

文章编号: 1001-3806(2009)06-0607-04

多棱镜扫描分光多头激光毛化圆形毛化点分析

周乐, 陈培锋*, 王英

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了得到圆形的毛化点以改善传统单头激光毛化技术椭圆毛化点对轧制钢板的均匀性和力学性能的影响, 提出了一种采用多棱镜扫描分光技术的多头激光毛化设备。在一定离焦量下, 使得扫描过程中扫描光束所带来聚焦点非均匀移动可以与轧辊同步运行, 理论上可以获得椭圆度(长短轴比)最小为 1.0010957 的近似圆形毛化点, 并进行了生产实践。结果表明, 理论分析计算与实际结果较为符合。通过对离焦量、扫描速度等毛化参量的控制, 可以获得椭圆度根据特殊要求任意调整的毛化点, 这为多头激光毛化技术的应用提供了指导。

关键词: 激光技术; 毛化点; 多棱镜扫描分光; 轧辊

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.014

Analysis of approximate round crater in multi-head laser texturing technology with polygon scanning

ZHOU Le, CHEN Pei-feng, WANG Ying

(College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to obtain round texturing craters to improve the uniformity and mechanical properties of the steel sheets with elliptical texturing craters produced by traditional single-head laser texturing technology, a multi-heads laser texturing equipment using rotating polygon as scanning beam splitter and modulator is proposed. Under a certain defocusing condition, the focusing point will move along the roll surface in phase with the rotating speed of the cold roll, so that an approximate round crater with a minimal elliptical ratio (ratio of long axis to short axis) of 1.0010957:1 can be obtained in theory. Some experiments were conducted. The experiment results conform to those calculation ones. By controlling defocusing and other texturing parameters, different elliptical ratio can be designed guiding the application of multi-head laser texturing technique.

Key words: laser technique; texturing crater; polygon scanning beam splitter; mill roll

引言

具有特殊表面形貌的冷轧毛化钢板在制造业中有着广泛的应用, 其是由表面经毛化处理的轧辊轧制而成的, 其毛化的表面形貌特征对钢板的深冲、涂装等工艺性能影响极大^[1-2], 具有很高的附加值。

激光毛化是采用高功率高重复频率的激光束聚焦照射于轧辊表面, 使得聚焦点处熔化并部分汽化, 从而形成毛化点, 与此同时, 激光束与轧辊作轴向的相对运动, 完成整个轧辊毛化。传统的激光毛化一般采用斩光盘调制 CO₂^[3-4] 和脉冲调制的 Nd:YAG^[5-6] 两种毛化技术, 最近也有采用射频激励的脉冲 CO₂ 进行毛化的探索^[7], 一般都采取单头毛化的方式, 其由于毛化效率不高或者能量利用效率较低造成生产效率较低, 无

法满足实际生产需求而难以得到广泛的应用, 而且由于单头聚焦点的位置不变, 和高速转动的轧辊之间产生相对移动使得得到的毛化点均为椭圆形^[8]。

采用多棱镜的扫描分光技术的多头 CO₂ 激光毛化技术^[9], 由于在相同毛化时间内加工头数增加, 因而成倍提高了毛化效率, 从而可以满足实际生产需要。由于采用了多棱镜扫描分光的技术, 使得聚焦点有了一定的非线性移动, 而这种移动可以与轧辊本身的转动同步从而改善毛化点椭圆的情况。本文中首先简要介绍了多头毛化系统, 通过对扫描等效光路的分析, 计算出在扫描速度和离焦量匹配的情况下, 可以得到不同椭圆度的毛化点以满足不同应用的需要。

1 多棱镜扫描分光多头激光毛化系统的组成及方案原理

多头毛化设备总体结构由高功率 CO₂ 激光器、外光路系统和脉冲分光系统、激光聚焦和毛化装置、红光准直指示、毛化机床、数控系统、总控制台和冷却系统

作者简介: 周乐 (1982-), 男, 博士研究生, 主要从事激光打孔和轧辊毛化方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: pfchen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2008-08-27; 收到修改稿日期: 2008-09-09

等部分组成,见图1。

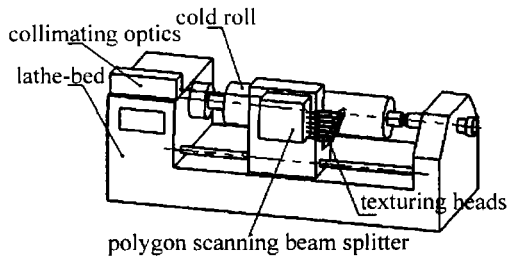


Fig. 1 Sketch of multi-head laser texturing equipment

其工作原理如下:轧辊置于机床旋转轴上,使轧辊按设定的转速旋转;采用1200W~4000W轴快流CO₂激光器输出的连续激光束进入安装在工作平台上的多棱镜分光机构,见图2。多棱镜的工作表面在旋转过

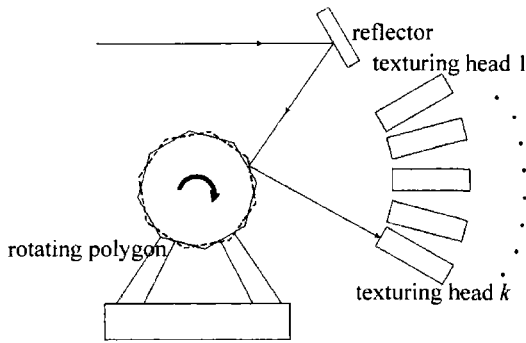


Fig. 2 Sketch of polygon scanning beam splitting and modulating system

程中将激光束依次扫过两个毛化头,每个毛化头在激光扫过时接受到一部分激光,这样多棱镜分光机构将进入的连续激光束分成两路脉冲激光输出;由多棱镜分光机构输出的两路脉冲激光束分别经两个聚焦头聚焦,焦点垂直落在旋转的轧辊工件表面,两个聚焦头对轧辊工件同时进行毛化加工。当轧辊作相对轴向平动时,形成两条螺旋扫描线点阵毛化坑分布,毛化加工头的横向移动螺距是单头加工的两倍,因此毛化所需时间是单头加工的一半;在机床对轧辊工件转速、多棱镜转速、工作平台平移速度的集中控制下,获得所需的毛化点密度要求。

2 圆形毛化点结果初步分析

对于传统的单头斩光盘激光毛化,见图3。聚焦光

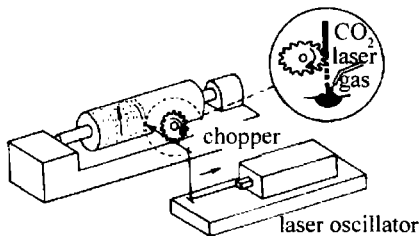


Fig. 3 Sketch of single-head chopper modulating CO₂ laser texturing

点位置不变,轧辊以高速转动,激光聚焦点在脉冲过程中相对轧辊表面有一个位移扫描过程,该位移的影响

使所形成的毛化点通常为一个椭圆形状,见图4。图5为扫描速度对毛化点椭圆度(长短轴比)的影响,可

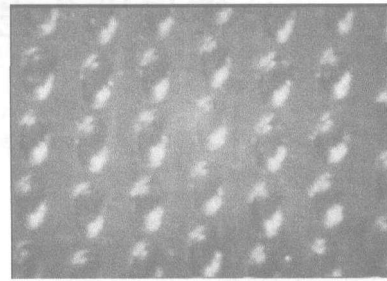


Fig. 4 Typical elliptical craters by chopper modulating CO₂ laser texturing

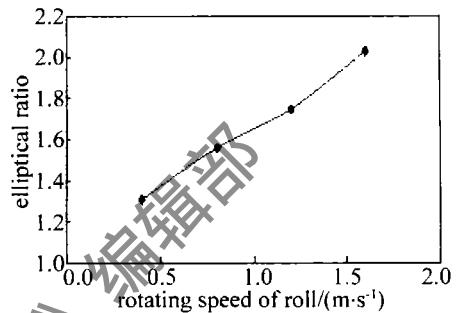


Fig. 5 Elliptical ratio of texturing crater changes versus rotating speed of the roll

见,扫描速度越快,椭圆度越大。各种参量下毛化点都存在一定的椭圆度,而且由于激光毛化点呈规则分布,轧辊表面纹路也是规则分布,因此轧制的钢板在力学性能,特别是冲压成型方面就会产生方向性差异。

然而通过实践发现,采用多棱镜分光多头毛化技术加工的毛化点却可以是非常好的圆形,从而实现了聚焦点的扫描跟踪随轧辊同步运动。由图2可以简单地获得聚焦点跟随的原理。从图2可以看出,多棱镜输出的光束从下向上运动,轧辊也从下向上运动,只要聚焦点的运动速度与轧辊运动速度一致,就可以获得圆点毛化。

图6是实现聚焦点跟随的示意图。 v_1 为多棱镜分

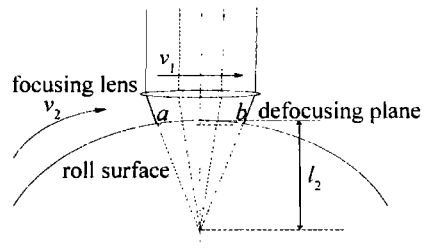


Fig. 6 Sketch of synchronization between focusing point scanning and rotation of roll surface

光扫描在聚焦镜上所产生的扫描速度,轧辊以恒定线速度 v_2 旋转, l_2 为离焦量,由于轧辊的转动速度快,高达150r/min,并且直径大,因而线速度快,于是可以忽略由于轧辊曲率所带来的对离焦量 l_2 的波动影响,所以假定 l_2 在整个脉宽作用过程中不变。在离焦状态下,图6中 a 是多棱镜扫描的某个脉冲开始作用时的

聚焦点位置, b 是多棱镜扫描的某个脉冲结束作用时的聚焦点位置, 如果 a 和 b 之间的距离正好等于在多棱镜扫描的单个脉冲时间内轧辊所旋转的距离, 则在多棱镜扫描的某个脉冲中激光聚焦点始终与轧辊中的同一个点相互作用。控制聚焦点的扫描速度与轧辊转速的同步可以获得圆形毛化点, 当然如果控制两速度相对不同步, 也可以有意识地获得可控制椭圆度的毛化点, 满足特殊的轧制要求和应用。

3 等效光路下的数值分析及实际毛化点效果

图7为图2光路的等效光路原理图, 其实际上是

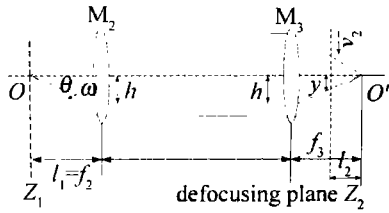


Fig. 7 Sketch of thin lens equivalence of optical path, M_2 —collimating lens; M_3 —focusing lens

利用一个望远镜准直光路传输和扩束后进行聚焦, 扫描光线通过 M_2 准直后经过 M_3 聚焦, f_2 和 f_3 分别为 M_2 和 M_3 的焦距。多棱镜的反射面置于 Z_1 平面的位置, Z_2 平面为轧辊表面加工面。由于多棱镜面数较多, 扫描速度较快, 因而忽略由于内接多边形与外界圆弧之差带来的 Z_1 平面的波动, 取 l_2 为负离焦情况计算对于多棱镜扫描所带来的激光束在聚焦镜上所产生的扫描速度(正离焦的情况亦相同), 由 Z_1 平面开始分析。

由于对称性, 设扫描从 OO' 这个面开始, θ 为一个脉冲光束扫描的角度, Δt 为一个脉冲的持续时间, ω_1 为多棱镜旋转的角速度, l_1 为多棱镜上的扫描点到 M_2 的距离, h 和 y 分别为扫描时在聚焦镜 M_3 和离焦工作面 Z_2 上产生的位移。可以根据实际工作参量, 获得以下关系^[10]:

$$\theta = 720^\circ/2 \cdot n = 5^\circ \quad (1)$$

$$\Delta t = \theta/\omega_1 = 34.72 \mu\text{s} \quad (2)$$

$$h = l_1 \cdot \tan\theta = l_1 \cdot \tan(\omega_1 t) \quad (3)$$

$$y = \frac{l_2}{f_3} \cdot h \quad (4)$$

$$v_1 = dy/dt = \frac{l_2}{f_3} \cdot l_1 \cdot \omega_1 \cdot \sec^2(\omega_1 t) \quad (5)$$

此时激光聚焦毛化点的大小约为 0.15mm 。若要求产生的毛化点为圆点或者尽量接近圆点, 由(5)式可知, 若考虑 \sec 函数的影响, v_1 在一个脉宽作用时间内是单调递增的非均匀的扫描, 取不同的 l_2 , 则有如图8所示, 可知通过对于离焦量 l_2 的调整可以调整 v_1 , 从而实现轧辊线速度与扫描速度的匹配。

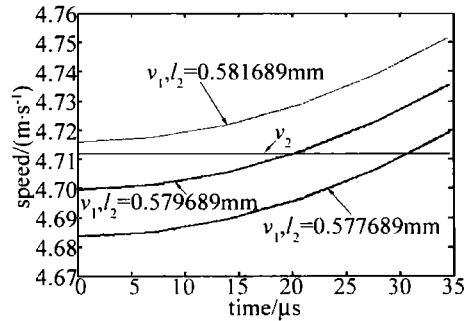


Fig. 8 v_1 varies with different value of l_2

如图9所示, 在脉冲时间伊始, 此时轧辊的 v_2 线速度较快, 而扫描速度 v_1 较慢, 两者之间产生了相对

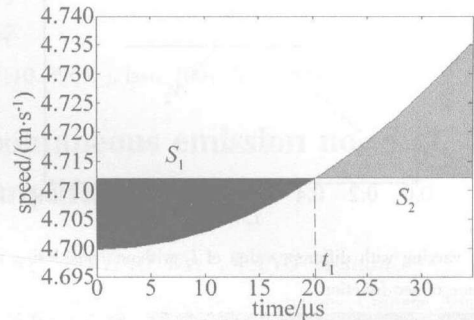


Fig. 9 In the process of synchronization, S_1, S_2 resulting from difference between v_1 and v_2

的位移差 S_1 。随后, 扫描速度 v_1 不断增加, 超过 v_2 , 两者又产生相对位移差 S_2 , 由于 S_1 和 S_2 是在轧辊表面重叠的, 因而最终轧辊表面产生的相对距离满足下式, 且要求此时 S 的最小值 S_{\min} :

$$S = \max(S_1, S_2) \quad (6)$$

若 $S_1 > S_2$ 时, 取 $S = S_1$, 当随着 l_2 的不断增大, S_1 不断减小, 一直减小到 $S_1 = S_2$; 若 $S_1 < S_2$ 时, 取 $S = S_2$, 当随着 l_2 的不断减小, S_2 不断减小, 一直减小到 $S_1 = S_2$; 在仅有当 $S_1 = S_2$ 时, 两者的速度差产生的距离最小, 这个最小距离满足 $S_{\min} = S_1 = S_2$, 且在 t_1 时刻有 $v_1 = v_2$, 即此时满足:

$$\int_0^{\Delta t} v_1 dt = \int_0^{\Delta t} \frac{l_2}{f_3} \cdot l_1 \cdot \omega_1 \cdot \sec^2(\omega_1 t) dt = v_2 \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$v_1 = v_2 = \frac{l_2}{f_3} \cdot l_1 \cdot \omega_1 \cdot \sec^2(\omega_1 t_1) \quad (8)$$

解得 $l_2 = 0.579689\text{mm}$, 代入(8)式解得 $t_1 = 20.311 \mu\text{s}$,

则: $S_{\min} = v_2 \cdot t_1 - \int_0^{t_1} v_1 dt = v_2 \cdot t_1 - \int_0^{t_1} \frac{l_2}{f_3} \cdot l_1 \cdot \omega_1 \cdot \sec^2(\omega_1 t) dt = 0.000164353\text{mm}$ 。则所得到的毛化点的椭圆度即长短轴比为 $(S_{\min} + 0.15)/S_{\min} = 1.0010957$, 可知当取 $l_2 = 0.580796\text{mm}$ 时, 此时满足产生位移 S 最小且 $S_{\min} = 0.000164353\text{mm}$, 此时一定为一个近似圆孔, 其椭圆度(长短轴比)为 1.0010957 。

在实际毛化应用中, 由于多棱镜面数较多, 扫描角

θ 非常小,而且多棱镜转速较快,脉冲作用时间较短,由 \sec 函数所带来的影响实在是太小,因而主要考虑离焦量的影响,而基本可以忽略扫描非线性带来的影响。此时有:

$$v_1 = \frac{l_2}{f_3} \cdot l_1 \cdot \omega_1 \quad (9)$$

取不同的离焦量 l_2 ,其效果如图 10 所示,可知当取离焦量 $l_2 = 0.5812\text{mm}$ 时,此时可以得到近似的圆形毛化斑,如图 11b 所示。

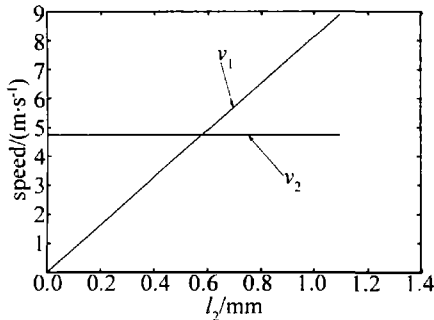


Fig. 10 v_1 varying with different value of l_2 without considering the influence of \sec function

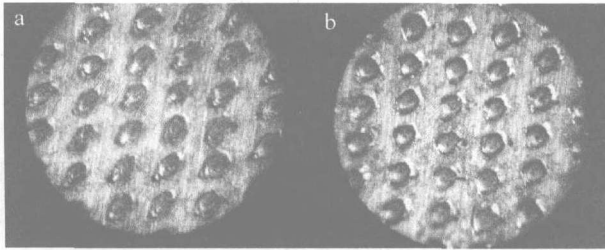


Fig. 11 Photographs of texturing craters produced by multi-heads laser texturing technology

a—when $l_2 = 0\text{mm}$, microscopic photograph of texturing crater ($100\times$)

b—when $l_2 = 0.58\text{mm}$, microscopic photograph of texturing crater ($100\times$)

图 12 为在不考虑 \sec 函数的非线性影响下,毛化点椭圆度随离焦量的变化,通过实践生产发现其与计

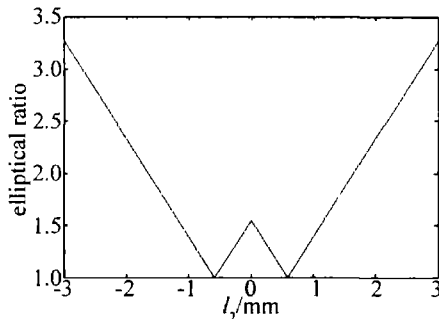


Fig. 12 Elliptical ratio's varying with different l_2 without considering the influence of \sec function

算结果有较好的符合,如图 11 所示。但对于 θ 较大的情况下,其对于速度非线性的影响会大大的增加,因而在设计光学系统时需要充分考虑到这一点,通过对光学系统的设计和对离焦量的控制达到控制椭圆度的目的,以满足特殊毛化点的需求。

4 结论

多棱镜扫描分光多头毛化的激光技术由于其毛化效率成倍的提高,可以满足企业实际生产的需要,已成功应用于实际生产。由于多棱镜扫描所带来的聚焦点跟随,使得其与轧辊旋转同步匹配运动,可以得到椭圆度最小为 1.0010957 的近似圆点。实际应用中,在扫描角度 θ 较小的情况下,可以忽略 \sec 函数所带来的非线性的影响,从而通过调节离焦量和设计光学系统参量来控制毛化点的椭圆度,以满足特种毛化点的需求。

参考文献

- [1] ZHOU J C. Texturing technology used for cold roll [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1996, 17(3): 1-18 (in Chinese).
- [2] TANG J. Test and analysis on surface roughness and micro-profile of cold-rolled steel sheet [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2004, 25(2): 60-70 (in Chinese).
- [3] XU A D. New type of high-power CO₂ laser texturing equipment and technology [J]. Metallurgical Equipment, 2004 (6): 35-37 (in Chinese).
- [4] ZHU D Q, LI S M, ZUO D L, *et al.* Experimental on quick craving by high power CO₂ laser [J]. Laser & Infrared, 1996, 36(3): 172-177 (in Chinese).
- [5] LIU Y, CHEN D R, YANG W Y, *et al.* Experimental investigation of laser textured on roller with micro-convex topography [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 107-110 (in Chinese).
- [6] HE Y F, DU D, LIU Y, *et al.* Parametric analysis of pulsed Nd:YAG laser texturing process [J]. Laser Technology, 2003, 27(1): 8-13 (in Chinese).
- [7] XUE Y, CHEN P F, ZHU M Z. Experimental research on RF CO₂ laser used in roller texturing [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007, 5(4): 16-19 (in Chinese).
- [8] ZHU D Q, ZUO D L, LI S M, *et al.* A numerical approach to the shape of the laser textured roll surface and its experimental comparison [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(1): 68-70 (in Chinese).
- [9] CHEN P F. A method for high power laser multi-heads texturing on roll surface and its device; China, 200610018261. 1 [P]. 2006-07-19 (in Chinese).
- [10] CHEN H Q. Modern applied optical system [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003: 30-79 (in Chinese).