

文章编号: 1001-3806(2012)04-0497-04

铝合金 CO₂ 激光电弧复合焊保护气体影响研究

谭兵 刘红伟 马冰 陈东高 任宝辉 明珠 马志华
(中国兵器科学研究院 宁波分院, 宁波 315103)

摘要: 为了研究保护气体对铝合金 CO₂ 激光-熔化极惰性气体保护电弧复合焊的焊缝成形和熔深等的影响, 采用不同流量的 He 和 Ar 混合保护气体在 5052 铝合金板上进行激光-熔化极电弧复合焊工艺试验的方法, 进行了理论分析和实验验证, 取得了焊缝成形、熔深、焊接电压等数据。结果表明, 复合焊时采用单 He 气会造成熔化极惰性气体保护焊的电弧电压增大, 电弧稳定性变差, 从而影响铝合金 CO₂ 激光-熔化极惰性气体保护焊复合焊的熔深, 少量的 Ar 气加入有利于改善焊缝表面质量和稳定电弧, 提高焊缝熔深的效果。当 $V(\text{Ar}) : V(\text{He}) = 5:25$ 时, 熔深最大, 但 He 气中加入大量的 Ar 气会降低焊缝熔深, 甚至抑制激光深熔焊接; 当采用纯 Ar 气作为保护气体时, 虽然焊缝成形美观, 但焊缝熔深很小。这一结果对铝合金 CO₂ 激光-熔化极惰性气体保护电弧复合焊焊缝成形质量分析具有较好的理论和工艺指导意义。

关键词: 激光技术; 保护气体; 激光焊; 熔化极惰性气体保护焊; 复合焊; 铝合金

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.016

Protective gas for CO₂ laser arc hybrid welding Al alloy

TAN Bing, LIU Hong-wei, MA Bing, CHEN Dong-gao, REN Bao-hui, MING Zhu, MA Zhi-hua
(Ningbo Branch, China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

Abstract: The protective gas plays an important role in the CO₂ laser metal inert gas (MIG) hybrid welding of aluminum alloy. The laser-MIG hybrid welding was carried out on 5052 Al alloy plates at different flow rates of He, Ar mixed protective gas, and the data about penetration depth and welding voltages were obtained. The results show when He is added to protective gas, the arc voltage of MIG will increase, and Arc stability reduces so that the weld penetration is affected by the pure He protective gas. The surface quality and the arc stability are improved when a little Ar gas is mixed with He protective gas, and the weld penetration is added. When the ratio of $V(\text{Ar}) : V(\text{He}) = 5:25$, the weld penetration is maximum. When a great amount of Ar is added to He protective gas, the weld penetration is decreased, even the deep penetration of laser welding is prevented. When using pure Ar gas, although the weld appearance is beautiful, but the weld penetration is very small. The results have an important role in the weld quality of the CO₂ laser-MIG arc hybrid welding aluminum.

Key words: laser technique; protective gases; laser welding; metal inert gas; hybrid welding; Al alloy

引言

与传统焊接热源相比, 激光焊具有能量密度高、焊接速度快、焊缝组织优良、焊接变形小等许多优点, 并且随着激光器价格下降, 激光焊接已在许多行业的焊接制造中得到应用。在室温下, CO₂ 激光焊接铝合金时 90% ~ 98% 的激光能量将被材料表面反射掉, 但是当激光功率密度达到某一临界值后, 会形成“小孔”, 将大幅提高激光的吸收率^[1]。影响形成“小孔”的能量临界值除了材料表面状态、激光功率等外, 保护气体也是一个相当重要因素。在形成“小孔”后, 保护气体

不仅将通过与激光作用区的金属反应改变材料的表面状态, 而且影响光致等离子体的形成, 而光致等离子体又将极大地改变激光与材料的相互作用^[2-5]。因此, 通过对激光焊保护气体的研究对焊缝质量和焊缝成形有很大的影响。

铝合金激光焊接传统上采用的保护气体有 Ar, He 和 N₂, 理论上 He 气最轻且电离能最高, 在抑制等离子体方面能力最强, 但使用成本较高。在相同条件下, 采用 N₂ 气更容易诱导小孔, 但纯 N₂ 会在焊缝中产生 Al-N 脆性相, 同时易形成气孔, 因此在采用 CO₂ 激光焊接铝合金时很少采用 N₂ 气作为保护气体。Ar 气由于具有低导热性和低电离能, 使得等离子体易于扩展, 从而不能实现等离子体的有效控制, 但由于其成本较低, 对焊缝保护效果较好, 也经常单独或与 He 气混合使用。因此, 对保护气体流量和配比研究对焊缝成

作者简介: 谭兵 (1979-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事铝合金、镁合金及钢的焊接研究。

E-mail: tan_l_1@163.com

收稿日期: 2011-11-29; 收到修改稿日期: 2011-12-26

形和成本控制有重要意义,但是国内外鲜见关于保护气体对铝合金 CO_2 激光-熔化极惰性气体保护焊(metal inertia gas, MIG) 复合焊焊缝形貌和熔深的影响方面的工艺和机理研究报道。

为了解决保护气体对铝合金 CO_2 激光-MIG 焊接特性的影响机理,分别采用不同流量和配比的 He, Ar 气体进行铝合金 CO_2 激光-MIG 焊接工艺试验,研究保护气体对电弧、焊缝形貌和焊缝熔深等方面的影响,通过对比分析,分析保护气体对焊缝特征影响机理,并找出最佳气体配比。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验中采用的母材为 5052 轧制铝合金板材, H32 热处理状态, 焊板尺寸为 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 10\text{mm}$, 焊丝采用 $\varnothing 1.2\text{mm}$ 的 5356 铝合金焊丝, 板材及焊丝的化学成分如表 1 所示。板材通过酸碱清洗去除表面的油污, 焊前利用烘干炉干燥板材及焊丝。保护气体为 He 气和 Ar 气, He 气的质量分数为 0.995, Ar 气的质量分数为 0.9999, 利用气阀控制两种气体的流量获得氦氩混合气体, 并利用 MIG 焊枪送保护气体。

Table 1 Chemical composition of magnesium alloy base plate and wires (mass fraction)

	Mg	Zn	Mn	Cr	Ti	Si	Al
5052	0.0266	0.0015	0.0010	0.0020	0.0015	0.0011	surplus
5356	0.0500	≤ 0.0020	0.0015	0.0015	≤ 0.0050	0.0020	surplus

1.2 试验方法

试验中采用 ROFIN-DC050 板条式激光器, 最大焊接功率为 5kW, 激光头光路经平面反射镜后反射聚焦, 焦距为 300mm, 光斑直径为 0.45mm。MIG 焊采用松下 INVISION 456MP 的焊机, 按图 1 所示方式复合, 焊接时激光在前, MIG 电弧在后, MIG 焊枪与铝合金焊板成 60° 夹角。复合焊试验采用激光功率为 4kW, 热源间距为 2mm~3mm, 焊接速率 1500mm/s, 焊丝伸出长度 14mm~16mm, 激光焦点作用于焊板表面, MIG 焊接送丝速率为 4.3m/min。

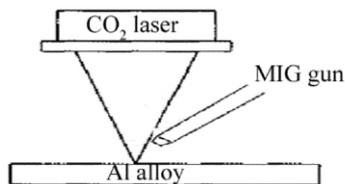


Fig. 1 Diagram of torch setup of laser-MIG welding

2 焊接结果及分析

2.1 保护气体对复合焊的电弧电压影响

图 2 为采用不同 He 气流量对复合焊接时 MIG 焊

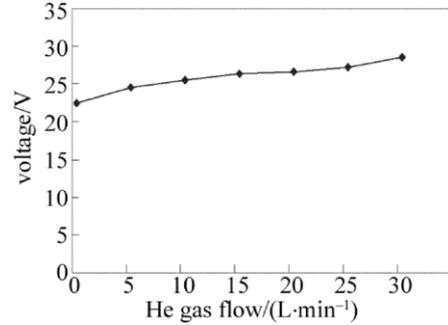


Fig. 2 Effect of He flow rate on MIG welding voltage

机电弧电压的影响曲线图,由图可知,随着保护气体 He 气流量的增加, MIG 焊机的电弧电压逐渐增高。He 和 Ar 都可完全隔离空气,起到完全保护熔池的作用。但为什么 He 的隔离效果更好? 其原因是 He 的电离能力比 Ar 的低。当复合焊接时,焊丝的干伸长一定时,为了维持相同的电弧高度,焊接电压会适当提高。电弧电压增高,产生的热量也更多, MIG 焊形成的等离子体密度会相应增加,这种等离子体密度会影响激光作用到熔池的特性,从而对焊缝成形和焊缝熔池有一定的影响。

2.2 保护气体对表面形貌影响

图 3a 为采用纯 Ar 气时的激光-MIG 复合焊焊缝表面成形形貌,由图可知,采用纯 Ar 气作为复合焊保护气体,焊缝表面成形美观,虽然焊接速率为 1.5m/min, 但焊缝表面纹理均匀、表面光滑,未见咬边和气孔等表面缺陷。激光作用到 MIG 焊的熔池上,有利于焊缝熔池成形。图 3b、图 3c 和图 3d 为采用纯 He 气作为保护气体的焊缝形貌图,当 He 气流量为 10L/min 时,焊缝成形差,表面氧化严重,有明显的咬边和飞溅,当气体流量为 15L/min 时,焊缝基本上能成形,焊缝氧化和大颗粒飞溅等问题得到控制,但咬边相当严重,当气体流量为 30L/min 时,焊缝成形变得均匀,咬边现象也得到明显缓解,但焊缝表面成形远差于采用纯 Ar 气体的焊缝成形表貌。当采用纯 He 作为保护气体时, MIG 焊接电弧稳定性变差,并且容易产生飞溅,另外由于氦气密度较小,当气流量较小时,气体易上浮,影响保护效果,因此当保护气体为 10L/min 时,焊缝表面氧

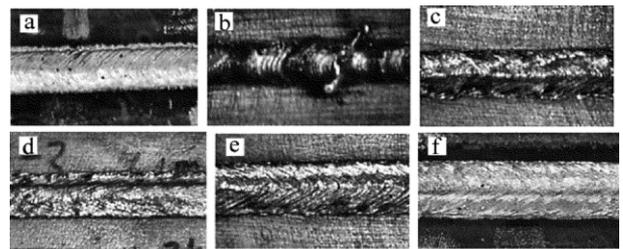


Fig. 3 Influence of protective gas on the welds surface

a— $V(\text{Ar}) : V(\text{He}) = 15:0$ b— $V(\text{Ar}) : V(\text{He}) = 0:10$ c— $V(\text{Ar}) : V(\text{He}) = 0:15$ d— $V(\text{Ar}) : V(\text{He}) = 0:30$ e— $V(\text{Ar}) : V(\text{He}) = 5:15$ f— $V(\text{Ar}) : V(\text{He}) = 10:15$

化相当严重,影响焊接过程的稳定性,易产生飞溅,但随着保护气体流量的增加,表面氧化、咬边和飞溅等问题逐渐得到改善,但由于 He 气特性和纯度造成它的表面成形差于 Ar 气的保护效果。

图 3e、图 3f 为在保护气体中配上适当 Ar 气后的焊缝成形形貌,在 15L/min 的 He 气中加入 5L/min 的 Ar 时,焊缝表面成形和咬边问题得到明显的改善,当加入的 Ar 气量越大,表面成形成就越美观,当加入到 10L/min 的 Ar 气量时,焊缝表面成形与采用纯 Ar 成形基本一致,但焊缝熔宽较采用纯 Ar 时宽。当采用纯 Ar 气作为保护气体时,激光在焊接铝合金时形成的光致等离子体不能得到抑制,以激光支持燃烧波的形式消耗掉激光的能量^[6],而对 MIG 焊熔池作用能量较小,而当 He 气的加入可有效地抑制一定量的等离子体,虽然不能完全抑制的效果,但可控制复合焊接的金属蒸气中的自由电子使周围气体发生雪崩式电离,从而抑制了激光维持吸收波的形成,使激光能量作用到焊缝,增加了熔池的热输入量,从而使焊缝熔宽增加。

2.3 保护气体对焊缝截面几何形状影响

图 4 为不同保护气体下的焊缝截面形貌,图中浅色区域为焊缝,图 4a~图 4d 为 Ar 气流量,图 4e~图 4h 为 He 气流量。由图可知,当完全采用 Ar 作为保护气体时,焊缝截面形貌主要表现为单 MIG 焊的焊缝形貌,见图 4a,当增大 Ar 气流量时,焊缝截面尺寸有轻微的增加,但形貌基本一致,见图 4b。当采用纯 Ar 气作为保护气体时,由于氩气的电离能相当低,会在熔池的上方诱导等离子体产生,并且等离子体密度越集越高,这种高密度等离子体引起气体击穿形成激光支持的燃烧波^[6],由于等离子体对激光的吸收和折射,使得作用在铝板表面的激光功率和功率密度降低^[7],但当吹的 Ar 气流量增大时,会在一定程度上降低等离子体的密度,使激光达到铝板表面的能量会增加,从而出现图 4b 中熔池增大的现象,但由于 Ar 气的电离能相

当低,依靠增大气体流量来吹散激光等离子体的效果不是相当明显。

图 4c 为采用 He,Ar 气体流量为 5L/min 时的焊缝截面形貌图。由图可知,当少量的 He 气加入可抑制高密度等离子体,形成了激光焊小孔,使深熔焊得到继续。当 He 气流量不变,Ar 气流量增加到 30L/min 时,焊缝截面形貌又基本上与采用纯 Ar 类似。当混合气体中有少量的 Ar 气时,He 气可起到抑制激光焊产生的高密度等离子体,但当混有相当多的 Ar 气体时,保护气体的导热性和电离能都较低,使得等离子体易于扩展,从而不能实现对等离子体的有效控制,由于高密度等离子体对激光的散射和吸收作用^[8],使激光作用到铝板上的功率密度大幅减小,以致难形成大功率激光焊的“小孔”效应,激光能量吸收率也相当低。

图 4e 为采用纯 He 气作为保护气体的焊缝截面形貌图,相比纯 Ar 气焊缝更窄,焊缝中有气孔和夹渣。而由图 4c 可知,10L/min 的 He 气流量可以抑制激光产生的高密度等离子体,但由于该流量的 He 气保护能力较差,造成空气进入熔池,从而使 MIG 焊缝成形变差,电弧受空气的影响发生收缩,熔池变窄,如图 3b 所示,另外由于氧等气体进入造成 MIG 焊接产生飞溅和电弧不稳定,这一过程影响了 He 气对激光等离子体的抑制作用,使得激光能量密度减小,达不到形成“小孔”效应的能量密度。但当 He 气流量增加到 15L/min 时,保护气体能起到保护熔池效果,整个焊接也相对稳定了,He 气对激光的抑制效果也得到明显的体现,也实现了激光的深熔焊接,见图 4f。由于 He 气量的增加,等离子体得到一定的抑制,激光作用焊缝的能量也得到提高,从而焊缝的熔宽也明显增加,焊缝形貌为明显的复合焊接特征,但由于 He 气具有导热性好、电离能高的特点,使得焊趾处易出现咬边现象,见图 3c。当在 He 气中加入少量的 Ar 气体,焊缝表面为光滑的圆弧过度,未出现任何咬边,见图 3f 和图 4g。主要因为少量的 Ar 气加入中和了 He 气的高导热性、高电离能的特点,从而改善了整个焊接过程的稳定性。但当过量的 Ar 气加入,焊缝上侧电弧和激光共同作用区域增大,而下侧单激光作用区减小,见图 4h。当大量 Ar 气加入,对激光等离子体的抑制效果变差,由于等离子体对激光会产生折射,使作用于焊缝的光斑变大,造成激光能量密度减小,并且这时激光能量更多的是作用于上侧电弧区,从而造成两热源共同作用区域增大。

2.4 保护气体对焊缝熔深影响

图 5 为不同配比、不同 He 和 Ar 混合气体流量下激光-MIG 复合焊的熔深曲线图。当 $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 5:25$

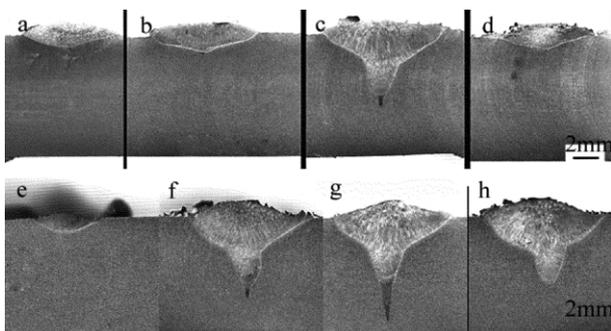


Fig. 4 Photos of weld cross-section with different protective gas

a— $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 10:0$ b— $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 30:0$ c— $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 5:5$ d— $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 30:5$ e— $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 0:10$ f— $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 0:15$ g— $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 5:15$ h— $V(\text{Ar}):V(\text{He}) = 30:15$

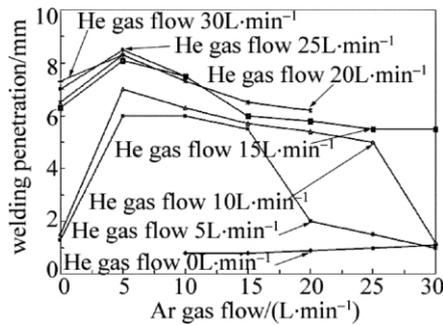


Fig. 5 Weld penetration curve

时,熔深最大,全采用 Ar 气或流量小于 5L/min 的 He 气时,熔深最小。当不加入 He 气时,单纯增加 Ar 气流量对提高复合焊接熔深没有明显的效果。由于单纯依靠 Ar 气没法吹散激光焊形成的等离子体,并会形成激光支持的燃烧波,这会严重消耗激光能量,使作用到铝板上的激光能量密度降低,达不到形成高激光吸收率“小孔”的能量密度,而铝合金对激光的反射率很高,使得激光能量很难被焊缝吸收,虽然增加了 Ar 气流量可吹散少量的等离子体,但由于 Ar 很容易电离,因而效果不明显,最终大部分激光能量都被反散掉了,形成的熔深主要依靠 MIG 焊的电弧作用。由图 5 可知,当 Ar 气流量为 0,He 气流量小于 10L/min 时,焊缝熔深都很小,这主要因为 He 气密度小,对焊缝的保护效果差,造成整个复合焊接过程稳定性变差,不稳定的焊接对激光等离子体的抑制能力也会减弱,从而作用到焊缝上的通量密度过小,不能形成“小孔”。在 He 气中加入少量的 Ar 气有利于提高焊接熔深,但过多的 Ar 气量加入,会使熔深下降,当 He 气流量小于 10L/min 时,过大的 Ar 气流量会造成焊缝熔深大幅下降。He 气中加入 Ar 气可提高电弧的稳定性,从而有利于提高复合焊的激光熔深,但随着 Ar 气量的增加,保护气体中的 He 的比例会下降,从而会减小保护气体对激光等离子体的抑制效果,当 Ar 气量大到一定程度后,会使激光作用于焊板的能量密度小于形成“小孔”时,复合焊的熔深出现大幅下降的现象。

3 结论

(1) 激光-MIG 复合焊中,随着保护气体 He 的增大,MIG 焊的电弧电压会增大,焊接过程的电弧弧长也会增大。

(2) 作为保护气体 He 由于密度小、对电弧的稳定较差,在进行铝合金激光-MIG 复合焊时,相比 Ar 气,需要更大的气流量才能获得较稳定的焊缝成形。在 He 气中加入 Ar 气对改善焊缝表面成形和咬边等问题有明显的效果,并且随着加入的 Ar 气量越大,效果越明显。

(3) 在 He 气中加入少量的 Ar 气有利于提高焊缝熔深,但加入过量的 Ar 气,会降低焊缝熔深。

参考文献

- [1] CHENG Y B. Modern laser welding technology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 89 (in Chinese).
- [2] SOLOLOWSKI W, HERZINGER G, BEYER E. Spectral plasma diagnostics in welding with CO₂ lasers [J]. SPIE, 1988, 1020: 96-102.
- [3] OTTO A, DEINZER G, GEIGER M. Control of transient processes during CO₂-laser beam welding [J]. SPIE, 1994, 2207: 77-84.
- [4] PABBRO R. Beam-plasma coupling in laser material processing [C]//Proceedings of Laser Advanced Materials Processing '92. Roma, Italy: United Nations Industrial Development Organization, 1992: 305-310.
- [5] CARMIGNANI C, MARES R, TOSELLI G. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a single pass butt-welded thick steel plate [J]. Methods Applied Mechanics Engineering, 1999, 179(3/4): 197-214.
- [6] STEGMAN R L, SCHRIEMPF J T, HETTICHE L R. Experimental studies of laser-supported absorption waves with 5ms pulsed of 10.6μm radiation [J]. Applied Physics, 1973, 44(8): 3675-3681.
- [7] FOWLER M C, SMITH D C. Ignition and maintenance of subsonic plasma waves in atmospheric pressure air by CW CO₂ laser radiation and their effect on laser beam propagation [J]. Applied Physics, 1975, 46(1): 138-150.
- [8] MATSUNAWA A, YOSHIDA H, KATAYAMA S. Beam-plume interaction in pulsed YAG laser processing [C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (1984). New York, USA: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 1984: 35-42.