

# 单曲率钛合金蜂窝结构的 钎焊设备与工艺研究

六二五所 翟宗仁 邵聚田

## 一、前言

随着高速、高机动飞行器的发展,要求航空、航天飞行器结构件能在较高温度环境下具有良好的刚度、强度和绝热等性能。钎焊的不锈钢与钛合金蜂窝结构均能在 $300^{\circ}\text{C}$ 以上环境中工作,但钛的比重只为不锈钢的60%,钛蜂窝结构的比强度比相同结构形式的不锈钢蜂窝高50%左右<sup>[1]</sup>,钛合金的导热系数比钢低50~60%,因此,选用钛合金蜂窝结构作各类飞行器的承载、绝热构件有助于提高飞行器的综合性能。美国在六十年代已对钎焊钛合金蜂窝壁板进行了研究,并将其用到航空发动机承力机匣和消音机匣、机翼壁板及机身内部构件上,其中有代表性的是SST试验机( $M=2.7$ ),在机翼(兼作油箱)、尾翼及机身尾部使用钛合金钎焊蜂窝结构达 $1486\text{m}^2$ <sup>[2]</sup>。

为适应高速、高机动飞行器发展和战斗机加大航程的需要,我们开展了单曲率钛合金钎焊蜂窝结构的试验研究。对钛合金蜂窝壁板元件机械性能、专用钎焊设备及钎焊工艺开展了有针对性的研究。焊出了目前我国最大的多种结构形式的单曲率钛合金蜂窝结构壁板的试验件,为钛蜂窝在国内推广使用奠定了基础。

## 二、专用钎焊设备的研制

为钎焊单曲率钛合金蜂窝壁板,专用钎焊设备应包括钎焊陶瓷模、电源、真空负压系统、测温系统及辅助工艺装备等部分。

蜂窝壁板的结构特点和材料性能都要求钎焊加热装置具备加热、型面控制和焊后热处理

三种功能。为此,选用熔融石英来制造称之为钎焊陶瓷模的特殊加热装置。陶瓷模分上、下模两部分,距工作型面适当距离均匀配置加热丝孔,热流通过工作型面上的透热孔或槽来加热被焊蜂窝壁板组合件(见图1)。加热体选用铁铬铝丝,可根据需要进行串、并联。选用磁性调压器作低压供电电源以提高加热效率。



图1 钎焊陶瓷模

钛合金蜂窝钎焊在真空负压条件下进行。真空负压系统应保证按需要随时灵活调节负数值。真空负压系统如图2所示。真空负压系统投入使用前应逐级检查,保证无明显泄漏,以便使钎焊容器中有良好的保护气氛和负压压紧条件。

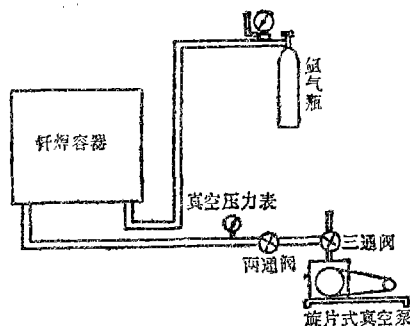


图2 真空负压系统

钎焊容器采用熔焊封焊的密封结构。容器封焊后需经检漏合格方可接入真空负压系统。

钎焊陶瓷模投入使用前需测定模腔内的温度场，只有经过调节使温度场的均匀性达到钎焊规范所要求的合理范围时方可钎焊，蜂窝壁板的连接质量才能得到保证。

### 三、单曲率钛合金蜂窝的 钎焊工艺研究

曲面钛蜂窝的钎焊工艺包括夹芯制造、钎料选择、边框件、均温材料、焊前清洗、装配工艺、止焊技术、钎焊循环与负压控制、钎焊质量与焊后无损检验等重要工艺环节。

外购的钛箔经厚度检测挑选后按设计要求剪切成所需宽度的带料，剪切好的带料经专用成型滚轮成型后即获得所需形状的蜂窝芯条。用高效贮能点焊机将蜂窝芯条拼焊成规定尺寸的蜂窝夹芯。拼焊时必须防止虚焊和芯条错位等现象。合理选择拼焊时的蜂窝芯条方向，有助于装配工作的顺利进行。

国外在钎焊钛蜂窝结构时曾比较了银基、金基、钽基、钛基、铜基和铝基等若干种钎料合金系统，有关性能比较结果如表1所示<sup>[2]</sup>。美国通过对钎焊温度范围、钎料的可加工性、蜂窝接头的平面拉伸强度、接头抗腐蚀性及其钎焊冶金适应性等方面的全面比较分析后认为，3003Al是钎焊钛蜂窝的最佳钎料<sup>[2]</sup>。

表 1 钎焊钛蜂窝的几种钎料系统

钎料系统	成本	钎焊温度	抗腐蚀性	强度	适应性
银 基	高	中等	差	高	好
金基、钽基	很高	高	好	高	好
钛铜镍	高	高	极好	高	脆
钛铅铍	高	高	极好	高	脆
铜基	低	高	好(扩散后)	高	脆
铝基	很低	低	好	中等	好

我们曾对 Al-Mn 与 Ag-Al-Mn 钎料进行过比较，也验证了上述认识。同时发现，银基

钎料对钛箔有溶蚀倾向，工艺上需严格控制；铝基钎料则没有溶蚀钛基体问题，它与钛反应形成的TiAl<sub>3</sub>化合物层，可以通过控制钎焊规范和钎料用量来解决。

试验表明，选用铝基钎料钎焊时，随着钎料厚度增加，蜂窝壁板的抗压强度及弹性模数均有所增加，弯剪、侧压性能均趋于平缓，且受芯条方向性影响显著下降，剥离载荷谱变得平稳，波动幅度很小。美国有关试验报导认为，钛合金蜂窝的平面拉伸强度随着钎料的厚度增加而增加，但每种夹芯高度都有一个最佳的钎料厚度值（图3曲线中的拐点）<sup>[2]</sup>。

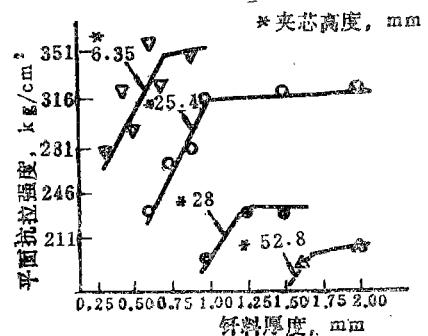


图 3 钎料厚度对钛蜂窝平面拉伸强度的影响

钎焊时铝基钎料与钛在界面上会形成脆性钛铝化合物(TiAl<sub>3</sub>)，铝化物层主要影响壁板的疲劳性能。铝化物层厚度主要通过控制最高钎焊温度及在635℃以上的停留时间予以限制。最高钎焊温度不得超过688℃，635℃以上的停留时间不超过60分钟，在这种情况下铝化物层厚度不超过8μm，对壁板静载性能影响不大<sup>[2]</sup>。

试验表明，铝钎料很薄时(0.1mm)，壁板性能对钎焊规范很敏感，710℃钎焊的壁板在弯剪、侧压试验中常因面板与夹芯间炸裂而失去承载能力。金相测定指出，此时界面铝化物层厚度平均达到12.9μm。值得引起重视的是，当钎料厚度增加到0.3mm时，壁板性能对钎焊规范的敏感明显下降，接头脆性明显缓和。抗压、弯剪性能均不低于合理规范钎焊时的数值。金相测定指出，经720℃钎焊的蜂窝接头中界

面铝化物层平均厚度只有 $7.2\mu\text{m}$ 。这一有趣现象为大型蜂窝壁板的制造提供了良好而有利的工艺条件。铝基钎料不溶蚀钛基体也为我们选用较厚钎料提供了冶金保证。

蜂窝边框特别是弧形边框件在曲面蜂窝壁板型面成型过程中起着重要作用,没有弧形边框件,装配后的待焊壁板不可能得到带曲率的型面,也会给容器封焊、钎焊带来一系列困难。

均温板(条)不仅有助于使待焊蜂窝壁板在加热过程中受热均匀,而且对夹芯起支撑作用,在钎焊循环和真空负压作用下仍能保持边框件的形状、尺寸和钎焊质量。

众所周知,各种油污及氧化物均会严重阻碍钎料的润湿、铺展和填充钎焊间隙。为保证钎焊质量,待焊壁板的所有零件、钎料及有关工艺材料,均需经过严格的焊前清洗。各种钛合金零件均可用625型金属清洗剂认真除油,然后在 $15\%\text{HNO}_3 + 5\%\text{HF}$ 水溶液中洗去氧化膜,经流水冲洗干净后烘干。但是金属清洗剂不得用于清洗铝基钎料,它会对铝合金产生一种特殊污染,从而使之不能实现钎焊。为此,铝基钎料需用汽油除油后在 $\text{NaOH}$ 溶液中去除氧化膜,再经 $30\%\text{HNO}_3$ 溶液钝化后用流水冲洗干净并烘干。

钎焊时止焊不力常会造成前功尽弃,特别是蜂窝结构钎焊时,有效的止焊是不容忽视的。溢出的钎料会粘焊工艺材料及均温板、条,特别是形成铝铜低熔点共晶( $548^\circ\text{C}$ )使均温板、条溶蚀损坏。我们使用自制的YM-1型止焊剂及相应的止焊技术获得了十分满意的效果。

蜂窝夹层结构比波纹夹层结构具有更好的绝热性能,钎焊时为使待焊蜂窝壁板各部分零件受热均匀,除要求加热装置温度场均匀及选择高导热率的均温材料外,还必须采用合理的钎焊加热循环。连续升温的热循环对蜂窝壁板钎焊是很不利的。我们采用带三个均温台阶的钎焊热循环曲线(见图4),对保证壁板的钎焊质量是可靠的。这种热循环曲线既有助于消除加工应力、排除污气(止焊剂脱结晶水及热分解

产物)、净化钎焊气氛,也有助于稳定型面,使壁板各部分充分均温后同时进入钎焊温度,从而获得优质、均匀的钎焊质量。

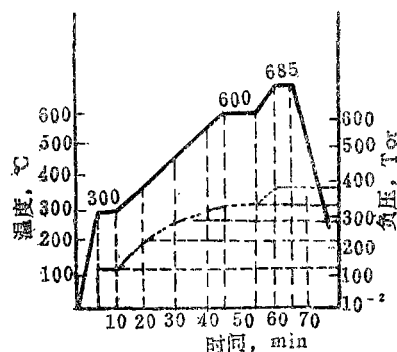


图4 钎焊循环与负压值

负压工艺是指在钎焊容器中建立真空,使大气通过容器封皮均匀压紧待焊蜂窝壁板而无需机械夹具的一种先进工艺方法。特别是在钎焊夹层结构时采用负压工艺有着独特的优越性。随着温度升高,金属材料的刚度和强度均下降。为防止蜂窝夹芯在高温下因失稳而被压塌,应根据需要向容器中充入一定量的氩气来调节和控制负压值(即真空度)。具体的负压值曲线是按照不同的材料、夹芯密度、芯格形式、夹芯高度、芯箔厚度及热循环曲线等因素通过试验来确定。

试验反复证明,只要认真执行上述各项工艺准则,蜂窝壁板通常能获得满意的钎焊质量。对于曲面蜂窝壁板的钎焊常常还存在一些特殊的质量因素,如内外两侧蜂窝面板与蜂窝夹芯的贴合均匀性不十分一致,内侧面板与夹芯的贴合质量容易不均匀。这需从装配模与装配工艺、容器封皮的预先成型等工艺环节中严格控制。最好采用半模陶瓷模钎焊工艺,它可以更精确地控制蜂窝壁板的型面精度。在双模陶瓷模钎焊工艺方案中,鉴于目前国内陶瓷模材质及制造工艺水平不高,经浇注、焙烧后的陶瓷模的尺寸和型面偏差较大,为制造型面要求较高的蜂窝壁板,就必须采取措施对焙烧后的陶瓷模再进行型面修整加工。

# 钛合金彩色阳极化

国营洪都机械厂 彭仁明

## 一、前言

钛合金因其比强度高、耐腐蚀性好而在宇航工业中广泛应用。但因其易于磨损、擦伤和接触腐蚀等倾向又限制了它的充分利用。

为了防止和减轻钛合金的磨损和接触腐蚀,六十年代国外在这方面做了大量的试验研究工作<sup>[1-3]</sup>,七十年代末,加拿大的“钛和钛合金的阳极化”<sup>[4]</sup>已列为国际标准并在西方国家中推广应用。这些方法主要用于标记,对防腐和抗磨只是有些改善。当前,国外应用于钛合金阳极化材料的主要是Ti-6Al-4V和Ti26V。

我国从七十年代后期对钛合金阳极化作了不少试验研究,并取得了一些成果。

根据我厂新产品设计和使用要求,我们从八十年代开始对钛合金彩色阳极化进行试研工作。本文重点介绍作为工艺装饰品和标记的彩色阳极化膜及其抗磨损和接触腐蚀的性能。

## 二、试验方法

### 1. 钛合金彩色阳极化

(1) 配方工艺的拟定(见表1)。

(2) 试验条件

阳极化配方工艺试验用钛合金牌号有47121、TC4、TC1、TC1M、TC2、TA2六种,规格有10×10、50×100、100×150mm三种,以47121为主,在三升的烧杯中进行。

阳极化试生产试验用47121钛合金高锁螺栓零件,直径为5mm而长短不同规格的有二十余种,在三十升的不锈钢槽中进行。

(3) 基本工艺程序

有机溶剂除油→装挂→化学除油→热水洗→冷水洗→酸洗→冷水洗→阳极化→冷水洗→热水处理→干燥→拆挂→检验→包装。

### 2. 抗接触腐蚀试验

(1) 盐雾腐蚀条件

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

我们在较短时间内完成了四种类型单曲率钛合金蜂窝壁板。这些蜂窝壁板是目前国内最大的,钎焊后均经过目视、敲击声和X射线透视检验等无损检测方法检查,质量良好。

## 四、结论

1. 钎焊陶瓷模采用低电压大电流供电效果良好。电阻丝采用单根短螺旋丝按孔配置,能灵活有效地调节加热功率和温度场,而且使用安全。

2. 铝基钎料厚度的增加可减小蜂窝芯条方

向对壁板机械性能的影响,特别是能明显地降低钛蜂窝壁板机械性能对钎焊规范的敏感性。这对大型钛蜂窝壁板的制造有重要意义。

3. 夹芯制造技术、焊前清洗、装配工艺、止焊技术、钎焊热循环与负压控制等都是单曲率钛蜂窝结构制造的主要工艺环节,它们对保证壁板质量有重要作用,必须严格执行。

### 参考文献

- (1) 钎焊蜂窝设备与工艺研究(六二五所技术报告), 1979年10月。
- (2) Weld. J., 1973, Vol. 52, No. 10, 425-432.