

## 面齿轮飞秒激光精修工艺参数优化实验研究

明兴祖, 樊滨瑞\*, 李楚莹, 袁磊, 吴陶, 明瑞\*\*

湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株洲 412007

**摘要** 针对传统面齿轮加工方式的局限性, 本文提出了基于飞秒激光精修面齿轮的新型加工方式。采用飞秒激光对面齿轮进行单因素实验和正交实验, 结果表明, 在激光功率、重复频率、扫描速度、扫描道间距和离焦量等因素中, 激光功率对扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的影响最大, 扫描道间距的影响最小。利用回归模型预测扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度, 并利用仿真模型预测扫描道烧蚀深度, 将两种模型的预测结果与参数优化后的激光实验结果进行对比, 结果发现最大相对误差均在合理范围内。本研究结果可为飞秒激光精修烧蚀面齿轮提供理论指导。

**关键词** 激光技术; 飞秒激光; 工艺参数; 正交实验; 回归模型; 仿真分析; 齿面形貌

**中图分类号** TN24

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1602012

## 1 引言

面齿轮在空间相交或交错传动方面的优势使其愈来愈多地被用于航空航天领域。航空技术的日益发展对面齿轮精度的要求不断提高, 但面齿轮的齿形复杂, 制造难度和技术要求均较高, 再加上国外在数控精密磨齿机和曲面齿轮先进制造技术上对我国实施封锁, 传统的机械加工精度已无法满足生产需求<sup>[1]</sup>, 亟待开发新的加工方式。

飞秒激光加工相对于传统加工方式具有热影响区小、加工区域精确、加工精度可达微纳级别等特点<sup>[2]</sup>, 其以极短的脉冲宽度和极高的峰值功率成为精修面齿轮齿面以及提高面齿轮精度的热门加工技术<sup>[3]</sup>。为解决飞秒激光技术不成熟所带来的高生产成本, 国内外学者针对飞秒激光参数的优化进行了一系列研究, 如: Tsubouchi 和 Momose<sup>[4]</sup>利用遗传算法处理量子计算结果来优化脉冲形状; Ho 等<sup>[5]</sup>将遗传算法与正交实验相结合, 以齿面粗糙度为研究目标, 成功降低了预测误差; 王震等<sup>[6]</sup>在双温方程的基础上, 对多脉冲飞秒激光烧蚀金属铁进行了数值模拟; 王明娣团队<sup>[7-9]</sup>在飞秒激光刻蚀覆铜板的基础上, 利用正交优化方法研究不同飞秒激光参数对覆铜板刻蚀深度和表面粗糙度的影响。

本团队首先预设飞秒激光加工参数组并对 18Cr2Ni4WA 材料进行单因素实验获得反馈数据组, 然后基于反馈数据组对预设加工参数进行多因素正交实验分析, 得到了飞秒激光精修 18Cr2Ni4WA 材料的优化参数组。同时, 本文探究了扫描道烧蚀深度、齿面

粗糙度与激光功率、重复频率、扫描速度、扫描道间距、离焦量之间的关系, 并将回归模型和仿真模型的预测结果与参数优化后的实验结果进行对比分析, 为高质量有效的飞秒激光精修面齿轮提供理论参考。

## 2 实验

## 2.1 实验设备与器材

选用以飞秒激光器和激光器控制平台为主的加工系统对面齿轮材料进行烧蚀实验, 其中的光路系统包括分光镜、聚焦透镜和三维振镜。采用四轴移动平台固定面齿轮材料。加工系统配备相应的 CCD 监测系统、照明系统、吹气系统以及计算机辅助系统。具体的飞秒激光加工系统如图 1 所示。

实验选用 FemtoYL-100 全光纤激光器, 其最大功率为 116.4 W, 激光束质量因子  $M^2$  为 1.259, 可发射中心波长为 1030 nm 的脉冲激光, 脉宽范围为 300 fs~6 ps, 重复频率在 25~5000 kHz 范围内可调。实验结束后, 选用图 2 所示的数字式三维视频显微镜 HIROX KH-7700 检测扫描道烧蚀深度, 该显微镜的最大放大倍数可达 7000 倍, 采用从低到高的逐层扫描方式对扫描道烧蚀深度进行图像采集, 然后用软件合形成貌图, 在形貌图中截取深度数据, 测量精度为 0.001  $\mu\text{m}$ 。利用图 3 所示的 Hommel T8000 轮廓仪检测齿面的粗糙度, 该轮廓仪的分辨率高达 0.1  $\mu\text{m}$ , 其采用运动式扫描的方法对齿面进行探测, 然后将所测结果反馈到其自带软件系统 Turbo Wave 中生成检测报告。

收稿日期: 2021-11-06; 修回日期: 2021-12-07; 录用日期: 2021-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(51975192)、湖南省自然科学基金(2021JJ30214, 2021JJ50042)、“机电汽车”湖北省优势特色学科群开放基金(XKQ2021044)。

通信作者: \*1144293434@qq.com; \*\*844153340@qq.com

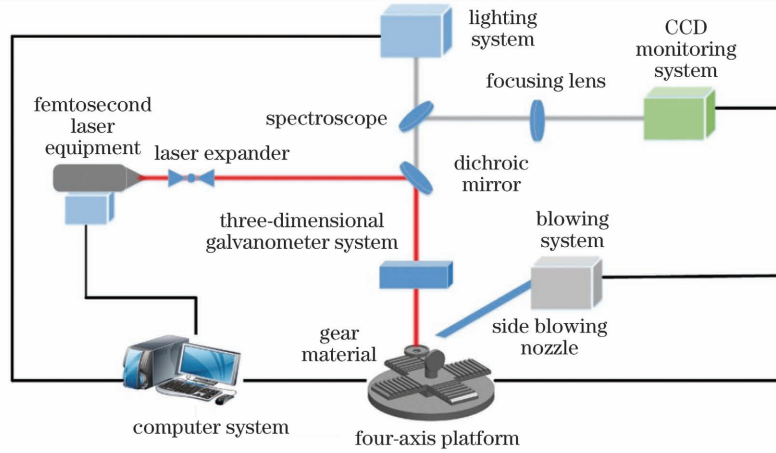


图 1 飞秒激光加工系统

Fig. 1 Femtosecond laser processing system



图 2 数字式三维视频显微镜 HIROX KH-7700

Fig. 2 Digital three-dimensional video microscope HIROX KH-7700



图 3 轮廓仪 Hommel T8000

Fig. 3 Profilometer Hommel T8000

## 2.2 实验方案

采用单因素实验分析缩小参数选择范围,采用多因素多水平的正交实验分析各因素(激光功率、重复频率、扫描速度、扫描道间距、离焦量)对扫描道烧蚀深度及齿面粗糙度的影响程度,从而得到优化参数组。具体实验方案如图 4 所示。

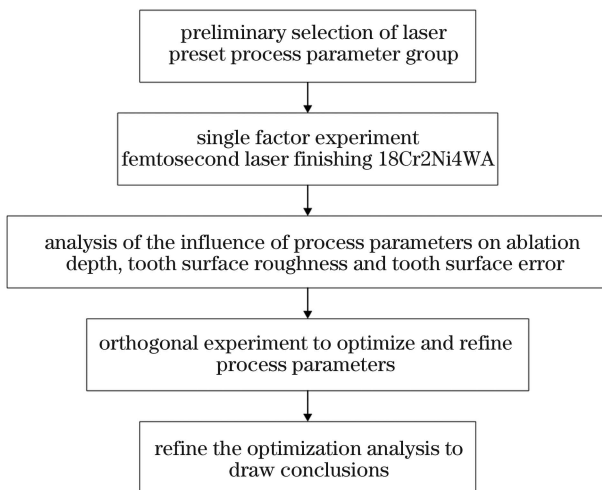


图 4 实验方案

Fig. 4 Experimental program

## 3 实验分析

飞秒激光精修面齿轮实验是一种多脉冲加工实验。在实验中,扫描路径采取直角 S 形扫线方式,目的是充分研究扫描速度和扫描道间距的影响。具体的烧蚀路径如图 5 所示。

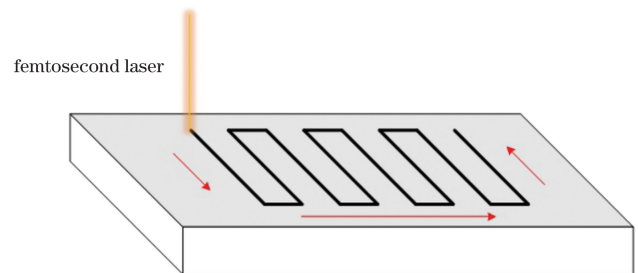


图 5 烧蚀路径图

Fig. 5 Ablation path diagram

根据实验数据确定合适的工艺参数范围。在脉冲宽度恒为 828 fs 的条件下,激光功率取 1.5~4 W,重复频率取 200~500 kHz,扫描速度取 50~130 mm·s<sup>-1</sup>,扫描道间距取 5~20 μm,离焦量取 -0.2~0.2 mm。飞秒激光精修面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的单因素实验结果如表 1 所示。

表 1 飞秒激光精修面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的单因素实验结果

Table 1 Single factor experiment results of femtosecond laser finishing face gear material 18Cr2Ni4WA

No.	Power $P$ / W	Frequency $f$ / kHz	Scanning speed $v$ / (mm·s <sup>-1</sup> )	Scanning track pitch $L$ / $\mu$ m	Defocusing distance $J$ / mm	Depth / $\mu$ m	Roughness / $\mu$ m
1	1.5	100	120	10	0	2.835	0.185
2	2	100	120	10	0	4.362	0.243
3	3	100	120	10	0	5.868	0.328
4	4	100	120	10	0	6.175	0.369
5	1.5	200	120	10	0	3.127	0.191
6	1.5	300	120	10	0	3.476	0.229
7	1.5	400	120	10	0	4.183	0.277
8	1.5	500	120	10	0	4.590	0.362
9	1.5	100	50	10	0	5.782	0.295
10	1.5	100	80	10	0	4.069	0.233
11	1.5	100	100	10	0	3.726	0.214
12	1.5	100	130	10	0	2.593	0.169
13	1.5	100	120	5	0	4.311	0.177
14	1.5	100	120	15	0	3.180	0.244
15	1.5	100	120	20	0	3.419	0.365
16	1.5	100	120	10	-0.2	2.219	0.235
17	1.5	100	120	10	-0.1	2.313	0.221
18	1.5	100	120	10	0.1	2.181	0.206
19	1.5	100	120	10	0.2	1.850	0.213

### 3.1 单因素实验结果分析

#### 3.1.1 飞秒激光功率对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 形貌特征的影响

在重复频率为 100 kHz、扫描速度为 120 mm·s<sup>-1</sup>、扫描道间距为 10  $\mu$ m、离焦量为 0 mm 的条件下,激光功率(1.5~4.0 W)对扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的影响如图 6 所示。可以看出,扫描道烧蚀深度随着激光功率的增大而增加。随着激光功率增大,能量密度增大,当能量密度达到材料的烧蚀阈值时,材料温度达到汽化温度,部分材料被汽化<sup>[9]</sup>;当能量密度降低至烧蚀阈值以下时,材料温度达到熔化温度,材料熔化成

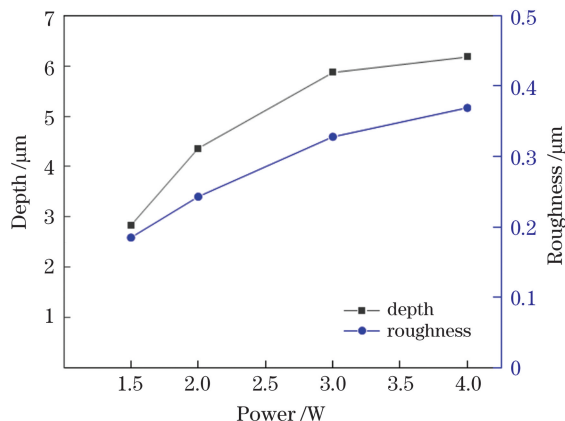


图 6 飞秒激光功率与面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 烧蚀深度和齿面粗糙度的关系曲线

Fig. 6 Ablation depth and tooth surface roughness of face gear material 18Cr2Ni4WA versus femtosecond laser power

液态。由于飞秒激光能量的高峰值特性,烧蚀凹坑底部会形成气压差,将液态材料沿烧蚀壁排出凹坑外<sup>[10]</sup>;随着激光功率增大,熔化成液态的材料增多,烧蚀深度随之增大,同时,液态材料排出烧蚀凹坑所需的动能也随之增大,导致部分液态材料来不及排出,因此齿面粗糙度增大。激光功率增大导致激光能量增加,从而增大了烧蚀深度和齿面粗糙度。综合考虑扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的变化程度,后续正交实验选取激光功率为 1.5~3 W。

#### 3.1.2 飞秒激光重复频率对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 形貌特征的影响

在激光功率为 1.5 W、扫描速度为 120 mm·s<sup>-1</sup>、扫描道间距为 10  $\mu$ m、离焦量为 0 mm 的条件下,激光重复频率(100~500 kHz)对扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的影响如图 7 所示。扫描道烧蚀深度的整体变化趋势是随着重复频率的增大而增大,且起初烧蚀深度曲线的增幅较小,当重复频率达到 200 kHz 后,烧蚀深度增加迅速。随着激光重复频率增加,激光脉冲数增多,能量密度增大,更多的材料因吸收激光能量而被去除;当重复频率达到 400 kHz 时,单个脉冲能量减少,部分齿轮材料达到烧蚀阈值,能量损失增大,材料被去除的程度减缓,故烧蚀深度曲线增大的趋势变缓。此外,随着重复频率增大,齿面粗糙度增大。当重复频率较小(100~200 kHz)时,材料的烧蚀程度不大,所产生的液态熔融物较少,难以去除的液态材料较少,故齿面粗糙度曲线增大的趋势较为缓慢;当重复频



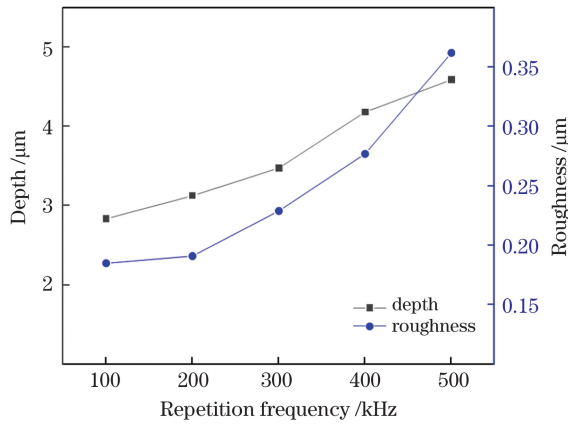


图 7 飞秒激光重复频率与面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 烧蚀深度和齿面粗糙度的关系曲线

Fig. 7 Ablation depth and tooth surface roughness of face gear material 18Cr2Ni4WA versus femtosecond laser repetition frequency

率达到 200 kHz 后,激光脉冲数增多,能量密度变大,随着能量的累积,产生的熔融物增多,齿面粗糙度增大的趋势变得更加明显。综合考虑扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的变化,后续正交实验选取激光重复频率为 250~400 kHz。

### 3.1.3 飞秒激光扫描速度对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 形貌特征的影响

在激光功率为 1.5 W、重复频率为 100 kHz、扫描道间距为 10 μm、离焦量为 0 mm 的情况下,激光扫描速度(50~130 mm·s<sup>-1</sup>)对扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的影响如图 8 所示。由于激光功率以及重复频率固定,因此单个激光脉冲的能量不变。扫描速度的持续增大使得单位时间内的激光脉冲数减少,同时,光斑搭接率的下降导致单位面积上飞秒激光与材料的作用时间缩短<sup>[11]</sup>,材料吸收的激光能量不足,无法实现有效的烧蚀,所以扫描速度越快,烧蚀深度越小。此外,扫描速度的增大使得飞秒激光与材料的接触程度降

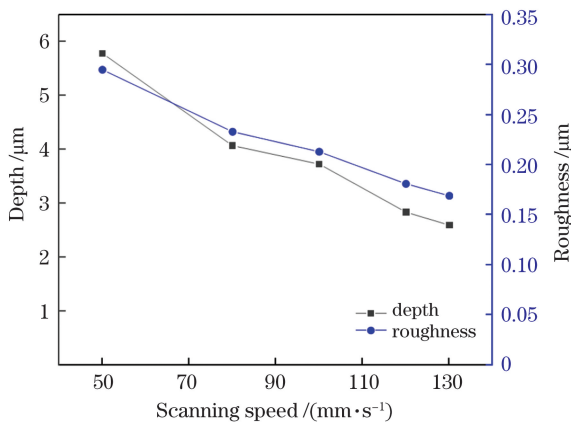


图 8 飞秒激光扫描速度与面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 烧蚀深度和齿面粗糙度的关系曲线

Fig. 8 Ablation depth and tooth surface roughness of face gear material 18Cr2Ni4WA versus femtosecond laser scanning speed

低,激光烧蚀所产生的液态熔融物的排出量减少,而且杂质在激光的高速扫描下更易远离材料表面,因此齿面的光滑程度增大,粗糙度减小。综合考虑扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的变化程度,后续正交实验选取扫描速度为 65~80 mm·s<sup>-1</sup>。

### 3.1.4 飞秒激光扫描道间距对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 形貌特征的影响

在激光功率为 1.5 W、重复频率为 100 kHz、扫描速度为 120 mm·s<sup>-1</sup>、离焦量为 0 mm 的条件下,激光扫描道间距(5~20 μm)对扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的影响如图 9 所示。两个飞秒激光聚焦光斑的中心距为扫描道间距,相邻两扫描道的激光加工存在交互影响。较小的扫描道间距对激光横向累积强度的影响较大,相应的烧蚀深度较大;随着扫描道间距增大,激光累积强度产生的影响减小,烧蚀深度达到一个最低值;随着扫描道间距继续增大,激光累积强度产生了不同的累积轮廓,材料的烧蚀深度接近于线性增大;当扫描道间距大于烧蚀线宽时,两个扫描道路径之间会产生非烧蚀材料,一些熔融物在烧蚀线边缘凝固,烧蚀深度接近于无增长。此外,随着扫描道间距增大,齿面粗糙度增加。由于材料表面使用高斯光束进行加工,被烧蚀凹坑的横截面呈抛物线形状。在较大的扫描道间距下加工时,残余材料的高度会略微高于材料的原始表面,从而使得材料熔化所形成的液态熔融物排出不彻底,这些熔融物冷却凝固后导致齿面粗糙度增大。综合考虑扫描道烧蚀深度以及齿面粗糙度的变化,后续正交实验选取扫描道间距为 10~16 μm。

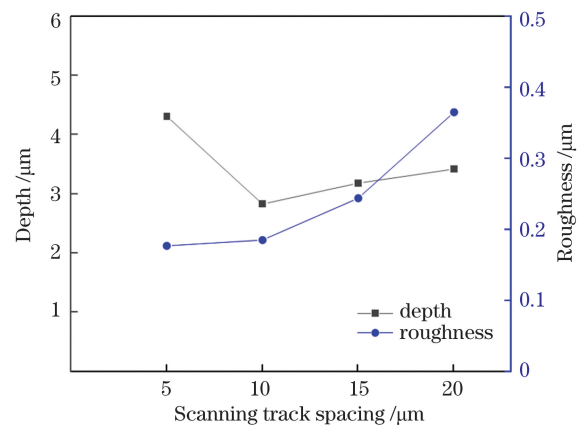


图 9 飞秒激光扫描道间距与面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 烧蚀深度和齿面粗糙度的关系曲线

Fig. 9 Ablation depth and tooth surface roughness of face gear material 18Cr2Ni4WA versus femtosecond laser scanning track spacing

### 3.1.5 飞秒激光离焦量对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 形貌特征的影响

在激光功率为 1.5 W、重复频率为 100 kHz、扫描速度为 120 mm·s<sup>-1</sup>、扫描道间距为 10 μm 的条件下,激光离焦量(-0.2~0.2 mm)对扫描道烧蚀深度和齿

面粗糙度的影响如图 10 所示。由图 10 可以看出,在正负离焦量下,随着离焦距离增加,烧蚀深度都减小。在负离焦量下,激光光束变为散焦入射,烧蚀焦点位于材料上方,材料吸收的激光能量减少;同时,等离子体在烧蚀过程中经碰撞导致激光散射,降低了激光入射能量,烧蚀深度减小<sup>[9]</sup>。当材料在焦点位置时,材料接收的能量密度最大,烧蚀深度最大。正离焦量下的烧蚀深度略小于负离焦量下的烧蚀深度。这是因为,当离焦量为正时,加工部位处于光束焦点之后,光束在加工之前已经发生了一系列非线性效应,能量有一定的削弱,因此正离焦下的烧蚀率会低于同位置负离焦量下的烧蚀率。所以,在正负离焦下,烧蚀深度随着离焦距离在一定范围内增大而减小,在离焦量为 0 时达到最大烧蚀深度。由于正负离焦下的能量密度降低,激光烧蚀不完全,液态材料无法从烧蚀凹坑内部彻底排出,因此正负离焦下的齿面粗糙度都大于离焦量为 0 时的粗糙度。综合考虑扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的变化,后续正交实验选取离焦量变化区间为-0.1~0.2 mm。

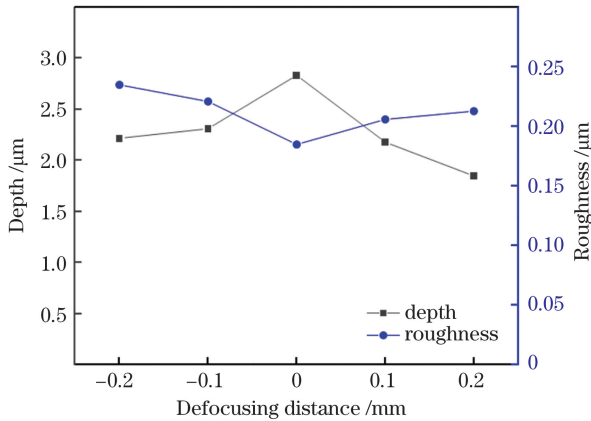


图 10 飞秒激光离焦量与面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 烧蚀深度和齿面粗糙度的关系曲线  
Fig. 10 Ablation depth and tooth surface roughness of face gear material 18Cr2Ni4WA versus femtosecond laser defocusing distance

### 3.2 正交实验结果分析

采用 828 fs 脉宽的飞秒激光烧蚀面齿轮材料 18Cr2Ni4WA,对激光功率(A)、重复频率(B)、扫描速度(C)、扫描道间距(D)、离焦量(E)各选取 4 个水平,结合单因素实验选取的参数范围设计正交实验。具体的因素水平如表 2 所示。

表 2 因素水平表  
Table 2 Factor level table

Level	P /mJ	f /kHz	v / (mm·s <sup>-1</sup> )	L /μm	J /mm
	A	B	C	D	E
1	1.5	250	65	10	-0.1
2	2	300	70	12	0
3	3	350	75	14	0.1
4	4	400	80	16	0.2

根据表 2 所列的因素水平设计 L<sub>16</sub>(4)<sup>5</sup> 正交实验表,将扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度作为评判标准,正交实验设计及结果如表 3 所示。

表 3 正交实验设计及结果  
Table 3 Orthogonal experimental design and result

No.	Level					Depth / μm	Roughness / μm
	A	B	C	D	E		
1	1	1	1	1	1	4.269	0.261
2	1	2	2	2	2	4.726	0.285
3	1	3	3	3	3	4.077	0.228
4	1	4	4	4	4	3.211	0.204
5	2	1	2	3	4	4.007	0.267
6	2	2	1	4	3	4.926	0.293
7	2	3	4	1	2	4.267	0.252
8	2	4	3	2	1	3.625	0.229
9	3	1	3	4	2	5.362	0.327
10	3	2	4	3	1	4.633	0.314
11	3	3	1	2	4	4.301	0.319
12	3	4	2	1	3	4.829	0.370
13	4	1	4	2	3	5.426	0.366
14	4	2	3	1	4	5.227	0.341
15	4	3	2	4	1	6.029	0.373
16	4	4	1	3	2	6.347	0.421

从表 3 的实验结果可以看出,扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度随激光参数的变化难以用统一的数学模型精确描述,所以在优化设计时采用正交实验中极差分析与方差分析相结合的方法,计算得到在保证扫描道烧蚀深度的同时具有合适齿面粗糙度的激光参数组。

设  $k_i (i=1,2,3,4)$  表示每一列同一水平所对应的实验结果的平均值,则任一因素的极差可以表示为

$$R_{\text{range}} = \max\{k_1, k_2, k_3, k_4\} - \min\{k_1, k_2, k_3, k_4\} \quad (1)$$

不同的极差可以反映出各因素对评判标准的影响程度,极差值越大,表示该因素的影响程度越大。根据极差的大小排列出各因素对扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度影响程度的顺序,就可以找激光功率、重复频率、离焦量、扫描速度和扫描道间距的最优组合方案。具体的极差分析结果如表 4 所示。

从表 4 所示的极差值大小顺序可以看出激光功率的影响程度最大,扫描道间距的影响程度最小。由扫描道烧蚀深度的极差分析表可知,应尽可能地利用激光能量,使其效率最高,这样烧蚀深度的 K 值最大,因此选择 A<sub>4</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>4</sub>E<sub>2</sub>(即因素 A 取第四水平,因素 B 取第二水平,因素 C 取第一水平,因素 D 取第四水平,

表 4 极差分析表  
Table 4 Range analysis table

Item	Level average	$P$ /mJ	$f$ /kHz	$v$ /(mm·s <sup>-1</sup> )	$L$ /μm	$J$ /mm
Ablation depth	$k_1$	4.071	4.766	4.961	4.648	4.639
	$k_2$	4.206	4.878	4.898	4.520	5.176
	$k_3$	4.781	4.669	4.572	4.766	4.815
	$k_4$	5.757	4.503	4.384	4.882	4.187
	Range	1.656	0.375	0.577	0.362	0.989
	Preferred plan	$A_4B_2C_1D_4E_2$				
Order of influence	$A>E>C>B>D$					
Roughness	$k_1$	0.245	0.305	0.324	0.306	0.294
	$k_2$	0.260	0.308	0.324	0.300	0.321
	$k_3$	0.333	0.293	0.281	0.308	0.314
	$k_4$	0.375	0.306	0.284	0.299	0.283
	Range	0.130	0.015	0.043	0.009	0.038
	Preferred plan	$A_1B_3C_3D_4E_4$				
Order of influence	$A>C>E>B>D$					

因素  $E$  取第二水平)为优化参数组。对于齿面,应使其尽可能平整光滑,即齿面粗糙度的  $K$  值越小越好,因此选择  $A_1B_3C_3D_4E_4$  为优化参数组。

扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的极差分析产生了两组不同的优化参数组,因此需要再进行方差分析,验证各因素对两种评判标准的显著性,选择能同时兼顾烧蚀深度和齿面粗糙度的优化参数组。

设  $S_T$  总误差平方和,  $S_U$  ( $U=A, B, C, D, E$ ) 为控制变量独立作用引起的水平项误差平方,  $S_Z$  为误差项平方和,它们的计算公式为

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_{ij}} (x_{ij} - \bar{x})^2, \quad (2)$$

$$S_U = \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i^U - \bar{x})^2, \quad (3)$$

$$S_Z = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_{ij}} (x_{ij} - \bar{x}_i^U)^2. \quad (4)$$

其中  $S_T$  与  $S_U, S_Z$  之间的关系为

$$S_T = \sum_{U=A}^E S_U + S_Z, \quad (5)$$

式中:  $n_{ij}$  为观测值的个数;  $k$  为因素水平的个数;  $x_{ij}$  为第  $i$  水平第  $j$  组实验的数据值;  $\bar{x}$  为评判标准总数据的平均值;  $\bar{x}_i^U$  为每一因素在各水平下的平均值。同时,记  $M_U$  为各因素的组间均方误差,  $M_Z$  为各因素的组内均方误差,它们的计算公式分别为

$$M_U = \frac{S_U}{k-1}, \quad (6)$$

$$M_Z = \frac{S_Z}{n-k}. \quad (7)$$

根据组间均方误差和组内均方误差可求得显著度

值  $F$ , 计算公式为

$$F = \frac{M_U}{M_Z}. \quad (8)$$

计算得到了扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的方差分析表,如表 5 所示。为了检验各因素的显著性,显著度  $F$  的临界值取  $\alpha=0.01$  时的值。若某因素的显著度值大于临界值时,说明该因素对评判标准的影响高度显著,用  $\blacktriangle\blacktriangle\blacktriangle$  表示;若某因素的显著度值小于临界值,则说明该因素对评判标准的影响不显著,用  $\blacktriangle$  表示。本次实验中显著度  $F$  的临界值为  $F_{0.05}(3, 12) = 5.95$ 。

由方差分析结果可以看出激光功率对扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度都有显著性影响。激光功率越高,烧蚀面齿轮材料所形成的烧蚀凹坑越大,产生的熔融物越多,熔融物无法排出所形成的粗糙度就越大。在实际加工过程中,应在保证一定加工效率的前提下使面齿轮材料表面尽可能平整,在综合考虑极差分析结果后选择因素  $A$  (激光功率)的第三水平。离焦量对烧蚀深度的影响是高度显著,但对齿面粗糙度的影响是一般显著,综合极差分析结果选择因素  $E$  (离焦量)的第三水平。扫描速度对烧蚀深度和齿面粗糙度的影响都是比较显著,综合极差分析结果后选择因素  $C$  (扫描速度)的第一水平。激光重复频率、扫描道间距对烧蚀深度以及齿面粗糙度的影响都是不显著,综合极差分析结果后选择因素  $B$  (重复频率)的第二水平和因素  $D$  (扫描道间距)的第四水平。即优选参数组合为  $A_3B_2C_1D_4E_3$ , 也就是选择激光功率为 3 W, 激光重复频率为 300 kHz, 扫描速度为 65 mm·s<sup>-1</sup>, 扫描道间距为 16 μm, 离焦量为 0.1 mm。

表 5 方差分析表  
Table 5 Variance analysis table

Item	Source of variance	Sum of squared deviations <i>S</i>	Degree of freedom <i>d</i>	Mean square sum <i>S/d</i>	<i>F</i> value ( <i>M<sub>U</sub>/M<sub>L</sub></i> )	Significance
Ablation depth	<i>A</i>	7.0563	3	2.3521	26.5474	▲▲▲▲
	<i>B</i>	0.3031	3	0.1010	1.1400	▲
	<i>C</i>	0.8917	3	0.2972	3.3544	▲
	<i>D</i>	0.2908	3	0.0969	1.0937	▲
	<i>E</i>	2.0262	3	0.6754	7.6230	▲▲▲▲
	Random	1.0632	12	0.0886		
	Sum	11.6313	15			
Roughness	<i>A</i>	0.04536	3	0.01512	10.7552	▲▲▲▲
	<i>B</i>	0.00057	3	0.00019	0.1352	▲
	<i>C</i>	0.00674	3	0.00225	1.5981	▲
	<i>D</i>	0.00022	3	0.00007	0.0523	▲
	<i>E</i>	0.00378	3	0.00126	0.8963	▲
	Random	0.01687	12	0.00141		
	Sum	0.07354	15			

## 4 预测模型与仿真

### 4.1 回归模型

根据表 3 中的正交实验结果,采用回归分析<sup>[12-13]</sup>进行预测分析。选择幂函数作为评判标准模型进行建模,设

$$T = k' \cdot P^\alpha \cdot f^\beta \cdot v^\delta \cdot L^\epsilon \cdot J^\gamma, \quad (9)$$

式中: $T$  为扫描道烧蚀深度  $h$  或齿面粗糙度  $R_a$ ;  $k'$  为

比例系数; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 、 $\epsilon$ 、 $\gamma$  分别为  $P$ 、 $f$ 、 $v$ 、 $L$  和  $J$  对  $T$  的影响指数。

在式(9)中,随机变量  $T$  与 5 个自变量  $P$ 、 $f$ 、 $v$ 、 $L$ 、 $J$  之间存在着多元非线性关系。通过对数变换,可将式(9)化简为线性模型,利用 SPSS 软件选择基于最小二乘法的回归分析对线性表达式进行多元线性回归求解,可得到扫描道烧蚀深度  $h$  和齿面粗糙度  $R_a$  的多元回归分析结果,如表 6 和表 7 所示。

表 6 扫描道烧蚀深度的多元回归分析结果

Table 6 Multiple regression analysis results of scanning track ablation depth

Regression statistics					
Multiple <i>R</i>	0.9020				
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.8135				
Adjusted <i>R</i> <sup>2</sup>	0.7203				
Standard error	0.4439				
Observations	16				
Variance analysis					
Parameter	Degree of freedom	Sum of squares	Mean squares	<i>F</i> value	Significance
Return	5	8.5980	1.7195	8.7260	0.00205
Residual	10	1.9705	0.1971		
Total	15	10.5685			
Regression parameter					
Parameter	Coefficient	Standard error	<i>t</i> statistic	<i>P</i> value	Lower 95%
Intercept	6.0212	1.7352	3.4700	0.0060	2.1550
$\alpha$	0.6782	0.1556	5.8672	$1.5 \times 10^{-4}$	0.4206
$\beta$	-0.0020	0.0020	-1.0059	0.3382	-0.0064
$\delta$	-0.0411	0.0199	-2.0700	0.0653	-0.8532
$\epsilon$	0.0474	0.0496	0.9556	0.3618	-0.0632
$\gamma$	-1.1718	0.9930	-1.7313	0.1141	-3.9302



表 7 齿面粗糙度的多元回归分析结果  
Table 7 Multiple regression analysis results of tooth surface roughness

Regression statistics					
Multiple R	0.9419				
R <sup>2</sup>	0.8871				
Adjusted R <sup>2</sup>	0.8306				
Standard error	0.0253				
Observations	16				
Variance analysis					
Parameter	Degree of freedom	Sum of squares	Mean squares	F value	Significance
Return	5	0.0503	0.0101	15.7127	1.8 × 10 <sup>-4</sup>
Residual	10	0.0064	0.0006		
Total	15	0.0567			
Regression parameters					
Parameter	Coefficient	Standard error	t statistic	P value	Lower 95%
Intercept	0.4108	0.0989	4.1543	0.0020	0.1905
α	0.0551	0.0067	8.3560	8 × 10 <sup>-5</sup>	0.0404
β	-2.6 × 10 <sup>-5</sup>	0.0001	-0.2298	0.8228	-2.78 × 10 <sup>-4</sup>
δ	-0.0032	0.0011	-2.8465	0.0174	-0.0057
ε	-0.0006	0.0028	-0.2210	0.8295	-0.0069
γ	-0.0415	0.0566	-0.7337	0.4800	-0.1675

按表 6 与表 7 中的回归系数,对  $k'$  进行反变换,由式(9)可得飞秒激光精修面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的扫描道烧蚀深度  $h$ 、齿面粗糙度  $R_a$  的回归模型分别为

$$h = 4.67 \cdot P^{0.678} \cdot f^{-0.02} \cdot v^{-0.41} \cdot L^{0.47} \cdot J^{1.1718}, \quad (10)$$

$$R_a = 0.53 \cdot P^{0.0551} \cdot f^{-2.6 \exp(-5)} \cdot v^{-0.0032} \cdot L^{-0.0006} \cdot J^{-0.0415}. \quad (11)$$

将正交实验分析所得数据代入回归分析建立的预测模型中,计算可得扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的预测结果分别为 5.83 μm 和 0.554 μm。

#### 4.2 仿真模型

烧蚀阈值是激光烧蚀材料的临界能量密度,由材料本身的性质决定<sup>[14]</sup>。飞秒激光脉冲的能量在空间上呈高斯分布,其能量密度  $F(R)$  沿光斑截面直径分布的表达式为<sup>[15]</sup>

$$F(R_s) = F_0 \exp\left(-\frac{2R_s^2}{\omega_0^2}\right), \quad (12)$$

式中: $F_0$  为光斑中心的能量密度; $\omega_0$  为束腰半径; $R_s$  是到光斑中心的距离。在光斑截面上对能量密度积分,可以得到脉冲能量  $E_p$ 。杨奇彪等<sup>[15]</sup>通过激光功率  $P$  和重复频率得到脉冲能量  $E_p$ ,进而计算出了光斑中心的能量密度  $F_0$ 。具体的计算公式为

$$E_p = \int_0^{+\infty} 2\pi R_s F(R_s) dR_s = \frac{\pi\omega_0^2}{2} F_0 = \frac{P}{f}. \quad (13)$$

记单脉冲烧蚀凹坑直径为  $D$ ,烧蚀凹坑边缘处刚好可以发生烧蚀时距离光斑中心  $D/2$  处的能量密度为烧蚀阈值  $F_{th}$ ,则由式(12)可得

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

测量上述不同功率下单脉冲实验中扫描道的烧蚀直径  $D$ ,并绘制散点图,然后拟合得到相关直线方程,根据拟合直线斜率可求解得到  $\omega_0$ 。当烧蚀凹坑直径无限接近 0 时,光斑中心处的能量密度为材料的烧蚀阈值<sup>[10]</sup>,即

$$F_{th} = F_0 = 2P / (\pi\omega_0^2 f). \quad (15)$$

将正交优化后所得激光功率和重复频率代入式(15),可以求解得到面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的烧蚀阈值  $F_{th} = 0.1189 \text{ J/cm}^2$ 。

飞秒激光能量在传播过程中呈指数规律递减<sup>[16]</sup>,则距材料表面  $H$  处的能量密度可以表示为

$$F(H, R_s) = \beta F(R_s) \exp(-bH), \quad (16)$$

式中: $\beta$  为材料的吸收率; $b$  为材料的吸收系数。

飞秒激光在烧蚀过程中存在能量累积现象,在前一个脉冲激光作用结束后,一部分热量会损失在外界环境中,剩下的大部分热量被材料吸收并累积到材料内部<sup>[17]</sup>。将材料内部残留的能量等价于本次脉冲激光的能量,则可得到材料内部距离表面  $H$  处,第  $N$  个激光脉冲照射后的能量密度为<sup>[18]</sup>



$$Q_T = b\beta F(R_s) \exp(-bH) N^{1-s}, \quad (17)$$

式中:  $s$  为能量累积系数。扫描过程中脉冲数<sup>[19]</sup>的表达式为

$$N = \frac{2\omega_0 f}{v}. \quad (18)$$

本次实验采取的是直角 S 形扫描加工方式,考虑到加工时两条扫描道之间距离  $L$  的影响,本文引入了齿面相邻扫描道横向位移方向上的激光累积强度,即

$$Q_C = 2F_0 \exp\left(-\frac{L^2}{2\omega_0^2}\right). \quad (19)$$

表 8 材料特性及激光参数

Table 8 Material characteristics and laser parameters

Parameter	Symbol and unit	Numerical value	Parameter	Symbol	Numerical value
Absorption coefficient	$b / \text{m}^{-1}$	$4.97 \times 10^7$	Waist radius	$\omega_0 / \mu\text{m}$	23.14
Absorption rate	$\beta$	20%	Frequency	$f / \text{kHz}$	300
Laser power	$P / \text{W}$	3	Energy density	$F_0 / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	1.59
Pulse width	$\tau_p / \text{fs}$	828	Wavelength	$\lambda / \text{nm}$	1030
Scanning speed	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	65	Scanning track pitch	$\Delta L / \mu\text{m}$	16

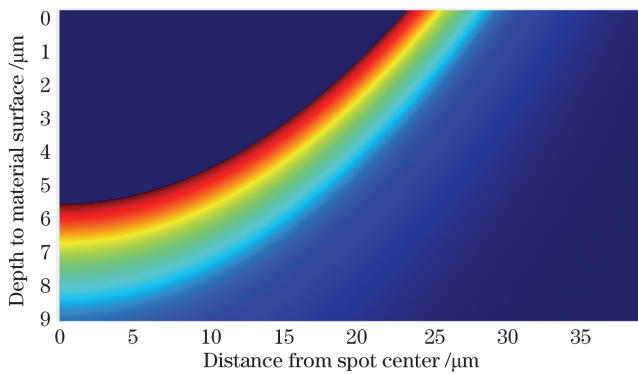


图 11 面齿轮烧蚀凹坑剖面轮廓图

Fig. 11 Profile of ablation pits on tooth surface

## 5 实验结果及分析

采用上述精修工艺参数对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 进行飞秒激光精修加工,利用三维设备及

结合式(16)、(17)、(19)可得到材料吸收能量后内部的能量密度为

$$F(H, R_s) = 2\beta b F_0 \exp(2R_s^2 - bH) \cdot \exp\left(-\frac{L^2}{2\omega_0^2}\right) \exp(N^{1-s}). \quad (20)$$

仿真模型所用参数如表 8 所示。

根据式(20)采用 MATLAB 进行仿真求解,得到了图 11 所示的烧蚀凹坑剖面的仿真图,去掉达到烧蚀阈值的材料所形成的轮廓线即可得到扫描道烧蚀深度值为  $5.682 \mu\text{m}$ 。

轮廓仪对烧蚀区进行观测,扫描道的扫描电镜(SEM)图像和三维超景深显微镜图像分别如图 12、13 所示。

从图 12 可以看出扫描道烧蚀路径完整,扫描道两壁比较整齐,表面有轻微损伤,熔化的液态材料基本都被推离扫描道凹坑底部,但由于推动动能不足,较大的熔化材料液滴在烧蚀坑壁重新凝固,使得凹坑底部残留一些未排出的液态材料所形成的气泡和一些由高温溅射形成的颗粒。在此图像中,扫描道两壁烧蚀完全且无残留,凹坑表面大部分较为平整,烧蚀区域形貌达到了预期要求。

图 13 为采用三维超景深显微镜获得的扫描道图像。为避免结果的偶然性,截取了不同位置处的三维超景深显微镜测量的扫描道烧蚀深度值,如图 14 所示,最终的烧蚀深度值取不同位置处的平均值。最终得到了在精修工艺参数下飞秒激光烧蚀面齿轮材 18Cr2Ni4WA 的扫描道平均烧蚀深度为  $5.376 \mu\text{m}$ 。

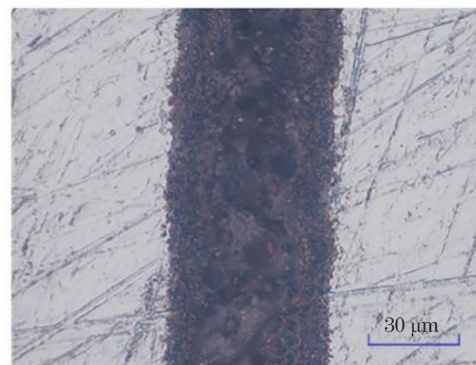
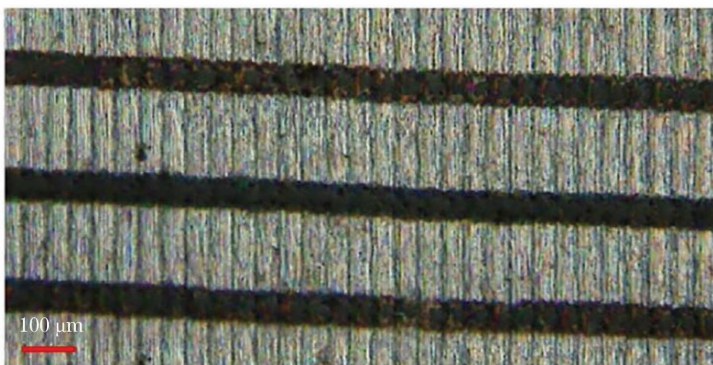


图 12 优化参数下扫描道的 SEM 图像

Fig. 12 SEM images of scanning track under optimized parameters

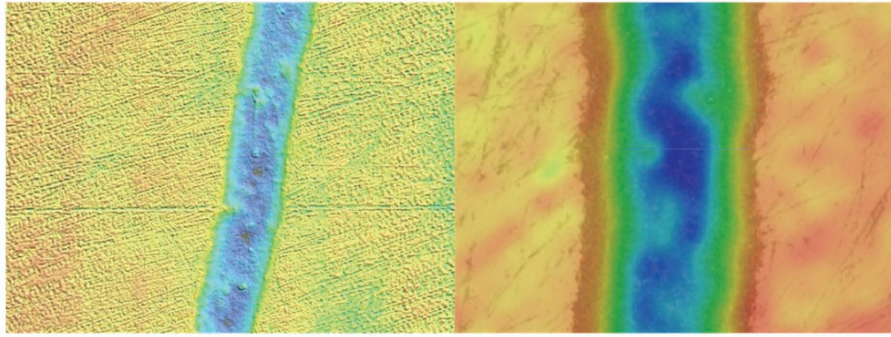


图 13 扫描道的三维超景深显微镜图像

Fig. 13 Three-dimensional super-depth of field microscopy image of scanning track

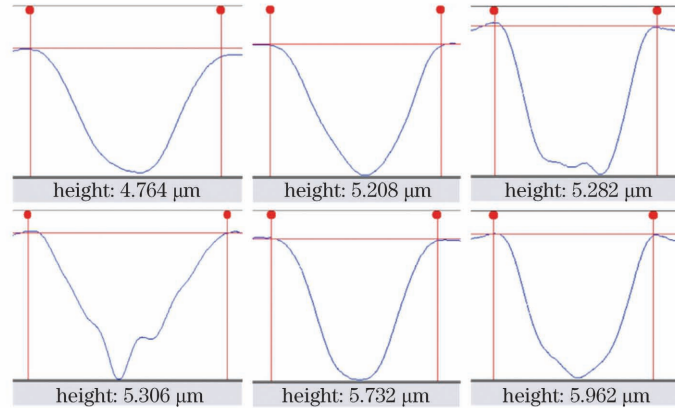


图 14 不同位置处超景深显微镜测量的烧蚀深度值

Fig. 14 Ablation depth values measured in different positions with ultra-depth of field microscope

齿面粗糙度的测量结果如图 15 所示。根据图 15 可以得到在精修工艺参数下飞秒激光烧蚀面齿轮材 18Cr2Ni4WA 的齿面粗糙度  $R_a$  为  $0.506 \mu\text{m}$ 。

预测模型、仿真模型和实际实验结果的对比如表 9 所示。根据回归模型计算得到的烧蚀深度和齿面粗糙度分别为  $5.83 \mu\text{m}$  和  $0.554 \mu\text{m}$  (预测值), 采用正交实验优选方案  $A_3B_2C_1D_4E_3$  进行实验得到的烧蚀深度和齿面粗糙度分别为  $5.376 \mu\text{m}$  和  $0.506 \mu\text{m}$ , 烧蚀深度预测值与实验值的最大相对误差为  $8.4\%$ , 齿

面粗糙度预测值与实验值的最大相对误差为  $9.5\%$ , 根据仿真模型计算得到的烧蚀深度与实验测量的烧蚀深度的最大相对误差为  $5.7\%$ 。误差的产生主要是由于回归模型无法考虑能量传递以及能量损失等的影响以及仿真模型对材料特性的研究不足。根据表 9 计算得到的相对误差表明两种模型的误差均在合理范围之内, 证明了参数优化的合理性, 保证了在高激光效率下产生最大的扫描道烧蚀深度和最小的齿面粗糙度, 为飞秒激光精修面齿轮提供了理论依据。

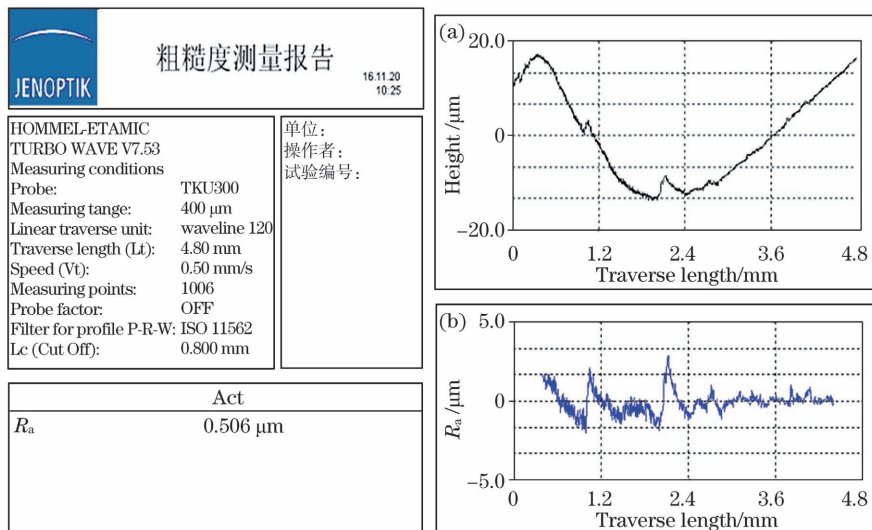


图 15 Hommel T8000 轮廓仪的测量结果。(a)原始轮廓;(b)粗糙度轮廓

Fig. 15 Hommel T8000 profilometer measurement results. (a) Original contour; (b) roughness profile

表 9 面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的预测值和实验值  
Table 9 Predicted and experimental scanning track ablation depth and tooth surface roughness of face gear material 18Cr2Ni4WA

Parameter	Regression prediction value	Simulation value	Experimental value
Scanning track ablation depth	5.83	5.682	5.376
Tooth surface roughness	0.554		0.506

## 6 结 论

本文开展了多脉冲飞秒激光烧蚀面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 扫描道的烧蚀形貌研究,采用单因素实验分析扫描道烧蚀深度、齿面粗糙度与激光功率、重复频率、扫描速度、扫描道间距、离焦量之间的关系,然后利用正交实验对目标参数进行优化,得到优化的参数组;接着采用回归模型和仿真模型对扫描道烧蚀深度及齿面粗糙度进行预测,并将预测结果与优化参数下的实验结果进行对比,得到以下结论:

1)激光功率对扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的影响程度最大,扫描道间距的影响程度最小。

2)对单因素实验数据进行正交分析后选择激光功率为 3 W、重复频率为 300 kHz、扫描速度为  $65 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、扫描道间距为  $16 \text{ }\mu\text{m}$ 、离焦量为  $0.1 \text{ mm}$  的优化方案,即  $A_3B_2C_1D_4E_3$ 。

3)在回归预测时,根据表 3 的正交实验结果,利用 SPSS 软件选择基于最小二乘法的回归分析,得到了扫描道烧蚀深度和齿面粗糙度的回归预测值,其与优化参数下实验结果的最大相对误差分别为 8.4% 和 9.5%;建立了多效应的仿真模型,并用该模型计算了扫描道烧蚀深度,计算值与优化参数下实验结果的最大相对误差为 5.7%。

4)证明了正交实验结果的可行性,在正交实验优选方案下可以得到最大的扫描道烧蚀深度以及最小的齿面粗糙度,这一结果为飞秒激光精修加工面齿轮提供了理论依据。

## 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] 明兴祖, 金磊, 肖勇波, 等. 齿轮材料 20CrMnTi 的飞秒激光烧蚀特征 [J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1214002.  
Ming X Z, Jin L, Xiao Y B, et al. Femtosecond laser ablation characteristics of gear material 20CrMnTi [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1214002.

[3] 董世运, 刚肖, 闫世兴, 等. 基于飞秒激光的表面微纳加工技术综述与展望 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(3): 83-89.  
Dong S Y, Gang X, Yan S X, et al. Status and prospects of surface micro-nano fabrication technology based on femtosecond laser [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2016, 30(3): 83-89.

[4] Tsubouchi M, Momose T. Rovibrational wave packet manipulation using shaped midinfrared femtosecond pulses toward quantum

computation: optimization of pulse shape by a genetic algorithm [J]. Physical Review A, 2008, 77(5): 052326.

[5] Ho W H, Tsai J T, Lin B T, et al. Adaptive network-based fuzzy inference system for prediction of surface roughness in end milling process using hybrid Taguchi-genetic learning algorithm [J]. Expert Systems With Applications, 2009, 36(2): 3216-3222.

[6] 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): 0706002.  
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.

[7] 施克明, 王明娣, 陈添禹, 等. 飞秒激光扫描刻蚀覆铜板工艺及质量研究 [J]. 应用激光, 2018, 38(1): 81-88.  
Shi K M, Wang M D, Chen T Y, et al. Study on technology and quality of etching copper clad laminate with femtosecond laser [J]. Applied Laser, 2018, 38(1): 81-88.

[8] 倪超, 王明娣, 施克明, 等. 飞秒激光刻蚀覆铜板的正交试验优化研究 [J]. 应用激光, 2018, 38(5): 787-793.  
Ni C, Wang M D, Shi K M, et al. Study on optimization of orthogonal test for femtosecond laser etching copper clad laminate [J]. Applied Laser, 2018, 38(5): 787-793.

[9] 张晓, 刘凯, 王明娣, 等. 基于飞秒激光的覆铜板刻蚀工艺 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214003.  
Zhang X, Liu K, Wang M D, et al. Etching technology for copper-clad laminates based on femtosecond laser [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1214003.

[10] 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.  
Lin J J, Ming R, Li X K, et al. Study on morphology characteristics of femtosecond laser-ablated face gear materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402017.

[11] 朱然, 张永康, 孙桂芳, 等. 三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金的残余应力场数值模拟 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0802007.  
Zhu R, Zhang Y K, Sun G F, et al. Numerical simulation of residual stress fields in three-dimensional flattened laser shocking of 2024 aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0802007.

[12] 王清波. 非线性回归模型参数估计及其应用 [D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2011.  
Wang Q B. Nonlinear regression model parameter estimation and its application [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2011.

[13] 王蕊, 董祥旻, 何卫革. 一种多元非线性回归模型的建立方法及其应用 [J]. 中国考试, 2010(11): 17-22.  
Wang R, Dong X M, He W P. A kind of multiple nonlinear regression model and its application [J]. China Examinations, 2010(11): 17-22.

[14] 王菲, 李玉瑶, 车英, 等. 平顶激光束诱导薄膜损伤阈值测量系统 [J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0314003.  
Wang F, Li Y Y, Che Y, et al. Measurement system of flattop laser induced damage threshold to film [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 0314003.

[15] 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): 0614002.  
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): 0614002.

[16] 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.
- [17] 蔡颂, 熊彪, 陈根余, 等. 青铜金刚石砂轮的激光整形与修锐[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0406008.
- Cai S, Xiong B, Chen G Y, et al. Laser truing and sharpening of bronze-bond diamond grinding wheel[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0406008.
- [18] 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.
- Shao J F, Guo J, Wang T F. Theoretical research on dynamics of femto-second laser ablation crystal silicon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2419-2424.
- [19] Choi H W, Farson D F, Bovatsek J, et al. Direct-write patterning of indium-tin-oxide film by high pulse repetition frequency femtosecond laser ablation[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 5792-5799.

## Experimental Research on Optimizing Process Parameters of Femtosecond Laser Finishing of Face Gear

Ming Xingzu, Fan Binrui<sup>\*</sup>, Li Chuying, Yuan Lei, Wu Tao, Ming Rui<sup>\*\*</sup>

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

### Abstract

**Objective** Face gears have complex tooth profiles, are difficult to manufacture, demand a high level of technical expertise, and traditional machining accuracy cannot meet production requirements. Therefore, femtosecond laser fine correction face gear was proposed as a new processing technology. In this study, we investigated the multifactor optimization of laser and correction parameters during the femtosecond laser ablation of face gear and presented theoretical guidance for the production field.

**Methods** FemtoYL-100 all-fiber laser produced an 828 fs femtosecond laser to ablate 18Cr2Ni4WA, a three-dimensional digital video microscope observed the depth of ablation pits, and Hommel profiler-Hommel T8000 detected tooth surface roughness. First, a single-factor femtosecond laser right-angle S-type scanning was performed to machine the face gear material, and the influence degree and trend of laser correction parameters on the scanning track ablation depth and tooth surface roughness were obtained by combining the theoretical and experimental results. Based on the results, we analyzed and selected the value range of each factor and designed a factor-level table. According to the factor-level table, we performed multiple orthogonal experiments and tested the results of scanning track ablation depth and tooth surface roughness. The results were extremely poor. Furthermore, in the analysis of variance, after combining the two methods, the optimal laser parameters and combination of correction parameters were selected. A regression analysis model was established using the results of orthogonal experiments, and the power function was selected as the criterion model for modeling. After substituting the optimized parameter combination, the prediction results of the scanning track ablation depth and tooth surface roughness were obtained. A simulation model based on the ablation threshold and energy accumulation was established, and the predicted value of the scanning track ablation depth was obtained using MATLAB to solve the problem. Using optimized parameter combination to process the opposite gear material, measuring the scanning track ablation depth and tooth surface roughness, and comparing them with the regression and simulation models' results, the maximum relative error was within a reasonable range, verifying the feasibility of the orthogonal result.

**Results and Discussions** According to single-factor experiments, the influence trends of laser power, repetition frequency, scanning speed, scanning track spacing, and defocusing distance on scanning track ablation depth and tooth surface roughness are obtained, and the parameter range is reduced. The results show that the energy density of the material increases and gradually reaches the ablation threshold as the laser power increases. Part of the material is vaporized, and the continuous decrease in temperature causes the material to melt into a liquid state, resulting in a pressure difference at the pit bottom, and the liquid material is difficult to discharge from the pit. The ablation depth and tooth surface roughness continue to increase (Fig. 6). As the repetition frequency increases, the number of times the pulsed laser acts on the material surface increases, the energy absorbed by the material increases, and the ablation depth and tooth surface roughness increase (Fig. 7). As the scanning speed increases, the spot overlap rate decreases, the contact between the femtosecond laser and material per unit area decreases, the energy obtained from the material decreases, and the ablation depth and tooth surface roughness decrease (Fig. 8). As the scanning track spacing increases, the lateral cumulative effect of the laser within a certain range intensifies, the ablation depth decreases, the scanning track spacing continues to increase, the energy accumulation degree is greater than the lateral accumulation, the ablation depth approaches linear growth, and the tooth surface roughness continues to increase (Fig. 9). An increase or decrease in the defocus will cause laser scattering, which will reduce the scanning track ablation depth, and the ablation will be



incomplete, so when the defocus is 0, the tooth surface roughness is the smallest, and as the defocus amount increases or decreases, the tooth surface roughness will increase (Fig. 10). According to the single-factor results, we narrowed the range of parameters, designed orthogonal experiments (Tables 2 and 3), and used range and variance analyses to obtain optimal parameter combinations (Tables 4 and 5). We established a regression analysis model, used the least-squares method to calculate the orthogonal results, obtained the regression expressions (Tables 6 and 7), and substituted the optimal parameter combination to predict the value of scan channel ablation depth and tooth surface roughness. We also established a simulation model, calculated a material ablation threshold value of  $0.1189 \text{ cm}^{-2}$  according to the empirical formula, and used MATLAB to predict the value of scan channel ablation depth after substituting the optimal parameter combination. Experiments were performed according to the optimal parameter combination, and the experimental values of the scanning track ablation depth and tooth surface roughness were obtained. The maximum relative errors of ablation depth and tooth surface roughness from predicted value of regression model were 8.4% and 9.5%, whereas the maximum relative error of ablation depth from predicted value of simulation model was 5.7%, indicating the feasibility of the optimized results within a reasonable range.

**Conclusions** The influence trend and degree of laser correction parameters on the ablation depth and tooth surface roughness of a scanning track are determined, and an orthogonal analysis table is established to obtain the optimal parameter combination. We establish a regression model, substitute the optimal parameters to predict the scan channel ablation depth and tooth surface roughness. We also established a simulation model, and use MATLAB to predict the experimental values of the scanning track ablation depth. The optimized parameter combination processing experiment is performed, and the maximum relative errors obtained after comparing the experimental value with predicted values of regression and simulation models are within a reasonable range, proving the rationality of the parameter optimization.

**Key words** laser technique; femtosecond laser; process parameters; orthogonal experiment; regression model; simulation analysis; tooth surface profile