

## 基于均匀随机分布偏移相位的轧辊激光毛化技术

马仁豪, 禹玄毅, 李健垚, 沈重阳, 邓晓旭\*

上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

**摘要** 提出一种基于随机分布偏移相位的轧辊表面峰值密度(PPI)和粗糙度范围可控的无序激光毛化技术。利用多光束干涉原理,分析轧制带钢表面反射光之间形成明暗相间条纹的机制。基于光线追迹方法,研究凸台微结构在等间距分布基础上的偏移产生的随机分布相位,对轧制带钢表面单一波长反射光形成的干涉条纹的影响,以使带钢表面多种波长反射光干涉条纹叠加形成的莫尔条纹近乎消失。轧辊表面凹坑微结构中心间距随机偏移与衰减性“拷贝”获得的轧制带钢表面凸台相同,采用理论与模拟分析得到的均匀分布中心间距随机偏移,利用激光雕刻方法对轧辊材料样件进行无序激光冲击毛化,毛化样件表面粗糙度为 $3.79\ \mu\text{m}$ ,PPI为179。所提出的基于均匀分布偏移相位的无序激光可控轧辊毛化技术,实现了PPI和粗糙度范围可控的轧辊毛化,并且可灵活控制轧制带钢表面质量。

**关键词** 表面光学; 多光束干涉; 激光毛化; 冷轧轧辊; 均匀随机分布; 偏移相位

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231742

## 1 引言

激光毛化(LT)技术是采用脉冲激光束冲击轧辊表面,轧辊材料被加热熔化,部分气化,熔融的金属冷却形成微米级毛化凹坑,轧辊表面被毛化的同时完成快速淬火冷却,形成相变硬化表面<sup>[1-2]</sup>,进而提升轧辊的耐磨性,延长毛化轧辊的使用寿命<sup>[3-4]</sup>。激光毛化在轧辊表面形成的凹坑比较圆滑,能有效地避免轧辊韧性降低、残余应力集中等问题<sup>[5]</sup>;激光毛化过程中材料的气化对熔融物质形成冲击,不存在电火花毛化的排屑困难问题<sup>[6]</sup>。因此,激光毛化技术深冲性能优良<sup>[7]</sup>,并且加工过程中污染很小,是一种清洁的生产技术。

基于轧辊表面凹坑形貌衰减性“拷贝”得到带钢表面凸台微结构,具有规则性和一致性的轧辊表面微结构将导致冷轧带板表面出现干涉条纹等问题,因此无序毛化是激光毛化技术研究的主流。国内外的轧辊表面无序激光毛化技术主要包括无规则延时法、无规则偏转法和无规则图像雕刻法。无规则延时法通过改变激光脉冲的控制信号,输出随机占空比或频率的激光脉冲,在轧辊表面实现无序的激光毛化<sup>[8-9]</sup>。无规则偏转法<sup>[10]</sup>在激光毛化装置中增加伪随机偏转的振镜,通过调节激光束在轧辊表面的随机位置偏移,实现了无序的激光毛化。无规则图像雕刻法依据计算机离线生成无规则位置图像,对轧辊进行激光毛化加工,使毛化微坑在轧辊表面的圆周向和轴向形成无规则分布<sup>[11]</sup>,

形成可控的二维无序毛化表面。

本文采用多光束干涉原理,基于随机分布偏移相位分析了轧制带钢表面微结构反射光之间形成的明暗条纹消失的机理。利用光线追迹方法模拟了中心间距不同、偏移位置服从不同随机分布函数的带钢表面凸台微结构的单一波长反射光的相干辐照度。当凸台微结构的中心偏移量服从均匀分布时,单一波长反射光的相干辐照度分布的无序性最好,导致轧制带钢表面多波长自然光反射形成的莫尔条纹近乎消失。基于轧辊表面微结构的反射光多光束干涉效应与衰减性“拷贝”得到的带钢表面微结构一致,偏移相位服从相同的随机分布。实验测定轧辊毛化凹坑形貌与激光<sup>[12-13]</sup>冲击条件的对应关系,采用理论分析得到凹坑中心位置偏移量的均匀分布函数,利用激光雕刻法通过实验在轧辊材料样件表面完成小区域无序激光冲击毛化,得到的粗糙度为 $3.79\ \mu\text{m}$ ,PPI为179。通过调整凹坑中心间距及其偏移量服从的均匀分布函数特征参数,选择相对应的激光冲击条件,实现具有不同PPI和粗糙度范围的毛化轧辊,进而满足轧制带钢表面的不同质量需求。

## 2 多光束干涉原理

轧辊表面激光毛化凹坑的形状相似,当其分布位置也具有规律性时,例如等间距分布,轧制过程将轧辊表面形貌衰减性地“拷贝”到带钢表面,在带钢表面形成具有相似形状和等间距排布的凸台,导致带钢表面

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2023-12-14; 录用日期: 2023-12-29; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(61927822)

通信作者: \*xxdeng@sjtu.edu.com

在光照条件下形成条纹。由于地日距离远大于规律分布凸台间距尺寸,可认为太阳光平行入射到钢板表面,考虑在单一波长的入射光下,相邻凸台同样位置处反射光束之间会存在固定的光程差和相位差,产生定域多光束干涉现象,如图 1 所示。不同波长入射光形成的反射光之间多光束干涉图像相叠加,最终在特定空间位置处形成莫尔条纹。

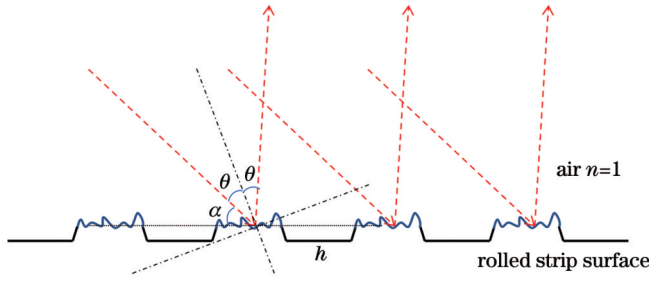


图 1 轧制带钢表面光线反射简图

Fig. 1 Schematic of reflection on rolled strip steel

对于轧制带钢表面凸台同样位置处相同波长的入射光,设光线的入射角为  $\theta$ ,入射光线与水平面的夹角为  $\alpha$ ,相邻凹坑中心的间隔为  $h$ ,相邻反射光线之间的光程差为  $\Delta$ ,波长为  $\lambda$ ,如图 1 所示。相邻反射光程引起的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi h \sin \alpha - 2\pi h \sin(2\theta + \alpha)}{\lambda}. \quad (1)$$

凸台相同位置处反射光形成的总光场为

$$\begin{aligned} \tilde{E}_r &= \tilde{E}_{r_1} + \tilde{E}_{r_2} + \tilde{E}_{r_3} + \dots = rA(1 + e^{i\delta} + e^{2i\delta} + \dots) = \\ &= rA \frac{1 - e^{im\delta}}{1 - e^{i\delta}}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $A$ 为入射光振幅; $r$ 为反射系数; $\tilde{E}_r$ 为凸台相同位置处各反射光的复振幅, $l=1,2,3,\dots$ 。轧制带钢表面的总反射光强为

$$I_r = \frac{1 - \cos n\delta}{1 - \cos \delta} I_r^2, \quad (3)$$

式中: $I$ 为入射光强。当  $\delta$  取值范围很小时,式(3)可以改写为  $I_r = \frac{1 - \cos n\delta}{k} I_r^2$  ( $k$ 为常数)。式(3)表明,当  $n\delta = m\pi$  时: $m$ 为整数, $I_r$ 最小; $m$ 为半整数, $I_r$ 最大。在具有位置等间距分布凸台的轧制带钢表面,同一波长反射光之间发生多光束干涉现象,形成明暗相间的干涉条纹。多波长的自然光或灯光入射到位置具有等间距分布凸台的轧制带钢表面,各个相同波长的反射光之间形成各自的干涉条纹,不同波长的干涉条纹叠加形成莫尔条纹。

当轧制带钢表面凸台位置的等间距分布被打破后,相邻凸台同一波长反射光之间的光程差不再固定,导致相位差发生改变,则凸台相同位置处反射光形成的总光场为

$$\tilde{E}_{rs} = A_r [1 + e^{i(\delta + \Delta\delta_1)} + e^{i(2\delta + \Delta\delta_2)} + e^{i(3\delta + \Delta\delta_3)} + \dots], \quad (4)$$

式中: $\Delta\delta_i$ 为凸台微结构反射光之间产生的随机分布的偏移相位。相邻凸台反射光之间的相位差不再有固定关系,相同波长反射光之间形成的多光束干涉条纹减弱,轧制带钢表面不同波长反射光叠加形成的莫尔条纹同样被减弱。干涉条纹被减弱的程度与  $\delta + \Delta\delta_i$  的随机取值范围直接相关, $\delta$ 保持不变, $\Delta\delta_i$ 的取值具有随机性,同样可打破相邻凸台反射光之间相位的固定关系。本文提出一种带钢表面凸台微结构分布方式,即凸台偏离其初始等间距位置服从随机分布函数,凸台微结构反射光之间产生随机分布偏移相位  $\Delta\delta_i$ ,以减弱轧制带钢表面形成的明暗条纹,同时保证钢板表面 PPI。

### 3 模拟与实验

#### 3.1 随机分布凸台微结构反射光的相干辐照度

轧制带钢表面凸台分布方式影响带钢表面反射光明暗条纹现象,凸台微结构初始等间距分布与凸台 PPI 取值范围相关,带钢表面 PPI 通常在 100~300 之间。本文研究在轧制带钢表面凸台微结构等间距分布基础上,使凸台微结构位置发生偏移,偏移量服从不同的随机分布函数,通过产生不同随机偏移相位减弱轧制带钢表面反射光形成的干涉条纹。改变随机分布函数,模拟分析轧制带钢表面凸台微结构反射光的相干辐照度。

模拟研究凸台微结构的随机偏移位置服从均匀分布概率密度函数时,其特征参数对轧制带钢表面凸台微结构反射光的相干辐照度的影响。在 Zemax 软件中构建位置等间距分布的凸台微结构,相邻凸台微结构的中心间距为 200  $\mu\text{m}$ ,以保证轧制带钢表面 PPI 大于 100,凸台直径取值与中心间距相等,为 200  $\mu\text{m}$ ,以保证轧制带钢表面可以被凸台覆盖<sup>[14]</sup>。凸台微结构在等间距分布的基础上产生随机偏移,以减弱带钢表面凸台微结构反射光产生的明暗相间条纹。首先,将凸台微结构的位置偏移服从的概率函数设为  $f(x) = \frac{1}{a-b}$  ( $a$ 和  $b$ 为均匀分布概率密度函数的特征参数)的均匀分布,利用 Zemax 软件光线追迹方法,模拟凸台微结构同样位置处反射光的相干辐照度,结果如图 2 所示。均匀分布数据由 Matlab 产生并导入 Zemax,入射光波长为单一波长。与凸台微结构位置等间距分布时产生的反射光相干辐照度相比较[图 2(a)],当均匀分布概率密度函数的特征参数  $a$ 和  $b$ 变化时,凸台微结构同样位置处反射光产生的明暗条纹逐渐模糊。当特征参数为  $a=40, b=-40$  时,相干辐照度分布不规则,反射光明暗条纹明显减弱。

将凸台微结构偏离位置的均匀分布改变为高斯分布,同样条件下,研究高斯分布概率密度函数  $f(x) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

的特征参数  $\sigma$  对带钢表面凸

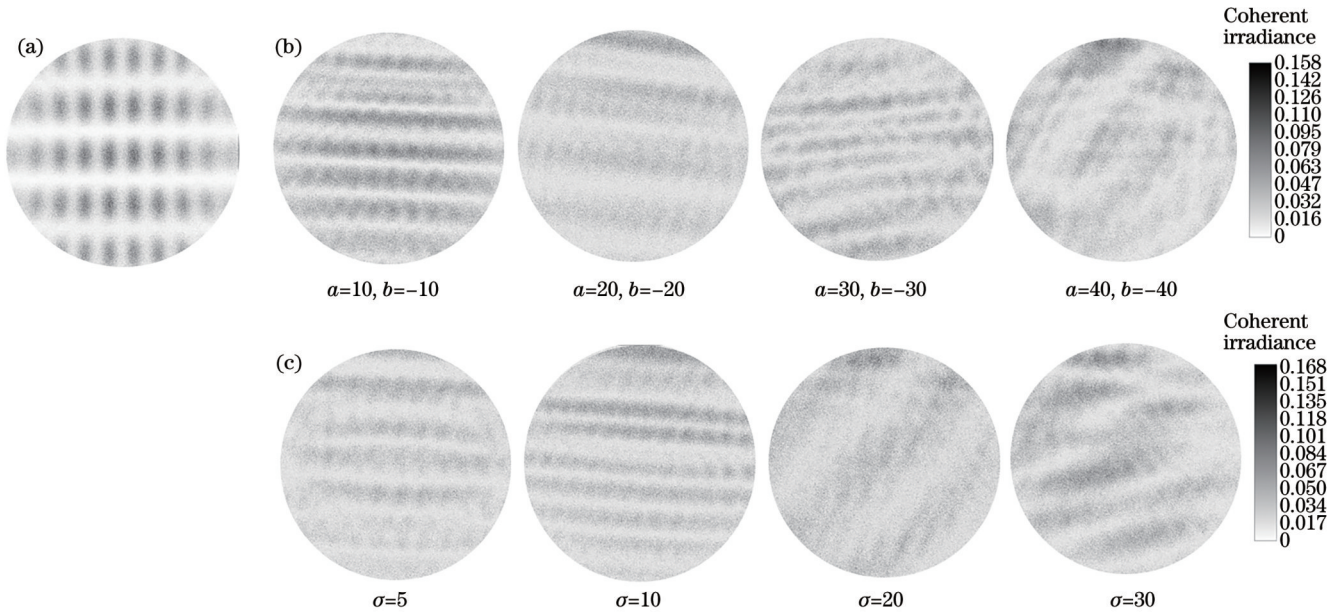


图 2 不同随机分布凸台微结构的反射光相干辐照度。(a)等间距中心间距;(b)均匀分布;(c)高斯分布

Fig. 2 Coherent irradiance of reflection light of convex microstructure with different random distribution. (a) Evenly spaced center distance; (b) uniform distribution; (c) Gaussian distribution

台微结构反射光的相干辐照度的影响,模拟结果如图 2 所示。随着高斯分布概率密度函数的特征参数标准差  $\sigma$  变大,凸台微结构同样位置处反射光产生的明暗条纹变模糊;当  $\sigma$  为 30 时,相干辐照度分布不规则,反射光明暗条纹明显减弱。

当轧制带钢表面凸台微结构位置的等间距分布被打破时,带钢表面单波长反射光相干辐照度的明暗条纹转化为不规则分布。但是,比较两种随机分布,发现偏移位置服从均匀分布函数的凸台微结构的反射光相干辐照度条纹分布更加不规则。均匀分布概率密度函数产生的随机数在其特征参数  $(a, b)$  范围内是相等概率分布,而对于高斯分布,越靠近均值  $\mu$ ,随机数的概率密度越大,导致高斯分布的随机数相较于均匀分布的随机数方差更小,偏离程度更低,随机程度更低。其他随机分布,例如 Gamma 分布、指数分布和柯西分布等均是和高斯分布相类似的非均匀随机分布,按其位置分布的凸台微结构产生的单波长相干辐照度条纹的规则程度与高斯分布类似。

在轧制带钢表面凸台微结构偏移位置服从均匀分布函数的条件下,轧制带钢表面凸台微结构的相邻结构中心间距不同,凸台微结构同样位置处的反射光相干辐照度也会发生变化。在 Zemax 模拟软件中构建不同中心间距的等间距分布凸台微结构:中心间距分别为  $100\ \mu\text{m}$  和  $150\ \mu\text{m}$  (对应的轧制带钢表面的 PPI 大于 150)。对于两种不同的中心间距,凸台微结构的反射光相干辐照度模拟结果如图 3 所示。当均匀分布概率密度函数的特征参数为  $a = 30, b = -30$  时,中心间距为  $100\ \mu\text{m}$  的凸台微结构的反射光明暗条纹明显减弱;而对于中心间距为  $150\ \mu\text{m}$  的凸台微结构,这一条

件为  $a = 40, b = -40$ 。

凸台微结构的表面反射光的相干辐照度分布不规则时,凸台微结构等间距分布时不同的中心间距对应均匀分布函数不同的特征参数。由于凸台直径应与中心间距相等以保证轧制带钢表面可以被凸台覆盖,不同的凸台直径位置偏移需要服从不同的均匀分布函数,以保证表面反射光明暗条纹明显减弱。

以上分析是单波长入射光条件下的模拟结果,轧制带钢表面反射光形成的条纹是多波长作用下的现象。单波长反射光相干辐照度分布不规则,导致轧制带钢表面由于多波长自然光反射形成的莫尔条纹近乎消失。带钢表面的凸台微结构由轧辊表面凹坑形貌衰减性“拷贝”得到,因而类似的冷轧轧辊无序激光毛化过程中产生的激光冲击凹坑中心位置需要与钢表面的凸台微结构具有同样的随机分布,以保证轧制带钢的表面性能。

### 3.2 激光冲击轧辊材料样件实验

采用轧辊材料样件研究激光冲击毛化凹坑的形貌与激光能量密度和冲击方式的关系。根据模拟结果,带钢表面相邻凸台中心间距与凸台直径有关,并决定随机分布函数的特征参数取值。分析轧辊表面凹坑直径和深度对应的冲击条件,以获得 PPI 和粗糙度范围满足要求的轧辊表面,进而有效控制轧辊毛化质量。

轧辊材料样件表面凹坑激光冲击实验光路如图 4(a) 所示。Nd:YAG 激光器的激光脉宽为  $10\ \text{ns}$ ,波长为  $1064\ \text{nm}$ ,重复频率在  $1\sim 10\ \text{Hz}$  内分档可调,光斑直径为  $26\ \text{mm}$ ,激光脉冲的最大能量为  $6\ \text{J}$ 。轧辊材料样件为 Cr5 型号轧辊切割材料,实验测得其熔融能量密度阈值为  $15.5\ \text{J}/\text{cm}^2$ 。

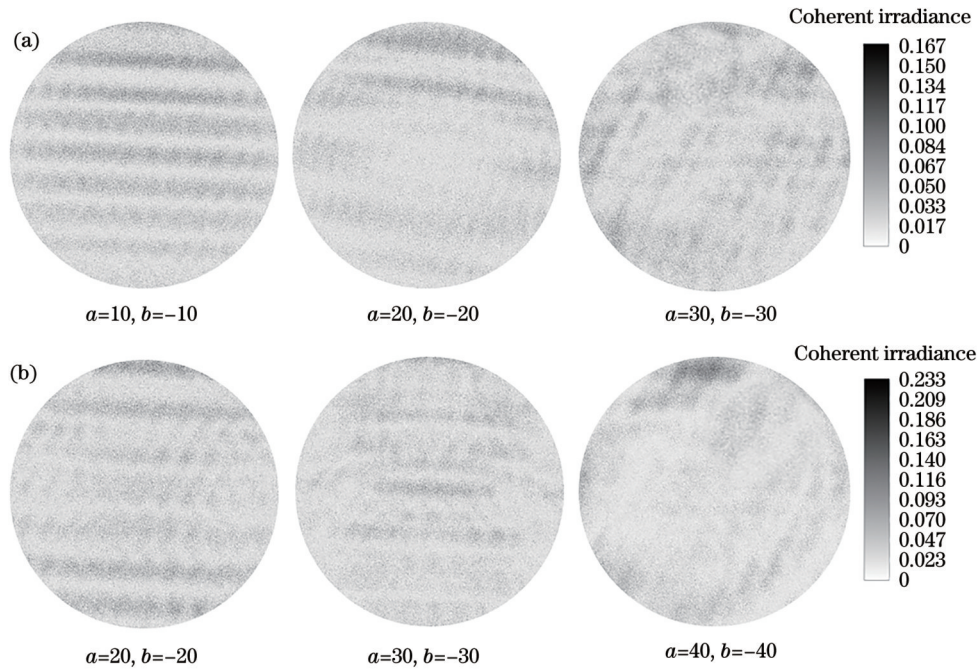


图 3 不同中心间距的均匀分布凸台微结构的反射光相干辐照度。(a) 100 μm; (b) 150 μm

Fig. 3 Coherent irradiance of reflection light of uniformly distributed convex microstructures with different center distances. (a) 100 μm; (b) 150 μm

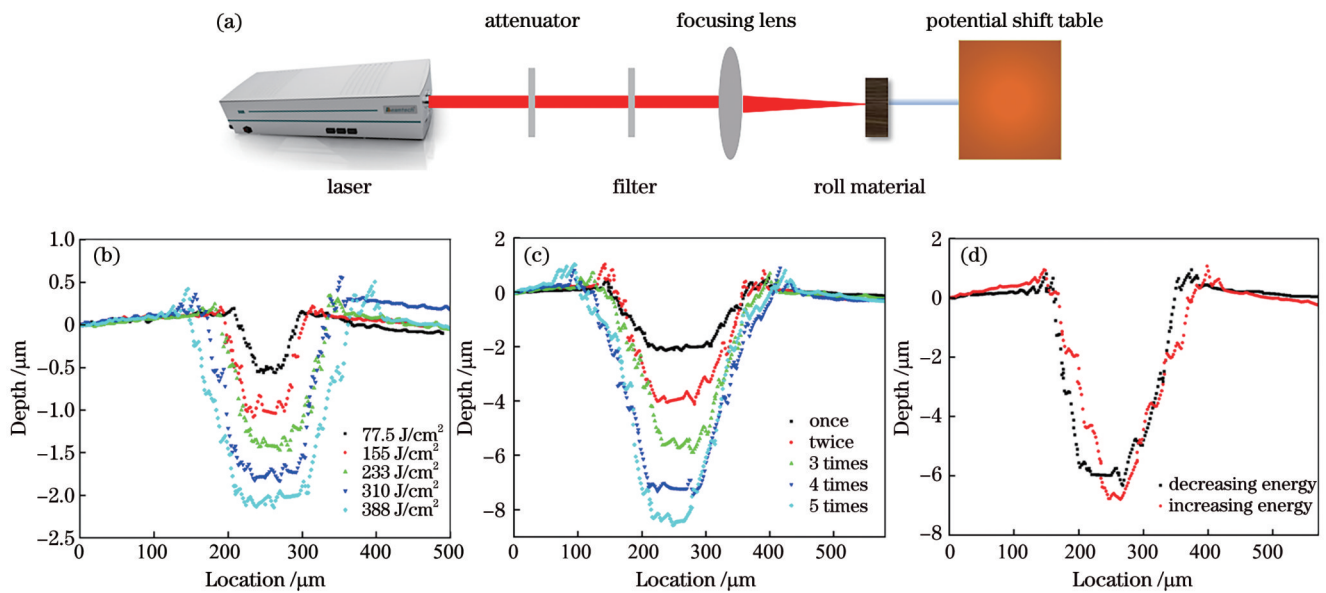


图 4 激光冲击实验光路与毛化凹坑形貌的曲线。(a) 激光冲击实验光路; 不同激光冲击条件与凹坑形貌的关系曲线; (b) 不同能量密度; (c) 不同冲击次数; (d) 不同冲击方式

Fig. 4 Optical path of laser impact experiment and curves of textured pit morphology. (a) Optical path of laser impact experiment; relationship between laser impact condition and textured pit morphology: (b) different energy density; (c) different number of impacts; (d) different impact mode

采用高于材料熔融能量密度阈值的激光能量密度,对轧辊材料样品进行单次冲击实验,控制台阶仪扫描探针沿凹坑直径进行深度扫描,测量轧辊材料样品表面凹坑形貌,如图 4(b)所示。激光平均能量密度改变,毛化凹坑直径与深度各不相同。保持激光能量不变,改变激光冲击次数,对轧辊材料样品表面分别进行

冲击,获取轧辊材料样品表面凹坑形貌,如图 4(c)所示。随着激光能量密度的提高、冲击次数的增加,凹坑直径变大,深度增加。由凸台微结构的反射光相干辐照度模拟结果可知,凹坑直径变大,衰减性“拷贝”得到的凸台直径随之改变,其位置偏移服从的均匀分布特征参数  $a$  和  $b$  的取值也发生改变,以保证无

序毛化后带钢表面明暗条纹减弱。凹坑深度增加,毛化轧辊表面及与之对应的带钢表面粗糙度均提高。保持激光冲击次数不变,单次激光冲击能量逐次递增、逐次递减,分别对轧辊材料样件进行多次冲击,如图 4(d)所示。对比两种冲击方式下形成的凹坑形貌,

递减能量密度下脉冲激光冲击形成的凹坑上下直径差更小,其原因是当激光能量密度递减时,冲击产生的熔融金属物质逐渐减少,凹坑底部排屑更容易。轧辊材料样件毛化凹坑形貌与冲击条件的对应关系见表 1。

表 1 轧辊材料样件毛化凹坑形貌与冲击条件的对应关系

Table 1 Corresponding relationship of textured pit morphology and impact condition of roll material samples

Experimental conditions	Energy density / (J/cm <sup>2</sup> )					Number of impacts				
	77.5	155	233	310	388	1	2	3	4	5
Dimple diameter / μm	78	104	139	162	198	198	209	243	292	296
Dimple depth / μm	0.71	1.29	1.72	2.19	2.55	2.55	5.04	6.60	8.05	9.37

对轧辊材料样件进行无序激光冲击毛化实验,实验光路如图 4(a)所示,根据激光冲击凹坑形貌的实验结果,并依据轧制钢板粗糙度以及 PPI 要求,选择轧辊材料表面的凹坑深度为 2.55 μm,直径约为 198 μm,对应脉冲激光的单次冲击能量密度为 388 J/cm<sup>2</sup>。通过轧辊表面凹坑形貌衰减性“拷贝”得到带钢表面凸台微结构,轧制带钢表面凸台与轧辊表面凹坑形貌一一对应,其中心偏移服从相同的随机分布。因而采用模拟分析得到的中心偏移服从的均匀分布函数,选择凹坑中心位置等间距分布的中心间距为 200 μm,毛化 PPI 理论值大于 100,凹坑中

心位置的偏移服从均匀分布函数,其特征参数为  $a = 40$ 、 $b = -40$ 。建立中心间距为 200 μm 的等间距分布位置坐标,利用 Matlab 基于线性同余法的伪随机数生成器生成服从上述均匀分布的两组随机数组,将等间距分布位置坐标与对应的随机数相结合,得到凹坑中心位置坐标,将随机的坐标数据导入电位移台控制系统,控制轧辊材料样件相对聚焦激光随机移动,利用激光雕刻方法对样件表面 10 mm × 10 mm 区域进行无序激光冲击毛化实验,利用材料型正置激光共聚焦显微镜观察激光冲击后毛化表面,结果如图 5 所示。

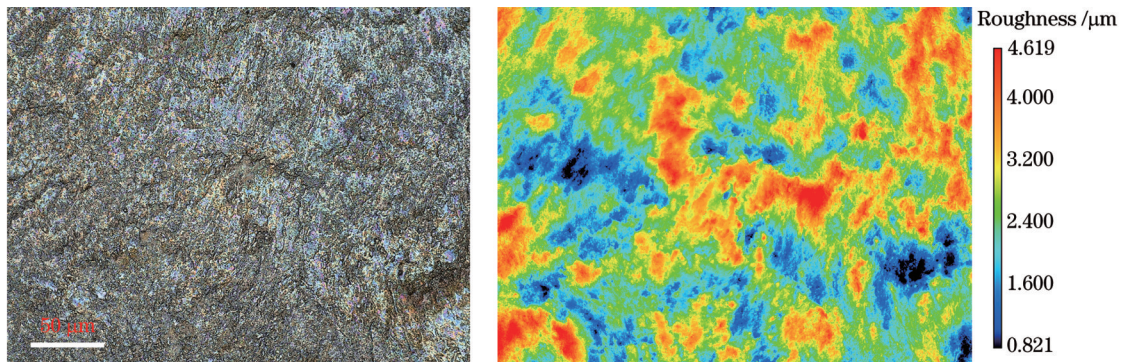


图 5 轧辊材料样件毛化表面的光学成像与粗糙度

Fig. 5 Optical image and roughness of laser textured roll material sample

本文选用 10 Hz 频率的激光脉冲,在轧辊材料样件 10 mm × 10 mm 的小范围区域内,通过实验实现了粗糙度为 3.79 μm、PPI 为 179 的无序激光毛化。通过修改凸台微结构等间距分布位置坐标的中心间距,及其偏移服从均匀分布函数的特征参数,选择激光冲击参数,包括激光能量、冲击次数,以及激光能量递增或递减等冲击方式,将灵活实现符合各种要求的 PPI 和粗糙度范围的毛化轧辊,以满足轧制带钢表面质量要求。下一步的研究工作可利用高频率激光脉冲进行轧辊的无序毛化,提高工业生产效率。

## 4 结 论

本文利用多光束干涉原理,基于随机分布偏移相

位分析轧制带钢表面反射光之间形成明暗相间条纹的机理。利用光线追迹方法模拟分析中心间距偏移服从不同随机分布的凸台微结构的反射光相干辐照度,结果表明均匀分布凸台微结构的单一波长反射光相干辐照度的无序性更好。不同的凸台微结构中心间距对应的均匀分布函数特征参数不同。轧制带钢表面凸台与轧辊表面凹坑形貌一一对应,其中心偏移服从相同的随机分布。采用服从均匀分布的中心间距偏移,利用激光雕刻方法,在轧辊材料样件表面通过实验实现小区域无序激光冲击毛化,毛化后轧辊材料样件的表面粗糙度为 3.79 μm, PPI 为 179。通过调整凹坑中心间距及其偏移量服从的均匀分布函数的特征参数,选择相对应的激光冲击条件,将满足毛化轧辊表面不同

PPI和粗糙度范围的要求,实现轧制带钢表面质量的不同需求。

## 参 考 文 献

- [1] 陈战锋, 琚艳军, 李龙飞. 冷轧辊激光毛化技术应用研究[J]. 河南冶金, 2018, 26(3): 9-11.  
Chen Z F, Ju Y J, Li L F. Study on application of laser roughen technology for cold roll[J]. Henan Metallurgy, 2018, 26(3): 9-11.
- [2] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. Tribology Letters, 2004, 17(4): 733-737.
- [3] 李中华, 许晓健, 纪召红. 激光毛化技术在平整轧辊上的应用浅析[C]//全国冶金自动化信息网2014年论文集. 北京: 中国钢铁工业协会, 2014: 4-9.  
Li Z H, Xu X J, Ji Z H. Brief analysis of the application of laser texturing technology in smoothing rolls[C]//Proceedings of the 2014 National Metallurgical Automation Information Network Annual Conference. Beijing: China Iron and Steel Association, 2014: 4-9.
- [4] 雷泽红. 轧辊激光毛化技术的应用及发展[J]. 应用激光, 2013, 33(5): 563-566.  
Lei Z H. Application and development of laser texturing technology for rolls[J]. Applied Laser, 2013, 33(5): 563-566.
- [5] He D Q, Zheng S X, Pu J B, et al. Improving tribological properties of titanium alloys by combining laser surface texturing and diamond-like carbon film[J]. Tribology International, 2015, 82: 20-27.
- [6] 蔡珍, 韩斌, 吴国胜, 等. 轧辊表面激光毛化技术的进展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(13): 5-7.  
Cai Z, Han B, Wu G S, et al. Development of laser texturing technology for roller surface[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(13): 5-7.
- [7] Wan D P, Liu H B, Wang Y M, et al. CO<sub>2</sub> laser beam modulating for surface texturing machining[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(2): 309-314.
- [8] 王辉, 陈培锋, 梁乔春. 一种激光毛化加工装置: CN106425085A[P]. 2017-02-22.  
Wang H, Chen P F, Liang Q C. Laser roughening machining device: CN106425085A[P]. 2017-02-22.
- [9] 胡家强, 柳洁, 李春旺, 等. 激光无序毛化轧辊表面的方法: CN109175707A[P]. 2019-01-11.  
Hu J Q, Liu J, Li C W, et al. The method of laser disordered texturing roller surface: CN109175707A[P]. 2019-01-11.
- [10] 王红才, 杨明江, 彭林华. 不规则偏转毛化点的辊类表面毛化激光加工系统及方法: CN100462180C[P]. 2009-02-18.  
Wang H C, Yang M J, Peng L H. Laser processing system and method for roller surface burr without regular deflection burr: CN100462180C[P]. 2009-02-18.
- [11] Wang H C, Wang Y, Zhan J, et al. The YAG laser texturing technology and application with controllable disorder distribution [C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, July 15-17, 2011, Inner Mongolia, China. New York: IEEE Press, 2011: 5458-5462.
- [12] 廖新隆, 苏波泳, 徐硕, 等. TC4钛合金激光冲击强化塑性变形流动规律研究[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602206.  
Liao X L, Su B Y, Xu S, et al. Flow law of plastic deformation of TC4 titanium alloy by laser shock peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602206.
- [13] 赵恩兰, 王情情, 杨海峰, 等. 超光电子铜箔的微尺度激光冲击平坦化[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1602002.  
Zhao E L, Wang Q Q, Yang H F, et al. Microscale laser shock flattening of ultraspeed electronic copper foil[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1602002.
- [14] Convert L, Bourillot E, François M, et al. Laser textured titanium surface characterization[J]. Applied Surface Science, 2022, 586: 152807.

## Roll Laser Texturing Technology Based on Uniformly Randomly Distributed Offset Phase

Ma Renhao, Yu Xuanyi, Li Jianyao, Shen Chongyang, Deng Xiaoxu\*

*School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

### Abstract

**Objective** Cold rolled strips are widely employed in automobiles, home appliances and other industries, and their surface micromorphology affects the surface chromatic aberration of the strip steel. The strip steel surface with regularly distributed microstructure tends to exhibit alternative bright and dark fringes. When the microstructure is randomly distributed, the stripes caused by multi-beam interference will be weakened. The surface microstructure of the rolled strip corresponds to that of the roll surface. The disordered roll laser texturing technology features less pollution, a wide range of texturing roughness, and high surface hardness, which can reduce the surface chromatic aberration of the rolled strip and is expected to meet the growing demand for sound stamping performance and fine brightness after the painting of cold rolled sheet productions.

**Methods** The laser texturing roller technology is presented for controlling the range of peak per inch (PPI) density and roughness of rolling rolls based on the offset phase difference of the random distribution. The formation mechanism of light and dark alternately stripes on the surface of rolled strip steel is analyzed using the multi-beam interference principle. By the ray tracing method, the random distribution phase difference generated by the offset of equally spaced convex

microstructures is studied to weaken the interference fringes formed by single-wavelength reflected light on the surface of rolled strip steel, which thus eliminates Moiré fringes generated by multiple wavelengths. The reflected coherent irradiance is adopted to study the corresponding uniform distribution function characteristic parameters under different center spacing when the interference fringes are broken. Meanwhile, laser impact pit experiments are conducted on roll material samples to obtain the corresponding relationship between the textured pit morphology and laser impact conditions. The random deviation of the pit microstructure on the roll surface is the same as that of the convex microstructure on the rolling strip by attenuating “copying”. We utilize Matlab’s pseudo-random number generator based on the linear congruence method to generate two sets of random arrays that obey the uniform distribution obtained from the simulation analysis. Disordered texturing is performed on the rolling roll material sample by laser impact, which is achieved by adopting deviation in the convex microstructure center distance following a uniform distribution by theoretical and simulation analysis.

**Results and Discussions** When the center offset of the microstructure on the surface of the rolled strip steel obeys a uniform distribution function, the coherent irradiance disorder of the single wavelength reflected light of the microstructure is better (Fig. 2). When the interference fringes of the reflected light from the tabular microstructure are broken, different center spacing corresponds to various characteristic parameters of the uniform distribution function (Fig. 3).

**Conclusions** By employing the uniform distribution function of pit center offset obtained from theoretical and simulation analysis, and the relationship between experimentally obtained laser parameters and pit morphology, the surface of a roll material sample with a roughness of  $3.79\ \mu\text{m}$  and PPI of 179 is experimentally realized as disordered laser texturing of the roll material sample in a small area of  $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$  by laser texturing technology (Fig. 5).

**Key words** surface optics; multi-beam interference; laser texturing; cold rolling roller; uniform random distribution; offset phase