

氦-氩混合保护气体对铝合金激光-MIG 复合焊接特性的影响

何双, 陈辉*, 蔡创**, 殷彦杰

西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

摘要 研究了氦-氩混合保护气体对铝合金激光-MIG 复合焊熔滴过渡行为及焊缝气孔缺陷的影响, 结合焊接过程中匙孔的动态特征, 分析了气孔缺陷得到抑制的原因。结果表明, 采用氦-氩混合保护气体时, 焊接过程匙孔更加稳定, 焊缝气孔率得到有效降低。当氦-氩混合保护气体中氦气体积分数为 50% 时, 熔滴过渡形式由射滴过渡转变为短路过渡, 焊缝气孔率约为 1.0%, 相比于纯氩气保护时降低了 80%; 继续增加氦气, 对气孔的抑制并无显著效果。纯氦气时, 焊接过程中产生大量飞溅, 焊缝表面成形差。

关键词 激光技术; 氦-氩保护气体; 激光-MIG 复合焊接; 熔滴; 匙孔; 气孔

中图分类号 TG457.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1202005

Influence of He-Ar Mixed Shielding Gas on Laser-MIG Hybrid Welding Characteristic of Aluminum Alloys

He Shuang, Chen Hui*, Cai Chuang**, Yin Yanjie

School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

Abstract The influences of the He-Ar mixed shielding gas on the droplet transition behaviors and the weld porosity defects are investigated in the laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys. According to the dynamic characteristics of the keyholes in the welding process, the reason for the suppression of porosity defects is analyzed. The results show that, the He-Ar mixed shielding gas can enhance the stability of the keyholes and reduce the weld porosity effectively. When the volume fraction of He in the He-Ar mixed shielding gas is 50%, the droplet transition mode changes from “one drop per pulse” to “short-circuit” transition and the weld porosity is about 1.0%, reduced by 80% if compared with that for the pure argon shielding gas. The further increase of the He content is not helpful to the suppression of the porosity. When the shielding gas is the pure He gas, the big spatter and the bad welding seam occur.

Key words laser technique; helium-argon shielding gas; laser-MIG hybrid welding; droplet; keyhole; porosity

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

A7N01 铝合金属于 Al-Zn-Mg 系高强度铝合金, 主要用在高速列车底架、地板等结构中。激光-电弧复合焊接技术结合了激光自熔焊和电弧焊两者优势, 具备热输入小、变形小、焊接速度高、适应性强等优点^[1-2], 在制造行业中得到广泛应用^[3], 而气孔是铝合金焊接的主要缺陷之一。

关于铝合金激光焊接气孔的形成机制, 大多

学者认为是由焊接过程中匙孔前壁不稳定^[4]以及铝合金凝固过程中氢的聚集^[5]导致的。在铝合金激光-电弧复合焊接中, 主要通过优化焊接电流、激光功率、焊接速度等来降低焊缝气孔率^[6]。目前, 已有研究人员证明, 在铝合金电弧焊中使用氦-氩混合气体可减少接头气孔数量, 减小气孔尺寸^[7], 但会造成引弧困难, 从而增加焊接过程的不稳定性^[8]。雷正龙等^[9]在铝合金双光束激光填丝焊中发现, 采用纯氦气保护时, 匙孔稳定性增强, 等离

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-07-17; 录用日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51474178)、四川省科技计划(2018GZ0288)

* E-mail: xnrpt@swjtu.edu.cn; ** E-mail: caichuang@home.swjtu.edu.cn

子体减少,焊接过程更稳定,气孔率降低到1%以下。高明等^[10]研究了保护气体对 Q235 钢材 CO₂ 激光-熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)复合焊的影响,试验证明,对于性能要求较高的焊接件,必须采用氦-氩混合气体来保证焊接熔深和接头力学性能。此外,在 CO₂ 激光焊、CO₂ 激光-电弧(GMAW)复合焊接中,等离子体屏蔽临界功率密度随辅助气体成分的变化而变化,而氦气对 CO₂ 激光等离子体具有较好的抑制作用^[11-12]。与氩气相比,以氦气作为保护气体可降低等离子体对 CO₂ 激光和 YAG 激光的逆韧致吸收和散焦作用,从而获得较好的焊接效果^[13-14]。

以上研究表明,在铝合金激光-电弧焊接中,使用氦气保护能够提高焊接质量,减少气孔缺陷。氦气对激光-脉冲 MIG 复合焊接过程的影响以及加入氦气后焊缝气孔率降低的原因仍有待深入研究。本文针对 A7N01 铝合金材料,研究了不同体积分数的氦-氩保护气体对激光-熔化极稀有气体保护焊(MIG)复合焊接过程中熔滴过渡特性及焊缝气孔率的影响。

表 1 母材及焊丝成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of base metal and weld wire (mass fraction, %)

Material	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	Bal.
ER5356	≤0.25	≤0.40	≤0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	≤0.10	Bal.

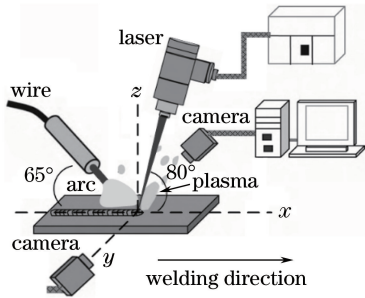


图 1 激光-MIG 复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic of laser-MIG hybrid welding

表 2 激光-MIG 复合焊的工艺参数

Table 2 Process parameters of laser-MIG hybrid welding

Welding parameter	Value
Wire feeding speed / (m · min ⁻¹)	8.0
Welding speed / (m · min ⁻¹)	0.6
Laser power / kW	4000
Distance between laser and arc / mm	3
V _{Ar} :V _{He}	1:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:1

2 试验材料及方法

试验材料为 A7N01P-T4 铝合金,尺寸为 300 mm × 150 mm × 12 mm,填充材料为直径 1.2 mm 的 ER5356 铝合金焊丝,母材及焊丝成分见表 1。试验中使用德国 IPG 公司生产的 YLR-4000 型光纤激光器和芬兰肯比公司生产的 Kemp Arc-450 型脉冲焊机,用 MIG 焊枪保护气对焊接过程进行保护,气流量为 30 L/min。采用堆焊形式进行试验,复合焊接示意图如图 1 所示,焊接过程中使用高速摄像机、背光源及滤光片等拍摄熔滴和激光匙孔特征,摄像机与试板表面成 35° 夹角。此外,试验中借助美国 NI 公司的 NI-USB 6251 型数据采集设备采集焊接过程中的电流电压参数。焊前对试板表面进行机械打磨以去除表面氧化膜,并用丙酮擦洗,主要焊接参数见表 2,其中 V_{Ar}:V_{He} 表示两种气体的体积比。使用分辨率 0.5 mm 的 X-射线无损检测设备对焊缝进行探伤,通过 Image J 图像处理软件统计焊缝气孔率,并在焊缝中心位置截取长为 25 mm 的纵截面以观察焊缝气孔形态。

3 试验结果与分析

3.1 不同保护气体下的熔滴过渡特征

图 2 所示为脉冲电流峰值阶段结束后(电流峰值时电弧明亮,难以观察到熔滴行为),熔滴在基值阶段的行为特征。从图 2 可看到,随着保护气体成分的变化,熔滴的运动轨迹无较大差别,均沿焊丝轴线方向。如图 2(a)所示,纯氩气保护时,熔滴在电流峰值结束 t₀ 时刻已经形成;经过 1.6 ms 后,熔滴与焊丝分离,焊丝端部到熔池的垂直高度记为 D_{h1},此时焊接过程稳定,熔滴为射滴过渡模式。当保护气 Ar、He 的体积分数分别为 75%、25% (记为 75% Ar+25% He,全文同)时,在熔滴脱离焊丝的瞬间,焊丝端部与熔池的竖直距离为 D_{h2},当保护气为 50% Ar+50% He 和 25% Ar+75% He 时,在熔滴脱离焊丝的瞬间,焊丝端部与熔池的竖直距离分别为 D_{h3} 和 D_{h4},如图 2(b)~(d)所示。可见随着氦气比例的增加,焊丝端部及熔滴与熔池表面的距离越

来越近, $D_{h1} > D_{h2} > D_{h3} > D_{h4}$, 造成熔滴与熔池的瞬间短路, 尤其是在纯氦气保护下, 短路产生大量飞

溅, 如图 2(e) 所示。

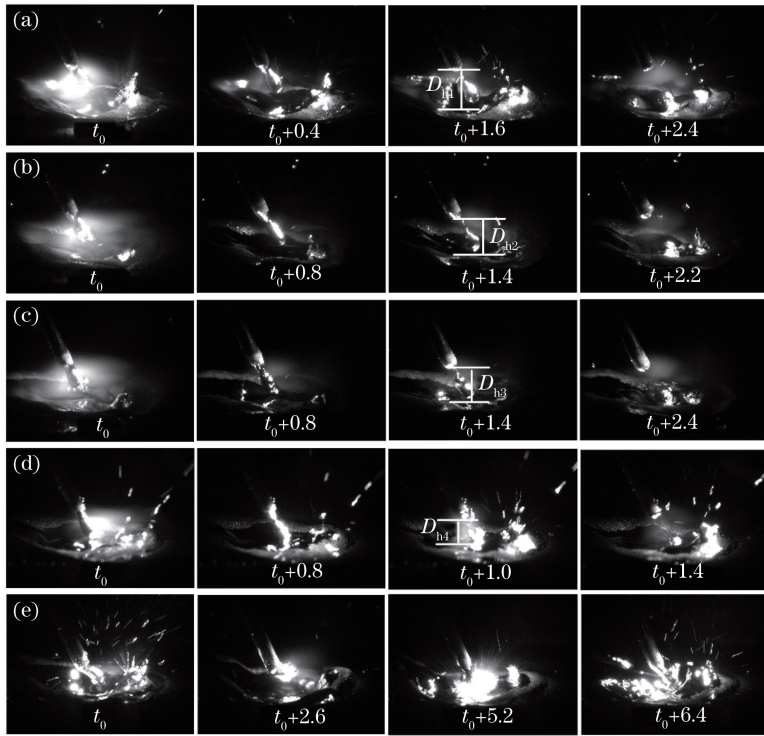


图 2 不同保护气体下的激光-MIG 复合焊接熔滴过渡图像。

(a) 100% Ar; (b) 75% Ar+25% He; (c) 50% Ar+50% He; (d) 25% Ar+75% He; (e) 100% He

Fig. 2 Droplet transition phenomena in laser-MIG hybrid welding under different shielding gases.

(a) 100% Ar; (b) 75% Ar+25% He; (c) 50% Ar+50% He; (d) 25% Ar+75% He; (e) 100% He

在拍摄不同比例氦-氩混合保护气体下的激光-MIG 复合焊接熔滴行为时, 同步采集脉冲电流、电

压信号, 如图 3 所示。从图 3 可以看到, 纯氦气时电流电压波形稳定性好, 重复性高。随着保护气中氦

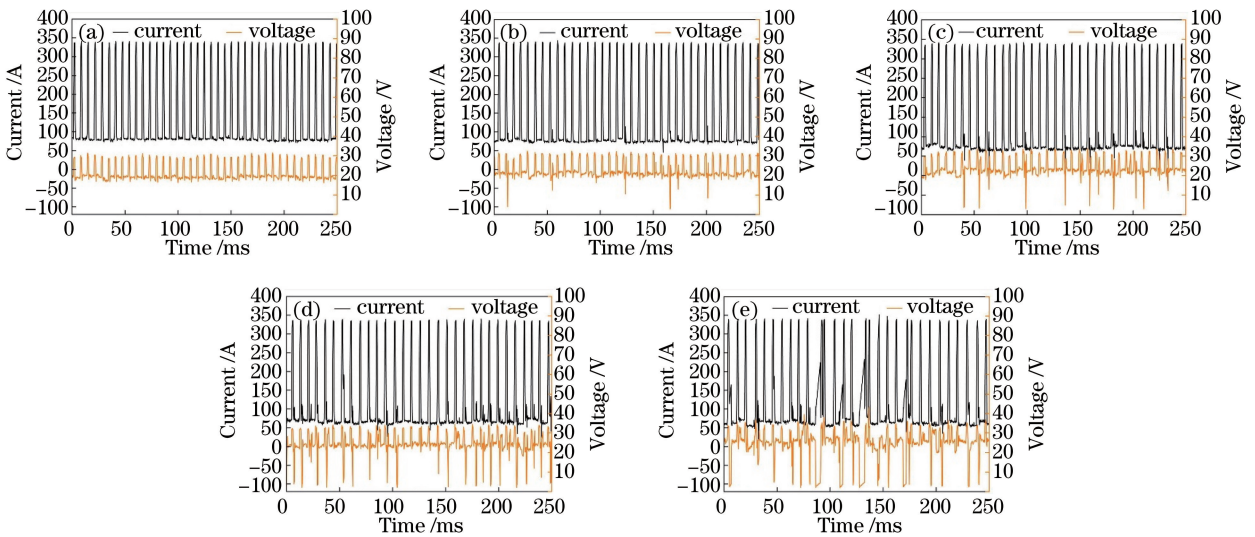


图 3 不同保护气体下的脉冲电流、电压波形图。(a) 100% Ar; (b) 75% Ar+25% He;

(c) 50% Ar+50% He; (d) 25% Ar+75% He; (e) 100% He

Fig. 3 Pulsed current and voltage waveforms under different shielding gases.

(a) 100% Ar; (b) 75% Ar+25% He; (c) 50% Ar+50% He; (d) 25% Ar+75% He; (e) 100% He

气比例的增加,电流电压波形重复性逐渐变差。当氦气体积分数增大至 75%和 100%时,电流电压脉冲波形紊乱。从图 2 中熔滴过渡图像可知,氦气的体积分数超过 50%后,熔滴易与熔池短路,导致电流电压参数重复性差,焊接过程不稳定。

在焊接过程中,采集大量数据统计分析焊接电压的概率分布情况,结果如图 4 所示。从图 4 可见,在纯氩气保护下,概率密度曲线上存在两个波峰,分别为电压的脉冲基值和脉冲峰值;而加入氦气后,曲线上的两个波峰逐渐变得“矮胖”,表明电压分布范围增大,焊接稳定性降低;在氦气体积分数达到 75%后,在概率密度曲线左侧出现一个小波峰,对应电压为 4 V 左右,表明熔滴短路概率较大;在纯氦气保护下,左侧小波峰最高,短路频率最大,这与图 2 中的熔滴行为表现一致。

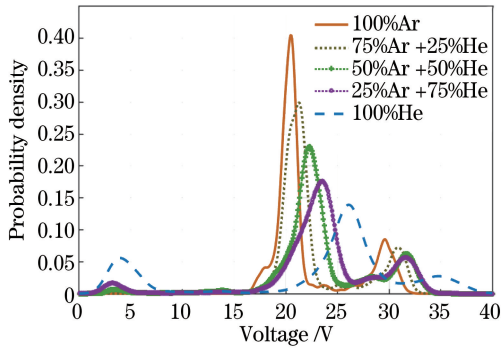


图 4 不同保护气体下的电压概率密度图
Fig. 4 Voltage probability density graphs under different shielding gases

氦气电离能远高于氩气的,使用氦气后气体电离所消耗的能量增加;同时,氦气的热导率大,电弧

的热损失更多。因此,在送丝速率相同的情况下,焊丝的熔化速度降低,焊丝与熔池的距离缩短,导致熔滴短路频率增加。在纯氦气保护时,与纯氩气相比,电流降低,电压增大,脉冲周期延长。

3.2 不同保护气体下的焊缝形貌及气孔率

不同比例氦-氩混合保护气体下铝合金激光 MIG 复合焊接的焊缝 X 射线探伤、焊缝表面成形以及纵向截面特征如图 5 所示。从图 5 可看出,在高纯氩气保护下,焊缝表面有规则的鱼鳞纹,焊缝成形好;100% Ar、25% He + 75% Ar 和 50% He + 50% Ar 三种气氛下的焊缝成形均比较好,表面基本无缺陷;当氦气体积分数超过 50%后,焊缝表面凹凸不平;尤其是在高纯氦气保护时,焊缝成形最差,焊缝表面粗糙、凹凸不平,且飞溅多。从 X-射线探伤结果可看到,焊缝气孔主要集中在焊缝中心,高纯氩气保护时,焊缝气孔数量多且尺寸大,气孔率达到 5.2%。加入体积分数为 25%的氦气后,气孔数量显著减少,气孔率降低至 1.9%;继续增大氦气含量,焊缝气孔率缓慢降低,当氦气的体积分数为 50%时,气孔率大约为 1.0%;在纯氦气时,气孔率最低为 0.6%,如图 6 所示。同时,在射线源透射方向,气孔尺寸随氦气含量的增加而逐渐减小。可见,采用氦-氩混合保护气体可有效抑制焊缝气孔的产生。从图 5 纵截面金相试样形貌可清楚地看到焊缝气孔形貌特征。当保护气体为高纯氩气时,焊缝中心位置气孔长度可达 4 mm,主要分布在焊缝中下部的激光作用区。气孔为蠕虫状,上部椭圆形,下部细小,具有向熔池表面溢出的趋势。氦气比例增大后,气孔数量明显减少,尺寸明显减小。

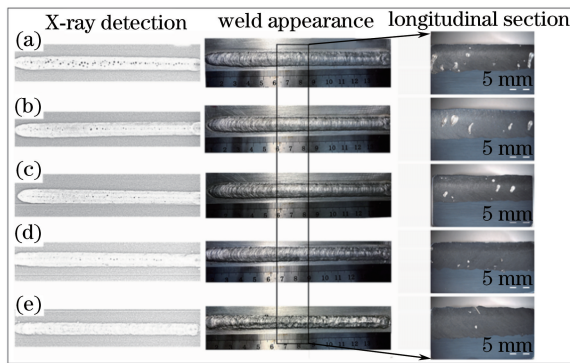


图 5 不同保护气体下的焊缝射线探伤、表面形貌及纵向截面。

(a) 100% Ar; (b) 75% Ar+25% He; (c) 50% Ar+50% He; (d) 25% Ar+75% He; (e) 100% He

Fig. 5 Radiographs, surface morphologies and longitudinal sections of welds under different shielding gases.

(a) 100% Ar; (b) 75% Ar+25% He; (c) 50% Ar+50% He; (d) 25% Ar+75% He; (e) 100% He

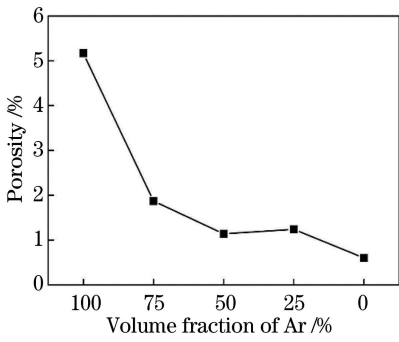


图 6 混合保护气中氩气比例与焊缝气孔率间的关系

Fig. 6 Relationship between argon content in mixed shielding gas and weld porosity

3.3 不同保护气体下的匙孔表面特征

激光-MIG 复合焊接匙孔运动特征如图 7 所示,纯氩气保护时,匙孔形状不规则,熔池振荡剧烈,匙孔出现短暂的闭合现象,即存在周期性的闭合-张开过程。增加混合保护气体中氦气的比例时,匙孔大小逐渐稳定,张开-闭合周期延长,熔池也相对稳

定。当氦气的体积分数达到 100% 时,匙孔始终保持张开状态,在熔池中的位置也相对固定,熔池及匙孔的稳定性增强。

图 8 所示为不同氦-氩混合保护气体下,匙孔平均直径随时间变化的统计结果。由图 8 可见,纯氩气保护时,平均直径最大可超过 80 pixel,最小为 0 pixel(匙孔闭合),并且变化周期短,激光匙孔剧烈振荡,导致其尺寸变化大。匙孔在失稳闭合的瞬间,将其根部的金属蒸气、焊接保护气体等卷入熔池形成体积较大的气泡,由于熔池冷却速度快,气泡来不及溢出并在焊缝中心附近形成气孔。随着氦气比例的增大,匙孔直径减小,且变化幅度较小,逐渐趋于稳定。在纯氦气保护下,匙孔平均直径主要为 20~60 pixel,直径明显减小,且相对较稳定。段爱琴等^[15]研究发现,与纯氩气相比,使用氦气作为保护气体,小孔与熔池更加稳定。可见,氦气对匙孔起到较好的稳定作用,可避免匙孔失稳闭合,从而抑制气孔的产生。

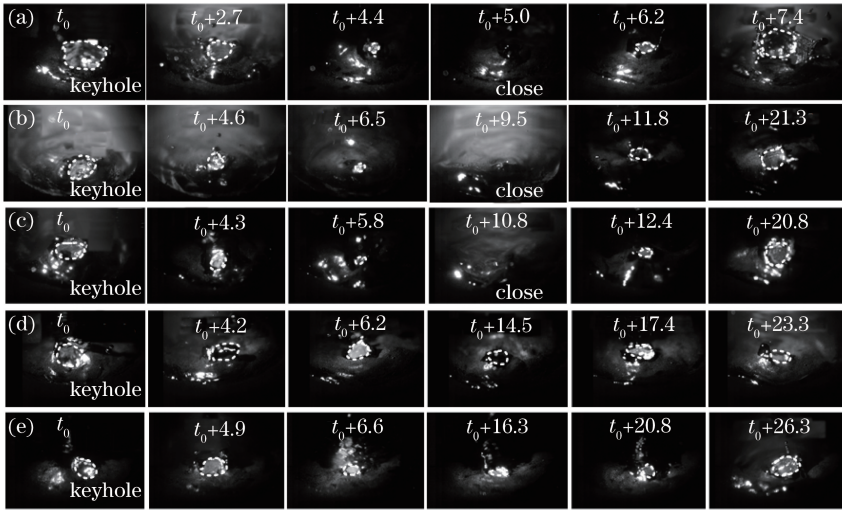


图 7 不同氦-氩保护气体下激光-MIG 复合焊的匙孔特征。

(a) 100% Ar; (b) 75% Ar+25% He; (c) 50% Ar+50% He; (d) 25% Ar+75% He; (e) 100% He

Fig. 7 Keyhole characteristics in laser-MIG hybrid welding under different He-Ar shielding gases.

(a) 100% Ar; (b) 75% Ar+25% He; (c) 50% Ar+50% He; (d) 25% Ar+75% He; (e) 100% He

4 结 论

研究了氦-氩混合保护气体对 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接过程中熔滴过渡及焊缝气孔缺陷的影响,得到以下结论。

1) 随着氦-氩混合气体中氦气含量的增多,熔滴过渡稳定性减弱。当氦气体积分数超过 50% 时,熔滴由射滴过渡转变为短路过渡,电流电压脉冲波形重复性变差;纯氦气时,熔滴短路过渡产生大量飞

溅,焊缝成形较差。

2) 氦-氩混合保护气体可以有效降低焊缝气孔率。纯氩气保护时,焊缝气孔率为 5.2%;氦气体积分数达到 50% 时,焊缝气孔率约为 1.0%,与高纯氩相比降低了 80%。

3) 保护气体中加入氦气可增强激光匙孔的稳定性,避免匙孔失稳产生气孔,从而降低焊缝气孔率。纯氦气保护时,匙孔形态稳定,始终保持张开状态,焊缝气孔率最低。综合考虑后认为,氦气体积分

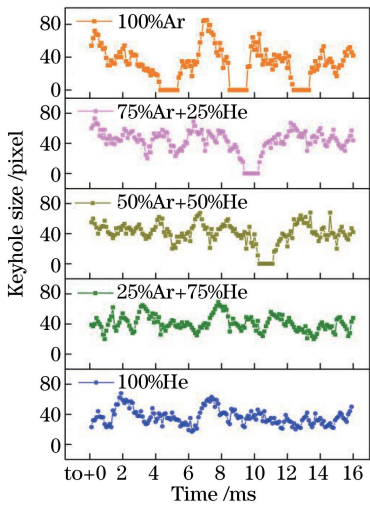


图 8 不同氦-氩保护气下匙孔尺寸随时间的变化

Fig. 8 Keyhole size versus time under different He-Ar shielding gases

数为 50%时,焊缝表面成形较好,气孔率较低。

参 考 文 献

[1] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(11): 5636-5641.

[2] Diltthey U, Wieschemann A. Prospects by combining and coupling laser beam and arc welding processes[J]. 2000, 44: 37-46.

[3] Jasnau U, Hoffmann J, Seyffarth P. Nd:YAG-laser-GMA-hybrid welding in shipbuilding and steel construction[J]. Lecture Notes in Control & Information Sciences, 2004, 299: 14-24.

[4] Matsunawa A, Mizutani M, Katayama S, et al. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding [J]. Welding International, 2003, 17(6): 431-437.

[5] Pastor M, Zhao H, Martukanitz R P, et al. Porosity, underfill and magnesium loss during continuous wave Nd:YAG laser welding of thin plates of aluminum alloys 5182 and 5754[J]. Welding Journal, 1999, 78(6): 207s-216s.

[6] Zhang C, Gao M, Wang D, et al. Relationship between pool characteristic and weld porosity in laser arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 217-222.

[7] Kang B Y, Prasad Y K D V, Kang M J, et al. Characteristics of alternate supply of shielding gases in aluminum GMA welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4716-4721.

[8] Menzel M. The influence of individual components of an industrial gas mixture on the welding process and the properties of welded joints[J]. Welding International, 2003, 17(4): 262-264.

[9] 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 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.

[10] Gao M, Zeng X Y, Hu Q W, et al. Effects of shielding gas in CO₂ laser-MAG hybrid welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 85-88, 117.
高明, 曾晓雁, 胡乾午, 等. CO₂激光-MAG 电弧复合焊接保护气体的影响规律 [J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 85-88, 117.

[11] Xiao R S, Mei H H, Zuo T C. Influence of assistant gases on the shielding thresholds of laser induced plasma during high power CO₂ laser penetration welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25(11): 1045-1050.
肖荣诗, 梅汉华, 左铁钊. 辅助气体对 CO₂激光焊接光致等离子体屏蔽的影响 [J]. 中国激光, 1998, 25(11): 1045-1050.

[12] Chae H B, Kim C H, Kim J H, et al. The effect of shielding gas composition in CO₂ laser-gas metal arc hybrid welding [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222 (11): 1315-1324.

[13] Hosseini Motlagh N S, Parvin P, Jandaghi M, et al. The influence of different volume ratios of He and Ar in shielding gas mixture on the power waste parameters for Nd:YAG and CO₂ laser welding [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 191-198.

[14] Huang H Y. Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments [J]. Materials & Design, 2009, 30(7): 2404-2409.

[15] Duan A Q, Gong S L, Liu F. Influence of shielding gas on temperature field distribution during laser welding of 5A90 [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 181-189.
段爱琴, 巩水利, 刘飞. 保护气体对光纤激光焊接 5A90 温度场分布特征的影响 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 181-189.