

超快激光工艺参数对不锈钢表面着色的影响

吴勇华^{1,2}, 杨保平¹, 康献民^{1,2}

¹五邑大学机电工程学院, 广东 江门 529020;

²广东省摩托车先进设计与制造工程技术研究中心, 广东 江门 529020

摘要 利用皮秒激光在 304 不锈钢上进行表面着色试验研究。分析了皮秒激光对不锈钢表面着色的机理,建立了表面色彩的模型。分别试验研究了扫描线间距、扫描速度和脉冲能量等激光工艺参数对着色效果的影响。研究表明,改变线间距、扫描速度和功率均能对着色效果产生显著影响,在扫描速度 90~300 $\mu\text{m}/\text{s}$,扫描线间距 0.001~0.01 mm,单脉冲能量 60~140 mJ/cm^2 的参数范围内能得到较好的色彩,而且三者对着色有近似的影响效果。在试验基础上,获得了皮秒激光参数与 CIE $L^* a^* b^*$ 色彩模型之间的关系。最后对着色后的试样进行了颜色老化对比试验。老化对比试验表明,不同老化时间下的激光着色试样的色差值 ΔE 均很小,说明各试样颜色接近,耐老化效果较好。

关键词 激光制造; 激光加工参数; 激光着色; 皮秒光纤激光器; 不锈钢

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0302005

Effects of Processing Parameters of Ultra-Fast Laser on Surface Coloring of Stainless Steel

Wu Yonghua^{1,2}, Yang Baoping¹, Kang Xianmin^{1,2}

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China;

²Provincial Research Center of Advanced Motorcycle Design and Manufacturing, Jiangmen, Guangdong 529020, China

Abstract Experiment study on surface coloring of 304 stainless steel is carried out by using picosecond laser. The mechanism of the coloring on stainless steel surface by picosecond laser is analyzed, and the surface color model is established. The influence of the laser processing parameters such as scanning line spacing, scanning speed and pulse energy on coloring effect is studied, respectively. Experimental results show that changes of line spacing, scanning speed and pulse energy have a significant impact on the coloring effect, and good color can be obtained with the parameters range of scanning speed from 90 $\mu\text{m}/\text{s}$ to 300 $\mu\text{m}/\text{s}$, line spacing from 0.001 mm to 0.01 mm, and single pulse energy from 60 mJ/cm^2 to 140 mJ/cm^2 . The effects of three parameters on coloring have similar impact. Based on the experiment, the relationship between the parameters of picosecond laser and the CIE $L^* a^* b^*$ color model is obtained. Finally, the color aging contrast test of the samples after coloring is carried out. Experimental results show that the chromatic aberrations ΔE of laser coloring samples with different aging time are very small, which indicate that all samples are very similar. And they have good anti-aging effect.

Key words laser manufacture; laser processing parameters; laser coloring; picosecond fiber laser; stainless steel

OCIS codes 140.3610; 140.3450; 140.3390; 060.3510

1 引 言

不锈钢作为一种在各行各业被广泛应用的金属材料,具有良好的强度、硬度、耐磨性、耐蚀性及易于加工的特性。着色不锈钢可以提高产品的附加值,因此不锈钢的着色技术受到了人们的重视。激光着色作为一种

收稿日期: 2016-08-15; 收到修改稿日期: 2016-11-13

基金项目: 广东省自然科学基金(S2013010008735)

作者简介: 吴勇华(1965—),男,博士,副教授,主要从事激光加工与激光表面改性方面的研究。

E-mail: wyhwn@sina.com

新兴的着色技术,从一开始就引起大家的高度关注,相关研究也逐步展开^[1-4]。

国内外研究人员对激光着色已经做了大量的研究。Skowroński 等^[1]在用工业光纤激光器打标时对图标颜色进行了观察,研究了不同激光工艺参数对图标颜色的影响,并考察了激光着色色彩的稳定性和持久性。刘忠民等^[2]利用调 Q 半导体端泵红外激光器分析了激光工艺参数对彩色打标效果的影响,从激光对材料表面的热机理分析了热因素产生不同的彩色效果。黄天琪等^[3]利用 Nd:YAG 纳秒激光器在不锈钢上进行了表面着色研究,通过试验获得了不同颜色所对应的最佳激光工艺参数。陶海岩^[4]运用超短的飞秒激光在铝合金表面上制备了多种不同的表面微结构,获得了白色、灰色、褐色、浅金色、黑色和深金色等色彩,并对表面着色机理进行了探讨。姬兴国^[5]也采用超短的飞秒激光辐照铝合金表面,诱导不同色彩的周期性表面结构,并研究了脉冲能量、脉冲个数对铝表面微观结构形成的影响。李国强等^[6]运用飞秒激光分别在镍和不锈钢表面扫描,获得了多种彩色图案,并观测和分析了两种金属上纳米量级的表面条纹微结构。

目前用于激光着色的激光器主要是纳秒^[7]和飞秒激光器,未见用皮秒激光器进行激光着色的报道,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。本文以皮秒激光器不锈钢着色试验作为研究对象,着重研究皮秒光纤激光器的激光脉冲能量、扫描速度和线间距等参数对着色效果的影响,以及皮秒激光参数与色彩之间的关系,以期获得皮秒激光不锈钢着色的工艺参数和规律。这一工作对超快激光在着色技术领域内的工业化推广应用具有实际意义。

2 皮秒激光表面着色机理与色彩模型

2.1 皮秒激光着色机理

对于激光着色的工作原理,国内外有两种不同的观点。第一种观点是氧化薄膜观点^[7-8],认为激光之所以能够使金属表面呈现色彩是因为激光脉冲作为局部热源,在辐照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。国内外研究人员用纳秒激光器进行金属表面打标着色,依据就是氧化膜呈色理论。但随着超快激光器如皮秒和飞秒激光器的出现和逐步应用,人们提出了第二种观点,即表面周期性条纹微结构现象^[9-12]。研究人员发现超短脉冲激光,尤其是飞秒激光着色可以在金属表面形成纳米量级的激光诱导周期性表面条纹微结构(NC-LIPSS)。这种条纹微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^[13-15]。

纳秒激光辐照金属表面形成氧化薄膜是产生颜色的主要依据。在纳秒激光辐照金属材料表面过程中,可以形成与化学氧化着色法、电化学氧化着色法等一样的着色表面氧化薄层,由于纳秒激光对金属表面产生的热影响区过大,金属表面易形成再铸层和微裂纹等问题,难以获得良好的表面条纹微结构。飞秒激光辐照金属表面形成周期性条纹微结构是产生颜色的主要原因。飞秒激光脉冲具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,与物质相互作用时呈现强烈的非线性效应,作用时间极短,热效应小,对被加工材料氧化、变形、热影响区域均较小,加工精度非常高,能获得各种良好的表面条纹微结构。处于纳秒激光与飞秒激光之间的皮秒激光,既可以像纳秒激光一样,在金属表面辐照加热形成呈现不同颜色的氧化薄膜,也可以像飞秒激光通过扫描方式实现金属表面周期性条纹微结构,从而调制了光谱反射率,导致了金属表面颜色的改变^[16-18]。其差别主要取决于皮秒激光参数如光斑大小、扫描速度、线间距、脉冲能量和个数等的综合作用。在脉冲宽度小、扫描速度较慢、线间距较短、合适的脉冲能量和个数条件下,皮秒激光就可以在金属表面制备性能良好的周期性表面条纹微结构(LIPSS)。图 1 为纳秒激光和皮秒激光在不锈钢表面着色后的结构。纳秒激光着色采用灯抽运 Nd:YAG 激光器,激光器功率为 70 W,扫描速度为 80 mm/s,重复频率 2 kHz,扫描间距 0.01 mm,工作台上偏焦 2.0 mm,激光波长 1064 nm,激光束质量因子 $M^2=1.5$,聚焦后激光斑点直径约为 15 μm 。皮秒激光器单脉冲能量为 120 mJ/cm²,扫描速度 150 $\mu\text{m/s}$,扫描间距 0.005 mm,激光中心波长 1064 nm,激光束质量因子 $M^2\leq 1.8$,重复频率 30 kHz,脉冲宽度 10 ps,光斑直径约 10 μm 。从图 1 可看出,纳秒激光辐照后的金属表面为一薄氧化层(端面),而皮秒激光辐照后的金属表面是一种较为明显的条纹微结构。

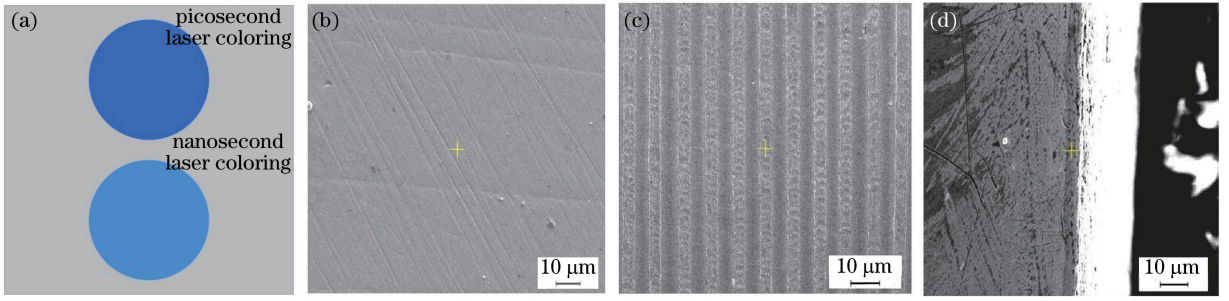


图 1 纳秒激光与皮秒激光辐照不锈钢着色的表面形貌。(a)不锈钢激光着色试样;

(b)未着色不锈钢表面原貌;(c)皮秒激光着色表面 NC-LIPSS;(d)纳秒激光着色表面氧化层断面

Fig. 1 Coloring surface topography of stainless steel via irradiation of picosecond laser and nanosecond laser.

(a) Stainless steel laser coloring samples; (b) surface morphology micrograph of un-coloring stainless steel;

(c) surface NC-LIPSS of coloring sample by picosecond laser; (d) oxide layer section morphology micrograph of coloring sample by nanosecond laser

2.2 色彩模型与评价

CIE $L^* a^* b^*$ 颜色空间是国际照明委员会(CIE)制定的一种均匀的颜色系统,任何一种颜色都能在 CIE $L^* a^* b^*$ 色空间中表示出来,其中 L^* 为光亮度,取值范围为 0(黑色)~100(白色); a^* 和 b^* 表示色坐标(其中 a^* 代表红绿轴, b^* 代表黄蓝轴),它们的取值范围为 $-128 \sim 127$ 。获取 L^* 、 a^* 、 b^* 值的前提是测得样品的三刺激值(X, Y, Z)及色度坐标(x, y, z)。

将颜色从 XYZ 系统转换到 CIE $L^* a^* b^*$ 系统的转换关系为^[3-5]

$$\begin{cases} L = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a = 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right], \\ b = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \end{cases} \quad (1)$$

式中, $X_n=95.047, Y_n=100.0, Z_n=108.883$ 。且有

$$f(t) = \begin{cases} t^{\frac{1}{3}}, & t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{29}{4}\right)^2 t + \frac{4}{29}, & t \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{cases} \quad (2)$$

三刺激值与 CIE $L^* a^* b^*$ 色彩空间坐标转化比较复杂,其计算方法与步骤为:1) 采用光度计对样品进行光谱测量;2) 在 Matlab 软件中,用 load 函数导入标准光源数据、试样的光谱功率分布数据及 CIE 标准光源的三刺激值;3) 编写功能函数,获取试样色度坐标;4) 编写空间转换函数 $h(x, y, z, L^*, a^*, b^*)$,计算样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值^{[2-3][5-6][19]}。

两种不同颜色的差别可用色差来辨别,色差 ΔE 计算式为

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

一般情况下认为,两种色彩的 ΔE 值越小,说明这两种色彩越接近。如果 $\Delta E < 2$,即便是专业人员也很难用肉眼区别。有关研究将色差值 $\Delta E \leq 4$ 作为颜色稳定的评价标准^[2-6]。

3 试验方法与试验结果分析

3.1 试验装置与试验方法

试验所用激光器为 PSHE300-06A 皮秒光纤激光器,激光中心波长 1064 nm,激光束质量因子 $M^2 \leq 1.8$,重复频率 30 kHz,单脉冲能量为 200 mJ/cm²,脉冲宽度 30 ps,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 112 mm×112 mm。试验材料选用 1 mm 厚、尺寸为 100 mm×100 mm 的 304 不

锈钢板,材料表面经过抛光处理,表面光滑平整。

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、脉冲能量与脉冲个数、脉宽、脉冲重复频率、扫描速度、线间距、金属的物理性质、离焦量等因素^[16]。参考国内外激光着色工艺并结合实际试验条件,研究填充线间距、扫描速度、脉冲能量及工作台的离焦量等因素对着色的影响。参照纳秒和飞秒激光着色经验,初选线间距 0.005 mm,50%的脉冲能量(即 100 mJ/cm²),速度 150 μm/s 为试验初始基准参数。

3.2 扫描速度和线间距对激光着色的影响

激光扫描区域为直径 2 mm 的圆形色块,在不同参数下阵列成 10×10 的圆形色块排列;填充范围 0.001~0.01 mm,间隔 0.001 mm;速度范围 30~300 μm/s,间隔 30 μm/s;单脉冲能量范围 10%~100%,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 2 所示。

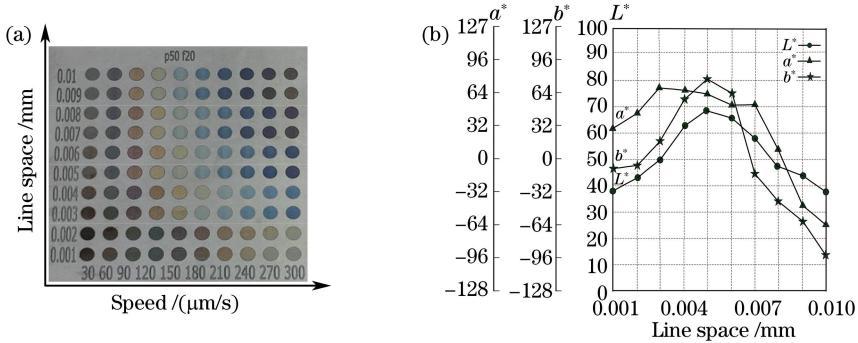


图 2 不同线间距和扫描速度下的着色图。(a)着色显示;(b) CIE $L^* a^* b^*$ 色彩模型的 L^* 、 a^* 、 b^* 的平均值随线间距的变化情况

Fig. 2 Coloring result under different line spaces and scan speeds. (a) Coloring display; (b) mean changes of L^* 、 a^* 、 b^* in CIE $L^* a^* b^*$ color model with line spaces

从图 2(a)中可以看到,改变速度和线间距都能对着色效果产生显著影响,并可制备多种色彩。当速度小于 90 μm/s 时,颜色较深,说明慢速情况下激光已经烧蚀较重;当速度大于 90 μm/s 时,色彩分布具有对称性。综上所述,可以得到脉冲能量一定情况下,合理的范围为 90~300 μm/s,线间距 0.001~0.01 mm。合理速度参数范围下能得到色泽鲜艳的颜色。图 2(b)为对应的 CIE $L^* a^* b^*$ 色彩系统的 L^* 、 a^* 、 b^* 的平均值随扫描线间距的变化情况。从图 2(b)可以看出,随着速度的增大, L^* 、 a^* 、 b^* 先增大,而后快速减小。这表明皮秒激光着色时扫描线间距不能过大。

3.3 线间距和脉冲能量对激光着色的影响

采用相同方法分析线间距变化和脉冲能量变化对着色效果的影响,得到图 3 所示的试验结果。

从图 3(a)可以看到,当线间距大于 0.01 mm 和脉冲能量小于 30%时基本看不到有颜色出现,而线间距小于 0.01 mm 和脉冲能量大于 30%时才能看到较明显的颜色变化。说明此时的脉冲能量太小,不能对不锈

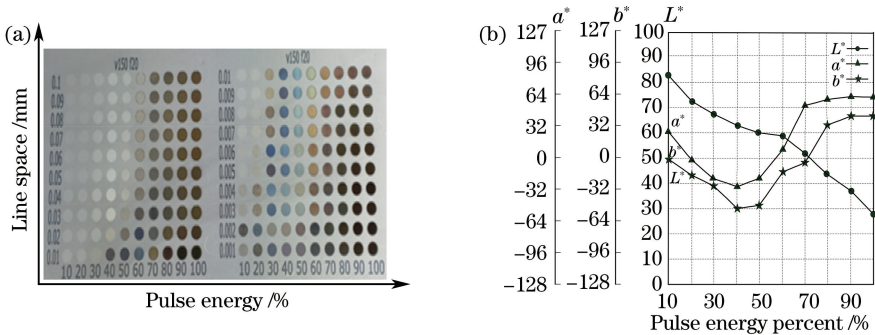


图 3 不同线间距和脉冲能量下的着色图。(a)着色显示;(b) CIE $L^* a^* b^*$ 色彩系统的 L^* 、 a^* 、 b^* 的平均值随脉冲能量的变化情况

Fig. 3 Coloring result under different line spaces and pulse energies. (a) Coloring display; (b) mean changes of L^* 、 a^* 、 b^* in CIE $L^* a^* b^*$ color system with pulse energy

钢表面产生作用。当脉冲能量大于 70% 时,由于脉冲能量过高,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,合理的线间距和脉冲能量参数分别为 0.001~0.01 mm 和 30%~70%。图 3(b)为对应的 CIE $L^* a^* b^*$ 色彩系统的 L^* 、 a^* 、 b^* 的平均值。从图 3(b)可以看出, L^* 随着脉冲能量的增大而减小, a^* 、 b^* 随着脉冲能量的增大,先减小而后增大。

3.4 速度和脉冲能量功率对激光着色的影响

将线间距取 0.005 mm 为定值,改变速度和脉冲能量。速度变化范围取 30~300 mm/s,间隔为 30 mm/s。脉冲能量范围 10%~100%,间隔为 10%。试验结果如图 4 所示。

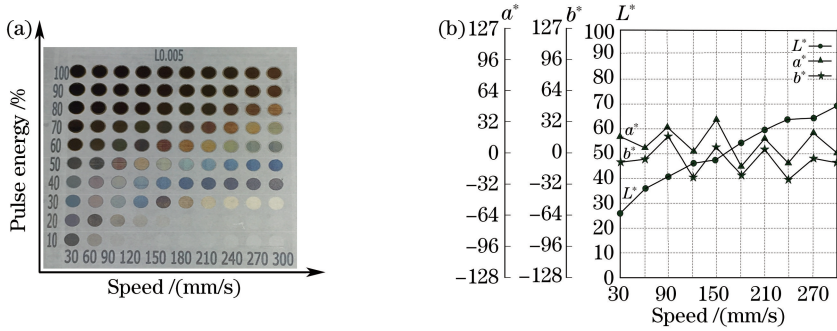


图 4 不同速度和脉冲能量下的着色图。(a)着色显示;(b) CIE $L^* a^* b^*$ 色彩模型的 L^* 、 a^* 、 b^* 的平均值随速度的变化情况

Fig. 4 Coloring result under different speeds and pulse energies. (a) Coloring display; (b) mean changes of L^* , a^* , b^* in CIE $L^* a^* b^*$ color model with speed

从图 4(a)可知,较好的颜色范围主要集中在速度 150~300 mm/s 和脉冲能量 40%~70% 所组成的区域内。从图中可以看到色彩分布沿对角线具有明显的对称性,说明速度和脉冲能量均能够明显影响着色效果,且影响效果相当。图 4(b)为对应的 CIE $L^* a^* b^*$ 色彩系统的 L^* 、 a^* 、 b^* 的平均值。从图 4(b)可以看出,随着速度的增大, L^* 呈近线性方向增大趋势, a^* 、 b^* 则出现一定的波动。

3.5 离焦量对激光着色的影响

分别设置离焦量参数为 2、1、0 mm 进行试验,通过三种着色图对比,发现着色区域的颜色色相基本不变,只发生了色彩明度和纯度的微小改变,离焦量大的着色图颜色较浅,减小离焦量后颜色加深了。这也间接印证了焦点处的能量最集中。

3.6 结果分析与讨论

通过对不锈钢表面激光着色试验的研究,发现表面颜色与相应的表面周期性条纹微结构在一定条件下发生的光的散射、折射、衍射等现象存在联系。这种周期性条纹微结构具有反射光栅结构的功能,当入射自然光照射到具有周期性条纹微结构的表面时,由于光栅的衍射作用,光经过光栅后色散而成光谱,因而呈现出彩色效果。国内外学者已经在飞秒激光器制备微纳米结构方面做了大量的试验和研究,成功改变金属对光谱的吸收和反射性能。

采用皮秒脉冲激光对不锈钢表面进行扫描处理,也可以在不锈钢表面形成纳米或近纳米周期表面微结构。在试验中,经过皮秒激光辐照后大部分不锈钢试样表面出现了明显的衍射效应。使用扫描电子显微镜 (SEM) 对不锈钢表面进行扫描,发现其表面形成了一种类似光栅的周期性微结构,周期约为 300 nm~20 μ m,正是这种类周期条纹微结构导致了光在其表面发生衍射效应,造成表面呈现颜色的现象。

图 5 所示为不锈钢表面经皮秒激光辐照后绿色试样表面的 SEM 图。利用 AURORA4000 高分辨率光谱仪测得的绿色试样反射干涉光谱如图 6 所示,绿色试样的反射干涉光谱存在一个明显的峰值,峰值波长为 580 nm,与呈现的绿色相符,说明理论和试验结果基本吻合,即通过控制皮秒激光的参数可有效地实现不锈钢在可见光谱范围内的各种颜色的制备。

因此,不同周期性条纹微结构的表面就能呈现不同的颜色,并影响颜色的 L^* 、 a^* 和 b^* 的大小。从图 2 (b)可以看出,随着扫描速度和线间距的增大, L^* 快速减小,表明条纹微结构未能形成。这说明了皮秒激光

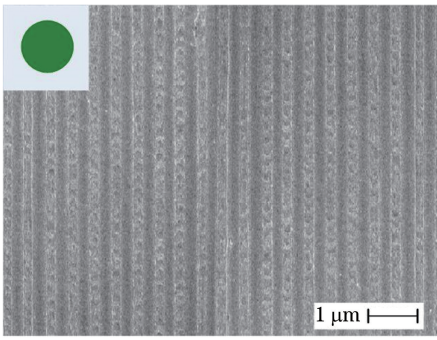


图 5 绿色试样表面周期性条纹微结构 SEM

Fig. 5 LIPPS SEM on surface of green sample

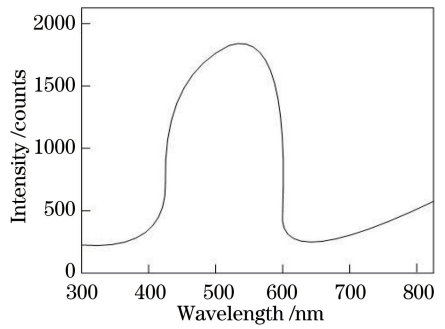


图 6 绿色试样表面反射干涉光谱图

Fig. 6 Reflection interference spectrum of green sample surface

着色时扫描速度和线间距不能过大;从图 3(b)可以看出, L^* 随着脉冲能量增大而减小, a^* 、 b^* 随着脉冲能量的增大先减小后增大。这说明能量过大时, 不锈钢表面烧蚀严重, 不但没有形成微条纹, 还使表面呈黑色, 吸收了各波长段的白光。

4 不锈钢皮秒激光着色老化性能

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、耐热和耐蚀等性能, 其中彩色不锈钢的颜色老化问题是极其重要的。为了考查不锈钢激光着色后的颜色老化性能, 对激光辐照后的着色试样进行了老化试验。

选用三种皮秒激光着色试样(Sample 1、Sample 2、Sample 3)和一种纳秒激光着色试样(Sample 4)参照塑料老化试验标准进行荧光紫外灯人工加速模拟老化试验(光老化)。使用 CI65/DMC 型人工加速气候箱, 光强度设为 (2100 ± 300) lux, 辐照强度值设为 (5.4 ± 0.27) kW/m², 辐照时间分别为 1 天、1 周、2 周、3 周和 4 周。试验结果如表 1 所示。从表 1 可以观察光老化过程中试样表面颜色的变化过程。把各着色试样的颜色用 CIE $L^* a^* b^*$ 值表示, 计算后得到各老化试验与原始试样之间的色差值 ΔE 。

表 1 皮秒激光与纳秒激光着色不锈钢老化试验对比

Table 1 Aged experiments with different coloring stainless steel samples of picosecond laser and nanosecond laser

Aging time /h	0	24	168	336	504	672
Sample 1						
ΔE	0	2.1	2.9	3.2	3.7	4.2
Sample 2						
ΔE	0	0.7	2.1	2.4	2.7	3.6
Sample 3						
ΔE	0	0.5	1.3	3.2	3.3	4.8
Sample 4						
ΔE	0	2.3	2.9	6.2	9.8	12.7

从老化试验数据可以看出, 不锈钢皮秒激光着色老化试样和原始试样比较, 各时间段老化试样与原始试样的色差值 ΔE 都比较小, 在老化 504 h 以内与原始试样色差在 4.0 以下, 属于不明显可忽略颜色变化, 说

明皮秒激光着色的不锈钢耐光老化性能优异,至少可以达到在紫外线照射老化 504 h 的技术指标。试验结果证明皮秒激光表面着色处理效果好,褪色慢,着色效果有更好的持久性。纳秒激光着色老化试样和原始试样比较,各时间段的色差值 ΔE 均较大,在老化 336 h 以后与原始试样色差大于 4.0,结果说明纳秒激光着色后的氧化膜比皮秒激光着色后的 NC-LIPSS 褪色要快,色彩的持久性比皮秒激光着色低。

至于纳秒激光着色后的表面氧化膜与皮秒激光着色后的表面 NC-LIPSS 的金属材料表面的其他性能如耐磨性,还需要进一步的试验研究。

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,试验表明在脉冲宽度小、扫描速度慢、线间距较短和合适的脉冲能量条件下,皮秒激光就可以在金属表面制备性能良好的周期性表面条纹微结构。研究了皮秒激光参数与色彩空间之间的关系,着重分析了填充线间距、扫描速度、脉冲能量等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) 改变速度和线间距均能对着色效果产生显著影响。增大速度和线间距时,颜色沿对角线呈近似对称分布,说明改变速度与线间距对着色有相同的影响效果。当脉冲能量为 $60 \sim 140 \text{ mJ/cm}^2$,速度为 $90 \sim 300 \mu\text{m/s}$,线间距为 $0.003 \sim 0.01 \text{ mm}$ 时能得到较好的、丰富的表面色彩。改变离焦量也能改变色彩效果,但没有扫描线间距、脉冲能量和扫描速度三者影响显著;

2) 利用 CIE $L^* a^* b^*$ 色彩模型,可获得皮秒激光参数与 CIE $L^* a^* b^*$ 色彩空间之间的变化关系。随着扫描速度的增大, L^* 、 a^* 、 b^* 先增大后快速减小; L^* 随着脉冲能量的增大而减小, a^* 、 b^* 随着脉冲能量的增大先减小后增大;随着扫描速度的增大, L^* 呈近线性方向增大趋势, a^* 、 b^* 则出现一定的波动;

3) 光老化性试验表明,激光着色试样在老化 504 h 以内与原始试样的色差 ΔE 在 4.0 以下,属于不明显可忽略的颜色变化,说明此皮秒激光工艺参数下的着色不锈钢耐光老化性能优异,至少可以达到在紫外线照射老化 504 h 着色色彩不退化,而纳秒激光着色试样在 336 h 老化后即出现色差 ΔE 明显变大,色泽出现了差别。证明皮秒激光表面着色处理效果好,褪色慢,着色效果有更好的持久性。

参 考 文 献

- [1] Skowroński L, Antończak A J, Trzcinski M, *et al.* Optical properties of laser induced oxynitride films on titanium[J]. Applied Surface Science, 2014, 304(18): 107-114.
- [2] 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.
- [3] Huang Tianqi, Li Jianmei, Lu Changhou, *et al.* Laser-induced color marking on 304 stainless steel by Nd:YAG nanosecond laser[J]. Applied Laser, 2013, 33(6): 586-590.
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.
- [4] Tao Haiyan. Fabrication and properties researches of femtosecond laser induced micro/nano structures on solid surface [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
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.
- [5] Ji Xingguo. Metal coloring with femtosecond laser pulses [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
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.
- [6] Li Guoqiang, Li Xiaohong, Yang Hongdao, *et al.* Fabrication of colorful metals with femtosecond laser pulses[J]. Chinese J Lasers, 2011, 4(1): 72-76.
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, 2011, 4(1): 72-76.
- [7] Yang Tiejian, Li Guoqiang, Han Yawei. Exclusive display of patterns fabricated by femtosecond laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(9): 099001.
杨铁见, 李国强, 韩亚伟. 飞秒激光诱导图案独立显示研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9): 099001.
- [8] Li Z L, Zheng H Y, Teh 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.

- [9] Vorobyev A Y, Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses[J]. Optics and Photonics News, 2008, 19(12): 30.
- [10] Yang Zhenyuan. Study of fabrication color metal with multi-polarization femtosecond laser [D]. Hefei: Anhui University, 2014.
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.
- [11] Ahsan M S, Ahmed F, Kim Y G, *et al.* Colorizing stainless steel surface by femtosecond laser induced micro/nano-structures[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(17): 7771-7777.
- [12] 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 and Coatings Technology, 2013, 222(6): 1-8.
- [13] Antończak A J, Kocoń D, Nowak M, *et al.* Laser-induced colour marking—sensitivity scaling for a stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2013, 264(1): 229-236.
- [14] 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.
- [15] Yao J W, 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(19): 7625-7632.
- [16] Wu Bo, Zhou Ming, Li Baojia, *et al.* Microstructures on stainless steel surface induced by femtosecond laser pulse[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 111406.
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(11): 111406.
- [17] Tang Yanfu, Nie Zhenwei. Study on periodic ripples on metallic surfaces induced by polarized lasers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702002.
唐延甫, 聂真威. 偏振激光诱导金属表面周期条纹结构机理的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702002.
- [18] Wang Haozhu, Yang Fenghe, Yang Fan, *et al.* Investigation of femtosecond-laser induced periodic surface structure on molybdenum[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0103001.
王浩竹, 杨丰赫, 杨 帆, 等. 飞秒激光在金属钼表面诱导产生纳米量级周期条纹结构的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103001.
- [19] Li Yangbo, Bai Feng, Fan Wenzhong, *et al.* Color difference analysis of femtosecond laser colorized metals[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0714003.
李阳博, 柏 锋, 范文中, 等. 飞秒激光金属着色颜色差分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0714003.