

文章编号: 0258-7025(2008)11-1730-05

# 激光热处理光束优化系统

王云山 王娟娟 朱福栋

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 激光束的光强分布以及光斑形状对激光热处理硬化层性能影响极大,一般要求光强均布的矩形光斑或宽带光斑;但是光强均布的激光束不一定产生均匀的硬化层,目前的激光热处理光束优化装置得到的是中间厚,两边薄的月牙形分布硬化层。为了改善激光热处理硬化层分布的均匀性,在分析国内外激光热处理光束优化系统研究现状及存在问题的基础上,提出了光束优化系统的两种方案,激光扫描环形光斑和线形光斑。建立了两种光斑温度场的数学模型,模拟了温度场分布。从理论上说明了两种方案能够改善激光热处理硬化层分布均匀性。

**关键词** 激光技术; 激光热处理; 光束优化; 数学模型; 温度分布

**中图分类号** TN 249; TG 151 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1730

## Beam Optimum System for Laser Heat Treatment

Wang Yunshan Wang Juanjuan Zhu Fudong

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** It is great that the influence of laser beam intensity distribution and its shape on laser hardened layer performance. Rectangle facula or wide-band facula are applied widely. But laser beam of uniform intensity distribution can not always generate uniform hardened layer. At present, using general laser heat treatment beam optimum equipment, the distribution shape of laser hardened layer was crescent. Based on the analysis of research on beam optimum system for laser heat treatment in the world, two different methods on laser beam optimum are present in order to improve distribution uniformity of hardened layer. Laser scanning ring facula and linear facula are analyzed in the new methods. The mathematic models of laser beam optimum are built and their temperature field distributions are simulated. The distribution uniformity of the hardened layer is improved.

**Key words** laser technique; laser heat treatment; beam optimum; mathematic models; temperature distribution

## 1 引 言

20 世纪 70 年代,利用大功率激光实现材料表面相变硬化的可能性在实验室得到证实。我国自 70 年代末研制成功千瓦级二氧化碳激光器之后,激光热处理的工业应用亦取得了重要的成就。但时至今日,激光热处理在工业上的应用情况远远低于最初的估计,其中一个重要原因是光束的质量限制了激光技术的应用水平。因此研究激光束优化系统意义重大。

## 2 国内外激光热处理光束优化系统研究现状及存在问题

人们认为在激光热处理时,作用光束在材料表

面形成截面为方形或矩形的均匀光斑是一种较理想的光束结构<sup>[1]</sup>。为此,近 20 多年来,国内外研制出了不少光束变换系统:一是通过光学元件的对接对光束进行变换、整形:非球面镜、光波导镜、反射式面式/带式积分镜、光楔阵列均束器、二元光学元件、随机相位板等;二是通过扫描方式实现均匀的矩形光斑或带形(线形)光斑:机械电磁振镜、激光宽带扫描转镜等;为满足不同需要,人们仍在探索新方法<sup>[2~6]</sup>。从准确控制激光作用区域观点而言,这些具有整齐边界的光束无疑是一种较好的光束。但是实验和研究很容易证实,均匀的光强分布(功率密度分布)的光斑不一定产生均匀的热作用。目前,激

收稿日期:2008-09-08; 收到修改稿日期:2008-10-10

基金项目:天津市自然科学基金项目(08JCYBJC09200)资助课题。

作者简介:王云山(1954—),男,博士,教授,主要从事激光材料加工和激光与材料相互作用理论及应用等方面的研究。

E-mail: wys0126@126.com

光淬火中常用功率密度均布的矩形光斑或宽带光斑,用这两种形状激光扫描得到的是截面形状为中间厚、向光斑边缘两侧逐渐变薄的“月牙形”硬化层,如图 1 所示。其原因是在光斑中心处热量主要向纵深方向传递,等温线涉及的深度较深,即硬化层较厚;而越靠近光斑边缘,基体横向热传导越强烈,使许多热量向边缘散失,导致纵向传递的热量减少,造成等温线涉及的深度逐渐变浅,即硬化层越来越薄。

针对上面的问题,文献[7]早在 1997 年就提出,即便是一个简单的平面工件,如果期望获得一个均匀的淬火带,事实上需要在作用光斑边缘有能量突起的光束。但时至今日,相关的报道很少,没有相应的装置被做出来。

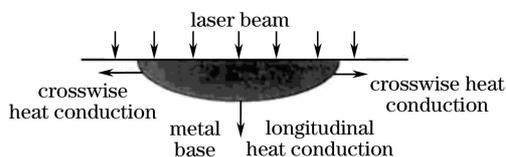


图 1 横向热传导对硬化层分布均匀性的影响

Fig. 1 Influence of crosswise heat conduction on distribution uniformity of hardened case

文献[8]提出为使靠近光斑边缘处的硬化层厚度增大,改善其分布均匀性,必须设法加大光斑边缘的能量注入,以补偿由于横向热传导所带来的部分热损失。并通过两种途径来实现这一目的:一是改变矩形光斑内的激光功率密度分布,如增大光斑边缘处的功率密度,使其呈“马鞍形”分布。这与文献[7]所述一致,但具体如何对光束进行变换,也没给出;二是改变光斑形状,将原矩形光斑改为曲边矩形。文献对采用曲边矩形进行激光淬火来改善硬化层分布均匀性作了理论上的分析和研究,表明采用曲边矩形光斑进行激光淬火能够使硬化层分布更加均匀,是进一步提高激光淬火质量的有效途径之一。这对设计新型的光束处理装置有一定的参考价值,但由于曲边矩形光斑有锐角,在现实中不容易实现,到目前为止还没有研制出相应的光束处理装置能获得所要求的曲边矩形光斑。

### 3 激光热处理光束优化系统设计方案

本文提出两种研制激光热处理光束优化系统的方案,来对激光束进行扫描和变换,能够实现边缘能量加强的光斑。依据温度场的叠加原理<sup>[9]</sup>建立了光斑温度场的数学模型,并模拟得到了光斑的温度场分布。从理论上说明这两种方案能够改善硬化层分布的均匀性,是拓展激光热处理应用水平的一种手段。

#### 3.1 环形光斑温度场数学模型及其温度场分布

透镜绕激光束中心轴做偏心旋转可以扫描得到环形光斑,环形扫描原理<sup>[10]</sup>如图 2 所示。与透镜光轴平行的激光束射向透镜,其中激光束中心轴与透镜光轴之间的间距为  $r$ 。经透镜折射后,激光束聚焦于透镜的焦点。当透镜绕激光束中心轴旋转时,会在透镜焦平面上扫描出一个圆。改变  $r$  的大小,扫描圆的大小也会随之改变。

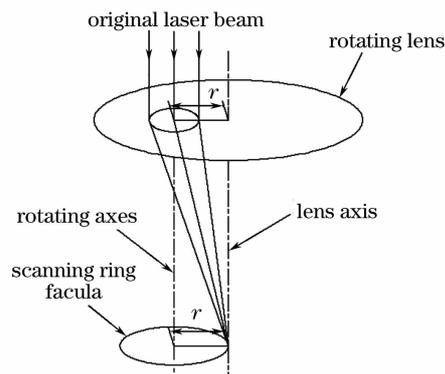


图 2 环形光斑扫描原理图

Fig. 2 Scanning principle of ring facula

环形光斑是原始激光束通过旋转透镜的聚焦扫描投射到作用区域反复叠加的结果,其宏观效果为一环形的线光斑。将透镜聚焦光斑看成点光源,根据半无限大导体表面瞬时点热源温度场数学模型<sup>[9]</sup>,点光源  $t=0$  时作用在点  $(x_0, y_0, z_0)$  处热量为  $q$  的瞬时点热源,在  $t$  时刻使点  $(x, y, z)$  处的温度为

$$T(x, y, z, t) = \frac{2q}{c\rho\pi^{3/2}(4\alpha t)^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}{4\alpha t}\right], \quad (1)$$

式中  $\rho$  为材料密度,  $c$  为材料比热容,  $\alpha = \lambda/(\rho c)$  为材料热扩散率,  $\lambda$  为材料热导率。

如图 3 所示的圆为扫描轨迹。建立直角坐标系,设  $t=0$  时刻,在  $xy$  坐标平面上扫描起始点  $(r, 0, 0)$  处有一点热源,沿半径为  $r$  的圆形扫描轨迹逆时针匀速运动。其功率为  $p$ , 材料对热源的吸收率为  $\mu$ ,

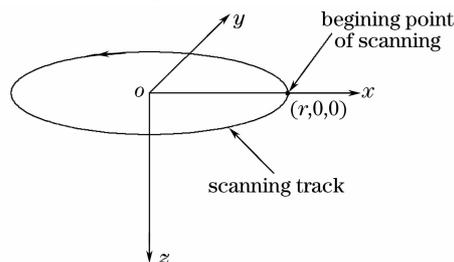


图 3 扫描轨迹示意图

Fig. 3 Scanning track

扫描一周所用的时间为  $t_0$  ( $t_0 = 1/f$ , 由扫描频率  $f$  确定)。

建立在  $t = nt_0$ , 即扫描  $n$  周后温度场的数学模型。将时间区间  $[0, t_0]$  等份, 每份长  $d\tau_i = t_0/m$ ,  $i = 1, \dots, m$ , 其中  $m, n$  为正整数。对应时刻  $\tau_i = it_0/m$ , 点热源转过的圆弧所对应的圆心角为  $\theta =$

$2\pi i/m$ , 则点热源此时的坐标为

$$\begin{aligned} x_i &= r \cos \theta = r \cos(2\pi i/m), \\ y_i &= r \sin \theta = r \sin(2\pi i/m), \\ z_i &= 0. \end{aligned}$$

热量  $dq_i = \mu p d\tau_i = p\mu t_0/m$ , 则在  $\tau_i$  时刻放热的点热源在  $t$  时刻使材料内任一点  $(x, y, z)$  处的温度变化为

$$dT_i = \frac{2p\mu(t_0/m)}{c\rho[4\alpha\pi(t-it_0/m)]^{3/2}} \exp\left\{-\frac{[x-r\cos(2\pi i/m)]^2 + [y-r\sin(2\pi i/m)]^2 + z^2}{4\alpha(t-it_0/m)}\right\}. \quad (2)$$

运用递推法可以求出在  $t_0$  时刻即扫描完一周时, 材料内部任一点  $(x, y, z)$  处的温度函数表达式

$$T_1 = \sum_{i=0}^{m-1} \left\{ \frac{2p\mu(t_0/m)}{c\rho[4\alpha\pi(t-it_0/m)]^{3/2}} \exp\left\{-\frac{[x-r\cos(2\pi i/m)]^2 + [y-r\sin(2\pi i/m)]^2 + z^2}{4\alpha(t-it_0/m)}\right\} \right\}. \quad (3)$$

在  $nt_0$  时刻即扫描完  $n$  周时, 材料内部任一点  $(x, y, z)$  处的温度应该是将  $n$  次扫描的温度叠加, 运用温度场的叠加原理可求得其温度场函数表达式为

$$T_n = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} \left\{ \frac{2p\mu(t_0/m)}{c\rho[4\alpha\pi t_0(n-k-i/m)]^{3/2}} \exp\left\{-\frac{[x-r\cos(2\pi i/m)]^2 + [y-r\sin(2\pi i/m)]^2 + z^2}{4\alpha t_0(n-k-i/m)}\right\} \right\}. \quad (4)$$

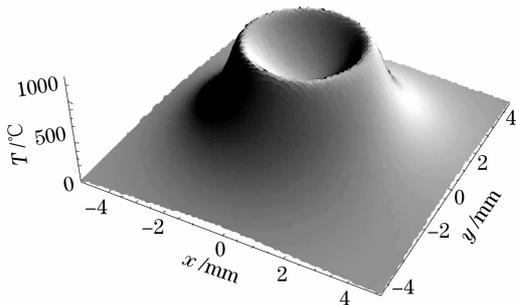


图 4 环形光斑温度场分布图  
Fig. 4 Temperature field of ring facula

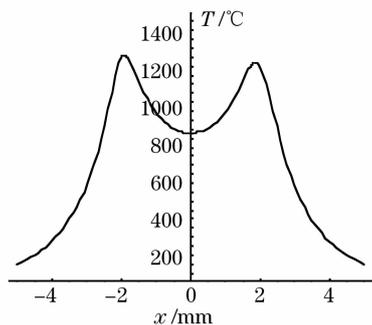


图 5 环形光斑温度场分布截面图  
Fig. 5 Section chart of ring facula's temperature field

根据(4)式, 模拟激光束通过旋转透镜的聚焦扫描, 在 45# 钢上得到环形光斑的温度场分布。45# 钢的热物性参数为:  $c = 577.78 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$ ;  $\rho = 7860 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $\alpha = 1.03 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。取  $m = 100$ , 材料对热源的吸收率  $\mu = 80\%$ 。当激光器功率  $p = 1300 \text{ W}$ , 扫描半径  $r = 2 \text{ mm}$ , 扫描周数  $n = 80$ , 扫描

频率  $f = 200 \text{ Hz}$  时, 在材料表面下  $z = 0.4 \text{ mm}$  处的光斑的温度场分布如图 4 所示。图 5 是与它相对应的在  $xoz$  坐标平面上的二维截面图。

研究发现, 当环形光斑直径比较大时, 周围的热量不足以影响中心, 中心温度很低, 因此环形光斑不宜过大。当工件磨损面积不大时, 适合用这种形状光斑来进行表面强化处理。但要实现较大面积硬化处理时, 需将光束展宽, 宽度可调的线形光斑可以实现。

### 3.2 线形光斑温度场数学模型及其温度场分布

激光扫描宽带光斑是一种通过多面体镜旋转扫描得到的光斑能量密度均匀的线光斑, 而这里要实现的是两边能量密度比中间高的线光斑。将环形光斑通过柱面反射镜聚焦可达到目的, 但只有平行光束通过柱面镜才能聚焦成一条线。因此必须先将上面聚焦的环形光斑变为平行光束分布的环形光斑, 然后再通过柱面聚焦反射镜的变换, 最终得到线形光斑。

具体变换原理如下: 在环形扫描原理基础上, 进一步做光束变换。用另一透镜 2 将上面的聚焦光束变为平行光束, 两个透镜作为一个整体来对原始光束进行扫描, 得到一能量密度均匀且光线相互平行

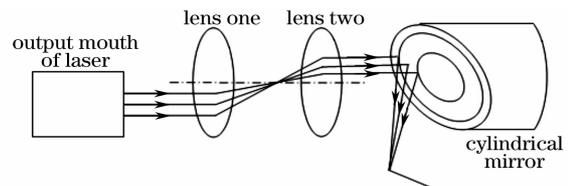


图 6 线形光斑扫描原理图  
Fig. 6 Scanning principle of linear facula

的环形光束,再用一  $45^\circ$  的柱面聚焦反射镜对环形光束聚焦,最终在柱面镜的焦线处得到一功率密度从中心向边缘逐渐增大的线形光斑。整个过程是个动态扫描过程,这里只能给出一个静态的简单的变换原理示意图,如图 6 所示。

线形光斑相当于将  $xoy$  平面上的环形光斑向  $x$  轴垂直投影得到,因此  $x$  轴坐标不变, $y$  轴坐标为零,即将  $x_i = r\cos(2\pi i/m)$ ,  $y_i = 0$  代入(4)式就得到在  $t = nt_0$  时刻线形光斑温度场数学模型为

$$T_n = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} \left\{ \frac{2p\mu(t_0/m)}{c\rho[4\alpha\pi t_0(n-k-i/m)]^{3/2}} \times \exp\left\{-\frac{[x-r\cos(2\pi i/m)]^2 + y^2 + z^2}{4\alpha t_0(n-k-i/m)}\right\}\right\}. \quad (5)$$

根据(5)式,模拟线形光斑在  $45^\#$  钢上作用的温度场分布。取  $m = 200$ ,材料对热源的吸收率  $\mu = 80\%$ 。当激光器功率  $p = 2000$  W,扫描半径  $r = 4$  mm,扫描周数  $n = 20$ ,扫描频率  $f = 200$  Hz 时,在材料表面下  $z = 0.6$  mm 处的光斑的温度场分布如图 7 所示。图 8 是与它相对应的在  $xoz$  坐标平面上的二维截面图。

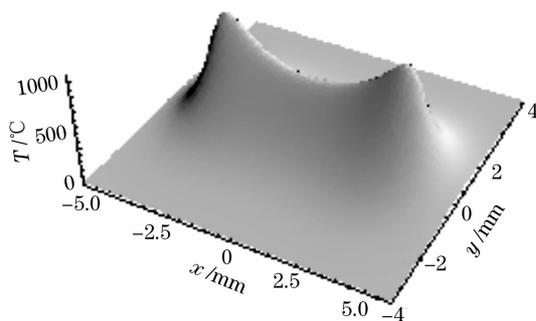


图 7 线形光斑温度场分布图

Fig. 7 Temperature field of linear facula

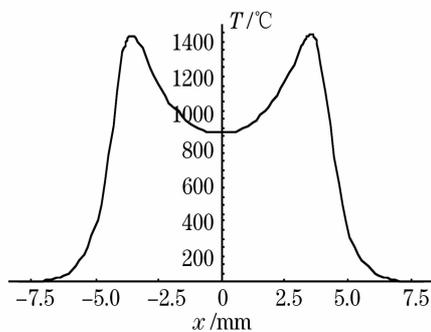


图 8 线形光斑温度场分布截面图

Fig. 8 Section chart of linear facula's temperature field

## 4 结 论

计算和模拟表明,扫描得到的环形光斑和线形光斑由于加强了光斑边缘的能量注入,使边缘附近的温度显著高于光斑中心处温度,温度场分布呈现反翘,其反翘的程度也会由于工艺参数选择不同而异。如果对工件表面激光淬火,由于淬火温度必须控制在材料的奥氏体相变温度和熔点温度之间,因此反翘部分的最高温度与中心温度的差值应控制在一个比较适当的范围内。差值小,对硬化层分布的均匀性不利;差值大,可能导致边缘附近发生局部熔化,或者光斑中心层深过浅。同理,其他激光热处理工艺参数的选择也必须考虑这个问题。

提出的两种研制光束优化系统方案,能通过激光扫描得到环形光斑和线形光斑来解决相应问题。理论研究表明,两种光斑通过加强光斑边缘的能量注入能够使硬化层分布更加均匀,是进一步提高激光热处理质量的有效途径之一。研究结果对设计新型的光束优化装置具有参考价值。由于目前相应的光束优化装置还在研制之中,这里只给出了一个理论模型,进一步的研究工作将在装置做出来之后通过具体的实验来验证。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Xichen. Study on beam pattern for laser heat treatment [J]. *Chin. J. Lasers*, 1990, **17**(4): 957~959  
杨洗陈. 激光热处理宽带光斑的研究[J]. *中国激光*, 1990, **17**(4): 957~959
- 2 Zhu Guangzhi, Zhang Yaoning, Zou Xuefen. Vibrating mirror for smoothing of high power laser beam[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 175~179  
朱广志,张耀宁,邹雪芬. 摆动反射镜实现高功率激光束的平滑化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 175~179
- 3 Yang Xiangtong, Fan We. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1705  
杨向通,范 薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1705
- 4 Lin Yong, Hu Jiasheng, Wu Kenan. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1682~1687  
林 勇,胡家升,吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1682~1687
- 5 Liang Minyong, Liao Ningfang, Feng Jie. Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1359~1364  
梁敏勇,廖宁放,冯 洁. 三反射式柱面光学系统设计及优化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1359~1364
- 6 Wang Jingquan, Fang Liang, Zhang Zhiyou. Implementation of coherent array beam combination using two dimensional sine phase grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(1): 39~44

- 王景全,方 亮,张志友. 用二维正弦相位光栅实现阵列激光相干并束[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 39~44
- 7 Li Junchang. Analysis on laser heat treatment status[J]. *J. Kunming University of Science and Technology*, 1997, **22**(1): 146~153
- 李俊昌. 激光热处理现状分析[J]. 昆明理工大学学报, 1997, **22**(1): 146~153
- 8 He Fang, Wu Gang, Song Guangming. Study on laser hardening with curved rectangular beam [J]. *J. Tianjin Polytechnic University*, 2003, **22**(5): 17~20
- 何 芳,吴 钢,宋光明. 曲边矩形光斑激光淬火的理论研究[J]. 天津工业大学学报, 2003, **22**(5): 17~20
- 9 Wang Yunshan, Yang Xichen, Liu Yajun. Temperature field of laser sanning line facula[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 981~986
- 王云山,杨洗陈,刘亚君. 激光扫描光斑温度场[J]. 中国激光, 2006, **33**(7): 981~986
- 10 Li Jiao, Tang Xinhua, Huang Xuanshao. Optical design of circular laser vision sensor[J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(4): 295~299
- 李 姣,唐新华,黄宣劭. 环形扫描激光视觉传感器的光学系统设计[J]. 应用激光, 2007, **27**(4): 295~299