

文章编号:1001-5078(2024)12-1834-07

· 激光应用技术 ·

面齿轮飞秒激光精修工艺参数优化实验研究

明兴祖^{1,2}, 李楚莹², 李 湾³, 杨向东¹, 周春英¹, 陈伟全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:飞秒激光精修面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的烧蚀区域表面形貌与激光工艺参数直接相关。为了获得更好的烧蚀区域表面形貌,设计三因素三水平的正交试验,并通过信噪比分析激光重复频率、能量密度和扫描速度对烧蚀区域深度和表面粗糙度的影响,获得了单一响应目标最佳时的工艺参数组合。结合灰色关联法综合优化两个响应目标,得到最优的工艺参数组合为重复频率 200 kHz,能量密度 3.5 J/cm²,扫描速度 110 mm/s。通过最优工艺参数验证试验,发现优化后的表面形貌综合质量更佳,证明了灰色关联法多响应目标优化的可靠性,为改善飞秒激光精微加工面齿轮材料表面形貌质量提供了一种有效方法。

关键词:飞秒激光;面齿轮材料;烧蚀形貌;灰色关联法;工艺参数优化

中图分类号:0436;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.005

Experimental study on the optimization of process parameters for femtosecond laser finishing of face gears

MING Xing-zu^{1,2}, LI Chu-ying², LI Wan³, YANG Xiang-dong¹, ZHOU Chun-ying¹,
CHEN Wei-quan¹

(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: The surface morphology of the ablation region of femtosecond laser finishing surface gear material 18Cr2Ni4WA is directly related to the laser process parameters. In order to obtain a better surface topography of the ablation region, a three-factor, three-level orthogonal test is designed, and the effects of laser repetition frequency, energy density and scanning speed on the depth of the ablation region and surface roughness are analyzed by signal-to-noise ratio, and the optimal combination of process parameters is obtained with a single response target. Combining the grey correlation method to optimize the two response targets, the optimal process parameter combinations are obtained as 200 kHz repetition frequency, 3.5 J/cm² energy density, and 110 mm/s scanning speed, and the optimal process parameter validation test shows that the optimized surface topography has a better overall quality, which proves the reliability of the grey correlation method of multi-response optimization, and provides a method to improve the quality of

基金项目:广东省普通高校重点领域专项项目(No. 2023ZDZX3050; No. 2023ZDZX3051);广东省普通高校青年创新项目(No. 2023KQNCX137);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(No. 22B0994);湖南省自然科学基金项目(No. 2023JJ50207);国家自然科学基金项目(No. 51975192)资助。

作者简介:明兴祖(1964-),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事微纳与绿色制造技术方面的研究。E-mail: mxz9036@126.com

通讯作者:李楚莹(1998-),女,硕士,主要从事激光精微加工技术方面的研究。E-mail: 675175745@qq.com

收稿日期:2024-03-18

surface topography for the femtosecond laser micromachined face gears. This proves the reliability of the grey correlation method and provides an effective method to improve the surface topography of femtosecond laser micromachined gears.

Keywords: femtosecond laser; face gear material; ablative morphology; grey relational method; optimization of process parameters

1 引言

面齿轮传动具有传动比大、承载能力强等优点,然而其齿形复杂,传统的齿轮机械加工方法难以将面齿轮加工至更高精度^[1-3]。飞秒激光脉冲宽度超短且峰值功率极高,具有加工区域精确、可精密加工任何材料等优点^[4-5]。为得到加工精度及加工质量更高的面齿轮,本文对飞秒激光精微加工面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的表面形貌质量进行研究。

Davydov 等^[6]基于双温模型模拟分析了飞秒激光不同工艺参数对铜和铝表面形貌的影响;Bamoto 等^[7]通过贝叶斯优化算法对飞秒激光加工工艺参数进行优化;Zhang 等^[8]将机器学习和遗传算法相结合,以提高烧蚀凹坑质量和加工效率为目标优化飞秒激光工艺参数;Bakhtiyari 等^[9]采用田口-灰色关联法,将激光工艺参数作为输入因子,加工深度和表面粗糙度作为响应因子,得到了激光加工蓝宝石的最佳工艺参数;Zhang 等^[10]采用响应曲面法建立回归模型,以最高材料去除率和最小热影响区为目标,对飞秒激光加工工艺参数进行优化。

本文以面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 为研究对象,利用正交试验分析研究影响飞秒激光烧蚀面齿轮材料表面形貌的主要因素,并预测最佳工艺参数组合。通过对试验结果进行对比分析,验证预测结果的准确性,实现考虑多个工艺参数影响下多个响应目标的改善。

2 试验设备与设计

2.1 试验设备

飞秒激光精修面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的加工系统如图 1 所示,主要由飞秒激光器、光路系统、四轴移动平台、计算机辅助系统、CCD 监测系统及吹气系统组成。

试验选用的激光器为 FemtoYL-100 全光纤飞秒激光器,其最大功率为 116.4 W,可产生中心波长为 1030 nm 的脉冲激光。烧蚀区域深度采用 3D 激光共聚焦形貌测量显微镜 VK-X260K 进行检测,其

放大倍数范围为 28000 倍以内。表面粗糙度的检测采用 Hommel T8000 轮廓仪,其分辨率可达 0.1 μm 。

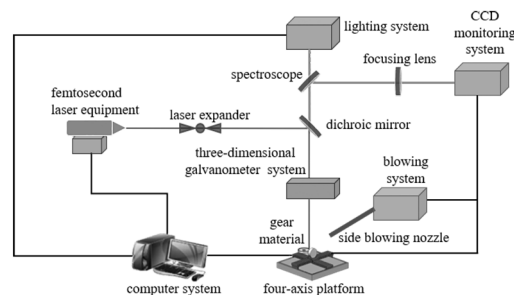


图 1 飞秒激光精修系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of femtosecond laser micromachining system

2.2 试验设计

试验以提高飞秒激光精修的效率 and 表面质量为目标,分析研究飞秒激光重复频率 F 、能量密度 D 、扫描速度 V 三因素对烧蚀区域深度和表面粗糙度的影响,以获得最佳工艺参数组合。其中飞秒激光采用弓字形的扫描路径进行烧蚀,具体扫描路径如图 2 所示,扫描道成直线且相互平行。

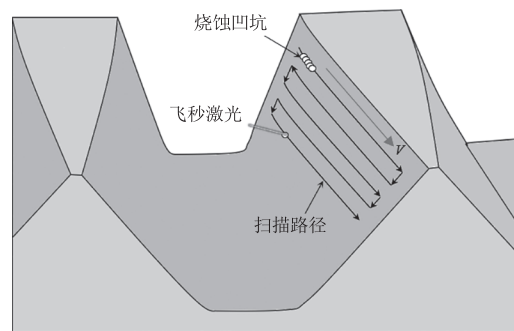


图 2 扫描路径图

Fig. 2 Scanning path diagram

采用正交试验法可以通过相对较少的试验次数,获取最佳工艺条件和确定关键工艺参数,从而节省试验成本^[11]。试验设计三因素三水平的 $L_9(3)^3$ 正交试验,运用信噪比作为质量评价指标,并根据信噪比绘制出飞秒激光工艺参数对不同响应目标的主效应图,分析形成较好烧蚀区域表面形貌质量的工艺参数。其中正交试验因素水平表如表 1 所示, $L_9(3)^3$ 正交表如表 2 所示。

表1 正交试验因素水平表

Tab. 1 Orthogonal test factor level table

Process parameters	Symbol	Level		
		1	2	3
Pulse frequency/kHz	F	100	150	200
Energy density/($J \cdot cm^{-2}$)	D	3.0	3.5	4.0
Scanning speed/($mm \cdot s^{-1}$)	V	100	110	120

表2 $L_9(3)^3$ 正交表Tab. 2 $L_9(3)^3$ orthogonal table

No.	Level			F / kHz	$D / (J \cdot cm^{-2})$	$V / (mm \cdot s^{-1})$
	1	2	3			
1	1	1	1	100	3.0	100
2	1	2	2	100	3.5	110
3	1	3	3	100	4.0	120
4	2	1	2	150	3.0	110
5	2	2	3	150	3.5	120
6	2	3	1	150	4.0	100
7	3	1	3	200	3.0	120
8	3	2	1	200	3.5	100
9	3	3	2	200	4.0	110

3 烧蚀区域目标信噪比与多响应目标优化试验分析

3.1 烧蚀区域单一响应目标信噪比试验分析

试验采用信噪比分析评估偏离期望值的质量特性。信噪比是衡量稳健性的指标,用以识别控制影响因素,尽量减少噪音因素的影响,从而减少产品或过程的可变性^[12-13]。信噪比可根据研究目标分为望大特性、望小特性和望目特性,其中望大特性是期望质量特性值越大越好,望小特性是期望质量特性值越小越好,望目特性是期望质量特性值越接近目标值越好。

为提高飞秒激光精微加工的效率,并充分利用激光能量,试验期望烧蚀区域深度越大越好,则烧蚀区域深度选用望大特性信噪比;对于工件表面,飞秒激光加工后应尽可能平整光滑,使表面形貌质量更好,因此试验期望加工后表面粗糙度越小越好,则表面粗糙度选用望小特性信噪比。望大特性和望小特性信噪比公式分别为:

望大特性:

$$\eta_{SNR-L} = -10 \lg \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{y_j} \right) \right] \quad (1)$$

望小特性:

$$\eta_{SNR-S} = -10 \lg \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j^2 \right) \quad (2)$$

式中, η_{SNR-L} 为望大特性信噪比; η_{SNR-S} 为望小特性信噪比; m 为一组试验的重复次数; y_j 是第 j 组试验的响应目标值。正交试验烧蚀区域形貌如图3所示,对应不同因素和水平下的正交试验单一响应目标值及其对应的信噪比如表3所示。

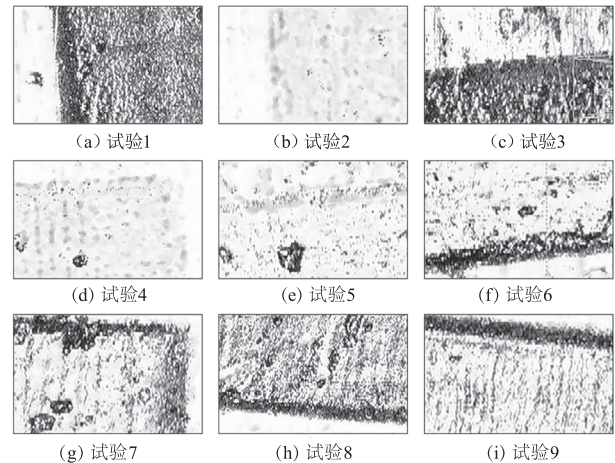


图3 正交试验烧蚀区域形貌图

Fig. 3 Morphology of the ablation region of the orthogonal test

表3 单一响应目标值及对应信噪比

Tab. 3 Single response target value and corresponding SNR

No.	Depth/ μm	η_{SNR-L}	Roughness/ μm	η_{SNR-S}
1	2.20	6.848454	0.429	7.350854
2	3.49	10.856509	0.213	13.432408
3	3.04	9.657472	0.523	5.629966
4	5.11	14.168418	0.468	6.595083
5	4.31	12.689545	0.539	5.368225
6	9.61	19.654468	0.365	8.754143
7	6.05	15.635107	0.273	11.276747
8	10.85	20.708595	0.549	5.208553
9	9.48	19.536167	0.544	5.288022

如图4、5所示,根据信噪比计算结果,绘制出飞秒激光工艺参数对不同响应目标的主效应图。图中纵坐标数值为信噪比在每一水平下的均值,信噪比越大,说明越接近优化目标。

烧蚀区域深度的信噪比主效应如图4所示,可以观察到重复频率信噪比的极差最大,说明烧蚀区域深度主要受到重复频率的影响。如图4(a)所示,

随着重复频率的增加,烧蚀区域深度信噪比显著增大。这是由于在相同的扫描时间内,激光重复频率的增加能产生更多脉冲数,工件表面的能量累积程度提高,烧蚀去除的材料增多,烧蚀区域深度增大。如图4(b)所示,烧蚀区域深度信噪比随着能量密度的增大而增大。这是由于随着飞秒激光能量密度增大,达到气化温度的材料增加,去除的材料增多,烧蚀区域深度加深。如图4(c)所示,烧蚀区域深度信噪比随着扫描速度的增加而减小。扫描速度增加导致激光光斑搭接率下降,单位时间内工件表面吸收能量减少,烧蚀区域深度减小。因此,为了获得最大的烧蚀区域深度,工艺参数组合应选取 $F_3D_3V_1$,即飞秒激光重复频率为 200 kHz,能量密度为 4.0 J/cm^2 ,扫描速度为 100 mm/s 。

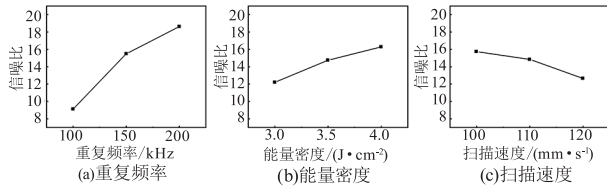


图4 烧蚀区域深度信噪比主效应图
Fig. 4 Main effect plot of signal-to-noise ratio at depth in the ablation region

烧蚀区域表面粗糙度的信噪比主效应如图5所示,可以观察到烧蚀区域表面粗糙度主要受到重复频率和能量密度的影响。如图5(a)所示,重复频率较大(150~200 kHz)时,工件表面的能量累积程度较高,产生的熔融金属液体增多,烧蚀区域深度加深。部分熔融金属液体由于没有获得足够的动能排出,冷却凝固后形成了熔融堆积物,从而增大表面粗糙度^[14]。重复频率较小(100 kHz)时,产生的熔融金属液体较少,因此表面粗糙度较低。如图5(b)所示,表面粗糙度信噪比随着能量密度的增大而降低。随着激光能量密度增大,熔融金属液体增多,熔融金属液体剧烈蒸发膨胀产生的反冲压力无法将熔融金属液体完全排出,导致表面粗糙度增大。如图5(c)所示,随着扫描速度的增大,表面粗糙度信噪比先升高后降低。扫描速度较低(100 mm/s)时,激光光斑搭接率升高,能量累积升高,烧蚀区域深度加深,从而使熔融金属液体排出不彻底,表面粗糙度增大。扫描速度较高(120 mm/s)时,激光光斑搭接率下降,激光烧蚀不完全,产生的反冲压力较小,熔融金属液体无法完全排出,导致表面粗糙度增大。因此,

选取 $F_1D_1V_2$ 这一工艺参数组合可获得最小的烧蚀区域表面粗糙度。

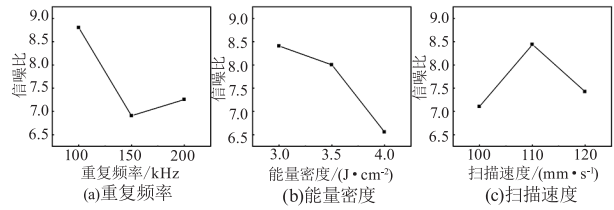


图5 烧蚀区域表面粗糙度信噪比主效应图
Fig. 5 Main effect plot of signal-to-noise ratio of surface roughness in the ablation region

3.2 基于灰色关联法的多响应目标优化试验分析

灰色关联法是灰色系统理论中的一种度量方法,可解决多响应目标优化问题^[15]。正交试验中运用灰色关联理论,可将多个工艺参数优化问题转换为仅对灰色关联度进行优化问题,再通过最大化灰色关联度得到最佳工艺参数组合。灰色关联理论分析包括信噪比的归一化处理、灰色关联系数的确定、计算灰色关联度^[16]。

由于不同响应的量纲不同,因此需将信噪比进行归一化处理,从而得到一个无量纲且可比较的序列^[17]。可根据式(3)进行归一化处理:

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min_k y_i(k)}{\max_k y_i(k) - \min_k y_i(k)} \quad (3)$$

式中, $x_i(k)$ 为归一化处理结果; $y_i(k)$ 为第 i 组试验第 k 个响应目标值的信噪比分析数据。归一化处理结果及对应偏差如表4所示。

表4 归一化处理结果及对应偏差
Tab. 4 Normalized processing results and correspondence bias

No.	Normalized results of the depth SNR	misalignment	Normalized results of the roughness SNR	misalignment
1	0.000000	1.000000	0.260498	0.739502
2	0.289179	0.710821	1.000000	0.000000
3	0.202669	0.797331	0.051243	0.948757
4	0.528131	0.471869	0.168599	0.831401
5	0.421431	0.578569	0.019416	0.980584
6	0.923945	0.076055	0.431135	0.568865
7	0.633951	0.366049	0.737877	0.262123
8	1.000000	0.000000	0.000000	1.000000
9	0.915410	0.084590	0.009663	0.990337

灰色关联系数表示期望值与实际归一化信噪比之间的相关性^[18]。基于归一化数据,计算灰色关联系数,其表达式为:

$$\mu_i(k) = \frac{\min_k |x_0 - x_i(k)| + \mu \max_k |x_0 - x_i(k)|}{|x_0 - x_i(k)| + \mu \max_k |x_0 - x_i(k)|} \quad (4)$$

式中, $\mu_i(k)$ 为灰色关联系数; x_0 为归一化信噪比的理想值,在此取 1; μ 为分辨系数, $\mu \in (0,1)$,通常取值为 0.5。

将各响应的灰色关联系数整合为单一的灰色关联度。灰色关联度越大,说明试验数据越接近理想值^[19]。灰色关联度表达式为:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mu_i(k) \quad (5)$$

式中, γ_i 为第 i 组试验的灰色关联度; n 为响应目标数量。灰色关联系数和灰色关联度计算结果如表 5 所示。

表 5 灰色关联系数和灰色关联度计算结果

Tab.5 Grey relational coefficient and grey relational grade calculation results

No.	Grey relational coefficient of the depth SNR	Grey relational coefficient of the roughness SNR	Grey relational grade	Order
1	0.333333	0.403388	0.368361	8
2	0.412943	1.000000	0.706471	1
3	0.385407	0.345123	0.365265	9
4	0.514472	0.375544	0.445008	6
5	0.463577	0.337705	0.400641	7
6	0.867973	0.467786	0.667880	2
7	0.577335	0.656062	0.616698	4
8	1.000000	0.333333	0.666667	3
9	0.855300	0.335495	0.595398	5

由表 5 可知,第 2 组试验灰色关联度最大,具有最好的表面综合形貌质量。各工艺参数在不同水平下的灰色关联度平均值如表 6 所示,通过对各因素进行极差分析,结果表明重复频率对面齿轮材料表面综合形貌质量影响最大,其次是扫描速度。灰色关联度信噪比主效应图如图 6 所示,为了获得最大的灰色关联度,工艺参数组合应选取 $F_3D_2V_2$ 。

表 6 灰色关联度均值响应表

Tab.6 Response for means of grey relational grade

	Pulse frequency	Energy density	Scanning speed
Level 1	0.480032	0.476689	0.567636
Level 2	0.504510	0.591260	0.582292
Level 3	0.626254	0.542847	0.460868
Delta	0.146222	0.114571	0.121424
Rank	1	3	2

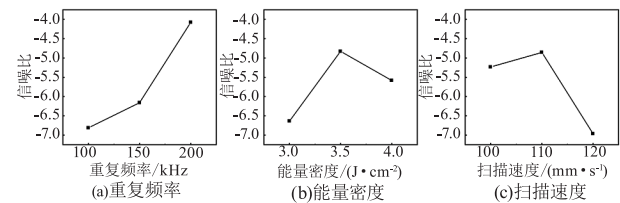


图 6 灰色关联度信噪比主效应图

Fig.6 Effect of different process parameters on surface roughness

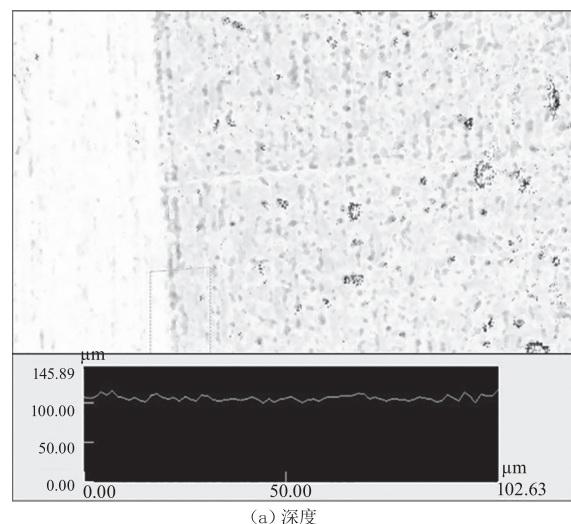
4 试验验证

根据灰色关联度信噪比主效应图,得出了最佳工艺参数组合为 $F_3D_2V_2$,其灰色关联度的预测值可用以下表达式进行计算:

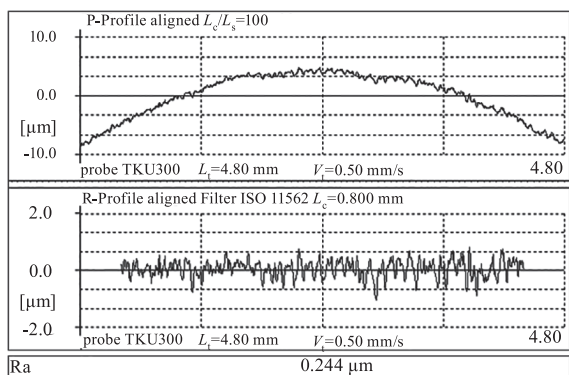
$$\gamma_p = \bar{\gamma} + \sum_{z=1}^q (\gamma'_z - \bar{\gamma}) \quad (6)$$

式中, γ_p 为灰色关联度预测值; $\bar{\gamma}$ 为正交试验中灰色关联度的平均值; γ'_z 为各因素最佳水平下的灰色关联度平均值; q 为因素个数。

由于最佳工艺参数组合 $F_3D_2V_2$ 并不在正交试验中,因此需对最佳工艺参数组合进行试验验证。采用工艺参数组合 $F_3D_2V_2$ 开展飞秒激光精修面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的优化试验,烧蚀区域检测结果如图 7 所示,烧蚀区域深度为 8.63 μm ,表面粗糙度为 0.244 μm 。



(a) 深度



(b) 表面粗糙度
图7 烧蚀区域检测图

Fig. 7 Ablation area detection map

最佳工艺参数 $F_3D_2V_2$ 的验证试验结果如表 7 所示,其试验值的灰色关联度为 0.777019,与预测值 0.725942 的相对误差仅为 7%,说明具有较好的一致性。与正交试验中的综合最优试验结果对比,优化试验烧蚀区域深度比正交试验综合最优结果加深了 5.14 μm ,而表面粗糙度比正交试验综合最优结果仅有略微升高。这是由于重复频率增大导致材料表面产生更多熔融金属液体,液体剧烈蒸发产生的反冲压力无法将熔融金属液体完全排出,随着材料表面温度与环境温度达到平衡,熔融金属液体再固化,使烧蚀区域表面粗糙度有一定程度的增大。但综合烧蚀区域深度和表面粗糙度考虑,优化后的试验结果更符合期望的表面形貌质量特性。该验证试验证明了多响应目标下工艺参数优化的可靠性,为飞秒激光精微加工面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 提供了理论依据。

表7 验证试验结果

Tab.7 Results of confirmation experiment

Process parameters	Initial parameters setting	Optimal parameters	
		Prediction	Experiment
	$F_1D_2V_2$	$F_3D_2V_2$	$F_3D_2V_2$
Depth/ μm	3.49	—	8.63
Roughness/ μm	0.213	—	0.244
Grey relational grade	0.706471	0.725942	0.777019

5 结论

(1) 利用正交试验设计和信噪比评价,分析研究了重复频率、能量密度、扫描速度这三个工艺参数对飞秒激光精微加工面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的烧蚀区域深度和表面粗糙度的影响,可以发现重复频率对烧蚀区域深度影响最大,烧蚀区域表面粗糙度

主要受到重复频率和能量密度的影响;

(2) 采用灰色关联法对工艺参数进行优化,获得最佳表面综合形貌质量的工艺参数组合为重复频率为 200 kHz,能量密度为 3.5 J/cm^2 ,扫描速度为 110 mm/s 。

(3) 对优化后的工艺参数组合进行试验验证,得到的试验值灰色关联度与预测值有较好的一致性,误差仅为 7%,实现了考虑多个工艺参数影响下多个响应目标的改善。

参考文献:

- [1] Zhao N, Guo H, Fang D Z, et al. Research on machining face gears using a CNC hobbing machine [J]. Advanced Materials Research, 2010, 905(97-101): 3761-3764.
- [2] Wang Y Z, Hou L W, Liu Y Q, et al. Research on machining method of complex surface face gears [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 163: 233-237.
- [3] Ming Xingzu, Jin Lei, Xiao Yongbo, et al. Femtosecond laser ablation characteristics of gear material 20CrMnTi [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1214002. (in Chinese)
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.
- [4] He Kuikui, Zhou Guangfu, Dai Yutang. Study on femtosecond laser etching of quartz [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(12): 1768-1773. (in Chinese)
何魁魁, 周广福, 戴玉堂. 飞秒激光刻蚀石英工艺研究 [J]. 激光与红外, 2022, 52(12): 1768-1773.
- [5] Lin Z Y, Hong M H. Femtosecond laser precision engineering, from micron, submicron, to nanoscale [J]. Ultrafast Science, 2021, 2021: 9783514.
- [6] Davydov R V, Antonov V I. Computer simulation of femtosecond pulsed laser ablation of aluminium and copper [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1124(8): 081037.
- [7] Bamoto K, Sakurai H, Tani S, et al. Autonomous parameter optimization for femtosecond laser micro-drilling [J]. Optics Express, 2022, 30(1): 243-254.
- [8] Zhang Z, Liu S Y, Zhang Y Q, et al. Optimization of low-power femtosecond laser trepan drilling by machine learning and a high-throughput multi-objective genetic algorithm [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 148: 107688.
- [9] Bakhtiyari A N, Wu Y L, Wang L Y, et al. Laser machining sapphire via Si-sapphire interface absorption and process

- optimization using an integrated approach of the taguchi method with grey relational analysis[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 663 – 674.
- [10] Zhang R, Huang C Z, Wang J, et al. Experimental investigation and optimization of femtosecond laser processing parameters of silicon carbide-based on response surface methodology[J]. *Ceramics International*, 2022, 48 (10): 14507 – 14517.
- [11] Behera A, Sahu P S, Patel S K. Application of taguchi methodology for optimization of process parameters in laser bending of Al sheet [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 2323 – 2327.
- [12] Mohanavel V, Ravichandran M, Kumar S S. Optimization of tungsten inert gas welding parameters to; attain maximum impact strength in AA6061 alloy joints using Taguchi technique [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5 (11): 25112 – 25120.
- [13] Wojciechowski S, Maruda R W, Krolczyk G M, et al. Application of signal to noise ratio and grey relational analysis to minimize forces and vibrations during precise ball end milling[J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 582 – 596.
- [14] Xu Haijun, Li Wan, Mi Chengji, et al. Study on tooth surface layer morphology of femtosecond laser ablation of face gear material[J]. *Packaging Journal*, 2023, 15 (2): 34 – 41, 49. (in Chinese)
- 徐海军, 李湾, 米承继, 等. 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的齿面表层形态研究 [J]. *包装学报*, 2023, 15 (2): 34 – 41, 49.
- [15] Pritam A, Dash R R, Mallik R K. Predictive modeling and multi objective optimization of Al 6063 for engraving depth and surface roughness using grey relational and regression analysis [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 80: 3464 – 3470.
- [16] Priyadarshini M, Pattnaik S K, Mishra D, et al. Multi characteristics optimization of laser drilling process parameter using grey fuzzy reasoning method [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2015, 2 (4): 1518 – 1532.
- [17] Nisar L, Bandy B, Amatullah M, et al. An investigation on effect of process parameters on surface roughness and dimensional inaccuracy using Grey based Taguchi method [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 6564 – 6569.
- [18] Targ Y S, Juang S C, Chang C H. The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 128 (1): 1 – 6.
- [19] Deng D W, Li T S, Huang Z Y, et al. Multi-response optimization of laser cladding for TiC particle reinforced Fe matrix composite based on Taguchi method and grey relational analysis [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 153: 108259.