

文章编号: 1001-3806(2018)02-0282-07

基于陶瓷焊接的半导体激光器合束及聚焦研究

汪菲¹, 唐霞辉^{1*}, 钟理京¹, 许成文¹, 胡千¹, 姚巍²

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074; 2. 深圳华中科技大学研究院, 深圳 518057)

摘要: 为了解决石油输送管道 Al_2O_3 陶瓷内衬管的连接问题, 研制了专用的半导体激光光源用于陶瓷激光焊接。实验研究了陶瓷激光焊接所需要的半导体激光工艺参量及光束要求, 采用单管空间合束、偏振合束、波长合束以及菲涅耳聚焦系统输出等方式, 研制了光场分布均匀的半导体激光陶瓷焊接系统。结果表明, 所设计半导体激光器偏振合束输出功率为 384W, 合束效率达到 96.62%, 经波长合束后输出功率可以超过 800W, 聚焦系统输出光斑均匀度为 93.85%。该系统可以成功应用于不同场合的陶瓷焊接生产中, 满足 2mm 厚度 Al_2O_3 陶瓷激光焊接要求。

关键词: 激光技术; 陶瓷激光焊接; 半导体激光器; 非相干合束; 菲涅耳透镜聚焦

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.02.027

Research of beam combination and focusing system of laser diode applied in ceramic welding

WANG Fei¹, TANG Xiahui¹, ZHONG Lijing¹, XU Chengwen¹, HU Qian¹, YAO Wei²

(1. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Shenzhen Research Institute of Huazhong University of Science and Technology, Shenzhen 518057, China)

Abstract: In order to solve the connection problem of Al_2O_3 ceramic lined pipe in petroleum pipeline, a special semiconductor laser light source was developed for ceramic laser welding. The technological parameters and beam requirements for ceramic laser welding were investigated experimentally. By means of single tube space beam combination, polarization beam combination, wavelength combination and Fresnel focusing system, a semiconductor laser ceramic welding system with uniform light distribution field was developed. The results show that, the output power of the polarization combination module is 384W, the beam combination efficiency is up to 96.62%. After wavelength combination, the output power can exceed 800W, and the output spot uniformity of focusing system is 93.85%. The system can be applied to ceramic welding in different occasions, and meet the requirements of Al_2O_3 ceramic laser welding with 2mm thickness.

Key words: laser technique; ceramic laser welding; laser diode; incoherent combination; Fresnel focusing lens

引言

Al_2O_3 陶瓷由于其高硬度、高熔点、抗氧化、耐高温、耐磨损和抗腐蚀等优异性能^[1], 可作为钢管的内衬来增强运输管道的性能及使用寿命^[2]。传统方法一般采用法兰盘连接和电弧焊接方法连接陶瓷复合钢管, 但是由于 Al_2O_3 陶瓷焊接性能差, 导致接头处密封

性、强度和耐腐蚀性差^[3]。激光焊接陶瓷内衬管是目前重要的国际发展趋势, 半导体激光器的输出光为平顶波光束, 焊缝一致性好, 非常适合用于作氧化物和非氧化物陶瓷焊接的激光光源^[4]。

随着半导体激光器光束整形、合束技术以及封装散热技术的发展, 其功率水平和光束质量都有了很大提高, 已经成为金属表面硬化、聚合物及金属焊接、薄片切割以及医疗领域的直接应用激光光源^[5-9]。德国的 Laserline 公司利用“多堆栈模块”、偏振合束及波长合束技术已研制出应用于抽运源的光纤耦合半导体激光器, 输出功率可达 25kW, 耦合光纤芯径 2mm, 数值孔径 (numerical aperture, NA) 为 0.2, 输出光束的质量为 $200\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ^[10]。美国的 Teradiode 公司最新利用波长合束技术研制出的光纤耦合半导体激光器输出功

基金项目: 湖北省重大科技创新计划资助项目 (2013AAC008); 深圳市科技计划资助项目 (JCYJ20160531194407693)

作者简介: 汪菲 (1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事高光束质量半导体激光器的整形合束研究。

* 通讯联系人。E-mail: txh1116@hust.edu.cn

收稿日期: 2017-04-23; 收到修改稿日期: 2017-06-20

率达到 4680W, 光纤芯径为 100 μ m, 数值孔径小于 0.08, 输出光束质量为 3.5mm · mrad, 这是迄今为止报道的所有千瓦级直接半导体激光器中最高的光束质量, 此激光器可应用于金属板的切割焊接等领域, 性能可媲美如今广泛应用在切割焊接领域的光纤激光器、CO₂ 激光器等, 且相比之下, 此半导体激光器具有更高的效率(50%)^[11]。Coherent 公司的直接半导体激光器 HighLight D 系列具有高的功率和灵活的输出光斑形状, 且能提供自由空间光束传输, 是理想的激光热处理、熔覆和焊接应用光源。

作者旨在根据陶瓷半导体激光焊接工艺以及对光束特性的要求, 设计一套基于单管的半导体激光器陶瓷焊接系统, 输出功率可达 800W 以上, 并且可以输出不同长宽比的矩形光斑, 满足陶瓷激光焊接的不同应用场合下的需求。通过实验得出陶瓷焊接对半导体激光器的光束特性要求, 然后对半导体激光器单管进行快、慢轴准直, 空间重排, 偏振合束及波长合束, 设计用于半导体激光器直接输出的菲涅耳聚焦系统, 从而得到光强分布均匀的输出光斑。

1 Al₂O₃ 陶瓷焊接对半导体激光光束的要求

1.1 陶瓷激光焊接实验条件

实验中采用由 3kW 半导体激光器、聚焦镜头、激光水冷却电源及控制系统、焊接机械手系统及外部控制 2 自由度变拉机和控制系统等组成的激光焊接系统对两部分 Al₂O₃ 陶瓷进行激光填料焊接, 如图 1 所示。两块 Al₂O₃ 内衬块中间夹着焊料条, 形成“三明治”结构, 并将“三明治”固定在夹具上, 一起放在激光器正下方, 激光束垂直入射于焊料表面, 焊接方向与焊料方向平行, 确定焊接功率及焊料宽度对焊缝成形的影响规律。

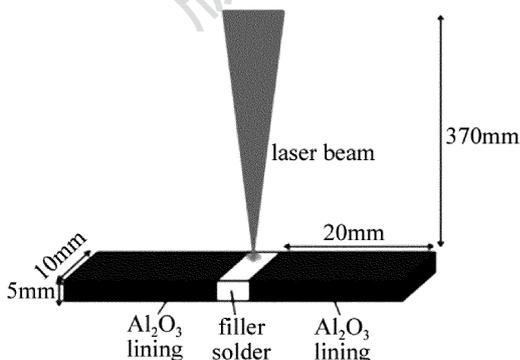


Fig. 1 Schematic of Al₂O₃ ceramic laser filler welding

1.2 工艺参量对陶瓷焊接的影响

不同的焊料宽度决定了焊料表面受激光辐照的面积不同, 从而导致焊料与基材表面不同的温度场分布。

图 2 是 6 组不同宽度的焊料在最佳工艺下的焊接截面图。在一定的光斑大小(宽度 3.0mm)下, 当焊料宽度较小时, 激光辐照在基材表面的面积较多, 即基材表面受到激光热作用较大, 而基材韧性差, 快速的升温 and 降温使得基材的剩余热应力过大, 从而产生了裂纹(见图 2a 和图 2b 中单箭头处); 继续增加焊料宽度, 激光辐照在焊料表面的面积增大, 辐照在基材表面的面积减少, 基材中温度梯度小, 剩余热应力小, 所以基材中没有裂纹形成, 然而, 在中间层中有气孔存在(见图 2c 和图 2d 中单箭头处); 焊料宽度为 3.0mm 时, 激光照射光束全部作用于焊料表面, 焊料熔融并润湿基材的界面, 与基材界面结合良好, 中间层没有气孔等缺陷。此外, 由于基材不是通过激光的热作用加热, 而是通过焊料传导而来的热量加热, 此热量比激光直接加热所致的热量小很多, 因此基材中的热应力小, 没有裂纹形成; 焊料宽度为 3.5mm 时, 焊料中大部分直接接受激光热作用, 并以焊料中间处为中心进行横向和纵向的热传导, 热量由中心向外扩散, 远离中心处热量少, 温

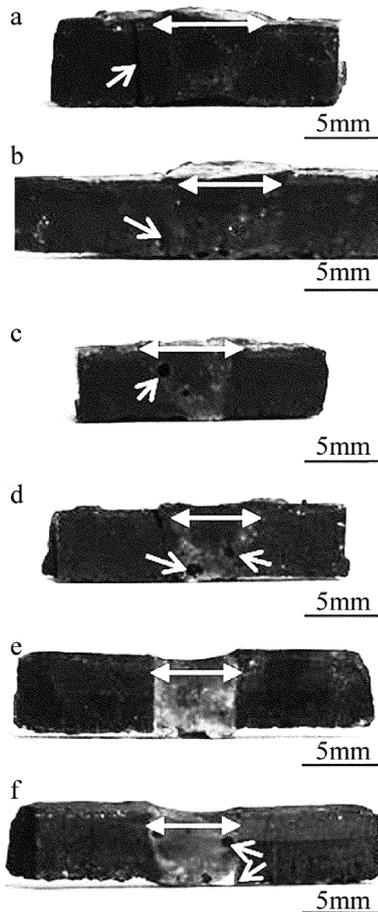


Fig. 2 Cross profiles of different solder widths

a—1.0mm b—1.5mm c—2.0mm d—2.5mm e—3.0mm f—3.5mm

度相对较低。小部分焊料通过热传导来的温度熔融,边缘处的部分焊料因为热传导温度不够,并未熔融和润湿界面,此时未熔焊料与基材存在缝隙(见图 2f 中单箭头处),并且中间层中还存在着一些气孔,该接头结合并不牢固。由上可知,当焊料宽度与光斑宽度一致时,基材中无裂纹形成,焊接质量最好。

激光功率阈值是指激光热导焊向深熔焊接转变的临界值,在此激光功率阈值处,材料对激光有较高的吸收率,易实现深熔焊^[12]。实验中设置焊料宽度为 3.0mm,测量焊接试样接头横截面在不同激光功率作用下的焊缝宽度及熔深尺寸,得到熔深、熔宽随激光功率变化的曲线图,如图 3 所示。可以看出,当功率为 400W~600W 时,此时焊缝的熔深的变化趋势比较小,属于热导焊。随着功率增加到 700W,焊缝的熔深急剧。原因在于,激光功率达到阈值时,焊材部分汽化形成“小孔”,激光直接穿过“小孔”照射到小孔底部,使得焊件对激光吸收率增加,从而焊缝的熔深急剧增加。因此,其它参量一定时,焊件的激光阈值功率为 700W,此时焊件对激光利用率最大。

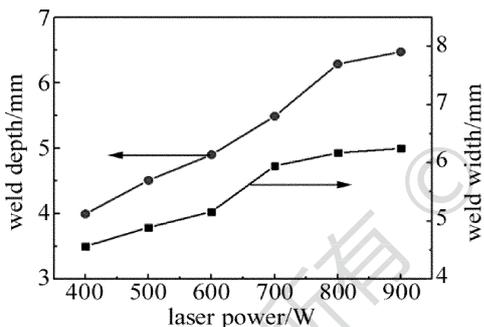


Fig. 3 Weld depth and weld width with different laser powers

可以得出,当光斑尺寸大小与焊料宽度一致,光斑均匀性较好,半导体激光功率在 700W 以上时,焊接质量最佳。本文将基于此要求,设计输出功率超过 800W、可灵活改变光斑形状大小的半导体激光器系统,满足不同应用场合下的陶瓷焊接需求。

2 基于陶瓷焊接的半导体激光器系统设计

2.1 半导体激光器整形合束结构设计

与线阵和叠阵半导体激光器相比,单管半导体激光器具有以下几个方面的优点^[13]:首先半导体激光器(laser diode, LD)单管的输出光束质量更好,不会有线阵和叠阵中会产生“smile”效应,因此不需要太过复杂的光学整形元件;其次 LD 单管散热简单,只需通过风冷的方式就可散热,而半导体激光器叠阵通常需要使用去离子水采用微通道热沉进行散热,导致微通道

易被腐蚀;再者 LD 单管采用串联的方式连接,可以降低驱动电流。

本文中所采用的半导体激光器单管波长分别为 915nm, 940nm 和 980nm,单管输出功率为 10W,快、慢轴方向的光束质量 (beam parameter product, BPP) B 如下:

$$\begin{cases} B_{FA} = \theta_{FA} \cdot w_{FA} = \frac{1.5\mu\text{m}}{2} \cdot \frac{58^\circ}{2} \approx 0.37\text{mm} \cdot \text{mrad} \\ B_{SA} = \theta_{SA} \cdot w_{SA} = \frac{100\mu\text{m}}{2} \cdot \frac{8.6^\circ}{2} \approx 3.75\text{mm} \cdot \text{mrad} \end{cases} \quad (1)$$

式中, B_{FA} , θ_{FA} 和 w_{FA} 分别表示快轴方向 (fast axis, FA) 的光束质量、发散角以及束腰半径, B_{SA} , θ_{SA} 和 w_{SA} 分别表示慢轴方向 (slow axis, SA) 的光束质量、发散角以及束腰半径。

可以看出,快轴光束质量比慢轴好得多,将 20 个半导体激光器单管,采用串联方式连接并排在阶梯状热沉上,每一个激光器分别用快、慢轴准直镜进行准直,然后通过反射镜反射后实现光束在快轴方向的叠加,达到提高输出功率并且匀化光束质量的目的。

基于以上 20 个单管构成的模块的半导体激光器陶瓷焊接系统结构图如图 4 所示。通过测量半导体激光器偏振特性可知,该半导体激光器均以 TE 模式输出,偏振度很高,可以通过以下公式计算偏振度:

$$D = \frac{P_{TE} - P_{TM}}{P_{TE} + P_{TM}} \quad (2)$$

式中, D 表示半导体激光器偏振度, P_{TE} 表示测得的 TE 模式功率, P_{TM} 表示测得的 TM 模式功率。利用偏振合束能达到成倍提高输出功率以及亮度的目的,提高程度取决于偏振合束效率,可表示为:

$$\eta = P_o / (P_1 + P_2) \quad (3)$$

式中, η 表示偏振合束效率, P_o 表示合束后的功率大小, P_1 和 P_2 表示被合束的两个模块单元的输出功率大小。

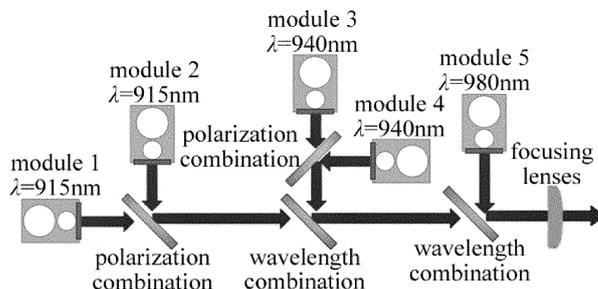


Fig. 4 Designing scheme of diode laser system applied in ceramic welding

焊料对于波长范围在 800nm ~ 1000nm 内的半导体激光的吸收率相差不大,所以可以利用多个波长间隔相差不大的模块提高亮度,通过选用合适的色散元件来实现,此时决定合束效率的是波长耦合器的透射率曲线中两种待合束波长的透射率和反射率,值越接近 1 则合束效率越高,对于波长间隔相距很短的待合束波长,则需要透射率曲线的上升斜率更陡峭,对耦合器件的要求更高^[14]。

2.2 菲涅耳聚焦系统设计

聚焦透镜采用自主设计的菲涅耳聚焦系统,由一块菲涅耳透镜和一块柱透镜组成,它能够在控制输出光斑形状的同时,有效地提高输出光斑的均匀性。弧形基面菲涅耳透镜原理如图 5a 所示, F 处点光源发出的光线,在弧形基面处产生折射,到达点 F' 处,则第 i 楞的楞高度角 θ_i 可表示为^[15]:

$$\theta_i = \omega_i' + \arctan \left\{ \frac{[\sin \omega_i' \sqrt{n^2 - \sin^2(u_i + \omega_i')} - \cos \omega_i' \sin(u_i + \omega_i') - \sin u_i'] / [\cos u_i' - \cos \omega_i' \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2(u_i + \omega_i')} - \sin \omega_i' \sin(u_i + \omega_i')]}{\sin u_i'} \right\} \quad (4)$$

式中, $n = n_1/n_2$ ($n_1 = 1$ 为标准大气压下的空气折射率, n_2 为透镜材料的折射率), u_i 为第 i 楞入射光与光轴 FF' 的夹角, u_i' 为第 i 楞出射光与光轴 FF' 的夹角, f 和 f' 分别为 F 和 F' 到光轴 O' 点的距离, R 为菲涅耳透镜的圆弧曲率半径, r 为球冠的外廓半径, ω_i' 为第 i 楞透镜入射面的法线与光轴的夹角。对于本文中所设计的为平板楞朝内型菲涅耳透镜^[16] (结构如图 5b 所示),楞高角度可表示为:

$$\theta_i = \arctan \left(\frac{\sin u_i'}{n - \cos u_i'} \right) \quad (5)$$

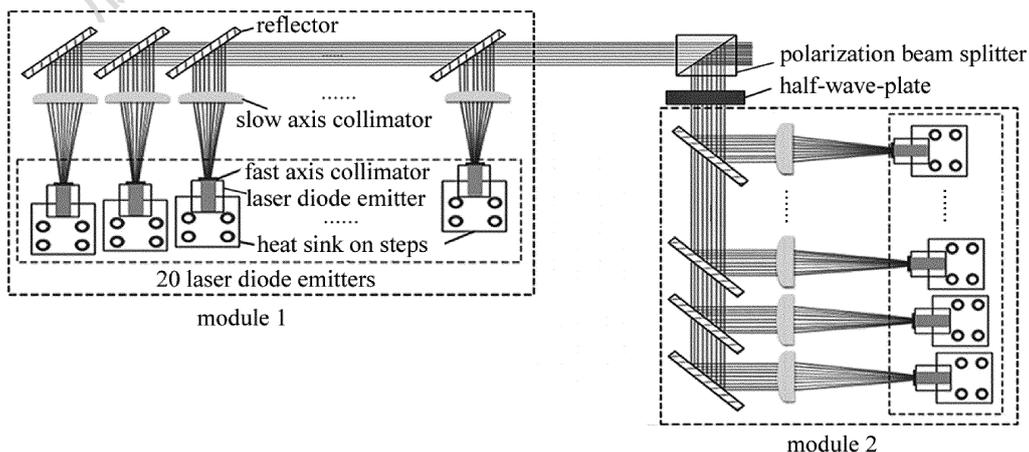


Fig. 6 Experimental device of polarization combination based on single tube

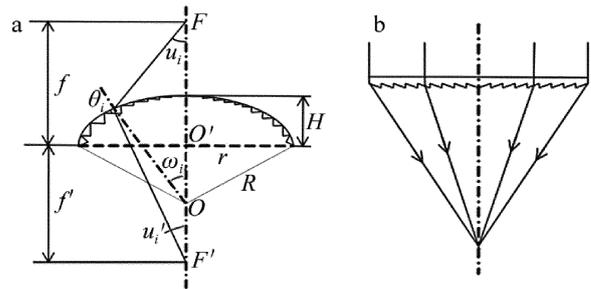


Fig. 5 Schematic of Fresnel lens

a—principle of Fresnel lens b—Fresnel lens with flat base and inward ridge

光束聚焦匀化系统的优劣一般通过焦斑的均匀性来评价^[17],焦斑均匀性可通过对焦斑强度的所有取样点取均方根 M_{RMS} 来表示:

$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I_j - \bar{I})^2}{n - 1}} \times 100\%, \quad (I_j \geq 0.8I_{max}) \quad (6)$$

式中, I_{max} 为最大输出光强值, I_j 为不小于 $0.8I_{max}$ 的取样点光强值, n 为总取样点数, \bar{I} 为取样点光强的平均值。由(6)式可知,均方根 M_{RMS} 与光斑均匀性成反比,则光斑均匀性亦可表示为:

$$M = 1 - M_{RMS} \quad (7)$$

通过(5)式可计算出设计的菲涅耳透镜的各楞高角度,在建模软件中绘制出菲涅耳透镜的 3 维模型,并导入到 ZEMAX 软件中进行系统仿真与优化得到最佳的透镜参量,就能根据需要灵活地控制输出光斑的形状和大小,并且输出光斑均匀度可达 93.85%。

3 半导体激光器整形实验装置

基于多单管的偏振合束实验装置如图 6 所示。分

别将 20 个 LD 单管进行快、慢轴准直,并在快轴方向叠加后,通过半波片改变一个模块输出光的偏振态,与另一模块通过偏振分束立方体进行偏振合束。

实验中所用到的偏振耦合器件为 THORLABS 公司生产的偏振分束立方体 PBS201,该分束立方体通过电介质分束膜来反射 s 偏振分量,但允许 p 分量通过,从而分离 s 和 p 偏振光分量。从该器件对于不同波长的 p 偏振和 s 偏振光的透过率曲线可以得出,对于实验中使用的 940nm 半导体激光器,此分束立方体对于 p 偏振光束的透过率为 98.15%,对 s 偏振光束透过率为 0.04%,可以满足进行高效率偏振合束的要求。偏振分束镜被安装在水平位移台和旋转位移台及棱镜调整架上,可以调整偏振分束镜沿着 x, y, z 方向的位移以及绕 x, y, z 轴的旋转 6 个方向的自由度。测试仪器为 PRIMES 公司的型号为 BeamMonitor BM60 的光束分析仪,可准确测量光斑直径和特定位置处光斑能量分布图/曲线,其主要参量为:响应激光波长 $0.8\mu\text{m} \sim 1.1\mu\text{m}$,所测功率范围 $100\text{W} \sim 12\text{kW}$,最大响应功率密度 $10\text{kW}/\text{cm}^2$,超过最大功率密度,系统会饱和而无法准确测量。

4 光束整形实验结果与分析

首先测试由 20 个单管组成的模块在不同驱动电流下的输出功率,可以得出模块的 $P-I$ 特性曲线,如图 7 所示。不同位置处的光强分布图如图 8 所示。阈值电流为 0.36A,当电流为 11.91A 时,功率最大可以达到 196.12W。

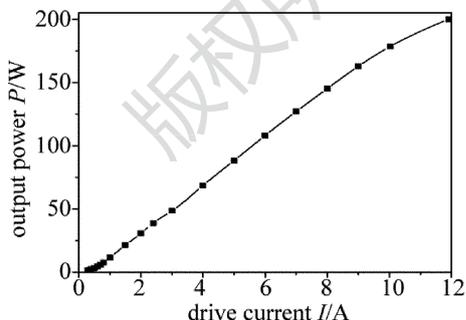


Fig. 7 Relationship of power and current of diode laser module

对于单个半导体激光器单元,一般采用宽增益区结构的矩形或锥形谐振腔。在垂直于 P-N 结(快轴)方向,强波导作用只允许最低阶本征模式存在,远场分布近似为基模高斯分布;在平行于 P-N 结(慢轴)方向,弱波导作用使得多个波导本征模式同时存在,远场分布近似认为是“顶帽型”分布或超高斯分布^[14]。本文中使用的半导体激光合束模块是由 20 个单管在快

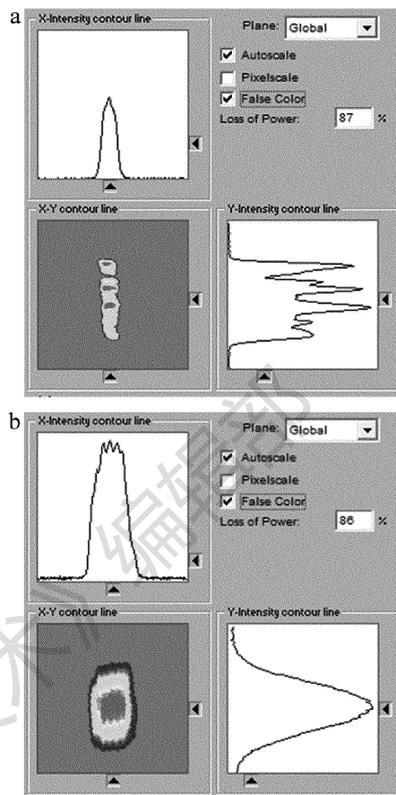


Fig. 8 Spot profiles of diode laser module on different positions
a— $z=0\text{cm}$ b— $z=130\text{cm}$

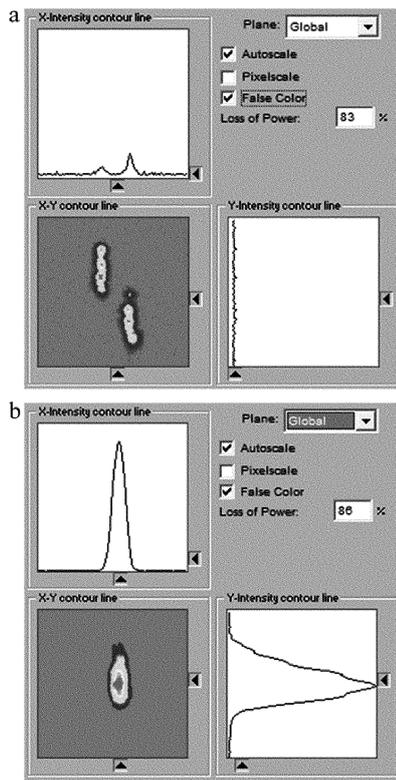


Fig. 9 Light intensity distribution after polarization combination
a—before adjusting b—after adjusting

轴方向叠加而成,因此模块的慢轴方向与单管的慢轴

相同,呈现出超高斯及平顶高斯分布,如图 8 所示。由于单管经过准直后的快轴发散角较小,在传播距离不够远时($z=0\text{cm}$),可以看到快轴方向光强分布呈现多个尖峰。随着光束传播足够远后,在测量位置 $z=130\text{cm}$ 处,各半导体激光单元发出的光束在快轴方向相互充分叠加,呈现出与单个半导体激光器的快轴方向相同的基模高斯分布形式。可以计算出经过准直后的模块剩余发散角为: $\theta_{\text{SA}}=6.50\text{mrad}$, $\theta_{\text{FA}}=7.34\text{mrad}$ 。

使用光束分析仪测量到的偏振合束后的光场分布特性如图 9 所示。其中图 9a 为校准前在测试平面测得的光斑分布图,通过位移台以及棱镜支架调整偏振分束镜的位置与倾斜角度,使得两个半导体激光器模块的光束在传播方向上完全重合,保证光束质量不受损失,图 9b 为经过校准后的偏振合束输出光斑。使用功率计分别测量两个激光器在不同的驱动电流下合束后的功率以及损失的功率,并且计算其合束效率,结果见表 1。

Table 1 Output power of polarization combination and the combining efficiency under different drive currents

current of LD ₁ /A	current of LD ₂ /A	output power after combination /W	loss of power/W	combining efficiency/%
1.04	0.98	19.03	0.34	98.24
1.66	1.49	38.19	0.67	98.28
2.91	2.50	77.31	1.37	98.26
4.91	3.57	117.40	2.12	98.23
5.37	4.59	157.10	2.84	98.22
6.64	5.62	195.90	3.66	98.17
8.21	7.43	291.20	7.85	97.37
11.96	11.85	384.10	13.42	96.62

从表 1 中可以看出,合束效率平均在 96%~98% 之间,当单个激光器输出功率为 200W 时,合束后总的输出功率为 384.10W,损耗的功率为 13.42W,合束效率为 96.62%,实现了高效率的偏振合束。随着电流的增加,单个激光器的输出功率的增长,合束效率有轻微的下降,这是因为器件的偏振相关损耗和偏振相关增益(包括材料特性、波导作用和腔面反射率的因素)在激光振荡的作用下被不同程度地反复放大,导致偏振度有波动,从而使偏振合束效率有略微下降的趋势,但是总体的合束效率依然可以满足实际应用需求。

对楞间距为 1mm 的非涅耳透镜聚焦系统进行实验验证,利用光束分析仪测量其焦点处的光场分布如图 10 所示。可以看出,光斑在 x 轴方向由于只通过一个柱透镜进行聚焦,光束被聚焦得较窄, y 轴方向是通

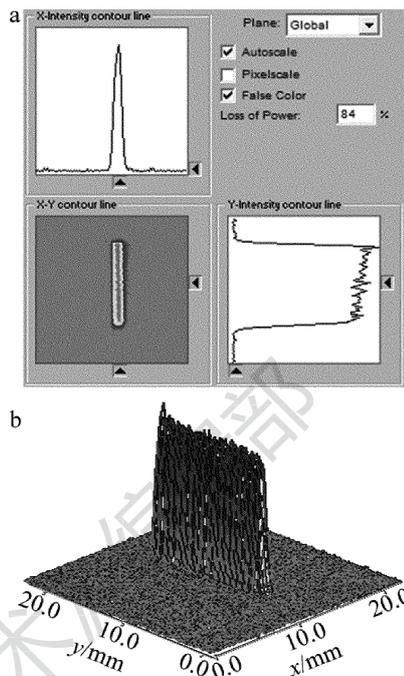


Fig. 10 Light field distribution on the focal plane

过非涅耳透镜聚焦,光场分布均匀性较好,光斑的上升沿很短。该聚焦光斑应用于陶瓷焊接时可以使得焊缝的一致性更好,焊接质量更佳。

使用色散元件将偏振合束后的 915nm 模块、940nm 模块以及 980nm 模块进行波长合束,输出功率能够超过 800W,聚焦光斑均匀性较好,并且可以通过合理设计非涅耳聚焦透镜的参量,从而获得不同形状尺寸的矩形光斑,使得该系统可以成功应用于不同场合下的 Al_2O_3 陶瓷焊接生产中。

5 结 论

本文中通过实验分析了陶瓷激光焊接对半导体激光光束特性的参量要求,从而设计了一套基于半导体激光器单管的陶瓷焊接系统。

(1) 当半导体激光器光斑尺寸与焊料宽度一致,光斑均匀性较高,激光功率在 700W 以上时,此时基材中不会出现裂纹,中间层无气孔,焊接质量最佳,对激光的利用率最高。

(2) 将 20 个单管经过整形重排后进行偏振合束实验,整形后慢轴方向剩余发散角为 6.50mrad,快轴方向为 7.34mrad,得到最大合束功率 384W,合束效率为 96.62%,实现了高效的偏振耦合输出。使 3 个不同波长的经过偏振合束后的模块进行波长合束,输出功率可达 800W 以上。

(3) 设计的非涅耳聚焦系统可以根据要求灵活改

变光斑的形状大小,输出光斑均匀度可达 93.85%,能够满足陶瓷焊接在不同场合下的需求。

参 考 文 献

- [1] WANG X Zh, WANG J, WANG H. Performance and structural evolution of high-temperature organic adhesive for joining Al_2O_3 ceramics [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 45 (2): 1-6.
- [2] LE M T, KIM D J, LEE J R, *et al.* Properties of ceramic layer formed by centrifugal thermit reaction with silicon sludge replacement [J]. Materials Transactions, 2008, 49(8): 1868-1873.
- [3] ZHENG X J. Investigation on laser welding technology of Al_2O_3 -lined ceramic[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 1-11(in Chinese).
- [4] BORNER F D, LIPPMANN W, HURTADO A. Laser-joined Al_2O_3 , and ZrO_2 ceramics for high-temperature applications[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 405(1): 1-8.
- [5] HUANG R K, CHANN B, TAYEBATI P. Direct diode lasers for industrial sheet metal cutting and welding[C]//Photonics Conference (IPC), 2014 IEEE. New York, USA: IEEE, 2014: 232-233.
- [6] HUANG R K, CHANN B, BURGESS J, *et al.* Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO_2 , and solid state lasers [J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8241: 824102.
- [7] DORSCH F, DAIMINGER F X, HENNEG P, *et al.* 2kW CW fiber-coupled diode laser system [J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 3889: 45-53.
- [8] WU Zh N, XIE J R, YANG Y N. Design and implementation of beam array shaping for high power semiconductor lasers[J]. Laser Technology, 2017, 41(3): 416-420(in Chinese).
- [9] ZHU H B, ZHANG J Sh, MA J, *et al.* 10kW CW diode laser cladding sources[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 829-834 (in Chinese).
- [10] MALCHUS J, KRAUSE V, KOESTERS A, *et al.* A 25kW fiber-coupled diode laser for pumping applications[J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 8965: 89650B.
- [11] HUANG R K, CHANN B, BURGESS J, *et al.* Teradiode's high brightness semiconductor lasers [J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9730: 97300C.
- [12] AVILOV V V, GUMENYUK A, LAMMERS M, *et al.* PA position full penetration high power laser beam welding of up to 30mm thick $AlMg_3$ plates using electromagnetic weld pool support[J]. Science and technology of Welding & Joining, 2012, 17(2): 128-133.
- [13] ZHU H B. Study on high power single emitter diode laser combination and fiber coupling[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 37-47(in Chinese).
- [14] BACHMANN F. High power diode lasers-technology and applications[M]. New York, USA: Springer Science, 2007: 1-180.
- [15] LI P, WU H L, YANG P H, *et al.* General design method and optical efficiency of the solar concentrator by Fresnel lens[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(6): 62-66 (in Chinese).
- [16] ZHANG L. Design of Fresnel concentrating optical system with high homogeneity of energy distribution[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2013: 6-11 (in Chinese).
- [17] LIU Zh H, SHI Zh D, YANG H, *et al.* Homogenization of semiconductor laser using diffractive micro-lens array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2092-2096 (in Chinese).