

钛热交换器的真空钎焊

Vacuum Brazing of Titanium Heat Exchangers

中航工业北京航空材料研究院 梁海

[摘要] 研究了不同的钎料成分和使用形式、钎焊间隙、钎焊温度和保温时间对 TA2 纯钛钎焊接头的成形和钎缝组织形态的影响。试验结果表明,与用纯 Cu 钎料相比,用 Ti-Zr-Ni-Cu 钎料可以更容易得到好的等温凝固钎缝组织。而用纯 Cu 钎料,则价格低,也可得到致密的成形漂亮的钎焊接头,但代价是接头的塑性较低。

关键词: 钛 钎焊 热交换器

[ABSTRACT] Vacuum brazing process of CP Titanium TA2 heat exchangers was investigated. The effect of filler metals composition, use form, clearance, brazing temperature and hold time on braze joint forming and microstructure was studied. The test results showed that desirable isothermal-solidified braze microstructure can be produced more easily by use of Ti-Zr-Ni-Cu filler metals than pure copper filler metal when vacuum brazing titanium. Whereas low price pure copper rolled foil as filler metal for brazing titanium can also result in tight and good look brazed joints, but at the cost of low plasticity of joints.

Keywords: Titanium Vacuum brazing Heat exchangers

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.124

钛合金在现代先进的航空和航天结构中已发展成为重要的结构材料,钛合金结构选材的用量呈现了迅速上升的趋势。目前在美国先进的 F119 型第四代航空喷气发动机上,钛合金的用量已达到了结构总重的 1/3,而且预计在下一代涡轮发动机和飞机结构中钛的用量将继续增长。已知钛合金钎焊结构可广泛应用于飞机的大芯格蜂窝夹层机翼、机翼和方向舵的加强肋、生命保障和防护服的板-翅式热交换器、着陆反推格栅,导管等,涡轮发动机的宽弦中空风扇叶片、压气机导向器和扩散器、进气导向器等,以及火箭发动机的燃烧室的安装环等。而新型的 TiAl 和 TMC 材料的钎焊结构可用于先进涡轮发动机的工作温度 600℃~1000℃ 的低压涡轮、燃烧室和喷口^[1]。

目前,钛及钛合金的钎焊用钎料基本上有 2 类^[1-3],一类是低温的 Al 基和 Ag 基钎料;另一类是高温的 Ti(Zr)-

Cu-Ni 基和 Cu 基钎料。前者低温钎料的钎焊接头的缺点是耐蚀性和高温强度低;后者高温钎料的钎焊接头的高温强度和耐蚀性好,是钛钎焊的最佳钎料。传统的热交换器主要为铝、铜或不锈钢材质的钎焊结构,而新型的钛热交换器在减重、耐蚀性和高温强度性能上具有明显优势,航空、航天、航海是其应用的最佳领域。钛热交换器结构复杂,钎缝很多,钎着率要求高,钎缝致密性要求高,因此对钎焊工艺提出了很高要求。本文研究了钛热交换器的真空钎焊工艺。

1 试验条件和方法

1.1 材料

热交换器的材质为 TA2, 结构如图 1 所示。热交换器由本体和盖板 2 部分组成,盖板放入本体的方形槽后与本体的筋形成 T 形钎焊接头,钎焊后形成密封的结构,筋宽 2mm,盖板厚 1.9mm。

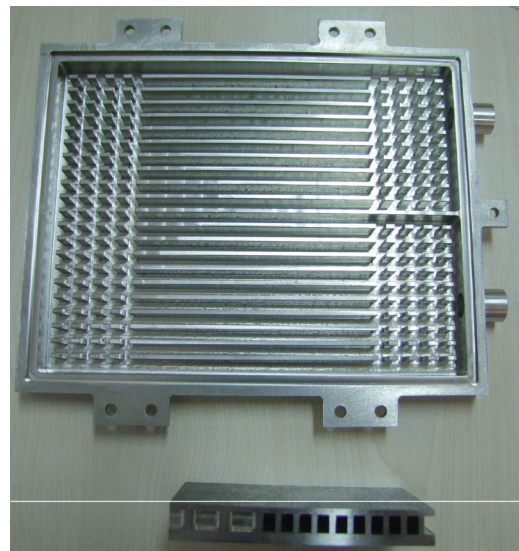


图1 钛热交换器结构

Fig.1 Configuration of Ti heat exchanger

工艺试片材质为 TA2, 厚度组合:1.5mm+1.5mm, 0.1mm+1.5mm 和 0.1mm+0.5mm (表面镀 Cu), 模拟热交换器的钎焊接头。

所用钎料:(1)Ti-Zr-Cu-Ni 系 Ti 基钎料,钎焊温

度范围 910~960℃,以粉状和 0.05~0.07mm 厚的急冷非晶箔形式使用;(2)纯 Cu 钎料,以 0.05mm 厚冷轧箔和 10 μ m 电镀层形式使用。

1.2 设备

真空钎焊采用北京航空材料研究院的真空钎焊/扩散焊炉,均温区尺寸 ϕ 300mm \times 400mm,使用温度 1230℃,热态真空度优于 2×10^{-2} Pa。

钎焊接头的成分分析采用北京航空材料研究院的 JEOL JXA-8100 电子探针仪和 CAM SCAN3100 扫描电镜和 OXFORD X-MAX 能谱仪。

1.3 钎焊接头质量检验

(1)金相检查;(2)氦质谱致密性检查;(3)耐压强度试验,在内腔压力 0.6MPa 下,保压 5min 后,无残余变形。

2 钎焊工艺试验

2.1 热交换器钎焊装配

纯 Cu 钎料箔清洗后用储能点焊机定位点焊到热交换器本体的筋上,盖板镶入到本体的槽中,再在盖板侧面与本体的钎焊间隙中加入钎料。组合件放到钎焊卡具上压紧,以使钎料压紧在钎焊间隙中,保证每条钎缝形成预定的钎焊间隙,以得到高的钎着率和气密性。为防止粘连,卡具与钛热交换器间用阻焊剂隔离。由于钎焊件大,不便于用钎焊炉的液压杆均匀加压,因此用带紧固螺钉的不锈钢压板多点均匀加压。

2.2 钎焊工艺参数

钎焊工艺参数见表 1。对不同的钎料和钎料使用形式,钎焊间隙,不同的钎焊温度和时间进行了试验和比较。

表1 钎焊工艺参数

钎料	母材厚度 / mm	钎焊间隙 / mm	钎焊温度 /℃	保温时间 /min
Ti 基粉	1.5+1.5	0.1	930	30
Ti 基粉	1.5+1.5	0.05	930	30
Ti 基箔	0.1+1.5	0.05	930	30
Cu 箔	0.1+1.5	0.05	960	60
Cu 箔	1.5+1.5	0.05	960	60
镀 Cu	0.1+0.5	0.01	960	60

3 试验结果和分析

3.1 显微组织

图 2 为用 Ti 基钎料真空钎焊的 TA2 纯钛接头组织。图 2 (a)为粉状钎料,钎焊间隙为 0.05mm 的组织,经过 930℃下 30min 的钎焊保温后钎缝为等温凝固的共析针状 α 组织,在钎焊过程中钎料已经完全与母材混合在

一起,形成了固溶体组织;图 2 (b)、(c)为非晶钎料箔 /0.05mm 厚的组织,经过 930℃下 30min 的钎焊保温后钎缝也为等温凝固的针状 α 组织,钎缝中的钎料也已经完全与母材混合在一起,形成了固溶体组织,但是在钎焊圆角处的中心仍有少量残留的共晶钎料,并形成了小的缩孔;图 2 (d)为粉状钎料,钎焊间隙为 0.1mm 的组织,经过 930℃下 30min 的钎焊保温后,钎料也已经基本与母材混合在一起,钎缝大部分为等温凝固的针状 α 组织,钎缝中心可看到凝固的一次枝晶痕迹。钎

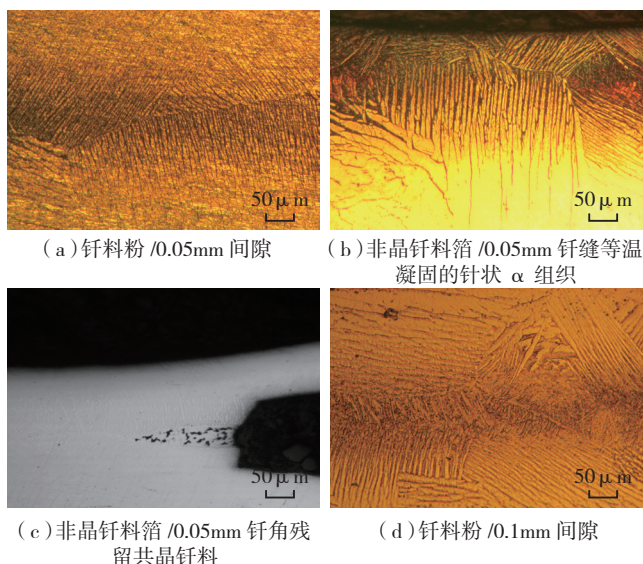


图2 Ti基钎料的TA2纯钛真空钎焊接头组织

Fig.2 Microstructure of CP Ti TA2/Ti-Zr-Cu-Ni joints vacuum brazed at 930℃ for 30 minutes

料共晶组织也已难以看到。

图 3 为用 Cu 钎料钎真空钎焊的 TA2 纯钛接头组织。图 3 (a)、(b)为镀 Cu/0.01mm 的组织,经过 960℃下 60min 的钎焊保温后,钎缝中的钎料已经完全与母材混合在一起,钎缝基本成下等温凝固组织,但是在钎焊圆角处仍有残留的共晶钎料,钎焊圆角美观致密;图 3 (c)、(d)为 Cu 箔 /0.05mm 的组织,经过 960℃下 60min 的钎焊保温后钎缝形成了 3 个组织区,钎缝中心的残留液相凝固区化合物相,宽度大约为 50 μ m,母材与钎料相互溶解的凝固区,大部分为针状 α 组织,和钎料向母材的扩散区针状 α 组织。这说明,在这个工艺条件下,钎料还不能充分从钎缝中扩散出去,钎焊接头会存在一定的脆性。

3.2 钎缝成分分析

为了解 Cu 箔 /0.05mm 钎料的钎焊接头组织中元素的分布,用电子探针和能谱仪对钎缝成分做了线扫描分析和相成分分析,线扫描和 SEM 像见图 4。

线扫描结果显示,与钎缝两侧的钎料/母材溶解混合凝固区相比钎缝中心区的 Cu 含量高, Ti 含量低。

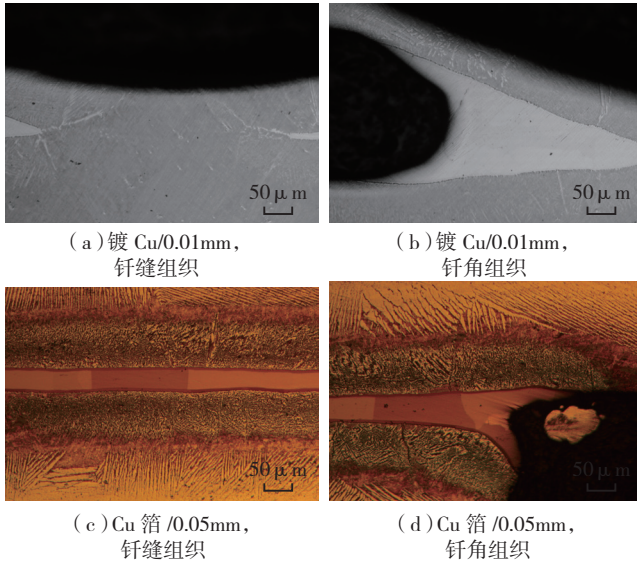


图3 Cu钎料的TA2纯钛真空钎焊接头组织
Fig.3 Microstructure of CP Ti TA2/ Cu joints vacuum brazed at 960°C for 60 minutes

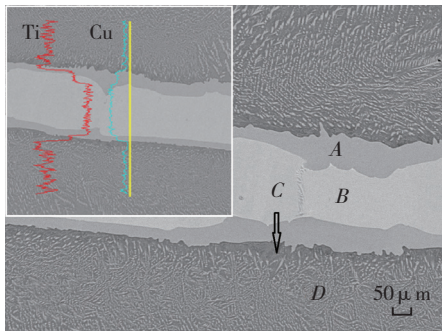


图4 Cu钎料箔的TA2纯钛真空钎焊接头SEM像
Fig.4 SEM image of CP Ti TA2/ Cu foil joints vacuum brazed at 960°C for 60 minutes

SEM能谱分析显示,图4中A相的成分接近 Ti_2Cu ,应为 Ti_2Cu 相;B相的成分接近 $TiCu$,应为 $TiCu$ 相;C相和D相都为高Ti低Cu固溶体相,应为针状 $\alpha + \alpha'$ 组织。从图5的Ti-Cu二元合金相图可知,用Cu作钎料在960°C进行钎焊,是利用了Ti-Cu的共晶反应:

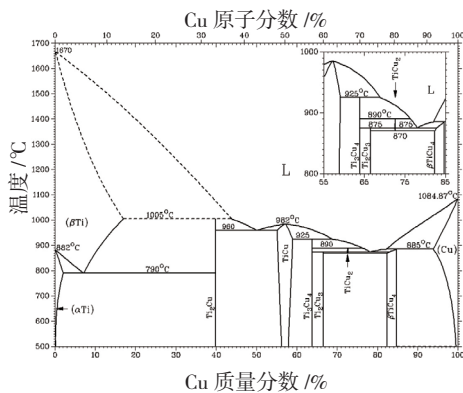


图5 Ti-Cu二元合金相图
Fig.5 Ti-Cu Binary equilibrium diagram



当钎焊时高温扩散形成的共晶液相,没能通过扩散和相互溶解,使共晶点成分明显改变,穿越 Ti_2Cu 成分点向富Ti端靠近,那么,在钎缝中心必然会形成 $Ti_2Cu + TiCu$ 的化合物组织。因此,降低接头间隙,减少钎料用量,延长保温时间,对提高接头塑形是必不可少的。

3.3 热交换器的钎焊

根据上述试验结果,考虑到实际零件为内腔T形接头,粉状钎料不易使用,必须要使用箔状钎料形式,但是国内Ti基非晶箔状钎料的价格昂贵,每公斤大约要4-5万元,而且现货钎料难得,需要定做,周期长。为满足零件的钎焊要求,采用Cu作钎料在960°C/60min条件下的真空工艺方案,对图1中所示的热交换器进行真空钎焊。经实体零件解剖,钎缝致密,钎着率100%,见图1。TA2的 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变温度为885~900°C^[4],在960°C进行钎焊,母材晶粒有所长大。钎焊的热交换器检漏和耐压试验,满足技术要求。

4 结论

与用纯Cu钎料相比,用Ti-Zr-Ni-Cu钎料钎焊钛热交换器可以更容易地得到等温凝固钎缝组织。而用纯Cu钎料,则价格低,也可得到致密的成形漂亮的钎焊接头,但代价是接头的塑形较低。

参考文献

- [1] Shapiro A, Rabinkin A. State of the art of titanium-based brazing filler metals. *Welding Journal*, 2003 (10):36-43.
- [2] LAN S W. Laminated Brazing Filler Metals for titanium assemblies. *Welding Journal*, 1982, (10):23 ~ 28.
- [3] CHANG C S, JIA B. Application of roll welding to brazing. *Welding Journal*, 2003, (10):28-31.
- [4] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.

(责编 早春)

(上接第119页)

- [3] 吴伏家, 尹晓霞, 超长瑞. TC4钛合金等温锻造过程的数值模拟和实验研究. *锻压技术*, 2009(10):147-150.
- [4] 曲银化, 孙建笠, 孟祥军. 钛合金等温锻造技术研究进展. *钛工业进展*, 2006, 23(1):6-9.
- [5] Argyris J H, Doltsinis J S, Luginsland. Three-dimension thermomechanical analysis metal forming processes//Proc.Int. Workshop Simulation of Metal Forming Processes by the Finite Element Method. Stuttgart, 1985.
- [6] Yang D Y, Lee N K, Yoon J H. A three dimension of isothermal turbine blade forging by the rigid-Viscoplastic finiteelement method. *Journal of Material Engineering and Performance*, 1993, 2:119-124.

(责编 谷雨)