DOI: 10.3901/JME.2021.06.078

5A06 铝合金超声辅助激光填丝焊接熔池流动与结晶行为研究*

雷正龙¹ 郭亨通¹ 张登明² 李 谦¹

(1. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001;
2. 上海航天精密机械研究所 上海 201600)

摘要: 为解决铝合金激光焊接过程中由于焊缝成形不良及组织不均匀引起的接头性能下降的问题, 针对 3 mm 厚的 5A06 铝合金开展超声振动辅助激光填丝焊接试验研究。超声变幅杆与焊接试件直接接触, 进而将超声波引入熔池。超声导入熔池后, 增强了熔池的稳定性和流动性, 可以有效地改善焊缝成形, 增加焊缝熔深。不同焊速的试验表明, 低焊速下熔池的高温停留时间长、成分均匀性好, 超声波的引入增强了熔池成分均匀性。超声波在熔池内传播时引起的空化效应、声流效应以及机械搅拌效应既可以有效地提高熔池内的形核率又可以促使晶粒的生长方式由柱状晶向等轴晶转变, 具有细化晶粒的作用。细晶强化作用改善了接头断裂方式, 提高了接头塑韧性和抗失稳能力。与未施加超声辅助相比, 当超声变幅杆压力为 125.7 N 时, 焊缝晶粒明显细化, 接头抗拉强度从 258.3 MPa 提高到 293.1 MPa 左右, 延伸率从 11.2% 提高到 13.1% 左右。

关键词: 5A06 铝合金; 激光填丝焊接; 超声振动; 熔池流动; 晶粒细化

中图分类号: TG456

Study on Melt Flow and Grain Refining Ultrasonic-assisted Laser Filler Wire Welding Process of 5A06 Aluminum Alloy

LEI Zhenglong¹ GUO Hengtong¹ ZHANG Dengming² LI Qian¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
2. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

Abstract: In order to solve the problem of joint performance degradation caused by poor weld formation and uneven structure in laser welding of aluminum alloy, ultrasonic vibration assisted laser wire filling welding was carried out for 3 mm thick 5A06 aluminum alloy. The ultrasonic horn is in direct contact with the welding specimen, and then the ultrasonic wave is introduced into the molten pool. The stability and fluidity of the molten pool are enhanced after the ultrasonic wave is introduced into the molten pool, which can effectively improve the weld formation and increase the weld penetration. The experiments of different welding speeds show that the high temperature retention time of the molten pool is long and the composition uniformity is good at low welding speed. The introduction of ultrasonic only enhances this effect. The cavitation effect, sonic flow effect and mechanical stirring effect caused by ultrasonic wave propagation in the molten pool can not only effectively improve the nucleation rate in the molten pool, but also promote the transformation of grain growth mode from columnar crystal to equiaxed crystal, which has the effect of refining grains. The fine grain strengthening improves the fracture mode of the joint, improves the plastic toughness and stability resistance of the joint. When the pressure of ultrasonic horn is 125.7 N, the grain size of the weld is obviously refined. The tensile strength of the joint increased from 258.3 MPa to about 293.1 MPa, and the elongation increased from 11.2% to about 13.1%.

Key words: 5A06 aluminum alloy; laser filler wire welding; ultrasonic vibration; melt flow; grain refining

* 上海航天科技创新基金资助项目(SAST2017-057)。20200408 收到初稿,
20201225 收到修改稿

0 前言

铝合金是一种重要的轻金属材料,其在工业中的使用量仅次于钢^[1]。铝合金因其耐腐蚀性好、比强度高、导热性能及低温力学性能好等优点,在飞机、汽车和船舶等交通制造业中,铝合金结构件的使用频率越来越高^[2-3]。铝合金的广泛应用不可避免的涉及到铝合金的焊接问题。由于铝合金容易氧化、热导率和比热容大、热裂纹倾向大,在焊接过程中,容易出现气孔、夹渣、变形等问题^[4-6]。目前传统的铝合金焊接方法主要有钨极惰性气体保护焊、熔化极惰性气体保护焊、电子束焊、搅拌摩擦焊、激光焊等^[7-11]。铝合金搅拌摩擦焊接焊缝成形良好,但焊接自由度受搅拌头限制^[12],电子束焊接需要在真空室中进行^[13]。激光焊接具有焊接效率高、深宽比大、热影响区小、残余应力小、焊接变形小、不需要真空环境等优点,因此成为了铝合金常用的焊接工艺。

铝合金激光焊接存在反射率高、合金元素烧损、装配精度要求高、焊缝下塌等问题。填充焊丝是解决以上问题的手段之一。激光能量一部分用于熔化焊丝,一部分被固态焊丝反射,剩余部分用于熔化母材^[14-16]。激光与焊丝部分重叠,且采用前置送丝的方式并且焊丝贴近熔池的边缘时,送丝过程稳定^[17-18]。SALMINEN 等^[16]研究发现,当送丝角度为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 且焊丝延长线与激光束交于工件表面以下 2 mm 处时激光能量利用率高,可以获得高质量的焊缝。此外,激光热丝焊^[19]可以提高焊接过程的稳定性和效率,焊丝可以采用电阻加热或者电弧加热^[20-21]。在传统的焊接工艺中,已有学者对超声辅助非熔化极惰性气体保护焊(Tungsten inert gas welding, TIG)、熔化极惰性气体保护焊(Metal inert gas welding, MIG)、熔化极活性气体保护焊(Metal active gas welding, MAG)等焊接方法进行了研究^[22-25],而超声辅助激光焊接的研究则较少。超声振动可以施加在电弧、焊丝和母材上^[26]。利用超声对电弧的压缩和约束作用、焊丝和母材对熔池的振荡搅拌作用,达到改善焊缝成形、增加焊缝熔深、细化晶粒、抑制裂纹的作用。LEI 等^[27-28]开展了激光超声复合焊接研究,发现超声的声流和机械搅拌作用可以明显改善焊缝组织,但超声对焊缝下塌无明显改善作用。

本文采用光纤激光器和超声换能器,进行超声辅助 5A06 铝合金激光填丝焊接试验。对比分析

5A06 铝合金薄板对接接头在无超声辅助和有超声辅助条件下的焊缝成形、接头性能、熔池流动、显微组织等焊接特性。分析超声振动对熔池流动及晶粒细化的作用机理。为 5A06 铝合金超声辅助激光填丝焊接的工业应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

试验材料为厚度 3 mm 的 5A06 铝合金薄板,采用电火花线切割机将试件加工成 300 mm×50 mm 的长方形,试件不开坡口。焊缝填充材料为直径 1 mm 的 ER5356 铝镁焊丝,焊接区域保护气体为氩气。采用 PW4400 型 X 射线荧光光谱仪对母材及焊丝成分进行分析,母材及焊丝的成分如表 1 所示。实施焊接前,对母材采用 NaOH 溶液(质量分数 5%)碱洗 3 min,然后采用 HNO₃ 溶液(质量分数 30%)酸洗 3 min,清水冲洗后采用烘干箱进行烘干。

表 1 母材及焊丝的主要化学成分(质量分数) %

成分	5A06	ER5356
Mg	6.8	4.5~5.5
Mn	0.5~0.8	0.05~0.2
Si	0.4	0.25
Fe	0.4	0.4
Zn	0.2	0.1
Cu	0.1	0.1
Be	0.000 1~0.005	—
Cr	—	0.05~0.2
Ti	0.005~0.01	0.06~0.2

超声辅助激光填丝焊接装置示意图如图 1 所示。主要设备包括光纤激光器(YLS-5000)、超声波电源(CSHJ-1000)、步进电机(STC01Z)等。光纤激光器的波长为 $1\ 060\ \text{nm} \pm 10\ \text{nm}$,最大输出功率为 5 kW;超声波电源和超声换能器的最大输出功率为 800 W,振动频率为 40 kHz;行走机构为单轴可编程步进电机,试件固定在课题组自主设计的夹具垫板上,垫板上开有成形槽,并在成形槽的端部通入背面保护气体(Ar),保证焊缝背面成形。试验中,只有试件及垫板随步进电机移动。激光加工头、超声变幅杆、焊丝、送气管均位于焊接方向所在的竖直平面内,且固定不动。其中激光加工头与竖直方向成 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,以防止光学器件被反射光损伤。焊丝采用前送进,焊丝与试件成 20° 。保护气采用后送进,保护气与试件成 40° 。超声变幅杆位于激光加工头后方,变幅杆头部作用于熔池后沿的焊缝两侧。变幅杆采用气缸带动,通过调节气缸气压(P)控制变幅杆施加在工件上的压力(F),换算关系见式

(1)。试验中主要焊接工艺参数如表 2 所示, 文中未做特殊说明时, 超声变幅杆的压力为 125.7 N。

$$F = \frac{1}{4} \pi D^2 \times P \quad (1)$$

式中, F 为变幅杆压力(N), D 为气缸直径(mm), P 为气缸气压(MPa)。

图 1 超声辅助激光填丝焊接装置示意图

表 2 主要焊接工艺参数

参数	数值
激光功率/W	1 400
焦距/mm	192
离焦量/mm	+1
光斑直径/mm	2
焊接速度/(m·min ⁻¹)	1
送丝速度/(m·min ⁻¹)	1.5
保护气流量/(L·min ⁻¹)	20

按照国际标准 ISO 6892—1998 设计拉伸试样, 试样尺寸如图 2 所示, 拉伸试验采用 Instron5569 型电子通用试验机, 在 25 °C 下的恒定拉伸速度为 1.0 mm·min⁻¹。在母材及焊缝上各取三个拉伸试样, 抗拉强度取三个试样的平均值。经过研磨、抛光后采用混合酸溶液化学腐蚀得到金相试样, 并采用光学显微镜(OLYMPUS GX71)进行观察。拉伸断裂试样采用超声清洗 5 min, 并采用扫描电子显微镜对断口进行分析, 显微镜的工作电压为 20 kV。

图 2 拉伸试样尺寸(mm)

2 结果与讨论

2.1 焊缝成形及拉伸性能

焊缝成形及横截面形貌如图 3 所示^[28], 其中 d

为余高。未施加超声时, 焊缝成形不良, 余高较大, 呈现未熔透状态。施加超声后, 焊丝能稳定铺展, 鱼鳞纹细密光滑, 焊缝余高较小, 并且呈现束腰形熔透特征。一方面, 超声的声流效应迫使熔池上层的高温熔融金属向下作不规则的运动, 熔池温度均匀性增加, 熔池底部受到高温熔体的冲刷作用增强, 熔池边缘的高温停留时间延长。另一方面, 超声需要克服液态金属黏滞力做功, 机械能转化为热能。两者共同作用, 增加了母材熔化量和焊缝熔深^[28]。

图 3 焊缝成形

母材及焊缝的拉伸应力应变图如图 4 所示, σ_b 为抗拉强度, δ 为延伸率。母材的室温抗拉强度为 315.5 MPa, 延伸率为 15.2%。由图 4 可知, 未施加超声时, 焊接接头性能较母材有所下降, 接头抗拉强度为 258.3 MPa, 延伸率为 11.2%, 分别达到母材的 81.9%和 73.7%。施加超声辅助后, 焊接接头的抗拉强度为 293.1 MPa, 延伸率为 13.1%, 较未施加超声时分别提高了 13.5%、16.9%, 分别达到母材的 92.9%和 86.2%。未施加超声时, 焊缝成形不良、组织不均匀, 导致接头性能下降。施加超声增强了熔池的稳定性和流动性, 进而改善了焊缝成形和成分均匀性。超声的空化效应、声流效应和机械搅拌效应降低了形核功, 增加了形核质点。同时, 超声会抑制树枝晶的生长, 促使晶粒细化, 改善焊缝组织和性能。

图 4 母材及焊缝的拉伸性能

2.2 熔池流动

铝合金激光焊接熔池的不稳定性是由于液态金属表面张力低、流动性强所决定的, 而且熔池流动与焊缝成形及焊接缺陷的形成都有密切的关系^[29]。

试验中, 采用高速摄像观察熔池表面流动, 熔池图像如图 5 所示。以焊丝直径为标尺, 利用 Photoshop CC 2018 软件计算后拖角(α)、后沿高度角(β)、熔池表面积(S)。根据固液界面是否在母材表面所在的平面内, 可以将熔池表面分为两部分: 熔池在母材表面的部分 A_1 , 熔池后沿与焊缝余高形成的表面 A_2 , A_1 、 A_2 均为空间三维曲面。将 α 定义为 A_2 与水平面截交线的夹角, β 定义为 A_2 的固液界面与水平面的夹角。未施加超声时, 熔池呈水滴形状, 熔池前部呈椭圆形, 熔池后部不断凝固散热呈现尖角形。施加超声后, 后拖角 α 增大, 熔池轮廓更接近于完整的椭圆形。此外, 施加超声后 β 也由 25.3° 减少为 11.5° , 这说明超声增强了液态金属在母材表面的润湿铺展能力。

图 5 熔池形貌

超声辅助对熔池面积的影响如图 6 所示。未施加超声时, 熔池面积的波动范围为 $5.62 \sim 6.70 \text{ mm}^2$, 波动幅度达 19.2%。施加超声后, 熔池面积的波动范围缩小为 $5.23 \sim 5.43 \text{ mm}^2$, 波动幅度只有 4%, 这说明超声波的引入极大地提高了熔池稳定性, 进而改善了焊缝成形。

在多能场复合激光加工中, 外部能量场总是通过改变焊接过程中的熔池流动和传热行为进而改善焊接适应性^[30-31]。试验中, 采用 Cu 作为示踪元素研究超声振动及焊接速度对熔池流动的影响。如图 7a 所示, 铜箔夹在试件中间, 铜箔厚度为 0.2 mm, 宽度为 3 mm。利用扫描电镜背散射模式下 Al、Mg 小原子序数元素与示踪元素 Cu 大原子序数元素衬度的不同观察 Cu 元素在熔池内的扩散和流动行为。整个截面在背散射模式下都呈现明亮的衬度, 这说明 Cu 元素的在熔池中的跟随性好, 能够遍布整个截面。采用 EDS 能谱分析焊缝横截面上 Cu 元素的分布情况, 测点位置如图 7b、图

7c 所示, 测点间距为 0.2 mm。其中熔宽方向测量线距离焊缝顶部 1 mm, 熔深方向测量线位于焊缝中心线。

图 6 超声辅助对熔池面积的影响

图 7 示踪元素试验原理

图 8 是 Cu 元素在测量线上的测量结果, 均方差(Mean squared error, MSE)反映 Cu 元素分布的离散程度。在熔宽方向(图 8a、8b), Cu 元素分布受超声振动影响较大。在未施加超声时, Cu 元素在焊缝边缘处的含量很高, 跨过焊缝后 Cu 元素的含量急剧下降。施加超声后, Cu 元素富集现象消失, 焊缝中心区域 Cu 元素浓度升高。这说明超声振动加快了熔池流动, 使熔池边缘处的 Cu 元素回流到中心区域。在熔深方向(图 8c、8d), Cu 元素分布受焊接速度影响较大。施加超声后 Cu 元素含量普遍较高, 这与超声波的空化效应减少了富集 Cu 元素的气泡有关。均方差分析表明在低焊速下, 熔池高温停留时间较长, 熔池流动更加充分, 无论是否施加超声, Cu 元素的分布都比较均匀。在高焊速下, 熔池高温

停留时间较短,熔池流动不够充分,焊缝内的 Cu 元素大体上随深度的增加而增大。此外,熔池中存在局部流动,使得 Cu 元素在局部深度区域上均匀分布,但局部流动对熔池的整体流动并不起决定性作用。这也与 GOU 等^[32]研究 2205 与 X65 双层复合钢激光焊接时发现的现象类似。

图 8 Cu 元素在测量线上的分布

2.3 微观组织

超声振动对熔池结晶行为的影响原理如图 9 所示。超声在液态金属中传播时会引起空化效应、声流效应以及机械搅拌效应。这些效应通过改变晶体形核与长大两个方面影响熔池内的结晶行为。

图 9 超声振动对熔池结晶行为的影响原理

超声的空化效应和机械搅拌效应分别从增加形核质点和降低形核功两个方面促进形核。超声空化泡的形成、膨胀过程所需的表面能由其周围液态金属提供,形成局部过冷,提高形核驱动力。在正压力区的部分空化泡被压溃而爆破,形成强烈的冲击波,为晶胚的形成提供结构起伏和能量起伏。同时,冲击波会击碎正在生长的一次枝晶,枝晶碎片成为新的形核质点。此外,超声的机械搅拌效应使部分熔化的晶粒卷落至熔池,形成新的形核质点^[33]。此外,大量研究^[34]表明超声波可以增强液态金属的润湿性,降低液态金属与外来质点间的润湿角,进而降低形核功,提高形核率。

超声的声流和机械搅拌效应通过改变熔池中的温度梯度进而改变晶粒生长趋势。其中晶粒生长速度与焊接速度满足

$$R = v \cos \gamma \quad (2)$$

式中, R 为晶粒生长速度($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$); v 为焊接速度($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$); γ 为晶粒生长角度($^\circ$)。

在相同焊接速度下,未施加超声时,晶粒生长角度 γ 和熔池温度梯度 G 均较大,晶粒生长速度 R 较小。此时 G/R 的值很大,生成柱状晶的倾向较大。超声波的引入使晶粒生长角度 γ 变小(极限情况接近

于 0°), 晶粒生长速度 R 变大。超声的声流效应和机械搅拌效应提高了熔池流动性和温度均匀性。此时 G/R 显著减小, 熔池中的晶粒便更倾向于成长为等轴晶。

不同变幅杆压力下焊缝微观组织如图 10 所示。使用粒度分析工具 NanoMeasurer 对接头晶粒尺寸进行测量, 测量结果如图 11 所示。未施加超声辅助时熔合线边缘存在着一一条宽大的柱状晶区, 焊缝中心为粗大等轴晶, 晶粒尺寸集中在 $125\ \mu\text{m}$ 附近。施加超声后, 焊缝中心区域的晶粒尺寸明显减小。随着超声波压力的增大, 柱状晶区逐渐缩小, 等轴晶尺寸也不断减小。变幅杆压力为 $125.7\ \text{N}$ 时, 柱状晶区消失, 焊缝中心出现均匀而细小的等轴晶。晶粒尺寸集中在 $78\ \mu\text{m}$ 附近。但随着变幅杆压力继续增大, 焊缝边缘的柱状晶区重新出现。变幅杆压力增大到 $251.4\ \text{N}$ 时, 焊缝中心的等轴晶尺寸变大, 晶粒尺寸集中在 $100\ \mu\text{m}$ 附近。由此可知, 只有在合适的变幅杆压力下超声波对于焊缝组织的细化作用才能达到最好, 压力过小或过大都会削弱超声对焊缝组织的细化作用。

图 10 变幅杆压力对焊缝微观组织的影响

图 11 变幅杆压力对焊缝中心区域平均晶粒尺寸的影响

接头拉伸试样的断口形貌如图 12 所示。由图可知, 两种断口均表现为微孔聚集型断裂, 宏观断口呈现暗灰色纤维网状且存在明显的塑性变形。微观断口由聚集的韧窝构成, 说明断口具有良好的塑性特征。超声波的引入并未改变焊缝原有的塑性断裂模式。对比两图可知, 未施加超声时, 断口存在部分粗大的韧窝, 且韧窝区域较浅(图 12a 区域 I), 塑性变形较小。施加超声后, 断口中韧窝细小而密集(图 12b 区域 II), 且存在较深的韧窝区域, 具有较大的塑性变形(图 12b 区域 III)。晶粒细化后, 单位体积内的晶界和晶粒数增加。拉伸载荷被细化的晶粒分散, 延缓了裂纹的生成和扩展^[35]。细密的晶界可以阻碍裂纹的扩展, 增加接头的延展性。由此可见, 铝合金激光填丝焊接过程中施加超声振动, 可以通过细晶强化作用提高焊缝塑韧性, 提高接头抗失稳能力。

图 12 断口形貌

3 结 论

(1) 采用光纤激光器和超声换能器, 进行了超声辅助 5A06 铝合金激光填丝焊接试验。结果表明, 施加超声辅助后, 焊缝中缺陷减少, 接头晶粒细化, 塑韧性增强。接头的抗拉强度为 293.1 MPa, 延伸率为 13.1%, 较未施加超声时分别提高了 13.5%、16.9%左右。

(2) 超声振动增强了熔池的稳定性和流动性, 提高了熔池内温度和成分的均匀性, 进而改善了焊缝成形和元素分布。不同焊速下的试验研究表明, 低焊速下熔池高温停留时间较长, 成分均匀性好, 超声波的引入进一步增强了熔池成分的均匀性。

(3) 超声振动引起的空化效应、声流效应和机械搅拌效应降低了形核功, 提高了形核率, 提高了固液线附近晶粒被卷落至熔池的概率。这些作用降低了生成粗大柱状晶的倾向, 促使晶粒成长为细小的等轴晶。细晶强化作用改善了接头断裂形式, 提高了接头抗失稳能力。

参 考 文 献

- [1] YAN Fei, WANG Xianwei, CHAI Fang, et al. Improvement of microstructure and performance for steel/Al welds produced by magnetic field assisted laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 164-170.
- [2] 荆洪阳, 丰琪, 徐连勇, 等. 6063-T6 铝合金搅拌摩擦焊组织与力学性能研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 13-19.
JING Hongyang, FENG Qi, XU Lianyong, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welds on 6063-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 13-19.
- [3] MACIEL R, BENTO T, BRAGA D F O, et al. Fatigue performance of friction stir weld-bonded Al-Mg joints[J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 17: 949-956.
- [4] WU Yufeng, KIM G Y, RUSSELL A M. Effects of mechanical alloying on an AL6061-CNT composite fabricated by semi-solid power processing[J]. Materials Science and Engineering, 2012, 538: 164-172.
- [5] 杨超, 王英君, 徐艳利, 等. 含 Sc 高强铝合金薄板 TIG 焊与 FSW 接头组织与性能对比研究[J]. 机械工程学报, 2020, 26(6): 221-228.
- [6] YANG Chao, WANG Yingjun, XU Yanli, et al. Microstructure and mechanical properties of TIG and friction stir welded joints of Sc-contained high strength aluminum alloy sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 26(6): 221-228.
- [7] 吴圣川, 谢成, 胡雅楠, 等. 中高强度铝合金熔化焊接接头的缺陷容限评价方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 46-59.
- [8] WU Shengchuan, XIE Cheng, HU Yanan, et al. Defect tolerance assessment method of fusion welded medium and high strength Al alloy joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 46-59.
- [9] YUAN Heren, LIN Saobao, YANG Chunlin, et al. Microstructure and porosity analysis in ultrasonic assisted TIG welding of 2014 aluminum alloy[J]. China Welding, 2011, 20(1): 39-43.
- [10] FAN Chenglei, ZHOU Lei, LIU Zeng, et al. Arc character of the ultrasonic-wave assisted GMAW[J]. Welding Journal, 2013, 91(12): 375-380.
- [11] ARIVAZHAGAN N, SURENDRA S, SATVA P. Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc electron beam and friction welding[J]. Materials & Design, 2011, 32(5): 3036-3050.
- [12] GHOSH M, KUMAR K, KAILAS S V, et al. Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys[J]. Materials & Design, 2010, 31(6): 3033-3037.
- [13] 韩锐波, 王红阳, 杨帆, 等. 铝合金与高强钢激光-电弧焊复合连接机制研究[J]. 机械工程学报, 2020, 26(6): 57-64.
- [14] HAN Ruibo, WANG Hongyang, YANG Fan, et al. Research on riveting-laser arc welding hybrid joining mechanism of aluminum alloy and high strength steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 26(6): 57-64.
- [15] RADISAVLJEVIC I, ZIVKOVIC A, RADOVIC N, et al. Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(12): 3525-3539.
- [16] MO Zhonghai, WANG Yarong, HUANG Wenrong. Inhibit the porosity with electron beam scanning method in

- welding LD10 aluminum alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(S4): 54-57.
- [14] SALMINEN A S, KUJANPAA V P, MOISIO T J I. Interactions between laser beam and filler metal[J]. *Welding Journal*, 1996, 75(1): 9s-13s.
- [15] 陈彦宾, 雷正龙, 杨雨禾, 等. 排布方式对铝合金激光-MIG 复合横向焊接特性的影响[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(10): 84-90.
- CHEN Yanbin, LEI Zhenglong, YANG Yuhe, et al. Influence of arrangement on laser-MIG hybrid horizontal welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(10): 84-90.
- [16] SALMINEN A S, KUJANPAA V P. Effect of wire feed position on laser welding with filler wire[J]. *Journal of Laser Applications*, 2003, 15(1): 2-10.
- [17] 张建勋, 江旭, 徐甄真, 等. 6061-T6 铝合金/SPCC 冷轧钢激光熔钎焊特性研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 26(6): 41-49.
- ZHANG Jianxun, JIANG Xu, XU Zhenzhen, et al. Study on characteristics of laser welding-brazing of 6061 aluminum alloy to SPCC cold rolled steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 26(6): 41-49.
- [18] YU Yangchun, WANG Chunming, HU Xiyuan, et al. Porosity in fiber laser formation of 5A06 aluminum alloy[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(5): 1077-1082.
- [19] MATHIEU A, PONTEVICCI S, VIALA J C, et al. Laser brazing of a steel/aluminum assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si) [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 435(1): 19-28.
- [20] CHEN J S, LU Y, LI X R, et al. Gas tungsten arc welding using an arcing wire[J]. *Welding Journal*, 2012, 91(10): 261s-269s.
- [21] FUERSCHBACH P W, DUCK D L, BERTRAM L E, et al. Laser assisted micro wire GMAW and droplet welding[R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2002: 10-30.
- [22] SUN Qingjie, LIN Sanbao, YANG Chunli, et al. Arc characteristic of ultrasonic assisted TIG welding[J]. *China Welding*, 2008, 17(4): 52-57.
- [23] SUN Qingjie, LIN Sanbao, YANG Chunli, et al. Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14(8): 765-767.
- [24] DAI Wenlong. Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weld ability of aluminum alloy 7075-T6[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(16): 2447-2454.
- [25] WATANABE T, SHIROKI M, YANAGISAWA A, et al. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(12): 1646-1651.
- [26] KIM J S, WATANABE T, YOSHIDA Y. Ultrasonic vibration aided laser welding of Al alloys: Improvement of laser welding-quality[J]. *Journal of Laser Applications*, 1995, 7(1): 38-46.
- [27] LEI Zhenglong, BI Jiang, LI Peng, et al. Analysis on welding characteristics of ultrasonic assisted laser welding of AZ31B magnesium alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 105(9): 15-22.
- [28] 郭亨通, 张登明, 赵耀邦, 等. 5A06 铝合金超声辅助激光填丝焊接焊缝成形及组织性能研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50(4): 1-8.
- GUO Hengtong, ZHANG Dengming, ZHAO Yaobang, et al. Study on the formation of welding, microstructure, and properties of 5A06 aluminum alloy by ultrasonic laser assisted filler welding[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(4): 1-8.
- [29] VENKANNAH S, MAZUMDER J. Changes in laser weld bead geometry with the application of ultrasonic vibrations[C/CD]//*Proceedings of the World Congress on Engineering Vol II. Berlin: Lecture Notes in Engineering & Computer Science*, 2009.
- [30] WANG Lin, WU Chuansong, CHEN Ji, et al. Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116(1): 1282-1291.
- [31] LEI Zhenglong, BI Jiang, LI Peng, et al. Melt flow and grain refining in ultrasonic vibration assisted laser welding process of AZ31B magnesium alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108(12): 409-417.
- [32] GOU Ningnan, ZHANG Linjie, ZHANG Jianxun. Increased quality and welding efficiency of laser butt welding of 2205/X65 bimetallic sheets with a lagging MIG arc[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,

- 2018, 251(1): 83-92.
- [33] ALAVI S H, HARIMKAR S P. Melt expulsion during ultrasonic vibration-assisted laser surface processing of austenitic stainless steel[J]. Ultrasonics, 2015, 59(5): 21-30.
- [34] RAMIREZ A, QIAN M, DAVIS B, et al. Potency of high-intensity ultrasonic treatment for grain refinement of magnesium alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(1): 19-22.
- [35] RAMAKRISHNA T, RAO S S, NAIDU G S. Strength and hardness of post-weld heat-treated thick section 7075 Al alloy friction stir welds[J]. Materials Testing, 2019, 61(5): 411-416.

作者简介: 雷正龙(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为多能场激光复合加工基础与应用、绿色激光清洗、特种材料激光制造以及激光焊接质量监测与智能控制。

E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn