

一种随机频率、随机能量的轧辊光纤激光无序毛化方法

鄢 然 张李超 张宜生 赵祖焯

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 轧辊激光毛化技术作为一种最新的轧辊毛化方法,具有广泛的应用前景。但由于加工方法的限制,目前的激光毛化技术产生的轧辊表面毛化点分布成一个周期性各向异性的分布,导致最后轧制的毛化冷轧薄钢板效果不理想。提出了一种可以产生随机频率随机能量激光的光纤激光控制方法,此方法通过一个高效的随机数算法产生一个随机频率和随机占空比的脉冲宽度调制信号控制激光器输出特定波形的激光进行毛化加工,能够使得毛化轧辊表面产生随机无序分布的毛化花纹,最终轧制的毛化冷轧薄钢板能够满足表面各向同性亚光的要求,并且还能够提高加工效率,基于该方法的毛化加工设备已在实际生产中得到应用并且取得良好效果。

关键词 激光技术; 无序激光毛化; 光纤激光; 伪随机数算法; 脉冲宽度调制; 轧辊

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0903004

Irregular Mill Roll Fiber Laser Texturing Method Based on Random Frequency and Random Power

Yan Ran Zhang Lichao Zhang Yisheng Zhao Zuyue

State Key Laboratory of Materials Processing and Mold&Die Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The mill roll laser texturing is the newest mill roll texturing method which has broad application prospects. As the limit of processing method, the distribution of the craters on the surface of the mill roll is anisotropy and periodicity, which makes the surface of the texturing cold-roll steel not satisfy the needs. A fiber laser control method is proposed to produce random frequency and power lasers. This method can control the fiber laser device output particular wave form laser by the pulse width modulation signal which is calculated by a pseudo-random algorithm. The surface of the mill roll produced by this method is isotropic and irregular which can reach the quality requirements. In addition, it can also improve production efficiency. The laser texturing equipment based on this method is applied in practice and makes well effect.

Key words laser technique; irregular laser texturing; fiber laser; pseudo-random algorithm; pulse width modulation; mill roll

OCIS codes 140.3510; 140.3390

1 引 言

毛化冷轧薄钢板在制造业中有广泛的应用,特别是在家电制造和汽车产业中,它是由表面经过毛化处理的轧辊轧制而成^[1]。目前轧辊的毛化加工方式主要有3种,喷丸毛化(SBT),电火花毛化(EDT)和激光毛化(LT)^[2]。其中喷丸毛化由于表面毛化硬度低,其表面的毛化组织是由机械撞击产生,所以这种毛化方式加工

收稿日期: 2015-03-13; 收到修改稿日期: 2015-04-23;

基金项目: 国家自然科学基金(51005090)

作者简介: 鄢 然(1986—),男,博士研究生,主要从事激光加工设备,数控系统,机器视觉方面的研究。

E-mail: yanranbigman@qq.com

导师简介: 张李超(1975—),男,副教授,博士生导师,主要从事先进制造,快速成形系统,CAD/CAM/NC等方面的研究。

E-mail: elegantteac@263.net

的轧辊在使用过程中,表面毛化形貌很容易就被磨损掉,使用效果差,这种技术已处于被淘汰阶段。电火花毛化是目前应用最广的毛化技术,它的工作原理是通过轧辊表面和电极通电后产生的自激放电作用,在轧辊表面形成凹坑和针状尖峰。用这种技术加工出来的轧辊表面硬度较高,并且产生的毛化组织分布随机性好,各向同性,所以是目前加工效果相对较好的毛化技术,这种加工方式的不足之处是设备成本很高,并且加工过程中会消耗大量的电极材料和电解液,造成很大的浪费和环境污染^[3-4]。激光毛化技术是新出现的一种毛化技术,它的原理是使用激光束对轧辊进行毛化,在轧辊表面烧蚀出毛化点,产生合金反应,能够提高毛化效果的耐久性,提高使用寿命,并且这种方式加工成本低,维护成本低,而且工作环境污染小,是一种清洁的技术,所以激光毛化技术是毛化技术的发展方向^[5-7]。传统的激光毛化方式一般是采用配备了机械斩光盘的CO₂激光和Nd:YAG激光这两种方式^[8-10],本文所采用光纤激光方式,其具有光电效率更高,更加节能,稳定性更高的优势,是激光加工的未来发展趋势^[8]。

目前激光毛化技术的最大问题是由于毛化点是通过激光烧蚀轧辊形成的,而这个过程是通过轧辊周期性匀速旋转,激光按照一定频率产生然后聚焦到轧辊表面来进行的,所以毛化点的分布是由几个周期性作用综合产生的,这样毛化点的分布一定是呈一个周期性分布并且由于单脉冲激光能量固定导致每个毛化点的大小相同,所以必然是一个各向异性的分布,而不能形成各个方向都是亚光面的毛化板所需要的各向同性的随机毛化点分布,所以导致最后轧制出来的毛化冷轧薄钢板效果不理想^[12-13]。

为了解决这个问题,有很多人研究和提出了效果不同的解决方案。张向明等^[14]提出了一种通过机械装置实现的随机扰动装置,通过给激光头加上一个周期性扰动装置来实现毛化点分布呈周期性分布,然而这个方法实际并没有解决问题,它实际上只是在原来的基础上再加上了一个周期性过程作用,实质只是把周期性变得更大了一些,产生的毛化点按照一个更大的周期呈规律分布,并且毛化点的大小仍然是固定的,所以通过这个方法轧制的毛化板仍然不能满足质量要求^[14]。王红才等^[15]提出一种通过随机改变激光脉冲输出频率来实现随机毛化的方法,它的核心方案是通过单板机来随机修改每个脉冲之间的延时,虽然这个方案是能够实现真正无规律毛化点分布,但是仍然存在两大问题:一是此方案的输出脉冲频率低,不能够满足要求;二是毛化点的大小仍然是相同的,所以只能产生一种不理想的一维随机变化,不能产生需要的二维随机变化。另外王红才^[16]还提出了一种用伪随机信号控制振镜电机,使得振镜随机偏转的方法,这种方法同样存在随机性不够好,及不能够产生随机大小的毛化点的缺点。

综上所述,目前仍然没有能够真正有效产生各向同性随机毛化点的激光毛化方法,针对目前激光毛化技术出现的问题,本文提出了一种用于轧辊光纤激光器毛化机床的脉冲频率能量随机控制方法,这个方法通过1个高效随机数算法来控制光纤激光器产生高频率的随机频率随机能量的激光脉冲,能够精确的控制每次毛化孔产生时的激光频率和激光能量,使得产生的每个毛化孔的大小和分布是随机的,能够使得毛化轧辊表面产生真正的无序毛化花纹,能够克服现有技术的不足和空白,使用这种毛化方法加工出来的毛化轧制的毛化冷轧薄钢板能够满足各向同性亚光的要求,并且由于算法的高效性还能够提高轧辊毛化加工效率。

2 随机控制方法原理

随机频率随机能量激光毛化算法的技术核心思想是采用一个足够高效的方法来产生伪随机数,通过伪随机数来决定当前产生的激光的频率和能量。其中核心的问题有两个,1) 随机性足够好,必须要保证所使用的伪随机数生成算法的伪随机周期性足够长,因为通常毛化一根轧辊通常需要耗时2 h,并且激光的频率需要达到50 kHz,所以一根轧辊上面需要产生 3.6×10^8 个毛化孔,而伪随机周期的长度必须要超过毛化孔的数量才能保证足够的随机性;2) 伪随机数算法的效率,因为激光频率需要达到50 kHz,所以每秒产生伪随机数要超过100000个,其中50000个用来生成随机频率,另外50000个用来产生随机能量,所以产生伪随机数的速度必须要满足这个条件。

2.1 伪随机数产生算法

本方法采用了“线性同余”、“移位轮转”和“带忆乘法”,这3种常用的简单伪随机数生成算法的混合算法来满足对伪随机数生成算法的要求。可以使得生成的伪随机数分布均匀,并且效率满足50 kHz的要求。算法公式如下:

$$x = 123456789 + R_s, \tag{1}$$

$$y = 362436000 + R_s, \tag{2}$$

$$\hat{y} = (y \ll 13), \tag{3}$$

$$\hat{y} = (y \gg 17), \tag{4}$$

$$\hat{y} = (y \ll 5), \tag{5}$$

$$x = 69069x + 12345, \tag{6}$$

$$R_d = (x + y) \% R_w, \tag{7}$$

式中 x, y 是计算的中间变量, R_s 是随机种子, R_w 是得到的随机数取值范围, R_d 是最后得到的随机数值。

本方法使用的随机种子的范围是 1 到 0xffffffff, 也就是最大达到 4294967295, 按照 50 kHz 的毛化激光频率计算, 本方法的伪随机周期可以达到 11.93 h, 可以远远满足最少 2 h 随机周期的要求, 所以本算法可以满足轧辊毛化过程对伪随机性的要求。

如图 1 所示进行算法时间效率测试, 每次实验循环计算 50000 次随机数然后统计时间, 一共进行了 1000 次实验, 可以从曲线图里面看到所有的测试时间消耗都小于 1500 μs , 一般是在 900 μs 到 1500 μs 之间, 远远低于 1 s 以内的要求, 所以本伪随机数参数算法效率可以远远满足使用要求。

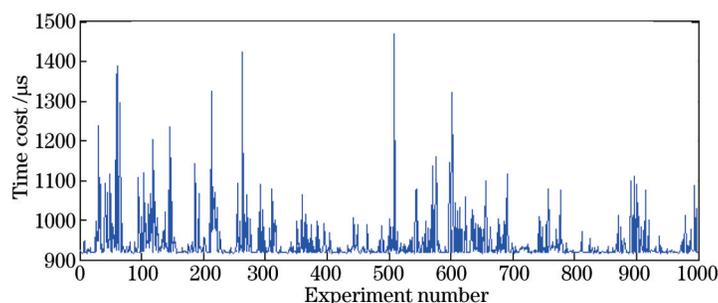


图 1 算法时间效率测试

Fig.1 Test of algorithm time efficiency

2.2 随机控制算法流程

算法流程如图 2 所示, 系统通过得到的随机数产生随机频率和占空比的脉冲宽度调制(PWM)信号控制光纤激光器产生相应的激光进行毛化加工。一直循环这个过程, 直到整个毛化加工结束, 最终得到二维随

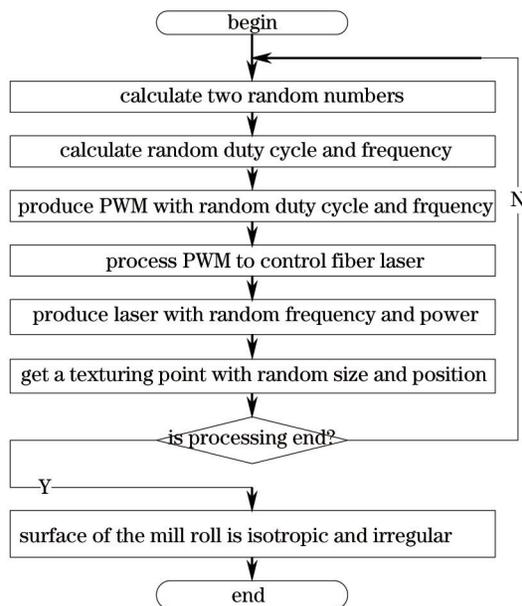


图 2 毛化随机控制流程图

Fig.2 Flowchart of texturing random control method

机的毛化轧辊表面。

2.3 毛化效果软件模拟

为了在数学模型上验证该伪随机数算法进行轧辊激光毛化的效果,采用软件模拟的方法,对毛化的效果进行模拟,由于模拟的目的主要是为了验证随机算法对于毛化点的分布及整体形貌的影响,所以为了简化模型,总体的模拟原则如下^[7]:

- 1) 简化毛化孔为圆形,不考虑由于毛化时轧辊的圆周运动导致的毛化孔形状不可预测的影响;
- 2) 假设毛化孔的大小和激光能量成正比;
- 3) 假设几个毛化孔发生部分重叠的时候只是进行简单重叠,不会互相干扰。

基于以上原则,开发了一个基于c++的模拟软件来模拟算法的效果。按照不同的参数和变化量,一共设计了4组试验,结果如图所示,图3(a)是相同频率、相同能量条件下,进行软件模拟的效果图。可以看到,总体呈均匀分布,每个毛化点的大小相同,整体的形貌是一个周期性有规律的图案。图3(b)是相同频率、随机能量、能量随机浮动范围为50%条件下,进行软件模拟的效果图,可以看到,毛化点的大小呈随机变化,位置均匀分布,总体上整体的形貌具有一定的随机性。图3(c)是随机频率、频率随机浮动范围为50%,相同能量条件下,进行软件模拟的效果图,可以看到毛化孔的大小相同,位置随机分布,整体的形貌具有一定的随机性。图3(d)是随机频率、频率随机浮动范围为50%,随机能量、能量随机浮动范围为50%时的效果图,可以看到毛化孔的大小呈随机变化,位置随机分布,整体的形貌无规律性,呈一个无序的随机分布,无法看出周期性变化,和其他试验条件的结果相比,在毛化花纹的分布无序性上效果是最好的。图3(e)是随机频率、频率随机浮动为50%,随机能量、能量随机浮动为75%时的效果图,可以看到同图3(d)相比,毛化孔大小的随机变化范围更大,大空白的出现范围更多,这样可能会导致粗糙度分布不均匀,所以浮动范围要调整到合适的值。

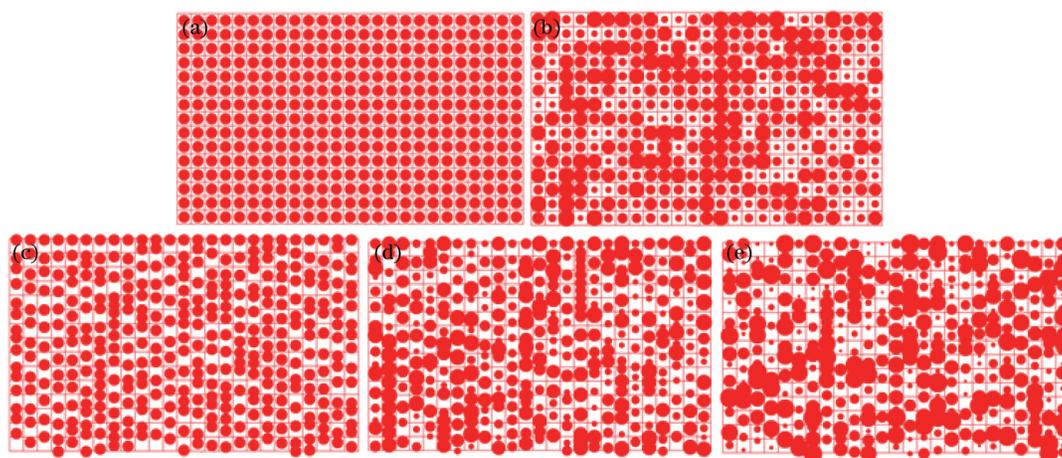


图3 软件模拟随机算法效果图。(a) 固定频率、固定能量;(b) 固定频率、随机能量;(c) 随机频率、固定能量;(d)和(e) 随机频率、随机能量

Fig.3 Software simulation result of the random algorithm. (a) Fixed frequency and fixed power; (b) fixed frequency and random power; (c) random frequency and fixed power; (d) and (e) random frequency and random power

3 实验

3.1 实验装置

如图4所示,本次实验采用的实验平台是华工激光的光纤激光毛化系统。运动系统采用的是西门子S120伺服控制系统,可以控制3个运动轴协同运动。激光器是使用的IPG的400W光纤激光器。激光控制器采用自主研发的Laser Controller ZST-1,它采用数字信号处理器(DSP)作为核心运算单元,通过运行伪随机数算法得到随机数,然后根据这个随机数去控制外围电路产生相应的激光控制信号,最终使得光纤激光器产生随机频率随机能量的激光脉冲。

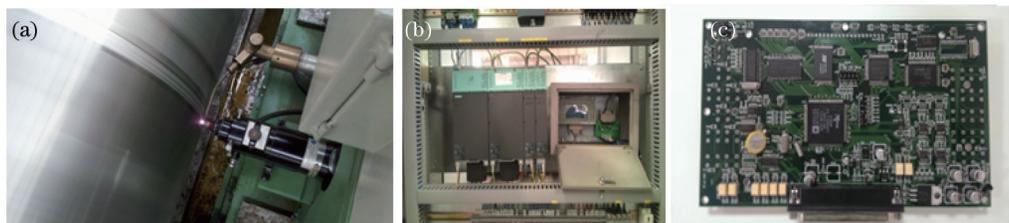


图4 实验设备。(a)加工现场; (b)平台运动系统; (c)激光控制器 ZST-1

Fig.4 Experiment equipment. (a) Actual processing; (b) platform motion system; (c) laser controller ZST-1

3.2 对比实验

为了检验随机频率随机能量毛化控制器在毛化花纹形貌分布无序性上的效果,采用华工激光这套激光毛化系统原来采用的激光控制器西门子的 S7-200 可编程控制器做对比实验。西门子激光控制器只能产生固定频率,固定占空比的激光控制信号,所以产生的毛化花纹是周期性规律分布的。

对比测试的实验方法是采用同样的基准频率和基准占空比,分别对轧辊进行毛化实验,然后通过显微镜在两种放大比率下观察毛化后轧辊表面的形貌分布特点。

首先比较在 260 倍放大效果下的形貌分布对比,图 5(a)是用西门子激光控制器产生的毛化形貌,可以看到毛化点都是一样的大小,并且形状也很相似呈椭圆形,整体分布非常均匀,呈周期性分布,可以明显的看出花纹的分布规律。和采用软件模拟的相同频率相同能量下的毛化分布情况如图 3(a)是一致的。图 5(b)是用激光控制器在随机浮动频率随机浮动占空比的情况下产生的毛化形貌,可以看到毛化点的大小随机变化,分布位置随机变化,并且容易交错在一起,整体形貌分布随机,无规律性,无法找到周期性分布的特征。进一步和软件模拟的情况进行对比,如图 3(d)所示的软件模拟的随机频率随机能量作用下的毛化花纹形貌,可以看到两者在毛化孔的大小变化和位置分布上的特点是非常一致的,说明算法的设计思想和实际产生的效果是一致的,可以相互得到验证。

进一步观察 60 倍放大情况下两者的对比情况,在该放大率下,可以看到的毛化花纹更多,可以更好地看到整体的分布情况特征。图 5(c)是西门子控制器的效果,可以看到整体分布非常具有规律性,是一个典型的周期性各向异性分布毛化花纹。图 5(d)是本文激光控制器的效果,整体上是一个完全无序各向同性的分布,无法找到周期性分布的特征。

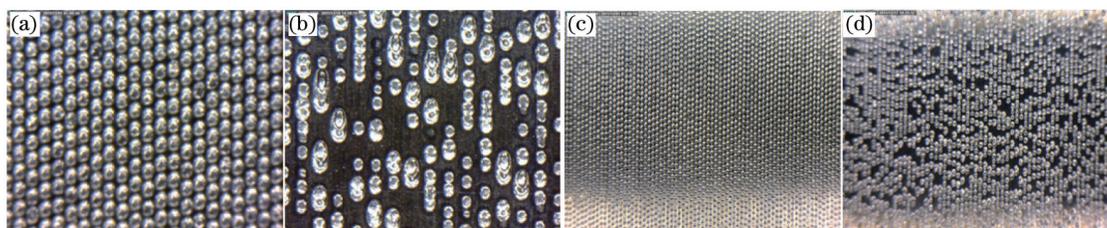


图5 实际加工轧辊毛化效果对比。(a) 西门子系统效果 260 倍; (b) 本文系统效果 260 倍; (c) 西门子系统效果 60 倍; (d) 本文系统效果 60 倍

Fig.5 Result of comparative experiments of actual mill roll texturing effect. (a) Result of Siemens system 260X; (b) result of our system 260X; (c) result of Siemens system 60X; (d) result of our system 60X;

3.3 毛化孔相互叠加互相干扰的影响

在 2.3 节里面采用的软件模型采用了一个毛化孔相互只会发生简单重叠不会相互干扰的假设,实际上由于毛化孔产生位置和大小是随机的,所以他们之间很容易产生相互干扰的情况,特别是在增大频率和减小轧辊转速的时候,这种相互干扰的情况会更加严重,为了测试这种叠加相互干扰产生的影响,进行了在提高频率和减小轧辊转速下的毛化实验,实验结果如图 6 所示,可以看到这种情况下毛化花纹的分布更加无序,得到了非常类似于电火花加工下的毛化效果,所以这种叠加和相互干扰会使得毛化效果更好。

3.4 毛化加工轧辊表面质量对比

衡量轧辊毛化质量的指标一般有表面粗糙度、毛化点密度等,为了测试随机频率随机能量无序毛化加工的毛化轧辊表面的质量,所以以有序毛化加工为对比,在相同基准频率、相同基准占空比下做了一系列实

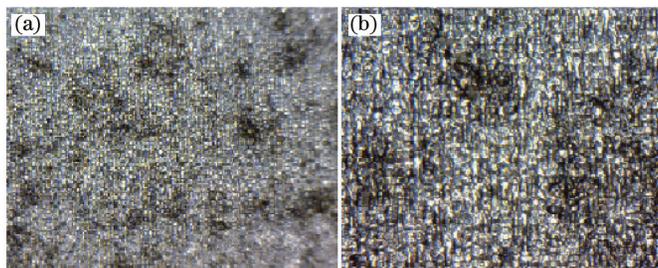


图6 毛化孔叠加相互干扰的情况。(a) 60倍放大;(b) 260倍放大

Fig.6 Result of texturing points super position and mutual interference. (a) Zoom in 60X; (b) zoom in 260X

验,如表1所示,无序毛化加工在表面粗糙度和毛化点密度上与有序毛化加工的结果是差不多的,只是在表面粗糙度上有一点轻微波动,这应该是由花纹随机分布造成的。

表1 有序毛化和无序毛化表面粗糙度和毛化点密度对比

Table 1 Regular and irregular texturing contrast experiment about surface roughness and texturing point density

Base frequency /kHz	Regular texturing		Irregular texturing	
	Surface roughness / μm	Texturing point density / (dot/mm^2)	Surface roughness / μm	Texturing point density / (dot/mm^2)
10	1.41	3×3	1.37~1.75	3×3
15	1.87	4×4	1.71~2.034	4×4
25	3.39	5×5	2.96~3.585	5×5
35	4.75	6×6	4.67~5.126	6×6
50	5.62	7×7	5.41~5.897	7×7

3.5 毛化板加工效果

如图7所示为采用了本文随机脉冲、随机能量加工的毛化辊生产的毛化板,可以看到毛化板表面的毛化花纹呈无序随机分布,整体效果呈一个各向同性的亚光分布,没有明显的周期性规律花纹出现,能够满足对于毛化板的表面毛化效果的要求。

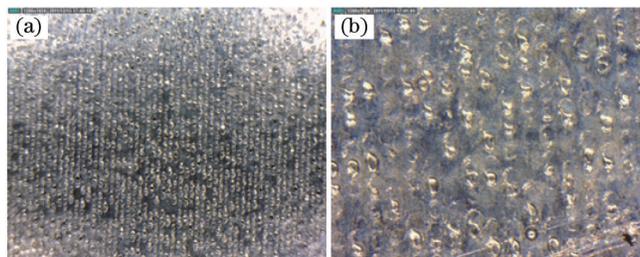


图7 无序毛化轧辊加工的冷轧钢板。(a) 60倍放大;(b) 260倍放大

Fig.7 Result of irregular texturing cold-roll steel. (a) Zoom in 60X; (b) Zoom in 260X

图8所示是普通的有序毛化加工的毛化板,可以看到整体上轧制出来的毛化板表面出现规则性螺旋纹路,严重影响了薄板的美观问题。

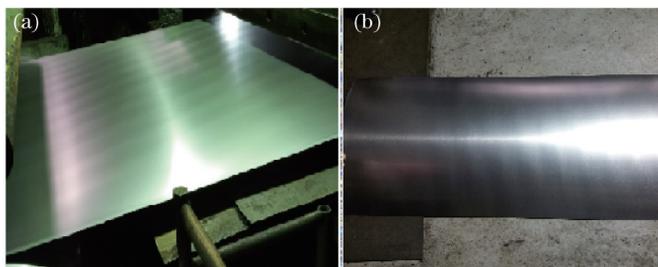


图8 有序毛化加工冷轧钢板效果

Fig.8 Result of regular texturing cold-roll steel

4 结 论

本文提出了一种随机脉冲随机能量的轧辊激光毛化方法,能够在轧辊表面形成随机分布的各向同性无序毛化花纹,并且通过软件模拟试验和对比试验的结果对照,使得该方法的效果得到了验证。最后使用利用该方法加工的毛化辊来加工冷轧板,得到的冷轧板表面质量能够满足使用要求,进一步验证了该方法的有效性和优点。

本方法的最终毛化点生成速度可以达到 50 kHz,并且由于随机数生成速度远远大于这个速度,所以理论上还可以进一步提高系统的速度。所以存在很大的进一步提高加工效率的空间。

基于该毛化方法生产和改造的轧辊激光毛化机床已经在很多家冷轧钢生产厂家得到应用,并且取得了很好的生产效果,大幅提升了生产的毛化冷轧板的品质。所以本方法具有很大的应用前景和市场价值。

参考文献

- 1 Zhou Jiacong. Texturing technology used for cold roll[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1996, 17(3): 1-9.
周家琮. 冷轧轧辊毛化技术[J]. 钢铁钒钛, 1996, 17(3): 1-9.
- 2 Yang Mingjiang, Peng Linhua, Li Zhengyang. Development of YAG laser texturing technology[J]. Applied Laser, 2002, 22(3):323-326
杨明江, 彭林华, 李正阳. YAG 激光毛化技术进展[J]. 应用激光, 2002, 22(3):323-326
- 3 Xu Dong, Li Hongbo, Zhang Jie, *et al.*. Surface topography multi-parameter analysis of textured rolls in cold temper mill[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(3): 734-741.
徐冬, 李洪波, 张杰, 等. 冷轧平整机毛化辊表面形貌特征多参数对比分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 734-741.
- 4 Cao Zexin, Zhang Chunjie, Liu Ling, *et al.*. Development of LD pumped Nd:YAG laser texturing device with high performance[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0803010.
曹泽新, 张春杰, 刘玲, 等. 高性能 LD 抽运 Nd:YAG 激光毛化装置的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803010.
- 5 Tan Xianghu, Shan Jiguo, Tang Lei, *et al.*. Study on laser surf- sculpt of GMW2 autobody sheet steel for carbon fiber reinforced polymer/steel dissimilar joint[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303002.
谭向虎, 单际国, 唐磊, 等. 面向碳纤维增强树脂基复合材料/钢异质结构连接的汽车钢板高速激光毛化工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303002
- 6 Xu Anding. New type of high-power CO₂ lasers texturing equipment and technology [J]. Metallurgical Equipment, 2004, 48(6): 35-37.
徐安定. 新型大功率 CO₂ 激光毛化成套设备及工艺[J]. 冶金设备, 2004, 48(6): 35-37.
- 7 Du D, He Y F, Sui B, *et al.*. Laser texturing of rollers by pulsed Nd:YAG laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 161(3): 456-461.
- 8 Zhou Le, Chen Peifeng, Wang Ying. Study and practice on multi-head laser texturing technology using polygaon scanning for beam modulation[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 210-215.
周乐, 陈培峰, 王英. 多棱镜扫描分光多头激光毛化技术研究与实践[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 210-215.
- 9 Wang Xiong, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. Contrastive research on hybrid-pump pulse and gain-switch pulse Tm-Ho Co-doped fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302010.
王雄, 周朴, 王小林, 等. 混合抽运和增益开关铥/钬共掺脉冲光纤激光器对比研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302010.
- 10 Sun Ruoyu, Jin Dongchen, Cao Yi, *et al.*. Hundred-watt-level 1030 nm ytterbium-doped picosecond all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002004.
孙若愚, 金东臣, 曹懿, 等. 百瓦级 1030 nm 皮秒脉冲掺镱全光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002004.
- 11 Zhang Ruihua, Li Baolei, Han Shuai. Fiber laser texturing robot system[J]. Applied Laser, 2012, 32(1): 31-35.
张瑞华, 李宝磊, 韩帅, 等. 光纤激光毛化机器人系统[J]. 应用激光, 2012, 32(1): 31-35.
- 12 Zhou Le, Chen Peifeng, Wang Ying. Analysis of approximate round crater in multi-head laser texturing technology with polygon scanning[J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 607-610.
周乐, 陈培峰, 王英. 多棱镜扫描分光多头激光毛化圆形毛化点分析[J]. 激光技术, 2009, 33(6): 607-610.
- 13 Wang Hongcai. Study on Evaluation and Processing Technologies of Micro-pits Distribution of YAG Laser Texturing Rolls[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
王红才. YAG 激光毛化轧辊微坑分布的评价及加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

- 14 Zhang Xiangming, Lu Feixing, Mo Hengyang. A method for focus lens no rules laser texturing machine and its device [P]. China Patent: 200910265427.3. 2009-12-28.
张向明, 卢飞星, 莫衡阳. 用于轧辊激光毛化机床的聚焦镜主动无序装置及方法[P]. 中国专利: 200910265427.3. 2009-12-28.
- 15 Wang Hongcai, Yang Mingjiang, Peng Linhua. A method for circumference no rules laser texturing on roll surface and its system[P]. China Patent: 200510117158.8. 2009-04-08.
王红才, 杨明江, 彭林华. 圆周无规则毛化点的辊类表面毛化激光加工系统及方法[P]. 中国专利: 200510117158.8. 2009-04-08.
- 16 Wang Hongcai, Yang Mingjiang, Peng Linhua. A device for no rules deflection laser texturing on roll surface[P]. China Patent: 200520130541.2. 2005-11-04.
王红才, 杨明江, 彭林华. 用于加工辊类表面无规则偏转毛化点的激光加工设备[P]. 中国专利: 200520130541.2. 2005-11-04.
- 17 Wan Daping, Hu Dejin, Liu Hongbin, *et al.*. Computational fluid dynamic numerical simulation for pulse laser texturing machining[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 1004-1008.
王大平, 胡德金, 刘红斌, 等. 脉冲激光毛化加工的计算机流体动力学数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 1004-1008.

栏目编辑: 宋梅梅