

激光诱导自由曲面周期性纳米结构图案与着色

冯朝鹏, 程可, 曹凯强, 陈龙, 张羽婵, 贾天卿*

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241

摘要 利用波长为 532 nm、脉宽为 90 ns 的纳秒激光器, 精密五轴运动系统, 以及自主研发的计算机辅助制造程序, 通过精确控制机械运动和激光辐照参数, 在平面和自由曲面上制备了周期性亚波长条纹。研究了不同激光能流密度和扫描速率对条纹形成的影响, 发现能流密度 $F=7.52\text{ J/cm}^2$ 和扫描速率 $v=7\text{ mm/s}$ 时, 形成最佳条纹。结合激光偏振控制器件, 发展了一种同步偏振控制技术, 实现对激光偏振方向的同步控制, 从而实现对条纹方向的精确操控。同时研究了不同的条纹方向对着色效果的影响。在此基础上, 在不锈钢平板上制备了颜色鲜艳、外轮廓清晰的彩色图案, 进一步实现了曲面上复杂图案的制备。

关键词 激光技术; 周期性条纹; 自由曲面; 偏振控制; 着色

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111423

Laser Induced Periodic Nanostructure Pattern and Coloring on Free-Form Surface

Feng Chaopeng, Cheng Ke, Cao Kaiqiang, Chen Long, Zhang Yuchan, Jia Tianqing*

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract In this paper, periodic subwavelength ripples were fabricated on the plane and free-form surface by using nanosecond laser with wavelength of 532 nm and pulse width of 90 ns, precise five-axis motion system, and self-developed computer-aided manufacturing (CAM) program. The effects of laser fluence and scanning rate on the formation of ripples were studied. The results show that the best ripples are formed when fluence F is 7.52 J/cm^2 and scanning rate v is 7 mm/s . Combined with a laser polarization control device, a synchronous polarization control technology was developed to achieve synchronous control of the laser polarization direction, so as to achieve precise control of ripple direction. At the same time, the effect of ripple direction on the coloring effect was studied. Furthermore, a bright color pattern with clear outer contour can be obtained on a stainless steel plate, which further realizes the preparation of complex patterns on curved surfaces.

Key words laser technique; periodic ripples; free-form surface; polarization control; coloring

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 260.5430

1 引言

激光诱导周期性表面结构(即所谓的“周期性条纹”)的功能化应用领域包括抗反射^[1-3]、防伪^[4-5]、材料表面着色^[5-9]、修改材料表面浸润性^[10-12]、改变菌落或细胞生长速度、控制细胞反应^[13-14]、改变摩擦学性能^[15-18]等。

研究人员对周期性条纹的研究始于 1965 年, 已经经历了半个多世纪, 目前有散射光模型和表面等离极化激元模型等理论可解释周期性条纹的形成机制。纳秒激光诱导周期性条纹可通过散射光模型来解释, 即样品表面散射光与入射激光相互干涉, 导致能量呈现周期性分布, 最终导致条纹的形成^[19]。

周期性条纹的主要特征有条纹的周期、方向和

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2019-12-19; 录用日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(11474097)、上海市科学技术委员会(19ZR1414500)、中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室开放基金(19CK010301)

* E-mail: tqjia@phy.ecnu.edu.cn

深度。条纹周期由入射光波长和入射角决定,方向由激光偏振方向决定,深度与激光能流密度、脉冲数有关。

飞秒激光热效应小,加工精度高,但功率较低,价格昂贵。与飞秒激光相比,皮秒激光功率较大,价格较优惠,技术日益成熟,有广泛的应用前景。与皮秒激光器相比,纳秒激光器价格更便宜,功率更大,稳定性更好,成本和效率方面比皮秒激光器更有优势。

周期性条纹的方向受激光偏振方向影响,而周期性条纹方向的不同对材料表面功能特性具有重要影响。激光偏振状态的改变,可以借助于波片或者衍射光学元件。Hermens 等^[20]通过扫描振镜实现了在自由曲面内分区域操作周期性条纹的功能,通过对样品姿态的调整,激光对不同区域的影响力保持了一致,但在一个扫描区域内激光入射方向存在不一致的问题,因此随着激光作用位置的改变,诸多加工参数发生微小的变化。偏振器件通常无法实现与激光器、三维运动系统的并行控制,响应速度、自动化程度和精度往往无法同时满足。

对于二维平面,选择合适的距离可以实现周期性条纹无缝拼接;对于三维自由曲面,无缝拼接的难度较大,传统的计算机辅助制造(CAM)软件无法实现这一目的。

本研究为全面解决上述问题提供了新的思路,探索对纳秒激光加工过程中能流密度、扫描速率等参数的控制方案,以极大地改善其相比于飞秒激光加工的不足,同时满足高效率和高精度的加工要求。使用商用纳秒激光器、精密五轴运动系统和激光偏振控制器件,组建一个结构简单、性能稳定的处理系统,开发的算法程序可以根据样品几何结构生成控制代码,实现对位移系统的高精度运动控制。在平面和自由曲面材料表面周期性纳米结构任意图案制备实验中,这种算法和代码的有效性得到验证。

值得说明的是,通过灵活控制激光通过的半波片,在三维表面上精确制备周期性纳米结构构成的复杂图案实验中实现了样品位置与激光偏振方向的同步改变,即在激光扫描过程中,实时操控周期性条纹生成方向。不同偏振方向导致周期性条纹方向变化的颜色效应可以从镜面抛光不锈钢平板激光着色实验得到验证。

2 实验方法

2.1 实验装置

不锈钢是一种常用的工业金属,在实验中被广

泛使用。304 不锈钢板(厚度 $T=0.5$ mm,算术平均粗糙度 $R_a=0.02$ μm ,最大高度 $R_z=0.18$ μm)在被激光处理前用乙醇清洗。

金属材料表面周期性纳米结构任意图案制备技术是一种基于激光诱导形成具有给定方向的周期性表面纳米结构,通过精密运动控制改变样品和激光焦点的相对位置技术。

如图 1 所示,搭建了二极管泵浦、二次谐波调 Q 的 Nd:YAG 纳秒激光器(Myron-20-0, UpTek Solutions Corp, 纽约, 美国)加工系统。该激光器可提供脉宽 $\tau=90$ ns、中心波长 $\lambda=532$ nm、最大功率 >20 W@10 kHz、重复频率 $P_{\text{RF}}=1\sim 10$ kHz 的线偏振激光脉冲。使用由 1/2 波片(Thorlabs Inc., 牛顿市, 新泽西州, 美国)制作的偏振旋转器调节激光束的偏振方向。经过焦距 $f=250$ mm 的凸透镜后,激光作用在样品表面。样品固定在五轴运动系统上,该系统的参数为: X 轴精度为 1 μm ,行程为 600 mm; Y 轴精度为 1 μm ,行程为 300 mm; Z 轴精度为 1 μm ,行程为 300 mm; THETA_A 轴精度为 3", THETA_B 轴精度为 6"。激光和样品作用的位置和方向可以被精确控制。

与 1064 nm 的红外激光相比,532 nm 的绿光激光热效应更小,加工精度更高,因此优先选用绿光。许多研究工作表明,激光脉宽越窄,加工热效应越小,条纹越规则^[21-22]。本实验中,激光器脉宽固定为 90 ns。如果使用最新的 20 ns 或 2 ns 激光器,效果会更好一些。

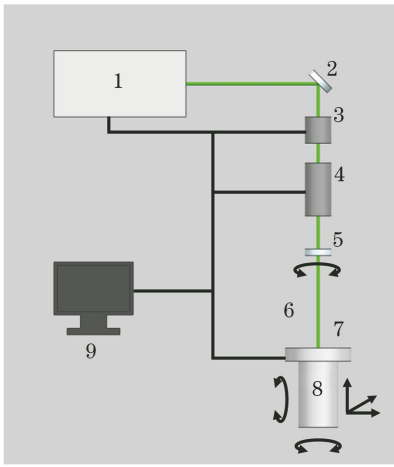
不同方向的周期性条纹之间的差异是可以通过肉眼分辨颜色差异而观察到的。样品被放置在一个玻璃板上,一个白光光源沿着玻璃板移动,来自光源的光以一定角度照射在样品上,由于周期性条纹的衍射,使用 CCD 可以从不同角度观察到不同的光谱成分。

2.2 实现方案

图 2 展示了实验过程的 4 个阶段:

1) 二维或三维图形结构设计。通过精密控制五轴系统的运动,可以在平板或者三维曲面上加工具有复杂空间形状的着色图案。这个过程不使用掩模版,大大提高了加工的灵活性和效率,降低了成本。另外本过程不需要使用振镜。

2) 代码生成和测试。根据机器人运动控制原理,开发代码生成软件。软件在数学算法上考虑了工件初始安装位置、姿态和系统的几何尺寸等参量,从而使得控制更加精确,加工效果也不会因初始安



1: laser; 2: mirror system; 3: half-wave plate and liquid crystal polarization rotator; 4: dynamic beam expander; 5: lens; 6: laser beam; 7: sample; 8: 5-axis handling system; 9: computer with control software solution

图 1 解决方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solution

装状态不同而发生变化。

3) 误差检测和校准。步骤 2) 的测试结果用于生成误差数据,代码生成软件可以根据误差数据生成新代码,以大幅提高加工精度。

4) 代码执行。运行最终代码时偏振控制器件也可以同步运动。

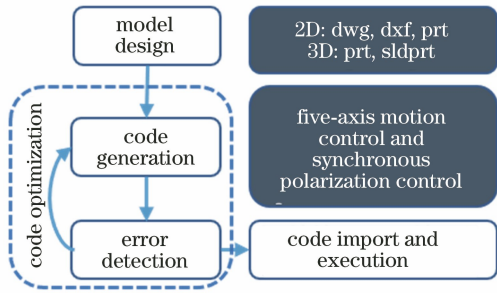


图 2 一种通过激光诱导周期性表面纳米结构制备表面图案的方案

Fig. 2 Scheme of surface pattern preparation using laser induced periodic surface nanostructures

3 分析与讨论

3.1 实验条件

表面周期结构形成受到脉冲能量、光偏振、样品上的光斑大小和样品上光斑重叠等因素的影响,实验过程中通过控制以上几个关键参数研究周期性条纹形成的条件。

图 3 是在能流密度 $F = 7.07 \sim 7.96 \text{ J/cm}^2$ 条件下得到的。对于每个能流密度,每个周期性条纹结

构对应的扫描速率变化范围为 $6 \sim 9 \text{ mm/s}$ 。结构表面出现了具有不同周期的条纹,这表明每个辐照序列都是物质激发的一种特定方式,决定了最终态的形貌。当扫描速率为 7 mm/s 时,随着能流密度的增大,条纹深度先加大,但生成周期性条纹的区域占总区域的比例先增加后减小。这表明,在某一扫描速率下,能流密度过大或过小都不利于周期性条纹的生成,而是应该选择适当的能流密度。设置能流密度为 7.52 J/cm^2 ,当扫描速率较低时,材料表面获取的能量较多,表面出现褶皱,随着扫描速率增加到 7 mm/s ,褶皱的程度降低。扫描速率达到 8 mm/s 时,材料表面生成周期性条纹的区域比例降低。因此将扫描速率和能流密度都控制在合适的范围,对于有效诱导周期性条纹是必要的。

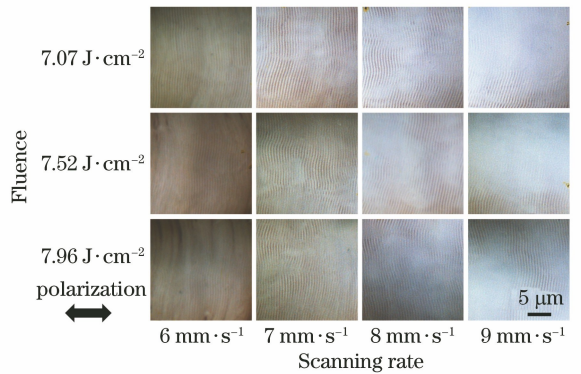


图 3 镜面抛光的 304 不锈钢表面在不同能流密度和扫描速率下由纳秒激光诱导形成的周期性纳米结构的光学照片

Fig. 3 Optical photographs of periodic nanostructures induced by nanosecond lasers at different fluences and scanning rates on mirror polished 304 stainless steel surfaces

为了更好地掌握周期性条纹生成的条件,在以下加工条件下进行激光扫描:激光能流密度的范围为 $3.32 \sim 10.17 \text{ J/cm}^2$,激光束的聚焦光斑(圆形光斑直径 $d = 24 \mu\text{m}$)沿着样品表面的扫描速率 v 的范围为 $1 \sim 12 \text{ mm/s}$ 。图 4 所示为不同能流密度和扫描速率下形成的周期性条纹情况图。颜色所代表

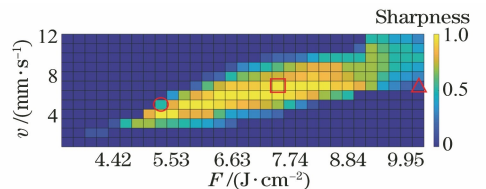


图 4 扫描速率、能流密度对周期性条纹形成的影响
Fig. 4 Effects of scanning rate and fluence on periodic pattern formation

的数值越大,表示生成的周期性条纹越清晰。周期性条纹清晰度的计算依据是周期性条纹清晰可见的部分和总面积的比例。

周期性条纹的参数主要反映在周期、清晰度、方向等方面。条纹的周期和激光波长有关,本实验中,利用扫描电子显微镜进行观察,得到的条纹周期约为 530 nm。

3.2 周期性条纹清晰度和规则度对着色的影响

通过调整激光能流密度和扫描速率,周期性条纹的清晰度和规则度将发生改变。如图 4 所示,选取 $F = 5.31 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 5 \text{ mm/s}$ 、 $F = 7.52 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 7 \text{ mm/s}$ 、 $F = 10.17 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 7 \text{ mm/s}$ 三种条件研究条纹形成情况和着色效果。

图 5(a)~(c)展示了在平面不锈钢样品上 $F = 5.31 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 5 \text{ mm/s}$ 的条件下(对应图 4 中圆圈标记的情况)周期性条纹的着色效果。图 5(d)为在该样品的着色区域拍摄的 SEM 图像,该图像显示了此条件下条纹清晰度很低,并且出现断续的情况。如图 5(g)中短点线所示,该条纹 SEM 图像傅里叶变换频谱的空间频率分布较分散,虽然在 $k_x = 2.095 \mu\text{m}^{-1}$ 时曲线出现峰值,但是峰值归一化后的强度只有 0.17,说明条纹排列不够规则。以上因素导致图 5(a)所示的条纹着色效果较差。

图 5(b)展示的是在 $F = 7.52 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 7 \text{ mm/s}$ 的条件下(对应图 4 中矩形标记的情况)周期性条纹的着色效果。在这种情况下,从图 5(e)可以看出条纹排列规则,清晰度较高。图 5(g)中实线表明该条纹空间频率分布较为集中,在 $k_x = 1.9 \mu\text{m}^{-1}$ (对应的条纹周期为 526 nm,接近入射激光波长)时曲线出现峰值。以上因素导致图 5(b)所示的条纹着色效果良好,颜色明亮。

图 5(c)展示了在 $F = 10.17 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 7 \text{ mm/s}$ 的条件下(对应图 4 三角形标记的情况)周期性条纹的着色效果。这种情况下,激光能流密度较大,由于强烈的烧蚀过程,图片[图 5(f)]明显较暗。通过傅里叶变换频谱曲线[图 5(g)中虚线]可以看出,条纹空间频率分布相对集中,但是由于强烈的烧蚀作用,条纹清晰度和规则性较差,因此着色较差。

图 5(g)显示了 $k_y = 0 \mu\text{m}^{-1}$ 时,条纹沿着 k_x 方向的空间频率分布,图中曲线可以很好地表现条纹周期的分布情况,但是无法体现条纹的平直性。图 6 用二维傅里叶分析方法从 k_x 和 k_y 两个方向分析条纹的空间频率分布,图 6(a)显示了 $F = 7.52 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 7 \text{ mm/s}$ 时,频谱强度峰值主要集中

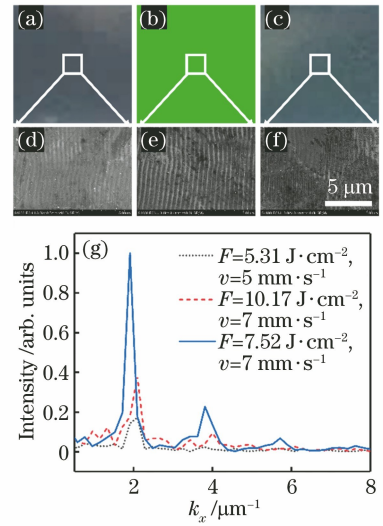


图 5 条纹清晰度和规则度对着色的影响。(a)~(c)分别是图 4 中圆形、正方形和三角形所标记的三种实验条件的着色效果图;(d)~(f)分别是图 5(a)~(c)对应的 SEM 图;(g) SEM 图像的傅里叶变换取 $k_y = 0 \mu\text{m}^{-1}$ 的频谱图

Fig. 5 Effects of ripple sharpness and regularity on coloration. (a)–(c) Coloring renderings of three experimental conditions marked in figure 4 by circle, square, and triangle, respectively; (d)–(f) SEM images corresponding to Fig. 5(a)–(c); (g) frequency spectrum of Fourier transform of SEM images at $k_y = 0 \mu\text{m}^{-1}$

在 $k_y = 0 \mu\text{m}^{-1}$ 、 $k_x = \pm 1.9 \mu\text{m}^{-1}$ 位置附近,这说明 k_x 方向上条纹分布的周期较一致,条纹比较平直和规则,因此着色亮度较高。图 6(b)显示了 $F = 10.17 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 7 \text{ mm/s}$ 时,频谱峰值主要集中在 $k_y = -0.5 \sim 0.5 \mu\text{m}^{-1}$ 、 $k_x = \pm 2.095 \mu\text{m}^{-1}$ 位置附近,这说明 k_x 方向上条纹分布的周期相对一致,但是条纹平直性较差、不够规则,因此着色亮度较低。而图 6(c)显示了 $F = 5.31 \text{ J/cm}^2$ 、 $v = 5 \text{ mm/s}$ 时,频谱峰值主要集中在 $k_y = -0.2 \sim 0.2 \mu\text{m}^{-1}$ 、 $k_x = \pm 2.095 \mu\text{m}^{-1}$ 位置附近,但是强度较低,这说明 k_x 方向上条纹周期性较差,且条纹平直性不够高、不够规则,因此着色亮度很低。

3.3 同步偏振控制

周期性条纹表面功能化应用的一个重要方向之一是产品防伪,该技术最重要的参数是表面颜色及其可控变化。为了对表面颜色进行调节,使用控制周期性条纹定位角的方法。将偏振旋转器安装在聚焦透镜附近,激光偏振方向随着偏振旋转器的旋转发生改变,相应地,周期性条纹方向相对扫描方向发生变化。图 7 展示了不同方向的周期性条纹和偏振

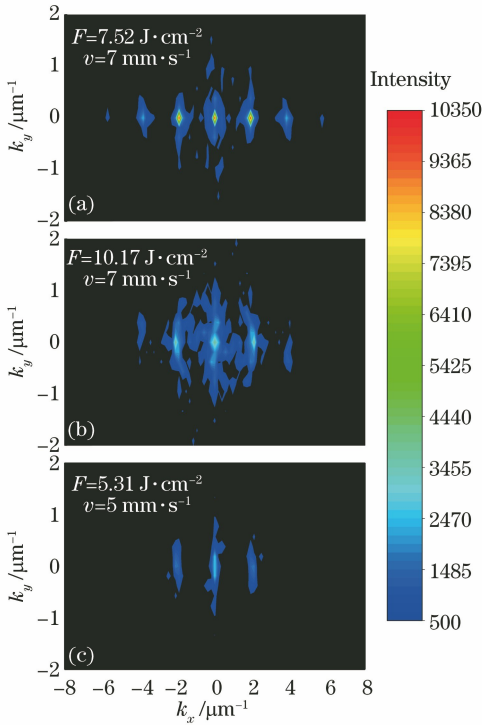


图 6 SEM 图像傅里叶变换频谱。(a)~(c)分别对应图 5(e)、5(f)和 5(d)的二维傅里叶变换图

Fig. 6 Fourier transform spectra of SEM image. (a)~(c) Two-dimensional Fourier transforms corresponding to Figs. 5 (e), (f), and (d), respectively

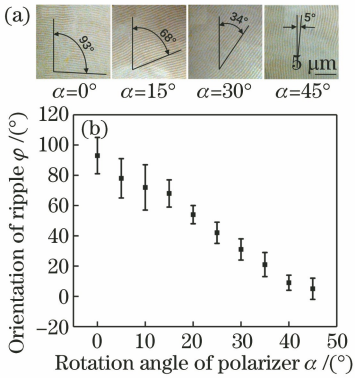


图 7 使用偏振旋转器控制条纹方向。(a)具有不同方向角(φ)的周期性条纹的光学照片;(b)周期性条纹方向角(φ)对偏振片旋转角度(α)的依赖

Fig. 7 Direction control of ripples by polarization rotator. (a) Optical images of periodic ripples with different orientation angle (φ); (b) periodic ripple direction angle (φ) dependence on rotation angle (α) of polarizer

器旋转方向角的相关关系。激光电场矢量投影的变化驱动着周期性条纹方向的变化。虽然激光偏振和入射角对周期性条纹方向控制的物理原因尚不清

楚,但周期性条纹方向控制的精度是可以保证的。

周期性条纹的性质接近于衍射光栅。因此,可以通过周期性条纹的衍射现象,即通过光照射样品表面有周期性条纹的部分获得颜色效应,来识别这些条纹^[4]。Vorobyev 和 Guo^[6]已经研究了金属表面周期性结构的这种颜色效应。Lochbihler^[23]已经展示了用纳米结构在金属表面上获得图像的潜力,但使用的是经典的光栅雕刻方法。

实验中使用前期探索中得到的最佳周期性条纹生成条件进行往复式大面积扫描,根据光斑直径将每次扫描间隔设置为 24 μm。使用等间隔匀速往复式直线扫描的办法,在激光能流密度 $F = 7.52 \text{ J/cm}^2$ 、扫描速率 $v = 7 \text{ mm/s}$ 的加工参数下,在 304 不锈钢样品表面制作了由 18 个正方形构成的扫描图像,如图 8 所示。每个正方形内周期性条纹的方向以 10°的间隔从 0°变化到 170°,实现了样品颜色随偏振方向的改变而改变。

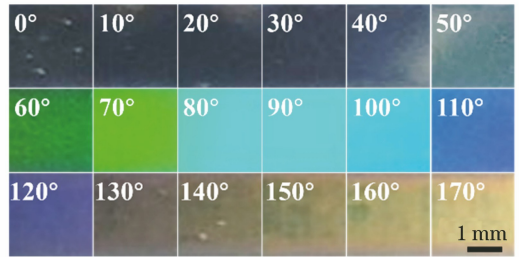


图 8 偏振方向对着色的影响

Fig. 8 Effect of polarization direction on coloring

在用于产品防伪时,需要考虑周期性条纹着色效应的可靠性,以上着色效果是由图像采集系统在光源、样品的方位和观察角度处于某一特定关系下得到的。当需要重新获取完全一致的着色效果时,必须以同样的位置关系采集图像信息,这一颜色读取过程是可重复的。另外,通过调节周期性条纹方向得到不同颜色,而条纹方向取决于激光偏振方向。于是得到了图 9 所示的 RGB 颜色空间各成分演化曲线,每条曲线代表一种颜色分量随周期性条纹方向的变化。

通过对曲线的分析可知每条曲线的斜率变化不同,而且不规律。对于曲线 R,条纹方向在 0~30°时,R 的数值在 50 左右;当条纹方向从 30°增加到 40°时,R 值从 57 增加到 98;当条纹方向从 40°变化至 50°时,R 值基本不变;当条纹方向从 50°变化至 100°时,R 值迅速下降。事实上,在不同的条纹方向上,每个 RGB 曲线斜率都很重要,对于不同的样品,曲线的差异总是存在的,这在产品防伪中十分重要。

图10展示了使用激光诱导周期性表面结构构

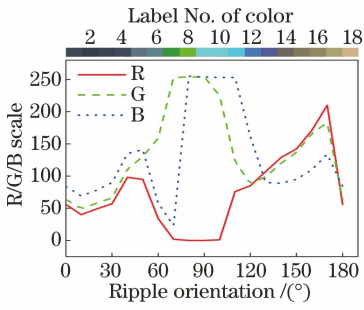


图 9 RGB 颜色空间各成分的演化

Fig. 9 Evolution of each component of RGB color space

成复杂表面图形技术在镜面抛光不锈钢(304)表面制备的花朵图案的颜色效果。光学照片显示,同一光源、不同视角下,花朵图案可以呈现不同颜色。

类似地,为了进一步体现本文对周期性纳米结构方向和分布等方面的精确操控能力,制备了图 11 所示的镜面抛光不锈钢表面的校徽图案。图 11 (a)、(b)分别为不同观察角度下的着色效果。当微小改变观察角度时,分布周期性条纹区域的颜色效果发生明显变化。这一点再次显示了精密制备的周期性纳米结构精确表征外部环境变化的巨大潜力。

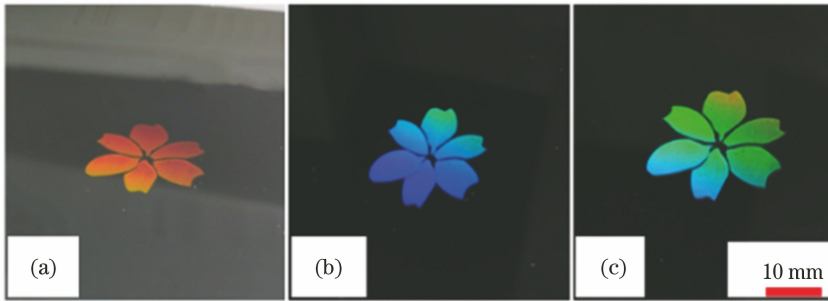


图 10 周期性纳米结构在镜面抛光的 304 不锈钢表面构成花朵图案。(a)表面观察角较大时花朵主体呈现橙红色;(b)减小观察角度时,花朵主体变为蓝色;(c)进一步减小观察角度时,花朵主体变为绿色

Fig. 10 Flower patterns on surface of mirror polished 304 stainless steel based on periodic nanostructures. (a) Main body of flower appears orange-red when viewing angle is large; (b) flower body turns blue when viewing angle is reduced; (c) main body of flower shows green when viewing angle is further reduced



图 11 镜面抛光不锈钢表面校徽图案光学照片

Fig. 11 Optical photographs of school logo on mirror polished stainless-steel surface

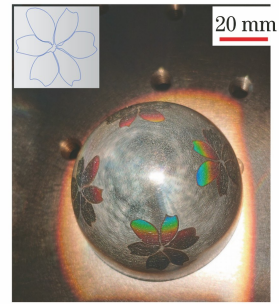


图 12 自由曲面上复杂图形颜色效应

Fig. 12 Color effect of complex shapes on free-form surfaces

进一步地,使用所开发的系统解决方案在不锈钢球体的不同区域上演示了在自由曲面上具体操作周期性条纹的功能。这些区域在不同的激光偏振方向下有不同的条纹方向。但是,激光的入射方向总是和与材料相互作用时所在位置的曲面法线方向一致,除偏振方向外,着色区域内每个位置的加工参数相同。图 12 展示了曲面不锈钢表面周期性纳米结构的颜色效应,花瓣图案颜色鲜艳,外轮廓清晰,显示了本文方法在曲面上精密操控周期性纳米结构的能力。

4 结 论

使用纳秒激光,通过精确的运动和参数控制制备复杂形状图案,成功实现了在平面、自由曲面上对激光诱导纳米周期性结构的精确操控。发展了一种同步偏振控制的技术,实现了在激光扫描的同时改变偏振方向。针对周期性条纹构成的平面图案的颜色效应,研究了激光偏振控制对条纹方向改变的作用和不同条纹方向对着色效果的影响。曲面纳米周期性结构构成的复杂图案制备方式与使用扫描振

镜的方式相比,图案区域内每个位置的加工参数得到更加精密的一致性控制,从而在自由曲面上得到了高度规则的周期性纳米结构。

参 考 文 献

- [1] Vorobyev A Y, Guo C L. Antireflection effect of femtosecond laser-induced periodic surface structures on silicon [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (S5): A1031-A1036.
- [2] Ionin A A, Klimachev Y M, Kozlov A Y, et al. Direct femtosecond laser fabrication of antireflective layer on GaAs surface[J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(3): 419-423.
- [3] Yao T F, Wu P H, Wu T M, et al. Fabrication of anti-reflective structures using hot embossing with a stainless steel template irradiated by femtosecond laser[J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(9): 2908-2912.
- [4] 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.
- [5] Li G Q, Li J W, Hu Y L, et al. Realization of diverse displays for multiple color patterns on metal surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 316: 451-455.
- [6] Vorobyev A Y, Guo C L. Colorizing metals with femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(4): 041914.
- [7] Ou Z G, Huang M, Zhao F L. Colorizing pure copper surface by ultrafast laser-induced near-subwavelength ripples[J]. *Optics Express*, 2014, 22 (14): 17254-17265.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Zhang J Z, Chen F, Yong J L, et al. Research progress on bioinspired superhydrophobic surface induced by femtosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110001. 张径舟, 陈烽, 雍佳乐, 等. 飞秒激光诱导仿生超疏水材料表面的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110001.
- [11] Pan H H, Wang Z, Fan W Z, et al. Superhydrophobic titanium surface micro/nanostructures induced by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0802002. 泮怀海, 王卓, 范文中, 等. 飞秒激光诱导超疏水钛表面微纳结构 [J]. *中国激光*, 2016, 43 (8): 0802002.
- [12] Cunha A, Serro A P, Oliveira V, et al. Wetting behaviour of femtosecond laser textured Ti-6Al-4V surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 265: 688-696.
- [13] Shinonaga T, Tsukamoto M, Kawa T, et al. Formation of periodic nanostructures using a femtosecond laser to control cell spreading on titanium[J]. *Applied Physics B*, 2015, 119(3): 493-496.
- [14] Martínez-Calderon M, Manso-Silván M, Rodríguez A, et al. Surface micro- and nano-texturing of stainless steel by femtosecond laser for the control of cell migration [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36296.
- [15] Bonse J, Koter R, Hartelt M, et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures on steel and titanium alloy for tribological applications [J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(1): 103-110.
- [16] Eichstädt J, Römer G R B E, Huis in 't Veld A J. Towards friction control using laser-induced periodic Surface Structures [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 7-15.
- [17] Bonse J, Höhm S, Koter R, et al. Tribological performance of sub-100-nm femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 374: 190-196.
- [18] Bonse J, Koter R, Hartelt M, et al. Tribological performance of femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium and a high toughness bearing steel [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 336: 21-27.
- [19] Emmony D C, Howson R P, Willis L J. Laser mirror damage in germanium at 10.6 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 23(11): 598-600.
- [20] Hermens U, Pothen M, Winands K, et al. Automated polarization control for the precise alignment of laser-induced self-organized nanostructures [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 101: 44-50.
- [21] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser

- ablation of solids [J]. Applied Physics A, 1996, 63 (2): 109-115.
- [22] Ancona A, Döring S, Jauregui C, et al. Femtosecond and picosecond laser drilling of metals at high repetition rates and average powers [J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3304-3306.
- [23] Lochbihler H. Colored images generated by metallic sub-wavelength gratings [J]. Optics Express, 2009, 17(14): 12189-12196.