

高频脉冲耦合铝合金激光-MIG 复合焊接熔滴过渡及其熔覆特性

朱宗涛，王雪飞，杨晓益，高 健*
(西南交通大学 材料科学与工程学院,成都 610031)

摘 要:采用高频脉冲电源与单脉冲 MIG 焊电源并联叠加的方式与激光热源复合,形成高频脉冲耦合激光-MIG 复合焊接方法. 在 A7N01 铝合金板材上进行堆焊试验,用高速摄像研究高频脉冲耦合后电弧及熔滴过渡行为的变化,并通过金相观察研究高频脉冲耦合对熔覆层成形及组织的影响. 结果表明,高频脉冲耦合后弧长增大,电弧电压增大、基值电流减小,峰值电流变化不大;熔滴由部分亚射流过渡转变成完全射流过渡;熔覆金属表面光滑,“鱼鳞纹”特征消失,无“指状”熔深问题;熔覆层晶粒大小变化不明显,但晶粒内部强化相颗粒变小,分布更加均匀.

关键词: 铝合金; 激光-MIG 复合焊; 高频脉冲; 熔滴过渡; 电弧超声

中图分类号: TG 456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)08-0039-06

0 序 言

铝合金材料不仅具有密度低、比强度高、耐蚀性好等优点,还具有较好的疲劳强度和成形加工性能,是一种优异的轻量化结构材料. 铝合金焊接结构件广泛应用于航空、航天、轨道交通、造船、石油化工等领域,焊接接头的质量直接影响到结构件的安全可靠性.

激光-MIG 复合焊接方法具有熔深大、效率高、应力和变形小等优点,是一种具有广泛应用前景的铝合金焊接方法^[1,2]. 对于铝合金激光-MIG 复合焊接接头而言,气孔、晶粒粗大等问题是造成接头强度下降的主要原因之一^[3,4]. 如何减少铝合金焊缝中气孔缺陷(或缺欠)、细化晶粒和改善接头组织一直是人们关注的重点. 从多场耦合的复合焊接角度而言,超声场辅助作用下的电弧焊接方法是有限途径之一. 超声耦合电弧的实现方式有多种:吴敏生等人^[5,6]提出并实现了利用高频调制 TIG 电弧激发超声的构想,试验结果表明电弧超声焊接钢时起到了细化晶粒的效果,但该耦合方式用于铝合金 MIG 焊研究未见报道;范成磊等人^[7,8]设计了超声换能器与传统 MAG/MIG 复合的一体化焊枪,实现了超声与电弧的复合作用,并研究了超声作用下的电弧行为和熔滴过渡变化,接头质量也有明显的改善,但这种

耦合方式会增大焊枪尺寸,使可达性受影响,一定程度上限制了其应用;除此之外,还有通过在焊接垫板或试板上直接施加超声振动进行焊接的方法,对铝合金焊接中的气孔具有一定的控制作用^[9],但实际焊接过程中由于超声施加位置很难实现与焊枪随动,因此其应用也受到了限制.

文中在铝合金传统的脉冲 MIG 与激光复合焊接过程中,在 MIG 电弧上叠加了高频调制的脉冲,通过高速摄像研究叠加高频脉冲后熔滴过渡的变化,并通过在铝合金试板上的堆焊试验研究熔覆层成形及组织变化.

1 试验方法

堆焊试验材料为 A7N01P-T4 铝合金板材,尺寸为 300 mm × 150 mm × 10 mm,填充材料为直径 1.6 mm 的 ER5356 焊丝. A7N01P-T4 铝合金和焊丝的成分见表 1.

高频脉冲耦合激光-MIG 复合焊接系统的原理示意图如图 1 所示. 图中的激光由 IPG YLS-4000 光纤激光器发出,采用旁轴复合的形式与 MIG 焊枪构成复合焊枪,装卡在 IRB 2600 机器人上进行自动焊接,机器人与 KEMPPI KempArc-450 脉冲型数字焊机通讯实现焊接参数调用. 另外,有一频率为 21 kHz,占空比为 50% 的高频脉冲电源与 MIG 电源并联叠加. 为了避免两个电源之间的相互干扰,分别在高频脉冲电源和 MIG 电源正向输出端串联一个

收稿日期: 2015-06-04
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405398);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682015CX007)
* 参加此项研究工作的还有陈辉

表 1 母材和焊丝的合金成分(质量分数,%)
Table 1 Compositions of A7N01P-T4 and filler metal

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
A7N01	≤0.30	≤0.35	≤0.20	0.20~0.70	1.0~2.0	≤0.30	4.0~5.0	余量
ER5356	≤0.25	≤0.10	≤0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	≤0.10	余量

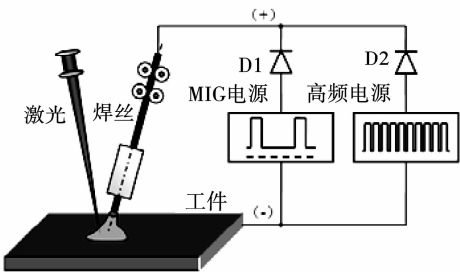


图 1 高频脉冲耦合铝合金激光-MIG 复合焊接原理图
Fig. 1 Schematic of Laser-MIG hybrid weldingcoupled by high frequency pulses(HFP)

表 2 A7N01P-T4 铝合金堆焊工艺参数
Table 2 Build-up welding parameters of A7N01P-T4 alloy

堆焊工艺	激光功率 $P_{\text{laser}}/\text{kW}$	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接电流 I_{MIG}/A	电弧电压 U_{a}/V	脉冲电流 I_{HFP}/A	热输入 $E_{0.8}/(\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1})$
Laser-MIG	1	0.6	175	15.6	—	4.97
HFP + Laser-MIG	1	0.6	143	19.6	30	5.85

帧速为 6 000 幅/s,图像分辨率为 896 × 752 DPI. 焊后对比有无高频脉冲辅助堆焊层的表面成形情况. 在堆焊试板上取样,用 ZEISS Stemi 2000-C 体式观察熔覆层的截面形貌,并用 ProgRes Capture 软件测量熔覆层截面形状的特征尺寸. 用 ZEISS Axio Observer A1m 光学显微镜观察熔覆层的金相组织.

2 试验结果与分析

2.1 电弧形态及熔滴过渡分析

图 2 所示为高速摄像同步信号采集系统采集的 A7N01P-T4 铝合金激光与传统单脉冲 MIG 复合后,堆焊过程电弧的电压和电流变化波形. 从电压波形来看,除了相对较低的基值维弧电压和较高的脉冲电压区间外,还出现了电压迅速下降至接近零电位的若干区间(图中圆形标识处),对应此时的电弧电流有突然增大的趋势,这些区间的熔滴明显处在短暂的短路过渡区间. 取从 134 帧 ~ 171 帧区间(约一个脉冲周期)内的几张高速摄像照片进一步分析其电弧形态和熔滴过渡,如图 3 所示;图 3a 为一个熔滴过渡结束电弧刚刚引燃的过程,之后电弧的加

快恢复二极管模块. 堆焊过程采用 99.999% 的氩气作为保护气,采用激光在前引导电弧的焊接方式,激光束与试板法线的夹角为 10°,焊枪与试板的夹角为 75°,光纤间距为 4 mm,激光焦点位置在试板上表面. 激光功率(P_{laser})、焊接速度(V)、MIG 电源输出平均电流(I_{MIG})、电弧电压(U_{a})、高频脉冲叠加平均电流(I_{HFP})、热输入($E_{0.8}$,电弧和激光的热效率为 80%)大小见表 2.

用 Photron FASTCAM SA4 高速摄像及观察电弧形态及熔滴过渡行为,并用同步外部数据采集器 DAQ 采集堆焊过程的电压和电流. 高速摄像拍摄的

热使得焊丝端部不断熔化,如图 3b 所示;在电磁收缩力、重力和斑点力的共同作用下,熔滴克服表面张力逐步向熔池过渡,熔滴靠近焊丝端部位置发生缩颈,如图 3c 所示;由于弧长较短,不断发生缩颈的熔滴接触到熔池,发生短路,电弧熄灭,电流增大,熔滴进入短路,如图 3c ~ 3f 所示,直至液滴被拉断,短路过渡过程结束,如图 3 g 所示;紧接着电弧重新引燃,见图 3 h. 至此,一个脉冲周期结束,重复进入下

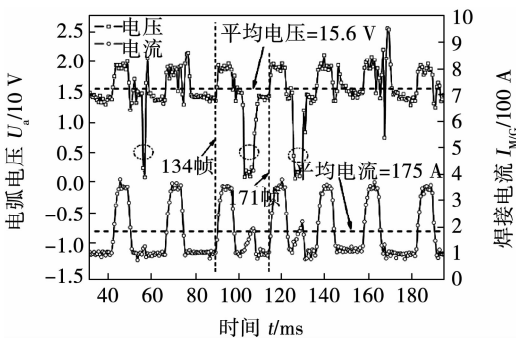


图 2 铝合金激光-MIG 复合电弧堆焊电压、电流波形
Fig. 2 Voltage and current waveforms of laser-MIG hybrid built-up welding

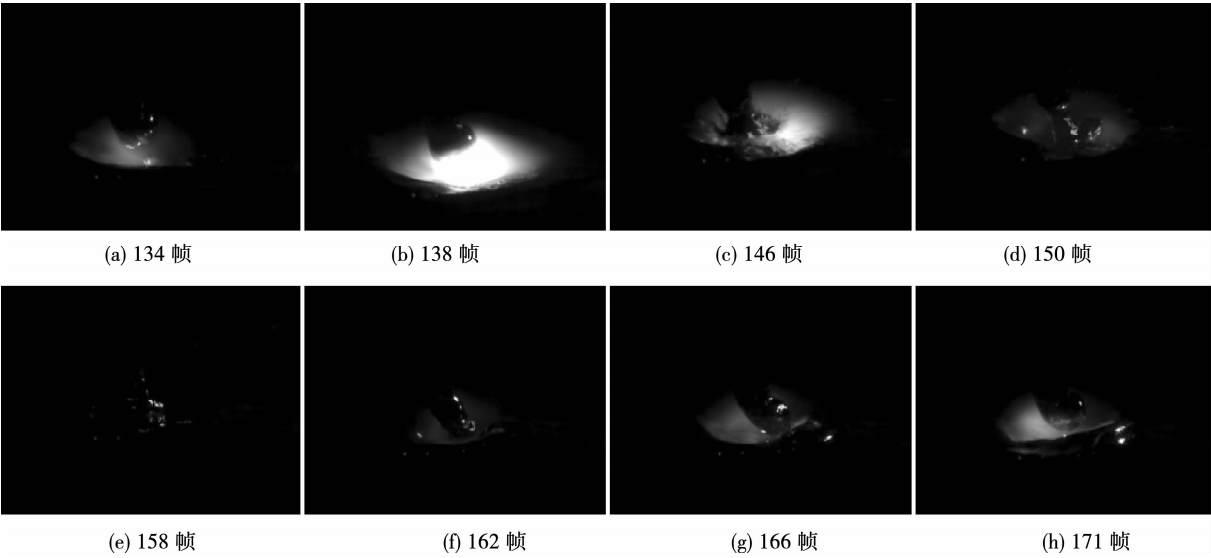


图 3 A7N01 铝合金激光-MIG 复合堆焊亚射流过渡图像

Fig. 3 Images of meso-spray transfer in A7N01 aluminum alloy laser-MIG hybrid built-up welding

一个周期。

从上述结果可以明显看出,A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接熔滴过渡出现了典型的亚射流过渡,是介于短路过渡与射流过渡之间的一种特殊过渡形式. 与短路过渡相比,同样在弧长较短的条件下(一般为 2~8 mm)发生,熔滴先出现缩颈再短路(与短路过渡恰恰相反),但短路时间较短,因此对熔池的冲击力很小,焊接程稳定,成形美观;与射流过渡相比,由于射流过渡电流大,熔滴过渡时对熔池的冲击力太大,易造成“指状”熔深问题;同时,射流过渡的电弧较长,气体的保护效果变差,造成焊缝“起皱”现象. 因此,一般传统的铝合金脉冲 MIG 焊接过程多采用亚射流过渡. 但对于激光-MIG 复合焊接过程而言,由于弧长较短,焊丝端部的熔滴离激光束过于接近,焊接时易出现激光照射在熔滴上,影响激光“匙孔”的稳定性,造成焊接过程不稳定,就此而言亚射流过渡并不是铝合金激光-MIG 复合焊最佳的熔滴过渡形式。

图 4 为叠加高频脉冲电源后激光-MIG 焊在 A7N01 铝合金堆焊时的电弧电流和电压波形. 与图 2 相比,叠加后的基值电压由叠加前的 14.5 V 增加到 17 V,脉冲峰值电压由 20 V 变到 25 V;叠加后的基值电流由叠加前的 100 A 降低到 80 A,而脉冲峰值电流仍为 350 A,变化不大. 这是由于弧长变化造成的,图 5 为一个脉冲区间(对应于图 4 中的 1553~1557 帧)高速摄像拍摄到熔滴和电弧的形态. 高频脉冲叠加后,电弧明显拉长,电弧呈“钟罩”型,焊丝端部的液滴在电磁收缩力的作用下发生缩颈,最终断开过渡到熔池,从图 4 中的电压、电流波

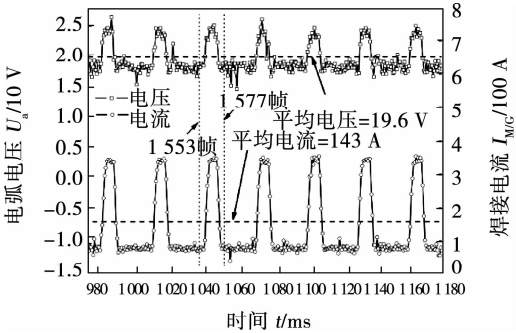


图 4 高频脉冲耦合激光-MIG 复合电弧堆焊电压、电流波形

Fig. 4 Voltage and current waveforms of laser-MIG hybrid built-up welding coupled by high frequency pulses

形也可以看出,未出现短路过渡的现象,因此,高频脉冲耦合后的铝合金激光-MIG 复合焊主要以射流过渡的方式进行熔滴过渡。

对于铝合金激光-MIG 复合焊接而言,熔滴以长弧(8~15 mm)射流过渡形式进行焊接,熔滴与激光束的距离增大,可以有效避免激光辐照在熔滴上导致的焊接过程和质量不稳定现象. 高频脉冲耦合后,虽然熔滴过渡由亚射流向射流转变,但并没出现铝合金 MIG 焊射流过渡形式的“指状”熔深和焊缝“起皱”问题。

2.2 熔覆层成形

图 6 为有无高频脉冲耦合条件下,A7N01 铝合金激光-MIG 复合堆焊熔覆层表面形貌. 由图可见,传统无高频耦合条件下堆焊后,激光-MIG 复合堆焊熔覆层表面“鱼鳞纹”特征比较明显;而叠加高频脉冲后,熔覆层表面变得更加圆滑,“鱼鳞纹”特征消

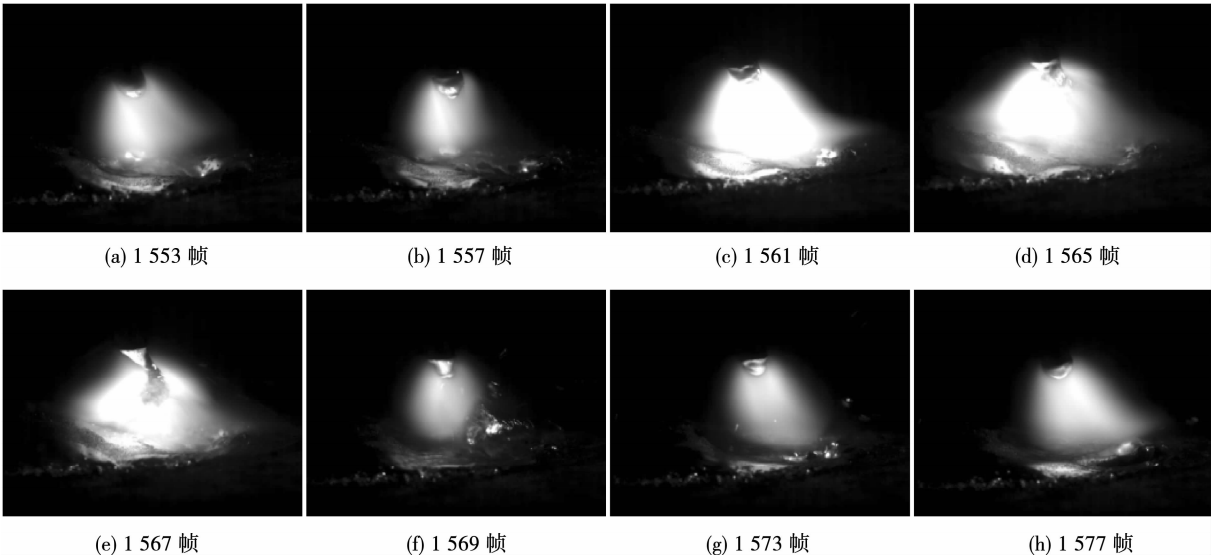


图 5 高频脉冲耦合铝合金激光-MIG 复合堆焊射流过渡图像

Fig. 5 Images of spray transfer in aluminum alloy laser-MIG hybrid built-up welding coupled by high frequency pulses

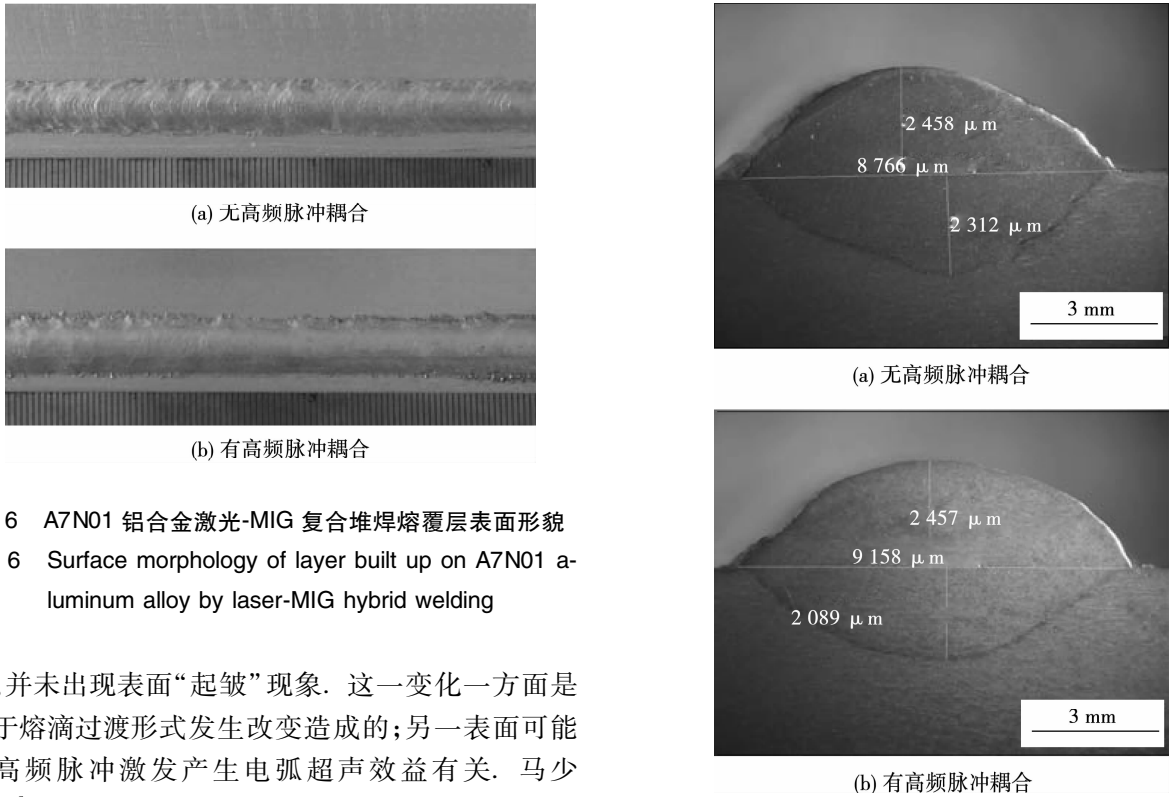


图 6 A7N01 铝合金激光-MIG 复合堆焊熔覆层表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of layer built up on A7N01 aluminum alloy by laser-MIG hybrid welding

失,并未出现表面“起皱”现象. 这一变化一方面是由于熔滴过渡形式发生改变造成的;另一表面可能与高频脉冲激发产生电弧超声效益有关. 马少龙^[10]在研究碳钢材料的 MIG-超声复合焊接时也发现类似的结果.

图 7 为 A7N01 铝合金激光-MIG 复合堆焊熔覆层的截面形貌. 如图 7a 所示,常规激光-MIG 复合堆焊时,堆焊金属底部熔宽较窄,有“指状”熔深的成型趋势;而高频脉冲叠加后,熔覆层的熔宽增大,熔深略有减小,余高变化不大,堆焊金属底部熔宽较宽(如图 7b 所示),反而避免了传统铝合金 MIG 焊射流过渡模式下“指状”熔深问题. 其主要原因可能是高频脉冲耦合后,电弧的受力和形态发生改变,电

图 7 有无高频脉冲耦合激光-MIG 复合堆焊熔覆层截面形貌

Fig. 7 Cross-section photographs of laser-MIG hybrid built-up welding with or without HFPs coupling

弧向外侧扩展引起的;此外,高频脉冲耦合后促进了激光-MIG 复合熔池中“匙孔”的动态填充过程,增大了根部熔宽,可以避免一些工艺型气孔出现. 因此,从熔覆层的宏观成形来看,耦合高频脉冲对 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接成形更有利.

2.3 熔覆层组织

图 8 是激光-MIG 复合堆焊熔覆层不同区域的微观组织. 图 8a 和图 8b 分别对应低倍下(50 倍放大倍数)有无高频脉冲耦合熔覆层中心区组织,二者的晶粒大小差异不明显,并且在垂直于熔合线并指向熔覆层中心的方向上,晶粒呈现由柱状晶向等轴晶逐渐过渡的特征. 二者进一步放大到 1 000 倍的组织照片分别对应图 8c 和图 8d,图中细小颗粒

为 α (Al) 基体上的强化相. 有高频脉冲耦合后熔覆层中强化相颗粒尺寸略有减小,并且分布相对更均匀,这有利于提高熔覆层金属的强化效果,分析其原因可能为高频脉冲激发产生的电弧超声,在熔池结晶凝固过程中的振动作用,使得析出的强化相分布更加分散. 而对比图 8e 和图 8f 可知,高频脉冲耦合以后对 A7N01 铝合金焊接接头熔合区附近的组织形态影响不大.

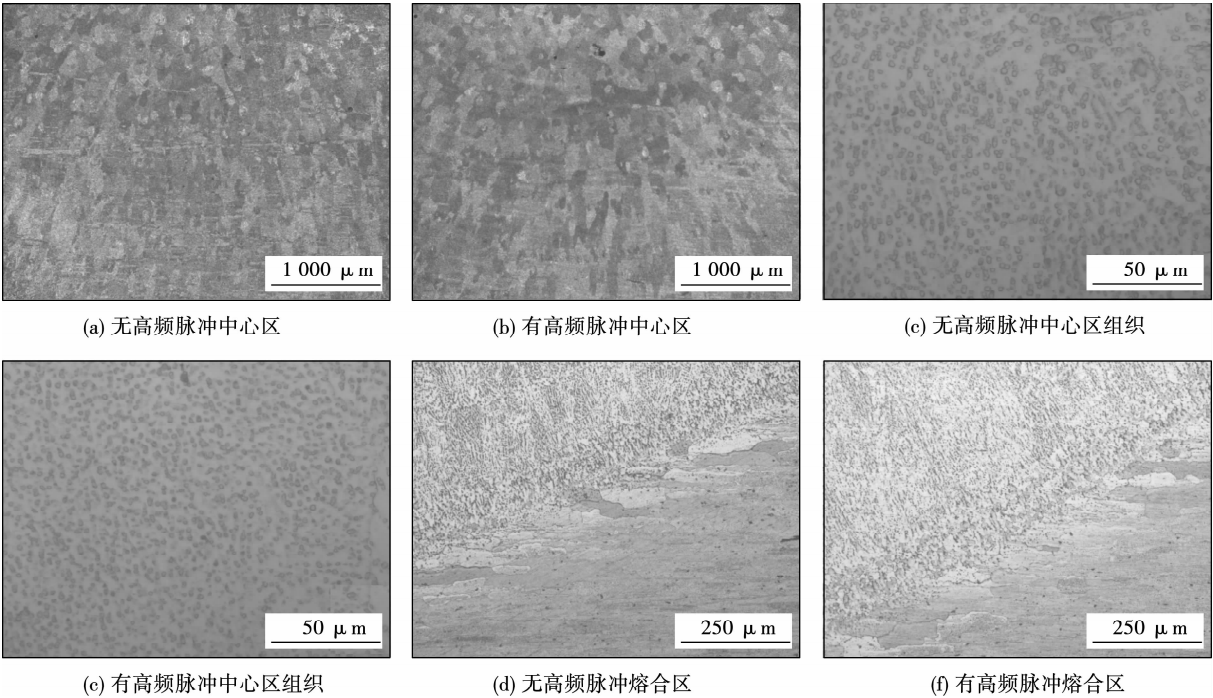


图 8 A7N01 铝合金激光-MIG 复合堆焊熔覆层各区域组织

Fig. 8 Microstructure photograph of layer built up on A7N01 aluminum alloy by laser-MIG hybrid welding

3 结 论

- (1) 研究了高频脉冲耦合 A7N01 铝合金激光-MIG 复合堆焊过程,高频脉冲耦合后弧长变长,电弧基值电压增大,基值电流降低,峰值电流变化不大;熔滴过渡形式由部分亚射流过渡转变为射流过渡.
- (2) 高频脉冲耦合 A7N01 铝合金激光-MIG 复合堆焊后,未出现射流过渡常出现的表面“起皱”和“指状”熔深问题,熔覆层成形更好.
- (3) 高频脉冲耦合对 A7N01 铝合金激光-MIG 复合堆焊熔覆层中心和熔合区晶粒大小影响不大,熔覆层表面“鱼鳞纹”特征消失,强化相颗粒变小,分布更均匀.

参考文献:

[1] 许良红,田志凌,彭云,等. 高强铝合金的 MIG 以及激光-

MIG 焊接工艺对比[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 38-43.
Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun, et al. Comparison of MIG welding and laser-MIG welding of high strength aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 38-43.
[2] Yan S H, Chen H, Ma C P, et al. Local corrosion behaviour of hybrid laser-MIG welded Al - Zn - Mg alloy joints[J]. Materials and Design, 2015, 88: 1353-1365.
[3] Ascari A, Fortunato A, Orazi L, et al. The influence of process parameters on porosity formation in hybrid LASER-GMA welding of AA6082 aluminum alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44: 1485-1490.
[4] Campana G, Ascari A, Fortunato A, et al. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases [J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 5588-5590.
[5] 吴敏生,段向阳,李路明,等. 电弧超声的激发及其特性研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(6): 110-112.
Wu Minsheng, Duan Xiangyang, Li Luming, et al. Study of arc-ultrasonic excitation and its characteristics[J]. Journal of Tsinghua U-

niversity (Science and Technology). 1999, 39(6): 110–112.

[6] 吴敏生, 何龙标, 李路明, 等. 电弧超声焊接技术[J]. 焊接学报, 2005, 26(6): 40–45.

Wu Minsheng, He Longbiao, Li Luming, *et al.* Study of arc-ultrasonic welding technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(6): 40–45.

[7] 范成磊, 谢伟峰, 杨春利, 等. 超声-MAG 复合焊接熔滴过渡受 CO₂ 含量的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 18–23.

Fan Chenglei, Xie Weifeng, Yang Chunli, *et al.* Effect of CO₂ content for droplet transfer in ultrasound-MAG hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(3): 18–23.

[8] 范成磊, 谢伟峰, 杨春利, 等. 铝合金超声-MIG 焊接电弧行为[J]. 焊接学报, 2015, 35(1): 5–9.

Fan Chenglei, Xie Weifeng, Yang Chunli, *et al.* Characteristics of welding arc during ultrasound-MIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 35(1): 5–9.

[9] 朱宗涛, 陈 辉, 李远星, 等. 一种超声场耦合激光-MIG 共熔池铝合金焊接技术: 中国, 2015101736623[P]. 2015–04–14.

[10] 马少龙. MIG-超声复合焊接系统研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.

作者简介: 朱宗涛,男,1983 年出生,博士,讲师,硕士研究生导师. 主要从事高能束等特种焊接技术和教学工作. 发表论文 10 余篇. Email: zongtaozhu@163.com

[上接第 34 页]

[6] 何小东, 张建勋, 裴 怡, 等. 钛合金薄板激光焊接和 TIG 焊接残余应力数值模拟[J]. 机械工程材料, 2005, 39(3): 25–28.

He Xiaodong, Zhang Jianxun, Pei yi, *et al.* Numerical simulation of the residual stress in laser beam welded and TIG welded joints of thin plate of titanium alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 39(3): 25–28.

[7] Strycker M De, Lava P, Paepegem W Van, *et al.* Measuring welding deformations with the digital image correlation technique[J]. Welding Journal, 2011, 90: 107–112.

[8] 何洪文, 赵海燕, 钮文翀, 等. 应用三维激光扫描法测量板材的焊接变形[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 9–12.

He Hongwen, Zhao Haiyan, Niu Wenchong, *et al.* A method to measure welding deformation of plate by three dimensional laser scanner[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 9–12.

作者简介: 黄尊月,女,1989 年出生,博士研究生. 要从事激光焊接和焊接变形等研究工作. Email:hzy smile@126.com

通讯作者: 罗 震,男,教授,博士研究生导师. Email: lz@tju.edu.cn

[上接第 38 页]

[4] 胡礼木, 胡 波, 张永宏, 等. 不锈钢 ATIG 焊接接头的抗腐蚀性能分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(7): 34–36.

Hu limu, Hu Bo, Zhang Yonghong, *et al.* Analysis of corrosion resistance of stainless joints by ATIG[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(7): 34–36.

[5] Katharina Köster, Peter Kaestner, Günter Bräuer, *et al.* Material condition tailored to plasma nitriding process for ensuring corrosion and wear resistance of austenitic stainless steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228(S1): S615–S618.

[6] Wilfried Pacquentin, Nadège Caron, Roland Oltra. Nanosecond laser surface modification of AISI304L stainless steel: Influence the beam overlap on pitting corrosion resistance[J]. Applied Surface Science, 2014, 288: 34–39.

[7] Xu Peng, Lin Chengxin, Zhou Chaoyu, *et al.* Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI304 stainless steel/Al₂O₃ composite

coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 238: 9–14.

[8] 邹 杨, 潘春旭, 傅 强, 等. Cr5Mo 异种钢焊接熔合区 H₂S 腐蚀过程的“原位”观察[J]. 金属学报, 2005, 41(4): 421–426.

Zou Yang, Pan Chunxu, Fu Qiang, *et al.* In situ observations for corrosion process at fusion boundary of Cr5Mo dissimilar steel welded joints in H₂S containing solution[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(4): 421–426.

[9] KirchheirAR, Heine B, Fischmeister H, *et al.* The passivity of iron-chromium alloys[J]. Corrosion Science, 1989, 29(7): 899–917.

作者简介: 周广涛,男,1973 年出生,工学博士,副教授,硕士研究生导师. 主要从事焊接工艺、金属材料焊接性、焊接结构力学研究. 已发表论文 30 余篇. Email:zhouguangtao@hqu.edu.cn