

激光标刻铝锭二维码图像灰度与加工参数计算模型

李建华, 张郁天*, 伊 焯, 闫朝宁, 张龙龙

兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050

摘要 激光器在金属表面标刻的控制参数多, 参数对图像质量影响大。采用脉冲光纤激光在铝锭(牌号 A199.70)表面标刻二维码图像, 建立了工艺参数与图像灰度值之间的优化计算模型; 分析了激光加工相关参数的交互作用, 对工艺参数进行了简化整合; 对简化后的参数进行单因素实验, 分析了标刻图像灰度值分布及变化规律并得到合理参数范围; 基于单因素实验结论, 建立了工艺参数与灰度值之间的多元非线性回归数学模型, 利用多因素正交实验数据和免疫克隆算法对模型参数进行了拟合。实验结果证明了模型的有效性, 为铝锭表面实现激光二维码标刻技术提供了理论基础。

关键词 测量; 激光标刻; 加工参数; 多元非线性回归; 免疫克隆算法; 脉冲光纤式激光器

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.071203

Mathematical Model of Processing Parameters and Barcode Image Gray Value Marked by Lasers on Aluminium Ingot Surface

Li Jianhua, Zhang Yutian, Yi Xuan, Yan Chaoning, Zhang Longlong

School of Mechanical & Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

Abstract There are numerous control parameters of metal surface marking by laser which providing great influence on image quality. Pulse fiber laser is used to mark the two-dimensional code on A199.70 aluminum ingot surface. The optimal mathematical model is established between processing parameters and gray value. The interaction between related processing parameters is analyzed, the process parameters are simplified and integrated. The single factor experiment is carried out with the simplified parameters, and the reasonable parameter range is obtained through the analysis of both distribution and change law of gray value of marked image. Finally, based on the results of single factor experiment, a multivariate nonlinear regression mathematical model between process parameters and gray value is put forward, and then the multi-factor orthogonal experiment data and immune clone algorithm are utilized for the fitting of model parameters. The effectiveness of mathematical model is demonstrated by verification experiment which provides the theoretical basis for the realization of laser two-dimensional code marking on aluminum ingot surface.

Key words measurement; laser marking; process parameters; multivariate nonlinear regression; Immune clone algorithm; pulse fiber laser

OCIS codes 120.4610; 140.3390; 220.3740

1 引言

物料标识是智能制造的重要技术, 利用激光在物料表面直接标刻条码实现物料识别已经应用于很多材料, 如不锈钢、工具钢、钛合金、陶瓷、木材、玻璃或塑料等^[1-7]。激光与材料之间作用非常复杂, 不仅与激光加

收稿日期: 2016-12-20; 收到修改稿日期: 2017-02-19

基金项目: 兰州市科技支撑计划(2015-3-73)、甘肃省青年科技基金(1506RJYA103)、甘肃省先进控制重点实验室开放课题(XJK201521)

作者简介: 李建华(1975—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事工业标识、制造业信息化等方面的研究。

E-mail: li_jh@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: 93131882@qq.com

工参数相关,还与被加工材料的吸收率、反射率等材料特性相关^[8]。因此,激光烧蚀图像质量研究主要围绕加工参数和不同材料展开。Leone等^[9]针对304不锈钢论述了扫描速度、Q频率和电流对标记图像对比度的影响。Jangsombatsiri等^[10]以碳钢为材料,深入研究激光参量,包括激光平均功率、扫描速度、激光加工路径、Q频率对二维条码质量的影响。Lazov等^[11]在碳钢表面标刻图形和文字,以表面粗糙度和对比度为衡量指标,重点讨论了激光能量密度、金属反射率等因素对加工质量的影响。文献[12]研究了各种激光工艺参数对彩色打标效果的影响及其相互关系。文献[13]研究了激光在铝合金表面标刻二维码的最优标刻工艺参数组合等。

铝锭是工业中广泛使用的原铝材料,其中A199.70较为常见。根据国家标准,铝锭必须粘贴条码以满足物流管理与生产追溯要求,随着市场竞争加剧,发展激光直接标刻替代传统人工粘贴铜版纸流程对于企业节支增效具有重要意义。铝锭通过高温铝液铸造生产,其表面凹凸不平导致背景颜色复杂,很难基于对比度衡量激光条码标刻效果,鉴于此,本文以激光器标刻图像灰度值为目标参量评估,建立灰度值和激光加工参数的数学模型,基于智能算法完成模型参数拟合,并通过实验证实了本文模型有效性。该结论不仅可以为铝锭A199.70激光标刻条码提供工艺指导,而且对于相同应用场景具有一定的借鉴意义。

2 激光标刻条码相关参数分析

近年来,脉冲光纤式激光器在光束质量、可靠性、免维护时间、转换效率、体积、冷却方式等方面具有良好特性,已经成为高速、高精度激光标刻方面的主要选择。脉冲光纤式激光器产生激光脉冲,经聚焦后作用于物料表面产生复杂物理及化学变化。通常,脉冲光纤激光器可调节参数主要包括扫描速度、激光功率、Q频率和填充线间距、扫描路径等,这些不同激光加工参数直接影响材料热输入能量的大小、能量密度分布及作用时长,并导致激光标刻条码图像质量差异,标刻图像灰度值分布范围广。

根据条码标准,条码识读质量通过对比度进行评估,对比度的一般计算公式为

$$C = 1 - \frac{G_R}{G_B}, \quad (1)$$

式中 C 为条码图像对比度, G_R 为图像灰度值最小10%的平均灰度值, G_B 为图像灰度值最大10%的平均灰度值。铝锭A199.70表面不均匀、高反光,成像时受外部光照等因素影响,条码背景图像灰度值分布随机性强;而激光烧蚀后的金属表面组织分布均匀,条码灰度值与标刻参数选择相关,如图1所示。显然,受背景图像影响,评估不同加工参数在铝锭表面的条码标刻效果,不能直接使用对比度指标统一评估。激光控制参数可以改变标刻图像灰度值,却无法改变背景图像灰度值,鉴于此,本文以激光烧蚀部分图像灰度值作为标刻图像统一评估指标,研究激光加工参数对铝锭表面标刻条码质量的影响。

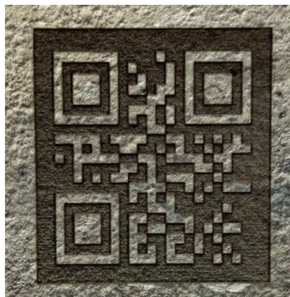


图1 A199.70 锭表面激光标刻条码图像

Fig. 1 Laser marking barcode image on Al199.70 surface

3 工艺参数对标刻灰度值影响实验及分析

3.1 参数影响分析

为了获得激光加工参数和A199.70表面标刻条码图像质量之间的确切关系,前期需通过单因素实验研究影响图像质量的Q频率、激光功率、扫描速度、填充线间距的作用规律。由于参数多,首先尝试对参数进

行整合,根据激光烧蚀原理,激光标刻表面获取能量取决于激光光斑重叠次数 n 和激光单脉冲能量 E_s 。将光斑重叠次数 n 定义为激光脉冲光斑在直线移动过程中内部区域的最大累加烧蚀次数,如图 2 所示。对应于加工参数,在激光扫描速度慢、 Q 频率高时,重叠次数高,反之则相反。

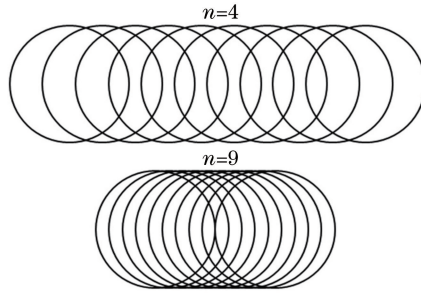


图 2 不同激光光斑重叠次数图像

Fig. 2 Images of laser spot with different overlap times

激光单脉冲能量 E_s 是每个激光脉冲所包含的能量,与激光功率成正相关, Q 频率成负相关,根据它们的物理含义,可得

$$n = \frac{df}{v}, \quad (2)$$

$$E_s = \frac{P}{f}, \quad (3)$$

式中 n 为光斑重叠次数, d 为聚焦激光束直径(单位为 mm), v 为激光扫描速度(单位为 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$), f 为 Q 频率(单位为 Hz), E_s 为激光单脉冲能量(单位为 mJ), P 为激光功率(单位为 W)。

显然,若激光光斑重叠次数 n 和激光单脉冲能量 E_s 相同,则对材料能量输入相同,可得到相同效果图像,因此,可以将光斑重叠次数 n 和激光单脉冲能量 E_s 作为主要输入参数。为验证以上推论,在 A199.70 表面进行烧蚀测试,加工参数如表 1 所示,其中 s 为填充线间距,表示激光在烧蚀表面图形时,扫描线之间的间距。由表 1 可知,每一行实验的控制参数拥有相同光斑重叠次数和激光单脉冲能量,激光标刻效果如图 3 所示。显然,可基于 n 、 E_s 、 s 这三个参数研究加工参数对图像灰度值的影响。

表 1 激光标刻参数

Table 1 Laser marking parameters

No.	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	P / W	f / kHz	s / mm
1	500	10	20	0.10
2	650	13	26	0.10
3	750	15	30	0.10
4	900	18	36	0.10
5	200	10	20	0.05
6	260	13	26	0.05
7	300	15	30	0.05
8	360	18	36	0.05
9	200	10	20	0.10
10	260	13	26	0.10
11	300	15	30	0.10
12	360	18	36	0.10
13	100	10	20	0.05
14	130	13	26	0.05
15	150	15	30	0.05
16	180	18	36	0.05
17	100	10	20	0.10
18	130	13	26	0.10
19	150	15	30	0.10
20	180	18	36	0.10

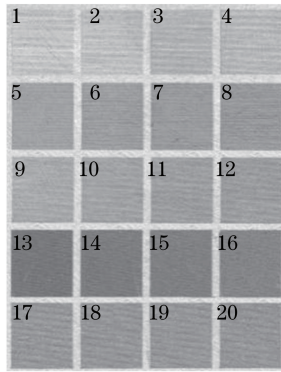


图3 不同参数标刻图像

Fig. 3 Images of different marking parameters

3.2 实验及其分析

3.2.1 实验条件

实验采用规格 150 mm×150 mm×10 mm 的铝块(牌号为 Al99.70)若干,样块具体成分如表 2 所示。

表 2 Al99.70 材料化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of Al99.70 (mass fraction, %)

Al	Fe	Si	Cu	Ca	Mg	Zn
99.75	0.17	0.05	0	0.02	0	0.01

实验采用脉冲光纤激光打标机的聚焦激光束直径为 0.05 mm、激光波长为 1064 nm,实验标刻规格 8 mm×8 mm 的正方形图形,选用扫描仪获取图像以避免光照影响灰度值^[14-15]。

3.2.2 单因素变化实验

为了分别研究激光光斑重叠次数 n 、单脉冲能量 E_s 、线间距 s 与激光标刻图像灰度值之间的关系,得到单因素变化对灰度值的影响规律,找出标刻图像灰度值最低的目标工艺参数组合,需进行单因素变化实验。前期通过选择多组参数进行烧蚀实验,排除烧蚀痕迹不明显时所使用的参数,最终确定在重叠次数为 2~26、单脉冲能量为 0.3~0.9 mJ、线间距为 0.01~0.1 mm 范围内完成单因素实验。

首先,单脉冲能量分别采用 0.5,0.7,0.9 mJ,其他条件不变对光斑重叠次数进行单因素变化实验,如图 4 所示。

图 4 中三条曲线起始位置灰度值分布不等,但随着重叠次数的增加,三条曲线灰度值呈整体下降趋势,且单脉冲能量越大,下降速度越快,当重叠次数在 5~15 之间取到最低灰度值。在重叠次数达到一定次数后,灰度值逐渐上升,并趋于一致,超过 15 次后灰度值变化缓慢,且趋于一致。分析其原因可能是在重叠次数过多后,导致铝的微观结构分布基本一致,从而引起光反射增强,灰度值变化较小。

其次,以重叠次数为 2、6、10 和 15 次时,对单脉冲能量进行单因素变化实验,如图 5 所示。

图 5 中曲线灰度值随着单脉冲能量的增加,整体呈下降趋势,不同的重叠次数下,下降速度不同,随着激

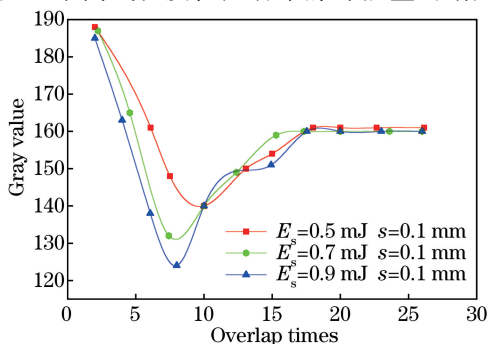


图4 重叠次数与灰度值单因素实验图

Fig. 4 Single factor experiment versus overlap times

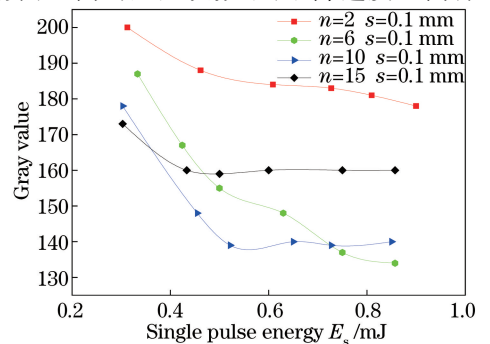


图5 单脉冲能量与灰度值单因素实验图

Fig. 5 Single factor experiment versus single pulse energy

光单脉冲能量的增加,激光与纯铝直接热作用加剧,使材料表面产生熔化甚至汽化,表面微观结构变化相应变大,灰度值呈下降趋势,当单脉冲能量增大到一定程度后,纯铝表面微观结构趋于稳定,灰度值的变化速度变慢并趋于稳定。此外,当单脉冲能量小于 0.3 mJ 时,由于能量太小,激光标刻痕迹不明显,图像不清晰。

最后,在重叠次数和单脉冲能量均不变的情况下,对扫描线间距进行 4 组单因素变化实验,如图 6 所示。

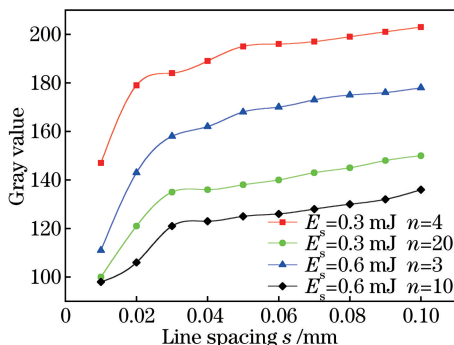


图 6 线间距与灰度值单因素实验图

Fig. 6 Single factor experiment versus line spacing

图 6 中随着激光标刻的线间距增大灰度值逐渐增加,线间距在 0.01~0.03 mm 之间变化时灰度值增加明显,大于 0.03 mm 后灰度值增幅较小趋于平稳,当标刻线间距超过 0.1 mm 时,激光与材料相互作用产生的热量无法影响填充线之间的材料,灰度值几乎不发生变化。在实际生产中,激光线间距越小,加工效率越低,所以线间距不应小于 0.5 mm。

以上分析表明,在重叠次数 2~12,单脉冲能量 0.3~0.9 mJ,线间距 0.06~0.1 mm 范围之内标刻图像清晰,符合生产需求。因此,将此作为加工参数范围建立多元非线性回归模型。

4 多元非线性回归模型多元非线性回归模型

4.1 模型建立

由以上分析可知,激光标刻铝锭 Al99.70 表面的图像灰度值同时受光斑重叠次数、单脉冲能量和线间距的影响,根据三参数的单因素实验结果,对实验灰度值进行一元非线性回归分析。对应于图 4 中重叠次数与灰度值的关系,拟合为程度最高的三次方模型;对应于图 5、6 中单脉冲能量和线间距与灰度值的关系,均拟合为 S 曲线模型。据此分析,可将各模型进行整合,并根据单因素实验分析和文献[16]的相关分析方法,建立以灰度值回归的经验模型为

$$G = \sum_{i=0}^3 a_i n^i \exp\left(a_4 + \frac{a_5}{a_6 + a_7 E_s} + \frac{a_8}{a_9 + a_{10} s}\right), \quad (4)$$

式中 G 为标刻图形的灰度值, $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$ 和 a_{10} 为待定系数。

(4)式中 n 和 E_s 是通过计算得到,不属于激光器可调参数,为建立激光加工参数与标刻图像灰度值之间的数学模型,还需将(2)、(3)式代入(4)式,得到数学模型为

$$G = \sum_{i=0}^3 a_i \left(\frac{df}{v}\right)^i \exp\left(a_4 + \frac{a_5}{a_6 + a_7 E_s} + \frac{a_8}{a_9 + a_{10} s}\right). \quad (5)$$

4.2 模型参数拟合

4.2.1 正交实验数据准备

对(5)式中系数进行拟合之前,需要通过实验获取多组变量数据,在参数范围内的众多加工参数组合中,选用合理的数据拟合模型系数,能够显著提高拟合的可靠性。因此,利用正交表从大量加工参数的组合中,挑选出具有代表性的适量地组合作为基础实验数据。

依据单因素实验得到的 n, E_s 和 s 参数范围,结合(2)、(3)式,可调加工参数范围及水平设置如表 3 所示。

表3 加工参数范围及其水平

Table 3 Laser marking parameters and their levels

Parameter	Paramant range	Level
P / W	10-18	5
$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	100-500	5
f / kHz	20-28	5
s / mm	0.06-0.1	5

再根据表3设计等水平多因素正交实验,共获取了25个标刻样本,如图7所示,其中参数选择与灰度测量结果如表4所示。

表4 正交实验安排及结果

Table 4 Orthogonal array and experimental results

No.	s / mm	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	P / W	f / kHz	E_s / mJ	n	Gray value
1	0.06	100	10	20	0.5	10	128
2	0.07	200	12	22	0.55	5.5	154
3	0.08	300	14	24	0.58	4	169
4	0.09	400	16	26	0.62	3.25	172
5	0.10	500	18	28	0.64	2.8	176
6	0.07	300	16	28	0.57	4.67	162
7	0.08	400	18	20	0.9	2.5	170
8	0.09	500	10	22	0.45	2.2	198
9	0.10	100	12	24	0.5	12	145
10	0.06	200	14	26	0.54	6.5	143
11	0.08	500	12	26	0.46	2.6	196
12	0.09	100	14	28	0.5	14	142
13	0.10	200	16	20	0.8	5	148
14	0.06	300	18	22	0.82	3.67	150
15	0.07	400	10	24	0.42	3	201
16	0.09	200	18	24	0.75	6	139
17	0.10	300	10	26	0.38	4.33	186
18	0.06	400	12	28	0.43	3.5	186
19	0.07	500	14	20	0.7	2	184
20	0.08	100	16	22	0.73	11	134
21	0.10	400	14	22	0.67	2.75	174
22	0.06	500	16	24	0.67	2.4	169
23	0.07	100	18	26	0.69	13	137
24	0.08	200	10	28	0.36	7	170
25	0.09	300	12	20	0.6	3.33	168

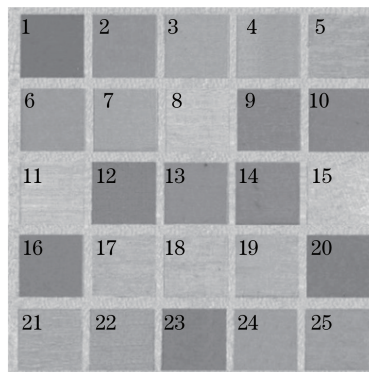


图7 正交实验标刻图像

Fig. 7 Marking images of orthogonal experiment

在正交实验中,25组方形标刻图像样本灰度变化明显,参数选择包含了参数范围内所有参数,且均为有效实验样本。实验结果显示,加工参数与灰度值的分布没有明显的规律性,图像灰度值邻域内的标刻图像对

应的激光标刻工艺参数,并非简单地分布在以灰度值对应的加工参数邻域之内,而是分布在若干个灰度值对应的加工参数领域并集之中,如第1、12、16、20和23组实验,是在功率为10~18 W、频率为20~28 kHz、线间距为0.06~0.09 mm、扫描速度为100~200 mm/s内选取的不同工艺参数组合,计算出的单脉冲能量和重叠次数亦不同,这些参数组合均可在铝表面标刻出灰度值相近的图像样本。另外,并非在以上参数范围之内任意选取的参数组合,都可以标刻出相近灰度值的图像,而且不同加工参数组合有可能标刻出灰度差异大的效果。基于以上分析,正交实验体现出不同参数组合与灰度值之间的关系:多组相同加工参数组合可标刻出相近灰度值的图像;不同加工参数组合可标刻出灰度值差异较大的图像。因此,所选的正交实验数据代表性性强,能够作为的合理数据对模型系数进行拟合。

4.2.2 基于免疫克隆算法的参数拟合

根据表4中的正交实验数据对(5)式中的参数进行拟合,由于需要拟合的参数众多,利用传统计算方法难以实现快速准确拟合,因此采用免疫克隆算法为拟合算法^[17],以亲和度函数优化目标函数,即

$$F_{\text{Fitness}}(g) = \sum_{i=1}^{25} |G_{mi} - G_{ci}|, \quad (6)$$

式中 $F_{\text{Fitness}}(g)$ 为免疫克隆算法亲和度函数, G_{mi} 为一次亲和度计算中第*i*个灰度计算值, G_{ci} 为一次亲和度计算中第*i*个灰度实际值,免疫克隆循环迭代目标是获取实际灰度值和预测灰度值之间误差和的最小值,并基于此得到优良参数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$ 和 a_{10} ,经过优化计算后,得到灰度值最终回归公式为

$$G = \left[8.646777 - 40.918784 \left(\frac{f}{v} \right) + 144.128840 \left(\frac{f}{v} \right)^2 - 140.178497 \left(\frac{f}{v} \right)^3 \right] \exp \left(3.092806 + \frac{-0.882669f}{1.036561f - 9.499999P} + \frac{0.002021}{5.406680 - 90.593320s} \right). \quad (7)$$

根据复决定系数 R^2 与方差分析 F 值来衡量回归模型对实测数据集的拟合优度以及回归方程的可信度^[16],结果为

$$R^2 = 1 - \frac{r_{ss}}{t_{ss}} = 0.97, \quad (8)$$

$$F = \frac{e_{ss}/h}{r_{ss}/\omega} = 51.45, \quad (9)$$

式中 r_{ss} 为残差平方和, t_{ss} 为总偏差平方和, e_{ss} 为回归平方和, F 为统计量, h 为回归平方和的自由度, ω 为残差平方和的自由度。查表可知, $F = 51.45 \gg F_{0.05}(10, 15) = 2.54$,从复决定系数 R^2 、 F 值来看,该多元非线性模型可以较好地拟合实际观测数据。

4.3 模型验证实验

为进一步验证本文方法的有效性,进行了25组激光烧蚀验证实验,并对模型进行验证,参数选择与灰度测量结果如表5所示,标刻效果如图8所示。对实验测量值与模型预测值数据进行对比,对比结果如图9所示,根据表4和表5中数据计算50组实验的灰度拟合值残差如图10所示。

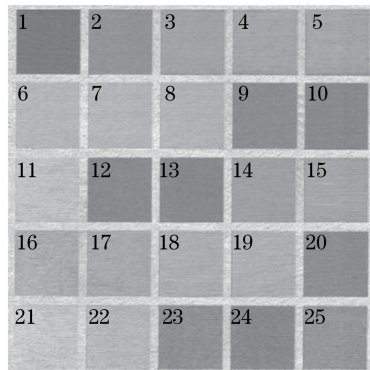


图8 验证实验标刻图像

Fig. 8 Marked images of verification experiment

表5 验证实验参数及灰度测量值

Table 5 Verification experimental parameters and gray measured value

No	s / mm	$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	P / W	f / kHz	E_s / mj	n	Gray value
1	0.06	100	10	20	0.5	10	128
2	0.06	200	12	22	0.55	5.5	149
3	0.06	300	14	24	0.58	4	162
4	0.06	400	16	26	0.62	3.25	167
5	0.06	500	18	28	0.64	2.8	169
6	0.07	300	10	22	0.45	3.67	187
7	0.07	400	12	24	0.5	3	189
8	0.07	500	14	26	0.54	2.6	186
9	0.07	100	16	28	0.57	14	146
10	0.07	200	18	20	0.9	5	143
11	0.08	500	10	24	0.42	2.4	204
12	0.08	100	12	26	0.46	13	147
13	0.08	200	14	28	0.5	7	144
14	0.08	300	16	20	0.8	3.33	167
15	0.08	400	18	22	0.82	2.75	174
16	0.09	200	10	26	0.38	6.5	177
17	0.09	300	12	28	0.43	4.67	177
18	0.09	400	14	20	0.7	2.5	182
19	0.09	500	16	22	0.73	2.2	183
20	0.09	100	18	24	0.75	12	137
21	0.1	400	10	28	0.36	3.5	205
22	0.1	500	12	20	0.6	2	191
23	0.1	100	14	22	0.64	11	143
24	0.1	200	16	24	0.67	6	142
25	0.1	300	18	26	0.69	4.33	157

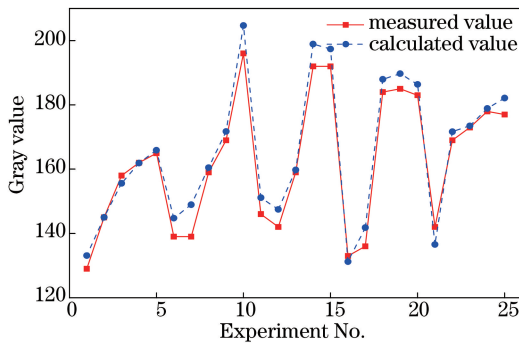


图9 回归模型预测值与实测值对比

Fig. 9 Comparison of regression forecasting value and measured value

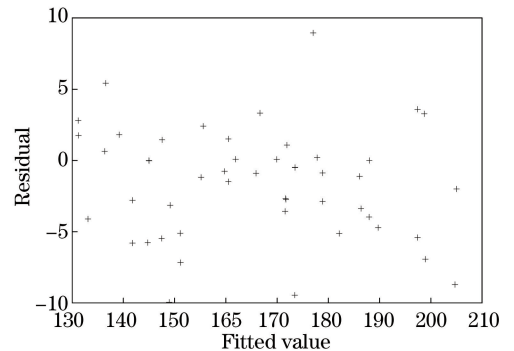


图10 灰度拟合值残差图

Fig. 10 Residual plot of gray fitted value

图9显示本文数学模型预测的灰度值与实际激光加工实测灰度值吻合度较高,经相关性分析得到复决定系数为0.96,在0.05的显著水平上显著相关。图10中残差值控制在4%以内,大多集中在零值附近且无明显趋势性。显然,该模型未遗漏其他重要实验因素,灰度值的非线性回归模型合理,可信度高,能够用于实际生产中预测标刻图像灰度值。

5 结论

脉冲光纤激光工艺参数众多,且存在复杂交互作用,通过分析,可以将相关工艺参数简化整合为单脉冲能量、光斑重叠次数和线间距。单脉冲能量、光斑重叠次数和线间距的单因素实验表明,重叠次数与图像灰度值关系为三次方模型,单脉冲能量、线间距与灰度值关系拟合模型均为S曲线模型。建立了二维码图像灰度和单脉冲能量、光斑重叠次数和线间距的数学模型,并基于多因素正交实验数据和免疫克隆算法对模型参

数进行拟合,统计数据显示模型拟合度较高。通过验证实验,实测图像灰度值和计算值误差较小,证明了预测模型的可靠性,能够为铝锭 Al99.70 激光标刻条码提供工艺指导和理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Chitu L, Cernat R, Bucatica I, *et al.* Improved technologies for marking of different materials[J]. *Laser Physics*, 2003, 13(8): 1108-1111.
- [2] Qi J, Wang K L, Zhu Y M. A study on the laser marking process of stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 139(1-3): 273-276.
- [3] Rusu S, Buzaianu A, Ionel L, *et al.* Titanium alloy nanosecond vs. femtosecond laser marking[J]. *Bulletin of Materials Science*, 2013, 36(6): 1037-1042.
- [4] Qiu H D, Bao W S, Lu C H. Investigation of laser parameters influence of direct-part marking data matrix symbols on aluminum alloy[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 141: 328-333.
- [5] Leone C, Lopresto V, Iorio I D. Wood engraving by Q-switched diode-pumped frequency-doubled Nd:YAG green laser[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2009, 47(1): 161-168.
- [6] Dumont T, Lippert T, Wokaun A, *et al.* Laser writing of 2D data matrices in glass[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 453: 42-45.
- [7] Noor Y M, Tam S C, Lim L E N, *et al.* A review of the Nd:YAG laser marking of plastic and ceramic IC packages[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 42(1): 95-133.
- [8] Tao H, Diao L, Diao L, *et al.* Extending femtosecond laser fabrication of micro- and nanoscale structures from a planar to non-planar metal surface[C]. *International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale*, 2012: 1-4.
- [9] Leone C, Genna S, Caprino G, *et al.* AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd:YAG laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(10): 1297-1303.
- [10] Jangsombatsiri W, Porter J D. Laser direct-part marking of data matrix symbols on carbon steel substrates[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2007, 129(3): 583-591.
- [11] Lazov L, Atanasov A, Angelov N. Investigation of the role of certain factors affecting the contrast in laser marking[J]. *Contemporary Materials*, 2011, 2(1): 13-17.
- [12] Liu Zhongmin, Zhang Qingmao, Guo Liang, *et al.* Influence of laser process parameters on color obtained by marking[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403011.
刘忠民, 张庆茂, 郭亮, 等. 激光工艺参数对打标彩色效果的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403011.
- [13] Li Xiashuang, He Weiping, Lei Lei, *et al.* Process and optimal parameter domain of laser marking two-dimension code[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0703006.
李夏霜, 何卫平, 雷蕾, 等. 激光标刻二维码工艺及最优参数域研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0703006.
- [14] Ye Qing. Fibre laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, 39(6): 40-41.
叶青. 光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, 39(6): 40-41.
- [15] Cao Ronghua, Qiu Huadong, Li Jianmei, *et al.* Quality assessment and technical parameter optimization of laser direct part marking[J]. *Applied Laser*, 2011, 31(2): 151-156.
曹荣华, 邱化冬, 李建美, 等. 激光直接标记的质量评定及工艺参数优化[J]. *应用激光*, 2011, 31(2): 151-156.
- [16] Jekabsons G, Lavendels J, Sitikovs V. Model evaluation and selection in multiple nonlinear regression analysis[J]. *Mathematical Modelling & Analysis*, 2010, 12(1): 81-90.
- [17] Li J, Wei X. Analytical methods on computational capabilities of multi-parameter natural algorithm[C]. *Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 2014: 285-287.