

# 钎焊工艺参数对 C/C 复合材料/Cu/Mo/TC4 钎焊接头微观组织的影响

Effects of Brazing Parameters on Microstructures of  
C/C Composite/Cu/Mo/TC4 Brazed Joints

秦优琼, 于治水

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

QIN You-qiong, YU Zhi-shui

(School of Material Engineering, Shanghai University of  
Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**摘要:** 在钎焊温度为 820~940℃, 钎焊时间为 1~30min 的条件下, 采用 TiZrNiCu 钎料、Cu/Mo 复合中间层对 C/C 复合材料和 TC4 进行了钎焊实验。利用扫描电镜及能谱仪对接头的界面组织进行了研究。结果表明: 在较低工艺参数下, Cu/C/C 复合材料界面结构为  $\text{Cu/Cu}_{51}\text{Zr}_{14}/\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{TiCu} + \text{Cu}_2\text{TiZr}/\text{TiC}/\text{C}/\text{C}$  复合材料。随着工艺参数的提高, TiCu 和  $\text{Cu}_2\text{TiZr}$  反应相逐渐消失,  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$  新相生成, 此时的界面结构为  $\text{Cu/Cu}_{51}\text{Zr}_{14}/\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2/\text{TiC}/\text{C}/\text{C}$  复合材料。钎焊工艺参数较高时界面结构为  $\text{Cu/Cu}_{51}\text{Zr}_{14}/\text{Cu}(\text{s.s.}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2/\text{TiC}/\text{C}/\text{C}$  复合材料。随着钎焊温度的增加以及保温时间的延长, 界面反应层  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$  和 TiC 反应层厚度增加。

**关键词:** C/C 复合材料; TC4; TiZrNiCu 钎料; Cu/Mo 复合中间层; 界面组织结构

**中图分类号:** TG454    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2012)08-0078-05

**Abstract:** C/C composite and TC4 were brazed using TiZrNiCu filler metal and Cu/Mo composite interlayers at 820-940℃ for 1-30min. The interfacial microstructures were investigated by scanning electron microscopy and electron energy spectrum analysis. The results showed that the sequence of the interface structure at low brazing parameters can be described as the following:  $\text{Cu/Cu}_{51}\text{Zr}_{14}/\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{TiCu} + \text{Cu}_2\text{TiZr}/\text{TiC}/\text{C}/\text{C}$  composite. With the increased brazing parameter, TiCu and  $\text{Cu}_2\text{TiZr}$  disappeared, and  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$  appeared. The interface structure was changed to  $\text{Cu/Cu}_{51}\text{Zr}_{14}/\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2/\text{TiC}/\text{C}/\text{C}$  composite. For high brazing parameters, the interface structure was composed of  $\text{Cu/Cu}_{51}\text{Zr}_{14}/\text{Cu}(\text{s.s.}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2/\text{TiC}/\text{C}/\text{C}$  composite. The thickness of  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$  and TiC reaction layers increased with the increased brazing temperature and the prolonged holding time.

**Key words:** C/C composite; TC4; TiZrNiCu filler metal; Cu/Mo composite interlayer; microstructure

C/C 复合材料是一种碳纤维增强的碳基体复合材料, 它保留了碳和石墨的优点, 如密度低、热膨胀系数低、导热性好以及对热冲击不敏感等特性, 又克服了石墨材料强度低, 抗热震性能不足等问题。同时, C/C 复合材料制成的火箭喷管内型面烧蚀比较均匀、光滑, 没有前后烧蚀台阶或凹坑, 有利于提高喷管效率, 因此被普遍认为是目前喷管的最佳材料之一<sup>[1,2]</sup>。TC4 是一种广泛用于航空、航天的钛合金材料, 它属于  $\alpha + \beta$  型两相钛合金, 具有优异的综合性能, 易于焊接、锻造和切削加工, 通过热处理后可使其抗拉强度高达 1173MPa<sup>[3,4]</sup>。把 C/C 复合材料与 TC4 连接在一起作为火箭发动机构件可发挥它们优势互补的作用。

目前 C/C 复合材料的连接主要采用扩散焊和钎焊。扩散焊由于其连接温度高, 所获得接头强度分散性较大, 不适宜 C/C 复合材料的连接<sup>[5-7]</sup>。而钎焊的连接温度低, 接头应力小, 因此钎焊是连接 C/C 复合材料的常用方法。据报道, Ag 基钎料钎焊 C/C 复合材料接头的力学性能较好<sup>[8-12]</sup>。且本人前期采用 Ag 基钎料连接 C/C 复合材料与 TC4 时, 发现接头可以获得较好的力学性能<sup>[10,11]</sup>。然而, Ag 基钎料熔点不高, 焊后接头的使用温度一般不超过 500℃, 且其含 Ag 量高, 价格昂贵。在实际应用中, 往往需要接头承受更高的服役温度。因此, 国内外学者正在寻求能满足更高温使用的钎料, 如采用 Si,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{TiSi}_2$ , Co-Ti

系, Ni-Ti 系和 Pd-Ni 系对 C/C 复合材料进行钎焊连接<sup>[12-14]</sup>。但这些钎料的连接温度高达 1000℃ 以上, 超过了 TC4 钛合金的相变温度(980℃), 显然不适合 C/C 复合材料与 TC4 的连接。本研究使用的 TiZr-NiCu 钎料是在 Ti 的基础上加入了降熔元素 Zr, Ni 和 Cu, 其熔点在 850℃ 左右。同时, 考虑到 Ti(TC4 中的)与许多金属(或非金属)反应容易形成脆性化合物以及 C/C 复合材料、钎料和 TC4 之间热物理性能的差异易在接头界面处产生较大的残余应力。为了控制这种脆性化合物的生长, 同时又能在一定程度上缓解残余应力, 获得理想性能的接头, 在 C/C 复合材料与 TC4 中间加入 Cu/Mo 复合中间层。因此, 本工作采用活性钎料 TiZrNiCu 以及 Cu/Mo 复合中间层, 研究钎焊工艺参数对钎接头微观组织的影响。

## 1 实验材料与方法

实验采用的母材是 C/C 复合材料和 TC4 钛合金。TC4 为 Ti-6Al-4V(质量分数/% , 下同)热轧板材, 原始组织为  $\alpha+\beta$  相。实验前, 用电火花线切割的方法把 C/C 复合材料和 TC4 切割成 8mm×5mm×5mm 和 8mm×5mm×4mm 的试样。TiZrNiCu 为市售的非晶态钎料, 厚度为 30 $\mu$ m, 其成分为 Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni。试件的装配方式如图 1 所示。实验在真空炉中进行, 真空度小于  $1\times 10^{-4}$  Pa。连接温度  $T=820\sim 940^{\circ}\text{C}$ , 连接时间  $t=1\sim 30$  min。焊后接头在电

子万能试验机(Instron model 1186)上进行抗剪实验; 用扫描电镜 S-4700(SEM)对接头进行形貌观察; 并结合 EDS 能谱分析仪对界面组织进行能谱分析。

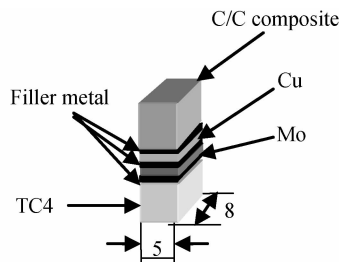


图 1 试件装配示意图

Fig. 1 Assembly schematic diagram of specimens

## 2 结果与分析

### 2.1 界面组织结构

图 2 为钎焊温度 850℃, 保温时间 5min 条件下得到的 TC4/Mo/Cu/C/C 复合材料接头的界面结构。从图 1(a) 可以看出, TiZrNiCu 钎料能很好地连接母材以及中间层, 界面结合良好, 接头中无裂纹。由于 TC4/Mo 接头以及 Mo/Cu 接头的力学性能远远优于 C/C 复合材料/Cu 接头的力学性能, 且接头断裂主要发生在 C/C 复合材料与钎料的界面或 C/C 复合材料中, 因此, 这里主要分析 Cu/钎料/C/C 复合材料的界面结构。

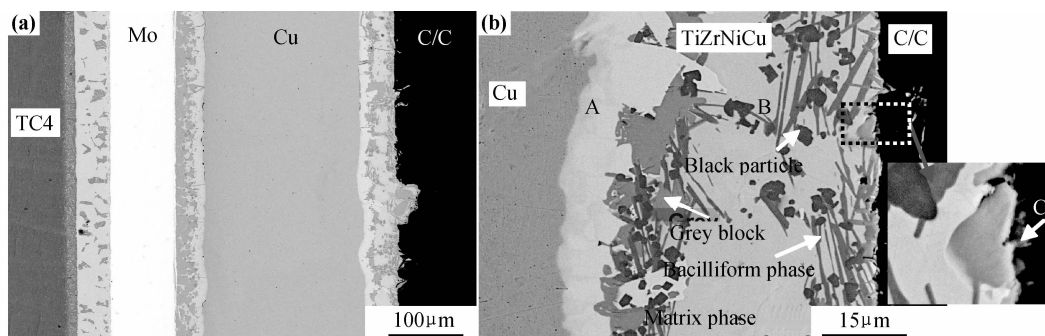


图 2 C/C 复合材料/TC4 接头的界面结构(850℃/5min)

(a) 整个界面; (b) Cu/C/C 复合材料界面

Fig. 2 Microstructure of the brazed C/C composite/TC4 joint(850℃/5min)

(a) whole interface; (b) Cu/C/C composite interface

当钎焊工艺较低时(钎焊温度 850℃, 保温时间 5min), C/C 复合材料与 Cu 连接接头界面如图 2(b) 所示。接头主要有 3 个反应层, A 层为靠近 Cu 侧不规则的白带状物, 厚度在十几个微米; B 层为焊缝中心, 它由较多相组成, 主要有黑色颗粒(black parti-

cle)、灰块(grey block)、杆状物(bacilliform phase)以及基底相(matrix phase); 另外, 在 C/C 复合材料与钎料的界面, 在高倍照片下还可以看到一个非连续的反应层(C 层), 此相在钎焊工艺参数较高时能够形成连续的反应层。各反应层的能谱分析结果如表 1 所示。

白色物 A 层中主要含有 Cu 元素和 Zr 元素。这是由于 Cu 在 Zr 中的溶解焓(−67.8kJ/mol)低于 Cu 在 Ti 中的溶解焓(−9.0kJ/mol),而 Cu 与 Ni 无限固溶,其溶解焓接近于零。因此,Cu 很容易溶解于 Zr 中生成 Cu 和 Zr 的化合物,A 层中 Cu 原子与 Zr 原子的百分比接近  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$ ,根据 Cu-Zr 相图,此相可能为  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$ 。

B 层中黑色颗粒中含有较多的轻原子,能谱分析发现其含 Ti 量较高,达到 59.04%(原子分数),且其 Ti:(Cu+Ni)的原子百分比接近 2:1,因此黑色颗粒的成分可表示为  $\text{Ti}_2(\text{Cu},\text{Ni})$ ;B 层中大块的灰块主要含有 Ti,Cu 和 Ni,且其 Ti:(Cu+Ni)的原子百分比接近 1:1,此相可能为  $\text{Ti}(\text{Cu},\text{Ni})$  相;B 层中杆状物

主要含有 Ti 和 Cu,且其 Ti 和 Cu 原子百分比为 1:1,可能为  $\text{TiCu}$ ;B 层中的基底相中 Cu,Ti 和 Zr 含量较高,根据 Ti-Zr-Cu 相图,可能为三元化合物  $\text{Cu}_2\text{TiZr}$ 。Arroyave 证实了有这种  $\text{Cu}_2\text{TiZr}$  三元化合物的存在<sup>[15]</sup>。

C 层厚度较薄,能谱分析时其成分可能含有靠近 C 层其他层中的成分,但与其他相的能谱结果比较发现,C 层中主要含有的是 Ti 和 C,而 Zr,Cu 和 Ni 元素含量较少。由于活性元素 Ti(或 Zr)很容易与 C 反应生成碳化物(这也是产生连接的根本原因),根据表 1 可知,钎料中的 Zr 很容易溶解到 Cu 中,聚集到 C/C 复合材料侧的 Zr 含量较少,因此,认为这层中几乎没有生成  $\text{ZrC}$  或者是含量较少,最后确定 C 层为 TiC 相。

表 1 C/C 复合材料/Cu 接头界面处各区能谱分析结果 (850℃/5min)

Table 1 EDS results of each zone at the brazed C/C composite/Cu joint (850℃/5min)

Layer	Atom fraction/%					Possible phase
	Ti	Zr	Cu	Ni	C	
A	2.9	19.9	73.8	3.4	—	$\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$
B(black particle)	59.0	5.7	18.6	16.7	—	$\text{Ti}_2(\text{Cu},\text{Ni})$
B(grey block)	41.3	6.5	35.4	16.8	—	$\text{Ti}(\text{Cu},\text{Ni})$
B(bacilliform phase)	44.7	2.8	49.6	2.9	—	TiCu
B(matrix phase)	19.2	21.2	47.7	11.9	—	$\text{Cu}_2\text{TiZr}$
C	17.1	3.9	1.7	0.3	77.0	TiC

当钎焊工艺参数升高时,接头生成了其他的反应相。图 3 为钎焊温度 900℃、保温时间 10min 以及钎焊温度 920℃、保温 5min 时 C/C 复合材料/Cu 接头的界面结构。从图 3(a)可以看出,钎缝中心的杆状物( $\text{TiCu}$ )以及类似于基底的相( $\text{Cu}_2\text{TiZr}$ )已经不存在。接头仍然可分为 3 个层。A 层为靠近 Cu 侧存在的不规则白色带状物层;B 层为焊缝中心由许多化合物组成的层;C 层为 C/C 复合材料与钎料界面的反应层。

当钎焊工艺参数继续升高时(钎焊温度 920℃、保温时间 5min),C/C 复合材料/Cu 接头界面反应产物也发生了明显的变化。接头中反应相的种类变少,A 层为靠近 Cu 侧白色的反应层;B 层为焊缝中心的反应层,但焊缝中 A 层与 B 层的界限已经不存在,发生了相互渗透;另外在 C/C 复合材料与钎料的界面,还存在一个黑色带状物,此层为 C 层,在钎焊工艺参数较高时 C 层的厚度明显增加。

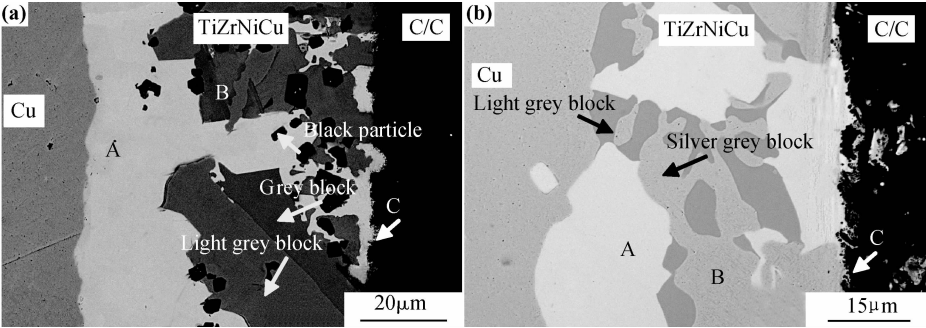


图 3 C/C 复合材料/Cu 接头的界面结构 (a)900℃/10min;(b)920℃/5min

Fig. 3 Microstructure of the brazed C/C composite/Cu joint (a)900℃/10min;(b)920℃/5min

表 2 和表 3 给出了钎焊温度 900℃、保温时间 10min 以及钎焊温度 920℃、保温 5min 时 C/C 复合材

料/Cu 接头处各反应层中反应相的平均元素含量。从表 2 可以看出,A 层中白色带状物,B 层中黑色颗粒和

灰块以及 C 层的薄黑带与钎焊工艺参数较低时的成分差别不大,因此这些反应产物分别为  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$ ,  $\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni})$ ,  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})$  和  $\text{TiC}$ 。在焊缝中心,出现了一个新的相,如图 3(a)中 B 层的浅灰块(light grey

block),能谱分析其成分为 Cu, Ti 和 Ni,  $\text{Ti} : (\text{Cu} + \text{Ni})$  的原子百分比接近 1 : 2,为  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$ 。在后面分析中发现在较高工艺参数下也有这种相的存在。C 层能谱分析发现主要含有 Ti 和 C,此层为  $\text{TiC}$  相。

表 2 C/C 复合材料/Cu 接头界面处各区能谱分析结果(900℃/10min)  
Table 2 EDS results of each zone at the brazed C/C composite/Cu joint (900℃/10min)

Layer	Atom fraction/%					Possible phase
	Ti	Zr	Cu	Ni	C	
A	3.1	20.1	74.4	2.4	—	$\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$
B(black particle)	59.4	4.3	19.5	16.8	—	$\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni})$
B(grey block)	41.2	4.2	42.2	12.4	—	$\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})$
B(light grey block)	29.6	2.8	53.5	14.1	—	$\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$
C	28.9	1.9	1.7	0.2	67.3	$\text{TiC}$

表 3 C/C 复合材料/Cu 接头界面处各区能谱分析结果 (920℃/5min)  
Table 3 EDS results of each zone at the brazed C/C composite/Cu joint (920℃/5min)

Layer	Atom fraction/%					Possible phase
	Ti	Zr	Cu	Ni	C	
A	3.5	18.6	74.6	3.3	—	$\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$
B(light grey block)	29.6	2.8	53.5	14.1	—	$\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$
B(silver grey block)	1.6	3.4	94.6	0.4	—	$\text{Cu}(\text{s. s})$
C	29.2	1.0	5.3	0.4	64.1	$\text{TiC}$

从表 3 可以看出,A 层中主要为 Cu 和 Zr,其原子百分比接近  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$  的成分;B 层中浅灰块主要含有 Cu, Ti 和 Ni,  $\text{Ti} : (\text{Cu} + \text{Ni})$  的原子百分比接近 1 : 2,根据 Ti-Cu-Ni 三元相图,可能为  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$ ;B 层中银灰块(silver grey block)主要为 Cu,由于钎焊温度较高,导致大量 Cu 向钎料中溶解,反应结束后残留在钎缝,为  $\text{Cu}(\text{s. s})$ ;C 层能谱分析发现主要含有 Ti 和 C,与其他参数相似,此层为  $\text{TiC}$  相。

2.2 钎焊工艺参数对接头界面结构的影响

图 4 为不同钎焊工艺条件下 C/C 复合材料/Cu 接头的界面结构。通过图 2(b),图 4(a)和 4(c)以及图 3(b)可以看出,随着钎焊温度增加,接头的界面结构发生了一定程度的变化。对于靠近 Cu 侧  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$  白色层,当钎焊温度较低时(850℃),其厚度较薄,随着钎焊温度增加, $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$  反应层厚度有所增加,特别是当温度较高时(920℃),部分区域深入到焊缝中心;对于焊缝中心,随着钎焊温度增加,焊缝中心的黑色颗粒  $\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni})$ 、灰块  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})$ 、杆状物  $\text{TiCu}$  以及基底相  $\text{Cu}_2\text{TiZr}$  明显减少,部分相逐渐消失,在温度较高时开始出现新的浅灰块  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$  和银灰块  $\text{Cu}(\text{s. s})$  生成;在 C/C 复合材料侧的  $\text{TiC}$  相随着钎焊温度的增加由断续的颗粒状逐渐变成连续的  $\text{TiC}$  薄层。

通过图 4(b)~(d)和图 3(a)可以看出,随着保温时间的延长, $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$  反应层厚度有所增加;钎缝中心焊缝中心的黑色颗粒  $\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni})$ 、灰块  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})$ 、

杆状物  $\text{TiCu}$  以及基底相  $\text{Cu}_2\text{TiZr}$  明显减少,部分相逐渐消失,在保温时间较长时开始出现新的浅灰块  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$ ;在 C/C 复合材料侧的  $\text{TiC}$  相也由断续的变为连续的层。

3 结论

(1)采用  $\text{TiZrNiCu}$  钎料,Cu/Mo 复合中间层真空钎焊 C/C 复合材料与 TC4 时,在较低钎焊工艺条件下,C/C 复合材料与 Cu 接头的反应产物有  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$ ,  $\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni})$ ,  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})$ ,  $\text{TiCu}$ ,  $\text{Cu}_2\text{TiZr}$  和  $\text{TiC}$ 。因此接头界面结构为  $\text{Cu}/\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}/\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{TiCu} + \text{Cu}_2\text{TiZr}/\text{TiC}/\text{C/C}$  复合材料。

(2)随着工艺参数的增加,接头界面组织发生了一定变化。中间层 Cu 不断地向钎料中溶解, $\text{Cu}_2\text{TiZr}$ ,  $\text{TiCu}$ ,  $\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni})$  和  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})$  逐渐消失,新的反应相  $\text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$  以及  $\text{Cu}(\text{s. s})$  生成,因此钎焊工艺参数较高时的界面结构为  $\text{Cu}/\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}/\text{Cu}(\text{s. s}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2/\text{TiC}/\text{C/C}$  复合材料。

(3)随着钎焊温度的增加或保温时间的延长, $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14}$  界面反应层厚度增加, $\text{TiC}$  反应层由断续变为连续的反应层。钎缝中心的反应产物发生了较大变化,由  $\text{Cu}_{51}\text{Zr}_{14} + \text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni}) + \text{TiCu} + \text{Cu}_2\text{TiZr}$  逐渐变为  $\text{Cu}(\text{s. s}) + \text{Ti}(\text{Cu}, \text{Ni})_2$ 。

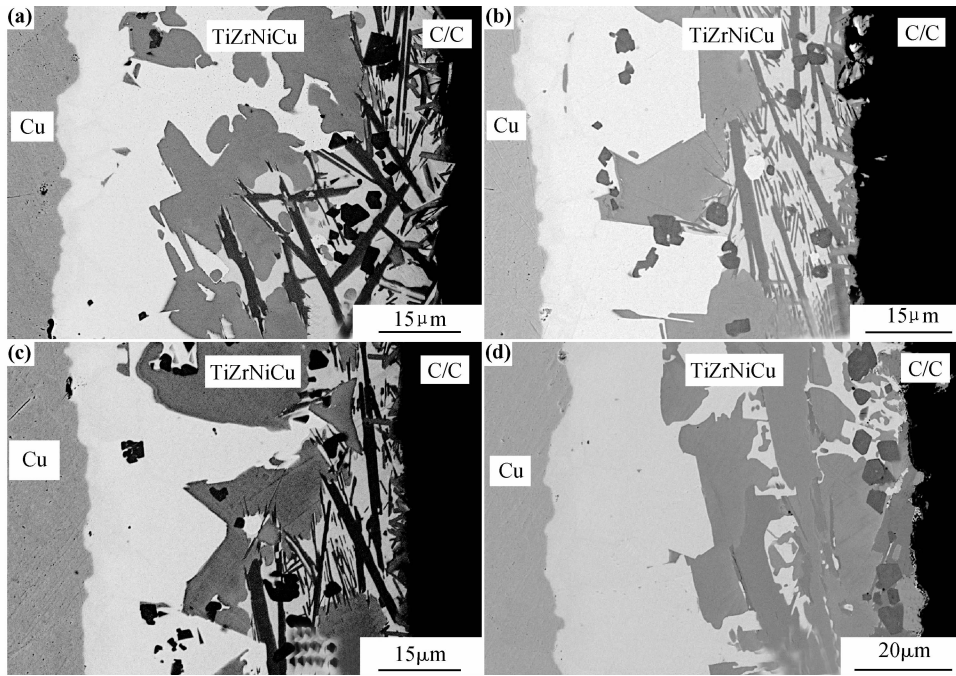


图 4 钎焊温度对接头界面结构的影响

(a) 880°C/5min; (b) 900°C/1min; (c) 900°C/5min; (d) 900°C/30min

Fig. 4 Effect of brazing temperature on the interface structure of the joint

(a) 880°C/5min; (b) 900°C/1min; (c) 900°C/5min; (d) 900°C/30min

### 参考文献

- [1] LACOSTE M, LACOMBE A, JOYEZ P. Carbon/carbon extendible nozzles[J]. Acta Astronautica, 2002, 50(6): 357—367.
- [2] MANOCHA L M, WARRIER ASHISH, MANOCHA S, et al. Thermophysical properties of densified pitch based carbon/carbon materials—I. unidirectional composites[J]. Carbon, 2006, 44(3): 480—487.
- [3] ROGER R, WELSCH G, COLLINGS E W. Materials properties handbook: titanium alloys[M]. USA: ASM International, Materials Park, 2007. 483—488.
- [4] DONACHIE MATHEW. Titanium and titanium alloys source book: a collection of outstanding articles from the technical literature[M]. USA: American Society for Metals, 1982. 265—269.
- [5] SALVO M, FERRARIS M, LEMOINE P. Joining of CMCs for thermonuclear fusion application[J]. Journal of Nuclear Materials, 1996, 233—237(2): 949—953.
- [6] 郭领军, 郭琛, 李贺军, 等. C/C 复合材料与镍基高温合金连接接头的力学性能和微观结构[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(1): 111—114.
- [7] 郭琛, 郭领军, 李贺军, 等. C/C 复合材料与金属材料的热压连接[J]. 炭素技术, 2009, 28(5): 27—31.
- [8] SINGH M, MORSCHER G N, TARAH P, et al. Active metal brazing of titanium to high-conductivity carbon-based sandwich structures[J]. Material Science and Engineering A, 2008, 498(1—2): 31—36.
- [9] 欧孝玺, 张福勤, 夏莉红, 等. 以 Nb 为中间层 AgCuTi 为钎料连接炭/炭复合材料与不锈钢[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, (3): 442—447.
- [10] QIN You-qiong, FENG Ji-cai. Microstructure and mechanical properties of C/C composite/TC4 joint using AgCuTi filler metal[J]. Material Science and Engineering, 2007, 454—455: 322—327.
- [11] QIN You-qiong, FENG Ji-cai. Vacuum brazing of the C/C composite and Ti-6Al-4V with AgCu braze alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(2): 1—4.
- [12] MILENA SALVO, PATRICK LEMOINE, MONICA FERRARIS, et al. Joining of carbon-carbon composites for thermonuclear fusion applications[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(1): 206—212.
- [13] DADRAS P, MEHROTRA G M, NGAI T T. Joining of carbon-carbon composites using boron and titanium disilicide interlayers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(1): 125—132.
- [14] 陈波, 熊华平, 毛唯, 等. 几种高温钎料对 C/C 复合材料的润湿性研究[J]. 材料工程, 2008, (1): 25—29.
- [15] ARROYAVE R, EAGAR T W, KAUFMAN L. Thermodynamic assessment of the Cu-Ti-Zr system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 351(1—2): 158—170.

基金项目: 上海市优秀项目资助(gjd08013); 上海市教委重点学科资助项目(J51402)

收稿日期: 2011-07-06; 修订日期: 2011-12-16

作者简介: 秦优琼(1978—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 新材料及特种材料的钎焊连接, 联系地址: 上海市松江区龙腾路 333 号上海工程技术大学行政楼 1615 室(201620), E-mail: qyqqin@163.com