

文章编号: 1000-8055 (2001) 01-0063-04

钛合金平板电子束焊接残余应力数值分析

刘 敏¹, 陈士焯², 康继东², 陈 勇²

1. 山东大学 材料学院, 山东 济南 250001;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016

摘要: 本文建立了钛合金平板移动电子束热源的焊接温度场和应力场的数值分析模型, 针对 6 mm 厚的 TC11 钛合金平板试件, 计算分析 3 种不同工艺参数的电子束焊接温度场及残余应力分布规律, 结果表明对于平板电子束焊接接头, 在焊缝及近缝区的很窄的区域内, 存在数值接近材料屈服极限的纵向残余应力, 焊接工艺不同将会影响残余应力的数值, 采用正面焊透加背面修饰的焊接工艺可在一定程度上降低纵向残余应力的数值。

关键词: 数值分析; 钛合金; 电子束焊接; 残余应力

中图分类号: TG404

文献标识码: A

1 前 言

钛合金是航空发动机结构中很有发展前景的航空材料, 电子束焊接由于化学成分纯净, 焊接接头热影响区小以及焊接变形小, 而成为钛合金连接的首选方法。电子束焊接属于局部短时高温加热, 焊缝窄而深, 在焊接过程中会产生相当大的焊接应力, 并在焊后形成残余应力, 对结构的安全使用具有重要的影响。深入研究电子束焊接应力分布特点, 是正确设计焊接接头的关键。

平板对接接头是焊接接头中最常见的接头形式, 研究平板对接接头的残余应力是研究其它复杂焊接接头残余应力的基础。在焊接力学界, 对焊接过程的热传导和力学过程进行三维仿真已成为当今最具有挑战性的课题^[1], 文献[2, 3]进行了钢的电子束焊接二维热应力数值分析, 而钛合

金平板电子束焊接三维应力变形研究尚未见报导。本文以 6 mm 厚的 TC11 钛合金平板为研究对象, 利用数值模拟方法分析电子束焊接残余应力的分布规律, 探讨不同工艺对残余应力的影响, 并进行残余应力的盲孔法试验测定, 以期对发动机钛合金电子束焊接接头的设计提供借鉴。

2 有限元计算模型

2.1 试件尺寸

本文计算的平板材料为 TC11 钛合金, 供应状态为盘模锻件, 经双重退火: 950°C, 1~2 h, 空冷+ 530°C, 6 h, 空冷^[4]。计算钛合金平板尺寸如图 1 所示, 钛合金平板电子束焊接的工艺参数如表 1 所示, 焊接时真空度为 1×10^{-2} Pa, 电子束为表面聚焦, 束径为 0.3~0.5 mm。

表 1 焊接工艺参数

焊接工艺编号	电压 (kV)	电流 (mA)	焊接速度 (m/min)	线能量 (kJ/m)	焊接状况
1	140	6.4	1.0	53.76	临界焊透
2	140	8.1	1.0	68.04	焊透
3	140	8.1+ 3.8	1.0	68.04+ 31.92	正面焊透+ 反面修饰焊

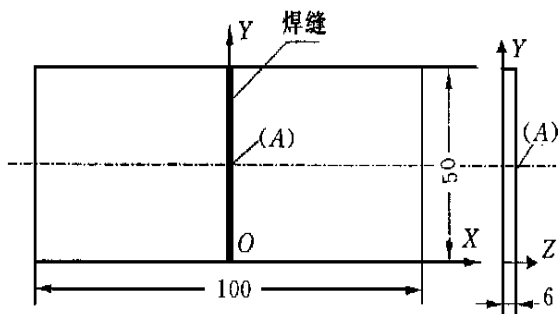


图 1 焊接接头形式与几何尺寸

2. 2 计算模型建立

2. 2. 1 移动电子束焊接温度场模型

采用内生热的加载方法来模拟电子束对平板材料的加热作用, 内生热率等于电子束功率除以所作用的单元的体积; 且内生热作用的时间与电子束移动一个单元的距离所用的时间相等, 并随时间移动模拟移动电子束的作用。在计算焊接温度场时假设温度场和应力场是解耦的, 不考虑熔池内部液态金属的流动情况, 而将其当作固体处理, 用热传导模拟电子束焊接的传热过程; 考虑热物理参数随温度变化引起的焊接温度场计算的的非线性和热源移动引起的焊接温度场非稳态性; 通过改变相变温度区间的比热实现对相变潜热的考虑。TC11 的密度 ρ 、热传导率 λ 、比热 c 、热膨胀系数 α 的高温数据取自文献[4], 高温缺乏的数据, 对其实验数据进行拟合。试件由于几何及传热以 Y 为对称轴, 可取试件的一半进行建模。由于试件在真空中焊接, 因此所有的散热边界取为绝热。

2. 2. 2 焊接应力场计算模型

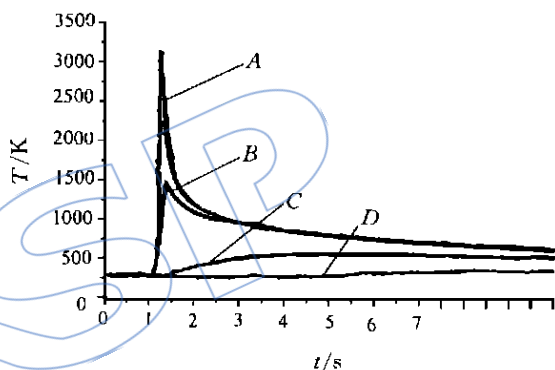
焊接应力的数值计算是通过将移动电子束焊接以及焊接结束后冷却的每一步计算的温度场, 形成热载荷并施加在试件模型上进行对应的整个焊接热应力分析, 分析的最后结果既是焊接残余应力。因此计算分析是一个极其耗时和复杂的工作。计算中考虑材料的力学常数随温度的变化, 屈服极限 σ_y 、弹性模量 E 高温数据取自文献[4]。

考虑到平板的厚度较小, 在厚度上单元剖分只在焊缝及其近缝区为二层单元, 其它区域均为一层单元。温度场和应力场的计算均采用相同的有限元网格, 有限元计算采用 ANSYS 软件进行。

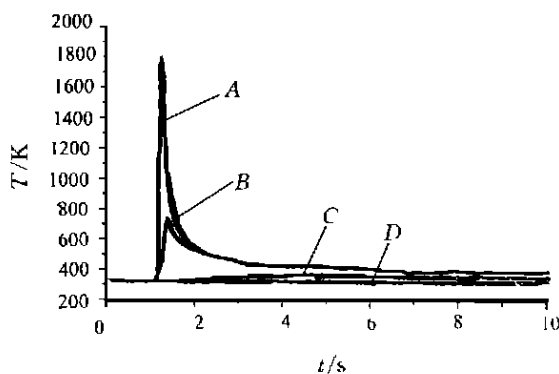
3 焊接温度场计算分析

电子束焊接工艺下, 焊缝中心以及离焊缝中心 0.5 mm, 2.0 mm, 7.5 mm 各点的热循环曲线。

在电子束焊接时, 焊接温度场在起始焊后不久, 将很快接近准稳态温度场, 即每个横截面 (垂直 Y 轴的平面) 的各点将有基本相同的热循环曲线, 只是时间的前后不同。在正面焊接时, 当电子束移动到该横截面时, 焊缝中心的温度急剧升高到 3000 K 以上; 而离焊缝中心 0.5 mm 的点, 最高温度只有 1500 K 左右, 远离焊缝的点则温度更低, 因此在电子束焊接中沿 X 方向存在着很高的温度梯度。离焊缝中心 0.5 mm 的点的最高温度低于材料熔点, 说明焊缝宽度应小于 1 mm, 经计算焊缝的宽度为 0.93 mm, 而实测值为 0.97 mm, 计算值与实测值是基本吻合的。



(a) 第一次焊透时的热循环



(b) 修饰时的热循环

图 2 焊透+ 修饰焊工艺下的热循环
(距焊缝中心: $A = 0.0$ mm; $B = 0.5$ mm;
 $C = 2.0$ mm; $D = 7.5$ mm)

当电子束离开该截面后, 焊缝中心的温度迅速下降, 而远离点温度有所升高, 但上升速度很缓慢。随着时间的推移, 整个平板的温度趋于均匀。

由于反面修饰焊的功率较小, 又是在平板背面进行, 因此在电子束经过该点时正面焊缝中心

图 2 所示为在正面焊透、反面进行修饰焊的

的最高温度稍低于熔点, 这与实际是相符的, 而各点温度随时间的变化趋势同正面焊透的情形一样, 只是温度较正面焊接时的低。

4 残余应力计算结果及讨论分析

3 种电子束焊接工艺的钛合金平板表面焊接残余应力数值模拟计算结果见图 3~图 5。

(1) 纵向残余应力 σ_x 沿 X 轴方向为在焊缝及近缝区为较高数值的拉应力; 随 x 的增加纵向残余拉应力数值迅速下降, 并逐渐转变为压应力,

在达到最大后压应力逐渐降至零。沿焊缝方向 (Y 向), 纵向残余应力 σ_x 在焊缝的起始和收末端拉应力值较小, 而在焊缝中部区域拉应力值基本保持稳定, 且数值较高, 对于临界焊透和焊透的工艺下, 其最高拉应力可达到 TC11 的屈服极限, 是相当高的。该纵向拉伸残余应力在接近焊缝的收末端达到最大, 其产生原因与移动电子束焊接有关。由于电子束焊接具有较大的深宽比, 因此纵向残余拉应力的区域相对于普通的熔化焊接方法也是非常窄的, 但数值却很高, 在正常焊透的情况下高达

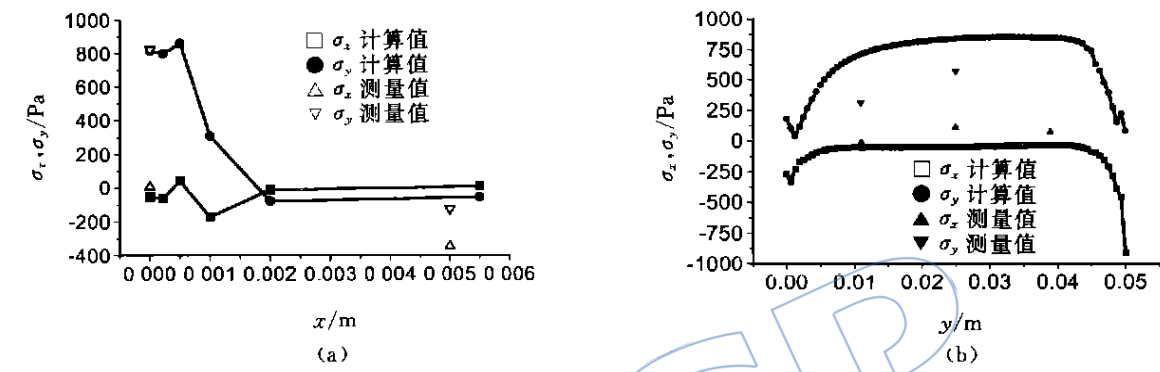


图 3 临界焊透规范下的残余应力测量结果与有限元计算结果

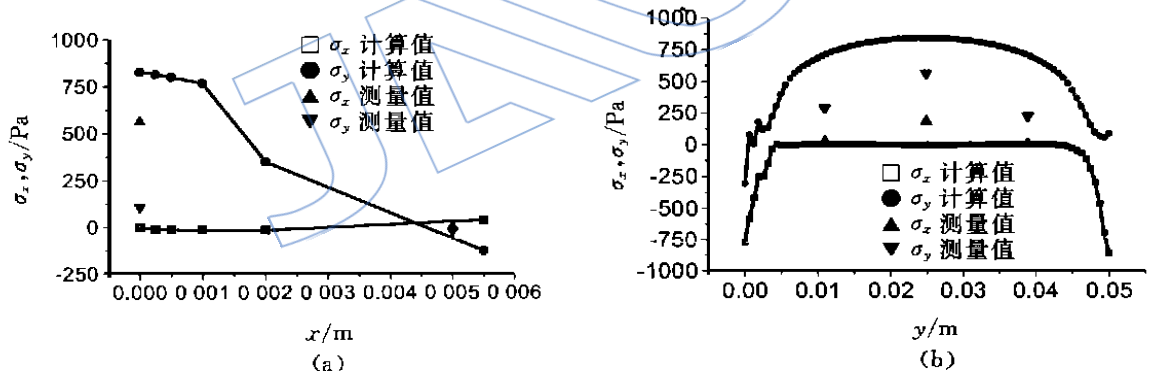


图 4 焊透规范下的残余应力测量结果与有限元计算结果

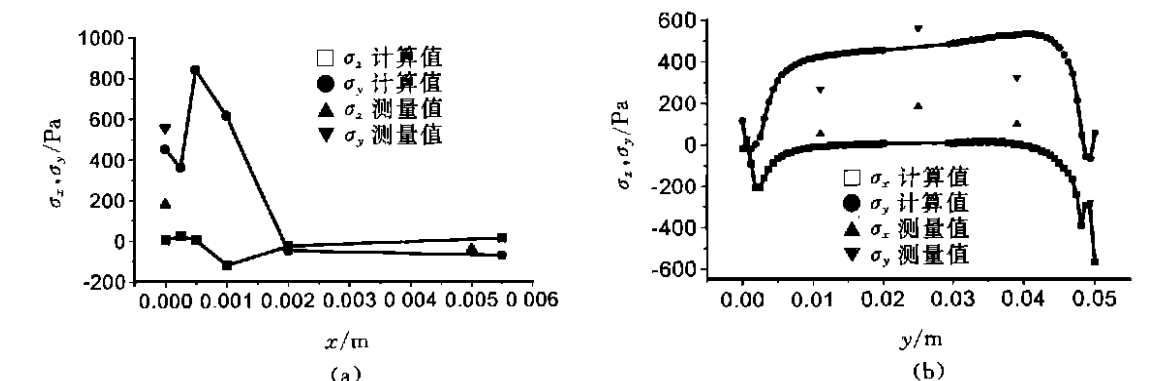


图 5 焊透+ 修饰焊规范下的残余应力测量结果与有限元计算结果

900 MPa, 说明该区域是一个危险区域。

(2) 横向残余应力沿焊缝方向的分布规律是在起焊和收焊部位出现较高的压应力, 收焊部位的压应力值(数值接近屈服极限)要明显高于起焊的部位的压应力值, 而稍微远离端部的地方, 横向残余压应力值迅速降低, 并逐渐趋于平缓, 在焊缝的中间大部分区域基本为一稳定值, 这一稳定值仍为压应力, 而通常平板的普通电弧焊的焊接横向应力在该区域的数值为拉应力, 其原因主要与电子束焊接的深宽比很大, 该区域的应力在厚度上呈不均匀状态有关。实际上在厚度的中心部位, 该区域的横向残余应力数值为拉应力。

(3) 对电子束焊接平板在不同焊接工艺参数下的残余应力值进行比较分析, 可以发现临界焊透的最高拉应力数值与完全焊透的基本相当, 但完全焊透的焊接接头, 其拉应力区宽度明显大于临界焊透的拉应力区宽度, 这主要与对同一平板, 完全焊透接头的输入功率比临界焊透的高近 20% 有关。从图 4 和图 5 可以发现, 在钛合金平板正面焊透的情况下, 在平板的反面加上一修饰焊工艺, 除能明显改善焊缝的表面成型, 提高焊缝质量外, 其焊缝中心的纵向残余拉应力数值的降低是明显的。进行修饰焊工艺前的纵向残余拉应力数值最高值约为 900 MPa, 进行修饰焊的工艺以后, 表面纵向残余应力最高值下降为 500 MPa 左右, 效果是明显的。因此, 单从焊接接头的应力数值及焊缝表面质量上来讲, 采用在钛合金平板正面焊透的情况下再在平板的反面加上一修饰焊工艺, 对提高电子束焊接接头的性能是有利的。

(4) 从图 3~图 5 的数值计算实测结果可见两者基本吻合, 从而进一步证实上述分析。

5 结 论

(1) 钛合金平板电子束焊接残余应力的分布规律同普通熔化焊的相似, 在焊缝及近缝区存在数值达材料屈服极限的纵向拉伸残余应力, 但拉应力区域比一般普通熔化焊的要小。横向残余应力在表面为压应力, 且大部分区域的数值较低。(2) 残余应力测量结果与有限元模拟结果基本吻合, 证明本方法是有效的。(3) 不同的焊接工艺参数对残余应力的分布有一定程度的影响, 采用合适的焊接工艺可有效降低残余应力的数值。正面焊透加反面修饰焊的工艺既可显著降低接头的残余应力水平, 又可改善焊接接头的表面成型。

参考文献:

- [1] 关桥. 飞行器薄壳结构焊接变形控制与焊接力学的发展 [C]. 航空连接技术重点试验室论文选编, 北京航空工艺研究所, 1998.
- [2] Carmet A, Debiez S, Devaux J, et al. Experimental and Numerical Study of Residual Stress and Strain in an Electron-Beam-Welded Joint. International Conference on Residual Stress [R]. ICRS2, 1998: 491-496.
- [3] Dufrene L, Truc J, Martin R. Modeling of Thermal Stresses During an Electron Beam Welding Process [J]. Journal of Thermal Stresses, 1996, 19: 211-236.
- [4] 北京航空材料研究所主编. 航空发动机设计用材料数据手册 [S]. 中国航空发动机总公司.

(责任编辑 王震华)

Numerical Model for the Temperature and Stress Fields of Moving EBW in Titanium Alloy Plates

LIU Min¹, CHEN Shi-xuan², KANG Ji-dong², CHEN Yong²

1. College of Material Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250001, China;
2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: A moving resource FEM model for analyzing the temperature and stress fields of EBW in titanium plate was set up. The welding residual stress distribution rules in 6 mm thickness plane were researched for the three kinds of welding parameters by means of numerical model and stress measurement. The results show that there exists the longitude tensile residual stress in a very narrow region of weld and welding heat-affected zone. The biggest longitude tensile residual stress approaches to the yield stress of titanium alloy. The welding technology will affect the stress distribution greatly. The technology, in which the EBW is proceeded on the surface firstly and then on the back surface, will improve the residual distribution obviously. The residual stress measurements prove the above conclusions.

Key words: numerical model; titanium alloy; residual stress; EBW