

# 镁合金/钛合金脉冲激光焊接头的组织、性能调控

谷晓燕\*, 朱开轩, 隋成龙, 孟政宇

吉林大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 采用脉冲激光偏移镁侧并添加铜中间层的方法对镁合金和钛合金进行激光对接焊接,研究了界面元素扩散和反应特点,分析了铜中间层厚度对接头组织和力学性能的影响及接头断裂的主要原因。结果表明:铜中间层的加入改善了焊缝/钛合金界面的组织,增大了界面附近 Ti-Cu 化合物的含量;随着铜中间层厚度增大,界面处  $Ti_2Cu$  反应层的厚度逐渐增大并变得连续,且接头的断裂位置从界面反应层转变到焊缝区;当铜中间层的厚度达到  $30\ \mu m$  时,接头的抗拉强度达到了 121 MPa。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 镁合金; 钛合金; 组织; 力学性能

**中图分类号** TG457

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202047.0102005

## Control of Microstructure and Property of Pulse Laser Welded Joint of Magnesium/Titanium Alloy

Gu Xiaoyan\*, Zhu Kaixuan, Sui Chenglong, Meng Zhengyu

College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** The butt-joint laser welding of magnesium and titanium alloys is achieved by shifting laser pulses on the magnesium side and adding copper interlayers. The diffusion of elements and reaction characteristics at the interface are investigated. Furthermore, the effect of the thickness of the copper interlayer on the microstructure and mechanical properties of the joint is investigated. In addition, the primary causes of joint fractures are analyzed. The results show that the copper interlayer improves the microstructure at the weld/titanium interface and increases the content of Ti-Cu compounds near the interface. As the thickness of the copper interlayer increases, the thickness of the  $Ti_2Cu$  reaction layer at the interface also gradually increases and becomes continuous. Moreover, the fracture position of the joint moves from the interface reaction layer to the weld zone. When the thickness of the copper interlayer reaches  $30\ \mu m$ , the tensile strength of the joint reaches 121 MPa.

**Key words** laser technique; laser welding; magnesium alloys; titanium alloys; microstructure; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3390; 350.3390; 350.3890

## 1 引 言

镁合金具有低密度、高比强度、高阻尼性等特点,已被广泛应用于航空航天、船舶、汽车等领域<sup>[1-2]</sup>。钛合金具有优良的耐蚀性和耐热性以及高的比强度,在地质勘探、航空航天等领域备受青睐<sup>[3-4]</sup>。因此,将镁、钛连接形成镁/钛复合结构,既能减轻结构整体的重量,又能保证结构的局部承载能力,具有巨大的应用潜力。

镁和钛的晶体结构不同,这使得它们的熔点、热

导率相差较大。熔融状态下的镁在钛合金表面的润湿性很差;同时,镁、钛之间的固溶度很小,且不能生成金属间化合物,导致传统的焊接方法难以实现镁/钛的可靠连接。

Cao 等<sup>[5]</sup>采用冷金属过渡技术通过添加 AZ61 镁合金焊丝实现了 TA2 钛板和 AZ31B 镁合金板的熔钎焊,接头可承受的最大载荷为 2.1 kN; Zang 等<sup>[6]</sup>通过加入铝中间层解决了镁和钛之间不混溶、不反应的问题,接头的最大拉伸剪切力可达到 2230 N/cm; Aonuma 等<sup>[7]</sup>利用搅拌摩擦焊技术对

钛板和镁合金 AZ31 板进行爆炸焊接,并研究了搅拌头转速和位置对焊接件力学性能的影响;Tan 等<sup>[8-9]</sup>采用在钛表面镀铜的方式增大了熔融镁合金在钛表面的润湿铺展,提高了焊接的稳定性;秦倩<sup>[10]</sup>采用纯 Ni、Cu、Al 箔作为中间层进行了镁、钛之间的瞬间液相扩散焊,焊接接头的最大强度为 71 MPa。然而,镁合金易烧损蒸发,且对焊接过程中的温度等有较为严格的要求,限制了它的进一步应用。

通过加入铝元素实现镁/钛焊接接头冶金结合的研究已经得到广泛关注,而铜元素对镁/钛接头组织性能调控作用的研究目前还鲜有报道。铜可以分别与镁、钛金属形成可靠的连接<sup>[11-12]</sup>,且铜元素可以与镁、钛形成化合物。本文采用铜作为中间层,采用激光向镁合金一侧偏移的焊接方式获得了可靠的镁合金/钛合金焊接接头,研究了焊缝的组织特点以及焊缝/钛合金界面的反应特点,并分析了铜中间层厚度对接头界面组织及力学性能的调控作用。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

试验采用的母材为 AZ31B 镁合金及 Ti-6Al-4V 钛合金板材,尺寸均为为 120 mm×37 mm×1 mm,它们的化学成分见表 1、2。钛合金板材经砂纸打磨后用 5% HF、20% HNO<sub>3</sub>、75% H<sub>2</sub>O(体积分数)组成的酸液清洗,随后用清水冲洗吹干备用。焊前,用砂纸打磨镁合金板材,以去除其表面的氧化膜,然后用无水乙醇清洗,吹干后备用。焊前两母材均用丙酮擦洗干净并吹干。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloy

| Element          | Mg   | Al      | Zn      | Mn      | Si   |
|------------------|------|---------|---------|---------|------|
| Mass fraction /% | Bal. | 2.5-3.5 | 0.6-1.4 | 0.2-1.0 | 0.08 |

表 2 Ti-6Al-4V 钛合金的化学成分

Table 2 Chemical compositions of Ti-6Al-4V titanium alloy

| Element          | Ti   | Al      | V       | Fe  | O   |
|------------------|------|---------|---------|-----|-----|
| Mass fraction /% | Bal. | 5.6-6.8 | 3.5-4.5 | 0.3 | 0.2 |

### 2.2 试验方法

采用 HKW-1050 型脉冲激光焊接系统进行对接焊,激光器为 Nd:YAG 固体激光器,透镜焦距为 150 mm,光斑直径为 0.1 mm。激光偏移照射在镁合金上,偏移量为 0.15 mm。采用纯氦气侧吹保护,气体流量为 10 L/min。焊接过程示意图如图 1 所示。

由于镁合金的熔点较低,在焊接过程中极易烧

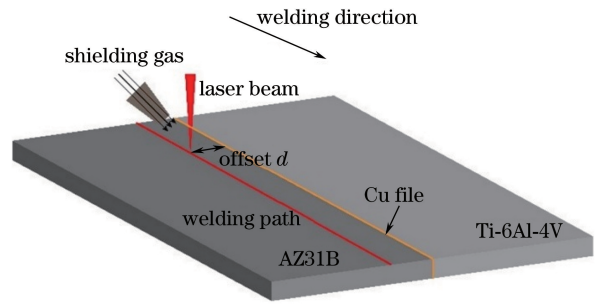


图 1 焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic of welding process

损而引起飞溅和塌陷,因此,为了得到成形较好的焊缝,必须严格控制焊接的热输入。试验选用的焊接参数如下:脉冲电流为 76 A,脉冲宽度为 11 ms,离焦量为 +2 mm,频率为 8 Hz,焊接速度为 180 mm/min。

焊接完成后沿垂直于焊缝方向切取金相试样,采用 ZEISS 光学显微镜观察接头的横截面形貌,采用 HIACHI S-3400N 型扫描电子显微镜及其配套的能量色散 X 射线谱(EDS)仪分析接头组织以及拉伸断口上的元素组成。

采用 MT-810 型万能试验机测试接头的抗拉强度,拉伸速度为 0.4 mm/min,试样形状及尺寸如图 2 所示。试样断裂位置始终靠近钛合金母材处,并不在焊缝板厚最低点处断裂,这说明焊缝强度大于界面强度(焊缝表面并未进行打磨,但这并不影响测试结果),因此将断裂位置处的厚度定义为 1 mm。试样的强度取三次测试试样强度的平均值。

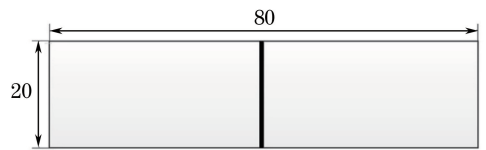


图 2 拉伸试样的形状及尺寸

Fig. 2 Shape and size of tensile specimen

## 3 试验结果与分析

### 3.1 接头的宏观形貌分析

添加铜中间层前后接头的横截面形貌如图 3 所示。可以看出,未添加铜中间层的焊缝靠近钛母材一侧出现了明显的裂纹,表明焊缝/钛合金之间未能形成有效连接。这是由于熔融态的镁、钛不互溶,焊接时大量的镁合金熔体和少量熔化的钛合金熔体呈层状分布,冷却后各自凝固,相互脱离,焊接后焊缝开裂。当加入铜中间层后,接头中的铜中间层全部熔化,并与熔化的镁合金及少量熔化的钛合金

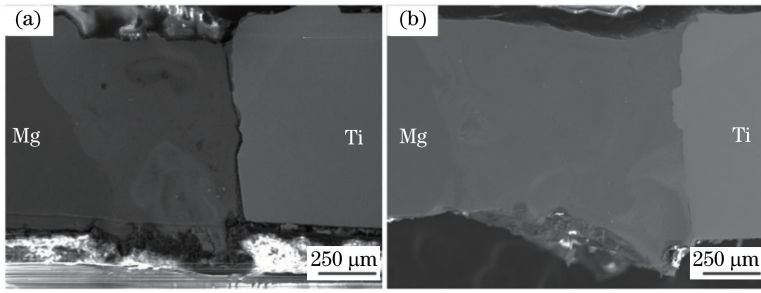


图 3 添加铜中间层前后焊缝的截面形貌。(a)添加前;(b)添加后

Fig. 3 Cross-sections of weld before and after adding copper interlayer. (a) Before adding; (b) after adding

共同形成焊缝,焊缝成形良好。这表明,添加铜中间层有助于改善镁/钛异种金属的结合性能。

### 3.2 接头的力学性能

接头抗拉强度随铜中间层厚度的变化如图 4 所示。可以看到,随着铜中间层厚度增大,接头的抗拉强度呈现出先增大后减小的变化趋势,当铜中间层厚度为 30 μm 时,接头的最大抗拉强度为 121 MPa。

### 3.3 接头组织特点及断口分析

#### 3.3.1 接头组织特点

添加 10 μm 厚铜中间层焊接得到的接头的微观形貌如图 5 所示。从图 5(a)可以看到,焊缝处的镁合金大量熔化而钛合金微量熔化,这是因为激光偏向镁合金一侧。从图 5(b)、(c)可以看到,铜中间层已经完全熔化,并与熔化的镁合金及钛合金混合形成焊缝。焊缝为细小的柱状晶和等轴晶,呈现为

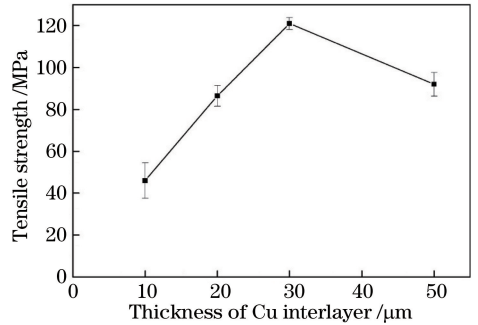


图 4 接头抗拉强度随铜中间层厚度的变化

Fig. 4 Tensile strength of joint as a function of thickness of copper interlayer

典型的镁合金焊缝组织形貌特点,且部分区域分布着一些颜色较深的组织。此外还可以看到,焊缝与钛合金母材结合良好,且焊缝与钛合金母材之间存在界面,但在界面处未发现明显的反应层。

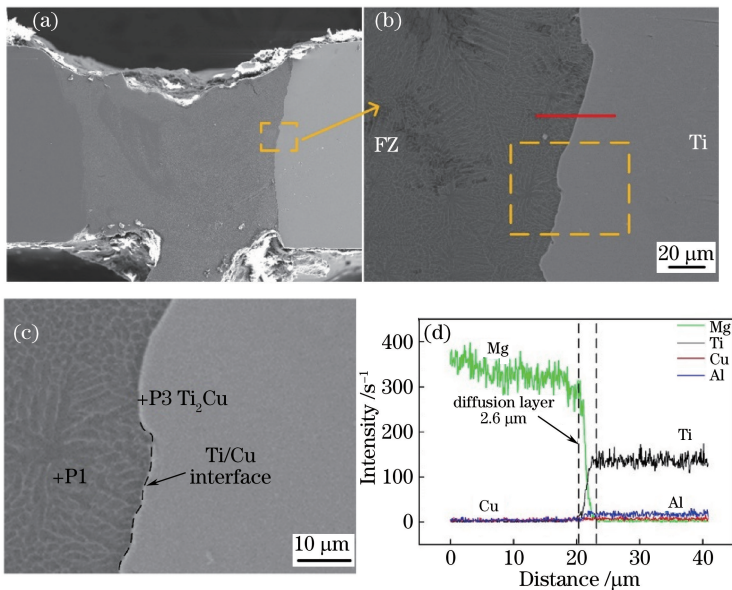


图 5 添加 10 μm 厚铜中间层焊接得到的接头的微观形貌。(a)接头横截面;(b)界面区;(c)图 5(b)中虚线框内的放大图;(d)EDS 线扫描结果

Fig. 5 Micro-morphology of Mg/Ti welded joint after adding 10-μm-thick copper interlayer. (a) Cross section of joint; (b) interface area; (c) enlarged view of dotted box in Fig. 5(b); (d) results of EDS line scanning

从图 5(d)可以看出铜元素在焊缝中的含量较少,这是因为铜中间层熔化后与熔化的镁合金混合,铜元素在液态金属中扩散均匀。此外,这也与铜中间层厚度很小有关。另外,图 5 中的元素分布为梯度变化,但没有明显的元素分布曲线平台,表明界面处存在元素互扩散,但没有反应层生成。

接头 EDS 线扫描结果见表 3,其中:焊缝处(P1)的主要成分为镁、铜,其组织主要为  $\alpha$ -Mg 固溶体和  $Mg_2Cu$  金属间化合物;焊缝中颜色较深的

组织(P2)的主要成分为镁、铜、铝,该组织主要为  $\alpha$ -Mg 固溶体和  $Mg_2(Cu, Al)$  金属间化合物。在焊缝中未检测到钛元素,这是因为激光偏向镁合金一侧,钛合金熔化量较少,且熔池金属在焊缝/钛合金界面处的流动并不十分剧烈,难以将熔化的钛卷入焊缝中。图 5(c)界面(P3)的能谱分析结果显示,扩散层的主要成分为钛、铜、铝、钒,在界面处形成了少量 Ti-Cu 化合物,但并未观察到明显的反应层。

表 3 不同位置的能谱分析结果

Table 3 Results of EDS analysis at different positions

| Location | Atomic fraction /% |       |       |       |      | Possible phase             |
|----------|--------------------|-------|-------|-------|------|----------------------------|
|          | Mg                 | Ti    | Cu    | Al    | V    |                            |
| P1       | 94.97              | -     | 3.13  | 1.90  | -    | $Mg_2Cu + \alpha Mg$       |
| P2       | 87.36              | -     | 7.10  | 5.53  | -    | $Mg_2(Cu, Al) + \alpha Mg$ |
| P3       | -                  | 80.21 | 8.03  | 8.05  | 3.71 | $Ti_2Cu + \alpha Ti$       |
| P4       | 74.07              | 15.88 | 7.71  | 2.34  | -    | $Ti_2Cu + \alpha Mg$       |
| P5       | 86.59              | -     | 10.06 | 3.36  | -    | $Mg_2Cu + \alpha Mg$       |
| P6       | 1.30               | 57.47 | 28.80 | 10.09 | 2.34 | $Ti_2Cu$                   |
| P7       | 64.43              | 8.04  | 21.95 | 5.34  | 0.33 | $Mg_2Cu$                   |
| P8       | 73.39              | -     | 18.21 | 8.40  | -    | $Mg_2Cu + Mg_{17}Al_{12}$  |
| P9       | 86.09              | 0.39  | 11.51 | 2.01  | -    | $Mg_2Cu + \alpha Mg$       |
| P10      | 29.92              | 38.25 | 25.24 | 4.88  | 1.71 | $Ti_2Cu + Mg_2Cu$          |

上述结果表明,铜的加入使得熔池金属在钛合金一侧的界面实现了较好的铺展,改善了镁合金/钛合金异种金属的结合性能。刘晓庆等<sup>[13]</sup>的研究表明,界面处形成的 Ti-Cu 化合物是性能提高的主要原因。但是试验中添加的是厚度为 10  $\mu m$  的铜中间层,焊缝中铜的含量较小,在焊缝/钛合金界面处不能形成连续的反应层,因此强度的提高有限。

添加 20  $\mu m$  厚铜中间层焊接得到的接头的微观形貌如图 6 所示(FZ 表示母材熔化区)。从图 6(a)可以看出,在焊缝/钛合金界面处出现了较明显的反应层,该反应层在钛合金一侧生长,并向焊缝中凸出。从图 6(b)可以看到,焊缝/钛合金界面

处存在小的凸起部分(如“+”所示)。从图 6(c)可以看出,焊缝中的铜含量比添加 10  $\mu m$  厚铜中间层接头中的铜含量略大。铜中间层厚度的增大使得焊缝/钛合金侧界面处的铜含量增大,促进了焊缝/钛合金界面处 Ti-Cu 化合物的生成。

界面处(P4)的主要成分为 Mg、Al、Ti、Cu。Miedema 模型可以辅助分析金属间化合物生成的倾向,当 Miedema 生成焓为正数时,表明此种化合物无法生成;当 Miedema 生成焓为负数时,表明两种金属可以形成化合物。Miedema 生成焓越小,表明两种金属的亲合力越大,发生反应的倾向越大<sup>[14-15]</sup>。Miedema 模型表达式见文献[16]。

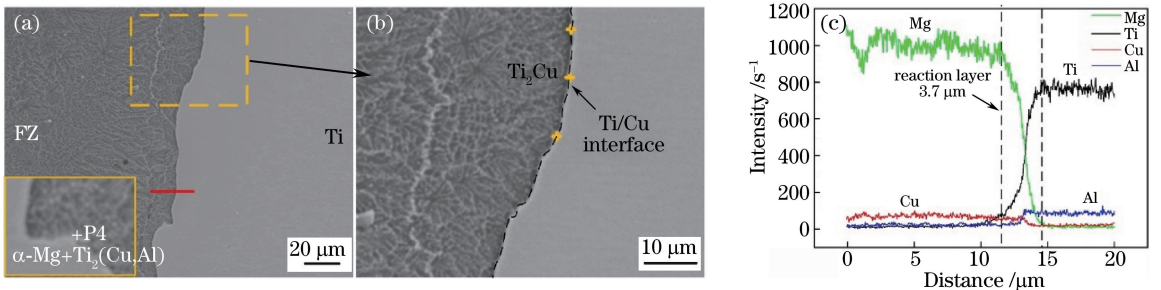


图 6 添加 20  $\mu m$  厚铜中间层焊接制得的接头的微观形貌。(a)界面区;(b)图 6(a)中虚线框内的放大图;(c) EDS 线扫描结果

Fig. 6 Micro-morphology of Mg/Ti welded joint after adding 20- $\mu m$ -thick copper interlayer.

(a) Interface area; (b) enlarged view of dotted box in Fig. 6(a); (c) results of EDS line scanning

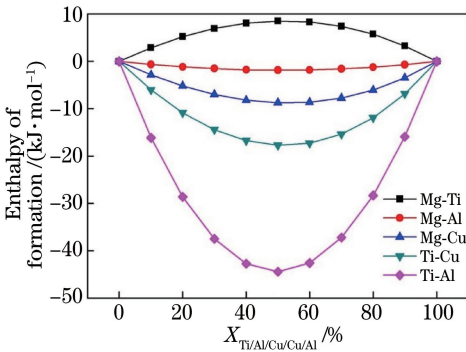


图 7 体系成分和生成焓的关系

Fig. 7 Relationship between components and enthalpy of formation

通过计算得到了体系成分和生成焓的关系,如图 7 所示,其中  $X_{Ti/Al/Cu/Cu/Al}$  指 Ti、Al、Cu、Cu、Al 元素在合金相中的原子数分数。可以看出:钛元素和镁元素的反应生成焓均大于零,表明镁和钛不发生反应;Ti-Cu 反应的生成焓小于 Mg-Cu 反应的生成焓,表明钛和铜之间的亲和力大于铜和镁之间的亲和力;Ti-Al 化合物的生成焓最小,表明钛和铝的亲和力最大。但由于铝在钛中的溶解度较大,少量的铝以固溶的形式存在于钛固溶体中,因此,P4 处主

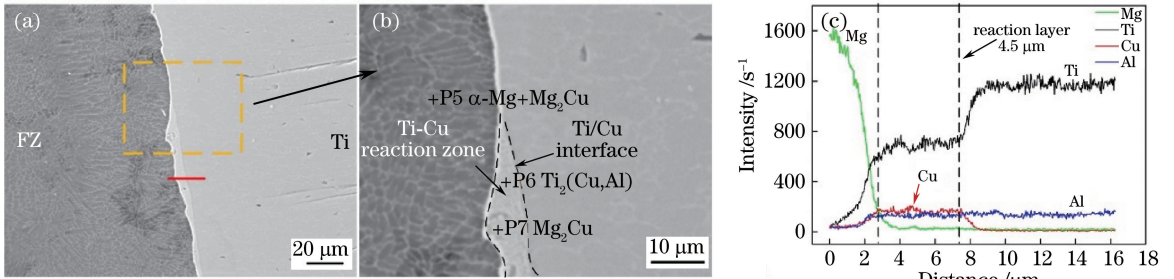


图 8 添加 30  $\mu\text{m}$  厚铜中间层焊接得到的接头的微观形貌。(a)界面区;

(b)图 8(a)中虚线框内的放大图;(c) EDS 线扫描结果

Fig. 8 Micro-morphology of Mg/Ti welded joint after adding 30- $\mu\text{m}$ -thick copper interlayer.

(a) Interface area; (b) enlarged view of dotted box in Fig. 8(a); (c) results of EDS line scanning

添加 50  $\mu\text{m}$  厚铜中间焊接得到的接头的微观形貌如图 9 所示。从图 9(a)中可以看到,焊缝/钛合金界面处生成了连续分布的反应层。从图 9(b)可以发现,白色组织均匀分散于焊缝中。从图 9(c)可以看出,铜元素在焊缝和焊缝/钛合金界面处的含量比添加 30  $\mu\text{m}$  厚铜中间层时有所增大,同时反应层中还含有少量镁元素和铝元素,整个反应层的厚度为 2.5  $\mu\text{m}$ 。从焊缝区域的线扫描结果可以看出,镁、铜、铝元素曲线均有起伏,且三者起伏位置一致。对比图 9(b)中的线扫描位置可以发现,当扫描经过亮白色组织时,镁元素曲线降低,铜和铝元素曲线升

要为  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  化合物以及  $\alpha\text{-Mg}$  固溶体。在界面多个位置(“+”所示)检测出了  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  化合物,表明此时的焊缝/钛合金界面处出现了较多的化合物,但化合物层沿板厚方向分布不连续。

添加 30  $\mu\text{m}$  厚铜中间层焊接得到的接头的微观形貌如图 8 所示。从图 8(a)可以看到,在接头界面处生成了明显的反应层,这是接头强度增大的主要原因。从图 8(b)中可以发现,焊缝/钛合金界面处反应层的厚度不均匀,反应层局部存在与焊缝组织形貌相似的区域(如 P7)。从图 8(c)中可以发现,钛元素和铜元素的分布曲线出现了明显的平台,这个平台区域对应图 8(a)中的反应层区域,表明此处主要是 Ti-Cu 化合物,反应层的厚度约为 4.5  $\mu\text{m}$ 。

焊缝(P5)及反应层(P6、P7)的 EDS 分析结果如表 3 所示,焊缝中的铜含量(原子数分数)为 10.06%,比添加 10  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  厚铜中间层时有所增大,此处生成了  $\alpha\text{-Mg}$  和  $\text{Mg}_2\text{Cu}$  化合物。反应层的主要成分为镁、钛、铜、铝、钒,此处的化合物主要为  $\text{Ti}_2\text{Cu}$ 。反应层中块状物的主要成分为镁、钛、铜、铝、钒,该处组织与焊缝相似,主要为  $\alpha\text{-Mg}$  和  $\text{Mg}_2\text{Cu}$  化合物。

高,这表明亮白色组织可能是 Mg-Cu 化合物和少量 Mg-Al 化合物。

接头的能谱分析结果如表 3 所示。亮白色组织的成分为镁、铜、铝,该组织为从  $\alpha\text{-Mg}$  中析出的  $\text{Mg}_2\text{Cu}$  化合物和  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  化合物。反应层中 P10 处的主要成分为镁、钛、铜、铝,此处的镁元素含量明显增大,这是因为铜元素含量的增大使得熔池/钛合金界面处出现了铜的富集区,铜富集区两侧的钛合金、镁合金液态金属同时向铜富集区扩散,并在激光的搅拌作用下混合均匀,冷却后形成了 Ti-Cu 化合物和 Mg-Cu 化合物的界面反应层。

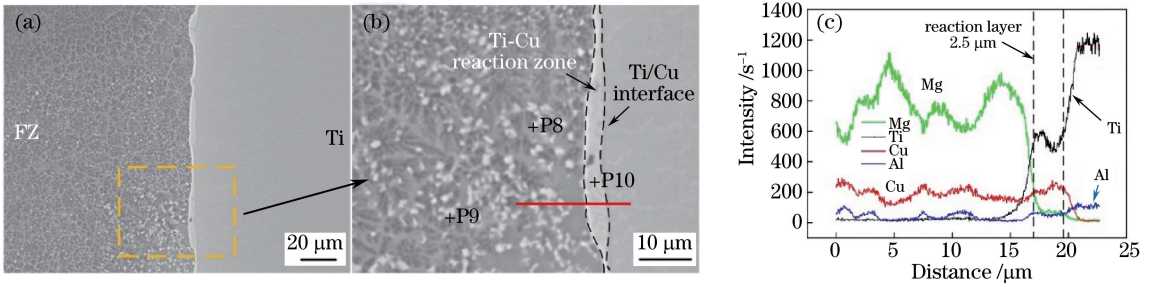


图9 添加50 μm厚铜中间层焊接得到的接头的微观形貌。(a)界面区；  
(b)图9(a)中虚线框区域的放大图；(c)EDS线扫描结果

Fig. 9 Micro-morphology of Mg/Ti welded joint after adding 50-μm-thick copper interlayer.

(a) Interface area; (b) enlarged view of dotted box in Fig. 9(a); (c) results of EDS line scanning

### 3.3.2 断口分析

添加不同厚度铜中间层焊接得到的接头在钛合金一侧的拉伸断口形貌如图10所示,可以发现,断口中存在明显的河流花样和少量韧窝,表明断口以韧-脆混合断裂方式发生断裂。

当铜中间层厚度为10 μm时,断口较平坦,局部存在凹凸不平。EDS分析结果表明:图10中P1处的主要成分为钛、铝、钒、铜,组织主要为钛固溶体;P2处的主要成分为镁、铝、铜,主要组织为α-Mg固溶体和Mg<sub>2</sub>Cu化合物。这表明断裂发生在焊缝/钛合金界面处,10 μm厚的铜中间层较薄,不足以使镁/钛合金焊接界面处形成连续的反应层,焊缝/钛合金界面是焊缝的薄弱处。

当添加铜中间层的厚度达到20 μm时,断口表面高低不平,难以看到平滑的界面。对断口进行成分分析后发现其主要元素为镁和铜,且镁和铜的原子数分

数之比为9:1,分析认为界面上的主要组织为Mg<sub>2</sub>Cu和α-Mg。图10(b)中P3处的主要成分为钛、铜、镁、铝,根据Ti-Cu二元相图可知其主要组织为Ti<sub>2</sub>Cu化合物。分析认为焊缝的断裂位置为焊缝/钛合金界面,接头的薄弱区域是界面的Ti<sub>2</sub>Cu反应层。

当添加铜中间层的厚度为30 μm时,整个断口上的元素主要为镁和铜,图10(c)中P4处镁和铜的原子数分数分别为85.43%和12.54%,断口上未发现钛元素存在,表明接头断裂位置为镁合金焊缝,焊缝/钛合金界面已经不是接头的薄弱区域。

当添加铜中间层厚度为50 μm时,接头上的主要元素为镁和铜,其中部分区域(如P5)的成分为镁、铜,推测其组织为Mg<sub>2</sub>Cu和少量Cu<sub>2</sub>Mg化合物,表明接头断裂位置为镁合金焊缝处。随着铜中间层厚度增大,焊缝中会产生大量的Mg-Cu脆性化合物,导致接头的力学性能下降。

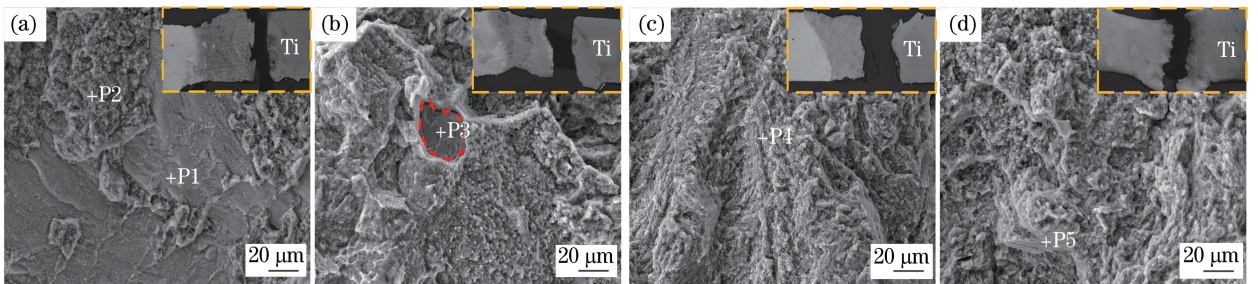


图10 添加不同厚度铜中间层焊接得到的接头在钛合金一侧的拉伸断口形貌。(a)10 μm;(b)20 μm;(c)30 μm;(d)50 μm  
Fig. 10 Micro-morphology of Ti-side tensile fractures of Mg/Ti welded joints after adding copper interlayers with different thicknesses. (a) 10 μm; (b) 20 μm; (c) 30 μm; (d) 50 μm

## 4 结 论

通过添加铜中间层并且采用激光偏向镁侧的方式成功实现了镁合金和钛合金的脉冲激光焊接,铜中间层在激光作用下熔化并与两侧母材发生反应,铜元素的加入提高了焊缝/钛合金界面的结合性能。

通过改变中间层的厚度来控制焊缝中铜元素的含量,进而影响焊缝组织,使接头的薄弱区从焊缝/钛合金界面反应层向焊缝区转移。当铜中间层厚度达到30 μm时,接头强度达到最大,为121 MPa。

随着铜中间层厚度进一步增加,焊缝中的脆性化合物Mg<sub>2</sub>Cu增多,接头的性能下降。

## 参 考 文 献

- [1] Tan C W, Gong X T, Li L Q, et al. Laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals Mg/Ti with Al interlayers [J]. Chinese Journal of 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.
- [2] Froes F H, Eliezer D, Aghion E. The science, technology, and applications of magnesium [J]. JOM, 1998, 50(9): 30-34.
- [3] Guo S, Peng Y, Zhu J, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti/Al alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102010.  
郭顺, 彭勇, 朱军, 等. 钛/铝激光焊接的微观组织及力学性能 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102010.
- [4] Li C H, Zhu M, Wang N, et al. Application of titanium alloy in airplane [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(1): 84-91.  
李重河, 朱明, 王宁, 等. 钛合金在飞机上的应用 [J]. 稀有金属, 2009, 33(1): 84-91.
- [5] Cao R, Wang T, Wang C, et al. Cold metal transfer welding-brazing of pure titanium TA2 to magnesium alloy AZ31B [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 605: 12-20.
- [6] Zang C W, Liu J G, Tan C W, et al. Laser conduction welding characteristics of dissimilar metals Mg/Ti with Al interlayer [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 595-605.
- [7] Aonuma M, Tsumura T, Nakata K. Weldability of pure titanium and AZ31 magnesium alloy by friction stir welding [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2007, 57(3): 112-118.
- [8] Zhang Z Q, Tan C W, Wang G, et al. Laser welding-brazing of immiscible AZ31B Mg and Ti-6Al-4V alloys using an electrodeposited Cu interlayer [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(3): 1414-1426.
- [9] Tan C W, Huang Y H, Chen B, et al. Microstructure and thermodynamic behavior of laser welded-brazed Mg/Ti dissimilar joint [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303009.  
檀财旺, 黄煜华, 陈波, 等. 镁/钛激光熔钎焊界面微观结构与元素热力学行为分析 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303009.
- [10] Qin Q. Study on the Mg alloy and Ti alloy joint by transient liquid phase bonding process [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015: 18-66.  
秦倩. 镁-钛异种材料的瞬间液相扩散连接 [D]. 西安: 西安科技大学, 2015: 18-66.
- [11] Du S M, Hu J, Lan T. The microstructure and properties of TIG welded joint of AZ31B/Cu dissimilar metal [J]. Advanced Materials Research, 2014, 941/942/943/944: 2047-2052.
- [12] Liu W, Chen G Q, Zhang B G, et al. Investigation on process optimization of Cu/Ti electron beam welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(5): 89-92, V.  
刘伟, 陈国庆, 张秉刚, 等. 铜/钛合金电子束焊接工艺优化 [J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 89-92, V.
- [13] Liu X Q, Du S M, Kong L M. Study on TIG welding-brazing of AZ31B and TC4 dissimilar metals with pure copper as interlayer [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(7): 209-211, 214.  
刘晓庆, 杜双明, 孔令明. 铜夹层 AZ31B/TC4 异种金属 TIG 熔钎焊研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(7): 209-211, 214.
- [14] Gao M J, Wang S Q, Yang Z R, et al.  $Al_3Ti_p/Mg$  developed by *in situ* synthesis of Mg-Al-Ti system [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(4): 583-588.  
高明娟, 王树奇, 杨子润, 等. Mg-Al-Ti 体系原位合成  $Al_3Ti_p/Mg$  [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(4): 583-588.
- [15] Fan T X, Yang G, Zhang D. Prediction of chemical stability in  $SiC_p/Al$  composites with alloying element addition using Wilson equation and an extended Miedema model [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 394(1/2): 327-338.
- [16] Miedema A R, de Châtel P F, de Boer F R. Cohesion in alloys—fundamentals of a semi-empirical model [J]. Physica B+C, 1980, 100(1): 1-28.