

多脉冲飞秒激光精修面齿轮的烧蚀形貌研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.02.004

明兴祖^{1,2} 贾松权¹
李 湾³ 周 贤¹
黎 超⁴ 袁 磊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
3. 湖南汽车工程职业学院
机电工程学院
湖南 株洲 412000
4. 株洲齿轮有限责任公司
技术中心
湖南 株洲 412007

摘 要: 针对材质为 18Cr2Ni4WA 的面齿轮, 采用飞秒脉冲激光烧蚀来提高其表面质量。建立电子-自旋-晶格三温复耦合模型, 预测分析面齿轮材料电子、自旋和晶格单脉冲能量效应下的温度变化过程; 结合多脉冲能量累积效应, 进行面齿轮材料在激光能量密度为 $1.035\sim 5.252\text{ J/cm}^2$ 下烧蚀凹坑直径和深度演变规律的预测与实验分析。研究结果表明: 脉冲数的增加并不会持续增大面齿轮表面的平衡温度, 基本在 30 个脉冲时就保持不变; 能量密度的增加会使烧蚀凹坑直径和深度持续变大, 但变大的速率会持续降低; 烧蚀凹坑形貌在能量密度为 2.467 J/cm^2 时最好; 过大的扫描道间距会使被加工表面粗糙度值增加, 扫描道间距为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 时粗糙度值最低为 $0.185\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词: 飞秒激光; 三温耦合; 能量累积; 凹坑形貌; 粗糙度

中图分类号: TN249

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2023)02-0023-11

引文格式: 明兴祖, 贾松权, 李 湾, 等. 多脉冲飞秒激光精修面齿轮的烧蚀形貌研究 [J]. 包装学报, 2023, 15(2): 23-33.

1 研究背景

面齿轮具有传动平稳、承载能力强和传动速度快等特性, 被广泛应用于航空航天、工程机械、大型精密装备等领域^[1]。面齿轮为一种曲面齿形, 传统的加工方法并不能满足面齿轮表面质量要求, 而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, 研究面齿轮的新型加工方法已迫在眉睫。飞秒脉冲激光具有热影响区域小、脉冲宽度窄和峰值温度高等特点, 能精确去除目标材料以满足面齿轮表面质量要求, 已被广泛应用于各种精密加工领域。

目前, 有关单脉冲激光烧蚀金属的研究较多。

Zhou C. 等^[2]通过改变平均激光功率、光斑重叠比和扫描轨迹重叠率, 探讨了单脉冲皮秒和 100 ns 脉冲激光清洗铝合金的特性。结果表明, 在相同平均功率下, 纳秒激光烧蚀深度大于皮秒激光; 为获得相同表面质量, 纳秒激光器需要比皮秒激光器更高的重叠率; 高重叠率导致纳秒激光清洗效率远低于皮秒激光。Chu K. P. 等^[3]提出了一种通过飞秒激光器单脉冲多次扫描提高烧蚀镍效率的方法。实验结果表明, 当总处理时间相同时, 与低扫描速度相比, 较高的扫描速度和更多的扫描次数将促进烧蚀镍形成的凹槽深度增加。王运龙等^[4]通过分析单脉冲激光功率、频率、扫描速率及加工路径等工艺参数对腔体刻蚀速

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975192); 湖南省教育厅科学研究基金资助优秀青年项目 (22B0994); 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ30214、2021JJ50042); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队项目 (T201919)

作者简介: 明兴祖 (1964-), 男, 湖南常德人, 湖北文理学院、湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事激光精微加工理论与技术研究, E-mail: mxz9036@126.com

率、腔体底部粗糙度的影响规律。阐述激光加工遍数与刻蚀深度的线性关系,测试腔体底部的平面度,获得了预定深度的腔体结构。高永强等^[5]理论分析了各种作用机理中相关工艺参数的作用,并针对不同的工艺参数进行测试,综合分析各个工艺参数在刻蚀过程中对刻蚀质量的影响。结果表明,单个激光脉冲的功率密度和频率对槽深和槽宽影响最大,单个激光脉冲的功率密度和扫描速度对槽的成形质量影响最大。王靖^[6]针对 TC 钛合金材料,利用 COMSOL Multiphysics 软件建立电子-晶格温度模型,模拟分析了单脉冲激光表面形貌,并分析了不同能量密度下钛合金表面的烧蚀情况。

在有关多脉冲激光烧蚀金属的研究中,国内外也有了丰富的研究成果。岳端木等^[6]通过飞秒激光微加工镍钛合金,计算了不同激光扫描速度下的烧蚀阈值,并分析了多脉冲的累积效应对镍钛合金烧蚀阈值的影响规律。王佳敏等^[8]开展了 532 nm 皮秒脉冲激光烧蚀单晶硅的损伤效应实验研究。测定了损伤阈值,明确了损伤机理并探讨了低通量下的脉冲累积效应,得到了多脉冲的累积效应可以降低单晶硅激光损伤阈值的结论。Hu F. F. 等^[9]研究了多脉冲皮秒激光对铜的烧蚀特性,将烧蚀材料的热导率设置为 0,从而实现了材料去除。王震等^[10]从双温方程入手,研究了多脉冲飞秒激光的烧蚀效应,分析了单脉冲飞秒激光烧蚀金属铁的温度变化规律,得到了在 3 个脉冲连续作用下,激光能量密度、激光脉冲宽度、激光脉冲时间间隔对电子/晶格温度变化规律的影响。Wang H. 等^[11]提出了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。蔡颂等^[12]建立多脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的传热物理模型与降温传热物理模型,对脉冲激光修整青铜金刚石砂轮石墨变质层进行了研究。王文豪等^[13]提出一种基于 Bézier 曲面分割法的光斑重叠率补偿方法,通过研究平均功率、扫描速度、离焦量对 TN85 金属陶瓷激光刻蚀深度和宽度的影响,确定优化参数,实现了激光二维振镜对曲面螺旋刻槽深度可控的高精加工。

本文针对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA,建立了由电子、自旋与晶格 3 个热传导模块组成的有限元模型,结合能量累积效应,分析不同能量密度下能量累积结果,并通过不同激光扫描参数研究面齿轮形貌变化的

规律。

2 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的三温传热过程与建模

2.1 金属烧蚀传热物理模型

飞秒脉冲激光作用面齿轮的时间极短,小于面齿轮温度达到平衡所需要的时间。金属材料受飞秒激光辐射后,会在皮秒量级发生自旋温度的升高,从而发生电子的超快退磁和磁化的恢复现象,这影响温度的平衡方式和平衡时间。传统的双温方程展示了脉冲激光烧蚀面齿轮时电子与晶格随时间的温度变化,并不能对退磁效应做出解释。在双温模型的基础上引入电子的自旋温度,与传统的电子温度和晶格温度组成三温模型,可解释这种现象。飞秒脉冲激光作用面齿轮的三温模型^[14],可划分为 3 个过程,如图 1 所示。第一过程为飞秒激光辐射在面齿轮表面,先促使电子场直接与电子系统相联系;第二过程为自旋系统的动态特性,在此过程中能量可以从热电子系统转移到低温自旋系统,并伴随着自旋温度上升,通过自旋反转过程的电子系统耦合来表现;第三过程为受激自旋系统通过电子-晶格耦合弛豫机理与晶格系统相联系,将温度传递到晶格系统。由于电子-晶格耦合时间比电子-自旋耦合时间长,所以自旋系统将被晶格系统冷却。三温模型能量转移的动力由电子温度、自旋温度和晶格温度的不同引起。

2.2 三温传热数学模型

根据傅里叶热传导定律,可以得到电子系统、自旋系统和晶格系统的三温控制方程如下^[15]:

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = -g_{es}(T_e - T_s) - g_{el}(T_e - T_l) + S(r, z, t), \quad (1)$$

$$C_s(T_s) \frac{\partial T_s}{\partial t} = g_{es}(T_e - T_s) - g_{sl}(T_s - T_l), \quad (2)$$

$$C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial t} = g_{el}(T_e - T_l) + g_{sl}(T_s - T_l). \quad (3)$$

式中: T_e 、 T_s 、 T_l 分别为电子、自旋和晶格随时间变化的温度;

C_e 、 C_s 、 C_l 分别为电子、自旋与晶格单位体积的比热容,其中在一定的温度范围内 C_l 在 5% 内变动,因此将 C_l 设为常数^[16];

$S(r, z, t)$ 为激光热源项, r 为几何模型中任意位置到激光束轴的距离, z 为到顶面的穿透深度, t 为

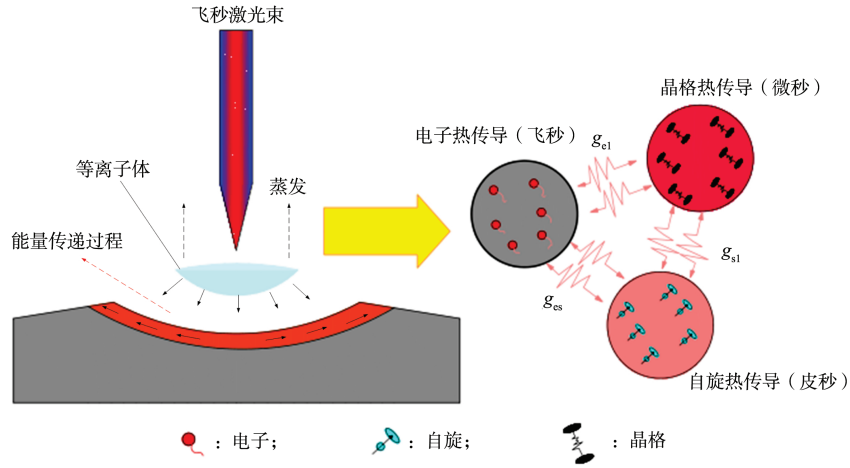


图1 烧蚀传热物理模型

Fig. 1 Physical model of ablative heat transfer

时间;

g_{es} 、 g_{el} 、 g_{sl} 分别为电子-自旋系统、电子-晶格系统和自旋-晶格系统的耦合系数,用于描述电子系统到自旋和晶格的能量转换率。

由于激光脉宽极短 (10^{-15} s), 电子的热传导比较缓慢, 因此电子的热传导忽略不计^[17]。用有限差分法将三温方程差分格式整理为^[14]

$$\begin{cases} T_e = [-g_{es}(T_e - T_s) - g_{el}(T_e - T_l) + S] / C_e, \\ T_s = [g_{es}(T_e - T_s) - g_{sl}(T_s - T_l)] / C_s, \\ T_l = [g_{el}(T_e - T_l) + g_{sl}(T_s - T_l)] / C_l. \end{cases} \quad (4)$$

激光热源项 $S(r, z, t)$ 表达式^[17] 为

$$S(r, z, t) = \frac{F_0 \exp[-2 \times (r/r_0)^2]}{\tau_p} (1-R) \alpha_b \cdot \exp(-\alpha_b z) \exp[-4 \ln 2 \times (t/\tau_p - 1)^2], \quad (5)$$

式中: F_0 为光束中心处能量密度;

r_0 为光斑半径, 用常数表示;

τ_p 为脉冲宽度;

R 为材料的反射率;

α_b 为材料的吸收系数。

当电子温度 T_e 小于费米温度时, 电子热导率可近似为^[19]

$$k_e = k_0 \frac{T_e}{T_l}, \quad (6)$$

式中 k_0 为室温下的电子热导率。

但是, 当 T_e 超过费米温度^[20] 时, 应使用式 (7) 计算 k_e 。

$$k_e = k \frac{(\theta_e^2 + 0.16)^{1.25} (\theta_e^2 + 0.44) \theta_e}{(\theta_e^2 + 0.092)^{0.5} (\theta_e^2 + \beta \theta_l)}, \quad (7)$$

式中: k 、 β 均为常数;

$\theta_e = T_e/T_f$, $\theta_l = T_l/T_f$, 其中 T_f 为费米温度, 用常数表示。

根据 Chen J. K. 等^[21] 的研究结果, 电子热容可以近似为

$$C_e = \begin{cases} B_e T_e, & T_e < T_f/\pi^2; \\ 2B_e T_e/3 + C'_e/3, & T_f/\pi^2 \leq T_e < 3T_f/\pi^2; \\ Nk_B + C'_e/3, & 3T_f/\pi^2 \leq T_e < T_f; \\ 3Nk_B/2, & T_e \geq T_f. \end{cases} \quad (8)$$

$$C'_e = \frac{B_e T_f}{\pi^2} + \frac{3Nk_B/2 - B_e T_f/\pi^2}{T_f - T_f/\pi^2} \left(T_e - \frac{T_f}{\pi^2} \right). \quad (9)$$

式中: B_e 为电子的比热容系数;

k_B 为玻尔兹曼常数;

N 为自由电子密度。

2.3 激光能量累积效应

飞秒激光连续作用过程中, 前一个脉冲激光烧蚀材料后累积的能量, 转化为后一个脉冲激光烧蚀的初始值, 从而逐渐累积能量。激光频率是能量累积效应的重要参数, 影响脉冲激光烧蚀材料后的热扩散时间。不同的激光频率使材料在每一个脉冲中累积的能量不同。值得注意的是, 过低的激光频率会使材料在下一个脉冲激光烧蚀前达到平衡温度而达不到能量的累积效应。只有在较高的激光频率时, 材料中的能量才会在下一个脉冲激光烧蚀前未完全扩散, 从而达到能量的累积效应。由于单个脉冲激光束的烧蚀强度

具有高斯分布, 因此单个脉冲激光束上的烧蚀强度可表示为

$$F(r) = F_0 \exp\left[-2 \times (r/r_0)^2\right]. \quad (10)$$

考虑峰值功率强度恒定的多线扫描的横向位移方向 (x 方向), 多个脉冲激光累积烧蚀强度可以表示为

$$F_{\text{sum}}(x) = F_0 \sum_{i=0}^{M-1} \exp\left[-2(x-i \times \Delta x)^2 / r_0^2\right], \quad (11)$$

式中: M 为加工区域中激光扫描路径的数量;

x 为激光中心的横坐标;

Δx 为扫描道间距。

3 飞秒激光烧蚀模型求解与仿真分析

使用 COMSOL 软件求解飞秒激光烧蚀面齿轮的模型方程 (1) ~ (3) 时, 边界条件设置为 297 K, 被加工材料表面为对流空气冷却。由于面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的激光实验研究较少, 缺少可供参考的材料特性参数, 尝试参考金属铁的材料特性参数^[10], 如表 1 所示。

表 1 面齿轮飞秒激光预测参数

Table 1 Femtosecond laser prediction parameters of face gear

参 数	取值
激光半径 $r_0/\mu\text{m}$	20
激光波长 λ/nm	1030
自旋热容 $C_s/[\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})]$	5.9×10^6
晶格热容 $C_l/[\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})]$	3.6×10^6
反射率 R	0.64
穿透深度 δ/nm	11
面齿轮厚度 $d/\mu\text{m}$	40
重复频率 f/kHz	200
气化温度 T_v/K	3023
脉冲宽度 τ_p/fs	800
电子 - 自旋耦合系数 $g_{es}/[\text{W} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})]$	2×10^{18}
电子 - 晶格耦合系数 $g_{el}/[\text{W} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})]$	3×10^{18}
自旋 - 晶格耦合系数 $g_{sl}/[\text{W} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})]$	1×10^{18}
透光率 T_t	0.092
吸收系数 α_0/m^{-1}	4.97×10^7
材料密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7800
费米温度 T_f/K	1.28×10^5
熔化温度 T_m/K	1724

在单脉冲激光作用下, 激光能量密度分别为 1.035 J/cm² 和 5.252 J/cm² 时, 面齿轮表面电子温度 T_e 、自

旋温度 T_s 和晶格温度 T_l 在 30 ps 时间内的温度演变过程如图 2 所示。

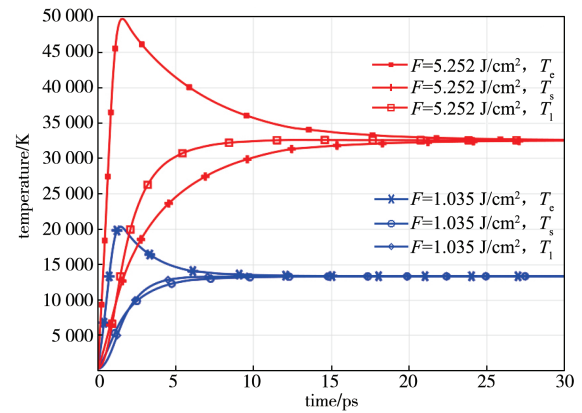


图 2 激光作用 30 ps 内温度 T_e 、 T_s 、 T_l 的演变过程

Fig. 2 Evolution of temperature T_e , T_s and T_l in 30 ps under laser irradiation

由图 2 可知, 激光到达面齿轮材料表面时, 电子系统的温度在飞秒量级内急剧升高并远大于自旋系统温度和晶格系统温度; 然后热电子通过电子 - 自旋系统将部分能量传递给自旋系统, 导致自旋系统温度在亚皮秒量级时间内快速升高, 自旋系统温度升高导致宏观磁化强度减小, 即发生超快退磁现象; 最后随着电子 - 晶格和自旋 - 晶格系统的耦合作用, 电子和自旋的能量共同向晶格传递, 且电子 - 晶格耦合时间比电子 - 自旋耦合时间长, 晶格系统温度在皮秒量级内超过自旋系统。

图 2 还表明, 随着能量密度的增加, 电子峰值温度升高, 且电子、自旋和晶格系统的平衡温度也升高, 温度达到平衡的弛豫时间随之变长。在进行多脉冲激光能量累积预测研究时, 使用 1.035 J/cm² 和 5.252 J/cm² 的激光能量密度为宜。

激光能量密度分别为 1.035 J/cm² 和 5.252 J/cm², 激光作用 30 个脉冲时, 面齿轮表面温度演变过程如图 3 所示。

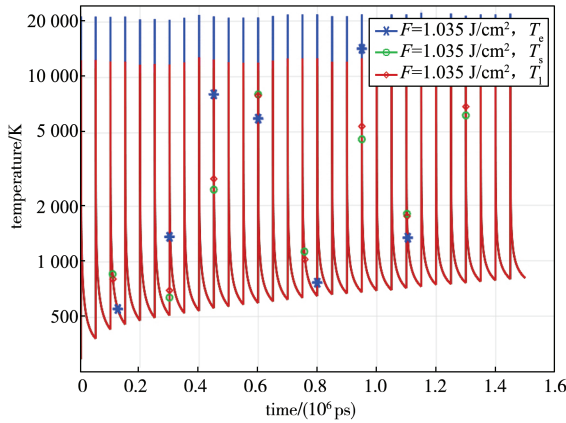
由图 3 可知, 面齿轮表面温度随着激光脉冲烧蚀反复的升温、降温, 但不会使平衡温度持续升高, 基本在第 30 个脉冲时就保持不变。能量累积效应的平衡温度随激光能量密度的变化而变化, 当能量密度为 1.035 J/cm² 时, 最高平衡温度为 807.5 K; 当能量密度为 5.252 J/cm² 时, 面齿轮表面最高平衡温度为 2903.6 K。相对于较低能量密度来说, 高能量密度的累积效应更明显, 容易在较低的脉冲数时达到平衡温度; 这是因为在较低能量密度下, 单个脉冲产生的能

量较少, 在相同的脉冲宽度内比高能量密度向环境耗散的能量比例较高。

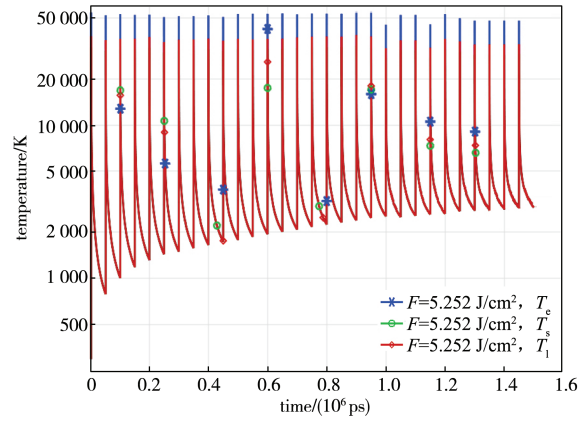
激光能量密度分别为 1.035 J/cm^2 和 5.252 J/cm^2 , 脉冲数为 30 时, 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的二维晶格温度分布如图 4 所示。

由表 1 可知, 面齿轮气化温度为 3023 K 。温度高于 3023 K 的晶格区域发生烧蚀被去除, 温度低于 3023 K 的晶格区域未被温度场耦合烧蚀去除, 即出现烧蚀凹坑剖面图, 再使用 COMSOL 软件中测量工

具可分别测量出烧蚀凹坑直径和深度。图 4a 表明激光能量密度为 1.035 J/cm^2 时, 烧蚀凹坑直径和深度分别为 $34.958 \mu\text{m}$ 和 $5.624 \mu\text{m}$; 图 4b 表明激光能量密度为 5.252 J/cm^2 时, 烧蚀凹坑直径和深度分别为 $51.440 \mu\text{m}$ 和 $8.692 \mu\text{m}$ 。随着能量密度的增加, 晶格径向宽度和轴向深度逐渐增大, 晶格温度仍旧沿着径向和轴向逐步降低, 且径向和轴向的热影响区域均仅有几微米, 说明激光进行多脉冲烧蚀面齿轮时热影响小, 对烧蚀材料周围作用不大。



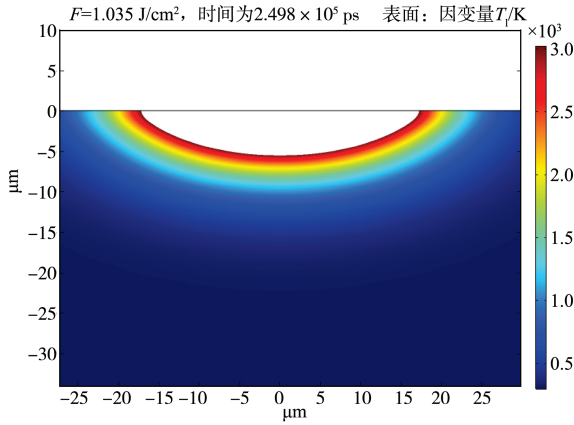
a) 激光能量密度为 1.035 J/cm^2



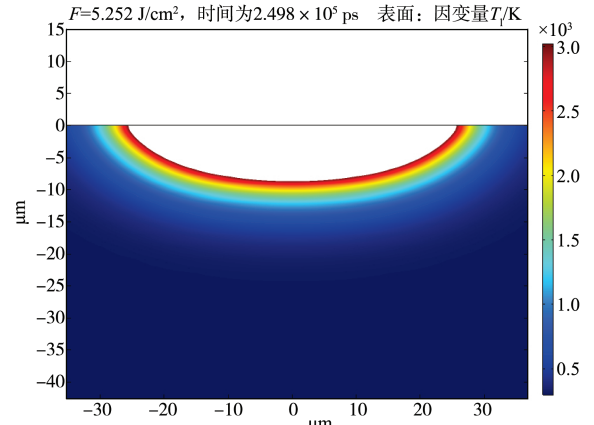
b) 激光能量密度 5.252 J/cm^2

图 3 不同能量密度激光作用 30 个脉冲下, 温度 T_e 、 T_s 、 T_l 的演变过程

Fig. 3 The evolution of temperature T_e 、 T_s and T_l under 30 pulses of laser with different energy densities



a) $F=1.035 \text{ J/cm}^2$



b) $F=5.252 \text{ J/cm}^2$

图 4 不同能量密度下激光作用 30 个脉冲时晶格温度分布

Fig. 4 Lattice temperature distribution under 30 pulses of laser with different energy densities

图 5 所示为激光扫描路径示意图, 图中, r_0 为光斑半径, Δy 为两相邻光斑距离, Δx 为两相邻扫描路径之间的扫描道间距, 激光束以正入射并聚焦在面齿轮齿面。两相邻光斑距离 Δy 计算公式为

$$\Delta y = v_y / f, \quad (12)$$

式中: v_y 为激光扫描速度, mm/s ;
 f 为激光脉冲频率, kHz 。



彩图

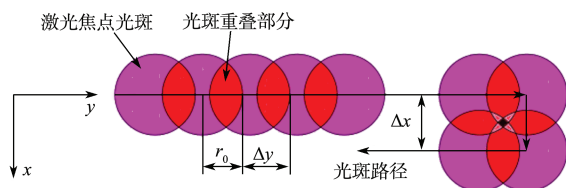


图 5 激光扫描路径示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser scanning path

4 实验分析

4.1 面齿轮实验样品与飞秒激光加工系统

面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 具有极好的强韧性和淬透性，被广泛应用于大功率柴油发动机、特种车变速箱等特殊工况传动机构^[12]。它的主要化学成分为金属铁（Fe），其余化学成分如表 2 所示。

表 2 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 化学成分

Table 2 Chemical composition of face gear material

18Cr2Ni4WA

成分	Ni	Cr	W	Mn	Si	C	Cu	P	S
质量分数 /%	4.190	1.490	0.890	0.370	0.240	0.180	0.100	0.012	0.011

面齿轮实物图如图 6 所示，其齿数为 60，压力角为 20° ，模数为 3.5，面齿轮外半径为 120 mm，面齿轮内半径为 102.5 mm，齿宽为 17.5 mm。加工面齿轮样品先用酒精擦拭干净后，安装在飞秒激光加工系统的四轴移动平台上。

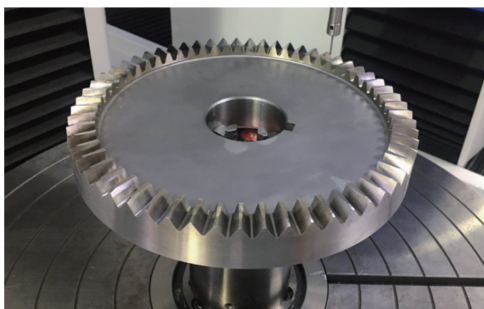


图 6 飞秒激光加工面齿轮实物图

Fig. 6 Picture of femtosecond laser machining surface gear

使用飞秒激光加工系统加工面齿轮时，设置好参数，在面齿轮上进行扫线激光实验。飞秒激光加工系统如图 7 所示，该系统主要由计算机、飞秒激光器、光栅、反射镜、激光扩束器、三维振镜系统、电荷耦合器件（charge coupled device, CCD）监测系统、测距仪、反射镜、远心场镜、四轴移动平台、照明系统、和吹风系统等部分组成。其中激光器为

FemtoYL-100 工业飞秒激光器，激光的波长为 1030 nm，脉宽为 800 fs，重复频率为 200 kHz。脉冲的数量由激光器控制操作平台控制，通过电荷耦合器件（CCD）监测系统连续监控制造过程。采用形状测量激光显微系统（VK-X260K）对面齿轮齿面的表面特性进行了测量。

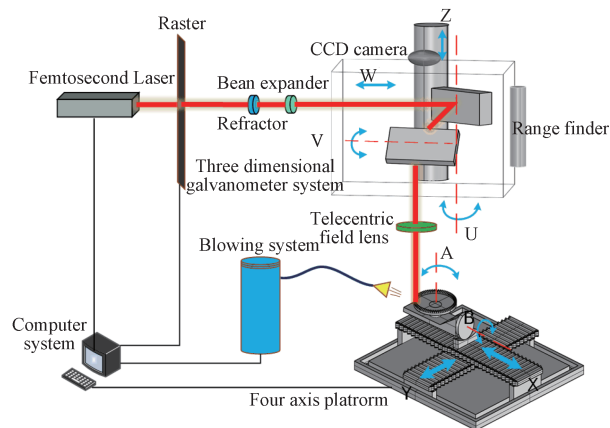


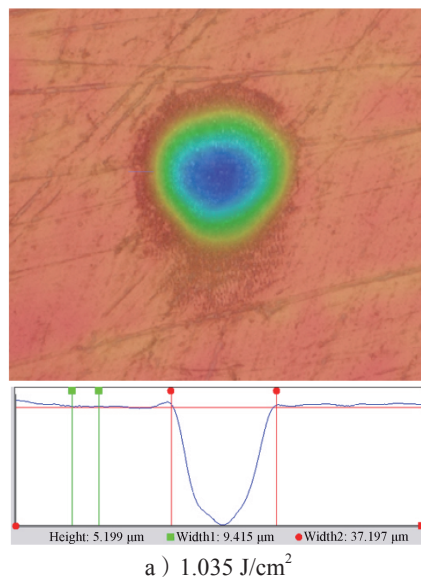
图 7 飞秒激光加工系统

Fig. 7 Femtosecond laser processing system

4.2 多脉冲激光烧蚀凹坑实验

飞秒激光扫描面齿轮后，采用 Motic images Plus 3.0 软件，在三维超景深显微镜获得的图像上拟合，进行面齿轮齿面上烧蚀凹坑直径和深度的测量。激光能量密度分别为 1.035 J/cm^2 和 5.252 J/cm^2 ，30 个脉冲时观测的烧蚀凹坑形貌图像如图 8 所示。

由图 8 可知，当能量密度为 1.035 J/cm^2 时，凹坑形貌较好，并无明显熔融物残留，凹坑直径与深度分别为 $37.197 \mu\text{m}$ 和 $5.199 \mu\text{m}$ 。当能量密度为



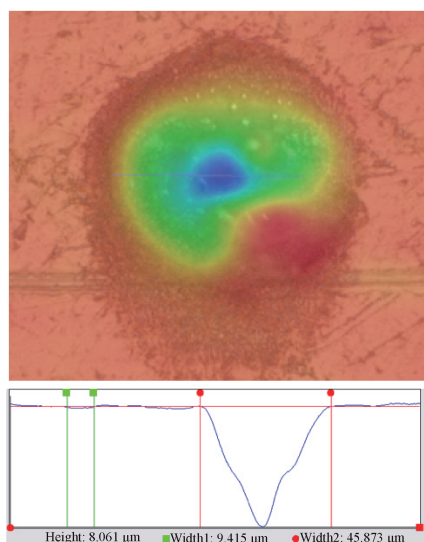
b) 5.252 J/cm²

图8 不同能量密度下的烧蚀凹坑形貌
Fig. 8 Morphology of ablative pits at different energy densities



彩图

5.252 J/cm² 时, 凹坑形貌不规整, 凹坑内有类似于波峰的形状, 且有明显的熔融物残留; 与能量密度为 1.035 J/cm² 时的相比, 凹坑直径和深度均有所增加, 分别为 45.873 μm 和 8.061 μm。这是因为当激光能量密度比较大时, 短时间内传递给面齿轮的能量增多, 相爆炸区域变大, 凹坑深度增加, 导致一些熔融物不能及时随爆炸排出坑内而形成这种形貌。

不同能量密度下, 烧蚀凹坑的预测值和实验值对比如表 3 所示。

表3 烧蚀凹坑预测值和实验值对比

Table 3 Comparison of predicted and experimental values of ablative pits

能量密度 / (J·cm ⁻²)	凹坑直径			凹坑深度		
	预测值 / μm	实验值 / μm	相对 误差 /%	预测值 / μm	实验值 / μm	相对 误差 /%
1.035	34.985	37.197	5.9%	5.624	5.199	8.2%
2.467	44.534	43.477	2.4%	7.545	6.517	15.8%
3.899	48.858	45.504	7.4%	8.299	7.141	16.2%
4.506	50.122	46.519	7.7%	8.495	7.622	11.5%
5.252	51.440	45.873	12.1%	8.692	8.061	7.8%

由表可知, 随着能量密度的增加, 烧蚀凹坑的直径和深度也在增加。不同的是烧蚀凹坑直径和深度的实验值大多比预测值小, 这是因为在预测中超过面齿轮气化温度 (3023 K) 的材料被去除, 低于气化温度的材料被保留; 而在凹坑实验中, 达到熔化温度 (1724

K) 但未达到气化温度的材料 (熔融物等) 会随着激光烧蚀脱离初始位置, 不会完全随激光烧蚀而脱离烧蚀凹坑, 可能会附着在凹坑底部或坑壁, 从而形成这种误差。相对误差均不超过 16.2%, 证明了预测的合理性, 预测结果可为探究不同能量密度下烧蚀凹坑的直径和深度提供理论参考。

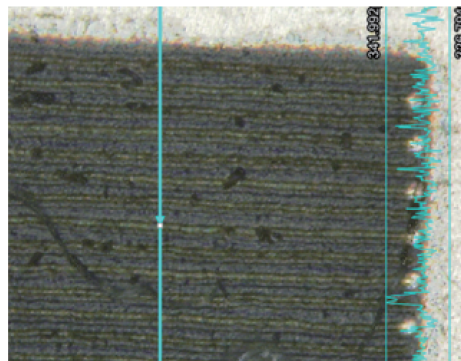
4.3 多脉冲激光烧蚀齿面粗糙度分析

通过三维超景深显微图像可知, 能量密度为 2.467 J/cm² 时烧蚀凹坑有较好的形貌, 并无明显熔融物残留, 因此选用 2.467 J/cm² 的激光能量密度进行脉冲扫描面实验。激光扫描速度影响光斑重叠部分的大小, 扫描道间距 Δz 的大小影响相邻扫描道之间的距离。为了研究扫描道间距 Δz 对齿面粗糙度的影响, 以不同的 Δz 进行研究。

图 9 为激光能量密度为 2.467 J/cm²、扫描速度为 100 mm/s、扫描道间距 Δz 分别为 25, 35, 45 μm 的扫描实验图像。

由图 9 可知, 当 $\Delta z=25 \mu\text{m}$ 时, 齿面加工表面质量良好, 并无明显异物残留; 当 $\Delta z=35 \mu\text{m}$ 和 $\Delta z=45 \mu\text{m}$ 时, 两相邻扫描道间距逐渐增大, 条纹状密度降低, 且扫描道间有类似熔融物堆积。这是因为脉冲激光为高斯激光, 呈抛物线的形状, 过大的扫描道间距并不能使扫描道之间的材料完全烧蚀, 一些熔融物会堆积在扫描道之间, 从而形成这种形貌, 造成表面质量降低。

采用德国生产的表面轮廓仪 Hommel Werke T8000 测量面齿轮齿面粗糙度。测量时, 取样长度为 0.25 mm, 探针的移动速度为 0.5 mm/s, 凹面和凸面上的测试长度均为 1.5 mm。测量 3 次, 并通过计算机软件生成的粗糙度检测报告观测出具体的粗糙度值, 取其平均值作为实验的表面粗糙度值。图 10 为面齿轮齿面未被加工时粗糙度。

a) $\Delta z=25 \mu\text{m}$

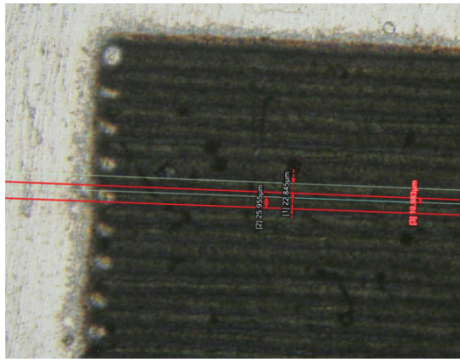
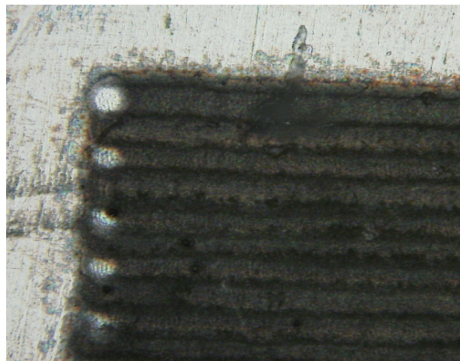
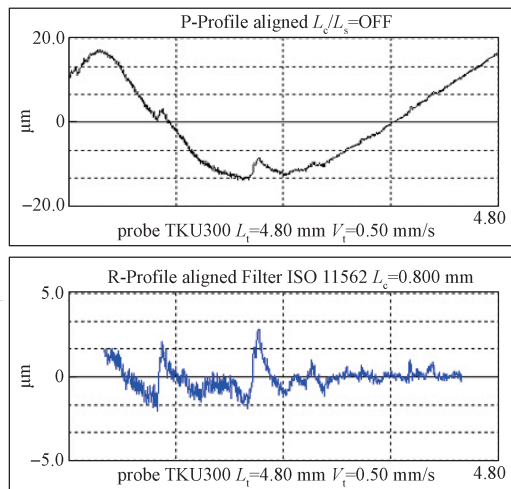
b) $\Delta z=35 \mu\text{m}$ c) $\Delta z=45 \mu\text{m}$

图9 不同扫描道间距下三维超景深图像

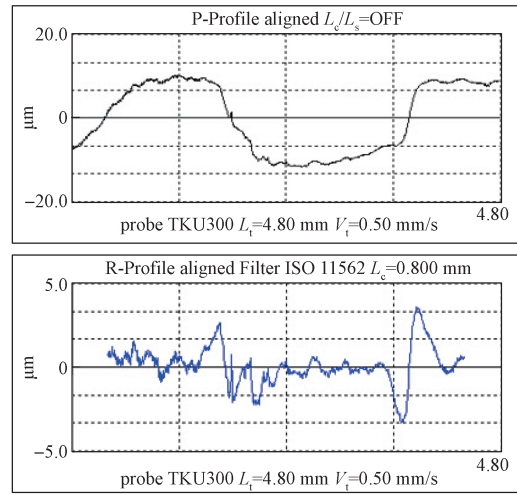
Fig. 9 Three-dimensional super-depth-of-field images with different scanning track spacing

图10a表明最大粗糙度为 $0.773 \mu\text{m}$; 图10b表明最小粗糙度为 $0.506 \mu\text{m}$ 。

对图9中3个被加工后齿面进行粗糙度测量, 并通过粗糙度检测报告观测出具体的粗糙度值如图11所示。



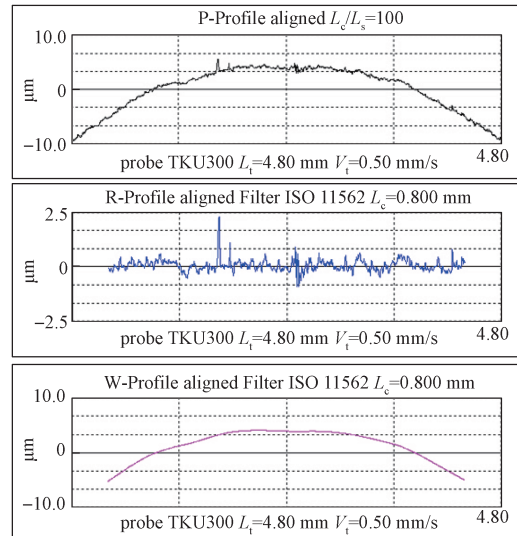
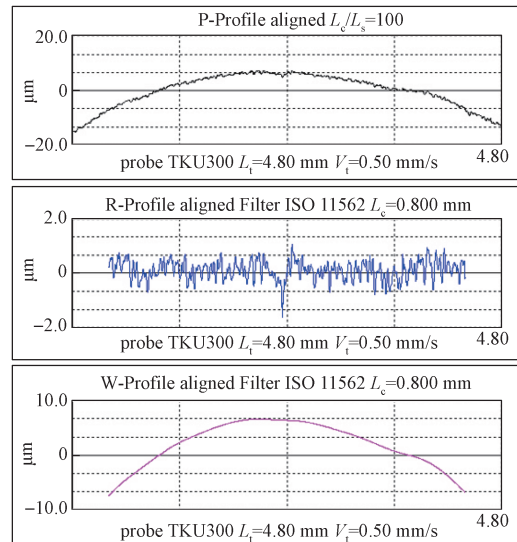
a) 最大粗糙度

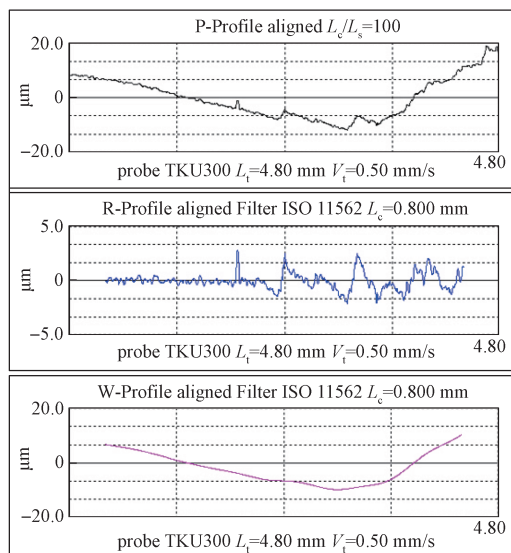


b) 最小粗糙度

图10 齿面被加工前粗糙度

Fig. 10 Roughness of tooth surface before machining

a) $\Delta z=25 \mu\text{m}$ b) $\Delta z=35 \mu\text{m}$



c) $\Delta z=45 \mu\text{m}$

图 11 不同扫描道间距下被加工后齿面粗糙度

Fig. 11 Roughness of machined tooth surface under different spacing of scanning track

由图 11 可知, 扫描道间距 Δz 分别为 25, 35, 45 μm 时, 测得粗糙度值分别为 0.185, 0.295, 0.549 μm 。这表明, 随着扫描道间距的增加, 被加工齿面的粗糙度也增加, 其中 Δz 为 35 μm 时齿面粗糙度值比 Δz 为 25 μm 的增加了 0.110 μm , 而 Δz 为 45 μm 时齿面粗糙度值比 Δz 为 35 μm 的增加了 0.254 μm , 并且 Δz 为 45 μm 时齿面粗糙度值大于被加工前。因为激光半径为 20 μm , 而 Δz 为两相邻扫描道中心点的距离, 当 Δz 为 45 μm 时两相邻扫描道间距超过了激光作用半径, 使两相邻扫描道间材料不能被完全烧蚀而成堆积熔融物。这说明扫描道间距的增大虽然加快了面齿轮加工效率, 但过大的扫描道间距会引起被加工齿面粗糙度值的增加, 甚至超过加工前齿面粗糙度值。

5 结论

基于脉冲激光作用对面齿轮电子-自旋-晶格的相互耦合作用进行了能量密度为 1.035~5.252 J/cm^2 的仿真计算, 研究了多脉冲飞秒激光精微烧蚀面齿轮 18Cr2Ni4WA 时, 面齿轮的温度场演变规律和能量温度分布, 并结合实验以凹坑形貌和粗糙度值为基准, 得出最佳激光能量密度和扫描道间距, 可得如下结论:

1) 激光作用 30 个脉冲时面齿轮材料表面能量累

积效应的平衡温度趋于平稳。

2) 随着激光能量密度的增加, 多脉冲激光烧蚀面齿轮凹坑的直径和深度也会增加, 增加速率会持续变小, 且形貌逐渐变差。激光能量密度为 2.467 J/cm^2 时烧蚀凹坑形貌最好。

3) 脉冲激光扫面时, 过大的扫描道间距会引起加工后齿面粗糙度增大, Δz 为 25 μm 时粗糙度值最小为 0.185 μm 。

参考文献:

- [1] 李 湾, 刘海渔, 谭立志, 等. 面齿轮磨削齿面力热耦合及残余应力研究 [J]. 包装学报, 2021, 13(6): 10-18.
LI Wan, LIU Haiyu, TAN Lizhi, et al. Research on Thermo-Mechanical Coupling and Residual Stress on Tooth Surface of Face Gear Grinding[J]. Packaging Journal, 2021, 13(6): 10-18.
- [2] ZHOU C, LI H G, CHEN G Y, et al. Effect of Single Pulsed Picosecond and 100 Nanosecond Laser Cleaning on Surface Morphology and Welding Quality of Aluminium Alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106197.
- [3] CHU K P, LIU Z P, GUO B S. High-Efficient Ablation of Nickel Through Multiple Scanning of Femtosecond Laser Single Pulse[C]//2021 International Conference on Laser, Optics and Optoelectronic. Xi'an: SPIE, 2021, 11885: 1188506.
- [4] 王运龙, 郭育华, 魏晓旻, AlN 陶瓷腔体的激光加工和芯片埋置工艺 [J]. 电子工艺技术, 2022, 43(1): 14-17, 45.
WANG Yunlong, GUO Yuhua, WEI Xiaomin. Technology on Laser Machining and Chip Embedding of AlN Ceramic Cavity[J]. Electronics Process Technology, 2022, 43(1): 14-17, 45.
- [5] 高永强, 史兴隆. 紫外激光刻蚀单晶硅片工艺的试验研究 [J]. 应用激光, 2021, 41(5): 974-978.
GAO Yongqiang, SHI Xinglong. Experimental Research on Monocrystalline Silicon Etching by Using UV Laser[J]. Applied Laser, 2021, 41(5): 974-978.
- [6] 王 靖. 飞秒激光抛光钛合金和不锈钢的数值模拟及实验研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.
WANG Jing. Numerical and Experimental Study on Femtosecond Laser Polishing of Titanium Alloy and Stainless Steel[D]. Anshan: University of Science and

- Technology Liaoning, 2021.
- [7] 岳端木, 孙会来, 刘泽林, 等. 飞秒激光加工镍钛合金的烧蚀阈值实验研究 [J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 441-446.
- YUE Duanmu, SUN Huilai, LIU Zelin, et al. Experimental Study on Ablation Threshold of NiTi Shape Memory Alloy Specimen by Femtosecond Laser Processing[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(4): 441-446.
- [8] 王佳敏, 季艳慧, 梁志勇, 等. 532 nm 皮秒脉冲激光对单晶硅的损伤特性研究 [J]. 中国光学, 2022, 5(2): 242-250.
- WANG Jiamin, JI Yanhui, LIANG Zhiyong, et al. Damage Characteristics of a 532 nm Picosecond Pulse Laser on Monocrystalline Silicon[J]. Chinese Optics, 2022, 15(2): 242-250.
- [9] HU F F, FAN H R, LIU S, et al. Samarium-Neodymium and Rubidium-Strontium Isotopic Dating of Veined REE Mineralization for the Bayan Obo REE-Nb-Fe Deposit, Northern China[J]. Resource Geology, 2009, 59(4): 407-414.
- [10] 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): 74-78.
- 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): 74-78.
- [11] WANG H, SHEN H, YAO Z Q. 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.
- [12] 蔡颂, 陈根余, 周聪, 等. 多脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的表面变质层 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 51-61.
- CAI Song, CHEN Genyu, ZHOU Cong, et al. Multi-Pulsed Laser Truing and Dressing of Deterioration Layer on Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheel Surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 51-61.
- [13] 王文豪, 季凌飞. 二维振镜超快激光高精加工球面等角螺旋槽研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 165-174.
- WANG Wenhao, JI Lingfei. High-Precision Machining of Spherical Equiangular Spiral Groove Using Two-Dimensional Galvanometer Ultrafast Laser System[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 165-174.
- [14] 庞博. 二维电子材料 MoS₂ 宽光谱超快磁光 Kerr 特性的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- PANG Bo. Study on Wide-Spectrum Ultrafast Kerr-Magnetic Properties of Two-Dimensional Electronic Material MoS₂[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [15] 任乃飞, 许美玲, 顾佳方, 等. 飞秒激光作用下铁磁薄膜的热化动力学分析 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2057-2062.
- REN Naifei, XU Meiling, GU Jiafang, et al. Analysis of Thermalization Dynamics on Ferromagnetic Thin Film Excited by Femtosecond Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2057-2062.
- [16] BEAUREPAIRE E, MERLE J, DAUNOIS A, et al. Ultrafast Spin Dynamics in Ferromagnetic Nickel[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(22): 4250-4253.
- [17] ANISIMOV S I, KAPELIOVICH B L, PERELMAN T L. Electron Emission from Metal Surfaces Exposed to Ultrashort Laser Pulses[J]. Sov. Phys. JETP, 1974, 39: 375-377.
- [18] 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): 76-82.
- YANG Qibiao, ZHANG Hong, ZHOU Wei, et al. Surface Incubation Effect of Carbide YG6 Induced by Femtosecond Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(6): 76-82.
- [19] ZHANG Y, CHEN J K. Melting and Resolidification of Gold Film Irradiated by Nano- to Femtosecond Lasers[J]. Applied Physics A, 2007, 88(2): 289-297.
- [20] HUANG J, ZHANG Y W, CHEN J K. 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.
- [21] CHEN J K, BERAUB J E. Numerical Study of Ultrashort Laser Pulse Interactions with Metal Films[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2001, 40(1): 1-20.

(责任编辑: 邓光辉)

Study on Ablative Morphology of Gear Finishing by Multi-Pulse Femtosecond Laser

MING Xingzu^{1,2}, JIA Songquan¹, LI Wan³, ZHOU Xian¹, LI Chao⁴, YUAN Lei²

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

2. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

3. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Automotive Engineering Vocational College, Zhuzhou Hunan 412000, China;

4. Technology Center, Zhuzhou Gear Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Femtosecond pulsed laser ablation was used to improve the surface quality of 18Cr2Ni4WA face gear. A three-temperature coupling model of electron-spin lattice was established to predict and analyze the temperature changes of face gear materials under the single pulse energy effects of electron, spin and lattice. Combined with the multi-pulse energy accumulation effect, the evolution law of the ablative pit diameter and depth of the face gear material was predicted and analyzed experimentally at the laser energy density of 1.035 J/cm² to 5.252 J/cm². The results show that the equilibrium temperature of the face gear surface does not continuously increase with the increase of pulse number, and basically remains unchanged at 30 pulses. With the increase in energy density, the diameter and depth of ablative pits will continue to increase, but the rate of increase will continue to decrease. The best shape of ablative pits is with the energy density of 2.467 J/cm². The roughness value of the machined surface increases with a large sweep spacing, and the minimum roughness is 0.185 μm when the distance between the scanning paths is 25 μm.

Keywords: femtosecond laser; three-temperature coupling; energy accumulation; pit morphology; roughness

(上接第 7 页)

Risk Analysis of Total Migration of Olive Oil in Food Contact Materials

DONG Shimeng, GE Wenxiu, SHI Huilian, ZHANG Haiyan, WU Min

(Changzhou Industrial and Consumable Products Inspection Co., Ltd., Changzhou Jiangsu 213000, China)

Abstract: 273 batches of food contact materials and products with 8 materials were selected to determine suitability, water sensitivity and total migration of olive oil, and the detection risks of different food contact materials were analyzed. The results showed that in terms of suitability determination, the unqualified rate of PVC material suitability was 100%. The suitability of PE, PET, vinyl chloride - vinylidene chloride copolymer resin and paper aluminum plastic cover film material was determined. For TPE, PP and metal coating materials, due to the interference of additives, the suitability of the judgment part did not pass. In terms of water sensitivity, PET material and paper aluminum-plastic cover film samples were moisture sensitive samples, the probability of water conditioning was 100%. As for TPE material, the probability of water conditioning is 48% due to additives exposure time and other factors, while other materials did not need water conditioning. In terms of migration test detection, the detection risks of TPE, PP and paper aluminum-plastic cover film were higher, which were 86%, 58% and 50%, respectively. The detection rates of PE, PET and metal coating materials were 7%, 9%, 9%, with a certain detection rate, but the overall migration risk was not high, while vinyl chloride - vinylidene chloride copolymer resin film material with correction factor could meet the limit requirements. Before the migration test, priority should be given to the suitability determination, moisture sensitivity confirmation and adjustment to ensure the accuracy and validity of test results, and to provide data support for the safety management and quality control of food contact materials and products.

Keywords: food contact material; total migration of olive oil; detection risk