

TC17 钛合金在 TIG 焊接方法下的焊接性研究

Study on Weldability of TC17 Titanium Alloy Under TIG Welding Method

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

李冬杰 万晓慧

李晓红 郭德伦

[摘要] 利用填充 TA2 焊丝的 TIG 焊接方法,研究了焊接接头组织和性能特点,并利用焊前涂覆活性剂和焊后进行热处理的正交试验,讨论了焊前和焊后处理方法对焊接接头性能的影响。试验结果表明,TC17 钛合金 TIG 焊接接头明显可见焊缝、熔合线和热影响区等区域,焊缝区柱状晶特点明显并且存在一定量的小气孔,热影响区晶粒较大;焊接接头组织较母材有软化的倾向。焊后接头强度达到母材的 85%,热处理后接头强度可达到母材的 90% 以上,并且热处理后的焊接接头具有良好的高温拉伸、持久性能,显示出 TC17 钛合金具有良好的焊接性。

关键词: TC17 钛合金 焊接性 焊接接头组织 力学性能

[ABSTRACT] The TIG welding method, filled with TA2 welding wire, is used to research the microstructure and mechanical property of the weld joint. The orthogonal experiment between coating active flux before welding and heat treatment after welding is carried out to investigate the influence of the common treatment way for the welding process on the properties of the weld joint. Results show that, the weld joint of TC17 titanium alloy has the obvious areas, named weld zone (WZ), fusion line and the heat affected zone (HAZ). The microstructure of the WZ has a character of columnar crystals and the air holes are observed in this zone. The microstructure of the HAZ is relatively large and the softening of the weld joint is obviously compared with the base metal. The tensile intensity of the weld joints after welding reaches 85% of the base metal, and this value could be more than 90% after heat treatment. The weld joints after heat treatment have good tensile property and creep deformation at high temperature, which shows that the TC17 titanium alloy has relatively good weld ability.

Keywords: TC17 titanium alloy Weldability Microstructure of weld joint Mechanical property

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.011.070

目前,航空用轻质材料主要有铝合金、钛合金和复合材料^[1]等,而钛合金是发动机部件的主要材料。其中,TC17 钛合金的名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr,因富含 β 相稳定元素 Mo、Cr,该合金具有良好的淬透性和较宽泛的锻造温度;同时该合金含有较多的固溶强化元素 Sn、Zr,通过固溶处理可以获得良好的机械性能;通过合理的热处理制度,该合金可获得含有片层结构的 $\alpha + \beta$ 双态组织,具有良好的断裂韧性,能够满足损伤容限设计的需要。TC17 钛合金被广泛用来制造航空部件,特别适用于发动机风扇、压气机盘件的制造^[2-3]。

TC17 钛合金具有良好的淬透性,适用于大部分的焊接方法进行制造,其焊接性成为设计人员使用 TC17 材料的重要参考性能。焊接性的优劣,决定了缺陷在焊接过程中对于焊接工艺参数是否敏感和不同工艺适用的范围是否宽泛^[4-5]。钛合金在焊接过程常见的缺陷形式是脆化、气孔和裂纹,与焊前清理、焊接过程的保护和焊接工艺参数相关;焊接热输入等工艺参数和焊接缺陷直接影响焊接接头的性能。本文针对 TC17 钛合金,利用 TIG 焊(Tungsten Inert Gas Welding)研究焊接接头不同位置的缺陷和组织状态以及接头的性能特点,并通过焊前涂覆活性剂、焊后热处理的正交试验,进行 TC17 钛合金在 TIG 焊接方法下焊接性的探索。

1 试验材料与方法

试验用 TC17 钛合金母材采用 $\alpha + \beta$ 两相区锻造,其扫描电镜(SEM)照片如图 1 所示。母材组织为初生 α 相(图 1 中灰色圆块状组织)+ β 转变组织(图 1 中白色组织,由层片状次生 α 相+保留 β 相组成),母材的室温抗拉强度为 1200MPa,400℃抗拉强度为 905MPa。焊接试板为 2mm×86mm×140mm 的长方形试件,进行不开坡口对接焊。为增加焊接接头塑性,焊丝选用直径 1mm 的 TA2 焊丝,焊丝要求严格控制杂质元素含量,其中氧 $\leq 0.20\%$ 、氮 $\leq 0.05\%$ 、氢 $\leq 0.012\%$ 、碳 $\leq 0.05\%$ 。

焊接准备过程为:(1)焊前清理,将待焊试件放入超声清洗机中,加入水+金属清洗剂去除表面油污;(2)酸洗,将试件和焊丝放入 HF 和 HNO₃ 混合酸液中,浸蚀

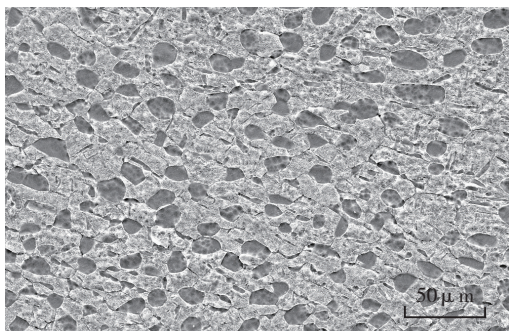


图1 TC17钛合金母材微观组织

Fig.1 Microstructure of TC17 titanium alloy base metal

3min后取出,用冷水冲洗;(3)烘干,将试件及焊丝放入烘箱中烘干,并保证在120h内完成焊接;(4)焊前准备,焊前用刮刀将试板待焊端面毛刺去除,用无水乙醇擦拭试件焊接区表面。

焊接选用传统TIG焊接和活性剂TIG焊接2种方法,焊接方法为脉冲TIG焊,脉冲频率 $f=8\text{Hz}$,占空比50%。其中,活性焊剂选用FT-01^[6],使用前对活性焊剂进行烘干处理,将焊剂平铺于不锈钢托盘后置于150℃烘箱中烘干3h,焊前均匀涂覆于待焊试件端面位置。焊后选择每种工艺的1/2焊接试板进行热处理,热处理工艺为:升温至630℃,保温1.5h,随炉冷却。表1所示为4组试验方法。

焊后对焊接试板进行X射线无损检测,焊缝内部质量均符合HB5376-1987标准的I级焊缝要求。将4种工艺得到的试板按Q/6S977-2004加工成室温、高温拉伸试样和持久试样,保证焊缝位于平行段中间位置。高温拉伸、高温持久试验的温度为400℃,按设计要求选择持久强度为685MPa(>100h)。取4组工艺试验的试板焊缝位置制成金相试样,制样过程依次为切割、研磨、抛光、柯尔试剂(100mL H₂O+2mL HF+5mL HNO₃)腐蚀,利用光学显微镜对金相试样进行观察,并对焊缝不同区域进行硬度测试。利用扫描电镜进行接头微观组织观察和成分分析,并进行室温拉伸断口形貌观察。

2 试验结果与分析

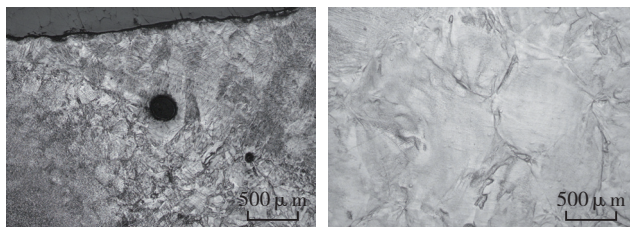
2.1 焊接接头组织分析

图2为TC17钛合金TIG焊接接头金相照片(图2(a)、(b))和扫描电镜照片(图2(c))。图2(a)所示

表1 试验工艺参数

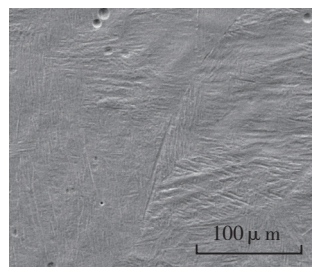
试样编号	活性剂	热处理	基值电流/A	峰值电流/A
1	否	否	60~62	180~186
2	是	否	45	135
3	否	是	60~62	180~186
4	是	是	45	135

为传统TIG焊接焊后熔合线位置金相照片,焊缝在熔合线位置产生气孔缺陷,气孔直径不超过200μm。较小的气孔不能被X射线检测出来,焊缝质量符合HB5376-1987规定的I级焊缝要求。图2(b)所示为热影响区晶粒形貌,热影响区晶粒较大,晶界形貌明显,晶粒内部组织不明显,但可见暗色、交错分布的细小板条状形貌,结合TC17钛合金含有较高的β相稳定元素的特征,热影响区组织为β转变组织(斜方马氏体α''相+保留β相),部分晶粒尺寸超过200μm。图2(c)所示为焊缝组织的扫描电镜照片,可见细小的针状组织形貌,组织为斜方马氏体α''相+保留β相。



(a) 熔合线位置

(b) 热影响区



(c) 焊缝区

图2 TIG焊接接头形貌

Fig.2 Morphology of TIG weld joint

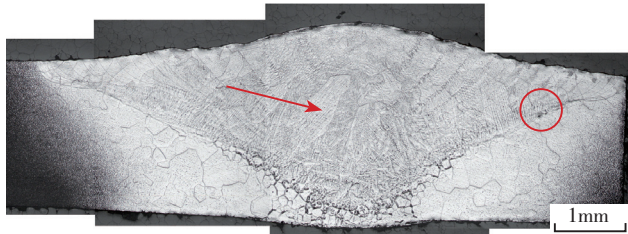
斜方马氏体α''相被认为是含β相稳定元素较多的钛合金软化的原因,在300~700℃时效过程中α''相的分解次序遵循 $\alpha'' \rightarrow \alpha'' + \alpha \rightarrow \alpha + \beta$ 的规律,利用斜方马氏体的逆转变,通过均匀地析出细小的次生α相和纳米级弥散分布的β相可使合金具有明显的时效强化效果^[7]。

表2所示为活性剂TIG焊接接头热处理前后硬度分布情况的统计。热影响区和焊缝硬度在焊后均有所下降,在热处理后焊缝硬度升高80HV,热影响区升高136HV,这两个区域在热处理后均得到强化。

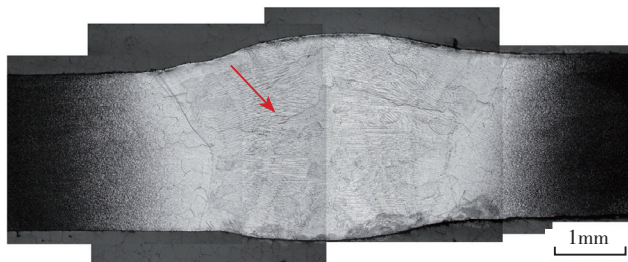
图3所示为传统TIG焊接和活性剂TIG焊接焊后焊缝形貌。图3(a)所示为传统TIG焊接焊后焊缝形貌,图中红圈位置所示为焊接接头的气孔,位于焊缝靠近熔合线的位置;图中箭头所示为焊缝区域柱状晶形貌,可见柱状晶沿垂直于熔合线方向生长,熔合线方向与母材呈较大的角度。未添加活性剂时,焊缝深度和宽度之比(深宽比)为0.24,焊缝区域呈现浅宽型,且焊接接头底

表2 焊接接头硬度 (HV) 测试结果

试样编号	焊缝	热影响区	母材
2	309	303	393
4	389	439	423



(a) 未使用活性剂



(b) 使用活性剂

图3 焊接接头形貌

Fig.3 Morphology of weld joints

部热影响区宽度较大,上部热影响区宽度较小。

图3(b)所示为添加活性剂的TIG焊接焊后焊缝形貌。活性剂能够改善熔池对流形式,使电弧向熔池过渡的热量更多地由熔池表面向底部传输,减少了熔池表面宽度,深宽比达到0.44。由表1可以看出,活性剂TIG焊接时,基值电流和峰值电流均小于传统TIG焊接,焊接热输入降低,焊接效率增加。熔合线方向与母材厚度方向之间的角度较小,焊缝柱状晶由熔合线向焊缝中心垂直生长,柱状晶与母材水平方向之间近似平行,如图3(b)箭头所示。焊接热影响区晶粒有长大趋势,并且热影响区宽度在接头上部和下部基本相同。使用2种焊接方法时,焊接接头气孔数量均较少,证明通过焊前清理和焊接过程惰性气体保护,可以有效避免焊接接头产生气孔^[8]。

2.2 焊接接头力学性能分析

表3为室温拉伸试验结果,同时给出了拉伸断裂

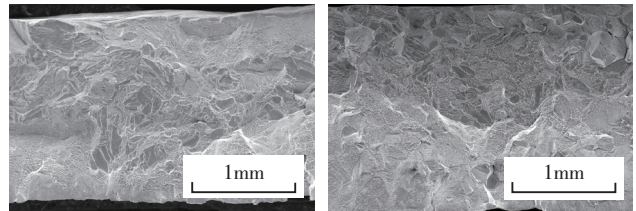
表3 室温拉伸试验结果

试样编号	抗拉强度 R_m /MPa	延伸率/%	断裂位置
1	1024	4.70	热影响区
2	1020	3.03	热影响区
3	1100	8.43	母材
4	1145	2.71	焊缝

位置。焊后焊接接头强度达到母材的85%以上,显示TC17钛合金焊后具有良好的拉伸性能。热处理后焊缝、热影响区得到强化,接头强度达到母材的90%以上。

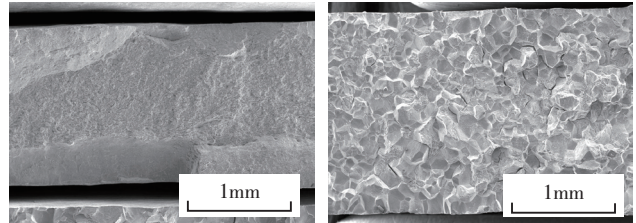
图4所示为4组试验后的拉伸断口形貌。图4(a)、(b)所示为焊后未进行热处理的焊接接头拉伸断口形貌,为混合型断口,表面起伏较大,断口韧窝区面积大于准解理断裂区,显示断口具有一定的韧性。图5(a)所示是2#试样的局部放大照片,可见较浅的韧窝形貌,整体轮廓显示晶粒形貌,晶粒尺寸符合热影响区晶粒特征。

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,断裂位置为母材,断口全部为韧窝形貌,呈现明显的韧性断裂特征。图4(d)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,可见沿晶断裂特征,结合图5(b)的局部放大图片,可见沿晶界断裂为光滑的表面,沿晶粒内部断裂则具有一定的韧窝形貌,晶粒内部韧性好于晶界。



(a) 1# 试样

(b) 2# 试样



(c) 3# 试样

(d) 4# 试样

图4 室温拉伸断口形貌

Fig.4 Fracture morphology of tensile tests at room temperature

表4统计了热处理前后焊缝位置晶界、晶粒内部各合金元素含量的分析结果。TA2纯钛焊丝的添加,并未对焊缝原有成分造成明显的稀释,焊缝的合金成分仍在设计的范围内。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,晶界的Sn、Zr元素有所减少。Sn、Zr属于中性元素,在 α -Ti和 β -Ti中都有较大的溶解度,对钛合金有显著的强化作用^[9]。热处理过程使Sn、Zr元素由焊缝的晶界位置向晶粒内扩散,对晶粒内部起到了固溶强化的作用,而晶界位置相对于热处理前强度下降。结合图3(b)焊缝柱状晶形貌特征,柱状晶平行于拉伸应力方向,因此受到拉伸正应力作用,裂纹容易沿柱状

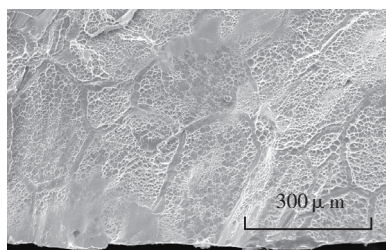
晶之间产生并扩展,最终形成沿晶断裂的形貌特征。

表5为热处理后的焊接接头高温拉伸和高温持久试验结果,表明焊接接头经热处理后,400℃抗拉强度达到母材的95%以上,并且持久强度满足设计要求。无论焊前是否涂覆活性剂,焊后热处理均可以显著强化焊接接头,使焊接接头满足使用要求。因此,TC17钛合金对TIG焊接方法具有良好的适应性,显示出这种合金具有良好的焊接性。

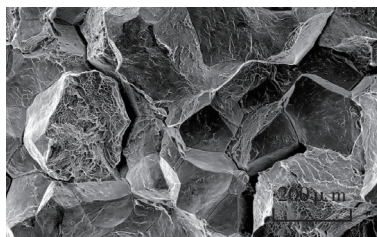
3 结论

(1) TC17钛合金TIG焊接接头存在明显的3个区域,即焊缝、熔合线和热影响区。焊缝区柱状晶特点明显并沿垂直于熔合线的方向生长,热影响区晶粒较大,焊接接头组织较母材有软化的倾向。

(2) 焊前涂覆活性剂可以减少焊接接头气孔的产



(a) 试样 2



(b) 试样 4

图5 拉伸断面局部形貌

Fig.5 Local morphology of fracture

表4 热处理前后焊缝元素含量分析 %

元素	晶界		晶粒内部	
	热处理	未热处理	热处理	未热处理
Al	4.46	4.55	4.62	4.48
Cr	3.87	3.47	3.57	3.44
Mo	4.25	4.34	4.40	4.33
Sn	2.00	2.16	2.20	2.07
Zr	1.50	2.24	2.42	2.11

表5 400℃拉伸和持久试验结果

试样编号	抗拉强度 R_m /MPa	延伸率 δ /%	持久强度 t_h
3	875	8.33	>100
4	867	14.4	>100

生,活性剂TIG焊接和传统TIG焊接均可以获得符合HB5376-1987标准的I级焊缝。焊后热处理能够改善焊缝区和热影响区的晶体组织,使焊接接头硬度大幅提高。

(3) 焊后焊接接头强度达到母材强度的85%以上,热处理后接头强度可达母材的90%以上;热处理后的焊接接头高温拉伸强度达到母材95%以上,并且持久性能满足设计需求,显示出TC17钛合金具有良好的焊接性。

参考文献

- [1] 马金瑞,黄峰,赵龙,等. Z-Pin/RTM成型工艺影响因素分析及工艺研究. 航空制造技术,2014(15):118-121.
 - [2] 徐斌,王晓英,周建华,等. TC17钛合金在热变形过程中的组织演变规律. 中国有色金属学报,2010,27(1):167-172.
 - [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] 魏晓棠. 钛合金的钨极氩弧焊. 钛工业进展,2008(6):38-41.
 - [5] 高飞. 钛及钛合金材料的焊接技术. 石油化工建设,2006,28(4):38-42.
 - [6] 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.
 - [7] 何宜柱,张文学,周红伟,等. TC21两相钛合金中斜方马氏体的失效分解. 稀有金属材料与工程,2012,41(5):800-804.
 - [8] 杜欲晓,王大鹏,郭德伦,等. 活性剂对TA15钛合金对接及T形穿透焊接头的影响. 焊接学报,2010,31(7):98-100.
 - [9] 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 亿霖)

(上接第69页)

参考文献

- [1] 杨健. 钛合金在飞机上的应用. 航空制造技术,2006(11):41-43.
 - [2] Boyer R R. Overview on the use of titanium in the aerospace industry. Materials Science and Engineering,1996,213(1-2):103-114.
 - [3] 江志强,杨合,詹梅,等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景. 塑料工程学报,2009,16(4):44-51.
 - [4] 邓志刚,盛长城,赵勇. 异种钛合金TIG焊接接头的组织和性能. 中国特种设备安全,2010,26(9):41-43.
 - [5] 徐龙勇,殷志明. TC4钛合金TIG焊接接头的断裂性能. 科技创业家,2013(11):57-60.
 - [6] 吴玮璐,于振涛,邓炬. TA16的焊接性能. 金属学报,2002(38):305-307.
 - [7] 韩继军,余军,董俊辉. TC4钛合金TIG焊接头组织及力学性能. 实验与研究,2011,40(4):15-17.
 - [8] 孙凯,刘忆. 断裂力学理论及其研究方法在材料学中的应用. 辽宁工程技术大学学报,2005(S1):230-234.
 - [9] 李庆芬. 断裂力学及其工程应用. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1998.
 - [10] Zhou W,Chew K G. Effect of welding on impact toughness of butt-joints in a titanium alloy. Materials Science and Engineering,2003,347(1-2):180-185.
- (责编 叶枫)