

活性焊剂和热处理对 TC17 钛合金 TIG 焊接接头组织和性能的影响分析

Study on Microstructure and Property of TC17 TIG Weld Joint

中航工业北京航空制造工程研究所航空焊接与连接技术航空科技重点实验室

万晓慧 李冬杰
郭德伦 李晓红

[摘要] 为了探明焊后热处理过程和焊前涂覆活性剂对 TC17 钛合金 TIG 焊接接头性能的影响,对不同状态的焊接接头进行了拉伸试验和硬度测试,并采用光学显微镜和扫描电镜观察焊接接头组织和拉伸断口形貌。结果表明,焊前涂覆活性剂可以有效防止焊缝出现气孔缺陷,降低焊接热输入,减少热影响区晶粒粗化倾向,同时减少焊接热影响区晶粒在宽度方向的不均匀性。焊后热处理使焊接接头 Sn、Zr 等元素扩散均匀,接头组织得到显著强化。对 TC17 板材,焊前涂覆活性剂,并且进行焊后热处理,可以获得良好的接头组织和性能。

关键词: TC17 钛合金 TIG 焊接 微观组织 拉伸性能

[ABSTRACT] In order to study the effect of the active flux using before welding and the heat treatment after welding on the microstructure and property of TC17 TIG weld joint, the tensile test and hardness test for the weld joint under different welding parameters are carried out in this study. The optical microscope (OM) and the scanning electron microscope (SEM) are used to observe the microstructure and the fracture surface of the tensile test. The results show that the using of the active flux could prevent the weld joint from the air hole defect, and after which, the heat input, the grain growth trend of the heat affected zone (HAZ) and the asymmetric for the grain size of the HAZ are decreased. Elements of Sn and Zr diffuse equably under the heat treatment process and weld joint is markedly strengthened. For the TIG weld joint of TC17 plates, the excellent microstructure and properties can be obtained under both using active flux before welding and heat treatment after welding.

Keywords: TC17 titanium alloy TIG welding Microstructure Tensile property

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.074

TC17 合金是一种富 β 稳定元素的 $\alpha + \beta$ 型两相钛合金,其名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr。该合金强度高、断裂韧性好、淬透性高和锻造温度范围宽,能够满足损伤容限设计的需要和高结构效益、高可靠性及低制造成本的要求,因而被广泛用来制造航空部件,如发动机风扇、压气机盘件和大截面的锻件^[1-2]。TC17 钛合金的连接可选用大部分的焊接方法,目前航空用 TC17 钛合金构件的连接多选用摩擦焊接的方法^[3-4]。

钨极氩弧焊(TIG)可以焊接大多数的金属和合金,是航空工业中的一种主要焊接方法,可用于不锈钢、高温合金、铝合金、镁合金、铜合金及钛合金等薄壁构件的焊接及各种结构的修复。

本文针对 TC17 钛合金进行 TIG 焊接工艺试验,研究焊前涂覆活性剂、焊后热处理对焊接接头的组织和性能的影响。

1 试验材料与方法

试验用 TC17 钛合金为 $\alpha + \beta$ 态锻件,母材金相照片如图 1 所示,母材组织为初生 α 相(图 1 中白色块状

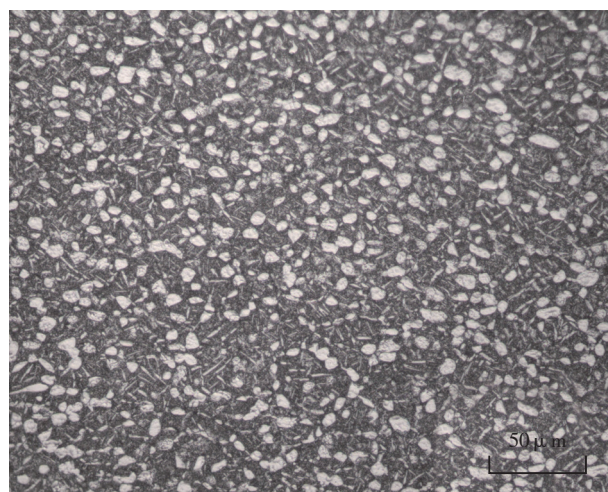


图1 TC17钛合金母材微观组织

Fig.1 Microstructure of TC17 titanium alloy base metal

组织)+ β 转变组织(图 1 中灰色组织,由层片状次生 α 相 + 保留 β 相组成),母材强度 1200MPa,延伸率 13%。将原始锻件加工成厚度 2mm 的焊接试件。活性焊剂选用 FT-01^[5],使用前对活性焊剂进行烘干处理。焊接采用平板对接焊,焊前不开坡口,焊丝选用直径为 1.3mm 的 TC17 同质焊丝。

焊接准备时将试件待焊端面用金属清洗剂去除表面油污,将试件和焊丝放入 HF 和 HNO₃ 混合酸液中,浸蚀 3min 后取出,用冷水冲洗并在烘箱中烘干试件及焊丝,120h 内完成焊接。焊前用无水乙醇擦拭试件焊接区表面。表 1 所示为试验 4 组工艺参数,焊接方法为脉冲 TIG 焊,脉冲频率 $f=8\text{Hz}$,占空比 50%。

表1 试验工艺参数

试样编号	活性剂	热处理	基值电流 /A	峰值电流 /A
1	否	否	60	180
2	是	否	45	135
3	否	是	60	180
4	是	是	45	135

焊后对焊接试板进行 X 射线无损检验,焊缝内部质量均符合航空标准 I 级要求。焊后对焊接接头进行热处理,热处理工艺为:升温至 630℃,保温 1.5h,随炉冷却。将 4 种工艺得到的试板加工成拉伸试样,试样示意图如图 2 所示。对焊缝进行切割、研磨、抛光、柯尔试剂(100mL H₂O+2mL HF+5mL HNO₃) 腐蚀以进行金相观察,并对焊缝不同区域进行硬度测试。利用扫描电镜(SEM)进行接头微观组织、拉伸断口观察和接头局部成分分析。

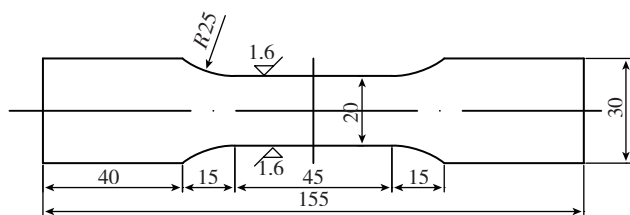


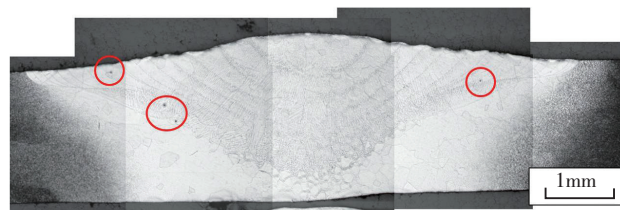
图2 拉伸试样示意图 (mm)
Fig.2 Diagram of tensile sample (mm)

2 试验结果与分析

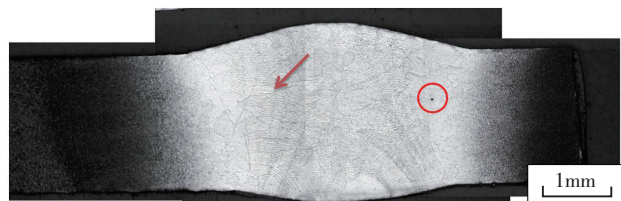
图 3 为 1 号试验(图 3 (a)) 和 2 号试验(图 3 (b)) 焊后焊缝形貌宏观照片。由图 3 可以看出,未添加活性剂时,焊缝表面较宽,焊缝深宽比(深度/宽度)为 0.13,如图 3 (a) 所示;添加活性剂时,焊缝表面宽度较窄,焊缝深宽比为 0.25,如图 3 (b) 所示。由表 1 可知,添加活性剂时基值电流和峰值电流都有所降低,结合图 3 可以看出,添加活性剂时,焊接能量的利用率明显提高。

钛合金的 TIG 焊接容易产生气孔缺陷^[6],焊接试板在进行 X 射线检测时,较小的气孔不能被检测出来,但可以通过金相法观察气孔的位置和数量。图 3 中红圈位置为焊接接头的气孔,气孔位置全部在焊缝靠近熔合线的位置,可以看出,焊前涂覆活性剂后,气孔数量减少。

TIG 焊接容易造成热影响区晶粒粗化,对焊接接头性能产生不利影响^[7]。由图 3 (a) 可以看出,未添加活性剂时,焊接接头热影响区晶粒粗化倾向明显,且焊接接头底部热影响区宽度较大,上部热影响区宽度较小,热影响区存在明显的组织不均匀性。由图 3 (b) 可以看出,添加活性剂时,焊接接头热影响区具有一定的粗化倾向,热影响区宽度均匀,且宽度比未添加活性剂时明显减小。未添加活性剂时,焊缝柱状晶形貌不明显;添加活性剂时,焊缝柱状晶由熔合线向焊缝中心垂直生长,如图 3 (b) 箭头位置所示。



(a) 未使用活性剂



(b) 使用活性剂

图3 焊接接头宏观形貌
Fig.3 Morphology of weld joints

活性剂能够有效改善熔池对流形式,使焊接热输入更多地由熔池表面向熔池底部传输,减少了电弧热量由熔池中心向边缘的传输,形成具有较大深宽比的焊缝形貌,同时降低了热输入,减小了热影响区的晶粒粗化趋势。此外,熔池对流的加强,有利于熔池内气体的溢出,使得焊后焊缝内气孔减少。未添加活性剂时,上宽下窄的熔池形貌导致焊接热输入的一部分被下部的热影响区吸收,导致晶粒长大,母材对焊缝的冷却作用减小;添加活性剂时,焊缝上下宽度相同,热影响区粗化倾向不明显,母材对熔池液态金属冷却作用加强,焊缝柱状晶生长充分,焊后可明显观察到垂直于熔合线生长的柱状晶。

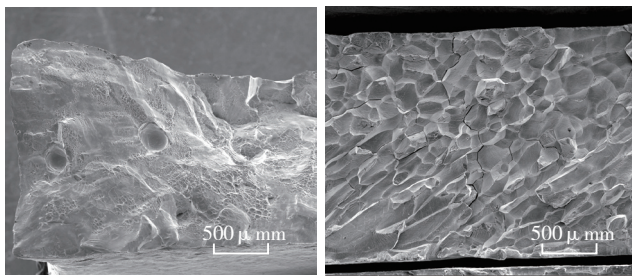
表 2 为拉伸性能试验结果,同时给出了拉伸断裂位

置。未添加活性剂时,热处理后焊接接头强度接近于母材,延伸率较母材有明显的降低;添加活性剂时,热处理后焊接接头强度接近于母材的 90%,延伸率有较大提高,且断裂位置在母材处,显示出焊缝有良好的焊接强度。

表2 拉伸试验结果

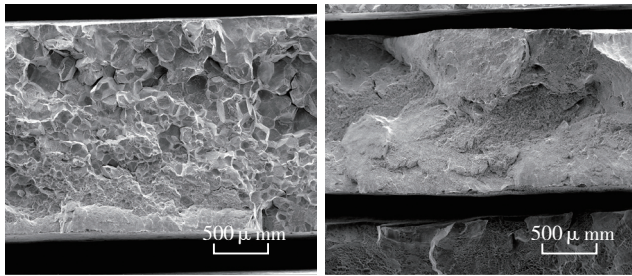
试样编号	抗拉强度 R_m /MPa	延伸率 A /%	断裂位置
1	998	4.68	热影响区
2	999	1.71	焊缝
3	1091	2.88	热影响区
4	1053	6.86	母材

图 4 所示为 4 组试验后的拉伸断口形貌。图 4 (a) 所示为焊接过程未使用活性剂,焊后未进行热处理焊接接头拉伸断口形貌。由图 4 (a) 可以看出,断口有明显的气孔形貌(图 4 (a) 中圆形孔洞),气孔直径为 $200\mu\text{m}$, X 射线探伤难以检测出来。结合图 3 (a) 焊缝气孔分布可知,未热处理的焊接接头拉伸过程沿熔合线附近气孔分布集中的位置断裂,断口形貌呈明显的起伏形貌,如图 4 (a) 所示。图 4 (b) 所示为焊接过程使用活性剂,但焊后未进行热处理的焊接接头拉伸断口形貌,



(a) 1 号试样

(b) 2 号试样



(c) 3 号试样

(d) 4 号试样

图4 拉伸断口形貌

Fig.4 Fracture morphology of the tensile samples

貌,断裂位置为焊缝,断口为典型的沿晶断裂形貌,柱状晶的形貌保留完整。图 4 (c) 所示为焊接过程未使用活性剂,焊后进行热处理的焊接接头拉伸断口形貌,断裂位置为热影响区和母材交界的位置,断口上方呈现焊缝晶粒粗大的特征,且自上而下呈现由焊缝区晶粒尺寸过渡到母材晶粒尺寸的特征,结合图 3 (a) 焊接接头形

貌,断裂位置为焊缝边缘位置,裂纹沿焊缝-热影响区-母材扩展。图 4 (d) 所示为焊接过程使用活性剂,焊后进行热处理的焊接接头拉伸断口形貌,断裂位置为母材,呈明显的韧性断裂特征。

表 3 所示为焊接接头硬度测试的结果。可以看出,母材在热处理前后硬度无明显变化,活性剂的添加对焊缝硬度无明显影响,而热处理后焊接接头硬度显著提高。对比表 2 可知,热处理后焊接接头强度显著提高。

图 5 所示为热处理前后焊缝形貌的扫描电镜照片。由图 5 (b) 可以看出,热处理后焊缝晶界的抗腐蚀性下降,经柯尔试剂腐蚀后晶界凹陷,晶粒内也有较深的腐蚀痕迹。利用扫描电镜对热处理前后晶界、晶粒内部元素进行分析,分析结果如表 4 所示。

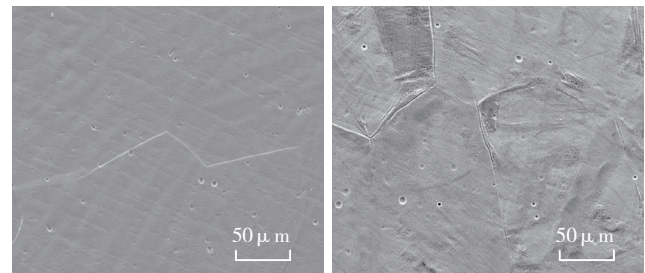
由表 4 可知,热处理前后晶界、晶粒内部的 Al、Cr、Mo 元素变化不大;热处理后,晶粒内部的 Sn、Zr 元素含量略有增加。Sn、Zr 属于中性元素,在 $\alpha\text{-Ti}$ 和 $\beta\text{-Ti}$ 中都有较大的溶解度,能够显著强化钛合金^[8]。热处理过程使 Sn、Zr 元素由焊缝的晶界位置向晶粒内扩散,对焊缝起到固溶强化的作用。因此,热处理后焊缝硬度升

表3 焊接接头硬度 (HV) 测试结果

试样编号	焊缝	母材
1	319	390
2	328	397
3	421	394
4	400	398

表4 热处理前后焊缝元素分析 %

元素	晶界		晶粒内部	
	热处理	未热处理	热处理	未热处理
Al	4.87	4.66	4.88	4.82
Cr	4.18	4.23	4.19	4.13
Mo	3.88	3.74	3.99	3.84
Sn	2.32	2.36	2.36	2.08
Zr	2.06	1.97	2.21	1.86



(a) 1 号试样

(b) 3 号试样

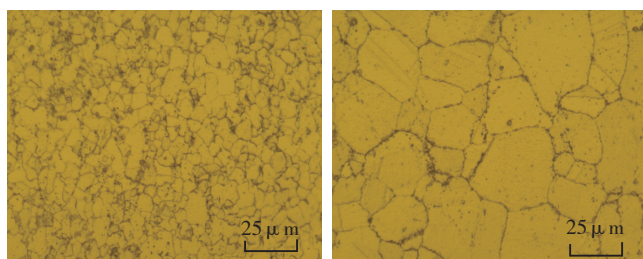
图5 焊缝形貌扫描电镜照片

Fig.5 SEM pictures of weld joint morphology

(下转第 79 页)

纹起源于机械加工缺口根部,且为多源起裂,随着应力强度因子幅值的增加,疲劳裂纹扩展速率增加,断口显示为疲劳条带的间距增加。

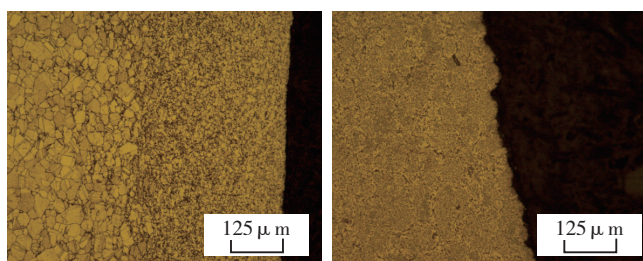
对焊缝区域进行切割、镶嵌,经过 100#~2000# 砂纸打磨后,机械抛光,最后进行腐蚀,以观察焊缝和母材的组织形貌。对试验后断口侧面进行切割、镶嵌、磨抛、腐蚀以观察裂纹走向。FGH96 惯性摩擦焊焊缝和母材组织形貌如图 3 所示。由于 FGH96 合金中的奥氏体具有较低的层错能,因此容易出现孪晶。焊缝中心区域形貌组织非常细小均匀,呈等轴晶状态,为典型的动态再结晶组织。母材组织晶粒大小不均,晶界处有析出物,并在晶粒内部还可见孪晶,这是由于 FGH96 合金为面心立方的奥氏体,在面心立方金属中, {111} 面为密排孪晶界面,孪晶界面容易沿该密排面滑移形成孪晶。



(a) 焊缝 (b) 母材

图3 试样缺口处组织形貌

Fig.3 Microstructure of sample notch



(a) 焊缝 (b) 母材

图4 断口侧面形貌

Fig.4 Side microstructure of sample fracture

图 4 为焊缝试样和母材试样断口侧面组织形貌,焊缝试样裂纹沿焊缝扩展,裂纹附近组织为细小晶粒,母材试样裂纹附近组织为粗大晶粒,焊缝的裂纹扩展路径较为平坦,二者均为穿晶断裂。

4 结论

(1) 本文对 FGH96 摩擦焊焊接接头裂纹扩展速率进行了测定,对曲线使用 Paris 公式进行了拟合,得到母材试样裂纹扩展速率方程为: $da/dN=3.14593E-15 \Delta K^{5.1410}$,焊缝区的扩展速率方程为: $da/dN=1.67302E-16 \Delta K^{5.36754}$ 。根据试验结果,焊缝裂纹扩展速率明显低于

母材。

(2) 在母材、焊缝中,裂纹均以穿晶形式扩展,FGH96 惯性摩擦焊焊缝组织为细小晶粒,母材为粗大晶粒。细小晶粒晶界的阻碍是焊缝裂纹扩展速率低于母材的原因。 (责编 玲犀)

(上接第 76 页)

高,强度增加。

热处理可以显著强化焊接接头,使得热处理后接头的拉伸断裂模式发生改变。一方面,没有使用活性剂的焊接接头,裂纹在容易产生气孔的焊缝边缘萌生,由于焊缝得到强化,裂纹垂直于拉伸应力扩展并直至断裂,与热处理前的焊接接头断裂模式有所区别。另一方面,使用活性剂的焊接接头,在未进行热处理时,焊接接头粗大的柱状晶是薄弱部位,裂纹沿柱状晶晶界扩展;热处理后,拉伸断裂发生在母材位置,显示接头强度显著增加。

3 结论

(1) 活性剂能够有效降低焊接热输入,减小热影响区的晶粒粗化趋势,并形成较大深宽比的焊缝形貌。活性剂的添加,有利于熔池内气体的溢出,使得焊后焊缝内气孔减少。

(2) 热处理可以使 Sn、Zr 元素由焊缝的晶界位置向晶粒内扩散,对焊缝位置起到固溶强化的作用,热处理后焊接接头硬度、强度显著提高。

(3) 针对 TC17 板材对接焊,焊前涂覆活性剂和焊后热处理的联合应用可以获得良好的接头组织和性能。

参考文献

- [1] 王华,冀胜利,王凯旋,等. 片层组织 TC17 钛合金高温变形行为研究. 钛工业进展, 2010, 27(6): 16-19.
- [2] 吴冰,李晋炜,巩水利,等. TC17 钛合金电子束焊接接头的疲劳裂纹扩展规律及疲劳剩余寿命. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S1): 170-173.
- [3] 季亚娟,张田仓,李晓红. TC11/TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织与性能. 航空制造技术, 2011(8): 66-69.
- [4] 李智渊,张田仓,刘颖. 热处理工艺参数对 TC4+TC17 线性摩擦焊接头微观组织的影响. 航空制造技术, 2012(4): 146-148.
- [5] 李晓红,张连锋,杜欲晓. 活性焊剂对钛合金焊缝形貌的影响. 航空制造技术, 2003(11): 26-28.
- [6] 张连锋,李晓红,杜欲晓. 钛合金活性焊剂氩弧焊接头组织分析. 焊接, 2006(7): 16-19.
- [7] 周水亮,陶军,杜欲晓,等. 细晶粒钛合金薄板 TIG 焊温度场分析. 焊接学报, 2010, 31(12): 33-36.
- [8] 于振涛,周廉,牛金龙,等. 合金元素,加工与热处理对医用 β 型钛合金力学性能的影响及微观分析. 稀有金属, 2007, 31(4): 416-419. (责编 叶枫)