

# 激光参量对铝合金直接标识条码的影响

邱化冬 路长厚 肖如镜

(山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要** 研究了不同激光参量组以及激光与铝合金相互作用产生物对条码等级的影响,寻找适合工业应用的最优激光参量组。实验采用 Nd:YAG 激光器作为加工源,通过调节搭配激光四参量实现 3136 种不同功率密度激光在铝合金表面标识二维码,并使用 INTEGRA 条码检测仪对标识条码进行分级。统计分析条码等级分布推得最优加工参量组为:有效矢量步长 0.005~0.009 mm,有效矢量步间延时 29~43  $\mu\text{s}$ ,Q 驱频率 7~10 kHz,Q 驱释放时间 13~19  $\mu\text{s}$ 。同时分析两组激光参量加工模块的扫描电镜(SEM)图片和能谱(EDS)数据,推知激光与铝合金相互作用的 4 个阶段,从微观上解释了激光参量与材质对条码等级的影响。

**关键词** 激光技术;激光最优参量;直接标识;Data Matrix 码;铝合金

中图分类号 TG176; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0803006

## Laser Parameters Influence in Direct-Part Marking Barcodes on Aluminum Alloy

Qiu Huadong Lu Changhou Xiao Rujing

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract** Different laser parameters and the interactional production can affect the barcode grade profoundly. In order to effectively mark barcodes on aluminum alloy with a laser, it is important to search out the optimum parameters and establish a relationship between critical laser parameters and the quality of the symbol. A Nd:YAG laser is utilized to produce 3136 Data Matrix symbols onto aluminum substrates. The experiment focuses on all interval values of the vector step, inter-step time, laser Q frequency and laser Q release time. From the experimental results, the optimized parameters are the vector step of 0.005~0.009 mm, the inter-step time of 29~43  $\mu\text{s}$ , laser Q frequency of 7~10 kHz, and laser Q release time of 13~19  $\mu\text{s}$ . And then, by analyzing the higher and the lower power density processing module scanning electron microscope (SEM) images and energy dispersive spectrometer (EDS) data, it is found that the interaction between the laser and the aluminum alloy can be divided into four stages. This can explain the laser parameters and materials influence on barcode grade in microstructure and micro-components.

**Key words** laser technique; optimal laser parameters; direct-part mark; Data Matrix symbols; Al alloy

**OCIS codes** 120.4610; 120.4630; 120.4800; 140.3390; 220.3740

## 1 引 言

激光与材料之间复杂的相互作用机制不明限制了直接标识 Data Matrix 码的工业应用,不同的激光加工参量、材料材质类型等对直接标识条码的等级产生重大的影响<sup>[1]</sup>。国内外对激光标识和刻蚀的研究已大量开展,其中在激光刻蚀研究中,紫外激光

被用来刻蚀印刷电路板<sup>[2,3]</sup>、三极管引线槽<sup>[4]</sup>,纳秒激光不锈钢表面刻蚀光栅结构<sup>[5]</sup>;激光标识研究中,CO<sub>2</sub> 激光器标识蛋壳编码<sup>[6,7]</sup>,Nd:YAG 激光器在 304 不锈钢<sup>[8,9]</sup>、碳钢<sup>[10]</sup>上进行标识。激光刻蚀主要研究了激光功率密度、扫描速度和光束口径等参量与刻蚀深度宽度的关系,而激光标识参量的研究

收稿日期: 2011-03-18; 收到修改稿日期: 2011-04-14

基金项目: 山东省自然科学基金(Q2008G02)和山东大学自主创新基金(2010TS036)资助课题。

作者简介: 邱化冬(1980—),男,博士研究生,主要从事激光标识与识别等方面的研究。E-mail: Sonntag@126.com

导师简介: 路长厚(1960—),男,教授,主要从事机电系统检测、诊断和激光标识等方面的研究。

E-mail: luchh@sdu.edu.cn

集中在激光阈值能量、激光功率与峰值功率、脉冲频率参量以及扫描速度等参量。

目前对激光参量的研究主要集中在激光能量与标识宽度深度之间的关系上<sup>[2~12]</sup>,未见针对铝合金材料标识参量范围以及作用形成物对标识条码质量影响的研究。为此,本文利用 Nd:YAG 激光器在铝合金表面直接标识 Data Matrix 码,通过统计分析条码等级分布寻找激光最优标识组。由加工模块的扫描电镜(SEM)图片和能谱(EDS)数据,分析激光与铝合金材料的作用机制,微观上解释激光参量对条码等级的影响,进而推断激光与铝合金材料相互作用的详细过程。

## 2 实验材料、装置及方法

激光直接标识条码基底材料选择铝合金薄片,具体成分如表 1 所示。

表 1 铝合金材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Al-alloy (mass fraction,%)

Al	Fe	Si	Cu	Mn	Ti	Mg	Zn
99.48	0.34	0.11	0.016	0.019	0.011	0.002	0.007

实验采用激光器为波长 1064 nm 灯抽运 Nd:YAG-T80C 激光打标机,激光平均功率为 80 W。当激光器电源电流超过材料破坏阈值电流时,单纯增大激光器电源电流对条码等级影响很小<sup>[13]</sup>,由前期实验确定激光器电源光电流为 15 A 时完全满足标识要求。该激光打标机是声光 Q 驱动式激光器,Q 频率和 Q 释放时间是调节激光聚能时间和功率密度的重要参量。两参量调节范围分别为 1~20 kHz 和 1~40 μs,Q 频率选取 1, 4, 7, 10, 13, 16 和 19 kHz 的 7 种水平,Q 释放时间选取 1, 7, 13, 19, 25, 31 和 37 μs 的 7 种水平进行实验。

有效矢量步长是将打标笔画划分成若干等份的长度,有效矢量步间延时则是每份步长预留的时间。两参量调节范围分别为 0.001~0.030 mm 和 8~60 μs,有效矢量步长选取由 0.001 mm 开始间隔 0.004 mm 的 8 种水平,有效矢量步间延时选取由 8 μs 开始间隔 7 μs 的 8 种水平进行实验。

激光 4 个参量组合能产生 3136 种不同的功率密度组合,依次使用不同参量组合在铝合金薄片表面进行标刻。标识完的条码执行三步清理程序,首先将条码浸泡水中 0.5 h,然后每个条码使用流动水冲洗 5 min,最后使用压缩空气将条码完全干燥,使用条码检测仪对清理完成的条码进行测量和等级评定。Data Matrix 码等级测定使用 INTEGRA

9500 二维条码检测仪,是市场上唯一通过 UCC 系统标准认证的条码检测系统。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验结果

国际标准化组织/国际电工委员会的 ISO/IEC 16022:2006 标准将条码分成 ABCDF 5 级,现有的国际标准均是针对印刷条码制定的。因此根据实验情况,将能够良好观察和阅读但条码检测仪无法分级的条码设定为 E 级,将人眼无法观察同时条码检测仪无法识别分级的条码设定为 G 级。这样在铝合金表面直接标识二维 Data Matrix 码实验中,条码等级将出现 7 级,其中 ABCDF 为国际标准化组织/国际电工委员会规定的原级别,EG 两级是由实验划定出的级别。实验结果统计如表 2 所示。

表 2 直接标识 Data Matrix 码等级统计表

Table 2 Statistical table of laser direct-part marking

Data Matrix symbols		
Data Matrix barcode grade	Number of barcode	Percentage /%
A	12	0.382653
B	178	5.67602
C	221	7.047194
D	231	7.366071
F	299	9.534439
E	496	15.81633
G	1699	54.1773
Total	3136	100

### 3.2 激光参量与条码等级

首先将 4 个激光参量根据物理意义进行合并,先研究合并后的两参量与条码等级分布之间的关系,并确定合并后参量范围,然后分别在各自范围内确定 4 个激光参量最优加工范围。有效矢量速率为有效矢量步长除以有效矢量步间延时。激光能量为 Q 频率乘以 Q 释放时间,特别注意此两项乘积实际为激光占空比。实验中未改变激光器电源电流,所以直接称激光占空比为激光能量。将条码等级用阿拉伯数字依次替代便于图形显示。

合并好的有效矢量速率、激光功率与条码等级,利用 Matlab 做三维散点图,如图 1 所示。

图 1 显示了直接标识二维条码的等级整体分布,从图中可以明显地观察到高质量等级条码都集中在激光功率小且加工速率慢的范围内。

在 ABC 高条码等级中,选择 Q 释放时间、有效矢量步间延时分别与条码等级做图,如图 2,3 所示。

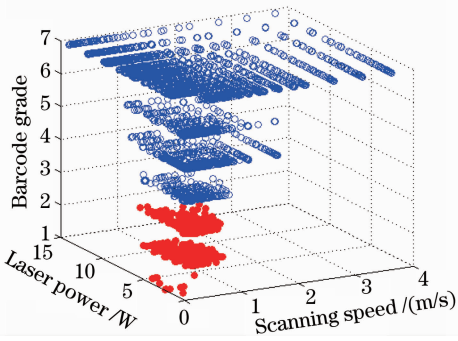


图1 条码等级整体分布

Fig. 1 Overall distribution of barcode grade

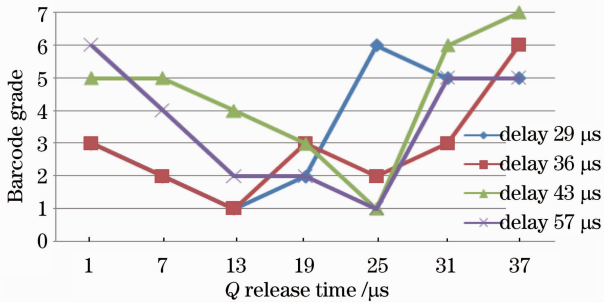


图2 Q 释放时间与条码等级

Fig. 2 Q release time and barcode grade

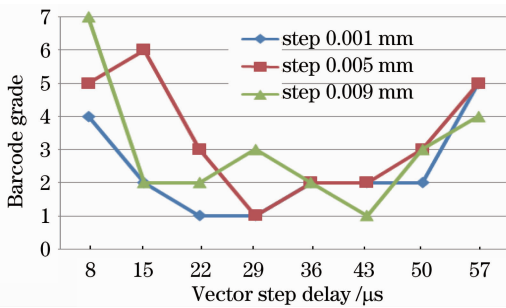


图3 有效矢量步间延时与条码等级

Fig. 3 Delay of vector step and barcode grade

图2是Q频率为10 kHz、有效矢量步长为0.009 mm的Q释放时间与条码等级图,有效矢量步间延时分别为29,36,43和57 μs 4个水平。图中4条曲线显示,随着Q释放时间的增大,条码等级出现先升高后降低的规律。有效矢量步间延时29 μs和36 μs两直线在Q释放时间13 μs点上达到条码的最高等级A级,而有效矢量步间延时43 μs和57 μs两直线在Q释放时间25 μs点上达到最高等级。这表明在同一矢量步长中,降低矢量速率必须相应地提高激光功率才能保证条码等级。同时29 μs和36 μs两水平条码等级波动范围也小于43 μs和57 μs两水平,标记出的条码等级较高。表明同一矢量步长中,较高的矢量速率对条码等级保证有利。

图3为在Q频率为10 kHz和Q释放时间为

13 μs条件下,有效矢量步间延时与条码等级的示意图,图中3条曲线分别为有效矢量步长0.001,0.005和0.009 mm。明显观察到有效矢量步间延时与Q释放时间类似的规律,条码等级随着有效矢量步间延时的增大先升高后降低,且随着有效矢量步长增大有效矢量步间延时必须相应增大以此获得高的条码等级。

有效矢量步间延时和Q释放时间为同一数量级的量,两者之间的相互影响要大于其余两参量的相互影响,两参量必须相互配合才能达到较高的条码等级。在整个打标实验中,A等级的条码均出现在Q频率为7 kHz和10 kHz两参量点。

综上所述,A级的分布区域在有效矢量速度0.03448~0.8056 m/s和激光功率1.26~4.5 W范围下出现。由参量相互关系的规律推知参量的最优选择为:有效矢量步长0.005~0.009 mm,有效矢量步间延时29~43 μs,Q驱频率7~10 kHz和Q驱释放时间13~19 μs。

### 3.3 激光与材料作用物宏观形貌及微观组织

直接标识二维条码外观出现6种情况,如图4所示。G级内的条码级为条码不完整或肉眼难观察的两种情况,如图4(a),(b)所示。ABC三高等级条码均为白色外观的条码,如图4(c)所示。图4(d)和图4(e)分别为“硅灰”现象和淡黄色边界放大图。E级内的条码绝大部分为黑色外观的条码,如图4(f)所示。

将黑白两种外观的条码的最小模块使用扫描电镜进行微观形貌研究和成分测量分析。扫描电镜结果如图5所示。

图5(a)为外观呈现黑色条码扫描结果图,使用参量有效矢量步长0.001 mm,有效矢量步间延时43 μs,Q频率7 kHz和Q释放时间13 μs,计算激光功率密度为70.434 W/m。图5(b)则为外观呈现白色条码扫描结果图,使用参量有效矢量步长0.005 mm,有效矢量步间延时22 μs,Q频率10 kHz和Q释放时间7 μs,计算激光功率密度为5.544 W/m。模块化学成分能谱分析结果如表3所示。

表3 条码模块能谱分析结果(质量分数,%)

Table 3 EDS analysis of barcode module (mass fraction, %)

Elements	High power	Low power
	density /(W/m)	density /(W/m)
O	32.73	7.31
Al	29.80	78.99
Si	0.44	
Fe	0.28	

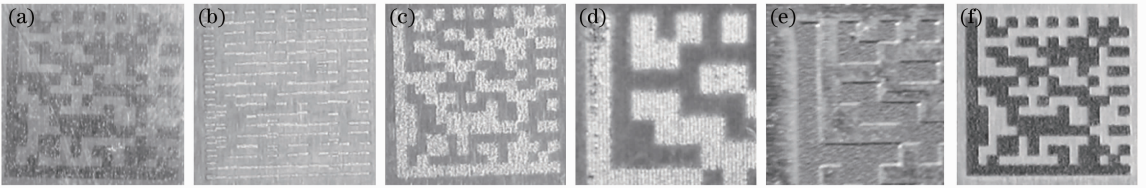


图 4 不同参量下条码外观图。(a)难以辨识;(b)条码不完整;(c)白色外观;(d)硅灰现象放大;  
(e)淡黄色边界放大;(f)黑色外观

Fig. 4 Appearance of Data Matrix barcode. (a) Difficult indentify; (b) barcode damaged; (c) white appearance;  
(d) close-up of silica fume; (e) close-up of pale yellow boundary; (f) black appearance

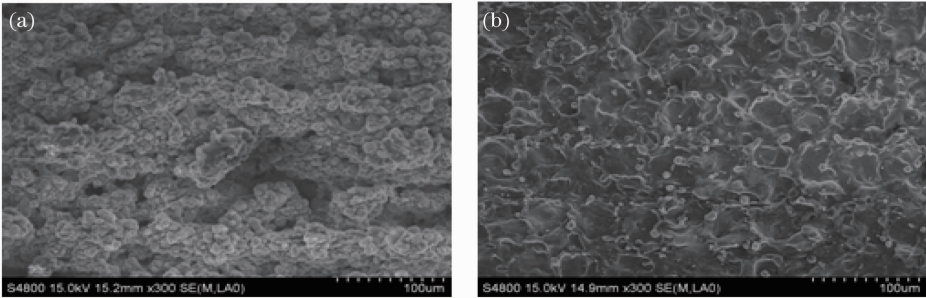


图 5 条码电镜扫描图。(a)高功率密度;(b)低功率密度

Fig. 5 Barcode module SEM image. (a) High power density; (b) low power density

表 3 中仪器送样使用黑色电工胶带粘贴试样,产生碳元素干扰本底,其他元素含量为碳元素。表 3 能谱数据显示了低功率加工的模块氧化程度要远远低于高功率模块。低功率加工形貌中存在球状颗粒,其形貌结构明显比高功率加工的致密,如图 5(b)所示。 $Al_2O_3$  常以球形聚集呈颗粒状成串分布,氧化物在明场中呈球状孤立存在<sup>[14]</sup>。结合表 3 能谱元素含量,低功率加工模块是熔化后又凝固形成的形貌结构,外观呈现白色。由此可以推定,激光低功率密度加工时,材料表层被激光加工成以铝及氧化铝为主要成分的组织,形成物及其较致密结构形成了条码的白色外观。

激光处于高功率加工时,情况变得更为复杂。当铝中铁和硅含量较少时,硅可溶入基体,而铁形成针状或细条状  $Al_3Fe$  相。当其含量较多时,可形成三元化合物,若含铁量大于含硅量时,可形成不定形片状或骨骼状  $\alpha(Al_{12}Fe_3Si)$  相。含硅量大于含铁量时,则形成针状或细条状  $\beta(Al_9Si_2Fe_2)$  相<sup>[15]</sup>。从表 1 材料元素含量中可见含铁量大于含硅量,但能谱数据显示氧化物硅的含量又高于铁,可见高功率激光加工铝合金时,其氧化物应当是一种复杂的形态,由于研究外观对条码等级的影响,其氧化物具体的形态不是研究重点。粉末冶金材料随着高熔点高硬度组元增多,致密化过程一般变得相对困难,从而使

得材料孔隙率增高<sup>[16]</sup>。可见,铁硅元素的存在使得激光高能加工形貌出现较大孔隙。激光高功率密度下形成的复杂形态氧化物和微观空隙对光的反射形成了条码黑色外观。

综上所述,不同激光参量在铝合金表面标识条码过程,可表征为不同功率密度的激光与铝合金的相互作用的 4 个阶段。1)激光功率密度小于 Al 的破坏阈值时,仅是对 Al 和  $Al_2O_3$  进行加热,对外观基本无影响,只增加了  $Al_2O_3$  的厚度,形成条码很难观察,如图 4(a)所示。2)达到 Al 破坏阈值时,铝优先与氧气反应,形成白色铝氧化物,此时的条码等级评级高,如图 4(c)所示。但可以观察到“硅灰”现象,如图 4(d)所示。3)达到 Si 的破坏阈值时, Si 中由于含有 Fe 元素在条码边缘形成淡黄色的边界,将降低条码质量,如图 4(e)所示。4)达到 Fe 的破坏阈值时,产生铝硅铁复杂氧化物混合情况,形成黑色外观条码,如图 4(f)所示,但此类条码无法被评测到等级。

## 4 结 论

通过实验研究激光直接标识二维条码中激光参量和材料材质的相关问题,由条码等级分布推得的激光加工参量可直接应用于工业铝合金表面标识,从而大大提高了激光直接标识铝合金材料的工业应

用前景。根据激光作用下的铝合金表面形貌图与能谱数据,推出了铝合金与激光相互作用的4个不同阶段。从微观上揭示了激光加工参量与条码等级之间的联系,研究结果为其他材料激光标识工艺参量选择及分析提供了依据。

### 参 考 文 献

- 1 National Aeronautics and Space Administration. NASA-HDBK-6003C. Application of data of Data Matrix identification symbols to aerospace parts using direct part marking methods/techniques [S]. Washington DC: NASA Press, 2002: 8~10
- 2 Zhang Fei, Zeng Xiaoyan, Li Xiangyou *et al.*. Laser etching and cutting printed circuit board by 355 nm and 1064 nm diode pumped solid state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1637~1643  
张 菲, 曾晓雁, 李祥友等. 355 nm 和 1064 nm 全固态激光器刻蚀印刷线路板[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1637~1643
- 3 Ling Lei, Lou Qihong, Ye Zhenhuan *et al.*. Ablation of circuit board by pulsed UV laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 953~955  
凌 磊, 楼祺洪, 叶震寰等. 紫外激光刻蚀多层线路板初步研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 953~955
- 4 Wen Dianzhong. Study on laser etching emitter region-groove approach of magnetic-sensitive silicon transistor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 454~456  
温殿忠. 激光刻蚀硅磁敏三极管发射区引线槽的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 454~456
- 5 Zhang Heng, Zhou Yun, Fang Zhongbao *et al.*. Fabrication of micro-grating structure on glazed stainless-steel by nanosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 448~451  
张 恒, 周 云, 方宗豹等. 用纳秒激光在镜面不锈钢表面刻蚀微光栅结构[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 448~451
- 6 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
- 7 M. F. Chen, W. T. Hsiao, W. L. Huang *et al.*. Finite element analysis and verification of laser marking on eggshell [J]. *Materials Processing Technology*, 2009, **209**(b): 470~476
- 8 J. Qi, K. L. Wang, Y. M. Zhu. A study on the laser marking process of stainless steel [J]. *Materials Processing Technology*, 2003, **139**(2): 273~276
- 9 C. Leone, S. Genna. AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd:YAG laser [J]. *Materials Processing Technology*, 2010, **210**(6): 1297~1303
- 10 J. David Porter. Laser direct-part marking of Data Matrix symbols on carbon steel substrates [J]. *Manufacturing Science and Engineering*, 2007, **129**(3): 583~591
- 11 T. W. Ng, S. C. Yeo. Aesthetic laser marking assessment using luminance ratios [J]. *Opt. Laser Engng.*, 2001, **35**(3): 177~186
- 12 H. Hayakawa. A laser method for marking bar codes on glass substrates [C]. *SPIE*, 2000, **4088**: 363~366
- 13 R. C. Palmer. The Bar Code Book [M]. Peterborough: Helmers Publishing Press, 2001. 314~318
- 14 Huang Zhongtao. Industrial Catalysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 135~137  
黄仲涛. 工业催化[M]. 北京:化学工业出版社, 2006. 135~137
- 15 Li Jionghui. Metal Metallographic Map [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 1638~1727  
李炯辉. 金属材料金相图谱[M]. 北京:机械工业出版社, 2006. 1638~1727
- 16 Han Fenglin. Power Metallurgy Essential [M]. Guangzhou: South China University Press, 1998. 97  
韩凤麟. 粉末冶金基础教程[M]. 广州:华南理工大学出版社, 1998. 97