

# 不锈钢激光着色机理及基于神经网络的颜色预测

郭 亮<sup>1,2,3,4</sup> 林远添<sup>1,2,3,4</sup> 张震华<sup>1,2,3,4</sup> 张庆茂<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>华南师范大学广州市特种光纤光子器件与应用重点实验室, 广东 广州 510006

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>华南师范大学广东高校特种功能光纤工程技术研究中心, 广东 广州 510006

<sup>4</sup>华南师范大学广东省微纳结构功能光纤与器件工程技术研究中心, 广东 广州 510006

**摘要** 研究了离焦量、脉冲能量、扫描间距、扫描速度和重复频率等激光加工参数对金属表面着色及微纳结构制备的影响机理,诱导制备了氧化膜、类光栅、凹坑和柱状突起 4 种结构,这些结构会使不锈钢表面产生薄膜干涉、光栅衍射和陷光等现象。通过 Matlab 软件在工艺参数与颜色 HSB 值之间建立了一个单隐含层的反向传播(BP)神经网络,该神经网络的训练均方根误差为 0.0078,色相  $H$ 、饱和度  $S$  和亮度  $B$  的测试相对误差分别为 23%,10.4%和 5.6%。该神经网络在一定程度上揭示了工艺参数与颜色之间的映射关系,使用该神经网络模型可以对激光着色效果作出有效的预测。

**关键词** 激光技术;微纳结构;BP 神经网络;不锈钢

**中图分类号** V261.8

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.1102008

## Mechanism of Laser Coloration of Stainless Steel and Color Prediction Based on Neural Network

Guo Liang<sup>1,2,3,4</sup> Lin Yuantian<sup>1,2,3,4</sup> Zhang Zhenhua<sup>1,2,3,4</sup> Zhang Qingmao<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Guangzhou Key Laboratory for Special Fiber Photonic Devices and Applications, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

<sup>2</sup>Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

<sup>3</sup>Specially Functional Fiber Engineering Technology Research Center of Guangdong Higher Education Institutes, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

<sup>4</sup>Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Microstructured Functional Fibers and Devices, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** To investigate the mechanism of laser coloring and fabrication of micro- and nano-structures fabrication on stainless steel, the influence of such laser parameters as defocusing distance, pulse energy, scanning interval, scanning speed, and repetition rate is studied. The oxide film, grating-like structure, concave and columnar protrusion are produced. The four structures lead to thin-film interference, grating diffraction effect and light trapping effect. A back propagation (BP) neural network with one hidden layer between process parameters and color parameters is established via Matlab. The training root-mean-square error of this BP neural network is 0.0078. The relative errors of hue, saturation and brightness are 23%, 10.4%, 5.6%, respectively. To a certain

**收稿日期:** 2016-06-23; **收到修改稿日期:** 2016-07-09

**基金项目:** 广东省科技项目(2013B090600045, 2013B090200003, 2014B010131004, 2014B010124002, 2014B090903014, 2015B090920003, 2016B090917002)、广东省研究生教育创新计划资助项目(2013JDXM23)、广东省自然科学基金(2016A030313456)

**作者简介:** 郭 亮(1968—),男,博士,高级工程师,主要从事激光先进制造技术等方面的研究。

E-mail: 15323310190@163.com

\* **通信联系人.** E-mail: zhangqm@scnu.edu.cn

extent, this neural network reveals the mapping relationship between process parameters and color. The laser coloring effect can be predicted effectively with the neural network model.

**Key words** laser technique; micro-nano structure; neural network; stainless steel

**OCIS codes** 140.3390; 140.3510; 140.3538; 240.0310

## 1 引 言

激光着色技术是一种表面微纳结构的制备方法,通过改变激光加工工艺,可以在金属表面制备不同的微纳结构,从而改变金属表面对不同波长的光的反射率,在金属上加工出彩色图案<sup>[1-4]</sup>。Zheng 等<sup>[5]</sup>使用准分子激光器在金属上生成各种颜色,并认为氧化膜所引起的干涉现象会形成不同的颜色。Long 等<sup>[6]</sup>利用皮秒激光在铜材料上成功诱导出周期性表面微结构,这些光栅周期结构可以引起丰富的彩虹颜色效果。这种利用激光在金属表面诱导的颜色属于由表面微纳结构引起的结构色,不会因为氧化反应而发生褪色

目前对于激光着色技术的理论研究和机理分析仍然不能清楚地解释激光辐照材料时激光与材料相互作用的具体过程和呈色机理,所以激光加工参数的组合与着色结果的定量关系依然无法确立,导致激光着色的重复性不高,成为激光着色技术进一步扩大其应用范围的最大阻碍。本文通过设计反向传播(BP)神经网络模型,确定激光加工工艺参数与着色效果关系的数学模型,并与测试结果对比说明其有效性。

## 2 实 验

实验采用 YLP-20W 型光纤激光打标机,其结构如图 1 所示。该系统包括电子计算机软件控制、硬件驱动控制、光纤激光器、扩束准直镜、振镜扫描系统、F-Theta 聚焦镜和可升降加工平台几个部分。

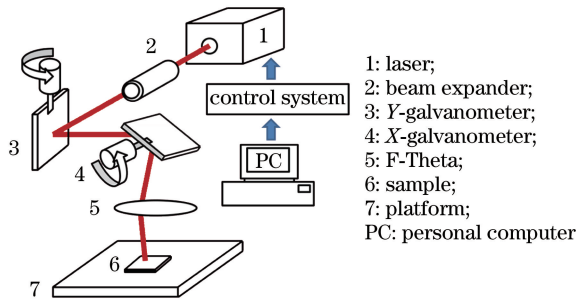


图 1 激光打标系统结构示意图

Fig. 1 Diagram of laser marking system

激光打标系统选用光纤激光器,输出平均功率最高可以达到 20 W,中心波长为 1064 nm,脉宽为 200 ns,重复频率 20~80 kHz 连续可调,光纤激光器经过 F-Theta 透镜后系统后的焦距为 16.5 cm。激光输出的功率和重复频率可以通过软件进行设置。可升降加工平台可用于固定样品和调节加工离焦量。

实验材料为 304 不锈钢,国标标示为 06Cr19Ni10,尺寸为 100 mm×100 mm×1 mm。样品的表面情况会影响激光着色效果,因此实验前需要对样品进行初步的预处理。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 工艺规律

#### 3.1.1 离焦量对激光着色效果的影响

使用平均功率为 2.3 W、重复频率  $f$  为 45 kHz 的激光进行加工,振镜加工速度为 60 mm/s,扫描线间距为 0.005 mm,逐渐改变离焦量,观察激光着色效果的变化(图 2)。颜色的初步定量可以使用 HSB 值进行表征。颜色的色相  $H$  表示颜色的主要成分在标准色轮上的位置,范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ ,饱和度  $S$  表示颜色的纯度,即色相中彩色部分所占的比重,亮度  $B$  表示颜色的明暗度。

图 3 为颜色的 HSB 值与正离焦量的关系曲线。从曲线中可以看出,颜色的色相  $H$  值与正离焦量呈正相关,在标准色轮中为逆时针转动方向。饱和度  $S$  与亮度  $B$  分别与正离焦量近似呈正弦函数关系,且饱和度  $S$  与亮度  $B$  的变化趋势相近。

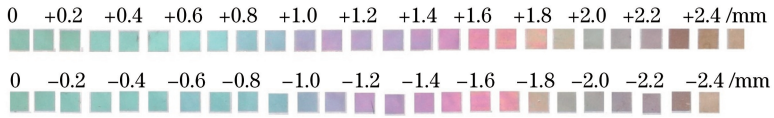


图 2 加工离焦量对激光着色效果的影响

Fig. 2 Effect of the defocusing distance on laser coloration

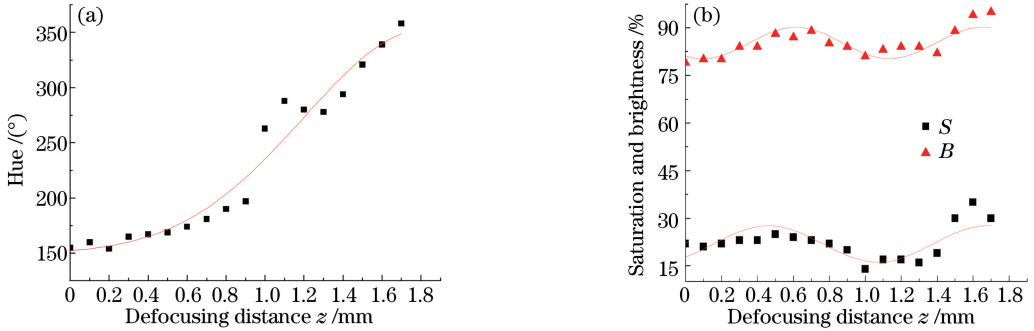


图 3 HSB 值与正离焦量的关系曲线

Fig. 3 Relationship between the HSB values and the positive defocusing distance

### 3.1.2 脉冲能量与扫描间距对激光着色效果的影响

使用重复频率为 45 kHz、振镜加工速度为 60 mm/s 的激光在离焦量为零的位置进行着色实验,分别改变加工参数中的输出功率和振镜扫描间距,观察激光着色效果的变化,输出功率和振镜扫描间距对激光着色效果的影响如图 4 所示。

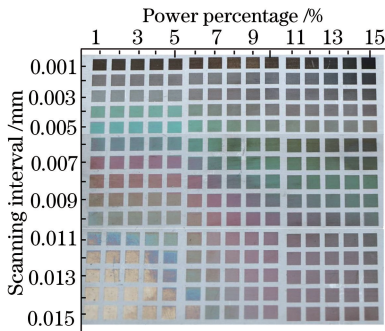


图 4 输出功率和振镜扫描间距对激光着色效果的影响

Fig. 4 Effect of output power and scanning interval on laser coloring

图 5 所示为扫描间距  $d$  固定为 0.005 mm 时,颜色 HSB 值与脉冲能量  $E$  的关系曲线。从图中可以看出,颜色的色相与脉冲能量呈负相关,即随着脉冲能量的增加,颜色色相在标准色轮上的位置呈顺时针方向转动,同时,颜色的饱和度和亮度也在逐渐下降,说明颜色越来越深。

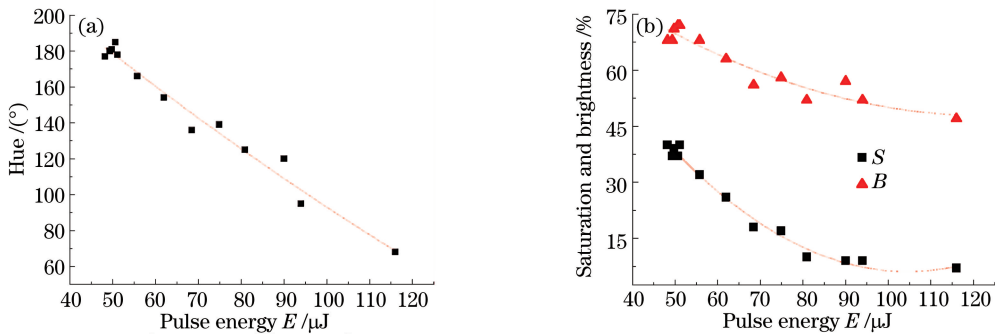


图 5 扫描间距为 0.005 mm 时 HSB 值与脉冲能量  $E$  的关系

Fig. 5 Relationship between the HSB values and the pulse energy when scanning interval is 0.005 mm

图 6 所示为脉冲能量  $E$  固定为 48.2  $\mu$ J 时,颜色 HSB 值与扫描间距  $d$  的关系曲线。结合标准色轮分析,当扫描间距增加时,颜色的色相在色轮上呈逆时针方向转动。颜色的饱和度和亮度与扫描间距的关系规

律不是特别明显,只有扫描间距  $d$  在  $[0.001, 0.005]$  和  $[0.009, 0.015]$  两个区间时,亮度与扫描间距呈现明显的正相关关系,即随着扫描间距的减小,亮度也随之下降,颜色逐渐向深色演变。

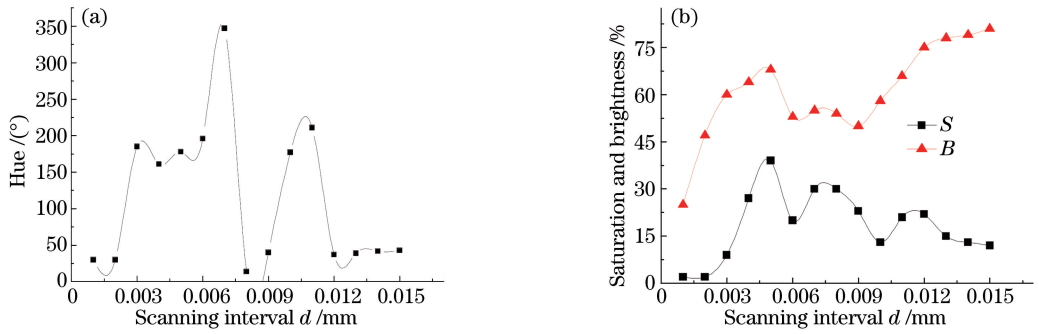


图 6 脉冲能量为  $48.2\mu\text{J}$  时颜色 HSB 值与扫描间距  $d$  的关系

Fig. 6 Relationship between the HSB values and the scanning interval  $d$  when pulse energy is  $48.2\mu\text{J}$

### 3.1.3 重复频率和扫描速度对激光着色效果的影响

使用单脉冲能量为  $67.6\mu\text{J}$  的激光在振镜扫描间距为  $0.005\text{mm}$ 、离焦距为零的情况下进行着色实验,分别改变加工参数中的激光重复频率和振镜扫描速度,观察激光着色效果的变化,重复频率和扫描速度对着色效果的影响如图 7 所示。

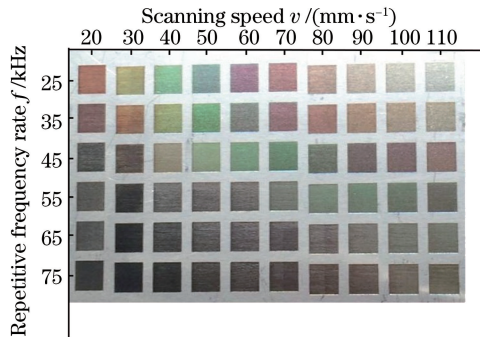


图 7 重复频率和扫描速度对激光着色效果的影响

Fig. 7 Effect of repetition rate and scanning speed on laser coloring

由图 8 和图 9 可知,当扫描速度增大或者重复频率减小时,颜色的色相在标准色轮上均呈逆时针方向转动。而且当扫描速度增大或者重复频率减小时,激光功率密度减小,材料氧化程度降低<sup>[7]</sup>,在 HSB 曲线中表现为亮度  $B$  上升,即加工出的颜色变浅。反之,当扫描速度减小或重复频率增加时,颜色会变深。

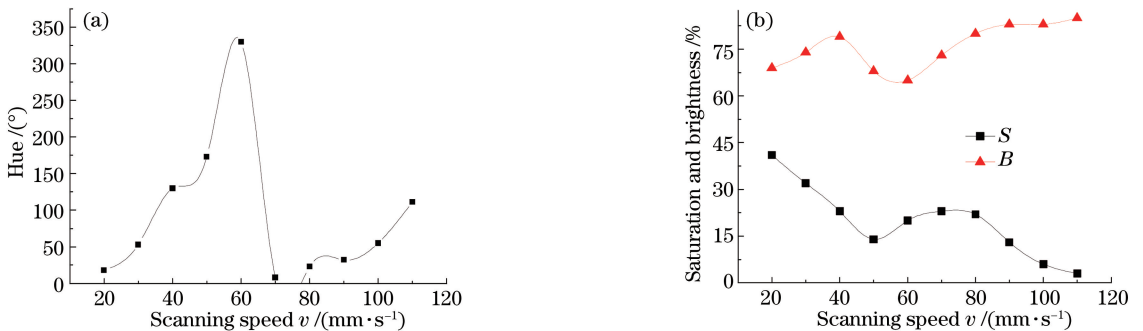


图 8 重复频率为  $25\text{kHz}$  时 HSB 值与扫描速度  $v$  的关系

Fig. 8 Relationship between HSB values and scanning speed when repetition rate is  $25\text{kHz}$

### 3.1.4 BP 神经网络模型的建立

为了在激光加工参数与着色效果之间确立正确的定量关系,使用 BP 神经网络算法建立两者关系的数学模型。BP 神经网络是一种基于误差反向传播算法的多层前向神经网络,其拓扑结构包括输入层、输出层以及若干个隐含层,是人工神经网络算法中最常用的一种。BP 神经网络的建立不需要预先知晓输入与输出的数学关系,可以学习和记忆输入层与输出层之间大量的映射关系,通过误差的反向传播不断地从后向前

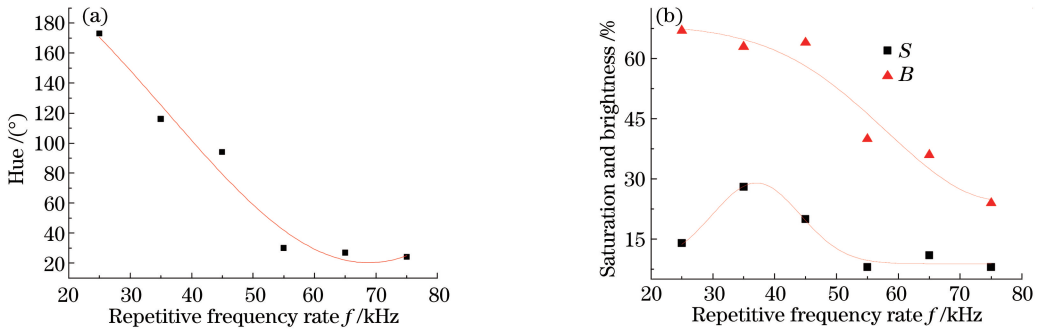


图 9 扫描速度为 50 mm/s 时 HSB 值与重复频率  $f$  的关系

Fig. 9 Relationship between HSB values and repetition rate when the scanning speed is 50 mm/s

逐层修正网络的权值,经过大量的学习和修正使得网络的误差最小<sup>[8]</sup>。

设计了一个单隐含层的三层 BP 神经网络,其中输入层和输出层的节点数分别由输入向量和输出向量的维数决定,将激光加工参数重复频率  $f$ 、扫描速度  $v$ 、脉冲能量  $E$ 、扫描间距  $d$  和正离焦量  $z$  作为输入向量,颜色的色相  $H$ 、饱和度  $S$  和亮度  $B$  作为输出向量。

使用  $\text{tansig}$  函数作为隐含层的传输函数,  $\text{purelin}$  函数作为输出层的传输函数,  $\text{trainlm}$  函数作为训练函数,表示使用 LM 法进行训练,使用  $\text{learndm}$  函数作为学习函数,均方根误差作为误差性能函数。隐含层节点数和学习率都会影响 BP 网络的误差性能,使用 Matlab 软件可以计算出隐含层节点数和学习率对训练误差的影响,从而确定最佳的隐含层节点数和学习率。

为了确定最佳的隐含层节点数和学习率,需要使用  $\text{newff}$  函数创建 BP 神经网络并进行初步训练。使用 110 组数据样本对创建的 BP 神经网络进行训练,并使用 20 组新数据样本对训练后的神经网络进行测试,训练及测试结果如图 10~13 所示。BP 神经网络的训练均方根误差(RMSE)在训练 800 次后最终稳定在 0.0078。颜色 HSB 值的预测值和实际值拟合效果比较好。根据数据计算 HSB 值的测试相对误差,得到色相  $H$  的测试相对误差为 23%,饱和度  $S$  的测试相对误差为 10.4%,亮度  $B$  的测试相对误差为 5.6%。由于其中几个数据点离散程度较大,色相  $H$  的相对误差比较大。结合实际拟合效果来看,此 BP 神经网络是有效的。

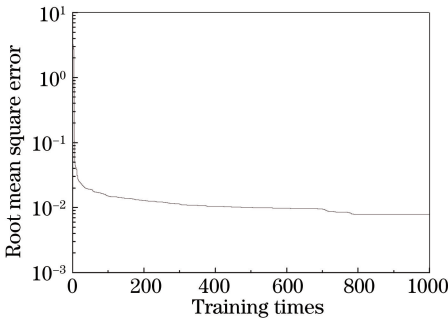


图 10 BP 神经网络的训练均方根误差

Fig. 10 Training RMSE of the BP neural network

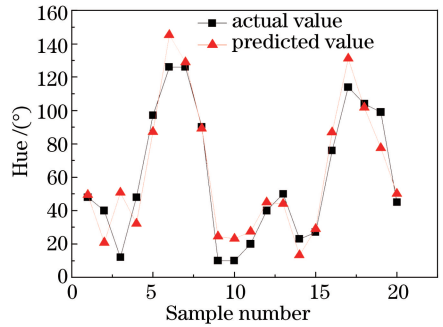


图 11 色相  $H$  的预测值与实际值

Fig. 11 Predicted value and actual value of  $H$

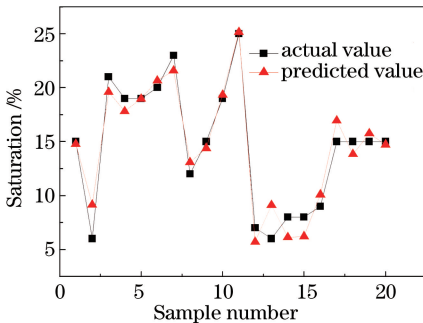


图 12 颜色饱和度  $S$  的预测值与实际值

Fig. 12 Predicted value and actual value of  $S$

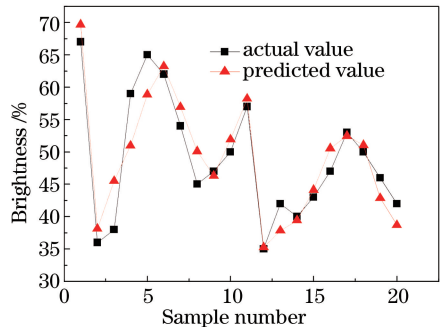





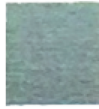








图 13 亮度  $B$  的预测值与实际值

Fig. 13 Predicted value and actual value of  $B$

部分样品实际颜色与预测颜色的对比结果如表 1 所示。

表 1 部分样品的实际颜色与预测颜色对比

Table 1 Comparison of actual color and Predicted color of some samples

Actual	Color						
	$H / (^{\circ})$	19	58	129	173	330	3
	$S / \%$	47	30	24	14	20	23
	$B / \%$	70	70	80	68	67	73
Predicted	Color						
	$H / (^{\circ})$	19.1	57.5	129.8	170.6	329.6	15.6
	$S / \%$	46.8	30.3	23.9	13.8	20.2	22.5
	$B / \%$	70.3	70.1	79.5	69.9	66.8	76.4

### 3.2 呈色机理

#### 3.2.1 氧化膜结构

使用热场发射扫描电子显微镜对不锈钢样品表面进行扫描,其中图 14(a)是不锈钢母材的表面结构,图 14(b)是经过激光处理后形成的膜结构。

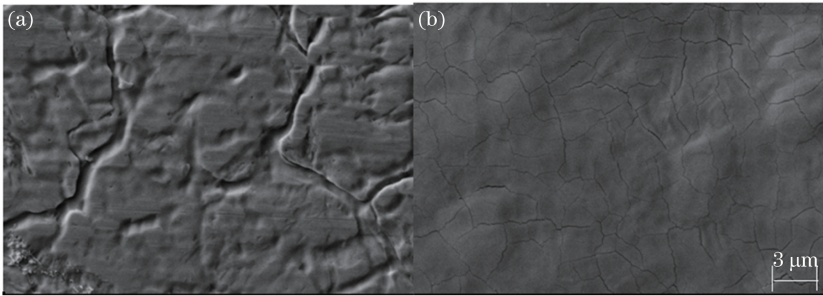







图 14 不锈钢表面微观结构。(a)未处理的母材;(b)激光处理后形成的膜结构

Fig. 14 Microstructure of stainless steel surface. (a) Untreated material; (b) film structure formed by laser treatment

从图 14(b)可以看出,经过激光辐照处理后不锈钢表面依然比较平整,没有明显的周期性结构,是一种膜结构。但是出现了许多细纹,而且随着激光功率密度的上升,细纹呈增多趋势。观察样品表面颜色的变化,发现这种膜结构对应 5 种主要的颜色,表 2 为这 5 种主要颜色及其对应的加工参数。

表 2 颜色与其对应的加工参数

Table 2 Colors and corresponding processing parameters

Sample	Color	Power $P / \text{W}$	Repetitive frequency rate $f / \text{kHz}$	Scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Scanning interval $d / \text{mm}$	Defocusing distance $z / \text{mm}$
1		3.60	55	270	0.005	0
2		3.52	20	200	0.005	0
3		2.22	45	60	0.005	+0.17
4		2.22	45	60	0.005	+0.12
5		2.22	45	60	0.005	0

为了分析这种膜结构对颜色的影响,使用 X 射线能谱仪分别对这 5 个膜结构样品的表面元素成分进行分析,并使用切片机对其进行切片处理,使用扫描电子显微镜测量其结构的膜厚,结果如表 3 所示。

表 3 样品表面的各种元素成分含量及膜厚

Table 3 Element mass percentage and film thickness of samples

Sample	Element mass percentage /%				Film thickness /nm
	O	Fe	Ni	Cr	
1	1.75	61.73	13.73	21.01	22
2	4.35	58.26	12.50	22.97	113
3	16.34	41.76	3.98	35.86	179
4	19.21	47.15	2.55	29.95	191
5	19.23	44.53	3.91	30.42	250

经过成分检测,304 不锈钢母材本身不含氧,但经过激光辐照处理后,不锈钢表面的氧元素含量明显上升,氧的质量分数最高可以达到 19%左右,说明不锈钢表面生成了一层氧化物,这些氧化物构成的表面膜结构其实就是氧化膜结构。氧化物本身呈黑色、绿色或暗红色等颜色,这些氧化物本身的颜色是不锈钢变色的原因之一<sup>[9]</sup>。经过激光辐照处理后不锈钢还会呈现近似蓝色和橙色等颜色,这是不锈钢相关氧化物不能呈现的颜色,不锈钢表面呈色机理不能只用受表面氧化物本身颜色所影响来解释,不锈钢表面存在的氧化膜结构会引起干涉等光学效应<sup>[10-11]</sup>,从而改变了不锈钢表面所显现的颜色。根据检测结果,氧化膜的厚度为 20~250 nm,不同颜色样品表面的氧化膜厚度不同,即氧化膜的厚度会影响不锈钢表面的颜色,符合薄膜干涉理论。薄膜干涉的相长相消情况与薄膜折射率、膜层厚度、入射角、波长和干涉级相关。当特定的波长因干涉相长,其他波长因干涉相消,则不锈钢表面的氧化膜就会显现特定的颜色。在波长干涉相长的情况下,波长  $\lambda$  与膜厚  $d$  的关系为<sup>[12]</sup>

$$\lambda = \frac{4n_1 d \cos \beta}{2m - 1} \quad (1)$$

式中  $n_1$  为氧化膜折射率,  $\beta$  为折射角,  $m$  为干涉级。

### 3.2.2 类光栅结构

经过激光辐照处理后,部分样品的表面出现了明显的衍射效应,即表面颜色会随着角度的变化而交替显现出两种截然不同的颜色。使用热场发射扫描电子显微镜对其进行扫描,发现样品表面形成了一种类似光栅的长周期结构,周期约为 20  $\mu\text{m}$ ,正是这种类光栅周期结构导致了光在其表面发生衍射效应,使表面显现的颜色与观察角度有关。

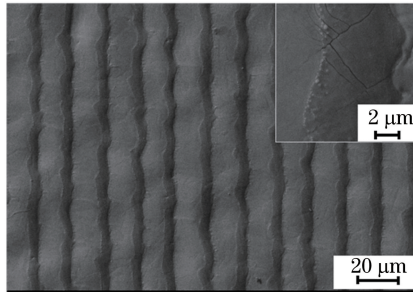


图 15 样品表面的类光栅结构

Fig. 15 Grating-like structure on the sample surface

使用卤素灯光源(波长范围 380~780 nm)和 Maya2000 Pro 型光谱仪对样品进行反射光谱检测,分别设置光源照射角度为 45°和 60°,测量类光栅结构样品的表面反射光谱,反射谱如图 16 所示。当光源照射角度为 45°时,反射光中心波长约为 420 nm,为蓝光成分,当光源照射角度为 60°时,反射光中心波长约为 600 nm,为橙光成分。

这种由于类光栅结构所产生的颜色具有明显的光栅衍射现象,是单纯的色素色所法实现的,这进一步证明可以利用激光在不锈钢表面制备出结构色。

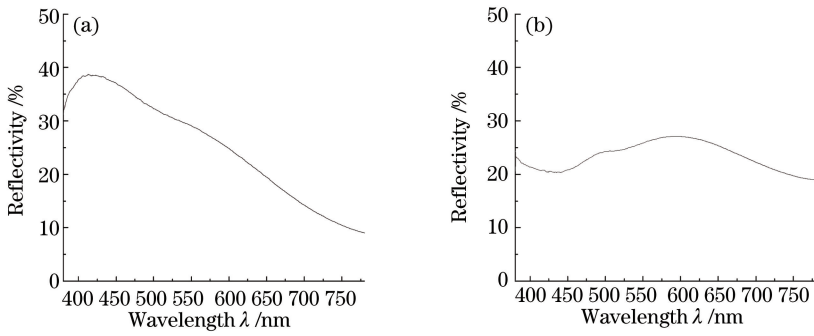


图 16 样品反射谱。(a)光源入射角为  $45^\circ$ ; (b)光源入射角为  $60^\circ$

Fig. 16 Reflectivity spectra of sample. (a) Incidence angle of light source is  $45^\circ$ ; (b) incidence angle of light source is  $60^\circ$

### 3.2.3 凹坑结构

随着不锈钢表面颜色的加深,不锈钢表面的微观结构会越来越复杂,这些复杂特殊的微观结构会成为一种陷光结构,使不锈钢表面对光的吸收能力明显增强。图 17 所示为利用激光制备得到的微凹坑结构,这种结构的表面覆有一层纳米尺度的微粒,对光的吸收能力比较强。如图 18 所示,这种结构对可见光的反射率不超过 4%。

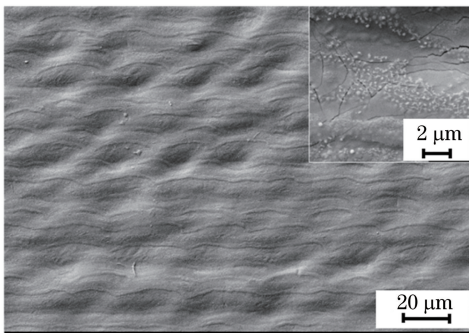


图 17 样品表面的凹坑结构

Fig. 17 Concave structure on the sample surface

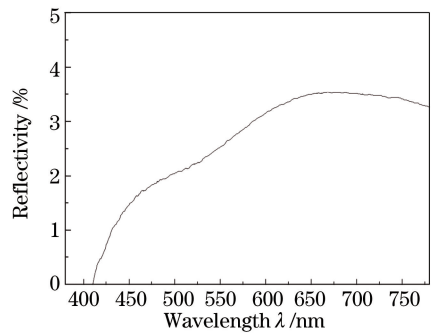


图 18 凹坑结构样品的反射光谱

Fig. 18 Reflectivity spectrum of the sample with concave structure

### 3.2.4 柱状突起结构

使用高功率密度激光辐照不锈钢时,不锈钢被处理区域会出现非常明显的黑色,经过光谱仪测量,样品的光谱反射率基本为 0,部分波长的反射率甚至显示为负,如图 19 所示。这是因为反射光太弱导致光谱仪响应错误导致的,说明样品表面对光的吸收作用非常强。使用电子显微镜观察,发现黑色样品的表面出现了许多排列不规则的柱状突起结构,正是这种陷光结构导致了样品表面在可见光范围内极低的反射率。

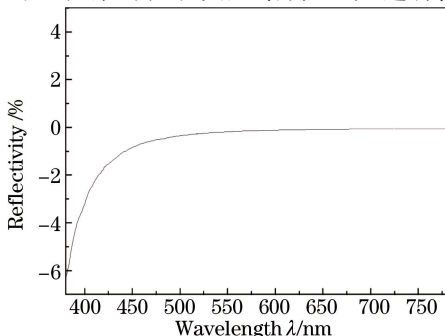


图 19 黑色样品的反射谱图

Fig. 19 Reflectivity spectrum of the black sample

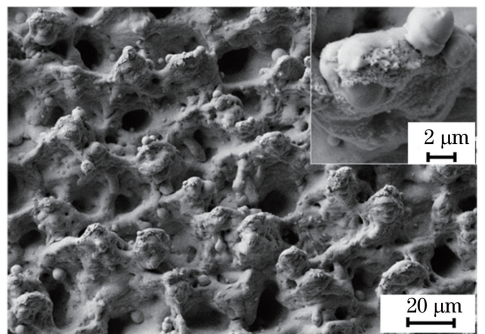


图 20 样品表面的柱状突起结构

Fig. 20 Columnar protrusion structure on the sample surface



## 4 结 论

通过工艺实验、光谱分析、能谱分析及扫描电子显微图像分析对不锈钢表面的激光着色技术进行了研究,总结了激光加工参数对着色效果的影响以及表面颜色的呈色机理,并对着色处理后的样品进行了表面物理性能检测。通过大量的数据分析和相关理论研究得出以下结论。

1) BP神经网络测试结果显示色相  $H$ 、饱和度  $S$  和亮度  $B$  的测试相对误差分别为 23%, 10.4% 和 5.6%。颜色 HSB 值预测值和实际值的拟合效果满足要求,说明该 BP神经网络可以在离焦量、脉冲能量、扫描间距、扫描速度和重复频率 5 个工艺参数与颜色 HSB 值之间建立比较可靠的数学模型。

2) 使用 X 射线能谱分析仪检测样品表面的成分,检测结果表明经过激光辐照着色处理后,氧元素含量明显上升。使用扫描电子显微镜观察样品表面的微观结构,发现样品表面出现氧化膜、类光栅、凹坑和柱状突起 4 种主要结构,样品表面的颜色同时受到色素色及结构色的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Laakso P, Ruotsalainen S, Pansar H, *et al.* Relation of laser parameters in color marking of stainless steel[J]. *Physica B Condensed Matter*, 2009, s378-380: 563-564.
- 2 Huang Tianqi. Process and application research of laser induced surface coloration of stainless steel[D]. Jinan: Shandong University, 2015: 9-28.  
黄天琪. 激光诱导不锈钢表面着色工艺及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2015: 9-28.
- 3 Amara E H, Haïd F, Noukaz A. Experimental investigations on fiber laser color marking of steels[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 351: 1-12.
- 4 Luo F F, Ong W, Guan Y C, *et al.* Study of micro/nanostructures formed by a nanosecond laser in gaseous environments for stainless steel surface coloring[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 328: 405-409.
- 5 Zheng H Y, Lim G C, Wang X C, *et al.* Process study for laser-induced surface coloration[J]. *Journal of Laser Applications*, 2002, 14(4): 215-220.
- 6 Long J Y, Fan P X, Zhong M L, *et al.* Superhydrophobic and colorful copper surfaces fabricated by picosecond laser induced periodic nano structures[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 311: 461-467.
- 7 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.
- 8 Li Ping, Zeng Lingke, Shui Anze, *et al.* Design of forecast system of back propagation neural network based on Matlab[J]. *Computer Applications and Software*, 2008, 25(4): 149-150.  
李萍, 曾令可, 税安泽, 等. 基于 Matlab 的 BP 神经网络预测系统的设计[J]. *计算机应用与软件*, 2008, 25(4): 149-150.
- 9 Liang Xue. Research of the laser color marking of stainless steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 17-20.  
梁雪. 不锈钢材料彩色激光打标研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 17-20.
- 10 Zhao Hongliang. Research on technology of laser colorful marking on metal[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008: 32-33.  
赵宏亮. 金属激光彩色打标技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008: 32-33.
- 11 Panjan M, Gunde M K, Panjan P, *et al.* Designing the color of AlTiN hard coating through interference effect[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 254: 65-72.
- 12 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering optics*[M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2011: 349-357.  
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 349-357.