

大功率长焦深高斯光束整形设计

李党娟, 王佳超, 陈阳, 杨金亮, 吴新宇, 苏俊宏

引用本文:

李党娟, 王佳超, 陈阳, 等. 大功率长焦深高斯光束整形设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2129–2137.

LI Dang-juan, WANG Jia-chao, CHEN Yang, et al. Design of high power long-coke deep-Gaussian beam shaping system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2129–2137.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2129>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光加工用5 kW光纤耦合半导体激光器

5 kW fiber coupling diode laser for laser processing

光学精密工程. 2015, 23(5): 1279–1287 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1279>

用于光学相干层析系统的三反射镜光束整形扫描机构的 optical 设计

Optical design of three-mirror beam shaping scanner for optical coherence tomography

光学精密工程. 2018, 26(11): 2654–2661 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182611.2654>

1470nm 大功率半导体激光溶脂仪控制系统设计

Design of control system for 1470-nm high-power semiconductor laser lipolysis device

光学精密工程. 2018, 26(8): 1896–1903 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182608.1896>

高功率准连续微秒脉冲钠导星激光

High-power quasi-continuous microsecond pulse sodium guide star laser

光学精密工程. 2017, 25(10): 2661–2667 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172510.2661>

均匀光强分布的5 kW 半导体激光硬化光源研制

Development of 5 kW diode laser hardening source with homogenized intensity distribution

光学精密工程. 2017, 25(5): 1178–1184 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172505.1178>

文章编号 1004-924X(2020)10-2129-09

大功率长焦深高斯光束整形设计

李党娟¹, 王佳超¹, 陈 阳¹, 杨金亮², 吴新宇², 苏俊宏^{1*}

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 西安高斯激光科技有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要:为了大功率激光设备工作时,减小高斯光束束腰半径外低能量所产生的边缘效应,避免出现毛边、搭接痕迹明显等问题,需要对其进行光束整形设计。针对大功率激光光源特性(输出平均光功率为 500 W,脉冲宽度为 130~160 ns,重复频率为 20~50 kHz,波长为 1 064 nm,功率调节范围为 10%~100%),为了减小系统的复杂性,提高激光能量的利用率,采用伽利略式非球面透镜整形系统进行参数优化;选取平顶洛伦兹模型为物理模型,根据能量守恒定律求得入射光与出射光之间的映射关系;采用光学软件对系统的结构参数和非球面系数进行优化。计算平顶光束在出射距离 20, 30 mm 时的输出能量均匀度。结果表明:系统的工作焦距在 20~30 mm 时,平顶区激光能量均匀度均大于 78.0%。以锈蚀的低碳钢板为作用目标进行了激光清洗实验,光斑作用区域内,激光与物质相互作用均匀,证明本设计能满足大功率激光使用环境的要求。

关键词:大功率激光;光束整形;平顶洛伦兹模型;平顶光束

中图分类号: O439; O435.2; TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202810.2129

Design of high power long-coke deep-Gaussian beam shaping system

LI Dang-juan¹, WANG Jia-chao¹, CHEN Yang¹, YANG Jin-liang², WU Xin-yu², SUN Jun-hong^{1*}

(1. School of Opto-electronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an Gauss Laser Technology Ltd. Co., Xi'an 710032, China)

* Corresponding author, E-mail: sujunhong@xatu.edu.cn

Abstract: To reduce the edge effect of low energy outside the waist radius of a Gaussian beam when high-power laser equipment is operating and avoid the problems of edge and lap marks, it is necessary to design effective beam shaping. First, to reduce the complexity of the system and improve the utilization of the laser energy, a high-power Gaussian laser light source(average optical power of 500 W, pulse widths in 130-160 ns, wavelength of 1 064 nm, and power regulation range of 10%-100%) was optimized using the Galileo aspheric lens shaping system. Second, through the law of conservation of energy, the mapping relationship between incident and emitted light was obtained, and the structural parameters and aspheric coefficients of the system were optimized and simulated using optical software. The output energy uniformity of the flat-top beam at ejection distances of 20, 25, and 30 mm was calculated. The results show that the energy uniformity of the flat-top region is greater than

收稿日期:2020-02-07;修订日期:2020-04-02.

基金项目:装备预研领域项目(No. 61406190501);陕西省科技计划项目(No. 2019CGXNX-037);西安市碑林区科技计划项目(No. GX1911)

78.0% when the focal depth of the system is between 20 and 30 mm. A laser cleaning experiment is conducted using a rusted low-carbon steel plate. The interaction between laser and material is uniform in the area of spot action, proving that the design can meet the requirements of high-power laser environments.

Key words: high-power laser; beam shaping; flat-top Lorentz model; flat-top beam

1 引言

大功率激光设备随着现代工业的发展得到了广泛应用,比如激光切割、激光清洗、激光增材等^[1-3]。为了使大功率高斯激光束在其辐射面积内达到能量密度均匀,且输出光斑达到近似矩形光,需要对耦合输出的高斯光束进行整形。

夏国才等对用于实现激光高效率加工的光束空域整形和时域整形技术进行了详细的分析^[4]。余金清等提出利用微透镜阵列与长焦深菲涅尔透镜相结合的办法,实现激光在三维空间的均匀分布,在获得高均匀度的同时极大地延长了其工作深度^[5]。邱基斯等基于数字微镜器件(DMD)对高斯光束进行了两次光束空间整形,光束近场调制由一次整形后的 1.85 : 1 下降到 1.33 : 1,能量损耗为 35.70%^[6]。而大功率激光器则需要长工作焦距、耐激光损伤、输出光斑能量均匀且呈矩形光斑的光学系统。

本文通过对系统模型与平顶光束物理模型进行对比,选出合适的光学系统结构;采用 ZEMAX 光学软件对系统进行仿真优化,得到系统的结构参数和非曲面的面形参数,检验系统结果;计算平顶光束在不同出射距离处的能量均匀度,进而判断系统的工作焦深;最后,通过实验来验证设计效果。

2 整形系统模型选择

常见的高斯光束整形系统模型包括:光阑整形系统、微透镜阵列整形系统、非球面透镜系统和衍射光学元件整形系统等^[4,7]。其中,光阑整形系统是人们最开始使用的光束整形系统,它用光阑从入射激光束中提取出所需求的光场分布,其

缺点是能量损失严重^[8]。Frieden 提出的非球面透镜组整形系统,利用多普勒型或伽利略型整形系统,都容易产生严重的波前畸变^[9];另外,采用微透镜阵列整形系统,对入射光束光强度不敏感,一般应用于光场强度分布不规则、相干性较差的准分子激光器的整形,以及半导体激光器、发光二极管等多种光源场景下的整形^[10]。液晶空间光调制器可实现对不同波长的激光束整形,可以动态改变激光束的光强分布^[11]。衍射光学元件整形系统虽然体积小、质量轻,可以将出射光斑整形成任意形状,但是其设计复杂,且加工精度很难达到^[12]。

为减小大功率激光整形系统的复杂度,提高工作焦深和激光能量分布均匀度,这里拟采用伽利略式非球面透镜整形系统并进行参数优化。

3 平顶光物理模型及映射函数

简单的平顶光束物理模型为圆域函数,它虽然具有形式简单的优点,但仅能描述平顶光能量均匀分布的特性,而不适合计算平顶光的传输特性。相较于其他平顶光物理模型,平顶洛伦兹模型的计算最为简便,因此为了减少计算量,本文选取平顶洛伦兹模型为平顶光物理模型。

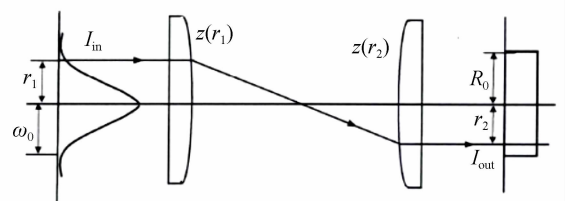


图 1 光束整形模型

Fig. 1 Beam shaping model

设入射光光强为 I_{in} , 出射光光强为 I_{out} , 入射面上任意一条光线的投射高度为 r_1 , 出射面上与之对应的投射高度为 r_2 , 高斯光束的束腰半径为 ω_0 , 平顶光半径为 R_0 。 $z_1(r)$ 与 $z_2(r)$ 为两面非球面的面形函数, 具体模型如图 1 所示。

由能量守恒定律可知, 包含在 $r_1 \sim \Delta r_1$ 与 $r_2 \sim \Delta r_2$ 内的能量相等, 在直角坐标系及极坐标系下, 可建立下列归一化方程^[13-16]:

$$\int_{\text{input aperture}} I_{in}(x_1, y_1) dx_1 dy_1 = \int_{\text{output aperture}} I_{out}(x_2, y_2) dx_2 dy_2 = 1, \quad (1)$$

$$\int_{\text{input aperture}} 2\pi I_{in}(r_1) r_1 dr_1 = \int_{\text{output aperture}} 2\pi I_{out}(r_2) r_2 dr_2 = 1. \quad (2)$$

其中高斯光束光强分布表达式为:

$$I_{SG}(R) = I_{SG,0} \exp\left[-\left(2 \frac{R}{R_{SG}}\right)^p\right], \quad (3)$$

其中 R_{SG} 和 p 分别是束腰半径和阶数, $I_{SG,0}$ 为归一化光强系数。将式(3)代入归一化方程中, 可以计算其归一化光强系数为:

$$I_{SG,0} = \frac{4^{1/p} p}{2\pi R_{SG}^2 \Gamma\left(\frac{2}{p}\right)}. \quad (4)$$

洛伦兹函数的光强表达式为:

$$I_{FL}(R) = \frac{I_{FL,0}}{\left[1 + \left(\frac{R}{R_{FL}}\right)^q\right]^{1+\frac{2}{q}}}. \quad (5)$$

归一化光强系数 $I_{FL,0}$ 表达式为:

$$I_{FL,0} = \frac{1}{2\pi R_{FL}^2}. \quad (6)$$

将高斯光束和平顶洛伦兹光束函数表达式分别代入方程(2), 可以得到映射函数关系为:

$$1 - \exp\left[-2\left(\frac{r_1^2}{\omega_0^2}\right)\right] = \left[1 + \left(\frac{R_{FL}}{R}\right)^q\right]^{-\frac{2}{q}}. \quad (7)$$

R 和 r 的映射函数关系分别为:

$$R = \frac{R_{FL} \sqrt{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^2\right]}}{\sqrt[1 - \left\{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^2\right]\right\}^{q/2}]}, \quad (8)$$

$$r = \pm \omega_0 \sqrt{-\frac{1}{2} \ln\left\{1 - \left[1 + \left(\frac{R}{R_{FL}}\right)^q\right]^{-\frac{2}{q}}\right\}}. \quad (9)$$

特别地, 当 $q \rightarrow \infty$ 时, 式(9)可以写为:

$$R = R_{FL} \sqrt{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^2\right]}. \quad (10)$$

式(10)表明, 采用平顶洛伦兹函数作为平顶光束分布函数, 其映射函数具有解析解, 可为光线追迹提供便利, 使得数值计算过程大为简化。

对于伽利略型非球面系统而言, 则有:

$$R = -R_{FL} \sqrt{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^2\right]}. \quad (11)$$

4 仿 真

由于传统非球面面形参数方法的计算量大且过程十分繁琐, 因此基于光学软件 ZEMAX 宏语言程序对非球面面形参数进行优化设计, 可以大幅减少计算量。

4.1 激光束能量分布整形系统结构及结果

由于开普勒系统具有实焦点, 大功率激光聚焦易损坏光学元件, 因此选择伽利略型非球面整形系统。依照实际选用激光光源的参数: M 因子为 1.52, 输出平均光功率为 500 W, 脉冲宽度 130~160 ns, 重复频率为 20~50 kHz, 波长为 1 064 nm, 功率调节范围为 10%~100%, 选用热膨胀系数小的熔石英材料。通过运行已编好的宏语言得到系统结构参数, 如表 1 所示。

表 1 非球面系统的结构参数

Tab.1 Structural parameters of aspherical system

表面	类型	曲率半径	厚度/mm	玻璃
2	标准面	0	5	SILICA
3	偶次非球面	12.32	30	
4	偶次非球面	30.07	5	SILICA
5	标准面	0	30	

为减小加工难度, 将非球面面形参数中二次项设为 0, 非球面面形参数如表 2 所示。

伽利略系统的结果如图 2、图 3 和图 4 所示。其中图 2 为系统结构平面图; 图 3 为系统入射光 X, Y 方向的能量分布仿真计算图; 图 4 为系统出

射光 X,Y 方向的能量分布仿真计算图;横坐标代表光斑坐标值,以光斑中心为圆点,纵坐标代表相对照度,单位为 W/mm^2 。由图 4 可知,激光束经过整形系统后,输出能量分布变为平顶分布,整形效果比较好。

表 2 非球面面形参数

Tab. 2 Aspherical surface parameters

圆锥系数	4 次项/ 10^{-4}	6 次项/ 10^{-6}	8 次项/ 10^{-8}	10 次项/ 10^{-10}
0	0	0	0	0
-1.342	-7.247	9.9521	-12.661	9.649
0.334	-0.2461	-1.0651	2.274	-2.546
0	0	0	0	0

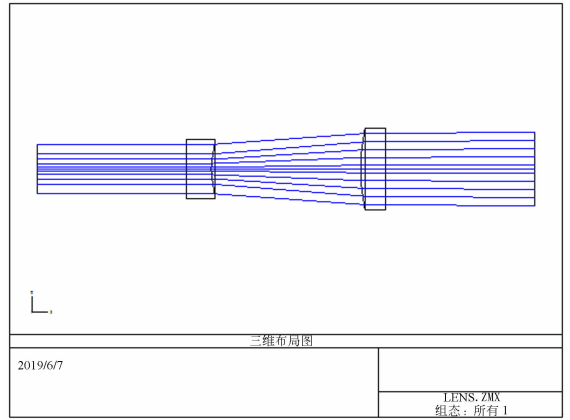
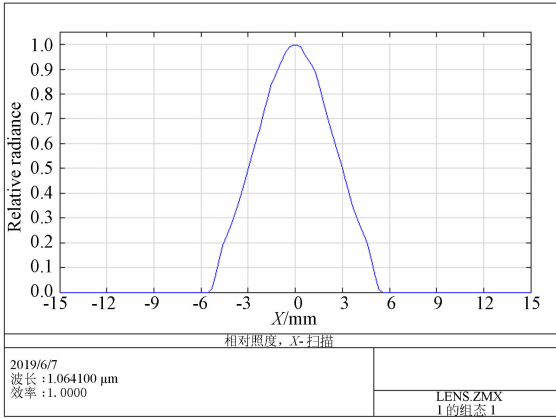
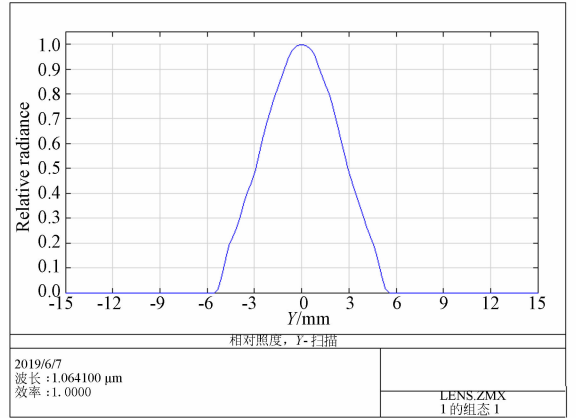


图 2 非球面整形系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of aspherical shaping system



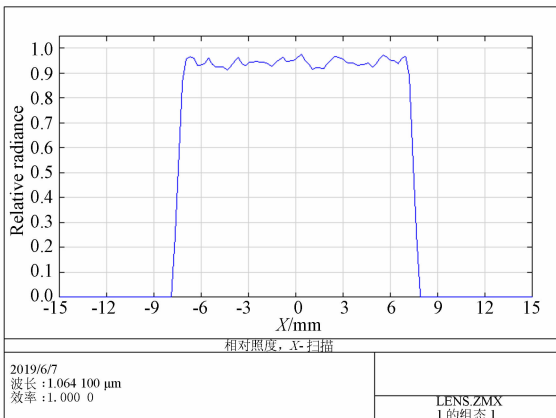
(a) X 方向
(a) X direction



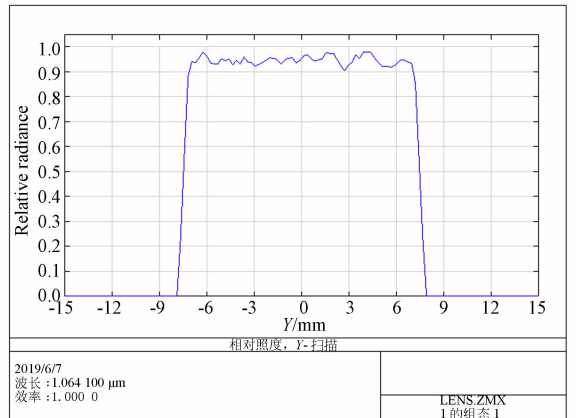
(b) Y 方向
(b) Y direction

图 3 不同方向入射光能量分布

Fig. 3 Energy distribution map of incidence light in different directions



(a) X 方向
(a) X direction



(b) Y 方向
(b) Y direction

图 4 出射光能量分布

Fig. 4 Energy distribution map of outgoing light in different directions

4.2 激光光斑形状整形系统及结果

一般来说, 要使激光光束的输出光斑呈矩形, 只需在系统后面添加两块相互垂直的柱透镜并进行默认优化后, 调整到最为合适的曲率半径即可。在 ZEMAX 上设计后系统结构, 具体参数见表 3。

光斑整形结果如图 5 所示, 其中, 图 5(a) 为入射光斑形状, 图 5(b) 为出射光斑形状。由图 5 可以看到, 激光束通过正交的柱透镜后出射光斑变为一个长 10.68 mm, 宽 9.38 mm 的光斑。

表 3 光斑整形系统结构参数表

Tab. 3 Structural parameters of spot shaping system

表面	类型	曲率半径	厚度	玻璃
6 *	标准面	0	5	SILICA
7 *	柱面	5.000	15	
8 *	柱面	40.000	5	SILICA
9 *	标准面	0	20	

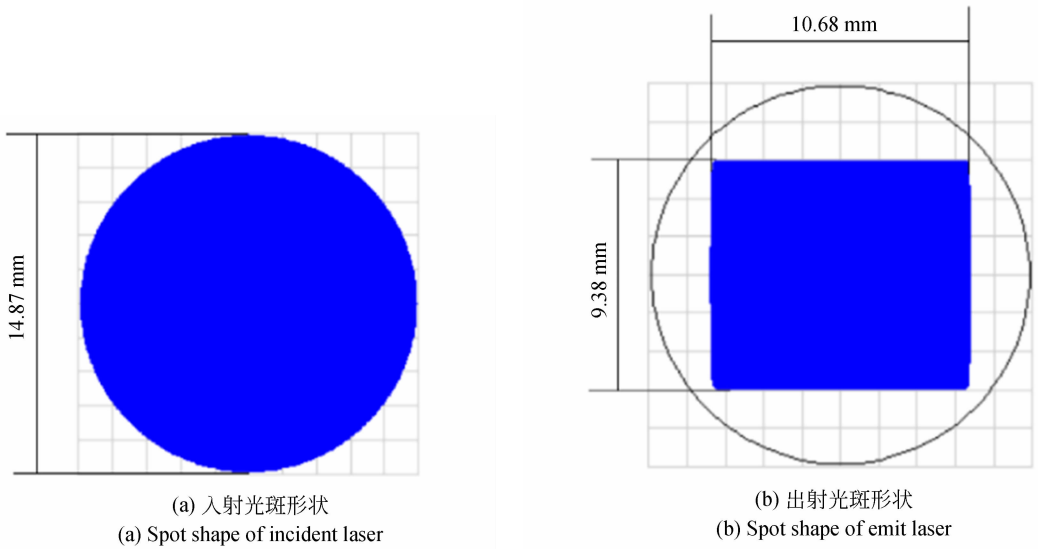


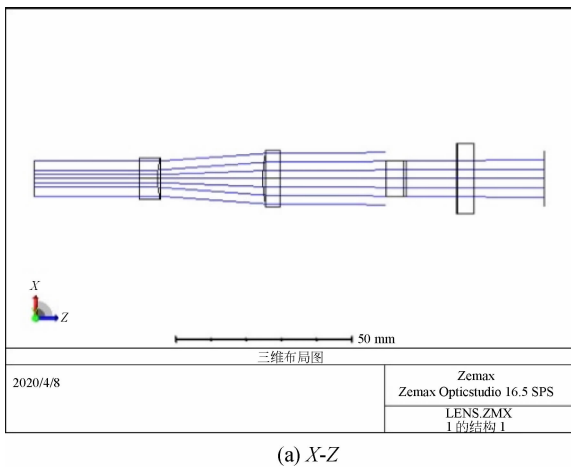
图 5 激光束光斑图

Fig. 5 Speckle pattern of laser beam

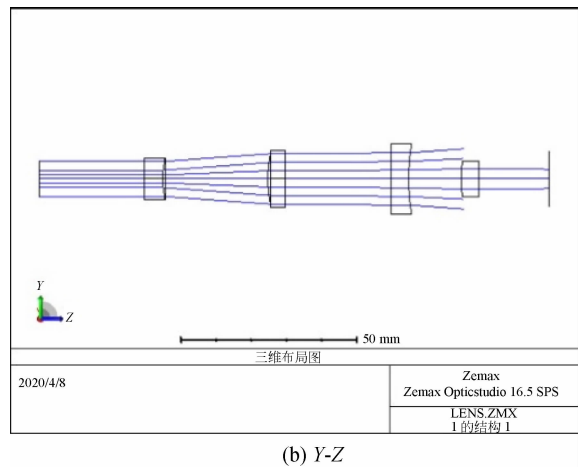
4.3 整形系统在两个方向上的光束拉格朗日不变量

整形系统在 X 方向像方空间的 NA 为

0.025 861 31, 在 Y 方向像方空间的 NA, 对于输出激光光束质量可以采用拉格朗日不变量来表征。输出能量分布平顶的激光在 XY 方向上的拉



(a) X-Z



(b) Y-Z

图 6 X-Z 和 Y-Z 方向光路

Fig. 6 Optical path in X-Z and Y-Z directions

格朗日不变量是相同的。系统在不同方向的光路如图 6 所示。输出能量分布平顶的激光在 X, Y 方向上的拉格朗日不变量是相近的, 分别为 $6.715\ 92 \times 10^{-4}$ 和 $6.728\ 24 \times 10^{-4}$ 。由此可知两个方向的拉格朗日不变量基本相近。

4.4 最终系统结构

通过对比整形后激光输出能量分布情况及激光光斑图, 最终得到的整体系统如图 7 所示。

在实际应用中, 大功率激光器激光输出有工

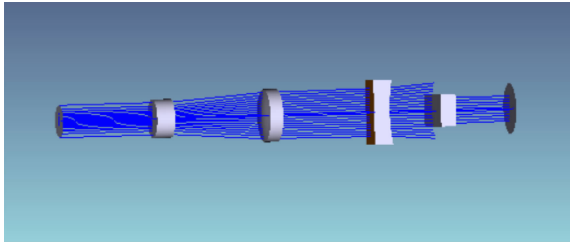
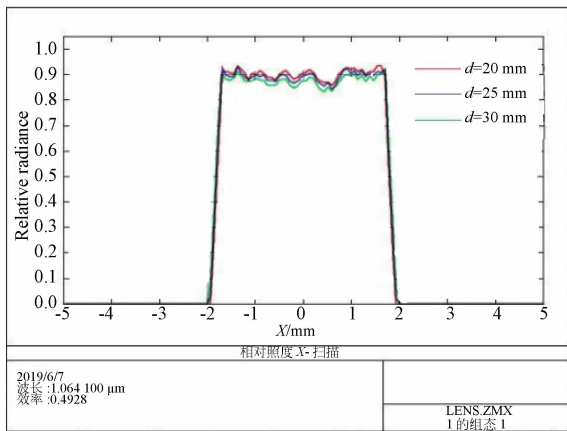
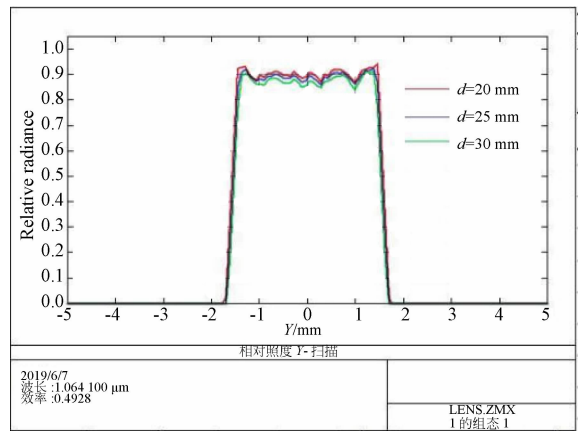


图 7 激光系统结构模型

Fig. 7 Model of Laser system



(a) X 方向
(a) X direction



(b) Y 方向
(b) Y direction

图 8 不同方向出射光平顶光能量分布

Fig. 8 Energy distribution map of flat-top light emitted in different directions

5 实验及结果

对设计的光学系统进行了激光均匀度测试。采用光束质量分析仪(型号: CinCam CMOS-12, 分析软件: RayCi-Lite), 辅助测试激光光束整形前后, 激光束形及能量分布情况; 准直后的高斯激光光斑直径约为 14.03 mm ; 整形后的平顶矩形光斑尺寸约为 $10.55 \times 9.27\text{ mm}$, 光斑内激光

作焦深要求, 而所谓的焦深指的是像面沿光轴移动一段距离后, 激光输出能量分布无明显变化。为此本文对比了输出距离 d 分别为 $20, 25, 30\text{ mm}$ 时输出平顶光的能量分布, 如图 8 所示。其中, 图 8(a) 为出射光 X 方向的能量分布, 图 8(b) 为出射光 Y 方向的能量分布。

假设光束能量分布的均匀度为 γ , 求其均匀度得到:

$$\gamma = 1 - \frac{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 / N}}{E}, \quad (8)$$

式中: E_i 表示每个采样点处的归一化光强, \bar{E} 表示各个采样点的光强平均值, N 为采样点个数 ($N=200$)。运用 Matlab 软件计算可得: 输出距离 $d=20\text{ mm}$ 时, 平顶区均匀度为 78.49% ; $d=25\text{ mm}$ 时, 平顶区均匀度为 78.42% ; $d=30\text{ mm}$ 时, 平顶区均匀度为 78.14% , 虽然均匀度有所改变, 但变化在 0.5% 以内, 所以满足工作焦深在 $20 \sim 30\text{ mm}$ 的要求。

能量密度分布均匀, 光斑形状如图 8 所示。

利用本整形系统, 在西安高斯激光科技有限公司自制的大功率激光清洗机上进行了实际产品激光清洗测试。采用的激光光源为武汉锐科光纤激光技术股份有限公司生产的 500 W 高功率脉冲光纤激光器(型号: RFL-P500)。针对实测激光清洗对象及要求(低碳钢板, 尺寸为 $300\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 清洗效率 $> 10\text{ m}^2/\text{h}$, 基材允许的热影响深度 $< 0.1\text{ mm}$, 基材硬度允许的变化范围 < 20

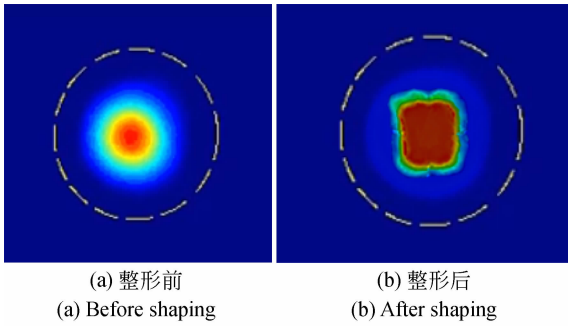


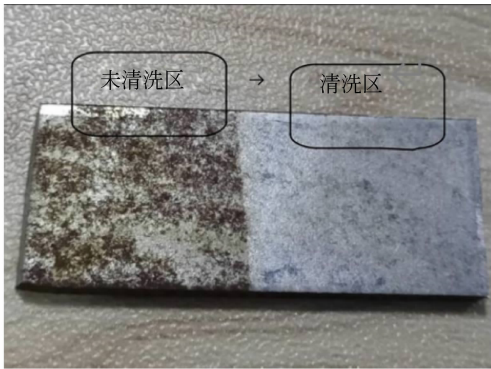
图 9 激光光斑的能量分布

Fig. 9 Energy distribution of laser spot

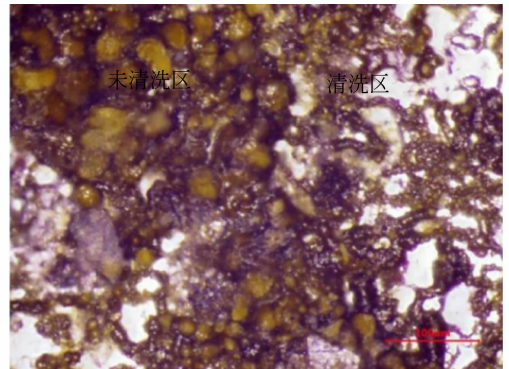
HV,表面清洁度要求:无肉眼可见红锈,粗糙度要求:不高于原粗糙度 R_a 值 40%,金相组织要求:无明显组织转变;尺寸变形要求:无肉眼可见变形),设置的激光清洗参数为:40%激光器能量输出(单脉冲能量约为 10 mJ),扫描速度为 6 000 mm/s,

脉冲宽度为 160 ns,扫描频率为 20 kHz,扫描延时 100 μ s,开光延时 190 μ s,关光延时 100 μ s,双 S 型扫描线形,聚焦后,手持清洗头平行于目标物移动。

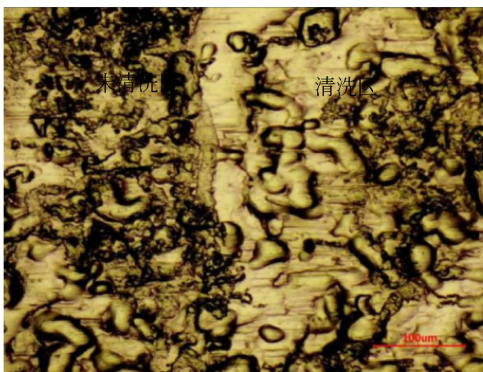
使用金相显微镜(型号:Nikon EPIPHOJ300),对清洗及未清洗区的微观组织形貌进行观测,测试结果如图 10 所示。在未清洗区,表面组织大量铁锈;激光清洗完成后,铁锈被完全去除,仅留存基底材料,即铁素体和极少量的粒状珠光体;清洗未造成热影响,表面未出现明显损伤痕迹;使用轮廓仪(型号:TalySurf CCI 2000)在测试区域内任选 3 个点进行表面粗糙度测试,对应的表面粗糙度分别为:测试点① 1.308 μ m,测试点② 1.303 μ m,测试点③ 1.261 μ m,材料表面粗糙度均匀,平均表面粗糙度为 1.29 μ m,说明整形后的激光光束能达到较好的清洗效果,满足实际使用要求。



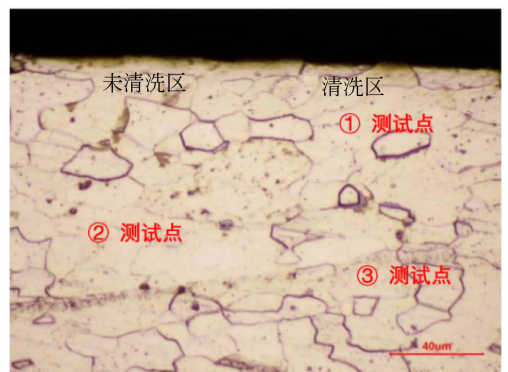
(a) 样品
(a) Sample



(b) 激光清洗前
(b) Before laser cleaning



(c) 激光清洗后
(c) After laser cleaning



(d) 样品表面
(d) Surface of the sample

图 10 激光清洗效果

Fig. 10 Images of sample before and after laser cleaning

6 结 论

本文在对比常见高斯光束整形系统模型的基础上,结合大功率高斯激光光源的输出参数,采用伽利略式非球面透镜整形系统,避免了大功率激光束聚焦时对光学元件的损伤。采用平顶洛伦兹函数作为平顶光分布函数,计算了其映射函数;使用 ZEMAX 光学软件进行优化设计,系统工作焦

深在 20~30 mm 时,平顶区激光能量均匀度均大于 78.0%。经实际输出光斑能量测试,整形后光斑内能量分布均匀;实际的激光清洗测试证明设计的光学系统能够达到预期效果。进一步地,由于衍射效果,系统平顶光能量均匀度还有提升空间,后续还将对衍射效应进行优化;此外,为了获得能量均匀分布的矩形光斑,采用了尺寸小于光斑直径的柱透镜,造成部分能量损失,这也需要进一步优化。

参考文献:

- [1] 王方雨,孙强,常颖,等. 用于光学相干层析系统的三反射镜光束整形扫描机构的光学设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2654-2661.
WANG F Y, SUN Q, CHANG Y, *et al.*. Optical design of three-mirror beam shaping scanner for optical coherence tomography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11): 2654-2661. (in Chinese)
- [2] 周建忠,李华婷,孙奇,等. 基于清洗表面形貌的 AH32 钢激光除锈机制[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1754-1764.
ZHOU J ZH, LI H T, SUN Q, *et al.*. Laser de-rusting mechanism of AH32 steel based on cleaned surface topography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1754-1764. (in Chinese)
- [3] 陈泳屹,秦莉,佟存住,等. 用于光束整形的表面等离子体双光栅结构[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1461-1468.
CHEN Y Y, QIN L, TONG C ZH, *et al.*. Dual gratings based on surface plasmons for optical beam shaping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1461-1468. (in Chinese)
- [4] 夏国才,孙小燕,段吉安. 用于实现激光高效率加工的光束整形技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100002.
XIA G C, SUN X Y, DUAN J A. Beam shaping technologies for high efficiency laser fabrication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100002. (in Chinese)
- [5] 余金清,尹韶云,殷智勇,等. 高均匀长工作深度激光整形系统设计[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 80-84.
YU J Q, YIN SH Y, YIN ZH Y, *et al.*. High uniform long working depth laser shaping system design[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(8): 80-84. (in Chinese)
- [6] 邱基斯,樊仲维,唐熊忻. 超高斯平顶分布光束空间整形技术研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(2): 233-238.
QIU J S, FAN ZH W, TANG X X. Research on spatial shaping technology of super-Gaussian flattopped distributed beam[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(2): 233-238. (in Chinese)
- [7] SCHEPERS F, BEXTER T, HELLOWIG T, *et al.*. Selective Hermite-Gaussian mode excitation in a laser cavity by external pump beam shaping[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(5): 1-8.
- [8] 庄雯,张宁,徐熙平,等. 用于激光光束整形的连续自由曲面的设计[J]. 光学技术, 2019, 45(1): 21-28.
ZHUANG W, ZHANG N, XU X P, *et al.*. Design of continuous freeform surfaces used for laser beam shaping[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(1): 21-28. (in Chinese)
- [9] ROY FRIEDEN B. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(11): 1400-1403.
- [10] 冯科,李劲松. 高斯光束非球面镜整形系统的设计[J]. 光电工程, 2013, 40(5): 127-132.
FENG K, LI J S. Design of aspherics lenses shaping system on Gaussian beam[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(5): 127-132. (in Chinese)
- [11] 陈怀新,隋展,陈赅培,等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1107-1111.
CHEN H X, SUI ZH, CHEN ZH P, *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9): 1107-1111. (in Chinese)
- [12] 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.

LIN Y, HU J SH, WU K N. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1682-1686. (in Chinese)

- [13] 韩立, 徐莉, 张贺. 传导冷却半导体激光阵列温度均匀化研究[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(11): 111002.

HAN L, XU L, ZHANG H. Study on temperature uniformity of conduction cooled semiconductor laser array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(11): 111002. (in Chinese)

- [14] 高瑀含, 安志勇, 李娜娜, 等. 高斯光束整形系统

的 光 学 设 计 [J]. *光 学 精 密 工 程*, 2011, 19(7): 1464-1471.

GAO Y H, AN ZH Y, LI N N, *et al.*. Optical design of Gaussian beam shaping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1464-1471. (in Chinese)

- [15] RHODES P W, SHEALY D L. Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation: their design and analysis[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(20): 3545-3553.

- [16] HOFFNAGLE J A, JEFFERSON C M. Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(30): 5488-5499.

作者简介:



李党娟(1978—),女,陕西眉县人,博士研究生,副教授,2004年于西安工业大学获得硕士学位,2016年日本名古屋大学访问学者,主要从事光学工程、光电信号检测方面的研究。E-mail: licy@xatu.edu.cn

通讯作者:



苏俊宏(1963—),男,陕西白水人,博士,教授,博士生导师,现任陕西省光电测试与仪器技术重点实验室主任、陕西省光学学会副秘书长,兼任中国光学学会光学测试专业委员会常务理事;中国宇航学会光电技术专业委员会委员;中国高等教育学会仪器科学与测控技术专业委员会委员;担任国家科技奖励会评专家,国家科技计划评审、教育部学位论文评审、长江学者奖励计划评审专家,主要从事光电技术及理论、光电检测及器件的研究。E-mail: sujunhong@xatu.edu.cn