# 钛合金 TIG 焊接头晶粒尺寸非线性梯度特征

张建勋<sup>1</sup>, 董丽娜<sup>1</sup>, 张林杰<sup>1</sup>, 王伊卿<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘 要: 以显微组织与晶粒尺寸统计分析为基础,研究了 TC4 钛合金不同 TIG 焊工艺 的焊接接头显微组织及其晶粒尺寸变化 引入了晶粒梯度特征值概念,以表征钛合金焊 接接头显微组织的非均匀性.结果表明,TC4 钛合金 TIG 焊接头显微组织的晶粒尺寸 从焊缝中心经热影响区至母材呈现非线性变化,晶粒尺寸变化率(晶粒梯度)在柱状晶 区(CZ)和粗晶区(CGZ) 交界处出现最大值,称之为晶粒梯度特征值;随着 TIG 焊热输 入增大,晶粒梯度特征值逐渐减小,但相对位置不发生改变.晶粒尺寸梯度特征值能够 反映钛合金焊接接头组织的不均匀性,这对于探索钛合金焊接接头的服役性能具有重 要的意义.



关键词:钛合金;TIG 焊;晶粒梯度

中图分类号: TG113.26+3 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2012)12-0001-04

张建勋

## 0 序 言

TC4 钛合金在航空航天、化工、医疗等领域有着 广泛的应用.采用熔化焊技术能够使得钛合金实现 良好的冶金接合,但在焊接接头中仍然存在严重的 非均匀组织性能与残余应力,从而会影响钛合金焊 接结构的服役性能<sup>[1-4]</sup>.

张建勋<sup>[5]</sup>提出了焊接接头存在组织性能与残 余应力的"大梯度与尺度效应"的概念,指出焊接接 头强度、损伤、断裂与疲劳等具有大梯度及其尺寸效 应 这对于研究焊接结构的服役可靠性有着重要的 意义. 文献 [6] 研究钛合金高能束焊接接头的晶粒 尺寸梯度对材料损伤性能的影响,发现晶粒尺寸的 大梯度对接头的损伤演化具有延缓作用. 李清华等 人<sup>[7]</sup>采用"多晶局域梯度模型"研究钛合金焊后组 织不均匀性发现 热输入的增大造成焊缝形貌的差 异 影响了焊缝内柱状晶的分布规律 最终使接头疲 劳性能受到很大影响. Liu 等人<sup>[8]</sup>从晶粒取向的角 度研究了 TC4 钛合金焊接接头的非线性不均性特 征 发现焊接热循环作用提高了晶粒取向的各向异 性. Jinkeun 等人<sup>[9]</sup>研究 TC4 钛合金在其不同尺度 效应下组织不均性对疲劳裂纹扩展的影响时发现, 接头越狭窄其组织不均匀性越大,越易产生疲劳

损伤.

焊接接头的组织不均匀性对其性能具有重要的 影响,在钛合金焊接中,晶粒尺寸的大小是影响焊接 接头微区性能的重要因素.然而关于该问题的研究 目前只处于宏观的定性分析阶段,缺少对接头组织 性能不均匀性的量化表征.文中通过对TC4 钛合金 TIG 焊接头组织非均匀性的研究,引入晶粒梯度特 征值的概念,提出了一种分析焊接接头大梯度组织 特征的表征方法.

## 1 试验方法

焊接试验采用商用 TC4 钛合金板材,焊接试板的尺寸为 150 mm × 200 mm × 3 mm, TIG 焊试验沿 垂直于轧制方向进行.

由于钛合金表面有致密的氧化膜,在施焊前需 要对其表面进行非常全面细致的清理. 首先用砂纸 打磨试件表面直至发亮,去除氧化膜. 然后进行酸 洗(配方为25%~30% HNO<sub>3</sub>+3% HF+H<sub>2</sub>O),采 用已经制备好的试剂擦拭试板表面,除去氧化膜及 油污后用清水冲洗,再用脱脂棉蘸取丙酮擦拭试板, 吸去试板表面的水分,并用吹风机吹干后待焊.

为了减小焊接变形,焊接时采用图 1a 所示的带 有紫铜散热夹具的工作台,图 1b 为焊接完成后的试 板. TIG 焊电流分别为 75,100,150 A,电弧电压 12 V,焊接速度为 12 cm/min,氩气流量 8 L/min(喷嘴)

收稿日期: 2012-08-15

基金项目:国家教育部博士点基金资助项目(20100201110065);国 家自然科学基金资助项目(50875200;50975221)

和 10 L/min(拖罩).



(b) 焊接试板

图 1 ZF-800 焊接工作台与焊件 Fig. 1 ZF-800 welding table and welded plate

#### 2 结果与分析

#### 2.1 焊接接头宏观形貌

为了分析焊缝形貌,在不同参数的焊接试件上 采用线切割法截取金相试样,然后进行镶嵌、磨制、 抛光与腐蚀工作,并在光学显微镜下观察焊接接头 横截面的宏观形貌及微观组织形态,采用的腐蚀剂 为 10 mLHF + 25 mLHNO<sub>3</sub> + 100 mLH<sub>2</sub>O.

图 2 表示了 TC4 钛合金 TIG 焊接头的立体宏 观形貌. 由图 2 可观察到晶粒结构以及焊接接头的 各个区域 从横截面能够清晰的区分出焊缝(WM)、 热影响区(HAZ)和母材(BM).根据焊接区的晶粒 尺寸和结构,可划分为柱状晶区(CZ)、粗晶区 (CGZ)、细晶区(FGZ)和母材(BM).



图 2 TC4 钛合金 TIG 焊接头宏观形貌 Fig. 2 Macrostructure of TIG welded joint of TC4

#### 2.2 焊接接头微观组织

TC4 钛合金焊接过程中 在焊接温度高于  $\alpha \rightarrow \beta$ 相变温度的区域,将发生  $\alpha \rightarrow \beta$  转变,形成  $\beta$  晶粒, 同时β晶粒会以突跳的形式将周围的小晶粒合并, 迅速长大. 在快速冷却条件下,液态焊缝金属结晶

时保留了原β晶粒结构,在晶粒内发生固态相变. 原始β晶粒尺寸与加热温度有密切的关系,焊缝高 温停留时间越长 冷却后组织越粗大.

TC4 钛合金母材为  $\alpha + \beta$  双相组织 細小的黑色  $\beta$ 相薄层分布于粗大的白色  $\alpha$  相片层的周围. 焊接 热影响区的粗大晶粒出现在熔合区和粗晶区. 靠近 母材的热影响区组织由于焊接加热的峰值温度较 低 冷却速度相对较慢 生成马氏体含量少 且该区 域含有 $\alpha$ 和 $\beta$ 相,靠近焊缝的热影响区的等轴晶中, 其微观组织主要是马氏体相和少量的  $\alpha$  相.

为了确认焊缝中的马氏体相类型,对电流值为 125 A 和 150 A 的焊缝区域做了 XRD 物相分析 结 果如图 3 所示. 由图 3 可见, TC4 钛合金 TIG 焊接 头的焊缝区域全部为密排六方(HCP) 晶体结构,并 没有斜方晶格和体心立方的晶体结构产生,并根据 各六方晶格的 c/a 常数可以确定在焊缝中的组织全 部为密排六方结构的  $\alpha$  相和  $\alpha$  马氏体组织 而没有  $\alpha$ "相或者过冷  $\beta$  相生成. 对比两条物相分析图谱曲 线可以发现 焊接工艺参数的改变并没有影响焊缝 的相组成 且对相含量的影响也不显著.



图 3 不同焊接热输入焊缝的 XRD 图谱 Fig. 3 XRD of welded zone for different heat input

由此可见,TC4 钛合金在 TIG 焊接过程中,由于 焊接热源对焊件加热的不均匀性,导致到焊缝中心 不同距离的温度分布存在极大的梯度 从而影响接 头的相变和晶粒的长大过程 最终造成微观组织、晶 粒尺寸在焊接接头各个区域的巨大差异.

2.3 焊接接头晶粒尺寸测量与梯度表征

钛合金焊接时 焊缝及热影响区的组织形态及 其晶粒尺寸对材料性能具有重要的影响.

图 4 所示为晶粒尺寸测试位置. 利用光学显微 镜在距离试板上表面 0.3 mm 的横截面上,沿垂直 于焊接接头的方向每隔 0.2 mm 拍照,得到 OM 形貌.

针对微观组织 OM 形貌,采用平均截线法统计



图 4 晶粒尺寸测试位置 Fig. 4 Measuring location of grain size

横截面上的晶粒尺寸分布.测量时在每张照片上用随机直线多次截取晶粒,并测量每条直线上晶界截取到的平均截线长度,再求平均值即为晶粒的平均 直径.对不同热输入的焊接接头,根据测量所得到的晶粒尺寸分布曲线,采用最小二乘法拟合出其光 滑曲线,由此得到TC4 钛合金TIG 焊接头的晶粒尺寸分布曲线.如图5 所示为电流75 A 和125 A 时的 晶粒尺寸分布.





由图 5a 可见,最大晶粒出现在焊缝中心处,粗 大的柱状晶最大值约 550 μm 随着到焊缝中心距离 的增大,柱状晶区、粗晶区、细晶区的晶粒尺寸呈递 减趋势,在细晶区的晶粒尺寸达到最小值,大约 3 μm 左右,母材的晶粒尺寸约为 10 μm.可见焊接接 头的晶粒尺寸从焊缝中心经热影响区至母材呈现非 线性变化.图 5b 中也表现了相似的变化趋势 ,焊缝 中心柱状晶的最大尺寸约 600 μm.

通过对不同焊接工艺下的晶粒尺寸分布分析, 晶粒的长大程度主要和焊接热输入有关,随着焊接 热输入的增加,焊接区的晶粒尺寸逐渐增大.但是 热输入对焊接接头晶粒度分布规律的影响不大,均 呈现如图5所示的形式,即晶粒尺寸都随着到焊缝 中心距离的增大呈现出逐渐减小的分布趋势.

对测量的焊接接头晶粒尺寸的回归曲线进行求 导处理,可以得到不同热输入下焊接接头晶粒梯度 分布规律,结果表明焊接接头晶粒尺寸梯度随着到 焊缝距离的不同而发生变化. 当电流 *I* = 75 A 时, 晶粒尺寸梯度的最大值约在 *L* = 2.3 mm 处; *I* = 100 A 的接头晶粒尺寸最大梯度特征值出现在距焊缝中 心 2.6 mm 处 *J* = 125 A 和 *I* = 150 A 的最大梯度分 别在 *L* = 3.8 mm 和 *L* = 3.9 mm 处. 即不同热输入 焊接接头的晶粒尺寸变化最剧烈的位置,均出现在 接头的柱状晶区和粗晶区的交界处,即熔合区附近. 随着热输入的增大,晶粒尺寸的最大梯度特征值逐 渐减小.

为了比较不同热输入的焊接接头晶粒尺寸的梯 度分布特征,在梯度曲线的横坐标上采用了归一化 处理(图6),图6中的 W<sub>cz</sub>表示焊接接头中柱状晶 区的宽度.由图6可见,晶粒尺寸梯度最大值出现 的位置与 W<sub>cz</sub>的比值为1,直观反映了晶粒尺寸梯度 峰值在焊接接头中的相对位置.为了阐述焊接接头 晶粒尺寸的梯度分布规律,引入了"晶粒梯度特征 值"的概念,以表征钛合金焊接接头显微组织的非 均匀性.



图 6 焊接热输入对晶粒尺寸梯度的影响



从图 6 中取出焊接电流及其相对应的晶粒梯度 特征值数据,发现二者之间接近线性关系.通过线 性回归拟合得到的变化关系曲线如图 7 所示.图 7 中的晶粒尺寸最大梯度特征值与焊接电流之间的关 系表示为

$$G = -0.414I + 213.4$$

式中: G 为晶粒最大梯度特征值; I 为焊接电流.







研究提出了"晶粒梯度特征值"概念,并指出其 位置出现在柱状晶和粗晶区的交界处. 形成此现象 的原因可以做如下表述,首先 TIG 焊接头的焊缝区 域柱状晶的形成是以焊接热影响区未熔化的金属为 基体生长而来 故存在于焊接热影响区一端的柱状 晶会将焊缝金属大量的结晶潜热聚集到与焊接热影 响区的交界处 从而在此处产生很大的温度梯度 造 成晶粒生长的"热钉扎效应"<sup>[10]</sup> ,导致焊接接头热影 响区靠近熔合区的晶粒长大被抑制,晶粒尺寸在此 发生突变;其次在焊接热循环过程中,焊接热影响区 的晶粒由于其内部温度梯度的存在而呈现非均匀分 布状态 且随着到熔合线的距离的减小 焊接热影响 区晶粒尺寸逐渐增大,但是未完全熔化的熔合区会 对靠近该区域的热影响区晶粒产生"晶界熔融钉扎 效应"[11] 从而限制了其晶粒长大趋势. 因此熔化 区和焊缝金属粗大的柱状晶区之间会形成一个突 变 即表现为梯度最大位置.

## 3 结 论

(1) 焊接接头晶粒尺寸从焊缝中心经热影响区 至母材呈现非线性变化,其梯度在柱状晶区和粗晶 区交界处出现最大值.

(2)提出将焊接接头的晶粒尺寸梯度最大值定 义为"晶粒梯度特征值",以表征焊接接头显微组织 的非均匀性.

(3) "晶粒梯度特征值"随着 TIG 焊热输入增 大而逐渐减小 但相对位置不发生改变.

### 参考文献:

- Casalino G , Curcio F , Minutolo F , et al. Investigation on Ti6Al4V laser welding using statistical and Taguchi approaches [J]. Journal of Materials Processing Technology ,2005 ,167: 422 –428.
- [2] Qi Yunlian , Deng Ju , Hong Quan , et al. Electron beam welding , laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet[J]. Materials Science and Engineering A , 2000 (280): 177 - 181.
- [3] 尹丽香,许鸿吉,魏志宇,等. TC4 钛合金电子束焊接接头高温性能与组织[J]. 焊接学报,2007,28(10):49-52.
  Yin Lixiang, Xu Hongji, Wei Zhiyu, et al. Microstructures and high-temperature properties of TC4 titanium alloy joints welded by electron beam [J]. Transactions of the China Welding Institution,2007,28(10):49-52.
- [4] Balasubramanian V, Jayabalan V, Balasubramanian M. Effect of current pulsing on tensile properties of titanium alloy [J]. Materials and Design, 2008(29) : 1459 – 1466.
- [5] 张建勋. 金属焊接性能的不均匀性及其尺度效应[J]. 电焊机,2009,39(1):24-28.
  Zhang Jianxun. Unevenness of metal welding performance and its scale effect study[J]. Electric Welding Machine,2009,39(1):24-28.
- [6] 张建勋,宋 旭,董丽娜. 钛合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接接头塑性损 伤行为分析[J]. 焊接学报,2011,32(5):1-4. Zhang Jianxun, Song Xu, Dong Lina. Analysis on plastic damage evolution of laser welded joint of titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution,2011,32(5):1-4.
- [7] 杨 波,杨新华,付 玮,等.钟罩型电子束焊接接头的疲劳寿命分析[J].焊接学报,2011,32(5):69-72.
  Yang Bo,Yang Xinhua,Fu Wei,et al. Analysis of fatigue life of electron beam welding seam with bell shape [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(5):69-72.
- [8] Liu H , Nakata K , Yamamoto N , et al. Microstructural characteristics and mechanical properties in laser beam welds of Ti6Al4V alloy[J]. Journal of Materials Science , 2012 , 47(3): 1460 – 1470.
- [9] Jinkeun O, Nack J K, Sunghak L, et al. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 340: 232 – 242.
- [10] Mishra S , Debroy T. Measurements and Monte Carlo simulation of grain growth in the heat-affected zone of Ti-6Al-4V welds [J]. Acta Materialia , 2004 , 52: 1183 – 1192.
- [11] Radhakrishnan B , Zacharia T. Monte Carlo simulation of grain boundary pinning in the weld heat affected zone [J]. Metallurgical and Materials Transactions A , 1995 , 26(8): 2123 – 2130.

作者简介:张建勋, 男, 1958 年出生, 博士, 二级教授, 博士研究生导师.主要从事先进材料焊接、激光精密加工、焊接结构强度及可靠性方面的教学与科研工作.发表学术论文 200 余篇. Email: jxzhang @ mail. xjtu. edu. cn

## MAIN TOPICS , ABSTRACTS & KEY WORDS

Nonlinear gradient features of grain size in TIG welded joint for titanium alloy ZHANG Jianxun<sup>1</sup>, DONG Lina<sup>1</sup>, ZHANG Linjie<sup>1</sup>, WANG Yiqing<sup>2</sup> (1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China). pp 1 – 4

Abstract: In the paper , based on the grain size observation and statistics analysis on TIG welded joints of TC4 titanium alloy, the gradient features of the gain sizes in welded joints with different heat input are studied experimentally for characterizing the microstructure heterogeneity by introducing a conception of grain gradient eigenvalue. The results show that the grain size in the TIG welded joint nonlinearly changes from the center of weld metal after the heat affected zone to the base metal, and the size changing rate (grain gradient) has a maximum value in the boundary between the columnar zone (CZ) and coarse grain zone (CGZ). The grain size gradient maximum value proposed as the grain gradient eigenvalue is inversely proportional to heat input in TIG welding and its position is independent with the heat input. The concept of the gain gradient eigenvalue can represent the microstructure heterogeneity in the welded zone and heat affected zone, and is significantly important for evaluating the service properties of titanium alloy welded joint.

Key words: titanium alloy; TIG welding; grain size

Interfacial structure and strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics joint brazed with amorphous filler metal and Cu layer ZOU Jiasheng , ZUO Huaiwen , XU Xiangping ( Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology , Jiangsu University of Science and Technology , Zhenjiang 212003 , China) . pp 5–8

Abstract: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics were brazed with TiZrCuB amorphous filler metal and Cu interlayer , the effect of brazing metal compositions and thickness of copper foil on interfacial structure and bonding strength were studied in this paper. The result shows that the joint strength is up to 241 MPa when the brazing temperature is 1 323 K , holding time is 30 min , the thickness of Cu interlayer is 70  $\mu$ m and the exerted pressure is 0.027 MPa. The reaction layer is TiN and the interface microstructure is compound of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiN/Ti-Si + Ti-Zr + Cu-Zr +  $\alpha$ -Cu. Changing the thickness of interlayer can adjust the thickness and compositions of the reaction layer. As the thickness of Cu interlayer increased , Ti-Si compound layer was gradually separated from the TiN layer , and was pushed into the weld center and refined to a granular shape.

**Key words**: amorphous brazing filler metals; Cu interlayer;  $Si_3N_4$  ceramics; interface structure; bending strength

Task planning and simulation of two-robot welding coordinationZHANG Tie , OUYANG Fan ( School of Mechanical & Automotive Engineering , South China University of Technology , Guangzhou 510640 , China) . pp 9 − 12

Abstract: This paper focuses on the dual-robot welding coordination of complex curve seams that one robot grasps the workpiece while the other holds the torch , then the two robots work on the same workpiece coordinately. The dual-robot coordination system is established at the beginning , after that , the non master/slave scheme is chosen for the kinematics trajectory planning. The non master/slave scheme sets the position and poses of the point on the workpiece, and calculates the end effecter trajectories of both robots through the constrained matrixes respectively. Downhand welding is employed in the kinematics trajectory planning that can guarantee the torch and the weld in good contact condition all the time during the welding process. Moreover , a Solidworks-SimMechanics platform is established for motion simulation , and an example of curved steel pipe welding is conducted. The results indicate that the established platform is accurate and effective for the task planning and analysis welding coordination of two robots. The output trajectories of both the joint displacements and end effectors are the same as predefined ones.

Key words: complex curve seam; two robot; coordination of welding

Study on influence factors of temperature in localized ultrahigh frequency induction brazing SU Honghua , LI Qilin , XU Jiuhua , FU Yucan ( College of Mechanical and Electrical Engineering , Nanjing University of Aeronautics & Astronautics , Nanjing 210016 , China) . pp 13 – 17

**Abstract:** The technology of localized ultra-high frequency induction brazing is introduced. The effect of influence factors, such as material of ferrite core, gap and coil structure, on temperature in induction brazing are investigated and analyzed. An optimal combination of technological parameters is obtained through experiments. At last, localized ultra-high frequency induction brazing of diamond is carried out based on the above parameters. The result demonstrates that the width of melted area of filler alloy is less than 3 mm. The diamond is wetted by the filler alloy. The interfacial structure between diamond and filler alloy is investigated by scanning electron microscope (SEM) and energy dispersion spectrometer (EDS). The result shows that the bond between diamond and filler alloy is established through a cross-diffusion of carbon and chromium.

Key words: diamond; localized heating; ultra-high frequency; induction brazing

Microstructure and corrosion resistance of welding joints of economic ferritic stainless steel ZHANG  $Yong^1$ , QIN Zuoxiang<sup>1</sup>, XU Hongji<sup>1</sup>, LU Xing<sup>1</sup>, TONG Wei<sup>2</sup> (1. Liaoning Key Materials Laboratory for Railway, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. School of Transport and Communication Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China). pp 18 – 22