

文章编号: 0258-7025(2008)11-1853-04

一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜

罗 曦¹ 陈培锋¹ 王 英¹ 熊文策²

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; ² 华中科技大学温州先进制造技术研究院, 浙江 温州 325003)

摘要 介绍了一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜的设计原理和实验结果。根据几何光学原理, 采用光线追迹的方法对该抛物面镜的光斑进行分析, 证明通过抛物面镜反射聚焦后, 能够将原始圆形激光束整形为光强分布均匀的窄条形光斑。并利用该新型抛物面镜及横流 CO₂ 激光器, 对 45[#] 钢进行了激光相变硬化研究, 测量了淬火带尺寸和淬硬层深度, 并对硬化层形貌及其金相组织进行了观察和分析。结果表明, 当激光器输出功率为 3 kW, 窄条光斑长度 12 mm, 扫描速度 15 mm/s 时, 该 45[#] 钢淬硬层硬度值可达 540~580 HV_{0.3}, 是非淬硬层的 3.5~4 倍。淬硬层深度约为 1 mm, 单道淬火宽度 10 mm 以上, 硬化层分布均匀。

关键词 激光技术; 新型宽带光斑成形抛物面镜; 光线追迹; 激光相变硬化

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1853

Novel Kind of Wide-Band Shaping Parabolic Mirror for High Power Laser Processing

Luo Xi¹ Chen Peifeng¹ Wang Ying¹ Xiong Wence²

¹College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

²Wenzhou Advanced Manufacturing Technology Institute of Huazhong University of Science & Technology,
Wenzhou, Zhejiang 325003, China

Abstract The design principle and experiment result of a novel kind of wide-band shaping parabolic mirror for high power laser processing are introduced. According to the geometrical optics, the focusing spot of this parabolic mirror is studied by ray tracking. It is demonstrated that after being focused by this parabolic mirror, the original circular laser beam could be shaped into the narrow strip with uniform distribution of light intensity. The laser hardening is carried out for 45[#] steel using crosscurrent CO₂ laser and the parabolic mirror, the laser hardening band size and hardened depth are tested, then the hardened layer shape and microstructure in the hardened layer are observed and analyzed. The results show that the micro hardness is 3.5~4 times as high as the unquenched area which reaches 540~580 HV_{0.3}, when the laser output power is 3 kW, the length of the strip spot is 12 mm and the scanning speed is 15 mm/s. The hardened depth is approximately 1 mm, the single quenching width is larger than 10 mm, and the hardened layer is well-distributed.

Key words laser technique; novel kind of wide-band shaping parabolic mirror; ray tracking; laser hardening

1 引 言

随着激光热处理的推广应用, 如何优化光束质量^[1]与形状以提高处理效率一直为人们所关注^[2,3]。在大功率激光热处理、淬火和熔覆中往往需要把激

光束变换成一定功率密度均匀分布的宽带光斑^[4], 以提高激光加工的质量。迄今, 已发展了多种光束整形技术, 如二元光学器件^[5,6]、小透镜阵列^[7]、正多面转镜扫描^[3]、离焦光斑、带式积分镜与方形积分

收稿日期: 2008-09-09; 收到修改稿日期: 2008-10-08

作者简介: 罗 曦(1982—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: luoxihust@126.com

导师简介: 陈培锋(1963—), 男, 浙江人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工与光电检测方面的研究。

E-mail: pfchen@mail. hust. edu. cn(通信联系人)

镜^[8]等方法来获得。其中使用较为成功的是方形积分镜,但其制造复杂,粘结剂受到高功率激光束的照射容易退化变质,且不易散热,至使小镜片吸收激光热量后容易变形,从而影响聚焦质量^[8]。本文介绍了一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜,克服了方形积分镜的缺点,且制造工艺简单,可采用高精车在反射镜基体上一次加工成型,避免了大功率激光照射引起的镜面变形。

2 设计原理

新型宽带光斑成形抛物面镜的设计原理是在与标准 90°离轴抛物面反射聚焦镜的回转方向相垂直的方向上采用新型类抛物面代替标准抛物面。这样,原始圆形激光束经该抛物面镜反射后,将在回转面(即 $z = 0$ 平面)与焦平面上形成一对相互垂直的窄条形光斑。

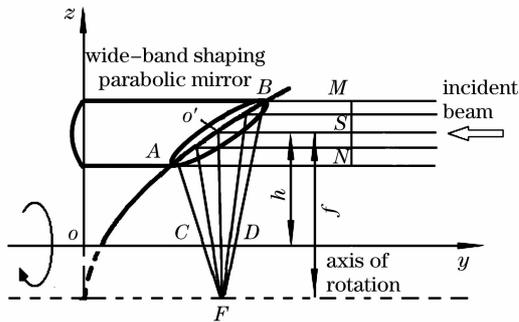


图 1 新型宽带光斑成形抛物面镜设计原理图
Fig. 1 Schematic diagram of novel kind of wide-band shaping parabolic mirror design

图 1 为新型宽带光斑成形抛物面镜光路设计原理图。新型抛物面与入射激光束成 45°夹角,镜面中心点 o' 与激光反射回转轴(即 y 轴)的距离为 h 。在该镜面中心点 o' ,入射激光束与出射激光束的夹角为 90°。而抛物面的焦点在 F 处,焦距为 f ,则 F 点的坐标为 $F(f/2, -f + h)$ 。新型抛物面弧线采用非标准抛物线方程

$$y = \frac{(z + f - h)^2}{2f} (z \geq 0), \quad (1)$$

于是,由图 1 中的坐标关系可知新型抛物面镜满足方程

$$y = \frac{(f - h)^2 + x^2 + z^2 + 2(f - h) \sqrt{x^2 + z^2}}{2f}. \quad (2)$$

如图 1 所示,抛物面弧线 AB 将激光束反射到回转轴处形成长度为 a 的线段 CD ,也就是所设计的回转面(即 $z = 0$ 平面)上窄条形光斑的长边。

从图 1 中还可以看到,入射平行激光束经抛物面弧线 AB 反射后将会聚于抛物线的焦点 F 处。那么当该抛物面弧线 AB 绕回转轴旋转时,将在该新型抛物面镜的焦面处形成与回转面处相垂直的窄条形光斑。

两窄条形光斑的长度均与抛物面镜的焦距 f ,镜面中心点 o' 距离激光反射回转轴的距离 h ,以及抛物弧线 AB 的长度相关。

3 光路追迹

根据几何光学原理,采用光线追迹的方法对新型抛物面镜的聚焦光斑分布形状进行分析。建立如图 1 所示的坐标系,选入射光一波振面 MSN ,将坐标系原点平移至 S 点,得到新坐标系 $Sx'y'z'$ 。假设入射光束为均匀分布的圆光束^[9],选取入射光点阵如图 2 所示。

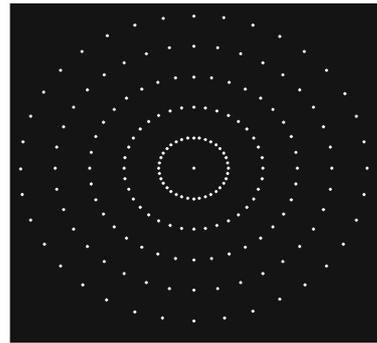


图 2 入射点光阵

Fig. 2 Incident light lattice

取图 2 中任意一点,假设其入射光线方程为

$$\frac{x - x_0}{\cos \alpha} = \frac{y - y_0}{\cos \beta} = \frac{z - z_0}{\cos \gamma} \quad (3)$$

联解方程(2),(3),可得入射光线与该类抛物面的交点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 。

那么,由(2)式可得交点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 处该类抛物面的法线方程为

$$\frac{x - x_0}{x_1 + (f - h) \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + z_1^2}}} = \frac{y - y_0}{-f} = \frac{z - z_0}{z_1 + (f - h) \frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + z_1^2}}}. \quad (4)$$

利用入射线、反射线及法线间的夹角关系,可求得反射光线唯一方向角 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ 。于是,可得反射线方程为

$$\frac{x - x_0}{\cos \alpha_0} = \frac{y - y_0}{\cos \beta_0} = \frac{z - z_0}{\cos \gamma_0}. \quad (5)$$

对应某一确定的入射光束分布,由(5)式可求得任意 z 平面内对应光点位置,取遍图 2 中各点,则可得任意 z 平面内光斑形状。

考虑实际多模高功率横流 CO_2 激光器的光束发散角为 6 mrad,将入射光看作半角为 3 mrad 的球面光束^[9]。取新型抛物面镜的焦距 $f = 210$ mm,抛物面中心点 o' 距离激光反射回转轴的距离为 $h = 60$ mm,入射光束直径 $D = 30$ mm,可得回转面与焦平面上的光斑分布如图 3 所示。

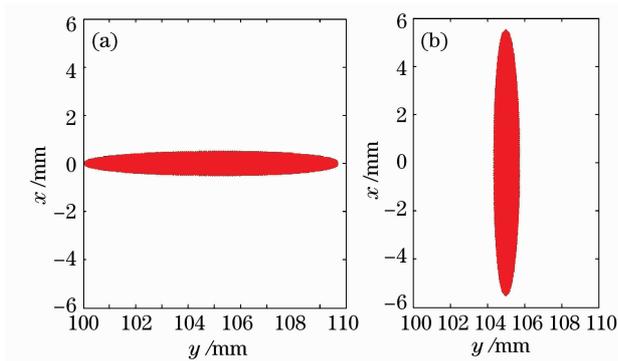


图 3 新型宽带光斑成形抛物面镜光斑分布

(a) 回转面上的光斑分布;(b)焦平面上的光斑分布

Fig. 3 Spot distribution of novel kind of wide-band shaping parabolic mirror. (a) spot distribution at the plane of $z = 0$; (b) spot distribution at the focal plane

从图 3 中可以看出,入射圆形激光束经抛物面镜反射聚焦后将在回转面与焦平面上产生一对互相垂直的窄条形光斑。证明新型抛物面镜可以将原始圆形激光束变换为窄条形分布。

4 实验研究

实验采用 5 kW 横流 CO_2 激光器。激光束经新

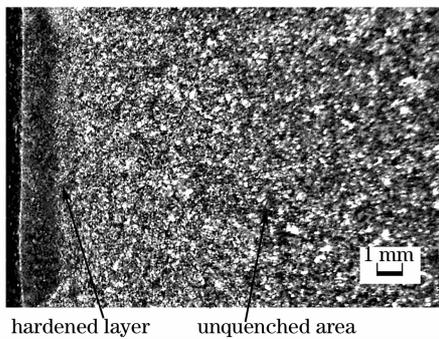


图 4 硬化层形状

Fig. 4 Shape of hardened layer

型抛物面镜聚焦整形后,在工件上形成窄条形光斑。实验所用样品材料为 45# 钢,尺寸大小及形状为长

250 mm,宽 150 mm,高 25 mm 的板材,用丙酮清洗干净,为提高试样对激光束能量的吸收率,实验前对样品表面进行“黑化”预处理。实验中保持工件处窄条形光斑的长度 $L = 12$ mm 不变。为了获得预期的激光硬化效果,通过多次试验,最终确定的工艺参数为激光器输出功率 3 kW,扫描速度 15 mm/s。

激光处理后,用显微镜观察得到的硬化层形状如图 4 所示。

由图 4 可以看出,硬化带呈所谓的“平顶月牙形”分布^[10],表明光斑内部光强分布均匀。两侧面的月牙,主要是由于热传导原因形成的,尽管光斑两端光强与内部光强相同,但由于材料传热,造成两端能量扩散而产生月牙形貌。经过测量可得:淬硬层深度约为 1mm,单道淬火宽度约为 12 mm。

45# 钢的基体原始组织为珠光体+网状铁素体,如图 5(a)所示。图 5(b)为经激光相变硬化后的组织可以发现,宽带激光淬火造成了组织的细化,热影响区的组织结构较图 5(a)发生了明显的变化,其组织变为马氏体+少量残余奥氏体。宽带淬火后的淬硬层硬度值可达 540~580 $\text{HV}_{0.3}$,为基体硬度的 3.5~4 倍。组织细化和大量马氏体的形成是 45# 钢激光淬火硬度提高的主要原因^[11]。

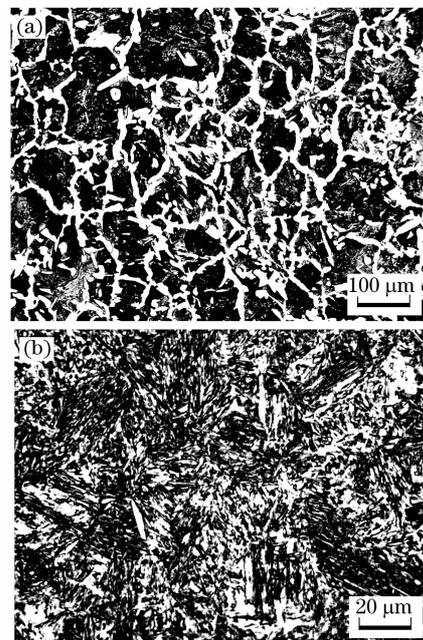


图 5 45# 钢的组织形貌

(a) 原始组织;(b)激光相变硬化区组织

Fig. 5 Microstructure of the 45# steel under different states (a) original state; (b) laser hardened zone

5 结 论

提出了一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜,通过该抛物面镜反射聚焦后,能够将原始圆形激光束整形为光强分布均匀的窄条形光斑,促进了激光热处理^[12]、淬火处理^[13]时厚度的均匀性,减小了重叠部分的回火区,提高了激光热处理的效率;新型宽带光斑成形抛物面镜可利用回转型高精车机床一次成型加工,制造工艺简单,可提高反射镜耐大功率激光束和散热的能力及聚焦质量。利用该新型宽带光斑成形抛物面镜对 45[#] 钢进行激光相变硬化研究,结果表明,当激光器输出功率为 3 kW,窄条光斑长度 12 mm,扫描速度 15 mm/s 时,宽带淬火后的淬硬层硬度值可达 540~580HV_{0.3},是基体硬度的 3.5~4 倍;淬硬层深度约为 1mm,单道淬火宽度 10 mm 以上;硬化带形状均匀,呈“平顶月牙形”分布。实验证明,该新型宽带光斑成形抛物面镜在材料表面激光热处理领域有着较为广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Xuesheng Liu, Zhiyong Wang, Qiang Wu *et al.*. 500-W high average power, high beam quality Nd:YAG solid state laser with one focusing reflector[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 409~411
- Li Junchang, Raphael Chevalier, Jean - Marc Lange. Rapid determination of the temperature field and of the geometry of the hardened zone in the heat treatment by a powerful laser beam[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(7): 665~672
李俊昌, R. 谢瓦利埃, J. M. 兰热. 激光热处理温度场及相变硬化带的快速计算[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(7): 665~672
- Yang Xichen. Study of laser pattern for a wide-band laser heat treatment [J]. *Chinese J. Lasers*, 1990, **17**(4): 229~235
杨洗陈. 激光热处理快带光斑的研究[J]. *中国激光*, 1990, **17**(4): 229~235
- Zhan Huanxiao, Wang Yong, Han Tao *et al.*. Residual stress analysis of the remelting zone on 42 CrMo steel plate in single-pass laser wide-band treatment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 625~630
占焕校, 王 勇, 韩 涛 等. 42CrMo 钢表面单道激光宽带处理后熔凝层的残余应力[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 625~630
- J. Cordingley. Application of a binary diffractive optic for beam shaping in semiconductor processing by lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2538~2542
- 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): 1682~1686
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): 1682~1686
- Tao Shaohua, Chen Peifeng, Qiu Junlin. Study of a diffractive refractive optical element used for Gaussian beam's shaping[J]. *Optical Technology*, 1998, (6): 3~5
陶少华, 陈培锋, 丘军林. 一种用于高斯光束整形的衍射光学元件的研究[J]. *光学技术*, 1998, (6): 3~5
- Wang Zhiyong, Chen Hong, Zuo Tiechuan. Design of strip integral mirror for high power laser processing[J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2002, **28**(3): 334~336
王智勇, 陈 虹, 左铁钊. 一种大功率激光加工用带式积分镜的设计[J]. *北京工业大学学报*, 2002, **28**(3): 334~336
- Shi Hongbin, Cheng Zhaogu, Xu Guoliang *et al.*. Study on focusing spot characteristics by off-axis parabolic mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10): 880~886
石鸿斌, 程兆谷, 许国良 等. 激光束经离轴抛物面镜聚焦后光斑特性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(10): 880~886
- Shi Juan, Wu Gang, Dai Zhongsen. Simple simulation model of the hardened layer for laser heat treatment [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2000, (2): 33~36
石 娟, 吴 钢, 戴忠森. 激光热处理硬化带简易实用模型[J]. *金属热处理*, 2000, (2): 33~36
- Liang Erjun, Du Liping, Luo Jiangtao *et al.*. Quenching of 45[#] steel with a wide-band CO₂ laser beam [J]. *Laser Journal*, 2001, **22**(2): 52~54
梁二军, 杜利平, 雒江涛 等. 45[#] 钢宽带激光淬火研究[J]. *激光杂志*, 2001, **22**(2): 52~54
- Zheng Xiaohua, Song Renguo, Yao Jianhua. Laser heat treatment and wear resistance of electroless plating Ni-P-Nano-Al₂O₃ composite coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 610~614
郑晓华, 宋仁国, 姚建华. 镍-磷-纳米氧化铝化学镀层的激光热处理及其摩擦磨损性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 610~614
- Wang Yunshan, Zhang Xingquan, Lei Jianbo *et al.*. Processing of laser quenching crankshaft [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 574~576
王云山, 张兴泉, 雷剑波 等. 曲轴激光淬火工艺[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 574~576