

## 激光直接书写快速制备虹彩与彩色复合图案

彭笛, 王大政, 张国伟\*

天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457

**摘要** 利用纳秒级光纤激光器直接书写的方式实现了 304 不锈钢板表面超高效虹彩结构的构建, 其速度可达到  $5 \text{ mm}^2/\text{s}$  以上。通过改变激光能量参数, 得到了激光诱导金属表面虹彩结构特定形成的工艺范围。实验分析得出, 改变参数, 使得每次脉冲形成的熔池边界间距满足布拉格条件, 可使这种微观结构出现虹彩现象。同时, 利用特定工艺直接构建了一种具有光栅衍射虹彩、薄膜干涉结构色及固有色的复合结构, 这种结构可在不同的角度下实现三种颜色交替主导的色彩表现, 这也为金属表面的个性化着色提供了新方案。

**关键词** 激光技术; 激光光学; 表面结构; 激光直接书写; 结构色

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231040

## 1 引言

快速改变金属的表面特征对于科学和工业的各个领域都是极为有利的, 这些特征结构可以改善金属的表面性质(吸光性、摩擦、防腐蚀等), 也可以修饰金属表面(颜色、花纹)以及添加隐藏防伪标识<sup>[1-3]</sup>。通过激光加工来改变金属表面结构是目前最先进的微纳加工手段。利用空间光调制器(SLM)对激光进行相位整形, 可以在金属表面上制备出斜度较低金属微细槽<sup>[4]</sup>; 在表面上构建减反射结构可以有效增加金属对光的吸收率<sup>[5]</sup>; 也可以在金属表面上形成全息辐射图<sup>[6-7]</sup>; 还可以通过激光刻蚀构建光栅结构<sup>[8]</sup>, 优化导电性能; 此外, 激光还可以使不锈钢、钛等金属表面快速升温, 形成薄膜结构, 实现丰富的结构彩色效果<sup>[9-11]</sup>。

激光已成为金属表面结构修饰的重要手段。对比其他方式, 其流程精简, 操作简单, 速度快, 获得的结构稳定, 加工过程无污染。目前可分为投影式激光打标法、振镜式激光打标法<sup>[12]</sup>和点阵式激光打标法。激光诱导金属表面呈现颜色的原理主要是: 高能量激光诱导金属表面生成氧化物薄膜, 通过氧化物薄膜的干涉以及本身氧化物固有色的结合, 进而呈现彩色效果<sup>[13-20]</sup>。目前关于激光诱导氧化膜着色技术的研究主要集中于参数与色彩结果的对应关系<sup>[10-11]</sup>。激光诱导金属表面周期性类光栅结构(LIPSS)<sup>[13-15]</sup>呈现鲜艳的虹彩色<sup>[21-22]</sup>。

目前实现虹彩色的方案有很多。Yao 等<sup>[23]</sup>利用偏振激光在不锈钢表面上构建了选择性展示的虹彩色。

Ha 等<sup>[24]</sup>利用偏振干涉生成了虹彩方块, 通过组合形成了虹彩字符, 通过改变干涉角度可储存更多信息。Teutoburg-Weiss 等<sup>[25]</sup>通过激光直写和激光干涉实现了具有隐藏特征衍射图样的表面色彩。但这些方案使用的扫描速度都不高, 导致构建过程很长<sup>[26]</sup>。比如文献<sup>[27]</sup>中利用飞秒激光脉冲产生结构颜色的扫描速度为  $1\sim 4 \text{ mm}/\text{s}$ 。此外, 在制作多信息图案时还需要多次重复扫描, 这延长了成形时间, 同时整个过程对误差的容忍度较低。我们采用一种简单快速的打标方案来实现虹彩效果, 以便工业化应用。

本文使用纳秒光纤激光, 以激光直写的方式在 304 不锈钢表面上构建了虹彩结构, 流程简短, 操作简单, 其成形速度可达到  $5 \text{ mm}^2/\text{s}$  以上。探讨了激光各种参数对结果的影响, 并以此推测了该方案中虹彩结构的构建过程。此外, 结合激光烧蚀钢材料表面形貌的演变规律<sup>[28]</sup>, 提出了一种特定工艺, 其可直接构建分别呈现薄膜干涉结构色、光栅衍射虹彩和金属表面固有色的三种色彩模式的复合结构, 丰富了视觉效果, 增加了图案信息的储存量。

## 2 实验材料和方法

研究采用的是光纤激光打标机(波长为  $1062 \text{ nm}$ ), 其采用 TEM00 单模输出, 输出功率为  $30 \text{ W}$ , 光束质量因子  $M^2 < 1.8$ , 光束发散角为  $0.24 \text{ mrad}$ , 脉冲重复频率为  $20\sim 200 \text{ kHz}$ 。通过改变能量百分比( $\eta$ , 实际输出与最大功率的比值)可实现不同能量的输出。激光发射器发射的激光光束经振镜偏转后, 通过焦距为  $160 \text{ mm}$  的透镜作用在承印物上, 承印物放置在可调节的平面

收稿日期: 2023-07-20; 修回日期: 2023-09-07; 录用日期: 2023-10-10; 网络首发日期: 2023-10-24

通信作者: \*zgw318@tust.edu.cn

工作台上,整体系统如图 1 所示。

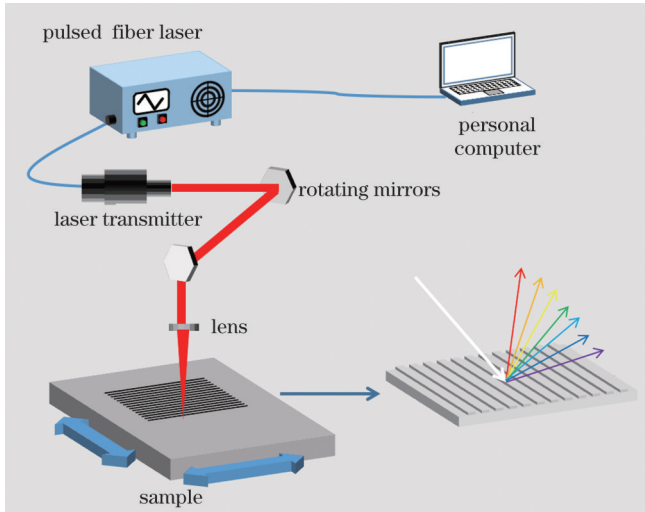


图 1 激光扫描流程和衍射原理

Fig. 1 Laser scanning process and diffraction principle

实验材料是板厚为 1 mm 的 304 不锈钢,由于材料表面的污渍和粗糙度对实验的结果有一定影响(对激光能量的吸收),同时表面较深的划痕会留在结果图案上,故在实验前需要对样品材料作镜面处理和表面清洗。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 虹彩结构色

激光脉冲作用于不锈钢表面,使其温度瞬间提高,从而加剧其与氧气的反应,同时表面升温冷却的过程也对形貌结构有影响。在激光诱导不锈钢表面结构变化的过程中,能够形成具有虹彩现象的结构。在这个过程中,不锈钢表面的激光脉冲相互重叠,它们之间的作用结果由总能量(脉冲重叠次数)决定:

$$\begin{cases} e = \frac{P}{f} \\ F_x = \frac{D}{d_x} \\ d_x = \frac{v}{f} \\ F_y = \frac{D}{d_y} \end{cases}, \quad (1)$$

$$E = e \times F_x \times F_y = \frac{(PD^2)}{(d_y v)}, \quad (2)$$

式中: $e$ 是脉冲能量,单位为J; $E$ 是作用在样品的总能量,单位为J; $P$ 是激光功率,单位为W; $f$ 是激光重复频率,单位为kHz; $D$ 是光斑大小,单位为 $\mu\text{m}$ ; $d_y$ 是激光扫描间隔,单位为mm; $d_x$ 是单个脉冲的偏移量,单位为mm; $F_x$ 是横向重叠量; $F_y$ 是纵向重叠量; $v$ 是扫描速度,单位为mm/s。其中,能量 $e$ 和 $E$ 过高过低都不行,有范围限制,能量影响结构深度(低能量下多次重复扫描也能形成虹彩), $D$ 、 $f$ 和 $d$ 确定了脉冲的相对位置,所以对应参数是相互制约的,各参数满足条件才能形成虹彩结构。

在实验中,我们发现虹彩效果与表面的颜色没有对应关系,相似的表面颜色不一定都有虹彩效果,虹彩效果需要满足一定条件。图 2(a)是不同间隔下开始出现明显虹彩的大致参数,在曲线下方虹彩效果不明显(表面颜色都是暗黄色)。图 2(b)是不同激光重复频率下出现虹彩的参数,曲线下方虹彩效果不明显。分析曲线的变化趋势,除去前面部分整个曲线近似呈线性变化,曲线前面部分对应的实际扫描速度比基于后续数据预估的扫描速度更高。因为较小的间隔和激光重复频率使得曲线前面部分的重叠是最紧密的,同时脉冲能量呈高斯分布,当脉冲之间的峰值能量堆叠时,前面的能量限制会被突破,更高的扫描速度可以避免过分重叠。

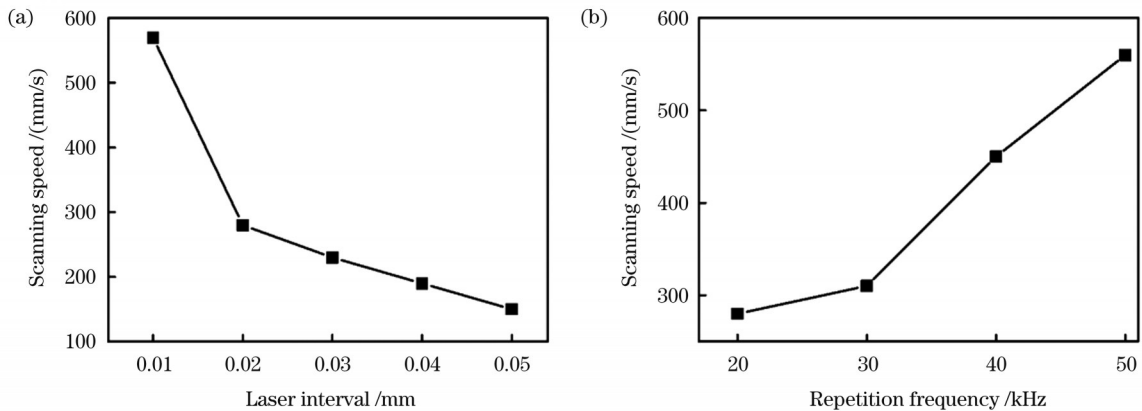


图 2 激光扫描过程中出现虹彩效果时的起始参数。(a)不同间隔下;(b)不同激光重复频率下

Fig. 2 Initial parameters when iris effect appears during laser scanning. (a) At different intervals; (b) at different laser repetition frequencies

#### 3.2 影响因素

##### 3.2.1 能量变化

激光能量是影响表面结构变化的重要因素。图 3

展现了随着激光能量的升高,不锈钢表面结构的变化过程,可以看到,表面结构的界限先是逐渐分明,最后被完全破坏,有序部分展现明亮的虹彩效果。提高激



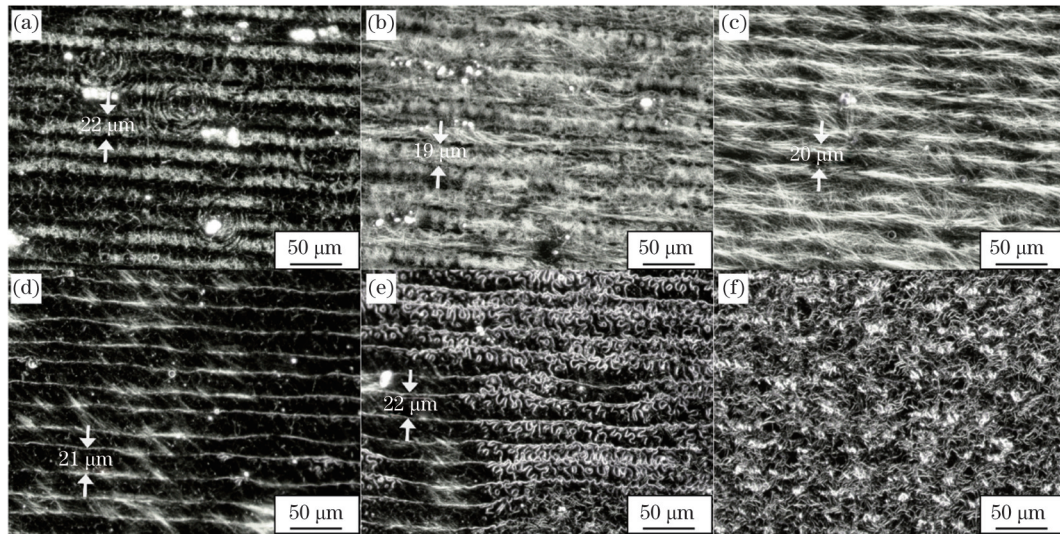


图3 当扫描速度为400 mm/s、重复频率为20 kHz、扫描间隔为0.02 mm时不同能量百分比下的显微图。(a) 55%;(b) 57%;(c) 59%;(d) 61%;(e) 63%;(f) 65%

Fig. 3 Micrographs under different energy percentages at scanning speed of 400 mm/s, repetition rate of 20 kHz, and scanning interval of 0.02 mm. (a) 55%; (b) 57%; (c) 59%; (d) 61%; (e) 63%; (f) 65%

光能量可使不锈钢表面结构趋于规整化并逐渐出现虹彩效果,如图3(a)~(d)所示;而随着激光能量的继续提高,这些结构逐渐被破坏,如图3(e)、(f)所示,缺损位置的虹彩效果消失。其中,图3(c)中的虹彩效果是最强的,在激光扫描的水平和垂直方向上都存在虹彩效果,但二者呈现的虹彩鲜艳程度不同,水平旋转图案有明显的颜色明暗变化,说明在该过程中生成了多种虹彩结构。根据前面激光能量对表面结构的影响,分析得出:在脉冲输出状态不变的情况下,能量的提高增强了脉冲之间的相互影响,这种影响引起的表面结构变化是有规律的;扫描速度和重复频率改变了脉冲之间的相对位置,每种相对位置都有对应的能量范围,单

个脉冲之间相互影响,形成最终的结构。

### 3.2.2 扫描间隔

实验采用的是扫描模式脉冲的输出,激光扫描间隔确定了脉冲束之间的纵向间距,由此影响了脉冲之间的作用结果,如图3(d)、(e)所示,激光作用结果中横向重复结构的间距与激光扫描间隔相近。图4展示了不同扫描间隔下表面结构的变化,可以看到这些重复结构的间距与设定的激光扫描间隔都是相近的,在其他参数不变的情况下,扫描间隔决定了横向重复结构的间距。当扫描间隔为0.05 mm时,中心出现了少量波纹结构[图4(b)],当扫描间隔增加到0.06 mm时,大部分都有波纹结构[图4(c)],这种波纹结构的水平

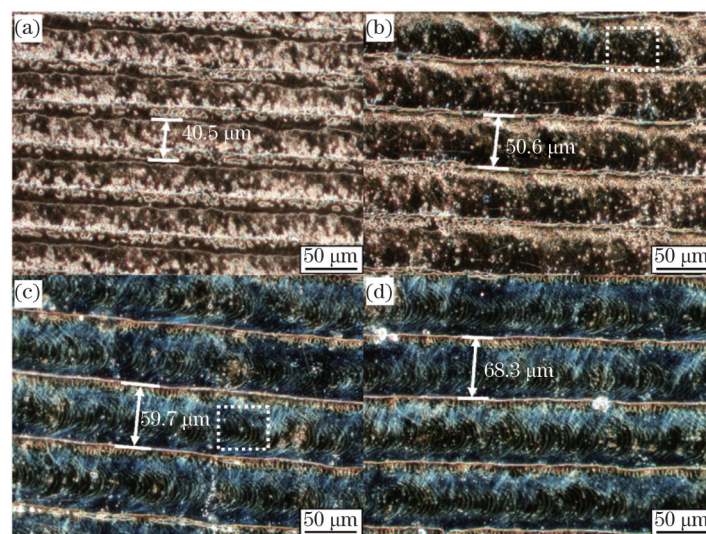


图4 当扫描速度为400 mm/s、重复频率为20 kHz、能量百分比为80%时不同激光扫描间隔下的显微图。(a) 0.04 mm;(b) 0.05 mm;(c) 0.06 mm;(d) 0.07 mm

Fig. 4 Micrographs under different laser scanning intervals at scanning speed of 400 mm/s, repetition rate of 20 kHz, and energy percentage of 80%. (a) 0.04 mm; (b) 0.05 mm; (c) 0.06 mm; (d) 0.07 mm

方向具有虹彩效果。推测这种波纹结构是由熔池效果引起的,激光沿水平方向扫描前进,脉冲的高能量使得表面急速升温融化,同时发射的脉冲每次都在原有基础上平移,不再有脉冲能量的地方迅速冷却成形。由于脉冲呈圆形,最终形成一个波纹,后续每一次脉冲束都会重复这一过程。激光间隔决定了纵向上相互影响的范围,较大的激光束重叠范围会使后续的脉冲熔化前面形成的波纹结构,并且由于激光改变了基底表面性质,吸收的能量更多,最终图 4(b)比图 4(c)的波纹结构更少。

综合前面的实验结果,我们推测激光诱导形成这种虹彩结构的过程,如图 5(a)所示。首先是一束激光沿水平方向平移扫描,其中激光脉冲相互堆叠,而不重叠部分因为没有后续能量的输入而冷却,重叠部分由于有能量而保持高温状态,相对的温度差异导致熔池形成波纹结构。扫描速度  $v$  和重复频率  $f$  决定单个脉冲的偏移量  $d_x$ ,从而确定脉冲形成的波纹结构位置。同时,激光的纵向平移使得脉冲束之间存在相对位移,连续的上下边缘形成横向的重叠线。如图 5(b)所示,第二束脉冲在前的基础上继续扫过,部分与前面重叠,该部分的能量破坏了前面

生成的波纹结构。由于基材性质改变(非镜面更粗糙),更多激光能量被吸收,熔池生成新波纹,过高的能量使得波纹冷却时间延长,波纹呈月牙状,同时上下边缘继续形成横向重叠线。激光束不断堆积重叠,如图 5(c)所示,波纹不断被破坏又重新被构建,横向重叠线也不断生成。激光能量影响单个脉冲之间的重叠效果和脉冲束之间的重叠效果,随着能量逐渐提高,最开始形成横向结构,接着形成波纹结构,当能量突破限制时,波纹消失,横向结构的界限分明,继续升高能量,所有结构都被破坏。由扫描速度  $v$  和重复频率  $f$  可预估波纹的大小,激光间隔确定脉冲束的相对位置。最终在激光垂直和平行方向上构建了一个包含周期性凹槽的反射光栅结构,当光入射时在几何光学角度上发生反射。在波动光学上,光在入射点处沉积,该点作为次波光源发射次波,不同的角度发射不同波长的光,也就是衍射现象,如图 5(d)所示。斜面上每个入射点都有衍射光,相同发射角之间的波长相同,相互干涉增强,在不同的角度上可以观测到高强度的单波光(虹彩);当入射光和观测角不变时,光栅凹槽角度和间距决定了被观测光的颜色。

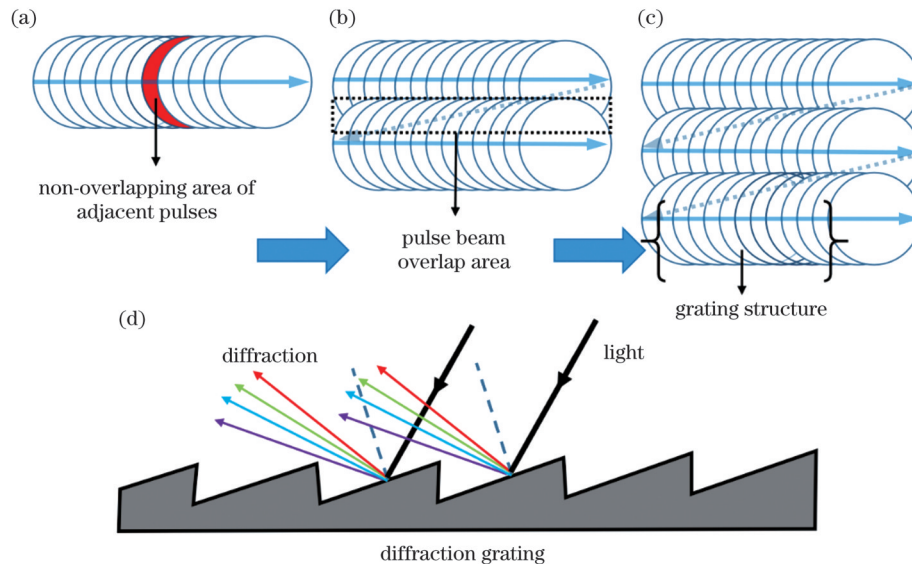


图 5 激光诱导不锈钢表面产生虹彩的过程。(a)~(c)激光对不锈钢表面的影响过程;(d)虹彩的产生原理

Fig. 5 Generation process of iris on stainless steel surface induced by laser. (a)~(c) Process of laser influence on stainless steel surface; (d) generation principle of iris

### 3.3 高速图案化

在生产中除了要考虑产品的效果外,还有制作速度和合格率。采取高扫描速度可以在几秒钟内完成成形,但会导致虹彩的均匀性降低,效果差,如图 6(g)、(h)所示,没有虹彩的部分不符合预期要求。这种缺陷的出现原因是激光脉冲使得不锈钢表面温度升高,在高扫描速度和较长的作用时间下,表面散热不足以对抗温度的升高,不锈钢整体温度升高,激光脉冲的影响范围增大,对已有结构的破坏程度增加。不锈钢本身

的导热性是很高的,因此消除这种不利影响有两种方式:一种是为不锈钢金属板增加降温装置;另一种则是延长制作时间,比如空跳时间(两束激光的间隔时间),增加散热。

我们采取了延长空跳时间的方法,图 6(a)~(f)为最终效果,比图 6(g)、(h)慢了 2 s,在 25 s 左右完成了尺寸为  $1.0\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$  的鹿图案。各种形状细节(鹿角)都有很好的表现,在光源强度不变的情况下不同方向上都有虹彩效果,其中条形缺陷来自于不锈钢表面



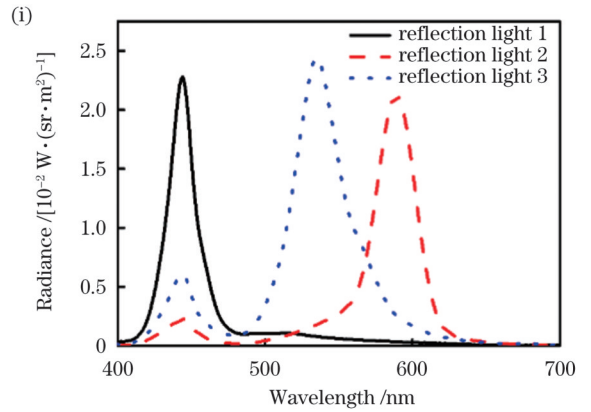
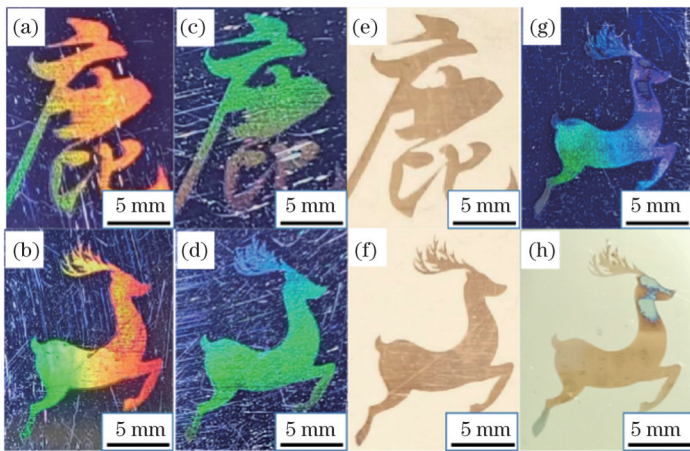


图 6 激光制备图案虹彩的效果图。(a)(b)垂直方向的虹彩效果;(c)(d)水平方向的虹彩效果;(e)(f)正常俯视;(g)(h)增加空跳时间造成的缺陷;(i)样品虹彩光谱数据

Fig. 6 Effect of pattern iris prepared by laser. (a)(b) Vertical iris effects; (c)(d) horizontal iris effects; (e)(f) normal overhead views; (g)(h) defects caused by increasing null jump time; (i) iris spectrum data of sample

的划痕。测得的样品光谱数据如图 6(i)所示,虹彩波长范围涵盖了大部分的可见光谱,符合我们的期望目标。

### 3.4 两种结构色共存

除了虹彩外,不锈钢表面还能形成另一种结构色。大幅提高激光输出功率,使不锈钢表面的类光栅结构完全被破坏,表面金属与氧气的反应加剧,形成氧化物薄膜,能量越高氧化物薄膜越厚,表面可展现不同的色彩。此时样品产生的颜色主要由表面氧化物的薄膜干涉和本身固有颜色组合而成,相比虹彩,其对角度的依赖性更低。根据前面的实验分析,不锈钢表面的虹彩是由脉冲重叠形成的波纹结构和脉冲束重叠的横向结构引起的,而干涉结构色与氧化物薄膜有关,考虑到人眼对颜色的识别不需要色彩的完全覆盖,我们采取了一种新工艺,将这两种结构组合在一起,以实现更丰富的图案信息储存。

将激光扫描间隔设定为 0.1 mm,通过改变激光的输出功率、扫描速度和重复次数( $n$ ),获得了不同的非虹彩的结构色,如图 7(a)~(d)所示,颜色方块的面积为  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ ,这些颜色的角度依赖性更小。该样品在高角度偏振光下能观测到虹彩色,图 7(e)~(h)是图 7(d)在不同偏振光倾斜角度( $\theta$ )下展现的虹彩色。在图 7(i)中,任意两束激光脉冲的影响区域都没有重叠,而且在结构边缘处存在明显的分界线,与没有受到激光作用的部分形成形貌差异,在高倾斜角度下这种形貌差异表现为能实现虹彩效果的光栅结构。在这种互不影响的激光脉冲作用下,样品中心部分的颜色由氧化物薄膜干涉和本身固有色组合而成,而边缘部分形成了具有虹彩结构色的光栅结构。最终形成了具有光栅衍射虹彩、薄膜干涉结构色及固有色的复合结构,并在不同的角度下三种颜色交替主导以表现不同色彩。

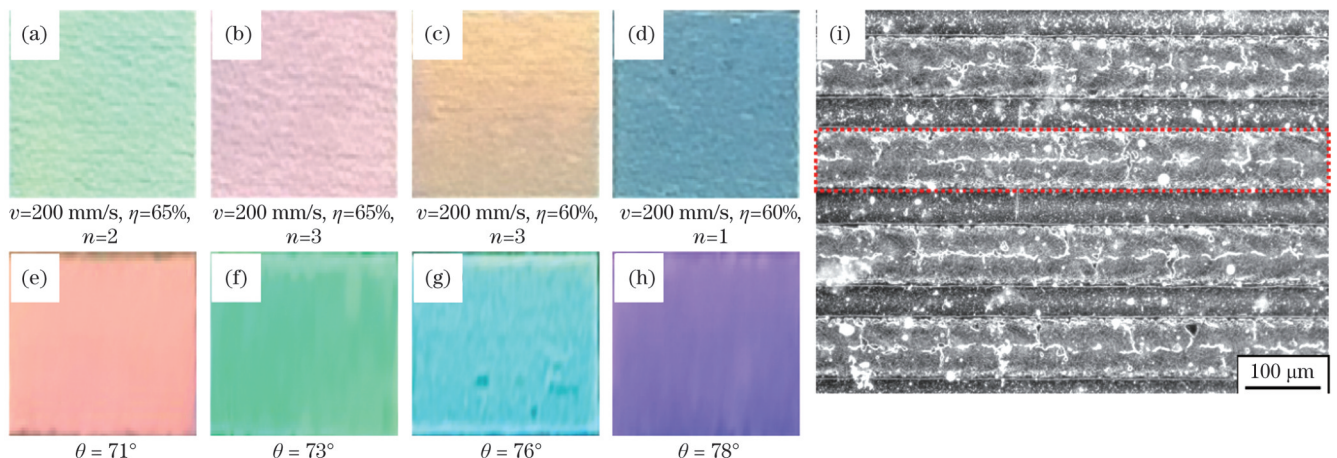


图 7 激光诱导不锈钢生成的复合结构颜色。(a)~(d)氧化薄膜产生的颜色;(e)~(h)图 7(d)在不同倾斜角度下产生的虹彩结构色;(i)图 7(d)的微观结构

Fig. 7 Laser induced composite structural colors of stainless steel. (a)~(d) Color produced by oxide film; (e)~(h) iris structural colors of Fig. 7(d) produced at different inclined angles; (i) microstructure of Fig. 7(d)

## 4 结 论

使用常见的纳秒光纤激光,通过激光直接书写的方式,在不锈钢金属板表面上高速构建了虹彩结构。根据实验结果,发现虹彩结构受到激光能量参数和扫描路径的影响,在一定条件下可以快速生成虹彩结构。增加激光能量会使虹彩结构从无到有再被破坏;激光的扫描路径、重复频率和扫描速度影响虹彩结构的波纹形态;产生虹彩效果的波纹是通过激光脉冲的平移由熔池边界演变而来的,符合布拉格干涉条件,得到的虹彩波长覆盖整个可见光谱。同时,利用特定工艺直接构建了一种具有光栅衍射虹彩、薄膜干涉结构色及固有色的复合结构,这种结构在不同的角度下可实现三种颜色交替主导的色彩表现,提供了一种新的表面个性化着色的方案。

### 参 考 文 献

- Dusser B, Sagan Z, Soder H, et al. Controlled nanostructures formation by ultra fast laser pulses for color marking[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2913-2924.
- Ageev E I, Veiko V P, Vlasova E A, et al. Controlled nanostructures formation on stainless steel by short laser pulses for products protection against falsification[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2117-2122.
- Xu L M, Liu H G, Chua T C, et al. Fabrication of SERS substrates by femtosecond LIPAA for detection of contaminants in foods[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 107954.
- 梁密生, 李欣, 王猛猛, 等. 空间整形飞秒激光加工金属微细槽实验研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202003.
- Liang M S, Li X, Wang M M, et al. Spatially-shaped femtosecond laser manufacturing of microgrooves in metals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202003.
- 矫知真, 李纪超, 陈招弟, 等. 激光加工减反射表面研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202011.
- Jiao Z Z, Li J C, Chen Z D, et al. Research progress on laser processing of antireflection surfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202011.
- Jwad T, Penchev P, Nasrollahi V, et al. Laser induced ripples' gratings with angular periodicity for fabrication of diffraction holograms[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 453: 449-456.
- Wlodarczyk K L, Ardron M, Weston N J, et al. Holographic watermarks and steganographic markings for combating the counterfeiting practices of high-value metal products[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 264: 328-335.
- 周运龙, 雷敏, 王陈林, 等. 激光刻蚀对 Ag/FTO/AZO 薄膜光学和电学性能的影响[J]. *中国激光*, 2022, 49(2): 0202007.
- Zhou Y L, Lei M, Wang C L, et al. Influences of laser etching on optical and electrical properties of Ag/FTO/AZO thin films[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(2): 0202007.
- Liu R J, Zhang D S, Li Z G. Femtosecond laser induced simultaneous functional nanomaterial synthesis, *in situ* deposition and hierarchical LIPSS nanostructuring for tunable antireflectance and iridescence applications[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 89: 179-185.
- 王翰章, 殷延蕊, 窦志强, 等. 不锈钢的激光着色研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(9): 0916001.
- Wang H Z, Yin Y R, Dou Z Q, et al. Laser coloring of stainless steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0916001.
- 张龙达, 李好发, 安丰硕, 等. 基于 Elman 神经网络的不锈钢微秒激光着色预测[J]. *中国激光*, 2022, 49(8): 0802010.
- Zhang L D, Li H F, An F S, et al. Elman-neural-network based prediction of microsecond laser coloring on stainless steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(8): 0802010.
- Lehmuskero A, Kontturi V, Hiltunen J, et al. Modeling of laser-colored stainless steel surfaces by color pixels[J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(2): 497-500.
- Li G Q, Li J W, Hu Y L, et al. Femtosecond laser color marking stainless steel surface with different wavelengths[J]. *Applied Physics A*, 2015, 118(4): 1189-1196.
- Liu Y H, Kuo K K, Cheng C W, et al. Femtosecond laser two-beam interference applied to 4H-SiC surface hierarchical micro-nano structure fabrication[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108081.
- Wu H, Jiao Y L, Zhang C C, et al. Large area metal micro-/ nano-groove arrays with both structural color and anisotropic wetting fabricated by one-step focused laser interference lithography[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(11): 4803-4810.
- Sun X Y, Wang W J, Mei X S, et al. Femtosecond laser-induced periodic oxidation of titanium film: structural colors both in reflection and transmission mode[J]. *Optical Materials*, 2020, 109: 110240.
- Veiko V, Odintsova G, Ageev E, et al. Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24342-24347.
- Kučera M, Martan J, Franc A. Time-resolved temperature measurement during laser marking of stainless steel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 125: 1061-1068.
- Xiang Y F, Mei R L, Azad F, et al. Investigation by nanosecond fiber laser for hybrid color marking and its potential application[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 147: 107553.
- Cui C Y, Cui X G, Ren X D, et al. Surface oxidation phenomenon and mechanism of AISI 304 stainless steel induced by Nd: YAG pulsed laser[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 305: 817-824.
- Lu G X, Trdan U, Zhang Y K, et al. The distribution regularity of residual stress on a metal surface after laser shock marking[J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 143: 103310.
- Shi X Y, Huang Z J, Laakso M J, et al. Quantitative assessment of structural and compositional colors induced by femtosecond laser: a case study on 301LN stainless steel surface[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 484: 655-662.
- 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.
- Ha B H, Ahn S, Bae H S, et al. Fast and direct engraving of iridescent lettering on original product surface using laser interference to prevent counterfeiting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 214-220.
- Teutoburg-Weiss S, Soldera M, Bouchard F, et al. Structural colors with embedded anti-counterfeit features fabricated by laser-based methods[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108012.
- Xie J, Wang F, Jiang L, et al. Periodic surface structures induced by femtosecond laser single pulse and pulse trains on metals[J]. *Laser Physics*, 2015, 25(5): 056103.
- 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.
- 樊玉杰, 李彬, 卢俊杰, 等. 纳秒激光烧蚀 GCr15 钢形貌演变规律研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(20): 2002201.
- Fan Y J, Li B, Lu J J, et al. Study on morphology evolution of GCr15 steel by nanosecond laser ablation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(20): 2002201.

# Rapid Preparation of Iris and Color Composite Patterns by Laser Direct Writing

Peng Di, Wang Dazheng, Zhang Guowei\*

*College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China*

## Abstract

**Objective** This study explores the utilization of laser technology to alter the surface structure of metals, producing rainbow-colored effects. Beyond aesthetic purposes, this method has potential applications in data storage and anti-counterfeiting measures. Laser modification of metal surfaces presents several advantages over alternative techniques: reduced processing time, user-friendly operations, rapid molding speeds, durable structures, and an environmentally-friendly process that produces no pollutants. However, present strategies for creating rainbow structures suffer from sluggish laser scanning rates, leading to slower molding speeds. Many of these approaches rely on laser polarization and interference, which produce relatively basic patterns. Storing intricate data requires multiple scanning passes. To address these challenges, this study employs nanosecond lasers to inscribe grating patterns directly onto stainless-steel surfaces, generating vibrant rainbow hues. A comprehensive statistical analysis is conducted to examine the influence of factors, such as laser power, scanning speed, scanning interval, and repetition frequency, on the shape transformations of the samples. By melding a range of rainbow effects, insights into the laser interaction with stainless-steel surfaces are obtained. Through systematic parameter adjustments, the mechanisms behind laser-induced rainbow coloration on stainless-steel surfaces are identified. Then, a composite structure, which combines grating diffraction rainbow hues, thin-film interference color, and the metal inherent color, is developed. This composite showcases a dynamic dominant color shift among its three colors, depending on the viewing angle. This investigation offers valuable insights for potential industrial implementations, seeks to enhance molding efficiency, and introduces innovative solutions for custom metal surface coloration.

**Methods** In this study, the relationship among the scanning speed, scanning interval, and repetition frequency is investigated to improve the molding speed. The variation trends among them are calculated and analyzed. Scanning speed of 400 mm/s, repetition frequency of 20 kHz, interval of 0.02 mm, and energy percentage of 55%–65% are chosen to observe the corresponding structural changes, and the effect of laser energy on the experimental results is analyzed. The scanning speed of 400 mm/s, repetition frequency of 20 kHz, energy percentage of 80%, and scanning interval of 0.04–0.07 mm are selected to observe the trend of structural changes and to analyze the effect of the scanning interval on the results. The experimental data are summarized, and the forming effect of the proposed scheme is verified. The parameter range required to achieve rainbow colors is determined, and the mechanism behind the changes in the stainless steel surface structure is deduced. Finally, a composite structure is formed after a single scan.

**Results and Discussions** We speculate that this rainbow-colored structure forms due to laser-induced effects (Fig. 5). Laser pulses superimpose on each other, and the parts that do not overlap, due to the absence of subsequent energy input, cool down. The overlapping parts maintain a high-temperature state because of the relative temperature difference, leading to wavy structures in the melt pool. Meanwhile, the translation mode of the laser causes the relative displacement between the pulses to be minimal, creating horizontal overlapping lines along the continuous upper and lower edges. The second pulse continues to sweep over the previous pulse, partially overlapping it. This portion of the energy wave either disrupts the previously formed wavy structures, creating new structures, or if the energy is too high, prevents the wavy parts from cooling down promptly. At the same time, the upper and lower edges keep forming horizontal intersection lines, and subsequent laser beams continuously superimpose in vertical and parallel directions of the laser, resulting in a rainbow effect (Fig. 6). At a scanning interval of 0.1 mm, a composite structure consisting of a grating diffraction iris, film interference structure color, and intrinsic color forms (Fig. 7).

**Conclusions** Using a standard nanosecond fiber laser, the surface of stainless-steel plate is directly etched to realize a high-speed rainbow structure. The results demonstrate that the rainbow structure is influenced by the laser energy parameters and scanning path. Under optimal conditions, structures are formed quickly. An increase in laser energy is found to compromise the rainbow structure from the outset. The ripple shape of the rainbow is determined by the laser scanning path, repetition frequency, and speed. By adjusting the laser pulses, a melt-pool boundary that adheres to the Bragg interference condition is formed, producing a wavering effect that spans the entire visible spectrum. Simultaneously, a composite structure that includes the grating diffraction iris, film interference structure color, and intrinsic color is constructed using a specific process. In this structure, alternating dominant colors for the three hues at different angles are achieved, offering a new personalized surface color scheme.

**Key words** laser technique; laser optics; surface structure; laser direct writing; structural color