

# 铝合金激光-短路过渡熔化极惰性气体保护焊 复合焊焊缝成形改善

蔡笑宇<sup>1</sup> 李 桓<sup>1</sup> 杨立军<sup>1\*</sup> 高 莹<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 天津大学材料科学与工程学院天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

<sup>2</sup> 天津职业技术师范大学天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222)

**摘要** 铝合金短路过渡熔化极惰性气体保护焊(MIG)焊缝成形较差、熔深浅。利用高速摄像与电信号同步采集系统,研究了铝合金 MIG 焊短路过渡时的熔滴过渡特性,解释了铝合金采用短路过渡焊接时焊缝成形差的原因。采用激光与电弧旁轴复合焊接形式,发现激光的加入改变了铝合金短路过渡的熔滴特性,当激光功率在某一临界值以下时,熔滴过渡稳定,焊缝成形得到显著改善;当激光功率超过临界值时,熔滴过渡不稳定,焊缝成形改善效果不明显。对比传统 MIG 和激光-MIG 焊在采用短路过渡焊接铝合金时的焊缝宏观形貌,激光的加入使熔滴铺展良好,余高降低,熔深增加。研究表明,激光的加入,将工程上焊接铝合金时不常应用的短路过渡 MIG 焊接形式变得有实际应用价值。

**关键词** 激光技术;激光材料加工;激光-熔化极惰性气体保护复合焊接;短路过渡;铝合金;焊缝成形

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0503001

## Improvement of Weld Appearance of Laser-Short Circuiting Transfer Metal-Inert Gas (MIG) Hybrid Welded Aluminum Alloys

Cai Xiaoyu<sup>1</sup> Li Huan<sup>1</sup> Yang Lijun<sup>1</sup> Gao Ying<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting and Precision Machining, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China

**Abstract** The weld appearance of short circuiting transfer metal-inert gas (MIG) welded aluminum alloys is poor, and the penetration depth is shallow. Using high-speed camera and synchronous electrical signal acquisition system, the droplets transfer characteristics of aluminum alloys short circuiting transfer MIG welding are studied, and the reasons that the weld appearance is not good are explained. In the process of aluminum alloys laser-arc paraxial hybrid welding, the results show that the droplets transfer characteristics are changed. When the laser power is below the threshold value, the droplets transfer becomes stable, and the appearance of weld are significantly improved. When the laser power exceeds the threshold value, the droplets transfer becomes instable, and there is no obvious improvement of weld appearance. By comparing the weld cross-sections of traditional MIG and laser-MIG welding when using short circuiting transfer welding, it is found that, with the addition of laser, the droplets spread better, residual height decreases, and penetration depth increases. The experiment proves that, to aluminum alloys, the assistance of laser makes the short circuiting transfer MIG welding available and valuable.

**Key words** laser technique; laser materials processing; laser-metal-inert gas hybrid welding; short circuiting transfer; aluminum alloys; weld appearance

**OCIS codes** 350.3390; 350.3850; 350.5400

收稿日期: 2013-08-19; 收到修改稿日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(51175374)、天津市自然科学基金(11JCYBJC06100)、哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室项目(AWPT-M12-08)

作者简介: 蔡笑宇(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光-电弧复合热源焊接方面的研究。E-mail: xycai@tju.edu.cn

导师简介: 李 桓(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事电弧物理方面的研究。E-mail: lihuan@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: tdyjlabc@163.com

# 1 引 言

随着铝合金的工程应用越来越广泛,其焊接技术得到了更多的关注和发展。当前,针对薄板铝合金的小功率熔化极惰性气体保护焊(MIG)常用的焊接形式为短路过渡焊和脉冲焊。短路过渡 MIG 焊具有热输入低、合适的规范区间内熔滴过渡过程稳定、飞溅少的优点,适合进行薄板高速焊接或空间位置焊缝的焊接<sup>[1]</sup>。但是铝合金若采用短路过渡 MIG 焊接形式,其焊缝成形较差,焊缝熔深浅,在实际的工程应用中需要在焊前对母材进行预热处理。

激光技术的发展推动了激光在材料加工技术中的应用。20 世纪 70 年代末,英国学者 Steen 等<sup>[2]</sup>首先进行激光-电弧复合热源焊接方面的研究,从而引发了激光-电弧复合焊接领域的研究热潮<sup>[3-6]</sup>。以往研究表明,激光-电弧复合热源焊接是焊接铝合金材料的一种理想方法<sup>[7]</sup>,目前已在汽车工业、航空航天领域、高速列车制造、船舶制造等领域得到了较为广泛的应用,并仍具有较为深远的研究发展前景<sup>[8-10]</sup>。

基于激光-电弧复合焊技术,采用在 3 mm 厚铝合金板短路过渡焊接过程中加入一定功率的激光,

主要考察激光的加入对焊接稳定性以及焊缝成形的影响。研究表明,一定功率激光的加入改善了铝合金短路过渡熔滴的稳定性,良好地改善了焊缝成形;同时与单独 MIG 焊和单独激光焊相比,显著提高了焊缝的熔深,对 3 mm 铝合金板可实现一次性焊透。使得激光-短路过渡 MIG 焊具有焊接过程稳定、焊接效率高、焊缝品质良好的优势。

# 2 主要研究内容与结果

## 2.1 试验条件

试验设备: Nd:YAG 固体激光器(型号: JK2003SM),输出激光波长为 1.06 μm,所用聚焦透镜焦距为 300 mm; Lincoln V350-Pro 焊机。MotionPro Y3 型高速摄像机。为了能够全面准确地分析焊接过程,采用高速摄像与电信号同步采集系统,其中高速摄像拍摄速度为 1000 frame/s,电信号采集频率为 500 kHz。

试验用材料为 6061 铝合金,试板尺寸为 200 mm×60 mm×3 mm,焊丝直径为 1.2 mm 的 5183 铝镁焊丝,保护气采用纯度为 99.9% 氩气。

试验搭建平台如图 1 所示。

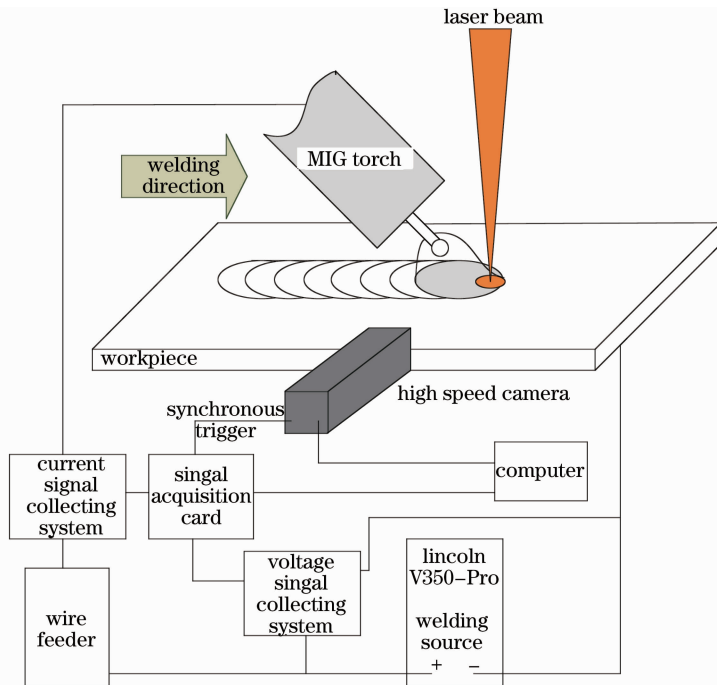


图 1 试验平台示意图

Fig. 1 Schematic representation of experimental plat

本次试验分为不加激光的传统 MIG 焊接铝合金试验和激光-MIG 复合焊接铝合金试验。焊枪采用前倾形式,复合焊时采用激光在前,电弧在后的旁

轴复合形式。焊前采用机械打磨去除工件表面氧化膜。主要试验参数如表 1 和表 2 所示。

表1 铝合金 MIG 焊接试验参数

Table 1 Parameters in MIG welding of aluminum alloys

Wire feed speed / (m · min <sup>-1</sup> )	Welding voltage /V	Welding speed / (mm · s <sup>-1</sup> )	Torch angle (forehand) / (°)	Wire extension /mm	Shielding gas flow / (L · min <sup>-1</sup> )
3.81~5.72	15	2~5	15	15	15

表2 铝合金激光-MIG 复合焊接试验参数

Table 2 Parameters in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys

Wire speed / (m · min <sup>-1</sup> )	Welding voltage /V	Welding speed / (mm · s <sup>-1</sup> )	Wire extension /mm	Shielding gas flow / (L · min <sup>-1</sup> )
4.45	15	3.5	15	15

Laser power /W	Distance between laser and wire /mm	Defocusing amount /mm	Laser beam spot diameter /mm	Angle between laser beam and arc / (°)
900~1500	1	0	1	30

## 2.2 铝合金短路过渡 MIG 焊

### 2.2.1 铝合金短路过渡 MIG 焊熔滴过渡特性与电信号

试验结果表明,传统 MIG 焊接铝合金时,焊接过程中熔化的熔滴堆在母材上不易铺展,造成焊道余高过大,并且熔滴受到电磁爆破力和等离子流力的

的作用,产生震荡,在震荡过程中产生的“波浪”有时会因波峰过高而与焊丝端部接触,使焊丝端部熔化金属在没有形成大滴状熔滴时就过渡到熔池中,这种现象促进了熔滴的短路过渡。图 2 为这种短路过渡形式的一个熔滴过渡周期。此时采用的送丝速度为 4.45 m/min,焊接速度为 3.5 mm/s。

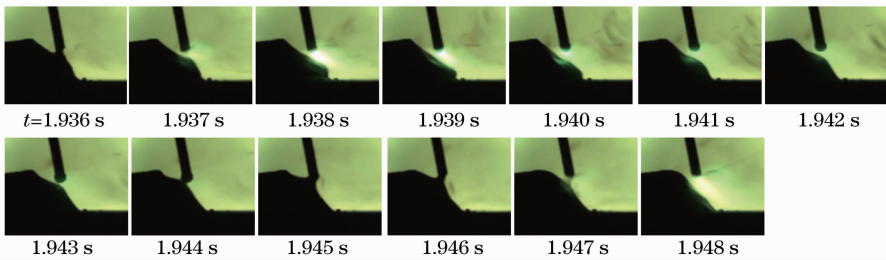


图2 铝合金短路过渡 MIG 焊熔滴过渡

Fig. 2 Droplets transfer of aluminum alloys short circuiting transfer MIG welding

虽然这种过渡形式促进了铝合金的短路过渡,但是在焊接过程中这种过渡形式并不是连续发生,而是与正常的熔滴长大接触熔池的短路过渡并存,这也就造成了熔滴过渡频率的不稳定,进而造成焊

缝表面的鱼鳞纹不均匀,这一点通过图 3 所示的电信号也可看到。

针对这种现象,主要考察了焊接速度与送丝速度的影响。送丝速度为 3.81~5.72 m/min,焊接速度为 2~5 mm/s。试验结果表明,焊速的降低或送丝速度的增加都会使得余高增加,增加了熔池与焊丝端部接触的几率,使这种现象加剧。

### 2.2.2 铝合金短路 MIG 焊焊缝宏观形貌

图 4 为铝合金短路过渡 MIG 焊焊缝宏观形貌。

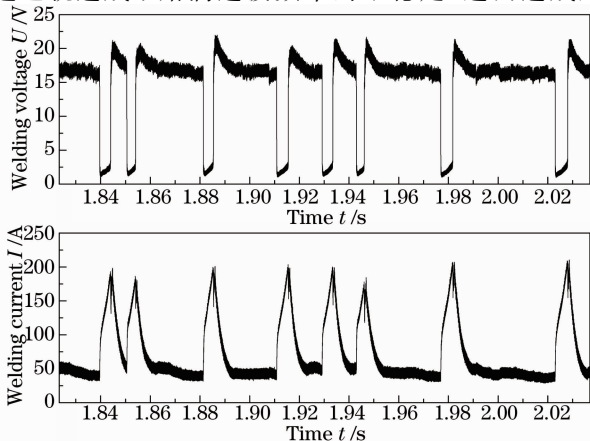


图3 铝合金短路过渡 MIG 焊电信号

Fig. 3 Electrical signal of aluminum alloys short circuiting transfer MIG welding

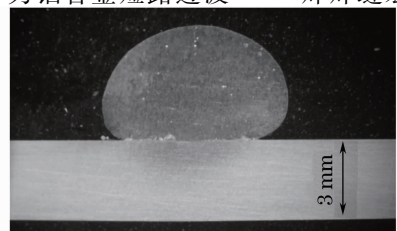


图4 铝合金短路过渡 MIG 焊焊缝宏观形貌

Fig. 4 Weld cross-section of short circuiting transfer MIG welded aluminum alloys

可见熔滴在母材上成球状而没有铺展,母材上几乎没有熔深,仅有一部分热影响区,在熔滴与母材界面处存在气孔。

### 2.2.3 试验结果分析

综合以上现象,分析铝合金短路过渡焊接焊缝成形较差的原因:1)采用短路过渡焊接时,焊接参数较小,铝合金的电阻率又较低,使得焊丝产生的电阻热小,导致焊接热输入很小,加以MIG焊时焊接热量有一大部分要用于熔化焊丝端部,且铝合金热导性良好,使得热量散失得较快,这样就使得熔滴过渡之前母材熔化量很小,从而形成的熔池尺寸很小甚至没有形成熔池,这样熔滴落到母材上时,母材和熔滴边缘形成了液态与固态的界面,由界面热力学知

$$G^s = \gamma A, \quad (1)$$

式中 $G^s$ 为吉布斯自由能, $\gamma$ 为界面张力, $A$ 界面面积。

在温度、压力一定时,吉布斯自由能 $G^s$ 最小时为最稳定状态,因而熔滴倾向于缩小界面面积 $A$ 以使 $G^s$ 为最小值,所以熔滴有向球形变化的趋势,故熔滴在工件表面不易铺展。2)铝合金在空气中极易形成一层致密的氧化膜,即使机械打磨后表面也会迅速形成些许氧化层,利用电弧的阴极清理作用可以破碎氧化膜,但是由于短路过渡焊中焊接参数很小,使得电弧氛围中电离出的正离子较少,并且其在小电场中得到的加速较小,从而其冲击氧化膜时冲击力不够大,阴极雾化效果不够彻底,而由于氧化膜熔点高( $T_m = 2050\text{ }^\circ\text{C}$ )不易熔化,所以在短路过渡焊接铝合金时可以看到熔滴在母材上铺展效果较差,且在熔滴与工件交界处存在氧化膜气孔。3)短路过渡焊时存在上述熔滴过渡不稳定的现象。三者综合,成为了铝合金采用短路过渡焊接时焊缝成形

较差的原因。

## 2.3 铝合金激光-短路过渡MIG复合焊

### 2.3.1 铝合金激光-短路过渡MIG焊熔滴过渡特性与电信号

试验中利用Nd:YAG激光器产生一定功率的激光,加到电弧前方,使激光与电弧复合,为了使激光束不被喷嘴阻挡,复合焊时焊枪倾角适当地增加到 $30^\circ$ 。试验结果表明,激光的加入将对铝合金熔滴短路过渡产生一定的影响,试验中发现这一变化与激光功率、激光-电弧间距、激光与电弧相对位置有关。在本次试验条件下激光-电弧距离在 $1\sim 3\text{ mm}$ 内选择,小于 $1\text{ mm}$ 时熔滴受到金属蒸气向上排斥力作用强烈,焊接飞溅大,大于 $3\text{ mm}$ 时两个热源在焊接过程中形成了相互独立的熔池,不予选择。试验中发现此距离分别选择 $1, 2$ 和 $3\text{ mm}$ 时试验现象只有少许变化,且是距离较近效果较优,因此选用 $1\text{ mm}$ 。当选择激光在前引导焊接时,焊缝成形普遍较为美观;当选择电弧在前引导焊接时,由于激光对熔覆金属有一定的搅动和冲击作用,使得焊缝表面不光滑,甚至当激光功率选择略大时沿焊缝纵向能够看见激光留下的“沟槽”,因此本次试验选择激光在电弧前方的复合形式。激光功率的变化对熔滴过渡特性有着明显的影响:当选择加入 $900\text{ W}$ 激光时,熔滴过渡形式多半向熔池震荡接触焊丝的短路过渡形式转变;加入 $1000\text{ W}$ 和 $1100\text{ W}$ 激光后,熔滴过渡形式基本完全为熔池震荡接触焊丝的短路过渡形式,接触时熔滴还没有长成大滴状。

加入 $1000\text{ W}$ 激光后高速摄像拍摄结果如图5所示。可见此时熔滴过渡为熔池震荡接触焊丝的短路过渡,每隔 $12\text{ ms}$ 熔滴过渡一次,过渡频率加快且非常稳定。

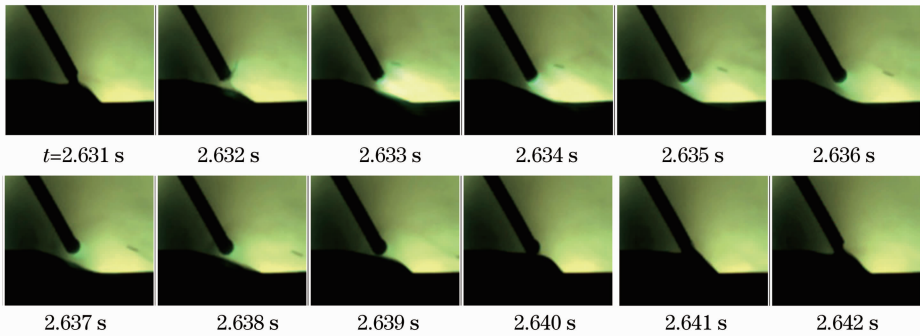


图5 铝合金 $1000\text{ W}$ 功率激光-MIG复合焊熔滴过渡

Fig. 5 Droplets transfer of aluminum alloys  $1000\text{ W}$  laser-MIG hybrid welding

出现这种现象的原因是：由于激光在前，其能量密度很高，可以将氧化膜熔化并使得母材上形成了尺

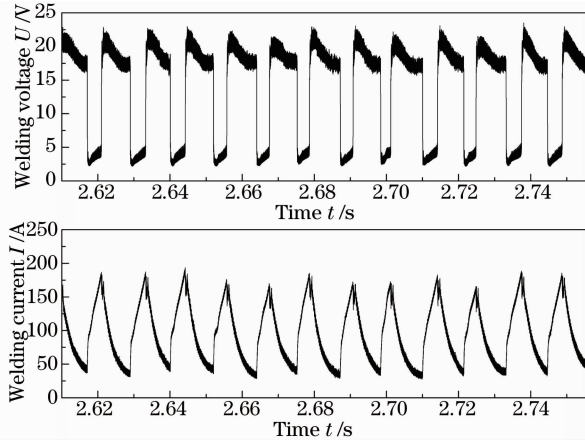


图6 铝合金 1000 W 功率激光-MIG 复合焊电信号  
Fig. 6 Electrical signal of aluminum alloys 1000 W laser-MIG hybrid welding

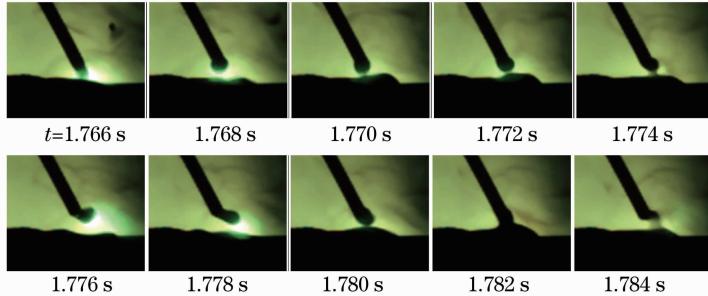


图7 铝合金 1200 W 激光-MIG 复合焊熔滴过渡

Fig. 7 Droplet transfer of aluminum alloys 1200 W laser-MIG hybrid welding

为了便于观察激光加入后引起 MIG 电弧的变化，将镜头光圈减小，从图 8 中发现，在短路后电弧重新燃烧时由于激光的加入使得焊丝端部出现“双弧”，形成了“双重导电”<sup>[12]</sup>，导电通道的增加提升了电弧的易燃性与稳定性，并且观察到焊接电弧根部向激光方向偏移，说明激光起到了吸引并引导电弧

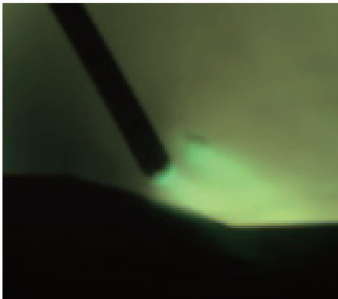


图8 激光-MIG 复合焊电弧重燃瞬间

Fig. 8 Moment of arc restriking of laser-MIG hybrid welding

寸适当的熔池，并且由于激光的匙孔效应，熔化金属不断向小孔后方流动，加以爆破力和等离子流力的作用而使熔池产生了更高频率的震荡，不断地形成一次次“波浪”<sup>[11]</sup>，使得焊丝端部不断与其接触。同时，激光的加入使得熔化金属处于高温低表面张力的状态，从而更有利于熔化金属的铺展。熔滴过渡的稳定性也可从电信号采集结果(图 6)中看到。

加入 1200 W 激光后，熔滴过渡多半为大滴接触短路过渡，并不时地伴有滴排斥过渡，熔滴过渡不稳定。高速摄像拍摄结果如图 7 所示。

产生这种现象的原因是随着激光功率的增大，产生的激光等离子体增强并且产生更多的金属蒸气，给熔滴较大向上的排斥力，阻碍了熔滴的顺利过渡，熔滴长大时间变长，尺寸变大，从而发生了大滴状的短路过渡甚至是大滴排斥过渡，使得熔滴过渡变得不稳定。

的性质，这一点对于铝合金焊接来说是很重要的，因为焊接铝合金时电弧总是自动寻找氧化膜，这样在焊接过程中电弧就会存在一定的不稳定性，加入激光后，由于激光对电弧的吸引使得电弧在激光的引导下去完成阴极雾化，使得焊接过程更趋于稳定，进而也保证了焊缝成形的美观。

### 2.3.2 激光-短路过渡 MIG 焊焊缝表面成形

焊缝表面成形如图 9 所示，加入 900~1100 W 激光后焊缝表面成形明显改善，焊道余高降低，熔宽增加，且表面光亮且鱼鳞纹致密均匀，焊道较直。其中以加入 1000 W 功率激光焊缝成形最为美观。加入 1200 W 激光后焊缝成形与 1000 W 的相比，由于熔滴过渡的不稳定性其焊道鱼鳞纹变得不均匀，焊缝表面不够光亮。当加入 1500 W 激光后，熔滴过渡几乎完全表现出大滴排斥过渡，焊缝表面不均匀。

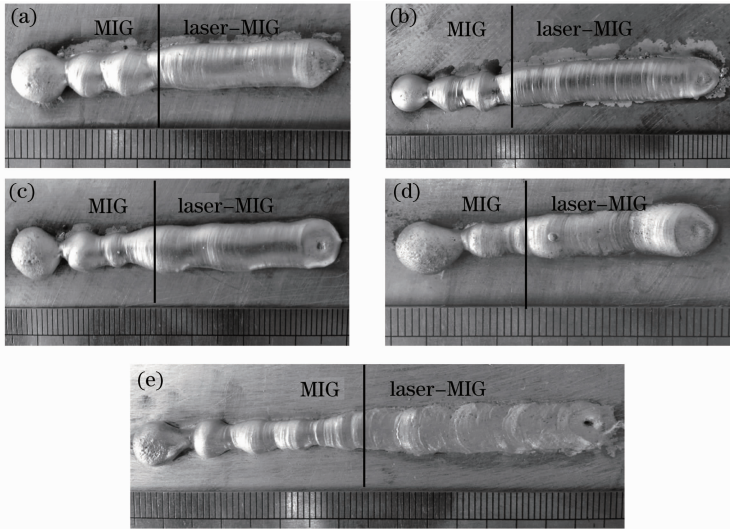


图 9 不同激光功率下铝合金激光-MIG 复合焊焊缝成形。(a) 900 W; (b) 1000 W; (c) 1100 W; (d) 1200 W; (e) 1500 W  
 Fig. 9 Welds appearance of laser-MIG hybrid welded aluminum alloys at different laser powers. (a) 900 W; (b) 1000 W; (c) 1100 W; (d) 1200 W; (e) 1500 W

### 2.3.3 激光-短路过渡 MIG 焊焊缝宏观形貌

图 10 为 1000 W 激光-MIG 复合焊焊缝宏观形貌,对比图 4 可发现,焊缝形貌良好,熔滴铺展效果得到了改善,焊道余高减低,且对于 3 mm 铝合金板可实现一次性焊透。

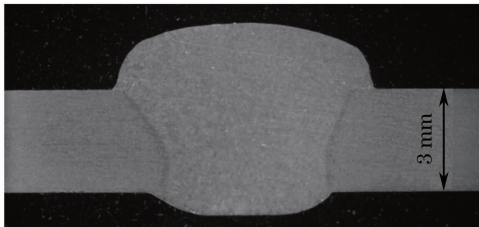


图 10 1000 W 激光-MIG 复合焊焊缝宏观形貌  
 Fig. 10 Weld cross-section of 1000 W laser-MIG hybrid welded aluminum alloys

单独短路 MIG 焊接铝合金时热输入较小;单独激光焊接铝合金时,能量密度小于  $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时,由于铝合金对激光的高反射率使得激光的吸收率很低<sup>[13]</sup>,从而两者单独作用时熔深都较浅。采用激光与电弧复合后,一方面电弧等离子体对光致等离子体有抑制作用,减少了其对激光的吸收与阻碍;另一方面电弧可使金属熔化,使得激光打在液态金属表面,提高了激光的吸收率,相对地提高了工件对能量的吸收,可将 3 mm 板焊透。

## 3 结 论

1) 采用传统短路过渡 MIG 焊焊接铝合金时,熔滴过渡形式不稳定,熔滴不易铺展,焊缝成形较差,从而使铝合金短路过渡焊实际应用价值不大,加

入激光后在不预热的情况下焊缝成形得到明显改善,使得短路过渡变得有实用意义。

2) 不同激光功率对焊缝成形有着不同的影响,功率在临界值以下时短路过渡频率显著增加且过渡稳定,焊缝成形良好;功率超过临界值时易产生大滴状短路过渡甚至大滴排斥过渡,过渡不稳定,焊缝成形略差。

3) 加入一定功率激光后可显著改善短路过渡 MIG 焊的焊缝宏观形貌,使熔滴铺展良好,余高降低,明显提升了焊缝的熔深。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Chunli, Lin Sanbao. Bases of Arc Welding[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2010. 166-172.  
杨春利,林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010. 166-172.
- 2 W M Steen, M Eboo. Arc augmented laser welding[J]. Metal Construction, 1979, 11(6): 332-333, 335.
- 3 J Tusek, M Suban. Hybrid welding with arc and laser beam[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 1999, 4(5): 308-311.
- 4 A Mahrie, E Beyer. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics, and applications[J]. J Laser Applications, 2006, 18(3): 169-180.
- 5 Cui Li, He Dingyong, Li Xiaoyan, et al.. Effect of welding direction on weld shape of fisher laser-MIG hybrid welded titanium alloys[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0103002.  
崔 丽, 贺定勇, 李晓廷, 等. 焊接方向对光纤激光-MIG 复合焊接钛合金焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103002.
- 6 Zeng Xiaoyan, Gao Ming, Yan Jun. Effects of shielding gas in laser-arc hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601005.  
曾晓雁, 高明, 严 军. 保护气对激光-电弧复合焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 00601005.
- 7 T Graf, H Stauffer. Laser-hybrid welding drives VW

- improvements[J]. *Welding Journal*, 2003, 82(1): 42-48.
- 8 H Staufer. Laser hybrid welding and laser brazing at Audi and VW[J]. *Welding in the World*, 2006, 50(7/8): 44-50.
- 9 U Dilthey, F Reich. Applications of the laser-GMA hybrid welding process in steel and aluminium vehicle construction[C]. 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, 2003. 157-163.
- 10 C M Allen, G Verhaeghe, P A Hilton, *et al.*. Laser and hybrid laser-MIG welding of 6.35 and 12.7 mm thick aluminium aerospace alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2006, 519-521: 1139-1144.
- 11 Xu Xiaofu. On the Characteristics of Nd:YAG Laser-Short Circuiting Transfer GMAW Hybrid Welding [D]. Harbin: Harbin Welding Institute, China Academy of Machinery Science & Technology, 2009. 76-77.
- 徐孝福. Nd:YAG 激光-短路过渡 GMAW 复合热源焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所, 2009. 76-77.
- 12 Wang Wei, Lin Shangyang, Wang Xuyou, *et al.*. Double electric conduction mechanism of Nd:YAG laser-pulse MAG hybrid welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0203001.
- 王 威, 林尚扬, 王旭友, 等. 激光-熔化极脉冲电弧复合焊接的双重导电机制[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0203001.
- 13 Flemming Ove Olsen. *Hybrid Laser-Arc Welding* [M]. UK: Woodhead Publishing Limited, USA: CRC Press LLC, 2009. 216-262.

栏目编辑: 宋梅梅