

镁/钛激光熔钎焊界面微观结构与元素热力学行为分析

檀财旺¹ 黄煜华¹ 陈 波^{1*} 李俐群² 冯吉才^{1,2}

¹哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209

²哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 镁/钛(Mg/Ti)异种金属既不反应也不互溶的特性制约着两者之间的冶金结合和可靠连接。为解决这一问题并拓宽 Mg、Ti 的应用,采用富铝镁基焊丝对 Mg/Ti 实施激光熔钎焊,实现了 Mg/Ti 之间的连接。在此基础上,利用扫描电镜对界面进行观察分析,并利用 Miedema 二元热力学模型和 Toop 三元热力学模型对调控元素 Al 在界面处的扩散及连接机理进行研究。结果表明,在焊丝中调控元素 Al 的参与下,Mg/Ti 界面处形成超薄的反应层,元素线扫描结果显示 Al 在靠近 Ti 一侧界面处富集,实现了界面的冶金结合。热力学计算结果显示,在界面处 Al-Ti 化合物具有更大的析出驱动力,而且 Al 在富 Ti 一侧的化学势较低,且 Al 的界面偏聚导致 Al 的化学势进一步下降,表明 Al 的扩散方式为上坡扩散。

关键词 激光技术; 激光熔钎焊; 钛合金; 镁合金; 热力学模型

中图分类号 TG47

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0303009

Microstructure and Thermodynamic Behavior of Laser Welded-Brazed Mg/Ti Dissimilar Joint

Tan Caiwang¹ Huang Yuhua¹ Chen Bo¹ Li Liqun² Feng Jicai^{1,2}

¹Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

²State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The main obstacles of metallurgical bonding and reliable joining of Mg/Ti dissimilar joint are their non-reactive and immiscible characteristics. To overcome those problems and expand their application, laser lap joining of Mg/Ti with Al-rich Mg based wire is carried out. Mg/Ti interface is observed with scanning electron microscope, and the role of Al element in interfacial diffusion and bonding mechanism is investigated based on the result of calculation of Miedema binary and Toop ternary thermodynamic model. The results demonstrate that an ultra-thin reaction layer is observed at the Mg/Ti interface with the help of Al elements from filler. The element line scan results show that enrichment of Al element is evidenced at the interface, indicating metallurgical bonding of Mg and Ti. Thermodynamic calculation result reveals Al-Ti intermetallic compound has more driving force than other compounds, which indicates that it is the compound firstly precipitated from the liquid. In addition, Al chemical potential near the Ti side is lower than that at other places. Al segregation at the interface further causes the decrease of Al chemical potential, indicating the behavior of Al element from Mg fusion zone to the interface is uphill diffusion.

Key words laser technique; laser welding; titanium alloys; magnesium alloys; thermodynamic model

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2015-09-11; 收到修改稿日期: 2015-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51504074)、山东省自然科学基金(BS2015ZZ008)

作者简介: 檀财旺(1986—),男,博士,讲师,主要从事异种材料、特种材料、特种环境(水下)的激光加工及焊接基础与应用方面的研究。E-mail: tancaiwang@163.com

*通信联系人。E-mail: chenber@163.com

1 引言

镁(Mg)合金作为最轻质的金属结构材料之一,具有比强度高、比刚度高、减震性和导电导热性好、易切削、无污染及易回收等优点,被誉为“21世纪绿色工程材料”,广泛应用于潜艇、航空航天、摩托车等行业^[1-3]。

钛(Ti)及Ti合金一直是航空航天工业的“脊柱”之一,具有密度小、比强度高和耐腐蚀性好的特点。目前,Ti及其合金最常用于航空航天和军事工业^[4]。在航天航空行业中,大型整体Ti合金关键结构件用量的高低,已成为衡量现代飞机和航空发动机等重大装备技术先进性的重要标志之一^[5]。实现Mg合金和Ti合金的可靠连接,以及Mg/Ti钛轻量化结构件的生产,可进一步拓展Mg合金和Ti合金的应用范围,对航空航天行业的发展起到至关重要的作用。

Mg/Ti之间的可靠连接受制于Mg、Ti两种元素之间既不反应也不互溶的问题。为解决这一问题,国内外研究人员进行了大量的研究,主要方式是通过不同的途径引入调控元素。西北工业大学熊江涛等^[6]采用以铝(Al)为中间层的瞬间液相扩散焊实现了Mg/Ti的连接。证明了Al元素作为调控元素的可能性,但发现接头的强度对焊接温度较为敏感,同时焊接方法本身也限制其进一步发展。日本学者Masayuki等^[7]采用不同含Al量的Mg板来研究调控元素的影响,利用搅拌摩擦焊实现了Mg/Ti的连接。在接头界面处发现了富Al薄层,由于Mg板的含Al量不能灵活控制,界面反应调控并不精准。为了实现调控元素的灵活控制,本课题组前期利用预制Al夹层的方法实现了Mg/Ti搭接激光焊,在激光辐照区域发现了AlTi₃化合物^[8]。Gao等^[9]采用激光填丝焊手段,发现界面处的元素Al向Ti侧扩散,但未对其热力学机制进行进一步的阐述。上述均从试验的角度分析了Mg/Ti界面冶金连接的可行性,但从热力学角度揭示连接的原因未见相关报道。

本文对Mg/Ti搭接接头进行激光熔钎焊,利用Mg基富Al焊丝做为填充钎料,充分利用调控元素Al对界面反应的调控,实现冶金连接。在此基础上,从热力学角度分析界面元素扩散行为及接头形成的机理。

2 试验材料及方法

采用母材为AZ31B镁合金与TC4钛合金板材。两者的试验件规格均为100 mm×30 mm×1.5 mm,其化学成分分别如表1和2所示。由于Al元素能够与Mg和Ti反应,可以作为调控元素起到中间连接作用,因此选定目前含Al量最高的AZ91焊丝,其化学成分如表3所示。为了能够更好对比AZ91焊丝中Al元素的调控效果,还选择了与Mg母材等成分的AZ31焊丝。焊接前用低速角磨机去除Mg合金表面和Ti合金表面至露出金属光泽,再用丙酮擦洗Mg合金和Ti合金表面以去除油污等杂质。

表1 AZ31B镁合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloy (mass fraction, %)

Element	Al	Zn	Si	Fe	Mg
Content	2.5~3.5	0.5~1.5	0.10	0.005	Bal.

表2 Ti6Al4V钛合金化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of Ti6Al4V titanium alloy (mass fraction, %)

Element	Al	V	Fe	C	N	H	O	Others	Ti
Content	5.5~6.8	3.5~4.5	0.30	0.10	0.05	0.01	0.20	0.5	Bal.

表3 AZ91镁合金焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical compositions of AZ91magnesium wire (mass fraction, %)

Element	Al	Zn	Si	Fe	Mg
Content	8.6~9.4	0.6~1.4	0.10	0.005	Bal.

Mg/Ti填丝光纤激光熔钎焊过程如图1所示。试验采用IPG掺镱光纤激光器,激光焦距为285 mm,输出最大功率为10 kW,焦点处光斑直径为0.4 mm。焊接时激光垂直辐照工件表面,在光束前方送丝,其中焊丝直径1.6 mm,光束后方侧吹氩(Ar)保护气。接头形式为搭接接头,由于Mg的熔点(660 ℃)较低,故将Mg合金作为上板,Ti板置于下部,从而使Mg合金和焊丝熔化,在重力作用下与部分微熔的Ti板进行充分的接触反应。试验过程中为了减少上板Mg合金的烧损,采用了散焦(正离焦10 mm)的焊接模式,即激光焦点位于工件之上10 mm。

焊后采用扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)等手段对接头的宏观成形、组织形貌和成分进行观察和分析。

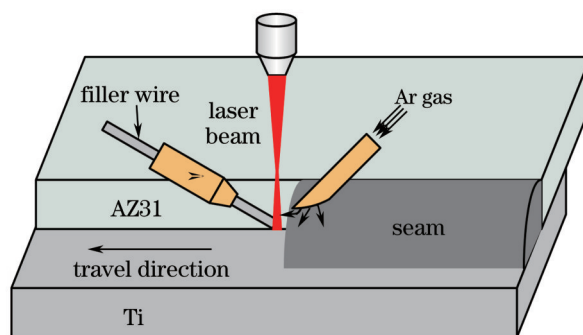


图1 镁/钛激光填丝熔钎焊过程示意图

Fig.1 Schematic of laser welding-brazing process of Mg/Ti with wire

3 Mg-Al-Ti 三元系热力学计算模型

在预测二元合金热力学性质的各种理论模型中,目前最成功的是Miedema模型理论。该模型根据元素的基本物理参数和模型的经验参数预测二元合金的生成焓,由于属于半经验公式所以其准确性高。利用Miedema模型可以求取任意浓度二元合金形成焓。目前三元合金的热力学性质计算是由二元系溶体的热力学性质推算三元系溶体的热力学性质。常用的几何模型分为对称模型和非对称模型两大类,其中非对称模型具有更好的精度,在非对称模型中Toop模型的计算过程相对简易且精度较高,因而在外推三元合金的热力学性质的计算中,仍主要以Toop模型为主^[10]。

采用Miedema模型求二元合金体系的混合焓,再通过Toop模型推算出三元合金体系的混合焓,以实现最终求三元合金体系热力学参数的目的。

Miedema二元合金系模型为^[11]

$$\Delta H_{ij} = f_{ij} \frac{x_i [1 + \mu_i x_j (\phi_i - \phi_j)] x_j [1 + \mu_j x_i (\phi_j - \phi_i)]}{x_i V_i^{2/3} [1 + \mu_i x_j (\phi_i - \phi_j)] + x_j V_j^{2/3} [1 + \mu_j x_i (\phi_j - \phi_i)]}, \quad (1)$$

$$f_{ij} = \frac{2p V_i^{2/3} V_j^{2/3} [q/p (\Delta n_{ws}^{1/3})^2 - (\Delta \phi)^2 - a(r/p)]}{(n_{ws}^{1/3})_i^{-1} + (n_{ws}^{1/3})_j^{-1}}, \quad (2)$$

式中 x 为组元的摩尔分数; ϕ 为电负性; V 为摩尔体积; n_{ws} 为电子密度; q 、 r 、 μ 、 α 、 p 为经验常数,取 $q/p=9.4$,对液态合金 $a=0.73$,对固态合金 $a=1$ 。上述各物理性参数和经验常数可在文献[11]中获得,其中Mg、Al、Ti物理性参数如表4所示。

表4 Al、Ti、Mg的参数值^[11]

Table 4 Parameters of Al, Mg, and Ti

Element	$n_{ws}^{1/3}$ (a.u.)	ϕ/V	$V^{2/3}/\text{cm}^3$	μ	T_m/K
Al	1.39	4.2	4.64	0.07	933
Ti	3.51	3.8	10.58	0.04	1933
Mg	1.17	3.45	5.81	0.10	923

二元合金的过剩吉布斯自由能 ΔG_{ij} 、过剩熵 ΔS_{ij} 以及混合焓 ΔH_{ij} 可表示为^[10]

$$\Delta G_{ij} = \Delta H_{ij} - T \Delta S_{ij}. \quad (3)$$

当二元溶液的混合焓绝对值不大,组元元素的原子量和原子尺寸相差也不大时,过剩混合熵与混合焓之间的近似关系式为^[12]

$$\Delta S_{ij} = 0.1 \Delta H_{ij} \left(\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_j} \right). \quad (4)$$

Toop模型中需要确定一个非对称组元*i*,对于非对称组元可表示为^[13]

$$\begin{cases} \eta_i = \int_0^1 (\Delta G_{ij}^E - \Delta G_{ik}^E)^2 dx_i \\ \eta_j = \int_0^1 (\Delta G_{ji}^E - \Delta G_{jk}^E)^2 dx_i, \\ \eta_k = \int_0^1 (\Delta G_{ki}^E - \Delta G_{kj}^E)^2 dx_i \end{cases} \quad (5)$$

系数 η_i 、 η_j 、 η_k 为偏差函数,若 η_i 最小则组元 i 为非对称组元,组元 j 、 k 为对称组元。

Toop 模型为^[14]

$$G^E = \frac{x_j}{1-x_i} G_{ij}^E(x_i, 1-x_i) + \frac{x_k}{1-x_i} G_{ij}^E(x_i, 1-x_i) + (x_j+x_k)^2 G_{ij}^E\left(\frac{x_j}{x_j+x_k}, \frac{x_k}{x_j+x_k}\right), \quad (6)$$

对于 i - j - k 三元系,各组分偏摩尔过剩自由能的关系为^[15]

$$\begin{cases} \overline{G}_i^E = G^E - x_j \frac{\partial G^E}{\partial x_j} + (1-x_i) \frac{\partial G^E}{\partial x_i} \\ \overline{G}_j^E = G^E - x_i \frac{\partial G^E}{\partial x_i} + (1-x_j) \frac{\partial G^E}{\partial x_j} \\ \overline{G}_k^E = G^E - x_i \frac{\partial G^E}{\partial x_i} - x_j \frac{\partial G^E}{\partial x_j} \end{cases} \quad (7)$$

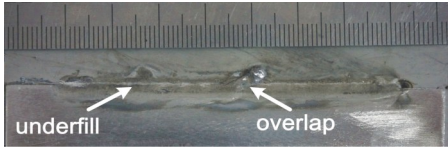
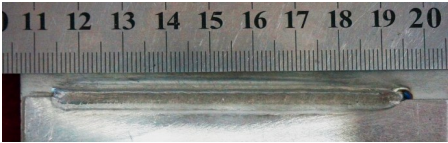
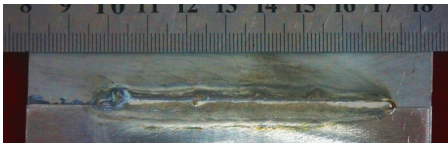

4 结果与讨论

4.1 接头成形及力学性能

在试验中采用 AZ91 焊丝作为钎料,并通过前期的探索实验,选择焊接速度 $V_h=0.2$ m/min 和送丝速度 $V_s=1$ m/min,通过改变激光功率,在合适的参数窗口下,获得不同的焊缝成形和焊缝界面形状,如表 5 所示。在激光功率较低(小于 1000 W)时,由于能量不足, Mg 焊丝没有很好熔化,没有在 Ti 合金一侧铺展形成焊接接头;功率较大(1500 W)时,钎料的烧损较大,蒸发作用明显,焊缝与激光作用处镁下凹严重,而且发现 Ti 合金板处出现了凹坑,说明功率相对较高时,由于激光能量密度相对集中造成高熔点的 Ti 合金进入熔池造成熔池失稳,使焊接过程不稳定。而在该组实验中,当功率为 1000 W 和 1200 W 时,获得成形较好的接头,其中接头的最大剪切力可达 1.48 kN。

表 5 采用 AZ91 焊丝接头的焊缝外观成形和力学性能

Table 5 Appearances and shear force of Mg/Ti laser welded-brazed joints with AZ91 wire

P/W	Appearances	F/kN
800		0.98
1000		1.06
1200		1.48
1500		1.40

4.2 界面组织分析

为了探究 Al 元素对界面反应的调控作用,选取试验中最优的两组参数($V_b=0.2$ m/min, $V_s=1$ m/min; $P=1200$ W, $P=1500$ W)以及不同铝含量的焊丝,焊后对焊缝进行取样,对界面形态和元素分布进行对比分析。

图 2 为扫描电镜下镁/钛激光熔钎焊的界面组织形态及元素线扫描结果,其中图 2(a)($P=1200$ W)与图 2(b)($P=1500$ W)采用的是 AZ31(铝的质量分数为 3%)焊丝作为钎料,扫描电镜观察界面处没有发现明显的反应层,但在 EDS 线扫描结果中发现了 Al 元素在界面处分布的峰值,峰值 Al 的原子数分数可达 30.49%,其中原子数分数比 Al:Ti 接近 1:1。表明在界面处发生了元素的富集和界面反应,Al 元素向 Ti 侧发生了扩散并生成了化合物 Al:Ti,但 Al 元素由于含量较少,对界面反应的调控作用有限。进而增加 Al 元素的含量探究 Al 元素含量对界面反应调控效果的影响,其中图 2(c)($P=1200$ W)与图 2(d)($P=1500$ W)是采用 Al 的质量分数为 9%的 AZ91 焊丝作为钎料的界面形态,扫描电镜下在靠近钛界面处观察到不连续的反应薄层,对界面处进行 EDS 线扫描也发现了 Al 元素的分布峰值,原子数分数的峰值最高可达 36.90%,其中 1500 W 下 Al:Ti 也接近 1:1,但在 1200 W 下比例变成了 1:2。表明在 1200 W 的情况下界面反应产物主要为 $TiAl$ 和 Ti_2Al ,当功率增加 Ti 和 Al 的比例增加,表现为 Al 元素含量的峰值增加。此外,功率增加使脆性化合物反应层在界面处形态趋于片状,导致接头性能降低。

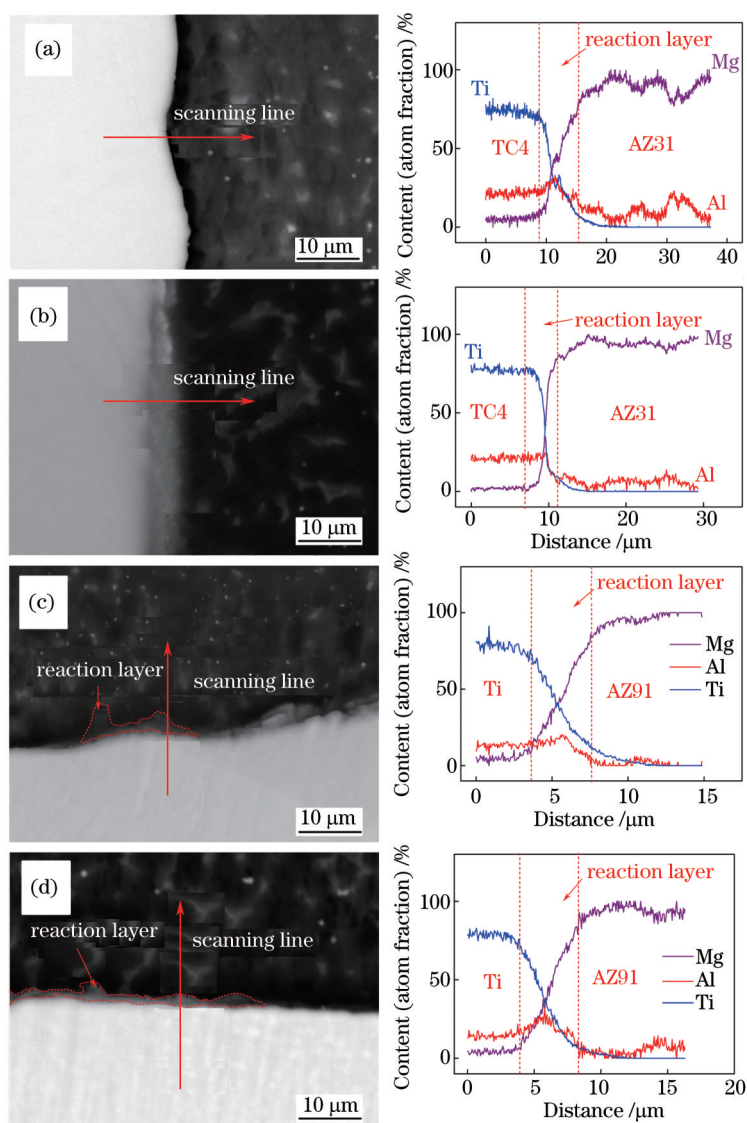


图 2 镁/钛激光填丝熔钎焊界面形态及 EDS 线扫描。(a)~(b) 填 AZ31 焊丝; (c)~(d) 填 AZ91 焊丝

Fig.2 Interface and EDS line scanning results of laser welding-brazing of Mg/Ti. (a)~(b) With AZ31 wire; (c)~(d) with AZ91 wire

通过以上的分析对比可以发现,当添加钎料的Al元素含量增加时,会加剧界面的反应,使原本不反应的Mg/Ti在Ti表面生成不连续的反应层。同时可以看出,在采用Al元素含量更高的AZ91焊丝形成的接头界面处,Al元素的分布峰值更加明显,而且Al元素的扩散距离也更大,这说明Al元素的含量会影响Al元素自身的偏聚。

综合上述试验结果可知,Al元素的行为对于界面处的反应起到至关重要的作用,也是Mg/Ti能实现可靠连接的关键因素。因此,有必要通过其他方式进一步解释Al元素在界面处的行为以及参与界面反应的内在机制。

4.3 Al-Mg-Ti三元热力学计算结果分析

熔钎焊过程中高熔点Ti表面处于微熔状态,所以取Ti表面微熔时的温度1000 K作为热力学计算的温度,由(1)~(4)式可以计算出二元系混合过剩自由能 ΔG_{MgAl} 、 ΔG_{MgTi} 、 ΔG_{AlTi} 与成分之间的关系,其结果如图3所示。

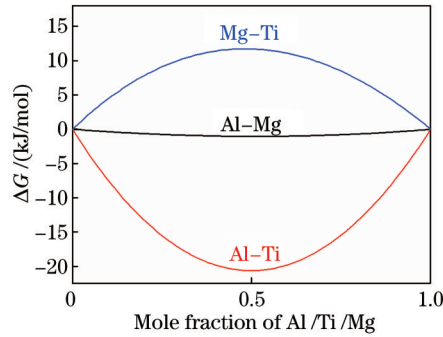


图3 1000 K时不同摩尔分数下Al-Mg、Al-Ti、Mg-Ti二元系混合过剩自由能

Fig.3 Excessive Gibbs energies of Al-Mg, Al-Ti, and Mg-Ti binary system at 1000K and different mole fractions

从计算结果可以看出,Mg-Ti二元系在整个成分范围内其自由能均大于零,且随着Mg含量的增加先增加后减少,说明在1000 K的温度下Mg、Ti两者互不反应,表现为在Ti表面微熔的情况下无法实现冶金连接。这与Mg、Ti平衡状态下Mg、Ti两者互不反应、互不溶解的实际结果相一致。

而对于Mg-Al、Al-Ti两个二元系来说,计算结果均呈现先减少后增加的趋势,存在最小值,且最小值不在端点处。说明在1000 K时Mg-Al、Al-Ti的金属化合物均能够稳定存在,且Al-Ti二元系金属化合物优先于Mg-Al二元系析出。为了更加准确地分析接头形成过程中各个元素之间的相互作用以及热力学行为,采用更加贴近实际的Toop三元热力学模型进行计算。

图4表示1000 K时Mg-Al-Ti三元系混合过剩自由能的分布情况。当 $x_{Al}=0.5$, $x_{Ti}=0.5$, $x_{Mg}=0$ 时过剩自由能最小值 $\Delta G_{MgAlTi}=-25.2$ kJ/mol,所以在1000 K的Mg-Al-Ti三元熔体中Al-Ti金属化合物具有更加充分的热力学析出条件。此外,通过固定Mg和Ti的摩尔分数比例分别为1:9、3:7、5:5、7:3、9:1计算出自由能的变化情况,如图5所示。通过对比发现,无论是哪种比例下,其过剩自由能随着Al含量增加均是先减小后增大,在中间存在最小值,且在Mg和Ti的比例减小时,过剩自由能的最小值下降并往Al含量减小一侧偏移。因此,在Ti含量较高的情况下,金属化合物的析出驱动力越大,Ti含量越高的区域,界面反应越容易发生。

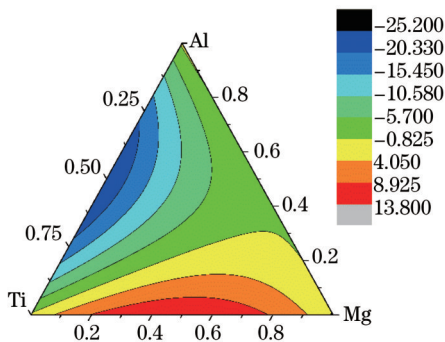


图4 1000 K时,Mg-Al-Ti三元系混合过剩自由能

Fig.4 Excessive Gibbs energy of Mg-Al-Ti ternary system at 1000 K

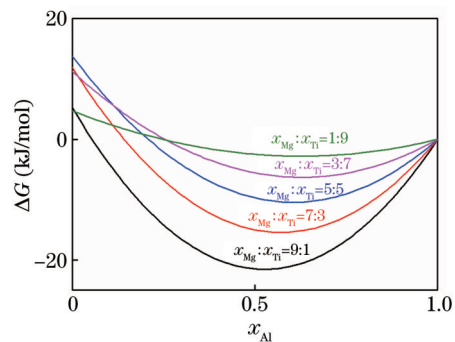


图5 1000 K时Mg-Al-Ti固定镁钛比例的三元系混合过剩自由能

Fig.5 Excessive Gibbs energy of Mg-Al-Ti ternary system at 1000 K and fixed the proportion of Mg and Ti

为了解释 Al 元素在界面处的扩散行为,通过(7)式计算出 Al 元素化学势的分布情况如图 6 所示。分析计算结果可知, Mg 侧的化学势最高, Ti 侧次之, Al 侧最低。试验中 Al 元素通过 Mg 基富 Al 焊丝进行添加,从化学势分布可以得出,在接头形成过程中 Al 元素扩散的方向是从 Mg 焊丝熔池中扩散到 Ti 一侧,这与文献[9]和图 2 中的线扫描结果相符。由于 Al 元素的偏聚导致 Al 的化学势进一步离界面较远处的 Al 元素也向界面处偏聚,即 Al 的扩散方式为上坡扩散,因此在图 2 的线扫描结果中发现 Al 元素的分布峰,并且在 AZ91 焊丝界面处可以看见 Al 元素的峰值更加明显,如图 2 (d), Al 元素的峰值宽度更广。

为了阐明不同 Ti 含量对 Al 偏聚的影响,通过设定不同的 Ti 含量,计算 Al 的化学势随着 Al 含量的变化情况,计算结果如图 7 所示。从计算结果可以看出 Ti 含量对 Al 元素的化学势在两个方面产生影响: 1) 在 Al 元素的含量一定的情况下, Ti 含量的增加显著降低了 Al 元素的化学势; 2) Ti 含量增加, Al 元素化学势随着 Al 含量变化变得更加剧烈。

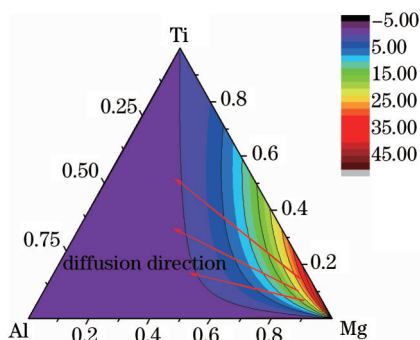


图 6 1000 K Mg-Al-Ti 三元系中 Al 的化学势
Fig.6 Al chemical potential in the Mg-Al-Ti ternary system at 1000 K

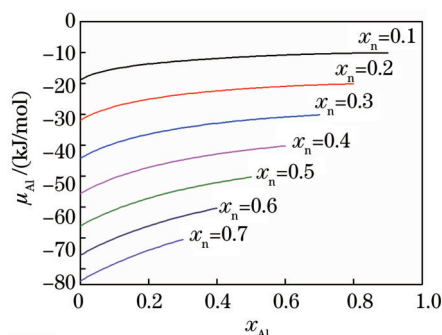


图 7 不同 Ti 元素含量的情况下, Al 的化学势随着 Al 元素含量的变化

Fig.7 Influence of Al content on Al chemical potential with the different Ti content

为了更好地探讨 Ti 的含量对 Al 元素扩散的影响,以使用 AZ91 焊丝为例基于如下两个假设进行探讨。假设一,在熔池形成的初期,钎料中的 Al 元素均匀分布未发生扩散;假设二, Ti 表面微熔在距离 Ti 母材越近一侧, Ti 含量越高。

图 8 为基于以上两个假设在熔池形成初期, Ti 表面微熔与 Mg 基焊丝中 Mg、Al 元素形成 Mg-Al-Ti 三元熔体后, Al 元素化学势的分布情况。Ti 表面微熔在熔体中形成了 Ti 的浓度梯度,而从计算结果可以看出 Ti 浓度将会影响熔体中 Al 元素的化学势分布,如图 7。从图 8 的计算结果可以看出,越靠近 Ti 母材一侧 Ti 浓度越高 Al 元素的化学势越低, Al 元素有自发地向 Ti 一侧扩散的驱动力,由于 Al 元素的扩散使得在靠近 Ti 一侧的界面处 Al 元素含量升高,进一步促进了界面 Al-Ti 之间的反应。

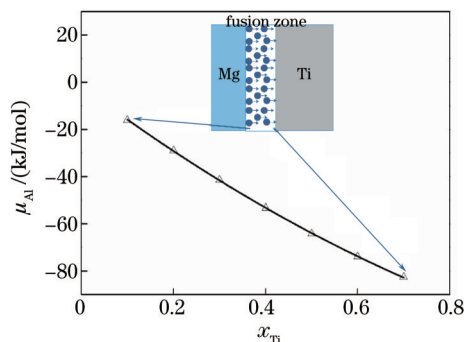


图 8 镁/钛激光填丝熔钎焊熔池形成初期,钛表面微熔对于 Al 化学势分布的影响

Fig.8 On initial stage of molten pool of laser welding-brazing process Mg/Ti with wire, the influence of microfusion of Ti on the distribution of Al chemical potential

5 结 论

通过填丝激光熔钎焊的方法实现了 Mg/Ti 两种互不反应、互不相溶金属的连接,并通过 Miedema 模型和 Toop 模型揭示了实现连接的热力原因和当中 Al 元素热力学行为,得出结论:

1) 利用 Mg 基焊丝中 Al 元素来进行调控 Mg/Ti 界面反应,并未观察到明显的反应层,仅在局部可观察到以 Ti 表面为基体的不连续的反应薄层。接头在 EDS 线扫描的结果中均观察到了 Al 元素分布的峰值,但对于填 AZ91 焊丝的接头的线扫描结果中的 Al 元素峰值更加明显,峰值原子数分数达到 36.90%,证明了采用 Mg 富 Al 焊丝添加调控元素实现 Mg/Ti 连接的可行性。

2) 通过热力学计算分析,发现 Al 元素的加入可以使原本自由能大于零的 Mg-Ti 二元系熔体的自由能小于零,在这方面 Al 起到了促进界面反应的作用。此外,在对化学势的计算中发现 Al 元素的扩散方式为上坡扩散,并且有向 Ti 一侧扩散的趋势,且焊接过程中微熔的 Ti 会进一步降低 Al 的化学势。

参 考 文 献

- Ding Wenbing, Tong Yangang, Deng Dean, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser welded AZ91D wrought magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203003.
丁文兵, 童彦刚, 邓德安, 等. AZ91D 变形镁合金激光焊接头的微观组织与机械性能[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203003.
- Tan Caiwang, Li Liqun, Chen Yanbin, *et al.*. Characteristics of fiber laser and CO₂ laser welding of AZ31B magnesium alloys[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603015.
檀财旺, 李俐群, 陈彦宾, 等. AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO₂ 激光焊接特性[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603015.
- Yang Genmei, Zhang Lingfeng, He Huanju, *et al.*. Effect of annealing on mechanical properties of AZ31 magnesium after laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0206002.
杨根妹, 张凌峰, 何焕菊, 等. 退火处理对激光冲击 AZ31 镁合金力学性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0206002.
- Shao Juan. Application and development of titanium alloys[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2007, 35(4): 61-65.
邵娟. 钛合金及其应用研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2007, 35(4): 61-65.
- Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming, *et al.*. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components (invited paper)[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3204-3209.
王华明, 张述泉, 王向明, 等. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战(邀请论文)[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.
- Xiong Jiangtao, Zhang Fusheng, Li Jinglong, *et al.*. Transient liquid phase bonding of magnesium alloy (AZ31b) and titanium alloy (Ti6Al4V) using aluminium interlayer[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2006, 35(10): 1677-1680.
熊江涛, 张赋升, 李京龙, 等. 镁合金与钛合金的瞬间液相扩散焊[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(10): 1677-1680.
- Masayuki A, Kazuhiro N. Effect of calcium on intermetallic compound layer at interface of calcium added magnesium-aluminum alloy and titanium joint by friction stir welding[J]. Materials science and engineering: B, 2010, 173(1): 135-138.
- Tan Caiwang, Gong Xiangtao, Li Liqun, *et al.*. Laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals Mg/Ti with Al interlayers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0103002.
檀财旺, 巩向涛, 李俐群, 等. 镁/钛异种金属预置 Al 夹层光纤激光熔钎焊接特性[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103002.
- Gao M, Wang Z M, Li X Y, *et al.*. Laser keyhole welding of dissimilar Ti-6Al-4V titanium alloy to AZ31B magnesium alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(1): 163-172.
- Sun Shunping, Yi Danqing, Zang Bing. Calculation of thermodynamic parameters of Al-Si-Er alloy based on Miedema model and toop model[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(11): 1975-1978.
孙顺平, 易丹青, 臧冰. 基于 Miedema 模型和 Toop 模型的 Al-Si-Er 合金热力学参数计算[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(11): 1975-1978.
- De Boer F R, Boom R, Mattens W C M, *et al.*. Cohesion in Metals: Transition Metal Alloys[M]. Amsterdam: North-Holland, 1988.
- Tanaka T, Gokcen N A, Morita Z I. Relationship between partial enthalpy of mixing and partial excess entropy of solute elements in infinitely dilute solutions of liquid binary alloys[J]. Zeitschrift Für Metallkunde, 1990, 81(5): 349-353.
- Fan Peng, Zhou Guozhi. A model for predicting thermodynamic properties of metallic solutions from fundamental physical quantities of constituent elements[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(4): 421-426.
范鹏, 周国治. 由组元的物性参数预测金属熔体的热力学性质[J]. 金属学报, 1999, 35(4): 421-426.
- Toop G W. Predicting ternary activities using binary data[J]. Trans Metall Soc, AIME, 1965, 233(5): 850-854.

15 Ding Xueyong, Fan Peng, Han Qiyong. Models of activity and activity interaction parameter in ternary metallic melt[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1994, 30(14): 49-60.

丁学勇, 范 鹏, 韩其勇. 三元系金属熔体中的活度和活度相互作用系数模型[J]. 金属学报, 1994, 30(14): 49-60.

栏目编辑: 张浩佳