

激光与光电子学进展

14 μm 芯径 2 kW 光纤振荡器及紫铜焊接试验研究

郭少锋*, 代小光, 彭杨, 代小星, 郑文雷, 朱朝晖, 刘同争, 徐志宏

湖南大科激光有限公司, 湖南 湘阴 414615

摘要 激光焊接是新能源电池制造的关键技术。采用 976 nm 半导体激光泵浦技术, 在保证泵浦光充分吸收和激光器光光转换效率的同时, 缩短增益光纤长度, 提高激光器受激拉曼散射阈值, 采用独特的增益光纤盘绕技术抑制模式不稳定, 提高输出光束质量, 实现了 2.25 kW 纯单模 ($M^2 \leq 1.1$) 激光功率输出, 拉曼抑制比达到 -38 dB, 能量传输光纤 (芯径为 14 μm , 数值孔径为 0.07) 长度达到 7 m。输出激光亮度高、光斑直径小、功率密度高, 有效降低了焊接中的热效应, 避免了焊缝缺陷和飞溅。

关键词 激光器; 单模光纤激光器; 细芯径; 焊接性能

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2136002

Experimental Research on 2 kW Fiber Oscillator with 14 μm Core Diameter and Copper Welding

Guo Shaofeng*, Dai Xiaoguang, Peng Yang, Dai Xiaoxing, Zheng Wenlei, Zhu Zhaohui, Liu Tongzheng, Xu Zhihong

Hunan Dake Laser Co., Ltd., Xiangyin 414615, Hunan, China

Abstract Laser welding is the key technology of new energy battery manufacturing. To ensure the full absorption of pump light and laser light conversion efficiency, 976 nm semiconductor laser pump technology is used, and the length of gain fiber is shortened to increase the laser stimulated Raman scattering threshold. And a novel gain fiber coiling method is provided to suppress the mode instability and improve the output beam quality. The output power of single-mode ($M^2 \leq 1.1$) laser is 2.25 kW, the Raman suppression ratio reaches -38 dB, and the length of energy transmission fiber (14 μm core diameter, numerical aperture is 0.07) reaches 7 m. The output laser has high brightness, small spot diameter, and high power density, which can effectively reduce the thermal effect during welding and avoids weld defects and spatters.

Key words lasers; single-mode fiber laser; small core; welding performance

随着世界范围内汽车引发的能源危机和环境污染问题加剧, 汽车产业链正加速向低碳化、电动化等方向转型, 新能源汽车正逐渐替代传统燃油车。电池系统是决定新能源汽车性能的关键组件。电池系统是一个由电池单体、电池模块和电池包组成的复杂系统, 该系统包含数千个焊点/焊缝, 每一个焊接都将直接影响整个电池系统的功能和效率, 焊接过程至关重要。因此, 高可靠性的电池焊接技术和工艺成为汽车制造业发展亟待解决的问题。激光焊接由于其非接触性、高能量密度、焊接速度快、对热输入的精确控制以及易于自动化等特点, 被广泛应用于新能源汽车电池制造中^[1]。

新能源电池生产和组装过程中需要焊接的材料主要是 3003 系铝合金 (电池外壳)、铝和铜 (电极、汇流

排、母排)。激光焊接工艺中的难点主要体现在: 铝合金对激光的反射率较高, 容易产生气孔、热裂纹; Al/Cu 异种金属材料混合形成脆性的、高电阻的金属间化合物等^[2-3]。目前, 已报道了多种方法和工艺研究, 例如, 光束振荡焊接、脉冲激光焊接、提高激光光束质量和缩小焦点光斑等^[4-7], 可以在一定程度上改善所述问题。2021 年 6 月, 湖南大科激光有限公司采用 976 nm 波长半导体激光器泵浦技术研制了工业级 2 kW 细芯径谐振腔型单模连续光纤激光器, 实现了在 14 μm 芯径输出端帽 (QBH) 中输出 2.25 kW 纯单模 ($M^2 \leq 1.1$) 激光。该激光器不但保持了近衍射极限激光输出, 而且在相同焊接头的情况下可以获得更小的焦点光斑, 特别适合用于铜铝材料的高质量焊接。

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-08-29; 录用日期: 2022-09-15

通信作者: *guoshaofeng@dklaser.com

14 μm 芯径 2 kW 单模光纤激光器采用双端泵浦方式, 结构如图 1 所示, 包括 976 nm 波长半导体激光器(LD)、前向泵浦合束器(FC)、高反光栅(HR)、掺镱光纤(YDF)、低反光栅(OC)、后向泵浦/信号合束器(BC)、包层光滤除器(CPS)、能量传输光纤(GDF)和 QBH。所用光纤光栅对的中心波长为 1080 nm, 增益光纤为商用双包层掺镱光纤, 纤芯模场面积为 $150 \mu\text{m}^2$, 增益光纤在 976 nm 的吸收系数约 2.5 dB/m,

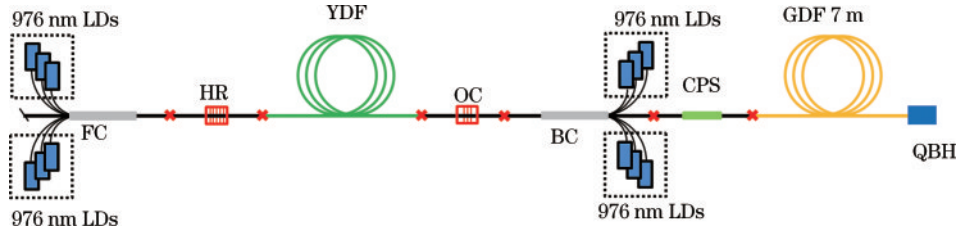


图 1 14 μm 芯径 2 kW 光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of 2 kW fiber laser structure with 14 μm core diameter

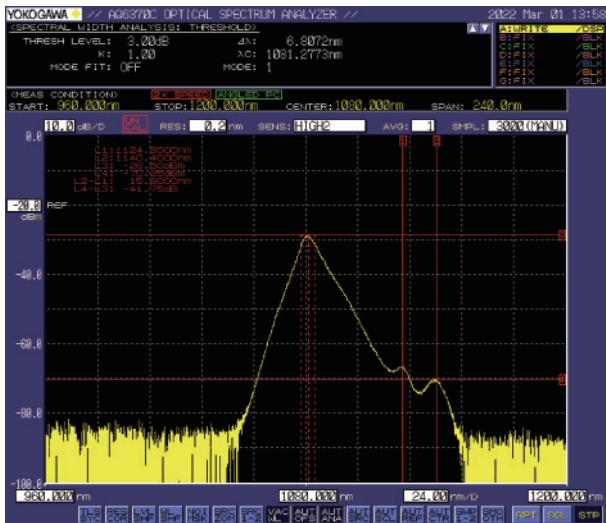


图 2 输出光谱图

Fig. 2 Output spectrogram

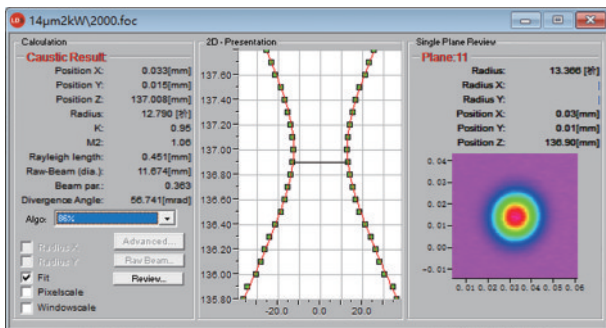


图 3 输出光束质量图

Fig. 3 Output beam quality graph

为了测试 14 μm 芯径单模 2 kW 激光器在高反材料焊接中的性能, 首先开展了紫铜激光焊接试验。所用材料是厚度为 2 mm 的紫铜薄板, 焊接方式为摆动振荡焊接, 焊接速度(焦点光斑移动速度)为 300 mm/s, 摆动

能量传输光纤(芯径为 14 μm , 数值孔径为 0.07)长度达到 7 m。该激光器在保证泵浦光充分吸收和激光器光光转换效率的同时, 缩短增益光纤长度, 提高激光器受激拉曼散射阈值, 总泵浦功率在 2720 W 时输出功率达到 2250 W, 拉曼抑制比例为 -38 dB, 如图 2 所示。增益光纤的盘绕直径约 9 cm, 可以在保证转化效率不降低的同时抑制模式不稳定, 滤除高阶模式, 提高输出光束质量, 输出光束质量 $M^2=1.06$, 如图 3 所示。

直径为 1 mm, 焦点位于紫铜表面(无离焦)。图 4 给出了焊缝的熔宽和熔深随输出功率变化曲线, 可以看出, 当输出功率从 1 kW 增加至 2 kW 时, 熔深从 0.91 mm 增加至 1.53 mm, 而熔宽则基本保持在 1.76 mm。这表明 14 μm 芯径单模激光器可以在保持熔宽基本不变的情况下, 逐渐增加熔深, 实现熔深可调, 具有更加广泛的工艺窗口。

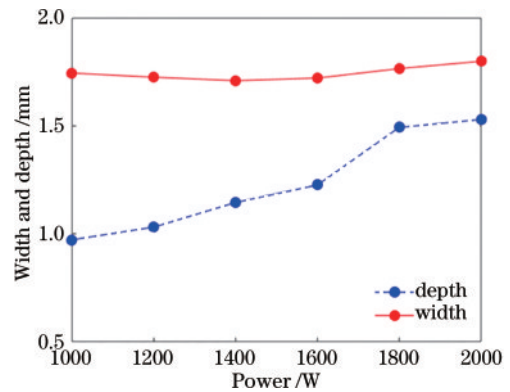


图 4 激光焊接过程中熔宽和熔深随激光功率的变化

Fig. 4 Variation of fusion width and depth with output power during laser welding

为进一步验证细芯径单模激光器在高反材料焊接的优势, 本文基于 14 μm 芯径单模激光器、20 μm 芯径单模激光器、50 μm 芯径多模激光器, 分别开展了紫铜薄板叠焊对比试验。三台激光器的输出功率均设置为 2 kW, 采用的焊接方式为摆动振荡焊接, 摆动直径为 1 mm。所用的焊接材料为两块紫铜薄板, 尺寸为 30 mm \times 50 mm, 上板厚度为 1 mm, 下板厚度为 2 mm。当熔深达到 1.5 mm 时, 50 μm 芯径多模激光器的最大焊接速度为 100 mm/s, 20 μm 芯径单模激光器的最大焊接速度为 300 mm/s。而 14 μm 芯径单模激光器由于焦点光斑更小, 能量密度更高, 达到该熔深

对应的最大焊接速率为 450 mm/s, 是芯径 20 μm 单模激光器的 1.5 倍, 是 50 μm 多模激光器的 4.5 倍。以上结果表明, 相比于普通 20 μm 芯径单模激光器和 50 μm 芯径多模激光器, 采用 14 μm 芯径单模激光器可以大幅度提升焊接速率。

除此之外, 采用 14 μm 芯径单模激光器还有利于降低热效应和减少缺陷。图 5 给出了三种激光器的紫铜叠焊效果图, 输出功率均为 2 kW, 焊接速度均设置为 450 mm/s, 摆动直径为 1 mm。50 μm 芯径多模激光器对应的热影响区宽度为 5.820 mm, 熔深为 0.878 mm, 由于其熔深小于 1 mm, 在该速度下未能实

现 (1+2) mm 铜板叠焊, 同时焊缝表面存在明显的孔洞和大量飞溅, 如图 5(a) 所示。图 5(b) 展示了 20 μm 芯径单模激光器的焊缝效果图, 对应的热影响区宽度为 4.241 mm, 熔深为 1.085 mm, 由于熔深刚好穿透上板, 未能实现上下铜板的高强度结合, 此外, 焊缝表面同样存在孔洞。14 μm 芯径单模激光器的焊缝效果图如图 5(c) 所示, 其热影响区宽度为 2.455 mm, 熔深为 1.310 mm, 相比于前两种激光器, 热影响区宽度明显降低, 且表面未见明显的孔洞和飞溅, 因此, 采用 14 μm 芯径单模激光器还可以获得更好的工艺稳定性。

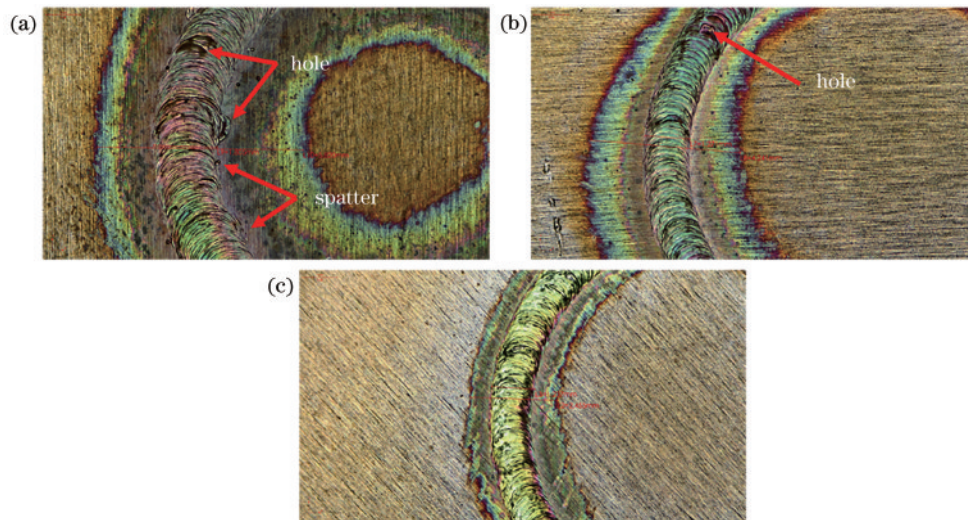


图 5 三种激光器对紫铜叠焊的焊缝效果对比。(a) 50 μm 芯径; (b) 20 μm 芯径; (c) 14 μm 芯径

Fig. 5 Comparison of weld effects of three lasers on copper overlap welding. (a) 50 μm core diameter; (b) 20 μm core diameter; (c) 14 μm core diameter

焊缝缺陷的产生通常与熔池不稳定有密切关系。工件表面起伏引起离焦量变化, 导致焊缝熔宽不均匀、不稳定, 最终产生孔洞等缺陷。为了进一步分析 14 μm 芯径单模激光器焊接时缺陷抑制效果明显的根本原因, 本文进一步测试了其焊缝熔宽随离焦量的变化。采用的焊接方式为摆动振荡焊接, 摆动直径为 1 mm, 焊接速度为 450 mm/s, 输出功率为 2 kW, 基底为 2 mm 的紫铜薄板, 结果如图 6 所示。可以看出, 在 -3~2.5 mm 的离焦量范围内, 熔宽变化只有 ± 0.25 mm。严格的单模激光输出 ($M^2=1.06$) 使得 14 μm 芯径单模激光器具有更大瑞利长度, 焦点附近光斑形态变化缓慢。正是由于其极高的光束质量, 14 μm 芯径单模激光器产生的焊缝熔宽均匀、稳定, 具有明显的缺陷抑制效果。

综上所述, 由于更小的焦点光斑和极高的光束质量, 14 μm 芯径 2 kW 单模激光器可明显降低焊接中的热效应, 从而减少熔池飞溅和焊缝缺陷率, 并可以在不改变焊缝宽度的同时, 实现穿透深度可控。相比于普通 20 μm 单模激光器和 50 μm 多模激光器, 14 μm 芯径 2 kW 单模激光器极大地提高了焊接速度, 拓宽了焊接

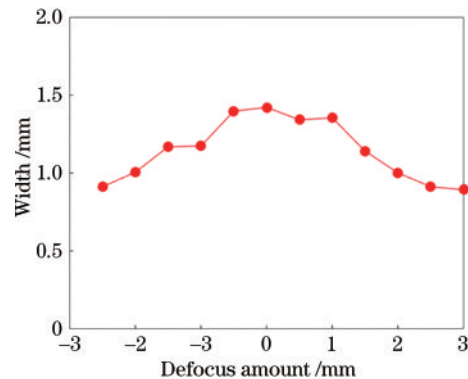


图 6 激光焊接过程中熔宽随离焦量的变化

Fig. 6 Variation of fusion width with defocus amount during laser welding

窗口, 降低了焊接缺陷产生率, 适用于铝合金和铜等高反材料及铜铝异种材料间的焊接。目前, 该激光器已应用于软包电池极耳焊接、汇流排焊接、方形电池封口、防爆阀、极柱焊接等方面, 未来将继续对该激光器的工艺参数进行优化, 进一步改善其在加工中的效能和稳定性。

参 考 文 献

- [1] 王瑜, 舒乐时, 耿韶宁, 等. 汽车车身激光焊接技术的现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1202004.
Wang Y, Shu L S, Geng S N, et al. Status and development trend of laser welding technology for automotive body[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1202004.
- [2] 张迪, 赵琳, 刘奥博, 等. 激光能量对激光焊接接头熔化形状、气孔和微观组织的影响及其调控方法[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1502005.
Zhang D, Zhao L, Liu A B, et al. Understanding and controlling the influence of laser energy on penetration, porosity, and microstructure during laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1502005.
- [3] 张高磊, 孔华, 邹江林, 等. 高功率光纤激光深熔焊接飞溅特性以及离焦量对飞溅的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202008.
Zhang G L, Kong H, Zou J L, et al. Spatter characteristics of high-power fibre laser deep penetration welding and effect of defocus on spatter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202008.
- [4] Shaikh U F, Das A, Barai A, et al. Electro-thermo-mechanical behaviours of laser joints for electric vehicle battery interconnects[C]//2019 Electric Vehicles International Conference (EV), October 3-4, 2019, Bucharest, Romania. New York: IEEE Press, 2019.
- [5] Dimatteo V, Ascari A, Liverani E, et al. Experimental investigation on the effect of spot diameter on continuous-wave laser welding of copper and aluminum thin sheets for battery manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 145: 107495.
- [6] Wang L, Gao M, Zhang C, et al. Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2016, 108: 707-717.
- [7] Zubiri F, Petite M M, Ochoa J, et al. Welding optimization of dissimilar copper-aluminum thin sheets with high brightness lasers[M]//Cracking phenomena in welds IV. Cham: Springer, 2016: 219-228.