

蓝光辅助红外 MOPA 光纤激光对纯铜薄片点焊的研究

王晨阳^{1,2}, 林卿¹, 吕超¹, 王方伟¹, 吕柳², 王锋^{1,3}, 袁孝^{3*}¹武汉凌云光电科技有限责任公司, 湖北 武汉 430205;²江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;³苏州大学光电信息科学与工程学院, 江苏 苏州 215006

摘要 由于纯铜材料吸收的波长依赖性以及对红外激光吸收的温度依赖性和高导热性, $1\ \mu\text{m}$ 红外激光的纯铜焊接常常会出现焊接效果不稳定的问题, 同时伴随着飞溅、孔洞等焊接质量问题。纯铜材料对激光的吸收具有很强的波长依赖性, 在短波段的吸收显著增加, 因此绿光和蓝光激光也被用来进行铜的焊接, 并取得不错的焊接效果; 然而, 蓝、绿激光的高成本严重制约了其在精细微焊接中的应用。考虑到成本和焊接效果的平衡, 本研究团队使用 $100\ \text{W}/450\ \text{nm}$ 蓝色半导体连续激光辅助 $120\ \text{W}/1.07\ \mu\text{m}$ MOPA 红外光纤纳秒激光对纯铜薄片进行点焊实验, 蓝光的主要作用是焊前预热和焊后保温。实验结果表明: 与单纯的红外 MOPA 激光焊接相比, 蓝光辅助红外 MOPA 激光焊接焊点的表面形貌、拉力、飞溅以及孔洞等都有明显改善。

关键词 激光技术; 纯铜片; 激光点焊; 蓝激光; MOPA 光纤激光; 双波长

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1602008

1 引言

纯铜以其优异的导电导热性能在动力电池、消费类电子产品等领域得到了越来越广泛的应用。在激光金属焊接领域, 有色金属的高质量焊接常常遇到挑战。作为应用最广泛的有色金属, 纯铜的激光精密焊接一直是研究的热点问题之一。

输出激光波长在 $1\ \mu\text{m}$ 附近的光纤激光器是最成熟、性价比最高的一类激光器, 在黑色金属的精密焊接中得到了广泛应用, 其中的红外光纤激光器, 例如连续波(CW)激光器、准连续波(QCW)毫秒长脉冲激光器、主振荡功率放大(MOPA)纳秒短脉冲激光器等, 在工业批量制造中能够满足焊接质量、生产效率、良品率等方面的要求; 但由于铜的高热导率和近红外吸收特性, 此类激光器在纯铜与铜合金的焊接过程中会产生焊接效果不稳定、飞溅、孔洞等焊接质量问题。在 $1\ \mu\text{m}$ 波段, 铜的吸收特性显示出较强的温度依赖性: 在室温下, 铜的吸收率非常低, 只有 $4\% \sim 5\%$; 随着温度升高, 铜的吸收率线性增大, 当温度达到熔点时, 吸收率可达 $11\% \sim 16\%$ 。液相铜的吸收率同样表现出随温度线性增大的特征^[1-2]。因此, 在恒功率红外激光焊接中, 铜对能量的吸收会随着温度的升高而快速增加, 导致焊点处的温度在达到熔点后迅速升至沸点, 形成“匙孔”, 进而产生飞溅。由于铜的高导热性, 在焊接激光

关闭后, 气态、液态金属迅速冷却固化, 使得焊点内部形成气孔等缺陷。每个焊接光斑内的微小瑕疵、污染、粗糙度等都会影响初始吸收率, 从而导致 $1\ \mu\text{m}$ 激光焊接纯铜时存在焊点质量不稳定的问题。此外, 红外高斯光束由于光斑中心强度高, 易形成中心匙孔, 进而产生飞溅。为了解决上述问题, 人们采取了多种措施, 比如, 采用摇摆焊^[3-5], 在表面加工出微结构^[6-7], 在表面增设吸收涂层^[8], 对激光功率进行调制^[9], 在真空中实施焊接^[10-11]等, 而且这些措施都取得了一定成效。值得一提的是, 有人将 $1\ \mu\text{m}$ MOPA 纳秒光纤激光以螺旋运动的方式用于薄铜片或异型金属片的焊接, 结果发现, 虽然焊点表面不够平滑, 但焊点质量的一致性得到了改善^[12-13]。

铜对激光的吸收表现出很强的波长依赖性^[1-2]: 当波长小于 $700\ \text{nm}$ 时, 室温下铜对光的吸收显著增加, 特别地, 铜对固态绿激光($532\ \text{nm}$)的吸收率可达到近 40% , 对蓝激光($450\ \text{nm}$)的吸收率则可达到 45% 以上(约为 $1\ \mu\text{m}$ 波长下吸收率的 10 倍)。近 10 年来, 铜的绿激光焊接得到了广泛研究, 焊点质量得到明显改善^[14-17]。最近, 蓝光半导体激光的高功率高亮度光纤耦合技术及其在铜焊接中的应用取得了关键性突破^[18-20]。典型的商用高亮度蓝光激光器生产商有美国的 NUBURU 公司^[19], 高功率激光器生产商有德国的 Laserline^[20]等。绿激光器和蓝激光器的成本非常高,

收稿日期: 2021-09-09; 修回日期: 2021-10-13; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 湖北省科技重大专项(2020AAA003)

通信作者: *xyuan@suda.edu.cn

因此,近年来出现了绿光和红外双波长焊接的方案和实验研究^[2,21-22],不久前也出现了基于蓝激光和红外激光的双波长辅助焊接的公开报道^[23-24]。可见,由于红外光纤激光器的高性能和高性价比,以 $1\ \mu\text{m}$ 红外激光为主对纯铜进行焊接依然是一个非常具有工业化应用前景的方向。

虽然红外 MOPA 光纤激光器可以有效地实现薄铜片的稳定焊接,但在螺旋焊接一个焊点时,由于激光开启初始阶段和焊接中后阶段工件的温度不同,依然会产生飞溅、宏观孔洞、微观孔洞等质量问题。为了进一步优化焊接质量,本研究团队提出了 $450\ \text{nm}$ 蓝激光辅助 $1\ \mu\text{m}$ MOPA 激光实现纯铜片点焊的方案,即:在红外 MOPA 激光焊接前,先开启蓝激光对铜片进行预加热,以提高随后红外焊接时铜对光的吸收率;红外 MOPA 激光焊接结束后,适当延时关断蓝激光,以延长熔池金属保持液态的时间,使熔池中的气泡有更

长的排出时间。与单纯的红外 MOPA 激光焊接相比,在焊点大小相同时,蓝激光辅助红外 MOPA 激光焊接在焊点表面形貌、拉力大小、飞溅以及孔洞等方面都有明显改善。

2 实验装置与方法

本研究团队设计的双波长同轴系统的光路图如图 1 所示。双波长激光光束由光纤耦合蓝光半导体激光和红外 MOPA 光纤激光经过适当扩束准直后同轴合束而成。振镜系统 scanner 2 控制合成光束的位置及运动,光束通过去色散远心 $f-\theta$ 透镜聚焦到待焊工件上。在红外 MOPA 光纤激光准直系统后添加另一个扫描振镜 scanner 1,用于控制红外光斑在蓝光光斑内的位置,以便在蓝光光斑内实现摇摆、螺旋等焊接方式。此外,焊点图像信息通过同轴图像采集装置汇聚到 CCD 相机中,实现成像与定位功能。

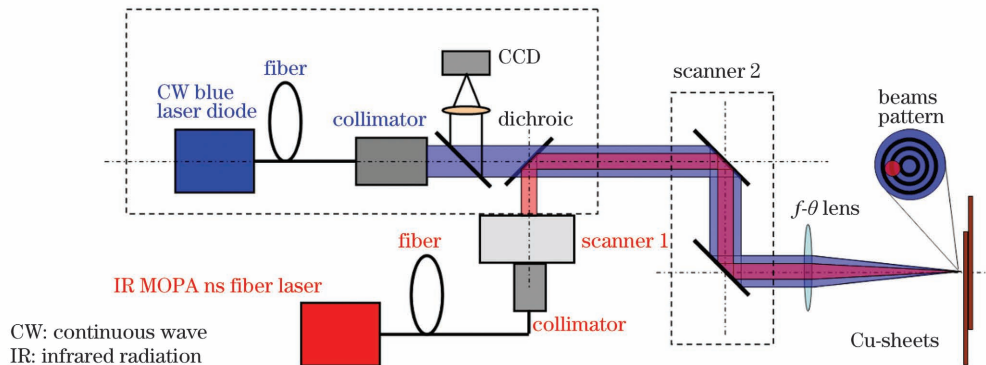


图 1 双波长同轴系统光路示意图

Fig. 1 Schematic of optical path of dual-wavelength coaxial system

实验所用激光器是北京大族天成半导体技术有限公司生产的 TCS-120-BW-FC3D 光纤耦合蓝光半导体激光器,其输出激光的波长为 $450\ \text{nm}$,光纤芯径为 $200\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22 ,最大连续输出功率为 $120\ \text{W}$ 。实验所用红外 MOPA 光纤激光器购于深圳市欧凌镭射科技有限公司,其型号为 NFL-C120,输出激光的波长为 $1070\ \text{nm}$,光束质量 M^2 小于 1.8 ,最大输出功率为 $120\ \text{W}$,脉冲宽度在 $2\sim 400\ \text{ns}$ 范围内可

调,重复频率为 $1\sim 6000\ \text{kHz}$ 。

在所有与拉力测试有关的实验中,每个样品将依次焊接 4 个焊点,焊点排列成边长为 $2\ \text{mm}$ 的正方形,每个焊点直径为 $350\ \mu\text{m}$,如图 2(a) 所示。待焊接样品是厚度分别为 $0.1, 0.2, 0.25\ \text{mm}$ 的纯铜薄片,将 $0.1\ \text{mm}$ 和 $0.2\ \text{mm}$ 厚铜片以叠焊的方式分别焊接到 $0.25\ \text{mm}$ 厚铜片上,并分别标记为 1# 样品和 2# 样品。

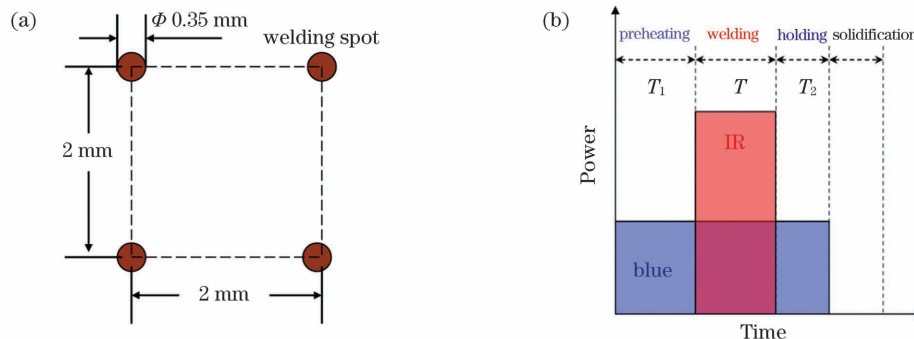


图 2 焊点的排布情况与焊接周期。(a) 拉力测试的四焊点排布;(b) 单焊点焊接时双波长激光的工作时序

Fig. 2 Welding spots arrangement and welding cycle. (a) Four welding spots arrangement for tensile test; (b) working sequence of dual-wavelength laser during single spot welding

单点焊接过程如图 2(b) 中的时序图所示。利用 scanner 2 将光束定位于样品的待焊位置。1) 开启功率为 P_B 的蓝光半导体激光器, 蓝激光聚焦在铜片表面形成直径约为 $400\ \mu\text{m}$ 的圆光斑, 开始“预热”过程。2) 预热一定时长 (T_1) 后, 开启功率、脉宽、重复频率分别为 P_M 、 t_M 和 F_M 的红外 MOPA 激光, 启动“焊接”过程。MOPA 光束在 scanner 1 的控制下以 v 的速度从内向外沿着螺旋线扫描, 经过时长 T 后, 形成一个直径为 $350\ \mu\text{m}$ 的焊点, 关闭 MOPA 激光器。3) 蓝激光依然作用在焊点上, 以维持熔池为液态, 实施“保温”功能, 保温 T_2 时长后, 关闭蓝光半导体激光器, 结束保温, 焊点熔池自然冷却凝固, 完成该焊点的整个焊接周期。

通过扫描振镜 scanner 2 将复合光束移动到第二个焊点位置, 重复上述单点焊接过程, 直至完成每个纯铜薄片样品上 4 个焊点的焊接。

表 1 焊接拉力与蓝光预热、保温时长的依赖性实验采用的激光参数

Table 1 Laser parameters used in dependence experiments of welding tension on blue light preheating and holding time

Sample	P_B/W	P_M/W	T/ms	t_M/ns	F_M/kHz	$v_1/(mm \cdot s^{-1})$
1# (0.1 mm + 0.25 mm)	50	80	25	350	100	130
2# (0.2 mm + 0.25 mm)	60	100	30	350	100	100

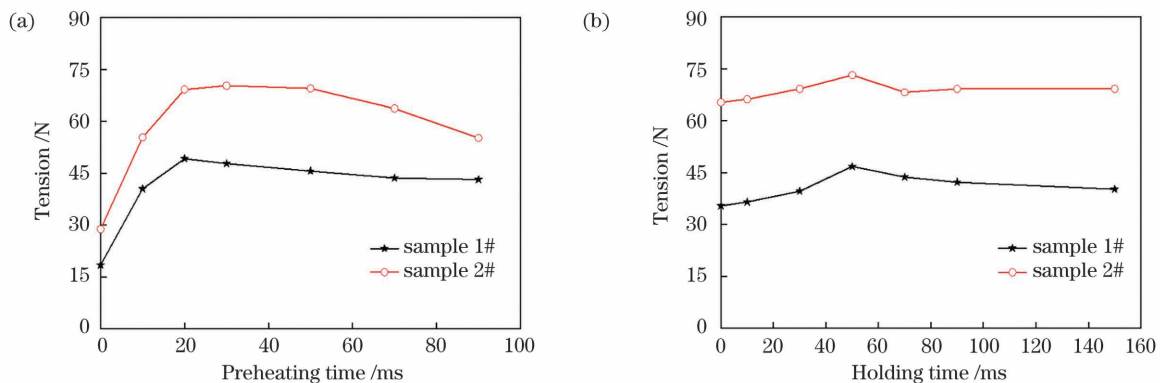


图 3 焊接拉力与蓝光预热、保温时长的依赖性。(a) 焊接拉力与预热时长的依赖性; (b) 焊接拉力与保温时长的依赖性
Fig. 3 Dependence of welding tension on blue laser preheating and holding time. (a) Dependence of welding tension on preheating time; (b) dependence of welding tension on holding time

由图 3(a) 可以看出: 1# 样品的拉力从无蓝光时的 $18.4\ \text{N}$ 升至 $20\ \text{ms}$ 预热时长时的最高值 $49.2\ \text{N}$, 之后随着预热时长增加而缓慢下降, 之后一直保持在 $45\ \text{N}$ 左右; 2# 样品的拉力从无蓝光预热时的 $28.8\ \text{N}$ 升至 $30\ \text{ms}$ 预热时长时的最佳值 $70.2\ \text{N}$, 随着预热时长增加到 $70\ \text{ms}$, 拉力缓慢下降到 $63.7\ \text{N}$, 在预热时长达到 $90\ \text{ms}$ 时, 拉力下降到 $55.2\ \text{N}$ 。可以推测, 1# 样品在 $50\ \text{W}$ 蓝光预热 $20\ \text{ms}$ 时表面温度可升至最高并达到热平衡, 2# 样品在 $60\ \text{W}$ 蓝光预热约 $30\ \text{ms}$ 后可达到热平衡。另外, 过长的预热时间并不能增大焊接拉力, 反而会使拉力略有下降。

由图 3(b) 可以看出, 随着保温时间从 0 增加到约 $50\ \text{ms}$, 1# 样品的拉力从 $36.3\ \text{N}$ 增大至 $46.8\ \text{N}$, 2# 样品的拉力从 $64.4\ \text{N}$ 增大至 $73.2\ \text{N}$, 之后随着保温

3 实验结果及讨论

实验中相关的激光参数包括蓝光功率 P_B 、蓝光预热时间 T_1 、蓝光保温时间 T_2 、红外 MOPA 激光的平均功率 P_M 、焊接时间 T 、脉宽 t_M 、重复频率 F_M 、扫描速度 v_1 。焊接时间 T 由焊点螺旋线长度和扫描速度决定, 可以通过扫描软件直接记录并读出。

3.1 预热及保温

1# 样品和 2# 样品的上铜片厚度分别为 $0.1\ \text{mm}$ 和 $0.2\ \text{mm}$, 两种样品对应的激光参数也有所不同, 主要参数列于表 1。在焊接拉力对预热时长 T_1 的依赖性实验中, 1# 样品和 2# 样品的蓝光保温时长 T_2 分别为 $50\ \text{ms}$ 和 $70\ \text{ms}$; 在焊接拉力对保温时长 T_2 的依赖性实验中, 1# 样品和 2# 样品的蓝光预热时长 T_1 分别为 $50\ \text{ms}$ 和 $30\ \text{ms}$ 。实验测量结果如图 3 所示。

时间延长, 拉力略微下降并达到稳定。适当时长的保温对于熔池内气泡的充分排出是有利的, 因此可以增大焊接拉力; 但过长的预热时长或保温时长会导致焊点熔池内的晶粒变粗, 导致拉力略有下降。

焊接后, 测得 2# 样品和 1# 样品可承受的最大拉力分别为 $73.2\ \text{N}$ 和 $49.2\ \text{N}$, 其比值约为 1.49。对于焊点直径都为 $350\ \mu\text{m}$ 、下铜片熔深都约为 $100\ \mu\text{m}$ 的两个焊点, 很容易计算出 2# 样品和 1# 样品熔池边界的表面积分别约为 $0.378\ \text{mm}^2$ 和 $0.268\ \text{mm}^2$, 其比值约为 1.41。可见, 样品最大可承受的拉力与熔池边界的表面积近似呈线性关系。

3.2 辅助蓝激光功率和红外焊接光功率

在这项实验中进行了两组测量: 在恒定的 MOPA 激光焊接参数、设定的预热和保温时长下, 寻找最佳的

蓝光辅助焊接功率;在恒定的辅助蓝光参数以及 MOPA 激光脉宽、重复频率和扫描速度下,寻找最佳

的红外 MOPA 激光焊接功率。主要参数列于表 2。实验测量结果如图 4 所示。

表 2 焊接拉力与蓝光、红外 MOPA 激光功率依赖性实验采用的激光参数

Table 2 Laser parameters used in dependence experiment of welding tension on blue and infrared (IR) MOPA laser powers

Sample	T_1 /ms	T_2 /ms	T /ms	t_M /ns	F_M /kHz	v_1 /(mm·s ⁻¹)
1#	50	50	25	350	100	130
2#	30	70	30	350	100	100

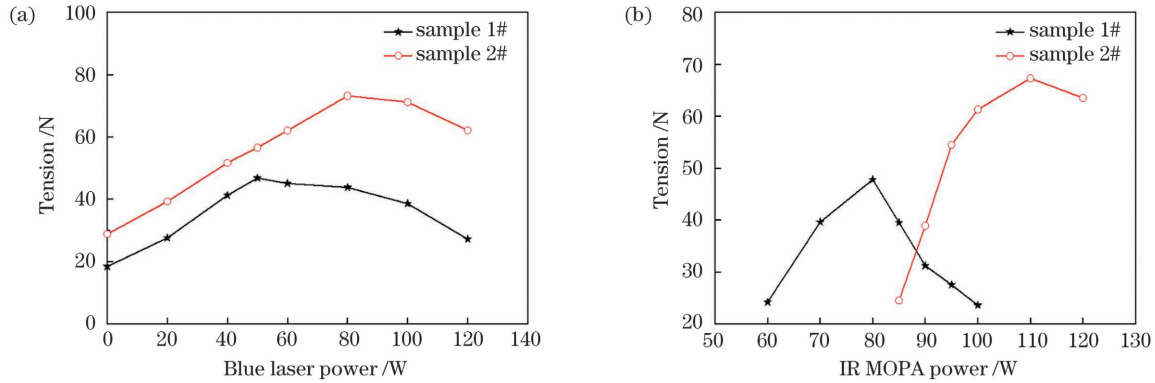


图 4 焊接拉力与蓝光功率、MOPA 激光功率的依赖性。(a)焊接拉力与蓝光功率的依赖性;(b)焊接拉力与 MOPA 激光功率的依赖性

Fig. 4 Dependence of welding tension on blue laser and MOPA laser powers. (a) Dependence of welding tension on blue laser power; (b) dependence of welding tension on MOPA laser power

寻找最佳蓝光辅助焊接功率时,1#样品和2#样品使用的 MOPA 焊接光功率分别为 80 W 和 100 W。由图 4(a)可以看出:随着辅助蓝光功率增大,焊接拉力迅速增加,1#样品和2#样品的焊接拉力在 50 W 和 80 W 的蓝光功率下分别达到最大值(46.8 N 和 73.2 N);进一步增大蓝光功率,焊接拉力减小。由于本组实验中的 MOPA 焊接光参数是定值,因此进一步增大辅助蓝光功率会导致焊接激光总功率进一步增加,发生过焊,从而导致焊接拉力降低。

46.8 N 和 67.3 N 的最佳值;进一步增大 MOPA 激光功率同样导致了过焊,焊接拉力减小。

寻找最佳 MOPA 焊接光功率时,1#样品和2#样品使用的蓝光功率分别为 50 W 和 60 W。由图 4(b)可以看出:随着红外 MOPA 焊接光功率增大,焊接拉力相应增加,1#样品和2#样品的焊接拉力在 80 W 和 110 W 红外 MOPA 焊接光功率下分别达到

实际上,辅助光功率和焊接光功率是相关联的,选择性价比合适的辅助光功率和预热时间,使铜片样品表面在辅助光的预热作用下接近熔融状态,可以更高效地使用红外焊接光。

3.3 蓝光辅助焊接和单纯 MOPA 焊接的拉力测试

为了比较蓝光辅助红外 MOPA 激光和单纯红外 MOPA 激光对纯铜片叠焊的质量,首先分析 MOPA 激光功率对焊接拉力的影响。本实验所用 MOPA 光纤激光器的最大输出功率只有 120 W,对比的样品为 2#样品,因此实验中红外 MOPA 激光焊接的螺旋线扫描速度降为 50 mm/s,焊接时长增加到 50 ms 左右。主要实验参数列于表 3,测试结果如图 5 所示。

表 3 单纯 MOPA 激光焊接与蓝光辅助 MOPA 激光焊接实验使用的激光参数

Table 3 Laser parameters used in only MOPA laser welding and blue-assisted MOPA laser welding experiments

Light source	P_B /W	T_1 /ms	T_2 /ms	T /ms	t_M /ns	F_M /kHz	v_1 /(mm·s ⁻¹)
MOPA				50	350	100	50
Blue+MOPA	30	30	70	50	350	100	50

由图 5 可以看出,在有无蓝光辅助的条件下,拉力随激光总功率变化的趋势都是一样的:随着焊接功率增大,焊接拉力逐渐增大,达到最大值后随着焊接功率的进一步增加而降低。相比较而言,它们有两点不同:1)蓝光辅助 MOPA 激光焊接样品的最大拉力为 76.5 N,而单纯 MOPA 激光焊接样品的最大

拉力为 58.6 N,显然蓝光辅助 MOPA 激光焊接样品具有更大的焊接强度;2)在最大拉力时,蓝光辅助 MOPA 激光焊接的总功率为 100 W(蓝光 30 W 和红外 70 W),而单纯 MOPA 激光焊接的总功率为 110 W,说明蓝光辅助 MOPA 激光焊接具有更高的激光使用效率。

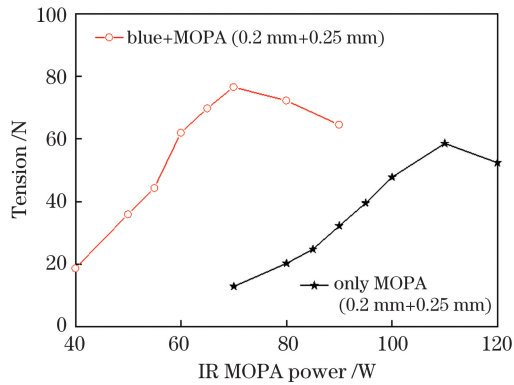


图 5 有无蓝光辅助时红外 MOPA 光纤激光焊接薄铜片的拉力对比

Fig. 5 Tension comparison of copper sheets welded by IR MOPA fiber laser with and without blue laser

3.4 蓝光辅助 MOPA 焊接和单纯 MOPA 焊接的表面质量对比

在单纯 MOPA 激光和蓝光辅助 MOPA 激光的铜片焊接对比实验中,本研究团队还测量了拉力最大时焊点的表面质量,结果如图 6 所示。图 6(a)为焊点表面照片,图 6(b)为焊点表面形貌测量结果。可以清晰地看出:1)单纯 MOPA 激光焊接时,焊点表面有明显的溅射颗粒,而蓝光辅助 MOPA 焊接时没有明显

的溅射颗粒;2)单纯 MOPA 焊接时,焊点表面的颗粒度明显,而蓝光辅助 MOPA 焊接时焊点表面的颗粒度不明显。可见,蓝光辅助 MOPA 焊接显著改善了飞溅情况和焊点的表面质量。

如前所述,室温下纯铜对光的吸收具有明显的波长依赖性,而且对 $1\ \mu\text{m}$ 波段光的吸收具有较强的温度依赖性。随着温度从室温升至纯铜的熔点,铜对光的吸收率从约 4% 线性增大到约 16%^[1-2],且随着温度升高继续线性增大。单纯的 110 W MOPA 激光焊接时,温度与吸收形成正反馈机制,导致温升速率越来越大,熔化后的纯铜迅速汽化并形成气压迅速增加的匙孔,发生明显的喷射,形成宏观孔洞和飞溅。在蓝光 450 nm 波段,铜的室温吸收可达到约 45%^[1-2],因此,在 30 W 蓝光预热下,焊接表面温度可达到近熔点,此时 70 W MOPA 激光的吸收率为 12%~16%,且随着温度升高增加的幅度相对较小,汽化和匙孔内气压的增大速度明显低于单纯 110 W MOPA 激光焊接时的情况,因此喷射和飞溅都明显减弱。适当的蓝光保温可使焊接熔池有较长的时间发生再流,得到相对平滑的表面。所以,通过蓝光预热和保温,可在提高激光使用效率的同时减少飞溅,焊点表面更加平滑。

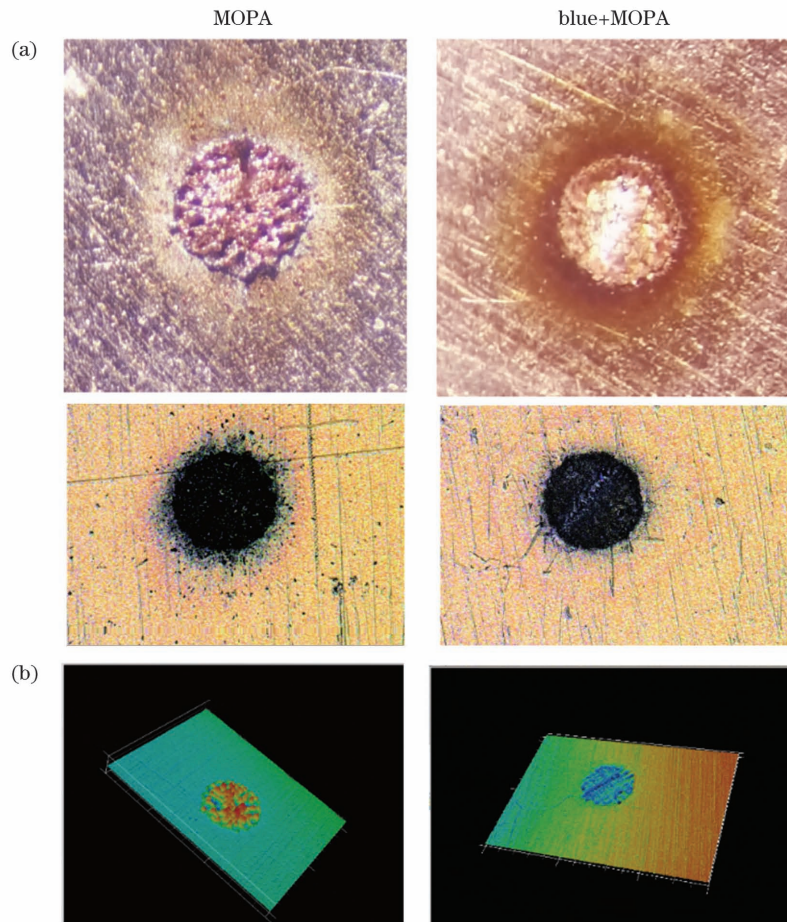


图 6 有无蓝光辅助时焊点的表面质量对比。(a)焊点表面照片;(b)焊点表面形貌测量结果

Fig. 6 Surface quality comparison of welding spots with and without blue laser assistance. (a) Photographs of welding spots surface; (b) measured surface topography of welding spots

3.5 蓝光辅助 MOPA 焊接和单纯 MOPA 焊接的熔池对比

为了进一步了解焊接质量,对焊点进行切片,观察熔池的内部情况。前文的对比实验已经得出蓝光辅助 MOPA 激光焊接的最大拉力出现在 30 W 蓝光辅助 70 W MOPA 激光条件下,因此,首先进行单纯 70 W MOPA 激光焊点的切片观察。由图 7(a)可知,单纯 70 W MOPA 激光只能实现焊点中心较少的、分立的齿状焊接熔池,且熔池内存在大量微孔,焊点表面也出现了比较明显的孔洞。对此种情况下的焊点进行拉力测试,结果表明此时的拉力只有 12.8 N。单纯 110 W MOPA 激光焊点的最大拉力为 58.6 N,其熔池切片

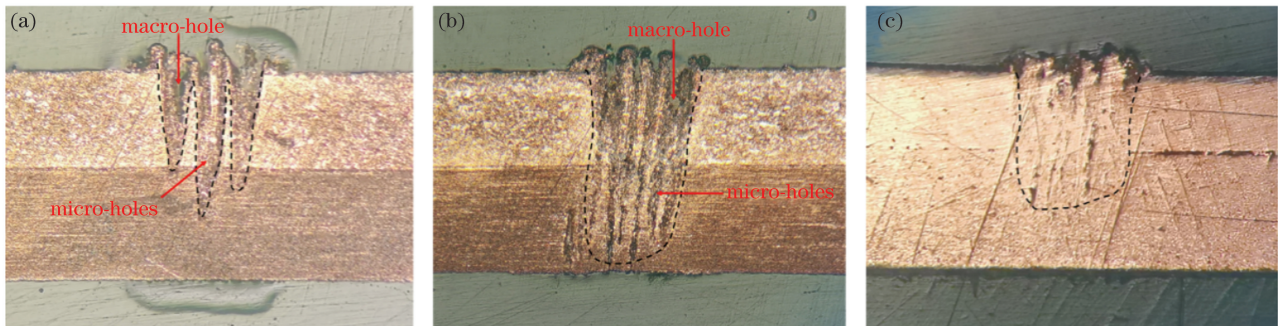


图 7 焊点熔池的剖面图。(a)单纯 70 W MOPA 激光焊接;(b)单纯 110 W MOPA 激光焊接;(c) 30 W 蓝光辅助 70 W MOPA 激光焊接

Fig. 7 Cross-sections of molten pools. (a) Only 70 W MOPA laser welding; (b) only 110 W MOPA laser welding; (c) 30 W blue laser-assisted 70 W MOPA laser welding

红外 MOPA 激光为高斯光束,具有中心强边沿弱的光强分布,因此,纯铜在初始吸收后温度也呈中心高边沿低的分布。吸收和温度的正反馈机制以及高斯分布导致 MOPA 光束螺旋轨迹上的熔池进一步窄化,形成分立而不连续的熔池;同时,110 W 单纯红外 MOPA 激光焊接时,越来越快的温升导致匙孔迅速向下蔓延,如图 7(b)所示。在蓝光辅助焊接中,由于蓝光的预热作用,纯铜对 MOPA 光的吸收率整体很高,而且高斯光束的边沿部位也可达到纯铜的熔化温度,因此,光束螺旋轨迹上的熔池很宽,形成了一个整体熔池。由于在蓝光预热情况下,纯铜对红外 MOPA 激光的吸收随着温度升高而增加的幅度相对不大,因此可以通过调节功率来控制熔池深度。在本实验中,MOPA 激光功率为 70 W 时可得到深度合适的熔池,如图 7(c)所示。

由于铜的大热导率,当红外光焊接结束后,液态熔池迅速冷却,熔池中的气体无法充分排出,因此,在单纯红外 MOPA 激光焊接中,熔池中除了存在喷射形成的宏观孔洞外,还存在大量微气孔。在蓝光辅助 MOPA 激光焊接中,熔池金属保持液态的时间得以延长,有助于气泡的排出以及液态金属向孔洞的回流。

图 8 显示了焊点熔池底部边沿部分微观组织的对比图,第一列图和第二列图分别是单纯 110 W 红外

如图 7(b)所示,总的熔池体积相比图 7(a)增大,且出现了较多锯齿状熔池,但熔池表面的宏观孔洞和内部的微观孔洞依然非常明显。

30 W 蓝光辅助 70 W MOPA 激光焊接的焊点熔池切片如图 7(c)所示,其与图 7(b)所示的单纯 MOPA 激光最佳焊接切片相比,有如下几点改善:1)熔池的锯齿状不明显,整个熔池有一体化趋势,这有助于增加有效熔接面积,增强焊接强度;2)内部孔洞显著减少,改善了焊点熔池质量;3)表面的宏观孔洞明显减少,优化了焊点的表面质量。蓝光辅助 MOPA 激光焊接焊点的拉力为 76.5 N,约为单纯 MOPA 激光焊接的 1.31 倍。综上所述,蓝光辅助焊接提升了熔池质量,增大了焊接强度。

MOPA 激光和 30 W 蓝光辅助 70 W 红外 MOPA 激光的螺旋扫描焊接熔池的显微组织(第一行为金相显微镜照片,第二行为扫描电镜照片)。可以看出:1)蓝光辅助 70 W 红外 MOPA 激光焊接时,扫描光束轨迹上熔池内部的孔洞相比单纯 110 W MOPA 激光焊接时明显小了很多;2)熔池中的晶粒和基材相比明显变得粗大。与单纯 110 W MOPA 激光焊接相比,30 W 蓝光辅助 70 W 红外 MOPA 激光焊接的熔池晶粒更大。

在有蓝光预热时使用了功率相对较小的 70 W 红外 MOPA 焊接光,相比于单纯 110 W 红外 MOPA 激光,其温升速度相对缓慢,匙孔中金属蒸气的气压相对较低,形成的匙孔也相对狭窄,最终留下的孔洞也小得多或被金属完全回填。由于温度的作用,熔池中的晶粒相较于基材会有所增大。在单纯红外 MOPA 激光焊接时,由于热保持时间短、散热速度快,所以熔池中的晶粒与基材中的相比增大程度较低。在蓝光辅助焊接中,不仅有预热过程还有保温过程,所以熔池具有相对较长的时间保持在较高的温度下,熔池部分区域的晶粒因此获得了相对较长的生长时间,其尺寸有更大程度的增大^[25]。

综上所述,与单纯的红外 MOPA 焊接相比,蓝光辅助红外 MOPA 焊接熔池的质量更高,深度较均匀,内部微孔与表面孔洞都大大减少,焊点的机械强度得到提升。

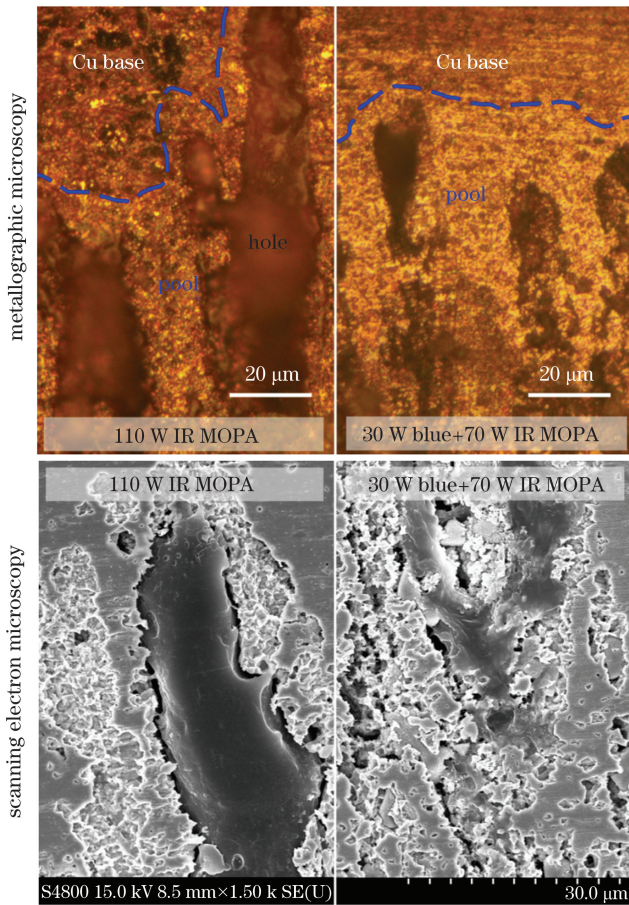


图 8 焊点熔池底部边沿部分的金相显微镜照片和扫描电镜照片

Fig. 8 Metallographic microscopy and scanning electron microscopy pictures of bottom edge of molten pools

4 结 论

本课题组采用蓝光以预热和保温的方式辅助红外 MOPA 光纤激光实现纯铜薄片的焊接,与单纯的红外 MOPA 光纤激光焊接相比,焊接质量明显改善:焊点的焊接强度提升,焊点表面无飞溅且无明显孔洞,表面颗粒度得到明显改善(这得益于蓝光的有效预热);多锯齿熔池趋于融合,熔池内部的大量微孔得以消除(这归因于蓝光的保温排气作用)。总之,蓝光辅助 MOPA 红外激光焊接明显改善了焊点的表面形貌、拉力大小、飞溅以及孔洞。

参 考 文 献

- [1] Mattern M, Weigel T, Ostendorf A. Temporal temperature evolution in laser micro-spot welding of copper considering temperature-dependent material parameters [J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(6): 066545.
- [2] Rüttimann C, Dürr U, Moalem A. Reliable laser micro-welding of copper [J/OL]. *ICALEO*, 2010: 95-100. <https://doi.org/10.2351/1.5062145>.
- [3] Franco D, Oliveira J P, Santos T G, et al. Analysis of copper sheets welded by fiber laser with beam oscillation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106563.
- [4] 陈靖雨, 王晓南, 吕凡, 等. 激光束摆动焊接低碳钢焊接接头的组织和力学性能 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0302006.
- [5] 李军兆, 刘一搏, 孙清洁, 等. 激光摆动模式对铝/钢焊接接头成形特征及组织、强度的影响 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0402010.
- [6] Li J Z, Liu Y B, Sun Q J, et al. Effects of laser beam wobble on weld formation characteristics, microstructure, and strength of aluminum alloy/steel joints [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0402010.
- [7] Helm J, Schulz A, Olowinsky A, et al. Laser welding of laser-structured copper connectors for battery applications and power electronics [J]. *Welding in the World*, 2020, 64(4): 611-622.
- [8] Kaierle S, Overmeyer L, Hoff C, et al. Conditioning of copper material surfaces increasing the efficiency of continuous wave laser microwelding [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016, 14: 66-70.
- [9] Chen H C, Bi G J, Nai M L S, et al. Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 216: 287-293.
- [10] Heider A, Stritt P, Hess A, et al. Process stabilization at welding copper by laser power modulation [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 81-87.
- [11] Reisgen U, Olschok S, Turner C. Welding of thick plate copper with laser beam welding under vacuum [J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022402.
- [12] Reisgen U, Olschok S, Jakobs S, et al. Sound welding of copper: laser beam welding in vacuum [J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 447-454.
- [13] Gabzdyl J, Capostagno D. Pulsed nanosecond fiber lasers can join dissimilar materials [J]. *Industrial Laser Solutions*, 2017, 32(1): 24-26.
- [14] Berndt M, Danner M, Treffers E. Dissimilar metal welding with advanced laser beam control [J]. *Industrial Laser Solutions*, 2020, 35(3): 13-15.
- [15] Nakashiba S I, Okamoto Y, Sakagawa T, et al. Micro-welding of copper plate by frequency doubled diode pumped pulsed Nd:YAG laser [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 577-584.
- [16] Alter L, Heider A, Bergmann J P. Investigations on copper welding using a frequency-doubled disk laser and high welding speeds [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 12-16.
- [17] Haubold M, Ganser A, Eder T, et al. Laser welding of copper using a high power disc laser at green wavelength [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 446-449.
- [18] 尚大智, 张健, 冯爱新, 等. 焊面结构化对铜/钢激光焊接接头组织及力学性能的影响 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0902004.
- [19] Shang D Z, Zhang J, Feng A X, et al. Effect of surface texturization on microstructure and mechanical properties of laser welded copper/steel joint [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0902004.
- [20] Wang H Z, Kawahito Y, Yoshida R, et al. Development of a high-power blue laser (445 nm) for material processing [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(12): 2251-2254.
- [21] Pelaprat J, Finuf M, Boese E, et al. High-power blue laser improves fabrication throughput [J]. *Industrial Laser Solutions*, 2018, 33(1): 17-19.
- [22] Britten S, Krause V. Project working towards blue high-power diode laser [J]. *Industrial Laser Solutions*, 2018, 33(6): 1-4.
- [23] 张健, 张津超, 张庆茂, 等. 双波长激光束同轴复合焊接系统设计及实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0602007.
- [24] Zhang J, Zhang J C, Zhang Q M, et al. Experimental study and design of dual-wavelength coaxial hybrid laser welding system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0602007.
- [25] Rüttimann C, Holtz R. Reliable laser welding of highly reflective materials [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8065: 80650X.
- [26] Ishige Y, Hashimoto H, Hayamizu N, et al. Blue laser-assisted kW-class CW NIR fiber laser system for high-quality copper

welding[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11668: 116680M.

[24] Fujio S, Sato Y, Hori E, et al. Effect of preheating on pure copper welding by hybrid laser system with blue laser and IR

laser[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11673: 116731D.

[25] Kou S. Welding metallurgy[M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2002: 199-209.

Blue Laser-Assisted Infrared MOPA Fiber Laser Spot Welding of Pure Copper Sheets

Wang Chenyang^{1,2}, Lin Qin¹, Lü Chao¹, Wang Fangwei¹, Lü Liu², Wang Feng^{1,3}, Yuan Xiao^{3*}

¹Lingyun Photoelectronic System Co., Ltd., Wuhan 430205, Hubei, China;

²School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

³School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract

Objective Due to the dependence of absorption on wavelength and temperature as well as the high thermal conductivity of copper, the laser welding of copper with a 1 μm infrared (IR) laser beam generally shows clear instability, splashes, and poor surface morphology. Thus, blue and green lasers were used to weld copper and excellent welding quality were obtained for the high absorption of copper in short wavelength. Currently, the cost of the red and green lasers is significantly high. Hence, considering the cost and welding quality, we employed an IR nanosecond MOPA fiber laser with a power and wavelength of 120 W and 1.07 μm , respectively, to weld the copper sheets using a fiber-coupled blue diode laser with a power and wavelength of 100 W and 450 nm, respectively. The function of the blue laser is to preheat the surface of the copper sample to increase the effective absorption of the IR laser and slow the cooling process to help the expulsion of bubbles. As expected, surface morphology and tensile force of welded copper sheets are improved, and almost no splashes and microholes can be observed inside the pool in the welding area.

Methods A dual-wavelength coaxial beam-welding system was designed. Two collimated beams from an IR MOPA fiber laser and a fiber-coupled blue diode laser were coaxially combined using a dichroic mirror, and further were focused on the workpiece using a galvanometer scanner and a dedispersive telecentric $f\text{-}\theta$ lens. The weld position on the workpiece was controlled by scanner 2. Another galvanometer scanner, scanner 1, was inserted between the collimator of the IR MOPA beam and the dichroic mirror to control the movement of the MOPA beam inside the blue spot to achieve different welding modes, such as swing and spiral. In the experiments related to the tensile test, each workpiece sample was welded to four spots in a square-like pattern with a 2 mm pitch. The diameter of each welding spot is about 350 μm . Copper sheets with a thickness of 100 and 200 μm were welded onto a copper sheet with a thickness of 250 μm , which were marked as samples 1# and 2#, respectively. The welding process is as follows. (1) Turn on the blue laser to start the preheating process. (2) After the preheating time (T_1), turn on the IR MOPA laser to start the welding process. The MOPA beam was scanned along a spiral line to form a 350 μm welding spot, which was then turned off. (3) Keep the blue laser on a warm-holding time, T_2 , to maintain the molten pool at a relatively high temperature, and cool it down naturally further. The preheating and warm-holding time dependencies and the blue and IR laser power dependencies of the joint tension were measured. The IR power dependency of the joint tension with and without blue-assistant welding was also compared. Finally, the surface quality of the weld spots and the microstructure of the molten pools were observed, compared, and explained.

Results and Discussions The optimal preheat time, T_1 , is approximately 20 and 30 ms for samples 1# and 2# at the blue laser power of 50 and 60 W, respectively; the optimal warm-holding time, T_2 , for both samples 1# and 2# is 50 ms. A proper warm-holding time is essential for expelling bubbles from the molten pool, which increases tension. However, an excessive preheating or holding time will slightly decrease the welding tension due to the coarsening of grains in the molten pool. A 30 W blue laser-assisted 70 W IR MOPA laser welding process achieves the best tensile force (76.5 N), whereas a 110 W MOPA laser welding process achieves a tensile force of only 58.6 N. The blue-assisted MOPA laser welding shows higher welding strength and laser efficiency than the only IR MOPA laser welding. Moreover, the blue-assisted welding significantly improved the splash and surface quality (Fig. 6). From the observation of the cross-section of the blue-assistant welding molten pool using metallographic and scanning electron microscopy (Figs. 7 and 8), we can obtain the following results: (1) the zigzag shape of the molten pool of the blue-assisted welding is not obvious; (2) the internal holes of molten pool are significantly reduced; and (3) the grains in the molten pool are slightly coarsened.

Conclusions The blue laser assists the IR MOPA fiber laser to weld pure copper sheets through the preheating and warm-holding processes. The welding quality is significantly improved compared with the only IR MOPA fiber-laser welding. The welding strength is increased to 1.31 times. There are no splashes and obvious surface voids on the weld spot surface, and the surface granularity is considerably improved, which benefits from the effective preheating using blue light. The multi-sawtooth molten pools tend to fuse, and the widespread and numerous micropores in the interior are eliminated, which is attributed to the exhaust effect during the warm-holding process using the blue light. The blue laser-assisted IR MOPA laser welding can significantly improve the welding quality of copper sheets.

Key words laser technology; pure copper sheets; laser spot welding; blue laser; MOPA fiber laser; dual-wavelength