

镁/钛异种金属预置 Al 夹层光纤激光熔钎焊接特性

檀财旺^{1,3} 巩向涛² 李俐群³ 冯吉才^{1,3}

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(威海)汽车工程学院, 山东 威海 264209

³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,通过中间预置铝(Al)箔对镁/钛实施激光搭接焊。调整焊接工艺参数获得较好的焊缝成形,并对界面元素扩散及连接机理进行研究。结果表明,Al中间夹层的添加能很好地改善镁/钛界面的润湿铺展,促进了界面的冶金反应。当添加的Al中间层厚度为50 μm时,接头载荷是未添加的1.8倍,达到1010 N/cm。界面组织分析表明在激光直接辐照区形成了一定厚度的AlTi₃相,其余部位为Ti基化合物(α-Ti)。焊缝中第二相数量随着Al夹层厚度的增加而增多,当形成网状结构时造成焊缝变脆,降低接头拉剪载荷。

关键词 光学制造; 激光焊接; 镁合金; 钛合金; 异种材料

中图分类号 TG457.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0103002

Laser Welding-Brazing Characteristics of Dissimilar Metals Mg/Ti with Al Interlayers

Tan Caiwang^{1,3} Gong Xiangtao² Li Liqun³ Feng Jicai^{1,3}

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

²School of automotive engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

³State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The metallurgical bonding and reliable joining of Mg/Ti dissimilar metals are restricted by their non-reactive and immiscible characteristics. To overcome this problem, laser lap joining of Mg/Ti with addition of Al interlayer is carried out. Well appearances are obtained by adjusting the welding parameters. Elemental distribution across the interface and bonding mechanism are studied. The results indicate that wettability of Mg/Ti is improved with the help of Al interlayer, and thus metallurgical bonding is accelerated. When the thickness of Al interlayer is 50 μm, the shear force reaches 1010N/cm, which is 1.8 times as much as that without Al interlayer. The interfacial microstructure indicates that AlTi₃ phase forms at the direct laser irradiation zone, while α-Ti is at the zone around it at the interface. The second phases in the weld zone increase with the increase of thickness of Al interlayer. The tensile-shear force decreases when network structure is formed in the weld zone.

Key word optical fabrication; laser welding; magnesium alloys; titanium alloys; dissimilar materials

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2014-06-20; 收到修改稿日期: 2014-07-08

基金项目: 哈尔滨工业大学(威海)校科研基金[HIT(WH)201416]、哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室开放课题(AWJ-M15-08)

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)等的激光加工及焊接基础与应用等方面的研究。E-mail: tancaiwang@163.com

1 引言

镁及镁合金是目前已知的最轻金属结构材料之一,具有低密度、高比强度、比刚度、高阻尼性及易回收利用等特点,被誉为21世纪绿色工程材料,广泛应用于汽车工业和航空航天等领域^[1-3]。钛合金由于具有比强度高、抗腐蚀性能好、良好的耐热性以及焊接性等优点,在航空航天、核工业等领域广泛使用^[4-7]。因此,将镁/钛连接形成复合结构,在保证局部承载的同时减轻整体重量,提高飞行器的运载能力,具有巨大的应用前景。实现镁/钛两者之间的可靠连接既是轻量化应用的前提,也为镁合金扩大在航空航天领域的应用奠定基础。

由于镁、钛之间溶解度非常小,熔点差异较大(镁:649 ℃,钛:1678 ℃),相互之间几乎不发生冶金反应,传统的熔焊手段在熔化钛合金同时造成镁合金剧烈烧损蒸发,很难实现镁/钛的可靠连接。尤其在快速加热和冷却条件下,元素之间的扩散受到限制,实现这类相互间不发生冶金反应的异种金属连接更加困难^[8]。

针对于这些问题,国内外学者开展了相关的焊接研究工作,主要方法有激光焊、液相扩散焊、搅拌摩擦焊等。Gao等^[9]对镁/钛采用激光填丝对接焊,接头界面处发生了合金元素Al向钛一侧的元素扩散。西北工业大学熊江涛等^[10]在焊接镁/钛时,为改善两者的连接效果,以铝箔为中间层进行了瞬时液相扩散焊,对界面连接机制和接头力学性能进行了研究。但镁合金易烧损蒸发以及在焊接过程中温度、保温时间等要求较为严格,限制了其进一步应用。日本东京都立产业技术研究所和大阪大学焊接研究所^[11-12]联合开展了镁/钛搅拌摩擦焊,发现在压力和搅拌的作用下,界面处发生了扩散并形成了极薄的反应层。其厚度随着镁合金母材中Al元素的增加而增加,且与接头性能紧密相关。

在此基础上,本文利用激光熔钎焊方法,选择合适的中间过渡层来实现镁/钛接头的冶金结合。在获得优化工艺参数后,主要研究夹层厚度对组织及性能的影响。

2 试验材料及方法

试验采用的母材为AZ31B镁合金与Ti6Al4V钛合金板材,其中镁合金为H24态,轧制后不完全退火,钛合金为退火态。两者的试验件规格均为100 mm×30 mm×1.5 mm,其化学成分如表1和表2所示。由于Al元素能够与镁、钛反应,可以起到很好的中间连接作用,因此选定纯Al箔为中间层^[10]。用砂带打磨去除镁合金表面的防氧化层,再用丙酮擦洗镁合金和钛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.

镁/钛夹Al层光纤激光熔钎焊过程如图1所示。试验采用IPG光纤激光器(YLR-10000),激光焦距为285 mm,输出最大功率为10 kW。焊接时激光垂直辐照工件表面,采用Ar气进行侧吹保护,同时垫板进行背保护,利用正反保护可很好地避免镁、钛的氧化。接头形式为工程中常见的搭接接头,由于镁的熔点(660 ℃)较低,故将镁合金作为上板,铝箔置于中间,钛板置于下部,从而主要使镁合金和铝箔熔化,与部分熔化的钛板进行充分的接触反应。试验过程中为了减少上板镁合金的烧损,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。

焊后采用金相显微镜(OM)和扫描电镜(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。在INSTRON-5569电子万能材料试验机上进行拉剪试验,拉伸速率为1.5 mm/min,数据点采集频率为10 point/s,试验温度为18 ℃,可获得剪切力 F 。

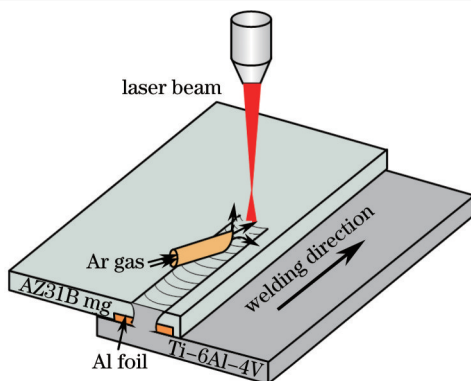


图1 镁/钛夹Al层激光熔钎焊示意图

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

3 结果与讨论

3.1 焊接工艺参数

Mg合金由于熔沸点较低,焊接过程中易烧损蒸发,为了获得较好的焊缝成形,必须对焊接热输入进行精确可控。试验中主要的焊接工艺参数为激光功率 P 和焊接速度 V 。在试验中改变这两个参数,以获得较好的热输入范围,具体参数如表3所示。图2为利用表3中的焊接参数获得的焊缝成形。试验结果发现,热输入对接头成形的好坏有着极大的影响。热输入较高时(1号件和5号件),上板镁合金焊缝区域大部分均发生烧损蒸发现象,表面成形较差,无法获得满意接头。热输入过小,易造成焊接过程不够稳定,如3、4号件。经过最终优化后获得较好的热输入范围并取得了较好的焊缝成形,如2号件。

表3 试验采用的焊接参数

Table 3 Welding parameters employed in the study

Number	P/W	$V/(m/min)$
1	1200	0.30
2	850	0.30
3	600	0.30
4	850	0.50
5	850	0.20

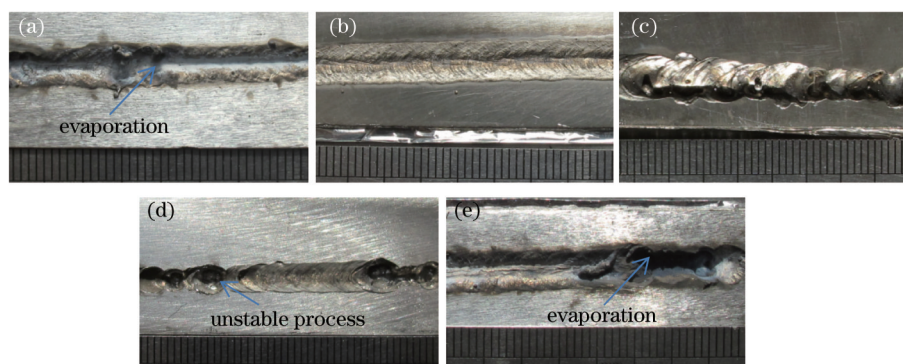


图2 焊后表面形貌。(a) 1号件; (b) 2号件; (c) 3号件; (d) 4号件; (e) 5号件

Fig.2 Appearances of laser welded-brazed Mg/Ti welded joints (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4; (e) No.5

典型接头的横截面照片如图3所示,虽然采用了正离焦及较低的焊接热输入,在焊接过程中,Mg合金还存在一定的烧损情况,但表面下塌量已在接受范围之内。Al夹层受热熔化后会与两侧镁、钛反应,故在截面中很难发现。

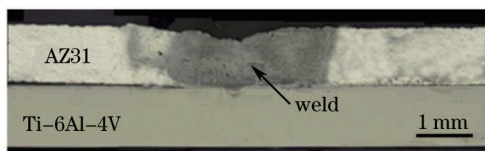


图3 典型镁/钛激光熔钎焊接头截面形貌

Fig.3 Typical cross section of laser welded-brazed Mg/Ti joint

3.2 接头力学性能

在合适的热输入范围内,主要研究了所添加的Al中间夹层厚度和接头性能之间的对应关系,其结果如图4所示。随着Al添加层厚度的增加,接头抗剪载荷呈现出先增大后减少的趋势,在Al添加层厚度为50 μm时,剪切力达到最大值1010 N/cm,约为未添加中间层的1.8倍。在Al添加层厚度为10~100 μm时,接头的抗剪载荷均超过未添加中间层时的接头载荷,这也体现出Al夹层的加入对力学性能存在着极大的改善作用。

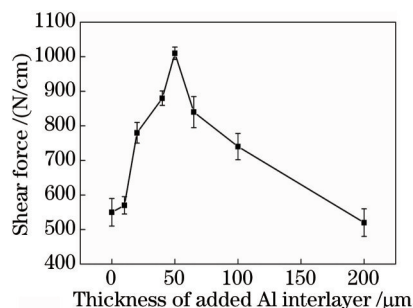


图4 Al中间层厚度和接头性能之间关系

Fig.4 Relationship between the thickness of added Al interlayer and shear force

接头主要断裂于界面,如图5所示。在添加Al夹层附近区域均出现了撕裂痕迹,从而也反映出Al夹层的添加能够有效地阻碍接头的断裂。分析认为,接头性能的改善主要得益于两部分:一是钎缝界面处通过Al夹层实现了冶金结合;二是熔焊焊缝中由于部分Al元素的卷入使得焊缝增强。

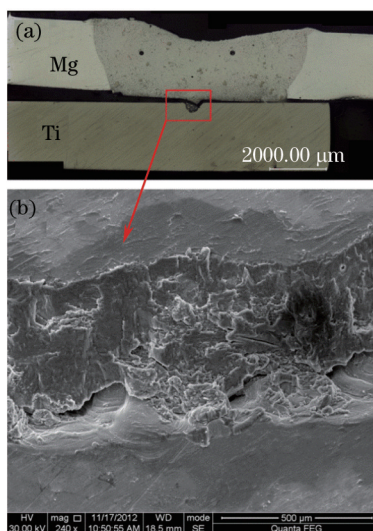


图5 镁/钛接头断裂位置及断面形貌。(a) 断裂截面;(b) 断面表面

Fig.5 Fracture location and surface of Mg/Ti welded joint. (a) Fracture location; (b) fracture surface

3.3 界面组织分析及反应机制

添加Al中间夹层对于界面反应的改善效果最直观体现在界面处润湿铺展情况。图6为添加夹层前后,利用扫描电镜的二次电子信号获得的界面处组织形貌。

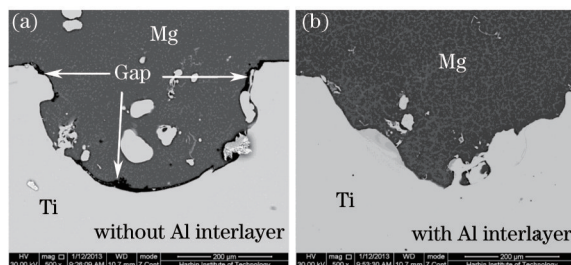


图6 添加Al夹层前后界面处对比。(a)添加前;(b)添加后

Fig.6 Comparison of the interface added. (a) Without and (b) with Al interlayer

可以看出,当未添加Al夹层时,由于镁、钛之间互不相熔特性,当上板镁合金熔化后,与下板钛合金之间无法取得较好的润湿铺展效果。冷却凝固后,两者之间形成了如图6(a)所示的界面间隙。当利用Al充当中间夹层时,界面处无明显间隙[见图6(b)],说明Al夹层熔化后能够很好地与两侧镁、钛进行润湿铺展,解决了两者之间互不相熔的问题。

图7为添加不同厚度Al中间层时钎缝界面处的组织形貌。利用电镜的背散射模式进行观察,可以清晰地发现,未添加Al中间层时,镁/钛界面处无明显的反应层,此时接头更多的是一种机械结合,承载能力较低,如图7(a)所示。在添加Al中间层后,镁/钛界面处形成了较为明显的中间反应层,如图7(b)~(d)所示。Al中间层厚度和界面反应层厚度之间无明确的对应关系,这主要是由于Al中间层熔化后部分被卷入到焊缝中,无法全部与钛一侧发生反应。总体来看,添加Al中间层厚度越厚,界面结合区域越宽。增加界面结合区域,必然提高拉剪作用下接头承载能力。结合图5中的断口形貌可知,在冶金结合的区域,出现了撕裂棱,而在结合比较薄弱的部位断口表面光滑,阻碍接头断裂的能力较弱。

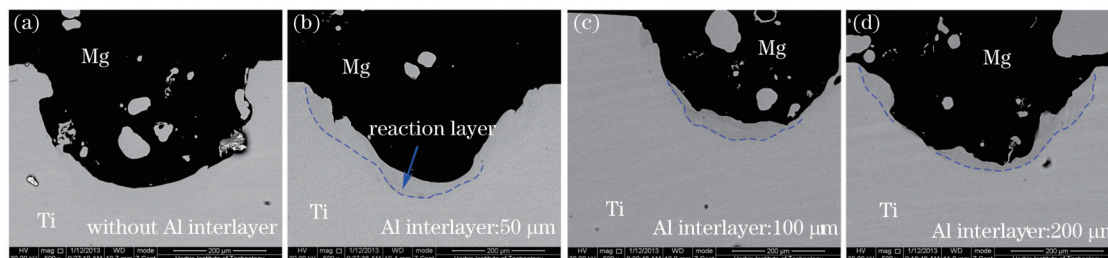


图7 不同厚度的Al夹层时镁/钛界面组织形貌。(a)0;(b)50 μm;(c)100 μm;(d)200 μm

Fig.7 Interfacial morphologies of Mg/Ti with different thicknesses of Al interlayer. (a) 0; (b) 50 μm; (c) 100 μm; (d) 200 μm

同时激光的局部加热特性也造成了界面反应的不均匀性。图8为激光直接辐照区(凹坑)和两侧之间的反应层形貌。焊接过程中,在激光局部高能量密度的辐照下,不仅搭接接头上部的镁合金、Al中间层熔化,下部钛合金也会发生局部微熔,反应凝固后形成如图7所示的凹坑。而在凹坑之外的其他区域,由于激光能量不足以使Ti大量熔化,Al熔化后无法与Ti大量混合而反应,此时的界面结合主要以Al固溶于Ti为主。这种液/固界面在激光快速加热冷却条件下,无法形成明显的反应层。

为鉴定各反应物的组成,对图8(a)中界面处进行能谱分析。其反应层成分的原子数分数分别为Al 13.2%,Ti 84.4%,V 2.4%,认定为Ti(Al)固溶体 α -Ti。对凹坑处明显的反应层进行线扫描,扫描结果如图8(c)所示。在界面处Al、Ti原子比例出现平台,原子个数比约为1:3,据此可判断界面生成的反应物为AlTi₃相。可见预置的Al在熔化后与微熔的Ti发生了金属间化合物反应层。反应方程式如下



3.4 熔焊组织分析

Al中间层的添加不仅改善镁/钛界面冶金反应,其存在也对上板Mg一侧焊缝组织产生一定的影响。图9显示Al夹层厚度分别为0、50、100、200 μm时近界面Mg焊缝中组织形貌。可以发现随着Al厚度的增加,焊缝中的第二相颗粒析出数量逐渐增多,而且渐渐成链状分布。为了进一步分析相的组成,对焊缝进行相应的能谱分析,其结果如表4所示。由此可见逐渐增多的相主要是Mg-Al共晶相(点2)以及Al-Mn相(点3),这

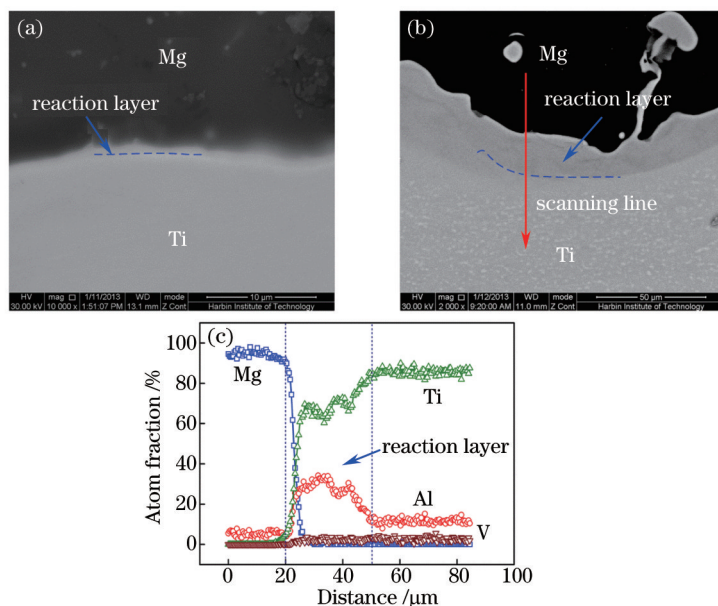


图8 激光局部加热对镁/钛界面反应的影响。(a) 未直接辐照区；(b) 直接辐照区；(c) 界面元素分布
 Fig.8 Effect of localized heat on interfacial reaction of Mg/Ti. (a) Non-direct laser irradiation zone; (b) direct laser irradiation zone; (c) elemental distribution

两种相在焊缝中可起到强化作用。相应的近界面处焊缝区域硬度测试结果也证实了这一点,如图10所示。随着Al添加层厚度增加,焊缝区域硬度明显增加,而且,越靠近界面处,焊缝的硬度越高。当焊缝中的Mg-Al第二相(β -Mg₁₇Al₁₂)形成网状时,焊缝变脆,这也是接头性能逐渐降低的一个重要原因^[13]。

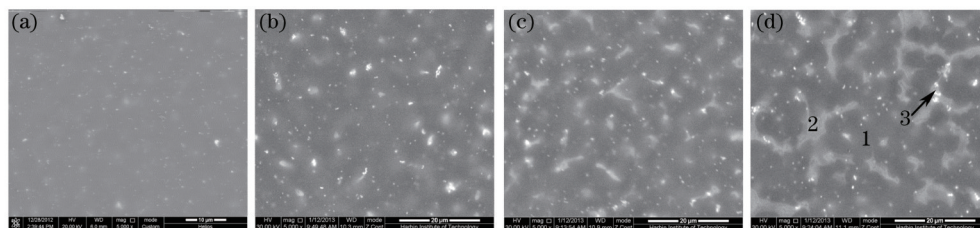


图9 不同厚度Al夹层下的焊缝组织形貌。(a) 0; (b) 50 μm; (c) 100 μm; (d) 200 μm
 Fig.9 Microstructure of weld with different thicknesses of Al interlayer. (a) 0; (b) 50 μm; (c) 100 μm; (d) 200 μm

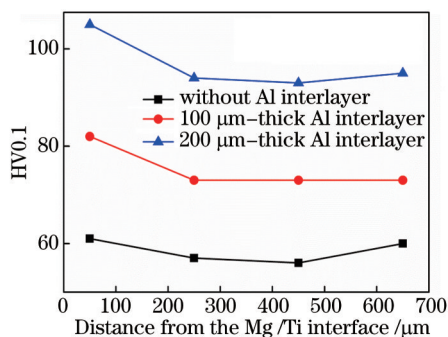


图10 近镁/钛界面的焊缝硬度分布
 Fig.10 Hardness distribution near the Mg/Ti interface
 表4 图9中焊缝第二相能谱分析结果(原子数分数,%)

Table 4 EDS analysis results of the second phases pointed in Fig.9 (atom fraction, %)

Location	Mg	Al	Zn	Mn
1	92.2	7.4	0.4	-
2	70.7	28.2	1.1	-
3	62.7	30.4	-	6.9

镁/钛夹 Al 层反应机制如图 11 所示。采用镁板在上,钛板在下,Al 夹层在中间的接头形式,如图 11(a)所示。采用散焦的激光束辐照镁板表面,在热传导的作用下,Al 夹层迅速熔化并将热量传递至钛板上,随着温度的上升,在激光直接辐照的区域,钛板表面发生微熔,如图 11(b)中凹坑所示。与此同时,Al 夹层熔化后与镁合金都处于液态,会在短时间内充分扩散混合,且部分 Al 原子会与钛板之间发生固/液扩散。当温度冷却到 1180 °C 以下时,在 Al/Ti 近界面处的凹坑部位会优先析出 Al-Ti 化合物。由于钛原子向液态中的扩散速度远大于 Al 原子向固态中的扩散速度,因此会形成富 Ti 的 Ti_3Al 相。随着温度的进一步降低,会在镁合金焊缝中析出 Al-Mn 相,由于浓度起伏以及激光的不均匀加热等因素影响,Al-Mn 的析出也较镁合金母材中的含量大为增加。同时会在激光直接辐照区的两侧析出 α -Ti 相,如图 11(d)所示。当温度进一步下降到 650 °C 以下时,镁合金焊缝开始凝固,最终得到图 7 中所观察到的形貌。

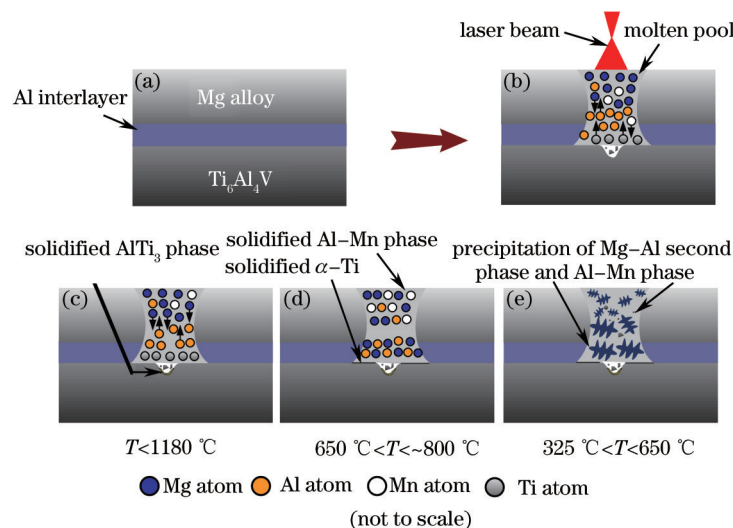


图 11 镁/钛中间夹 Al 层激光熔钎焊机机制示意图

Fig.11 Schematic of laser welding-brazing Mg/Ti dissimilar joint with Al interlayer

4 结 论

1) 通过添加 Al 中间层可以显著提高接头抗剪载荷,最大可以达到 1010 N/cm,是未添加中间层的 1.8 倍,界面处冶金结合区域能有效阻碍裂纹扩展。

2) Al 中间层的添加可以很好地改善镁/钛之间的润湿铺展,扩大了连接区域,促进了两者之间的冶金结合,界面处主要形成了 $AlTi_3$ 化合物和 α -Ti 固溶体。

3) 随着 Al 中间层厚度的增加,焊缝中第二相 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 越来越多,当形成网状时易造成焊缝变脆,是接头载荷下降的重要原因。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Lü Junxia, Yang Wuxiong, Wu Shikai, *et al.*. Microstructure and mechanical property of Mg-9.8Li-2.9Al-Zn alloy laser welded joint[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0303001.
吕俊霞,杨武雄,吴世凯,等. Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303001.
- 3 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.
- 4 Chen Xi, Yao Gang, Huang Rui, *et al.*. Laser welding of TC4 titanium with aluminum insert[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603006.

- 陈 曦, 姚 刚, 黄 锐, 等. TC4 钛合金加入铝夹层的激光焊接[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603006.
- 5 Fu Yanyan, Song Yueqing, Hui Songxiao, *et al.*. Research and application of typical aerospace titanium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(6): 850–856.
- 付艳艳, 宋月清, 惠松骁, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850–856.
- 6 Zhao Bo, Li Guoyuan, Xu Guangxing. Application and prospect of titanium alloy welding technology in aircraft manufacture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, (16): 122–125.
- 赵 博, 李国元, 许广兴. 钛合金焊接技术在飞机制造中的应用和展望[J]. 航空制造技术, 2013, (16): 122–125.
- 7 Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3204–3209.
- 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204–3209.
- 8 Tan Caiwang, Mei Changxing, Li Liqun, *et al.*. Single and dual beam laser welding–brazing characteristics of magnesium/zinc-coated steel dissimilar alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1577–1585.
- 檀财旺, 梅长兴, 李俐群, 等. 镁/镀锌钢异种合金单、双光束激光熔钎焊特性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1577–1585.
- 9 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.
- 10 Xiong Jiangtao, Zhang Fusheng, Li Jinglong, *et al.*. Transient liquid phase bonding of magnesium alloy (AZ31B) and titanium alloy (Ti6Al4V) using aluminum interlayer[J]. Rare Metal Materials and 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.
- 11 Masayuki Aonuma, Kazuhiro Nakata. 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(1–3): 135–138.
- 12 Masayuki Aonuma, Kazuhiro Nakata. Effect of alloying elements on interface microstructure of Mg–Al–Zn magnesium alloys and titanium joint by friction stir welding[J]. Materials Science and Engineering B, 2009, 161(1–3): 46–49.
- 13 Shi Huiying, Chen Zishan, Zhang Jumei, *et al.*. Effects of precipitation morphology of β -Mg₁₇Al₁₂ phase on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(1): 42–46.
- 时惠英, 陈梓山, 张菊梅, 等. β -Mg₁₇Al₁₂相析出形态对 AZ91 镁合金力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(1): 42–46.

栏目编辑: 张 雁