

TC4 合金 TIG 焊接头组织转变与力学性能分析

吴 巍, 程广福, 高洪明, 吴 林

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对 TC4 合金 TIG 焊接头微观组织特征以及焊接过程中的组织转变规律进行了研究, 并对接头力学性能进行了分析. 经历 TIG 焊接热循环之后, 焊缝及热影响区粗晶区晶粒严重粗化, 热影响区晶粒尺寸具有突变特征, 过渡区组织呈带状分布, 不存在明显的细晶区. 升温过程中($\alpha + \beta$) $\rightarrow \beta$ 转变过程包括两个阶段: 原始 $\beta \rightarrow$ 高温 β 转变和原始 $\alpha \rightarrow$ 高温 β 转变, 而且在原始 $\alpha \rightarrow$ 高温 β 转变开始之前, 原始 $\beta \rightarrow$ 高温 β 转变已经完成. 冷却过程中在 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变区间冷速较慢时, α' 相首先在高温 β 晶界上形核, 并向晶内生长, 生成针状 α' ; 在快速冷却时, α' 相在晶内大量形核, 形成“筐篮”组织. 硬度测量结果表明, 粗晶区部位存在一个软化区; 接头抗拉强度与母材接近, 接头性能优异.

关键词: TC4 合金; 热影响区; 组织转变; 力学性能

中图分类号: G115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)07-0081-04



吴 巍

0 序 言

钛及钛合金具有高的比强度和优异的抗腐蚀性, 同时具有密度小, 耐热性、韧性和焊接性较好的特点, 是优良的结构材料, 因此, 在航空、航天、造船、化工等工业部门得到广泛应用^[1]. 其中 TC4(Ti-6Al-4V)合金是使用最广泛、最成熟的典型 $\alpha + \beta$ 双相钛合金, 该合金现在占到钛合金总产量的 50% 以上, 占到全部钛合金加工件的 95%^[2]. 其中航空工业是最先研制和应用 TC4 合金的部门, 在航空航天中用量超过 80%, 主要用在飞机的机身、机翼蒙皮和各种承力构件以及压气机盘、叶片等承受大应力的旋转件, 而其中很多构件都采用了焊接结构^[3]. 在钛合金 TIG 焊接过程中, 解决钛合金 TIG 焊接区组织粗大问题成为钛合金焊接结构可靠应用的关键所在^[4].

在焊接过程中, 由于钛合金本身热容大, 导热性差, 熔点高, 使得焊接接头在高温区间停留时间长. 而合金元素在 β 相中的扩散系数很大, 因此钛合金的加热温度一旦超过 β 相变点, 高温 β 相将快速长大成粗晶组织, 产生所谓“ β 脆性”^[5]. 根据合金化元素含量和经历的焊接热循环的不同, 钛合金冷却过程中能形成不同的亚稳相, 这些相能显著地改变近

缝区性能. 相和组织转变的特征, 常常导致焊缝金属的脆化^[6]. 因此, 针对 TC4 合金 TIG 焊接接头微观组织特征以及焊接过程中的组织转变规律进行了研究, 并对接头力学性能进行了分析.

1 试验方法

试验材料为厚度 1.0 mm 的 TC4 合金板材, 采用反复轧制的大塑性变形方法制得, 其化学成分如表 1 所示. 其抗拉强度为 935 MPa, 平均晶粒尺寸(α 相)为 19 μm , 微观组织为等轴状 α 晶粒和分布于其间的层片状 $\alpha + \beta$ 双相结构, 如图 1 所示.

表 1 试验用 TC4 合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.51	4.08	0.16	0.01	0.05	0.0016	0.19	余量

对 TC4 合金进行 TIG 堆焊试验, 并加工金相和拉伸试样. 采用 PME OLYMPUS 光学显微镜及 FEI Sirior 扫描电镜对焊接接头进行金相观测和分析. 采用万能拉伸试验机测量不同热输入条件下接头抗拉强度, 采用 HV-5 型小载荷维氏硬度仪对不同热输入时焊缝及热影响区硬度进行测量, 测量点位于 1/2 熔深处, 沿水平线进行, 试验载荷 0.98 N, 加载时间 10 s.

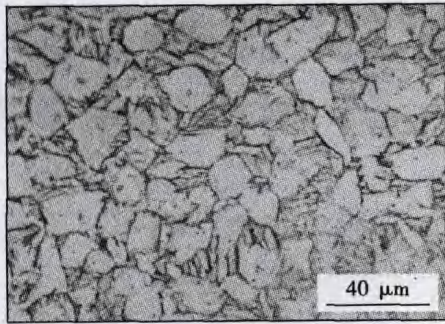
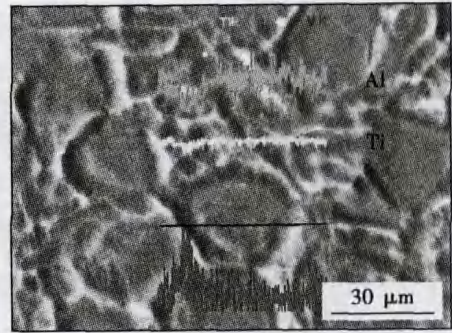


图1 母材微观组织形貌

Fig.1 Microstructure of base metal

图3 α 晶粒边缘元素分布Fig.3 Elements distribution of α grain boundary

2 接头组织及转变过程分析

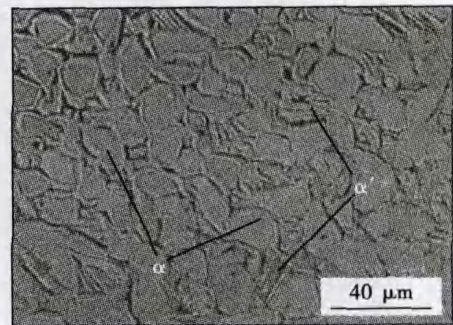
图2为焊接接头截面的组织形貌,从右至左依次为母材、过渡区、粗晶区和焊缝区。可以看到,经历TIG焊接热循环之后,母材等轴晶粒组织消失,焊缝及热影响区粗晶区晶粒严重粗化,组织粗大。粗晶区与过渡区之间晶粒尺寸具有突变的趋势,在热影响区中不存在明显的细晶区。远离焊缝靠近母材的热影响区组织,形成了具有带状形貌的,较为宽大的过渡区。文中根据焊接热循环作用下TC4合金的组织分析结果,对接头各区域组织特征及其转变过程加以研究。

图2 TIG焊接头组织形貌($I=40\text{ A}$)

Fig.2 Microstructure of joint during TIG welding

TC4合金在焊接加热中,发生 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 的转变过程。这一过程包括两个阶段:原始 $\beta\rightarrow$ 高温 β 转变和原始 $\alpha\rightarrow$ 高温 β 转变,而且在原始 $\alpha\rightarrow$ 高温 β 相转变开始之前原始 $\beta\rightarrow$ 高温 β 转变完全完成。

$(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变过程中 β 相首先转变,使得分布与 α 晶粒间的原始 β 组织消失。当温度升高到 α/β 相变温度时,将发生原始 $\alpha\rightarrow$ 高温 β 相的转变,首先 α 相中的 β 稳定元素V在加热过程中由晶粒内部向外扩散, α 晶粒边缘元素浓度首先出现不平衡状态,见图3。位于晶界的高温 β 晶粒获得稳定元素而不断长大,蚕食 α 晶粒,直到转变过程结束,见图4。

图4 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 的相转变Fig.4 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ Phase transformation

在原始 $\alpha\rightarrow$ 高温 β 转变同时, β 晶粒将以突跳方式,合并周围的小晶粒迅速长大。钛合金焊接时热影响区中 β 晶粒的长大,首先取决于最高加热温度,在此温度下的停留时间和近缝区冷却速度对晶粒尺寸和晶内组织会产生显著影响^[7]。钛合金熔点高,导热性能差,使得热影响区的近缝区长时间处于过热状态, β 晶粒严重长大。

当温度升至 β/L 转变温度时, β 相向液相转变,形成焊接熔池。

TC4合金在冷却过程中, β 相可以以扩散方式转化为 α 相,或是以切变方式转变为 α' 相,或者是两相的混合组织。快速冷却中生成的初生 α' 板条相互平行,穿过分割 β 晶粒,而次生成的不同尺寸与位相的 α' 相分布在初生 α' 板条分割的区域里。

钛的 α/β 相变体积效应不大,约为0.17%,只有铁的 γ/α 相变的1/50,因此钛的相变应力很小,不足以使新相大量形核。相变时,各相之间存在着严格的晶体学取向关系和强烈的组织遗传性^[8]。因此,冷却过程中形成的晶粒保持了高温 β 晶界,相变过程在 β 晶粒内部发生,晶粒大小不发生变化。

焊缝区在冷却过程中,晶粒依附熔合区附近加热到半熔化状态的基体金属的晶粒表面,以柱状晶的形态向焊缝中心生长,形成交互结晶,也称联生结

晶,(图 2). 焊缝组织是由粗大 β 晶粒转变而成的 α' 相,即针状马氏体组织(图 5a). 在 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变区间, α' 相首先在 β 晶界上形核,并向晶内生长,形成片状 α' 组织,且呈一定位相排列,而原始 β 晶界保留下来. 由于焊缝金属冷却很快,片状 α' 又细又尖,呈针状 α' 马氏体形态.

构成层状交错分布的混合组织,过渡区微观组织如图 5d 所示.

3 接头力学性能测试与分析

图 6 为不同热输入时 TC4 合金接头硬度分布,可以看到,热影响区粗晶区部位存在一个软化区. 在较小的热输入作用时,此软化区间硬度与母材接近,而较大热输入作用时,粗晶区硬度降低较多,硬度明显小于母材. 随着热输入的增大,软化区进一步向过渡区偏移.

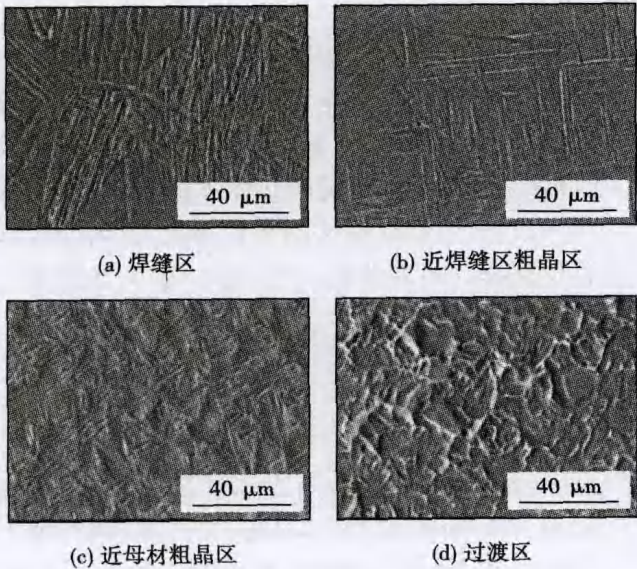


图 5 焊缝不同区域微观组织
Fig.5 Microstructure of different zones in weld

临近焊缝区的热影响区粗晶区部位在 α/β 相转变温度以上停留较长时间, α 相完全转变为 β 相,并充分长大,形成粗大的 β 等轴晶,在冷却过程中,转变为 α' 相. 由于此区加热温度低于焊缝,并且冷却速度比焊缝快, α' 相的扩散形成更加困难. 因此,在形成的 α' 相中,片状 α' 更细更尖,金相测量结果显示 α' 针比焊缝组织细小,如图 5b 所示.

在距离焊缝区较远的区域,此区域加热到 $\alpha + \beta$ 双相区间,仅有部分的 α 相转化为 β 相,而且,由于热流及成分的不均匀分布,部分 β 相异常长大,成为较为粗大的等轴晶. 部分 β 晶粒的长大使得这个区域的晶粒组织大小极不均匀(图 2). 在冷却过程中,由于冷速更快 α' 相在 β 晶粒内部大量形核,生成“筐篮”状 α' 马氏体,而未发生相变的 α 相保留下来,由此形成了两者的混合组织. 随着距焊缝中心距离的增大, α' 相所占比例逐渐减少,而 α 相不断增多. 微观组织如图 5c 所示.

在热影响区远离焊缝区的过渡区域,由于远离热源,金属在 β 相区仅存在极短的时间,只有很少的 α 相转化为 β 相,而且 β 晶粒很难长大或成长非常有限,并且在冷却过程中转化为 α' 相. 由于成分分布的不均匀性,生成的 α' 相成带状分布,与残留的 α 相

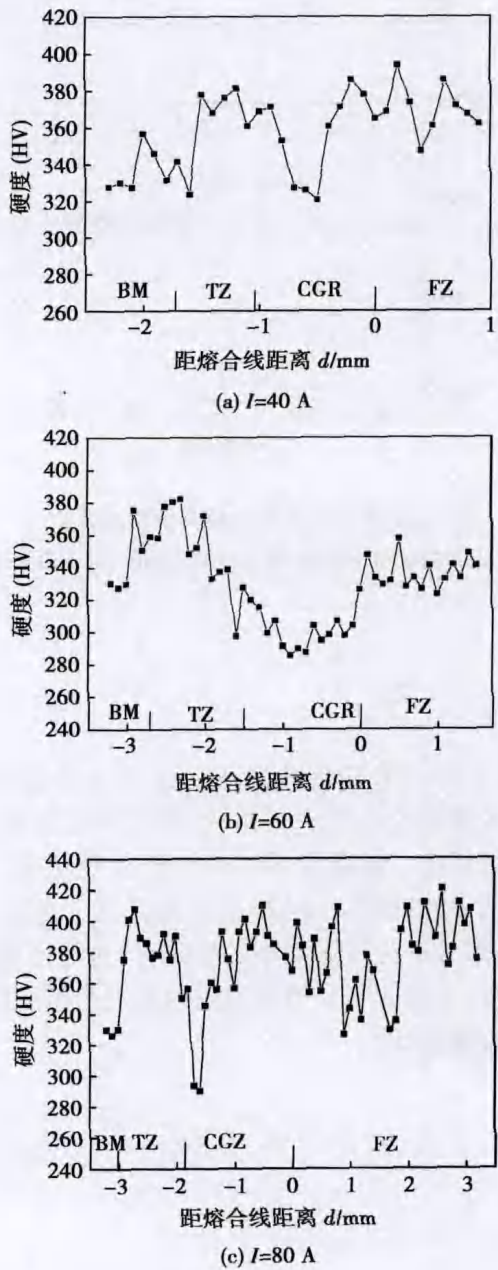


图 6 接头硬度分布
Fig.6 Hardness distribution of joint

不同热输入条件下,接头的抗拉强度如表 2 所

示. 可以发现,接头断裂于母材部位,焊接接头抗拉强度与母材相当,接头性能优异. TC4 合金接头抗拉强度变化如图 7 所示,随着焊接电流的增大,接头强度呈上升趋势.

表 2 TC4 合金对接焊工艺参数
Table 2 Parameters of TIG welding for TC4

序号	焊接电流 <i>I</i> /A	电弧电压 <i>U</i> /V	焊接速度 <i>v</i> /(mm·s ⁻¹)	抗拉强度 <i>R_m</i> /MPa
1	40	8.6	4	1 053
2	50	8.8	4	1 038
3	60	9.2	4	1 024
4	70	9.7	4	1 145
5	80	9.5	4	1 127

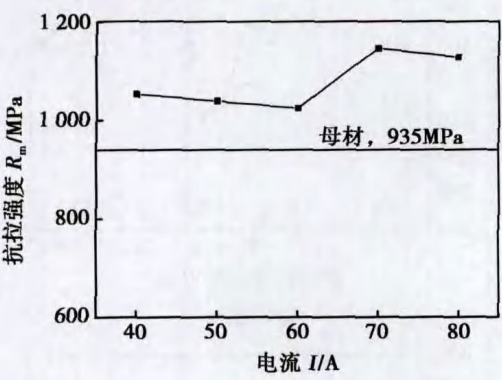


图 7 不同焊接电流下接头的抗拉强度

Fig.7 Variation of tensile strength of joint for TIG welding

4 结 论

(1) 经历 TIG 焊接热循环之后,TC4 合金焊缝及热影响区粗晶区晶粒严重粗化,热影响区晶粒尺寸具有突变特征. 焊缝区的组织为粗大柱状晶,显微组织为粗大的针状 α' ;热影响区粗晶区为粗大的等轴晶,显微组织为较为细小的针状 α' ;过渡区组织呈带状分布,生成 α' 与 α 相交错分布的混合组织;不存在明显的细晶区.

(2) 升温过程中,TC4 合金的($\alpha + \beta$) $\rightarrow \beta$ 相转变过程包括两个阶段:原始 $\beta \rightarrow$ 高温 β 转变和原始 $\alpha \rightarrow$ 高温 β 转变,而且在原始 $\alpha \rightarrow$ 高温 β 转变开始之前原始 $\beta \rightarrow$ 高温 β 转变已经完成. 冷却过程中,在 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变温度区间冷速较慢时, α' 相在 β 晶界上形核,向晶内生长,且呈一定位相排列,生成针状 α' ;在快速冷却时, α' 相在 β 晶粒内部大量形核,形成“筐篮”组织.

(3) 硬度测量结果表明,粗晶区存在一个软化区. 在较小的热输入作用下,此软化区间硬度与母材接近,而较大热输入作用下,粗晶区硬度降低较多,硬度明显小于母材. 随着热输入的增大,软化区进一步向过渡区偏移;接头的抗拉强度与母材相当,接头性能优异. 随着热输入的增大,接头强度呈上升趋势.

参考文献:

[1] Froes F H, Eylon D, Bomberger H. Titanium technology: present status and future trends[M]. OH: Bomberger TDA Publication, 1985.

[2] Matucha K H. Materials science and technology-structure and properties of nonferrous alloys[M]. Wiley-VCH, Federal Republic of Germany: 1996.

[3] Boyer R, Welsch G, Collings E W. Materials properties handbook: titanium alloys[M]. OH: ASM, Materials Park, 1990.

[4] Zhou W, Chew K G. Effect of welding on impact toughness of butt-joints in a titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 347(1,2): 180 - 185.

[5] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京:航空工业出版社, 2000.

[6] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京:机械工业出版社, 1995.

[7] Ernest Levine, Ira Greenhut, Harold Margolin. Grain size and grain growth in equiaxed alpha-beta titanium alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1973, 4(11): 2519 - 2525.

[8] Grewal G, Ankem S. Particle coarsening behavior of α - β titanium alloy [J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21(6): 1645 - 1653.

作者简介: 吴 巍,男,1976 月出生,博士研究生.主要从事钛合金焊接接头组织演变过程的研究. 发表论文 6 篇.

Email: wuws@163.com