

可热处理强化铝合金中温真空钎焊技术

Medium-Temperature Vacuum Brazing of Heat-Treatable Strengthening Aluminum Alloy

北京航空材料研究院 程耀永



程耀永

高级工程师,毕业于北京航空航天大学,分配至北京航空材料研究院工作一直从事航空材料和复杂构件的钎焊和扩散焊技术研究,获部级科技进步奖5项,发表论文约30篇。

铝合金具有重量轻、耐腐蚀性好,导热、导电性能良好等特性,在航空、航天、电子、汽车等军用和民用工业领域的应用越来越广泛。其中空调用的冷凝器、蒸发器,高效铝合金雷达缝阵天线、机载高效铝合金电子机箱、铝合金燃料泵叶轮等结构均需要采用钎焊技术制造,钎焊已成为铝合金加工制造的重要工艺手段。但是,由于受到现有技术水平的限制,

由于航空航天产品轻量化的需求,对高强度铝合金钎焊的技术需求越来越迫切,但是目前的钎焊技术已经不能满足对结构强度、刚度的技术要求,因此研究开发高强度铝合金钎焊所需的低熔点钎料及钎焊工艺成为亟待解决的问题之一。

铝合金的钎焊结构还局限于纯铝及3A21、6063等个别牌号上,大量的强度级别较高的铝合金仍无法进行钎焊。另一方面,由于航空航天产品轻量化的需求,对高强度铝合金钎焊的技术需求越来越迫切,但是目前的钎焊技术已经不能满足对结构强度、刚度的技术要求,因此研究开发高强度铝合金钎焊所需的低熔点钎料及钎焊工艺成为亟待解决的问题之一。

现有的Al-Si-Cu钎料(如BA167CuSi钎料)因铜含量很高使接头的抗腐蚀性变差,降低Cu含量,提高接头工艺性成为铝合金中温钎料研究的方向之一。如D.M. Jacobson等研究一种Al-Si-Cu-Ni钎料^[1],液相线温度538℃,用于可热处理强化铝合金的钎焊,接头具有较好的抗腐蚀性。但用于铝合金真空钎焊的中温钎料均存在抗腐蚀性差、加工性能差、工艺性不好等缺点,因此尚无一

种钎料得到广泛应用。本文中,作者将近期对可热处理强化铝合金真空钎焊的研究结果进行了综合分析。

Al-Cu-Si-Mn 钎料研究

1 钎料的成分设计

考虑到2A50、6061可热处理强化铝合金过烧温度和固溶处理温度,钎焊温度应当选择在材料过烧温度以下进行,同时,钎料在固溶处理时不应产生明显熔化。综合考虑2方面因素,钎料的熔化温度范围应在520℃~550℃范围内。

Al-Si-Cu三元合金系中,其共晶成分已形成标准钎料,但该钎料存在Cu含量过高、接头脆性大和抗腐蚀能力差的缺点。Cu元素在铝合金中与铝形成脆性的金属间化合物相,同时铜的加入使铝合金的抗腐蚀性能大大降低,因此,在保证足够低的熔化温度的前提下,应尽可能降低钎

料中 Cu 的含量。在 Al-Si-Cu 三元相图中,存在一点,该点含铜量 18% 左右,含 Si 约 7.5%,既可以降低 Cu 的含量,又可以将液相线温度控制在 825K 以下。因此选择该点对应的成分作为设计钎料的基本合金体系。

Mn 是铝合金中的重要元素,在变形铝合金中得到广泛应用。铝合金中加入 Mn 可以提高强度,另外,液态快速冷却时, Mn 可以溶解在 Al 中形成过饱和固溶体,并抑制三元化合物的形成,同时 Mn 可以减缓 Cu 的扩散速度。在工业铝合金中,由于 Mn 是杂质铁的中和剂,因此 Mn 的加入可显著提高合金的抗蚀性,并对于 Al-Cu 合金具有一定的提高抗腐蚀能力的作用^[2]。因此尝试加入 Mn 用以改善钎料合金的抗腐蚀性和快速凝固箔带制备的工艺性。综合以上因素设计钎料成分为 Al-18Cu-7.5Si-1Mn。

采用惰性气体保护环境下急冷的工艺制备了钎料箔带,从箔带制备试验结果看,设计的 Al-Cu-Si-Mn 钎料比资料报道的 Al-Cu-Si-Ni 钎料具备更好的制带工艺性,在同样的工艺条件下制备的箔带质量前者明显优于后者。

2 接头的组织与性能

表1 Al-Cu-Si-Mn钎料钎焊2A50合金的接头性能

钎焊规范	强度平均值 /MPa
550℃ /10min+T6; 块状钎料, 搭接	80.9
560℃ /10min+T6; 块状钎料, 搭接	80.9
550℃ /20min+T6; 块状钎料, 对接	148.3
540℃ /10min+T6; 箔状钎料, 搭接	62.6
550℃ /20min+T6; 箔状钎料, 对接	99.8

注: 对接试样为抗拉强度, 搭接试样为抗剪切强度。

表2 钎料在NaCl溶液中的电极电位、腐蚀电流密度

试样	自腐蚀电位平均值 /mV	腐蚀电流密度平均值 / (A·cm ⁻²)
Al-Cu-Si-Mn 钎料	-662	4.39
BA167CuSi 钎料	-673	10.22
2A50 母材	-708	4.58

表 1 给出了 Al-Cu-Si-Mn 钎料钎焊 2A50 合金的接头性能数据,可以看出,采用块状钎料在 550℃、10min 工艺条件下,接头 T6 热处理后的平均剪切强度在 80MPa 左右,钎焊温度升高至 560℃,钎焊接头的剪切强度变化不大。接头强度数据分散性较大,可能与钎焊缺陷有关。

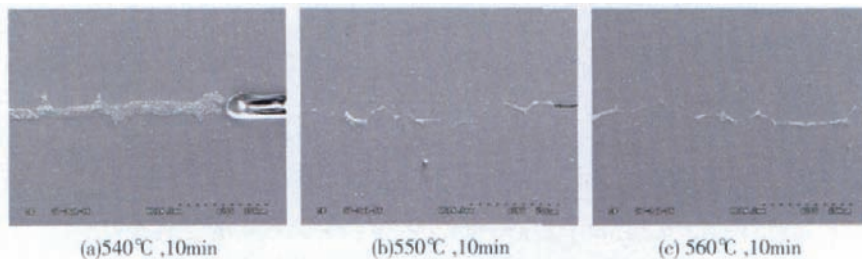


图1 Al-Cu-Si-Mn块状钎料钎焊2A50接头组织随温度变化情况

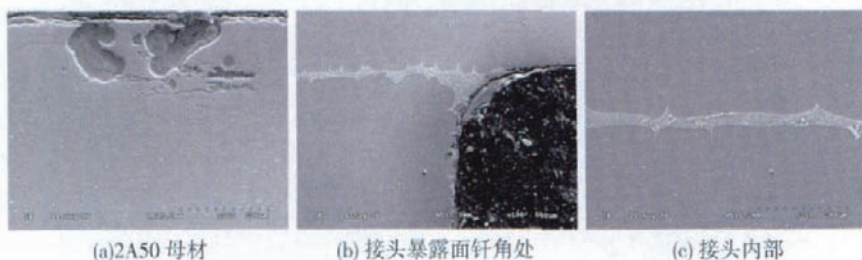


图2 经200h盐雾腐蚀后2A50母材表面及接头的典型组织

箔状钎料搭接接头剪切强度明显低于块状钎料,这可能与钎焊时采用两层箔状钎料引入较多的氧化膜有关。

图 1 为 Al-Cu-Si-Mn 块状钎料钎焊 2A50 合金的典型接头组织形貌。能谱分析结果表明,钎缝中主要有 5 种相, Al 固溶体相、Al₂Cu 相、Al-Cu-Si-Mg 四元相、含有 Mn 和 Fe 的多元化合物相及富硅相。随着钎焊温度升高,钎缝中化合物相条带宽度变窄,化合物相的量减少。

3 钎料及接头的抗腐蚀性能

表 2 为钎料及对比母材所得电极电位、腐蚀电流测试结

果,可见, Al-Cu-Si-Mn 钎料的自腐蚀电位高于 2A50 母材,及对比用的标准 BA167CuSi 钎料。从腐蚀电流密度数据看, Al-Cu-Si-Mn 钎料的腐蚀电流密度显著低于 BA167CuSi 钎料,与 2A50 母材相当。此试验表明, Al-Cu-Si-Mn 钎料具有较高的电极电位,组成接头后不易被作为阳

极被优先腐蚀。与传统 BA167CuSi 钎料相比,在 NaCl 溶液中具有较缓慢的腐蚀速度。因此,就钎料本身而言, Al-Cu-Si-Mn 钎料均较传统 BA167CuSi 钎料具有更好的抗腐蚀能力。

经盐雾腐蚀后,2A50 基体腐蚀坑附近典型组织形貌见图 2 (a)。可见 2A50 合金发生一定程度的腐蚀,出现裂纹状组织。图 2 (b) 为经盐雾腐蚀后 2A50 接头暴露面钎角处组织形貌。与基体相比,钎角处并没有发生明显选择性优先腐蚀,接头内部组织形貌与腐蚀前相比没有明显变化图 2 (c)。

经 200h 盐雾腐蚀,并经 200h 盐水浸泡后接头性能测试结果表明,接头剪切强度平均为 78.9MPa,与腐蚀前 80.9MPa 相比没有明显降低。其原因是由于钎料的电极电位略高于所钎焊 2A50 母材的电极电位,钎焊

组合成接头后,钎缝区域没有成为主要腐蚀对象,因此未发生优先腐蚀,加上钎料自身耐腐蚀性较好,因而接头性能没有明显降低。

复合钎料箔带研究

为解决铝合金中温钎焊技术,不少学者致力于铝合金中温钎焊的钎料研究。但是,当我们试图将这些技术用于实际结构的钎焊时,却发现因为不能够制备出工艺性良好的钎料形式(丝、薄带等)而使具体结构的钎焊仍然无法实施。快速凝固制备的非晶或准非晶态箔带仍存在厚度太薄、钎料难以精确裁剪以及没有合适的化学清洗工艺以保证钎料良好的表面状态等实际困难,最终还是难以用于实际结构的钎焊。为此制备出一种复合钎料薄带,钎料在具有较低的钎焊温度的同时保持了与普通 Al-Si 钎料一样的塑性和同样的化学清洗工艺性,可用于实际结构的钎焊制造。

1 复合钎料箔带的设计与制备

与 Al-Cu-Si-Mn 钎料的设计思路一致,复合钎料箔带仍然采用 Al-Cu-Si 钎料,在保证具有足够低的熔点的前提下尽可能降低 Cu 含量,为简化钎料制备工艺,选取了成分相对简单的 Al-Cu-Si 三元合金,设计钎料成分为 Al-18Cu-7.5Si。

前面研究结果表明,采用 Al-Si-Cu 系非晶态箔带钎料钎焊铝合金时存在钎料偏薄、钎料化学清洗时表面发黑等问题,难以寻求合适的化学清洗工艺,钎焊时由于钎料表面氧化膜的存在使接头性能不高,钎缝成形不好。而且钎料偏脆,难以精确裁剪定位。为此,提出复合钎料技术,即把 Al-Si-Cu 系钎料分解为 Al-Si 合金和 Cu,二者均有足够的塑性,可以变形加工,将二者叠层复合起来可以形成具有塑性的复合薄带。而用于 Al-Si 合金化学清洗的工艺已经成熟,为便于钎料的化学清洗,将钎

料设计为三明治结构,即两面均为 Al-Si 合金,中间夹芯为 Cu。

采用特殊工艺将 Al-Si 板和 Cu 箔复合到一起,保证 Al-Si 板和 Cu 箔形成无脆性层的良好结合,然后再经多道轧制制成厚度 0.1mm~0.20mm 的薄带。制备出的复合钎料薄带的钎料表面平整,无分层、起泡等缺陷,与普通 Al-Si 钎料外观完全相同。对钎料的多处断面结构进行了观察,结果表明,Al-Si 合金和 Cu 结合良好,形成了典型三明治结构,Cu 箔中间夹芯层均匀连续。

2 复合钎料箔带的工艺性

对复合钎料进行了差热分析(DTA)试验,试验时升温速度 10℃/min,采用 Ar 气保护。结果表明,研制的复合钎料具有与常规铝基钎料基本相同的熔化性质,钎料固相线温度 518℃,液相线温度 541℃。

采用 530℃~570℃ 间 5 个不同钎焊温度进行搭接试样钎焊试验,结果表明,研制的复合钎料具有极好的钎焊工艺性能,在 540℃~570℃ 温度区间内均能形成良好的接头,钎缝成形美观,钎角圆滑适中,不同温度钎焊的搭接试样局部形貌见图 3。钎焊温度至 570℃ 时,母材表面出现类似润湿环的灰色斑点,表明此钎焊温度下母材可能已出现过烧。

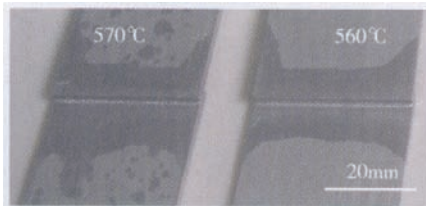


图3 不同温度钎焊的搭接试样局部形貌

3 复合钎料接头组织与性能

复合钎料 550℃ 钎焊 LD5 母材的组织与采用普通合金 Al-Cu-Si 合金钎料的接头类似。钎缝中形成了 Al 固溶体、Al₂Cu、Al-Cu-Si-Mg 四元相,含有 Al、Si、Mg、Mn、Fe 的五元化合物相,另外还分布着富 Si 相。适当升高钎焊温度,或延长保温时

间,或施加压力使钎缝变窄等措施均有利于消除 Al₂Cu 等化合物相,获得均匀的固溶体组织。

接头剪切性能测试结果显示,接头可达到较高的性能水平,平均剪切强度 172MPa。特别需要说明的是,每个试样的性能接近,数据分散度不大,这在铝合金中温钎焊中较为难得,数据分散度较低也从另一个侧面说明制备的钎料钎焊工艺性较好,可以保证较好的接头质量一致性。

4 实际构件的钎焊

采用研制的复合钎料对 2A50 铝合金叶轮实际结构进行钎焊,叶轮钎焊前后形貌见图 4。钎焊面为叶轮



漩涡状筋条与另一半壳体相配合的表面。先把钎料裁剪成与叶轮筋条形状一致且宽度稍宽的条状,定位于筋条钎焊面上,然后将 2 壳体对合,装入弹性夹具中在真空钎焊炉内钎焊。结果表明,叶轮钎焊达到了很好的效果,钎缝成形美观连续,完全达到了设计技术要求。

铝合金中温钎焊接头的缺陷

1 接头中的缺陷

铝合金中温真空钎焊试验中发现,无论是采用 Al-Cu-Si-Ni 钎料、Al-Cu-Si-Mn 钎料,还是采用 Al-Cu-Si 复合钎料,在拉断的试样断口

上均可发现明显的内部钎焊缺陷。从采用不同的钎料形式在 550℃ 钎焊 2A50 合金接头搭接试样断口形貌中可以看出,缺陷占钎焊总面积的 10%~40%。作者所作的 100 余个接头中,均存在不同程度的内部缺陷,外形美观完整的接头也不例外。由此看来,采用 Al-Cu-Si 系钎料在较低温度真空钎焊可热处理强化铝合金时,内部缺陷的存在具有普遍性。内部缺陷的存在掩盖了随着工艺参数的变化可能出现的性能变化规律,也是接头性能分散度较大的原因。相对而言,采用复合箔带钎料钎焊的接头缺陷的分布一致性更好,因此采用复合箔带钎料性能数据的分散度相对较小。

2 缺陷的成因分析

接头中缺陷的形态和分布具有一定的规律性,通过对断口的观察分析,提出了 2 种搭接接头块状钎料填缝过程模型。

第一种填缝过程描述如下:钎料熔化后首先沿搭接钎角流动,随后钎料填入钎焊间隙沿搭接面流动,钎料流动过程中将氧化膜排开,氧化膜在钎料流动前沿逐渐堆积,流动局部受阻,未受阻钎料继续向前流动,至另一端钎角处沿钎角横向流动形成钎角并汇集在一起,将流动受阻区域包括在钎缝内形成封闭区域,最终形成集中封闭缺陷。在第一种填缝过程中,钎料主要靠钎缝的毛细作用和宏观的流动实现填缝过程。

第二种填缝过程描述如下:钎料熔化后首先沿钎角流动并填满前沿钎角区域,随后钎料在晶粒状的氧化膜片的交界间隙处形成优先渗流的通道,钎料沿此通道润湿两面母材形成晶界状结合区;继续扩展至另一端钎角处汇集形成钎角,同时在钎料不断的渗流补充下加粗和形成新的分支,逐渐扩大结合面积并将未结合区分割成多处细小的分散区域,最后形成含有多处分散缺陷的接头。

第二种钎缝成形过程钎料基本未表现出宏观流动,钎料沿氧化膜片的边沿间隙或下面渗流,形成的缺陷为分散型缺陷。

铝合金中温真空钎焊时缺陷的形成最终还是与氧化膜能否去除或排出有关,块状钎料钎焊时有时也存在两种填缝过程同时进行的现象,形成混合型缺陷。

母材对铝合金中温真空钎焊工艺性的影响

1 不同母材表现出的钎焊工艺性

试验中发现,采用不同的母材时,Al-Cu-Si 系钎料钎焊工艺性表现出明显的差异。采用 3A21、6061 和 2A50 母材进行了对比试验。

试验表明,在所用的规范下(550℃/10min),钎料在 3A21 上的填缝长度仅为约 40mm,钎角大;在 2A50 母材上的填缝长度达到 100mm 以上,成形美观,钎角适中;而在 6061 母材上,虽然宏观填缝长度也基本上达到了 100mm,但钎料沿表面流失严重,钎缝圆角小而不致密,沿钎角有不致密或裂缝现象。

可见,在所选的钎焊温度下,钎料钎焊 3A21 母材时流动性及填缝性能均较弱,钎角大,形成良好的填缝需更高的温度;对于 6061 母材,钎料在母材表面润湿环区域过大,钎料沿表面流失严重,而钎料主体形成完整接头的性能较差,钎角小而不致密,在钎角处有裂缝情况出现;而对于 2A50 母材,钎料表现出较好的钎焊工艺性,形成的钎焊接头完整美观,钎料填缝能力强,钎角适中。由此可见,2A50 具有更好的钎焊工艺性。

2 不同母材的填缝机理分析

对钎焊后 6061、2A50 表面进行了俄歇电子能谱分析和 X 射线衍射分析。为提高表面的分辨精度,前 10min 采用了较慢的溅射剥离速率,约 1nm/min,10min 后提高溅射速率。

俄歇电子能谱的分析结果中表

明钎焊前铝合金表面以氧化铝为主,经钎焊热循环后,表面元素发生了变化,变为 Al 和 Mg 的复合氧化膜。2A50 表面为 Mg 高 Al 低的复合氧化膜,而 6061 表面为 Al、Mg 等比的复合氧化膜。

对钎焊热循环后 6061 和 2A50 母材表面氧化膜的 X 射线衍射分析结果表明,经钎焊热循环后 6061 和 2A50 母材表面氧化膜存在不同结构。6061 合金出现晶化峰,氧化膜为结晶态结构。而 2A50 合金没有表现出明显的氧化物晶体衍射峰。

以上分析表明,影响铝合金钎焊工艺性的氧化膜是在钎焊加热过程中形成的。2A50 合金上的富镁氧化膜具有松散结构,钎料流动时可以冲开氧化膜,形成致密钎缝。而 6061 合金上的 Al、Mg 等比氧化膜与母材结合较紧密,液态钎料不能冲开氧化膜,只能在氧化膜缝隙间或下面渗透,形成类似润湿环环状,而钎料主体难以形成宏观流动,因此 6061 填缝性能较差,表面流失严重。

结束语

铝合金中温钎焊技术不仅需要研究出熔化温度范围合适的钎料,由于铝合金表面氧化膜特性使得铝合金中温真空工艺性较差,钎料工艺性好坏也非常重要,钎缝内的缺陷也应成为关注重点之一。钎料制备问题关系到能否真正应用,从钎料研制开始就应考虑钎料的加工制备问题。此外,不同母材中温钎焊工艺性差别较大,合理的选材更容易获得良好的效果。以上应为今后大家研究关注的重点。

参考文献

- [1] Jacobson D M, Humpston G, Sangha S P S. A new low-melting-point aluminum braze. *Welding Journal*[J], 1996(8),243-250.
- [2] 蒙多尔福 L F. 铝合金的组织与性能. 北京:冶金工业出版社,1988.

(责编 依然)