

激光工艺参数对打标彩色效果的影响

刘忠民¹ 张庆茂¹ 郭亮¹ 吕启涛² 杨琨¹

(¹ 华南师范大学广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006)
² 深圳市大族激光科技股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 为了研究各种激光工艺参数对彩色打标效果的影响及其相互关系,通过计算获得了纳秒激光脉冲在不锈钢表面打标产生的温度场的解析结果,模拟了一系列激光脉冲由点打标成线、由线连成面的热作用过程。通过打标实验验证了对不锈钢激光彩色打标进行热分析的合理性。研究表明:激光工艺参数是通过热作用来影响打标效果,不同参数组合的激光结果能产生相同的颜色。同时发现,不同工艺参数的变化改变不同形式的热输入,产生的热影响会有一些的区别,一些彩色效果只能在特定的工艺参数组合的激光作用下才能产生。

关键词 激光技术; 激光彩色打标; 不锈钢; 温度场; 工艺参数

中图分类号 O434 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0403011

Influence of Laser Process Parameters on Color Obtained by Marking

Liu Zhongmin¹ Zhang Qingmao¹ Guo Liang¹ Lü Qitao² Yang Kun¹

¹ *Guangdong Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China*
² *Han's Laser Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China*

Abstract In order to study the influence of laser processing parameters on the resulting color and a possible connection of laser parameters, the heating process of the stainless steel in laser marking are simulated based on the analytical results of temperature fields generated by nanosecond laser pulse marking on the surface of stainless steel. Experimental results indicate the reasonability of the heat analysis in this study. It is found that the influence of laser process parameters on the resulting color are based on heat treatment, so the same color can be produced by different sets of parameters. Besides, different types of heat input are changed by various laser parameters, which produce different heat treatments. Accordingly, some colors can be marked only by specific sets of laser parameters.

Key words laser technique; laser color marking; stainless steel; temperature field; process parameters

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 140.3540; 140.6810

1 引言

在金属表面制作彩色标识可以通过印刷、电镀或喷漆等传统工艺来实现,然而在实际应用中这些工艺都有一定的局限性。印刷制品的抗刮、抗磨性能有限,电镀工艺的工序复杂且不善于处理多种彩色,喷漆成本很高而且需要多道工序。采用不同的激光光源对金属进行彩色打标的研究应用已有多^[1],激光打标有别于其他传统加工技术,在加工过

程中不需要添加任何化学试剂或其他原材料,只需通过输出不同的激光束能量来改变不锈钢、钛等金属表层的颜色就可以产生多彩标识。

研究已经证实^[2-4]脉冲激光作为局部热源诱导金属发生氧化反应,在其表面生成一层透明或半透明的氧化层。氧化层在白光下产生干涉效应,不同厚度的氧化层使观察者看到不同的颜色。

由于金属彩色打标的效果对激光能量和环境因

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-11-26

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040210)、中央财政支持地方高校专项资金(510-C10293)、广东省高等学校科技创新重点项目(CXZD1139)

作者简介: 刘忠民(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光先进技术方面的研究。E-mail: liuzm1129@126.com

导师简介: 张庆茂(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进技术方面的研究。E-mail: zhangqm@scnu.edu.cn

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

素变化比较敏感,造成该工艺存在调试困难、可重复性差等问题,因此金属彩色打标工艺未能获得广泛的应用。脉冲激光打标是通过调节激光功率、功率密度、重复频率、扫描速度、扫描方式和打标次数等激光工艺参数来实现不同的打标效果。本文通过模拟脉冲激光热作用产生的温度,从能量角度分析不同激光工艺参数对成色效果的影响以及它们之间的相互关系,为金属彩色打标工艺的调试和优化提供方向,同时也能进一步加深对激光打标机理的理解。

2 实验准备

实验设备采用大族激光公司 Draco-EP15 型号的声光调 Q 半导体端泵红外激光器,激光输出波长为 1064 nm,最大输出功率 15 W,重复频率在 10~200 KHz 连续可调,输出激光的脉宽处于 10~100 ns 的范围。使用德国 Scanlab 的振镜控制激光的扫描方式和速度,配备焦距为 254 mm 的 F-Theta 镜头,输出激光的光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 。该激光系统用打标软件中的打标速度、填充线宽和填充方式 3 个参数来改变振镜的扫描方式,改变打标软件中的重复频率、Q 释放和电流 3 个参数来改变激光的能量输出。

实验材料是板厚 1 mm 的商用不锈钢 AISI 304,尺寸为 150 mm×150 mm,打标前进行打磨、清洁处理。

实验过程中使用荧光示波器测量激光的脉宽,用激光功率计测量输出的脉冲激光平均功率。用分光测色计做辅助工具,通过眼睛视觉检验来评估打标的彩色效果。分光测色计型号为 Konica Minolta 的 CM-2600d,其 ΔE^* 色度值标准偏差在 0.04NBS 以内,测量结果采用 CIE $L^* a^* b^*$ 模型^[5]。用 L^* , a^* , b^* 3 个数值可以描述自然界中的任何色彩,其中 L^* 表示黑白,值域为 0~100,“100”表示偏白,“0”表示偏黑; a^* 表示红绿,值域为 +127~-128,“+”表示偏红,“-”表示偏绿; b^* 表示黄蓝,值域为 +127~-128,“+”表示偏黄,“-”表示偏蓝。比较两个打标效果的颜色差异可以用国际照明委员会(CIE)色差公式来表示:

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^* + \Delta a^* + \Delta b^*}, \quad (1)$$

式中 ΔL^* 、 Δa^* 和 Δb^* 表示需对比的两种打标颜色效果用分光测色计测得的 L^* 、 a^* 和 b^* 的差值,统计认为一般人眼可识别的最小颜色差异是对应 $\Delta E^* = 1$ 的值。

3 结果分析与讨论

3.1 激光热作用产生的温度计算

室温下金属中载流子的平均弛豫时间约为 10^{-13} s 量级^[6],载流子的寿命与纳秒级激光脉冲持续时间相比可以忽略,因此假设低功率激光与金属的相互作用是热作用过程。激光实际打标过程是:激光器输出高重复频率的激光脉冲,激光经过振镜的反射再由 F-Theta 镜头聚焦到不锈钢表面,在振镜摆动下激光脉冲在不锈钢表面的作用区由点展开成线、由线填充成面。根据打标过程和激光热作用时间长短,可划分出三个热作用阶段:单脉冲作用阶段,表示一个单脉冲的热作用过程,作用时长为纳秒级;热累加阶段,表示激光脉冲打标成线的过程,相邻脉冲的打标间隔为微秒级;已氧化阶段,表示激光打标的“线”形成面的过程或是同一区域重复打标的过程,打标过的不锈钢表面会发生氧化反应。

为描述传热过程中的物理本质,特作如下简化:

- 1) 研究的材料看成是半无限固体,在激光作用下一直处于固态;
- 2) 材料表面辐射和对流传热可以忽略;
- 3) 材料的热参数如吸收率 A 、导热系数 k 、热扩散系数 α 等不随温度变化;
- 4) 材料在固态相变时的相变潜热和激光能量相比可以忽略。综合上述假定可以得到材料在激光作用下材料的热传导方程如下:

$$\begin{cases} \nabla^2 T + \frac{Q_v}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \\ k \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \text{surface} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{n} 表示表面法向, k 为导热系数, α 为热扩散系数。如图 1 取激光作用中心为坐标原点,不锈钢表面为 xy 平面, z 轴正向向上。

激光光源的模式分布认为是高斯基模,可以得到一个脉冲激光的热源^[7]为

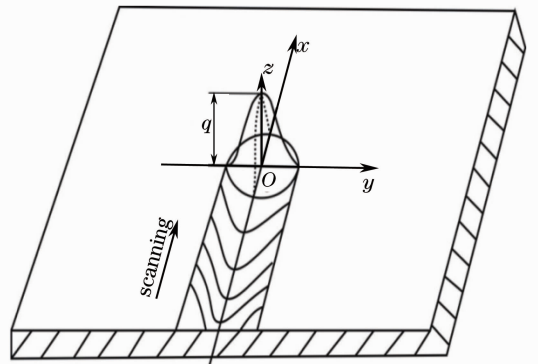


图 1 高斯热加载在不锈钢表面的示意图
Fig. 1 Schematic image of Gauss beam marking on the surface of stainless steel

$$\begin{cases} Q_v = \frac{AP}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{r^2}\right) \exp(-\alpha \cdot z), & t_1 \leq t \leq \tau + t_1 \\ Q_v = 0, & t > \tau + t_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 A 为表面吸收率, P 为热源中心处的最大功率, r 为激光在 xy 方向激光功率从中心降到 $1/e^2$ 处的等效半径, t_1 为激光脉冲的开始时刻, t 为观察时刻, τ 为激光的脉宽时间。在时空坐标 xyz 中, 考虑时空点 (x', y', z', t') 处的小体积元的热源 $dQ_v(x', y', z', t')$ 的热作用对时空点 (x, y, z, t) 的温度贡献对变量 x', y', z', t' 进行积分可得任意时刻 t 空间点 (x, y, z) 处的温度, 令 $u = \sqrt{t-t'}$ 。由(2)、(3)式得到静止的高斯激光束在金属表面加热和冷却过程中产生的温度场为

$$T - T_0 = \frac{2AP\sqrt{\alpha}}{k\pi^{3/2}r^2} \int_{\sqrt{t-t_2}}^{\sqrt{t-t_1}} \frac{r^2 du}{r^2 + 4\alpha u^2} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha u^2} - \frac{x^2+y^2}{r^2 + 4\alpha u^2}\right), \quad (4)$$

式中 t_2 为激光脉冲的结束时刻, 脉冲激光满足 $t \geq t_2 > t_1$ 。单脉冲作用区域中心点的温度变化可以简化为

$$\begin{cases} T = T_0 + \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{4\alpha t}{r^2}}, & 0 \leq t \leq \tau \\ T = T_0 + \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \left[\arctan \sqrt{\frac{4\alpha t}{r^2}} - \arctan \sqrt{\frac{4\alpha}{r^2}(t-\tau)} \right], & t > \tau \end{cases} \quad (5)$$

由上式可知, 单脉冲激光作用下的不锈钢表面的温度变化与脉冲能量、脉宽相关。高斯光源有效半径不同, 产生的温度变化也不同。

3.2 单脉冲作用阶段

3.2.1 功率密度变化对打标效果的影响

离焦量的变化会改变激光辐照在不锈钢表面的光斑半径大小, 从而引起作用区激光功率密度的变化。沿激光传播方向直径为 W 的光束^[8]为

$$W^2(z) = W_0^2 + \left[\frac{M^2 \lambda (z - z_0)}{\pi W_0} \right]^2, \quad (6)$$

式中 W_0 为焦平面处的光束直径, M^2 为光束质量因子, λ 为激光波长。由(6)式可知处于正负离焦面激光辐照在不锈钢表面的光斑大小是对称分布的。而实际中由于光学器件特别是 F-Theta 镜头的像差和光束质量等因素^[9]使激光光束偏离理想高斯光束,

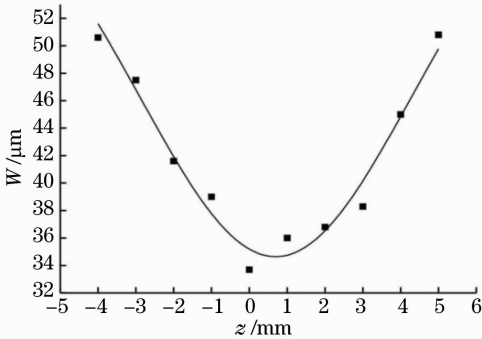


图2 不同离焦平面处的光斑大小分布
Fig. 2 Spot size versus material position relative to the focal point

图2是实验采用的激光系统的光斑大小分布, 负离焦处的光斑大小与正离焦对称位置的光斑大小更大一些。

在不同离焦位置打标效果如图3所示, 图3中的颜色效果总体上是对称分布的, 这与(5)式中激光产生的温度与光斑尺寸 r 的平方成反比的理论预测趋势相吻合。负离焦方向的彩色打标效果比正离焦的变化趋势更快, 这也证实图2光斑大小分布的结果。

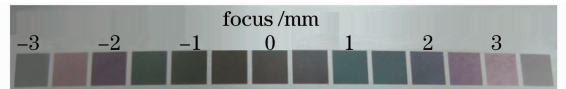


图3 不锈钢在不同的焦平面激光打标的颜色效果
Fig. 3 Influence of material position relative to the focal point on the obtained color

从图3中还可以发现, 处于焦平面位置的打标效果由于功率密度过高导致出现灼黑的现象。而离焦过远超过3 mm时, 由于功率密度过低也打不出颜色。因此, 激光在不锈钢表面打标, 存在一个相适应的激光功率密度范围, 过高或过低都不能打出彩色。

若在离焦量越来越小的平面位置处打标, 不锈钢表面的激光功率密度越来越高, 对应的打标颜色按图4中从左到右的趋势变化。这些颜色的排布并没有按照可见光谱随波长变化的颜色趋势, 通过分光测色计测得各种颜色的 L^* , a^* 和 b^* 值如图4所示, 可以发现随着功率密度越来越高, a^* 值从小变大, 直到深红色颜色的 a^* 值成最大值, 进而 a^* 值又由大变小。

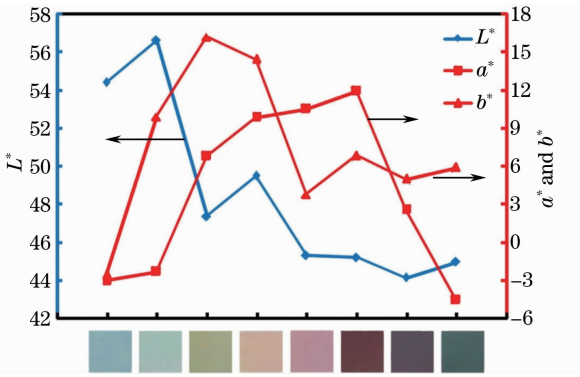


图4 不同离焦量处打标颜色效果及其对应的 CIE L^* , a^* , b^* 值

Fig. 4 Marked color of different positions relative to the focal point and its measured L^* , a^* , b^* data

3.2.2 峰值功率和脉宽对打标效果的影响

激光单脉冲可以用脉冲能量、峰值功率和脉宽来表征,根据(5)式的结果,激光单脉冲的热作用不能简单的用脉冲能量来评价,而应该用峰值功率和脉宽来评估单脉冲激光能量对打标效果的影响。参考 304 不锈钢的热物理性能^[10],可以模拟峰值功率和脉宽不同的激光单脉冲在不锈钢表面产生的温度场。

表1 模拟中使用的参数

Table 1 Parameters used in simulations

Variable	Unit	Value
Laser efficiency A	—	0.3
Thermal conductivity k	W/(m · K)	30
Thermal diffusivity a	m ² /s	3×10^{-6}
Laser beam radius r	m	2.5×10^{-5}

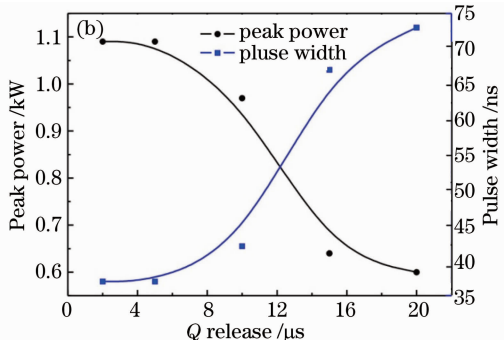
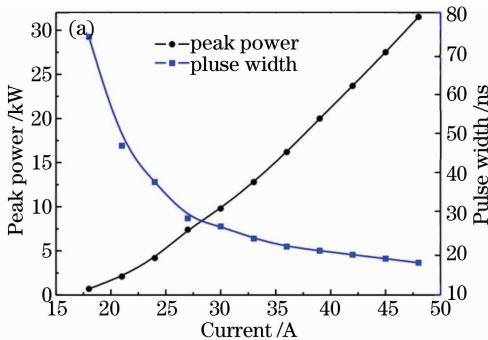


图6 (a) 激光工作电流的变化引起峰值功率和脉宽的变化; (b) 激光 Q 释放的变化引起平均功率和单脉冲能量的变化

Fig. 6 (a) Effect of current on the peak power and pulse width of laser pulse; (b) effect of Q release on the peak power and pulse width of laser pulse

图7(a)是激光系统的 Q 释放和电流的变化对打标彩色的影响规律,图7(a)中每行是电流单因子变化的效果,每列是 Q 释放单因子变化的结果。实验结果验证了短脉宽、高功率的激光脉冲会产生更深的颜色,长脉宽、低功率的激光脉冲打标

由图5对比结果发现长脉宽、低峰值功率的激光脉冲不能得到短脉宽、高功率的激光脉冲加热的效果。单脉冲的热作用能使不锈钢表面的瞬时温度达到 2000 °C,这个阶段会存在熔融、蒸发现象。

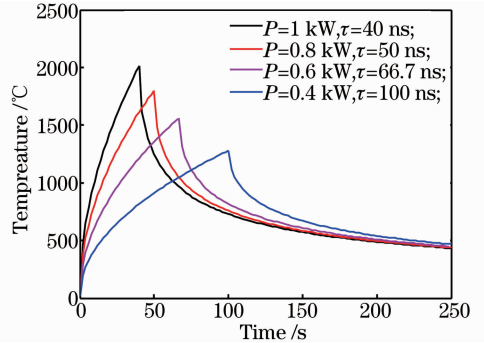


图5 单脉冲激光的加热—冷却温度曲线

Fig. 5 Heating-chilling temperature curve of single pulse

实验用的 Draco-EP15 型号的激光系统可以通过改变 Q 释放或电流两个工艺参数达到只改变输出脉冲激光的峰值功率和脉宽的目的。通过仪器测得分别随 Q 释放和电流变化的脉冲激光的平均功率及脉宽,计算得到对应的峰值功率。一个方脉冲的峰值功率^[11]为

$$P_{\text{peak}} = \frac{P}{t_p \cdot f} \quad \text{or} \quad P_{\text{peak}} = \frac{E_p}{t_p}, \quad (7)$$

式中 P 为平均功率, t_p 为脉宽, f 为脉冲的重复频率, E_p 为单脉冲能量,单脉冲能量可用 $E_p = P/f$ 来计算。由此可得该激光系统 Q 释放或电流单因子变化引起脉冲激光的峰值功率和脉宽变化趋势如图6所示。

出的颜色较浅,颜色的浅深变化规律与图4描述的规律相似。

通过图7(b)也发现电流太小打不出均匀的颜色,而电流太大导致灼黑的现象,与离焦量对打标效果影响的变化规律相似。这证实了热分析的结论:离焦量、

峰值功率和脉宽共同决定单脉冲的热作用过程,产生

的瞬时温度过低或过高都不利于氧化膜的生成。

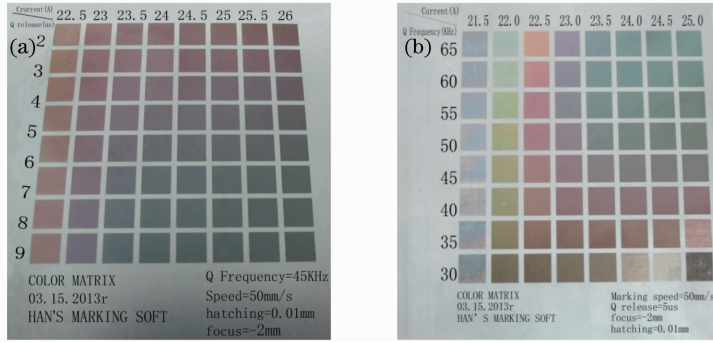


图 7 (a) Q 释放或电流的变化对打标效果的影响;(b) 峰值功率和脉宽变化对打标效果的影响
Fig. 7 (a) Influence of current and Q release of the laser system on the color palette; (b) influence of peak power and pulse width of the laser system on the color palette

3.3 热累加阶段

振镜的运动使激光在金属表面进行扫描,一连串激光脉冲打标的光斑重叠得到连续的线性标识,如图 8 所示相邻两光斑以一定的时间间隔和间距打标在金属表面。

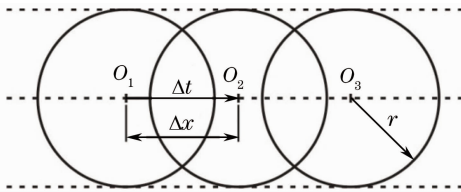


图 8 脉冲激光打标过程的示意图
Fig. 8 Schematic diagram of laser pulse marking processing

令相邻两个脉冲的时间间隔为 Δt , 相邻光斑中

心点的间距为 Δx , 则

$$\Delta t = \frac{1}{f}, \quad \Delta x = \frac{v}{f}, \quad (8)$$

式中 v 为激光扫描速度在处理激光脉冲的热累加效应时,可以简化成不同位置的激光单脉冲的热扩散到同一处的热叠加的结果。如图 9(a)是(5)式联立(8)式模拟一系列激光单脉冲沿 x 扫描方向的热扩散分布,将这一系列脉冲以 Δx 间距沿扫描方向排开,则模拟的是由点成线的激光脉冲的热扩散、累加过程,如图 9(b)所示。观察图 9(b)中 $x = -40$ 点的热效应,则是前后打标的脉冲扩散到 $x = -40$ 点处的热量加上该点处脉冲作用的热量的叠加效果,即该处的温度值是图中所有黑点的温度值相加的值。由此可知,激光脉冲的 Δt 与 Δx 会影响热累加过程,影响的程度取决于激光的重复频率 f 和扫描速度 v 。

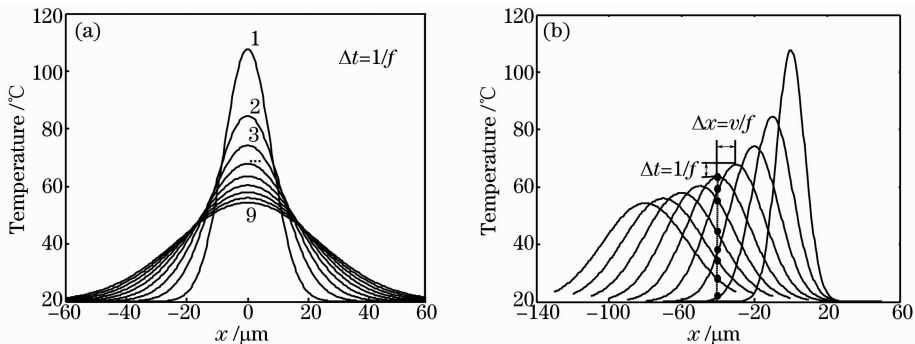


图 9 热累积效应。(a) 不同时刻“观察”到的激光单脉冲产生的温度;
(b) 激光扫描过程中一系列脉冲产生的温度

Fig. 9 Accumulated heat effect. (a) Temperature observed at different moments generated by one laser pulse;
(b) temperature generated by a series of pulses during laser scanning

图 10 的实验结果验证了扫描速度对打标效果的影响,扫描速度越快,脉冲间距越大,热累加影响越小,打标的颜色会越浅。

由于半导体端泵激光器重复频率的变化还会使激光的功率和脉宽变化,所以图 7(b)中重复频率对颜色的影响趋势不明显。为了验证重复频率对热累

加效应的影响,利用输出激光的脉宽与重复频率无关的光纤激光器进行彩色打标对比实验。由表 2 结果发现由于重复频率的不同引起脉冲时间间隔 Δt 的不同而导致颜色效果明显不同。

热累加的温度在 300 °C 左右,这一过程主要影响不锈钢的氧化快慢。与单脉冲能量变化对颜色效果影响的程度相比,扫描速度和重复频率对打标效果的影响相对较小。图 10 实验结果证实单独改变扫描速度色块中很少出现灼黑的现象,不同形式的热作用对颜色的影响也有区别。

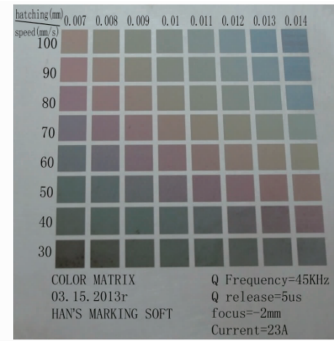


图 10 不同扫描线宽或扫描速度对打标效果的影响
Fig. 10 Influence of different hatching and scanning speeds of the laser system on the color palette

表 2 脉冲时间间隔对颜色效果的影响

Table 2 Influence of different intervals of laser pulse on the obtained color

Std	Speed /(mm /s)	Frequency /kHz	Peak power /kW	Pluse width /ns	Effect
1	400	80	3.98	46	
2	600	120	3.98	46	

3.4 已氧化阶段

扫描线宽的不同及同一区域的多次打标也会引起颜色的变化,而这些因素的作用机理与前面提及的热作用过程明显不同。如表 3 的测试结果,扫描线与线之间不间断打标、与间断 10s 或 30s 打标的效果对比发现,三种打标效果的颜色会有轻微的不同,但这个程度的线与线之间的热累加效应不能完全说明图 10 中扫描线宽对打标效果有明显影响的结果。间断长时间的“线”打标引起的颜色变化较小,恰恰说明激光脉冲“线”扩散的热比较小,说明还存在别的因素影响颜色效果。实验发现打标过的“线”区域及其影响区已经发生氧化反应产生氧化层,激光的热分布不均致使这些区域不同程度的物质变化,不同扫描线宽使氧化的“线”区域发生不同程度的交叠,表现出图 10 中每一行对应的不同扫描线宽的影响结果。

表 3 不同时长的线间隔扫描对颜色的影响

Table 3 Influence of different intervals of scanning of the laser system on the color palette

Std	Mode	Time interval /s	ΔE^*	Effect
1	Progressive scan	0	0	
2	Progressive scan	10	0.76	
3	Progressive scan	30	7.77	

这种热作用后的氧化结果可以从在同一区域多次打标引起的颜色变化的对比实验中看得更加明

显。如表 4 中以一定工艺参数打标一次后已经使不锈钢表面发生氧化,在打标区域显示浅绿色的效果,在该区域重复打标后有着明显的颜色变化。

表 4 不同激光打标次数下产生的颜色

Table 4 Colors obtained at various laser scan passes

Std	Repetition	Color	Effect
1	One pass	Green	
2	Two passes	Red	
3	Three passes	Blackish purple	
4	Four passes	Blackish green	

3.5 小 结

实验结果验证了对不锈钢激光彩色打标进行热作用分析的合理性,说明激光工艺参数均是通过热作用来影响打标效果。如图 7(a)和图 10 两个色块矩阵的颜色变化呈现一种对称的效果,正是由于相同的热作用影响机制,使得各种工艺参数对颜色效果的影响在一定范围内可以相互补偿,不同的参数组合能打标出类似的颜色效果。

激光打标过程存在明显的 3 个热作用阶段:纳秒级单脉冲作用阶段,激光在不锈钢表面产生的温度达到 2000 °C 左右,存在熔融、气化作用,这一过程受离焦量、峰值功率和脉宽工艺参数影响;持续输出的激光脉冲在不锈钢表面有明显的热累加相应,累加的热影响不锈钢的氧化过程,这种热累加效应主

要受扫描速度和重复频率的影响；激光热作用使打标区的不锈钢发生氧化反应产生氧化物，激光的热分布不均致使打标区域不同程度的物质变化，因此扫描线宽、重复打标和扫描方式的不同也会明显影响最终颜色的效果。不同的工艺参数改变不同形式的热输入，产生的热影响有一定的区别。如实验中高能量密度的激光脉冲正焦打标，不锈钢容易出现灼黑现象，而单纯改变扫描速度很难出现烧焦的效果，因而存在一些颜色只能在特定的工艺参数组合的激光下才能打标产生。

4 结 论

半导体端泵激光器通过各种激光工艺参数来调试不锈钢彩色打标的颜色效果，通过分析得出以下结论：

1) 实验结果验证了对不锈钢激光彩色打标进行热作用分析的合理性，说明激光工艺参数均是通过热作用来影响打标效果。但不同的工艺参数改变不同形式的热输入，产生的热影响有一定的区别。

2) 由于相同的热作用影响机制，使得各种工艺参数对颜色效果的影响在一定范围内可以相互补偿，不同的参数组合能打标出类似的颜色效果。

3) 由于存在不同形式的热输入和热作用过程，因而一些颜色只能在特定的工艺参数组合的激光下才能打标产生。

4) 功率密度单一因素变化引起颜色的变化规律是：随着功率密度越来越高， a^* 值从小变大，直到深红色颜色的 a^* 值成最大值，进而 a^* 值又由大变小。

参 考 文 献

- 1 A M Carey, W M Steen, D Watkins. Laser Surface Ornamentation[C]. Proceedings of International Congress on Application of Lasers & Electro-Optics, ICALEO 1998.
- 2 H Y Zheng, G C Lim, X C Wang, *et al.*. Process study for laser-induced surface coloration[J]. Journal of Laser Application, 2002, 14(4): 215-220.
- 3 Z L Li, H Y Zheng, K M Teh, *et al.*. Analysis of oxide formation induced by UV laser coloration of stainless steel[J]. Appl Surf Sci, 2009, 256(5): 1582.
- 4 A Lehmuskero, V Kontturi, J Hiltunen, *et al.*. Modeling of laser-colored stainless steel surfaces by color pixels[J]. Appl Phys B, 2010, 98(2-3): 497.
- 5 K McLaren, XIII-The development of the CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) uniform colour space and colour-difference formula[J]. J Soc Dyers Colour, 1976, 92(9): 338.
- 6 B N Chickkov, C Momma, S Nolte, *et al.*. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Appl Phys, 1996, 63(2): 109.
- 7 Chen Qinghua. Laser-Material Interaction and Thermal Field Modelling[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2001. 72-75.
陈庆华. 激光与材料相互作用及热场模拟[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001. 72-75.
- 8 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. The Principle of Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. 70-73.
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. 70-73.
- 9 Ji Xiaoling, Lü Baida. Effect of the spherically aberrated lens on beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(4): 347.
季小玲, 吕百达. 球差透镜对高斯光束质量的影响[J]. 中国激光, 2001, 28(4): 347.
- 10 Tan Zhen, Guo Guangwen. Thermophysical Properties of Engineering Alloys[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. 127-129.
谭 真, 郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994. 127-129.
- 11 Wang Jiajin. Laser Processing Techniques[M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1992. 61-63.
王家金. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992. 61-63.

栏目编辑: 宋梅梅