

飞秒激光烧蚀模型与面齿轮形貌特征研究

明兴祖^{1,2}, 李湾³, 杨向东¹, 伍昆军¹, 樊滨瑞², 刘金华¹, 周旭¹

(1. 广州华立学院 机电工程学院, 广东 广州 511325; 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)

摘要:飞秒激光加工成为当今研究复杂齿轮制造的新方向。本文通过面齿轮齿面网格划分方法,利用齿面三维模型测量计算每个节点处的激光入射角 θ ,建立飞秒激光加工齿面材料18Cr2Ni4WA的反射率、能量密度分布等烧蚀模型,研究椭圆形烧蚀光斑面积、烧蚀区面积,以及烧蚀凹坑深度等齿面形貌特征。通过模型仿真和实验结果分析表明,烧蚀光斑面积随 θ 的增大先缓慢增加,后快速增加;烧蚀区面积随激光功率 P 的增加而增加,随 θ 的增大,先慢速减小而后呈指数函数形式加速减小;烧蚀凹坑深度随着 P 的增加而增加,随 θ 增大而呈现近似线性降低。 θ 对齿面质量的影响程度要大于 P ,较小的 θ ,以及 P 为4.9 W左右时齿面形貌较好,为提高面齿轮加工质量提供了技术支撑。

关键词:面齿轮;网格划分;激光参数;齿面形貌特征;飞秒激光烧蚀

中图分类号:TN249;TG665 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.008

Research on femtosecond laser ablation model and morphology characteristics of face gear

MING Xing-zu^{1,2}, LI Wan³, YANG Xiang-dong¹, WU Kun-jun¹, FAN Bin-ru², LIU Jin-hua¹, ZHOU Xu¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou Huali College, Guangzhou 511325, China;

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

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

Abstract: Femtosecond laser machining has become a new research direction for complex gear manufacturing. In this paper, the laser incidence angle θ at each node is measured and calculated by using the three-dimensional model of the tooth surface, and the ablation model of the tooth surface material 18Cr2Ni4WA with femtosecond laser machining is established to study the ellipsoidal ablation spot area, ablation area, and the depth of ablation pit and other tooth surface topographic features. Through the model simulation and experimental results analysis, it is shown that the ablation spot area increases slowly at first and then rapidly with the increase of θ . And the area of ablation zone increases with the increase of laser power P , and decreases slowly at first and then accelerates exponentially with the increase of θ . The ablation pit depth increases with the increase of P and decreases approximately linearly with the increase of θ . The influence of θ on the tooth surface quality is greater than that of P . When the smaller θ and P is around 4.9 W,

基金项目:广东省普通高校重点领域专项项目(No. 2023ZDZX3050; No. 2023ZDZX3051);湖南省自然科学基金项目(No. 2023JJ50207);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(No. 22B0994);国家自然科学基金资助项目(No. 51975192)资助。

作者简介:明兴祖(1964-),男,博士,教授,硕士研究生导师,研究方向为微纳与绿色制造技术。E-mail:mxz9036@126.com

通讯作者:李湾(1989-),女,硕士,讲师,研究方向为激光加工技术。E-mail:398459729@qq.com

收稿日期:2024-07-21

the better tooth surface morphology is achieved, which provides technical support for improving the machining quality of face gear.

Keywords: face gear; meshing; laser parameters; morphology characteristics of tooth surface; femtosecond laser ablation

1 引言

面齿轮的传动优势具有能够实现空间相交或交错、动力分流效果好、承载能力强等,使之广泛应用于航空等领域^[1]。由于面齿轮齿形复杂,加工技术要求高,目前国外面齿轮先进制造技术对我国封锁,而国内其加工精度比国外要低2级左右,需采用新的制造方式^[2]。

相对于传统机械加工方法,飞秒激光加工具有可加工任何材料、加工区域精确等特点^[3]。对于飞秒激光加工的研究,王震等人^[4]研究多脉冲飞秒激光对金属铁在不同参数下的影响;在双温方程、能量累积效应、变离焦效应、等离子体冲击波效应等影响的温度场方面,文献^{[2]~[3]}研究了不同参数下飞秒激光烧蚀面齿轮材料形貌特征与工艺参数优化。Kumar等^[5]利用COMSOL研究了飞秒激光与合金材料Ti6Al4V之间的相互作用。Chowdhury等^[6]研究了飞秒激光与材料之间的热传递,确定了三种不同的传热过程;Palmer等^[7]研究了基片角度变化对飞秒激光烧蚀亚铁合金壁面的影响,得到在相同功率下基片角度较小时脉冲烧蚀孔的质量和精度更优。以上对飞秒激光加工的仿真求解计算与实验研究,缺乏考虑飞秒激光入射到材料表面时所形成的夹角导致激光能量部分被反射损失,导致加工材料对激光吸收率会随着入射夹角的改变而变化。

本文通过对面齿轮齿面进行网格划分,测定计算网格节点处激光入射角度,结合光反射率变化规律和激光能量吸收等烧蚀模型,利用MATLAB仿真研究不同激光功率和激光入射角对烧蚀齿面形貌特征的影响,并通过飞秒激光加工实验验证分析。

2 齿面网格节点划分和节点处激光入射角测量计算

2.1 齿面网格节点划分

面齿轮加工齿面上每个节点上的理论齿面法向和理论齿厚都不一致,导致飞秒激光加工时每个节点处激光入射角 θ 均不同,因此齿面对激光能量的吸收和累积存在变化,激光工艺参数(激光功率等)相同的情况下对面齿轮精修厚度也会产生误差,因此需要测量理论齿面不同节点处 θ 。考虑一定区域内 θ 变化较小,为节约计算和测量成本,需对面

齿轮理论齿面测量节点做 5×9 的网格划分,网格节点即测量点^[8]。根据结构边界和过渡曲线的相关约束,齿顶方向边缘缩进1 mm,过渡曲线方向边缘缩进0.5 mm,大端方向和小端方向边缘各缩进1.75 mm,将面齿轮单齿模型导入到Solidworks软件中,对齿面的轴向剖面划分网格如图1所示;对轴向剖面网格点做垂线投影到齿面上,将所有投影点连接在一起得到齿面上的网格划分如图2所示。

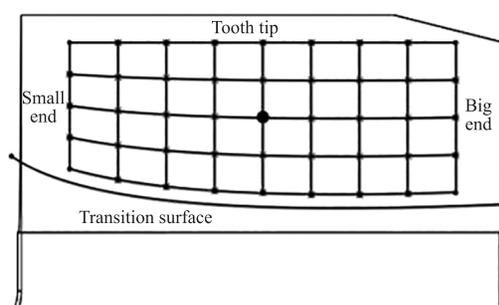


图1 齿面的轴向剖面网格划分

Fig.1 Axial section meshing of tooth surface

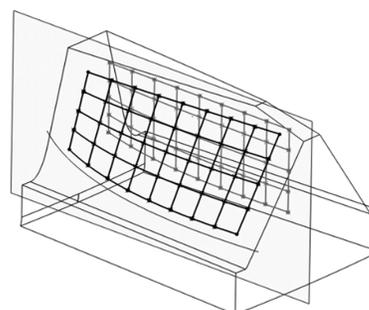


图2 投影到齿面上的网格划分

Fig.2 Meshing projected onto tooth surface

2.2 齿面网格节点处激光入射角测量计算

将齿面网格节点处齿面法线与激光入射方向所形成的夹角称之为激光入射角,如图3所示为激光入射角 θ 与烧蚀区域形貌。

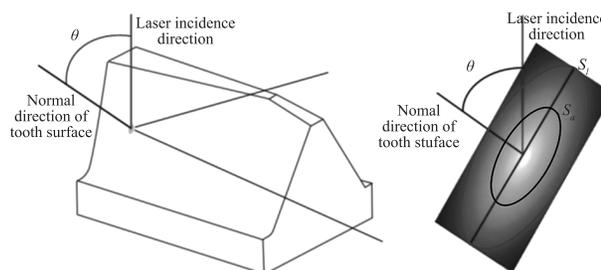


图3 激光入射角与烧蚀区域形貌

Fig.3 Laser incidence angle and morphology of ablation area

利用 Solidworks 软件自带角度测量工具, 计算生成每个网格节点的激光入射角 θ (单位为 $^{\circ}$), 按照从小端到大端、齿顶到齿根的顺序记录每个网格节点处的入射角 θ 值如表 1 所示。

表 1 网格节点激光入射角 θ 值

Tab. 1 Laser incidence angle values of grid nodes

Incidence angle θ values/ $^{\circ}$ (Small end \rightarrow large end, tooth tip \downarrow tooth root)								
73	70	68	67	66	65	63	62	60
68	67	65	64	62	63	61	58	57
64	62	61	62	63	61	60	58	59
54	54	53	51	52	53	54	52	50
41	39	37	38	39	41	39	39	38

3 齿面的飞秒激光烧蚀模型与计算分析

3.1 烧蚀齿面的飞秒激光反射和吸收

飞秒激光加工面齿轮齿面时, 激光光束到达齿面的瞬间会发生反射、吸收、透射三个过程; 由于有激光入射角 θ 的存在, 反射过程中齿面将反射率为 R 的激光能量散发至材料外部; 吸收过程是激光能量不断向齿面材料内部渗透, 被材料吸收的激光能量可用吸收率 β 表示; 透射过程是激光渗透时材料被激光光束完全击穿, 金属的透射率极低, 具有较高的反射率和较低的吸收率^[9]。面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 是一种高强度合金, 加工时激光能量绝大多数被材料反射和吸收, 透射率几乎为零, 故面齿轮材料的吸收率 β 可表示为:

$$\beta = 1 - R \quad (1)$$

飞秒激光入射到齿面材料时, 对入射激光矢量分解, 反射过程在平行入射面和垂直入射面同时发生, 根据菲涅耳公式与折射定律, 可得平行入射面的反射率 R_p 为^[8]:

$$R_p = \left| \frac{(n + \kappa i) \cos \theta - \cos \left(\arcsin \frac{\sin \theta}{n + \kappa i} \right)}{(n + \kappa i) \cos \theta + \cos \left(\arcsin \frac{\sin \theta}{n + \kappa i} \right)} \right|^2 \quad (2)$$

垂直入射面的反射率 R_v 为:

$$R_v = \left| \frac{\cos \theta - (n + \kappa i) \cos \left(\arcsin \frac{\sin \theta}{n + \kappa i} \right)}{\cos \theta + (n + \kappa i) \cos \left(\arcsin \frac{\sin \theta}{n + \kappa i} \right)} \right|^2 \quad (3)$$

式(2)、(3)中, n 为材料折射率; k 为材料消光系数; i 为复数虚部形式。

面齿轮合金材料 18Cr2Ni4WA 的飞秒激光加工, 在垂直与平行方向上两个激光分量几乎相等^[8], 故飞秒激光入射到齿面的反射率 R 可表示为:

$$R = (R_p + R_v)/2 \quad (4)$$

面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 是一种铁基合金, 铁元素占 90% 以上, 其他元素镍、铬、钨等共占 10% 左右, 按文献[8]得到材料 18Cr2Ni4WA 的折射率 n 和消光系数 k 分别为 3.192 和 4.416, 通过对式(2)~(4)的 MATLAB 软件求解计算, 绘制出反射率 R_p 、 R_v 、 R 随激光入射角 θ 的变化曲线如图 4 所示。

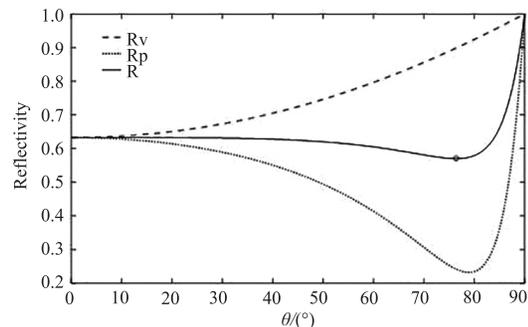


图 4 随激光入射角 θ 的反射率变化曲线

Fig. 4 Change curves of laser reflectivity with incident angle θ

由图 4 可看出, 由于折射率和消光系数的存在, 激光入射角 θ 为 0° 时材料反射率达到了 0.63 以上, R_v 随着 θ 的增大而加速增加; R_p 随着 θ 的增大先逐步减小再急剧增加; 整体反射率 R 在 θ 为 $0 \sim 76^{\circ}$ 时随着 θ 的增大而减小, 在 θ 为 76° 时 R 达到最小值 0.567, 后加速增大, 最终接近达到 1; 再根据式(1)可推测吸收率 β 的变化规律则与反射率 R 相反。

3.2 齿面的飞秒激光烧蚀光斑面积和烧蚀区面积

齿面对飞秒激光能量进行吸收时, 首先会在材料表面形成类似椭圆形光斑^[7], 随着齿面材料对能量的不断吸收, 在激光烧蚀区域产生水平长度为 x 、宽度为 y 、竖直高度为 z 的椭圆烧蚀区域, 其形貌如图 3 所示, 其中烧蚀光斑面积 S_l 为外圈椭圆圈内, 烧蚀区面积 S_a 为内圈椭圆圈内。

烧蚀光斑面积 S_l 的产生是一种类小孔成像现象, 是指激光入射至齿面材料的激光束在焦点位置处的光束横截面积, 光斑大小主要受激光参数的影响, 与激光器发出的飞秒激光束腰半径 w_0 、激光波长 λ 和激光入射角 θ 等有关, S_l 具体可表示为:

$$S_l = \pi^2 \omega_0^4 \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{\pi^2 \omega_0^2 - \lambda^2 \tan^2 \theta}} \quad (5)$$

利用 MATLAB 对式(5)进行求解,仿真在波长为 1030 nm、束腰半径为 20 μm 的飞秒激光束产生的烧蚀光斑面积 S_l 随 θ 的变化曲线如图 5 所示。

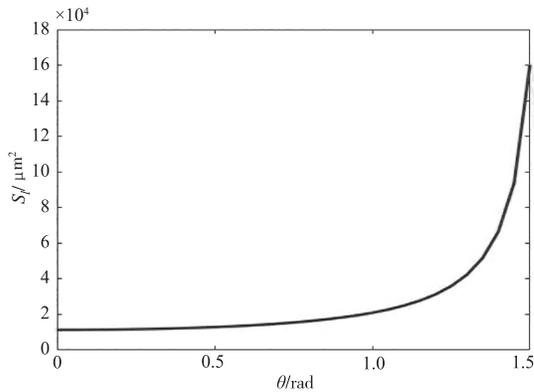


图 5 烧蚀光斑面积 S_l 随 θ 的变化曲线

Fig.5 Variation curve of ablation spot area S_l with θ

由图可知,烧蚀光斑面积 S_l 在激光入射角 θ 为 0 ~ 1 rad(0 ~ 57°)时变大程度较缓,变化趋势不大;在激光入射角 θ 达到 1 ~ 1.5 rad(57 ~ 86°)时,烧蚀光斑面积 S_l 呈加速增加的趋势,烧蚀光斑在轴向方向上会被拉长,入射角越接近 90°,烧蚀光斑会越接近一条长直线,烧蚀光斑面积 S_l 呈指数函数形式增长到最大值。

烧蚀区面积 S_a 内是激光能量主要作用区域,在不考虑飞秒激光传递过程中受空气衰减影响的情况下,齿面烧蚀区能量密度 $F(x, y, z)$ 可表示为:

$$F(x, y, z) = \frac{2P}{\pi\omega_0^2 f_n} \cdot \frac{\cos\theta}{1 + \frac{\lambda^2 z^2 \tan^2 \theta}{\pi^2 \omega_0^4}}$$

$$\exp\left(-\frac{2x^2 + 2y^2}{\omega_0^2 + \frac{\lambda^2 z^2 \tan^2 \theta}{\pi^2 \omega_0^2}}\right) \quad (6)$$

式中, x, y, z 分别为飞秒激光烧蚀区的三个轴向烧蚀长度,其中 y 和 z 可由含 x 的表达式表示为:

$$y = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{1}{2} \frac{1 + \lambda^2 z^2 \tan^2 \theta}{\pi^2 \omega_0^2} \left[\ln 2P \cos \theta - \ln \frac{F_{th} f_n C (1 + \lambda^2 z^2 \tan^2 \theta)}{\pi^2 \omega_0^2} \right]} \quad (7)$$

$$z = x \tan \theta \quad (8)$$

式(6)、(7)中, F_{th} 为面齿轮材料烧蚀阈值; f_n 为激光重复频率; P 为激光功率。

烧蚀阈值一般由材料本身的性质决定,通过实验计算拟合得到在飞秒激光波长为 1030 nm、激光脉冲宽度为 800 fs、激光束腰半径为 20 μm 的情况下,该材料的烧蚀阈值 F_{th} 为 $0.28 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ [3]。代入表 2 中相关激光加工参数,通过 MATLAB 对式(6)进行仿真求解,在飞秒激光功率 P 为 4.9 W 下,激光入射角 θ 为 0°、52° 和 76° 时,分别得到齿面烧蚀形貌如图 6(a)、(b)、(c) 所示,可看出烧蚀光斑和轴向烧蚀长度的大小,随烧蚀区随着 θ 的增大而减小。

从图 6 可发现烧蚀光斑在激光入射角 θ , 为 0° ~ 52° 时变化程度较为显著,有明显的从 z 轴变长和从 y 轴变短的趋势,而烧蚀区面积 S_a 减小程度不够明显;当 θ 从 52° 变化到 76° 时,烧蚀光斑弧度被显著拉长,烧蚀光斑面积 S_l 明显增大,烧蚀区面积 S_a 减小显著,且随着 θ 的增加,烧蚀区域会愈加接近为一个梭形结构直至完全消失。

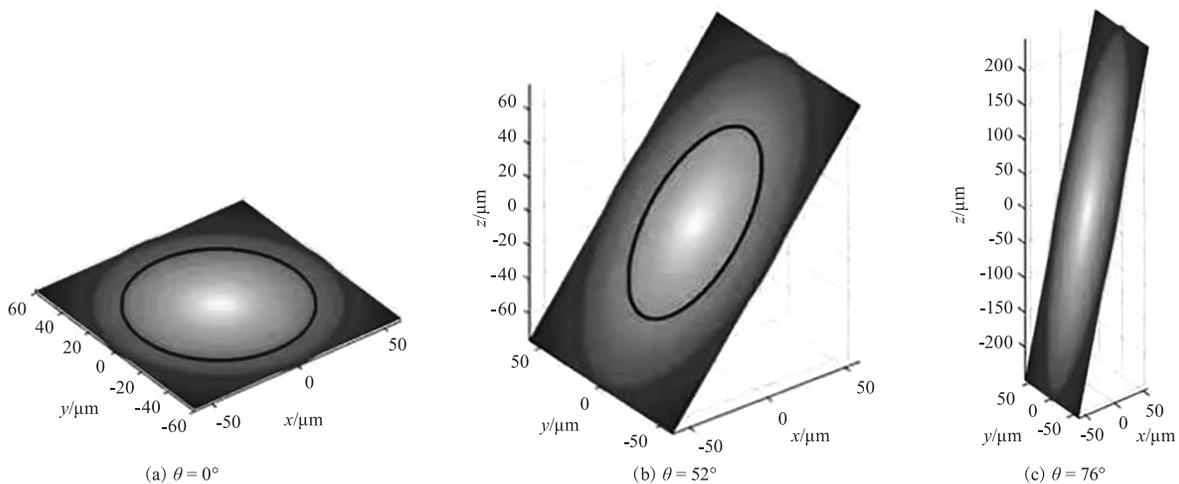


图 6 不同 θ 下齿面烧蚀形貌

Fig.6 Ablative morphology of tooth surface under different θ

为计算烧蚀区面积 S_a , 对式(6)、(7)、(8)进行变换处理; 采用对烧蚀区曲线分割后积分求近似面

$$0 = -\frac{x_r^2}{\tan^2\theta + 1} + \frac{1}{2}\omega_0^2 \frac{1 + \lambda^2 x_r^2 \tan^2\theta}{\pi^2 \omega_0^4 (\tan^2\theta + 1)} \times \left[\ln 2P \cos\theta - \ln \frac{1 - R(0)}{1 - R(\theta)} \frac{F_{th} \pi \omega_0^2 f_n (1 + \lambda^2 x_r^2 \tan^2\theta)}{\pi^2 \omega_0^4 (\tan^2\theta + 1)} \right] \quad (9)$$

激光参数和激光入射角 θ 都会对边界长度变量 x_r 产生影响, 根据式(9) 代入已知激光参数和入射角可求得具体 x_r 值, 并将所得 x_r 值作为烧蚀区长度

$$S_a = \int_{-x_r}^{x_r} \sqrt{\frac{x^2}{\tan^2\theta + 1} + \frac{1}{2}\omega_0^2 \frac{1 + \lambda^2 x^2 \tan^2\theta}{\pi^2 \omega_0^4 (\tan^2\theta + 1)}} \times \left[\ln 2P \cos\theta - \ln \frac{1 - R_n(0)}{1 - R_n(\theta)} \frac{F_{th} \pi \omega_0^2 f_n (1 + \lambda^2 x^2 \tan^2\theta)}{\pi^2 \omega_0^4 (\tan^2\theta + 1)} \right] dx \quad (10)$$

表 2 飞秒激光加工参数

Tab. 2 Femtosecond laser processing parameters

name	symbol	Numerical value
wavelength/nm	λ	1030
Waist radius/ μm	w_0	20
frequency/kHz	f	200
Pulse width/fs	τ_p	800
Laser power/W	P	2.7 ~ 4.9

代入表 2 中面齿轮飞秒激光加工参数, 并设置飞秒激光功率 P 为 4.9 W、3.8 W、2.7 W, 通过 MATLAB 对式(10) 进行求解, 得到不同 P 下烧蚀区面积 S_a (μm^2) 与激光入射角 θ (rad) 的仿真变化曲线分别如图 7 中实线 1、2、3。

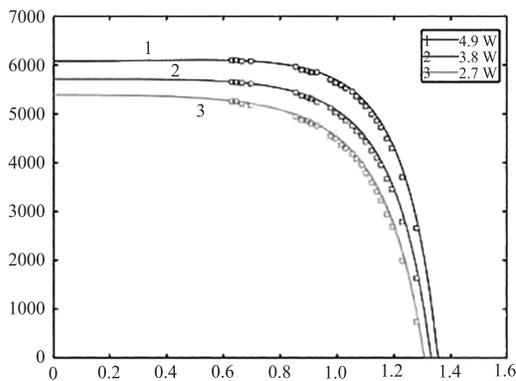


图 7 不同激光功率下烧蚀区面积 S_a 随入射角 θ 的实验和仿真对比曲线

Fig. 7 Experimental and simulation comparison curves of ablative area S_a with incident angle θ at different laser power P

由图 7 可知, 激光功率 P 在一定程度上影响烧蚀区面积 S_a 大小, 同一激光入射角 θ 的情况下, P 越大则 S_a 越大; 当 P 一定时, S_a 随着 θ 的增大而减小, 不同 P 下开始变化的区间也有所区别, P 为 4.9 W、重复频率 f_n 为 200 kHz、脉冲宽度 τ_p 为 800 fs

积, 引入烧蚀区在轴上的边界长度变量 x_r , 结合面齿轮材料反射率 R 变化规律, 得到超越方程为:

x 的取值范围, 结合式(9) 对 x 进行积分变换, 得到烧蚀区面积 S_a 为:

时, 飞秒激光辐照在 θ 为 0 的面齿轮材料表面所产生的 S_a 为 $6082 \mu\text{m}^2$, θ 在 $0 \sim 0.8 \text{ rad}$ (46°) 时 S_a 变化呈缓慢减小状态; 当 θ 在 0.8 rad (46°) $\sim 1.333 \text{ rad}$ (76°) 时, S_a 变化呈指数函数形式加速减小趋势, 随着 θ 增加导致烧蚀光斑面积增大, 聚焦光斑的椭圆畸变量增大, 使得光斑中心能量密度逐渐减小, 材料表面对能量的吸收也减少, 当 θ 为 1.333 rad 时达到此功率下的入射角阈值, S_a 降低为 0。在 P 分别为 3.8 W 和 2.7 W 时, S_a 曲线下移递减变化。

3.3 齿面的烧蚀凹坑深度

飞秒激光能量经齿面的反射与折射后, 最初的一部分能量在面齿轮表面形成类椭圆形烧蚀区, 随着激光能量不断的向材料内部渗透, 齿面逐渐形成烧蚀凹坑。由于材料对能量的不断吸收, 激光能量会随着传递距离的增加而不断衰减^[15]。与光斑中心距离 r 、距离材料表面深度 h 处的能量密度 $F(h, r)$ ^[8] 为:

$$F(h, r) = \beta b F(r) \exp(-bh) \quad (11)$$

材料的吸收系数 b 影响材料内部对激光能量的吸收能力, 决定激光在材料中传播距离上衰减程度, 可由材料的消光系数 k 和激光波长 λ 得到, 即 $b = 4\pi k/\lambda$, 文献[11] 研究了面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的吸收系数。

距离光斑中心 r 处的材料表面能量密度 $F(r)$ 表示为^[2]:

$$F(r) = \frac{2P}{\pi \omega_0^2 f_n} \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (12)$$

结合式(8)、(11) 得到在激光入射角 θ 变化的情况下, 距离烧蚀光斑中心位置 r 处的烧蚀凹坑最大深度 Z_{\max} 为:

$$Z_{\max} = \frac{1}{b \cos \theta} \left[\ln \left(\frac{1 - R_v(0)}{1 - R_v(\theta)} \frac{F_{th}}{F_0 \cos \theta} \left(1 + \left(\frac{\lambda x \tan \theta}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right) \right) + \frac{2x^2 + 2y^2}{\omega_0^2 \left(1 + \left(\frac{\lambda x \tan \theta}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right)} + b x \sin \theta \right] \quad (13)$$

代入表 2 中面齿轮飞秒激光加工参数,改变激光功率 P 为 4.9 W、3.8 W、2.7 W,在 MATLAB 软件中对式(13)计算求解,得到三种激光功率下各个齿面网格节点处烧蚀凹坑深度 Depth 的理论仿真曲线分别如图 8 中实线 1、2、3。

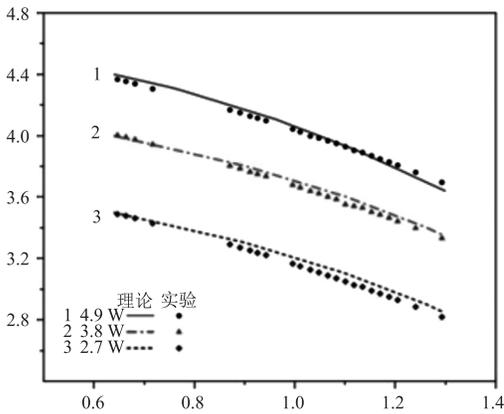


图 8 不同激光功率下烧蚀凹坑深度 θ 的实验和仿真对比曲线

Fig. 8 Experimental and simulation comparison curves of pit depth with incident angle θ at different laser power

由图 8 可知,激光功率大小并不影响烧蚀凹坑深度 Depth 随激光入射角 θ 变化的整体趋势,辐照在材料表面能量的大小主要受激光功率 P 影响,随着 P 越大,齿面材料所吸收的能量越多,同一 θ 的烧蚀深度越大;当 P 一定时,Depth 与 θ 之间存在一种近似线性降低变化。

4 飞秒激光加工面齿轮的实验条件与结果分析

4.1 面齿轮飞秒激光加工实验条件

面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的最后工序为飞秒激光精微加工,其加工系统如图 9 所示,主要由激光器、折射镜、扩束器、三维振镜系统(V、U 和 W 轴)、调焦机构(Z 轴)、CCD 摄像头、测距仪(精度 0.01 mm)、四轴平台(X 轴、Y 轴、A 和 B 轴)、吹气系统及计算机系统部分组成^[3]。

加工系统中采用 FemtoYL-100 全光纤激光器,最大功率 116.4 W,可产生中心波长 1030 nm 的脉冲激光,脉冲宽度为 300 ~ 6 ps 可调,重复频率为 25 Hz ~ 5000 kHz 可调^[11],面齿轮飞秒激光加工系统实验中采用激光参数与上述仿真时相同(表 2)。

面齿轮飞秒激光加工后,齿面烧蚀形貌选用数

字式三维视频显微镜 HIROX KH-7700 进行扫描测量和图像采集^[2],经软件合形成貌图,可截取烧蚀凹坑横向直径和烧蚀凹坑深度数值。

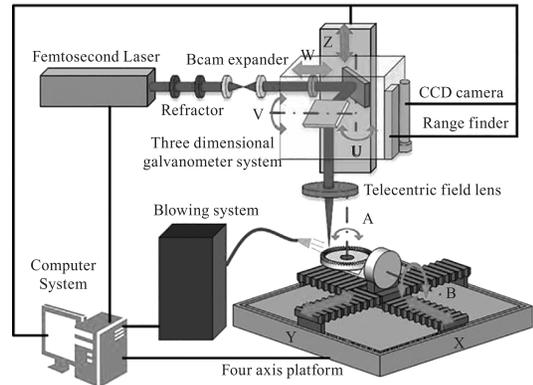


图 9 面齿轮飞秒激光加工系统

Fig. 9 Femtosecond laser processing system for face gear

4.2 飞秒激光烧蚀齿面形貌特征实验结果与分析

不同激光功率 P 和激光入射角 θ 下,通过数字式三维视频显微镜测量烧蚀凹坑形貌如图 10 所示。

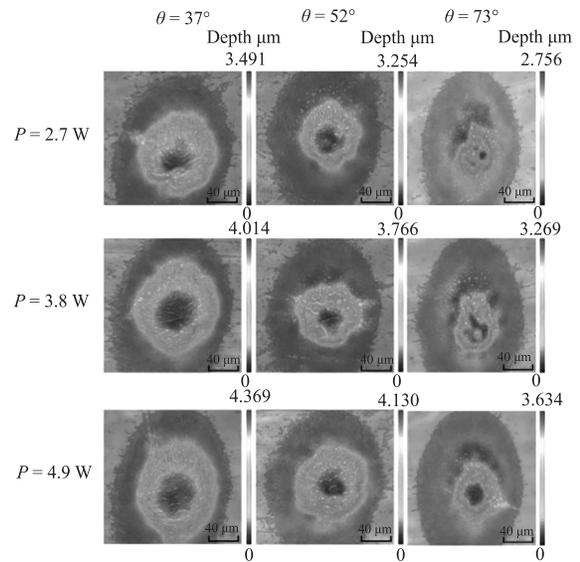


图 10 不同飞秒激光功率 P 和入射角 θ 下烧蚀凹坑形貌

Fig. 10 Morphology of ablated pits at different femtosecond laser power P and incident angles θ

由图 10 可知,当飞秒激光功率为 2.7 W、激光入射角为 37° 时,具有较为平滑的烧蚀凹坑轮廓和相对平整的凹坑底部,烧蚀凹坑深度 Depth 明显;随着 θ 的增大到 52° ,烧蚀光斑逐渐增大变为类椭圆结构,烧蚀凹坑轮廓有些凸起,烧蚀区面积减小程度显著,Depth 有所下降;当 θ 达到 73° 时,烧蚀光斑增大

接近于梭形结构,烧蚀区面积萎缩显著,具有不规则的烧蚀凹坑轮廓和不平整的凹坑底部,Depth持续降低。当 P 提高到3.8 W和4.9 W时,当 θ 为 37° 时, S_a 显著增大,Depth明显增加,烧蚀凹坑轮廓呈现纵向凸起趋势及有些缺陷;达到较大 θ 时, S_l 与 S_a 差异显著, S_a 减小程度明显,Depth持续降低,凹坑轮廓粗糙,凹坑底部可见凸起的残留熔融物。飞秒激光加工齿面时,在较小 θ 时面齿轮加工质量良好,较大的 θ 会降低激光加工质量,实验中功率 P 为4.9 W时所形成的烧蚀区和烧蚀凹坑形貌较好。

通过显微镜可以对所有网格节点处进行测量,可得到齿面椭圆形烧蚀区横向直径 a ,烧蚀区竖直直径 $b = a/\cos\theta$ 。

按照烧蚀区横向直径 a 和竖直直径 b ,可计算椭圆面积得到实验所得烧蚀区面积 S_a ,在三种激光功率 P 为4.9 W、3.8 W、2.7 W下, S_a 随激光入射角 θ 的仿真和实验对比曲线分别如图7中1、2、3,图中散点表示 S_a 实验值,实线为仿真值。由图7可看出三种功率下仿真与实验值的变化趋势一致,在较小 θ 时实验值与理论值相差不大,随着 θ 的逐渐增大,实验值相对理论值的偏差较大。主要是由于 θ 越大,齿面材料对能量的吸收会更加困难,同时对激光能量的接收时间增长,从而空气中的一些颗粒杂质会造成少部分激光散射,使得实际被材料吸收的能量会略有降低。整体说明三种功率下的实验结果都贴近理论仿真值,理论模型具有一定的可靠性。

三种激光功率 P 为4.9 W、3.8 W、2.7 W下,烧蚀凹坑深度Depth随激光入射角 θ 下的理论仿真和实验对比曲线分别如图8中1、2、3,图中散点为Depth实验值,实线为理论仿真值。由图8可看出,不同功率下的实验值都在理论值附近波动, P 为2.7 W和3.8 W时,Depth实验值在 θ 达到 0.87 rad (50°)后持续低于理论仿真值,这是由于齿面在实际吸收激光能量时,非真空环境带来能量损耗,使得实际进入齿面材料内部的能量稍低于理论值,而烧蚀所产生的残留熔融物在很大程度上阻碍烧蚀深度的增加,随着 θ 增大,残留熔融物更难以被排出凹坑外,使得高 θ 时Depth降低程度更明显。而 P 为4.9 W时的Depth实验值从最开始就低于理论值,在 θ 达到 1.08 rad (62°)后,Depth实验值略高于理论仿真值,此时气压差减少显著,烧蚀产生的气化材料

由于激光功率的增大,导致Depth实验值略微增加。整体实验结果与理论模型较接近,证明该烧蚀理论模型较为有效。

5 结论

以齿面飞秒激光反射和吸收率随激光入射角的变化规律研究为基础,建立齿面飞秒激光烧蚀光斑面积 S_l 、烧蚀区面积 S_a 和烧蚀凹坑深度Depth等烧蚀齿面形貌特征模型,研究了不同激光功率 P 下烧蚀齿面形貌特征随激光入射角 θ 的变化规律,得出以下结论:

(1) 齿面材料18Cr2Ni4WA的反射率 R 随 θ 的增大而减小,在 θ 为 1.333 rad (76°)时 R 达到最小值为0.567,后加速增加到最大1; S_l 随 θ 的增大先缓慢增加,后快速增加。

(2) 根据齿面烧蚀区能量密度,计算得到 P 为4.9 W时材料的入射角阈值为 1.333 rad ,通过仿真和实验验证得到 S_a 随 P 的增加而增加,随 θ 的增大先慢速减小而后呈指数函数形式加速减小。

(3) 建立不同激光功率 P 下烧蚀凹坑深度模型,仿真和实验验证得出Depth会随着 P 增加而增加,随着 θ 增大而呈现近似线性减少变化。

(4) 激光入射角 θ 对齿面质量的影响程度要大于激光功率,在兼顾激光能量利用和加工质量的前提下,较大的 θ 会降低加工质量,激光功率选择4.9 W左右时的飞秒激光加工形貌较好。

参考文献:

- [1] Wei Chao, Ma Yuping, Han Yuan, et al. Research progress of femtosecond laser processing of superhard materials[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2019, 56(19):36-54. (in Chinese)
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):36-54.
- [2] Ming Xingzu, Ma Yulong, Jia Songquan, et al. Research on surface gear topography of femtosecond laser ablation based on energy coupling model [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(1):41-50. (in Chinese)
明兴祖, 马玉龙, 贾松权, 等. 能量耦合模型的飞秒激光烧蚀面齿轮形貌研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(1):41-50.
- [3] Ming Xingzu, Fan Binrui, Zhou Xian, et al. Multi-objective optimization of process parameters for femtosecond laser machining of face gears [J]. Laser & Infrared, 2023, 53

- (4):513-521. (in Chinese)
明兴祖,樊滨瑞,周贤,等. 飞秒激光精修面齿轮工艺参数的多目标优化[J]. 激光与红外,2023,53(4):513-521.
- [4] Wang Zhen,Fu Wenjing,Zhang Rongzhu. Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metallic iron [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7):74-78. (in Chinese)
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.
- [5] 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.
- [6] Chowdhury I H, Xu X. Heat transfer in femtosecond laser processing of metal [J]. Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, 2003, 44(3):219-232.
- [7] Palmer J A, McDaniel K L, Harris M F, et al. The effects of varying substrate angle on feature quality in femtosecond laser ablation of ferrous alloys [C]//High-Power Laser Ablation V. SPIE, 2004, 5448:1028-1038.
- [8] Ming Xingzu, Zhou Xian, Liu Kefei. Application technology of laser precision manufacturing [M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
明兴祖,周贤,刘克非. 激光精微制造应用技术 [M]. 北京:科学出版社,2022.
- [9] Yu Gang. Laser advanced manufacturing technology and its application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
虞钢. 激光先进制造技术及其应用 [M]. 北京:国防工业出版社,2016.
- [10] Xiao Yongbo, Ming Rui, Lai Mingtao, et al. Femtosecond laser ablation kinetic energy thermal model and tooth surface topography of face gear materials [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2021, 58(17):256-264. (in Chinese)
肖勇波,明瑞,赖名涛,等. 面齿轮材料的飞秒激光烧蚀动能热模型与齿面形貌研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17):256-264.
- [11] Lin Jiajian, Ming Rui, Li Xuekun, et al. Study on the morphological characteristics of femtosecond laser ablated surface gear materials [J]. China Laser, 2021, 48(14):1402017. (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):1402017.