

可调环模激光焊接飞溅抑制机理及工艺优化研究

董金枋^{1,2}, 杨方毅^{1,2}, 吴颀^{1,2,3*}, 李小婷^{4**}, 曾达^{1,2}, 黄宏星^{1,2}, 吴浩⁵, 张鹏⁴, 姜良银⁶, 张培磊^{1,2}¹上海工程技术大学材料与科学工程学院, 上海 201620;²上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620;³上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 201620;⁴深圳市大族锂电智能装备有限公司, 广东 深圳 518000;⁵湖北亿纬动力有限公司, 湖北 荆门 448000;⁶阿帕奇(北京)光纤激光技术有限公司上海分公司, 上海 201620

摘要 选用铝合金顶盖满焊为研究对象, 定量分析了芯环功率比对熔深、熔宽的影响规律。结合熔池匙孔动态行为, 阐述了可调环模激光有效抑制金属飞溅的机理。同时采用光学相干断层扫描测量技术, 实时测量了匙孔深度的波动, 定量评价了焊接稳定性, 并获得了最佳工艺窗口。结果表明, 在 150 mm/s 的焊接速度下, 当芯环功率比为 1:2~1:3 时, 匙孔深度最稳定, 且飞溅率最低。研究结果为进一步提高铝合金可调环模激光焊接质量提供了理论指导和实验依据。

关键词 激光技术; 激光焊接; 铝合金; 可调环模激光; 熔深检测; 飞溅机理; 光学相干断层扫描

中图分类号 TG457.14

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231055

1 引言

动力电池系统是电动汽车的灵魂, 为汽车提供能量, 驱动其高效地运行。该系统由不同材料的复杂组件构成, 每一个组件接头都直接影响整个电池系统的质量和效率^[1]。激光焊接具有非接触性、高能量密度、热输入可精确控制和易于自动化等一系列优点^[2-3], 因此在极耳^[4-5]、正负极^[6-8]、汇流排^[9]、模组^[10-11]等动力电池制造环节中得到了广泛应用。然而, 传统单模高斯激光由于能量过于集中, 在形成大深宽比的焊缝时, 匙孔内部始终处于极度不稳定的状态, 容易发生匙孔坍塌闭合, 从而出现金属飞溅缺陷, 最终影响动力电池产品质量和生产良率^[12-15]。因此, 确保熔池匙孔稳定性和抑制飞溅是实现动力电池高效激光焊接的关键。

国内外诸多学者为了实现低飞溅激光焊接开展了大量相关研究。邢孟琪等^[16]在激光焊接过程中, 将传统的直吹保护气形式改为侧吹保护气形式, 通过高速摄影对匙孔、熔池以及金属蒸气的行为进行研究, 结果表明, 侧吹保护气可以明显打开匙孔并维持匙孔稳定性, 熔池面积扩大, 焊接过程中的飞溅现象明显减少。Mei 等^[17]在铜合金激光摆动焊接过程中对“O”、“8”、

“∞”形轨迹进行了对比研究, 发现在“O”形扫描轨迹下, 接头处的金属飞溅现象的抑制效果最好。丁浩等^[18]研究了交变磁场对焊缝成形及气孔、飞溅等缺陷的影响, 结果表明, 磁场搅拌能改善焊缝的形貌, 减少焊缝中的气孔、飞溅等缺陷。

在新型光源方面, 同样有学者对动力电池低飞溅焊接工艺进行了相关研究。赵艳秋等^[19]对不同激光功率下光纤-半导体复合焊接过程中的匙孔的动态特性进行了研究, 与高斯激光焊接相比, 光纤-半导体激光复合焊接会产生更大的熔池和等离子体羽流、更深的小孔深度以及更光滑的小孔后壁, 有效抑制了匙孔开口的闭合和熔池的膨胀, 降低了焊接过程中的飞溅发生率。Yang 等^[20]通过对 450 nm 蓝光激光器和 1060 nm 光纤激光器进行外光路复合, 提高了焊接过程中的激光能量吸收率, 降低了工件对激光吸收率的影响, 结果表明, 红蓝复合焊接中材料对激光的吸收率较单光纤激光焊接提高了 20%, 且焊接过程更加稳定, 在一定程度上降低了飞溅概率。Kaufmann 等^[7]利用绿色激光器对铝铜异种金属进行了不同搭接形式的焊接并研究了焊缝性能, 结果显示, 在铜铝材料深熔焊接时, 同样功率下的绿光比红光可以实现更大的熔深, 热量在材料内部传导扩散的范围缩小, 焊接过程更

收稿日期: 2023-07-25; 修回日期: 2023-08-10; 录用日期: 2023-08-21; 网络首发日期: 2023-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(52075317)、中国博士后科学基金(2022T150400)、上海市 III 类高峰学科—材料科学与工程(高能束智能加工与绿色制造)

通信作者: *wudi@sues.edu.cn; **lixt112247@hanslaser.com

稳定。

可调环模 (ARM) 激光作为一种新型的激光复合热源模式, 同轴集成了内外两束近红外波段激光, 其中外部为低功率密度的环形激光, 内部为高功率密度的圆形高斯激光 (中心激光), 外环激光主要起到预热工件、扩大匙孔开口的作用, 内环激光主要影响熔深。同时可调环模激光器可独立且动态地控制中心光束和环形光束的大小和功率, 得到更高质量的焊缝, 因此在动力电池激光制造领域有巨大的应用潜力^[21]。

2020 年, Punzel 等^[22]研究了可调环模激光的芯环功率分布对熔深、熔宽和气孔率等焊缝性能的影响, 发现当芯环激光功率比为 3:1 时, ARM 激光可将焊缝孔隙率降低至 8% 左右。Jabar 等^[23]研究了芯环激光功率比对铝钢搭接焊的影响, 结果显示, 当内外环功率比为 1:5 时, 焊缝的有效连接面积最大, 同时搭接焊缝的剪切力也达到峰值。Maina 等^[24]研究发现, 当中心激光功率相同时, 相比纯高斯激光焊接, ARM 激光焊接能获得更大的焊接熔深, 焊缝呈良好的梯度分布, 粗糙度更低。Li 等^[25]定量研究了铝合金 ARM 激光焊接过程中孔隙率的改善方法, 证明了在芯环功率比从 10:0 调整到 5:5 的过程中, 孔隙率首先显著降低 (从 7.45% 降至 4.6%), 最后保持在较低水平 (1.73%~2.58%), 焊接熔深近似保持不变。张明军等^[26]利用镁合金研究了中心激光束和环形激光束功率组合对焊缝宏观成形、显微组织和力学性能的影响规律, 结果表明, 当芯环功率比大于 1 时, 环形激光功率对熔宽的影响较大, 当芯环功率比小于 1 时, 焊缝上下表面的成形均不稳定, 虽

然环形激光能够抑制中心激光的热影响区大小, 但会导致焊缝中心区域的硬度值降低。

综上所述, 目前关于 ARM 激光焊接技术的研究主要聚焦于焊缝成形、气孔和连接强度等焊接质量指标, 且以低速焊接 (<100 mm/s) 为主, 缺乏动力电池领域铝合金高速焊接 (>100 mm/s) 工艺优化和飞溅抑制机理的系统研究。因此, 本文以 1060 和 3003 铝合金为研究对象, 搭建了基于高速视觉传感和光学相干断层扫描技术 (OCT) 的同步监测平台, 研究了内外环激光功率对焊缝熔深、熔宽的影响规律。进一步结合熔池匙孔视觉图像和 OCT 测量深度, 系统阐述了 ARM 激光焊接技术抑制飞溅的机理, 最终为工艺参数优化提供了理论指导和实验依据。

2 实验材料与方法

2.1 实验方法和设备

图 1 为铝合金可调环模激光焊接系统示意图, 激光器选用可调环模激光器, 内外环芯径分别为 $100\ \mu\text{m}$ 和 $300\ \mu\text{m}$, 搭配高功率准直聚焦焊接头, 准直焦距为 $150\ \text{mm}$, 聚焦焦距为 $250\ \text{mm}$ 。在工艺平台上, 搭建了具有高速视觉传感和熔深检测功能的同步传感监测平台。该平台采用高速相机对熔池匙孔视觉图像进行采集, 采样频率为 $8000\ \text{frame/s}$, 加上 $808\ \text{nm}$ 辅助激光光源, 可获得清晰的熔池匙孔图像。搭配了基于 OCT 传感的监测模块 (最高采集频率为 $250\ \text{kHz}$) 和 OmniWELD 在线监测软件, 可实时获得焊接过程中的匙孔深度信息。

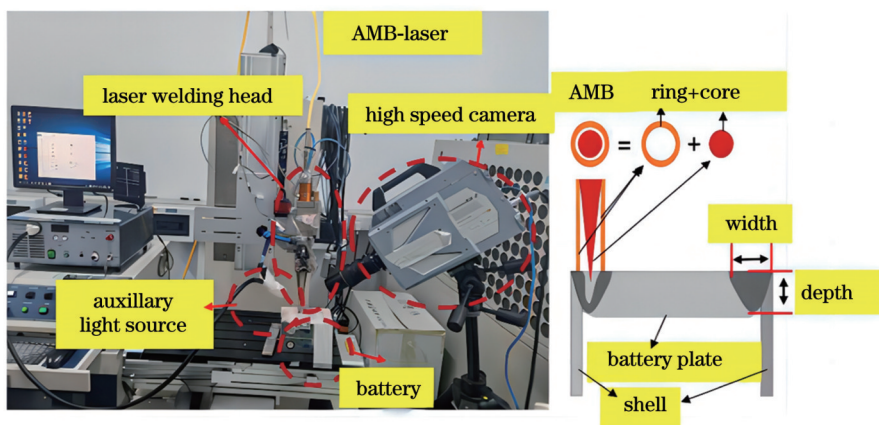


图 1 ARM 激光焊接系统及高速摄影平台

Fig. 1 ARM laser welding system and high-speed photography platform

电池盖板一般采用对缝焊接, 激光直接作用于拼接位置, ARM 激光的外环激光熔化材料, 中心激光打出匙孔, 然后对金相熔深、熔宽进行工艺质量评估, 如图 1 所示, 通过光学显微镜进行观测, 记录参数。

2.2 实验材料和工艺设计

实验选用动力电池铝合金盖板与壳体组件为研究对象, 其中壳体为 3003 系铝合金, 厚度为 $0.6\ \text{mm}$,

盖板为 1060 系铝合金, 厚度为 $2.5\ \text{mm}$, 顶盖和壳体的焊接形式为对接, 将盖板向下按入壳体, 最终盖板被壳体夹住。然后利用夹具进行固定, 壳体和盖板紧密贴合。接着采用激光进行预点焊固定, 防止焊接过程中工件受热变形, 同时确保焊缝间隙及台阶高度的一致性。

焊接前, 用丙酮清洗工件表面, 去除表面油污。

采用同轴吹气形式,选择氩气作为保护气体,流量设置为 25 L/min。焊接速度为 150 mm/s,离焦量为 0。表 1 为两种材料的化学成分,表 2 为实验工艺参数。

表 1 铝合金盖板和壳体的主要化学成分^[27]

Table 1 Main chemical compositions of aluminum alloy cover plate and shell^[27]

Material	Mass fraction / %						
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Mg
Al 3003	>96.7	0.60	0.70	0.13	1.30	0.10	-
Al 1060	99.60	0.25	0.35	0.05	0.03	0.05	0.03

表 2 实验工艺参数

Table 2 Experimental process parameters

Core power / W	Ring power / W	Defocusing amount / mm	Weld speed / (mm/s)	Argon flow / (L/min)
600	1200	0	150	25
600	1500	0	150	25
600	1800	0	150	25
800	1800	0	150	25
1000	1800	0	150	25
1200	600	0	150	25

2.3 焊缝截面结果分析

焊接实验后,用线切割方式对样品进行切割,对焊缝截面进行研磨、抛光和腐蚀处理,得到金相图。焊缝外观及对应金相如图 2 所示。

从图 2 可以观测到:随着外环功率的增加,焊缝粗糙度减小,熔宽增大;随着内环功率的增加,焊缝粗糙度增大,熔深增加。

利用光学显微镜测量金相,得到各个参数下的熔深、熔宽数据,通过数值计算进行响应曲面回归,得到对应的熔深、熔宽与内外环功率的等值线工艺窗

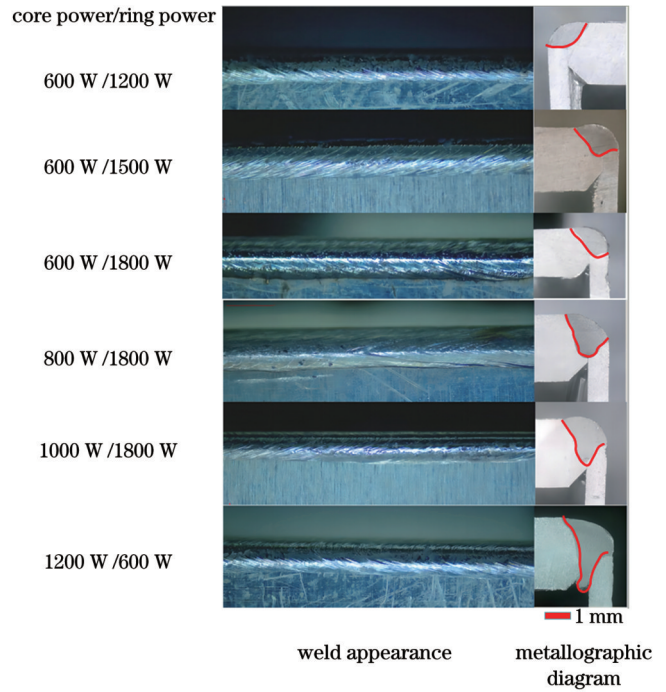


图 2 实验参数设计及焊缝外观金相图

Fig. 2 Design of experimental parameters and metallographic diagrams of weld appearance

口图。

动力电池工艺要求如下:熔深为 (1.1 ± 0.3) mm,熔宽为 (1.4 ± 0.3) mm。如图 3 所示,此时熔宽的工艺窗口为内环功率 600~1300 W,外环功率 800~1800 W。熔深的工艺窗口为内环功率 500~1150 W,外环 800~1800 W。从熔深、熔宽工艺窗口可以看出:在 ARM 激光焊接过程中,熔深受内环功率的影响较大,随着内环功率的增加而增加;熔宽主要受外环激光功率的影响,随着外环激光功率的增加而增加。通过工艺窗口可以看到,ARM 激光焊接因为内外环激光功率可独立调节,相比传统的高斯激光焊接,有更灵活的参数调试窗口,能最大程度兼容各种异常工况,满足各种焊接工艺要求。

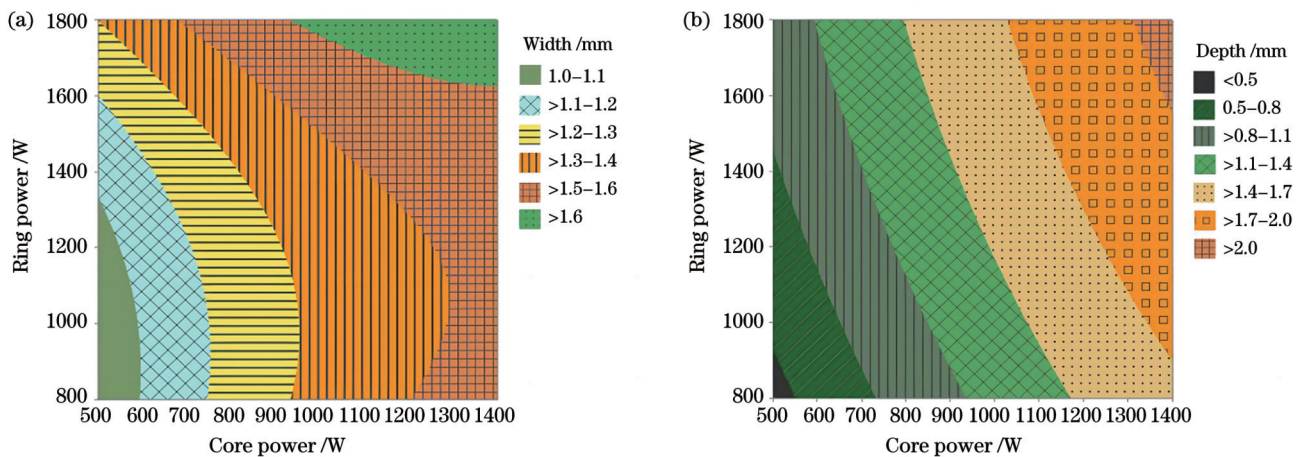


图 3 工艺窗口等值线图。(a)熔宽;(b)熔深

Fig. 3 Process window contour maps. (a) Weld width; (b) penetration

3 分析与讨论

3.1 飞溅产生机理分析

动力电池的焊接飞溅容易导致焊缝表面出现凹坑、炸点等缺陷,此时焊缝出现质量缺失,焊缝有效熔深减小,直接影响动力电池顶盖满焊的焊缝强度、气密性。飞溅是对动力电池影响最大的焊接缺陷。

图 4 所示为飞溅引起的凹坑、炸点缺陷,放大之后可以清晰看到尚未脱离凹坑的飞溅液滴凝固在凹坑边缘。飞溅导致的凹坑缺陷往往会使焊缝表面质量丢

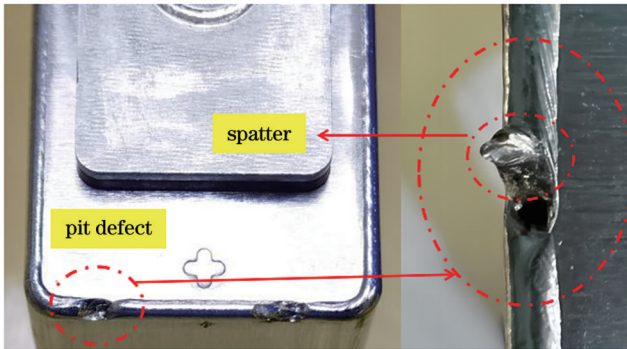


图 4 激光焊接飞溅引起的凹坑缺陷

Fig. 4 Pit defect caused by laser welding spatter

失,甚至出现贯穿工件表面的穿孔缺陷,导致产品报废,所以研究飞溅的发生机理至关重要。基于机理进行工艺优化,进而抑制飞溅。

高速摄影下激光焊接过程中飞溅的形成过程如图 5 所示:首先激光作用于材料表面,引发金属熔化、蒸发,金属蒸气在向上挥发的过程中,给熔池一个向下的反冲压力,形成匙孔,如图 5(a)所示;在焊接方向上,反冲压力主要作用于前壁,使得前壁的液态金属高速运动,液态金属绕过匙孔,不停地冲击后壁,引起后部熔池振荡,导致匙孔后壁熔池出现褶皱、凸起,如图 5(b)所示;当液态金属凸起并盖住匙孔时,激光直接作用于坍塌的液态金属,由于此时坍塌熔池距离焦点位置更近,光斑更小,激光能量密度更高,激光很快击穿上层液态金属,形成新的匙孔,如图 5(c)、(d)所示;此时内部的高压金属蒸气会直接作用于坍塌的液态金属表面,匙孔下方的高压金属蒸气从新形成的更小的匙孔开口中高速喷涌而出,给坍塌的液态金属更大的向上的垂直剪切力,如图 5(e)所示;匙孔中的高压混合气体使得金属液滴克服熔池表面的张力和重力,飞出熔池,形成飞溅,同时在焊缝表面形成凹坑,如图 5(f)所示。整个过程即为飞溅的形成过程。

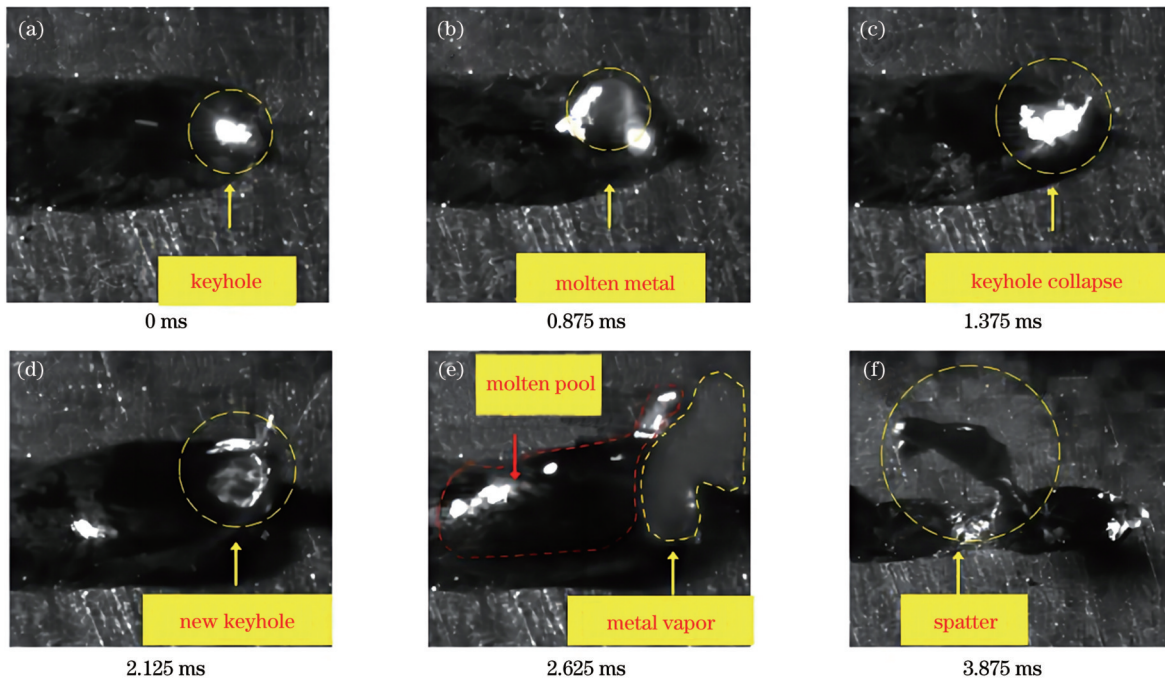


图 5 高速摄影下飞溅缺陷的形成过程

Fig. 5 Formation process of spatter defects under high-speed photography

通过高速摄影观察飞溅形成过程,可以发现,匙孔坍塌是导致飞溅发生的关键因素,由于匙孔坍塌的频率和匙孔深度的波动相关,且发生匙孔坍塌时匙孔的深度会急剧减小,故可以通过实时测量匙孔深度的波动来判断匙孔的稳定性,进而优化 ARM 激光焊接工艺参数。

3.2 基于 OCT 的工艺优化

本实验结合熔深实时检测设备对匙孔深度进行监测。激光熔深检测(LDD)模块包括超辐射发光二极管(SLD)、光纤耦合器、参考臂、样品臂和光谱仪等部分,其中参考臂主要由偏振控制器、光纤准直器、色散补偿片、反射镜等构成,而样品臂通过光纤准直器与激

光焊接光路发生同轴耦合,样品检测光与加工激光中心同轴对准,便于在焊接过程中进入小孔底部对匙孔深度进行测量。

图 6 显示了 LDD 模块内部结构和测量原理。LDD 系统的具体原理如下:SLD 发出的宽谱光源经过光纤耦合器后分束,一束进入参考臂,经反射镜反射后原路返回,另一束进入样品臂,经光纤准直器准直后进入焊接头,经过焊接头合束镜后与加工激光合束;两束光经过焊接头聚焦镜后,同时聚焦到工件表面;加工激光在工件上打出匙孔,而样品光进入匙孔底部发生散

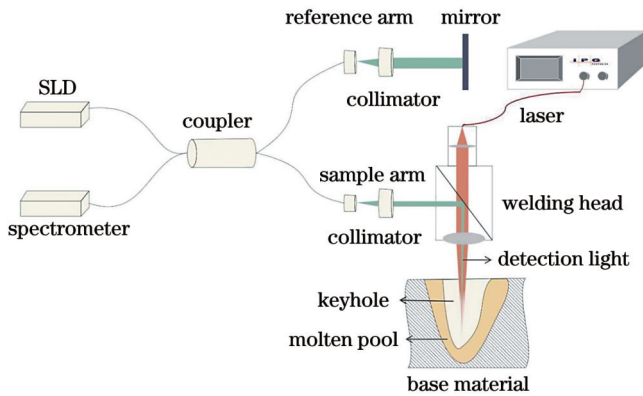


图 6 LDD 原理图
Fig. 6 Schematic of LDD

射,然后原路返回。经过样品臂和参考臂后返回的光在光纤耦合器中发生干涉,光谱仪线阵相机拍摄得到原始光谱的干涉条纹图像,通过对该图像进行傅里叶变换,即可得到样品臂相对参考臂的深度信息,即匙孔的深度信息。

LDD 模块实时检测结果如图 7 所示。对比实验过程中飞溅发生的位置与 LDD 模块采集的匙孔深度信号,发现当匙孔坍塌引起飞溅缺陷时,匙孔深度变化的过程如下:首先是正常的匙孔熔深,此时检测光打在匙孔底部,测量出来的正常熔深在 1.4 mm 附近;然后匙孔深度开始不稳定波动,熔深降到 0.8 mm 左右,之后发生匙孔坍塌,液态金属覆盖匙孔上方的开口,挡住入射光路,此时检测光由于无法穿透液态金属,直接作用于坍塌的液态金属,实时检测结果显示,熔深骤降到 0.5 mm 左右;紧接着激光作用在坍塌的匙孔上方的液态金属上,液态金属吸收激光能量剧烈蒸发,激光穿透坍塌的液态金属,再次出现正常状态的匙孔,LDD 模块的检测结果恢复为正常熔深(0.8~1.4 mm),到此一个匙孔坍塌导致飞溅形成的周期结束。在匙孔坍塌过程中通常有飞溅的发生,这个过程与通过高速摄影观察到的飞溅形成过程(图 5)相符,验证了匙孔坍塌导致飞溅产生的机理。

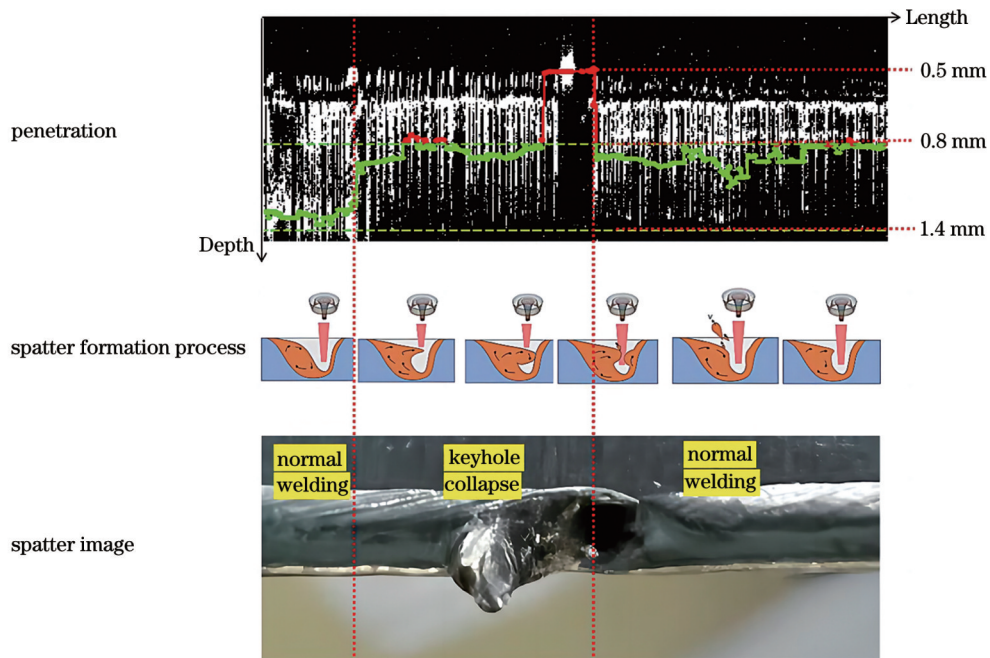


图 7 OCT 观测下飞溅形成过程示意图
Fig. 7 Schematics of formation process of spatter under OCT observation

对比纯中心高斯激光(1200 W)和 ARM 激光(800 W/1800 W)焊接过程中 LDD 模块采集的匙孔点云图(图 8),可知 ARM 激光能够在一定程度上抑制飞溅的发生。图 8(a)所示为纯中心高斯激光和 ARM 激光作用下的匙孔开口点云图,可以明显看到 ARM 激光作用下匙孔开口面积是纯中心高斯激光的 4 倍,

图 8(c)高速摄影图也说明了这点。图 8(b)所示为两种激光作用下匙孔内部的 3D 点云图,可以看出高斯激光作用下的匙孔呈细长形,ARM 激光作用下的匙孔呈上宽下窄的“Y”形。图 8(d)所示的金相图也证实了二者的区别,匙孔内部越大,匙孔开口越大,匙孔坍塌概率越低,焊接过程也就越稳定。

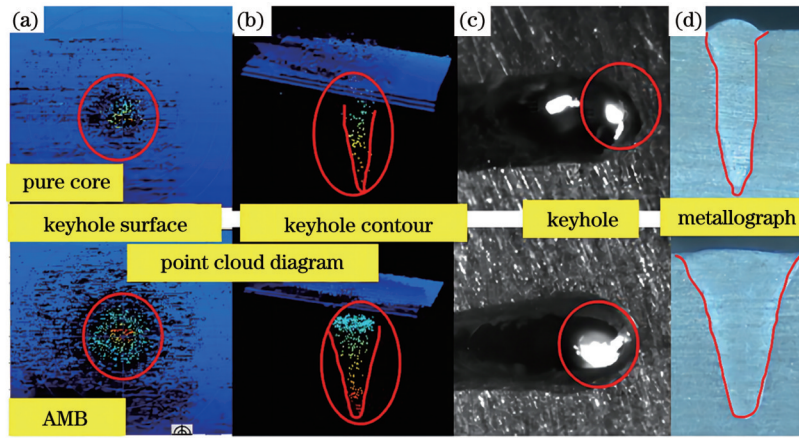


图8 纯中心高斯激光与 ARM 激光焊接过程中的匙孔图。(a)匙孔开口形状点云图;(b)匙孔内部点云图;(c)匙孔;(d)金相图
Fig. 8 Keyhole images in pure center Gaussian laser welding process and ARM laser welding process. (a) Point cloud images of keyhole opening shape; (b) keyhole internal point cloud images; (c) keyhole; (d) metallographic images

外环激光作用于匙孔周围的熔池,当激光能量密度超过金属蒸发的能量阈值时,液态金属剧烈蒸发,金属蒸气在匙孔周围给熔池一个向下的反冲压力,使得匙孔开口扩大,同时也抑制了匙孔周围熔池的波动,降低了匙孔坍塌的概率,进而避免了匙孔内部高压金属蒸气向匙孔上方喷射形成的剪切力与坍塌熔池直接接触,抑制了飞溅的产生。

ARM 激光虽然能在一定程度上抑制飞溅,但基于正交实验通过金相数据确定工艺窗口的传统方法缺乏针对匙孔稳定性的考量,考虑到匙孔坍塌主要是由匙孔的剧烈波动导致的,而匙孔的波动必然导致匙孔内部深度的变化,因此采用 LDD 模块,基于 OCT 检测手

段对匙孔内部深度进行实时检测,并对匙孔的波动进行量化,以此来评价匙孔的稳定性,进一步优化 ARM 激光焊接工艺窗口。

当满足同样的工艺要求时,不同内外环激光功率搭配下匙孔内部的深度波动具有明显的差异。匙孔深度的波动振幅和频率越大,则匙孔越不稳定。图 9 所示为不同内外环激光功率搭配下匙孔深度的曲线图,可以看出:与内外环激光功率为 1000 W/1000 W 的工艺参数相比,当内外环激光功率为 650 W/1950 W 时,焊接过程的稳定性明显较高;相较于内外环激光功率大于 1,内外环激光功率比小于 1 时焊接过程明显更稳定。匙孔深度波动越剧烈,匙孔内部越不稳定,越容易

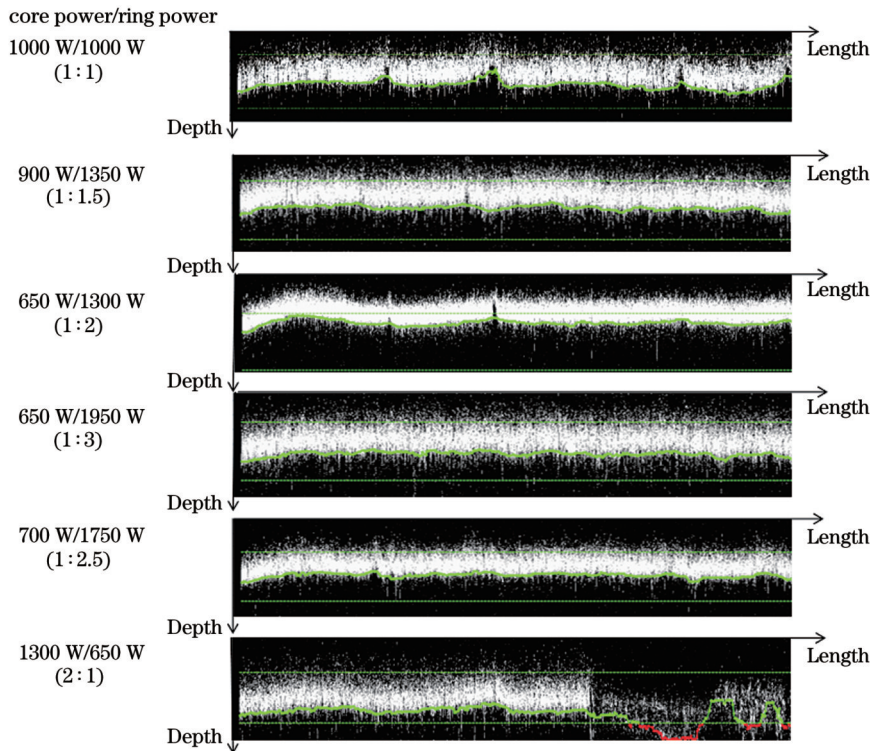


图9 不同内外环激光功率比下匙孔深度的曲线图

Fig. 9 Curves of keyhole depth under different power ratios of inner ring laser to outer ring laser

发生匙孔坍塌,进而气孔、外观不良等缺陷越多。由此可见,LDD在激光焊接稳定性评估、监测、工艺优化方面有很大的应用潜力。

通过功率正交实验得到不同内外环激光功率配比下的匙孔深度数据,利用匙孔深度的标准差评价该工艺参数下激光焊接过程的稳定性。在不同的参数下进行熔深监测,并计算各个参数下熔深的波动性,通过标准差的大小评估熔深波动程度,标准差越大,波动越剧烈,说明该工艺参数下的激光焊接过程极不稳定。进一步对不同内外环激光功率配比下的匙孔深度标准差进行响应曲面分析,得到最佳的稳定性工艺窗口。

如图 10 所示,最佳工艺窗口为内环激光功率 600~1200 W,外环激光功率 1000~2000 W,考虑到工业应用窗口应留有一定余量,选择内外环激光功率窗口分别为 600~1000 W 和 1000~1600 W,在该窗口内,焊接过程中的匙孔波动最为平缓,飞溅缺陷发生概率最低。同时,在满足最佳熔深工艺要求的情况下,较小的内环激光功率和较大的外环激光功率搭配更有利于匙孔稳定。ARM 激光焊接过程中的总功率存在上限,当总功率超过 2800 W 时,匙孔的稳定性开始降低,匙孔深度的波动加剧,焊接过程中缺陷的发生概率增加。另外,大于 1 的内外环激光功率比会导致匙孔的不稳定波动,所以在 ARM 激光焊接铝合金过程中须确保外环激光功率大于内环激光功率,这样才能在扩大匙孔开口的同时实现飞溅抑制的效果。结合匙孔波动标准差可知,当内环激光功率较低时,匙孔的稳定性主要受外环激光功率的影响,外环激光功率越大,匙孔越稳定。当内外环激光功率比为 1:2~1:3 时,在熔深熔宽工艺窗口范围内,匙孔最为稳定。

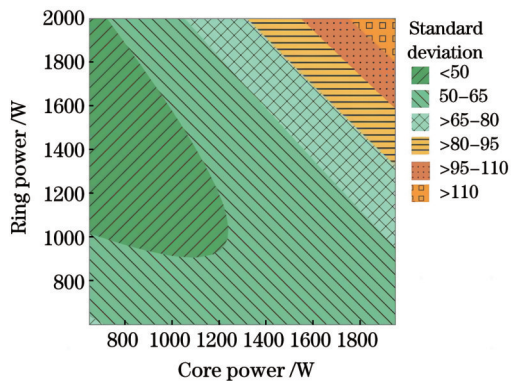


图 10 基于匙孔深度波动标准差的工艺窗口图

Fig. 10 Process window diagram based on standard deviation of keyhole depth fluctuation

4 结 论

对 ARM 激光高速(150 mm/s)焊接中的飞溅形成进行了机理分析,阐述了飞溅形成过程以及抑制方法。利用 OCT 对匙孔深度信息进行采集,并定性评估了焊接过程的稳定性,实现了 ARM 激光焊接工艺的优化。

主要结论如下:

1) 利用 ARM 激光对动力电池盖板进行了控制变量实验,得到顶盖焊接工艺窗口。当焊接速度为 150 mm/s、离焦量为 0 时,500~1150 W 内环激光功率和 800~2000 W 外环激光功率皆可满足熔深熔宽的工艺要求。熔深主要受内环激光的影响,熔宽主要由外环激光控制。相比纯光纤激光焊接,ARM 激光焊接拓宽了铝合金激光焊接工艺窗口,提高了焊接过程中匙孔的稳定性,同时也提高了对设备和其他异常工况的兼容能力。

2) 激光焊接飞溅机理研究表明,飞溅主要是由匙孔坍塌导致的,可以从两方面抑制飞溅。首先是利用外环激光扩大匙孔开口,避免匙孔内部的混合高压气体直接作用于匙孔开口周围的熔池。其次是通过合理的内外环激光功率搭配扩大熔池,减少熔池波动导致的匙孔坍塌现象,降低飞溅发生的概率。

3) 结合 LDD 对焊接过程进行了实时监测,验证了飞溅主要是由匙孔坍塌导致的。利用匙孔深度波动标准差进一步优化了激光焊接工艺,结合传统工艺窗口和匙孔波动稳定性分析,得到最终工艺窗口为内环激光功率 800~1000 W,外环激光功率 1200~1600 W。同时得出在 150 mm/s 的焊接速度下,焊接铝合金的最佳内外环激光功率比为 1:2~1:3,此时匙孔最为稳定,缺陷发生概率最小。

参 考 文 献

- [1] Sadeghian A, Iqbal N. A review on dissimilar laser welding of steel-copper, steel-aluminum, aluminum-copper, and steel-nickel for electric vehicle battery manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 146: 107595.
- [2] 李敏, 荣佑民, 王璐, 等. 超高强度 1700MS 激光焊接头微观组织与力学性能[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 1714004. Li M, Rong Y M, Wang L, et al. Study on microstructure and mechanical properties of laser welded joints for ultra-high-strength steel 1700MS[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1714004.
- [3] 黄嘉森, 蔡创, 刘致杰, 等. Inconel690 镍基合金/SUS304 不锈钢激光焊接接头组织与力学性能[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1014001. Huang J S, Cai C, Liu Z J, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded Inconel690 nickel-based alloy/SUS304 stainless steel joints[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 1014001.
- [4] Shin J H, Noh H C, Park G D. Effect of spiral welding path and laser power on weld in laser welding of aluminum tab for lithium-ion battery[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(3/4): 1317-1327.
- [5] Nothdurft S, Seffer O, Hermsdorf J, et al. Investigations on laser beam welding of thin foils of copper and aluminum regarding weld seam quality using different laser beam sources[J]. Journal of Laser Applications, 2022, 34(4): 042011.
- [6] Sadeghian A, Iqbal N. Blue laser welding of low thickness Ni-coated copper and mild steel for electric vehicle (EV) battery manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 155: 108415.
- [7] Kaufmann F, Strugulea M, Höltingen C, et al. Seam properties of overlap welding strategies from copper to aluminum using green laser radiation for battery tab connections in electric vehicles[J]. Materials, 2023, 16(3): 1069-1107.

- [8] Trinh L N, Lee D. The characteristics of laser welding of a thin aluminum tab and steel battery case for lithium-ion battery[J]. *Metals*, 2020, 10(6): 842-857.
- [9] Sun T Z, Franciosa P, Ceglarek D. Effect of focal position offset on joint integrity of AA1050 battery busbar assembly during remote laser welding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 2715-2726.
- [10] 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.
- [11] Yoon H S, Bang H S. The effect of wobbling on the welding characteristics in Al/Cu fiber laser welded joints[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(11): 5343-5352.
- [12] 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.
- [13] Zhang G L, Zhu B Q, Zou J L, et al. Correlation between the spatters and evaporation vapor on the front keyhole wall during fiber laser keyhole welding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 15143-15152.
- [14] Zou J L, Zhu B Q, Zhang G L, et al. Power density effect on the laser beam-induced eruption of spatters in fiber laser keyhole welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 147: 107651.
- [15] 蔡旺, 蒋平, 舒乐时, 等. 基于机器视觉的高功率激光焊接过程飞溅监测方法与飞溅特征研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(24): 2402103. Cai W, Jiang P, Shu L S, et al. Machine vision-based spatter monitoring method and spatter characterization for high power laser welding process[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(24): 2402103.
- [16] 邢孟琪, 李铸国, 孙军浩, 等. 细管径侧吹气体流量对光纤激光中厚板焊接的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0302012. Xing M Q, Li Z G, Sun J H, et al. Effect of small diameter side-blown gas flow on fiber laser welding of medium and heavy plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0302012.
- [17] Mei L F, Lin L, Yan D B, et al. Metal spattering in laser scanning welding of T2 copper and welding quality[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161: 107392.
- [18] 丁浩, 徐家乐, 谭文胜, 等. 磁场对激光焊接钢/铝异种金属焊缝性能的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0902003. Ding H, Xu J L, Tan W S, et al. Influence of magnetic field on properties of Fe/Al dissimilar metal laser welding joints[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902003.
- [19] 赵艳秋, 李响, 刘志强, 等. 激光功率对 2195 铝锂合金光纤-半导体激光复合焊接形貌与气孔的影响[J]. *焊接学报*, 2023, 44(1): 99-106, 134. Zhao Y Q, Li X, Liu Z Q, et al. Effect of laser power on the morphology and porosity for 2195 Al-Li alloy fabricated by fiber-diode laser hybrid welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(1): 99-106, 134.
- [20] Yang H, Tang X H, Hu C, et al. Study on laser welding of copper material by hybrid light source of blue diode laser and fiber laser[J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33(3): 032018.
- [21] Wang L, Gao X D, Kong F R. Keyhole dynamic status and spatter behavior during welding of stainless steel with adjustable-ring mode laser beam[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 74: 201-219.
- [22] Punzel E, Hugger F, Dinkelbach T, et al. Influence of power distribution on weld seam quality and geometry in laser beam welding of aluminum alloys[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 94: 601-604.
- [23] Jabar S, Baghbani Barenji A, Franciosa P, et al. Effects of the adjustable ring-mode laser on intermetallic formation and mechanical properties of steel to aluminium laser welded lap joints [J]. *Materials & Design*, 2023, 227: 111774.
- [24] Maina M R, Okamoto Y, Okada A, et al. High surface quality welding of aluminum using adjustable ring-mode fiber laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 180-188.
- [25] Li J M, Jiang P, Geng S N, et al. Numerical and experimental study on keyhole dynamics and pore formation mechanisms during adjustable-ring-mode laser welding of medium-thick aluminum alloy [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 214: 124443.
- [26] 张明军, 吴乐峰, 毛聪, 等. AZ31B 镁合金可调环形光斑光纤激光焊接试验研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(22): 2202002. Zhang M J, Wu L F, Mao C, et al. Experimental research on AZ31B magnesium alloy welded using fiber laser with adjustable ring spot[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(22): 2202002.
- [27] 耿立博. 汽车动力电池盖板激光焊接工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. Geng L B. Study on laser welding technology of automobile power battery cover plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

Spatter Suppression Mechanism and Process Optimization of Adjustable Ring-Mode Laser Welding

Dong Jinfang^{1,2}, Yang Fangyi^{1,2}, Wu Di^{1,2,3*}, Li Xiaoting^{4**}, Zeng Da^{1,2}, Huang Hongxing^{1,2}, Wu Hao⁵, Zhang Peng⁴, Jiang Liangyin⁶, Zhang Peilei^{1,2}

¹*School of Materials and Science Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;*

²*Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China;*

³*School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201620, China;*

⁴*Shenzhen Han's Lithium Battery Intelligent Equipment Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;*

⁵*Hubei EVE Power Co., Ltd., Jingmen 448000, Hubei, China;*

⁶*Shanghai Branch, IPG (Beijing) Fiber Laser Technology Co., Ltd., Shanghai 201620, China*

Abstract

Objective With the development of the new energy vehicle industry, laser welding has become increasingly popular in the manufacturing of power batteries because of its high welding speed, small heat-affected zones, and high degree of automation.

However, as the laser involves high-energy beam, its interaction with materials is often intense. This can easily lead to defects, such as spatters and explosion points, thus compromising the quality of battery welding. In the field of power batteries, the adjustable ring-mode (ARM) laser has emerged as a high-speed low-spatter laser welding tool, gaining attention from both academia and industry. However, the spatter suppression mechanism of the ARM laser during high-speed welding remains unclear. This limitation hinders theoretical guidance and process optimization for industrial applications. Thus, in this study, the complete welding of an aluminum alloy roof is considered and how the core ring power ratio affects the penetration and width is analyzed. Moreover, how the ARM laser effectively curbs the metal spatter is elucidated by examining the dynamic behavior of the keyhole in the molten pool. Optical coherence tomography (OCT) measurement technology is used to monitor keyhole depth fluctuations in real time, providing a quantitative assessment of welding stability and identifying the optimal process window.

Methods A synchronous-sensing monitoring platform (Fig. 1) is established by integrating high-speed visual shooting with penetration detection. For the visual sensing component, a high-speed camera is utilized to capture sharp keyhole images of the molten pool. For penetration detection, the platform is merged with an OCT-based monitoring module to acquire real-time keyhole depth information during the welding process. Initially, the process window of the ARM laser welding is determined by conducting an orthogonal experiment, as shown in Fig. 3. The keyhole images under different parameters are obtained, and the changes in the keyhole depth are recorded. Comparisons of the keyhole opening and depth reveal the mechanism behind the spatter suppression during ARM laser welding. To identify the best low-spatter process window, keyhole volatility is introduced as a variable. The variance in the keyhole depth, measured by applying OCT in real time, is calculated. This variance is used to assess the depth fluctuations of the keyhole and, consequently, the stability of the welding process. The relationship between the welding process stability and the power ratios of inner ring laser to outer ring laser is then established by using a contour map, resulting in the identification of optimal process window parameters (Fig. 10).

Results and Discussions The spatter formation mechanism in the ARM laser high-speed (150 mm/s) welding is analyzed. The spatter formation process and suppression methods are elucidated, demonstrating that the ARM laser can indeed diminish the spatter occurrence rate by enlarging the keyhole opening. The effect of the power ratio of inner ring laser to outer ring laser on the keyhole stability is verified. First, a traditional orthogonal experiment is conducted to determine the process window for melting width when the inner ring laser power ranges from 600 W to 1300 W and the outer ring laser power ranges from 800 W to 1800 W. The process window for the penetration is determined for an inner ring laser power of 500–1150 W and outer ring laser power of 800–1800 W. Subsequently, the optical coherence scanning technology is employed to acquire the keyhole depth information. This information enables a qualitative evaluation of the welding process stability, facilitating the process optimization of the ARM laser welding. The findings suggest that a higher outer ring laser power is better for achieving a suitable penetration. A higher outer laser ring power stabilizes molten pool fluctuations and enlarges the keyhole opening.

Conclusions This study presents a process optimization scheme combined with real-time monitoring of the laser welding depth. The theory that spatter is mainly caused by keyhole collapse is verified. The laser welding process is further optimized based on the standard deviation of keyhole depth fluctuations. The final process window that satisfies both the traditional process window and keyhole fluctuation stability analysis window is identified: the core laser power ranges from 800 W to 1000 W, ring laser power is between 1200 W and 1600 W, and welding speed is set at 150 mm/s. The optimal power ratio of inner ring laser to outer ring laser for welding aluminum alloys typically lies between 1:2 and 1:3. Within this range, the keyhole achieves maximum stability and the defect occurrence rate is the smallest.

Key words laser technique; laser welding; aluminum alloy; adjustable ring-mode laser; penetration detection; spatter mechanism; optical coherence tomography