

Al-Ti 异种合金真空钎焊的研究

Study on Vacuum Brazing of Dissimilar Alloys of Al-Ti

赵鹏飞, 康慧 (北京航空航天大学, 北京 100083)

ZHAO Peng-fei, KANG Hui

(Beijing University of Aeronautic and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 在结合界面上生成层状的脆而硬的金属间化合物 (TiAl_3 , TiAl 和 Ti_3Al) 是 Al-Ti 异种合金焊接所存在的主要问题。本工作基于国内外研究成果和相关资料, 利用正交设计原理, 以 Al-11.5Si 近共晶合金为基, 通过添加元素 Sn 和 Ga 形成 9 种钎料, 并利用各新钎料对 Al 合金和 Ti 合金进行了真空钎焊。通过进行剪切强度试验和铺展性试验, 对该 9 种钎料进行评定。试验结果表明: 含 10%Sn、0.20%Ga 的 Al-11.5Si 铝基钎料铺展性和抗剪强度等方面都具有较好的性能, 使 Al-Ti 异种合金构件达到较好的机械性能。

关键词: 铝合金; 钛合金; 异种合金; 真空钎焊; 正交试验; 钎料

中图分类号: TB331; O346.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2001) 04-0025-04

Abstract: The existence of brittle, stratiform and hard intermetallic compound (TiAl_3 , TiAl and Ti_3Al) in the conjunction interface is the primary problem for the welding of dissimilar alloys of Al and Ti. Based on newest development and documents published in relevant fields, by using the principals of orthogonal experiment, based on the alloy of Al-11.5Si, 9 types of brazing filler metals were confected by adding alloying elements Sn and Ga to Al-11.5Si close-eutectic alloys. The overall properties of the brazing filler metals were judged by anti-shear test, wettability experiments. We tried to make a new proper brazing filler metal to braze the dissimilar alloys of Al and Ti alloys from it. The testing results showed that the brazing filler metal of Al-11.5Si close-eutectic alloys containing 10%Sn, 0.20%Ga has better property on extendibility and anti-shear intensity, and the component of dissimilar alloys of aluminum and titanium has better mechanical property than others when the brazing filler metal used to braze.

Key words: aluminum alloys; titanium alloys; dissimilar alloys; vacuum brazing; orthogonal experiment; brazing filler metal

铝合金和钛合金由于其比强度高, 耐腐蚀和耐高温等优良性能而成为航空、航天领域的主要结构材料。由于某些特殊性能的需求, 将铝合金和钛合金连接以形成复合结构是必要的, 而且还可降低重量, 节约钛材, 例如飞机的机翼就是由钛合金的蒙皮和铝合金的蜂窝夹层连接而成的复合结构。而要获得异种合金焊接接头的主要条件是: 它们有完全的互溶性; 能够形成间隙式连续系列的固溶体^[1]。但是由于铝合金和钛合金在常温下的相互溶解度极低; 熔点相差极大; 线膨胀系数相差大等原因, 如果采用一般的连接方法, 则会因铝合金的大量熔化而在铝合金和钛合金的结合界面上形成大量层状的质硬而脆的金属间化合物 Ti_3Al (α), TiAl (γ) 和 TiAl_3 (τ)^[1], 它们的存在引起了应力集中, 从而当受到应力或冲击时在结合界面发生脆断。况且由于铝合金和钛合金在高温下极易受到大气的污染, 用一般方法对它们进行连接,

焊后焊件的机械性能将恶化, 严重影响了铝合金和钛合金在航空、航天领域的复合使用。

由于 Ti 的化学活性极强, 能与除银以外的任何金属形成质硬而脆的金属间化合物, 使接头严重脆化^[2], 使得配制钎料存在很大的困难。美国焊接协会^[3]认为: 对于铝合金和钛合金不能直接进行连接, 而应先在钛合金上热浸镀铝, 然后用一般的铝合金钎料将它们连接在一起。但这也存在一个问题, 就是镀层的厚度会严重影响焊件连接的质量。国内研制的钎料 Al-11.5Si-1~2Mg 等钎焊的铝、钛异种合金取得了较好的效果。除此以外, 国内外对此进行的公开报道较少。

目前研究 Al-Ti 异种合金焊接工艺较先进的国家有乌克兰的巴顿焊接研究所和美国国家航空航天局 (NASA), 前苏联和美国 Al 合金与 Ti 合金复合构件作为一种新型材料已在航空航天领域上得到广泛

应用。国内至今还没有成熟的 Al-Ti 异种合金焊接工艺。因此, 寻求 Al 合金与 Ti 合金的连接方法, 具有重要的意义。

本工作在查阅国内外有关文献的基础上, 运用正交实验原理, 以 Al-11.5Si 近共晶合金为基, 通过添加合金元素 Sn、Ga 来形成 9 种钎料, 用此钎料对铝合金和钛合金进行真空钎焊, 并通过剪切实验、熔点测定及钎料在钛上的铺展性测定, 来评定所配制钎料的综合性能, 试图找到钎焊铝、钛异种合金的新钎料。

1 母材及其基本性能

实验所用铝合金的成分是 LF21, 钛合金的成分是 TC4, LF21 是铝-锰系不可热处理强化的铝合金, 在退火状态下塑性高, 可焊性很好, 密度 $2.73\text{g}/\text{cm}^3$; TC4 属于 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 密度约 $4.51\text{g}/\text{cm}^3$, 它含有 6% α 稳定元素铝和 4% β 稳定元素钒 (V)。该合金具有优异的综合性能, 在航空和航天工业中获得最广泛的应用。其各自的焊接性都很好, 但是, 由于铝和钛都是化学活泼性元素, 在一般的焊接过程中它们还会产生如下问题: (1) 氧化能力强, 在材料表面形成氧化皮, 严重影响焊接质量; (2) 易吸收气体, 造成接头污染, 性能下降; (3) 熔点差异极大, LF21 熔化温度范围为 $643\sim 6540^\circ\text{C}$, TC4 熔化温度范围为 $1540\sim 1650^\circ\text{C}$ 。所以, 只能采用真空钎焊, 不但消除了气体和水分的有害作用, 不需要钎剂, 而且会使焊件光滑, 具有良好的机械性能和抗腐蚀能力, 从而使焊件的质量提高^[4]。

2 试验过程及步骤

2.1 钎料的配制

利用正交设计方法^[5], 以 Al-11.5Si 近共晶合金为基, 通过添加 Sn、Ga 两种合金元素, 形成 9 种钎料。所谓“正交设计”, 主要是利用一套现成的规格化的表-正交表, 来科学地挑选试验条件合理安排试验。其主要优点是: 能在众多的试验条件中选出代表性强的少数试验条件, 并能通过较少次数的试验条件, 推断出最好的试验条件和生产工艺; 同时还可以作进一步的分析, 提供出比试验结果本身多得多的对各因子的分析。在此正交表中, 确定 Sn、Ga 因子及其三个不同水平如下:

A	Sn 含量/ wt%	0	5	10
B	Ga 含量/ wt%	0	0.20	0.40

其中所考察的因子 Sn、Ga 以 A、B 表示, 其中数字 0、5、10 为 Sn 因子的不同水平, 分别以 A_1 、 A_2 、

A_3 表示; 0、0.20、0.40 为 Ga 因子的不同水平, 分别以 B_1 、 B_2 、 B_3 表示。按照正交设计原则, 该试验可选择按 $L_9(3^4)$ 的正交表进行设计。用该方案所设计的各钎料的名义成分如表 1 所示。

表 1 配制钎料名义成分
Table 1 The nominal component of confected brazing filler metal

试 验 号	A 1	B 2	C	D
1	1	1		
2	1	2		
3	1	3		
4	2	1		
5	2	2		
6	2	3		
7	3	1		
8	3	2		
9	3	3		

表 1 中各列的数字“1”、“2”、“3”分别表示该列所填因子的相应水平, 而每一行就是一个试验方案。例如, 第二行就是第二号试验, 其试验条件是 A_1B_2 , 即因子 A (Sn) 取 1 水平 A_1 , 即加入的 Sn 为 0, 因子 B (Ga) 取 2 水平 B_2 , 即加入的 Ga 为 0.20%, 依次类推, 每一种试验条件对应相应的钎料, 1 到 9 号试验号分别对应的钎料标号从 A_1B_1 、 A_1B_2 A_3B_3 。

熔炼钎料时, 首先将高熔点的 Al-11.5Si 近共晶合金置于石墨坩埚中, 在坩埚电炉中以 700°C 进行熔炼, 待其完全熔化后, 依次加入 Sn 和 Ga (加入时, 均包在 Al 箔中), 加入的量以正交设计表 (表 1) 中所示为准。同时迅速加入 J201 覆盖剂以防熔化金属及低熔点合金元素的氧化。

2.2 母材的清洗

将铝合金与钛合金板先用丙酮擦洗表面油污, 然后对于铝合金先使用 $40\sim 60^\circ\text{C}$ 、浓度 8%~10% 的氢氧化钠溶液浸蚀, 保持 5min 左右取出, 用冷水冲洗 2min, 再置于 30% 的稀硝酸溶液中进行光化处理, 以中和余碱, 避免碱液继续腐蚀铝, 再用流动水冲洗干净, 用风扇吹干。对于钛合金用含硝酸 40%、氢氟酸 3%~5% 和水 (余量) 的混合酸液中浸蚀 15~20min 后, 用清水冲洗干净, 吹干, 然后立即进行钎焊。

2.3 接头强度试验

剪切强度实验所用铝合金厚度为 2mm, 钛合金厚度为 1mm, 其它尺寸规格按 GB11363—89^[6] 执行。在实验之前往真空炉的加热炉中撒一定的镁屑。

2.4 钎料铺展性试验

方法按 GB11364—89^[6] 执行。

2.5 真空钎焊热循环曲线

热循环曲线(见图1)包括钎焊前抽真空及钎焊过程中的加热、保温、降温等几个阶段,在开始加热前及达到钎焊温度时,真空度必须不低于 10^{-5} 托,且在此过程中抽真空一直进行。

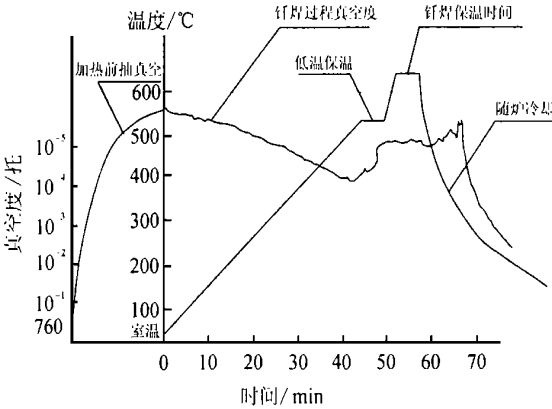


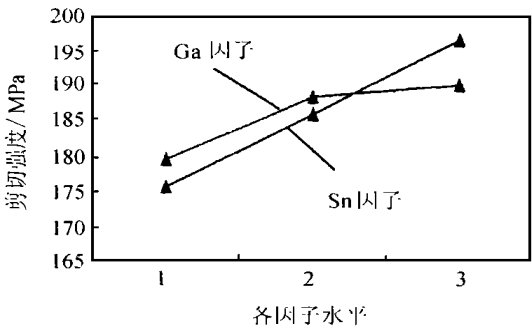
图1 真空钎焊热循环曲线

Fig.1 Heating-cycle curve of vacuum brazing

3 试验结果与分析

3.1 剪切强度

剪切强度实验结果见表2,表2中的数据表示可



得到图2的变化曲线,图2为加入Sn, Ga 对剪切强度的影响。由表2可以看出,单纯地填加Sn或Ga,都会使焊件的剪切强度提高,但提高幅度不大,只有将其二者混合加入,才可以较显著地提高剪切强度。但是,当二者都加入时,随各自添加量的增加,复合构件剪切强度提高,当 $Snwt\%$ 含量达10%时,此时钎料

表2 剪切强度试验结果

Table 2 The test results of anti-shear intensity

试 水 列 验 平 号 号	A 1	B 2	C	D	接头剪切 强度 / MPa
1	1	1			57.1
2	1	2			58.9
3	1	3			59.7
4	2	1			59.6
5	2	2			62.3
6	3	1			64.3
7	3	1			63
8	3	2			67.5
9	3	3			66.2
j	175.7	179.7			T = 558.6
j	186.2	188.7			
j	196.7	190.2			
R _j	21	10.5			

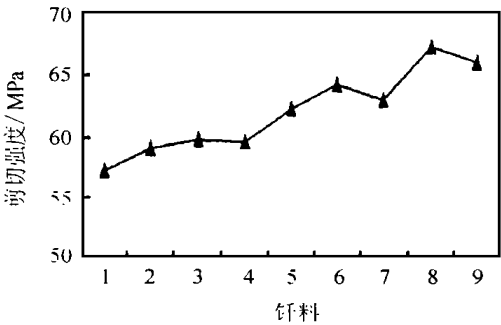


图2 Sn, Ga 对剪切强度的影响

(a) 试验因子与剪切强度的关系; (b) 钎料与剪切强度的关系

Fig.2 Effect of Sn, Ga on anti-shear intensity

(a) testing factor as the function of anti-shear intensity;
(b) Every brazing filler metal as the function of anti-shear intensity

中添加Ga,其剪切强度先提高,后稍有下降。

微量Ga的加入,使得金属间化合物周围的电子云密度提高,使共价键成分减少,使晶界电荷均匀化,提高了位错的可动性,从而减少了脆性,提高延性。但是随着Ga含量的增加,其效果没有发生较大的变化。同时,由于Al是非金属性极强的元素,它和钛形成的

化合物具有陶瓷一样的性能^[7],当铝合金中加入Ga和Sn时,Sn和Ga的金属性都比Al强,在钎焊铝—钛异种合金时,Sn, Ga占据了 Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_3$ 中的Al原子位置^[8],这样,就使形成的化合物具有一定的金属性。从而减少了这三种脆性相的数量,提高了强度。

3.2 铺展性数据

钎料在钛合金板上的铺展性用它们之间的相对铺展面积来确定，其铺展面积采用硫酸纸称重法测量，其实验数据如表 3 所示，各钎料铺展性趋势如图 3 所示。

表 3 钎料在钛上的铺展面积
Table 3 The extend area of every brazing filler metal on Ti

钎料	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₁ B ₃	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	A ₂ B ₃	A ₃ B ₁	A ₃ B ₂	A ₃ B ₃
铺展轮廓硫酸 纸质量/mg	1.6	1.55	1.3	1.1	1.4	1.65	1.6	2.2	1.95
铺展面积/cm ²	0.45	0.44	0.37	0.31	0.40	0.47	0.45	0.62	0.55

可以看出：(1) 钎料中不加入 Sn 时，随着 Ga 加入量的增加，钎料在钛母材上的铺展性略有下降；(2) 同时加入 Sn 和 Ga 时，随着 Sn 含量和 Ga 含量的增加，钎料的铺展性随之增加；(3) 当 Sn 的含量达到 10% 时，随着 Ga 含量的增加，其铺展性先稍有下降，后增大，然后又会上下降。；(4) 当钎料含有 Sn 时，铺展性试验结果与剪切强度试验结果在趋势上有相似性。

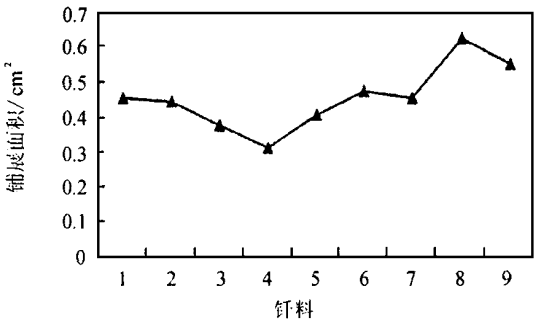


图 3 各钎料的铺展性

Fig. 3 The extendibility of every brazing filler metal

上图为各钎料在母材钛上的相对铺展面积数据。可以看出：在铺展性方面，Sn 元素与 Ga 元素之间存在相互作用，使得它们在 Ti 上的铺展性在含 Sn 为 10%，Ga 为 0.20% 时为最大。

4 结论

(1) 钎焊 Al-Ti 异种合金时，以 Al-11.5Si 近共晶合金为基，加入 Sn，Ga 元素形成的新钎料会对 Al-Ti 异种合金构件的性能产生积极的影响。

(2) 对于铺展性来说，当加入的元素只有 Ga 时，其铺展性稍有下降；但当随着 Sn 元素的加入，铺展性会增大，当钎料含 Sn% 为 10%，Ga% 为 0.20% 时铺

展性最好。

(3) 对于 Al-Ti 异种合金钎焊构件的剪切强度来说，只含微量 Ga 的钎料对剪切强度的影响不大，当钎料中同时加入 Sn 时，会使剪切强度得到较大程度的提高，含 Sn% 含量继续增加，其剪切强度的提高不大，且用含 Sn% 为 10%，Ga% 为 0.20% 的钎料钎焊的 Al-Ti 复合构件剪切强度达到峰值。

(4) 只有同时含有 Sn，Ga 的钎料才可以对 Al-Ti 异种合金钎焊时的铺展性和剪切强度有较大的用处，且当钎料含 Sn% 为 10%，Ga% 为 0.20% 时为最好。

参考文献

[1] 何康生，曹雄夫 编著．异种金属焊接 [M]．北京：机械工业出版社．
[2] TITANIUM science and technology VOLU ME2 P868．
[3] 美国金属学会．焊接与钎焊．金属手册．
[4] 邹儒主编．钎焊 [M]．北京：机械工业出版社．
[5] 韩於羹编著．应用数理统计 [M]．北京航空航天大学出版社．
[6] 中华人民共和国国家标准 1990-01-01 实施．
[7] 章桥新．弄金属间化合物脆性及其克服途径 [J]．稀有金属材料与工程．1990，6：27．
[8] Acta MATERILIA Y H HAO etc．1999：4 (47) ．

收稿日期：2000-07-31； 修订日期：2001-02-16
作者简介：赵鹏飞 (1974-)，男，北京航空航天大学硕士研究生，主要从事钎焊方面的研究，联系地址：北京航空航天大学 1-64 信箱 (100083)。

本文编辑：李海霞

* * * * *

日制成世界强度最高的镁合金

日本东北大学金属材料研究所，开发出了具有高强度、高延展性、耐热、质轻的镁合金。这种镁合金的强度至少是以往镁合金的 2.5 倍，是目前世界上强度最高的镁合金。这种镁合金是在急速冷却条件下将镁、锌和钇的金属粉末按一定比例混合，用高压挤压而成，其中镁、锌、钇的原子数比例为 97 1 2。这一构成使新的镁合金既具有高强度又富有延展性，在横截面积为 1m² 的新型镁合金丝上挂 60kg 的重物也不会变形；其耐热强度是目前镁合金的 2 倍以上；同时也特别易于加工。另外，经过精炼加工后，还可把镁从该合金中再单独分离出来，非常利于循环利用。以往的镁合金，若想有高强度就缺少延展性，若求其延展性强度就会相应降低，新开发的镁合金圆满解决了这一问题。预计这种镁合金除广泛用于家电产品外，还将在机器人、人造卫星等要求材料既轻又结实的领域发挥巨大威力。

(解)