.20

实验采用的飞秒激光加工系统如图 1 所示,它主要由飞秒激光器、折射镜、激光扩束器、反射镜、三维(3D)振镜、远心场镜、四轴移动平台、照明系统、CCD 监控管理系统及电脑控制系统等部分组成。三维振镜系统中用 U、V 轴调整激光方向,远心场镜能使不同方向的激光焦点在同一水平面上,W 轴可控制激光焦点在垂直方向上的移动。3D 振镜系统

在垂直方向上调整焦点范围有限,Z 轴有更大的移动范围,可增大系统的加工范围。四轴平台上的移动轴为 X、Y,旋转轴为 A、B,可以分别调节工件的加工位置和加工姿势。该加工系统共有 8 个控制轴,X、Y 轴的运动范围为 400 mm × 250 mm、最大速度 250 mm/s、重复精度 $\pm 1.5 \mu m$;三维测量系统中扫描范围 67 mm × 67 mm、W 轴聚焦范围 $\pm 13.5 mm$;Z 轴旋转范围 200 mm、最大速度 20 mm/s、旋转角度 360°。

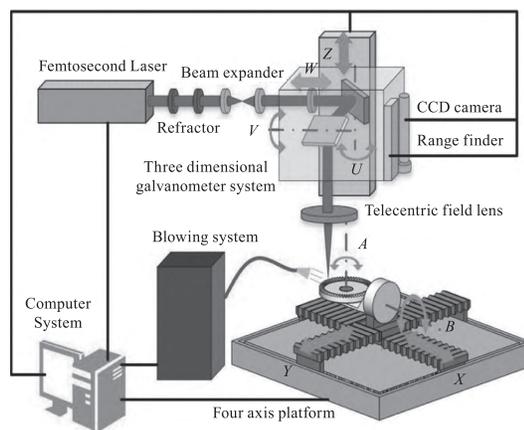


图 1 飞秒激光加工系统图

Fig. 1 Femtosecond laser processing system diagram

采用的激光器为 FemtoYL-100 工业飞秒激光器,此激光器的波长为 1030 nm,最大功率可达到 116.4 W,激光束的质量因子 M^2 为 1.259,脉宽为 300 fs ~ 6 ps,重复频率变化区间为 25 kHz ~ 5000 kHz,实验中的激光参数如表 2 所示。在飞秒激光精微加工面齿轮平面时采用吹气系统以此来清除废屑,减少熔凝物对齿面加工的干扰,提高加工质量。

表 2 飞秒激光烧蚀材料 18Cr2Ni4WA 的实验参数

Tab. 2 Experimental parameters of femtosecond laser ablation material 18Cr2Ni4WA

Wavelength λ/nm	Frequency F_n/kHz	Pulse width T/fs	Spot diameter $\omega_0/\mu m$	Power P/W	Number of pulses $N/pulses$
1030	300	828	20	1.3 ~ 5.5	1 ~ 5000

待飞秒激光加工完成后,对烧蚀形成的扫描线和平面进行检测,检测设备为数字式 3D 视频显微镜 HIROX KH-7700,其实物图如图 2 所示,精度可达 0.001 μm ,最大可放大 7000 倍。按照能量密度从低到高依次对烧蚀线和面分别进行烧蚀后的图像采集,再使用软件合成烧蚀线和面的形貌图,然后测量烧蚀深度和宽度。用 COMSOL 软件对理论模型

进行仿真,得到不同能量密度下的烧蚀线和面的深度和宽度,并与实验结果进行对比和分析。



图2 数字式3D视频显微镜的实物图

Fig. 2 Physical image of a digital 3D video microscope

3 单脉冲飞秒激光烧蚀面齿轮材料特性

激光对材料造成烧蚀的临界能量密度叫做烧蚀阈值,它是由材料本身性质决定的,即飞秒激光对材料具有固定的烧蚀阈值^[12]。飞秒激光脉冲的能量在空间上呈高斯分布,能量密度分布如图3所示。

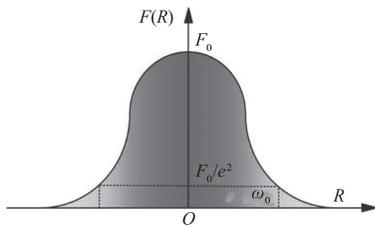


图3 高斯光束的能量密度分布图

Fig. 3 Energy density distribution of gauss beam

光斑截面直径上某处与光斑中心距离为 R 则该处的能量密度 $F(R)$ 可表示为^[13]:

$$F(R) = F_0 \exp\left(-2 \frac{R^2}{\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

式中, F_0 为距离光束中心为 R 处的能量密度,也是光束的最大能量密度 (J/cm^2); ω_0 为束腰半径即能量密度下降至 F_0/e^2 时的光束半径。

对截面各点能量密度积分,可得单脉冲能量 E_p 可表示为:

$$\begin{aligned} E_p &= \int_0^{+\infty} 2\pi F(R) dR \\ &= \int_0^{+\infty} 2\pi F_0 \exp\left(-2 \frac{R^2}{\omega_0^2}\right) dR \\ &= \frac{\pi \omega_0^2}{2} F_0 \end{aligned} \quad (2)$$

激光单脉冲能量 E_p 和平均功率 P 、重复频率 f 的关系为:

$$E_p = \frac{P}{f} \quad (3)$$

F_0 与 P 的关系为:

$$F_0 = \frac{2P}{\pi f \omega_0^2} \quad (4)$$

设烧蚀阈值为 F_{th} , D 为烧蚀直径 ($D = 2R$), 烧蚀边缘处的烧蚀阈值为^[14]:

$$\begin{aligned} F_{th} &= F\left(\frac{D}{2}\right) \\ &= F_0 \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

整理可得:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \left(\frac{\ln F_0}{F_{th}}\right) \quad (6)$$

将(4)、(5)式代入(6)式中,可得:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \left(\ln P + \ln \frac{2}{\pi \omega_0^2 f_n F_{th}}\right) \quad (7)$$

由(7)式可以发现烧蚀凹坑的孔径的平方即 D^2 与 $\ln P$ 存在线性函数关联,斜率为 $2\omega_0^2$ 。使用 DMM-300C 型光学显微镜测量飞秒激光在不同功率 P 下烧蚀得到的凹坑孔径 D 的散点图,如图4所示,关系式为 $D^2 = 1071 \ln P - 2304.1$ 。

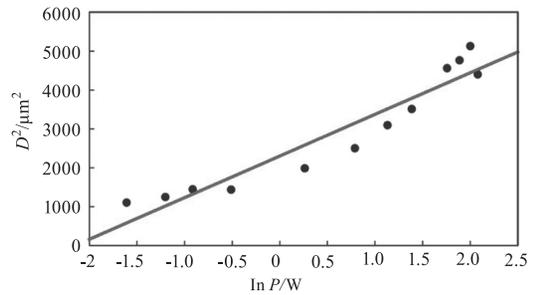


图4 D^2 与 $\ln P$ 的拟合曲线图

Fig. 4 D^2 and $\ln P$ curve fitting

当凹坑直径无限趋近于 $0 \mu\text{m}$ 时,即 $F_{th} = F_0 = 2P/(\pi \omega_0^2 f_n)$, 光斑中心的能量密度就是材料的烧蚀阈值。令 $D = 0 \mu\text{m}$, 则可以得到材料 18Cr2Ni4WA 的烧蚀阈值 $F_{th} = 0.1383 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。

4 多脉冲飞秒激光烧蚀面齿轮材料的能量复耦合模型及仿真

4.1 多脉冲激光累积效应

能源累积效应是指前一个脉冲激光作用于材料结束后大部分热能被材料本身吸收传递并累积在材料里面,少部分损失于外在环境中^[15]。多脉冲激光在进行加工时能量累积效应使得低能量密度区域的能量密度随脉冲数不断累积从而达到烧蚀阈值来达到烧蚀效果。脉冲能量累积效应如图5所示。

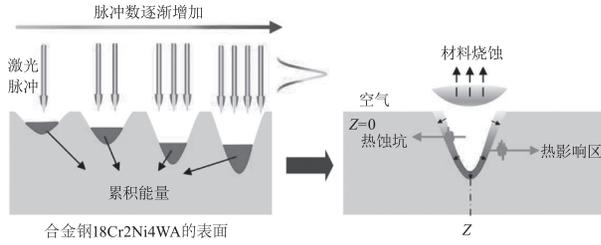


图5 脉冲能量累积效应

Fig. 5 Pulse energy accumulation effect

设 n 为面齿轮材料的累积系数,表示能量累积效应的程度, $n > 1$ 时才会有能量累积效应。飞秒激光脉冲的间隔时间越久,能量累积效应越弱^[16]。为了达到 n 的相对稳定必须在加工时保持脉冲频率不变。材料内部距离材料表面 S 处、第 M 个激光脉冲后的能量密度可表示为:

$$Q_T = b\beta F(R)\exp(-bS)M^{1-n} \quad (8)$$

4.2 多脉冲激光材料成分间互温感应效应

材料成分间互温感应对晶格的作用时间会比较长^[17],因此在进行飞秒精微加工面齿轮时需要考虑材料成分间互温感应的影晌。

齿轮材料中主要各化学成分 Fe、Ni 与 Cr 间经互温感应后,达到平衡态的能量吸收密度 E_g 可表示为:

$$E_g = \sum_{i=A}^C V_0 M_i X_i \beta_i \quad (9)$$

式中, V_0 为材料单位质量的材料吸收的能量; M_i 为第 i 种成分质量; X_i 为第 i 种成分比例; β_i 为第 i 种成分的吸收率; A 为碳(C)基成分; B 为铬(Cr)基成分; C 为镍(Ni)基成分。

将多脉冲激光累积效应(8)和能量吸收模型(9)与双温模型方程相结合^[18],描述飞秒激光与材料成分相互作用的能量复耦合模型表示为:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - g(T_e - T_i) + S(x, t) \quad (10)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = g(T_e - T_i) - E_g \quad (11)$$

式中, T_e 、 C_e 依次为电子温度与电子单位体积的比热容; T_i 、 C_i 依次为晶格温度与晶格单位体积的比热容; k_e 为电子热导率; g 为电子与晶格的耦合系数,表示电子与晶格内部能量相互转换的特征参数; $S(x, t)$ 为激光脉冲相对应的热源项; x 为垂直于材料表面方向距离。

公式(10)表示的是电子与电子之间的能量传递的热传导项,公式(11)表示的是电子与晶格之间的能量传递。

在进行多脉冲激光加工时必涉及到重叠率的问题,重叠率的公式为:

$$\phi = 1 - \frac{\nu}{df} \quad (12)$$

式中, ϕ 为脉冲光斑重叠率; d 为光斑直径; f 为扫描频率; ν 为激光扫描速度。(12)式用以估算脉冲光斑重叠率^[19]。光斑直径是一个常数,通过控制变量法随着速度的增加脉冲光斑重叠率会降低,脉冲光斑重叠率会随着扫描频率增加而增大。图6为面齿轮材料加工不同位置处的光斑重叠率图。

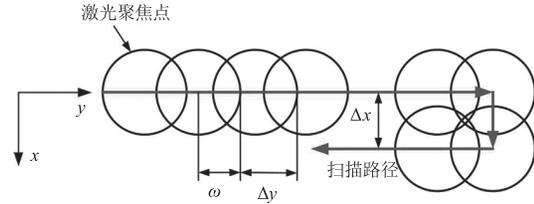


图6 光斑重叠率图

Fig. 6 Plot of spot overlap rate

重叠率的表达式为:

$$z\phi = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \quad (13)$$

$$\omega_z = \omega_0 \left(1 + \frac{z^2}{z_\phi^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\phi = \frac{\pi\omega_z^2 \arccos \frac{d}{2\omega_z} \cdot \sqrt{\omega_z^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{180 \pi\omega_z^2} \quad (15)$$

(13)、(14)、(15)式中: z 为离焦量; ϕ 为重叠率; ω_0 为聚焦光斑半径; λ 为入射等光波长; ω_z 为离焦处的光斑半径。

4.3 仿真分析

用 COMSOL 求解方程,飞秒激光脉冲宽度为 288 fs,时间差分步长为 1 fs,间距选择 0.5 mm,初始温度为 300 K,烧蚀后后面齿轮材料底层的电子温度与晶格温度均为 300 K。结合表 3 的仿真参数^[20-23],对方程(8)、(9)、(10)、(11)进行求解。

模型网格的划分为模型工件的厚度和宽度分别为 80 μm 和 20 μm ,横向、纵向分别记为 A 和 B 。入射激光光斑中心处时 $A = B = 0$ 。选用自由三角形网格,最大单元大小为 0.5 μm ,最小大小为 10^{-4} μm ,最大单元增长率为 1.3,曲率因子 0.3,狭窄区域分辨率为 1。

表3 仿真参数

Tab.3 Simulation parameters

name	numerical value
Electronic heat capacity $C_e/(J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3})$	760.4
Lattice heat capacity $C_l/(J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3})$	3.5×10^6
Melting temperature T_m/K	1724
Evaporation temperature T_n/K	3023
Laser transmission speed $c/(m \cdot s^{-1})$	3.8×10^8
Laser wavelength λ_0/m	1.03×10^{-6}
Absorption factor $\alpha/(m^{-1})$	7.1×10^7
Material conductivity $\sigma_0/(\Omega^{-1}/m)$	1×10^7
Material density $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	7.91×10^3
Pulsewidth τ/s	300×10^{-15}
Thermal conductivity k	78.4
Vacuum dielectric constant $\epsilon_0/(F \cdot m^{-1})$	8.85×10^{-12}
Fermi temperature T_f/K	1.28×10^5
Reflectivity R	0.51

利用 COMSOL 软件对能量耦合模型进行求解仿真,在图 7 中,表示激光能量密度为 0.320 J/cm²、1.730 J/cm²、3.845 J/cm² 和 5.255 J/cm²,脉宽为 828 fs,激光光斑半径为 20 μm 时齿轮表面的电子和晶格在持续 30 ps 时间内的温度演变过程,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(实线)急剧升高达到峰值远大于晶格温度,电子和晶格温度在 10 ps 时间后达到平衡使用 0.320 至 5.255 J/cm² 范围内的激光能量密度进行仿真研究。随着激光能量密度的增加,电子温度上升得最大值也随之增加,同时达到平衡后的电子温度升高,以及达到平衡态需要的弛豫时间也变得更长。

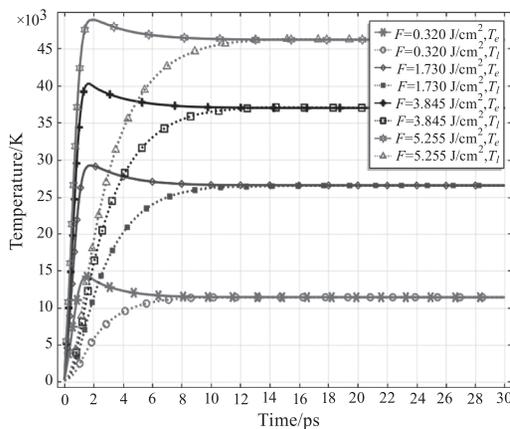
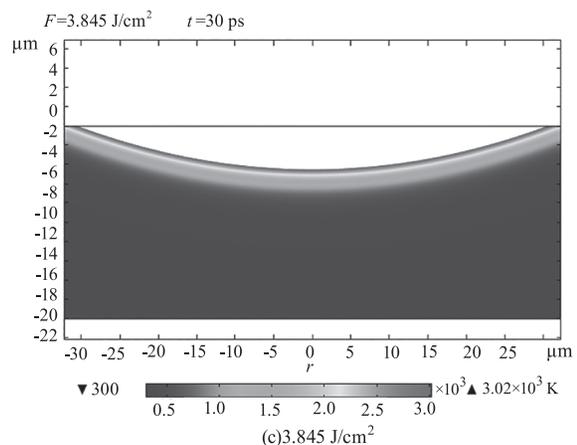
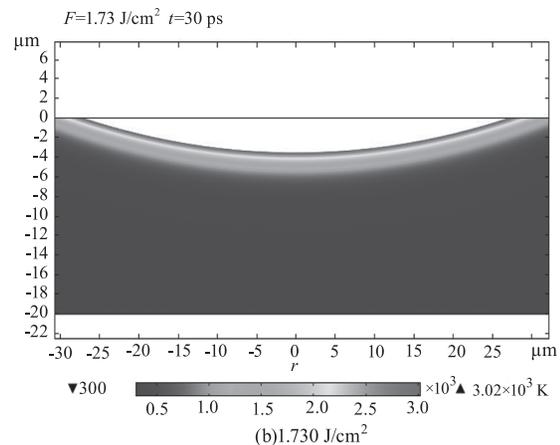
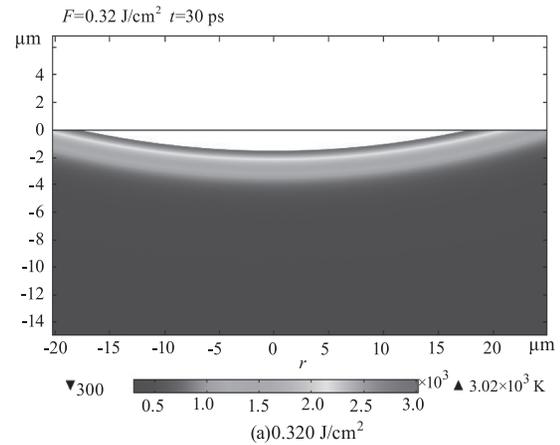


图7 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的电子和晶格温度变化过程

Fig.7 Electronic and lattice temperature changes of face gear material 18Cr2Ni4WA

图 8 表示为单脉冲 0.320 J/cm² 至 5.255 J/cm² 范围内不同能量密度仿真面齿轮材料 18Cr2Ni4Wa 的烧蚀凹坑图。由图可知单脉冲随着能量密度的不断增加,烧蚀凹坑的深度与宽度都有明显的增加。烧蚀深度在 2.5 ~ 10 μm 范围之间,烧蚀宽度在 35 ~ 60 μm 范围之内。再次证明飞秒激光的烧蚀效果只发生在材料的表面,不会对材料内部产生明显的影响,因此能够完成面齿轮材料的精微加工。



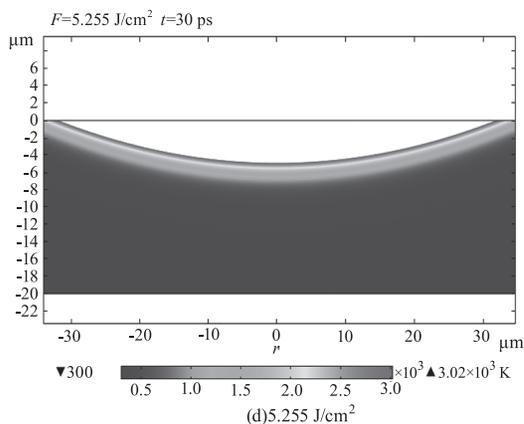


图 8 单脉冲不同能量密度下的凹坑仿真图

Fig. 8 Pit simulation diagram of single pulse under different energy density

如图 9 所示脉冲数 $N = 30$ 在能量密度为 0.320 J/cm^2 和 5.255 J/cm^2 下面齿轮材料 $18\text{Cr}2\text{Ni}4\text{W}a$ 的烧蚀凹坑仿真图。图中可以发现能量密度的增大会使凹坑形貌的深度和宽度都有相应增加。

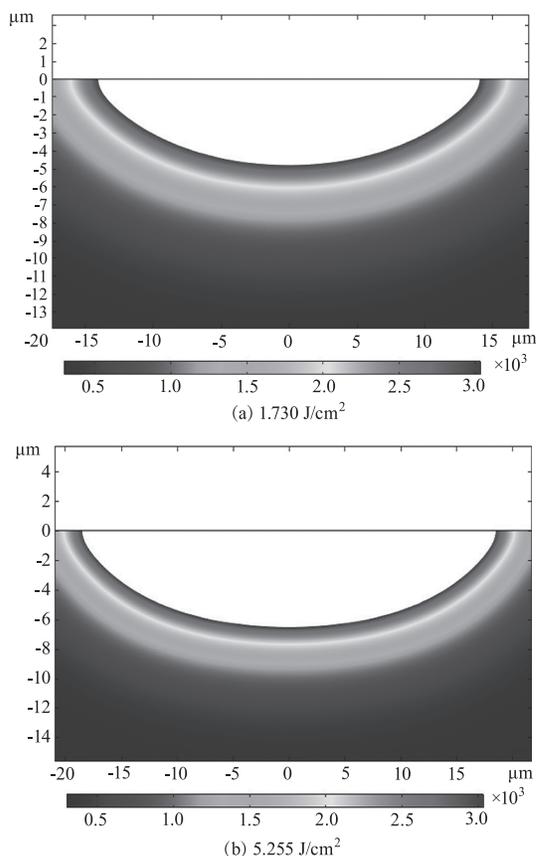


图 9 脉冲数 $N = 30$ 下不同能量密度下的凹坑仿真图

Fig. 9 Simulation of pits under different energy density with pulse number $N = 30$

5 实验结果分析

分别在能量密度为 0.320 J/cm^2 、 1.730 J/cm^2 、 3.845 J/cm^2 和 5.255 J/cm^2 的情况下,用脉冲数 N

$= 30, 500, 1000, 3000, 5000$ 的多脉冲飞秒激光烧蚀齿轮材料。当能量密度达到烧蚀阈值时,材料温度到达气化温度材料直接气化;能量密度低于烧蚀阈值时,材料温度低于气化温度但达到融化温度材料会熔化为液态,若能量密度持续降低则材料仍为固态。

图 10 为不同能量密度单脉冲飞秒激光烧蚀形成的图貌,由图可发现残留物主要留在烧蚀凹坑底部。能量密度增大时残留的材料会形成条纹结构,继续增大能量密度会使得亚稳态材料增加气态和液态材料会混合,残留的液态残渣在凹坑底部形成孔洞结构。

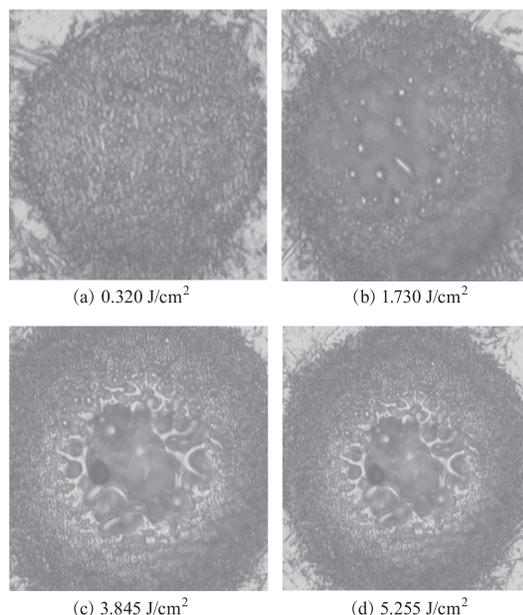


图 10 不同能量密度单脉冲飞秒激光烧蚀形成的图貌

Fig. 10 Morphology of ablation by a single-pulse femtosecond laser with different energy densities

在多脉冲飞秒激光加工中液态材料容易凝固形成凸起结构是由于气化材料未能将液态材料推离凹坑;能量累积效应会使得凹坑表面材料发生二次烧蚀从而在凹坑表面形成较小的凸起结构;凸起结构会影响并阻碍后续材料的烧蚀情况,如图 11 所示。

从文献[24]中可知在能量密度增大时会影响烧蚀效果,故此选用能量密度为 1.730 J/cm^2 功率为 1.9 W 进行实验验证,脉冲数选用 $N = 30, 500, 1000, 3000, 5000$ 观察烧蚀凹坑的情况,如图 12 所示。烧蚀深度依次为 $6.680 \mu\text{m}$ 、 $10.000 \mu\text{m}$ 、 $9.885 \mu\text{m}$ 、 $11.547 \mu\text{m}$ 、 $9.841 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出 $N = 3000$ 时具有最好的烧蚀效果且脉冲数的不断增加对烧蚀凹坑的深度不会产生很大的影响。

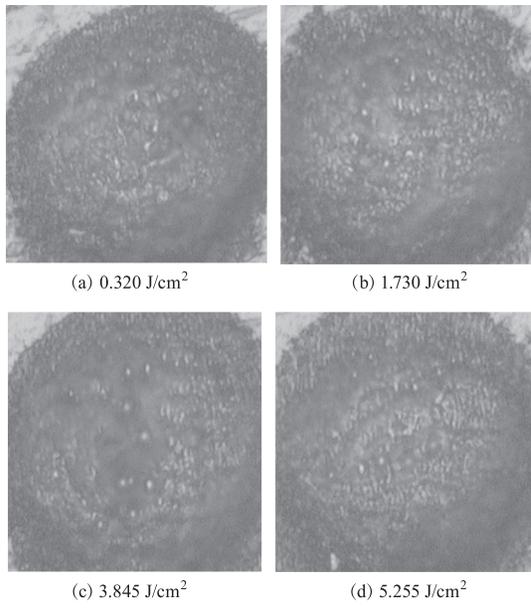


图 11 不同能量密度多脉冲飞秒激光烧蚀形成的图貌

Fig.11 Multi-pulse femtosecond laser ablation with different energy densities

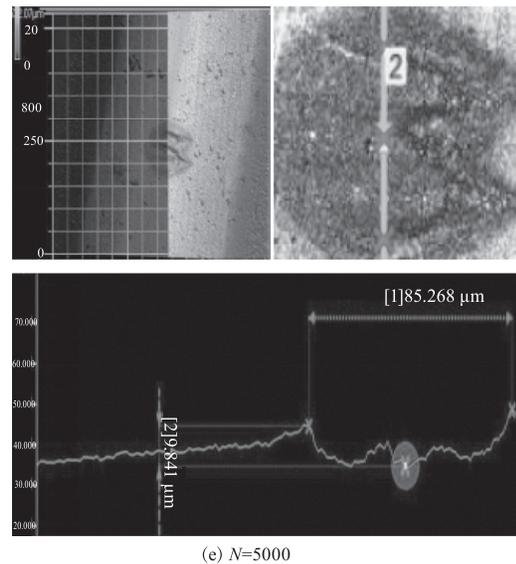
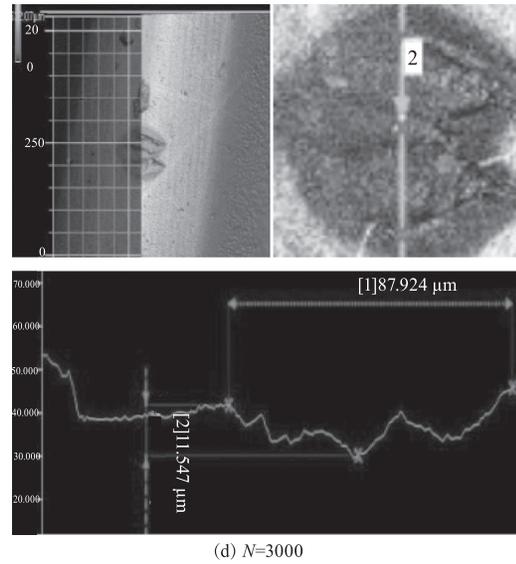
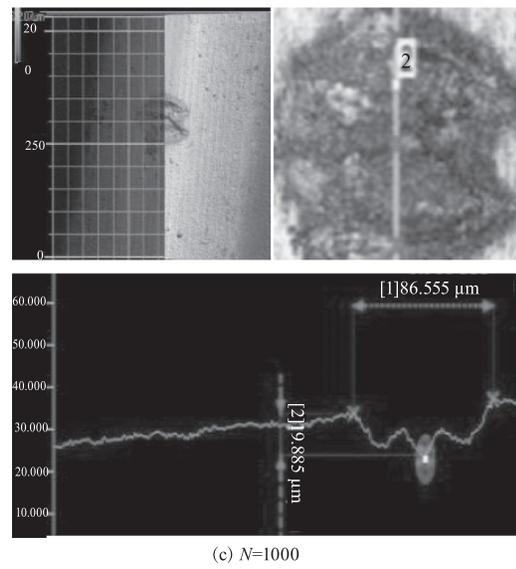
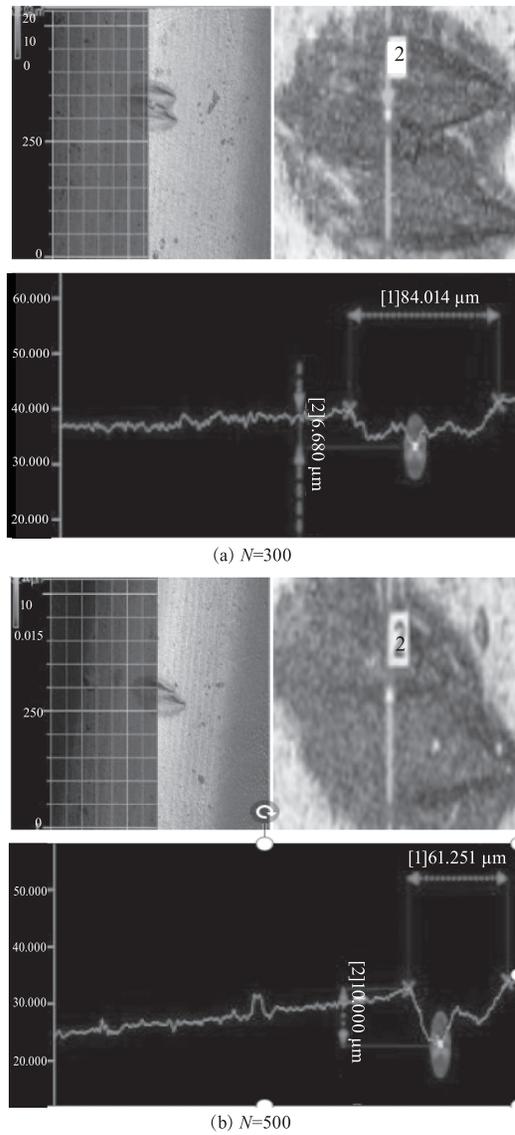


图 12 不同脉冲数的三维超景深显微图像

Fig.12 Three-dimensional ultra-depth-of-field microscopic images with different number of pulses

多脉冲飞秒激光在不同能量密度下的加工面齿轮烧蚀面的形貌图,使用脉冲数为 $N = 3000$ 时观察能量密度分别从 0.320 J/cm^2 、 1.730 J/cm^2 、 3.845 J/cm^2 、 4.550 J/cm^2 、 5.255 J/cm^2 烧蚀面的深度变化情况,如图 13 所示。从图中可以得出随着能量密度的不断增加,烧蚀面的深度也在相应的变深。考虑实际加工时的需要选择能量密度为 1.730 J/cm^2 ,实际烧蚀面深度为 $17.604 \mu\text{m}$ 作为最优参数。

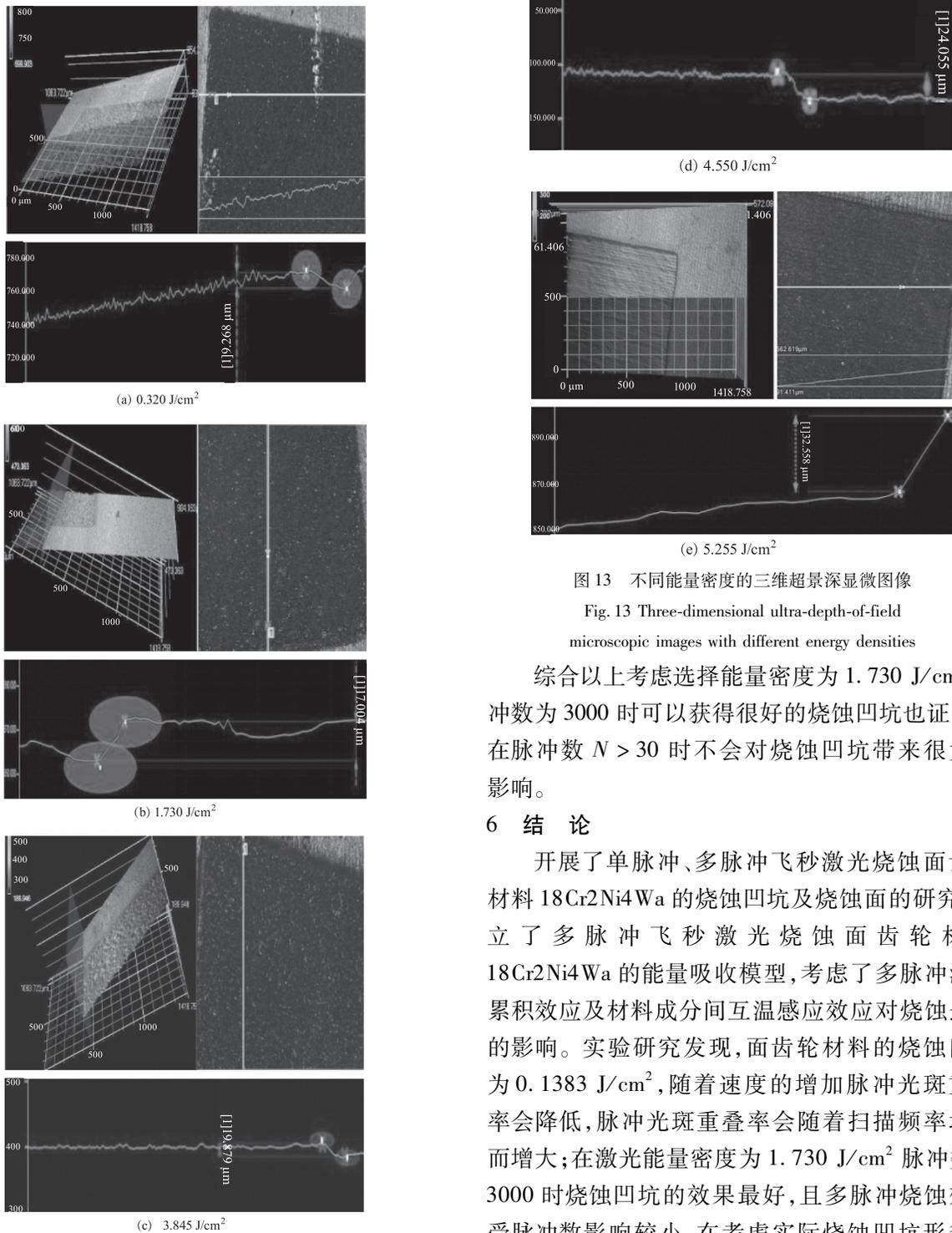


图 13 不同能量密度的三维超景深显微图像

Fig. 13 Three-dimensional ultra-depth-of-field microscopic images with different energy densities

综合以上考虑选择能量密度为 1.730 J/cm^2 脉冲数为 3000 时可以获得很好的烧蚀凹坑也证明了在脉冲数 $N > 30$ 时不会对烧蚀凹坑带来很大的影响。

6 结论

开展了单脉冲、多脉冲飞秒激光烧蚀面齿轮材料 18Cr2Ni4W_a 的烧蚀凹坑及烧蚀面的研究,建立了多脉冲飞秒激光烧蚀面齿轮材料 18Cr2Ni4W_a 的能量吸收模型,考虑了多脉冲激光累积效应及材料成分间互温感应效应对烧蚀过程的影响。实验研究发现,面齿轮材料的烧蚀阈值为 0.1383 J/cm^2 ,随着速度的增加脉冲光斑重叠率会降低,脉冲光斑重叠率会随着扫描频率增加而增大;在激光能量密度为 1.730 J/cm^2 脉冲数为 3000 时烧蚀凹坑的效果最好,且多脉冲烧蚀效果受脉冲数影响较小,在考虑实际烧蚀凹坑形貌的

情况下,进行低能量密度烧蚀效果会很好,选用激光能量密度为 1.730 J/cm^2 激光功率为 1.9 W 进行烧蚀效果最好。

参考文献:

- [1] Vorobyev A Y, Guo C L. Femtosecond laser nanostructuring of metals[J]//Optics Express,2006,14(6):2164-2169.
- [2] Ming X Z, Gao Q, Yan H, et al. Mathematical modeling and machining parameter optimization for the surface roughness of face gear grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9-12):2453-2460.
- [3] Wu Xuefeng, Yin Hailiang, Li Qiang. Experimental study on femtosecond laser processing of nanotube films[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9):0902002. (in Chinese)
吴雪峰,尹海亮,李强.飞秒激光加工纳米管薄膜试验研究[J].中国激光,2019,46(9):0902002.
- [4] Zhu Xiaonong, Bao Wenxia. Some basic knowledge of ultrashort pulse laser and its related applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12):1200001. (in Chinese)
朱晓农,包文霞.超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识[J].中国激光,2019,46(12):1200001.
- [5] Cui Ziquan, Guan Yingchun. Research progress on main numerical models of ultrafast laser processing process[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11):111408. (in Chinese)
催智铨,管迎春.超快激光加工过程主要数值模型研究进展[J].激光与光电子学进展,2020,57(11):111408.
- [6] Cheng J, Liu C S, Shang S, et al. A review of ultrafast laser materials micromachining[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 46:88-102.
- [7] Weck A, Crawford T H R, wilkinson D S, et al. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses[J]. Applied Physics A, 2008, 90(3):537-543.
- [8] Mannion P T, Magee J, Coyne E, et al. The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air[J]. Applied Surface Science, 2004, 233(1-4):275-287.
- [9] Kumar K K, Samuel G L, Shunmugam M S. Theoretical and experimental investigations of ultra-short pulse laser interaction on Ti6Al4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263:266-275.
- [10] Lickschat P, Schile J, Mueller M, et al. Comparative study on microstructure of picosecond laser pulse and femtosecond laser pulse[C]//International Conference on Laser and Electro-optic Applications (American Laser Research Institute), 2012:1261-1268.
- [11] Ming Rui, Shen Jingwei, Lai Mingtao, et al. Research on micro-precision ablation characteristics of femtosecond laser for face gear material 18Cr2Ni4WA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9):0914001. (in Chinese)
明瑞,申警卫,赖名涛,等.面齿轮材料的飞秒激光精微烧蚀特性研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(9):0914001.
- [12] Yang Qibiao, Zhang Hong, Zhou Wei, et al. Surface incubation effect of carbide YG6 induced by femtosecond laser[J]. Acta Photonica, 2019, 48(6):76-82. (in Chinese)
杨奇彪,张弘,周维.飞秒激光诱导硬质合金 YG6 表面累积效应[J].光子学报,2019,48(6):76-82.
- [13] Huang Kai. Study on the interaction process and microstructure processing between nanosecond laser and metal materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
黄楷.纳秒激光与金属材料相互作用过程及微结构加工研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [14] Jin Tianye, Chen Junyun, Wang Jinhu, et al. Femtosecond laser material removal mechanism of nano-twin cubic boron nitride[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9):198-205. (in Chinese)
靳田野,陈俊云,王金虎,等.纳米孪晶立方氮化硼的飞秒激光材料去除机理[J].机械工程学报,2019,55(9):198-205.
- [15] Shao Junfeng, Guo Jin, Wang Tingfeng. Theoretical study on the interaction process between femtosecond laser and silicon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8):2419-2424. (in Chinese)
邵俊峰,郭劲,王挺峰.飞秒激光与硅的相互作用过程理论研究[J].红外与激光工程,2014,43(8):2419-2424.
- [16] 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.
- [17] Ihlemann J, Wolff B, Simon P. Nanosecond and femtosecond excimer laser ablation of fused silica [J]. *Applied Physics A*, 1992, 54(4): 363 – 368.
- [18] Li Jian, Ji Lingfei, Hu Yan, et al. Experimental study on 532 nm laser milling of Y-TZP ceramics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 211 – 217. (in Chinese)
李健, 季凌飞, 胡炎, 等. 532 nm 激光铣削 Y-TZP 陶瓷实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 211 – 217.
- [19] Sun Chengwei. Laser irradiation effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [20] Billings B H, Frederikse H P R. American institute of physics handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [21] Wang Zhen, Fu Wenjing, Zhang Rongzhu. Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0706002.
- [22] Fang Ranran. Study on the dynamics of target ablation by high energy laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [23] Lin Jiajian, Ming Rui, Li Xuekun, et al. Study on morphological characteristics of gear materials ablated by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 175 – 185. (in Chinese)
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): 175 – 185.