

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0339-03

# 激光毛化加工新型调制斩光系统的设计

王大平<sup>1</sup>, 刘红斌<sup>1</sup>, 王裕民<sup>2</sup>, 胡德金<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030  
<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 为了提高 CO<sub>2</sub> 激光毛化轧辊的质量, 根据激光束扩束聚焦的特点, 设计了一种新型激光束调制斩光系统。采用机械式调制斩光盘使激光束交替透射与反射到加工表面, 达到先预热后毛化或双点毛化的效果。讨论了激光束的调制聚焦光学参数的选择方法, 并结合实例进行了讨论。结果表明, 通过对光腰位置以及散焦程度进行调节, 可以获得合理的焦斑大小与能量密度。使用该光束调制装置加工的毛化轧辊表面具有各向同性和均匀一致的粗糙度, 以及较高的耐磨性。

**关键词** 激光技术; 斩光; 激光毛化; 光束传输

**中图分类号** TN249; TG665 **文献标识码** A

## Design of New Laser Beam Modulating Device for Texturing Machining

WAN Da-ping<sup>1</sup>, LIU Hong-bin<sup>1</sup>, WANG Yu-min<sup>2</sup>, HU De-jin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China  
<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Aim at increasing the quality of textured roller by CO<sub>2</sub> laser processing, a new laser beam chopping and modulating device was designed based on the beam expanding and focussing transformation characteristic. The laser radiation was transmitted and reflected to the machining surface alternately using a mechanical chopper, which resulted in efficient preheating or double points texturing effect. The selection of optical parameters for the laser beam modulating was investigated. An example application was discussed. Reasonable focal spot and energy density were gained by adjusting the position of the local beam waist and the off-focus degree. The laser textured roll had uniform roughness and high surface hardness, and the hardened bumps improved the abrasion resistant quality.

**Key words** laser technique; chopper; laser beam delivery; laser texturing

## 1 引 言

激光毛化是世界上最新近发展起来的冷轧钢辊毛化新技术。激光毛化轧辊时, 高能量密度、高重复频率的脉冲激光束, 聚集照射到轧辊表面, 形成若干微小熔池, 同时辅助气体侧吹熔池中的熔融物, 按指定要求堆积到熔池边缘; 光脉冲作用停止后, 微坑熔融物迅速冷却, 形成表面硬化的微坑和坑边凸台结构<sup>[1]</sup>。连续激光经过激光调制盘调制形成脉冲激光, 用于冶金轧辊的毛化, 可提高表面粗糙度均匀性和各向同性。美国专利<sup>[2,3]</sup>提供了一种激光调制盘, 盘面开有等间距圆周分布的透孔, 透孔与盘面形

成截面为四边形的反射齿。当激光束通过透孔时, 在被加工物表面形成凹坑, 当激光束照射到反射齿上时则反射激光到被加工物面产生预热和淬火效果。然而, 此反射区域并不总是和直接照射区域匹配的, 从而导致预热区对毛化作用不大。当聚焦长度短时, 预热或淬火效果不显著, 斩光盘挡光不完全。斩光盘必须靠近加工面, 否则会加工出连续的螺旋线而非孤立的毛化点<sup>[4]</sup>。

激光毛化对光束质量, 比如激光光束的平行度以及聚焦光斑的质量, 要求都较为苛刻<sup>[5]</sup>。为提高 CO<sub>2</sub> 激光毛化轧辊的质量, 根据光束经过光学系统

**基金项目:** 上海市重点科技攻关项目(05DZ2202)资助课题。

**作者简介:** 王大平(1974—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事光机电装备研究。E-mail: wandapingwu@163.com

**导师简介:** 胡德金(1946—), 男, 重庆人, 教授, 主要从事特种加工与自动化装备系统的开发。E-mail: djhu@sjtu.edu.cn

的变换与传输特性,我们设计了一种新型激光束调制系统,并结合实例对其进行了分析。

## 2 系统设计

### 2.1 设计方案

高重复频率脉冲激光是获得高峰值功率、减小热影响区的有效方法。YAG 调 Q 脉冲激光模式较差,平均功率较低,用于大型冷轧辊的毛化加工时表面粗糙度不高、毛化效率较低,而采用高光束质量的 CO<sub>2</sub> 连续激光进行脉冲调制后可克服这些不足。文献[1,2]通过把高速旋转的机械式斩光盘置于聚焦透镜和工件之间来获得脉冲激光束,转盘离工件距离较近,激光加工时会对斩光盘造成污染。另外,该装置聚焦距离较长,难以获得较小的焦斑,并且预热区也无法进行调整。

为了获得较高的毛化功率密度,以及使聚焦镜远离被处理的工件,可在激光加工系统的导光系统中加入一个倒相式望远镜,即扩束系统,以减小激光束的发散角,然后再聚焦,将光束的束腰位置(焦点位置)变换到加工所允许的范围,从而提高激光束的加工范围和有效焦深,获得较小的焦点光斑直径。预热光斑的获得及其调节采用反射聚焦方式,先用抛物面镜将入射激光变为平行光,经平面镜传输后再由一块离轴抛物面镜聚焦光束。离焦量的调节要求预热光点的功率密度刚刚低于被加工材料的熔点,使激光预热区覆盖整个毛化区。

### 2.2 系统结构

图 1 为设计的激光束调制系统,斩光盘圆周开有一定间距的透孔,采用反射激光束进行预热,透射激光束进行毛化。有扩束系统的透射聚焦系统将激光束高度汇聚到工件表面,获得设定的光斑直径和能量密度。平面反射镜和抛物面反射镜组合对激光束进行反射和聚焦,可前后左右移动该组合镜位置对预热焦斑进行调节。

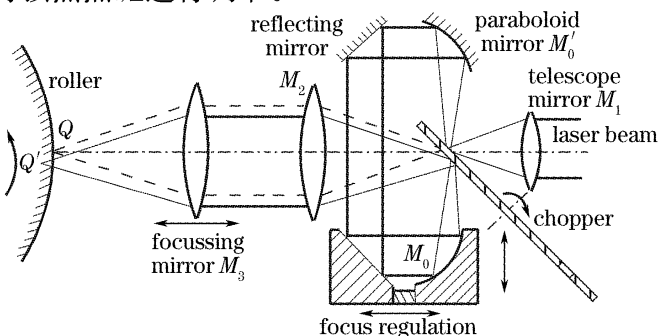


图 1 调制系统示意图

Fig. 1 Sketch of modulating system

工作时,斩光盘逆时针旋转,轧辊顺时针旋转,激光束通过平面反射镜、抛物面镜经反射聚焦后对轧辊表面的 Q' 点进行预热及强化。当转盘转到透孔时,激光束通过扩束镜、聚焦镜聚焦到轧辊表面的 Q 点进行融化, Q 点必须落在 Q' 形成的线段上,才能达到良好的预热效果和毛化作用,其功率密度在几百千瓦以上,在侧吹气流的作用下形成火山坑状、硬度极高的毛化形貌。光点偏移量 QQ' 的确定按照被处理表面的材料特性以及运动、几何参数由调节装置进行调节。可调节参数使反射聚焦光斑与透射聚焦斑具有相同的焦斑尺寸与能量密度,并间隔一定的距离,实现双点毛化的效果。

## 3 光学参数的计算

在其他加工条件不变的条件下,聚焦光斑大小和相对于待加工工件表面的焦点位置对毛化效果影响较大。为了达到特定的聚焦要求,分别采用调焦望远镜系统和失调望远镜系统变换高斯光束,对入射光束进行扩束、准直和聚焦,其光束传输变换原理如图 2 所示。激光束穿过转盘透孔时为处于调焦状态的扩束系统,激光束经过调焦望远镜系统变换后像方腰斑大小和位置为

$$\omega_{02} = |M_T| \omega_{01}, \quad (1)$$

$$l_2 = -M_T(f_1 + f_2) - M_T^2 l_1, \quad (2)$$

其中  $\omega_{01}$  为物方腰斑半径,  $\omega_{02}$  为像方腰斑半径,  $f_1$ ,  $f_2$  分别为物镜、目镜的焦距,  $l_1$  为光腰距物镜的距离;  $l_2$  为光腰距目镜的距离,  $M_T$  为扩束比,大小为  $-f_2/f_1$ 。像方腰斑位置由望远系统的参数和激光器相对望远系统的距离确定。扩束后的高斯光束经过聚焦透镜(焦距为  $f_3$ ) 聚焦后的光斑大小和位置为

$$\omega'_{02} = \omega_{02} \frac{f_3}{[z_{02}^2 + (l'_2 - f_3)^2]^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{l_3} = \frac{1}{f_3} - \frac{1}{l'_2} \cdot \frac{1}{1 + z_{02}^2/[l'_2(l'_2 - f_3)]}, \quad (4)$$

其中  $l'_2$  为入射光束腰到聚焦透镜的距离;  $\omega'_{02}$  为出

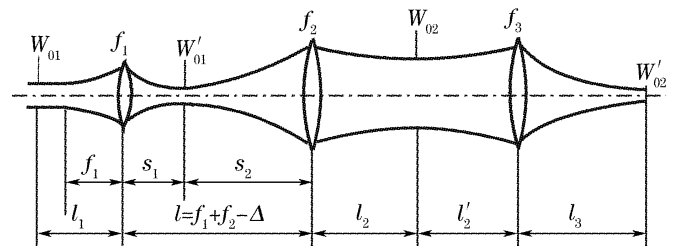


图 2 高斯光束的扩束聚焦传输变换

Fig. 2 Propagation and transformation of Gaussian beam through expanding beam telescope system

射光束束腰半径,  $l_3$  为该束腰到聚焦透镜的距离;  $z_{02} = \pi w_{02}^2 / \lambda$  为入射光束的瑞利长度。可知, 较大的扩束比可得到较小的聚焦光斑, 加工效率较高, 但焦深亦较短, 不利于稳定的加工。

抛物镜与扩束透镜  $M_1$  的焦距均选为  $f_1$ , 当它们距转盘的初始距离相同时, 激光束通过转盘和抛物镜的反射传输类似于调焦望远镜系统。可通过调节抛物镜和转盘的相对位置使其变为失调状态的扩束系统。光束通过失调望远系统的束腰大小和位置为

$$l_2 = \frac{f_2(\Delta - f_2)}{\Delta} + \frac{f_1^2 f_2^2 [l_1 + f_1(f_1 - \Delta)/\Delta]}{\Delta^2 \{ [l_1 + f_1(f_1 - \Delta)/\Delta]^2 + z_{01}^2 \}}, \quad (5)$$

$$w_{02} = w_{01} \frac{|M_T| f_1^2}{\{ z_{01}^2 \Delta^2 + [f_1^2 + \Delta(l_1 - f_1)]^2 \}^{1/2}}, \quad (6)$$

其中,  $\Delta$  为扩束望远系统的失调量, 入射光束共焦参数  $z_{01} = \pi w_{01}^2 / \lambda$ 。(5) 式表明, 可以通过调节失调量来调节扩束望远系统出射光束的束腰位置, 光束轴线的偏移可由抛物镜来调节, 进而影响预热聚焦光斑的位置和大小。

## 4 实例分析

针对激光毛化加工中的特殊要求, 利用大功率  $\text{CO}_2$  激光器和调制光盘对轧辊进行毛化, 其平均功率一般为 1.3~2.5 kW, 调制频率为 2~35 kHz, 这里给出一个设计实例具体说明。激光器采用波长为 10.6  $\mu\text{m}$  的基模输出为主的横流  $\text{CO}_2$  连续激光器, 功率为 1300 W, 从激光器出射的光束直径为 20 mm, 斩光盘的旋转速度为  $10^4$  r/min, 轧辊进给速度为 1.8 m/s。扩束光学调制系统的结构参数为:  $f_1 = 30$  mm,  $f_2 = 90$  mm,  $f_3 = 100$  mm,  $l_1 \geq f_1 + f_2$ , 扩束倍数  $|M_T| = 3$ 。激光束经过调焦变换后可得  $l_2 = f_2$ ,  $l'_2 = f_3$ ,  $l_3 = f_3$ , 焦深  $z_{01} = 113$  mm, 聚焦光斑直径  $2w'_{02} = 0.112$  mm, 聚焦点功率密度为

$1.33 \times 10^7$  W/mm<sup>2</sup>。当扩束望远系统置于离焦状态对毛化点预热时, 光点离焦量为 -0.08 mm, 光点的偏移量  $|QQ'| < 0.13$  mm, 在扫描时间 0.12 ms 内, 温度迅速升到材料熔化点附近。通过调整激光扫描速度, 控制单脉冲功率、脉宽、离焦量等参数, 采用惰性辅助气体侧吹, 最终可以获得均布分离的火山坑状毛化点。毛化硬度可以达到 HV900 以上, 毛化轧辊具有较高的耐磨性。

## 5 结 论

基于基模高斯光束通过扩束聚焦光学系统的变换特性的分析, 设计了一种新型激光束调制斩光系统。该装置可以调节离焦量来调节高斯光束束腰位置以及散焦程度, 获得较合理的聚焦光斑和能量密度。通过选择调制器最佳的结构参数, 可使毛化点实现有效的预热淬火和毛化。使用该光束调制装置加工的毛化轧辊表面具有各向同性和均匀一致的粗糙度、较高的耐磨性。

## 参 考 文 献

- 1 O. Deutscher. Methods for attaining particular roughness; on cold rolled strip [J]. *Iron and Steel Engineer*, 1997, **74**(5): 35~40
- 2 J. Crahay. Modulating a laser beam [P]. US Patent, 4462660, 1984
- 3 T. Frederic. Device for modulate a laser beam [P]. US Patent, 4885751, 1989
- 4 Zuo Duluo, Zhu Daqing, Xu Zhene *et al.*. Effects of chopper on laser-texturing of rolls by  $\text{CO}_2$  laser [C]. *SPIE*, 1999, **3862**: 347~351
- 5 Liu Liping, Wang Qi. Design of the local beam branch in  $\text{CO}_2$  laser imaging radar optical system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 605~608  
刘丽萍, 王 骐.  $\text{CO}_2$  脉冲外差激光成像光学系统中高斯光束光路的设计 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 605~608
- 6 Lü Baida. *Laser Optics; Laser Beam Propagation and Beam Quality Control* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992  
吕百达. *激光光学: 激光束的传输变换和光束质量控制* [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992