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

郭亨通¹, 张登明^{2*}, 赵耀邦², 雷正龙^{1*}, 李谦¹, 杨雨晨³, 徐艳利³

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;

3. 北京航天新凤机械设备有限公司, 北京 100854

* E-mail: 1217184522@qq.com; leizhenglong@hit.edu.cn

收稿日期: 2019-11-26; 接受日期: 2019-12-26; 网络版发表日期: 2020-03-30

上海航天科技创新基金(编号: SAST2017-057)资助项目

摘要 利用超声换能器和光纤激光器对5A06铝合金进行了超声辅助激光填丝焊接工艺试验, 对比分析了5A06铝合金激光填丝焊接与超声辅助激光填丝焊接的焊接特性. 结果表明, 采用超声辅助激光填丝焊接可以获得良好的焊缝成形, 熔池的流动性和均匀性更强, 焊缝背面熔宽显著增加. 施加超声后接头抗拉强度达到293.1 MPa, 延伸率达到13.1%, 分别达到母材的92.9%和86.2%. 焊缝熔合线附近的柱状晶区基本消失, 超声波的引入增加了熔池内的形核质点, 降低了形核功, 促使原本生长为柱状晶的组织转为生成细小的等轴晶, 焊缝中心区域的等轴晶尺寸集中范围由97~117 μm 下降到66~79 μm .

关键词 激光技术, 超声振动, 激光填丝焊接, 铝合金

1 引言

铝合金具有密度低、比强度高、耐蚀性好、易于成型等优点, 广泛应用于航空、航天、轨道交通等领域. 铝合金构件在实际应用中不可避免地涉及铝合金的连接工艺, 而铝合金熔点低、热导率大、热膨胀系数大的特性, 使得铝合金在焊接过程中容易出现焊缝成形不良、晶粒粗大、裂纹等缺陷^[1,2]. 目前, 铝合金常用的焊接方法有熔化极惰性气体保护焊(MIG)、非熔化极惰性气体保护焊(TIG)、电子束焊(EBW)、搅拌摩擦焊接(FSW)、激光焊接(LBW)^[3~7]等. 其中激光

焊接具有热输入集中、热影响区窄、焊接应力低、焊接变形小等特点, 是铝合金常用的焊接工艺. 目前铝合金激光焊接存在激光反射率高、对试件的加工和装配精度要求高等问题, 并存在合金元素烧损、下塌和咬边等缺陷^[8,9].

近年来, 随着激光器制造技术的发展, 出现了多种铝合金激光焊接方法. 激光填丝^[10]和激光填粉焊接^[11]可以很好地改善焊缝成形, 改善焊缝的合金成分. 双光束激光焊接^[12]和表面涂层^[13]工艺可以大大提高铝合金的激光吸收率. 此外, 多项以激光为主热源的焊接技术取得进展. 激光热丝焊接^[14,15]技术通过电流或者

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1521–1528
Guo H T, Zhang D M, Zhao Y B, et al. Study on the formation of welding, microstructure, and properties of 5A06 aluminum alloy by ultrasonic laser-assisted filler welding (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1521–1528, doi: 10.1360/SST-2019-0407

电弧预热焊丝可以大大提高铝合金的焊接效率。激光电弧复合焊接^[16]提高了铝合金激光焊接过程的稳定性,增加了激光能量利用率。

超声辅助加工技术已经在铸造、钎焊、电弧焊中有应用^[17~19]。国外学者已经对低碳钢进行了超声辅助激光重熔、超声辅助激光点焊、超声辅助激光焊接数值模拟等研究^[20~22]。本课题组研究了AZ31B镁合金超声辅助激光焊接特性及熔池流动行为,对超声辅助激光焊接的作用机理进行了详细的阐述^[23]。除此之外,国内的相关研究较少,对于铝合金超声辅助激光焊接技术的研究更是鲜有报道。

本文采用光纤激光器作为热源,采用超声换能器对焊接试件施加振动,进行了5A06铝合金超声辅助激光填丝焊接工艺试验。对5A06铝合金激光填丝焊接与超声辅助激光填丝焊接的焊缝成形、接头力学性能及显微组织等焊接特性进行对比分析,研究超声振动对激光填丝焊接过程的影响。本研究结果为铝合金超声辅助激光焊接技术的工业应用提供了一定的工艺基础。

2 材料与方法

试验中待焊接材料为5A06铝合金,尺寸为300 mm×50 mm×3 mm,直径为1 mm的ER5356铝镁焊丝作为焊缝填充材料,采用平板对接的方式进行焊接。采用PW4400型X射线荧光光谱仪对母材和焊丝的成分进行测量,母材和焊丝的主要化学成分如表1所示。

表1 5A06铝合金和ER5356焊丝主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical composition of 5A06 aluminum alloy and ER5356 welding wire (mass fraction, %)

成分	5A06铝合金	ER5356焊丝
Mg	6.8	4.5~5.5
Mn	0.5~0.8	0.05~0.20
Si	0.4	0.25
Fe	0.4	0.4
Zn	0.2	0.1
Cu	0.1	0.1
Be	0.0001~0.005	—
Ti	0.01~0.005	—
Cr	—	0.05~0.20
Ti	—	0.06~0.20

试验前对母材表面的油污进行清洗,清洗工艺如下:质量分数5%的NaOH溶液清洗3 min,质量分数30%的HNO₃溶液清洗3 min,清水冲洗,放入烘干箱干燥处理。

超声辅助激光填丝焊接装置示意图如图1(a)所示。超声辅助激光填丝焊接系统所使用的主要设备为IPG公司生产的YLS-5000型光纤激光器,最大功率为5 kW,激光波长为1060 nm,光束质量稳定。因为铝合金对于激光的反射率较高,为防止反射光对激光器中的光学元件(如聚焦透镜和准直透镜等)造成损伤,将激光束进行5°~10°的偏转。超声发生装置主要包括超声换能器和CSHJ-1000型超声波电源,超声波功率为800 W,超声频率为40 kHz。焊接过程中超声振动头与激光加工头位置保持不变。焊丝采用前送进方式,并与试件保持20°的送丝角度。为防止焊接区域氧化,选用氩气作为保护气体,并从焊接方向的后方送进。行走机构控制器为STC01Z型步进电机控制器,行走机构可以设置固定的运动速度,保证焊接速度恒定。焊接试件下方为课题组自行设计的垫板,垫板上开有成形槽,从垫板一端吹入保护气体,焊缝背面成形得以保证。垫板与行走机构刚性固定,焊接试件由夹具固定于垫板上。通过行走机构带动5A06试件的方式实现焊接,焊接方向与行走机构运动方向相反。超声辅助激光填丝焊接原理图如图1(b)所示。激光束作用于母材使其熔化形成熔池,焊丝被激光热量熔化并填充到熔池中。超声换能器作用于超声变幅杆上,变幅杆头部为马鞍形,方便保护气的送进。变幅杆通过与熔池后沿焊缝两侧的母材接触,将超声振动传导到熔池中。

试验过程中变幅杆由充进压缩空气的气缸带动,变幅杆通过与工件接触将超声波传入工件。通过调节不同的气缸压力可以控制变幅杆与工件之间的压力,气缸中气压与变幅杆压力的换算可以通过式(1)进行。采用变幅杆压力为0(未施加超声), 31.4, 62.9, 100.5, 125.7, 188.6, 251.4 N的条件下进行试验。

$$F = \frac{1}{4}\pi d^2 \cdot P, \quad (1)$$

式中, F 为变幅杆与试件间压力(N), d 为气缸直径(mm), P 为气缸气压(MPa)。

按照国标GB/T 2651-2008设计拉伸试样尺寸(图2),采用Instron公司生产的Instron5569电子万能试验机进行拉伸试验,拉伸速度为1.0 mm min⁻¹。不同变

图 1 (网络版彩图)超声辅助激光填丝焊接装置图。(a) 示意图; (b) 原理图

Figure 1 (Color online) Ultrasonic assisted laser welding with filler wire device. (a) Schematic diagram; (b) elementary diagram.

图 2 (网络版彩图)拉伸试样尺寸(mm)

Figure 2 (Color online) Size of tensile sample (mm).

幅杆压力对应的焊缝上各取3个拉伸试样, 取3个试样抗拉强度的平均值作为该压力下焊缝的抗拉强度。选用型号为OLYMPUS GX71的光学显微镜对焊缝组织进行观察。

3 结果与讨论

3.1 焊接参数对焊缝成形特征的影响

本试验采用正面和背面熔宽来评价焊缝成形和熔透程度, 对不同焊接参数下的熔宽变化讨论分析。焊缝背宽比 $R=W_b/W_f$, 其中 W_b 为背面熔宽, W_f 为正面熔宽, 未熔透时背面熔宽记为0。焊缝背宽比可以表征不同焊接参数下的熔透性和热源与试件作用的强弱, 同时也可以反映熔透性匙孔的稳定性^[24]。

在激光功率 $P=1400$ W、离焦量 $Z=+1$ mm、焊接速度 $V=1$ m min⁻¹、送丝速度 $V_f=1.5$ m min⁻¹、光纤间距 $d=1$ mm、保护气流量 $L=20$ L min⁻¹时进行焊接, 焊

缝截面的宏观形貌如图3所示。未施加超声的焊接试样背部未熔透, 且焊缝成形不良, 而超声辅助下的焊丝的稳态铺展能力更强, 焊缝正面鱼鳞纹更加细腻, 焊缝背面连续光滑, 呈现均匀熔透特征, 可以得到良好的单面焊双面成形效果。在激光焊接过程中, 铝合金急剧蒸发, 金属蒸气将熔融的液态金属排开形成匙孔, 匙孔的深度直接决定了焊缝熔深。未施加超声辅助时, 匙孔依靠金属蒸气反作用力与熔融金属重力和表面张力的动态平衡来维持, 达到平衡状态时还不足以实现熔透焊接, 故激光填丝焊接时背面熔宽为0。施加超声辅助后, 一方面, 熔融金属在超声作用下产生声流效应, 熔池上下层之间形成层间压力, 熔池上层的高温液态金属向下流动, 熔池中的温度更加均匀, 熔池底部受到的冲刷作用增强。另一方面, 超声在熔池中传播时, 需要克服熔融金属的黏滞力做功, 超声衰减的能量转化为热量, 提高了焊接热输入量。二者共同作用延长了熔池边缘的高温停留时间, 增加了母材熔化量, 使得焊缝熔深显著增加。

激光功率和焊接速度通过改变激光的线能量密度改变焊缝成形。如图4(a)所示($V=1$ m min⁻¹, $Z=+1$ mm), 随着激光功率的增加, 正面熔宽、背面熔宽和背宽比都在增加, 其中正面熔宽略有增加, 背面熔宽由1 mm增加到2.26 mm。当激光功率增大到1700 W时, 由于热输入过大焊缝表面出现了较为明显的下塌。如图4(b)所示($P=1400$ W, $Z=+1$ mm), 随着焊接速度的增加, 正

图3 (网络版彩图)5A06铝合金焊缝成形. (a) 未施加超声辅助; (b) 施加超声辅助

Figure 3 (Color online) Weld formation of 5A06. (a) No ultrasonic assistance; (b) with ultrasonic assistance.

图4 (网络版彩图)激光能量密度对焊缝成形特征的影响. (a) 激光功率; (b) 焊接速度

Figure 4 (Color online) Effect of laser line energy density on weld forming characteristics. (a) Laser power; (b) welding speed.

面熔宽和背面熔宽快速下降. 当焊接速度为 0.5 m min^{-1} 时, 焊缝正面出现较为严重的下塌. 当焊接速度增大时, 由于激光的线能量密度减小, 焊缝冷却速度加快, 熔池高温停留时间缩短, 使焊缝下塌得到改善.

离焦量通过改变工件表面的激光功率密度改变焊缝成形. 如图5所示($P=1400 \text{ W}$, $V=1 \text{ m min}^{-1}$), 随着离焦量的增大, 焊缝正面熔宽基本不变, 背面熔宽波动较大. 当离焦量为 -1 mm 时, 激光焦点位于母材表面以下, 母材熔化量最多, 背宽比最大. 此时激光能量密度最高的点位于母材内部, 母材表面金属蒸发严重, 焊缝表面出现下塌. 当离焦量为正离焦时, 母材表面的激光能量密度减小, 母材熔化量减少, 焊缝背面熔宽随之减小.

变幅杆压力通过改变超声的传入效率进而改变焊缝成形. 如图6所示($P=1400 \text{ W}$, $V=1 \text{ m min}^{-1}$, $Z=+1 \text{ mm}$), 随变幅杆压力的增大, 焊缝的正面熔宽先减小后增大, 背面熔宽先增大后减小. 正面熔宽由 3.3 mm 减小到 2.7 mm , 而背面熔宽由 1 mm 增加到

图5 (网络版彩图)离焦量对焊缝特征的影响

Figure 5 (Color online) Effect of defocus on weld characteristics.

2.6 mm , 背面熔宽对变幅杆压力的变化更为敏感. 当变幅杆压力过小时, 变幅杆与试件接触不良, 超声波传入效率很低. 随着变幅杆压力增大, 超声波的声流作用在熔池中产生的层间压力促进熔融金属向下流

图6 (网络版彩图)变幅杆压力对焊缝特征的影响
Figure 6 (Color online) Effect of horn pressure on weld characteristics.

动, 增大背部熔宽. 当变幅杆压力为100.5 N时, 背宽比达到最大值. 但随着压力持续增大, 变幅杆的振动受阻, 试件对超声反射作用增强, 超声的传入效率降低, 焊缝背部熔宽减小. 同时, 振动头在工件表面的行走阻力增大, 振动头左右晃动, 致使填丝过程不稳定.

3.2 接头力学性能

变幅杆的压力对焊缝力学性能的影响如图7所示, 其中变幅杆压力分别为0, 31.4, 62.9, 100.5, 125.7, 188.6, 251.4 N. 图7(a)为变幅杆压力对接头抗拉强度 R_m 和延伸率 δ 的影响, 图7(b)为变幅杆压力对焊缝中心区域硬度的影响. 母材的室温抗拉强度为315.5 MPa, 延伸率为15.2%. 由图可知, 未施加超声时, 焊接接头的抗拉强度为258.3 MPa, 延伸率为11.2%, 焊缝中心区域硬度为89 HV. 施加超声辅助后, 焊接接头的抗拉强

度、延伸率、焊缝中心区域硬度分别提高到293.1 MPa, 13.1%, 109 HV, 分别提高了13.5%, 16.9%, 22.5%.

当变幅杆压力过小时, 变幅杆与工件之间的接触不良, 超声波传递到介质的界面处反射严重, 造成大量的能量损失, 只有少部分的超声通过界面传递到工件中, 超声传入效率很低, 焊缝的力学性能仅略有改善. 当变幅杆压力较大时, 虽然变幅杆端部与工件表面接触良好, 但工件对变幅杆的反作用力也较大, 导致变幅杆在产生超声振动时受阻, 同样会有较大的超声能量损失, 造成超声波的传入效率降低. 但施加超声对焊接接头软化有很好的改善作用, 这与超声振动促进了熔池流动, 使焊缝中元素分布更加均匀有关.

3.3 微观组织

图8为激光填丝焊接与超声辅助激光填丝焊接焊缝截面的光学显微组织照片. 由图8(a)和(b)可知未施加超声波辅助时, 焊缝熔合线附近为柱状晶带, 生长方向指向焊缝中心. 由于垂直于熔合线方向的温度梯度最大, 熔池冷却时晶粒在该方向生长最快, 形成粗大的树枝晶主干. 由图8(d)和(e)可知, 施加超声后焊缝熔合线附近的柱状晶区基本消失, 该区域主要为细小的等轴晶, 只有极个别的晶粒呈现柱状. 对比图8(c)和(f)可知, 未施加超声时, 焊缝中心区域等轴晶较粗大. 施加超声后, 整个熔池的温度更为均匀, 焊缝中心区域的等轴晶较未施加超声时明显细化. 使用粒度分析工具NanoMeasurer对焊缝中心区域的等轴晶尺寸进行分析, 焊缝中心区域的等轴晶尺寸分布如图9所示. 由图9

图7 (网络版彩图)变幅杆压力对焊缝力学性能的影响. (a) 抗拉强度和延伸率; (b) 焊缝中心区域硬度
Figure 7 (Color online) Effect of horn pressure on mechanical properties of weld. (a) Tensile strength and elongation; (b) hardness of weld center area.

图 8 (网络版彩图)焊接接头光学显微组织。(a)~(c) 激光填丝焊接宏观焊缝截面、熔合线及焊缝中心区域; (d)~(f) 超声辅助激光填丝焊接宏观焊缝截面、熔合线及焊缝中心区域

Figure 8 (Color online) Optical microstructure of welded joints. (a)~(c) Laser fill wire welding macro weld seam section, weld line and weld center area; (d)~(f) ultrasonic assisted laser filler wire welding macro weld seam section, weld line and weld center area.

图 9 焊缝中心区域等轴晶尺寸分布

Figure 9 Equiaxed crystal size distribution in the center of weld.

可知未施加超声时, 焊缝中心区域等轴晶尺寸集中在 97~117 μm . 施加超声后, 焊缝中心区域等轴晶尺寸集中在 66~79 μm .

超声振动对于焊缝组织的影响, 主要是由于超声的空化效应、声流效应和机械搅拌效应. 一方面超声振动改变了熔池中的温度分布, 改变晶粒生长方向. 焊接熔池边缘界面、枝晶间隙及高熔点夹杂物为空化气泡提供了大量的形核表面. 在超声周期性的压力作用下, 空化气泡反复收缩、膨胀, 气泡在膨胀过程中需要从周围吸收能量以克服液体压力做功, 从而在其周围产生局部过冷度. 超声的空化效应产生的局部震荡作用与

声流效应产生的层间流动共同促进熔池流动, 显著降低了熔池中的温度梯度, 进而改变晶粒生长取向. 另一方面超声振动增加了熔池中的形核质点, 提高了形核率. 当超声振动的频率小于空化气泡振动频率时空化气泡崩溃, 气泡崩溃产生的冲击波作用于熔池边缘界面和枝晶间隙, 击碎凝固界面前沿正在生长的枝晶. 脱落的枝晶碎片被流动的液态金属卷入熔池中, 形成大量的形核质点, 促进粗大树枝晶向细小等轴晶转变. 综上所述, 超声振动降低了熔池中的温度梯度, 增加了形核质点, 抑制粗大柱状晶的定向生长, 促进细小等轴晶的生成. 因此, 施加超声后熔合线附近的柱状晶区基本消失, 焊

缝中心区域的等轴晶尺寸也显著减小。

4 结论

采用超声换能器和光纤激光器研究了5A06铝合金超声辅助激光填丝焊接特性。研究结果表明, 采用超声辅助激光填丝焊接5A06铝合金可以获得良好的焊

缝成形, 超声振动增强了熔池的稳定性和流动性, 焊缝背面熔宽显著增加。超声波的引入有效地提高了焊接接头抗拉强度和延伸率, 对接头软化有很好的改善作用, 接头抗拉强度达到293.1 MPa, 延伸率达到了13.1%, 分别达到母材的92.9%和86.2%。超声波的引入促使晶粒细化, 焊缝中心区域的等轴晶尺寸集中在66~79 μm , 细晶强化作用提高了接头的力学性能。

参考文献

- 1 Wang C W, Qu S Y, Wang X H, et al. Research status and development trend of laser welding of aluminum alloy (in Chinese). *Met Process*, 2008, 8: 38–40 [王承伟, 曲仕尧, 王新洪, 等. 铝合金激光焊接的研究现状和发展趋势. *金属加工*, 2008, 8: 38–40]
- 2 Chen Y B, Cao L J. State of the study of laser welding of aluminum alloys (in Chinese). *Weld Join*, 2001, 3: 9–12 [陈彦宾, 曹丽杰. 铝合金激光焊接研究现状. *焊接*, 2001, 3: 9–12]
- 3 Yuan H R, Lin S B, Yang C L, et al. Microstructure and porosity analysis in ultrasonic assisted TIG welding of 2014 aluminum alloy. *China Weld*, 2011, 20: 39–43
- 4 Fan C L, Yang C L, Lin S B, et al. Arc character of the ultrasonic-wave assisted GMAW. *Weld J*, 2013, 91: 375–380
- 5 Arivazhagan N, Singh S, Prakash S, et al. Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding. *Mater Des*, 2011, 32: 3036–3050
- 6 Ghosh M, Kumar K, Kailas S V, et al. Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys. *Mater Des*, 2010, 31: 3033–3037
- 7 Cretteur L, Iaan J K, Marya S. Flux development to improve CO₂ laser welding of aluminum-application to alloy 6061. *Weld Res Abroad*, 2000, 46: 4–11
- 8 Zhang Z Y, Tian Z L, Peng Y. Advanced welding technology of aluminum alloy (in Chinese). *Weld Join*, 2003, 7: 5–9 [张志勇, 田志凌, 彭云. 铝合金先进焊接工艺. *焊接*, 2003, 7: 5–9]
- 9 Kutsuna M, Yan Q. Study on porosity formation in laser welds in aluminium alloys (Report 1): Effects of hydrogen and alloying elements. *Welding Int*, 1998, 12: 937–949
- 10 Chen Y B, Li L Q, Peng X Y. Joint performance in laser welding Al alloy with filler wire. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2005, 15: 87–91
- 11 Chen K, Yang W X, Xiao R S. Laser welding of some aluminum alloys with powder (in Chinese). *Appl Laser*, 2005, 25: 222–226 [陈恺, 杨武雄, 肖荣诗. 几种高强铝合金的激光填粉焊接. *应用激光*, 2005, 25: 222–226]
- 12 Lei Z L, Li Y, Chen Y B, et al. Effect of process parameters on porosity formation ratio in dual-beam laser welding of aluminum alloys with wire (in Chinese). *Trans China Weld Inst*, 2013, 34: 40–44, 115 [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. *焊接学报*, 2013, 34: 40–44, 115]
- 13 Fan D, Zhang R H, Nakata K. YAG laser welding with surface activating flux. *China Weld*, 2003, 12: 83–86
- 14 Mathieu A, Pontevicci S, Viala J, et al. Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si). *Mater Sci Eng-A*, 2006, 435–436: 19–28
- 15 Chen J S, Lu Y, Li X R, et al. Gas tungsten arc welding using an arcing wire. *Weld J*, 2012, 91: 261–269
- 16 Lei Z L, Chen Y B, Li Y, et al. Experimental study on CO₂ laser-TIG arc hybrid welding of Al alloy (in Chinese). *Aeronaut Manuf Technol*, 2012, 4: 35–37 [雷正龙, 陈彦宾, 李颖, 等. 铝合金CO₂激光-TIG电弧复合焊接试验研究. *航天制造技术*, 2012, 4: 35–37]
- 17 Puga H, Costa S, Barbosa J, et al. Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi₉Cu₃ alloy. *J Mater Process Tech*, 2011, 211: 1729–1735
- 18 Guo W, Luan T, Leng X, et al. Interfacial microstructure evolution and mechanical properties of Al/Sn joints by ultrasonic-assisted soldering. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2017, 27: 962–970
- 19 Fan Y Y, Fan C L, Yang C L, et al. Research on short circuiting transfer mode of ultrasonic assisted GMAW method. *Sci Tech Weld Join*, 2012, 17: 186–191

- 20 Alavi S H, Harimkar S P. Melt expulsion during ultrasonic vibration-assisted laser surface processing of austenitic stainless steel. *Ultrasonics*, 2015, 59: 21–30
- 21 Venkannah S, Mazumder J. Changes in laser weld bead geometry with the application of ultrasonic vibrations. In: Si A, Len G, David W H, et al., eds. *Proceedings of the World Congress on Engineering Vol II*. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 1612–1617
- 22 Kim J S, Watanabe T, Yoshida Y. Ultrasonic vibration aided laser welding of Al alloys: Improvement of laser welding-quality. *J Laser Appl*, 1995, 7: 38–46
- 23 Lei Z, Bi J, Li P, et al. Analysis on welding characteristics of ultrasonic assisted laser welding of AZ31B magnesium alloy. *Optics Laser Tech*, 2018, 105: 15–22
- 24 Xu F, Chen L, Gong S L, et al. Effect of filler wire on laser welding of 6061 aluminum alloy (in Chinese). *Aviat Precis Manuf Technol*, 2012, 48: 40–42 [许飞, 陈俐, 巩水利, 等. 填充焊丝对6061铝合金激光焊缝成形的影响. *航空精密制造技术*, 2012, 48: 40–42]

Study on the formation of welding, microstructure, and properties of 5A06 aluminum alloy by ultrasonic laser-assisted filler welding

GUO HengTong¹, ZHANG DengMing², ZHAO YaoBang², LEI ZhengLong¹, LI Qian¹, YANG YuChen³ & XU YanLi³

¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

² Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;

³ Beijing Aerospace Fresh Air Machinery and Equipment Co., Ltd, Beijing 100854, China

Ultrasonic assisted laser welding with filler wire test of 5A06 aluminum alloy was carried out by ultrasonic transducer and fiber laser. The welding characteristics of 5A06 aluminum alloy laser welding with filler wire and ultrasonic assisted laser welding with filler wire were compared and analyzed. The experimental results showed that the use of ultrasonic assisted laser welding with filler wire can achieve good weld formation, the fluidity and uniformity of the molten pool is stronger, and the weld width on the back of the weld is significantly increased. The joint's tensile strength exceeded 293.1 MPa after ultrasonic application, and the elongation reached 13%, touching 93% and 86.7% of the base metal, respectively. The area of the columnar crystal near the fusion line of the weld greatly vanished. Ultrasonic wave application increased the nucleation sites in the molten pool, reducing the work of nucleation. The columnar crystals have been converted into small equiaxed crystals and the range of equiaxed crystal sizes in the center of the weld is reduced to 66–79 μm from 97–117 μm .

laser technique, ultrasonic vibration, laser filler wire welding, aluminum alloy

doi: [10.1360/SST-2019-0407](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0407)