

激光与光电子学进展

飞秒激光加工面齿轮表面的能量耦合模型与齿面形貌研究

马玉龙¹, 明兴祖^{1,2*}, 贾松权¹, 刘克非¹, 徐海军², 樊滨瑞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 飞秒激光精微加工是用一种超短脉冲宽度、超高能量激光对材料进行精确去除的制造方法。考虑到面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 成分间的互温感应, 建立了飞秒激光烧蚀面齿轮材料的能量耦合模型, 并仿真分析了不同能量密度下电子温度与晶格温度的变化过程。结果表明, 电子温度随着激光能量密度的增大迅速增高且远大于晶格温度。用能量在 0.320~5.255 J/cm² 范围内的激光观测面齿轮齿面烧蚀形貌并对齿面粗糙度进行检测, 结果表明, 烧蚀形貌光滑平整, 粗糙度最低为 0.265 μm, 与能量耦合模型的仿真分析结果基本一致, 为提高面齿轮的表面质量研究提供了基础。

关键词 激光光学; 飞秒激光; 面齿轮; 烧蚀特性; 粗糙度

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0714009

Study on Energy Coupling Model and Tooth Surface Morphology of Face Gear Surface Machined by Femtosecond Laser

Ma Yulong¹, Ming Xingzu^{1,2*}, Jia Songquan¹, Liu Kefei¹, Xu Haijun², Fan Binrui²

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

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

Abstract Femtosecond laser micromachining is a manufacturing method that uses ultra-short pulse width and ultra-high energy laser to accurately remove materials. In this paper, considering the mutual temperature induction among the components of the face gear material 18Cr2Ni4WA, the energy coupling model of femtosecond laser ablation of face gear material is established, and the change process of electron temperature and lattice temperature under different energy densities is simulated and analyzed. The results show that electron temperature increases rapidly with the increase of laser energy density and is much higher than the lattice temperature. The laser with energy of 0.320~5.255 J/cm² is used to observe the ablation morphology of face gear tooth surface and detect the tooth surface roughness. The results show that the ablation morphology is smooth and the minimum roughness is 0.265 μm, which is basically consistent with the simulation analysis results of the energy coupling model, and provide a basis for improving the research of face gear surface quality.

Key words laser optics; femtosecond laser; face gear; ablation characteristics; roughness

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-06-17; 录用日期: 2021-07-04

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(XKQ2021044)

通信作者: mxz9036@126.com

1 引言

面齿轮是实现空间相交或交错传动的关键零件,具有重合度大、承载能力强、高速传动平稳等诸多优势,广泛应用于包装机械、大型装备、工程机械、航空航天等领域^[1]。面齿轮的齿形复杂、技术要求高、制造困难,且国外面齿轮的先进制造设备及技术对我国实行封锁政策,导致国内的面齿轮加工精度比国外低二级左右^[2]。飞秒脉冲激光加工具有加工区域精确、可精密加工任何材料等突出特点,近年来得到了快速发展和广泛应用,成为提高面齿轮加工精度、打破国外技术封锁的突破方向^[3]。飞秒激光微加工是一种适用于材料加工和器件制造的通用工具,可实现对多种材料高柔性、高精度、高效率的微细加工^[4],且能高精度、无损伤地加工各种硬脆材料,使该类材料在复杂精密领域得到了广泛应用。在飞秒激光减材加工过程中,可以实现极小尺寸下材料的局部精密去除,且拥有极高的灵活性^[5],在合理的参数组合下,能实现具有复杂、精细结构的零件加工。

Liu 等^[6-7]在 20 世纪 90 年代就开展了关于飞秒激光与物质烧蚀效应的研究。Jiang 等^[8-9]以金为研究对象,对双温方程的准确性进行了初步研究,通过量化双温方程中的光学和热学参数,准确预测了金的烧蚀阈值和加工深度。张云龙等^[10]详细介绍了激光加工微孔的优势,总结了激光加工微孔的质量特征。曾振鹏等^[11]研究了激光表面处理对 18Cr2Ni4WA 钢组织和性能的影响,结果表明,18Cr2Ni4WA 钢经激光表面处理后,含碳量和硬度均有所增加。田梦瑶等^[12]介绍了飞秒激光对低维纳米材料的制备加工和改性。Metzner 等^[13]利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,超短激光脉冲可提高烧蚀效率。梁

密生等^[14]用飞秒激光加工金属微细槽,结果表明,槽截面未出现明显的热影响区域。

针对面齿轮的加工过程,本文通过理论模型和实验分析分别从能量密度、功率、激光能量三个方面研究参数对飞秒激光精微加工面齿轮的影响,为提高面齿轮的加工质量提供了技术参考。

2 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的能量耦合模型

图 1 为飞秒激光与面齿轮材料相互作用并产生烧蚀的过程。能量传递过程有三个阶段:第一阶段中电子受激吸收飞秒激光的能量,从而摆脱束缚状态,作用时间在 fs 量级;第二阶段中电子温度比晶格温度高,热电子与晶格耦合,进一步将能量转移给晶格,作用时间在 ps 量级;第三阶段为晶格与晶格之间的相互作用,作用时间在 μs 量级^[15]。

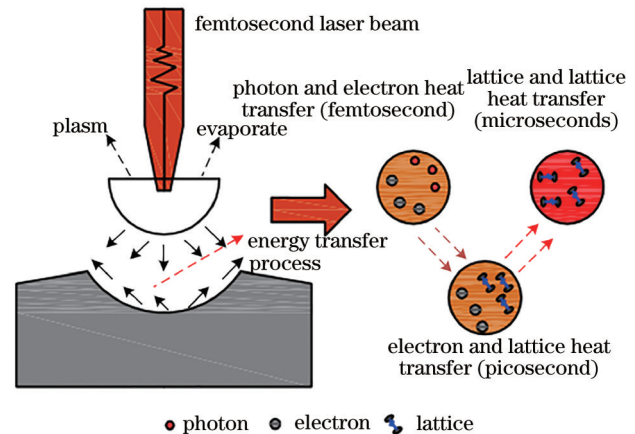


图 1 飞秒激光源到晶格的能量传输过程

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

面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 是一种低碳合金渗碳钢,具有强度大、韧性好、淬透性好的特点,该材料的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的化学成分

Table 1 Chemical composition of the face gear material 18Cr2Ni4WA

unit: %

Element	Ni	Cr	W	Mn	Si	C	Cu	P	S
Mass fraction	4.190	1.490	0.890	0.370	0.240	0.160	0.100	0.012	0.011

材料成分间的互温感应对晶格的作用时间较长^[16],因此,对面齿轮进行飞秒精微加工时需要考虑材料成分间的互温感应。齿轮材料中的主要化学成分 Fe、Ni 与 Cr 经互温感应后,达到平衡态的能量吸收模型 E_g 可表示为

$$E_g = \sum_{i=1}^3 V_0 M_i X_i \beta_i, \quad (1)$$

式中, V_0 为材料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 种成分的比例, β_i 为第 i 种成分的吸收率, $i=1, 2, 3$ 分别为碳(C)基成分、铬(Cr)基成分、镍(Ni)基成分。

将能量吸收模型与双温模型方程相结合^[17],得到描述飞秒激光与材料成分相互作用的能量耦合模型,可表示为

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(K_e \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) - g(T_e - T_i) + S(r, t), \quad (2)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = g(T_e - T_i) - E_g, \quad (3)$$

式中, T_e 、 T_i 分别为电子与晶格系统的温度, C_e 、 C_i 分别为电子与晶格单位体积的比热容, K_e 为电子的热导率, 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, $S(r, t)$ 为与激光脉冲对应的光源强度分布, r 为垂直于材料表面方向的距离。(2) 式为电子与电子之间的能量传递, (3) 式为电子与晶格之间的能量传递。

当激光热源强度为高斯分布时^[18], 激光光源强度 $S(r, t)$ 可表示为

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

式中, R 为材料对激光的反射率, $\partial_b = 1/\delta$ 为飞秒激光的吸收系数, δ 为与材料相关的范数, z 为传输距离, I_0 为激光的能量密度最大值, β 为常数, 取值为 $4 \ln 2$, τ_p 为激光的脉冲宽度。

边界条件是模型求解需要考虑的重要因素, 假设环境温度为室温 (300 K), 被加工材料的表面为空气对流冷却。从 (2) 式可以发现, 电子热容、晶格热容、电子热导率和电声耦合系数是求解动能量热模型的几个关键参数。Anisimov 等^[19] 提出的电子热导率表达式为

$$K_e = \kappa \frac{(V_e^2 + 0.16)^{1.25} (V_e + 0.44) V_e}{(V_e^2 + 0.092)^{0.5} (V_e + \eta V_i)}, \quad (5)$$

式中, κ 和 η 为常数, $V_i = T_i/T_F$, $V_e = T_e/T_F$, T_i 为晶格温度, T_F 为费米温度。晶格比热容 C_i ^[20] 可表示为 $C_i(T_i) = 313.7 + 0.324T_i - 2.687 \times 10^{-4}T_i^2 + 1.257 \times 10^{-7}T_i^3$ 。(6)

能量沉积为高斯分布, 可由边界热流模拟。热内流^[21]可表示为

$$-n \left(-k_1 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{I_0}{I_p} (1 - k) \partial_b \exp \left[-2 \times \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right], \quad (7)$$

式中, n 为代数, k_1 为晶格系数, T 为温度, I_p 为脉冲宽度, k 为常数。假设模型的另一边界上为绝热, 强

制导电时的通量为 0, 则有

$$-n \left(-k \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0. \quad (8)$$

根据 (2) 式、(3) 式两个非线性动能量热方程, 用 COMSOL 软件建立两个固体传热模块。先通过设置电子与晶格的耦合系数 g 将两个固定传热模块即飞秒脉冲激光作用下电子-声子系统进行耦合, 再计算出受激光脉冲作用时电子系统和晶格系统的温度变化规律。根据文献^[22] 得到电子系统的热源 E_e 和晶格系统的热源 E_i 分别为

$$E_e = S(r, t) - E_i, \quad (9)$$

$$E_i = g(T_e - T_i). \quad (10)$$

设置初始条件 $T_e = T_i = 300$ K, 根据 (7) 式、(8) 式就能得到外表面的边界条件。当电子温度较低时, 面齿轮材料的吸收率可当作常数。但使用飞秒激光精微加工时, 材料表层的电子会瞬间加热到高温高压状态, 当面齿轮表面吸收的能量很大时, 材料的吸收系数和吸收率是变化的。因此, 建立飞秒激光烧蚀齿轮表面模型时还需考虑到吸收率的动态变化。

3 求解与仿真分析

用 COMSOL 软件对方程进行求解, 设置飞秒激光的脉冲宽度为 828 fs, 时间差分步长为 1 fs, 激光的扫描间距为 0.5 mm, 初始温度为 300 K, 烧蚀前后面齿轮材料底层的电子温度与晶格温度均为 300 K。对 (1) 式、(2) 式、(3) 式进行求解时, 仿真参数^[23-26]如表 2 所示。

飞秒激光与面齿轮材料的烧蚀效果是轴对称的, 因此, 可将模型作为二维轴对称结构进行处理, 忽略面齿轮材料表面的划痕以及不均匀光强引起的烧蚀效果, 同时将同一面齿轮材料当作各项同性。模型的网格划分结果如图 2 所示。模型工件的厚度和宽度分别为 50 μm 和 25 μm , 横向、纵向坐标分别记为 m 和 n , 入射激光光斑中心的 $m = n = 0$ 。选用自由三角形网格, 最大单元尺寸为 0.4 μm , 最小单元尺寸为 10^{-4} μm , 最大单元增长率为 1.1, 曲率因子为 0.2。

利用 COMSOL 软件对能量耦合模型进行求解, 脉冲宽度为 828 fs, 光斑半径为 20 μm , 激光能量密度 F 分别为 0.320, 1.730, 3.845, 5.255 J/cm² 时材料为 18Cr2Ni4WA 的面齿轮表面电子温度和晶格温度在 30 ps 内的变化过程如图 3 所示。可以发

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

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

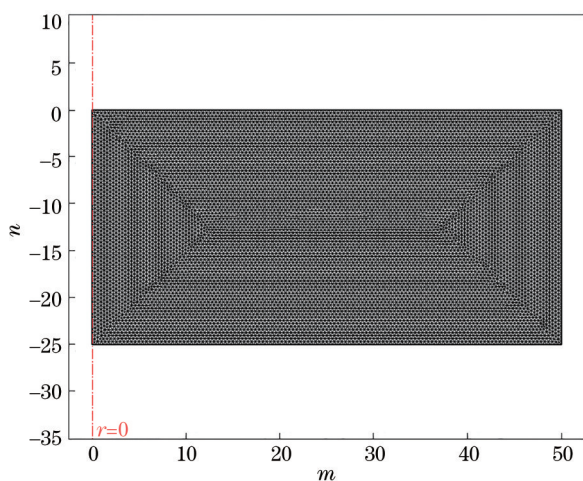


图 2 几何模型的网格划分

Fig. 2 Meshing of the geometric model

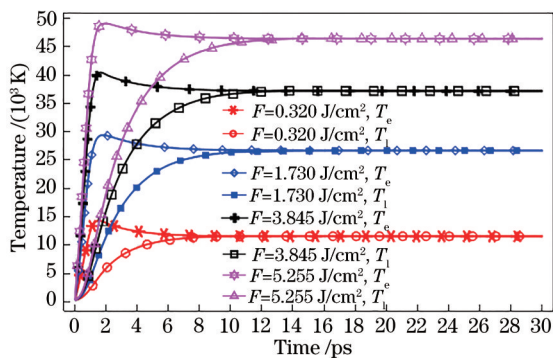


图 3 面齿轮材料电子和晶格温度的变化过程

Fig. 3 Variation process of electron and lattice temperature of the face gear material

现:电子温度到达峰值的时间没有太大变化,原因是电子能量的吸收时间为 fs 量级,可在极短时间内到达峰值且远大于晶格温度;电子温度的最大值以及晶格温度的最大值均随激光能量密度的增加而增加,且随着激光密度的不断增大,电子与晶格温度达到平衡状态的时间也逐渐变长。在 10 ps 后电子和晶格的温度达到平衡,因此,后续实验均用

0.320~5.255 J/cm²范围内的激光能量密度进行仿真研究。

图 4 为仿真得到的收敛图,可以发现,随着迭代次数的增加,仿真误差逐渐呈下降趋势,符合收敛要求。

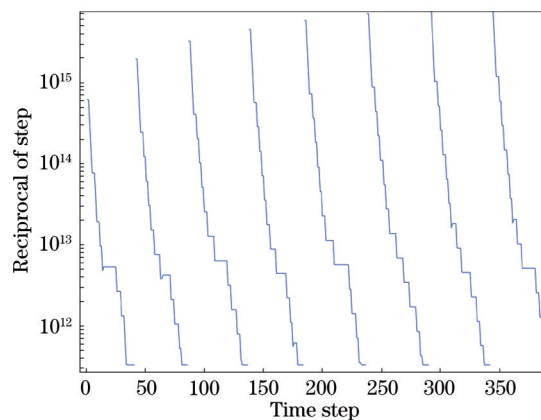


图 4 仿真收敛图

Fig. 4 Simulation convergence diagram

面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的晶格温度在到达汽化温度时会发生烧蚀现象^[27],材料的汽化温度为 3023 K。用能量密度为 1.025 J/cm²的激光烧蚀齿面时得到凹坑剖面的电子温度和晶格温度分布分别如图 5(a)和图 5(b)所示。可以发现,激光烧蚀齿面时电子温度和晶格温度分别沿轴向和径向逐渐降低。

用能量密度为 5.255 J/cm²的激光烧蚀齿面时得到凹坑剖面的电子温度和晶格温度分布分别如图 6(a)和图 6(b)所示。可以发现,电子温度与晶格温度依然沿轴向和径向逐步降低,这表明激光能量密度对加工过程的热影响较小,对烧蚀材料周围的作用不大。

在 0.320~5.255 J/cm²范围内选用不同能量的激光密度得到面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的径向晶格温度和轴向晶格温度分布,结果如图 7 所示。可

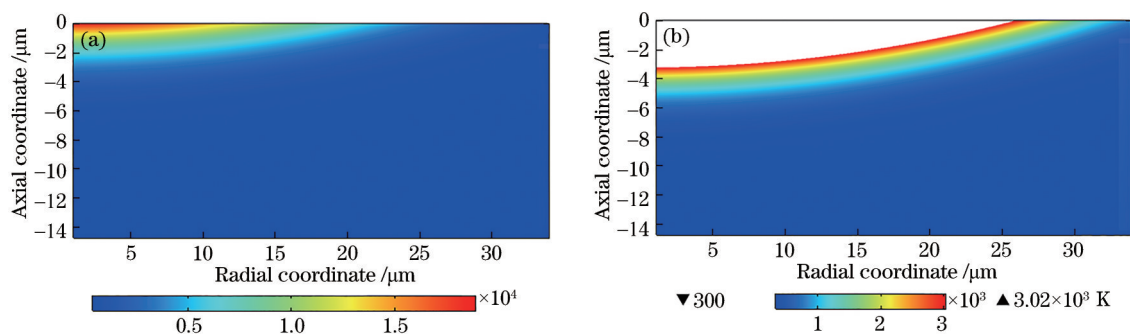


图 5 激光能量为 1.025 J/cm^2 时材料的温度分布。(a) 电子温度; (b) 晶格温度

Fig. 5 Temperature distribution of the material when the laser energy is 1.025 J/cm^2 . (a) Electron temperature; (b) lattice temperature

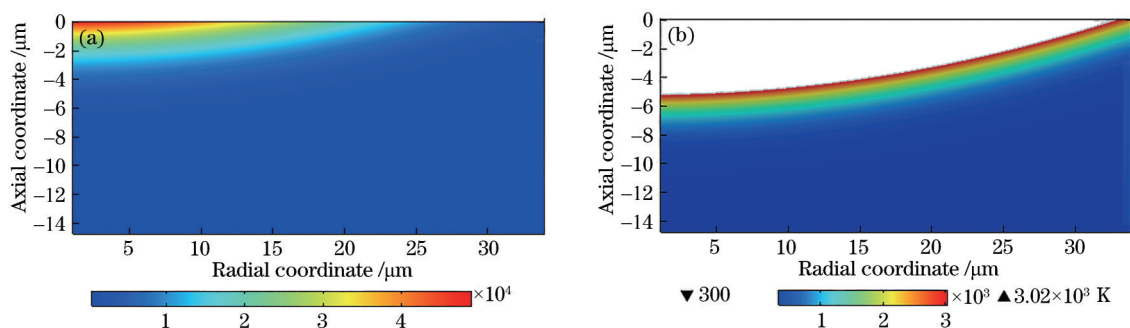


图 6 激光能量为 5.255 J/cm^2 时材料的温度分布。(a) 电子温度; (b) 晶格温度

Fig. 6 Temperature distribution of the material when the laser energy is 5.255 J/cm^2 . (a) Electron temperature; (b) lattice temperature

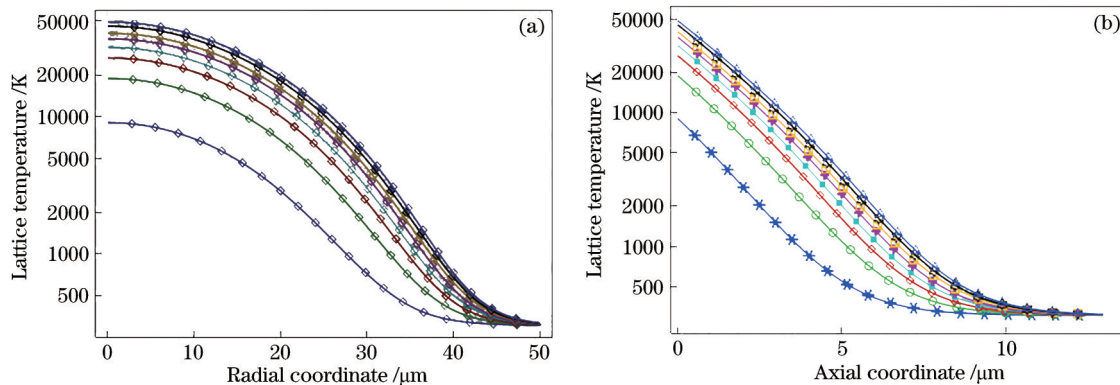


图 7 材料沿径向和轴向的晶格温度分布。(a) 径向晶格温度; (b) 轴向晶格温度

Fig. 7 Lattice temperature distribution of the material along the radial and axial directions. (a) Radial lattice temperature; (b) axial lattice temperature

以发现,飞秒激光烧蚀面齿轮材料时,随着激光能量密度的增加,径向晶格温度和轴向晶格温度都有明显提高,在径向距离和轴向深度上晶格温度逐渐降低。径向距离为 $24.35 \sim 36.04 \mu\text{m}$ 、轴向距离为 $3.15 \sim 5.67 \mu\text{m}$ 的晶格区域内,只有晶格的温度高于材料的汽化温度时会出现烧蚀破坏现象,其他晶格区域不会受到影响。这表明飞秒激光的烧蚀效果只发生在材料表面,不会对材料内部产生明显的影响,从而完成面齿轮材料的精微加工。

4 飞秒激光加工面齿轮的实验结果与分析

4.1 实验系统

实验采用的飞秒激光加工系统如图 8 所示,主要由飞秒激光器、折射镜、激光扩束器、反射镜、三维振镜、远心场镜、四轴移动平台、照明系统、CCD 监测系统及计算机控制系统等组成。激光器为 FemtoYL-100 工业飞秒激光器,波长为 1030 nm ,脉

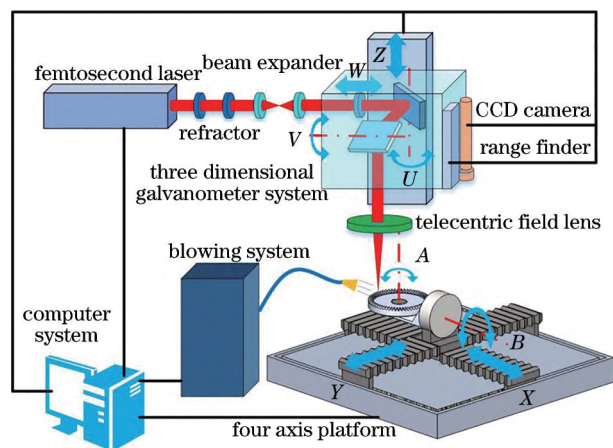


图 8 飞秒激光微加工系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the femtosecond laser micromachining system

冲宽度为 828 fs, 重复频率变化区间为 100~500 kHz。在飞秒激光精微加工面齿轮平面时用吹气系统清除废屑, 减少熔融物对齿面加工的干扰, 提高加工质量。

4.2 面齿轮参数及加工实验样品

加工面齿轮零件的材料为 18Cr2Ni4WA, 设计参数如表 3 所示, 通过飞秒激光加工系统加工的实验样品如图 9 所示。在观测加工面齿轮齿面形貌前, 先从齿轮中用线切割切取出单个齿面试件, 并用酒精清洗干净。

4.3 面齿轮齿面的形貌分析

用光学显微镜分析经不同能量密度飞秒激光精微加工后面齿轮的加工形貌特征, 激光能量密度为 1.025 J/cm^2 和 5.255 J/cm^2 时面齿轮的扫描电子显微镜 (SEM) 图像分别如图 10(a)、图 10(b) 所示。可以发现: 低能量密度下面齿轮表面有轻微的烧蚀迹象, 但烧蚀现象不明显; 而高能量密度下材料发生了融化及蒸发现象, 溅射出的细小颗粒也沉积在扫描线底部的表面上。

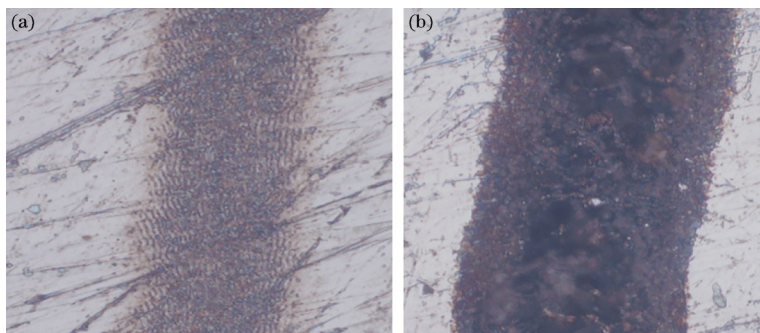


图 10 不同能量密度下材料的烧蚀线。(a) 能量密度为 1.025 J/cm^2 ; (b) 能量密度为 5.255 J/cm^2

Fig. 10 Ablation line of materials at different energy densities. (a) Energy density is 1.025 J/cm^2 ; (b) energy density is 5.255 J/cm^2

表 3 面齿轮设计参数

Table 3 Design parameters of the face gear

Serial number	Parameter	Value
1	tooth number of face gear	60
2	number of pinions	23
3	number of insert teeth	25
4	module /mm	3.5
5	pressure angle /($^\circ$)	20
6	tip coefficient of small gear	1.00
7	tooth root coefficient of small gear	1.25
8	axis intersection angle /($^\circ$)	90
9	outer radius of face gear /mm	120
10	inner radius of face gear /mm	102.5
11	tooth width /mm	17.5
12	gear helix angle /($^\circ$)	0
13	total weight fit /mm	1



图 9 面齿轮的实验样品

Fig. 9 Experimental sample of the face gear

在三维超景深显微镜上用 Motic images Plus 3.0 软件拟合测量烧蚀线的宽度和深度。图 11(a) 为激光能量密度为 1.025 J/cm^2 时测得的数据, 烧蚀宽度为 $21.536 \mu\text{m}$, 烧蚀深度为 $0.498 \mu\text{m}$ 。图 11(b) 为能量密度为 5.255 J/cm^2 时测得的数据, 烧蚀宽度为 $40.147 \mu\text{m}$, 烧蚀深度为 $4.832 \mu\text{m}$ 。

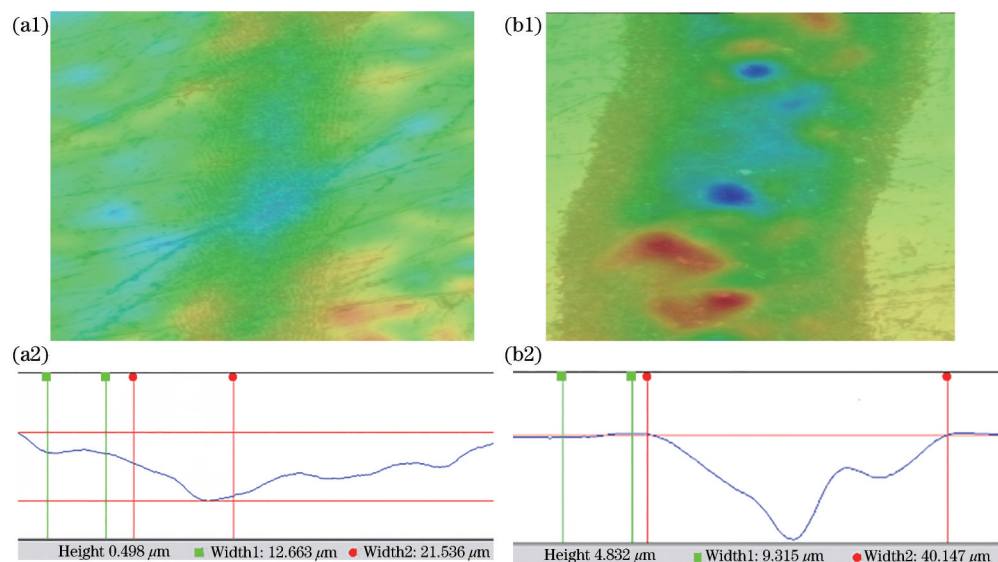


图 11 不同能量密度下的三维超景深 SEM 图像。(a)能量密度为 1.025 J/cm²; (b)能量密度为 5.255 J/cm²
 Fig. 11 Three-dimensional ultra-depth-of-field SEM images under different energy densities. (a) Energy density is 1.025 J/cm²; (b) energy density is 5.255 J/cm²

用能量密度分别为 1.730, 3.845, 4.550 J/cm² 的激光加工时材料上烧蚀线的 SEM 图像如图 12 所示。可以发现,烧蚀形成的线宽随能量密度的增大而增大,且溅射的小颗粒都沉积在表面上。

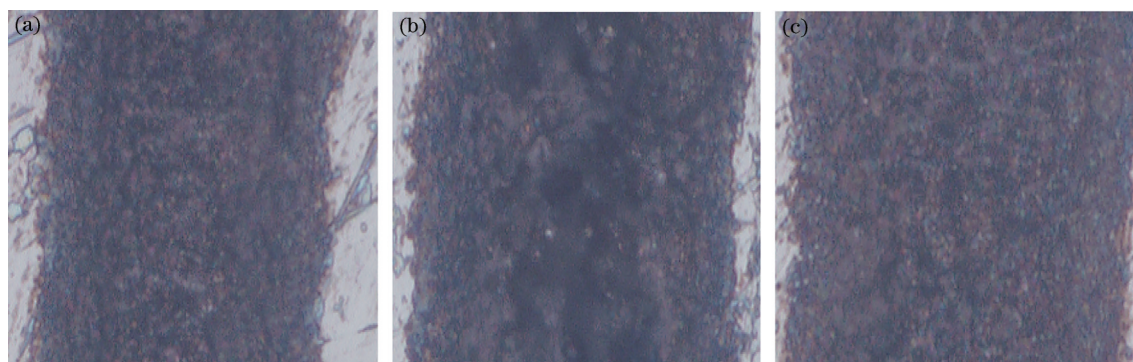


图 12 不同能量密度下的 SEM 图像。(a)能量密度为 1.730 J/cm²; (b)能量密度为 3.845 J/cm²; (c)能量密度为 4.550 J/cm²
 Fig. 12 SEM images at different energy densities. (a) Energy density is 1.730 J/cm²; (b) energy density is 3.845 J/cm²; (c) energy density is 4.550 J/cm²

图 13 为图 12 在三维超景深显微镜上用 Motic images Plus 3.0 软件拟合测量烧蚀线的宽度和深度。可以发现,能量密度为 1.730, 3.845, 4.550 J/cm² 时测得的烧蚀线宽度分别为 21.704, 38.227, 39.096 μm, 深度分别为 0.758, 3.351, 3.772 μm。

从图 10~图 13 可以发现,随着激光能量密度的不断增加,烧蚀形成的线宽越来越宽,深度逐渐增大。表 4 为面齿轮的仿真预测值和实验测量结果,可以发现,激光能量密度与烧蚀线的宽度和深度基本呈线性关系。

4.4 加工齿面的粗糙度分析

飞秒激光加工齿面的粗糙度 R_a 采用德国生产

的表面轮廓仪 Hommel Werke T8000 (精度可达 0.001 μm) 测量,凹面和凸面上的测试长度均为 1.5 mm,取样长度为 0.25 mm,探针的移动速度为 0.15 mm/s。对齿面的粗糙度测量 3 次,取其平均值作为实验的表面粗糙度。图 14 为面齿轮没有进行飞秒激光精微加工前的粗糙度,出现的尖峰可能是加工过程中残留的碎屑导致。实验测量中的最大粗糙度为 0.902 μm,最小粗糙度 0.506 μm。

面齿轮经过不同能量密度飞秒激光精微加工后的表面粗糙度变化情况如图 15 所示。能量密度为 1.025 J/cm²、实际功率为 1.3 W、激光能量为 13 μJ 飞秒激光作用下测量的齿面粗糙度如图 15(a)所示,

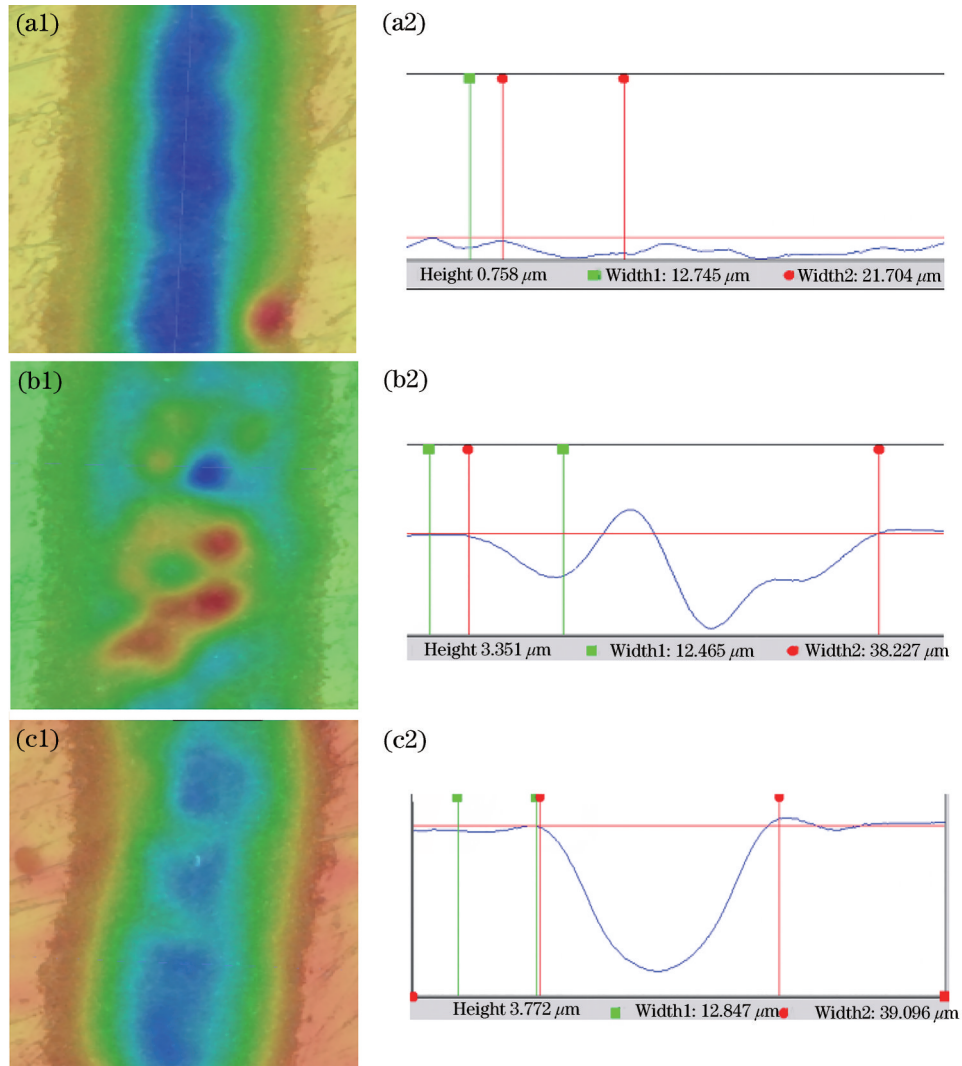


图 13 不同能量密度下的三维超景深 SEM 图像。(a)能量密度为 1.730 J/cm^2 ; (b)能量密度为 3.845 J/cm^2 ; (c)能量密度为 4.550 J/cm^2
 Fig. 13 Three-dimensional ultra-depth-of-field SEM images under different energy densities. (a) Energy density is 1.730 J/cm^2 ; (b) energy density is 3.845 J/cm^2 ; (c) energy density is 4.550 J/cm^2

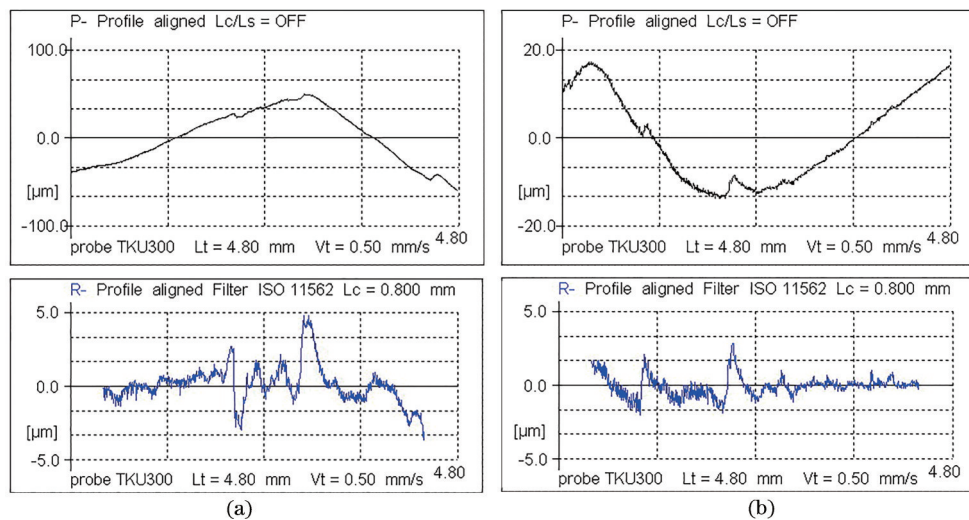


图 14 精微加工前面齿轮的齿面粗糙度。(a)最大粗糙度值;(b)最小粗糙度值。
 Fig. 14 Roughness of tooth surface of front face gear is finely machined. (a) Maximum roughness; (b) minimum roughness

表 4 面齿轮的预测值和实验值

Table 4 Predicted and experimental values of the face gear

Power / W	Laser energy / μJ	Energy density / $(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	Ablation diameter $D / \mu\text{m}$		Ablation depth $H / \mu\text{m}$	
			Predicted value	Experimental value	Predicted value	Experimental value
1.3	13	1.025	22.51	21.536	0.51	0.498
1.9	19	1.730	24.07	21.704	0.82	0.758
2.7	27	3.845	37.66	38.227	3.22	3.351
3.7	37	4.550	38.22	39.096	3.71	3.772
5.5	55	5.255	39.66	40.147	4.75	4.832

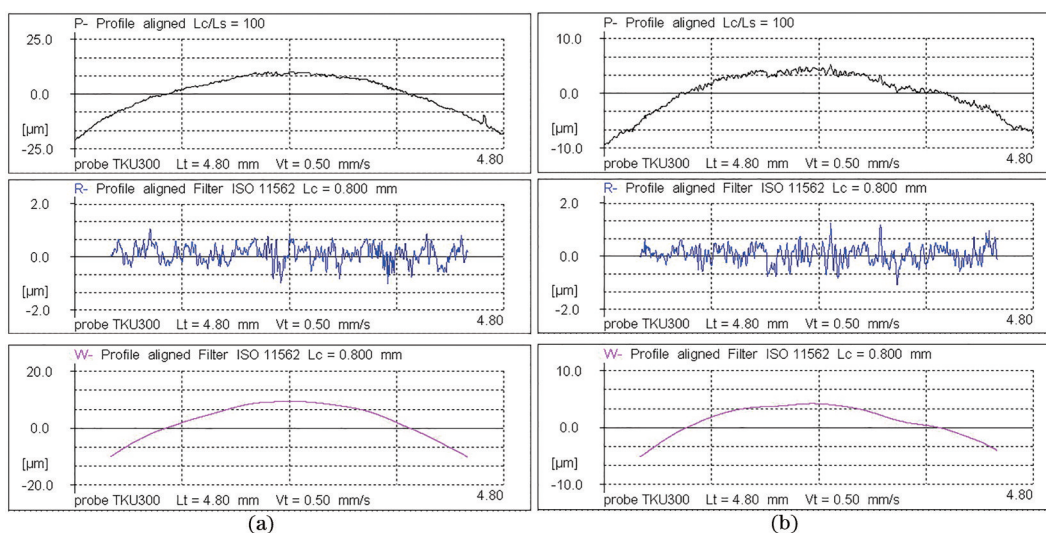


图 15 能量密度为 1.025 J/cm^2 和 1.730 J/cm^2 时的齿面粗糙度。(a) 能量密度为 1.025 J/cm^2 ; (b) 能量密度为 1.730 J/cm^2
 Fig. 15 Tooth surface roughness at energy densities of 1.025 J/cm^2 and 1.730 J/cm^2 . (a) Energy density is 1.025 J/cm^2 ; (b) energy density is 1.730 J/cm^2

平均粗糙度为 $0.282 \mu\text{m}$ 。能量密度为 1.730 J/cm^2 、实际功率为 1.9 W 、激光能量为 $19 \mu\text{J}$ 飞秒激光作用下测量的齿面粗糙度如图 15(b) 所示, 平均粗糙度为 $0.265 \mu\text{m}$ 。

能量密度为 3.845 J/cm^2 、实际功率为 2.7 W 、激光

能量为 $27 \mu\text{J}$ 飞秒激光作用下测量的齿面粗糙度(尖峰的出现可能是溅射的残渣导致)如图 16(a) 所示, 平均粗糙度为 $0.351 \mu\text{m}$ 。能量密度为 4.550 J/cm^2 、实际功率为 3.7 W 、激光能量为 $37 \mu\text{J}$ 飞秒激光作用下测量的齿面粗糙度如图 16(b) 所示, 平均粗糙度为 $0.267 \mu\text{m}$ 。

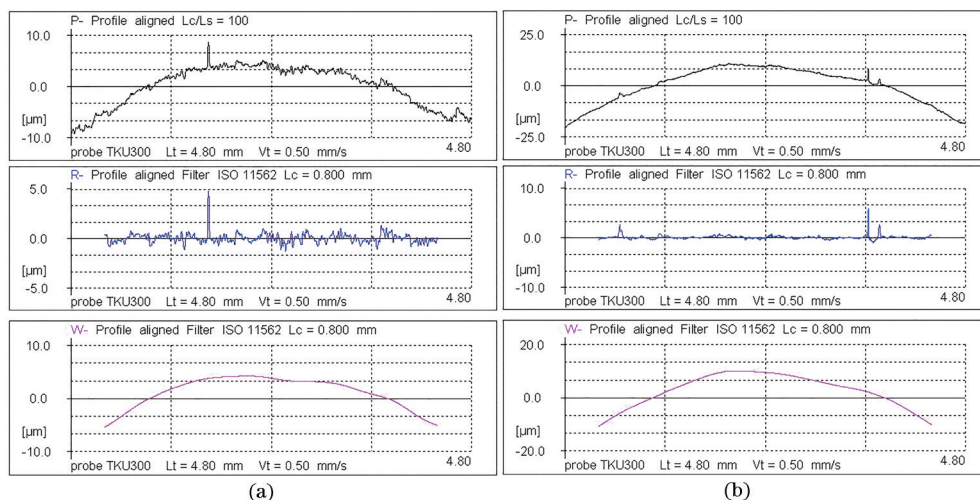


图 16 能量密度为 3.845 J/cm^2 和 4.550 J/cm^2 时的齿面粗糙度。(a) 能量密度为 3.845 J/cm^2 ; (b) 能量密度为 4.550 J/cm^2
 Fig. 16 Tooth surface roughness at energy densities of 3.845 J/cm^2 and 4.550 J/cm^2 . (a) Energy density is 3.845 J/cm^2 ; (b) energy density is 4.550 J/cm^2

随着能量密度的不断增加,会对齿面烧蚀的效果产生一定影响,能量密度的不断增加使溅射的颗粒物沉积严重,粗糙度相比低能量时有所增加。能量密度为 5.255 J/cm^2 、实际功率为 5.5 W 、激光能量为 $55 \mu\text{J}$ 作用下测量的齿面粗糙度如图 17 所示,平均粗糙度为 $0.551 \mu\text{m}$ 。

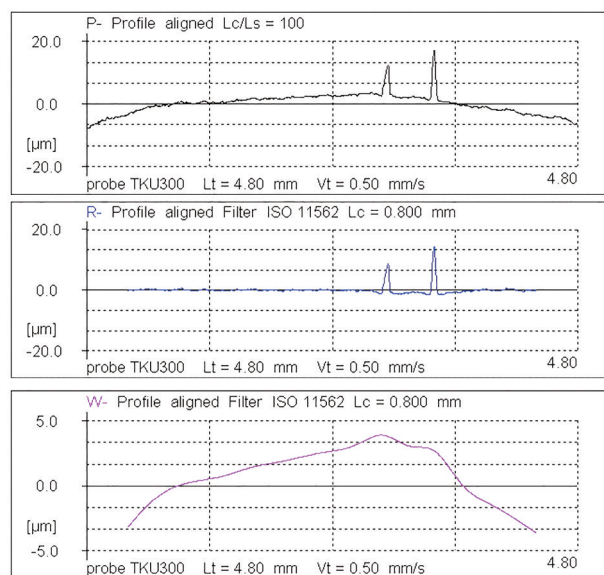


图 17 能量密度为 5.255 J/cm^2 时的齿面粗糙度

Fig. 17 Tooth surface roughness at energy density of 5.255 J/cm^2

通过改变飞秒激光的能量密度、功率、激光能量参数发现,在能量密度为 1.730 J/cm^2 、功率为 1.9 W 、激光能量为 $19 \mu\text{J}$ 时加工材料表面的粗糙度最低,为 $0.265 \mu\text{m}$ 。伴随能量密度的增加粗糙度并不是持续降低,过大的能量密度会导致粗糙度增加,但会一直保持在样本原始粗糙度 ($0.902 \mu\text{m}$) 之下。

5 结 论

研究了飞秒激光精微加工面齿轮过程中材料成分互温感应和光子-电子-晶格系统的相互耦合作用,建立了能量耦合模型,模拟分析了飞秒激光修正面齿轮表面电子和晶格温度的变化规律。实验结果表明,随着能量密度的逐渐增大,电子温度迅速升高且远大于晶格温度,烧蚀线的宽度和深度也在逐渐增加。当电子和晶格的温度达到面齿轮材料的气化温度时,烧蚀线的周围较为平整,没有发生热扩散等热效应,也没有对烧蚀线周围产生损伤。在能量密度为 1.730 J/cm^2 、功率为 1.9 W 、激光能量为 $19 \mu\text{J}$ 时可以获得最低的粗糙度,为 $0.265 \mu\text{m}$ 。能量密度的持续增加也会使粗糙度缓慢增加,但在一定范围内

依旧低于未加工前材料的粗糙度。这表明针对面齿轮材料的烧蚀特性,选择合适的加工参数,能有效降低粗糙度,为提高面齿轮的加工质量提供了一定参考。

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] Fleischer R L, Price P B, Walker R M. Ion explosion spike mechanism for formation of charged-particle tracks in solids[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(11): 3645-3652.
- [3] Hashida M, Mishima H, Tokita S, et al. Non-thermal ablation of expanded polytetrafluoroethylene with an intense femtosecond-pulse laser[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 13116-13121.
- [4] Momma C, Chichkov B N, Nolte S, et al. Short-pulse laser ablation of solid targets[J]. Optics Communications, 1996, 129(1/2): 134-142.
- [5] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices[J]. Nature, 2001, 412(6848): 697-698.
- [6] Liu X, Du D, Mourou G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(10): 1706-1716.
- [7] Horvath C, Braun A, Liu H, et al. Compact directly diode-pumped femtosecond Nd: glass chirped-pulse-amplification laser system[J]. Optics Letters, 1997, 22(23): 1790-1792.
- [8] Jiang L, Tsai H L. Improved two-temperature model and its application in ultrashort laser heating of metal films[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(10): 1167-1173.
- [9] Jiang L, Tsai H L. Plasma modeling for ultrashort pulse laser ablation of dielectrics[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(2): 023116.
- [10] Zhang Y L, Sun S F, Wang X, et al. Research on quality of micro-holes fabricated by laser drilling[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1900002.
- [11] Zeng Z P, Wang Y R, Yang Z R. 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. 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.
- [12] Tian M Y, Zuo P, Liang M S, et al. Femtosecond laser processing of low-dimensional nanomaterials and its application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202004.
- 田梦瑶, 左佩, 梁密生, 等. 飞秒激光加工低维纳米材料及应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202004.
- [13] Metzner D, Lickschat P, Weißmantel S. Laser micromachining of silicon and cemented tungsten carbide using picosecond laser pulses in burst mode: ablation mechanisms and heat accumulation[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(7): 1-8.
- [14] Liang M S, Li X, Wang M M, et al. Spatially-shaped femtosecond laser manufacturing of microgrooves in metals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202003.
- 梁密生, 李欣, 王猛猛, 等. 空间整形飞秒激光加工金属微细槽实验研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202003.
- [15] Leitz K H, Redlingshöfer B, Reg Y, et al. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 230-238.
- [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 Y. Heat accumulation in high repetition rate femtosecond laser micromachining and its applications [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 15.
- 李毅. 高重复频率飞秒激光微纳加工中热效应的研究及应用[D]. 天津: 天津大学, 2012: 15.
- [19] Anisimov S I, Rethfeld B. Theory of ultrashort laser pulse interaction with a metal[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3093: 192-203.
- [20] Ren Y P, Chen J K, Zhang Y W. Optical properties and thermal response of copper films induced by ultrashort-pulsed lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(11): 113102.
- [21] 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: Applications*, 2017, 71(2): 128-136.
- [22] 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): 33-37.
- 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): 33-37.
- [23] Sun C W. Laser irradiation effect[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [24] Billings B H, Frederikse H P R. American institute of physics handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [25] 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.
- [26] Fang R R. Study on the dynamics of target ablation by high energy laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- 方然然. 高能激光烧蚀靶的动力学研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [27] 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.