

铜铝异质金属炉中钎焊试验研究

Experimental Study About Dissimilar Metals Between Copper and Aluminum in Furnace Brazing

合肥工业大学材料科学与工程学院 闫飞 侯玲 徐道荣 陈明浩 吴圣川

[摘要] 选用不同厚度的 BA1SiMg 钎料进行 Cu/LF21 炉中钎焊试验。结果表明,钎料层过薄,共晶反应中产生的液相较少,不能填满整个钎缝,反之,钎缝中生成较多的脆性相 CuAl_2 和 AlCu ,导致焊缝在冷却过程中出现微裂纹,二者都会导致钎缝强度和接头强度降低。因此,要得到理想的接头,必须保证钎缝中的脆性相呈不连续分布或弥散状态存在。

关键词: Cu/LF21 炉中钎焊 脆性相

[ABSTRACT] The furnace brazing of Cu/LF21 by using different solder thickness of BA1SiMg is studied. The results show that the solder layer is so thin that the liquid phase produced by eutectic reaction cannot fill the entire weld completely while the more brittle phase CuAl_2 and AlCu produced in the brazing seam zone can lead to coming along the micro-cracks in the cooling process of the weld so that both of them can lead to reducing joint strength of solder joints. Therefore, to obtain the ideal joint, the brittle phases in weld must be a non-continuous distribution or the dispersion state of existence.

Keywords: Cu/LF21 Furnace brazing Micro-crack

由于铝合金具有密度低、强度高、耐腐蚀、热导和电导率高以及加工性能好等优良品质而发展迅速,已广泛应用于国民经济各领域及国防建设中,用量仅次于钢铁材料,成为第二大金属材料。铜及其合金具有优良的导电、导热性能以及耐腐蚀和良好的加工成形性,因此也获得了广泛的应用^[1-2]。铝的密度是铜的 1/3,因此将铜、铝及其合金连接形成复合结构,不但能减轻构件的重量、节约材料,而且能发挥各自的性能优势^[3]。铝铜异种有色金属接头广泛应用于电力、化工、制冷和航空航天工业中,具有广泛的实际应用价值,而焊接是实现铜、铝及其铝合金连接并满足铝铜接头力学性能和使用性能的可靠方法。

铜铝的焊接方法有闪光对焊、摩擦焊、冷压焊、电容储能焊、真空扩散焊、钎焊等。

铜铝焊接时的主要问题是由于铜铝金属之间的化学势存在的很大差异导致的接头腐蚀。此外,焊缝中还会有脆性化合物的生成,导致焊接接头强度的降低。

铝铜钎焊主要存在 2 个问题:一是需使用腐蚀性强的钎剂去除铝表面的氧化膜,但钎剂残渣吸潮后形成电解液,构成强烈的腐蚀剂腐蚀接头;二是铝铜原子扩散较快,容易在接头区形成易熔的脆性共晶相,导致接头强度降低^[4-5]。本课题以钎料的中间层厚度为变化参数,探讨 BA188SiMg 钎料层厚度对钎缝组织形貌以及性能的影响。

1 试验材料及工艺条件

试验母材铝选用防锈铝 LF21,铜采用工业纯铜,将其加工成标准的钎焊试样,钎料选用铝硅镁(BA188SiMg),制成厚度为 0.08mm、0.05mm、0.02mm 的片状。母材的力学性能见表 1。钎料的化学成分及参数见表 2。焊前对所有材料进行物理化学处理以除去其表面的氧化皮和污染物。试样选用搭接形式,搭接长度为 10mm 左右,装配好后用夹具夹紧,防止试样在高温下发生错动。钎焊试样在真空炉加热,钎焊温度为 560℃,保温时间为 10min,试样随炉冷却到 300℃以下取出。

2 试样结果分析与讨论

2.1 接头的金相分析

图 1 中的 (a) 和 (b) 分别为钎料层取 0.08mm 和

表1 母材的力学性能

名称	牌号	熔化温度 /℃	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	耐蚀性	焊接性
工业纯铜	C11000	1 083	209 ~ 344	33 ~ 90	14 ~ 60	优良	良好
防锈铝	LF21	643 ~ 654	98 ~ 147	40 ~ 77	30 ~ 36	优良	好

表2 钎料的化学成分及参数

钎料牌号	化学成分 /%			固相线 /℃	液相线 /℃	钎焊温度 /℃
	Si	Mg	Al			
BA188SiMg	9.0 ~ 10.5	1.0 ~ 2.0	余量	559	591	588 ~ 604

0.05mm 的接头区金相照片。当钎料层太薄时,钎缝界面上仅有少量区域连在一起,大部分区域存在未填满现象,有的地方甚至出现较大的孔洞。出现这种现象的原因可能是 BA188SiMg 钎料层太薄,再加上保温时间过长,BA188SiMg 钎料向基体中扩散的损失量较大,这样导致与母材接触后生成的液相较少,不能很好地润湿和填满整个焊缝。钎料层较厚时,钎缝的宽度较大,并且大部分能够很好地连接在一起,缺陷较少,这主要是因为钎料层较厚,与母材接触反应后生成的液相较多,凝固后滞留在界面上形成较厚的钎缝组织层。但钎料层也不能过厚,否则在高温区停留时间母材会出现严重的溶蚀现象。

2.2 接头区的能谱分析

为了进一步了解焊缝中的各种元素的分布以及相对含量,试验中对 BA188SiMg 钎料钎焊的 Cu/LF21 接头试样进行了线扫描和能谱检测,如图 2 所示。线扫描方向由母材垂直经过钎缝。从表 3 中可以看到靠近母材 LF21 一侧的扩散区域含有大量 Al 元素和少量的 Cu 元素,Al 元素的富集会形成富 Al 区,主要以 α -Al 固溶体的形式存在,大量的固溶体存在可以有效地增强接头的强度,而少量的 Cu 元素是由部分母材溶于钎料后通过扩散作用形成的。焊缝中心区含有较多的 Al 元素和 Cu 元素,且原子个数比近似为 1:1,这样就可能会形成脆性相 AlCu,这种脆性相的存在会导致接

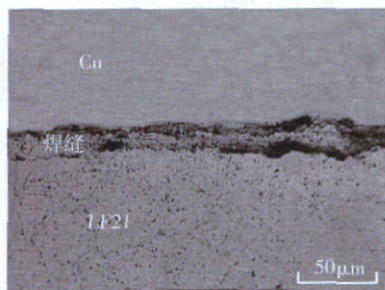
表3 Cu/LF21接头元素分布

LF21 扩散区			焊缝中心			Cu 扩散区		
元素	质量分数 /%	原子数分数 /%	元素	质量分数 /%	原子数分数 /%	元素	质量分数 /%	原子数分数 /%
C	0.73	1.64	O	24.74	47.90	C	0.44	1.28
Mg	0.72	0.80	Al	23.34	26.79	O	7.54	16.35
Al	96.38	96.34	Cu	51.92	25.31	Mg	1.15	1.64
Cu	2.16	0.93				Al	42.09	54.10
						Cu	48.78	26.62

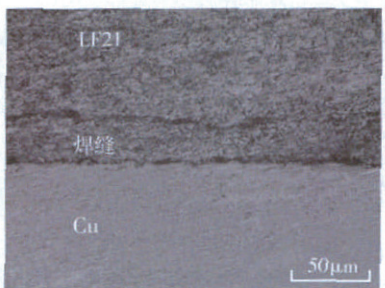
头的性能变差。靠近母材 Cu 一侧含有少量的 Mg 元素,它与钎料中的 Si 会形成 Mg_2Si 相,在固溶处理时溶入 α -Al 中,它在以后的析出和长大都很缓慢,在 α -Al 固溶体中形成大量弥散分布的 G.P 区(元素偏聚区)和过剩相 β' 使接头得到强化。而 Al 元素和 Cu 元素原子个数比近似为 2:1,这样就可能会生成强化相 Al_2Cu ,可以适当地提高基体的强度。但过多 Al_2Cu 相存在会导致接头的强度大幅度降低,缩短接头的使用寿命。此外钎缝中还含有少量的 C 元素和 O 元素,这可能是接头区受到氧化或是在使用腐蚀剂浸蚀接头金相时引进的。

2.3 接头区的 XRD 分析

利用 X 射线对 LF21/Cu 钎焊接头的焊缝进行相组成判定,结果如图 3 所示。从衍射图谱中可以看出,钎缝组织中除了含有 α -Al 固溶体、 $CuAl_2$ 、 $CuAl$



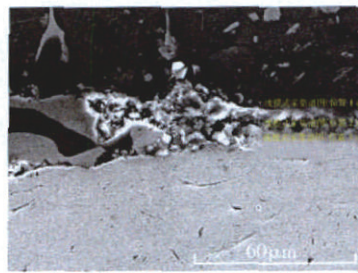
(a) $\delta = 0.08mm$



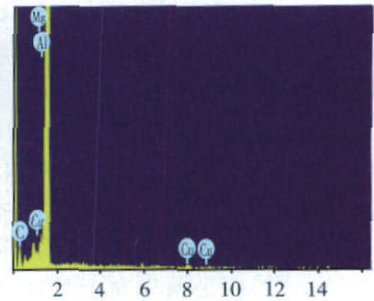
(b) $\delta = 0.05mm$

图1 不同钎料层厚度钎焊接头的金相照片

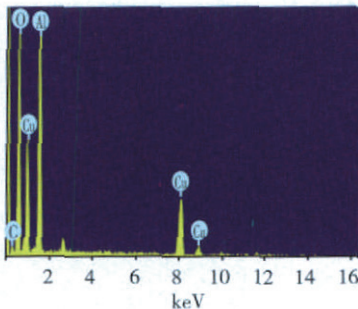
Fig.1 Metallographic photos of brazing joint with different thickness filler



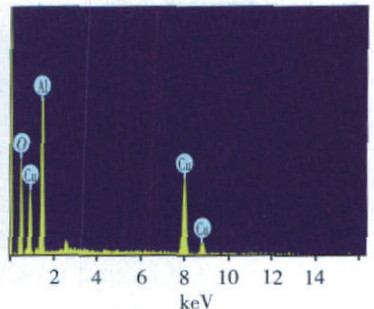
(a) 电子图像



(b) 位置 1



(c) 位置 2



(d) 位置 3

图2 Cu/LF21钎焊接头扫描图和元素分布图

Fig.2 Scanning photos of brazing joint on Cu/LF21 element distribution

和 Al_4Cu_9 还有 Mg_2Si 和 Cu 相,其中 $\alpha\text{-Al}$ 固溶体和 CuAl_2 相比较多, Al_4Cu_9 相和 CuAl 相相对较少,且靠近母材 LF21 一侧主要是 $\alpha\text{-Al}$ 固溶体,而靠近母材 Cu 一侧主要以 CuAl_2 化合物,钎缝中心区的物相主要是 CuAl 化合物的形式存在,因而在焊缝就可能产生以化合物 CuAl_2 为基的固溶体 θ 相和以 CuAl 为基的固溶体 η_2 。钎缝中心处形成的 CuAl 相和靠近母材 Cu 一侧的 CuAl_2 相都是从 Cu 基体扩散过来的 Cu 原子与钎料中的 Al 原子结合而成的化合物。铜铝原子在界面上相互扩散,通过晶间渗透使铜铝待连接表面出的原子间间距减小,通过二者之间相互吸引的范德华力和 2 种金属间的晶间渗透作用来实现冶金结合,进而用界面处的化合物来实现原子键之间的连接的目的。

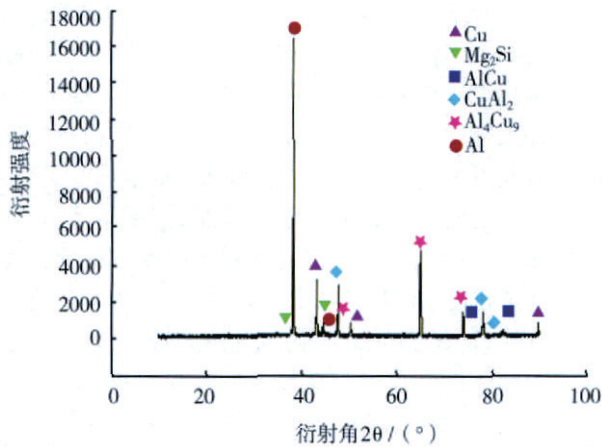
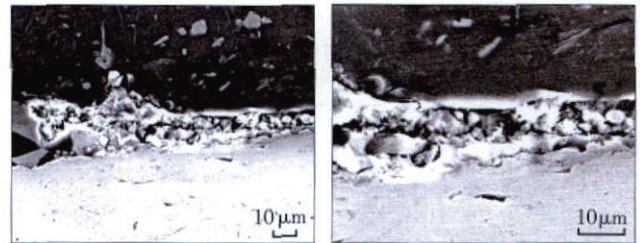


图3 LF21/Cu钎焊接头区X衍射
Fig. 3 XRD result of brazing zone on LF21/Cu

2.4 接头区的微观形貌分析

图 4 为 LF21/Cu 钎焊接头的 SEM 形貌照片。图中从上到下依次为 LF21 母材、钎缝和 Cu 母材。从图 4(a) 中可以看出钎料与母材结合良好,钎缝主要有白色团块状的 Cu-Al 化合物,和弥散在晶间颗粒状的共晶组织 ($\alpha\text{-Al}+\text{CuAl}_2$),还有少量未溶入 $\alpha\text{-Al}$ 固溶体的浅灰色的 Mg_2Si 。钎缝中较多的团块状颗粒存在会导致钎缝的致密性较差,甚至出现微孔。从图 4(b) 中可以看到在靠近母材 Cu 一侧出现了细长的微裂纹,且界面处凹凸不平,这说明钎料与母材 Cu 在界面处发生了剧烈的冶金化学反应。微裂纹的产生主要是因为钎料与母材冶金发生化合作用后,在由液相向固相转变过程中生成了较多的脆性相,而它与母材的热膨胀系数相差较大,在冷却过程中残余应力的存在就会导致界面处出现微裂纹现象。从图 4(a) 中还可以看出钎缝中部分晶粒沿母材 LF21 的晶界生长,由于在同一环境中,电位愈负的金属愈易成为电偶的阴极而被腐蚀,电

位愈正的金属愈易成为电偶的阳极而不被腐蚀,因此冷却时焊缝中大量脆性相 CuAl_2 ,而 CuAl_2 的电位要比铝高,这样就很容易产生晶间腐蚀。



(a)放大倍数 x (b)放大倍数 2x

图4 钎焊接头不同倍数的SEM形貌照片
Fig.4 SEM morphology with different multiples of brazing joint

3 结论

(1) 用 BA188SiMg 钎料作为中间层对 LF21/Cu 进行炉中钎焊,当工艺条件一定时,钎料层的厚度对钎缝的组织形貌和性能有非常重要的影响。钎料层太薄,共晶反应生成的液相过少,不能填满整个焊缝,接头区会有空洞出现。钎料层太厚,共晶反应生成的液相过多,焊缝区会出现脆性相(主要是 Cu-Al 金属间化合物)。二者都会削弱的接头的强度。

(2) 钎料与母材发生界面反应后,焊缝区生成的物相主要有 $\alpha\text{-Al}$ 固溶体、 CuAl_2 、 CuAl 相等,其中 $\alpha\text{-Al}$ 固溶体和 CuAl_2 相比较多,大量的 CuAl_2 脆性相的存在不仅导致接头区出现细长的微裂纹,还会导致接头在使用过程中产生晶间腐蚀,严重影响接头的使用寿命。

(3) 钎缝区大量的 CuAl_2 相存在会严重降低接头的强度,因此,要得到理想的接头,必须保证钎缝中的脆性相呈不连续分布或弥散状态存在。

参考文献

- [1] Mai T A, Spowage A C. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 374(1-2):224-233.
- [2] Lacaze J, Tierce S, Lafont M C, et al. Study of the microstructure resulting from brazed aluminium materials used in heat exchangers. *Materials Science and Engineering A*, 2005(413-414):317-321.
- [3] 何康生,曹雄夫. 异种金属焊接. 北京:机械工业出版社, 1986.
- [4] 陈学定,宋强,俞伟元,等. 铝基钎料真空钎焊接头的腐蚀性. *焊接学报*, 2003, 24(1):40-43.
- [5] 杨瑞鹏,蔡殉王,李培祖,等. 铝铜直接钎焊的研究. *焊接技术*, 1999, 28(5):4-5.

(责编 老石)