

激光标刻二维码工艺及最优参数域研究

李夏霜 何卫平 雷蕾 许迎飞 宋葆华 田琦楠

(西北工业大学现代设计与集成制造重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 研究了在铝合金表面激光直接标刻 DM(Data Matrix) 码的识读质量、标刻时间与激光标刻参数之间的关系, 并重点分析了激光参数对 DM 码对比度的影响。结果显示, 最优参数域并非简单地分布在一个连通的实邻域之内, 而是分布在若干个连通实邻域的并集之中。给出了基于识读质量的激光参数的约束空间, 并获取了以识读质量、标刻时间综合最优为目标的激光标刻工艺参数组合。同时分析了优化参数所标刻 DM 码模块的扫描电镜图和能谱数据, 从微观上解释了最优激光参数的分布问题。

关键词 激光技术; 最优参数域; 识读质量; 标刻时间; Data Matrix 码; 铝合金

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0703006

Process and Optimal Parameter Domain of Laser Marking Two-Dimension Code

Li Xiashuang He Weiping Lei Lei Xu Yingfei Song Baohua Tian Qinan

(Key Laboratory of Contemporary of Design and Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The correlation occurring between reading quality or marking time of data matrix (DM) code marked on aluminium alloy and laser marking parameters has been studied, and the influence of laser parameters on DM code contrast is analyzed. The experiment result indicates that the optimal laser parameter domain is not simply distributed within a connected real neighborhood, but distributed in a union set of several connected real neighborhoods. The restricted space of laser parameter based on reading quality of DM code is built, and the laser marking process parameters combination with the goal of comprehensive optimal reading quality and marking time is acquired based on this foundation. Meanwhile, scanning electron microscope images and energy dispersive spectrometer data of DM code marked by the optimal parameter module are analyzed, which can explain the distribution of optimal laser parameters in microcosm.

Key words laser technique; optimal parameter domain; reading quality; marking time; data matrix code; aluminium alloy

OCIS codes 120.4610; 120.4630; 120.4800; 140.3390; 220.3740

1 引言

激光标刻技术可用较低成本在各种材料比如金属、玻璃、陶瓷、塑料或木材等^[1-4]表面产生永久、高对比度的优质标记。目前, 激光标刻技术已经广泛应用于工业标识领域, 通过与 DM(Data Matrix) 码技术结合用于产品商标的认证和原始生产、性能与维修历史的追溯^[5-6]。然而在实际应用中, 不同材料的激光参数主要靠经验选取, 往往造成标识质量

不高、对基体损伤较大、标记制作效率低下等问题。

国内外已开展有关材料表面激光直接标刻文字、条码的研究, 如陈明飞等^[4,7-8]研究了激光标刻技术在鸡蛋壳、碳素钢、不锈钢表面进行二维码标识的应用。Costa 等^[9]通过激光表面改性技术在不锈钢、铝合金表面得到了耐腐蚀、耐磨损的二维码标识, 西北工业大学在刀具管理^[6,10]与航空航天零件直接标识^[11]方面已开展了大量相关的应用研究, 邱

收稿日期: 2013-11-20; 收到修改稿日期: 2014-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(51275419)

作者简介: 李夏霜(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事工业标识及模式识别等方面的研究。E-mail: reqiu@126.com

导师简介: 何卫平(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事产品标识与追踪技术、物联网环境下制造信息控制技术等方面的研究。E-mail: weiping@nwpu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

化冬等^[12]研究了激光参量对铝合金直接标识码的影响。然而,涉及激光标刻二维码识读质量与标刻时间整体控制的研究较少,大多只是从统计学角度较为粗放地给出了激光参数的范围,未得到以识读质量最优为目标的激光标刻工艺参数的约束空间,且未考虑标记制作效率等因素。

为此,本文研究了激光直接标刻在铝合金表面的DM码的识读质量、制作效率与激光标刻工艺参数之间的关系,获取了以识读质量、标记制作时间综合最优为目标的激光标刻工艺参数组合,并根据单元模块的扫描电镜(SEM)图和X射线能量散射图谱(EDS)数据,从微观上解释了最优激光参数的分布问题,为铝合金及其他金属激光标刻DM码的识读质量与标刻时间的控制提供理论基础和实现方法。

2 前期研究

2.1 DM码特征

根据相关标准^[13],DM码识读质量可通过对比度、打印增长等进行评估。对比度是指DM码标刻区域与背景的灰度差,理论最小值为0%,最大为100%。打印增长是指填充模块的程度,包括X方向和Y方向,分为过增长(大于100%)、欠增长(小于100%)与饱和(等于100%)三种,饱和为最佳状

态。针对二维码对比度、X方向打印增长、Y方向打印增长进行研究,这些参量均为无量纲参量,是影响DM码识读质量最重要的指标。未使用纠错、轴向不一致、模块调制等特征参量与激光标刻工艺参数关联很小,不作为观测目标。

2.2 实验布置

准备规格为150 mm×150 mm×5 mm的铝合金(牌号为LF6,主要成分为铝、镁、锰、铁等)若干块,并进行去氧化皮处理。在试件表面用YLP-H10光纤激光打标机(最大激光输出功率为10 W、聚焦激光束直径为0.025 mm、激光波长为1064 nm)标刻规格为8 mm×8 mm的DM码,每个模块的公称宽度为0.5 mm。使用美国Microscan校验仪对DM码进行识读质量分析,使用日本电子株式会社型号为JSM-6390A并配备EDS图谱分析仪的设备进行SEM分析及相应的化学成分分析。

2.3 激光标刻参数对DM码对比度的影响

考虑到激光标刻DM的打印增长指标通过模块缩进量的调节较容易达到预定目标,且模块缩进对DM码对比度无影响,前期通过单因素实验研究了Q频率、激光功率P、标刻速度v、扫描间距S对DM码对比度指标的影响。Q频率与对比度的关系如图1(a)所示。

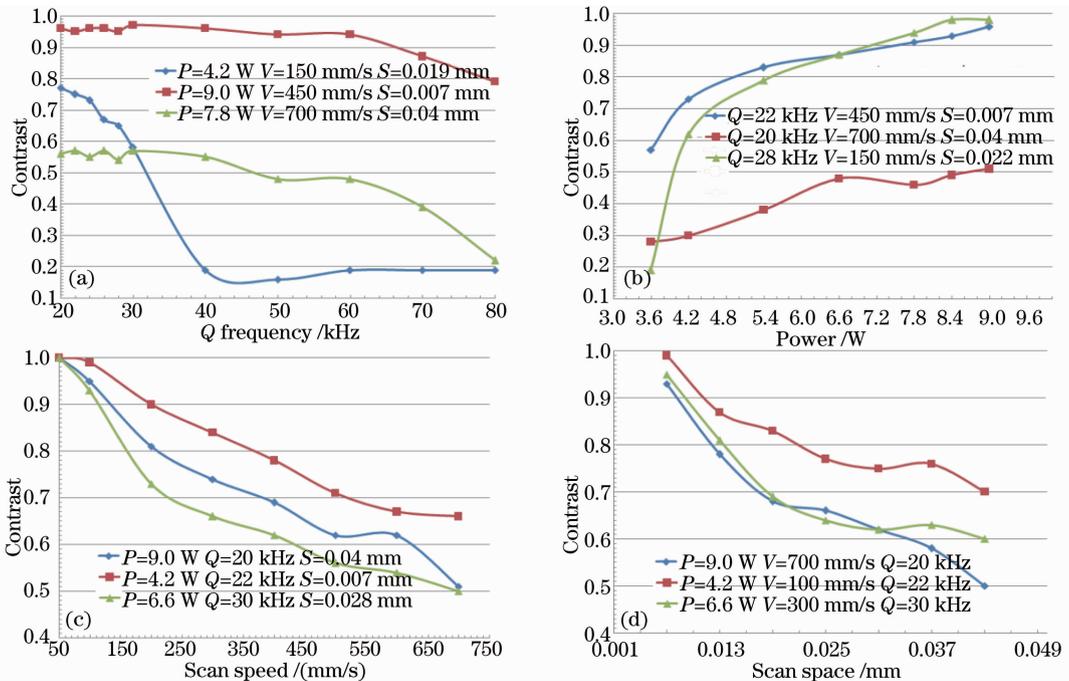


图1 单因素实验曲线图。(a) Q频率与对比度;(b) 激光功率与对比度;(c) 激光扫描速度与对比度;(d) 激光扫描间距与对比度

Fig. 1 Single factor experiment curves. (a) Q frequency versus contrast; (b) laser power versus contrast; (c) laser scan speed versus contrast; (d) laser scan space versus contrast

图 1(a)中 3 条曲线起始位置($Q=20$ kHz)的对比度从 54% 到 96% 分布不等,但随着 Q 频率的增大,3 条曲线 DM 码对比度均呈整体下降趋势,且激光功率越小下降速度越快,对比度明显下降时所对应的 Q 频率越小,即激光功率越小,DM 码对比度对 Q 频率越敏感,如图中蓝色曲线所示, Q 频率大于 30 kHz 时 DM 码对比度便从 56% 直接下降到 20% 以下(对比度小于 20% 表示该 DM 码在条码校验仪中无法检测)。实验还发现,当激光功率大于 4.8 W 时,无论其他激光标刻工艺参数如何,DM 码对比度在 20~30 kHz 的 Q 频率范围内变化很小。激光功率、激光扫描速度、激光扫描间距分别与对比度做图,如图 1(b)、(c)、(d) 所示。由图可见,随着功率的增大、扫描速度与扫描间距的减小,DM 码对比度呈增大趋势。图 1(b)红色曲线显示,当扫描速度与扫描间距均较大时($v > 700$ mm/s, $S > 0.04$ mm),通过提高激光功率难以实现高对比度 DM 码的标刻;而图 1(b)的绿色曲线显示当 Q 频率为 28 kHz 时,功率从 4.2 W 降到 3.6 W,DM 码对比度直接从 62% 下降到不可识读,这说明 Q 频率较大时,DM 码对比度对低激光功率的变化也很敏感。图 1(c)显示,减小扫描速度能有效地增大 DM 码对比度,且当扫描速度很小($v \leq 50$ mm/s)时 DM 码对比度可变得很大,甚至为 100%。图 1(d)显示,在激光扫描间距小于激光束光斑直径(0.025 mm)时,DM 码对比度随扫描间距的变化较快,在激光扫描间距大于光斑直径时,对比度随扫描间距的变化相对平缓。

3 实验方法与结果分析

3.1 实验方法

激光辐射在材料表面的瞬间局部热量可引起

材料的氧化、熔融、蒸发、色变,从而改变材料的物理特性或表面粗糙度,最终实现激光标记。通过前期研究,实验参数范围及水平设置如表 1 所示,根据表 1 进行多水平混合均匀实验,均匀实验的重复因子为 2,共获取了 60 个 DM 码样本,后文中的激光参量组合均用(A,B,C,D,E)表示。

表 1 激光标刻参数

Table 1 Laser marking parameters

Parameter	Code	Parameter range	Level
Laser power /W	A	3.6~9.0	10
Mark speed /(mm/s)	B	50~750	15
Q frequency /kHz	C	20~30	6
Scanning pitch /mm	D	0.001~0.043	15
Module indent /mm	E	-0.02~0.02	5

3.2 DM 码结果分布

实验中 60 组 DM 码样本用康耐视 Dataman7500 扫描枪均能正确识读,并可在 Microscan 校验仪下获取其识读质量的各个特征参量。校验结果显示,实验 DM 码的特征参量分布均匀,对比度从 37%~100% 均有分布,而打印增长参量从 78%~119% 不等分布,过增长、欠增长与饱和三种状态也分布在各个实验组中,图 2 所示为其中的几个 DM 码样本,特征参量由对比度、X 方向打印增长、Y 方向打印增长组成的特征参量表示。

从图 2 可看出,实验所得到的 DM 样本各个特征分量在目标优化点的邻域内均有分布,是进行以最佳识读质量为目标激光标刻工艺参数优化的有效样本。实验结果还显示最优激光标刻工艺参数组并非简单地分布在一个连通的实邻域之内,而是分布在若干个连通实邻域的并集之中。60 组 DM 码实验样本中,对比度大于 90% 的共计 16 组,其中的 9 组如表 2 所示。

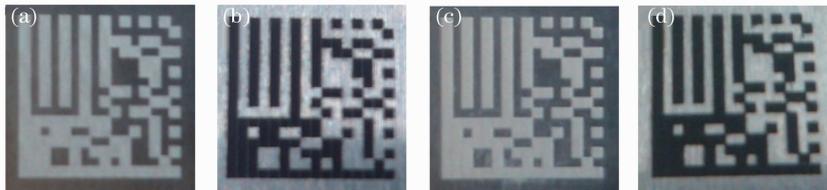


图 2 Microscan 校验仪图像。(a) 第 3 组 DM 码,特征参量:(37% 79% 90%);(b) 第 6 组 DM 码,特征参量:(100% 79% 90%);(c) 第 39 组 DM 码,特征参量:(79% 106% 102%);(d) 第 45 组 DM 码样本,特征参量:(100% 119% 111%)

Fig.2 Microscan verifier images. (a) 3rd group DM code, characteristic parameter: (37% 79% 90%); (b) 6th group DM code, characteristic parameter: (100% 79% 90%); (c) 39th group DM code, characteristic parameter: (79% 106% 102%); (d) 45th group DM code, characteristic parameter: (100% 119% 111%)

表 2 对比度大于 90% 的 DM 码样本
Table 2 DM code samples whose contrast is more than 90%

Parameter combination (A,B,C,D,E)	Contrast /%	X print growth /%	Y print growth /%	Marking time /s
(6.6,500,26,0.001,0.02)	100	96	92	108
(8.4,100,26,0.031,-0.01)	92	113	108	14
(8.4,650,24,0.001,-0.02)	100	113	110	117
(9.0,150,20,0.019,-0.01)	100	115	112	16
(9.0,450,22,0.007,0)	100	108	111	19
(5.4,50,30,0.034,0)	100	99	97	24
(7.2,50,20,0.025,0)	100	119	111	31
(7.2,200,22,0.001,0.01)	100	112	104	215
(3.6,50,20,0.016,0.01)	93	96	94	45

实验结果还显示最优激光标刻工艺参数组并非简单地分布在一个连通的实邻域之内,而是分布在若干个连通实邻域的并集之中,在表 2 中可得到相应的印证,这一点与其他研究结果^[4,8,12]显示的铝合金激光标刻二维码的最优参数域为一单连通实域的结论不同。引起不同结论的主要因素是实验扩大了激光标刻参数的范围,尤其是激光扫描间距的实验范围,有效基础数据更多。其次,其他相关研究结果的最优参数域与本实验尽管结论不同,但并不矛盾,可将其看为本实验最优参数域的一个子集。该实验结果在相同的标刻设备与相同牌号材料条件下具有相当高的可重复性。

从表 2 可见,对比度大于 90% 的 DM 码样本所对应的激光标刻工艺参数组合分布广泛且较为分散。比如功率为 3.6~9.0 W,标刻速度为 50~650 mm/s,激光扫描间距为 0.001~0.034 mm 的工艺参数组合均可在铝合金表面标刻出对比度大于 90% 甚至为 100% 的 DM 码样本,且可通过调节模块缩进量的大小,使打印增长变为最佳状态。

然而并非在这些范围之内的参数的任意组合便可标刻出对比度大于 90% 的 DM 码,如图 1(a)、(c) 中的激光标刻工艺参数分别为(3.6,500,26,0.031,-0.02)、(9.300,20,0.043,0.01),所产生的 DM 码对比度为 37% 和 79%。此外,从表 2 中可见,不同工艺参数组合可实现相同对比度,但制作标记所需时间往往是不同的(从 17 s 到 215 s 不等分布),其标记制作效率相差较大,215 s 的标记时间难以满足实际应用需求。

4 基于多目标的激光工艺参数优化

4.1 基于识读质量的参数约束空间

模块缩进对 DM 码模块的灰度值无影响,DM

码对比度只受激光功率、激光标刻速度、激光扫描间距和 Q 频率的影响。对对比度观测量进行多元非线性回归,根据单因素实验分析以及文献^[8]的相关分析与研究结果,并考虑到对比度最大值为 1,建立对比度回归经验模型为

$$C = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1 - \exp\left(\frac{-ax_1^b}{x_2^c x_4^d}\right)(m \ln x_3 + n), \quad (1)$$

式中 C 为 DM 码的对比度, x_1, x_2, x_3, x_4 分别为激光功率、激光标刻速度、Q 频率和激光扫描间距, a、b、c、d、m 和 n 为待定系数。

利用(1)式以及遗传算法进行多元非线性回归,并根据复决定系数 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,DM 码对比度的最终回归公式为

$$C = 1 - \exp\left(\frac{-0.944x_1^{1.062}}{x_2^{0.607} x_4^{0.515}}\right)(0.26 \ln x_3 + 0.147). \quad (2)$$

计算复决定系数 $R^2 = 0.972, F = 374.914 \gg F_{4,55}(0.05)$,得到 DM 码对比度拟合值的残差图如图 3 所示。

从复决定系数、F 值以及拟合值的残差图分析

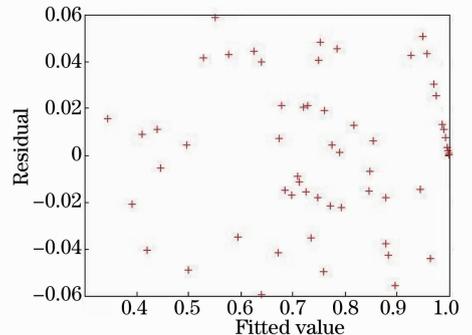


图 3 DM 码对比度拟合值的残差图

Fig. 3 Residual plot of DM code contrast fitted value

来看,该多元非线性模型能较好地拟合实际观测数据,残差控制在6%以内,且拟合值的残差无明显趋势性。综上所述,该模型未遗漏其他重要的实验因素,对比度的非线性回归模型较为合理,可信度高。

实验发现DM码打印增长受激光功率、Q频率影响外,模块缩进对DM码打印增长有较大影响,而激光标刻速度、激光扫描间距对打印增长影响相对较小。表3所示为特定观测量的线性回归模型在

表3 方差分析与参数估计

Table 3 Variance analysis and parameter estimation

Parameter	State	Observed quantity	Parameter significance p value	F value	Error mean square	R^2
D	Import	X print growth	0.4803	49.886	0.00170	0.9066
D	Eliminate	X print growth	No	60.331	0.00167	0.9024
A	Import	Y print growth	0.4770	55.259	0.00123	0.9146
A	Eliminate	Y print growth	No	70.350	0.00121	0.9146

采用同样的方法,对DM码X方向打印增长与Y方向打印增长进行线性回归,回归结果为

$$\begin{cases} G_X = 1.0043 + 0.0313x_1 - 0.0001x_2 - 0.0059x_3 - 3.9477x_5 \\ G_Y = 0.9711 + 0.0283x_1 - 0.0051x_3 - 0.5636x_4 - 3.8175x_5 \end{cases} \quad (3)$$

式中 G_X 、 G_Y 为X、Y方向打印增长, x_5 为模块缩进。

根据(2)式和(3)式以及DM码质量检验相关标准可得

$$K = \{x \mid k_1 \leq C \leq k_2, k_3 \leq G_X \leq k_4, k_5 \leq G_Y \leq k_6, x \in \mathbf{R}^{+5}\}. \quad (4)$$

(4)式所示为基于识读质量的激光标刻工艺参数的约束空间 K ,其中 $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T$ 为五维的参数域, $k_i (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 为可调正参数,可依所需的DM码识读质量等级给定,且 $k_1 \leq k_2 \leq 100\%$ 。

4.2 标记制作功效优化

从表2可以看出,不同的激光工艺参数组合可标刻出相同的高识读质量等级的DM码,但制作标记所需时间往往不同,从17s到117s分布不等,效

剔除某参数前后的方差分析与参数估计及显著性检验表。

由表3可知,激光标刻间距对X向打印增长影响较小,激光标刻速度对Y向打印增长影响较小,回归模型的复决定系数与误差均方在剔除二者前后相差甚小,其他参数的估计值及标准差估计也相差不大,因此在X、Y向打印增长的回归模型中分别忽略了二者对其拟合值的影响。

率差别较大。显然,标记制作时间与激光标刻速度、激光扫描线间距成反比,且与激光功率、激光Q频率无关,标记制作时间 T 满足关系

$$T = \frac{NZ_m}{x_2 x_4} (Z_m - 2x_5), \quad (5)$$

式中 N 为黑色模块数, Z_m 为每个模块的公称宽度。因此在保障标记质量的同时追求最小标记制作时间或最小功耗(用 E_r 表示制作该标记所需功耗)时满足

$$\begin{cases} \min T = \frac{NZ_m}{x_2 x_4} (Z_m - 2x_5) \text{ or } \min E_r = x_1 T \\ x \subset X, 3.6 \leq x_1 \leq 9.5, 50 \leq x_2 \leq 800 \\ 20 \leq x_3 \leq 30, 0.001 \leq x_4 \leq 0.043, -0.04 \leq x_5 \leq 0.04 \end{cases} \quad (6)$$

(6)式所示为约束优化问题。式中 $Z_m = 0.5 \text{ mm}$, $N = 130$, 保证DM识读质量等级为“A”级,在约束空间 K 中不妨取 $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6) = (0.9, 1, 0.92, 1.02, 0.92, 1.02)$ 。以标记时间最小和功耗最小为目标,分别求解得到的优化参数组合为 $(9.0, 152.68, 29.11, 0.043, 0.02)$ 、 $(9.0, 150, 26, 0.043, 0.02)$,该参数组合制作的DM码标记各项

指标的预测值与实际值对比如表4所示。

考虑到检验仪的误差,可见该模型能较好地预测实验数据,模型得到的最优解满足实际工程需求。显然,当约束空间中 $k_i (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 发生变化即DM码识读质量要求变得更加苛刻或宽松时,最优组合将发生变化,以满足不同质量等级要求的DM码的制作。

表 4 DM 码指标预测值与实际值对比

Table 4 Comparison of predicted and actual values for DM code index

Target	Optimal combination	Contrast / %	X print growth / %	Y print growth / %	Target value
Minimum time	Predictive value	90	102	97	5.4 s
Minimum time	Actual value	91	103	99	6 s
Power consumption	Predictive value	90	103	98	49.2 J
Power consumption	Actual value	91	104	101	54 J

5 激光标刻区域的宏观形貌与微观组织

对采用识读质量最优的参数域中的参数组所标刻的三组 DM 码的最小模块进行微观形貌研究和成分分析,放大 1000 倍的电镜扫描结果如图 4 所示。

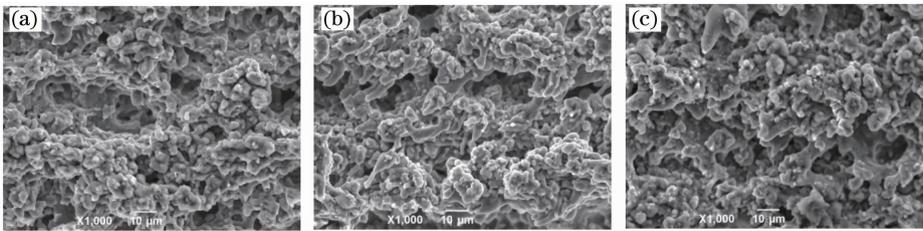


图 4 DM 码电镜扫描图。(a) 第一组模块;(b) 第二组模块;(c) 第三组模块

Fig. 4 DM code SEM images. (a) 1st set module; (b) 2nd set module; (c) 3rd set module

从图中可以看出,尽管标刻参数不同,三个模块的激光熔池“爆炸”现象都较为明显,且在铝合金基体表面均形成了一层由氧化颗粒所组成的氧化膜,氧化颗粒之间形成的微观空隙也较为致密,总之三个模块的微观形貌具有较大的相似之处。因此,不同邻域的激光标刻工艺参数组合可在铝合金表面形成类似的微观形貌,模块对光照具有大致相等的漫反射情况,使模块对比度相近成为了可能。图 4 中三个模块以及铝合金基体的化学成分能谱分析结果如表 5 所示。

表 5 模块能谱分析结果(质量分数,%)

Table 5 EDS analysis of the modules (mass fraction, %)

Element	Matrix	(a) module	(b) module	(c) module
O	0.02	28.12	20.59	24.86
Al	93.08	64.68	71.87	67.56
Mg	5.94	6.12	6.51	6.48
Mn	0.48	0.45	0.42	0.50
Fe	0.34	0.36	0.40	0.42
Cu	0.04	0.02	0.03	0.02
Other	0.10	0.25	0.18	0.16

表 5 中三个模块的含氧量均较大,氧化反应程度基本处于同一水平,模块的整体成分组成相近,模块对光照具有大致相等的吸收情况,三个模块的对比度相近成为了必然,并进一步证实了标刻区域的氧化反

图 4(a)、(b)、(c)中模块对比度分别为 1.0、0.92、1.0,标刻这三个模块的激光工艺参数组合(A,B,C,D,E)分别为(6.6,500,26,0.001,0.02)、(8.4,100,26,0.031,0.01)、(9.0,150,20,0.019,0.02)。

应及所形成的氧化颗粒是引起模块对比度发生变化的重要原因。实验还发现高对比度模块的氧含量至少在 16% 以上,因此充分的氧化反应是获取高对比度模块的必要条件,在一定激光功率下,充分氧化反应可通过低标刻速度与较小的激光扫描间距实现。

综上所述,分布在若干个连通实邻域的并集之中的优化参数组合所标刻的 DM 码模块具有大致相同的微观形貌与化学组成成分,从微观上解释了最优激光参数的分布问题。

6 结 论

实验结果显示,激光功率、激光扫描间距与扫描速度对激光标刻铝合金表面 DM 码识读质量有重要影响,低功率时 DM 码对比度对 Q 频率变化较为敏感,且最优激光标刻工艺参数组合并非简单地分布在一个连通的实邻域之内,而是分布在若干个连通实邻域的并集之中。不同的工艺参数组合可以获取相同的、高对比度的 DM 码,但标记制作时间差别较大,获取了以识读质量、标记制作时间综合最优为目标的激光标刻工艺参数组合。扫描电镜图和能谱数据显示,高对比度的 DM 码模块具有大致相似的微观形貌,且标刻区域的氧化程度相近。

参 考 文 献

- 1 Y M Noor, S C Tam, L E N Lim, *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—103.
- 2 L Chitu, R Cernat, I Bucatica, *et al.*. Improved technologies for marking of different materials[J]. *Laser Physics*, 2003, 13(8): 1108—1111.
- 3 T Dumont, T Lippert, A Wokaun, *et al.*. Laser writing of 2D data matrices in glass[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 453: 42—45.
- 4 W Jangsombatsiri, J D Porter. Laser direct-part marking of data matrix symbols on steel substrates[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, 129(3): 583—591.
- 5 C Connolly. Part-tracking labelling and machine vision [J]. *Assembly Automation*, 2005, 25(3): 182—187.
- 6 Wang Su'an, He Weiping, Zhang Wei, *et al.*. Direct tool marking and identification method [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(6): 1169—1174.
王苏安, 何卫平, 张 维, 等. 刀具直接标刻与识别技术研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(6): 1169—1174.
- 7 M F Chen, W T Hsiao, W L Huang, *et al.*. Laser coding on the eggshell using pulsed-laser marking system [J]. *Materials Processing Technology*, 2009, 209(a): 737—744.
- 8 C Lenone, S Genna, G Caprino, *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.
- 9 L Costa, K Lansford, D Rajput, *et al.*. Unique corrosion and wear resistant identification tags via LISI™ laser marking [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203(14): 1984—1990.
- 10 Wang Su'an, He Weiping, Zhang Wei, *et al.*. Research on application of direct laser marking and 2-dimension code technology in tool marking [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(6): 676—680.
王苏安, 何卫平, 张 维, 等. 直接激光标刻和二维条码技术在刀具标识中的应用研究 [J]. *中国机械工程*, 2007, 18(6): 676—680.
- 11 Wang Wei, He Weiping, Lei Lei, *et al.*. 2-D bar code data extraction on metal pasts [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(5): 612—619.
王 伟, 何卫平, 雷 蕾, 等. 标刻在金属零件上的二维码数据提取方法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24(5): 612—619.
- 12 Qiu Huadong, Lu Changhou, Xiao Rujing. Laser parameters influence in direct-part marking barcodes on aluminum alloy [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0803006.
邱化冬, 路长厚, 肖如镜. 激光参量对铝合金直接标识条码的影响 [J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0803006.
- 13 NASA. Applying Data Matrix Identification Symbols on Aerospace Parts[S]. Washington, DC: NASA, 2008.

栏目编辑: 宋梅梅