

填充焊丝对激光焊接过程的影响

李时春^{1,2}, 许伟^{1,2}, 伍俏平^{1,2}

¹湖南科技大学智能制造研究院, 湖南 湘潭 411201;

²湖南科技大学难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201

摘要 综述了焊丝成分、焊丝熔入行为以及与焊丝相关的工艺参数对激光填丝焊接过程的影响。在适当的工艺参数下, 确保焊丝连续平稳过渡, 能够实现稳定的焊接过程, 避免焊接缺陷的产生, 大幅提高激光焊接质量和焊缝性能。要实现激光填丝智能、高效、高质量的焊接, 还需进一步研究相互关联的工艺参数的多目标优化、焊丝成分的精确控制、加热焊丝的能量和焊丝温度的优化和精确控制等。

关键词 激光技术; 激光焊接; 焊丝; 熔入行为; 工艺参数

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.120005

Effect of Filler Wire on Laser Welding Process

Li Shichun^{1,2}, Xu Wei^{1,2}, Wu Qiaoping^{1,2}

¹Intelligent Manufacturing Institute, Hunan University of Science and Technology,
Xiangtan, Hunan 411201, China;

²Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

Abstract The effects of the composition and the fusion behavior of welding wires and welding-wire-related parameters on the laser welding process are summarized. With appropriate process parameters and under the condition that the continuous and smooth transition of the filler wire is ensured, a stable welding process can be realized, welding defects can be avoided, and a substantial increase of laser welding quality and weld performance can be obtained. In order to keep the laser welding with filler wire to be of intelligence, high efficiency and high quality, it is necessary to do further research on the multi-objective optimization of the interconnected process parameters, the precise control of the composition of the filler wire, the precise control and optimization of the wire-heating energy and the welding-wire temperature.

Key words laser technique; laser welding; welding wire; fusion behavior; process parameters

OCIS codes 140.3390; 140.3380; 160.3900

1 引言

激光焊接具有热影响区小、焊接变形小、结合强度高、生产效率高、易于实现自动化加工等优点^[1-2]。但是, 激光焊接仍存在以下局限^[3-5]: 1) 激光焊接对接头间隙要求严格, 所允许的间隙量最大不超过板厚的10%; 2) 焊接过程不稳定, 焊缝成形不理想, 容易产生塌陷、气孔和裂纹等缺陷; 3) 焊接接头易被烧损, 焊缝的化学成分完全取决于母材, 不能按要求对性能进行调控。激光焊接铝合金时, 上述局限性更为明显。

激光填丝焊接技术有效解决了上述不足, 得到了广泛的研究。在激光填丝焊接过程中, 焊丝的作用主要包括^[6-9]: 1) 为焊缝提供合金化的必要元素, 从而提高焊缝的组织性能, 减少焊缝裂纹和组织软化等缺陷; 2) 弥补焊接过程中的元素烧损, 得到饱满的焊缝成形, 避免塌陷、气孔等缺陷; 3) 引入形核质点, 促进焊缝组织

收稿日期: 2017-07-10; **收到修改稿日期:** 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51505145)、湖南科技大学校级博士启动基金(E51657)

作者简介: 李时春(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光焊接技术和先进复合焊接技术方面的研究。

E-mail: li.shi.chun@163.com

细化;4)降低接头的装配精度要求。

国内外学者对激光填丝焊接技术进行了深入的研究,主要集中在激光填丝焊接的工艺、缺陷抑制及焊丝过渡等方面。本文分别从焊丝成分、焊丝熔入以及主要工艺参数的影响规律这三方面,综述和总结了填充焊丝对激光焊接过程的影响,最后对激光填丝焊接技术的发展趋势进行了展望。

2 焊丝及热源对焊接过程的影响

2.1 焊丝成分对焊接过程的影响

通过匹配母材及填充焊丝中的元素成分,可以改善焊丝与母材的融合特性,弥补母材的元素烧损问题,从而避免焊接过程中出现热裂纹、气孔等不稳定现象,获得力学性能良好的焊缝成形,提高焊接质量^[10-11]。文献[12-14]表明,在进行铝合金填丝焊接时,将含有硅(Si)元素的焊丝加入焊接熔池,不仅能够显著减少甚至消除裂纹,弥补焊接时部分合金元素的损失,而且能够抑制气孔的形成,得到性能优良的焊缝成形和焊接接头。瞿玉峰等^[15]采用 ER4043 和 ER5356 两种焊丝对铝合金 6061-T6 进行了激光填丝焊接,其中 ER4043 焊丝中的 Si 元素含量较高,ER5356 焊丝中的镁(Mg)元素含量较高。通过对比焊缝的热裂纹敏感性以及焊缝中气孔率可知, Si 元素含量较高的 ER4043 焊丝不仅改善了液态金属的流动性,还促进了焊丝与母材的融合,得到了具有良好抗裂纹敏感性的焊缝,气孔率也相对较小;而 Mg 元素含量较高的 ER5356 焊丝可以有效弥补焊接时 Mg 元素的烧损,从而避免了焊缝力学性能的下降。何涛等^[16]对铝合金光纤激光填丝焊接工艺进行了研究,发现填充含有 Si 元素焊丝得到的焊接接头强度明显高于填充含有铜(Cu)和 Mg 元素焊丝得到的。这是由于铝-硅(Al-Si)焊丝中的 Si 元素改善了熔池的流动性,且 Si 元素的加入使得金属凝固收缩性降低,进而减少了热裂纹。文献[17]对比了分别含有 Si、Cu 和锌(Zn)合金元素的焊丝对接头组织及性能的影响,结果表明,填充含有 Si 元素焊丝得到的接头强度明显高于填充含有 Cu 和 Zn 元素焊丝得到的。这是因为 Si 元素具有很好的流动性,使得金属间化合物厚度减小,晶粒得到细化,从而提高了焊接接头的力学性能,且 Si 含量越高,晶体细化越明显,焊接接头的力学性能越好。蔡华等^[18]研究了 ER5087 焊丝对薄板 2524 铝合金激光焊接工艺及组织性能的影响,结果表明,填充的 ER5087 焊丝含有微量变质元素锆(Zr),在凝固过程中易生成具有高热稳定性的初生 Al_3Zr ,此化合物可以作为 Al 的异质形核核心,不仅能够细化焊缝晶粒,打乱柱状枝晶生长方向,而且可以阻碍枝晶生长交合,从而减少接头热裂纹缺陷。Chen 等^[19]研究了激光填丝熔纤焊 5A06 铝合金和 TC4 钛合金的异种板材焊接工艺,发现 Si 元素的扩散行为促进了 Ti_5Si_3 化合物的形成,进而提高了焊缝的力学性能。祁小勇等^[20]对 3 mm 厚的 C18000 铜合金板分别进行了激光焊接和激光填丝焊接,结果表明,激光焊接的焊缝组织粗大,而填充 ERNiCu-7 焊丝焊接的焊缝组织均匀细小。这主要是由于焊丝与母材进行了有效的互溶,其中镍(Ni)元素改善了熔池的流动性,形成了 Ni 和 Cu 的固溶体,焊缝强度得到提高。徐建国等^[21]对 SU304 不锈钢窄间隙激光填丝焊的性能进行了研究,结果表明,焊缝金属的硬度和母材金属的差别不大。这是由于焊缝金属和母材金属的组织都属于奥氏体组织,而且焊丝中的铬(Cr)、Ni 和 Si 含量比母材金属的高,因此其固溶强化效果比母材的好;加上激光填丝焊的快速加热和快速冷却的热循环作用,其焊缝组织比母材组织更细小,晶界强化效果增大,故硬度值略高于母材的。综上所述,在激光填丝焊接过程中,填充的焊丝可以调整焊缝的化学成分,改善接头的力学性能,抑制焊接裂纹的产生,避免采用激光自熔焊接时的焊接缺陷问题。

2.2 热源对焊接过程的影响

在激光填丝焊接过程中,焊丝主要依靠激光照射的能量、金属蒸气和光致等离子体的能量、熔池的能量^[22-23]进行加热。不同的焊接工艺包括单束激光填丝钎焊、单束激光填丝焊、双束激光填丝焊等,如图 1 所示,它们的热源的类型、大小及配比不同,焊丝熔化程度也不同,而焊丝的熔化程度决定了焊丝的填充熔入行为,焊丝的熔入行为对焊接过程的稳定性、组织成分与焊接接头性能等均有重要影响^[24]。文献[25-26]指出,保证焊丝稳定连续过渡是获得良好焊缝成形和焊接质量的前提。

2.2.1 单束激光填丝钎焊

根据母材的熔化形式,将单束激光填丝焊接分为单束激光填丝钎焊(母材以热传导形式熔化)和单束激光填丝焊(母材以深熔焊接形式熔化)两种形式。在单束激光填丝钎焊过程中,焊丝依靠激光的能量进行加

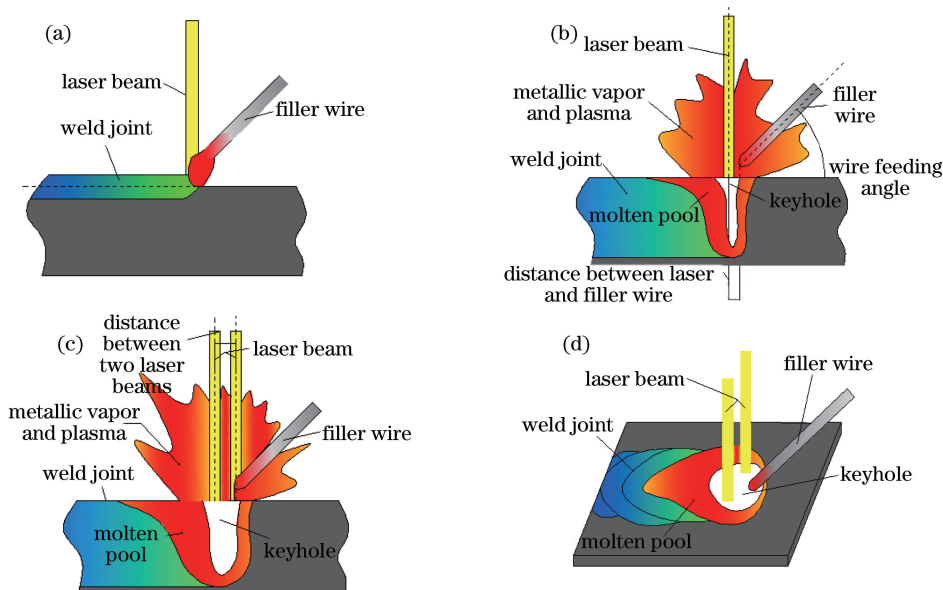
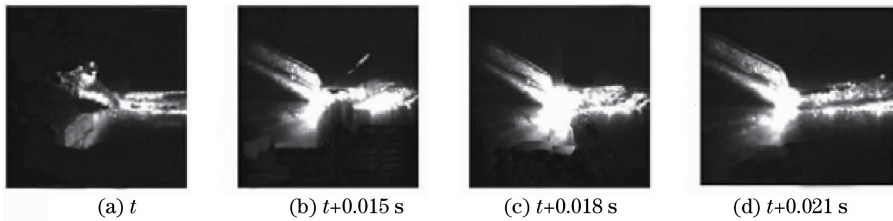
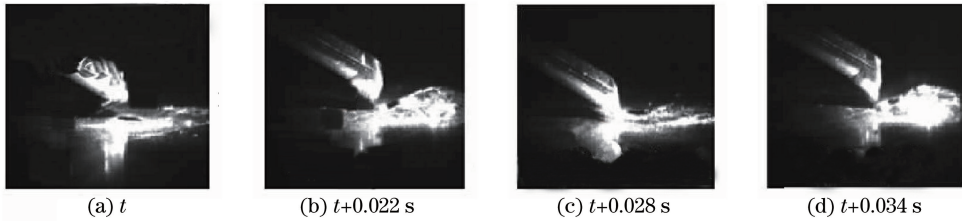
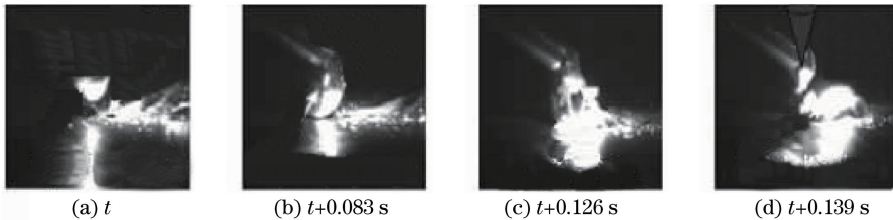


图 1 (a) 激光钎焊示意图; (b) 激光熔焊示意图; (c) 串行双束激光钎焊示意图; (d) 并行双束激光钎焊示意图
 Fig. 1 (a) Schematic of laser brazing with filler wire; (b) schematic of laser welding with filler wire; (c) schematic of dual-beam laser in series welding with filler wire; (d) schematic of dual-beam laser in parallel welding with filler wire

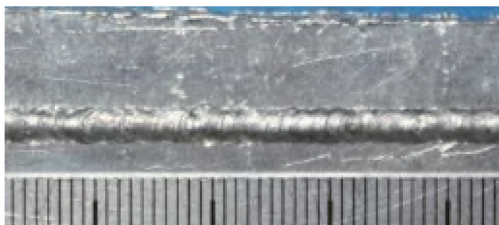
热熔化, 只有少量的激光能量照射在母材上, 母材上的加热形式以热传导为主。当激光照射的能量不足以使焊丝充分熔化时, 填充的焊丝处于固液态混合物, 呈半熔融状态, 堆积于焊缝表面, 焊缝显得很粗糙; 当焊丝被加热至充分熔化时, 填充的焊丝呈完全熔融状态, 熔滴依靠自身的重力作用沿着焊丝尾部过渡到母材表面并充分铺展开, 焊丝与母材熔合良好, 焊缝成形细致均匀且焊缝宽度增大^[27-28]。此外, 激光直接照射焊丝的能量不宜过大, 否则焊丝熔化极其迅速, 容易出现焊丝熔断, 进而出现间断的焊缝^[29]。文献[30]对铝/钢异种材料连接进行了激光钎焊工艺研究, 结果表明, 当激光功率过高时, 照射在钢上的激光能量增加, 熔化区内被熔化的 Fe 增加, 导致焊缝内部出现很多块状或条状的金属间化合物 FeAl, 进而严重影响接头的力学性能。封小松等^[31]进行了镀锌板激光钎焊焊缝成形和接头质量的研究, 分析认为, 通过改变激光加热方式, 如双光束、椭圆或矩形光斑等方式, 可以保证焊丝充分熔化, 使母材与熔化的焊丝充分作用, 从而获得具有良好性能的焊缝。陈焱等^[32]进行了铝合金与镀锌钢光纤激光钎焊的实验研究, 结果表明, 在焊丝充分熔化并平稳过渡填充到接合界面的条件下, 液态焊丝能够完全铺展并与母材熔合, 在低熔点铝合金一侧获得了成形饱满的钎焊接头, 在熔点较高的镀锌钢一侧, 由于熔化的填丝钎料具有良好的铺展浸润效应, 镀锌钢与钎料间的界面扩散效应更为均匀, 且界面层厚度也较均匀, 钎焊接头成形良好。

2.2.2 单束激光填丝焊

在单束激光填丝焊接过程中, 更多高能量密度的激光束直接照射在母材表面, 形成焊接小孔, 母材的加热熔化以深熔焊接为主。当焊丝与激光束未接触时, 焊丝主要依靠由焊接小孔喷出的光致等离子体和金属蒸气的辐射能量以及熔池辐射与热传导的能量而发生熔化。焊丝送入熔池之前为未完全熔化状态, 在焊丝送入过程中, 焊丝与母材或熔池存在挤压作用, 焊丝弯曲, 对熔池流动产生影响, 焊接过程不稳定, 易产生飞溅等缺陷。当焊丝与激光束部分重叠时, 一部分激光能量用于焊丝, 另一部分激光能量作用于母材形成匙孔。此时, 焊丝熔化充分, 焊接过程稳定, 没有出现飞溅现象, 且在表面张力和重力的作用下, 焊丝熔化的液态金属以“液桥”的形式过渡到熔池, 表面成形良好, 无明显缺陷。当焊丝完全遮挡激光束时, 在高能激光直接照射下, 焊丝熔化和气化剧烈, 并被迅速熔断形成下垂熔滴, 使照射在母材表面的激光能量大幅减小, 导致熔池深度大幅下降。此时, 熔化的焊丝以液滴状向熔池过渡, 焊丝熔滴的形成存在周期性, 导致焊接过程极不稳定^[22]。文献[33-34]认为, 焊丝熔化的能量来源是影响激光填丝焊过程稳定性的关键因素之一。另外, 文献[22, 35]同样发现, 在单束激光填丝焊接和铝合金光纤激光填丝焊过程中, 焊丝的三种典型熔入过渡形式为“平铺”过渡、“液桥”过渡和“大滴”过渡, 分别如图 2~4 所示, 其中 t 为时间。

图 2 “平铺”过渡的焊接过程^[22]Fig. 2 Welding process with spreading transition^[22]图 3 “液桥”过渡的焊接过程^[22]Fig. 3 Welding process with liquid bridge transition^[22]图 4 “大滴”过渡的焊接过程^[22]Fig. 4 Welding process with globular transition^[22]

彭进等^[36]对比分析了激光填丝焊和激光自熔焊焊接铝合金时熔池的表面波动及焊缝成形质量。结果表明,激光自熔焊熔池表面波动比较剧烈,匙孔后方出现液柱,易造成焊接飞溅,焊缝表面有明显缺陷;激光填丝焊熔池表面波动相对稳定,焊缝表面成形良好。焊接过程中焊丝过渡形式为“液桥”过渡和“大滴”过渡^[36],在“液桥”过渡形式下得到的焊缝表面成形良好,没有出现咬边等缺陷,如图 5 所示;在“大滴”过渡形式下,熔滴落入熔池中,对熔池的冲击较大,熔池表面出现较大的波动,焊缝表面成形不规则,如图 6 所示。综上所述,“液桥”过渡为最理想的过渡形式,可以得到表面成形良好的焊缝。

图 5 激光填丝焊“液桥”过渡下的焊缝表面成形^[36]Fig. 5 Weld surface appearance with liquid bridge transition in laser welding with filler wire^[36]图 6 激光填丝焊“大滴”过渡下的焊缝表面成形^[36]Fig. 6 Weld surface appearance with droplet transition in laser welding with filler wire^[36]

文献^[37]表明,焊接熔池的凝固决定了焊缝金属的晶体结构、组织和性能;焊缝熔池各个方向冷却的速度不同会造成焊缝组织的化学成分分布不均匀,甚至产生焊接缺陷,故研究焊接过程中熔池的凝固对获得性能优良的焊缝和高焊接质量具有重大意义。此外,文献^[38-40]提出,热丝激光填丝焊通过对焊丝进行预热,能使焊丝更快达到充分熔化状态,实现焊丝平稳、连续过渡填充到熔池,保证了焊接过程的稳定性,从而获得良好的焊缝成形和焊接质量。温鹏等^[41]对填充热丝激光窄间隙焊接进行了实验研究,结果表明,在合适的

电流能量加热下,焊丝进入熔池前被充分加热,焊丝过渡稳定,焊接质量得到提高。彭进等^[42]对激光液态填充焊的填材熔化与过渡稳定性进行了研究,结果表明,液态填充焊接过程分为“液桥”过渡和“大滴”过渡两种模式,控制合适的焊接电流,在电弧热量的作用下,焊丝上部熔化成液态金属,底部仍然保持固态形式;当焊丝被送到熔池边缘时,熔池的热对流和热辐射使焊丝底部熔化,在表面张力的作用下,液态金属流入到熔池中,实现了激光液态填丝焊的“液桥”过渡,焊接过程稳定。另外,当焊接电流过小时,电弧热量不足以使焊丝熔化,无法实现稳定的液态填充焊;当焊接电流过大时,焊丝前部完全熔化成液态金属,由于母材表面的温度与液态金属的温度差值较大,表面张力会影响液态金属向熔池的过渡,液态填材回缩成球,导致焊接过程不稳定,熔入行为表现为“大滴”过渡,焊缝成形较差。

综上所述,如何优化和精确控制加热焊丝的温度,使焊丝以连续稳定过渡行为过渡到熔池中,是激光填丝焊接过程中获得良好的焊缝成形和高焊接质量的关键因素之一。

2.2.3 双束激光填丝焊

在双束激光填丝焊接过程,当两束激光为串行布置时,一般将一束激光直接照射在焊丝上,对焊丝进行加热,将另一束光直接照射在母材上,对母材进行加热,形成深熔焊接熔池;当两束激光为并行布置时,焊丝布置在两束激光中间,两束激光分别有部分能量直接作用于焊丝,使其快速熔化。与单束激光填丝钎焊相比,双束激光填丝焊一方面能够形成深宽比更大的深熔焊接熔池,熔池搅动充分且流动性好,有利于气孔气泡的逸出,减少气孔的产生;另一方面,增大了激光辐照的有效面积,焊接小孔开口更大,而且双束激光中的一束激光直接照射在焊丝上,更有利于焊丝充分熔化并连续平稳过渡填充到熔池中,进而改善焊缝成形^[43-45]。雷正龙等^[46]研究了双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响,结果表明,与单光束激光填丝焊相比,双光束激光填丝焊形成的焊接小孔宽且浅,不易塌陷,并且焊接过程中焊接小孔始终处于张开状态,等离子体主要以向外流动的形式而不是喷发的形式流向孔外,从而使焊接过程更加稳定,减少气孔的产生。尤其是采用并行双光束激光填丝焊时,熔池内部温度梯度小,不仅降低了液态金属的凝固速度,还延长了气泡的逸出时间,对气孔的抑制效果更加明显。徐艳利等^[47]进行了2A12铝合金双光束激光填丝焊接工艺研究,结果表明,随着光斑间距的增加,两束激光照射的重叠面积减小,而两束激光照射的总面积增大,导致两束激光中心区能量密度降低,激光穿透能力减弱,当光斑距离大于0.3 mm时,焊缝中心出现了明显的凹槽,成形变差。雷正龙等^[48]研究发现,能量排布方式的不同导致焊缝金属熔化面积不同,熔化效率也不一样。通过合理控制能量的排布方式,焊丝可以连续平稳过渡填充到熔池中,从而获得力学性能良好的焊缝;当光束与焊缝中心成90°排布时(即并行排布),容易获得上、下等宽的焊缝成形,有利于提高对接焊缝的间隙适应性和焊缝的力学性能。综上所述,选取双光束热源的排布方式、选择合适的两束激光的能量配比以及两束激光束焦点的间距,不仅可以使焊丝稳定连续地过渡到熔池中,而且可以减少裂纹、气孔等缺陷。

3 焊接工艺参数对焊接过程的影响

采用激光填丝焊时,焊丝的加入使得激光焊接过程中增加了多个与焊丝相关的工艺参数,包括光丝间距、送丝方式、送丝角度、送丝速度。这些工艺参数都会影响焊丝的加热、熔化状态以及熔入行为,从而影响焊接过程的稳定性,故激光填丝焊接过程更加复杂、难以控制^[49-52]。文献[23,53]的研究结果表明,优化工艺参数是获得稳定焊接过程的重要基础。

3.1 光丝间距对焊接过程的影响

光丝间距是指激光光斑中心到焊丝端头与焊件接触点的距离,光丝间距主要影响焊丝加热的能量比例分配,使得焊丝加热熔化的程度和焊丝的过渡方式不一样,从而对焊接过程的稳定性产生影响^[54]。适当的光丝间距可以获得稳定的焊接过程和良好的焊接质量^[55]。孙晓芳等^[56]研究了5083铝合金光纤激光填丝焊接工艺,结果表明,若光丝间距选取适当,焊丝熔化充分且稳定连续地熔化过渡到焊接熔池中,减少了焊接过程的波动,成形较为美观;若光丝间距选取不当,焊丝存在顶丝现象而发生弯曲,且焊丝熔化不充分并呈半固态铺展在熔池的边缘,进而恶化焊缝的成形,焊接质量较差。Dilthe等^[57-58]对填丝过程中焊丝的熔化行为进行了研究,通过控制焊丝与光斑的位置实现熔化的液态焊丝以“液桥”形式的过渡,得到稳定的焊接过程和最佳的焊缝成形。Jokinen等^[59]采用激光填丝焊焊接核反应堆真空容器,发现只有当控制好激光束和焊丝

之间的光纤间距、合理分配激光束能量时,才能形成平稳的熔池,得到合格的焊缝。

3.2 送丝方式对焊接过程的影响

焊丝的送丝方式可分为前送丝、后送丝以及侧向送丝三种,如图7所示。

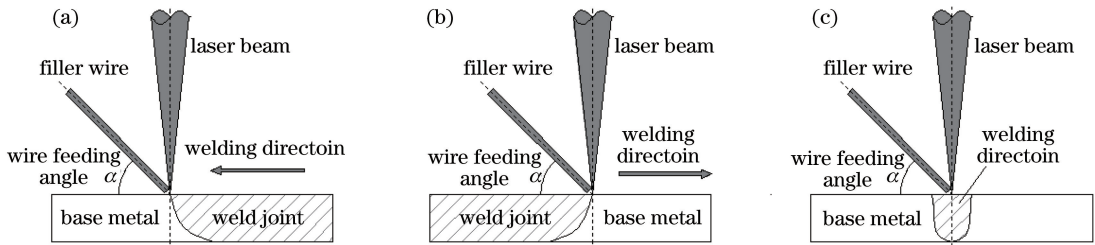


图7 三种送丝方式的示意图^[22]。(a)前送丝;(b)后送丝;(c)侧向送丝

Fig. 7 Diagrams of three types of wire feeding modes^[22]. (a) Pre-wire-feeding;

(b) post-wire-feeding; (c) lateral-wire-feeding

前送丝是将焊丝从熔池的前方并与焊接方向呈锐角送入熔池;后送丝是将焊丝从熔池的后方并与焊接方向呈钝角送入熔池;侧向送丝是将焊丝从熔池的两侧或焊接方向的两侧送入熔池。送丝方式决定了焊丝的加热机制,对焊丝的熔化程度和填充过渡形式产生影响^[60]。后送丝焊接时,由于焊丝是从熔池后方送入,焊丝主要依靠金属蒸气和光致等离子体以及熔池的能量进行熔化,这部分能量不能实现焊丝的快速熔化和充分熔化,故焊丝与母材融合不充分,焊接过程不稳定,焊缝成形不理想^[61];前送丝焊接时,焊丝在远离激光束时主要依靠金属蒸气和光致等离子体的能量以及熔池的能量作用发生熔化,当靠近激光束时焊丝受到部分激光的直接照射而被进一步加热熔化,熔化充分,不会出现顶丝现象,焊丝的熔入过渡连续稳定,且焊丝先熔入到前方熔池中并随金属熔液流向后方熔池,焊丝金属能均匀熔入到焊缝中^[62-64];侧向送丝焊接时,金属蒸气和光致等离子体以及熔池的能量难以使焊丝完全熔化,因此焊丝主要依靠部分激光的照射发生熔化,导致照射在母材上的激光能量减少,焊缝熔深减小,并且焊丝铺展不彻底,熔化焊丝加大了单侧的热量传递,导致焊缝出现不对称现象^[22]。

3.3 送丝角度对焊接过程的影响

送丝角度是指焊丝送进方向和工件表面所成的锐角,其对焊接过程的稳定性及焊丝的熔化效率具有重要影响。当送丝角度过大时,由于焊丝与激光束夹角较小,极小的焊丝摆动将大幅度改变光纤间距,进而导致焊丝过渡过程的波动和焊接过程的波动,甚至导致焊接缺陷的形成;当送丝角度过小时,由于焊丝与激光束夹角较大,焊丝对激光的反射作用增加,导致激光的利用率下降,从而降低焊丝的熔化效率^[51]。针对不同材料的焊接要求,合理选择送丝角度,可以保证焊丝熔化充分、过渡连续,提高焊接过程的稳定性。陶汪等^[65]对LF6铝合金激光填丝点焊工艺进行了研究,结果表明,送丝角度主要影响焊丝进入等离子体范围内的长度和焊丝的熔化效率。当送丝角度过大时,焊丝进入等离子体内部的长度过长,等离子体对焊丝快速加热,焊丝在等离子体边缘处易发生弯折,从而导致送丝过程的不连续;当送丝角度过小时,焊丝进入等离子体内部的长度过短,在连续送丝时焊丝被加热的时间短,熔化不充分,过渡不稳定;当送丝角度约为 30° 时,焊丝进入等离子体的长度适中,不仅熔滴过渡稳定,而且可以改善焊接时易出现的气孔和下塌等缺陷,焊缝成形良好。王成等^[66]对 CO_2 激光填丝焊的焊缝成形进行了研究,结果表明,送丝角度的变化会影响到热影响区和焊缝堆高,在其他条件不变时,送丝角度越大,热影响区越大,焊缝堆高尺寸越小,对激光的反射作用也越弱;送丝角度越小,对激光的反射作用则越强。综合考虑以上因素,得出送丝角度在 $20^\circ\sim 40^\circ$ 范围之内时,可以获得良好焊缝成形的结论。祁俊峰等^[67]研究了送丝角度对 CO_2 激光焊接7075-T6高强铝合金的稳定性的影响,结果表明,当送丝角度过大时,焊丝伸出距离较大,容易造成抖动,当送丝角度过小时,容易烧损送丝喷嘴。利用保护气体控制等离子体,并对熔池进行有效保护,送丝角度应控制在 $35^\circ\sim 60^\circ$ 范围内。黄宇等^[53]对TC4钛合金激光填丝焊接工艺进行了研究,结果表明,当送丝角度过小时,焊丝对激光功率的反射较严重,导致作用于工件表面的激光能量变小,出现未焊透的情况;随着送丝角度的增大,反射作用减小,激光能量的利用率增加,熔深变大;当送丝角度过大时,激光能量几乎完全作用于工件上,激光自熔焊的小孔效应

明显,从而得到更大的熔深,导致表面凹陷,背面堆高变大;在送丝角度为 50° 的条件下,能够获得正面和背面成形均光滑的焊缝。

3.4 送丝速度对焊接过程的影响

送丝速度是指单位时间内焊丝送进的长度,直接反映了焊丝送入的体积,即材料的填充量大小,是影响焊缝成形的重要参数之一^[56,68]。在激光填丝焊接过程中,假设焊丝的利用率为 100%,根据质量守恒关系,焊接速度与送丝速度之间的关系^[69]为

$$k \cdot b \cdot \delta \cdot \mu_0 = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot v_f, \quad (1)$$

式中 b 为间隙量, δ 为工件厚度, d 为焊丝直径, k 为余高决定系数(其值在 1.1~1.2 范围内), μ_0 和 v_f 分别为焊接速度和送丝速度。由(1)式可知,焊丝的送丝速度与板间间隙、工件厚度、焊丝直径、焊接速度等多个参数相关,实际焊接过程中通常只对焊接速度与送丝速度进行匹配,使其满足(1)式。当送丝速度过小时,送入的焊丝填充量不足,熔池的合金元素烧损和材料的流失得不到有效补充,焊缝易出现咬边及下塌等缺陷,且熔化的液态焊丝过渡不连续,容易产生间断的焊缝^[70];而当送丝速度过大时,单位时间送入的焊丝过多,易产生驻丝、堆丝等缺陷,同样降低了焊接过程的连续性和稳定性。在焊丝依靠激光能量加热的工艺条件下,送丝速度过快,就需要更多的激光能量对焊丝进行加热,导致熔池吸收的激光能量减少,焊缝熔深减小^[71-72]。文献[73]研究指出,焊接速度和送丝速度是影响热裂纹产生的主要工艺参数之一。因此,只有当焊接速度与送丝速度相匹配时,母材才能稳定熔透,焊缝才能成形饱满,无坍塌、咬边和裂纹等缺陷^[68-73]。

综上所述,在合适的焊接参数下,可以获得成形良好、力学性能优良的焊缝。如何匹配优化各个参数,对进一步获得稳定的焊接过程具有重大意义。

4 结束语

填充焊丝在激光焊接过程中不仅具有自身的优势,而且能弥补单独激光焊接的缺陷。但是,也存在一些局限性。在激光填丝焊接过程中,通过优选和控制焊丝成分,使其与母材相互匹配,可以有效减少裂纹和气孔的产生,而且还能够解决母材中合金元素的烧损问题,从而提高焊缝的力学性能。通过调节焊接过程中与焊丝相关的工艺参数,控制焊丝的熔化程度和连续过渡形式,可以大幅减少焊接过程中坍塌、气孔、裂纹等缺陷,并获得成形良好和力学性能稳定的焊缝。为进一步提高激光填丝焊接质量和稳定性,实现焊接热输入和焊缝组织性能的精确控制,在以后的工作中可以对以下三个方面展开深入研究:

- 1) 在保证焊接过程的稳定性和焊接质量的前提下,进一步研究激光填丝焊接多目标工艺参数的整体优化;
- 2) 如何优化和精确控制焊丝与母材合金元素的良好匹配,实现焊缝金相组织的精确控制,从而实现对焊缝性能的有效控制,是实现高质量激光填丝焊接的重要方向;
- 3) 如何优化和精确控制加热焊丝的能量及焊丝的温度,使焊丝能够以连续平稳且充分熔化的状态填充到熔池中,是保证焊接过程稳定性、实现高质量激光填丝焊接的关键。

参 考 文 献

- [1] Wang Jiachun. Development and expectation of laser welding technology[J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 48-54. 王家淳. 激光焊接技术的发展与展望[J]. 激光技术, 2001, 25(1): 48-54.
- [2] Cai Hua, Xiao Rongshi, Chen Kai. Mechanical property of CO₂ laser welded joint of 1420 aluminum-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 122-125. 蔡华, 肖荣诗, 陈铠. 1420 铝锂合金 CO₂ 激光焊接接头的力学性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 122-125.
- [3] Zuo Tiechuan. Laser machining high strength aluminum alloy [M]. 2nd edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [4] Zhao H Y, Niu W C, Zhang B, et al. Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding [J]. Journal of Physics D: Applied

- Physics, 2011, 44(48): 485302.
- [5] Wang Xijing, Seiji Katayama, Akira Matsunawa. Character of melting and evaporation in laser welding for different aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1995, 16(1): 30-35.
王希靖, 片山圣二, 松绳朗. 不同铝合金在激光焊接时的熔化和蒸发特性[J]. 焊接学报, 1995, 16(1): 30-35.
- [6] Zhao Jian. Study on behavior of melting wire transfer and copper/steel welding in electron beam welding with filler wire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
赵健. 电子束填丝焊接熔化过渡行为及铜/钢焊接研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [7] Qi J F, Zhang D Y, Xiao R S, *et al.* Joint performance of CO₂ laser beam welding 5083-H321 aluminum alloy[J]. China Welding, 2007, 16(2): 40-45.
- [8] Yu Yangchun, Wang Chunming, Yu Shengfu. Microstructures and property of butt laser joints of aluminium alloy 5A06 sheets with filler[J]. Laser Technology, 2010, 34 (1): 34-36.
余阳春, 王春明, 余圣甫. 5A06 铝合金的激光填丝焊接接头组织与性能[J]. 激光技术, 2010, 34(1): 34-36.
- [9] Yang D X, Li X Y, He D Y, *et al.* Effect of minor Er and Zr on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn alloy (5083) welded joints[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 561(3): 226-231.
- [10] Chan W M, Chew H I, Lee H P, *et al.* Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1): 15-24.
- [11] Zhou J, Tsai H L. Investigation of mixing and diffusion processes in hybrid spot laser-MIG keyhole welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(9): 095502.
- [12] Braun R. Laser beam welding of Al-Mg-Si-Cu alloy 6013 sheet using silicon rich aluminium filler powders[J]. Materials Science and Technology, 2005, 21(1): 133-140.
- [13] Dittrich D, Standfuss J, Liebscher J, *et al.* Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design-first results[J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 113-122.
- [14] Dittrich D, Brenner B, Winderlich B, *et al.* Progress in laser beam welding of aircraft fuselage panels/skin-skin-connections[C]. 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro Optics, 2008, 1804: 863-871.
- [15] Zhai Yufeng, Huang Jian, Li Min, *et al.* Research on high speed high power CO₂ laser welding of 6061-T6 aluminum with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0503001.
翟玉峰, 黄坚, 李敏, 等. 6061-T6 铝合金高速高功率 CO₂ 激光填丝焊接性的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0503001.
- [16] He Tao. Study on fiber laser welding of aluminum alloy with filler wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
何涛. 铝合金光纤激光填丝焊接工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [17] Dong H G, Hu W J, Duan Y P, *et al.* Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al filler wires[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 458-464.
- [18] Cai Hua, Lin Kaili, Xiao Rongshi. Process and microstructure properties of laser beam welding of thin 2524 aluminum alloy sheet with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 24-28.
蔡华, 林凯莉, 肖荣诗. 薄板 2524 铝合金激光填丝焊接工艺及组织性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 24-28.
- [19] Chen S H, Li L Q, Chen Y B, *et al.* Si diffusion behavior during laser welding-brazing of Al alloy and Ti alloy with Al-12Si filler wire[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(1): 64-70.
- [20] Qi Xiaoyong, Zhang Wei, Yu Shiwen, *et al.* Microstructural and mechanical property of laser welding of C18000 copper alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071405.
祁小勇, 张威, 余世文, 等. C18000 铜合金激光焊缝组织和力学性能[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071405.
- [21] Xu Guojian, Zhou Liming, Huang Zhengxiang, *et al.* Performance of narrow gap laser welding with filling wire for SU304 stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1003001.
徐国建, 钟立明, 杭争翔, 等. SUS304 不锈钢窄间隙激光填丝焊性能[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1003001.
- [22] Liu Hongbing, Tao Wang, Chen Jie, *et al.* Filler wire melting dynamics during laser beam welding with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(11): 73-77.

- 刘红兵, 陶汪, 陈洁, 等. 激光填丝焊熔丝熔入行为特征[J]. 焊接学报, 2013, 34(11): 73-77.
- [23] Wang Hongying, Mo Shouxing, Li Zhijun. CO₂ laser welding of AZ31 magnesium alloys with filler wire [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(6): 93-96.
王红英, 莫守形, 李志军. AZ31 镁合金 CO₂ 激光填丝焊工艺[J]. 焊接学报, 2007, 28(6): 93-96.
- [24] Huang Jiankang, Han Rihong, Shi Yu, *et al.* Force analysis of metal transfer in dual bypass MIG welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 44-48.
黄健康, 韩日宏, 石珩, 等. 双旁路耦合电弧 MIG 焊熔滴过渡受力分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 44-48.
- [25] Yamamoto M, Shinozaki K, Kadoi K, *et al.* Development of hot-wire laser welding method for lap joint of steel sheet with wide gap[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2011, 29(3): 58-61.
- [26] Kadoi K, Shinozaki K, Yamamoto M, *et al.* Development of high-efficiency / high-quality hot-wire laser fillet welding process[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2011, 29(3): 62-65.
- [27] Zhang Zequn, Huang Yuhua, Tan Caiwang, *et al.* Laser welding of Si particle reinforced aluminum matrix composite with filler[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(1): 26-30.
张泽群, 黄煜华, 檀财旺, 等. Si/Al 复合材料激光填丝钎焊工艺[J]. 电焊机, 2017, 47(1): 26-30.
- [28] Gu Yafei. Study on the laser beam brazing process and defect inhibition mechanism of galvanized steel [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
谷亚飞. 镀锌钢板的激光钎焊工艺及缺陷抑制机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [29] Feng Xiaosong, Chen Yanbin, Li Liqun, *et al.* Laser brazing with wire feed of galvanised thin sheets[J]. Applied Laser, 2004, 24(6): 357-360.
封小松, 陈彦宾, 李俐群, 等. 镀锌板激光填丝钎焊[J]. 应用激光, 2004, 24(6): 357-360.
- [30] Zhang Dongyun, Gao Shuangxin, Gao Haiyun, *et al.* Wire feeding laser brazing and fusion for Al-Fe dissimilar metal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 061403.
张冬云, 高双欣, 高海芸, 等. 铝/钢异种金属激光填丝熔-钎焊连接工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 061403.
- [31] Feng Xiaosong, Chen Yanbin, Li Liqun. Study of seam appearance and joint quality in laser brazing for galvanized steel sheets[J]. Applied Laser, 2005, 25(1): 23-26.
封小松, 陈彦宾, 李俐群. 镀锌板激光钎焊钎缝成形和接头质量研究[J]. 应用激光, 2005, 25(1): 23-26.
- [32] Chen Yi, Chen Genyu, Zhang Mingjun. Experimental investigation of fiber laser keyhole welding-brazing of aluminum to galvanized steel[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 421-425.
陈懿, 陈根余, 张明军. 铝合金与镀锌钢光纤激光深熔钎焊试验研究[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 421-425.
- [33] Dilthey U, Fuest D, Scheller W. Laser welding with filler wire [J]. Optical and Quantum Electronics, 1995, 27(12): 1181-1191.
- [34] Salminen A. The filler wire-laser beam interaction during laser welding with low alloyed steel filler wire [J]. Mechanika, 2010, 37(4): 67-74.
- [35] Yu Yangchun. Study on the technology and filler wire melting dynamics during the laser welding with filler wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010.
余阳春. 激光填丝焊的焊丝熔入行为及工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [36] Peng Jin, Wang Xingxing, Li Gang, *et al.* Effect of laser welding with filler wire on molten pool dynamic behavior and weld formation[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(11): 1102004.
彭进, 王星星, 李刚, 等. 激光填丝焊对熔池动态行为及焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102004.
- [37] He Enguang, Gong Shuili, Yang Tao, *et al.* Microstructure and properties of 5A90 Al-Li alloy T-joints by laser welding with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(9): 99-102.
何恩光, 巩水利, 杨涛, 等. 5A90 铝锂合金 T 形接头激光填丝焊接头组织性能分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(9): 99-102.
- [38] Tan Lipeng. Research on laser gap-butt joint welding of automotive high-strength steel with hot wire filler [D]. Hunan: Hunan University, 2013.
谭力鹏. 车用高强度钢间隙对接的激光热丝焊研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2013.
- [39] Zheng Shiqing, Wen Peng, Shan Jiguo. Experimental analysis on fusion ratio and composition uniformity of laser hot

- wire welds[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(12): 45-48.
- 郑世卿, 温鹏, 单际国. 激光热丝焊缝熔合比和焊缝深度方向的微观成分均匀性[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 45-48.
- [40] Zheng Shiqing, Wen Peng, Shan Jiguo. Research on wire transfer and its stability in laser hot wire welding process[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403008.
- 郑世卿, 温鹏, 单际国. 激光热丝焊接过程焊丝过渡行为及其稳定性的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403008.
- [41] Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji, *et al.* Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103004.
- 温鹏, 郑世卿, 荻崎贤二, 等. 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1103004.
- [42] Peng Jin, Li Liqun, Lin Shangyang, *et al.* Filler melting and transition stability in laser liquid filling welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 9-12.
- 彭进, 李俐群, 林尚扬, 等. 激光液态填充焊的填材熔化与过渡稳定性[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 9-12.
- [43] Yao Wei, Gong Shuili, Steve Shi. Twin spot laser welding characteristics of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(4): 108-112.
- 姚伟, 巩水利, Steve Shi. 铝合金激光双光点焊接工艺特性[J]. 焊接学报, 2007, 28(4): 108-112.
- [44] Haboudou A, Peyre P, Vannes A B, *et al.* Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 363(1/2): 40-52.
- [45] Dausinger F. Dual-focus technique for high-power Nd:YAG laser welding of aluminum alloys [C]. SPIE, 2000, 3888: 348-358.
- [46] Lei Zhenglong, Li Ying, Chen Yanbin, *et al.* Effect of process parameters on porosity formation ratio in dual-beam laser welding of aluminum alloys with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 40-44.
- 雷正龙, 李颖, 陈彦宾, 等. 双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 40-44.
- [47] Xu Yanli, Yang Changchun, Li Rui, *et al.* Process research on double beam laser welding with filler wire[J]. Hot Working Technology, 2017, (1): 186-188.
- 徐艳利, 杨长春, 李瑞, 等. 2A12 铝合金双光束激光填丝焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2017, (1): 186-188.
- [48] Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Lü Tao, *et al.* Effect of energy arrangement on temperature field and stress field in dual-beam laser welding process with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(11): 83-88.
- 雷正龙, 陈彦宾, 吕涛, 等. 能量排布方式对双光束激光填丝焊温度场与应力场的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(11): 83-88.
- [49] Meng Yunfei, Wang Weixin, Li Cui, *et al.* Research on fiber welding of 304 stainless steel with filler wire[J]. Applied Laser, 2016, 36(5): 535-542.
- 孟云飞, 王维新, 李翠, 等. 304 不锈钢光纤激光填丝焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2016, 36(5): 535-542.
- [50] Xing Ruizhi. Study on the laser beam welding of 6061 aluminum alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- 邢睿智. 6061 铝合金激光自熔焊与填丝焊工艺试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [51] Xu Fei. Aluminum alloys welding by laser with filling wire and laser-arc hybrid[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- 许飞. 铝合金激光填丝和电弧复合焊接技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [52] Xu Fei, Yang Jing, Chen Li, *et al.* Effects of welding parameters on laser welding of aluminum alloys with filler wire[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(9): 45-48.
- 许飞, 杨璟, 陈俐, 等. 焊接参数对铝合金激光填丝焊缝成形的影响[J]. 材料工程, 2010(9): 45-48.
- [53] Huang Yu, Feng Aixin, Luo Jingwen, *et al.* Research on laser filler wire welding process of TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2016, (19): 23-26.
- 黄宇, 冯爱新, 罗敬文, 等. TC4 钛合金激光填丝焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2016, (19): 23-26.
- [54] Wang Guozhen. Study on the formation and porosity of 5754 aluminum alloy by laser lap welding with filler wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- 王国振. 5754 铝合金激光填丝搭接焊缝成形及气孔的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [55] Wu Yanming, Wang Wei, Lin Shangyang, *et al.* Analysis of droplet behavior in Nd:YAG laser-pulsed MAG hybrid

- welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(7): 83-86.
- 吴艳明, 王威, 林尚扬, 等. Nd:YAG 激光-脉冲 MAG 复合热源焊熔滴过渡分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(7): 83-86.
- [56] Kong Xiaofang, Li Fei, Lü Junxia, *et al.* Fiber laser welding of 5083 aluminum alloy with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003007.
- 孔晓芳, 李飞, 吕俊霞, 等. 5083 铝合金光纤激光填丝焊接工艺[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003007.
- [57] Diltthey U, Schneegans J. Studies into laser beam welding with filler wire addition of unalloyed and low-alloyed steels[J]. Le Chirurgien-Dentiste de France, 1995, 56(355): 38-41.
- [58] Kutsuna M, Yan Q. Study on porosity formation in laser welds in aluminium alloys: effects of hydrogen and alloying elements[J]. Welding International, 1998, 12(6): 937-949.
- [59] Jokinen T, Kujanpää V. High power Nd:YAG laser welding in manufacturing of vacuum vessel of fusion reactor[J]. Fusion Engineering & Design, 2003, 69(1/2/3/4): 349-353.
- [60] Xiao R S, Chen K. CO₂-laser beam welding of aluminium alloys for transport systems[J]. Journal of Laser Applications, 1999, 12: 128-135.
- [61] Yang Jing, Li Xiaoyan, Gong Shuili, *et al.* Analysis of typical defects in aluminum-lithium alloy welding by laser welding[J]. Welding & Joining, 2009(11): 47-51, 71.
- 杨璟, 李晓延, 巩水利, 等. 铝锂合金激光焊接头典型缺陷分析[J]. 焊接, 2009(11): 47-51, 71.
- [62] Watson M N. Laser welding of structural steel with wire feed[R]. TWI Research Report, 1985: 264.
- [63] Syed W U H, Li L. Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition[J]. Applied Surface Science, 2005, 248(1/2/3/4): 518-524.
- [64] Xu Fei, Chen li, Gong Shuili, *et al.* Microstructure and mechanical mproperties of Al-Li alloy by laser welding with filler wire[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(10): 1775-1779.
- 许飞, 陈俐, 巩水利, 等. 铝锂合金激光填丝焊接接头组织性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(10): 1775-1779.
- [65] Tao Wang, Ma Yinan, Chen Yanbin, *et al.* Laser spot welding of LF6 aluminum alloy with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103007.
- 陶汪, 马轶男, 陈彦宾, 等. LF6 铝合金激光填丝点焊工艺研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103007.
- [66] Wang Cheng, Tian Zhiling. Study on weld formation during CO₂ laser welding with filler wire[J]. Application of Lasers, 1999, 19(5): 269-271.
- 王成, 田志凌. 填丝 CO₂ 激光焊的焊缝成形研究[J]. 应用激光, 1999, 19(5): 269-271.
- [67] Qi Junfeng, Tian Sheng, Chen Hong, *et al.* Slab CO₂ laser welding of 7075-T6 high strength aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(s1): 439-444.
- 祁俊峰, 田胜, 陈虹, 等. 板条 CO₂ 激光焊接 7075-T6 高强铝合金[J]. 中国激光, 2006, 33(s1): 439-444.
- [68] Zhang Lifang, Zhao Zeyang, Li Fangping, *et al.* Influence of process parameters on the forming of laser lap welding with filler wire[J]. Applied Laser, 2015, 35(1): 72-76.
- 张丽芳, 赵泽洋, 李坊平, 等. 工艺参数对激光填丝搭接焊成形的影响[J]. 应用激光, 2015, 35(1): 72-76.
- [69] Jiang Zhiwei, Zhang Yu. Study on process and properties of laser filling welding for 6061 Al alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(7): 189-191.
- 蒋志伟, 张玉. 6061 铝合金光纤激光填丝焊工艺与性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(7): 189-191.
- [70] Sun Z, Kuo M. Bridging the joint gap with wire feed laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 87(1/2/3): 213-222.
- [71] Lin Kaili, Yang Wuxiong, Lü Junxia, *et al.* Laser beam welding study of 2198-T851 aluminum-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103007.
- 林凯莉, 杨武雄, 吕俊霞, 等. 2198-T851 铝锂合金激光焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103007.
- [72] Li Chunguang, Tang Duo, Yun Zhonghuang, *et al.* Study on laser filler wire welding process of stainless steel SUS304[J]. Applied Laser, 2016, 36(2): 181-187.
- 李春广, 唐舵, 云中煌, 等. 不锈钢 SUS304 激光填丝焊工艺研究[J]. 应用激光, 2016, 36(2): 181-187.
- [73] Cicală E, Duffet G, Andrzejewski H, *et al.* Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding-operating parameters and their effects[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 395(1/2): 1-9.