DOI: 10.3901/JME.2019.06.061

TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊试板热处理 前后三维应力*

余 陈¹ 陈 静² 陈怀宁² 张宇鹏¹ 房卫萍¹

(1. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院)广东省现代焊接技术重点实验室 广州 510650;

2. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016)

摘要: 针对 100 mm 和 31 mm 厚 TC4 钛合金磁控窄间隙非熔化极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)焊试板, 采用压痕应变法测量表面残余应力分布, 采用全释放应变法测量厚度方向的三维残余应力分布。结果表明, 两种厚度试板的焊接残余应力数值有所不同: 100 mm 厚试板表面纵向和横向残余应力峰值高达 600~700 MPa, 接近材料屈服强度的 70%~80%; 31 mm 厚试板表面纵向和横向残余应力峰值较低, 仅达到材料屈服强度的 40%~50%。两种厚度残余应力差异较大的原因主要由较大厚度下横向收缩的累积效应造成。经过 650 °C 的真空焊后热处理, 两种厚度的焊接试板纵向和横向应力均显著降低, 应力降低幅度最高超过 50%, 剩余残余应力峰值均不超过 200 MPa, 焊缝处沿厚度方向分布的各向残余应力均接近零值, 表面残余应力出现了重新分布。

关键词: TC4 钛合金; 磁控窄间隙 TIG; 残余应力; 焊后热处理

中图分类号: TG407

Triaxial Stresses in TC4 Ti-alloy Weldments by Magnetically Controlled Narrow Gap TIG Welding before and after PWHT

YU Chen¹ CHEN Jing² CHEN Huaining² ZHANG Yupeng¹ FANG Weiping¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology,

Guangdong Welding Institute(China-Ukraine E.O.Paton Institute of Welding), Guangzhou 510650;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: For 100 mm and 31 mm thick TC4 Ti-alloy magnetically controlled narrow gap TIG weldments, residual stresses distribution of the surface is measured by indentation strain-gage method and triaxial stresses distribution in the thickness direction is measured by sectioning relaxation strain-gage method. Results show that welding residual stresses values of the two weldments are different. Longitudinal and transverse stresses peak values of the 100 mm thick weldment reached as high as 600-700 MPa, close to 70%-80% of the material yield strength. Longitudinal and transverse stresses peak values of the 31 mm thick weldment are low, only 40%-50% of the material yield strength. The reason for large difference of residual stresses between the two thicknesses weldments was mainly due to the cumulative effect of lateral shrinkage in large thickness weldment. After 650 °C vacuum heat treatment, longitudinal and transverse stresses of the two thickness weldments are significantly reduced, maximum stress reduction is more than 50%, remaining residual stresses peak values do not exceed 200 MPa, and stresses along the thickness direction of the weld is close to zero, stresses at surface are also redistributed.

Key words: TC4 Ti-alloy; magnetically controlled narrow TIG welding; residual stress; PWHT

0 前言

TC4 钛合金是一种中等强度的 $\alpha+\beta$ 型两相钛合

金, 含有 6% 的 α 相稳定元素 Al 和 4% 的 β 相稳定元素 V, 具有优异的综合性能, 在航空航天、核工业、海洋工程、能源化工等领域拥有极大的发展潜力和应用前景^[1-3]。近年来, 随着海洋工程、深潜器、压力容器、化工等领域的发展, 厚板钛合金结构的应用越来越普遍, 对钛合金的焊接工艺提出了更高的要求。目前厚板钛合金焊接多采用电子束焊接方

* 广东省科技(2017A070701026, 2016B070701025)、广州市科技(201704030112, 201807010035)和攀钢科技合作(2014-03、2015-10)资助项目。20180223 收到初稿, 20190202 收到修改稿

法^[4], 国内针对厚板钛合金电子束接头组织性能优化、残余应力控制也有较多研究^[5-8]。但该方法生产成本低, 构件受真空室尺寸及大构件装配精度的约束。更高效便捷、经济性好、适用于厚板钛合金结构的焊接方法对于推动厚板钛合金结构的应用及相关产业的发展具有非常重要的意义。

窄间隙非熔化极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)焊接技术由美国 Battle 研究所 1963 年率先提出, 其坡口间隙相比常规 TIG 焊接方法小很多。使用窄间隙方法进行厚板焊接时可以大幅度减小焊缝截面积, 降低焊缝金属填充量, 以较小的线能量实现较高的生产效率^[9-11]。20 世纪末, 乌克兰 Paton 焊接研究所创造性地将磁场引入到窄间隙焊接过程中, 开发出磁控窄间隙 TIG 焊接技术, 获得侧壁熔合更好、熔深更均匀的焊缝^[12-13]。使用磁控窄间隙 TIG 焊接技术进行厚板钛合金焊接具有较好的应用前景^[14], 受到研究人员关注^[15-16]。

材料在焊接过程中, 由于高度集中的瞬时热输入和随后的快速冷却, 在工件上会产生焊接残余应力。焊接残余应力的存在会降低焊接构件的刚性和尺寸稳定性, 严重影响焊接接头的疲劳强度、抗脆

断以及抗应力腐蚀开裂的能力。为了消除这些不利影响, 对于重要的焊接构件, 工程上一般要进行焊后热处理(Post-welding heat treatment, PWHT)。采用各种测试或数值模拟方法研究焊接残余应力的数值和分布特征, 对于焊接结构设计和工艺优化具有重要的意义, 已成为当前的研究热点^[17-19]。

本文以 TC4 钛合金为研究对象, 针对 31 mm 和 100 mm 两种厚度的 TC4 钛合金进行磁控窄间隙 TIG 焊接工艺试验, 采用压痕应变法和全释放应变法研究了焊接试板热处理前后的残余应力三维分布特征, 分析了 PWHT 对两种厚度试板残余应力的消除效果, 为厚板钛合金结构制造工艺优化奠定基础。

1 试验方法

TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接坡口由两块钛合金试板和垫板组成, 采用 I 型坡口, 坡口间隙 10 mm。垫板材料与母材相同, 尺寸为 30 mm 宽、10 mm 厚, 先通过角焊缝将两块待焊试板与垫板固定在一起, 焊接时焊缝两端采用引弧和收弧板, 根焊道与垫板熔合在一起。焊接参数如表 1 所示。

表 1 TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接参数

厚度/mm	焊道数	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(m·h ⁻¹)	填丝速度/(m·h ⁻¹)	磁感应强度/mT	电弧逆变频率/Hz
30	6	370~390	16~18	25	380~400	8	20
100	18	380~400	18~20	25	550~570	8	20

图 1 为 100 mm 厚 TC4 钛合金试板通过磁控窄间隙 TIG 焊接后的正反面面貌(31 mm 厚的试板与此完全类似)。试板正面焊缝高度 4~5 mm, 宽度 24 mm, 背面焊缝宽度 12 mm。

图 1 650 mm×300 mm×100 mm 焊接试板正反面面貌

焊后对焊接试板的残余应力进行测量, 测量背面焊接残余应力时先采用线切割方法将背板去除。针对 650 mm×300 mm×100 mm 和 650 mm×300 mm×31 mm 两种厚度材料的残余应力测量要求, 根据三维残余应力的可能分布特征和对比热处理效果的测量需要, 确定的测量方案如下。

首先从 650 mm 长试板中间进行线切割, 获得 2 块尺寸同为 325 mm×300 mm×100 mm 和 325 mm×300 mm×31 mm 的试样。然后取一块试样进行表面和厚度方向的原始残余应力检测, 另一块试样进行真空热处理, 热处理规范: 650 °C×3 h。对于 100 mm 厚的试板, 上下表面沿垂直焊缝方向布置应变片, 数量 6~7 个, 间距 5~15 mm(根据实际应力测量结果确定), 厚度方向应力分布测点间距 10 mm, 如图 2 所示。对于 31 mm 厚试板, 沿厚度方向的应力测点间距 5 mm。

图 2 100 mm 厚试件上下表面和内部测点安排

表面应力测定采用压痕应变法^[20], 应变片为 BA120-1BA-zky2 向片; 三维应力测定采用全释放 R-N 切割法^[21], 应变片为 BE120-05AA 单向片, 应力测试仪为 KJS-3P 型。TC4 钛合金的压痕应变法测量系数需要事先进行标定试验确定。图 3 为 TC4 钛合金的压痕应变法标定曲线, 该曲线显示了不同方向的弹性应变和输出的压痕应变增量之间的关系。

图3 TC4 钛合金的压痕应变法标定曲线

采用全释放 R-N 切割法测量三维残余应力分布时, 对于 31 mm 厚的试样, 深度上的残余应力测点和计算值均按双向应力(σ_x 、 σ_y)给出, Z 向应力 σ_z 可以忽略。对于 100 mm 厚的试样, 深度上的残余应力测点和计算值按三向应力(σ_x 、 σ_y 、 σ_z)给出。

2 试验结果与分析

图 4 为压痕应变法和全释放应变法测定现场照

(a) 表面残余应力测定

(b) 厚度方向残余应力测定

图4 应力测定现场照片

片, 其中图 4a 为表面残余应力测定, 图 4b 为厚度方向的残余应力测定, 试样解剖均采用线切割工艺完成。

图 5、6 分别给出了 100 mm 厚 TC4 钛合金焊接试板热处理前后上、下表面的残余应力分布, 图 7a、7b 为热处理前后三轴残余应力在厚度方向的分布(厚度计入了焊缝高度)。为方便计, 图 5、6、8、9 中给出的表面残余应力分布曲线将纵向和横向残余应力绘制在一张图上, 代表了同一点的双向残余应力分布状态: 同一图中右侧显示的是纵向残余应力 σ_x 垂直焊缝的分布情况, 左侧显示的是横向残余应力 σ_y 垂直焊缝的分布情况, 横坐标的正负没有实际意义。

图5 100 mm 厚试板热处理前后上表面残余应力分布

图6 100 mm 厚试板热处理前后下表面残余应力分布

(a) 热处理前

图7 100 mm 厚试板热处理前后残余应力沿厚度方向分布

图8 31 mm 厚试板热处理前后上表面残余应力分布

图9 31 mm 厚试板热处理前后下表面残余应力分布

对于数据进行分析可发现,对于热处理前的原始焊接残余应力:100 mm 厚焊接试板上表面的纵向和横向残余应力峰值比较接近,达到材料屈服强度的50%左右。下表面的纵向残余应力峰值达到材料屈服强度的40%左右,而横向残余应力峰值高达材料屈服强度的80%。残余应力峰值位于热影响区附近。高值横向残余应力反映了厚板单面焊工艺的特点。在焊缝中心部位,沿厚度方向分布的残余应力显示出如下特点:纵向残余应力皆为拉伸应力,且表面最大;横向残余应力除靠近下表面外,其余位置均为压缩应力。 Z 向残余应力均呈压缩状态,最大值近-300 MPa。

经过650 °C×3 h的真空退火热处理表面和厚度方向残余应力情况如下。

(1) 表面残余应力情况:对于100 mm 厚的焊接试板,热处理可以显著降低残余应力,尤其是横向残余应力,降低幅度超过60%,剩余残余应力峰值不超过200 MPa。

(2) 厚度方向分布的残余应力情况:对于100 mm 厚的焊接试板,除了上、下表面尚存在40 MPa左右的拉伸应力外,内部三个方向的所有残余应力数值均在-30~0 MPa 范围内,说明该热处理工艺比较理想。

图8、9分别给出了31 mm 厚 TC4 钛合金焊接试板热处理前后上、下表面的残余应力分布,图10a、10b为热处理前后纵向和横向残余应力在厚度方向的分布(厚度计入了焊缝高度)。

图10 31 mm 厚试板热处理前后残余应力沿厚度方向分布

对于31 mm 厚焊接试板热处理前的原始焊接残余应力:上表面纵向残余应力峰值达到材料屈服强度的40%以上,而横向残余应力小于纵向残余应力,最大值约为材料屈服强度的30%。下表面的纵向和横向残余应力峰值接近,均达到材料屈服强度的50%以上。残余应力峰值同样位于高温热影响区。在焊缝中心部位,沿厚度方向分布的残余应力均显示出相同的特点:纵向残余应力皆为拉伸应力,且表面最大;横向残余应力除靠近下表面外,其余位

置均为压缩应力。

经过 $650\text{ }^{\circ}\text{C}\times 3\text{ h}$ 的真空退火热处理表面和厚度方向残余应力情况如下。

(1) 表面残余应力情况: 对于 31 mm 厚的焊接试板, 纵向和横向残余应力峰值均有明显下降, 剩余残余应力峰值同样低于 200 MPa 。上表面降低程度不如下表面显著。

(2) 厚度方向的残余应力情况: 对于 31 mm 厚的焊接试板, 沿厚度方向分布的残余应力降低同样十分明显, 无论纵向残余应力还是横向残余应力, 除了靠近上表面处还剩余一定的残余应力外, 其余内部各点的应力无论是拉伸还是压缩性质, 几乎 100% 消除。

需要指出的是, 沿厚度方向测定的残余应力分布结果只是反映焊缝中心测点处的应力状态, 并不代表整个试板的水平。不同位置的测点可能有不同的表现, 例如, 在远离焊缝 $10\sim 20\text{ mm}$ 的位置, 表面残余应力仍然较高, 此处沿厚度方向的应力分布将有不同于焊缝中心的结果。

3 结论

(1) 100 mm 厚的 TC4 磁控窄间隙 TIG 焊试板, 上表面的纵向和横向残余应力峰值比较接近, 达到材料屈服强度的 50% 左右。下表面的纵向残余应力峰值达到材料屈服强度的 40% 左右, 而横向残余应力峰值高达材料屈服强度的 80% 。残余应力峰值位于热影响区附近。

(2) 31 mm 厚的 TC4 磁控窄间隙 TIG 焊试板, 上表面纵向残余应力峰值达到材料屈服强度的 40% 以上, 而横向残余应力最大值约为材料屈服强度的 30% 。下表面纵向和横向残余应力峰值接近, 均达到材料屈服强度的 50% 以上, 残余应力峰值同样位于高温热影响区。

(3) 无论是 100 mm 还是 31 mm 厚的焊接试板, 在焊缝中心部位, 沿厚度方向分布的残余应力均显示出相同的特点: 纵向残余应力皆为拉伸应力, 且表面最大; 横向残余应力除靠近下表面外, 其余位置均为压缩应力。对于 100 mm 厚的试板, Z 向残余应力均呈压缩状态, 最大值近 -300 MPa 。

(4) 经过 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的真空热处理, 两种厚度的焊接试板纵向和横向残余应力均显著降低, 残余应力降低幅度最高超过 50% , 剩余残余应力峰值均不超过 200 MPa , 焊缝处沿厚度方向分布的各向残余应力接近零值, 表面残余应力出现了重新分布。

参 考 文 献

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册: 第 4 卷, 钛合金、铜合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook: Volume 4, Titanium alloy, copper alloy [M]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [2] 于慧臣, 吴学仁. 航空发动机设计用材料数据手册: 第四册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
YU Huichen, WU Xueren. Aero engine design materials data book: Volume 4[M]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [3] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
ZHANG Xiyan, ZHAO Yongqing, BAI Chenguang. Titanium alloy and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [4] 李晓延, 巩水利, 关桥, 等. 大厚度钛合金结构电子束焊接制造基础研究[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 107-112, 118.
LI Xiaoyan, GONG Shuili, GUAN Qiao, et al. Fundamental research on electron beam welding of heavy section titanium alloy structures[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 107-112, 118.
- [5] 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.
- [6] 吴冰, 张建勋, 巩水利, 等. 厚板钛合金电子束焊接残余应力分布特征[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 10-12.
WU Bing, ZHANG Jianxun, GONG Shuili, et al. Residual stress distribution of large thickness titanium alloy joints by electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 10-12.
- [7] 王世清, 刘金合, 温国栋, 等. 10 mm 厚 TC11 钛合金电子束焊接组织性能和残余应力[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(6): 1150-1153.
WANG Shiqing, LIU Jinhe, WEN Guodong, et al. Microstructure, mechanical properties and residual stress of electron beam welded TC11 alloy joint of 10 mm thickness[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(6): 1150-1153.
- [8] 房卫萍, 黎小辉, 张宇鹏, 等. 热处理对 100 mm 厚 TC4

- 钛合金电子束焊接接头性能的影响[J]. 电焊机, 2017, 47(6): 82-87.
- FANG Weiping, LI Xiaohui, ZHANG Yupeng, et al. Effect of heat treatment on mechanical properties of welded joint of electron beam welding for TC4 titanium alloy with 100 mm thickness[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(6): 82-87.
- [9] HORI K, HANEDA M. Narrow gap arc welding [J]. Journal of the Japan Welding Society, 1999, 68(3): 179-200.
- [10] STARLING C M D, MARQUES P V, MODENESI P J. Statistical modeling of narrow-gap GTA welding with magnetic arc oscillation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 51: 37-49.
- [11] BUTLER C A, MEISTER R P, RANDALL M D. Narrow gap welding a process for all positions[J]. Welding Journal, 1969, 48(2): 102-108.
- [12] PATON B E, ZAMKOV V N, PRILUTSKY V P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium[J]. Welding Journal, 1996, 75(5): 37-41.
- [13] BELOUS V Y, PRILUTSKY V P, ZAMKOV V N. Effect of controlling magnetic field welding of titanium[J]. Scientific and Technical, 2004(4): 11-14.
- [14] 安飞鹏, 王其红, 李士凯, 等. 钛合金厚板窄间隙焊接技术的现状[J]. 焊接技术, 2014, 43(12): 1-5.
- AN Feipeng, WANG Qihong, LI Shikai, et al. Current situation of narrow gap welding technology of titanium alloy plate [J]. Welding Technology, 2014, 43(12): 1-5.
- [15] 孙清洁, 郭宁, 胡海峰, 等. 磁场对厚板 Ti-6Al-4V 合金窄间隙 TIG 焊缝组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(10): 2833-2839.
- SUN Qingjie, GUO Ning, HU Haifeng, et al. Effect of magnetic field on weld structure of large thickness Ti-6Al-4V alloy with narrow-gap TIG welding method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(10): 2833-2839.
- [16] 孙清洁, 李文杰, 胡海峰, 等. 厚板 Ti-6Al-4V 磁控窄间隙 TIG 焊接接头性能[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 9-12, 113.
- SUN Qingjie, LI Wenjie, HU Haifeng, et al. Analysis on welded joint of thick Ti-6Al-4V plate by magnetically controlled narrow-gap TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 9-12, 113.
- [17] RAE W, LOMAS Z, JACKSON M, et al. Measurements of residual stress and microstructural evolution in electron beam welded Ti-6Al-4V using multiple techniques[J]. Materials Characterization, 2017, 132: 10-19.
- [18] 刘敏, 虞松, 李瑜, 等. 钛合金大厚度试件电子束焊接残余应力有限元分析[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 142-145.
- LIU Min, YU Song, LI Yu, et al. FEM analysis of welding residual stresses in a thick plate EBW joint of titanium alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 142-145.
- [19] AHN J, HE E, CHEN L, et al. Prediction and measurement of residual stresses and distortions in fibre laser welded Ti-6Al-4V considering phase transformation[J]. Materials & Design, 2017, 115: 441-457.
- [20] GB/T 24179-2009, 金属材料 残余应力测定 压痕应变法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- GB/T 24179-2009, Metallic materials-Residual stress determination-The indentation strain-gage method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [21] GB/T 31218-2014, 金属材料 残余应力测定 全释放应变法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- GB/T 31218-2014, Metallic materials-Determination of residual stress-Sectioning relaxation strain-gage method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

作者简介: 余陈, 男, 1991 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为高能束流加工、高效弧焊技术、焊接有限元模拟等。

E-mail: yuch@gwi.gd.cn

陈怀宁(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为焊接接头质量控制。

E-mail: hnchen@imr.ac.cn