

## 电流辅助钛/铝异种合金激光熔钎焊的特性

陈树海, 李俐群, 陶汪, 陈彦宾, 刁旺战

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 采用电流辅助激光熔钎焊的方法对钛/铝异种合金的焊接特性进行研究。结果表明: 激光功率对钛/铝异种合金接头的力学性能及微观组织有着明显的影响; 辅助电流可有效地降低焊接过程中所需的激光功率, 促进焊丝及铝合金母材的熔化, 提高液态金属对母材的润湿铺展能力, 在一定程度上促进了界面反应。

**关键词:** 激光熔钎焊; 辅助电流; 钛/铝异种合金; 界面反应

中图分类号: TG 456.7

文献标识码: A

### Laser welding-brazing characteristics of Ti/Al dissimilar alloy with assistant current

CHEN Shu-hai, LI Li-qun, TAO wang, CHEN Yan-bin, DIAO Wang-zhan

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The welding characteristic of Ti/Al dissimilar alloy by laser welding-brazing with assistant current was investigated. The experiment results indicate that laser power has a significant influence on mechanical properties and interfacial microstructures. The assistant current effectively decreases laser power required for joining Al alloy to Ti alloy, and significantly enhances the melting of filler wire and Al substrate as well as the wettability of liquid metal on Ti substrate. In addition, the interfacial reaction is improved by increasing assistant current to some degree.

**Key words:** laser welding-brazing; assistant current; Ti/Al dissimilar alloy; interfacial reaction

钛合金和铝合金广泛应用于航空、航天及汽车工业中<sup>[1-2]</sup>, 但由于二者之间物理及化学性能的巨大差异, 采用传统的熔焊方法进行焊接时会产生大量的金属间化合物, 导致接头脆化, 强度低<sup>[3]</sup>。采用钎焊<sup>[4]</sup>、扩散焊<sup>[5-6]</sup>、摩擦焊<sup>[7]</sup>均可实现钛/铝异种合金的连接, 但是受到真空环境及接头形式的限制。采用激光熔钎焊的方法可有效地控制界面反应, 实现两种材料的可靠连接, 已经成为最有前景的钛/铝异种合金的焊接方法。前期的研究表明, 采用能量分布较为均匀的矩形光斑配合 V 形坡口可获得良好的钛/铝异种合金焊接接头, 有效地抑制界面反应<sup>[8-9]</sup>。但是, 这种焦斑

尺寸较大的光斑虽然能够保证液态金属对母材的润湿性能, 但是其能量密度较低, 一般需要较高的激光功率才能保证适当的界面反应, 对于 CO<sub>2</sub> 激光, 一般要超过 1 800 W<sup>[10-11]</sup>。

近年来, 国内外对热丝焊方法进行了大量的研究, 并已被逐渐引入到异种合金的激光钎焊领域<sup>[12]</sup>。焊丝在填入熔池之前对其进行预热可以降低所需的激光功率, 但是却不能够提高液态金属的润湿铺展性能和促进界面反应。如果在焊丝和工件之间通入电流构成回路, 利用电阻热方法同时加热焊丝、熔池及母材效果可能更佳。肖荣诗等<sup>[13]</sup>研究了电流热效应对激光焊接

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275036)

收稿日期: 2008-12-25; 修订日期: 2009-04-20

通信作者: 陈树海, 博士研究生; 电话: 0451-86415506; 传真: 0451-86415374; E-mail: shchenhit@gmail.com

铝合金的影响,他们认为由于铝合金的电阻率低,磁流体效应是焊接效果提高的主要因素,而非焊丝预热因素。但是在焊接过程中的固/液分界面的温度位于熔点附近,只需较小的热量即可促使固/液界面向固态一侧推移,所以电流加入后产生的热效应才是焊接效果改善的本质因素。

为降低焊接所需的激光功率,同时改善接头下部的界面反应,本文作者提出采用在焊丝与工件之间通入辅助电流的方法,研究钛/铝异种合金激光熔钎焊的焊缝成形、微观组织及力学性能,通过焊丝及熔池两方面热效应的分析,揭示电流辅助激光填丝焊接的物理本质。

## 1 实验

试验母材为厚 1.5 mm 的 Ti-6Al-4V 钛合金和 5A06 铝合金板材。钛合金的主要成分(质量分数)为:Al 5.5%~6.8%, V 3.5%~4.5%, Fe 0.3%, O 0.2%, C 0.1%, N 0.05%, H 0.01%, 其余为 Ti。铝合金的主要成分为: Mg 5.8%~6.8%, Si 0.4%, Mn 0.5~0.8%, Fe 0.4%, Zn 0.2%, Cu 0.1%, Ti 0.02%, 其余为 Al。首先用丙酮去除油污等杂质,然后钛合金用酸洗,铝合金用碱洗,烘干后进行焊接。选用 AlSi12 共晶合金焊丝,焊丝熔点范围为 575~590 。

采用积分镜将圆形光束调制能量较为均匀分布的矩形焦斑,焦斑尺寸为 2 mm × 4 mm。激光垂直工件入射,焦点位于工件的上表面,光斑的长边垂直于焊接方向,为调整钛合金和铝合金之间的热导率及反射系数之间的差异,光束向铝合金一侧偏移 0.4 mm。在焊接过程中,焊丝与工件的夹角为 30°,在激光束的前方填入,采用氩气双面保护。焊接试样均开 V 形坡口,便于焊丝与铝合金母材熔化混合形成熔焊接头的同时,液态金属对钛合金母材润湿铺展形成钎焊接头。

采用德国 ROFIN-SINAR 公司生产的扩散冷却射频频激励 CO<sub>2</sub> 激光器进行焊接试验,额定功率为 3 kW。辅助电流采用 Fronius 的 TP1500HD 热丝电源,输出范围为 10~150 A,输出电压恒定为 10 V。热丝电源的正负极分别与工件和送丝嘴连接,在焊接过程中形成回路,利用电阻热加热焊丝及熔池。采用金相显微镜和扫描电镜(SEM)对接头组织形貌、界面微观组织进行观察和分析;拉伸试验在 INSTRON-5569 电子万能材料试验机上进行,拉伸速度 1.0 mm/min,数据采集频率为 5 Hz,温度 18 。

为 10 mm × 50 mm,为了能准确地衡量界面处对抗拉强度的影响,焊缝的余高被磨平。

## 2 结果与分析

### 2.1 工艺参数对焊缝成形的影响

在焊接过程中填充焊丝与熔池相接触构成回路,焊丝及熔池将产生电阻热,可有效地降低焊接过程中所需的激光功率。图 1 所示为在激光功率为 1 200 W 时焊缝的截面形貌,可以看出,钎料对钛合金母材的润湿性良好,焊缝成形优良。

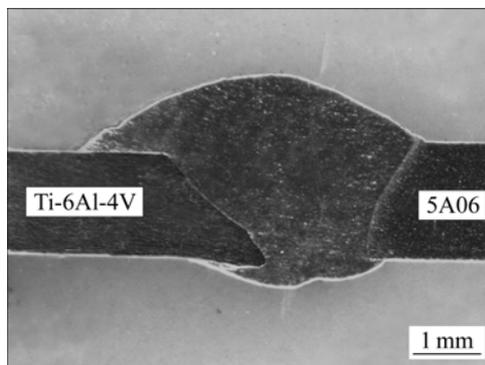
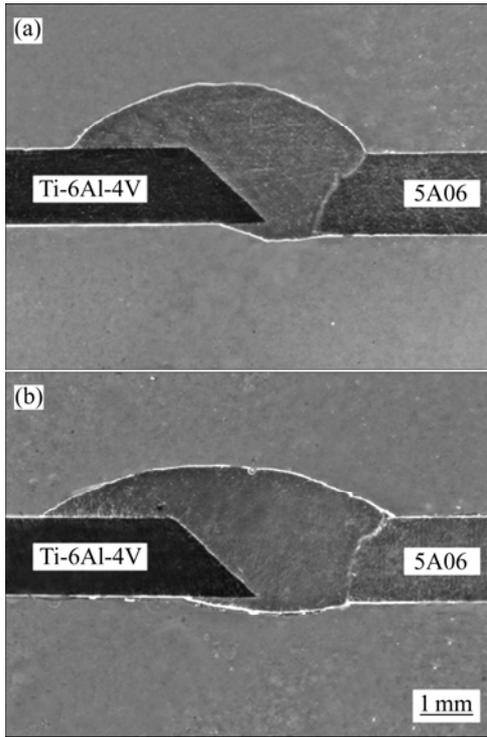


图 1 电流辅助激光熔钎焊接头的横截面形貌

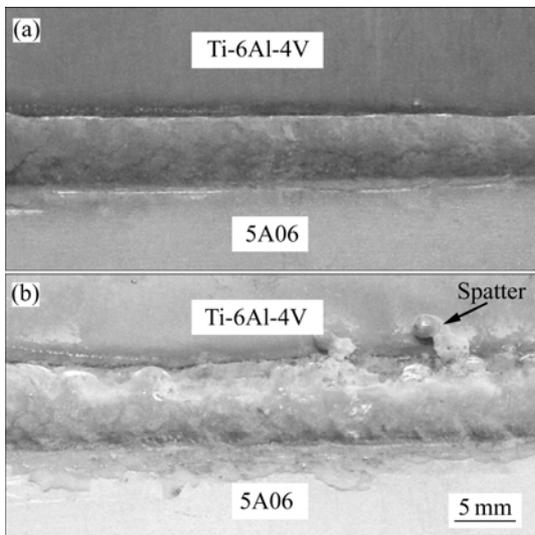
Fig.1 Cross-section morphology of joint by laser welding-brazing with assistant current ( $P=1\ 200\ W$ ,  $v_h=0.5\ m/min$ ,  $v_s=2.0\ m/min$ ,  $I=120\ A$ )

图 2 所示为加入辅助电流对接头形貌的影响。加入 100 A 的辅助电流在 1 400 W 的激光功率下铝合金母材熔化量高于激光功率为 1 800 W 的冷丝熔钎焊,而且接头的上部与下部液态钎料对钛合金母材的润湿角明显变小,润湿铺展性能增加。分析认为,焊接过程中电流产生的热效应能促使铝合金的熔化量增大,提高固态母材与液态填充金属的温度,增强润湿铺展能力。

当辅助电流适当时,在较低的激光功率条件(如 1 800 W)下,焊缝的表面较为光滑,如图 3(a)所示;随着激光功率的升高,焊缝表面凹凸不平,光滑程度降低,当激光功率为 2 000 W 时,有时会出现飞溅现象,如图 3(b)所示。在激光填丝钎焊的过程中,连续填入熔池的焊丝在激光辐照下不断地熔化,固态焊丝端部与熔池一直保持接触状态,一般不会出现现在熔化极电弧焊中所谓的熔滴过渡现象。这有利于焊接过程的稳定和对焊缝成形的控制。



**图2** 辅助电流对接头形貌的影响  
**Fig.2** Influence of assistant current on morphologies of joints: (a)  $P=1\ 800\ W, I=0\ A$ ; (b)  $P=1\ 400\ W, I=100\ A$  ( $v_h=0.5\ m/min, v_s=2.0\ m/min$ )



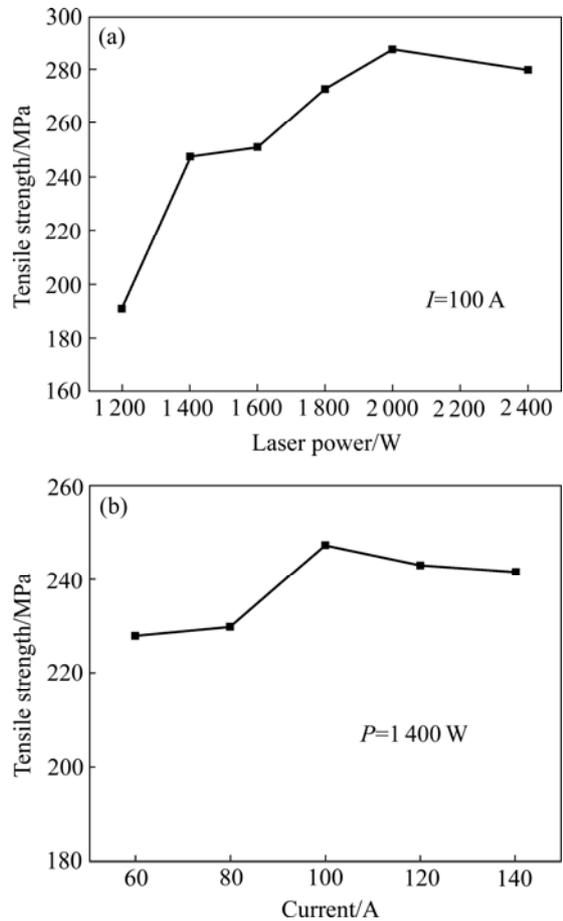
**图3** 激光功率对电流辅助激光熔钎焊表面成形的影响  
**Fig.3** Influence of laser power on weld appearance by laser welding-brazing with assistant current: (a)  $P=1\ 600\ W$ ; (b)  $P=2\ 000\ W$  ( $v_h=0.5\ m/min, v_s=2.0\ m/min, I=100\ A$ )

在激光熔钎焊过程中,电流的热效应是辅助性的,使焊丝及铝合金母材熔化的主要能量来源于激光。在较高的激光功率条件下,焊丝的熔化状态、液态钎料较低的粘度都可能是焊缝成形变差的原因。在激光功

率较低条件下,焊缝表面较为光滑,辅助电流的大小在合适范围内时,不会对焊缝表面的光滑程度产生明显的影响。但是电流过大(超过 120 A)时,焊接过程不是很稳定,并且伴随着起弧的现象。

**2.2 接头的抗拉强度与界面微观组织**

图4所示为激光功率与辅助电流对接头强度的影响。由图4可以看出,激光功率对电流辅助激光熔钎焊接头抗拉强度的影响较明显,随激光功率的升高抗拉强度逐渐提高(图4(a)),最高可达 287.4 MPa(2 000 W),最低仅为 190.8 MPa(1 200 W)。为此,我们试图在较低的激光功率下通过增加电流的方法来提高接头强度,但是辅助电流的变化对接头的抗拉强度的影响并不明显,如图4(b)所示。



**图4** 电流辅助激光熔钎焊接头的抗拉强度  
**Fig.4** Tensile strength of joint by laser welding-brazing with assistant current: (a) Laser power ( $I=100\ A$ ); (b) Assistant current ( $P=1\ 400\ W$ )

接头断口分析发现,在较低的激光功率条件下,裂纹大多发生在钛合金钎缝界面处,且多从接头底部开始起裂,沿界面逐渐向焊缝中部扩展。当激光功率较高时,接头底部结合良好,完全在焊缝中部断裂时,

接头的强度最高。

在激光熔钎焊过程中, 由于激光无法直接辐照接头底部, 主要依靠熔融液态金属传热实现固态钛合金与液态填充金属之间的物理化学反应, 因此底部界面反应相对较弱, 一直是裂纹萌生的主要区域。控制接头厚度方向上反应层的一致性是提高激光熔钎焊接头强度的关键。一般情况下, 适当提高激光功率与施加辅助电流能够提高接头底部的温度, 非常有助于改善接头底部的界面反应。

图 5 和 6 所示分别为激光功率变化与电流辅助作用对接头底部界面组织的影响。从激光功率的影响来看(图 5), 在激光功率为 1 400 W 时(图 5(a)), 接头的上部发生了良好的冶金反应, 反应层较薄(约为 1 μm), 接头底部没有观察到明显的反应层。随着激光功率提高到 1 800 W 时(图 6), 接头的下部界面则出现了明显的反应层, 接头上、下部位的反应层状况逐渐趋于一致。

以 1 800 W 功率为例, 观察辅助电流对界面反应的影响(图 7), 没有电流热效应的辅助作用时界面反应层更薄, 且呈毛刺状, 可以表明电流的热效应对界面反应层的控制起到了积极作用, 不过, 在辅助电流增加到 140 A 时(图 8), 其界面形态与 100 A 时(图 6)比较基本没有大的变化。由此可以推断, 辅助电流的

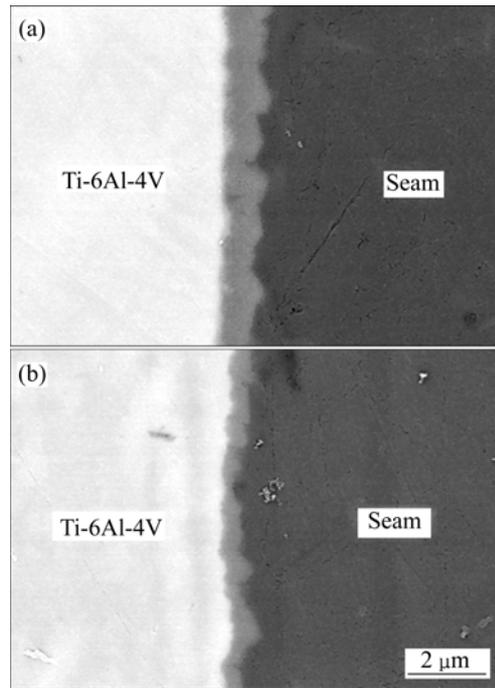


图 6 激光功率为 1 800 W 时 Ti/Al 接头界面的微观组织  
Fig.6 Interfacial microstructures of Ti/Al joint with laser power of 1 800 W ( $I=100$  A): (a) Top of joint, (b) Bottom of joint

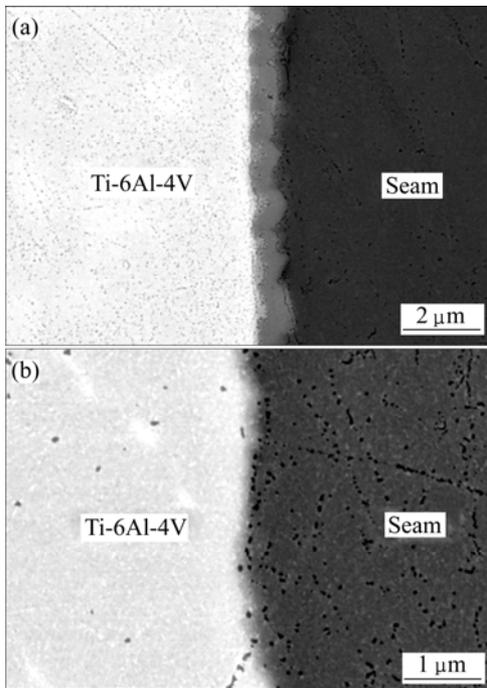


图 5 激光功率为 1 400 W 时 Ti/Al 接头界面的微观组织  
Fig.5 Interfacial microstructures of Ti/Al joint with laser power of 1 400 W ( $I=100$  A): (a) Top of joint, (b) Bottom of joint

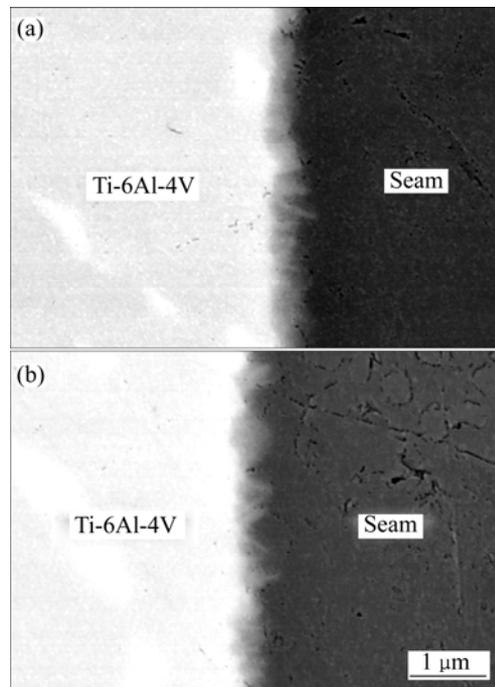


图 7 激光功率为 1 800 W 且无辅助电流时 Ti/Al 接头界面的微观组织  
Fig.7 Interfacial microstructures of Ti/Al joint with laser power of 1 800 W and no current: (a) Top of joint, (b) Bottom of joint

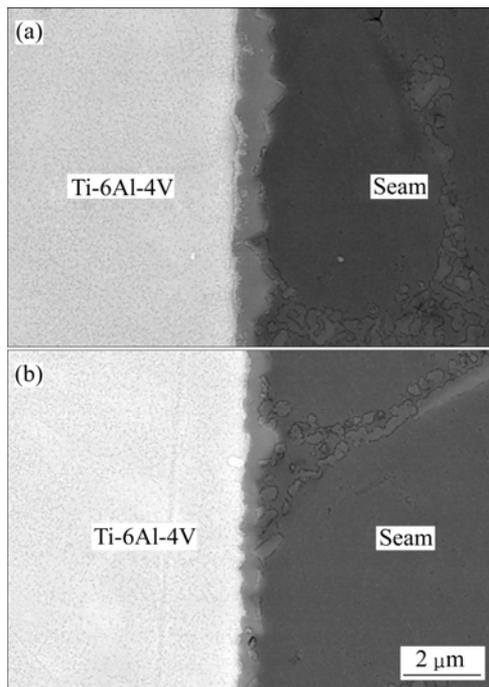


图8 激光功率为1 800 W且电流为140 A时Ti/Al接头界面的微观组织

Fig.8 Interfacial microstructures of Ti/Al joint with laser power of 1 800 W and current of 140 A: (a) Top of joint, (b) Bottom of joint

升高并不能使熔池的温度大幅度升高,仅能在一定程度上促进界面反应。

### 2.3 辅助电流热效应分析

由上述分析可知,辅助电流的加入可明显降低激光熔钎焊过程中所需的激光功率(图2),并可有效地促进焊丝及母材的熔化,提高液态金属的润湿铺展能力,在一定程度上促进接头的界面反应。

本试验是通过电流的热效应加热焊丝及母材,其电流的大小保持不变,因而电阻率是决定其热效应的本质因素。在焊接过程中,电流需要经过固态铝合金焊丝、液态金属和母材构成回路。在固态条件下,几乎所有金属的电阻率随温度呈线性变化,其大小由下式计算:

$$\rho = \rho_0(1 + at)$$

式中: $t$ 为温度, ; $\rho_0$ 为0时的电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $a$ 为电阻率温度系数。对于纯铝,  $\rho_0 = 2.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ,  $a = 4.7 \times 10^{-3}/^\circ C$ 。液态金属的电阻率较为复杂,可根据文献[14-15]中的实测数据获得。这样就得到了纯铝在不同温度下的电阻率,如图9所示。

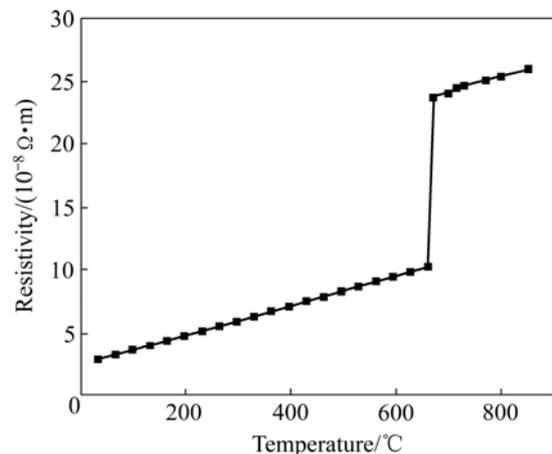


图9 温度对电阻率的影响<sup>[15]</sup>

Fig.9 Influence of temperature on resistivity of pure Al

由图9可以发现,随着温度的升高,铝的电阻率缓慢增大,当温度达到铝的熔点时电阻率呈阶跃式升高,是固态条件下的两倍多,而在液态条件下电阻率随温度的升高仍然呈缓慢上升趋势,所以电流对液态金属的热效应更为明显。铝合金的电阻率同纯铝之间略有差别,但趋势大致相同。铝合金焊丝温度与电阻率的这种关系,对焊接过程焊丝及母材的熔化有重要的影响。辅助电流对激光钎焊过程的影响主要体现在熔池与焊丝两个方面。

由图2可以看出,辅助电流的热效应明显增大了金属的熔化量;从图6和7的界面微观组织来看,辅助电流一定程度上促进了界面反应,界面温度只是小幅上升,不至于对界面产生很大的影响。在焊接过程中,随着电流的增加,液态金属的温度升高,由于铝合金的热导率较高,因而热量迅速向温度较低的固态方向传导,这样就促进了固/液界面向固态方向推移,使固态金属的熔化量增大。然而,固态金属的熔化需要熔化潜热,这就在很大程度上消耗了增加的热量,致使熔池温度随电流增大而升高的幅度不明显。所以,辅助电流对激光填丝焊的影响实质是促进了固/液界面向固态金属一侧推移,熔化潜热消耗掉了增加的大部分能量,温度仅有小幅度上升。

由于电阻值和电流密度均与导体的横截面积成反比,在截面最窄处的焊丝端头位置的电阻值和电流密度最大,电流热效应对焊接过程的影响更为明显。在焊接过程中,若激光功率较小,焊丝及母材的熔化不充分,此时辅助电流的加入起到了两方面的作用。首先,电流自身的热效应使固/液界面向固态焊丝方向移动,这就促进了焊丝的熔化。其次,焊丝及母材的温度升高,使其对激光的吸收率增加,提高了激光的能

量利用率。所以这两方面因素的共同作用使所需的激光功率大大降低。若激光功率或辅助电流过大,将使固/液界面过分向固态焊丝一侧推移,使焊丝的液相部分过长,致使焊接过程不够稳定,甚至有可能使液态焊丝部分的电磁收缩力增强,致使液相桥爆断,产生飞溅,并伴随着微小电弧产生。

通过以上分析,辅助电流对熔池的影响主要是促进了铝合金母材的熔化,对熔池温度的影响不大;而对焊丝的影响更重要的是体现在保持焊接过程的稳定上。应该指出,正是由于辅助电流的增加仅能在一定程度上促进界面反应,而不会使得界面反应太过剧烈,因此,这有利于提高接头的综合力学性能。

### 3 结论

1) 辅助电流的加入有效地降低了焊接过程中所需的激光功率,对焊缝成形和液态金属对母材的润湿铺展有着明显的促进作用。激光功率和辅助电流不宜过大,否则会使焊接过程不稳定甚至产生飞溅。

2) 激光功率对接头的抗拉强度及微观组织的影响,比辅助电流的强。随着激光功率的增加,接头的抗拉强度增大,明显地促进了接头底部的界面反应。

3) 辅助电流的加入促进了固/液界面向固态金属一侧推移,使铝合金基体的熔化量增加,但是熔池的温度仅小幅度上升,在一定程度上促进了界面反应。

### REFERENCES

- [1] FALLER K, FROES F H. Use of titanium in family automobiles: Current trends[J]. JOM, 2001, 53(4): 27-28.
- [2] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, WITTEBROOD A J, De SMET P, HASZLER A, VIEREGGE A. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 280(1): 37-49.
- [3] MAJUMDAR B, GALUN R, WEISHEIT A, MORDIKE B L. Formation of a crack-free joint between Ti alloy and Al alloy by using a high-power CO<sub>2</sub> laser[J]. J Mater Sci, 1997, 32: 6191-6200.
- [4] TAKEMOTO T, OKAMOTO I. Intermetallic compounds formed during brazing of titanium with aluminum filler metals[J]. Journal of material science, 1988, 23(4): 1301-1308.
- [5] REN Jiang-wei, LI Ya-jiang, FENG Tao. Microstructure characteristics in the interface zone of Ti/Al diffusion bonding[J]. Materials Letters, 2002, 56(5): 647-652.
- [6] SOHN W H, BONG H H, HONG S H. Microstructure and bonding mechanism of Al/Ti bonded joint using Al10Si1Mg filler metal[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 355(1/2): 231-240.
- [7] 傅莉, 杜随更, 白建红. TC4钛合金与LD10铝合金感应摩擦焊接头的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(2): 228-232.
- [8] FU Li, DU Sui-geng, BAI Jian-hong. Microstructures and properties of induction friction welded joint of TC4 Ti alloy and LD10 Al alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2007, 17(2): 228-232.
- [8] 陈树海, 李俐群, 陈彦宾. 矩形光斑钛/铝异种合金激光熔钎焊[J]. 中国激光, 2007, 35(12): 2036-2041.
- CHEN Shu-hai, LI Li-qun, CHEN Yan-bin. Laser welding-brazing of Ti/Al dissimilar alloys joint with rectangle spot[J]. Chinese J Lasers, 2007, 35(12): 2036-2041.
- [9] 倪家明, 李俐群, 陈彦宾, 封小松. 铝/钛异种合金激光熔钎焊接头特性[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 615-622.
- NI Jia-ming, LI Li-qun, CHEN Yan-bin, FENG Xiao-song. Characteristics of Al/Ti dissimilar alloys laser welding-brazing joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2007, 17(4): 615-622.
- [10] 陈树海, 李俐群, 陈彦宾. 光斑形式对钛/铝异种合金激光熔钎焊特性的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 49-52.
- CHEN Shu-hai LI Li-qun, CHEN Yan-bin. Welding characteristics of Al/Ti dissimilar alloys using laser welding-brazing with different spot[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 49-52.
- [11] 陈树海, 李俐群, 陈彦宾. 铝/钛异种合金激光熔钎界面特性[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(6): 991-996.
- CHEN Shu-hai, LI Li-qun, CHEN Yan-bin. Interface characteristic and property of Ti/Al dissimilar alloys joint with laser welding-brazing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2008, 18(6): 991-996.
- [12] MATHIEU A, PONTEVICCI S, VIALA, J C, CICALA, E, MATTE S, GREVEY D. Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si)[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 435/436(5): 19-28.
- [13] XIAO Rong-shi, ZUO Tie-chuan, HÜGEL L M. Hybrid Nd: YAG laser beam welding of aluminum in addition with an electric current[C]//Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, Lasers in Material Processing and Manufacturing II, Beijing: The International Society for Optical Engineering, 2005: 195-200.
- [14] BRETONNET J L, AUCHET J, GASSER J G. Electrical transport properties of the liquid Al-Cu alloys[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1990, 117/118: 395-398.
- [15] 桂满昌, 贾均, 李庆春, 冯健宏. 液态金属电阻率测定装置及应用[J]. 材料工程, 1994(7): 29-31.
- GUI Man-chang, JIA Jun, LI Qing-chun, FENG Jian-hong. Design and application of the instrument of electrical resistivity measurement for liquid metal[J]. Journal of Materials Engineering, 1994(7): 29-31.