

高反射率材料 AZ31 调制激光焊能量耦合行为的研究

宁 杰¹, 张林杰¹, 张兴军²

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 陕西汉德车桥有限公司, 陕西 西安 710201)

摘 要: 已有研究表明在镁合金、铝合金及铜合金等高反射率材料激光焊接中, 通过采用适当的功率调制措施可以增大熔深、减少飞溅和气孔等缺陷。本研究对这一现象背后的物理机制进行了初步探索。基于三元二次正交回归试验设计, 进行了 AZ31 镁合金的正弦调制激光焊试验。获得了平均功率(P_A)、调制振幅(A)和调制频率(F)对焊缝横截面面积(A_{FZ})的影响规律。结果表明: P_A 较小时功率调制措施可以显著改善焊接过程能量耦合效率, 随着 P_A 的增大功率调制的促进作用减弱甚至消失; P_A 较小时“小振幅+高频率”和“大振幅+低频率”的 2 种条件都可以增大焊缝 A_{FZ} 。获得并比较了频率 8 Hz 正弦调制焊接在“不锈钢(反射率约 60%)+镁合金(反射率约 80%)”双金属试板中形成的焊缝纵截面形貌。发现功率从瞬时最大值开始减小时, 低反射率材料 2205 中的熔深马上开始同步减小, 而高反射率材料 AZ31 中熔深开始减小的时刻则滞后了 0.036 s (约占一个正弦周期的 30%)。分析认为, 高反射率材料激光焊过程中利用大于 AP 的瞬时功率峰值形成大深宽比小孔后会使激光在小孔内反射次数增加, 因此在激光瞬时功率下降的过程中也可以使大深宽比小孔继续维持大约三分之一正弦周期。大深宽比小孔能够形成并且在较长时间内维持存在是调制措施能够改善高反射率材料激光焊能量耦合效率的关键所在。

关键词: 激光焊; 功率调制; AZ31 镁合金; 能量耦合效率; 正交回归试验设计

中图分类号: TG401

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-1437-08

镁合金具有质轻、环保等特性, 被誉为 21 世纪绿色工程材料^[1], 其激光焊接技术也受到国内外学者的广泛关注。王向杰等人研究了压铸镁合金熔焊过程气孔的形成机制^[2]; 单际国等人提出通过优化保护气条件或在焊接过程中添加填充材料可以减少气孔^[3]; J. Zhang 等人发现通过控制热输入可以减少压铸镁合金激光焊过程的气孔^[4]; X. L. Chen 等人^[5]研究了晶粒尺寸和沉淀物对 AZ61 镁合金激光焊接头液化裂缝的影响; J. Shen 等人^[6]研究了焊接速度对 AZ61 镁合金焊接接头组织和力学性能的影响; Jun Dai 等人^[7]比较了 3 种镁合金 (ZK60、AZ31 和稀土镁合金 NZ30K) 大功率 CO₂ 激光焊的显微组织和拉伸性能; 李正等人^[8]发现采用激光熔修可以改善 AZ31B 镁合金焊趾区材料的疲劳性能; J. Shen^[9]和刘黎明等人^[10]研究了活性剂对镁合金激光焊接的影响。Ming Gao 等人^[11]对 AZ31 镁合金激光-电弧复合焊接工艺及接头特性进行了研究; 李俐群等人^[12]对比分析了光纤激光与 CO₂ 激光的

镁合金焊接特性; 刘军、丁文兵等人分别分析了 AZ91D 镁合金光纤激光焊接 (FLW) 接头^[13]和 CO₂ 激光对接接头微观组织特征^[14]。C. Li 等人^[15]比较了电弧焊、激光焊、激光-电弧复合焊镁合金 T 型接头的焊接性。

近年来, 激光功率调制对激光深熔焊接过程的影响逐渐被很多研究者关注和报道。Kuo 和 Jeng^[16]发现对激光功率调制后, SUS304 不锈钢和 Inconel690 合金的 Nd:YAG 激光焊接接头中的气孔数量显著减少, 并且熔深有所增大。A. Matsunawa 等人^[17]发现通过对 CO₂ 激光功率进行调制, 可以减少 A5083 铝合金 CO₂ 激光焊焊缝中的气孔数量。Kawaguchi 等人^[18]发现调制振幅越大则 CO₂ 激光焊焊缝中气孔数量越少。Blackburn 等人^[19]将激光功率调制焊接技术用于钛合金的 Nd:YAG 激光焊接, 并且发现采用适当的激光功率调制振幅可以消除焊缝下表面的咬边缺陷。研究发现功率调制对高反射率材料激光焊接过程稳定性和热

收稿日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (51275391)

作者简介: 宁 杰, 女, 1990 年生, 硕士生, 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049, E-mail: ningjie2013@stu.xjtu.edu.cn; zhanglinjie@mail.xjtu.edu.cn

效率的影响十分显著。A. Heider 等人发现对激光功率正弦调制后不仅能够显著提高高反射率紫铜激光焊焊缝的熔深,而且能够减少紫铜 FLW 过程中的气孔和飞溅^[20],并进一步发现在合适的调制频率下紫铜 FLW 过程中小孔的稳定性被显著地改善^[21]。

工业领域最常用的激光为波长 1 μm 左右的红外激光,而室温下镁合金对波长 1 μm 左右激光的吸收率只有 8%~20%^[22]。本作者曾开展了功率正弦调制的 AZ31 镁合金 FLW 试验,结果表明将激光功率调制焊接技术应用于镁合金的焊接,可以增大焊缝熔深,如图 1 所示。研究表明在焊接速度为 5 m/min 时,常功率 FLW 和正弦波调制 FLW 将 2.7 mm 厚试板焊透需要的平均激光功率分别为约 3 和 2 kW^[23]。本实验将进一步分析功率调制对 AZ31 镁合金 FLW 过程能量耦合效率的影响,并对功率调制影响高反射率材料 FLW 过程能量耦合效率的机理进行初步试验研究。

1 实验

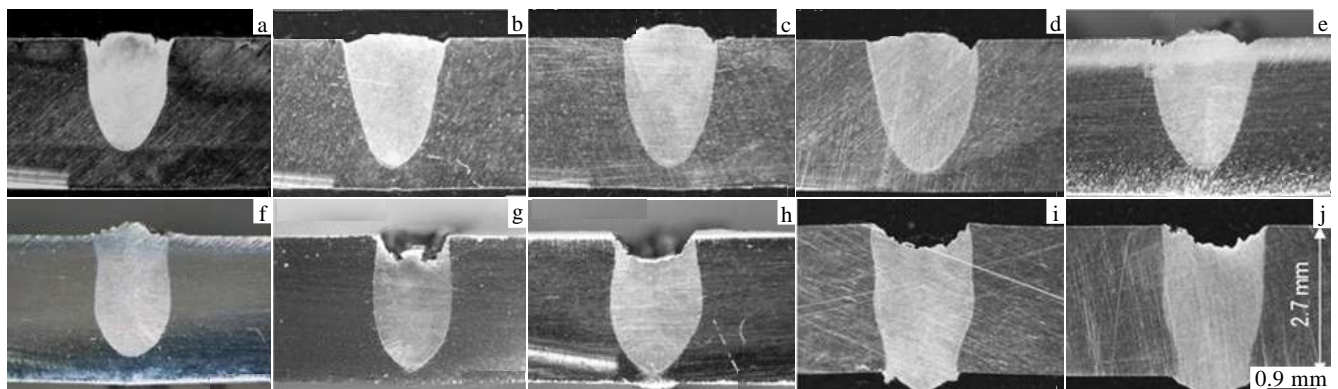


图 1 正弦调制焊接 AZ31 焊缝横截面形貌

Fig.1 Cross-section morphologies of sine modulated FLW welding ($P_A=2000$ W, Amplitude=500 W, welding speed=5 m/min)^[23]:
(a) 0 Hz, (b) 100 Hz, (c) 200 Hz, (d) 300 Hz, (e) 400 Hz, (f) 500 Hz, (g) 600 Hz, (h) 700 Hz, (i) 800 Hz, and (j) 900 Hz

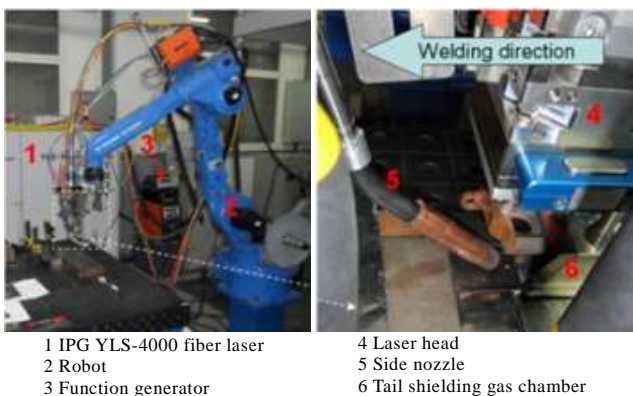


图 2 机器人-激光焊接系统

Fig.2 Robot-laser welding system

如图 2 所示, 试验所用激光器为 IPG YLS-4000 型光纤激光器。采用函数发生器实现对激光功率的正弦调制。为了防止材料对激光反射而损伤保护镜和聚焦透镜, 激光头向后倾斜 10°。焊接过程中, 工件上下表面用氩气进行保护。

试验中首先进行了以 A 、 F 和 P_A 为变量的三因素五水平回归正交试验。试验材料为 120 mm×25 mm×8 mm 的 AZ31 镁合金试板。焊后取横截面, 计算各横截面熔化区面积作为回归正交试验的结果值, 计算回归系数得到描述调制焊接工艺参数与焊缝横截面面积之间关系的三元二次回归方程。根据回归方程进一步分析各参数对能量耦合效率的影响。

随后对功率调制影响高反射率材料 FLW 过程能量耦合行为的机理进行了研究。试验方法如图 3 和图 4 所示: 在较低的调制频率下进行“2205 +AZ31”双金属试板激光焊接试验, 焊后比较同一焊接过程在不锈钢侧和镁合金侧形成的焊缝纵截面形貌, 分析调制对高反射率材料能量耦合效率的影响机理。试验所用

2205 双相不锈钢和 AZ31 镁合金板尺寸为 100 mm×30 mm×8 mm, 试验中不锈钢板和镁合金板的对接方式如图 3 所示, 图 4 为试验各阶段双金属试样的表面形貌。焊前用砂纸打磨去除试样表面氧化膜, 然后用丙酮清除油污。在焊接过程中, 焊接速度为 5 m/min, 离焦量为 0 mm。

2 结果与讨论

2.1 调制焊接参数对 AZ31 激光焊能量耦合效率的影响

为了研究调制参数对 AZ31 镁合金激光能量耦合效率的影响, 在 8 mm 厚镁合金板上进行了以 A 、 F 和

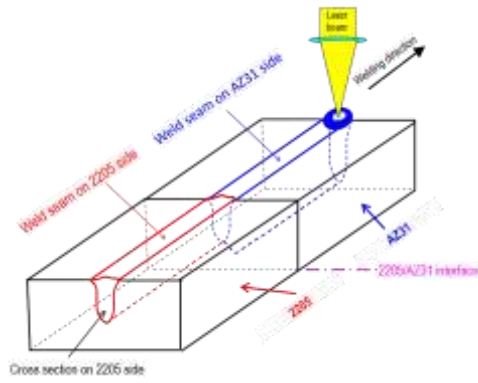


图 3 “不锈钢+镁合金”对齐后进行激光焊接的示意图
Fig.3 Schematic diagram of laser welding on assembled “stainless steel+Mg alloy”

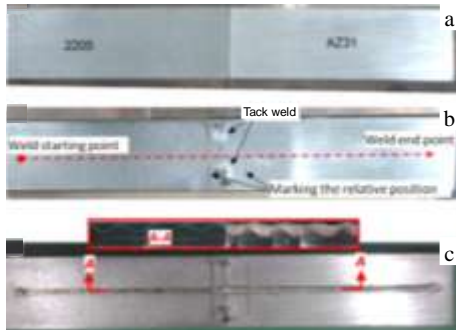


图 4 “不锈钢+镁合金”双金属试板在 FLW 各阶段的表面形貌

Fig.4 Appearances of “stainless steel+ Mg alloy” bimetallic specimen in various stages of FLW: (a) before bead welding, (b) after track welding, and (c) after bead welding

P_A 为变量的回归正交试验。试验参数和结果如表 1 和图 5 所示。由于激光能量耦合效率很难直接通过试验方法检测，本次试验采用不同条件下的焊缝横截面熔化区面积(A_{FZ})来分析和间接反映调制参数对 AZ31 激光焊接过程能量耦合行为的影响。焊缝横截面面积的具体计算过程如下：首先拍摄得到相同分辨率(300PPI)的一系列焊缝横截面金相照片，保证拍摄方向垂直于试样横截面；将横截面金相照片导入 CAD 软件中，用曲线勾勒区域轮廓，并使用 BO 命令提取轮廓使区域闭合，最后使用 AA 命令得到熔化区域面积。在此需要说明的是：试板原始表面以上的余高部分不能计入熔化区面积(试验中不填焊丝，有余高是因

表 1 8 mm 厚 AZ31 镁合金回归正交试验参数与试验结果

Table 1 Regression orthogonal test parameters and results for 8 mm AZ31

| A/W | F/Hz | P_A/W | A_{FZ}/mm^2 |
|-------|--------|---------|---------------|
| 800 | 800 | 2800 | 5.73 |
| 800 | 800 | 1200 | 1.38 |
| 800 | 200 | 2800 | 6.24 |
| 800 | 200 | 1200 | 1.68 |
| 200 | 800 | 2800 | 6.30 |
| 200 | 800 | 1200 | 1.74 |
| 200 | 200 | 2800 | 6.72 |
| 200 | 200 | 1200 | 1.16 |
| 865 | 500 | 2000 | 2.99 |
| 136 | 500 | 2000 | 3.62 |
| 500 | 865 | 2000 | 3.66 |
| 500 | 136 | 2000 | 3.44 |
| 500 | 500 | 2972 | 5.57 |
| 500 | 500 | 1028 | 1.03 |
| 500 | 500 | 2000 | 3.37 |

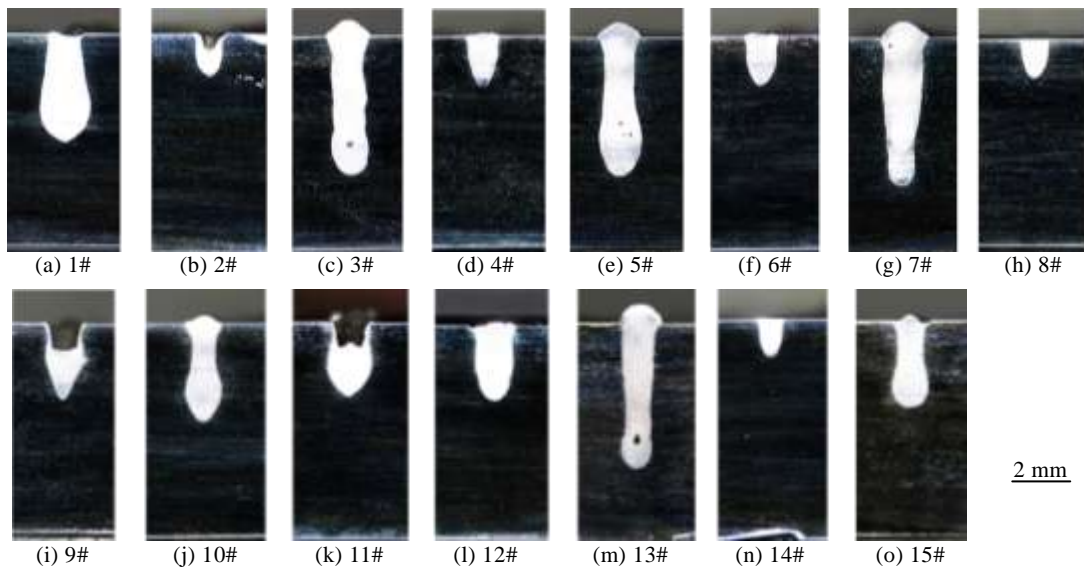


图 5 回归正交试验焊缝形貌

Fig.5 Weld cross-section morphologies obtained by regression orthogonal design based FLW test^[23]

为焊缝中有气孔等缺陷); 试板原始表面以下的未焊满部分或气孔部分要计入熔化区面积(因为该位置金属是熔化后才损失掉的)。

为了研究低热效率区域随平均功率的增大而移动的规律, 分别取不同平均功率下的最低热效率点, 对应调制焊接参数如表 2。

根据表 2 中试验结果可以得到描述调制焊接工艺参数和横截面熔化区面积之间关系的回归方程

$$s = 3.64 - 0.15x_1 - 0.04x_2 + 2.24x_3 - 0.12x_1x_2 - 0.15x_1x_3 - 0.15x_2x_3 + 0.19(x_1^2 - 0.73) + 0.31(x_2^2 - 0.73) + 0.19(x_3^2 - 0.73) \quad (1)$$

其中, x_1 为振幅, x_2 为频率, x_3 为平均功率。

通过方差分析对回归方程进行显著性检验, 得到该回归方程的置信度为 99% 以上。图 6 中比较了由回归方程计算得到的横截面 A_{FZ} 值和实际测量的横截面 A_{FZ} 值, 可以看到计算结果与试验结果吻合较好。

根据回归方程可以得到不同平均功率下调制振幅和频率对 A_{FZ} 的影响规律, 如图 7 所示, 可以看到: (i) 随着平均功率的增大, 熔化区面积显著增大; (ii) 功率调制措施的效果与平均功率大小密切相关, 平均功率较小时通过功率调制可以使激光焊过程能量耦合效率显著提高, 而随着平均功率的增大功率调制措施对能量耦合效率的促进作用逐渐减弱甚至消失; (iii) 平均功率较小时“小振幅+高频率”和“大振幅+低频率”的 2 种组合都可以使焊接过程能量耦合效率提高, 其中前一种组合的作用更显著。从图 7 还可以看到, 在振幅和频率都取中间值时热效率比较低, 并且随着平

均功率的逐渐增大, 低热效率区域逐渐向“高频率+大振幅”组合的方向移动。

对比热效率最低点的焊接参数, 可以发现最低热效率点的振幅与平均功率, 频率与振幅之间均近似呈线性关系, 如图 8、9 所示, 拟合直线方程如下:

表 2 最低热效率点对应焊接参数
Table 2 Welding conditions corresponding to the lowest thermal efficiency

| P_A/W | A/W | F/Hz |
|---------|-------|--------|
| 1028 | 461 | 435 |
| 1500 | 539 | 487 |
| 2000 | 642 | 539 |
| 2500 | 719 | 590 |
| 2972 | 823 | 642 |

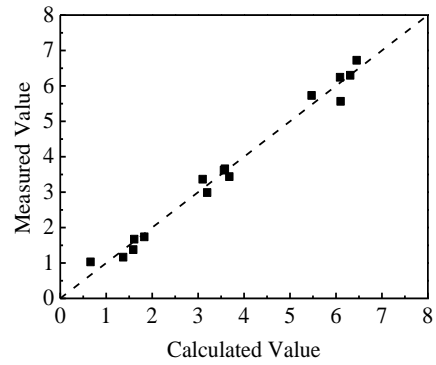


图 6 横截面熔化区面积测量值与计算值比较

Fig.6 Comparison of cross-section A_{FZ} between test and calculation

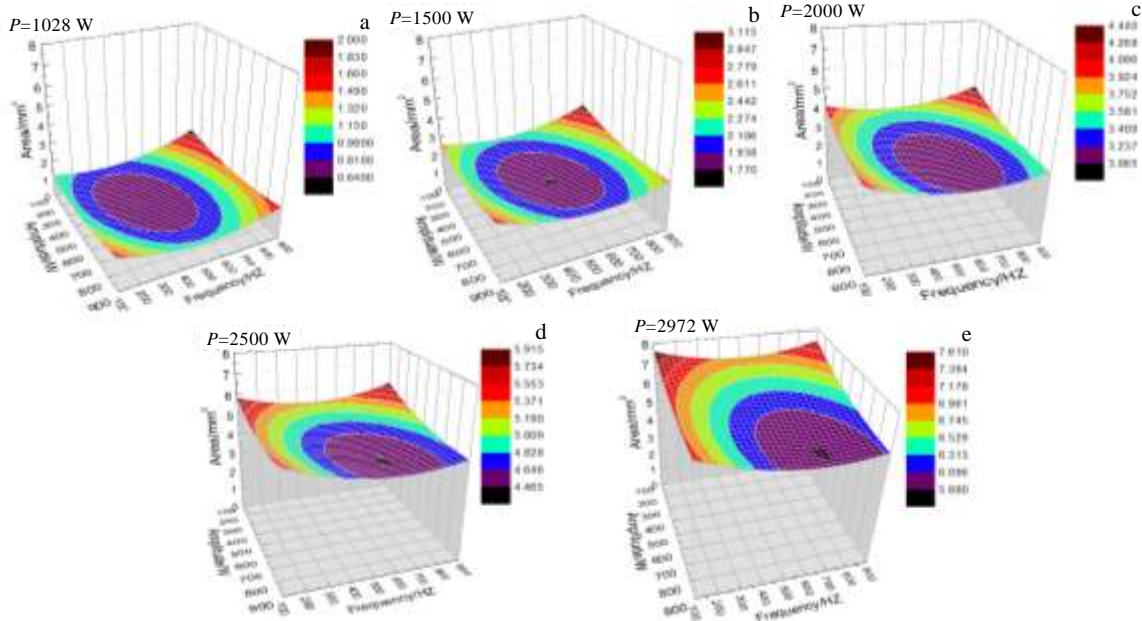


图 7 不同平均功率下振幅和频率对 A_{FZ} 的影响

Fig.7 Effects of A and F on the A_{FZ} at different P_A

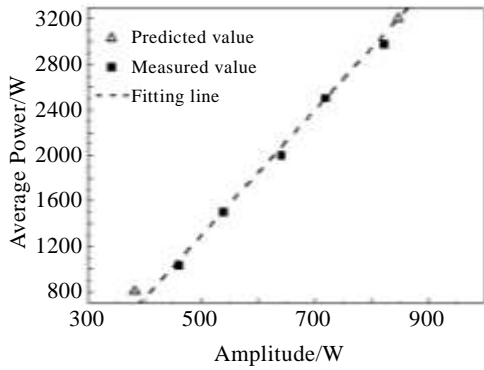


图 8 最低热效率点 P_A - A 关系曲线

Fig.8 P_A - A curve of the case with the lowest thermal efficiency

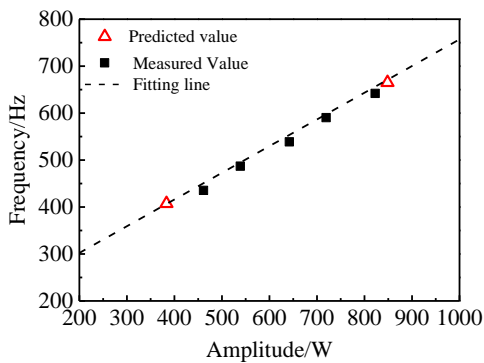


图 9 最低热效率点 F - A 关系曲线

Fig.9 F - A curve of the case with the lowest thermal efficiency

$$P_A = 5.48A - 1440.28 \quad (2)$$

$$F = 0.57A + 190.05 \quad (3)$$

通过回归方程计算得到平均功率为 800 和 3200 W 时 A_{FZ} 随调制振幅和频率变化关系如图 10 所示, 取热效率最低点时对应的焊接参数, 可以看到这两点依然基本符合 P_A - A 、 F - A 拟合直线方程, 如图 8、9。因此, 在调制焊接时, 可以通过式(2)和式(3)对调制焊接工艺参数的优劣进行初步评估。

2.2 功率调制措施影响 AZ31 激光焊能量耦合行为的机理

在 2000 W 的恒定功率下进行焊接, 得到的焊缝横截面如图 11 所示, 得到的焊缝纵截面如图 12a 所示, 恒定功率焊接时, 2205 双相不锈钢的熔深约为 2.1 mm, AZ31 镁合金的熔深约为 3.2 mm。采用 2000 W 的平均功率, 8 Hz 的调制频率, 1000 W 的振幅进行调制焊接, 得到的焊缝纵截面熔深变化如图 12b, 将其与功率调制波形图进行比较, 如图 13 所示。从图 13 可以看到, 对于 2205 双相不锈钢, 瞬时功率最大处对应最大的熔深, 焊缝熔深的变化趋势与激光波形的变化趋势基本同步。而当激光束从 2205 双相不锈钢

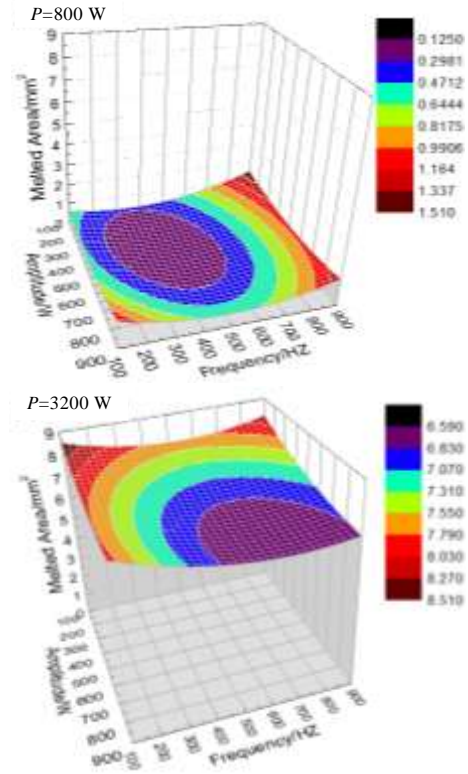


图 10 不同平均功率下振幅和频率对 A_{FZ} 的影响

Fig.10 Effects of A and F on A_{FZ} in different P_A

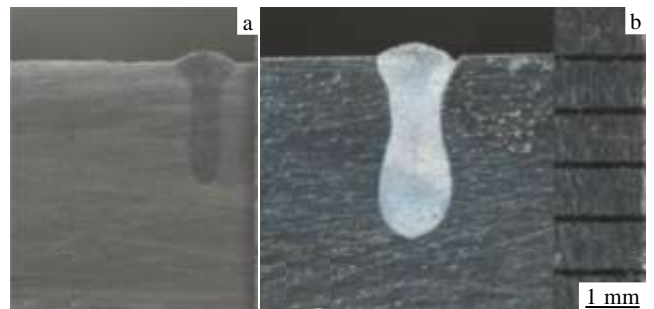


图 11 恒定功率下的焊缝横截面形貌

Fig.11 Cross-sectional morphology obtained by constant power welding: (a) AZ31 and (b) 2205 stainless steel ($P=2000$ W, $V=5$ m/min)



图 12 焊缝中心处纵截面形貌

Fig.12 Longitudinal section morphology of weld seam center: (a) without modulation and (b) with modulation ($P_A=2000$ W, $F=8$ Hz, $A=1000$ W, $V=5$ m/min)

侧进入高反射率的 AZ31 镁合金侧后, 焊缝最大熔深出现的时刻比激光功率峰值出现的时刻延迟了 0.036 s

(约为一个周期的 30%),且在随后的调制 FLW 过程中, AZ31 镁合金的焊缝最大熔深位置相对于激光波形的瞬时最大功率位置一直有所延后,激光功率开始衰减时, AZ31 镁合金的焊缝熔深仍可以继续维持(甚至略有增加),瞬时最大熔深约为 4.2 mm。

图 14 是 AZ31 激光焊接过程中拍摄到的小孔孔口典型形貌,根据熔宽测量结果可以估算出小孔的半径约为 0.5 mm。假设小孔为圆锥状,小孔孔深近似等于焊缝熔深,则可以根据小孔半径和熔深估算出小孔孔壁的倾斜角度 θ 。AZ31 激光焊熔深为 3.2 mm 时小孔孔壁的倾斜角度 θ 约为 8.9° ,当 AZ31 激光焊熔深为 4.2 mm 时小孔孔壁的倾斜角度 θ 约为 6.8° 。

A. Kaplan^[24]曾经计算过小孔孔壁倾斜角度 θ 对激光束在小孔内平均反射次数的影响,结果如图 15 所示。从图 15 可以看到,熔深 3.2 mm 时激光束在小孔内的平均反射次数约为 5 次。对激光功率进行调制后瞬时最大功率远大于平均功率,试验结果表明在瞬时最大功率作用的一段时间内小孔瞬时深度将增大,如图 12 所示。本实验条件下 AZ31 常功率焊接熔深约为 3.2 mm,而调制焊接瞬时最大熔深约为 4.2 mm。熔深为 3.2 mm 时经过 5 次反射吸收后,材料反射率约为

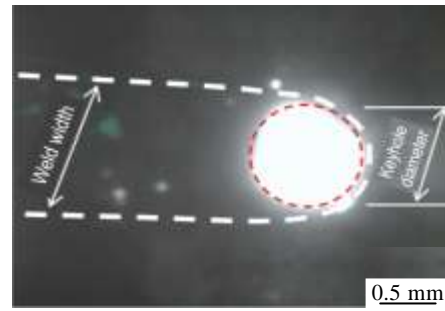


图 14 AZ31 激光焊接过程中拍摄到的小孔孔口典型形貌
Fig.14 Typical morphology of keyhole orifice captured in the laser welding process of AZ31

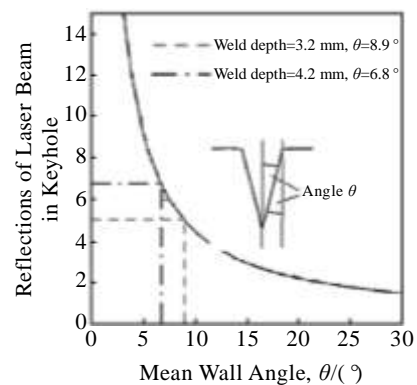


图 15 圆锥型小孔孔壁倾斜角度 θ 对激光束在小孔内平均反射次数的影响
Fig.15 Effects of mean wall angle on average reflection times of laser beam in the keyhole^[24]

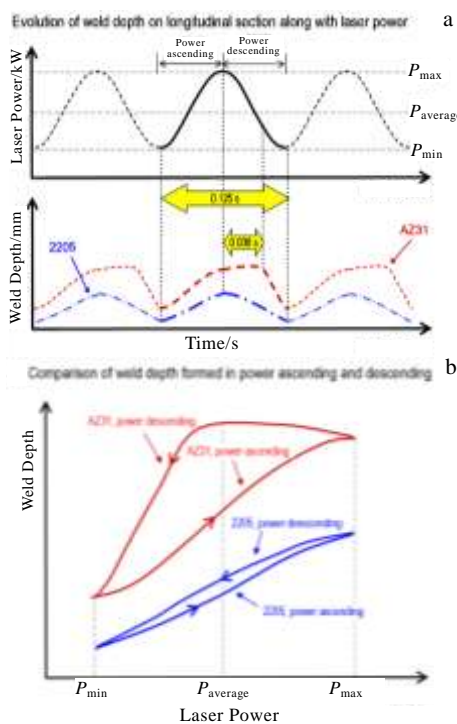


图 13 调制 FLW 中高反射率 AZ31 和低反射率 2205 中熔深演变的比较
Fig.13 Comparison of weld depth evolution in modulated laser welding between high reflective AZ31 and low reflective 2205

80% 的 AZ31 激光焊过程中还剩余约 32.7% 的激光能量未被工件吸收。由于经过 5 次反射后剩余激光能量还比较多,瞬时熔深增大后激光束在小孔内反射次数的增加必然导致能量耦合效率明显提高,从而使维持小孔的作用力增强。

进行功率调制后,在瞬时最大功率作用的一段时间内反射率较低的 2205 激光焊过程中瞬时小孔深度也会增大,并进一步使激光束在小孔内反射次数增加。但是由于材料对激光的反射率较低,此时激光束在小孔内反射次数的增加对能量耦合效率的影响并不明显。不妨以激光束在小孔内反射 5 次为例,经过 5 次反射吸收后,反射率约为 60% 的 2205 激光焊过程中只剩余 7.7% 的激光能量未被工件吸收。显然,由于剩余激光能量较少,即使瞬时熔深增大后激光束在小孔内反射次数增加,也不会对焊接过程的能量耦合效率产生明显的影响,因此调制对其焊接过程能量耦合效率影响不大。

3 结 论

1) 获得了描述调制焊接工艺参数与焊缝横截面面积关系的三元二次回归方程, 预测结果与试验结果具有较好的一致性。

2) 采用调制激光焊接时, 随平均功率增大, 高反射率材料的热效率显著增大, 低热效率区域逐渐向“大振幅+高频率”组合的方向移动; 最低热效率点的焊接参数之间具有线性关系。

3) 功率调制对AZ31镁合金激光焊焊缝横截面面积的影响规律与激光平均功率密切相关, 平均功率较小时通过功率调制可以显著提高焊接过程能量耦合效率, “小振幅+高频率”或“大振幅+低频率”都可以使能量耦合效率显著提高; 随着平均功率的增大功率调制对耦合效率的改善作用逐渐减弱并最终完全消失。

4) 大深宽比小孔能够形成并且在较长时间内维持存在是功率调制措施能够显著改善高反射率材料激光焊能量耦合效率的关键所在。

参考文献 References

- [1] Quan Yajie(全亚杰). *Laser & Optoelectrics Progress*[J], 2012, 49(5): 50 001
- [2] Wang Xiangjie(王向杰), You Guoqiang(游国强), Zhang Juncheng(张均成) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2012, 48(12): 1437
- [3] Shan Jiguo(单际国), Zhang Jing(张婧), Zheng Shiqing(郑世卿) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(A03): 234
- [4] Zhang J, Shan J G, Ren J L *et al. Welding Journal*[J], 2013, 12: 13
- [5] Chen X L, Yan H G, Chen J H *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2013, 18(6): 458
- [6] Shen J, Wen L, Li Y *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 578: 303
- [7] Dai Jun, Huang Jian, Li Zhuguo *et al. International Journal of Materials Research*[J], 2012, 103(10): 1218
- [8] Li Zheng(李正), Wu Shengchuan(吴圣川), Xu Daorong(徐道荣) *et al. Failure Analysis and Prevention*(失效分析与预防)[J], 2011, 6(4): 209
- [9] Shen J, Wang L Z, Zhao M L *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2012, 17(8): 665
- [10] Sun Hao(孙昊), Zhang Zhaodong(张兆栋), Liu Liming(刘黎明). *Transactions of China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2007, 28(4): 49
- [11] Gao Ming, Mei Shuwen, Wang Zemin *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212(6): 1338
- [12] Tan Caiwang(檀财旺), Li Liqun(李俐群), Chen Yanbin(陈彦宾) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2011, 38(6): 166
- [13] Liu Jun(刘军), Dong Junhui(董俊慧), Shinozaki K. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(S3): 202
- [14] Ding Wenbing(丁文兵), Tong Yangang(童彦刚), Deng Dean(邓德安) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2014(2): 220
- [15] Li C, Liu L. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 65(1-4): 27
- [16] Kuo T Y, Jeng S L. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2005, 38(5): 722
- [17] Matsunawa A, Mizutani M, Katayama S *et al. Welding International*[J], 2003, 17: 431
- [18] Kawaguchi I, Tsukamoto S, Arakane G *et al. Welding International*[J], 2006, 20: 100
- [19] Blackburn J E, Allen C M, Hilton P A *et al. Science and Technology of Welding & Joining*[J], 2010, 15(5): 433
- [20] Heider A, Stritt P, Hess A *et al. Physics Procedia*[J], 2011, 12: 81
- [21] Heider A, Sollinger J, Abt F *et al. Physics Procedia*[J], 2013, 41: 112
- [22] Haferkamp H, Goede M, Bormann A *et al. Proc LANE: Laser Assist Net Shape Eng*[J], 2001, 3: 333
- [23] Zhang L J, Zhang X J, Ning J *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 76(1-4): 721
- [24] Kaplan A. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 1994, 27(9): 1805

Energy Coupling Behavior in Modulated Fiber Laser Welding of High Reflectivity AZ31 Mg Alloy

Ning Jie¹, Zhang Linjie¹, Zhang Xingjun²

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Shaanxi HanDe Axle Ltd, Xi'an 710201, China)

Abstract: Previous researches show that appropriate power modulation methods can increase the weld penetration and decrease the drawbacks of splatters and pores in laser welding for the high reflectivity materials such as magnesium alloy, aluminium alloy and copper alloy. This paper conducted tentative explorations to the underlying physical mechanism of this phenomenon. The sine modulated laser welding test of AZ31 was developed based on ternary quadratic regression design and the influence of average power (P_A), modulation amplitude (A) and frequency (F) on welding joint cross-sectional fusion zone area (A_{FZ}) were studied. The results show that power modulation can obviously improve energy coupling in the lower P_A welding process, while this improvement will be weakened and even disappear with P_A increasing. Both “small amplitude + high frequency” and “large amplitude + low frequency” can increase the cross-sectional A_{FZ} when welding in the case of low P_A . The longitudinal-sectional morphology of “stainless steel (reflectivity: 60%) + Mg alloy (reflectivity: 80%)” bimetallic specimen welded joint obtained in the sine modulated welding of 8 Hz was compared. It is demonstrated that when the power decreases from the peak value, the weld depth in lower reflectivity materials 2205 decreases synchronously, but the decreasing moment of weld depth in high reflectivity materials AZ31 delays about 0.036 s (about 30% of a sine period). The phenomenon may be attributed to that a deeper keyhole could be formed by the instantaneous peak power value, which increases the number of reflection of laser beam in keyhole. Then, in spite of the declining of transient laser power, the high aspect ratio keyhole will be maintained for about 1/3 of a sine period due to the enhanced energy coupling efficiency. It is the key point for power modulation to improve the energy coupling efficiency of high reflectivity materials that the high aspect ratio keyhole can be formed and maintained for a long time

Key words: laser welding; power modulation; AZ31 Mg alloy; energy coupling efficiency; regression orthogonal experiment

Corresponding author: Ning Jie, Candidate for Master, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, E-mail: ningjie2013@stu.xjtu.edu.cn; zhanglinjie@mail.xjtu.edu.cn