

## 激光与光电子学进展

面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的飞秒激光  
精微烧蚀特性研究明瑞<sup>1</sup>, 申警卫<sup>1</sup>, 赖名涛<sup>1</sup>, 马玉龙<sup>2</sup>, 周贤<sup>2</sup>, 明兴祖<sup>2,1\*</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** 飞秒激光精微烧蚀是一种新型的精密加工方法。本文研究了飞秒激光烧蚀面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的电子亚系统和晶格亚系统的能量耦合作用, 建立了双温模型, 采用有限差分法分析了脉冲宽度、平均功率对电子温度和晶格温度的影响规律。结果表明: 当电子与晶格达到热平衡, 且电子温度和晶格温度超过材料的熔点时, 齿面产生烧蚀; 当电子和晶格的温度均高于材料的沸点和相爆炸温度时, 主要通过相爆炸实现材料的去除; 材料烧蚀深度一般为 40 nm 左右, 避免了热效应对表层质量的影响。采用飞秒激光微加工系统进行实验研究, 得出了能量密度呈高斯分布的飞秒激光烧蚀材料 18Cr2Ni4WA 的单脉冲烧蚀阈值为 0.29 J/cm<sup>2</sup>; 分析了平均功率和脉冲数对烧蚀形貌的影响。通过研究飞秒激光精微加工材料 18Cr2Ni4WA 的烧蚀特性, 为提高面齿轮的加工质量提供了技术基础。

**关键词** 激光技术; 飞秒激光; 面齿轮; 双温模型; 烧蚀特性; 烧蚀阈值

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0914001

Characteristics of Femtosecond Laser Microprecision Ablation of  
18Cr2Ni4WA Steel Used in Face GearsMing Rui<sup>1</sup>, Shen Jingwei<sup>1</sup>, Lai Mingtao<sup>1</sup>, Ma Yulong<sup>2</sup>, Zhou Xian<sup>2</sup>, Ming Xingzu<sup>2,1\*</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 Sciences, Xiangyang, Hubei 441053, China

**Abstract** Femtosecond laser micro-ablation is a new high-precision processing method. In this study, the ablation characteristics of a face gear material (18Cr2Ni4WA steel) were studied. The energy coupling effect of the electronic and lattice subsystems of the ablated 18Cr2Ni4WA steel was investigated. In addition, a two-temperature model was established, and the effects of pulse width and average power on electron and lattice temperature were simulated using the finite difference method. Results reveal that when thermal equilibrium between electron and lattice is reached and the electron and lattice temperatures exceed the melting point of the material, the tooth surface is ablated; furthermore, when the electron and lattice temperatures are higher than the material boiling and phase explosion temperature, the material removal is mainly achieved by phase explosion. The material ablation depth is generally taken as ~40 nm to prevent the thermal effects on surface quality. The single-pulse ablation threshold of the 18Cr2Ni4WA steel ablated by a Gaussian distributed femtosecond laser using

收稿日期: 2020-07-18; 修回日期: 2020-09-02; 录用日期: 2020-09-22

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)

\*E-mail: mxz9036@126.com

the femtosecond laser microprocessing system was  $0.29 \text{ J/cm}^2$ . The effects of average power and pulse number on the ablative morphology of the material were analyzed. The ablation characteristics of the 18Cr2Ni4WA steel microprocessed by a femtosecond laser in this study provide a technical basis for improving the processing quality of face gears.

**Key words** laser technique; femtosecond laser; face gear; two-temperature model; ablation characteristics; ablation threshold

**OCIS codes** 140.3390; 140.3440; 140.6810; 160.3900

## 1 引言

近年来,航空航天领域的传动越来越朝着轻量化方向发展,面齿轮传动的优势越来越显著。面齿轮的齿形复杂,技术要求高,制造困难,国外面齿轮高精度加工机床和精密加工技术对我国实行封锁,而国内传统机械加工的面齿轮加工精度比国外低两级左右<sup>[1]</sup>,亟待开发新的面齿轮加工方式。飞秒激光加工具有峰值功率高,加工区域精确,可精密加工任何材料等突出特点,加工精度可达微米甚至纳米级别<sup>[2]</sup>,这使得飞秒激光精微加工面齿轮将成为一种全新的精密制造方式。

飞秒激光的持续时间仅为  $10^{-15} \text{ s}$  量级,极短的脉冲宽度和极高的峰值功率使得飞秒激光辐照材料时,材料中的电子瞬间被加热到较高的温度,而传热时间短,有效降低了热扩散对加工精度的影响<sup>[3]</sup>。曾振鹏等<sup>[4]</sup>研究了激光表面处理对 18Cr2Ni4WA 钢组织和性能的影响,结果发现,该钢经激光处理后,含碳量增加,有效提高了表面硬度。Cheng 等<sup>[5]</sup>采用飞秒激光脉冲对钛合金、铜等材料进行加工,研究了激光参数对材料加工性能的影响,结果表明,激光脉冲累积效应有助于降低材料的表面粗糙度,从而提高表面加工质量。王锋等<sup>[6]</sup>设计了一种三光楔扫描的飞秒激光加工装置,然后利用该装置加工出了柴油机喷油嘴倒锥孔,孔的加工质量较高,验证了飞秒激光能够实现高精细加工。张伟等<sup>[7]</sup>开展了飞秒激光烧蚀镍基合金材料的实验,分析了材料的表面损伤形态、侧壁加工形貌和损伤阈值,结果发现镍基合金经飞秒激光烧蚀后呈现出非热熔性损伤和热熔性损伤两种损伤机制,从而建立了镍基合金的损伤机制以及损伤阈值与能量密度、脉冲个数的定量关系,这对于加工出高质量的镍基航空器件具有实际指导意义。杨奇彪等<sup>[8]</sup>利用损伤直径推导出了飞秒激光对硬质合金 YG6 的单脉冲损伤阈值和累积系数,为飞秒激光制备硬质合金刀具提供了理论和实验基础。

本文以面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 为研究对象,从理论模型和实验分析的角度,研究飞秒激光烧蚀齿轮材料的传热模型与烧蚀特性,为高质、有效实现飞秒激光精微加工面齿轮提供技术参考。

## 2 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的双温模型

飞秒激光烧蚀金属时,金属的电子首先被加热至接近或超过费米温度,而晶格的温度几乎未变。此时,电子温度下的热传导率和热容等热物理参数不能再用常数量来表示,需要将电子温度和晶格温度分开考虑<sup>[9]</sup>。双温模型的方程为

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = k_e \frac{\partial^2 T_e}{\partial x^2} - g(T_e - T_i) + S(x, t), \quad (1)$$

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

式中:  $T_e$  和  $T_i$  分别为电子亚系统和晶格亚系统的温度;  $C_e$  和  $C_i$  分别为电子和晶格的比热容;  $k_e$  为电子热导率;  $g$  为材料的电声耦合系数;  $S(x, t)$  为激光的热源项;  $x$  为垂直于材料表面方向的距离;  $t$  为时间。

(1)式描述了电子亚系统的温度随时间和空间的变化规律,其中:等式右边第一项为电子热传导项,表示轴方向上有温度差;第二项为能量耦合项,表示电子与晶格之间的能量耦合;第三项为激光热源项,表示电子亚系统所吸收的激光能量。(2)式描述了晶格亚系统的温度随时间和空间变化的规律,在电声耦合作用下,电子亚系统将能量传给晶格亚系统,两个亚系统达到热平衡。

电子热导率  $k_e$  一般被认为是常数<sup>[10]</sup>。实际上,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

$$k_e = k \frac{(\mu_e^2 + 0.16)^{5/4} (\mu_e^2 + 0.44) \mu_e}{(\mu_e^2 + 0.092)^{1/2} (\mu_e^2 + b\mu_i)}, \quad (3)$$

式中:  $k$  为材料的热导率;  $b$  为材料中电子的热导率;  $\mu_e = T_e/T_i$ ,  $\mu_i = T_i/T_F$ ,  $T_F$  为材料的费米温度。

飞秒激光光源为高斯光束,热源项可表示为

$$S = (1 - R)\alpha I(t)\exp(-\alpha x), \quad (4)$$

式中:  $R$  为反射率;  $\alpha$  为材料的吸收系数;  $I(t)$  为激光束在时间域上的分布函数。因为采用的入射激光为高斯光源, 故  $I(t)$  可以表示为

$$I(t) = \frac{I_0}{\tau\sqrt{\pi/(4\ln 2)}} \exp\left[-4\ln 2 \cdot \frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right], \quad (5)$$

式中:  $I_0$  为入射激光能量的最大值, 位于高斯型脉冲的中心处;  $t_0$  为脉冲初始时刻;  $\tau$  为激光脉宽。  $I_0$  与激

光能流密度  $E_p$  之间的关系为

$$I_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}, \quad (6)$$

式中:  $\omega_0$  为束腰半径。激光束进入材料后遵循朗伯-比尔定律, 光束在材料内部穿行过程中, 由于被加工材料对激光的吸收, 光束的强度以指数衰减<sup>[11]</sup>。高斯分布的激光入射到距材料表面  $x$  深处的热源项可以表示为

$$S(x, t) = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2\sqrt{\pi/(4\ln 2)}} \frac{(1-R)}{\tau} \alpha \exp\left[-4\ln 2 \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \alpha x\right]. \quad (7)$$

### 3 有限差分法仿真分析

采用有限差分法通过 MATLAB 软件编写程序代码求解双温方程 (1)、(2), 选择无条件稳定的向后差分, 设置时间差分步长  $\Delta t$  为 0.1 fs, 空间差分步长  $\Delta x$  为 1 nm, 初始温度  $T_0$  为室温 300 K, 烧蚀前后齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的底层绝热, 仿真参数如表 1 所示<sup>[12-13]</sup>。

#### 3.1 脉冲宽度对烧蚀齿轮材料电子温度和晶格温度的影响

脉宽在飞秒激光与齿轮材料的相互作用中主要影响电子对光子的非线性吸收, 脉宽越短, 非线性吸收就越明显。对于飞秒激光加工来说, 脉宽并不是越窄越好, 与实际应用有关。在固定平均功率为 2 W、重复频率为 200 kHz 的条件下, 选取脉宽分别为 50, 200, 400, 800, 1000 fs, 采用双温模型求解仿真, 得到了烧蚀面齿轮材料的电子温度与晶格温度随时间  $t$  的变化, 如图 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Symbol/unit	Value
Electron specific heat capacity	$C_e / (\text{J}\cdot\text{K}^{-2}\cdot\text{m}^{-3})$	$7.064 \times 10^2$
Lattice specific heat capacity	$C_l / (\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3})$	$3.5 \times 10^6$
Density	$\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$7.91 \times 10^3$
Absorption rate	$\alpha / \text{m}^{-1}$	$7.1 \times 10^7$
Reflectivity	$R$	0.51
Coupling coefficient	$g / (\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	$1.3 \times 10^{18}$
Fermi temperature	$T_F / \text{K}$	$1.28 \times 10^5$
Thermal conductivity coefficient	$k / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	78.4
Melting temperature	$T_m / \text{K}$	1724
Evaporation temperature	$T_n / \text{K}$	3023

由图 1 可以看出, 脉宽只影响电子的峰值温度、电声耦合时间, 而对晶格温度以及最终电子与晶格达到平衡后的温度影响不大。由图 1(a) 可知, 随着脉宽增加, 电子的峰值温度降低。当脉冲激光作用

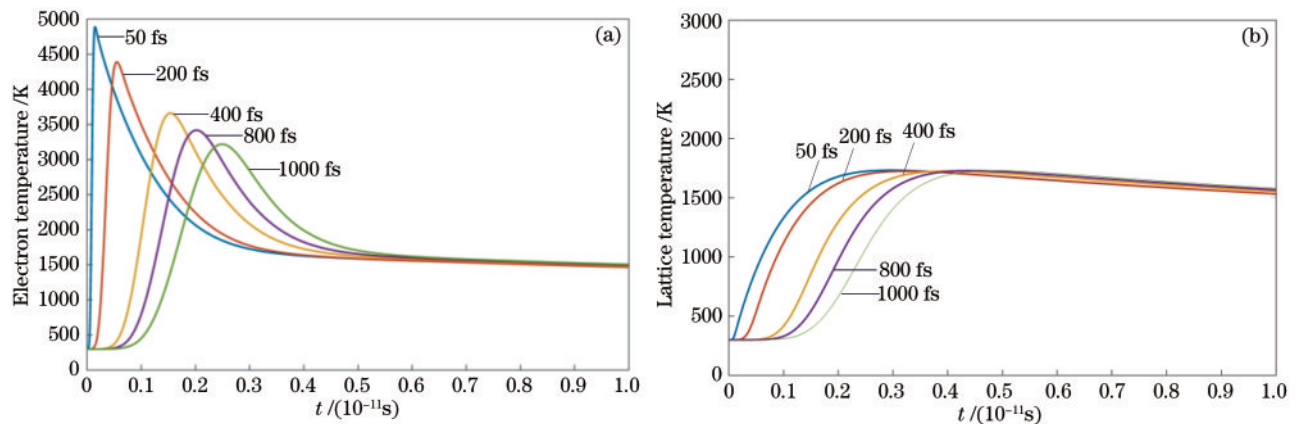


图 1 不同脉宽下烧蚀面齿轮材料的电子温度与晶格温度。(a) 电子温度; (b) 晶格温度

Fig. 1 Electron and lattice temperatures of ablated material of face gear under different pulse widths. (a) Electron temperature; (b) lattice temperature

于齿轮材料上时, 齿轮材料的电子温度在极短的时间内急剧升高, 脉宽越短, 电子温度升高得越快, 峰值温度越高, 这说明材料上的激光能量高度集中, 烧蚀效率高; 到达峰值温度之后, 电子开始进行热扩散和电声耦合, 温度快速下降, 最终达到平衡温度。脉宽为皮秒量级时, 受热传导的影响, 电子的峰值温度较低, 而当脉宽为飞秒量级时, 电子更易达到较高的峰值温度。电子的峰值温度越高, 意味着更多的热量传递给了晶格。当脉冲宽度为飞秒量级时, 电子与晶格的耦合时间为 3~6 ps, 热传导的时间被缩短, 说明飞秒脉冲激光可以实现高效加工。

在电子达到峰值温度之后, 晶格温度开始上

升, 升温过程相对平缓, 如图 1(b) 所示。可以看出: 脉宽越短, 升温速度越快, 材料达到热平衡的时间越短; 在不同的脉宽下, 晶格的升温趋势与时间大致相同; 电子与晶格最终达到热平衡之后的温度在齿轮材料的熔点附近, 在此温度下齿轮材料表面开始熔化。若要求更高的烧蚀率, 则需调整激光参数, 以实现更高的烧蚀温度。

### 3.2 平均功率对烧蚀齿轮材料电子温度和晶格温度的影响

在固定脉宽为 800 fs、重复频率为 200 kHz 的条件下, 选取平均功率为 0.7, 0.9, 2, 3.5 W 进行仿真, 得到烧蚀面齿轮材料的电子温度与晶格温度随时间  $t$  的变化, 如图 2 所示, 图中  $T_m$  为材料的熔点 1776 K。

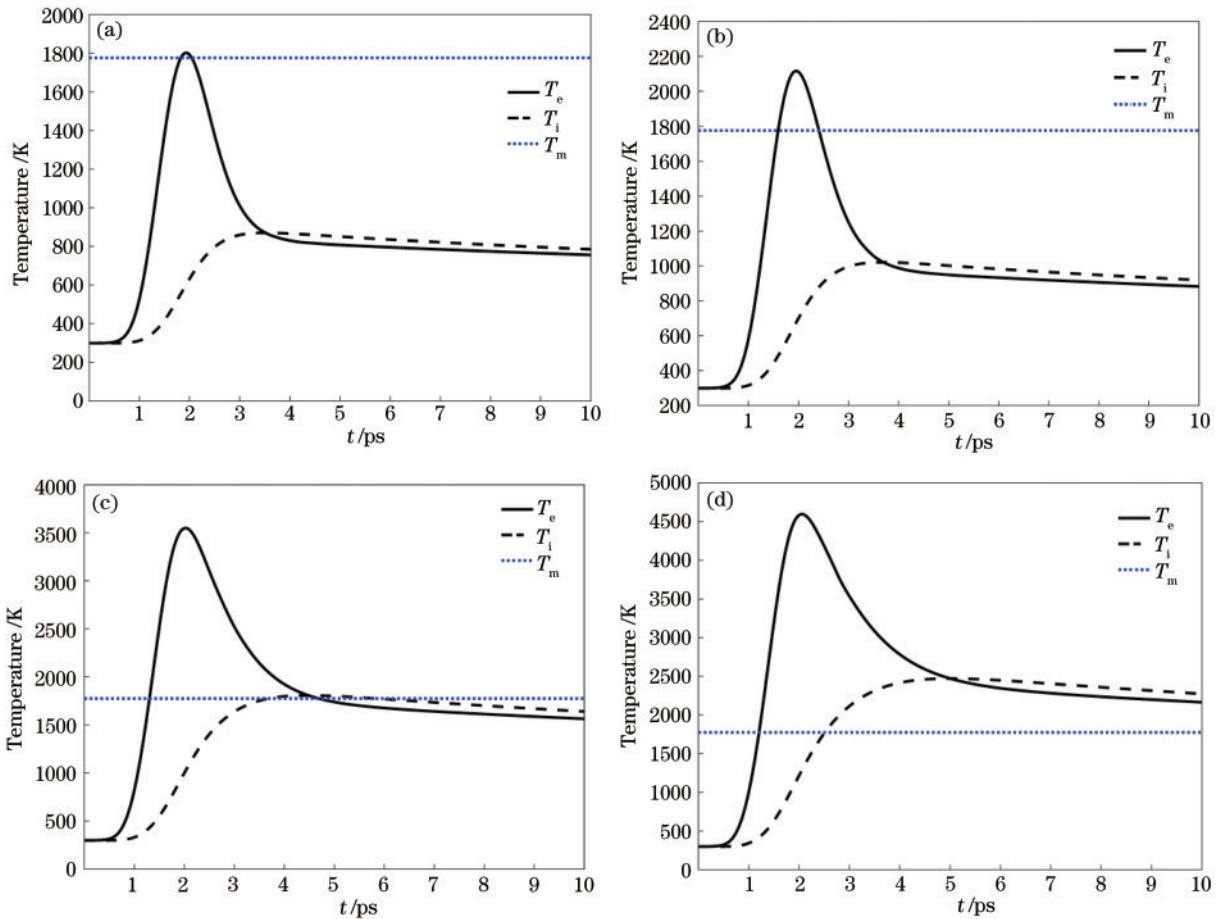


图 2 不同平均功率下烧蚀面齿轮材料的电子温度与晶格温度。(a) 0.7 W; (b) 0.9 W; (c) 2 W; (d) 3.5 W

Fig. 2 Electron and lattice temperatures of ablated material of face gear under different average powers. (a) 0.7 W; (b) 0.9 W; (c) 2 W; (d) 3.5 W

由图 2 可知, 激光平均功率会直接影响电子的峰值温度、电声耦合时间、晶格温度、热平衡后的表层材料温度, 当电子和晶格的平衡温度都超过熔点时, 材料才会发生烧蚀。由图 2(a)、(b) 可知, 当激光平均功率为 0.7 W 和 0.9 W 时, 仅有电子的峰值

温度接近或超过熔点, 随后温度迅速降至熔点之下, 此时材料未发生烧蚀; 由图 2(c) 可知, 当平均功率为 2 W 时, 达到热平衡后的表层材料温度在熔点附近; 由图 2(d) 可知, 当平均功率为 3.5 W 时, 在 3 ps 时电子和晶格的温度都超过了熔点, 同时电声

耦合时间也相对变长,耦合后晶格所达到的温度也随之升高。

当激光平均功率继续增加至 6.45 W 和 7.83 W 时,飞秒激光烧蚀面齿轮材料的电子温度与晶格温度随时间  $t$  的变化如图 3 所示,图中  $T_b$  为材料的沸点 3134 K。由于电声的耦合时间在皮秒量级,不足以形成一定密度的异质泡,熔融的材料表层无法发生正常的沸腾;当材料继续被加热到沸点之上,接近临界温度  $T_c$  时,同质泡的成核速率倍增,当同质泡

达到一定密度时,近表面区域的内同质泡突发性地转为气体和液滴的混合物并被排出,在极短的时间内快速完成相转变,产生相爆炸,相爆炸温度为  $0.9T_c$ ,此时才发生材料的去除<sup>[14]</sup>。金属材料临界温度  $T_c$  的经验公式为  $T_c=521\text{ K}+1.747T_b^{[15]}$ ,据此可知该齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的相爆炸温度为 5396 K,当电子温度和晶格温度都高于材料的沸点  $T_b$  和相爆炸温度时,材料的去除主要通过相爆炸来实现。

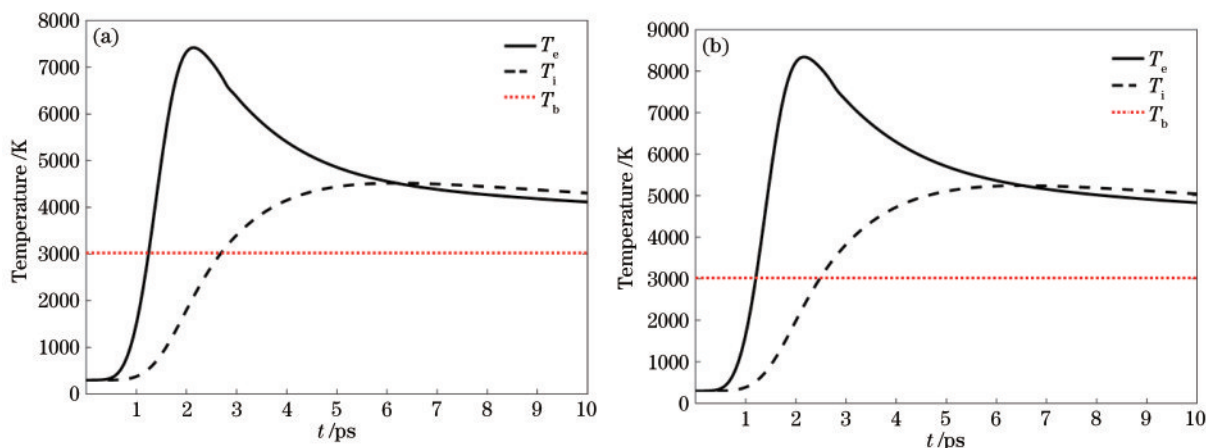


图 3 较高平均功率下烧蚀面齿轮材料的电子温度与晶格温度。(a)6.45 W;(b)7.83 W

Fig. 3 Electron and lattice temperatures of ablated face gear material at high average power. (a) 6.45 W; (b) 7.83 W

### 3.3 平均功率对烧蚀性能的影响

在激光脉宽为 800 fs、重复频率为 200 kHz、平均功率分别为 2 W 和 6 W 的条件下,电子与晶格的三维温度场分布分别如图 4、图 5 所示。由图 4、5 可

知,电子和晶格的温度分布差距较大,但电子温度和晶格温度在深度  $x$  上的影响有限,垂直于材料 40 nm 以下的区域处无热量注入。这说明激光能量多集中于材料表面的浅层区域,表层区域的材料余

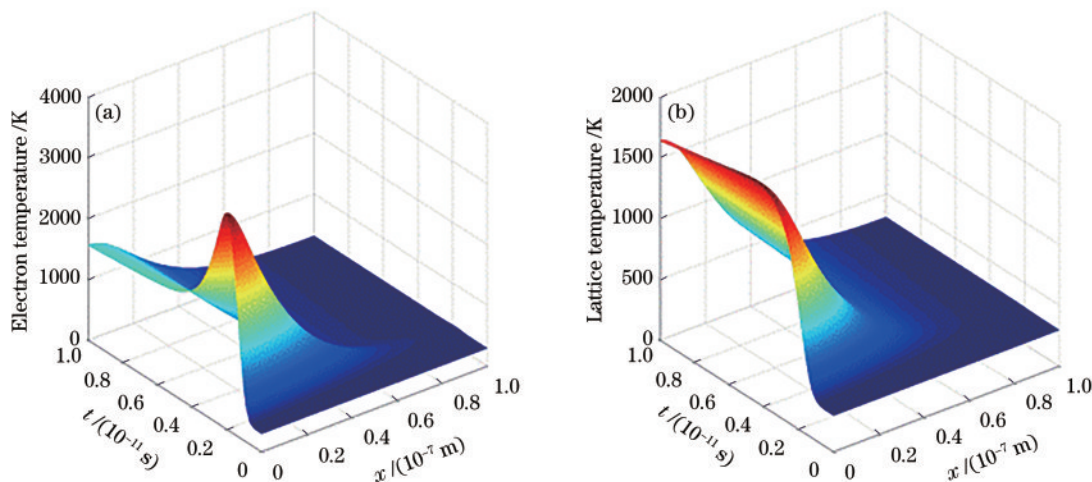


图 4 平均功率 2 W 时电子与晶格的三维温度场分布。(a)电子;(b)晶格

Fig. 4 Three-dimensional temperature field distributions of electron and lattice at an average power of 2 W.

(a) Electron; (b) lattice

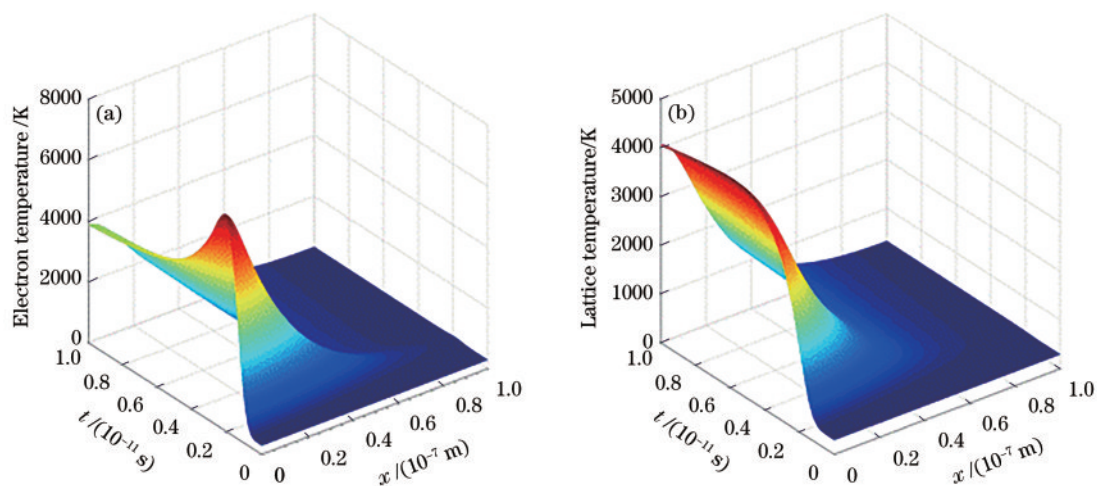


图 5 平均功率 6 W 时电子与晶格的三维温度场分布。(a) 电子; (b) 晶格

Fig. 5 Three-dimensional temperature field distributions of electron and lattice at an average power of 6 W.

(a) Electron; (b) lattice

量或凸起可以通过飞秒激光进行有效烧蚀去除,而不会对材料内部造成影响。因此,飞秒激光可有效避免热效应对加工质量的影响,实现精微加工。

#### 4 飞秒激光烧蚀面齿轮实验与分析

##### 4.1 实验加工系统和实验材料

如图 6 所示,实验采用的飞秒激光微加工系统

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组成。激光器的波长为 1030 nm,脉宽为 800 fs,频率在 100~1000 kHz 范围内可调。为降低等离子体的膨胀与辐射区高度,减少熔融物对齿面的覆盖,清除废屑,改善加工质量,该飞秒激光微加工系统配备了吹气系统。

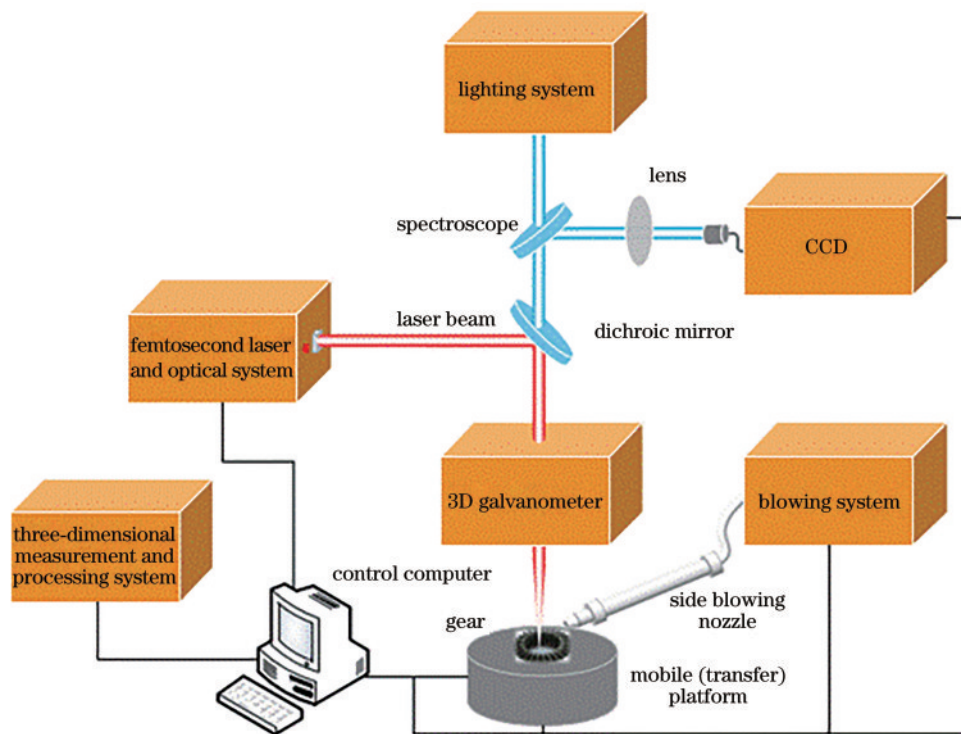


图 6 飞秒激光微加工系统示意图

Fig. 6 Schematic of femtosecond laser micromachining system

本次实验中的飞秒激光微加工试样是采用线切割机从面齿轮上切割下来的一个齿样品。面齿

轮材料为低碳合金钢 18Cr2Ni4WA, 其化学成分如表 2 所示。

表 2 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的化学成分

Table 2 Chemical composition of face gear material 18Cr2Ni4WA

Element	Ni	Cr	W	Mn	Si	C	Cu	P	S
Mass fraction/%	4.19	1.47	0.89	0.37	0.24	0.16	0.100	0.012	0.011

### 4.2 烧蚀阈值计算

由于材料加工过程中的粗糙度变化会影响烧蚀坑的深度与体积, 因此本文将烧蚀坑的面积作为烧蚀坑的几何表征来研究烧蚀阈值<sup>[16]</sup>。通过改变激光的平均功率对材料进行烧蚀, 借助电子显微镜测量烧蚀坑的半径, 利用其与入射激光能量密度的线性关系, 可以推导出材料的烧蚀阈值。飞秒激光脉冲的能量密度分布为高斯型, 如图 7 所示。

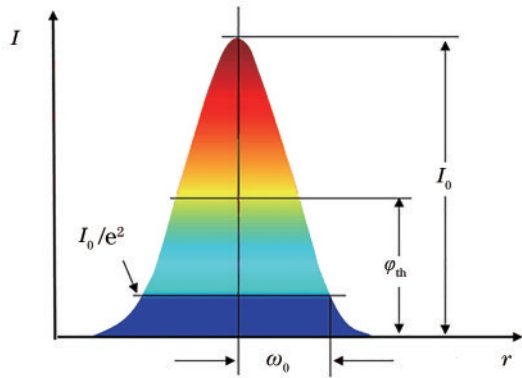


图 7 高斯光束的能量密度分布

Fig. 7 Energy density distribution of Gaussian beam

在距离光束中心为  $r$  处的激光能量密度  $I(r)$  的表达式为<sup>[17]</sup>

$$I(r) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (8)$$

式中:  $I_0$  为距离光束截面中线为  $r$  处的能量密度, 也是光束的最大能量密度 ( $J/cm^2$ );  $\omega_0$  为束腰半径, 即能量密度下降至  $I_0/e^2$  时的光束半径。

对截面各点能量密度积分, 可得单脉冲能量  $E_p$  为

$$E_p = \int_0^{+\infty} 2\pi I(r) dr = \int_0^{+\infty} 2\pi I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) dr = \frac{\pi \omega_0^2 I_0}{2}. \quad (9)$$

激光单脉冲能量  $E_p$  和平均功率  $P$ 、重复频率  $f$  的关系为

$$E_p = \frac{P}{f}, \quad (10)$$

$I_0$  与  $P$  的关系为

$$I_0 = \frac{2P}{\pi f \omega_0^2}. \quad (11)$$

设  $\varphi_{th}$  为烧蚀阈值,  $D$  为烧蚀坑直径 ( $D = 2r$ ), 则烧蚀边缘所对应的激光能量密度为<sup>[18]</sup>

$$\varphi_{th} = I_0 \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right). \quad (12)$$

对 (12) 式两边取对数, 可得

$$D^2 = 2\omega_0^2 \left( \frac{\ln I_0}{\ln \varphi_{th}} \right), \quad (13)$$

将 (11) 式、(12) 式代入 (13) 式, 整理可得

$$D^2 = 2\omega_0^2 \left( \ln P + \ln \frac{2}{\pi f \omega_0^2 \varphi_{th}} \right). \quad (14)$$

(14) 式是  $D^2$  关于  $\ln P$  的直线, 斜率为  $2\omega_0^2$ 。通过测量飞秒激光在不同平均功率  $P$  下对应的烧蚀坑直径  $D$ , 用最小二乘法进行线性拟合, 从拟合直线的斜率  $2\omega_0^2$  就可以确定束腰半径  $\omega_0$ ; 令烧蚀坑直径  $D=0$ , 此时光束中心处的能量密度即为材料的烧蚀阈值。

在单脉冲飞秒激光烧蚀齿轮材料的实验中, 设定不同的平均功率对材料进行烧蚀加工, 采用 DMM-300C 型光学显微镜测量烧蚀坑直径, 对实验数据进行整理计算, 可以拟合出烧蚀坑直径的平方  $D^2$  与平均功率对数  $\ln P$  的关系, 如图 8 所示。图中

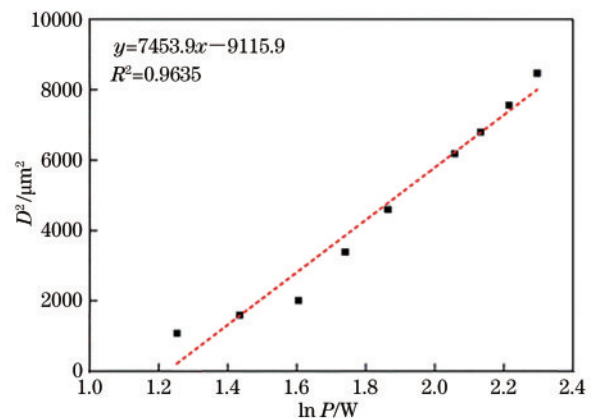


图 8 单脉冲激光下  $D^2$  与  $\ln P$  的关系

Fig. 8 Relationship between  $D^2$  and  $\ln P$  under single pulse laser

$y=7453.9x-9115.9$  为拟合直线的函数表达式,  $R^2$  为拟合的准确度。

通过拟合可以计算出在单脉冲激光波长为 1030 nm、脉宽为 800 fs、重复频率为 200 kHz 的条件下, 齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的烧蚀阈值为  $0.29 \text{ J/cm}^2$ 。

#### 4.3 平均功率对烧蚀圈形貌的影响

设定飞秒激光器的参数为脉宽 800 fs, 激光能量  $50 \mu\text{J}$ , 重复频率 200 kHz, 采用光学显微镜分别观

测不同平均功率(3.5, 4.98, 6.45, 10.04 W)下的烧蚀圈形貌, 结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 随着平均功率增加, 烧蚀坑的面积随之增加, 同时在烧蚀坑周边出现了严重的氧化痕迹, 且平均功率越大, 氧化痕迹越明显, 氧化区域面积越大。出现这一结果的原因有两个: 一是实验环境为大气环境, 二是吹气管的气压不足。由此可以得出, 随着平均功率增加, 齿轮表面烧蚀面积及形貌特征越来越明显。

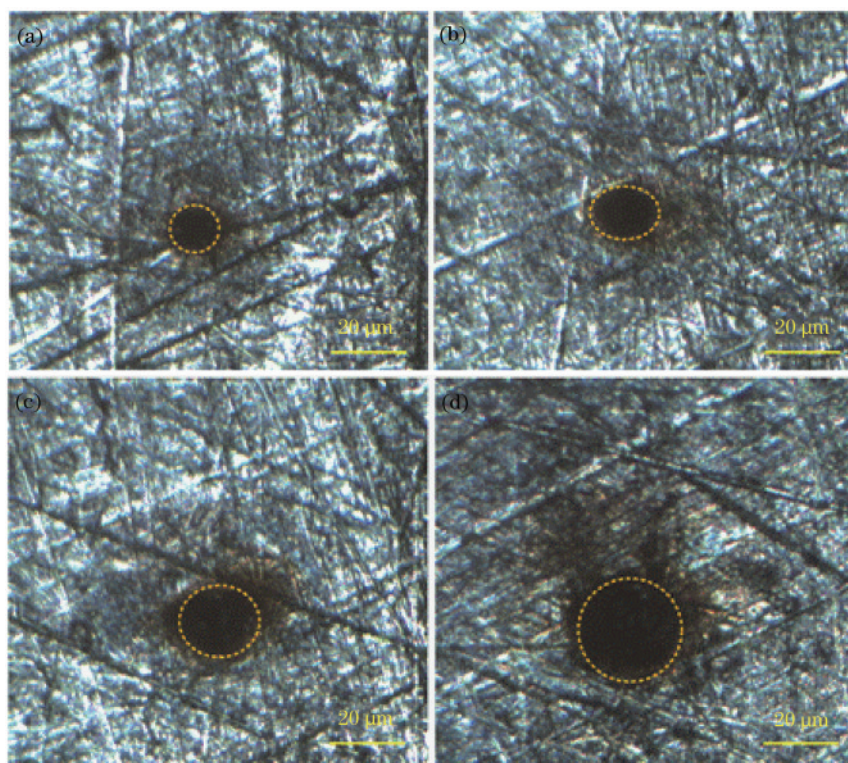


图 9 不同平均功率下的烧蚀圈形貌。(a) 3.5 W; (b) 4.98 W; (c) 6.45 W; (d) 10.04 W

Fig. 9 Ablative ring morphologies under different average powers. (a) 3.5 W; (b) 4.98 W; (c) 6.45 W; (d) 10.04 W

#### 4.4 脉冲数对烧蚀坑微观形貌的影响

飞秒激光光束的能量密度分布为高斯型, 因此齿面烧蚀坑呈现明显的弱烧蚀和强烧蚀的微观形貌。当激光强度较弱时, 材料表面出现弱烧蚀斑和周期性波纹; 当激光强度较强时, 发生强烧蚀的材料表面会形成一定深度的烧蚀坑以及重融物、喷溅物堆积区。设置激光器的参数为脉宽 800 fs, 重复频率 1 kHz, 平均功率 7 W, 采用 FEI Quanta 200 型扫描式电子显微镜, 观测不同脉冲数  $N$  下的齿面烧蚀坑微观形貌, 结果如图 10 所示。

如图 10(a) 所示, 当脉冲数为 10 时, 烧蚀凹坑深度较浅, 熔化在多个点开始。随着能量的累加, 近

表面材料爆炸性地转为气体与液滴的混合物, 这些混合物在高压作用下被排到烧蚀坑四周, 冷却后附着在材料表面, 形成边界模糊的烧蚀弹坑; 加工过程中熔化和蒸发并存。随着脉冲数增加, 烧蚀坑的边界逐渐清晰, 如图 10(b) 所示, 当脉冲数增加到 100 时, 烧蚀中心出现具有一定深度的锥形孔。随着深度的增加, 孔洞底部的能量减弱, 而孔洞深处的熔化材料需要更大的动能才能从一定深度的孔洞处抛离。随着脉冲数继续增大, 如图 10(c) 所示, 当脉冲数增加到 200 时, 烧蚀碎片获得了足够的能量, 形成了边界清晰的锥形孔洞, 孔径与孔深都随着脉冲的累积而增大。如图 10(d) 所示, 当脉冲数增加到 500 时, 因激光能量密度在径向方向上降至



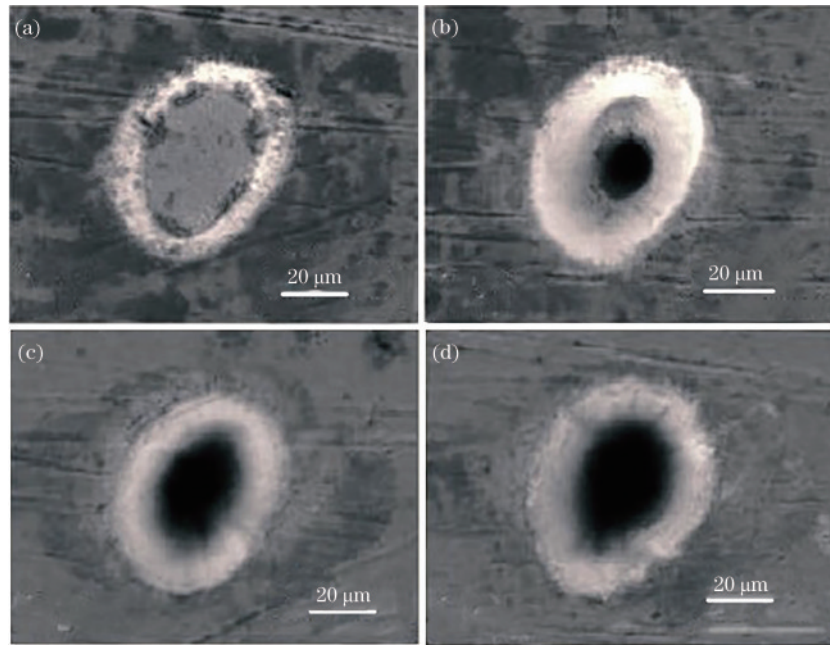


图 10 不同脉冲数  $N$  下的齿面烧蚀坑微观形貌。(a)  $N=10$ ; (b)  $N=100$ ; (c)  $N=200$ ; (d)  $N=500$

Fig. 10 Micro-morphologies of tooth ablation pit under different pulse numbers. (a)  $N=10$ ; (b)  $N=100$ ; (c)  $N=200$ ; (d)  $N=500$

较低水平,能量累积效应接近极限,孔径随着脉冲增大而增大的幅度不太明显,孔深则持续明显增大;随着孔深增加,孔洞底部的熔融材料从底部抛离的难度大大增加,更多的熔融材料被排到烧蚀坑四周并沉积。脉冲数直接影响烧蚀坑的形貌,多脉冲数导致的能量累积会造成材料不同程度的去除,脉冲数越多,烧蚀坑尺度与形貌特征越明显。当实验采用的重复频率较高时,激光光束会出现剧烈的电子电离抖动,增大了光子通量,从而也会增大烧蚀深度<sup>[19]</sup>。

飞秒激光具有极高的峰值能量,而能量的累积使得材料表面发生强烈的气化,材料蒸气与周围气体发生高强度电离,形成高温、高压、高密度的等离子体;等离子体喷溅离开材料时携带大量的热量,喷溅物附着在材料上时可引起二次烧蚀,并导致一些不规则的凹陷以及部分凸起的重熔物、喷溅物,从而在一定程度上影响了材料的表面加工质量。

## 5 结 论

本文开展了飞秒激光精微烧蚀面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的特性研究,建立了双温模型,采用有限差分法分析了脉冲宽度和平均功率对烧蚀齿材料电子温度和晶格温度的影响规律,结果表明:脉宽越短,电子温度升高得越快,峰值温度越高,烧

蚀效率越高;在电子温度达到峰值温度之后,脉宽越短,晶格温度上升得越快,当电子与晶格达到热平衡,且电子温度和晶格温度超过齿轮材料的熔点时,材料开始熔化,齿面产生烧蚀;在较高平均功率下,当电子和晶格的温度均高于材料的沸点和相爆炸温度时,主要通过相爆炸来实现材料的去除。电子与晶格的三维温度场分布显示,平均功率对电子温度和晶格温度分布的影响较大,但电子温度和晶格温度在深度上的影响有限,材料烧蚀深度一般为 40 nm 左右,避免了热效应对表层质量的影响。

采用飞秒激光微加工系统进行烧蚀面齿轮实验,根据烧蚀坑面积拟合出  $D^2 \cdot \ln P$  曲线,得出高斯分布的飞秒激光烧蚀齿材料 18Cr2Ni4WA 的单脉冲烧蚀阈值为  $0.29 \text{ J/cm}^2$ ;分析了平均功率和脉冲数对烧蚀形貌的影响,结果表明,随着平均功率和脉冲数增加,齿面烧蚀尺度及形貌特征愈加明显,在一定程度上影响了齿轮材料的表面加工质量。

## 参 考 文 献

- [1] Ming X Z, Gao Q, Yan H Z, et al. Mathematical modeling and machining parameter optimization for the surface roughness of face gear grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9/10/11/12): 2453-2460.
- [2] 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.
- [3] Shi Y, Xu B, Wu D, et al. Research progress on fabrication of functional microfluidic chips using femtosecond laser direct writing technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1000001.  
史杨, 许兵, 吴东, 等. 飞秒激光直写技术制备功能化微流控芯片研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1000001.
- [4] Zeng Z P, Wang Y R, Yang Z R, et al. Effect of laser surface treatment on microstructure and properties of 18Cr2Ni4WA steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 1987, 23(5): 16-19.  
曾振鹏, 王永瑞, 杨正瑞, 等. 激光表面处理对 18Cr2Ni4WA 钢组织及性能的影响[J]. 理化检验 (物理分册), 1987, 23(5): 16-19.
- [5] Cheng J, Perrie W, Edwardson S P, et al. Effects of laser operating parameters on metals micromachining with ultrafast lasers[J]. Applied Surface Science, 2009, 256(5): 1514-1520.
- [6] Wang F, Luo J J, Li M, et al. High-precision method of machining taper holes of diesel engine nozzle with femtosecond laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 414003.  
王锋, 罗建军, 李明, 等. 飞秒激光高精度加工柴油机喷嘴倒锥孔法[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 414003.
- [7] Zhang W, Feng Q, Cheng G H, et al. Femtosecond laser-induced ablation regimes and thresholds in a nickel-based superalloy[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1232001.  
张伟, 冯强, 程光华, 等. 飞秒激光对镍基合金的损伤机制和阈值行为[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1232001.
- [8] Yang Q B, Zhang H, Zhou W, et al. Surface incubation effect of carbide YG6 induced by femtosecond laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(6): 614002.  
杨奇彪, 张弘, 周维, 等. 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): 614002.
- [9] Gao J D, Zhang J Q, Quan Z J, et al. Dependence of limited radiative recombination rate of InGaN-based light-emitting diode on lattice temperature with high injection [J]. Chinese Physics B, 2020, 29(4): 557-562.
- [10] Cui B, Gong J L, Wang Z W, et al. Simulation and experiment of femtosecond laser pulse ablation on turbine blade material[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019, 42(2): 291-295.  
崔波, 宫金良, 王志文, 等. 飞秒激光脉冲烧蚀涡轮叶片材料的仿真和实验[J]. 电子器件, 2019, 42(2): 291-295.
- [11] Li L, Zhang D M, Li Z H, et al. The investigation of optical characteristics of metal target in high power laser ablation[J]. Physica B: Condensed Matter, 2006, 383(2): 194-201.
- [12] 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.
- [13] Ming X Z, Jin L, Shen J W, et al. Ablation characteristics of nanosecond laser correction gear material 20CrMnTi [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 181404.  
明兴祖, 金磊, 申警卫, 等. 纳秒激光修正齿轮材料 20CrMnTi 的烧蚀特性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 181404.
- [14] Song K H, Xu X F. Explosive phase transformation in excimer laser ablation[J]. Applied Surface Science, 1998, 127/128/129: 111-116.
- [15] Chang H, Jin X, Chen Z Y, et al. Study on optical and thermophysical properties of aluminum under nanosecond laser irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1114002.  
常浩, 金星, 陈朝阳, 等. 纳秒激光辐照下铝靶的光学与热物理性质研究[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1114002.
- [16] Wu X F. Studies on theories and experiments in femtosecond laser ablation of metal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 18-19.  
吴雪峰. 飞秒激光烧蚀金属的理论及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 18-19.
- [17] Huang K. Interacting process and microstructure machining on metal materials by nanosecond laser ablation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 14-16.  
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: 14-16.
- [18] Jin T Y, Chen J Y, Wang J H, et al. Material

removal mechanism of nanotwinned cubic boron nitride by femtosecond laser ablation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (9) : 198-205.

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.

[19] Chen M. Numerical and experimental research on effect of pulse laser processing on metal surface[D]. Zhenjiang: Jiangu University, 2017: 21-22.

陈美. 脉冲激光加工金属表面典型效应的理论和实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 21-22.