

15 kW 光纤耦合半导体激光淬火光源

张继业, 彭航宇*, 曹军胜**, 张俊, 王靖博

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 针对激光淬火在大型风电轴承生产中的实际需求, 研制了一种功率高达 15 kW 的光纤耦合半导体激光淬火光源。该光源先采用 915 nm 和 976 nm 两个波段各 8 个宏通道冷却技术封装的半导体激光微巴条阵列作为发光单元, 进行空间、偏振及波长合束, 在光纤芯径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤中实现了超过 800 W 的连续输出, 电光转换效率整体达到 45% 以上。再通过 19 \times 1 光纤合束器对 19 个 800 W 模块进行合束, 由输出端口光纤直径为 1 mm 的光纤耦合输出。光束经过由微透镜阵列与聚焦镜复合的加工头, 光斑匀化, 最终输出了功率大于 15 kW、光斑尺寸为 165 mm \times 25 mm 的激光束, 满足了大型风电主轴轴承滚道面淬火需求。

关键词 激光器; 半导体激光器; 光纤耦合; 合束; 激光淬火

中图分类号 TN248.4 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL220636

1 引言

风电轴承作为风力发电设备的核心部件, 工作环境恶劣, 制备技术复杂, 维修成本高, 其耐磨性、冲击韧性和疲劳强度等性能越高越好^[1]。近些年, 大功率激光器已经应用于起重机主轴承和蜗杆轴等工件的激光表面强化加工中, 利用激光淬火工艺可在这些工件表面形成厚达 3 mm 的淬硬层, 工件性能得到很大程度的改善^[2-4]。我国现有并已投入使用的风力发电设备以中小型发电设备居多, 大型风电轴承的制造技术有助于发展风电^[5-6]。采用大功率半导体激光器作为淬火光源有望解决目前大型风电轴承表面强化所面临的淬火问题。

众所周知, 材料加工用大功率激光器在经历了 CO₂ 激光器、固体 YAG 激光器之后, 目前正在向以半导体激光器为基础的直接半导体激光器的方向发展。半导体激光器重量轻, 体积小, 电光转换效率高, 金属材料吸收效率高, 在加工领域具有广阔的应用前景^[7-10]。另外, 大功率半导体激光器的输出波长主要为 800~1000 nm, 光纤激光器的输出波长为 1060 nm, CO₂ 激光器的输出波长为 10.6 μm , 各种金属材料在大功率半导体激光波段的吸收率明显较大^[11], 铝的吸收率为 13.5%, 铁的吸收率为 33%, 分别是 CO₂ 激光器 10.6 μm 波段吸收率的 9 倍和 5 倍。随着半导体激光器芯片技术与合束技术的日渐成熟, 大功率半导体激

光器光源已实现了万瓦级的输出, 制约其工业应用的光束质量问题正在逐步改善。德国已研制出多种光纤耦合半导体激光器, 实现了 1.5~45.0 kW 的输出, 美国也推出了 12 kW 功率的光束质量为 4 mm \cdot mrad 的光纤耦合半导体激光器产品^[7]。国内在这方面的主要研究单位有北京工业大学^[12]、华中科技大学^[13]等。然而, 国内半导体激光光源较国外产品还存在一定差距。近期, 武汉锐科光纤激光技术股份有限公司研制出了 10 kW 和 12 kW 的光纤耦合半导体激光设备^[14]。

本文针对目前国内 6 MW 大型风电主轴轴承的滚道表面对激光淬火的需求, 采用光束转换整形 (BTS) 方法及偏振合束、波长合束技术, 通过芯径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤耦合, 实现了超过 800 W 的连续输出; 通过 19 \times 1 光纤合束器对 19 个 800 W 模块进行合束, 由输出端口光纤直径为 1 mm 的光纤耦合输出, 输出功率大于 15 kW。

2 实验设计

2.1 光学准直及整形设计

半导体激光器的光束质量即光参量积 (Q), 通常采用束腰半径 (ω_0) 与远场发散半角 ($\theta_0/2$) 的乘积来评价。光参量积值越小, 光束质量越好。本实验采用宏通道冷却 (MCC) 技术封装的半导体激光微巴条阵列作为发光单元器件, 其具有 8 个发光点, 周期为 400 μm , 宽度为 3.2 mm, 腔长 4 mm, 每个发光点的尺寸约为

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-05-19; 录用日期: 2022-06-27; 网络首发日期: 2022-07-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0407303)、国家自然科学基金 (62104225, 61991433, 61874117, 11674314)、吉林省科技发展计划 (20200401006GX, 20210201019GX)、中国科学院先导科技专项 (XDB43030302)、吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目 (2021SYHZ0012)

通信作者: *penghy@ciomp.ac.cn; **caojis@ciomp.ac.cn

1.5 μm × 100 μm, 发散角为 45° × 8°, 如图 1 所示。半导体激光器快、慢轴方向的发光尺寸不对称, 这将导致快、慢轴方向的光束质量相差很大。经过计算, 快轴方向的光参量积为近衍射极限, 约为 0.3 mm·mrad, 慢轴方向的光参量积约为 112 mm·mrad, 不利于半导体激光器的光纤耦合装调^[15]。

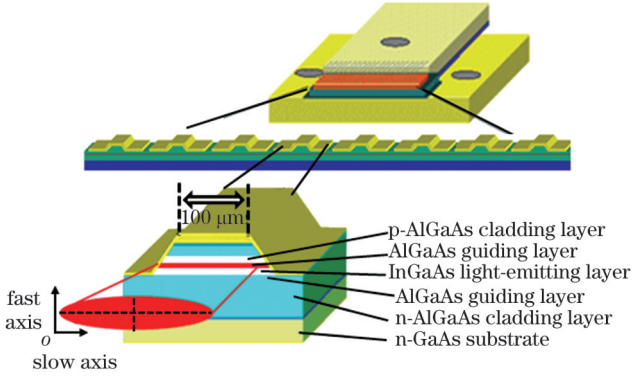


图 1 MCC 技术封装的半导体激光微巴条阵列示意图
Fig. 1 Schematic of MCC encapsulated semiconductor laser mini-bar array

半导体激光微巴条阵列快轴方向的分散角达到 45°, 普通柱透镜准直会带来非常大的球差, 从而影响准直后的分散角。在进行激光器的快轴准直时, 采用短焦距的快轴准直镜可以将快轴方向的分散角准直到 4.2 mrad 左右, 但是由于封装 smile 效应的影响^[16], 分散角一般会增加到 6 mrad, 如图 2 所示。

为了使快、慢轴的光参量积均匀化, 需要对半导体激光微巴条阵列的输出光束进行整形。激光微巴条在经过快轴准直后, 直接采用光束整形器进行光束整形。如图 3(a) 所示, 光束整形器是由一系列斜 45° 柱透镜组成, 柱透镜与线阵上的发光单元一一对应。斜 45° 柱透镜的作用是将对应发光单元的出射光束旋转 90°, 对应的光斑尺寸和分散角不会发生变化。原先快轴方向的光斑数量与慢轴方向的光斑数量的比值是 1/8, 斜 45° 柱透镜将这个比值变换为 8/1, 如图 3(b) 所示。激光器线阵快轴方向的光束质量变差, 光斑直径变为 3.2 mm, 分散角为 6 mrad; 慢轴方向的光斑直径仍为 100 μm, 分散角为 8°。激光器线阵的光参量积由 0.3 mm·mrad × 112 mm·mrad 变成 4.8 mm·mrad × 3.5 mm·mrad。

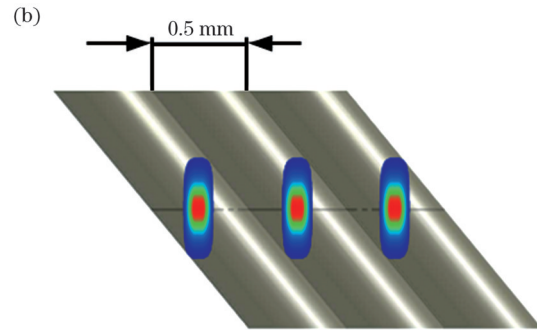
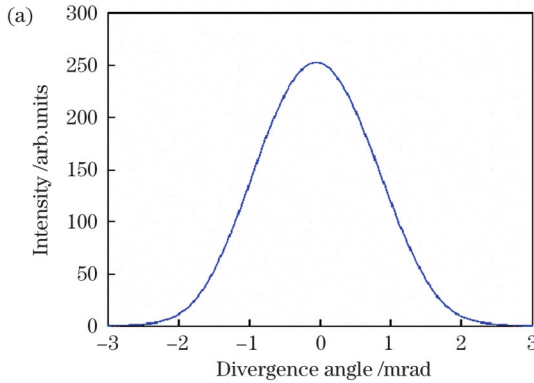


图 2 快轴准直后的分散角及光斑。(a) 分散角; (b) 光斑

Fig. 2 Divergence angle and spots after fast axis collimation. (a) Divergence angle; (b) spots

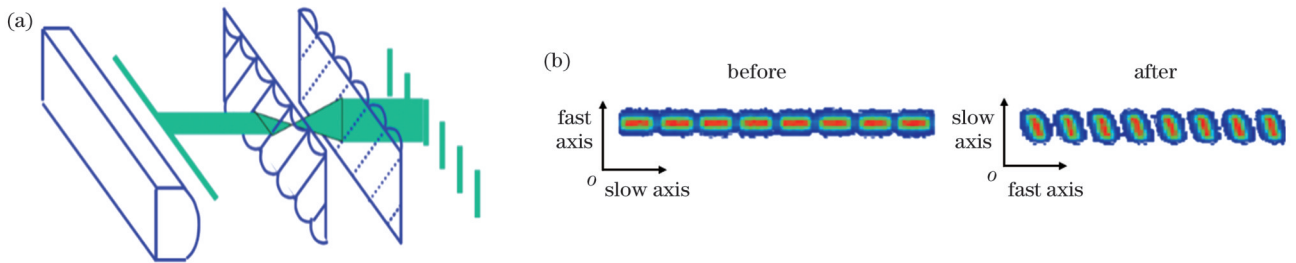


图 3 光束整形原理图及结果。(a) 原理图; (b) 光束整形前、后的光斑对比

Fig. 3 Schematic and result of beam shaping. (a) Schematic; (b) spot contrast before and after beam shaping

经过上述光学整形后, 对慢轴进行准直, 以减小激光器慢轴方向的分散角, 保证快、慢轴方向分散角的均衡。由于半导体激光微巴条阵列的分散角相对较小, 只有 8°, 选择普通柱透镜就可以得到较小的准直分散角, 准直后的激光器慢轴分散角小于 6 mrad, 满足光纤耦合要求^[17]。准直后的慢轴方向的光斑直径为 2.6 mm, 分散角为 6 mrad, 如图 4 所示。可以看出, 激光器线阵经过快轴准直、光束整形和慢轴准直后, 光斑尺寸为

3.2 mm × 2.6 mm, 分散角为 6 mrad × 6 mrad, 两个方向的光参量积约为 4.8 mm·mrad × 3.9 mm·mrad。

2.2 半导体激光器合束设计

此光源由 19 个半导体激光模块组成, 其中每个模块均包含 915 nm 和 976 nm 波段各 8 个微巴条阵列, 每 4 个相同波长的微巴条阵列为一组子模块。从图 5 可以看出: 每组子模块由 2 个高度差为 3 mm 的台阶构成, 每个台阶上水平排列 2 个微巴条, 该台阶式的物理

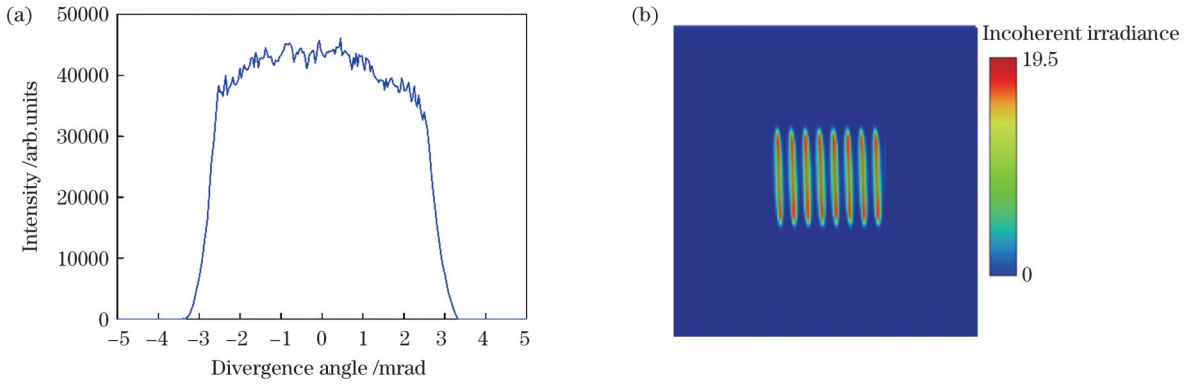


图 4 慢轴准直后的发散角及光场。(a)发散角;(b)光场分布

Fig. 4 Divergence angle and light field distribution after slow axis collimation. (a) Divergence angle; (b) light field distribution

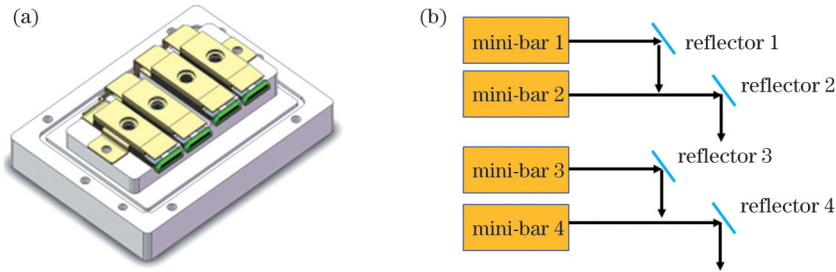


图 5 子模块排布。(a)由 4 个微巴条组成的子模块;(b)4 个微巴条的线阵空间排列示意图

Fig.5 Submodule arrangement. (a) Submodule consisting of 4 mini-bars; (b) schematic of linear array spatial arrangement structure of 4 mini-bars

结构可实现垂直方向的空间合束;每层台阶间隔 3.5 mm,可实现水平方向的空间合束。各个发光单元之间的装调互不影响,提高了装调精度,并且热源被分散,仅利用宏通道水冷即可实现有效散热。

此光源将子模块上输出的相同波长的 4 个单元激光束进行空间合束,通过各自的小反射镜调整光轴指向,合束后的光斑尺寸与激光器慢轴准直后的光斑尺寸基本一致,这样不会出现遮光现象,如图 5(b)所示。4 个尺寸为 3.5 mm×3.0 mm 的光斑叠加成 7 mm×6 mm 田字形,如图 6 所示。

四组子模块分别通过偏振合束及波长合束来实现功率的增加,而光束质量不出现下降。进一步进行光纤耦合,如图 7(a)所示。该模块的两个正交方

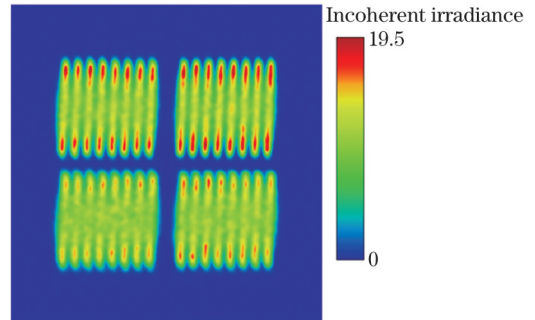


图 6 空间合束后的光场分布

Fig. 6 Light field distribution after spatial beam combination

向的发散角为 6 mrad×6 mrad,而两个方向的光参量为 10.5 mm·mrad×9.0 mm·mrad,两者相加为

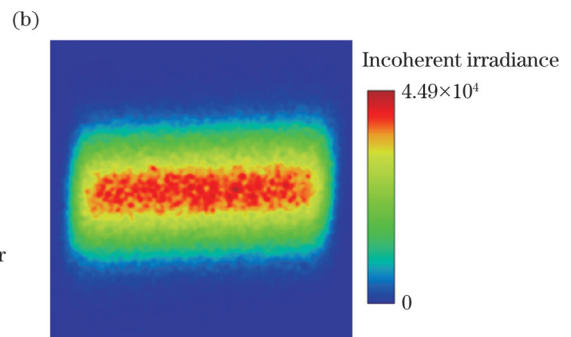
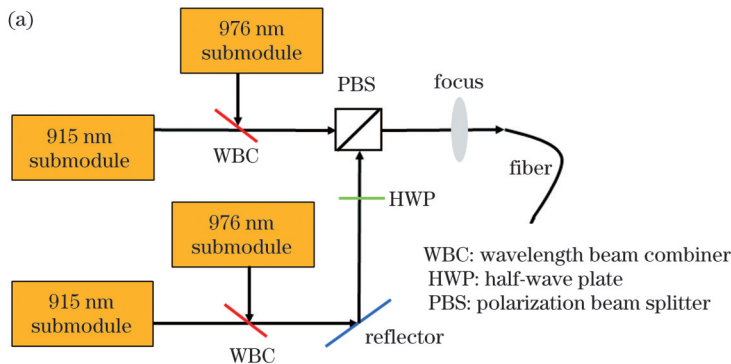


图 7 半导体激光模块光纤耦合。(a)二极管激光耦合源示意图;(b)光纤端面的光场分布

Fig. 7 Optical fiber coupling of diode laser module.(a) Sketch of diode laser coupling source; (b) optical field distribution on optical fiber end face

19.5 mm·mrad。选用芯径为 200 μm、数值孔径(NA)为 ~0.22 的光纤,其光参量为 22 mm·mrad,大于该模块输出光束两个正交方向的光参量积之和,理论上可以耦合进该光纤^[18]。为了保证光纤耦合时具有比较高的光纤耦合效率,采用焦距为 22.5 mm 的非球面熔融石英透镜进行光纤耦合,光纤端面的光场分布如图 7(b)所示,预计耦合效率超过 95%。

3 实验与结果分析

3.1 模块测试实验

在宏通道水冷散热下,单个半导体激光模块采用水冷功率计分别测量初始功率和光纤耦合后的功率,计算并拟合了相应的效率,如图 8 所示。在 70 A 的电流下,分别实现了 1172 W 和 872 W 两种功率,整体光电转换效率超过 45%。在 50 A 电流下,光电转换效率最高可达 47%。

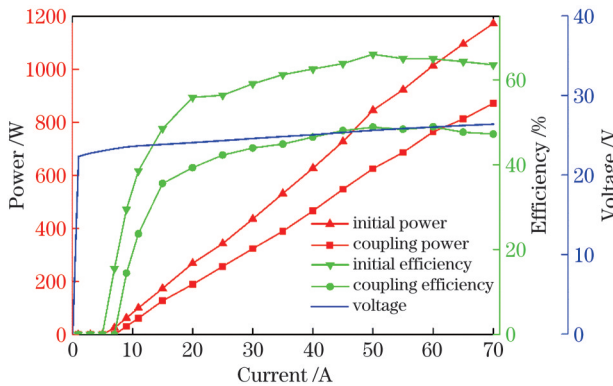


图 8 半导体激光模块的实验结果

Fig. 8 Experimental results of semiconductor laser module

针对激光淬火的应用需求,由于该淬火光源系统的输出功率达到 15 kW,因此共制备了 20 个 800 W 半导体激光模块。采用水冷功率计测试了每个模块在驱动电流为 70 A 时的输出功率,如图 9 所示,功率变化曲线较为平稳,其中最低输出功率为 819 W,最高输出功率为 913 W。每个模块之间的输出功率有差别,这主要是因为半导体激光微巴条阵列封装时会产生微小差别,在高电流驱动时热应力将导致每个发光单元的偏振度不同,进一步造成每个模块在光纤耦合输出时的功率不同。

3.2 15 kW 激光器装配实验

图 10 为该 15 kW 半导体激光系统的设计结构框

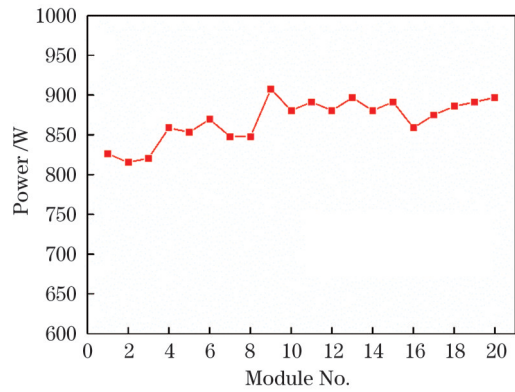


图 9 20 个半导体激光模块的功率一致性情况

Fig. 9 Power consistency of 20 semiconductor laser modules

图,采用 19 个输出功率为 800 W 的光纤耦合半导体激光模块,通过 19×1 激光合束器将 19 束光耦合进直径为 1 mm 的光纤中,实现超过 15 kW 功率的输出。为了获得良好且一致的淬火硬度以及淬火深度,通常需要将激光束整形成平顶分布状态^[19]。因此,该光源系统需要采用含有微透镜阵列和聚焦镜的加工头对光纤耦合后的光斑进行匀化聚焦处理。

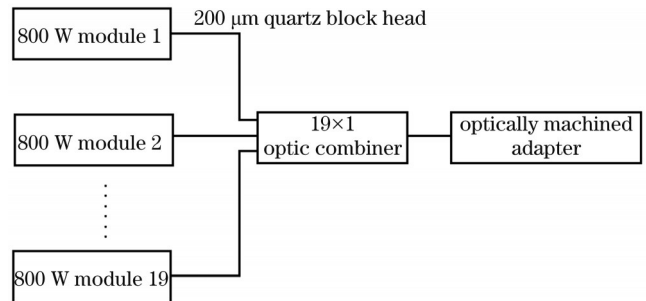


图 10 15 kW 激光器的结构框图

Fig. 10 Structural block diagram of 15 kW laser

如前文所述,每个半导体激光模块包含 4 个台阶物理结构的半导体激光光子模块,而每个子模块的驱动电压约为 7 V,驱动电流均为 70 A。为了适当减少 15 kW 半导体激光系统的驱动电源的数量并使其正常工作,将 6 个子模块串联,串联后的驱动电压为 42 V。经过计算,该光源系统确定采用 13 台额定输出电压为 50 V、电流为 75 A 的电源进行驱动。当各台激光电源在驱动电流为 70 A 时,测得的所对应的激光输出功率如表 1 所示。13 台电源全部工作在 70 A 时,该光源系统的最大输出光功率在理论上为 15763 W。

表 1 各激光电源对应的激光器输出功率

Table 1 Laser output power corresponding to each laser power supply

Laser power source No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Power /W	1240	1150	1310	1280	1330	1230	1170	1130	1240	1290	1240	1300	853

13 台电源全部工作时,功率曲线如图 11 所示,输出功率随电流线性增加。在驱动电流为 70 A 时,输出

功率为 15240 W,功率曲线没有出现饱和,而光电转换效率达到 43%。在高功率输出的情况下,半导体激光

微巴条慢轴发散角的增加导致慢轴准直效果减弱,降低了电光转换效率。19个半导体激光模块的输出功率在经过光纤合束器、1 mm 芯径的光纤以及加工头的损耗后,其与理论值相差数百瓦,但是仍然超过 15 kW,满足大型风电主轴轴承滚道面淬火的要求。

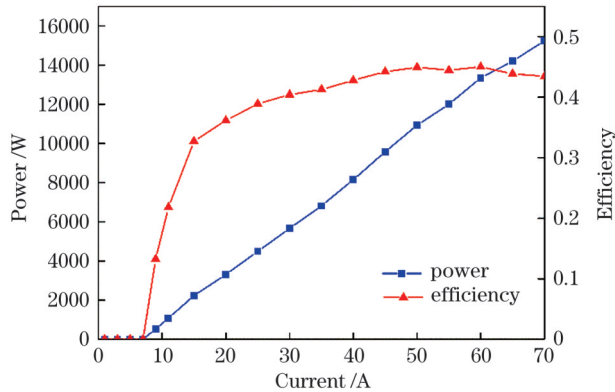


图 11 15 kW 激光器功率-电流曲线
Fig. 11 Power-current curve of 15 kW laser

经芯径为 1000 μm 的光纤耦合后,对输出光斑进行匀化聚焦处理。该 15 kW 半导体激光系统采用上海嘉强自动化技术有限公司研制的加工头,其主要参数如下:光斑尺寸配置为 163 mm \times 19 mm,准直焦距为 72 mm,聚焦焦距为 730 mm,末端工作距离为 675 mm,光纤接口。该加工头基于透镜阵列方式,结合常规透射式光路系统,可实现大尺寸双向平顶光斑匀化效果,总长度可以达到 160 mm 左右。如图 12 所示,在输入光纤芯径为 1000 μm 时,加工头输出光斑的长度约为 165 mm,宽度约为 25 mm,符合设计与应用要求。

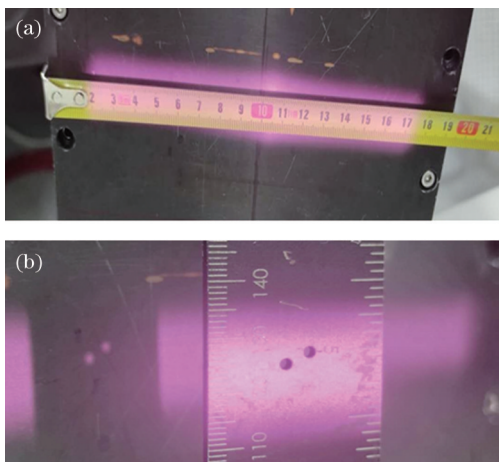


图 12 1000 μm 芯径下光斑的测量结果。(a)长度;(b)宽度
Fig. 12 Measurement results of light spot under 1000 μm core diameter. (a) Length; (b) width

4 结 论

采用空间合束、偏振合束及波长合束相结合的方法,将 915 nm 和 976 nm 两个波段各 8 只 MCC 技术封

装的半导体激光微巴条阵列作为发光单元进行总体组装,经过光纤芯径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的高功率光纤耦合输出,实现了光电转换效率超过 45%、功率超过 800 W 的连续输出。随后,将 19 个 800 W 模块通过 19 \times 1 光纤合束器进行合束,利用输出端口光纤直径为 1 mm 的光纤进行耦合,实现了大于 15 kW 的输出功率,为大型风电主轴轴承滚道面的淬火提供了技术支持。

参 考 文 献

- [1] 翟海平, 耿鑫, 王庆, 等. 我国风电轴承钢研究近况[J]. 黄冈职业技术学院学报, 2020, 22(6): 139-142.
Zhai H P, Geng X, Wang Q, et al. Recent development of wind turbine bearing steel in China[J]. Journal of Huanggang Polytechnic, 2020, 22(6): 139-142.
- [2] 杨志翔, 王爱华, 吴文迪, 等. 激光淬火深度对钢轨疲劳磨损性能的影响研究[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 636-643.
Yang Z X, Wang A H, Wu W D, et al. Effect of laser hardening depth on rolling contact fatigue property of steel rail[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 636-643.
- [3] 李昌, 于志斌, 赵金月, 等. 碟片激光器激光淬火过程数值模拟与试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 203-211.
Li C, Yu Z B, Zhao J Y, et al. Numerical simulation and experimental study on laser quenching process of disk laser[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 203-211.
- [4] 覃敏. 激光表面处理技术在重工业领域的研究和应用进展[J]. 装备制造技术, 2017(12): 51-53, 61.
Qin M. Laser surface treatment technology and its present application in heavy industry[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(12): 51-53, 61.
- [5] 赵靛. 中国风电轴承市场近况[J]. 风能, 2013(1): 44-45.
Zhao L. Situation on China's wind power bearing market[J]. Wind Energy, 2013(1): 44-45.
- [6] 陈雯. 我国风力发电的现状与展望[J]. 应用能源技术, 2010(8): 49-51.
Chen W. China wind power status and prospects[J]. Applied Energy Technology, 2010(8): 49-51.
- [7] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
- [8] 张志军, 刘云, 缪国庆, 等. 2 kW 半导体激光加工光源[J]. 发光学报, 2013, 34(3): 334-339.
Zhang Z J, Liu Y, Miao G Q, et al. The 2 kW semiconductor laser processing light[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(3): 334-339.
- [9] 陈安新. 大功率半导体激光器在金属材料加工中的应用[J]. 中国金属通报, 2021(6): 246-247.
Chen A X. Application of high power semiconductor laser in metal material processing[J]. China Metal Bulletin, 2021(6): 246-247.
- [10] Slipchenko S O, Vinokurov D A, Lyutetskiy A V, et al. Quenching of lasing in high power semiconductor laser[J]. Semiconductors, 2009, 43(10): 1369-1372.
- [11] 陈君, 张群莉, 姚建华, 等. 金属材料的激光吸收率研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 793-798.
Chen J, Zhang Q L, Yao J H, et al. Study on laser absorptivity of metal material[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 793-798.
- [12] 米庆改, 王旭葆, 肖荣诗. 大功率半导体激光堆栈双波长合束及聚焦系统[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1218003.
Mi Q G, Wang X B, Xiao R S. Double wavelength combination and focus system of high power laser diodes stack[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1218003.

- [13] 刘晓东, 秦应雄, 柳洁, 等. 高功率激光大宽度矩形光束抛物带式积分镜研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 191403.
Liu X D, Qin Y X, Liu J, et al. Research on parabolic band integrating mirror for high-power large-width rectangular laser beams [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 191403.
- [14] Raycus[EB/OL]. [2021-09-17]. <https://www.raycuslaser.com/>.
- [15] 张俊, 单肖楠, 刘云, 等. 千瓦级高光束质量半导体激光阵列合束光源[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202010.
Zhang J, Shan X N, Liu Y, et al. Kilowatt-output and high beam quality diode laser linear array coupling source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0202010.
- [16] 陈天奇, 张普, 彭勃, 等. 封装对大功率半导体激光器阵列热应力及 Smile 的影响[J]. 光子学报, 2018, 47(6): 0614001.
Chen T Q, Zhang P, Peng B, et al. Effect of packaging on thermal stress and smile of high power semiconductor laser arrays [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 0614001.
- [17] 丁兵, 赵鹏飞, 段程芮, 等. 高亮度绿光半导体激光器光纤耦合系统设计及仿真[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501016.
Ding B, Zhao P F, Duan C R, et al. Design and simulation of high brightness fiber coupling system of green laser diodes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501016.
- [18] Wang Z L, Segref A, Koenning T, et al. Fiber coupled diode laser beam parameter product calculation and rules for optimized design [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7918: 791809.
- [19] 安德春, 秦健. 激光淬火的原理与应用[J]. 化肥设计, 2021, 59(6): 59-62.
An D C, Qin J. Philosophy and application of laser quenching[J]. Chemical Fertilizer Design, 2021, 59(6): 59-62.

15 kW Fiber Coupled Diode Laser Source for Laser Quenching

Zhang Jiye, Peng Hangyu*, Cao Junsheng**, Zhang Jun, Wang Jingbo

State key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China

Abstract

Objective With the increase in wind turbine equipment volume, the scale and performance requirements of wind turbine bearings are increasing. This is a significant challenge for the production and manufacturing of large-scale wind turbine bearings. In recent years, high-power lasers have been applied for the processing of workpieces such as crane-main and worm-shaft bearings. Therefore, high-power lasers, while serving as quenching light sources, are expected to solve the surface hardening of large-scale wind turbine bearings, enabling the development of large-scale wind turbine bearing technology. After CO₂ and solid-state lasers, high-power diode laser systems have gained substantial interest in laser quenching for metal materials because of their high wall-plug efficiency, high reliability, long lifetime, relatively low investment costs, small footprint, and high absorption efficiency. Currently, high-power diode laser sources have achieved an output of over ten thousand watts in many countries, particularly in the USA and Germany. However, domestic development has been relatively slow. In this scheme, a novel method of 19 fiber-coupled laser modules, one of which is coupled with 16 macro-channel cooling (MCC) mini-bars, is used to develop a 15-kW fiber-coupled diode laser-quenching light source.

Methods Aiming at the practical application of laser quenching in the production of large-scale wind turbine bearings, a 15-kW fiber-coupled diode laser-quenching light source was designed. First, 16 MCC mini-bars with linear array beam shaping, eight of 915 nm and eight of 976 nm, were used by adopting a space/polarization/wavelength beam combination to obtain a high-power fiber-coupled module with an optical fiber with core diameter of 200 μm and numerical aperture of 0.22. Under cooling with industrial water, the high-power fiber-coupled module achieved a continuous output power of over 800 W and high wall-plug efficiency. Then, the laser beams from the 19 fiber-coupled modules were coupled by a 19×1 fiber optic combiner into a 1 mm optical fiber. Finally, the intensity distribution of the lasing beam spot was further homogenized using the microlens array combined with the focusing lens. In addition, the performance of the fiber-coupled module was analyzed in our simulations and experiments.

Results and Discussions Figure 1 shows a schematic of an MCC mini-bar. The MCC mini-bar has eight emitting points soldered onto a macro-channel cooler. The optical procedure for every mini-bar consists of three steps: fast axis collimation, beam symmetrizing with beam transformation systems, and slow axis collimation. The spot widths and divergence angles of the fast and slow axes for each emitting points were 3.2 mm, 6 mrad and 2.6 mm, 6 mrad, respectively (Fig. 4). Every four mini-bars with the same wavelength were mounted in a stair-step manner (Fig. 5), leading to the formation of a simulated beam spot with a 7 mm×6 mm field-shape distribution (Fig. 6). Then, all emitting units were coupled theoretically into a fiber with core diameter of 200 μm and numerical aperture of 0.22 using polarization and wavelength multiplexing, as shown in Fig. 7. In the experiment, a fiber-coupled module comprising 16 MCC mini-bars (eight of 915 nm and eight of 976 nm) achieved an output power over 800 W and wall-plug efficiency of 45% under macro-channel cooling with industrial water (Fig. 8). Furthermore, the lasing beam from 19 fiber-coupled modules was

coupled by a 19×1 fiber optic combiner into a 1 mm optical fiber (Fig. 10), achieving a maximum output power over 15 kW (Fig. 11) and spot size of $165 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ (Fig. 12).

Conclusions In this study, a high-power and high-efficiency fiber-coupled module is demonstrated by adopting a space/polarization/wavelength beam combination composed of 16 MCC mini-bars, eight of 915 nm and eight of 976 nm. Under macro-channel cooling with industrial water, an output power of over 800 W and wall-plug efficiency over 45% are demonstrated for a fiber with core diameter of 200 μm and numerical aperture of 0.22. Then, the lasing beams from the 19 fiber-coupled modules are coupled by a 19×1 fiber optic combiner into a 1 mm optical fiber. A better homogenized intensity distribution of the light spot is achieved using a microlens array combined with a focusing lens. The results show a maximum output power over 15 kW and spot size of $165 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, satisfying the power required for quenching the bearing raceway surface of a large wind turbine spindle.

Key words lasers; diode lasers; fiber coupling; beam combination; laser quenching