

# TC4 钛合金喷嘴真空钎焊工艺研究

齐齐哈尔二机床(集团)有限责任公司 (黑龙江 161005) 马军龙

**【摘要】** 采用 Ti-Zr-Ni-Cu 钎料实现了 TC4 钛合金喷嘴的真空钎焊, 分析了不同焊接参数对接头抗拉强度的影响, 并借助扫描电镜 (SEM) 和能谱分析 (EDS) 等方法研究了钎焊接头界面结构, 确定了界面反应产物及其形态分布。研究表明, 在界面反应层中生成四种产物: 灰白色块状 Ti 和 Al 的化合物相, 深灰色 Ti 基固溶体相, 以及由 Ti 基固溶体和脆性化合物构成灰白色突起相和浅灰色骨架相。随着钎焊温度和加热时间的增加, 接头抗拉强度呈现先增大再降低的趋势, 当钎焊温度为 940℃ 和保温时间为 15min 时, 获得最大抗拉强度为 412MPa 的钎焊接头。

钛合金因其优良的性能, 被广泛应用于航空、航天和其他工业领域。在一些钛合金复杂结构的制造过程中, 由于钎焊连接具有的独特优势而越来越受到重视。在所有的钛合金中, 用量最大的是 TC4。TC4 钛合金中钛的含量很高, 钛是活性很强的金属材料, 在高温下容易与 N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 反应, 并同其他许多金属反应生成脆性金属间化合物。由于 TC4 真空钎焊可以避免高温情况下, 氧、氮、氢等气体元素对 TC4 合金钎焊性能的影响, 所以近年来 TC4 真空钎焊技术的应用越来越广泛。

航天发动机的推力室, 要求重量轻, 结构紧凑, 强度高, 耐热性能好, 工作可靠。因此, 大多数空间工作的中小推力发动机都采用钛合金的结构设计方案。航天发动机燃料加注喷嘴是发动机的重要组成部分, 一般由 TC4 钛合金加工制造而成, 由于其具有复杂精密的薄壁结构, 故在焊接工艺上若采用脉冲自动焊、激光焊等方法, 则焊接时容易引起飞溅、热变形等, 导致喷嘴小孔堵塞或喷嘴射流撞击精度恶化, 最终会影响发动机的工作性能。

综合分析 TC4 钛合金的焊接性以及喷嘴的结构, 我们认为真空钎焊连接是喷嘴最适宜的连接方法。钛合金钎焊用钎料中常用的有银基钎料、铝基钎料和钛基钎料, 银基钎料和铝基钎料虽有良好的润湿性和一定的力学性能, 但焊缝与母材相比, 其力学

性能和化学性能差距较大; 钛基钎料与钛合金的冶金相容性好, 可以获得高强度的接头, 是钎焊钛合金的优质钎料。因此, 本研究采用较为常用的 Ti-Zr-Ni-Cu 钎料, 对 TC4 钛合金喷嘴进行了真空钎焊工艺研究。

## 1. 试验材料和方法

试件母材为 TC4 钛合金, 其主要化学成分如表 1 所示。试验采用的钎料为 Ti-Zr-Ni-Cu 非晶钎料, 其化学成分如表 2 所示。

表 1 TC4 钛合金化学成分 (质量分数) (%)

| Al      | V       | Fe    | Si    | C     | N     | H      | O     | Ti |
|---------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|----|
| 5.5~6.8 | 3.5~4.5 | ≤0.30 | ≤0.15 | ≤0.10 | ≤0.05 | ≤0.015 | ≤0.20 | 余量 |

表 2 钎料化学成分 (质量分数) (%)

| 钎料                            | Ti | Zr | Ni | Cu | 形态  |
|-------------------------------|----|----|----|----|-----|
| Ti40% + Zr25% + Ni15% + Cu20% | 40 | 25 | 15 | 20 | 非晶带 |

试验前, 用火花放电切割方法将 TC4 钛合金切成长 30mm 和直径为 8mm 的棒状试件 (用作抗拉试件), 15mm × 15mm × 2mm 和 5mm × 5mm × 2mm 的片状试件 (用作金相分析试验), 分别按照图 1、图 2 所示方式装配拉伸试件和界面分析试件。由于在母材试件表面存在着影响连接质量的氧化膜和吸附层, 因此要在焊前进行必要的去膜处理。试验所采用的去膜方法是手工机械去膜方法, 即用 240<sup>#</sup>、400<sup>#</sup>、

600<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、1000<sup>#</sup>水砂纸对试件表面进行逐级磨光，再用丙酮或无水乙醇清洗。然后在真空度优于  $2 \times 10^{-3}$  Pa 的钎焊炉内进行钎焊，同时用石墨夹具对试样进行装配和固定。焊接完成后，对钎焊对接试样进行抗拉强度测试，对焊后的试样用扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对钎焊接头组织进行观察分析。

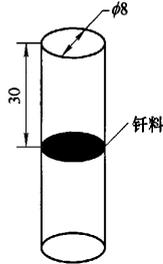


图1 拉伸试件装配

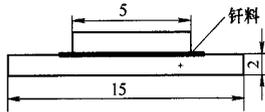


图2 界面分析试件装配

## 2. 试验结果及分析

(1) 钎焊接头的抗拉强度 首先是钎焊温度对接头抗拉强度的影响：保温时间为 15min，不同钎焊温度对接头强度的影响如图 3 所示。从图中可以看出，随着钎焊温度的升高，接头的抗拉强度先增大后减小。当钎焊温度为 940℃ 时，接头的抗拉强度最高达到 412MPa。

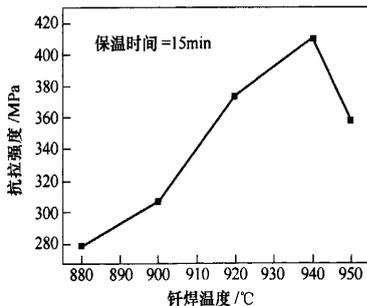


图3 钎焊温度对接头抗拉强度的影响

接头强度随钎焊温度产生这种具有峰值的变化是由界面反应程度决定的。当钎焊温度较低时，母材与钎料之间的原子溶解、扩散、固溶和反应不充分，难以实现良好的冶金结合，因而接头强度很低。

随着钎焊温度的升高，原子溶解、扩散、固溶和反应明显增加，因而接头强度提高。当钎焊温度达到 940℃ 左右时，不但界面反应比较充分，而且反应层的金属间化合物数量也较适中，有效地实现了母材与钎料的冶金结合，增加了接头的抗拉强度，于是接头强度达到最大值。当钎焊温度达到 940℃ 以后，随着温度升高，钎料对母材的溶蚀增加，接头界面厚度增加，界面上金属间化合物增多，这就是钎焊温度达到 950℃ 时接头的抗拉强度突然降低的原因。

其次保温时间对接头抗拉强度的影响：钎焊温度为 940℃，不同保温时间对接头强度的影响如图 4 所示。可以看出，随着保温时间的增加，接头的抗拉强度也是先增大后减小。当保温时间为 15min 时，接头的抗拉强度最高，达到 412MPa。

同钎焊温度的影响相类似，保温时间对 TC4 钛合金接头强度的影响也主要通过界面反应和元素扩散的情况，如图 4 所示。当保温时间比较低时，钎料与母材之间的界面反应程度较低，难以实现有效的冶金结合，因而接头强度较低。而当保温时间过长时，界面反应过于激烈，界面上生成了过多的金属间化合物，造成接头强度降低的原因。只有保温时间合适，界面反应既充分，金属间化合物的量又适中，接头的强度才较高。

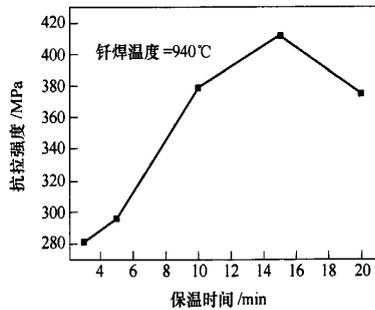
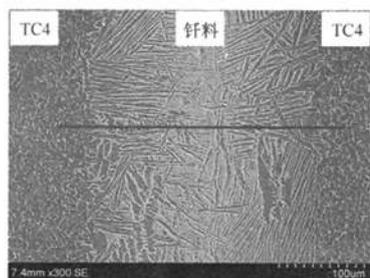


图4 保温时间对接头抗拉强度的影响

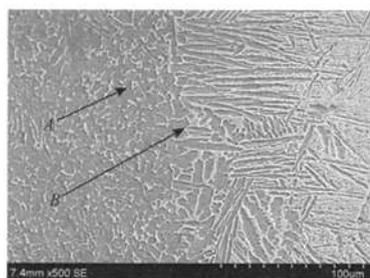
因此，采用 Ti-Zr-Ni-Cu 钎料钎焊 TC4 钛合金的最佳钎焊温度为 940℃、保温时间为 15min，此时接头抗拉强度为 412MPa。

(2) 钎焊接头组织分析 图 5 为 TC4 钛合金接头的界面组织结构。由图 5a 中可以看出，TC4 钛合金接头结合较好。由图 5b、图 5c 中可知，钎焊接头界面中共有四种相生成。为了方便分析，将弥散分布的不规则灰白色块状相称为 A，而将钎料与母材交

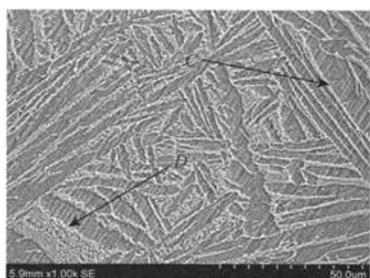
界面处的浅灰色骨架状相称为 *B*，把深灰色的基体相称为 *C*，同时称焊缝中心成片的灰白色突起相为 *D*。从图中可见，这个界面的过渡层厚度较为均匀，界面是一个较宽的区间。



(a) 整个界面



(b) 接头界面

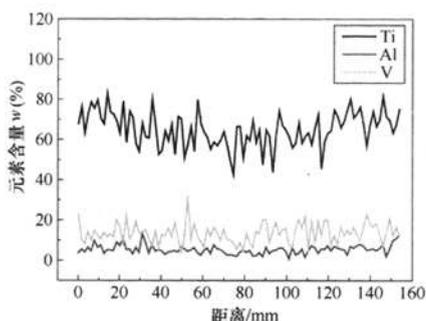


(c) 焊缝中心

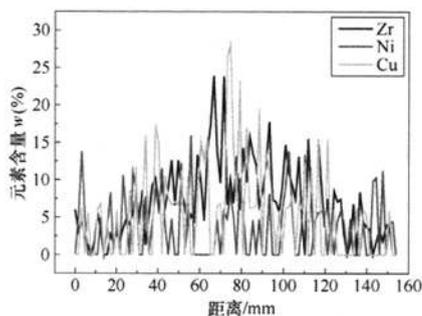
图5 TC4钛合金接头界面 ( $T=940^{\circ}\text{C}$ ,  $t=15\text{min}$ )

对钎焊温度为  $940^{\circ}\text{C}$  和保温时间  $15\text{min}$  的 TC4 钛合金接头进行了线扫描逐点能谱分析，扫描位置如图 5a 所示蓝线位置，得到各元素沿焊缝含量分布结果如图 6 所示。

由图 6a 可知，从母材到焊缝的中心位置，Ti、Al 和 V 元素的含量逐渐减少，证明母材中这三种元素向钎缝中扩散，但扩散的不够充分；而从 6b 可知 Cu 和 Zr 元素的含量逐渐增加，说明焊缝中的 Cu 和 Zr 元素也向母材扩散，同样扩散的也不够充分，同时，由 Ni 元素在整个界面的分布都较均匀可知，Ni



(a) Ti、Al 和 V 元素



(b) Ni、Cu 和 Zr 元素

图6 TC4钎焊接头线扫描结果 ( $T=940^{\circ}\text{C}$ ,  $t=15\text{min}$ ) 元素扩散的速度最快。

表 3 中列出了图 5 中 TC4 合金接头各反应产物中元素含量中 A~D 各点 EDS 分析的结果。从表 3 中可见，图 5a 中的 A 相主要由 Ti 和 Al 两种元素构成，还有极少量的 Ni 和 Cu 等元素，因此认为灰白色块状相 A 主要为 Ti 和 Al 的化合物相。B 和 D 相的形态和元素组成较相似，主要由 Ti 元素构成，并在其中溶解少量的 Al、V、Ni、Cu 和 Zr 元素，但与更靠近焊缝中心的灰白色突起相 D 相比，浅灰色骨架 B 的 Cu 和 Zr 元素的含量明显减少了，由此可以判断 B 和 D 相均由 Ti 固溶体和脆性化合物构成。图中 C 相为基体的 Ti 固溶体相，但与母材的元素含量相比其中溶入了少量的 Ni、Cu 和 Zr 元素。

表3 各反应产物化学成分 (质量分数) (%)

| 反应产物      | Ti    | Al    | V    | Ni   | Cu    | Zr   |
|-----------|-------|-------|------|------|-------|------|
| A (灰白块)   | 82.67 | 14.01 | 0.21 | 1.51 | 1.38  | 0.22 |
| B (浅灰色骨架) | 70.53 | 6.59  | 7.25 | 9.08 | 5.32  | 1.23 |
| C (深灰色基体) | 79.58 | 9.39  | 6.59 | 2.84 | 1.40  | 0.20 |
| D (灰白色突起) | 65.08 | 7.61  | 4.13 | 6.28 | 11.54 | 5.36 |

综合以上分析，可以确定在  $T=940^{\circ}\text{C}$ 、 $t=15\text{min}$  时在 TC4 钛合金钎焊界面共有 A、B、C 和 D

# 低合金高强钢 SA 517Gr. F 的焊接

张家港市技术监督研究所 (江苏 215632) 黄志东  
张家港中集圣达因低温装备有限公司 (江苏 215632) 王淑华

**【摘要】** 压力容器为特殊行业,对焊缝性能提出了更高的要求,而 SA 517Gr. F 的焊接性能相对较差,且焊后热处理温度对焊缝的冲击韧性影响大。通过多次焊接试验,确定了比较合适的焊接工艺及焊后热处理工艺,保证了焊缝的性能。

近期我公司生产了一批 ASME 产品,母材为 SA 517Gr. F,属低合金调质高强钢,此类母材在压力容器上的使用在国内还属首次。SA 517Gr. F 焊接性能尚可,但要成功地焊接这批产品,必须掌握母材的焊接特性,拟定正确的焊接工艺,并严格按工艺实施。

## 1. 材料

(1) 材料性能 该材质的主要化学成分及力学性能如表 1、表 2 所示。

表 1 SA 517Gr. F 化学成份 (质量分数) (%)

| C.          | Si          | Mn          | P           | S           |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.1 ~ 0.22  | 0.13 ~ 0.37 | 0.55 ~ 1.1  | ≤0.035      | ≤0.035      |
| Ni          | Mo          | Cr          | V           | Cu          |
| 0.67 ~ 1.03 | 0.36 ~ 0.64 | 0.36 ~ 0.69 | 0.02 ~ 0.09 | 0.12 ~ 0.53 |

四种相生成。

(2) TC4 钛合金钎焊的应用 采用以上 Ti-Zr-Ni-Cu 钎料及最佳焊接参数,实现了 TC4 钛合金航天发动机喷嘴的钎焊连接。经过地面试车考核验证了钎焊接头的可靠性,并将其应用于某型号航天发动机。

## 3. 结语

(1) 在钎焊接头的界面反应层中共生成四种产物:灰白色块状 Ti 和 Al 的化合物相,深灰色 Ti 基固溶体相,以及由 Ti 基固溶体和脆性化合物构成灰

表 2 力学性能

| 板材规格 /mm | 屈服强度 /MPa | 拉伸强度 /MPa | 伸长率 $A_5$ (%) |
|----------|-----------|-----------|---------------|
| ≤65      | ≥690      | 795-930   | ≥16           |

(2) 焊接性分析 ①焊接冷裂纹:母材通过加入提高淬透性的合金元素,保证获得强度高、塑韧性好的低碳马氏体和部分下贝体。由于淬透性增加,连续冷却转变图大大右移,冷裂倾向较大,但由于低碳马氏体的形成温度较高,焊接过程中冷却速度较慢时,低碳马氏体可实现“自回火”过程,得到强度和韧性都较高的回火马氏体和回火贝氏体,避免冷裂纹的产生。但为了可靠地防止冷裂纹的产生,还必须严格控制焊接时的氢源并选择合适的焊接参数。②焊接接头的软化:焊接时,加热温度处于  $A_{c1}$  至回火温度范围的热影响区会出现强度降低即软化

白色突起相和浅灰色骨架相。

(2) 随着钎焊温度和加热时间的增加,接头抗拉强度呈现先增大再降低的趋势,当钎焊温度为 940℃ 和保温时间为 15min 时,获得最大抗拉强度为 412MPa 的钎焊接头。

(3) 采用本研究获得的最佳工艺参数及 Ti40% + Zr25% + Ni15% + Cu20% 钎料实现了 TC4 钛合金喷嘴的钎焊连接,并将其应用于某型号航天发动机。

MW (20110425)