

Al/Ti 异种金属 TIG 熔钎焊接头 界面行为及断裂行为

王 敬^{1,2}, 王 勇³

(1. 重庆工商职业学院 汽车工程学院, 重庆 401520; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 3. 重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘 要:以 TIG 电弧为热源, AlMg₃ 焊丝为填充材料, 采用 BSE、EDS、XRD 以及万能拉伸试验机对 5052 铝合金和 Ti-6Al-4V 钛合金的 TIG 熔钎焊接头界面行为及断裂行为进行了研究。结果表明:焊接电流显著影响铝 / 钛钎焊界面反应层的形态及厚度, 进而对铝 / 钛焊接接头的力学性能产生显著影响。当焊接电流为 75 A 时, 铝 / 钛钎焊界面形成锯齿状的 TiAl₃ 反应层, 在拉伸试验中, 接头断裂发生在铝合金母材, 最高抗拉强度达到 185 MPa。

关键词:铝合金; 钛合金; TIG 熔钎焊; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2016.21.045

中图分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2016)21-0169-04

Interface Characteristics and Fracture Behavior of Al/Ti Dissimilar Metal TIG Welded-brazed Joints

WANG Jing^{1,2}, WANG Yong³

(1. School of Automotive Engineering, Chongqing Technology & Business Institute, Chongqing 401520, China; 2. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: Taking TIG arc as heat source and AlMg₃ wire as filler metal, interface characteristics and fracture behavior of the TIG welded-brazed 5052 Al alloy and Ti-6Al-4V alloy joint were studied by BSE, EDS, XRD and tensile tests. The results indicate that the morphology and thickness of brazing reaction layer of Al/Ti joints are influenced by welding current, which plays an important role on the mechanical properties of Al/Ti joints. With the optimized welding current of 75 A, the serration-shaped TiAl₃ reaction layer is formed in the brazing zone. Eventually, the maximum tensile strength of 185 MPa is obtained and the optimized Al/Ti joint fractures at Al alloy base plate during tensile test.

Key words: aluminum alloy; titanium alloy; TIG welding-brazing; microstructure; mechanical property

在当今社会, 环境污染尤其是大气污染日益受到人们的关注。在汽车工业迅速发展的今天, 汽车尾气作为大气的主要污染源之一, 占污染份额超过 80%。因此, 节能减排刻不容缓。大量研究表明, 汽车轻量化是实现减少尾气污染的重要举措。乘用车每减重 10%, 可节油 6%~8%, 排放降低 4%^[1]。铝合金密度小, 只有大量使用的钢的 1/3, 同时铝合金比强度高, 耐腐蚀性好, 易加工成型且价格低廉^[2-3]。因此铝合金作为高强轻质合金是实现汽车轻量化的首选

材料。钛及钛合金密度小, 比强度高, 耐腐蚀性好, 具有良好的高温强度和低温韧性, 而且我国的钛资源比较丰富^[4-5]。在当今汽车制造工业, 钛合金在乘用车及跑车等行业上的应用也越来越广泛, 目前, 已在奔驰、丰田、本田、法拉利和保时捷等品牌的汽车中得到应用。然而, 昂贵的成本限制了钛及钛合金的广泛应用。因此, 在某些情况下需要将钛合金与铝合金连接起来使用, 得到铝 / 钛复合结构, 以充分发挥各自的长处。开展这方面的研究, 无论是从经济角度, 还是从使用性能角度出发都是非常必要的, 其具有广阔的应用前景和深远意义。

但是, 铝合金与钛合金的可靠连接并不易实现。由于铝、钛的熔点、线膨胀系数、热导率相差较大, 在焊接加热和冷却过程中易产生较大的内应力; 常温下铝、钛互溶度极小, 接头处易形成脆性金属间化合

收稿日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275543); 国家科技部重大专项项目(2012ZX04010-081)

作者简介: 王敬(1983-), 女, 山东潍坊人, 副教授, 博士, 主要从事焊接材料与工艺等研究; 电话: 18580878106;

E-mail: jingw1981@163.com

物,从而使接头性能恶化,无法达到工业应用的要求。传统熔焊中,熔化的钛合金会造成铝合金的严重蒸发,从而恶化接头力学性能,难以实现铝/钛之间的可靠连接。近年来,搅拌摩擦焊^[6],扩散焊^[7],瞬间液相焊^[8],激光熔钎焊^[9],TIG 熔钎焊^[10-11]等焊接方法被用来实现铝/钛之间的可靠连接。其中 TIG 熔钎焊具有价格低廉、灵活、效率高、适用范围广等显著特点。针对铝/钛等熔点差异巨大的金属,TIG 熔钎焊具有显著优势。在 TIG 熔钎焊过程中,熔化的焊丝与部分熔化的铝合金凝固形成焊缝,具有熔焊特征;焊缝与未熔化的钛合金之间形成钎焊区,具有典型的钎焊特征。TIG 熔钎焊可以避免高熔点金属钛的熔化,又可以实现铝/钛之间的有效冶金结合。Xu 等^[12]采用 TIG 熔钎焊技术,实现了同样具有巨大熔点差异的镁/钛之间的可靠连接,接头强度达到镁合金母材的 82.3%。黄永宪教授^[2]采用 TIG 熔钎焊技术,实现了 5A06 铝合金与 Ti-6Al-4V 钛合金的连接。接头处形成了 TiAl₃ 钎焊层,铝/钛接头强度达到 270 MPa。吕世雄教授^[10]研究了 AlMg6 铝合金与 Ti-6Al-4V 钛合金的 TIG 熔钎焊,铝/钛接头具有熔焊及钎焊双重特征:铝母材侧为熔焊特征,钛母材侧为钎焊特征。

本文采用 TIG 熔钎焊技术,以 AlMg₃ 焊丝为填充材料,实现 5052 铝合金与 Ti-6Al-4V 钛合金的连接。主要研究不同焊接参数对接头界面行为及断裂行为的影响。

1 试验材料及方法

试验选用的母材为 5052 铝合金和 Ti-6Al-4V 钛合金,尺寸均为 100 mm×60 mm×1 mm,填充材料为直径 1.2 mm 的 AlMg₃ 铝焊丝,试验材料的主要化学成分如表 1 所示。焊接设备是 Panasonic 公司生产的 YC-500W 系 TIG 焊机。焊接前,用砂纸打磨待焊母材及焊丝表面的氧化膜,随后用丙酮清洗干净。由于钛合金的熔点远高于铝合金熔点,因此焊接时将钨极中心向铝合金一侧偏离焊缝中心 0.8 mm,以避免焊接过程中钛合金熔化引起铝合金的过度蒸发

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)及力学性能
Tab.1 Chemical compositions and tensile properties of base metal and filler metal (wt%)

合金	Al	Ti	Mg	V	Fe	Cu	Mn	σ_b /MPa
5052	余量	-	2.5	-	0.19	0.05	0.03	187
Ti-6Al-4V	5.5~6.5	余量	-	3.5~4.5	0.3	-	-	900
AlMg ₃	余量	0.1	2.5~3.5	-	0.3	0.05	0.15	-

发,焊接示意图如图 1 所示。焊接工艺参数见表 2。

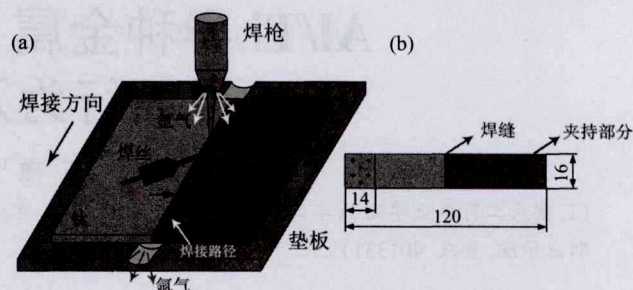


图 1 TIG 熔钎焊过程(a)及拉伸样(b)示意图

Fig.1 Schematic diagrams of TIG welding-brazing process (a) and tensile specimen (b)

表 2 试验采用的焊接参数

Tab.2 Experimental parameters used in the process

焊接电流 /A	钨极偏移量 /mm	焊接速度 v /(m·min ⁻¹)	焊丝填充速度 v_w /(m·min ⁻¹)	氩气流量 v_g /(L·min ⁻¹)	弧长 /mm
55~85	0.8	0.25	0.5	8	3

焊接完成后,将一部分焊件切成拉伸试样进行力学性能测试。拉伸速度为 0.5 mm/min,每个焊接参数测试 3 个试样,取其平均值。采用扫描电镜观察断口形貌,分析接头断裂模式;然后对断口进行 XRD 分析,确定断裂位置。此外,将部分铝/钛焊件沿横截面切开,经清洗抛光后用扫描电镜 BSE 模式观察界面微观特征并用能谱分析仪确定成分。

2 试验结果与讨论

2.1 铝/钛熔钎焊接头宏观特征

图 2 为铝/钛熔钎焊接头不同焊接电流下接头的横截面。可看出,低熔点的铝合金和填充焊丝熔化凝固形成熔焊区(FZ),具有熔焊的特征。而钛合金熔点较高,在整个焊接过程中几乎不熔化。钛合金与熔池作用形成钎焊层(BZ),具有钎焊特征。随着焊接电流的增大,熔焊区的范围明显增大。这是因为随着焊接电流增加,焊接过程热输入增大。较大的热输入使更多的铝合金母材及焊丝熔化,最终形成较大

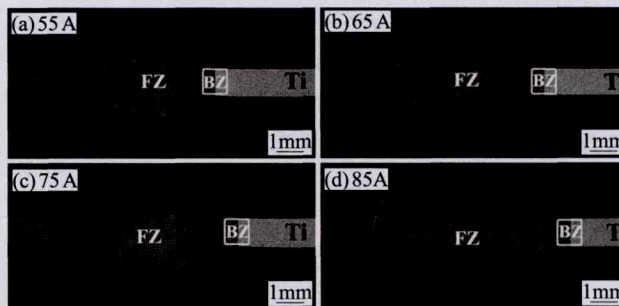


图 2 不同焊接电流下的铝/钛熔钎焊接头横截面图
Fig.2 Cross section macrostructures of typical Al/Ti joints under different welding currents

的熔焊区。

2.2 铝/钛熔钎焊接头微观特征

图 3 为铝/钛熔钎焊接头不同焊接电流下接头钎焊区的微观组织。可看出,当焊接电流为 55 A 时,接头上部形成了厚度约 $1\mu\text{m}$ 的锯齿状反应层,而接头下部没有明显的反应层生成。整个铝/钛接头在焊缝垂直方向上表现出微观组织差异。这主要是因为 TIG 氩弧作为热源,在焊缝垂直方向上具有较大的温度梯度。铝/钛接头上部热输入大,钛合金表面温度高,原子活性大,可以与熔池较充分反应,生成连续的反应层。而铝/钛接头下部热输入小,钛合金表面温度低,原子扩散能力弱,因此无明显反应层生成。此外,随着焊接电流的增大,铝/钛接头整体热输入随之逐渐增大,锯齿状反应层也逐渐增厚,有利于阻止裂纹扩展。对铝/钛接头反应层进行 EDS 分析,结果如表 3 所示。EDS 分析结果表明,所有铝/钛接头反应层中 Al、Ti 原子百分比约为 75:25,因此可以确定反应层成分为 TiAl_3 金属间化合物。当焊接电流为 85 A 时,接头上部生成了最大厚度约 $5\mu\text{m}$ 的反应层。然而从图 3(h)可见,此时接头下部沿钎焊层/钛合金界面出现了连续的裂纹。这是由于此时 TiAl_3 的形成速度高于 Ti 原子的消耗速度,形成了很强的内应力,导致裂纹萌生^[10]。此外铝合金与钛合金的热导率相差较大,且铝的线膨胀系数比钛大 3 倍,因此在快速冷却过程中铝/钛物理性能的巨大差异导致焊接应力进一步增大,最终导致接头下部形成了连续的裂纹,这对整个接头的力学性能是非常不利的。

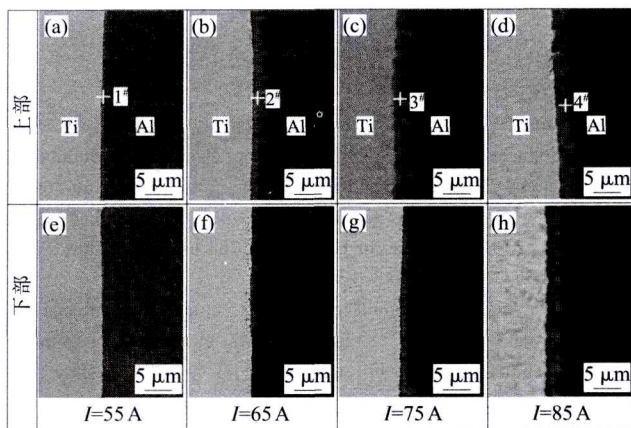


图 3 不同焊接电流下铝/钛熔钎焊接头钎焊区微观组织图
Fig.3 The transverse microstructures of brazing zones of Al/Ti joints under different welding currents

表 3 铝/钛熔钎焊界面反应层的能谱分析结果(原子分数,%)
Tab.3 EDS test results of Al/Ti brazing interface (at%)

位置	元素			
	Al	Ti	V	Mg
1 [#]	74.3	25.7	-	-
2 [#]	73.2	26.4	0.4	-
3 [#]	76.1	23.7	-	0.2
4 [#]	74.1	25.6	0.3	-

2.3 力学性能测试

图 4 为铝/钛熔钎焊接头力学性能测试结果。当焊接电流为 55 A 时,接头抗拉强度为 78 MPa,力学性能较低。这主要是因为此时热输入较小,铝/钛接头下部没有明显的反应层生成,整个接头为不完全的冶金结合。随着焊接电流的增大,接头强度也逐渐增大。当焊接电流为 75 A 时,铝/钛接头抗拉强度达到最大值 185 MPa。此时断裂发生在远离焊缝的铝合金母材处,说明此时铝/钛接头界面产生了可靠的冶金结合。当焊接电流达到 85 A 时,接头抗拉强度显著下降,只有 72 MPa。此时铝/钛接头下部在焊接过程中由于内应力产生了明显的裂纹,这些裂纹在拉伸过程中进一步扩展,严重恶化了接头强度。

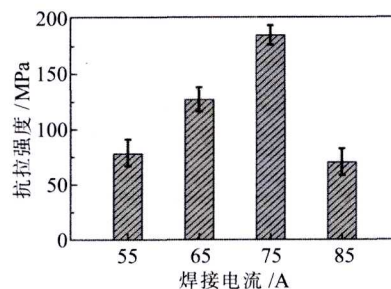


图 4 不同焊接电流下的铝/钛熔钎焊接头强度
Fig.4 Tensile strength of the Al/Ti joints under different welding currents

2.4 铝/钛熔钎焊接头断裂特征

图 5 为典型的 Al/Ti 接头断口形貌。当焊接电流为 75 A 时,接头断裂发生在铝合金母材处,可看

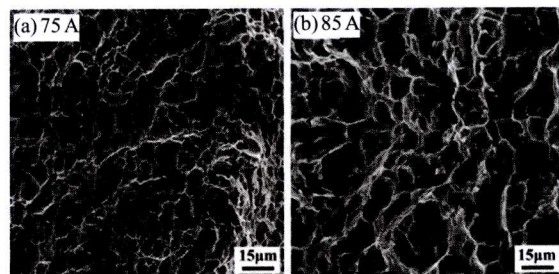


图 5 焊接电流为 75 A 和 85 A 时接头的断口形貌
Fig.5 Fracture surfaces of the joints welded with currents of 75 A, 85 A

出其断口表面存在韧窝(图 5(a)),为典型的塑性断裂,这与力学性能测试结果相符。XRD 分析结果表明断口表面只有 Al 相,如图 6(a)所示。当焊接电流增大到 85 A 时,断裂发生在钎焊层 / 钛合金界面处,图 5(b)为接头铝侧的断口形貌图。此时断口表面有大量撕裂棱,接头表现为脆性断裂。对铝侧断口进行 XRD 分析,只有 TiAl_3 相被检测到,说明断裂确实是沿钎焊层 / 钛合金界面发生的,这也与界面微观形貌图相符。

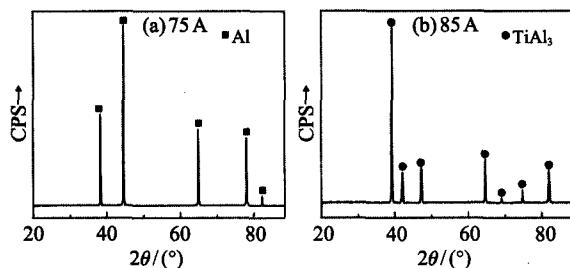


图 6 焊接电流为 75A 和 85A 时接头铝侧断口的 XRD 分析图谱

Fig.6 XRD results of fracture surfaces of Al side welded joints with 75A and 85A

3 结论

(1) 热输入影响铝 / 钛接头钎焊区反应层的形态及厚度,进而影响铝 / 钛接头的力学性能。

(2) 当焊接电流为 75 A 时,铝 / 钛熔钎焊接头界面生成 4 μm 厚的锯齿状 TiAl_3 金属间化合物层,有利于阻止裂纹扩展,最大抗拉强度达到 185 MPa,断裂发生在铝合金母材。

(3) 当焊接电流增大到 85 A 时,铝 / 钛接头下部在焊接过程中由于内应力产生了明显的裂纹,在拉伸试验中,断裂发生在钎焊层 / 钛合金界面,力学

性能较差。

参考文献:

- [1] 马鸣图,毕祥玉,游江海,等. 铝合金汽车板性能及其应用的研究进展[J]. 机械工程材料,2010,34(6):1-5.
- [2] Lv S X, Jing X J, Huang Y X, et al. Investigation on TIG arc welding-brazing of Ti/Al dissimilar alloys with Al based fillers [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17 (7): 519-524.
- [3] 陈玉华,谢吉林,戈军委,等. 工艺参数对 Ti/Al 异种金属搅拌摩擦焊接头抗拉强度的影响 [J]. 热加工工艺,2015,44(3): 41-44.
- [4] 陈思杰,朱春莉. 钛及钛合金先进连接技术研究[J]. 热加工工艺,2015,44(3):18-24.
- [5] 秦倩,杜双明,陈应科. 铜夹层 Ti-6Al-4V/AZ31B 异种金属的扩散连接[J]. 热加工工艺,2015,44(7):51-59.
- [6] Chen Y H, Ni Q, Ke L M. Interface characteristic of friction stir welding lap joints of Ti/Al dissimilar alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 299-304.
- [7] Yao W, Wu A P, Zou G S, et al. Formation process of the bonding joint in Ti/Al diffusion bonding [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480: 456-463.
- [8] AlHazzaa A, Khan T I, Haq I. Transient liquid phase (TLP) bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Characterization, 2010, 61: 312-317.
- [9] Chen S H, Li L Q, Chen Y B, et al. Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 891-898.
- [10] 吕世雄,杨涛,黄永亮,等. Ti/Al TIG 微熔钎焊界面行为及接头断裂行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (3): 478-482.
- [11] Lv S X, Cui Q L, Huang Y X, et al. Influence of Zr addition on TIG welding-brazing of Ti-6Al-4V to Al5A06 [J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 568: 150-154.
- [12] Xu C, Sheng G M, Deng Y Q, et al. Microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas welded-brazed Mg/Ti lap joints [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19: 443-450. [21]
- [1] 戴玮. Sr, Ti, Ce 对 6061 铝合金用钎料性能及组织的影响 [D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [2] 李红, Wolfgang Tillmann, 栗卓新,等. 高品质高可靠性钎料的技术发展及应用[J]. 焊接学报,2014,35(4):108-112.
- [3] 王宝瑞,雷华东,黄文荣,等. LF6 铝镁合金电子束焊接[J]. 新技术新工艺,2006(6):26-28.
- [4] Jürgen Hirsch. Recent development in aluminium for automotive applications[J]. Transaction of nonferrous metals society of China, 2014, 24:1995-2002.
- [5] 林钢,林慧国,赵玉涛. 铝合金应用手册 [M]. 北京:机械工业出版社,2006:278-283.
- [6] 余克壮,彭勃,范民,等. LF6 铝合金散热器振动钎焊润湿界面微观组织特征 [J]. 机械制造文摘:焊接分册,2011(3):28-31,43.
- [7] 张国伟,包晔峰,蒋永,等. Al-Si-Cu 基钎料钎焊 6063 铝合金钎焊接头的显微组织及剪切性能 [J]. 上海交通大学学报, 2010, 44: 66-69.
- [8] Tsao L C, Weng W P, Cheng M D, et al. Brazeability of a 3003 aluminum alloy with Al-Si-Cu-Based filler metals[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(4): 360-364.
- [9] Chang S Y, Tsao L C, Li T Y, et al. Joining 6061 aluminum alloy with Al-Si-Cu filler metals [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 488: 174-180.
- [10] Wang Shaohong, Zhou Heping, Kang Yuping. The influence of rare earth elements on microstructures and properties of 6061 aluminum alloy vacuum-brazed joints [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 352: 79-83.
- [11] 张瑜,王宇鑫,廖文俊,等. 稀土元素对过共晶铝硅合金的变质机理[J]. 金属功能材料,2010,17(3):86-90.
- [12] 张文. 铜 / 磷对高硅铝合金的变质研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014. [22]

(上接第 168 页)

参考文献:

- [1] 戴玮. Sr, Ti, Ce 对 6061 铝合金用钎料性能及组织的影响 [D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [2] 李红, Wolfgang Tillmann, 栗卓新,等. 高品质高可靠性钎料的技术发展及应用[J]. 焊接学报,2014,35(4):108-112.
- [3] 王宝瑞,雷华东,黄文荣,等. LF6 铝镁合金电子束焊接[J]. 新技术新工艺,2006(6):26-28.
- [4] Jürgen Hirsch. Recent development in aluminium for automotive applications[J]. Transaction of nonferrous metals society of China, 2014, 24:1995-2002.
- [5] 林钢,林慧国,赵玉涛. 铝合金应用手册 [M]. 北京:机械工业出版社,2006:278-283.
- [6] 余克壮,彭勃,范民,等. LF6 铝合金散热器振动钎焊润湿界面微观组织特征 [J]. 机械制造文摘:焊接分册,2011(3):28-31,43.
- [7] 张国伟,包晔峰,蒋永,等. Al-Si-Cu 基钎料钎焊 6063 铝合金