

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.05.010

皮秒光纤激光器诱导不锈钢表面着色工艺*

吴勇华¹, 杨保平¹, 刘忠念², 黄雪雄³

(1. 五邑大学 机电工程学院, 广东 江门 529020; 2. 华南师范大学 信息光电子科技学院, 广州 510006; 3. 广东量泽激光技术有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 利用皮秒激光在304不锈钢上进行着色试验研究, 分析了皮秒激光对不锈钢表面着色的周期性表面条纹结构机理, 分别研究了扫描线间距、激光功率、扫描速度和离焦量等激光工艺参数对着色效果的影响。结果表明: 改变扫描速度、线间距和功率均能对着色效果产生很大影响, 最佳速度为90~300 mm/s, 最佳线间距为0.003~0.01 mm, 功率为30%~70%, 并且三者对着色有近似的影响效果; 而改变离焦量对着色效果的影响没有线间距、功率和速度三者显著。在此基础上, 获得了红、橙、黄、绿、青、蓝、紫对应较为合理的皮秒光纤激光加工参数。腐蚀性试验表明, 未着色试样的腐蚀率是着色试样的3倍。

关键词: 激光着色; 皮秒光纤激光器; 304不锈钢; 条纹; 激光加工参数

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)05-0080-07

Surface Coloring Processing Induced via Irradiation of Picosecond Fiber Laser for Stainless Steel

WU Yong-hua¹, YANG Bao-ping¹, LIU Zhong-nian², HUANG Xue-xiong³

(1. School of Electromechanical Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, Guangdong; 2. School of Information and Optoelectronic, South China Normal University, Guangzhou 510006; 3. Guangdong Liangze Laser Technology Co., Ltd., Zhongshan 528400, Guangdong)

Abstract: To acquire the coloring technological methods on metal surface, the experiment of coloring on 304 stainless steel was successfully conducted by using picosecond fiber laser. The steel surface structure of periodic micro ripples induced with picosecond laser irradiation was studied and discussed, its mechanism of the surface coloring using picosecond laser was also considered, and the influences of the laser process parameters such as line spacing of the laser beam, laser power, scanning speed of the beam and the defocus amount on the coloring effect of stainless steel was then analyzed and studied in detail. Results show that changing the scan pitch of line, scan speed and laser power has a significant impact on the coloring effect, and the optimal parameters are at speed of 90 to 300 mm/s, at line gap of 0.003 to 0.01 mm, and at a range of 30% to 70% with full energy. Besides, The effect of three parameters on coloring is similar. Furthermore, its coloring effect of changing defocus distance is slight compared with the line spacing, power and speed. Based on this, reasonable laser processing parameters are determined, and the corresponding laser coloring parameters of red, orange, yellow, green, cyan, blue, and purple are obtained. The corrosion experimental results show that the corrosion rate of uncolored samples is three times that of colored samples.

Keywords: laser coloring; picosecond fiber laser; 304 stainless steel; ripple; laser process parameters

收稿日期: 2016-04-20; 修回日期: 2016-09-11; 基金项目: *广东省自然科学基金(S2012010008735)

通讯作者: 吴勇华(1965—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 激光加工; Tel: (0750) 3299 387; E-mail: wyhwyh@sina.com

网络出版日期: 2016-09-30 14:30; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160930.1430.036.html>

引文格式: 吴勇华, 杨保平, 刘忠念, 等. 皮秒光纤激光器诱导不锈钢表面着色工艺[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 80-86. WU Y H, YANG B P, LIU Z N, et al. Surface coloring processing induced via irradiation of picosecond fiber laser for stainless steel[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 80-86.

0 引言

不锈钢因其良好性能而被广泛应用,由于着色的不锈钢可以提高产品的装饰性、艺术性和表面性能,不锈钢着色技术受到了人们的高度重视,大量的相关研究也逐步展开。目前,常用的不锈钢着色方法主要有化学氧化着色法、电化学氧化着色法、离子沉积氧化物着色法、高温氧化着色法和气相裂解着色法等^[1-4]。这些着色方法产生的颜色种类有限,在工艺操作上较为繁琐,且在着色处理后容易产生锈斑,从而对产品质量产生不利影响。激光着色作为一种新兴的着色技术,从一开始就引起大家的高度关注。与传统着色方法相比,激光着色工艺操作简便,由于激光参数连续可调,能产生复杂多样的、耐久性的色彩。

目前激光着色技术的研究主要基于纳秒和飞秒激光器,皮秒激光器的激光着色研究报道较少,也未查询到针对皮秒激光器的着色原理与工艺的具体论述,因此研究皮秒激光器着色及影响着色效果的因素等问题具有一定的实际应用价值。由于不同类型的激光器的参数不尽相同,很难研究相同参数下纳秒、皮秒和飞秒激光器对金属着色效果的优劣,因此文中只将皮秒激光器的着色试验作为研究对象,着重研究皮秒光纤激光器之激光功率、扫描速度、填充间隔和离焦量等激光参数对激光着色效果的影响,以期获得红橙黄绿青蓝紫对应的最优激光加工参数,并确定颜色稳定的大致范围,这对皮秒激光器在激光着色技术领域内的推广和应用具有实际意义。

1 激光表面着色机理

国内外对激光着色已经做了大量研究。Antonczak A J^[5]采用工业光纤激光器在304不锈钢上研究了激光打标工艺参数对颜色的影响,并通过紫外线辐射和盐雾试验的方法确定其颜色稳定性。刘忠民^[6]基于调Q半导体端泵红外激光器研究了激光工艺参数对彩色打标效果的影响,从激光热作用的角度分析了不同的热输入产生不同的彩色效果。黄天琪^[7]利用Nd:YAG纳秒激光器在304不锈钢上进行了着色试验,获得了黄、蓝、绿、红、紫等颜色稳定的激光工艺参数范围。陶海岩^[8]运用飞秒激光器在铝表面获得了白色、灰色、褐色、浅金色、黑色和深金色等色彩的表面

微纳结构,并对呈色机理进行了分析。姬兴国^[9]运用飞秒激光在铝表面诱导出带有黑色、灰色和金色等色彩的周期性表面结构,研究了脉冲能量、脉冲个数对铝表面微观结构形成的影响。谭欣^[10]也运用飞秒激光在铝表面获得了7种不同颜色,并在铝合金和钛合金表面成功制备出“黑金属”。李国强^[11]运用飞秒激光在镍和不锈钢上均获得彩色图案,并测得了两种金属上纳米量级的表面条纹微结构。

对于激光着色机理,国内存在两种不同的说法。有观点认为^[12-13],激光之所以能够呈现色彩是因为激光脉冲作为局部热源,在着色的过程中使金属表面发生了氧化反应,表面形成了一层透明或半透明的氧化薄膜。氧化膜在白光下产生干涉效应,不同厚度的氧化膜产生不同的颜色。这一理论与传统金属着色法认为的氧化膜呈色理论相吻合。国内外研究人员在用纳秒激光器进行金属着色试验时,大多将上述原理作为激光呈色的理论依据。但对皮秒和飞秒激光器的金属表面,研究人员发现^[14-17],这种超短脉冲激光能在金属表面形成了纳米量级的激光诱导周期性表面条纹微结构(NC-LIPSS)。这种微条纹结构具有反射光栅的特点和性质,白光照射在金属表面时发生衍射使不同条纹衍射的光彼此之间相互干涉,波长不同的光干涉的极大值出现的方向不同,因而白光经过反射光栅后色散而成光谱,形成了彩色图案。这一理论主要应用于超短脉冲激光金属着色上^[18-19]。因此,超短脉冲激光辐照形成材料周期性微条纹结构表面反射率的变化是产生颜色改变的主要原因。通过皮秒激光扫描可以实现金属表面大面积NC-LIPSS条纹结构,从而调制了光谱反射率,导致了金属表面颜色的改变,而不同颜色的产生是由于表面条纹微结构引起的选择性光吸收所致^[20]。其着色机理如图1所示。

从纳秒激光、皮秒激光和飞秒激光对材料作用机理上分析,这3种激光都能对材料表面产生形态改变和性能改变作用,其中纳秒激光辐照材料表面时热效应占支配地位,而超短脉冲激光热影响区很小,产生的轮廓更为清晰,能实现高要求的细微加工。与纳秒激光相比,超短脉冲激光产生的这种周期性表面微结构导致的表面效果会更佳,轮廓更为清晰,着色效果有更好的细致性和持久性^[21]。

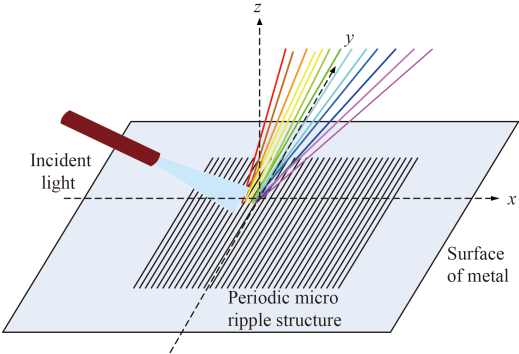


图1 皮秒激光金属表面着色机理

Fig. 1 Mechanism of the metal surface coloring via picosecond laser

2 试验装置、材料及方法

试验用激光器设备采用广东量泽激光技术有限公司生产的型号为PSHE300-06A的光纤激光器，试验用设备如图2所示。其平均功率6 W，脉冲宽度30 ps，激光中心波长1 064 nm，激光束质量因子 $M^2 \leq 1.8$ ，重复频率30 kHz，经场镜后入射到工件表面的光斑直径约15 μm 。激光器选用163 mm的聚焦场镜，有效标刻区域为112 mm $\times$ 112 mm。设备工作时可调参数有填充线间距、扫描速度、功率及工作台的离焦量等。

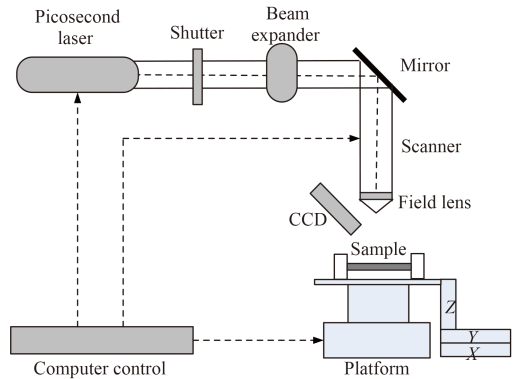


图2 皮秒光纤激光金属表面着色试验装置示意图

Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup for metal surface coloring via picosecond fiber laser

试验材料选用0.5 mm厚的304不锈钢板，表面外形尺寸为100mm $\times$ 100 mm，材料表面经过抛光处理，表面光滑平整。304不锈钢的化学成分如表1所示。

影响金属激光着色的因素很多，包括激光波长、激光光束质量、激光输出功率、脉宽、脉冲重复频率、扫描速度、线间距、金属的物理性

表1 304不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical components of 304 stainless steel (w / %)				
Element	Fe	Cr	Ni	Mn
Content	67.85	19.0	10.0	2.0
Element	Si	C	P	S
Content	1.0	0.08	0.04	0.03

质、离焦量、激光的传输和聚焦、打标后所生成薄膜和金属基底的光学属性等11个因素^[16]。参考国内外激光着色工艺和经验，文中选取填充线间距、扫描速度、功率及工作台的离焦量等因素对着色的影响。通过CIE $L^*a^*b^*$ 色彩模型可以将颜色数字化。该模型基于人对颜色的感觉， Lab 中的数值描述正常视力的人能够看到的所有颜色。 L 表示亮度，其值域为0~100。 a 表示从洋红色至绿色的范围， b 表示从黄色至蓝色的范围。 a 和 b 的值域都是+127~−128。为了比较两种颜色之间的差异，可以用色差来表示。选取一种颜色为参考颜色，则色差 $\Delta E^{[17]}$ 可表示为：

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \tag{1}$$

ΔE 值越小，说明被测颜色和参考颜色越接近。有关研究将色差值 $\Delta E \leq 7$ 作为颜色稳定的评价标准^[6]。

3 试验及结果分析

针对填充线间距、扫描速度、功率及工作台的离焦量这4个主要参数，分别进行了在不同参数下不锈钢表面着色试验，研究改变激光参数对着色效果的影响。对照纳秒和飞秒激光着色经验^[7, 9-10]，选取线间距为0.005 mm，50%的功率为（即3 W），速度为150 mm/s为基准参数。

3.1 线间距和速度对激光着色的影响

试验方法：激光扫描区域为直径2 mm的圆形色块，然后在不同参数下阵列成10 $\times$ 10的圆形色块排列；线间距填充范围0.001~0.01 mm，间隔0.001 mm；扫描速度范围30~300 mm/s，间隔30 mm/s；激光功率6 W，间隔10%。激光重复频率20 kHz，振镜向上离焦2 mm。试验数据和结果如图3所示。

从图3中可以看到，改变速度和线间距都能对着色产生显著影响。当线间距小于0.003 mm时，随着速度的增加，颜色由黑色渐变为最终的浅黄

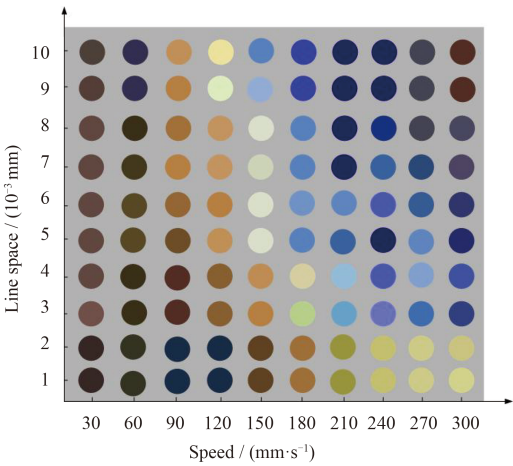


图 3 不同皮秒激光线间距和扫描速度的金属表面着色效果

Fig. 3 Coloring result display on metal surface with different line space and scan speed of picosecond laser

色，与线间距大于0.003 mm的着色效果相比颜色不够鲜艳。当速度小于90 mm/s时，颜色较黑，说明慢速情况下激光已经不能产生清晰的条纹微结构。因此，当功率一定时，在速度90~300 mm/s，线间距0.003~0.01 mm的参数范围能得到丰富多样的颜色。

3.2 线间距和功率对激光着色的影响

采用相同方法设置各项参数变化间隔，分析线间距和功率对304不锈钢表面着色效果的影响，得到图4所示试验结果。

从图4可以看到，当线间距大于0.01 mm时基本看不到有颜色出现，而线间距小于0.01 mm时能看到较明显的颜色变化。当功率小于20%时也基本看不到彩色，说明此时的功率太小，不能烧蚀

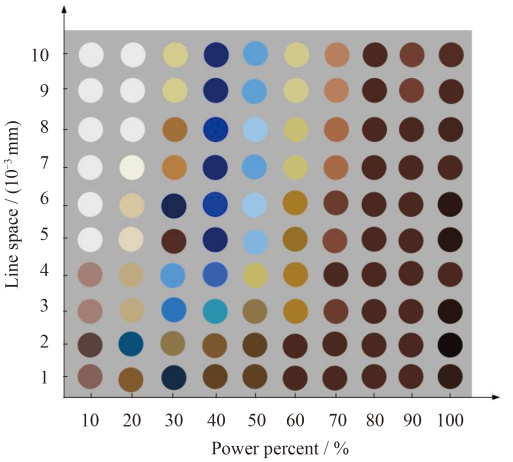


图 4 不同皮秒激光线间距和功率的金属表面着色效果

Fig. 4 Coloring result display on metal surface with different line space and power of picosecond laser

金属表面产生颜色。当功率大于70%时，由于功率过高而使金属表面过度破坏，也无法出现彩色，而是呈现出金属被烧焦时的黑色。由以上分析可知，当速度为150 mm/s情况下，合理的线间距和功率参数分别为0.001~0.01 mm和30%~70%。

3.3 速度和功率对激光着色的影响

将线间距取0.005 mm为定值，改变速度和功率。速度变化范围取30~300 mm/s，间隔为30 mm/s。功率范围10%~100%，间隔为10%。试验结果如图5所示。

从图5可知，颜色变化范围主要集中在速度150~300 mm/s和功率40%~70%所组成的区域内。从图中看到色彩分布沿对角线具有明显的对称性，说明速度和功率均能够明显影响着色效果，且影响效果相当。

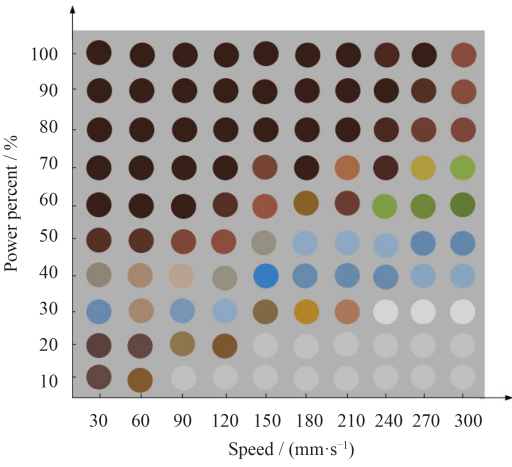


图 5 不同皮秒激光速度和功率的金属表面着色效果

Fig. 5 Coloring result display on metal surface with different speed and power of picosecond laser

3.4 离焦量对激光着色的影响

离焦量设置参数如图6(a)所示，此时的离焦量为2 mm，将离焦量改为1 mm，得到图6(b)图。

通过两图对比可以看到，虽然某些区域的颜色亮度已经发生了改变，减小离焦量后颜色加深了，但色相的样式和种类无明显改变。这也间接印证了焦点处的能量最集中。

通过以上试验，可以得到赤、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色的最佳加工参数如表2所示。

3.5 不锈钢周期性表面条纹微结构

对于皮秒激光扫描后不锈钢表面形貌和微结构，可以从SEM图像上分析。图7(a)为橙色不锈钢表面试样对应的表面形貌。该试样线激光参数为

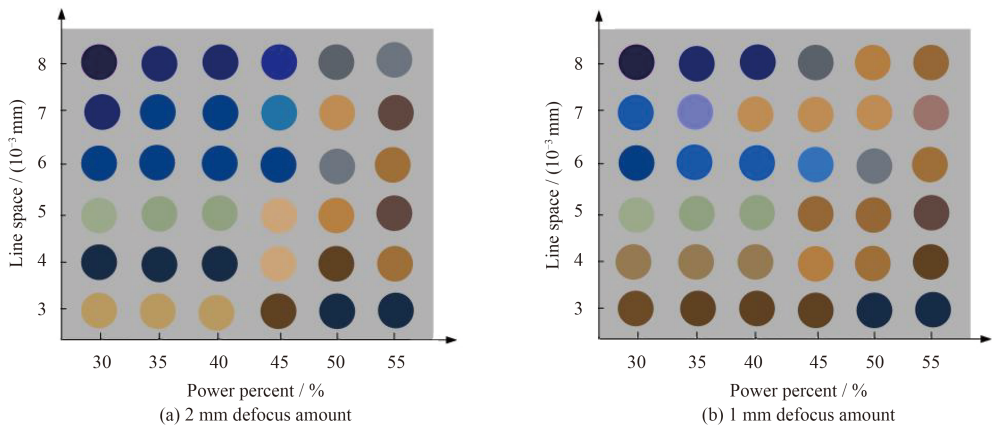


图6 改变皮秒激光离焦量的金属表面着色效果

Fig. 6 Coloring result display with different defocus amount of picosecond laser

表2 304不锈钢表面各颜色的最佳激光加工参数

Table 2 Reasonable laser processing parameters for seven colors of 304 stainless steel surface

Sorts of color	Line space / mm	Speed / (mm·s ⁻¹)	Power / %
Red	0.005	210	60
Orange	0.007	150	55
Yellow	0.005	140	50
Green	0.005	150	60
Cyan	0.005	240	60
Blue	0.004	150	35
Purple	0.005	150	55

功率60%，离焦量2 mm，间距0.007 mm，速度155 mm/s。橙色色彩模型为 $L=81$ ， $a=32$ ， $b=85$ 。图7(b)为红色不锈钢表面的表面形貌。该试样线激光参数为功率63%，离焦量2 mm，间距0.005 mm，速度220 mm/s。红色色彩模型为 $L=58$ ， $a=75$ ， $b=79$ 。从试样表面条纹分布可以看出，条纹呈现周期性表面条纹微结构，因此可印证皮秒激光可诱导金属表面周期性表面条纹微结构。橙色和红色的色差 $\Delta E=49.15$ ，两试样色相差异非常明显，SEM图片也显示表面条纹微结构有很大不同。

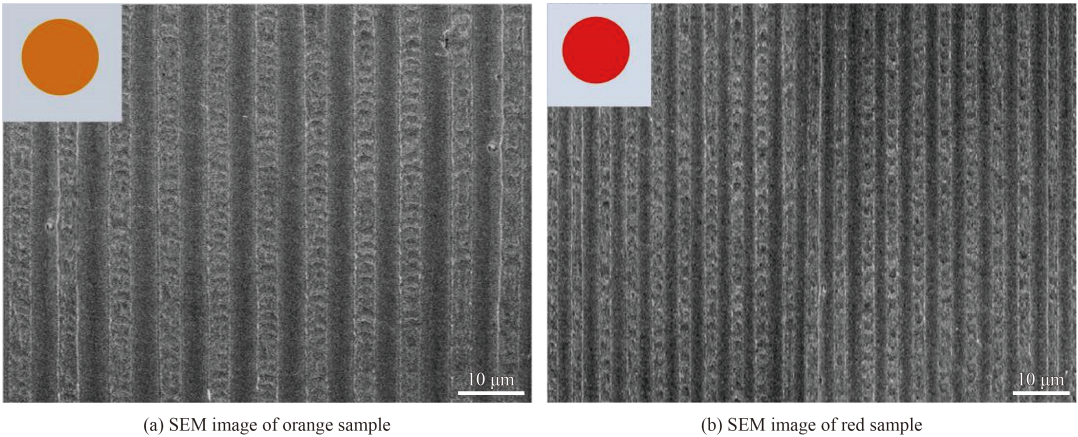


图7 皮秒激光照射304不锈钢表面产生的周期性表面条纹微结构

Fig. 7 Surface periodic micro ripple structure of 304 stainless steel induced by picosecond laser

4 不锈钢皮秒激光着色耐腐蚀性分析

不锈钢经过激光着色后不仅色彩鲜艳，还能提高材料的物理化学性能和机械性能，如耐紫外线照射、耐磨、耐热、耐蚀和加工等性能，其中不锈钢使用过程中的耐腐蚀性是极其重要的。为了考查不锈钢激光着色后的耐蚀性，对激光辐照

后的试样进行了腐蚀试验。腐蚀试验采用三氯化铁点腐蚀试验方法。试样的总表面积为10 cm²。试验前将试样表面进行清洗除油并存放于干燥器内。腐蚀前后计量试样重量，采用万分之一的电子天平进行称量，精确到0.000 1 g。

试验溶液用符合GB/T 622规定的纯盐酸和蒸

馏水配置成0.05 mol/L盐酸溶液,把符合HG/T 3-1085规定的分析纯三氯化铁200 g溶于900 mL,0.05 mol/L盐酸溶液中配置成三氯化铁溶液。试验温度为 50 ± 1 °C,腐蚀时间为30 min。按腐蚀试验规程,将配置好的三氯化铁溶液倒入试验容器中,将红、橙、黄、绿、青、蓝、紫7种正反面着色和未着色的不锈钢各取1平方厘米试样,每平方厘米试样所需的试验溶液量控制在20 mL以上,将试验容器放到恒温水域中,加热到规定温度。

着色不锈钢的耐蚀性试验结果用腐蚀率来判定,即单位面积、单位时间的失重表示,单位是 $\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$,腐蚀率按下式计算:

$$V_c = \frac{W_1 - W_2}{AT} \quad (2)$$

式中: W_1 为试验前试样重量, g; W_2 为试验后试样重量, g; A 为试样着色面积, m^2 ; T 为试验时间, h。试验结果如图8所示。

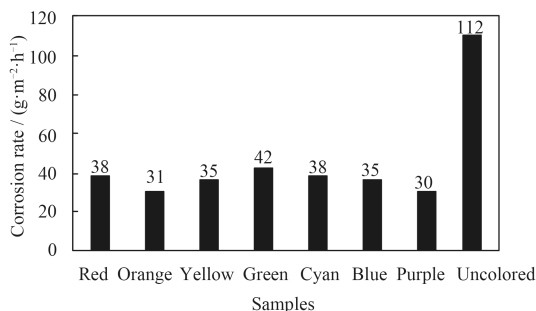


图8 不锈钢皮秒激光着色试样的耐腐蚀性

Fig. 8 Corrosion test of stainless steel coloring samples with picosecond laser

从图8中可以看出,通过不锈钢皮秒激光着色试样和未着色试样比较,未着色试样的腐蚀率是着色试样的3倍,着色试样的腐蚀率明显较小,耐腐蚀性较好,说明其表面耐蚀性有很大程度提高。不种着色试样在经过激光处理后的腐蚀率都比较小,且腐蚀率大致相同。从机理上分析,皮秒激光对不锈钢表面不仅产生了形态改变,如产生周期性表面结构,结构轮廓清晰,着色效果好,而且还有助于表面性能提高。皮秒激光辐照不锈钢表面也能形成一层致密组织结构,这一结构是表层微观形貌、组织结构、物相结构和残余应力综合影响的结果,其综合作用提高了材料表面的耐蚀性^[1, 8, 16-17]。

5 结 论

采用光纤皮秒激光器在304不锈钢上进行激光

着色试验,得到了红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等彩色图案。研究了填充线间距、扫描速度、功率及工作台的离焦量这4个主要参数对着色效果的影响,并给出了合适的参数加工范围,得出结论如下。

(1) 皮秒激光扫描速度、线间距和功率均能对着色效果产生显著影响。增大速度和增大线间距时,颜色分布沿呈近似对角线对称现象。改变速度、线间距和功率对着色有相似的影响效果。最佳速度为90~300 mm/s,最佳线间距为0.003~0.01 mm,功率为30%~70%。

(2) 改变离焦量也能改变颜色分布。但离焦量对着色效果的影响没有线间距、功率和速度的影响显著。金属表面距激光焦点越近,呈现的颜色越深。

(3) 观察SEM结果表明经皮秒激光照射后,不锈钢表面呈现周期性表面条纹微结构,这与理论分析相吻合;不锈钢表面着色试样腐蚀性试验得出,未着色试样的腐蚀率是着色试样的3倍,着色试样的腐蚀率较小,耐腐蚀性较好。

参考文献

- [1] 刘忠宝. 彩色不锈钢制备及性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
LIU Z B. The preparation and performance study of colored stainless steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2009 (in Chinese).
- [2] ROSANGELA C, NERILSO B, ROMEU C, et al. Corrosion resistance of colored films grown on stainless steel by the alternating potential pulse method[J]. Electrochemical Acta, 2003, 48(17): 2417-2424.
- [3] ZHANG J X, YUAN J, QIAO Y N, et al. The corrosion and passivation of SS304 stainless steel under square wave electric field[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 79: 43-48.
- [4] 王宜民. 不锈钢化学着色及其耐蚀性能的研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2014.
WANG Y M. The study of chemical coloring and corrosion resistance of stainless steel[D]. Wuhan: Hubei University, 2014 (in Chinese).
- [5] ANTONCZAK A J, KOCON D, NOWAK M, et al. Laser induced colour marking-sensitivity scaling for a stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2013, 264(1): 229-236.
- [6] 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): 129-135.
LIU Z M, ZHANG Q M, GUO L, et al. Influence of laser

- process parameters on color obtained by marking[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 129-135 (in Chinese).
- [7] 黄天琪, 李建美, 路长厚, 等. Nd:YAG纳秒激光诱导304不锈钢表面着色[J]. 应用激光, 2013, 33(6): 586-590.
- HUANG T Q, LI J M, LU C H, et al. Laser-induced color marking on 304 stainless steel by Nd:YAG nanosecond laser[J]. Applied Laser, 2013, 33(6): 586-590 (in Chinese).
- [8] 陶海岩. 飞秒激光固体材料表面微纳结构制备及其功能特性的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- TAO H Y. Fabrication and properties researches of femtosecond laser induced micro/nano structures on solid surface[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014 (in Chinese).
- [9] 姬兴国. 飞秒激光金属表面着色技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- JI X G. Metal coloring with femtosecond laser pulses[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011 (in Chinese).
- [10] 谭欣. 飞秒激光制备金属表面微纳结构及其光学特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- TAN X. Femtosecond laser inducing micro/nano structures on the metal surface and its optical properties[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012 (in Chinese).
- [11] 李国强, 李晓红, 杨宏道, 等. 采用飞秒激光诱导制备彩色金属[J]. 中国激光, 2014, 4(1): 72-76.
- LI G Q, LI X H, YANG H D, et al. Fabrication of colorful metals with femtosecond laser pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 4(1): 72-76 (in Chinese).
- [12] LI Z L, ZHENG H Y, THE K M, et al. Analysis of oxide formation induced by UV laser coloration of stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2009, 256(5): 1582-1588.
- [13] VOROBYEV A Y, GUO C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(4): 041914-041914-3.
- [14] 杨振远. 多偏振飞秒激光制备彩色金属研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.
- YANG Z Y. Study of fabrication color metal with multi-polarization femtosecond laser[D]. Hefei: Anhui University, 2014 (in Chinese).
- [15] AHSAN M S, AHMED F, KIM Y G, et al. Colorizing stainless steel surface by femtosecond laser induced nano-structures [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(17): 7771-7777.
- [16] Adams D P, Hodges V C, Hirschfeld D A, et al. Nanosecond pulsed laser irradiation of stainless steel 304L: oxide growth and effects on underlying metal[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 222: 1-8.
- [17] ANTOACZAK A J, KOCOA D, NOWAK M, et al. Laser-induced colour marking sensitivity scaling for a stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 229-236.
- [18] 李晶, 赵言辉, 李红, 等. 激光表面织构铝基低黏附双疏表面[J]. 中国表面工程, 2016, 23(3): 80-86.
- LI J, ZHAO Y H, LI H, et al. Fabrication of amphiphobic surface on aluminum via laser surface texturing[J]. China Surface Engineering, 2016, 23(3): 80-86 (in Chinese).
- [19] LI J W, LI G Q, HU Y L, et al. Selective display of multiple patterns encoded with different oriented ripples using femtosecond laser[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 71: 85-88.
- [20] YAO J Q, ZHANG C Y, LIU H Y, et al. Selective appearance of several laser-induced periodic surface structure patterns on a metal surface using structural colors produced by femtosecond laser pulses[J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 7625-7632.
- [21] 吴勃, 周明, 李保家, 等. 飞秒激光脉冲诱导不锈钢表面微结构研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50: 111406.
- WU B, ZHOU M, LI B J, et al. Microstructures on stainless steel surface induced by femtosecond laser pulse[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50: 111406 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)