

# 钛合金板对接焊接头残余应力测试研究

彭金波 吴秀丽 张茂 韩中宝

中国航发航空科技股份有限公司

**[摘要]**钛合金被广泛应用于航空航天等工程领域,其中焊接是完成连接的主要方式。焊接技术虽然生产效率高,但其常常会在结构中引入残余应力。焊接残余应力的存在会对结构的稳定性及疲劳开裂性能产生非常不利的影响,给结构的服役安全性带来威胁。为了了解钛合金焊后残余应力的大小和分布,本文针对TC2钛合金薄板制作了对接焊接头,并采用钻孔法对其残余应力具体分布进行了测试研究。结果表明残余应力在焊缝周围存在明显的应力梯度,峰值应力出现在焊缝及其附近,随着距离焊缝中心线的增大,残余应力值逐渐减小。

**[关键词]**TC2钛合金;薄板;焊接残余应力;钻孔法

**[DOI]** 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.09.2005

## 1 引言

钛合金被广泛应用于航空、航天、汽车、机械制造、精密仪器等领域。在钛合金于整体结构连接或者彼此连接时,通常采用焊接技术来完成。焊接是一个过程复杂的热加工工艺,焊后接头中会存在由于热应变和相应变引发的焊接残余应力。研究表明,焊接残余应力的存在会对结构的稳定及疲劳性能产生非常不利的影响,引发灾难性的事故。

相关研究人员大多基于数值模拟方法对钛合金薄板的焊接残余应力进行了研究。基于ANSYS软件对激光对接焊 TC4 钛合金薄板的非线性瞬态热传导焊接过程进行数值模拟,确定了结构试件焊接时需保护的临界尺寸,为后续焊接保护装置设计给予科学依据。应用锥状热源模型,建立TC4 钛合金薄板激光对接焊的三维对称模型,提取其温度场变化规律,指出减小高温持续时间和晶粒粗化程度可通过降低激光功率实现。针对2.5mm厚TC4钛合金薄板焊接接头进行了数值分析,并对其焊接温度场和应力场进行了系统研究。

由于缺乏实测数据,以及钛合金材料参数的匮乏,残余应力数值模拟结果的准确性有必要进行验证。为了充实现有研究关于测试试验的不足,为后续数值仿真提供实测数据支撑。本文针对TC2钛合金薄板进行了对接焊,并采用盲孔法针对对接焊试板残余应力分布进行了测试研究。

## 2 残余应力测试

### 2.1 钛合金试板制作

本次试验以TC2钛合金薄板为研究对象,试板如图1所

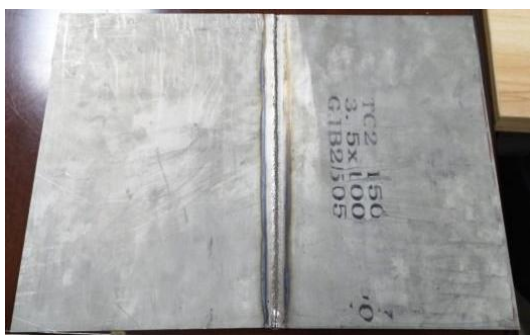


图1 TC2钛合金薄板焊接试样

示,具体尺寸为410mm×260mm,厚度为3.5mm。采用气体保护电弧焊沿纵向进行试板对接焊,分为上下两层焊接,焊接工艺参数具体为:电压为12V,电流为100A,焊接速度40cm/min,正反面及尾拖气体流量24L/min,两层焊丝皆采用 $\phi$ 1.6mm的TC2合金,焊缝宽度约为15mm。焊接过程中试板为自由状态,焊后在室温环境下自然冷却。

### 2.2 残余应力测试

习惯将沿着焊缝方向的残余应力分量称为纵向残余应力;垂直于焊缝方向的残余应力分量称为横向残余应力;沿着竖直方向的残余应力分量由于竖直较小,通常忽略不计。残余应力是焊接过程中热应力和相变应力叠加效应的共同体现。对于残余应力的测试方法有多种。钻孔法对构件的破坏性较小,整个测试过程简捷方便,测试理论成熟,应用也最为广泛。采用钻孔法对钛合金焊接试板残余应力进行测试。测试之前对试板表面进行清理,首先采用不同规格的砂纸进行打磨,保证粗糙度,以便粘贴应变花,然后用高浓度酒精进行清洗、定位并粘贴三向应变花。钻孔法测试见图2。

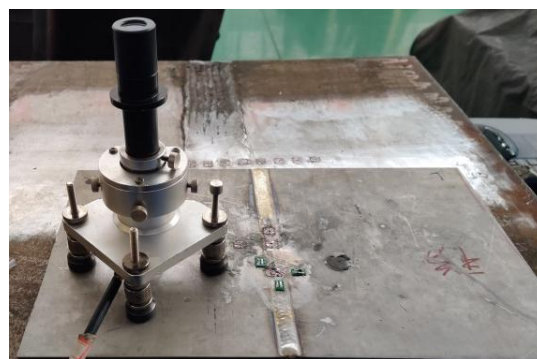


图2 残余应力测试图

为了有效捕捉焊缝区的残余应力梯度,残余应力测点布置间隔为10mm,共计布置7个测点,起始点位于焊缝中心线上。对试板表面粘贴的应变花,在其中心位置钻直径1.5mm,深度1.8mm(为1.2倍的直径)的小孔。钻孔会导致盲孔附近的残余应力释放,而形成一个新的应力场,此时应变花就会检测到钻孔前后应变的释放情况。最后根据应变和应力之间相互关系来计算获得构件表面的残余应力。钻孔法测试原理

如下所示。

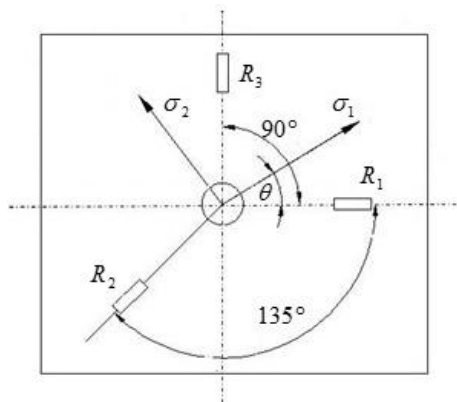


图3 钻孔法测量原理图

当3个应变栅 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 上产生的释放应变分别为 $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ 时。此时应变值与被测构件原有残余应力之间有如下关系:

$\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 为主应力, A、B为无量纲的应变释放系数,  $\theta$ 为主应力 $\sigma_1$ 与应变片 $R_1$ 的夹角。

### 3 测试结果分析

#### 3.1 纵向残余应力

考虑到钛合金试板的几何和残余应力的几何对称性, 将所测残余应力的分布数据关于焊缝中心线对称, 然后再作纵、横残余应力的分布曲线如图4所示。

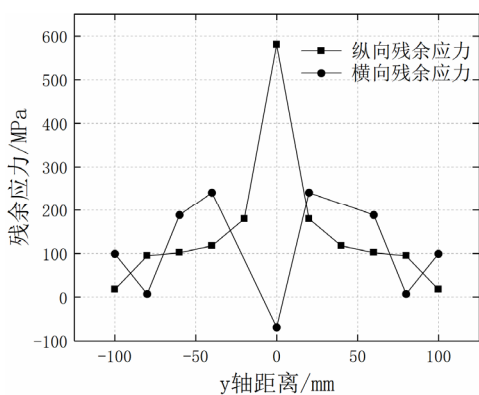


图4 焊接残余应力测试结果

如图4所示, 纵向残余应力沿垂直焊缝方向100mm的范围内皆为拉应力, 随着距焊缝中心距离的增加应力值迅速减小到零应力。测试所得的峰值拉应力约为600MPa位于距焊缝中心上; 20mm的热影响区内, 残余应力变化速度快, 急速下降, 呈现出明显的应力梯度, 而后逐渐变缓直至减小为压力。纵向焊接残余应力的峰值通常会接近材料屈服应力, 其对结构服役安全性会带来非常不利的影响, 因此在设计计算时需要重点考虑其影响, 对其进行系统的分析。

#### 3.2 横向残余应力

由于焊缝构造及试板几何形态的影响, 在焊接时来自纵向的约束>横向约束>竖向约束, 导致在焊后同一位置横向残余应力值低于相应的纵向残余应力值, 而竖向残余应力数值

可忽略不计。横向残余应力最大测试值约250 MPa, 出现在试板的热影响区; 横向残余应力在焊缝中心线上为-100MPa的应力, 这是因为实际焊接过程中焊缝金属相变会引起焊缝体积膨胀, 从而削弱残余应力增大的趋势, 致使焊缝位置残余应力减小, 甚至出现压应力。在测试范围内, 横向残余应力呈现先增大后减小的分布趋势。对比图4可知, 焊接残余应力整体上呈现拉压分布的自平衡体系。

### 4 结论

本文针对TC2钛合金薄板制作了对接焊接头, 并采用钻孔法对其残余应力具体分布进行了测试研究。分析测试结果, 可得出以下结论:

(1) 气体保护焊可以实现快速的连接工艺, 但也在焊缝及其周边位置引入了数值较大的残余应力, 需要对其进行系统研究以分析其不利应力。

(2) 由于在焊接过程中, 三维空间几何对焊缝的约束各不相同, 致使纵、横、竖向的应力分布各不相同。其中纵向应力峰值出现在焊缝中心线, 随着距离焊缝中心线距离的增减, 残余应力逐渐减小, 呈现出明显的应力梯度。

(3) 横向残余应力与纵向残余应力具有相似分布趋势, 但横向应力的峰值应力远低于纵向应力。横向应力的峰值应力出现在热影响区, 在焊缝中心线位置为负应力, 这可归因于焊接过程中焊缝金属固态相变体积改变引起的。从热影响区开始, 横向残余应力逐渐降低

(4) 整体上看, 焊接残余应力主要分布在焊缝及其周围金属, 测试结果真实可靠, 可为数值模拟提供验证数据基础, 也可支撑钛合金薄壁结果整体稳定性的评定的基础。

### 参考文献

[1] 刘敏, 陈士焯, 陈勇, 康继东. 钛合金电子束焊接应力分析的有限元模型[J]. 焊接学报, 2004(06): 62-65+131-132.

[2] 于澜. TA15钛合金构件TIG焊接过程的数值模拟[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.

[3] 刘西霞, 黄锐, 姚刚, 彭继忠, 张屹. 钛合金薄板激光对接焊温度场的数值模拟[J]. 激光技术, 2013, 37(05): 700-704.

[4] 李海东, 刘炳刚, 韩宪军, 梁瑛, 申俊琦. TC4薄板激光对接焊温度场的数值模拟[J]. 焊接技术, 2014, 43(08): 12-15.

[5] 黄爱国. 钛合金薄板低阈值背反射激光焊接数值分析与特性的研究[D]. 江苏大学, 2017.

[6] 陈梅峰, 郭玉龙, 周广涛, 刘方, 李华晨. TC4钛合金薄板激光焊接变形的有限元模拟[J]. 机械工程材料, 2019, 43(07): 74-78.

[7] 查永康, 彭金波. TC4钛合金薄板焊接残余应力数值分析[J]. 冶金管理, 2021, 7(423): 18-19.