

# 钛合金仿莲房芯体夹层结构钎焊界面组织与性能

邓云华, 王文森, 陶 军

(中国航空制造技术研究院 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

**摘 要:** 针对 TC4 钛合金仿莲房特征芯体与面板钎焊工艺, 采用 TiZrCuNi 钎料开展了钎焊工艺研究, 并分析了主要钎焊工艺参数对钎焊界面组织和夹层结构力学性能的影响。结果表明: 钎焊温度 920 °C, 保温时间 90 min 时, TC4 钛合金仿莲房特征芯体夹层结构钎焊后界面焊合率良好, 界面显微组织为均匀针状  $\alpha$  组织和界面金属间化合物, 夹层结构平压强度均值为 15.14 MPa。钎焊保温时间对 TC4 钛合金仿莲房特征芯体钎焊界面显微组织影响显著, 当钎焊保温时间较短(15 min)时, 钎料熔化后, 液态钎料中 Cu 和 Ni 元素与母材反应时间较短, 钎料中 Cu 和 Ni 向母材中的扩散反应不充分, 钎缝区局部 Cu 和 Ni 元素富集导致 Cu 和 Ni 元素含量超过共晶成分点, 钎焊保温结束后液态钎缝凝固时发生共晶反应, 生成块状金属间化合物, 钎焊界面主要为含有块状金属间化合物的凝固钎料组织和针状  $\alpha$  组织; 随着钎焊保温时间的增加, 液态钎料中 Cu 和 Ni 元素与母材反应时间增加, 钎料中 Cu 和 Ni 元素向母材中扩散反应深度显著增加, 从而 Cu 和 Ni 元素在液态钎料中的含量显著降低, 元素含量小于共晶成分点, 钎焊保温结束后液态钎缝凝固时 Cu 和 Ni 元素固溶于  $\beta$  相中, 避免大量块状金属化合物生成, 随后发生  $\beta$  相向  $\alpha$  相的固态相变时, 共析反应生成针状  $\alpha$  相, 在针状  $\alpha$  组织界面处生成金属间化合物。钎焊保温时间从 15 min 升至 90 min 时, 由于钎焊界面金属间化合物减少, TC4 钛合金仿莲房特征芯体夹层结构的平压强度逐渐增加。

**关键词:** 仿莲房特征芯体; 真空钎焊; 钎焊界面组织; 金属间化合物; 力学性能

**中图分类号:** TG146.23; TG454

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2021)09-3218-07

金属钎焊蜂窝夹层结构具有质量轻、比强度和比刚度高、消音、隔热以及减震、吸能等优良性能, 广泛应用于飞机机身、舵翼面、发动机舱门、发动机短舱消音声衬等部位<sup>[1-4]</sup>。金属蜂窝芯体制造方法主要有 2 种, 一种是点焊逐层拼接, 首先将金属箔材滚压或冲压成半蜂窝芯瓦楞板, 再将瓦楞板通过电阻点焊的方法连接成蜂窝芯<sup>[5,6]</sup>。另一种是在相邻波纹带层间放置钎料, 然后采用真空钎焊方法, 整体制备蜂窝芯体<sup>[7]</sup>。无论采用逐层点焊还是界面钎料整体钎焊的方式, 均需要经过蜂窝箔材轧制、半蜂窝格波纹带成形、蜂窝芯电阻焊或钎焊拼接制备、蜂窝芯体热成形、蜂窝芯体机加工、蜂窝芯体/面板钎焊等工艺过程, 工艺流程较复杂且制造周期较长。另外, 受限于蜂窝芯体结构形式, 相邻芯格空腔之间不连通, 内部需要冷却气流通或需要连通时, 需另采用机加工方法对蜂窝芯进行加工, 较为困难<sup>[8-10]</sup>。

针对当前金属蜂窝芯体存在的问题, 作者团队前期提出了一种仿莲房结构特征夹层芯体, 采用真空热蠕变成形方法在平板两侧表面上成形仿莲房特征的孔柱, 制

备夹层芯体<sup>[11]</sup>。与蜂窝芯体制备过程相比, 仿莲房特征芯体无需蜂窝箔材轧制、半蜂窝格波纹带成形、蜂窝芯拼接制备等工艺过程, 可直接采用金属板材真空热蠕变成形一步制备, 工艺过程简单, 且仿莲房特征芯体内部贯通, 芯体功能性改善。本研究在此基础上, 进一步针对仿莲房特征芯体与面板的钎焊工艺开展了试验研究, 并分析了典型钎焊工艺参数对仿莲房特征芯体夹层结构钎焊界面组织和力学性能的影响规律。

## 1 仿莲房特征芯体制备及钎焊试验过程

### 1.1 仿莲房特征芯体真空蠕变成形制备

仿莲房特征芯体真空蠕变成形原始材料为 0.8 mm 厚 TC4 钛合金平板, 试样尺寸为 235 mm×180 mm。如图 1 所示, 将 TC4 平板放置于上、下模之间, 装配后放置于真空炉中进行真空热蠕变成形, 成形工艺参数为成形压力  $P=0.4$  MPa, 成形温度  $T=940$  °C, 保温时间  $t=240$  min 时, 真空度小于  $1 \times 10^{-2}$  Pa。

真空热蠕变成形后的 TC4 钛合金仿莲房特征芯体

收稿日期: 2020-09-18

基金项目: 航空科学基金 (2017ZE25)

作者简介: 邓云华, 男, 1987 年生, 博士, 高级工程师, 中国航空制造技术研究院, 北京 100024, 电话: 010-85701343, E-mail: yunhuadeng@buaa.edu.cn

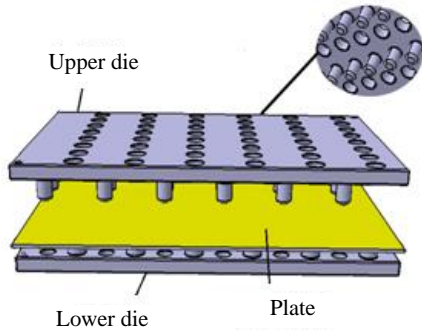


图 1 热成形工装示意图

Fig.1 Schematic diagram of hot forming die

如图 2 所示。

### 1.2 仿莲房特征芯体钎焊试验过程

夹层结构上、下面板均为 0.8 mm 厚 TC4 钛合金。采用真空钎焊的方法制备仿莲房特征夹层结构。钎焊前对芯体进行酸洗，将上、下面板机械打磨并清洗后，按图 3 所示进行钎焊装配固定。



图 2 真空热蠕变成形后的 TC4 钛合金仿莲房特征芯体

Fig.2 TC4 titanium lotus seedpod-like core after high-temperature creep forming process

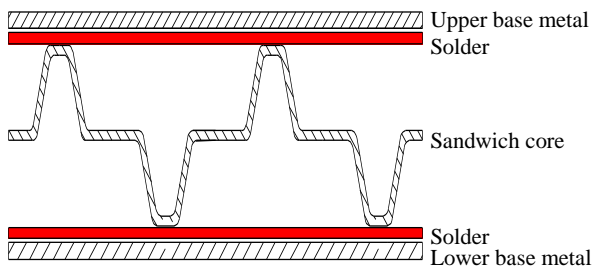


图 3 仿莲房特征芯体结构装配示意图

Fig.3 Brazing assembly of titanium sandwich structure with lotus seedpod-like core

实验中钎料为 Ti-Zr-Cu-Ni 非晶态箔带钎料，熔点 870~875 °C。通过前期对该钎料进行 TC4 钛合金蜂窝钎焊工艺研究实验结果<sup>[12,13]</sup>可知，实验中钛合金消音蜂窝结构钎焊时选择的钎焊温度为 920 °C，钎焊时间选择如 15, 30, 60 和 90min。

钎焊后采用线切割方法切取不同钎焊工艺参数下仿莲房特征夹层结构金相试样，制备金相样品，采用光学显微镜和扫描电镜对钎焊界面组织进行观察，采用 EDS 对面板与芯体之间的钎焊界面成分进行观察和分析，采用 XRD 对面板与芯体之间的钎焊界面物相成分进行分析，采用 EBSD 对面板与芯体之间的钎焊界面物相分布进行观察和分析。采用线切割方法切取 50 mm×50 mm 力学测试试样，进行平压强度测试。对不同工艺参数下钎焊界面的微观组织和平压强度进行对比分析，研究工艺参数对夹层结构钎焊界面组织和力学性能的影响规律。

## 2 钎焊界面组织

### 2.1 钎焊界面组织

TC4 面板和仿莲房特征芯体钎焊前显微组织如图 4 所示。由图 4a 可以观察到，TC4 面板母材组织由细小的等轴状  $\alpha$  相和晶界  $\beta$  相组成，并且具有原始纤维取向。仿莲房特征芯体因经历高温蠕变成形过程，等轴  $\alpha$  晶粒尺寸比原始 TC4 母材的大。

在钎焊温度 920 °C，保温时间 15 min 时，钎焊界面微观组织的 OM 照片如图 5 所示。由图可以看出，钎焊界面由白色针状组织 A 和黑色块状组织 B 组成。白色针状组织和黑色块状组织的 EDS 成分分析结果如表 1 所示。白色针状组织主要成分为 Ti 元素，并含有少量的 Al、Zr 和 Cu、V、Ni 元素，而黑色块状组织中除了 Ti 元素外，还含有较多的 Cu 和 Ni 元素。钎焊接头区域 XRD 物相分析结果如图 6 所示，钎缝界面主要物相成分为  $\alpha$ -Ti 和 Ti-Cu 化合物。综合 EDS 和 XRD 结果，可以确定白色针状组织 A 和黑色块状组织 B 分别为  $\alpha$  相和 Ti-Cu 金属间化合物，与相关钛合金钎焊文献报道结果相似<sup>[14-16]</sup>。

采用 EBSD 方法对钎焊时间 15 min 时钎焊界面进行分析，物相分布结果如图 7 所示。由图 7 可以看出，在钎焊界面处 Ti-Cu 金属间化合物呈块状分布，与金相结果中黑色块状组织分布特征吻合。

在钎焊温度 920 °C，保温时间 30 min 时，钎焊界面微观组织的 OM 照片如图 8 所示。由图 8 可以看出，当钎焊时间增加至 30 min 时，钎焊界面显微组织主要由白色针状组织 C 和黑色块状组织 D 组成。白色针状组织和黑色块状组织的 EDS 能谱分析结果如表 2 所示。结合

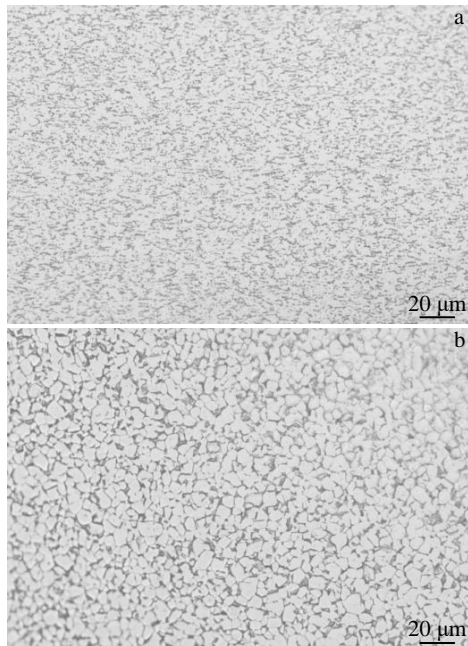


图 4 TC4 面板及仿莲房特征芯体显微组织

Fig.4 Microstructures of TC4 base metal (a) and lotus seedpod-like core (b)

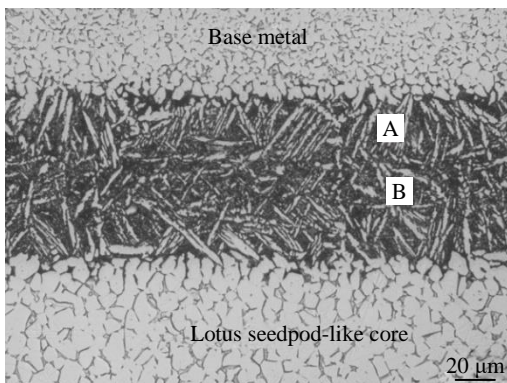


图 5 钎焊温度 920 °C、保温时间 15 min 时钎焊界面微观组织

Fig.5 Microstructure of brazing interface at the brazing temperature of 920 °C for 15 min

表 1 图 5 中钎焊界面 A 和 B 位置的 EDS 分析结果

Table 1 EDS analysis results of brazing interface A and B positions in Fig.5 (ω/%)

| Position | Ti    | Al   | V    | Zr   | Cu    | Ni   |
|----------|-------|------|------|------|-------|------|
| A        | 88.11 | 4.09 | 1.11 | 3.63 | 2.54  | 0.52 |
| B        | 75.44 | 2.73 | 2.05 | 4.70 | 10.53 | 4.56 |

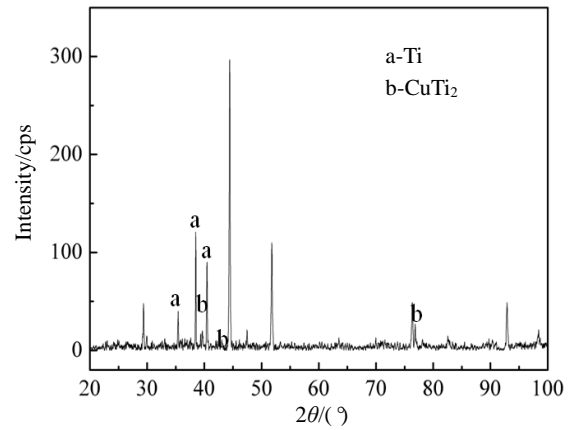


图 6 钎焊温度 920 °C、保温时间 15 min 时钎焊接头 XRD 图谱  
Fig.6 XRD pattern of brazed joints at the brazing temperature of 920 °C for 15 min

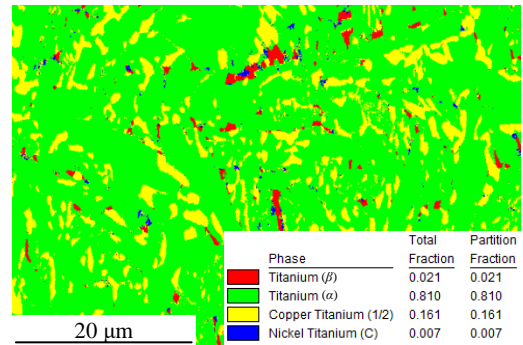


图 7 钎焊温度 920 °C、保温时间 15 min 时钎焊界面 EBSD 照片及分析结果

Fig.7 EBSD image and analysis result of brazing interface at the brazing temperature of 920 °C for 15 min

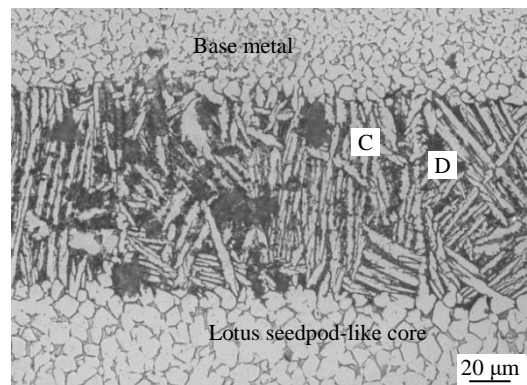


图 8 钎焊温度 920 °C、保温时间 30 min 时钎焊界面微观组织

Fig.8 Microstructure of brazing interface at the brazing temperature of 920 °C for 30 min

表2 图8中钎焊界面C和D不同位置的EDS成分分析结果

Table 2 EDS analysis results of brazing interface C and D positions in Fig.8 ( $\omega/\%$ )

| Position | Ti    | Al   | V    | Zr   | Cu   | Ni   |
|----------|-------|------|------|------|------|------|
| C        | 89.48 | 6.03 | 1.43 | 1.74 | 1.05 | 0.27 |
| D        | 72.45 | 2.71 | 5.57 | 2.03 | 8.66 | 8.57 |

EDS能谱分析结果可以确定,与钎焊时间15 min界面显微组织相同,白色针状组织为针状 $\alpha$ 相,黑色块状组织主要为Ti-Cu系金属间化合物。但是,与钎焊时间15 min钎焊界面显微组织相比,黑色块状组织所占比例明显减少,针状 $\alpha$ 相的比例明显增加,且针状 $\alpha$ 相尺寸增大。

在钎焊温度920 $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间60 min时,钎焊界面微观组织如图9所示。由图可以看出,当钎焊时间增加至60 min时,钎焊界面显微组织主要为白色针状组织。钎焊界面中心区域EDS成分分析结果如表3所示,主要成分为Ti、Al和V元素,Zr、Cu、Ni等元素含量较少,因此钎焊界面主要由针状 $\alpha$ 相组成。

在钎焊温度920 $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间90 min时,钎焊界面微观组织的OM照片如图10所示。由图可以看出,钎

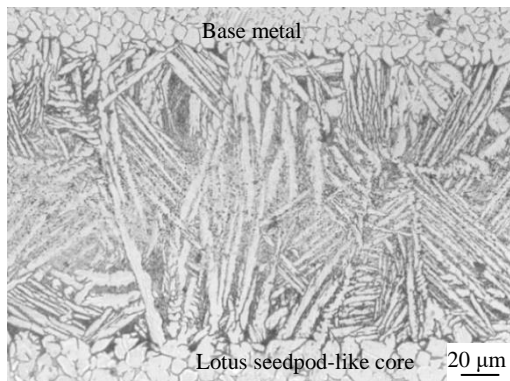


图9 钎焊温度920 $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间60 min时钎焊界面微观组织  
Fig.9 Microstructure of brazing interface at the brazing temperature of 920 $^{\circ}\text{C}$  for 60 min

表3 钎焊温度920 $^{\circ}\text{C}$ 、保温60 min时钎焊界面EDS成分分析结果  
Table 3 EDS analysis results of brazing interface at the brazing temperature of 920 $^{\circ}\text{C}$  for 60 min ( $\omega/\%$ )

| Ti    | Al   | V    | Zr   | Cu   | Ni   |
|-------|------|------|------|------|------|
| 88.82 | 5.43 | 2.02 | 0.61 | 0.55 | 0.25 |

焊界面显微组织主要为白色针状组织,与钎焊保温时间60 min时相同,可以确定钎焊界面主要由针状 $\alpha$ 相组成。在钎焊温度920 $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间90 min时,钎焊界面EBSD分析结果如图11所示,由物相分布图可以看出,Ti-Cu金属间化合物分布于界面处,且Ti-Cu金属间化合物的比例由钎焊保温时间15 min时的16.1%降低至3.0%,钎缝区金属间化合物显著减少。

## 2.2 平压性能

钎焊温度920 $^{\circ}\text{C}$ ,钎焊时间5、15、30、60和90 min时TC4钛合金仿莲房特征芯体夹层结构平压强度试验测试结果如表4所示。由表4随着钎焊时间保温时间从15 min升至90 min时,TC4钛合金仿莲房特征芯体夹层结构的平压强度逐渐增加,90 min时夹层结构平压强度均值为15.14 MPa。

表5为钎焊温度920 $^{\circ}\text{C}$ 时不同钎焊时间钎焊界面反应区宽度。可以看出,随钎焊时间的延长,钎焊界面反应温度增加,反应区宽度由15 min的80 $\mu\text{m}$ 增加到90 min的180 $\mu\text{m}$ 这与平压强度的变化趋势一致。

## 3 分析讨论

综合对比钎焊时间15、30、60和90 min时钎焊界面显微组织可以看出,在相同的钎焊温度(920 $^{\circ}\text{C}$ )下,钎焊时间对钎焊界面显微组织影响显著。当钎焊保温时间较短(15 min)时,钎焊界面主要为含有金属间化合物的凝固钎料层和针状 $\alpha$ 组织,其中金属间化合物呈块状分布于钎缝区;随着钎焊保温时间的增加,钎焊界面的金属间化合物含量逐渐减少,分布于针状 $\alpha$ 相的界面处,金属间化合物的形态和分布特征发生显著变化。

Ti-Zr-Cu-Ni钎料中的Cu和Ni元素为 $\beta$ 相稳定元素,

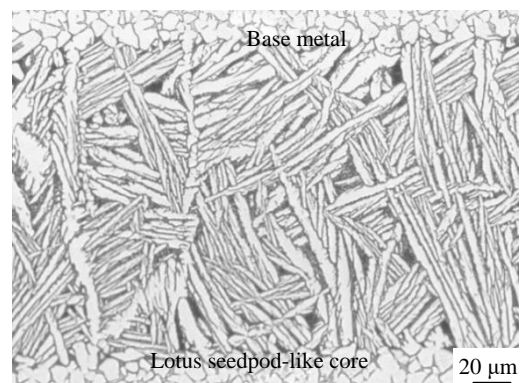


图10 钎焊温度920 $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间90 min时钎焊界面微观组织  
Fig.10 Microstructure of brazing interface at the brazing temperature of 920 $^{\circ}\text{C}$  for 90 min



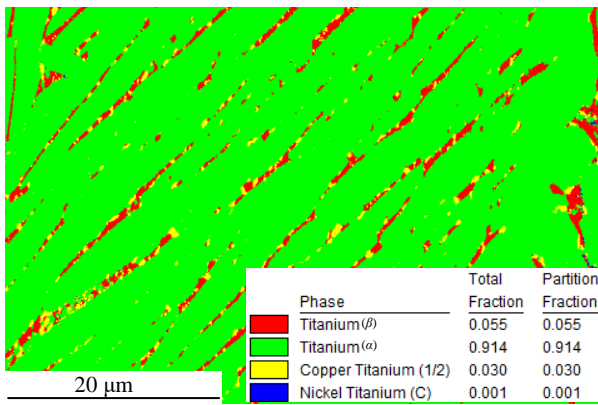


图 11 钎焊温度 920 °C、保温时间 90 min 时钎焊界面 EBSD 照片及分析结果

Fig.11 EBSD image and analysis result of brazing interface at the brazing temperature of 920 °C for 90 min

表 4 钎焊温度 920 °C 下不同钎焊时间的仿莲房特征芯体夹层结构平压强度

Table 4 Flat compression strength of brazed sandwich structures at the brazing temperature of 920 °C for different brazing time

| Brazing time/min | Flat compression strength/MPa |
|------------------|-------------------------------|
| 15               | 12.63                         |
| 30               | 13.43                         |
| 60               | 14.77                         |
| 90               | 15.14                         |

表 5 在钎焊温度 920 °C 下不同钎焊时间的钎焊界面反应区宽度

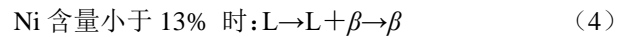
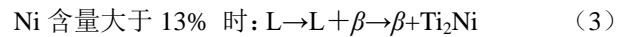
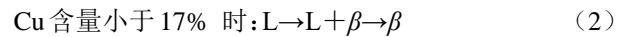
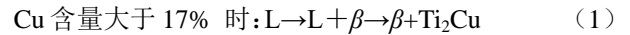
Table 5 Brazing interface width the at brazing temperature of 920 °C for different brazing time

| Brazing time/min | Brazing interface width/ $\mu\text{m}$ |
|------------------|--|
| 15               | 80                                     |
| 30               | 105                                    |
| 60               | 160                                    |
| 90               | 180                                    |

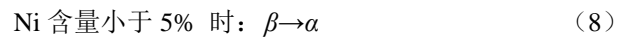
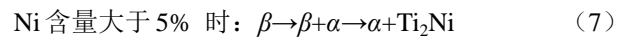
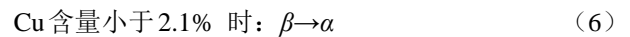
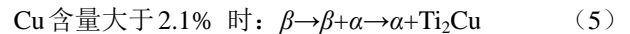
具有扩大  $\beta$  相区或降低  $\beta$  相相变点的作用<sup>[17]</sup>, 钎焊过程中, Cu 和 Ni 元素与 TC4 母材发生扩散反应, Cu 和 Ni 元素扩散至母材中。钎焊保温结束后, 液态钎缝界面发

生凝固和固态相变: 液相 $\rightarrow\beta$ 相区 $\rightarrow\alpha$ 相区。

在液相凝固时, 由 Ti-Cu 和 Ti-Ni 的二元相图可知, 当 Cu 和 Ni 在  $\beta$  相中分别超过约 17% 和 13% (质量分数, 下同) 时, 发生共晶反应生成  $\beta$  相与  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  和  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  化合物, 分别如式(1)和(3)所示<sup>[18,19]</sup>。



随着冷却过程的进行, 温度进一步降低时  $\beta$  相发生向  $\alpha$  相的固态相变。由于 Cu 和 Ni 在  $\alpha$  相中的溶解度远小于在  $\beta$  相中溶解度, 当 Cu 和 Ni 含量分别超过 2.1% 和 5% (质量分数) 时,  $\beta$  相向  $\alpha$  相转变时发生共析反应生成  $\text{Ti}_2\text{Cu}$  和  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  金属间化合物, 分别如式(5)和(7)所示<sup>[10]</sup>。



当钎焊保温时间较短(15 min)时, 钎料熔化后, 液态钎料中 Cu 和 Ni 元素与母材反应时间较短, 钎料中 Cu 和 Ni 向母材中的扩散反应不充分, 钎缝区局部 Cu 和 Ni 元素富集导致其含量超过共晶成分点, 钎焊保温结束后液态钎缝凝固时发生共晶反应, 生成大量块状金属间化合物; 随后  $\beta$  相向  $\alpha$  相的固态相变时, 因  $\beta$  相中的 Cu 和 Ni 元素含量较多, 元素含量超过共析成分点, 继续发生共析反应, 进一步生成金属间化合物。

当钎焊保温时间较长(90 min)时, 钎焊保温阶段液态钎料中 Cu 和 Ni 元素与母材反应时间增加, 钎料中 Cu 和 Ni 元素向母材中的扩散反应深度显著增加, 从而 Cu 和 Ni 元素在液态钎料中的含量显著降低, 其元素含量小于共晶成分点, 钎焊保温结束后液态钎缝凝固时 Cu 和 Ni 元素全部固溶于  $\beta$  相中, 避免大量块状金属化合物生成; 随后  $\beta$  相向  $\alpha$  相的固态相变时, 生成针状  $\alpha$  相, Cu 和 Ni 元素固溶于剩余  $\beta$  相中, 随着  $\beta$  相向  $\alpha$  相的转变,  $\beta$  相逐渐减少导致 Cu 和 Ni 元素在  $\beta$  相中的成分比例逐渐增加, 当 Cu 和 Ni 元素含量超过临界成分点时发生式(5)和式(7)共析反应, 在针状  $\alpha$  组织界面处生成金属间化合物。

随着钎焊时间保温时间从 15 min 增加至 90 min 时, TC4 钛合金仿莲房特征芯体夹层结构的平压强度逐渐增加。主要原因在于: 增加钎焊保温时间, 可以促使液态钎料元素向母材的扩散反应, 降低 Cu 和 Ni 元素在钎缝界面的成分富集, 且促进 Cu 和 Ni 元素在钎缝处成分均匀化, 从而避免大量金属间化合物的形成, 提高钎焊界面力学性能。

## 4 结 论

1) 采用 TiZrCuNi 钎料, 钎焊温度 920 °C, 保温时间 90 min 时, 实现了 TC4 钛合金仿莲房特征芯体钎焊, 钎焊后界面焊合率良好, 界面显微组织为均匀针状  $\alpha$  组织和少量界面金属间化合物, 夹层结构平压强度均值为 15.14 MPa。

2) 当钎焊保温时间较短(15 min)时, 钎料熔化后, 液态钎料中 Cu 和 Ni 元素与母材反应时间较短, 钎料中 Cu 和 Ni 向母材中的扩散反应不充分, 钎缝区局部 Cu 和 Ni 元素富集导致其含量超过共晶成分点, 钎焊保温结束后液态钎缝凝固时发生  $L \rightarrow \beta + \text{Ti}_2\text{Cu}/\text{Ti}_2\text{Ni}$  共晶反应, 生成大量块状金属间化合物; 随后发生  $\beta$  相向  $\alpha$  相的固态相变时, 因  $\beta$  相中的 Cu 和 Ni 元素较多, 元素含量超过共析成分点, 继续发生共析反应, 进一步在针状  $\alpha$  组织界面处生成针状金属间化合物。

3) 当钎焊保温时间较长时(90 min), 钎焊保温阶段液态钎料中 Cu 和 Ni 元素与母材反应时间增加, 钎料中 Cu 和 Ni 元素向母材中扩散反应深度显著增加, 从而 Cu 和 Ni 元素在液态钎料中的含量显著降低, 其元素含量小于共晶成分点, 钎焊保温结束后液态钎缝凝固时 Cu 和 Ni 元素全部固溶于  $\beta$  相中, 随后  $\beta$  相向  $\alpha$  相的固态相变转变时,  $\beta$  相逐渐减少导致 Cu 和 Ni 元素在  $\beta$  相中的成分比例逐渐增加, 发生  $\beta \rightarrow \alpha + \text{Ti}_2\text{Cu}/\text{Ti}_2\text{Ni}$  共析反应, 在针状  $\alpha$  组织界面处生成金属间化合物。

4) 随着钎焊时间保温时间从 15 min 升至 90 min 时, 钎焊界面金属间化合物减少, TC4 钛合金仿莲房特征芯体夹层结构的平压强度逐渐增加。

### 参考文献 References

- [1] Elangovan R, Olsen R F, Reynolds N D. *26th International Congress of the Aeronautical Sciences*[C]. Anchorage, Alaska: ICAS, 2008: 1
- [2] Yue Xishan(岳喜山), Ouyang Xiaolong(欧阳小龙), Hou Jinbao(侯金宝). *Aeronautic Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2009, 10: 96
- [3] Shang Lei(商磊), Xue Qichao(薛启超), Yang Dachun(杨大春) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(2): 567
- [4] Jing Yongjuan(静永娟), Li Xiaohong(李晓红), Yue Xishan(岳喜山). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2012, 13: 137
- [5] Zhao Li(赵丽). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015
- [6] Yang Yu(杨宇). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [7] Oruganti R K, Ghosh A K. *Acta Materialia*[J], 2016, 25(3): 774
- [8] Yang Hui(杨辉). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010
- [9] Wang Fengbiao(王凤彪), Hou Bo(侯博), Yuan Kai(袁凯) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(1): 326
- [10] Koch L C, Pagel L L. *High Heat Flux Actively Cooled Honeycomb Sandwich Structural Panel for a Hypersonic Aircraft*[R]. USA: NASA, 1978
- [11] Deng Yunhua(邓云华), Tao Jun(陶军), Yue Xishan(岳喜山) *et al. Chinese Patent*(中国专利), 201910505693.2[P], 2019
- [12] Deng Yunhua(邓云华), Yue Xishan(岳喜山), Tao Jun(陶军) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(11): 139
- [13] Gao Xingqiang(高兴强), Si Haoxue(佻好学), Yue Xishan(岳喜山) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2015, 11: 109
- [14] Huang X, Richards N L. *Welding Journal*[J], 2004, 83(3): 73
- [15] Ganjeh E, Sarkhosh H, Bajgholi M E *et al. Materials Characterization*[J], 2012, 71: 31
- [16] Wang W T, Fan M Y, Li J L *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2016, 25(3): 774
- [17] Chang C T, Du Y C, Shiue R K *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 420: 155
- [18] Leyens C, Peters M. *Titanium and Titanium Alloys*[M]. Weinheim: Wiley-VCH Press, 2003
- [19] Zhang Zhu(张翥), Wang Qunjiao(王群娇), Mo Wei(莫畏). *Metallurgy and Heat Treatment of Ti Alloy*(钛的金属学与热处理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009

## Brazing Interface Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloy Lotus-like Core Sandwich Structure

Deng Yunhua, Wang Wensen, Tao Jun

(Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract:** TC4 titanium lotus-like core sandwich structure was brazed by TiZrCuNi brazing filler metal. Effect of brazing parameters on brazing interface microstructure and mechanical properties of titanium lotus-like core sandwich structure was investigated. The results show that titanium sandwich structure with excellent brazed quality is attained at the brazing temperature of 920 °C for holding 90 min. The microstructure of the brazing interface consists of acicular  $\alpha$  structure and Ti-Cu intermetallic compounds, and the average flat compressive strength of the sandwich structure is 15.14 MPa. When the brazing holding time is short (15 min), the diffusion reaction time between Cu and Ni in the liquid solder and the base metal is short, and the diffusion reaction of Cu and Ni into the base metal is not sufficient. The enrichment of Cu and Ni in the brazing interface leads to the content of Cu and Ni exceeding the eutectic composition point, which makes eutectic reaction occur during the solidification process of liquid solder joint after brazing, and thus massive intermetallic compounds are formed. The brazing interface is mainly composed of solidified brazing filler metal containing massive intermetallic compounds and acicular  $\alpha$  structure. With the increase of brazing time, the diffusion reaction time of Cu and Ni elements in liquid solder and base metal increases, and the diffusion reaction depth of Cu and Ni elements into base metal increases significantly. As a result, the content of Cu and Ni in the liquid solder decreases significantly, and the element content is less than the eutectic composition point. Cu and Ni are all dissolved in  $\beta$  phase during the solidification process of the liquid brazing seam. When the  $\beta$  phase changes to  $\alpha$  phase, the acicular  $\alpha$  phase is formed by eutectoid reaction, and intermetallic compound is formed at the interface of acicular  $\alpha$  structure. When the brazing time increases from 15 min to 90 min, the flat compressive strength of TC4 titanium sandwich structure increases gradually due to the decrease of intermetallic compounds in the brazing interface.

**Key words:** lotus-like core; vacuum brazing; brazing interface microstructure; mechanical properties

---

Corresponding author: Deng Yunhua, Ph. D., Senior Engineer, Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, P. R. China, Tel: 0086-10-85701343, E-mail: yunhuadeng@buaa.edu.cn