

# 碳纤维复合材料与金属的钎焊试验研究

## Research of Vacuum Brazing of Carbon Fiber Reinforced Composites With Metal

上海空间推进研究所 田英超  
北京航空航天大学机械学院 曲文卿 张智勇 张雷 庄鸿寿

**[摘要]** 重点针对碳纤维复合材料与2种金属(钛合金、铌合金)采用含Ti钎料进行了真空钎焊试验,分析了钛合金、铌合金对含Ti钎料真空钎焊碳纤维复合材料与金属接头性能和质量的影响,并观察了碳纤维复合材料和钛合金、铌合金的连接界面的微观组织。研究结果对于碳纤维复合材料与金属的连接、结构优化设计以及在重要航天器中的应用具有重要的参考价值。

**关键词:** 碳纤维复合材料 钛合金 铌合金 含Ti钎料 真空钎焊

**[ABSTRACT]** The vacuum brazing of carbon fiber composites with metals (Niobium Alloy—Nb-alloy, Titanium Alloy—Ti-alloy) by brazing filler containing Ti element is conducted, and the effect of different metals including Ti alloy and Nb alloy on the brazed quality of carbon fiber composites with metals is discussed. The microstructures of the brazed zone of carbon fiber composites with metals are observed. The research provides the important technical base for the bonding of carbon fiber composites with metal, and the structural design and its application in aerospace.

**Keywords:** Carbon fiber reinforced composites Titanium alloy Niobium alloy Brazing filler containing Ti element Vacuum brazing

碳纤维复合材料具有耐高温、质量轻、尺寸稳定、抗腐蚀、抗热振和抗烧蚀等优点,在空间技术领域具有广阔应用前景,欧洲已采用碳纤维复合材料作为空间推进系统中的燃烧室材料<sup>[1]</sup>。目前困扰我国采用碳纤维复合材料作为空间推进系统中的燃烧室材料的关键因素是碳纤维复合材料与相关部件(钛合金)的连接问题。

由于碳纤维复合材料属于非金属,与金属的优质连接非常困难,目前所采用的方法主要是机械连接、粘接和钎焊或扩散焊等。机械连接主要是用难熔金属或碳纤维复合材料本身制成的螺栓进行固定,但是这种接头的抗剪和抗压强度较差,在螺栓或铆钉孔附近载荷集中的地方尤为严重。粘结主要是应用宇航用粘结剂EA934NA或高温环氧树脂来粘结碳纤维复合材料<sup>[2-3]</sup>。

扩散连接是通过连接过程中在2个被连接件之间生成石墨或高温稳定的化合物中间层,从而将碳纤维复合材料跟金属连接起来,常用的中间层材料有:锰、钛和铝等金属粉末以及B或TiSi<sub>2</sub>等非金属。钎焊方法是通过钎料与碳纤维复合材料发生化学反应产生冶金结合,主要采用的钎料有Si、Al、Ag-Cu-Ti钎料、金属硅化物及玻璃等<sup>[4-5]</sup>。

本课题重点针对碳纤维复合材料与2种金属(钛合金、铌合金)采用含Ti钎料进行了真空钎焊试验研究,分析了钛合金、铌合金对含Ti钎料真空钎焊碳纤维复合材料与金属接头性能与质量的影响,并观察了碳纤维复合材料与钛合金、铌合金的连接界面的微观组织。所得结果对碳纤维复合材料与金属的连接、结构优化设计以及在航天器中的应用具有重要的参考价值。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验材料及设备

试验材料为:碳纤维复合材料为圆筒状T-300™碳纤维复合材料;钛合金为TC4;铌合金为铌钎合金。试件形状:碳纤维复合材料与钛合金、铌合金套接结构,装配间隙为0.1mm,插接的深度为5mm。所采用的钎料为含Ti银基钎料。试验设备采用冷壁式真空钎焊设备,真空系统由机械泵和油扩散泵两部分构成,焊态真空度最高可达到10<sup>-3</sup>Pa级别。

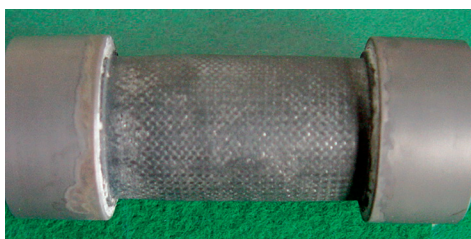
#### 1.2 试验方法与工艺参数

本研究采用真空钎焊方法连接碳纤维复合材料和钛合金、碳纤维复合材料和铌合金。钎焊温度为970~1000℃,保温1~5min,真空度为(1~4)×10<sup>-3</sup>Pa。为了保证加热均匀和较高的真空度,加热速率一般在5℃/min;在500℃以上时,加热速度可适当加快。冷却速度在钎焊完成后迅速降温至950℃,以后的降温速率在180℃/h。

#### 1.3 试验过程

首先将钎料放置在碳纤维复合材料和钛合金、铌合金的被连接表面之间;然后放入真空室。开始抽真空,将真空泵抽至所要求的真空度时开始升温加热。抽真空至(1~4)×10<sup>-3</sup>Pa左右,升温至钎焊温度

(980~1030℃),保温一定时间(1~5min),然后迅速降温至950℃,以后的降温速率在180℃/h。最后取出碳纤维复合材料和钛合金、碳纤维复合材料和铌合金钎焊试件,进行质量与性能检测和微观组织观察。碳纤维复合材料和钛合金、铌合金的钎焊接头实物见图1。



(a) 碳纤维复合材料与钛合金钎焊接头



(b) 碳纤维复合材料与铌合金钎焊接头

图1 碳纤维复合材料与钛合金、铌合金组合的钎焊接头

Fig.1 Brazed joints of carbon fiber composites with Ti and Nb

## 2 碳纤维复合材料与钛合金钎焊接头缺陷及分析

对碳纤维复合材料与钛合金的钎焊接头进行质量检测发现,碳纤维复合材料与钛合金的钎焊接头存在严重问题,即:钎料没有填满钎缝,如图2所示。对上面接头进行补焊,即将出现的空洞填满钎料再进行钎焊,依然发现钎料不能填满整个钎缝,甚至原来没有出现的部



图2 钎焊接头质量检测结果

Fig.2 Quality testing result of brazed joint

位也出现了空洞缺陷。

此外,对碳纤维复合材料与钛合金的钎焊接头进行了拉伸试验,结果发现钎焊接头性能较差,从断口上可以看到,碳纤维复合材料与钛合金的钎焊连接非常不均匀,碳纤维复合材料与钛合金的钎焊连接效果好的部分,拉伸后复合材料发生了剪切断裂,被拉断的部分复合材料已经附着在钛合金上,如图3所示;碳纤维复合材料与钛合金的钎焊连接效果差的部分(即钎料没有填上的钎缝部分),没有复合材料附在钛合金上面。另外,从拉断的钎焊接头中发现,许多钎料流到了钛合金套筒内部,并且与钛合金发生了良好的反应。



图3 钎焊接头拉伸试验结果

Fig.3 Tensile testing result of brazed joint

分析认为,上述问题的出现完全是由于含Ti银基钎料在钛合金上的流动性过好,另外,部分原因是钛合金的热膨胀系数远大于复合材料。由于钎料在钛合金上流动性远远优于在碳纤维复合材料上的流动性,而钛合金膨胀系数又远大于碳纤维复合材料,导致钎焊过程中,钛合金与碳纤维复合材料的间隙增大,熔化的钎料迅速沿着钛合金内壁流动,造成熔化的钎料与碳纤维复合材料连接效果不好,因此出现碳纤维复合材料与钛合金钎缝内部出现部分未连接、连接性能差等现象。

## 3 碳纤维复合材料与铌合金钎焊接头拉伸结果

碳纤维复合材料与铌合金的钎焊接头未发现钎料没有填满钎缝的现象。对其钎焊接头进行拉伸试验,发现接头从复合材料上发生剪切断裂,如图4所示。

从图4中可以看出,碳纤维复合材料与铌合金的钎焊接头强度明显高于碳纤维复合材料本身的强度,断口发生在碳纤维复合材料上,碳纤维复合材料呈现明显的剪切解理断裂,并且非常均匀的碳纤维复合材料一侧都



(a) 碳纤维复合材料一侧



(b) 钨合金一侧

图4 拉伸断裂后的碳纤维复合材料与钨合金的钎焊接头  
Fig. 4 Fracture surface of brazed joint of carbon fiber composites with Nb alloy

发生了断裂,而钨合金内部全部都与碳纤维复合材料连接,没有发生钨合金与碳纤维复合材料从钎缝处发生剪切断裂的现象。另外一端的钨合金与碳纤维复合材料的钎缝在拉伸过程没有发生断裂,依然连接良好。

#### 4 微观组织观察与分析

图5是碳纤维复合材料与钨合金的钎焊接头微观组织,由左至右依次为钨合金母材区、钎料区和碳纤维复合材料区。由图可以看到,含Ti钎料与钨合金形成良好的冶金结合;钎料和碳纤维复合材料母材发生了良好的化学反应,形成良好的冶金结合界面,而且由于碳纤维复合材料材质疏松,钎料渗入到复合材料的孔隙处。

#### 5 结论

采用含Ti钎料对碳纤维复合材料与2种金属(钛合金、钨合金)进行了真空钎焊试验研究,着重分析了钛合金、钨合金对含Ti钎料真空钎焊碳纤维复合材料与金属接头性能与质量的影响,并观察了碳纤维复合材料与钨合金的钎焊界面的微观组织。主要得到如下结论:

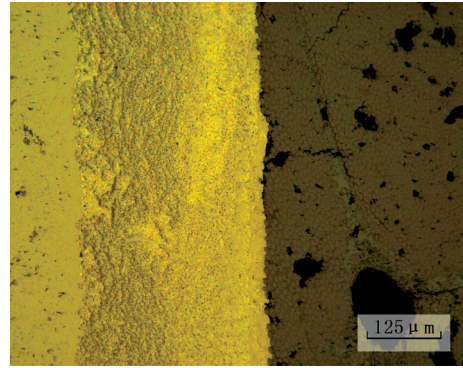


图5 碳纤维复合材料与钨合金钎焊接头微观组织  
Fig.5 Microstructure of brazed joint of carbon fiber composites with Nb alloy

(1)热膨胀系数和钎料的润湿性是影响碳纤维复合材料与钛合金真空钎焊质量和性能的关键因素。在钎焊过程中,由于钛合金的热膨胀系数远远大于碳纤维复合材料,导致碳纤维和钛合金之间的间隙明显变大,而熔化的含Ti钎料在钛合金表面润湿性也明显超过碳纤维复合材料,导致钎料沿着钛合金表面迅速流失,出现了钎料没有填满钎缝的缺陷。

(2)与钛合金相比,钨合金的热膨胀系数、钎料在钨合金上的润湿性要更接近碳纤维复合材料。因此钎焊过程中,熔化的钎料不容易从碳纤维复合材料与钨合金之间流失,因而成功地实现了碳纤维复合材料与钨合金的有效连接。

(3)对于空间推进系统中必须实现的碳纤维复合材料与钛合金的有效连接,更合理的连接工艺应当是:采用钨合金作为过渡环结构,首先进行碳纤维复合材料与钨合金的真空钎焊,然后再采用电子束焊接(或其他焊接方法)方法将钨合金与钛合金焊接到一起。研究结果对碳纤维复合材料与钛合金结构优化设计及在航天器中的应用具有重要的参考价值。

#### 参考文献

- [1] 霍肖旭,刘红林,曾晓梅.碳纤维复合材料在固体火箭上的应用.高科技纤维与应用,2000,25(3):1-7.
- [2] Subramanian S, Kustas, Rawal F, et al. Fabrication, testing and analysis of carbon-carbon/aluminum bonded with high thermal conductivity. AIAA-98-1996,1996.
- [3] Kweon J H, Jung J W, Kim T H, et al. Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. Composite Structures, 2006(75):192-198.
- [4] Milena S, Patrick L, Monica F, et al. Joining of carbon-carbon composites for therm onuclear fusion applications. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(1):206-212.
- [5] Parviz D, Gopal M M. Joining of carbon-carbon composites by graphite formation. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77(6):1419-1424.

(责编 小颖)