

铝制散热器真空钎焊性能及微观组织研究

冯 涛¹ 楼松年¹ 杨尚磊¹ 李亚江²

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院 , 上海 200030 ;

2. 山东大学 材料科学与工程学院 , 山东 济南 250061)

摘 要 探索铝制散热器真空钎焊最佳工艺参数 , 然后对散热器进行水压试验 , 并对试件断口进行了分析。同时对钎焊接头进行了金相试验、扫描电镜实验以及点成分分析。试验结果说明 , 在选定的工艺参数之下 , 钎焊接头水压试验数值能达到 1.5 MPa , 钎焊断口呈混合断裂的形式。在钎缝中生成了网状的共晶组织 , 皮层中的 Si 熔融之后重新结晶 , 形成条状的 Si 相 , 在晶粒边界上析出 , 这些富 Si 相的存在成为了接头断裂的一个主要原因。

关键词 铝质冷却器 ; 断口 ; 共晶组织

中图分类号 : TG146.2 ; TG454 文献标识码 : A 文章编号 : 1001 - 4837(2004)12 - 0012 - 05

Mechanical Property and Microstructure of Aluminum Radiator Vacuum Brazing Joint

FENG Tao¹ , LOU Song - nian¹ , YANG Shang - lei¹ , LI Ya - jiang²

(1. School of Material Science and Engineering , Shanghai Jiaotong University , Shanghai 200030 , China ;

2. School of Material Science and Engineering , Shandong University , Jinan 250061 , China)

Abstract A new manufacture technique of aluminum radiator was studied by means of vacuum brazing technique. The radiator was detected by means of hydrostatic test and the fracture interface was analyzed. Metallurgical test , scan electron microscope and electronic probe microscopy analyzer were used to analysis the brazing joint. The experiment result indicated that the hydrostatic test pressure could reach 1.5 MPa under the final technique parameters and the failure interface was mixture fracture. There was net - shape eutectic microstructure formed in the brazing joint. Si in the cortex metal recrystallized and formed strip Si phase in the vacuum brazing process. These Si phase was segregated on the grain boundary. The existence of these rich - Si phases was an important reason of the joint failure.

Key words aluminum radiator ; fracture ; eutectic microstructure

铝合金具有较高的机械强度和抗腐蚀性能 , 在冷却器的制造行业中 , 铝制冷却器正在逐步取代原有的不锈钢和铜制冷却器^[1,2]。由于冷却器结构复杂 , 在焊接过程中要求所有的焊接接头一次成形 , 这就需要严格控制焊接工艺。这种冷却器广泛应用于汽车发动机的水冷以及中型空调的冷却 , 是保证正

常工作的关键部件之一 , 因此焊接质量尤其重要^[3,4]。

1 试验材料

实验中所用的材料为 LT - 3 铝合金 , 这种铝合金为三层包覆合金 , 芯层为 3003 铝合金 , 皮层为

4004 铝合金 ,皮层金属在焊接中起钎料的作用。皮层金属和芯层金属的化学成分见表 1 所示。图 1 所

示为铝制散热器真空钎焊真空钎焊工艺曲线。铝制板翅式冷却器的生产工艺流程为 : 板材、翅

表 1 皮层和芯层金属的化学成分 (%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
芯层 (3003)	0.6	0.7	0.05 ~ 0.2	1.0 ~ 1.5	—	0.1	余量
皮层 (4004)	9.0 ~ 10.5	0.8	0.25	0.1	1.0 ~ 2.0	0.2	余量

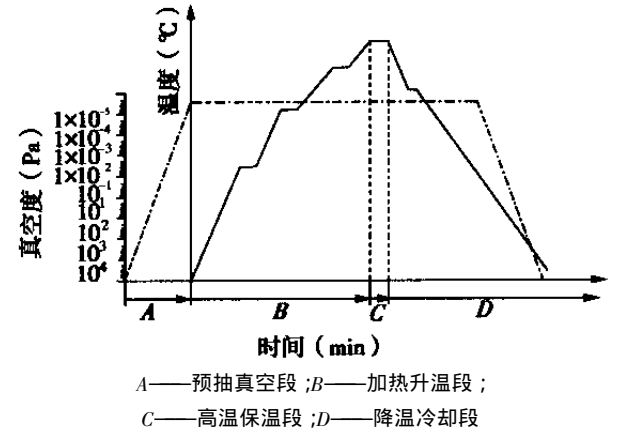


图 1 铝制散热器真空钎焊工艺曲线

片轧制成型→板材翅片表面清洗→组合装配→真空钎焊→质量检验。将焊接好的铝制冷却器做即水压试验 ,检验冷却器所能承受的最大压力。采用线切割机在铝制冷却器钎焊接头部位切取焊接试样 ,对钎焊接头区的显微组织进行分析。

铝制散热器的外形如图 2 所示 ,每一个散热器都是由 4 ~ 5 片散热片组成 ,在相临两个散热片之间是翅片 ,用来增大散热面积。

为了能更加清楚的说明铝制散热器的内部构造 ,图 3 所示为单—板材的示意图。每一片散热板都是由上下两个 LT - 3 板材焊接而成 ,中间形成空腔 ,里面也填充有翅片。

图 2 中所示的板材和翅片的接触位置① ,垫片

和板材的接触位置② ;引出接头和板材的接触位置③以及上下两个 LT - 3 板材的接触位置④都是在真空钎焊过程中一次焊接成形的 ,要求钎焊接头致密无缺陷并且能达到水压试验的要求。真空钎焊技术是铝制冷却器制造的关键技术。

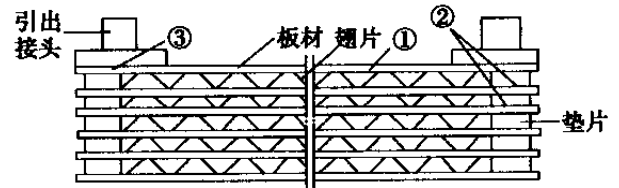


图 2 铝制散热器外形示意图

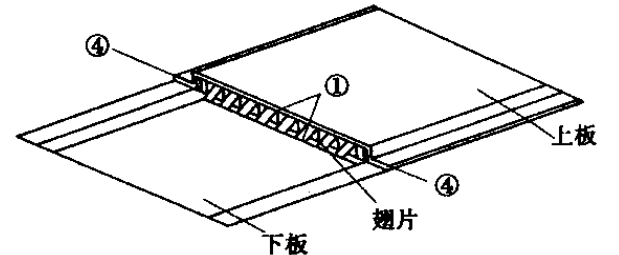


图 3 散热器单片散热板示意图

2 试验结果及分析

2.1 水压试验

为了确定铝制冷却器的最佳钎焊工艺参数 ,在实验中采用了一系列不同的焊接工艺参数 ,表 2 所示为实验中采用的一系列工艺参数。

表 2 铝质冷却器真空钎焊工艺参数

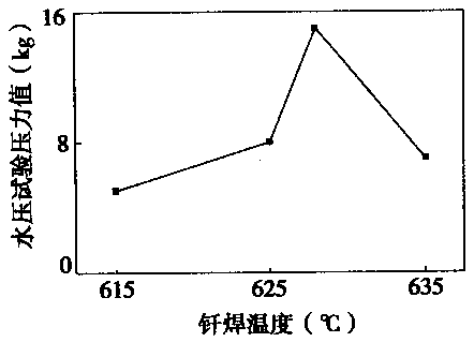
序号	钎焊温度 (° C)	保温时间 (min)	真空度 (Pa)	降温有无保温	钎焊结果
01	615	5	6.9×10^{-4}	无	未焊合
02	625	8	6.9×10^{-4}	无	工件变形 未焊合
03	628	8	6.5×10^{-4}	无	工件无变形 未焊合
04	635	11	6.5×10^{-4}	无	皮层过度熔化 形成熔滴
05	628	9	6.5×10^{-4}	有	外形良好 局部未焊合
06	628	10	6.5×10^{-4}	有	外形良好 焊合

将不同工艺参数下得到的散热器分别作水压试验 ,可以得到焊接工艺参数对水压试验数值的影响 ,也就是对焊接质量的影响。图 4 所示为焊接工艺参数对水压试验数值的影响。可以得出钎焊温度和保

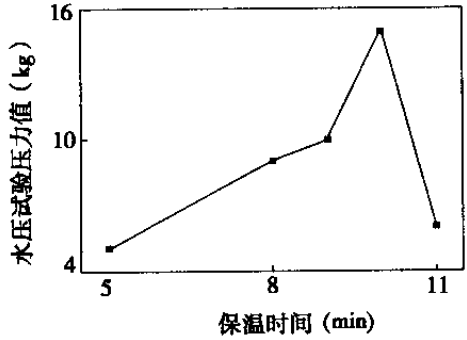
温时间对钎焊之后接头的性能有重要的影响。随着钎焊温度的升高 ,保温时间的延长 ,接头的强度随之增强 ,但是如果钎焊温度太高 ,保温时间过长 ,芯层金属过多熔解到熔融的钎料中 ,将造成一系列的不

良后果 (1) 芯层强度在焊接过程中下降 ,造成板材的塌陷 ,工件的变形 (2) 钎缝中的晶粒长大 ,造成钎

焊接头的强度下降 ,不能达到水压试验的要求。
通过工艺试验以及配套的水压试验 ,确定比较



(a) 钎焊温度



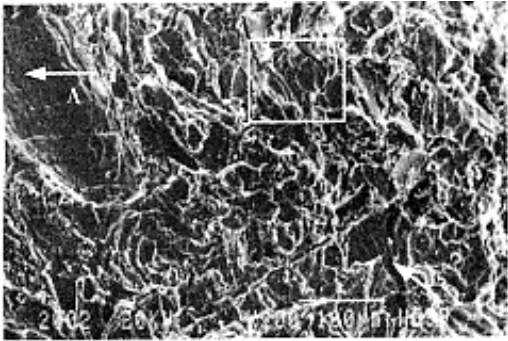
(b) 保温时间

图 4 冷却器工艺参数对钎焊接头水压试验压力的影响

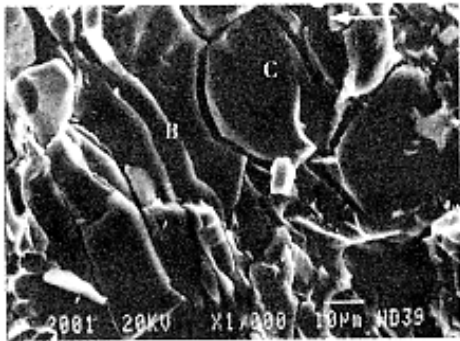
成功的真空钎焊工艺参数为表 2 中 06 号工艺参数 ,在这样的工艺参数下 ,能获得性能优良的接头 ,水压试验能达到 1.5 MPa。

将选定工艺参数下水压试验破坏的接头进行断

口分析 ,观察宏观断口 ,断口表面颜色比较暗 ,呈漫反射的状态 ,这说明没有大的解理面存在 ,然后对接头进行扫描电镜分析 ,图 5 所示为 06 号工艺参数下的断口扫描照片。



(a) 200×



(b) 1000×

图 5 06 号工艺参数下散热器断口扫描电镜照片

从图 5 进行分析可以看到 ,断口呈现一种混合断裂的形式 ,表面上存在有韧窝 ,小的解理面 ,二次裂纹等断裂形式。图 5 (b)所示为图 5 (a)中方框位置的局部放大图像。图 5 (a)中的 A 处为一个明显的大的韧窝 ,并且在韧窝的底部箭头所指的位置可以看到一条二次裂纹。从图中韧窝的形态可以看到 ,该处的这个韧窝已经长大。

从图 5 (b)中则可以明显见到解理断裂的特征。图样上有解理台阶以及沿晶断裂的特征 ,由于晶粒 B 和晶粒 C 的取向不同 ,起源于晶粒 B 的阶梯状断口也在晶粒 C 处引起了断裂 ,并且两个晶粒之间微裂纹相互联系。该台阶指向裂纹向 B 晶粒扩展的方向 ,大约与水平面呈 105° 角。

整个断裂平面布满了二次断裂的裂纹 ,其中最明显的是箭头所指的几条裂纹。在大韧窝 A 处的裂纹穿过韧窝 A ,裂纹的扩展方向与韧窝的发展方向大体一致。而在照片下部 D 处的裂纹是一个单

独的裂纹 ,从其断裂趋势可以看出 ,也是从上向下开裂的 ,与水平面呈 90° 角 ,从照片中可以明显的看到此裂纹的裂纹源。这一条大的二次裂纹直接影响了周围小的二次裂纹的取向 ,使得小的二次裂纹或者从这条裂纹起源 ,或者和这条裂纹合并为一条。

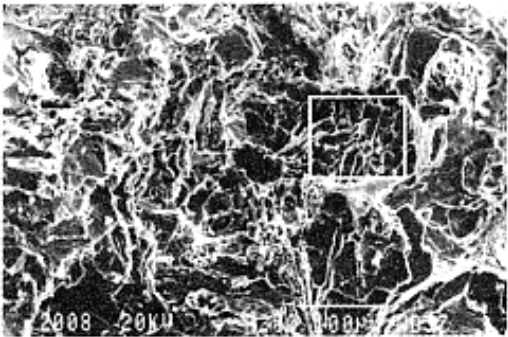
从图 5 可见 ,在铝制冷却器钎缝的断裂界面上没有大的河流状解理断口 ,主要是以韧窝为主 ,但存在有局部的解理花样 ,以及一些二次裂纹。裂纹及解理面的扩展方向与水平面成 90° ~ 120° 角。

为了能与 06 号试样的断口形貌进行对比分析 ,还对 04 号试样的断口进行了扫描电镜分析 ,图 6 所示为 04 号试样断口的扫描电镜图样。

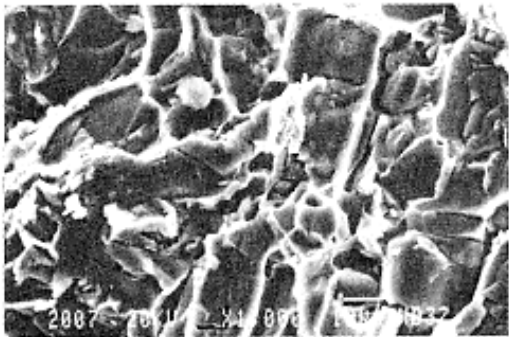
图 6 (b)为图 6 (a)中的方框部分放大到 1000 倍所得到的图样。在提高了钎焊温度 ,延长了保温时间之后 ,从断口图像上分析 ,整个断口呈现一种脆性断裂的形貌 ,整个断口布满大大小小的解理面 ,从图 6 (b)中可以看到 ,断面上布满了小的解理面、撕裂棱

和显微裂纹,为裂纹的方向与撕裂棱的方向基本垂直。综合以上这些说明,在钎焊温度 635 ℃,保温

11min 的工艺参数下,工件在水压试验时脆性断裂,接头强度明显下降。



(a) 200×



(b) 1000×

图 6 04 号工艺参数下散热器断口扫描电镜图像

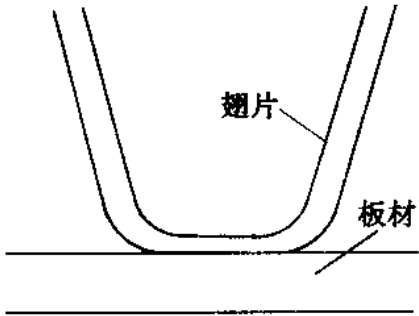
工件所受的应力状态是工件产生断裂的重要原因。铝制冷却器进行水压试验时,冷却器的接头处于三向应力状态。铝制冷却器钎缝的断裂过程是这样的:界面上裂纹的产生→裂纹亚临界状态扩展→裂纹扩展到最大水压力在剩余截面上产生的应力达到该钎缝缺口拉伸强度或裂缝长度达到钎缝断裂韧

性允许的临界值时,就发生急剧破坏的破断过程。

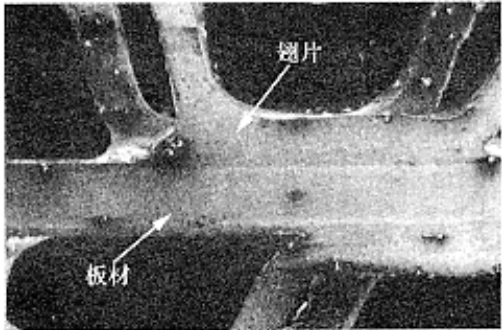
2.2 钎缝组织结构

铝制冷却器的的断裂形貌与钎缝中生成的组织有密切的关系。图 7 所示为其中一个钎缝的示意图以及金相照片。

为了能比较真空钎焊前后组织的不同,分别对

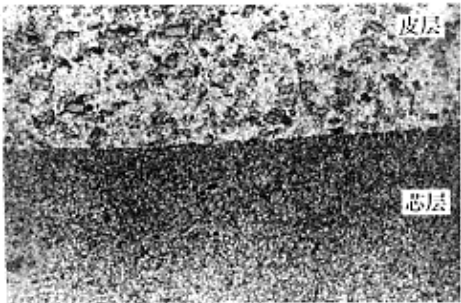


(a) 单个接头示意图



(b) 钎焊接头金相照片 20×

图 7 冷却器单个接头示意图及实际金相照片



(a) 未钎焊母材 200×



(b) 钎焊后钎缝 50×

图 8 钎焊前母材和钎焊后焊缝的金相对比照片

钎焊之前母材和钎焊之后的钎缝进行了金相分析,图 8 所示为钎焊前母材和钎焊后焊缝的金相对比照片。

母材起强化作用。但是在焊接之后,在原来母材的位置生成了钎缝,钎缝中形成了网状的共晶组织。将其中的网状的共晶组织放大,可以得到如图 9 所示的共晶组织。

从金相照片中可以看到钎缝中生成了共晶组

由图 8 可见,在真空钎焊之前,母材中的 Si 相呈不规则的颗粒状,而且其中布满了黑色的质点,对
万方数据

织 边界由长条状的相组成 ,对这些相进行点成分分析 得到这些相都是 Si 相 ,这也就是说在皮层金属熔化重新结晶的过程中 ,原来皮层金属中的 Si 熔化之后重新结晶 ,生成了这些长条状的 Si 相 ,这些 Si 相在晶粒的边界上析出 ,可以说这些富 Si 相的富集是在水压试验中钎缝破断的一个原因。

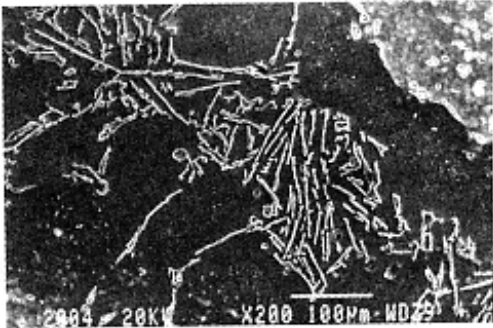


图 9 冷却器真空钎焊钎缝扫描电镜图样 200 ×

3 结论

(1) 铝质冷却器真空钎焊合适的焊接工艺参数为 :钎焊温度 628 ℃ ,保温 10 min。在这个工艺参数下水压试验能达到 1.5 MPa。

(2) 断口试验表明 ,在适合的工艺参数下 ,表面呈混合断裂的形式 ,而延长保温时间 ,提高钎焊温度的条件下 ,断口呈脆性断裂的形式 ,接头强度明显下

降。铝制冷却器钎缝的断裂过程是这样的 :界面上裂纹的产生→裂纹亚临界状态扩展→裂纹扩展到最大水压力在剩余截面上产生的应力达到该钎缝缺口拉伸强度或裂缝长度达到钎缝断裂韧性允许的临界值时 ,就发生急剧破坏的破断过程。

(3) 钎缝中生成了网状的共晶组织 ,皮层金属中的 Si 相熔融后重新结晶成条状的 Si 相 ,并且这些相富集在晶粒的边界上 ,这些富硅相的存在 ,成为水压试验中冷却器断裂的一个重要因素。

参考文献 :

[1] 胡刚 ,康慧 . 铝合金真空钎焊的发展[J]. 焊接技术 , 2001 ,30(2):1-3.

[2] J. R. Terrill , C. N. Cochran , J. J. Stokes , W. E. Haupin. Understanding the Mechanisms of Aluminum Brazing[J]. Welding Journal. 1971 ,50(12):833-839.

[3] 钟向阳 ,蒋金龙 . 管带式热交换器真空钎焊工业及影响钎焊质量的因素[J]. 焊接 ,1999(11):23-26.

[4] William Hoke II , Calvin Amenheuser. Techniques for Aluminum Brazing in Vacuum Furnaces[J]. Welding Journal. 1993 ,72(10):65-67.

收稿日期 2004-04-19

作者简介 :冯涛 ,博士 ,上海交通大学材料科学与工程学院 ,
通讯地址 :上海交通大学(徐汇校区)A0305091。

(上接第 8 页)

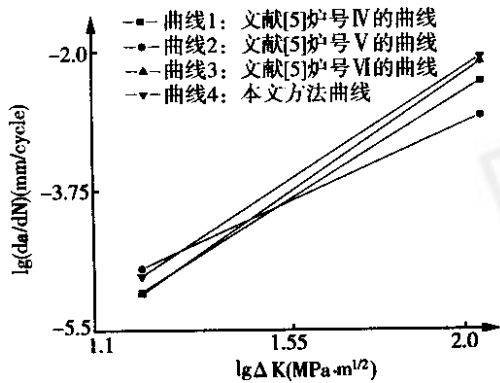


图 1 Paris—Erdogan 方程曲线比较

3 结语

(1) 本文提出了一种可以综合利用历史数据和当前试验数据测定金属材料疲劳裂纹扩展速率曲线的小样本方法。与传统方法相比 ,可以节约大量试样 ,降低试验成本 ,而在试样数量相同的情况下 ,又可以大大提高测试精度。

(2) 该方法可以解决在役压力容器、在役飞机等万方数据

因相同材质、相近工艺、相同失效的试样少而难以测定疲劳裂纹扩展速率曲线的难题 ,具有很大的实用价值和社会经济效益。

参考文献 :

[1] Provam J W . 概率断裂力学和可靠性[M]. 北京 :航空工业出版社 ,1989.

[2] 高镇同 . 疲劳应用统计学[M]. 北京 :国防工业出版社 ,1986.

[3] 陈希孺 . 数理统计引论[M]. 北京 :科学出版社 ,1999.

[4] 傅惠民 . 正态分布百分位值和百分率的置信限和容忍限公式[J]. 航空学报 ,1994 ,15(1):94-101.

[5] 朱森第 . 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京 :机械工业出版社 ,1994.

收稿日期 2004-06-15 修稿日期 2004-10-10
作者简介 :刘新卫 ,男 ,讲师 ,工学硕士 ,主要从事带缺陷压力容器小样本试验技术研究和机械搅拌设备的力学研究 ,
通讯地址 :北京市朝阳区北三环东路 15 号北京化工大学(东区) 230 号信箱 ,邮编 :100029。