

● 焊接技术 ●

TC4 钛合金电子束焊与 TIG 焊焊接接头的组织性能对比研究

张凤英, 邓娟丽, 姜超平, 张学敏

(长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:针对 TC4 钛合金电子束焊及 TIG 焊焊接接头的凝固组织、微观相结构及接头静载室温拉伸性能进行了对比研究。结果发现, TIG 焊接接头热影响区内为较粗大的等轴晶, 焊缝区内凝固组织为粗大柱状晶, 柱状晶粒生长方向由最初的垂直于焊缝-热影响区界面逐渐转为垂直向上生长。电子束焊接接头组织形态同样是热影响区为等轴晶粒形态, 而焊缝区内为柱状晶粒, 等轴晶和柱状晶粒的尺寸较 TIG 焊均明显减小, 且柱状晶生长方向始终垂直于焊缝-热影响区界面。TIG 焊焊缝区原始 β 晶内的微观组织由魏氏 α 板条、针状马氏体 α' 以及 β 基体组成, 而电子束焊焊缝原始 β 晶内的微观组织由大量细长针状马氏体 α' 及 β 基体组成。力学性能测试结果表明, 电子束焊焊接接头的强度略高于 TIG 焊, 塑性显著优于 TIG 焊。

关键词: 电子束焊接; TIG 焊接; 组织; 力学性能**中图分类号:** TG146.2¹; TG456.3**文献标识码:** A**文章编号:** 1001-3814(2012)07-0105-04

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Welding and TIG Welding of TC4

ZHANG Fengying, DENG Juanli, JIANG Chaoping, ZHANG Xuemin

(School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The morphologies of the prior-grains, the phase structure in the prior-grains and the room temperature mechanical properties of electron beam welding of TC4 and TIG welding of TC4 were investigated. It was found that the heat affected zone of the TIG welding TC4 was dominated by the large equiaxed grains and the weld seam was dominated by the large columnar grains. The growth direction of the columnar grains was perpendicular to the boundary between the weld seam and the heat affected zone firstly, and then changed to the vertical upward direction. The sample obtained by electron beam welding was also dominated by columnar grains in the weld seam and the equiaxed grains in the heat affected zone, and the grains sizes were all smaller than that of the TIG welding sample. Meanwhile, the growth direction of the columnar grains was always perpendicular to the boundary between the weld seam and heat affected zone. The microstructure in the prior- β grains of the TIG welding TC4 is composed by the Widmanstten α lath, the martensite α' and the β phase. The microstructure in the prior- β grains of the electron beam welding TC4 is composed by large quantities of martensite α' and the β phase. The performance test results show that the strength of the electron beam welding TC4 is a little higher than that of the TIG welding TC4, and the plasticity was much higher than that of the TIG welding TC4.

Key words: electron beam welding; TIG welding; microstructure; mechanical property

TC4(Ti-6Al-4V)钛合金因具有比强度高、热强性好、耐腐蚀、生物相容性好等一系列优点,近年来在航空航天、石油化工、造船、汽车、医药等部门得到了越来越广泛的应用^[1]。在 TC4 钛合金的各种连接

方法中,焊接技术因具有材料利用率高、减轻结构重量、连接成本低等方面的技术优势而被广泛采用。

TC4 钛合金在保护良好的条件下可以采用 TIG 焊、MIG 焊、等离子弧焊(PAW)及电子束焊(EBW)等多种方法进行焊接。其中电子束焊接技术由于具有能量密度高、焊缝和热影响区窄、焊接变形小、焊缝深宽比大等一系列技术优势而引起更为广泛的关注^[2]。国内外相继有研究者针对真空电子束焊接 TC4 钛合金技术展开研究。Saresh 等^[3]以 17.5 mm 厚 TC4 板

收稿日期: 2011-10-10**基金项目:** 西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放课题资助项目

(SKLSP201102);中国博士后科学基金资助项目(20110491683)

作者简介: 张凤英(1980-),女,天津人,博士,主要研究方向:激光加工和焊接技术;电话:02982337340;E-mail:zhangfengying@chd.edu.cn

材为研究对象,针对电子束焊接 TC4 厚板的焊接工艺展开研究。Irisarri 等^[4]研究了电子束焊接 17 mm 厚板时,采用不同焊接方式时焊接接头的组织和显微硬度分布。刘昕等^[5]研究了 TC4 钛合金电子束焊接接头相变的热力学特征。吴会强等^[6]研究了电子束焊接热输入对 Ti-6Al-4V 组织结构的影响。刘金合等^[7]研究了电子束局部热处理对 TC4 钛合金焊接接头组织和性能的影响等。以上工作大多集中于对焊接工艺的研究和焊接微观组织特征的描述,而对于焊接接头内凝固组织的形成机理分析很少报导。

本研究针对真空电子束焊接 TC4 钛合金焊接接头的微观组织及力学性能展开研究,并与传统 TIG 焊的组织性能进行对比分析。结合多元合金凝固柱状晶-等轴晶转化模型 (Columnar to equiaxed transition, CET) 及焊接熔池凝固条件分析,揭示焊缝区内凝固组织形成机理;研究焊缝内原始晶内的微观相结构特征;在此基础上,对比分析凝固组织及微观相结构特征对焊接接头室温拉伸性能的影响。

1 试验材料与方法

试验材料为 TC4 钛合金锻件,其微观组织如图 1 所示。可看出,TC4 锻件基体的显微组织呈等轴组织形态,等轴 α 较为均匀地分布在 β 基体上,部分 α 相略有拉长。试样尺寸为 60 mm × 30 mm × 12 mm,焊前用砂纸打磨以除去表面氧化层,随后用丙酮擦洗表面。

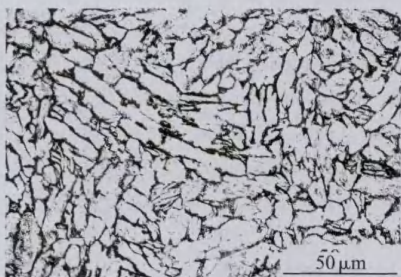


图 1 TC4 锻件母材微观组织

Fig.1 Microstructure of the TC4 wrought base

采用 ZD150-15A 型高压真空电子束焊机沿试样 60 mm 长度方向进行单道对接焊,焊接工艺参数为:加速电压 150 kV,聚焦电流 340 mA,电子束电流 32 mA,焊接速率 10 mm/s。

采用 Lincon315 型 TIG 焊机沿试样 60 mm 长度方向进行 TIG 焊接。试样连接区域开对称 60° X 型坡口,如图 2 所示。焊接过程中采用 $\phi 1.2$ mm 的 TC4 丝材作为填充材料,氩气保护,焊接工艺参数为:焊接

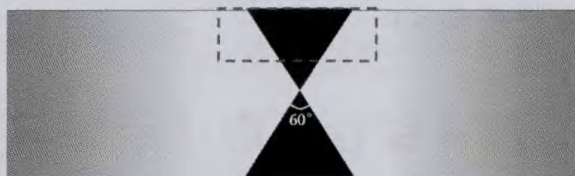


图 2 TIG 焊接接头形式示意图

Fig.2 Schematic of the joint of TIG welding

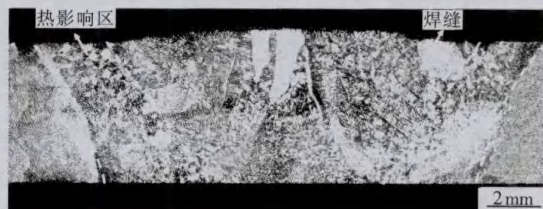
电流 120 A,电弧电压 10 V,焊接速率 2 mm/s。

采用光学显微镜和扫描电镜对两种方法获得的焊接接头进行组织及相结构分析;制备棒状室温拉伸试样,在英国 INSTRON1196 拉力试验机上进行室温拉伸性能测试。

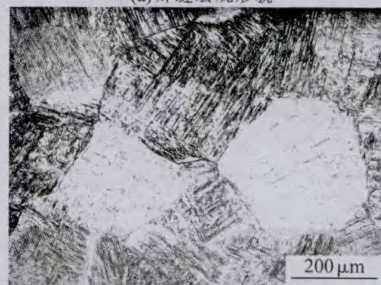
2 试验结果及分析

2.1 凝固组织

图 3 为 TIG 焊 TC4 焊接接头的宏观凝固组织形貌(图 2 中虚线方框所标注的区域)。可看出,TIG 焊热影响区(HAZ)宽约 3 mm,HAZ 内的原始晶粒形态为较粗大的等轴晶,晶粒尺寸约 200~400 μ m。过渡到焊缝区后,晶粒进一步明显粗化,且合金凝固组织逐渐由等轴晶转变为粗大柱状晶,柱状晶粒宽约 500~1000 μ m,长 4~10 mm 不等,其生长方向由最初的垂直于焊缝-HAZ 界面转变为向上生长,且相当一部分柱状晶粒由焊缝-HAZ 界面处贯穿至焊接试样顶部。



(a) 焊缝宏观形貌



(b) HAZ 内等轴晶形貌

图 3 TIG 焊接接头原始 β 晶粒(凝固组织)形貌

Fig.3 Morphology of the prior- β grains of TIG welding joint

图 4 为真空电子束焊接 TC4 接头的宏观凝固组织形貌。可看出,电子束焊的凝固组织特征与 TIG 焊类似,同样是 HAZ 内由等轴晶粒组成,过渡至焊

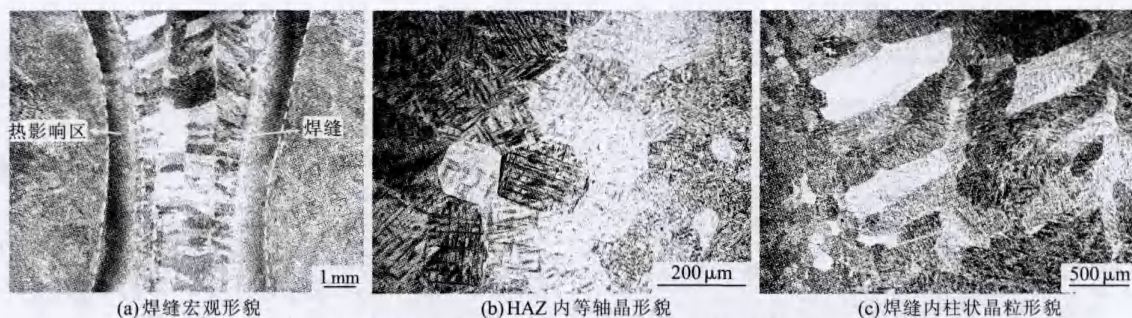


图4 EBW焊接接头原始 β 晶粒(凝固组织)形貌

Fig.4 Morphology of the prior- β grains of EBW welding joint

缝区内转化为相对粗大的柱状晶。与TIG焊相比,HAZ宽度明显减小,仅约1~1.5mm,且HAZ内的等轴晶粒尺寸明显减小,约50~200 μm 。焊缝区域的柱状晶粒尺寸也显著减小,宽仅约100~300 μm ,长约500~1000 μm ,且生长方向始终垂直于焊缝-HAZ界面。从图中可明显看出,与TIG焊缝内柱状晶粒生长特性不同,电子束焊缝区域内的柱状晶生长并不连续,大部分柱状晶粒的长度仅约焊缝宽度的1/4~1/3。

为揭示TIG焊和真空电子束焊接头的凝固组织形成机理,采用多元合金凝固柱状晶-等轴晶转变(CET)模型^[8]对TC4钛合金的CET转变临界条件进行了计算,如图5所示。图中阴影区域分别代表了通常所采用的焊接工艺参数范围内电子束焊接和TIG焊接条件下的合金凝固参数范围。可看出,在通常所采用的凝固参数范围内,两种方法所获得的合金凝固组织均落在柱状晶生长范围内,仅在熔池顶部,才有可能出现柱状晶-等轴晶的生长转变,与试验观察结果相吻合。

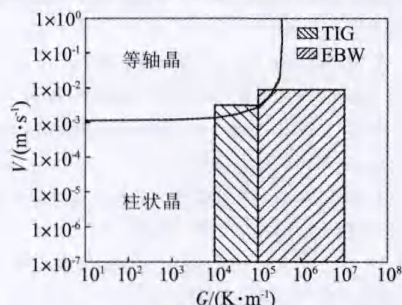


图5 TC4钛合金的柱状晶-等轴晶转变曲线

Fig.5 CET profile showing the regions of columnar dendrites and equiaxed dendrites as a function of temperature gradient G and solidification velocity V

对于晶粒尺寸,由于一次枝晶间距 λ 与凝固速度 V 和温度梯度 G 之间存在如下的近似关系: $\lambda \propto V^{-a} G^{-b}$ (a, b 为与合金系相关的常数)^[8],可以看出,柱状晶粒尺寸与凝固速度及温度梯度成反比,由于电子束焊接的凝固速度和温度梯度均显著大于TIG焊,

因而焊缝内的柱状晶粒尺寸显著小于TIG焊缝。

对于晶粒生长方向,由于枝晶生长方向受热流方向和晶粒生长择优取向的影响,将选择与热流方向最为接近的择优取向进行生长。对于电子束焊接而言,由于其焊接过程中采用对接焊的方式,且合金凝固速度较快,其热流方向始终垂直于焊缝-HAZ界面,因而柱状晶生长方向基本垂直于焊缝-HAZ界面。而对于TIG焊,由于其焊接过程中采用开坡口的多层堆焊方式,在进行后续堆焊的时候,坡口边缘处熔化界面与焊缝-HAZ界面基本一致,因而开始时柱状晶生长方向垂直于焊缝-HAZ界面,但是在远离坡口边缘的焊缝中部,由于是在上一层焊接层的表面进行材料堆焊,熔化界面方向转变为水平方向,热流方向转变为垂直水平面向上,因而其凝固组织特征中,柱状晶生长方向由最初的垂直于焊缝-HAZ界面转变为垂直向上。

2.2 微观相结构

图6为TIG焊和电子束焊缝原始晶内的微观相结构。可看出,TIG焊缝原始 β 晶内组织由部分魏氏 α 板条、针状马氏体 α' 以及少量 β 相组成(图6a);电子束焊缝原始 β 晶内组织由大量细长的针状马氏体 $\alpha'+\beta$ 基体组成,其中针状 α' 长约20~80 μm 不等,平均宽约2 μm (图6b)。

Ahmed等^[9]的研究表明,Ti-6Al-4V合金冷却过

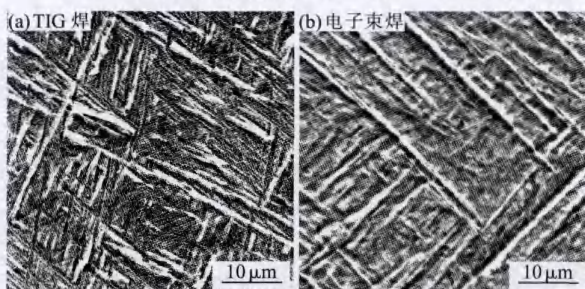


图6 TIG焊和电子束焊接接头原始晶内的微观相结构

Fig.6 Micrographs showing the microstructures in prior- β -Ti grains of TIG welding joint and EBW welding joint

程中,当冷却速率大于410K/s时,得到全马氏体组织。在本研究中,对于电子束焊接,由于焊接过程并未添加焊缝材料,且单层单道完成焊接过程,焊接过程中的冷速较高,超过马氏体形成的临界转变速率,因而部分 β 相通过切变的方式转变成马氏体 α' ,最终获得细针状 α' 分布在 β 基体上。而对于TIG焊,由于在本研究条件下采用多层堆焊工艺,TIG焊接过程实质上是逐步增材制造过程,焊缝内的不同区域要经历复杂的焊接热循环过程,焊接第一层时,由于冷速较高,可能超过马氏体形成的临界转变速率410K/s,因而得到马氏体 α' ,而随着焊接过程的进行,在随后的热循环过程中,合金相变点温度附近的冷却速率大大降低,部分马氏体由于受到再热循环的作用而转变为平衡组织 α 板条分布在 β 基体上,因而其最终的焊缝组织为部分马氏体 α' +魏氏 α 板条+ β 基体组成。

2.3 力学性能

图7为TIG焊和电子束焊接试样的室温拉伸性能,并与锻件标准进行对比。可看出,电子束焊接试样的强度略高于TIG焊,同时塑性显著高于TIG焊接试样,其综合室温拉伸性能达到锻件标准。分析是由以下两方面的因素导致电子束焊接试样的综合室温拉伸性能高于TIG焊:①电子束焊接试样接头内的宏观晶粒尺度显著小于TIG焊;②由于拉伸试样的拉伸方向垂直于焊缝,对于TIG焊,试样拉伸方向与大部分的晶粒生长方向相垂直,即垂直于晶界方向拉伸;而对于电子束焊接试样,试样拉伸方向始终与焊缝内柱状晶粒的生长方向相一致,即平行于晶界方向拉伸,因而电子束焊接试样的室温拉伸性能测试结果显著优于TIG焊。

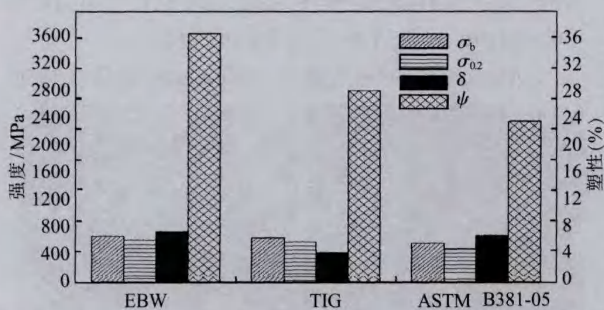


图7 电子束焊接与TIG焊接Ti-6Al-4V合金的室温拉伸性能
Fig.7 Room temperature tensile properties of EBW welding and TIG welding Ti-6Al-4V alloy

3 结论

对厚度为12mm的TC4锻件基体进行电子束焊接和TIG焊接,并研究了两种焊接方式下所获得的焊接接头的凝固组织、微观相结构及接头静载室温拉伸性能,结果发现:

(1) 电子束焊接和TIG焊接试样焊缝内的凝固组织均由柱状晶粒组成,其中电子束焊缝内的柱状晶粒生长方向始终垂直于焊缝-HAZ界面,而TIG焊缝内的柱状晶粒生长方向由最初的垂直于焊缝-HAZ界面转变为垂直焊接试样表面向上生长,且柱状晶粒尺寸显著大于电子束焊。两种方法获得的合金凝固组织形态均与CET理论预测结果一致。

(2) 电子束焊缝原始 β 晶内的微观组织主要由细长针状马氏体 α' 与 β 基体组成,TIG焊缝原始 β 晶内由部分魏氏 α 板条、针状马氏体 α' 以及 β 基体组成。

(3) 电子束焊接TC4的综合室温拉伸性能显著超过TIG焊,并达到锻件标准。

参考文献:

- [1] 杨静,程东海,黄继华,等. TC4钛合金激光拼焊接头显微组织及力学性能分析[J]. 焊接学报,2009,30(2):103-106.
- [2] 张永和,何俊,张涛. TC4钛合金电子束焊缝质量缺陷分析与预防[J]. 航天制造技术,2010,(3):17-20.
- [3] Suresh N, Gopalakrishna Pillai M, Jose Mathew. Investigations into the effects of electron beam welding on thick Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007,(83-88):192-193.
- [4] Irisarri A M, Barreda J L, Azpiroz X. Influence of the filler metal on the properties of Ti-6Al-4V electron beam weldments. Part I: Welding procedures and microstructural characterization [J]. Vacuum, 2010,(84):393-399.
- [5] 刘昕,巩水利,雷永平. 钛合金电子束焊接接头相变的热力学特征[J]. 焊接学报,2010,31(2):57-59.
- [6] 吴会强,冯吉才,何景山,等. 电子束焊接热输入对Ti-6Al-4V组织结构的影响[J]. 焊接学报,2004,25(5):41-44.
- [7] 胡美娟,刘金合,康文军,等. 电子束局部热处理对TC4钛合金焊接接头组织和性能的影响 [J]. 焊接学报,2008,29(2):104-107.
- [8] 林鑫,李延民,冯莉萍,等. 合金凝固组织/等轴晶转变[J]. 中国科学E,2003,33(7):577-588.
- [9] Ahmed T, Rack H J. Phase transformations during cooling in α - β titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering, 1998, A243:206-211. [11]