

TC17钛合金焊接及局部热处理残余应力的数值模拟

金俊龙, 万晓慧, 郭德伦

(中国航空制造技术研究院航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 对 TC17 钛合金平板的氩弧焊焊接和焊后热处理过程进行了数值模拟, 模型中考虑材料相变和蠕变, 计算得到焊接和热处理过程中的温度场演变情况和热处理前后残余应力分布规律。结果表明, 由于存在较大的热输入, 焊后产生了较大的残余应力, 焊缝附近的 HAZ 区域纵向残余拉应力达到了 650MPa 左右, 热处理后降低至 160MPa 左右。采用小孔法和 X 射线衍射仪测量了试件的残余应力, 模拟计算得到的残余应力值与小孔法测试结果符合性较好。

关键词: 钛合金; 数值模拟; 焊接; 热处理; 残余应力

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.030



金俊龙

硕士, 工程师, 主要研究方向为摩擦焊工艺、焊接过程数值模拟、航空发动机机损伤修复技术。

TC17 钛合金广泛应用于航空发动机风扇盘、压气机盘和大截面的锻件, 可以采用氩弧焊、电子束焊和摩擦焊等多种方法焊接, 焊接接头的力

学性能是影响焊接结构设计和使用的重要因素^[1-4]。对钛合金采用氩弧焊焊接后, 由于具有较大热输入, 带来较大的残余应力, 必须采用焊后热处理。钛合金的焊后热处理工艺的制定以降低残余应力为准则, 工程规范规定的热处理工艺一般针对整体真空热处理, 但是在对整体叶盘的受损叶片完成氩弧焊补片修复后, 为避免对未修复区带来有害影响, 对焊缝的热处理必须采用局部热处理。局部热处理温度曲线的设定与整体热处理不同, 为避免对零件其他区域带来影响, 希望缩短热处理保温时间。通过有限元的方法模拟计算焊接和热处理后工件的残余应力分布情况, 对焊接和热处理工艺的制定具有重要的工程意义。

目前, 对焊接过程残余应力的模拟研究报道较多, 如 Yaghi 等^[5]采用数值模拟和试验相结合的方法研究了 P91 钢管的焊接残余应力分布。焊后

热处理对焊件残余应力影响的研究报道较少, 董欣勇^[6]研究了电子束焊接和焊后电子束局部热处理过程的温度场和应力场分布规律, 其电子束局部热处理采用移动热源, 对残余应力的模拟未考虑材料的相变、蠕变等因数的影响。本文利用 Sysweld 有限元软件对 TC17 钛合金平板的氩弧焊焊接和焊后热处理的过程进行数值模拟, 重点研究了热处理前后残余应力演变情况。通过小孔法与 X 射线测量了残余应力, 对比实测结果与计算结果, 验证了计算方法的可靠性。

有限元模型及分析步骤

1 焊接及热处理工艺

试验所用设备为六轴弧焊机器人, 在焊接过程中, 焊枪、拖斗和夹具的垫板上的小孔内均通有氩气作为保护气体, 保护焊缝免受外部气氛的影响, 同时在焊枪内通水冷却。

焊接工艺参数为: 电弧电压 9.5V,

焊接电流 90A, 焊接速度 4mm/s, 送丝速度 6.7mm/s, 焊枪内氩气流量 15L/min, 拖斗和垫板内氩气流量 5L/min。

焊接试件冷却至室温后, 采用感应加热的方式对焊缝左右两侧 20mm 的区域进行焊后局部热处理, 热处理的温度为 $(650 \pm 10)^\circ\text{C}$, 控温精度为 $\pm 5^\circ\text{C}$, 热处理过程通氩气保护, 保温时间为 15min。

2 材料性能参数

试验所用材料为方块锻件, 焊接试样为由锻件机加工而成的厚 2.2mm 的板材。TC17 的化学成分如表 1 所示。

建立的 TC17 钛合金材料模型中的材料参量有: 弹性模量、屈服强度、泊松比、热应变、热导率、比热容、密度等, 模型中还包含材料的应变硬化、相转变、材料蠕变关系。所用焊丝与母材 TC17 成分相同。图 1 为计算中采用的部分材料基础性能数据, 包括热应变 L 、泊松

比 ν 、屈服强度 $Yield$ 、弹性模量 E 、热导率 λ 。

3 物理模型

两块 TC17 钛合金平板对接焊, 焊接过程中两块板上在距离焊缝 40mm 的位置通过夹具压紧进行位置约束, 每块试板的尺寸为 110mm \times 80mm \times 2.2mm, 焊缝长 80mm。

建立的计算模型与实际焊接试板尺寸为 1:1 的比例, 模型节点总数为 32412 个, 单元 49968 个, 焊缝上的焊丝填充物在焊前材料属性为空, 随焊接过程熔池的前移逐渐被赋予真实材料属性。在焊缝左右两侧各 10mm 的区域对网格划分进行细化。表面考虑了对流和辐射, 计算中对模型的约束与实际焊接过程相同。在模拟过程中热效率取为 0.75, 计算模型如图 2 所示。

试件经过焊接并冷却至室温后, 紧接着进行了热处理过程模拟, 焊接和热处理后均采用空冷的方式冷却至室温。

表 1 TC17 钛合金化学成分 (质量分数)
Table 1 Chemical composition of TC17 titanium alloy %

Ti	Al	Cr	Mo	Zr	Sn	O	H
基	5.25	4.12	4.34	2.1	2.2	0.13	0.01

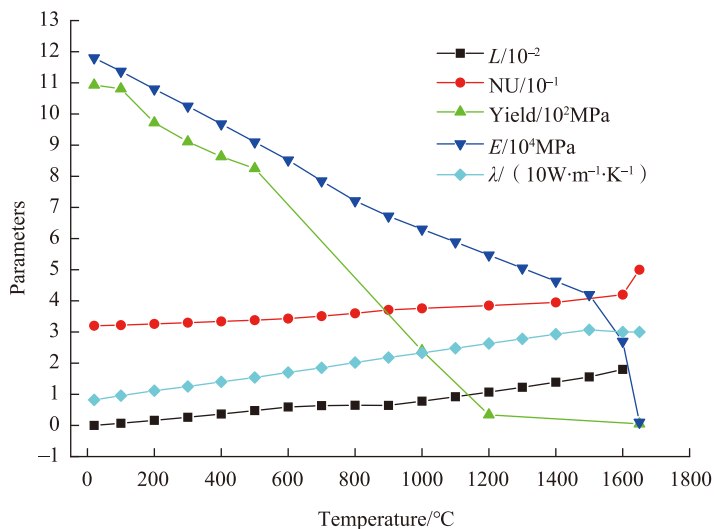


图1 TC17材料参数
Fig.1 Material parameters of TC17

计算结果与讨论

1 过程温度场

计算得到焊接过程温度场如图 3 所示, 移动的电弧产生了一个移动的焊接温度场, 计算结果显示熔池中心位置最高温度达到了 1927°C , 而边缘温度却接近室温, 焊缝温度自焊缝中心向两侧逐渐递减, 熔池附近温度梯度最大。

对焊接过程温度场分布图分析可知, 温度场分布有 3 个主要的温度区间: 第 1 个是高于 1650°C 的区间, 该区间温度高于 TC17 钛合金的熔点, 因此在温度场分布中这部分即为焊接熔池; 第 2 个区间为 $890\sim 1650^\circ\text{C}$ 之间, 该区间温度高于 TC17 钛合金的 β 转变点, 在焊接过程中, 这部分的材料发生 β 转变, 冷却到室温后该区域常可见原始 β 晶粒, 属于近热影响区; 第 3 个温度区间是 $650\sim 890^\circ\text{C}$, 该区域虽然低于相变点温度, 但是在这个温度范围仍然会对材料的组织和性能产生影响, 该区域称为远热影响区。

试件焊后沿垂直于焊缝的方向截取金相试样, 采用光学显微镜分析显微组织形貌, 与计算得到的熔池温度场进行对比分析, 如图 4 所示, 焊缝区可以观察到明显的析出板条 α 相, 呈现典型的网篮状, 并存在明显的 β 晶界, 这些 β 晶界是熔焊过程中合金从高温冷却时保留下来的。近热影响区超过了 β 转变温度, 晶粒粗化, 属于过热组织, 均容易辨别, 远热影响区 α 相发生部分溶解, 比较显示焊缝微观组织形貌与模拟的温度分

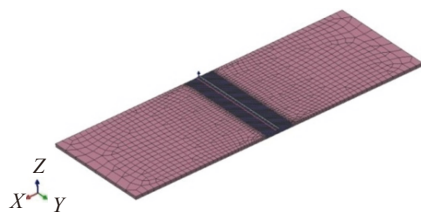


图2 计算模型
Fig.2 Numerical model

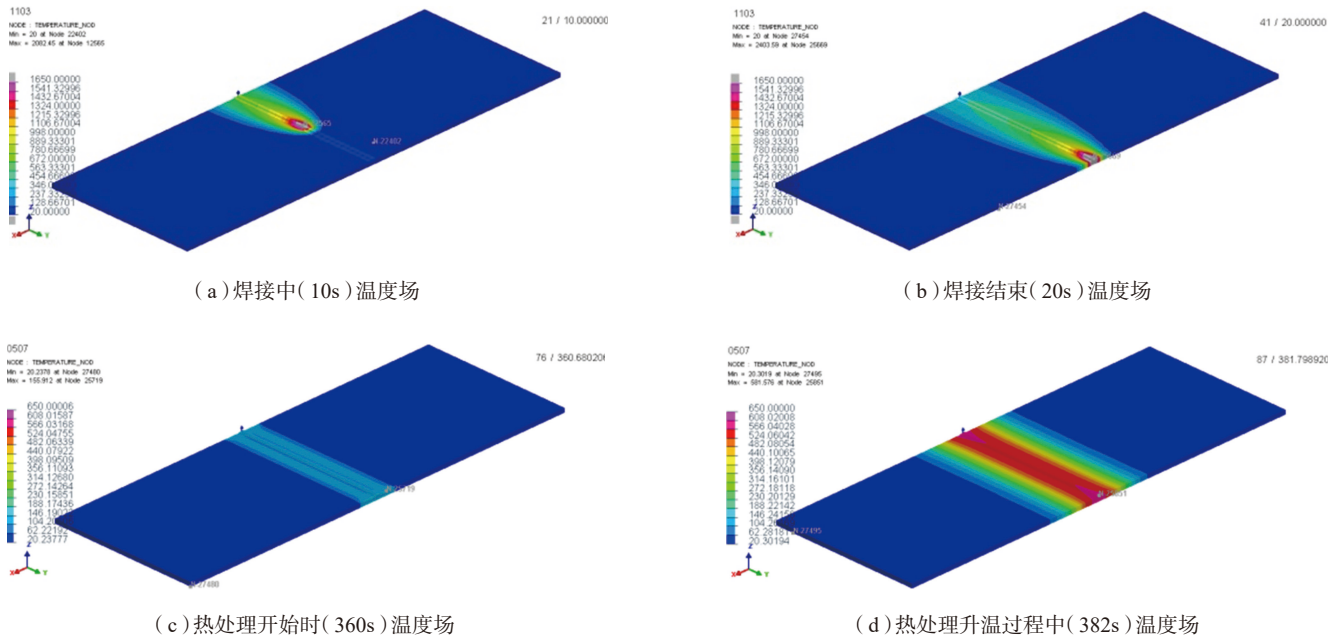


图3 温度场演变
Fig.3 Evolution of temperature field

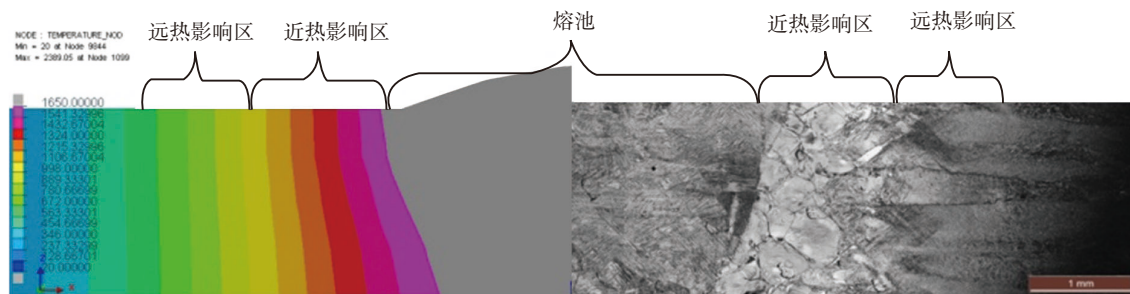


图4 焊缝金相组织和计算温度分布对比
Fig.4 Comparison of microstructure and calculated temperature distribution of weld seam

布区间比较吻合。

选取试板中部焊缝边的焊趾处一点为特征点进行分析,温度曲线如图5所示,在熔池到达该区域后,特征点温度在3s内从室温迅速升至1927℃,平均升温速率达到了642℃/s,在熔池继续前移后,特征点温度迅速降低,在随后的20s内,降至400℃以下,平均降温速率达到了76℃/s,随后降温速率降低,试件温度缓慢趋于一致并降至室温。在热处理阶段,试件以25℃/s的速率升到600℃,随后缓慢达到650℃的热处理温度,热处理过程结束后,在热辐射和对流作用下下降至室温。

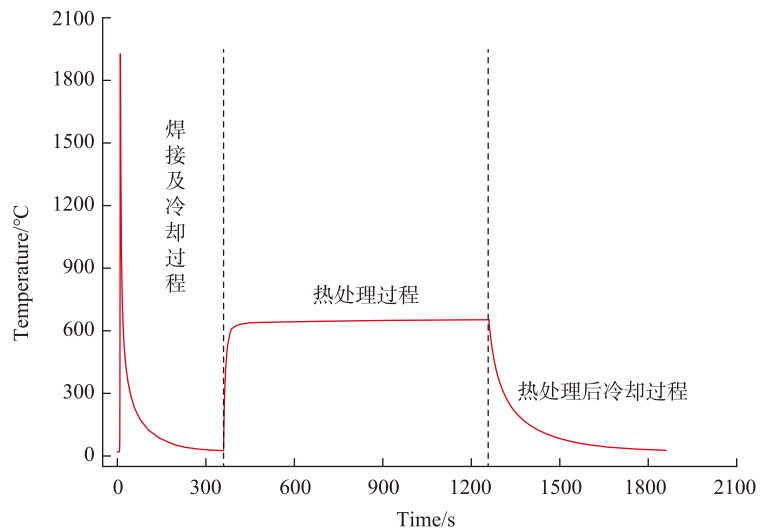


图5 焊缝中心点温度随时间变化曲线
Fig.5 Temperature curve of weld center point

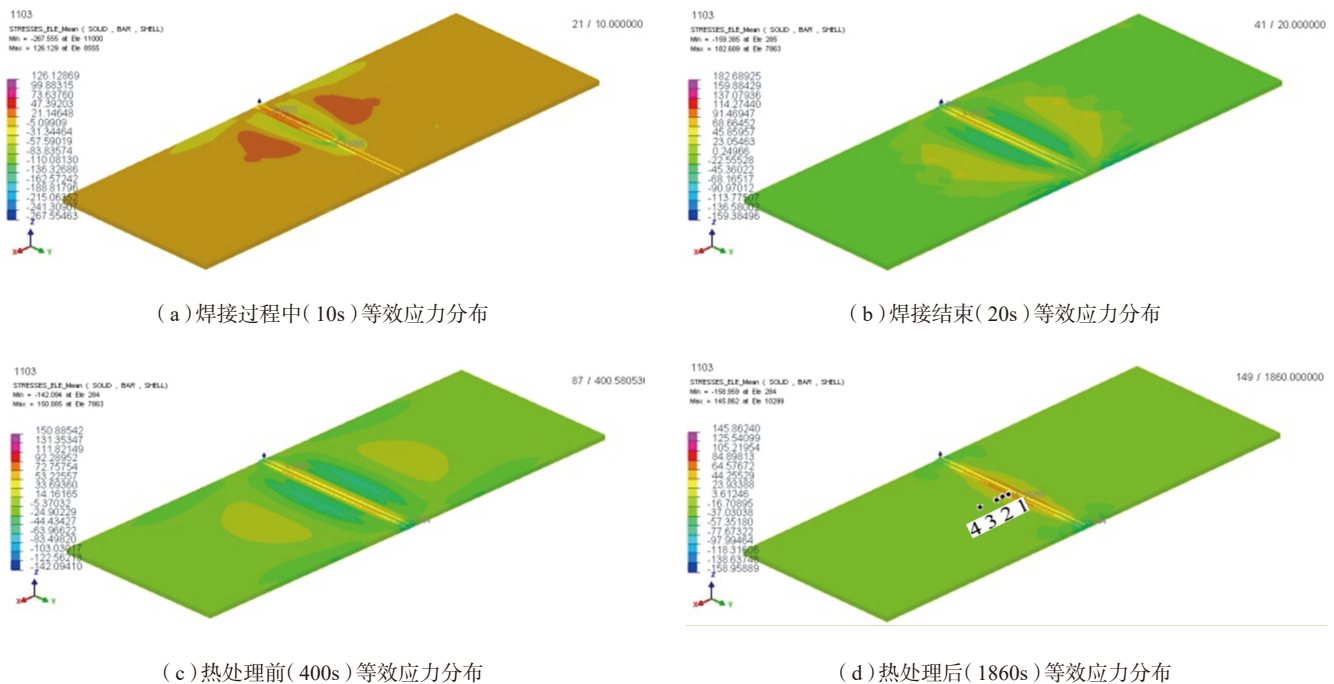


图6 焊接和热处理过程中纵向应力分布云图

Fig.6 Contour of longitudinal stress distribution during welding and heat treatment

2 残余应力场

图6为焊接和热处理过程中的等效应力云图,可以得出,焊接开始热源还没有作用到焊件上时,焊件上等效力为0;随着热源移动,由于熔池附近受热膨胀,而周围温度较低,受到拘束作用,在熔池周围产生了压缩塑性变形,产生压应力,焊接过程熔池前端的压应力达到了 -260MPa 左右;随着热源继续前移,该处温度下降引起收缩,周围的材料限制其收缩,产生拉伸塑性变形,最终产生了纵向残余拉应力。

在试板中心选取特征点进行研究,图6(d)中试板中间从焊趾往外选取4个点1、2、3、4,其距离中心点距离依次为 2.5mm 、 5mm 、 7.5mm 、 15mm ,得到其应力-时间演化曲线如图7所示。可知焊后焊趾处的点1纵向残余应力拉应力值达到 650MPa 左右,热处理过程开始后焊缝处的纵向残余应力值迅速下降,从 650MPa 降至 300MPa 以下。这是因为随着温度升高,材料的弹性模

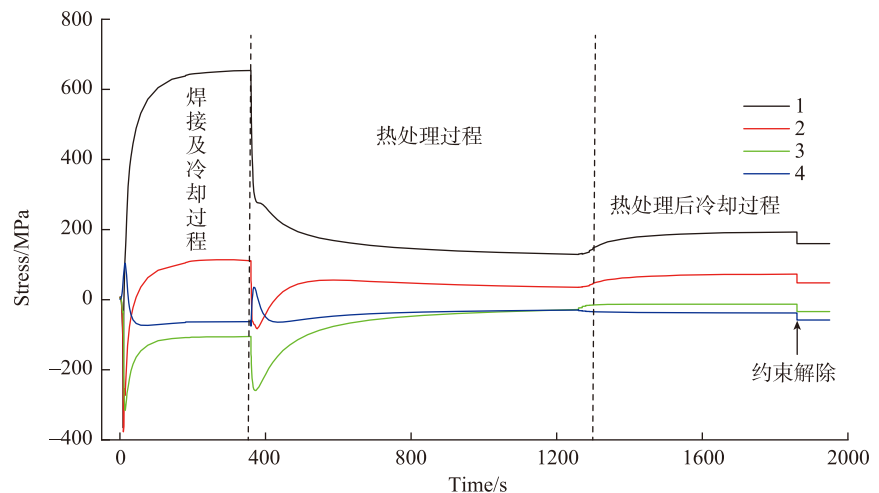


图7 纵向残余应力曲线

Fig.7 Longitudinal residual stress curve

量和屈服强度值降低,残余应力值迅速降低,随着保温过程进一步降低至 130MPa 左右,在保温过程中,材料发生蠕变,应力得到逐步释放,在随后的冷却过程,因为材料弹性模量和屈服强度值升高,纵向残余应力值回升至 192MPa 。在消除夹紧力后,试样恢复自由状态,残余应力水平降至 160MPa 左右。

残余应力预测及验证

目前,测试残余应力的方法大致分为破坏性的应力释放法(如切割法、小孔法等)和非破坏的无损测试方法(超声波法、X射线衍射、中子射线衍射法等)^[7-8]。除超声波法外,其他方法的共同点都是测定应变,再通过弹性力学定律由应变计算出应力

值。由于X射线法测定残余应力根据晶面间距的变化来确定应变,因此可以测定很小范围内的应变^[9]。

小孔法的原理是先在测量残余应力位置黏贴好应变片,应变片中心钻孔释放应力,应力释放产生应变,通过应变片测量数值,根据应力应变关系计算出残余应力。

焊缝的组织比较复杂,采用X射线衍射法测量焊缝点的应力误差较大^[10],因此验证焊缝边的H-H方向和垂直于焊缝的V-V方向应力分布。H-H方向每隔5mm分布1个点,V-V方向在近焊缝5个点间隔2mm,如图8所示。各个特征点通过模拟计算得到的热处理前后残余应力值如图9所示。

图9(a)显示纵向残余应力在H-H方向中间部位最高,焊后达到了675MPa,结合垂直于焊缝方向的截面(V-V方向),由图9(b)可知,纵向残余应力在近焊缝区域为拉应力,往远离焊缝方向转为压应力,在距离焊缝中心约7.5mm的位置点达到了-100MPa,热处理后近焊缝区的拉应力峰值得到明显降低,降至155MPa。母材的屈服强度约为1100MPa,接头纵向残余应力在焊后约为母材屈服强度的60%,经过焊后热处理后降低到低于屈服强度的15%。

由于焊件的横向残余应力相比于纵向残余应力较小,采用XRD与小孔法测量了图8所示各点的纵向

残余应力,并与模拟计算得到的结果对比,如图10所示,采用小孔法测量的结果比XRD测量的结果分散度小。结果显示计算得到的残余

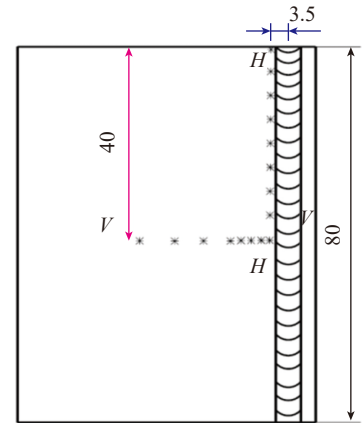
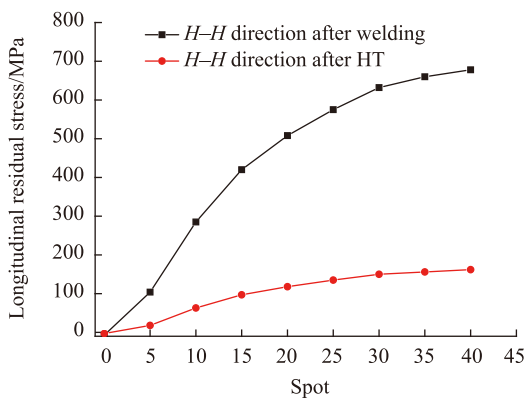
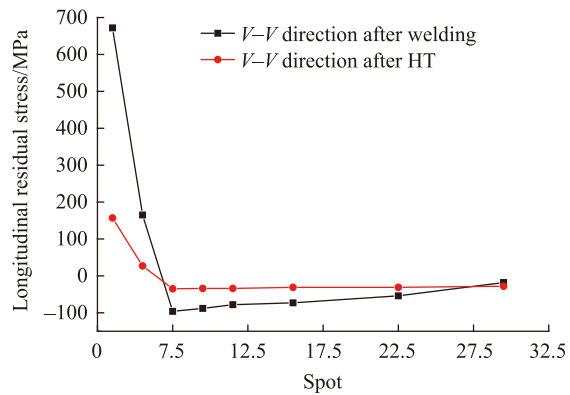


图8 残余应力验证点位置
Fig.8 Residual stress verification point location



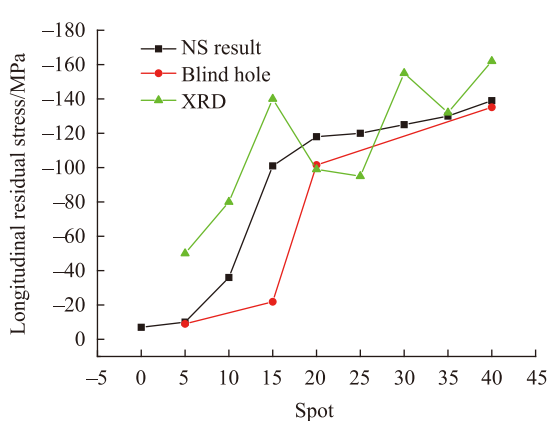
(a) H-H方向各点热处理前后纵向残余应力



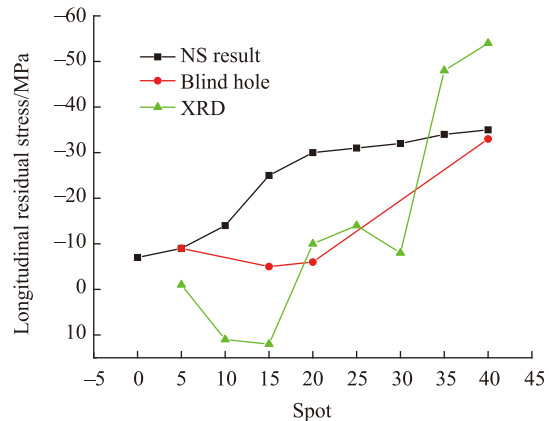
(b) V-V方向各点热处理前后纵向残余应力

图9 各测量点残余应力有限元计算结果

Fig.9 Residual stress calculated by FEM at measuring points



(a) 焊后各点纵向残余应力



(b) 热处理后各点纵向残余应力

图10 H-H方向各点的计算与测量应力值对比

Fig.10 Comparisons of calculated and measured stresses at points in H-H direction

应力值相比于测试结果偏高,但是值的变化趋势与计算结果具有较好的一致性。计算结果偏高主要是因为建立热处理模型的时候对蠕变关系的设定偏于保守,另外,计算模型相比于实际问题作了简化,导致残余应力值偏高,进一步的细化模型能使结果精确度提高。

结论

利用有限元软件 Sysweld,就 TC17 平板对接焊接及热处理过程进行了模拟,分析了过程温度场、焊后残余应力和热处理后残余应力,得到了平板对接接头局部热处理后残余应力分布规律。

(1) TC17 平板氩弧焊焊后,接头纵向残余应力达到了母材屈服强度的 60%,经过焊后热处理后降低到低于屈服强度的 15%。

(2) 通过残余应力测试证明文中建立的模拟方法可靠,对 TC17 平板焊接及热处理后的残余应力分布趋势能够较好的预测,将在工程上为叶片焊接修复和局部热处理后的残余应力预测提供技术基础。

(3) 对于 TC17 钛合金薄板的焊

接残余应力测量,采用小孔法测量的结果比 XRD 测量的结果分散度小。

参考文献

[1] FROES F H, EYLON D, BOMBERGER H. Titanium technology: present status and future trends[M]. OH: Bomberger TDA Publication, 1985.

[2] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1-2): 103-114.

[3] BOYER R R. Evolving aerospace applications for Ti alloys[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Titanium. Saint Petersburg, 1999.

[4] 黄伯云,李成功,石力开,等. 中国材料工程大典: 有色金属材料工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

HUANG Boyun, LI Chenggong, SHI Likai, et al. China materials engineering canon: nonferrous metal material engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[5] YAGHI A H, HYDE T H, BECKER A A, et al. Residual stress simulation in welded sections of P91 pipes[J]. Journal of Material Processing Technology, 2005, 167(2): 480-487.

[6] 董欣勇. TA15 薄板 EBW 及焊后再热处理对应力分布影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

DONG Xinyong. The study about the effect on stress distribution of the TA15 sheet with EBW and heat treatment after welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[7] MASUBUCHI K. Analysis of welded structures[M]. London: Pergamon Press Ltd., 1980.

[8] 周上祺. X 射线衍射分析原理方法应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.

ZHOU Shangqi. Principle, method and application of X-ray diffraction analysis[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991.

[9] 郑卜祥,宋永伦,席峰,等. 对接焊铝合金板材残余应力的 X 射线测试[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 275-281.

ZHENG Buxiang, SONG Yonglun, XI Feng, et al. Residual stresses measurement of butt-welded aluminum alloy plates by X-ray[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 275-281.

[10] 王西昌,左从进,刘方军,等. 基于 SYSWELD 软件的 TC4 电子束焊接过程的数值模拟[J]. 新技术新工艺, 2007(1): 8-10.

WANG Xichang, ZUO Congjin, LIU Fangjun, et al. Merical simulation of the EBW of TC4 alloy plate based on SYSWELD[J]. New Technology & New Process, 2007(1): 8-10.

通讯作者: 金俊龙, E-mail: kinghit@163.com。

Numerical Simulation of Residual Stress in TC17 Titanium Alloy Welding and Local Heat Treatment

JIN Junlong, WAN Xiaohui, GUO Delun

(Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies,
AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Numerical simulation of arc welding and post-weld heat treatment of TC17 titanium alloy plate was carried out, the phase transformation and creep of materials were considered in the model, evolution of temperature field during welding and heat treatment and the distribution of residual stress before and after heat treatment were obtained. Results show that, due to the large heat input, large residual stress is generated after welding, the longitudinal residual tensile stress in the HAZ zone near the welding seam reaches about 650MPa, and it decreases to about 160MPa after heat treatment. Residual stress was measured by blind-hole method and X-ray diffraction. The calculated residual stresses are in good agreement with the measured results of the blind-hole method.

Keywords: Titanium alloy; Numerical simulation; Welding; Heat treatment; Residual stress

(责编 古系)