

焊后热处理对钛合金对接板疲劳寿命影响的数值模拟

罗家元, 张宇翔*, 吕晨轲

(重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要:基于有限元软件建立了考虑蠕变应力松弛效应的 30 mm 厚 TC4 钛合金对接板的热—弹—塑性有限元模型, 采用该模型模拟了 TC4 钛合金对接板电子束焊接过程中的温度场与应力场, 对比了 3 种焊后热处理工艺下对接板内部残余应力分布情况, 得出最优的焊后热处理工艺。通过疲劳分析软件 fe-safe 分析了焊后热处理对于对接板疲劳性能的影响。结果表明, 数值模拟得到的残余应力分布情况较为准确。对接板经过 700 °C×2 h 焊后热处理, 其内部横向、纵向残余应力基本完全消除, 峰值分别为 28、46.3 MPa。蠕变效应在焊后热处理消除残余应力的过程中起重要作用, 经过焊后热处理, 对接板焊缝与热影响区的疲劳安全系数由 0.192 提升至 0.7 左右。

关键词:钛合金; 焊后热处理; 数值模拟; 组合热源; 残余应力; 疲劳寿命

中图分类号: TF823, TG405

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)05-0076-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.05.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Numerical simulation of the effect of post-welding heat treatment on fatigue life of titanium alloy butt plate

Luo Jiayuan, Zhang Yuxiang*, Lü Chenke

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the finite element software, a thermo-elastic-plastic finite element model of 30 mm thick TC4 titanium alloy butt plate considering the creep stress relaxation effect was established. The temperature field and stress field in the electron beam welding process of TC4 titanium alloy butt plate were simulated by this model, and the distribution of residual stress in the butt plate under three post-welding heat treatment processes was compared. The optimal post-welding heat treatment process is obtained. Fatigue analysis software fe-safe was used to analyze the influence of heat treatment on the fatigue properties of butt plate. The results show that the residual stress distribution obtained by numerical simulation is accurate. After 700 °C×2 h post-welding heat treatment, the internal transverse and longitudinal residual stresses of the butt plate were completely eliminated, and the peak values are 28 MPa and 46.3 MPa, respectively. The creep effect plays an important role in the process of post-welding heat treatment to eliminate the residual stress, and the fatigue safety factor of welding seam and heat-affected zone of the butt plate can be increased from 0.192 to about 0.7.

收稿日期: 2022-12-18

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (cstc2021jscx-dxwtBX0022); 国家重点研发计划项目 (2020YFF0404209); 重庆市博士后特别资助项目 (Xm2017034)。

作者简介: 罗家元, 1978 年出生, 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 残余应力评估及消除、结构疲劳寿命分析, E-mail: jiayuan_luo@126.com; * 通讯作者: 张宇翔, 1998 年出生, 男, 河南驻马店人, 硕士, 主要研究方向: 焊接残余应力评估及结构疲劳寿命分析, E-mail: 342210383@qq.com。

Key words: titanium alloy, post welding heat treatment, numerical simulation, combined heat source, residual stress, fatigue life

0 引言

钛合金由于具有重量轻、耐高温、耐腐蚀、焊接性能好等一系列优点而被广泛应用于海洋工程、航空航天设备中^[1-3]。大尺寸、大厚度的部件整体成型成本较高,且加工难度较大,在加工时通常采用成本较低的焊接加工,但由于焊接过程中,焊接接头的不均匀受热和冷却,焊件会产生残余应力,焊接残余应力的存在直接影响了焊接件的抗拉强度、断裂韧性以及疲劳寿命等,因此,在焊接件加工过程中控制与消减残余应力是必不可少的一环。

在 TC4 钛合金厚板的焊接过程中通常采用真空电子束焊接,因其具有能量集中、热影响区小等特点^[4],通常会导致 TC4 钛合金厚板内外温度梯度变化较大,从而引起残余应力在厚板内部的产生。Liu^[5]等开发了一种组合热源来研究 50 mm 厚的厚板电子束焊接的残余应力分布。结果表明电子束焊接引起的厚板的全厚度残余应力与电弧焊接的全厚度残余应力明显不同。曾庆继^[6]等采用试验的方法研究了 9 mm 厚的 TC4 钛合金的最佳焊接工艺参数,并用数据验证了数值模拟的正确性。结果表明,由双椭球热源和锥形热源组成的组合热源能够更好地模拟电子束焊接的特点。焊后热处理作为一种有效且常见的消减残余应力的工艺被广泛的使用,大量学者对于焊后热处理工艺进行了试验、数值仿真等研究。Zhang 等^[7]利用有限元仿真软件 Abaqus 对 GH80A 镍合金的电子束焊接和焊后热处理过程进行了研究,并采用试验的方法验证了有限元仿真结果的准确性。Dong 等^[8]通过有限元仿真和试验的方法,研究了塑性变形和蠕变松弛对焊后热处理不同阶段残余应力消除过程的影响。结果表明最主要的应力释放机制是蠕变应变引起的应力松弛。逯世杰等^[9]开发了考虑蠕变效应的热—弹—塑性有限元计算方法,用该方法研究了 Q345 钢焊后热处理过程中蠕变效应对焊接残余应力的影响。结果表明,仅考虑焊后热处理保温阶段的蠕变,能够较大幅度提高计算效率,且对数值模拟结果影响较小。目前有关 TC4 钛合金厚板焊后热处理过程中残余应力的分布状态及蠕变效应在该过程中的作用机理的研究相对较少。

基于有限元仿真软件 Abaqus,通过编写子程序的方法建立了双椭球热源与锥形热源组成的组合热源,模拟了 30 mm 厚的 TC4 钛合金厚板的真空电子束焊接过程,并分析了厚板焊后残余应力的分布情况,随后基于考虑蠕变应力松弛效应的热—弹—塑性有限元的方法,对 TC4 厚板进行焊后热处理,并分析了 3 种焊后热处理温度下残余应力的消除效果,最后,基于专业疲劳分析软件 fe-safe 分析对比了焊接残余应力以及焊后热处理对于 30 mm 厚的 TC4 钛合金对接板的疲劳寿命的影响,为 TC4 钛合金厚板结构焊接接头的残余应力预测及焊后热处理工艺参数的选择提供理论支持。

1 对接板焊接残余应力分析

1.1 焊接有限元模型

笔者研究的对接平板采用电子束焊接,平板材料为 TC4 合金,尺寸为 200 mm×100 mm×30 mm,是由两块 100 mm×100 mm×30 mm 的平板焊接而成,焊接数值模拟过程在有限元仿真软件 Abaqus 中完成,采用顺序耦合的热—弹—塑性有限元的方法,在温度场的模拟中,节点单元选择 DC3D8,应力场的模拟中,单元类型选择 C3D8R。为保证计算精度同时节约计算时间,对热影响区及焊缝位置采用过渡网格技术进行网格加密,焊缝及热影响区的网格尺寸为 1 mm,网格总数为 84 000 个,其结构如图 1 所示。

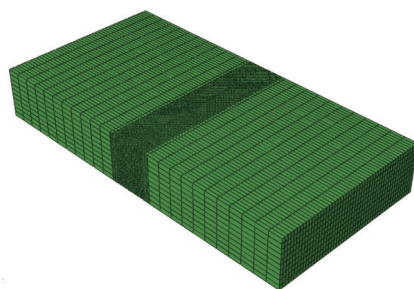


图1 TC4 钛合金对接板网格结构

Fig. 1 Grid structure of TC4 titanium alloy butt plate

焊接数值模拟过程中采用 Fortran 编程语言编写 Dflux 用户子程序,并导入到 Abaqus 中模拟焊接时热源的移动,焊接热源的选择与焊接方式密切相关,由于电子束焊接穿透性高,热影响区小,因此,在数值模拟过程中采用双椭球热源模型与锥形热源模

型共同构成的组合热源,该热源能够准确的模拟电子束焊接时的热量分布,双椭球热源的数学表达式为:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}f_f Q_{v1}}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3z^2}{a_f^2} - \frac{3x^2}{b^2} - \frac{3y^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}f_r Q_{v1}}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3z^2}{a_r^2} - \frac{3x^2}{b^2} - \frac{3y^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

锥形热源的数学表达式为:

$$q = \frac{9Q_{v2}}{\pi(1-e^{-3})(y_e - y_i)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \exp\left[\frac{-3(x^2 + z^2)}{\left[r_i + \frac{(r_e - r_i)(y - y_i)}{y_e - y_i}\right]^2}\right] \quad (3)$$

式中, $Q_{v1} + Q_{v2} = Q$ 为焊接热输入总量 (J); f_f 和 f_r 分别为双椭球热源前后椭球的热量分配系数; a_f 、 a_r 、 b 、 c 为双椭球热源的尺寸参数 (m); y_e 、 y_i 为锥形热源的位置参数 (m); r_e 、 r_i 为锥形热源的形状参数 (m); Q 的数学表达式为:

$$Q = UI\mu \quad (4)$$

其中, U 为焊接电压 (V); I 为焊接电流 (A); μ 为焊接时的热效率。在模拟过程中焊接电压取 60 kV, 电子束电流取 350 mA, 热效率取 0.85, 焊接速度取 8 mm/s, 焊接过程中, 焊件的高温区域通过辐射与外部环境进行热交换, 焊件的低温区域通过对流与外部环境进行热交换, 为了考虑焊接过程中的热量损失, 定义对流换热系数为 20 W/(m²·K), 发射率为 0.8, 室温为 20 ℃。焊接过程中考虑了随温度变化的材料热物理性能和力学性能, TC4 合金的材料参数取自文献 [10]。

1.2 焊接温度场分析

在焊接的模拟过程中, 温度场的准确性直接关系到残余应力场的分布是否合理, 因此, 对于焊接温度场的校核是至关重要的。图 2 为钛合金对接板上部分节点的热循环曲线, 从图 2 可以看出, 由焊缝到热影响区的最高温度急剧下降, 这表明热源的热量分布较为集中, 比较符合电子束焊接热量集中的特点。TC4 钛合金的熔点约为 1 600 ℃, 图 3 右侧为 4 s 时焊缝的熔池样貌, 图中灰色区域为熔池 (温度高于 1 600 ℃), 左侧为文献 [11] 中相同结构电子束焊接试验的熔池样貌, 对比可以得出本文模拟过程中温度场数据与实际焊接过程中的热量分布基本相同, 表明了温度场的模拟较为准确。

1.3 焊接残余应力场分析

将温度场作为预定场导入残余应力分析模型中,

可以得到 TC4 钛合金对接板的横向、纵向焊接残余应力分布, 如图 4 所示, 从图 4(a) 可以得出横向残余应力在上表面和下表面的分布规律为焊缝区域受压应力, 靠近焊缝两侧区域受拉应力, 在焊接起始位置和结束位置受到较大的压应力作用, 横向残余应力在对接板中面的分布情况为焊缝区域受到较大的拉应力。由图 4(b) 可知, 纵向残余应力在焊缝区域表现为压应力, 焊缝两侧表现为拉应力, 由于焊缝中部金属受到较大的约束作用, 因此, 纵向残余应力在焊缝区域中面表现为更大的压应力, 这一分布趋势与文献 [12] 中残余应力分布情况基本一致。

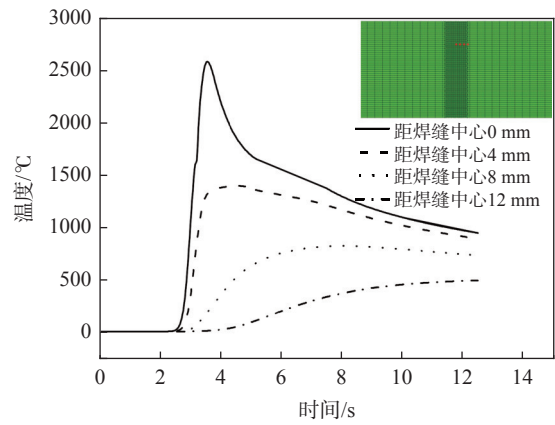


图 2 热循环曲线

Fig. 2 Thermal cycle curve

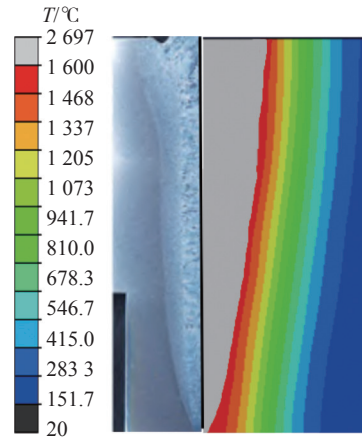


图 3 熔池对比

Fig. 3 Molten pool comparison

为了深入了解残余应力在 TC4 对接板上的分布情况, 在对接板表面及内部选取 3 条路径, 其位置见图 5, 分别给出残余应力在 Path1、Path2、Path3 三条路径上的分布曲线, 如图 5 所示, 可以看出残余应力主要存在于焊缝以及热影响区附近, 这是由于电子束焊接热影响范围小、能量集中导致焊缝与母材间温度差较大引起的。

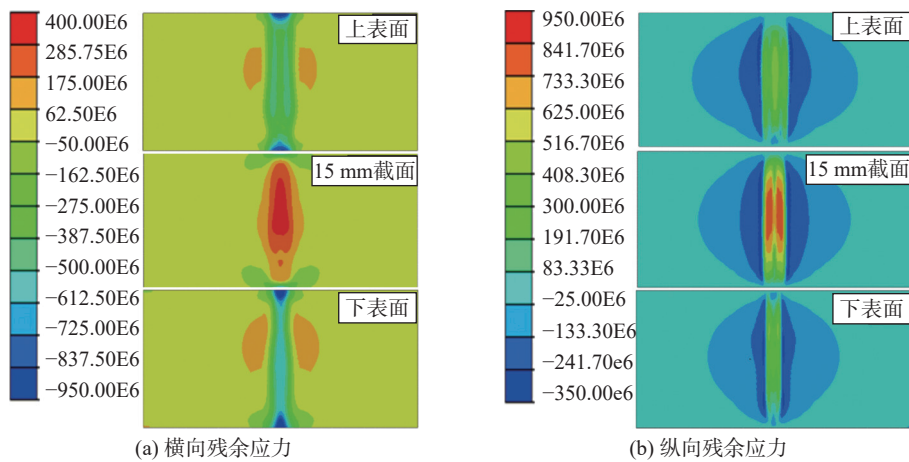


图 4 残余应力分布云图
Fig. 4 Residual stress distribution cloud diagram

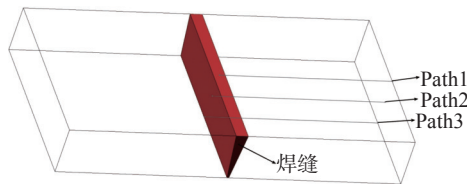


图 5 路径分布
Fig. 5 Path distribution diagram

由图 6(a) 可得, 横向残余应力在 Path1、Path3 上表现为焊缝区受压应力, 其最大值分别为 465.4、559.3 MPa, 在远离焊缝区后迅速减小至 0, 后又变

为 100 MPa 左右的拉应力, 最后缓慢减少至 0。在 Path2 上横向残余应力在焊缝区表现为拉应力, 最大值约为 339 MPa, 在远离焊缝区后缓慢减少至无残余应力。由图 6(b) 可得, 纵向残余应力在焊缝区均表现为拉应力, 最大拉应力值出现在中面的 Path2 上, 其值为 814.9 MPa, 在远离焊缝区后, 迅速减小至 0, 然后在热影响区变为 200 MPa 左右的压应力, 最大压应力出现在位于中面的 Path2 上, 其最大值约为 260 MPa, 可以看出钛合金对接板内部残余应力较大, 需要进行焊后热处理。

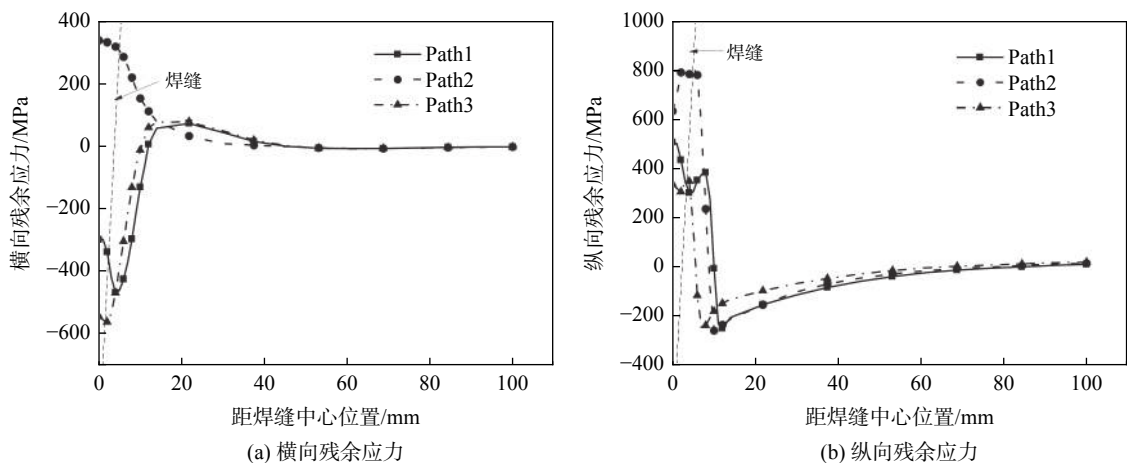


图 6 残余应力分布曲线
Fig. 6 Distribution curve of residual stress

2 焊后热处理过程分析

2.1 热处理有限元模型

将钛合金对接板焊后残余应力场作为初始条件导入热处理模型中进行焊后热处理过程分析, 分别

对焊接后的 TC4 对接板进行 500、600、700 °C 的焊后热处理, 热处理过程中包含升温、保温以及降温过程, 其中升温过程 0.5 h, 保温过程 2 h, 随后炉冷至室温。在焊后热处理的过程中, 残余应力的降低主要是由高温下材料强度的下降和材料蠕变引起的

应力松弛作用导致,因此,在焊后热处理的模拟过程中应考虑材料的蠕变效应。笔者采用由四次延迟函数变换得到的基于 Arrhenius 方程的双曲正弦型蠕变本构方程来描述 TC4 对接板保温阶段材料的应力松弛过程,其参数选自文献 [13],如表 1 所示,该方程可以准确预测蠕变的每一个阶段,其数学表达式如下:

$$Z = \varepsilon \exp[Q/RT] \quad (5)$$

$$Z = A_1 \sigma^{n_1} \quad \alpha \sigma < 0.8 \quad (6)$$

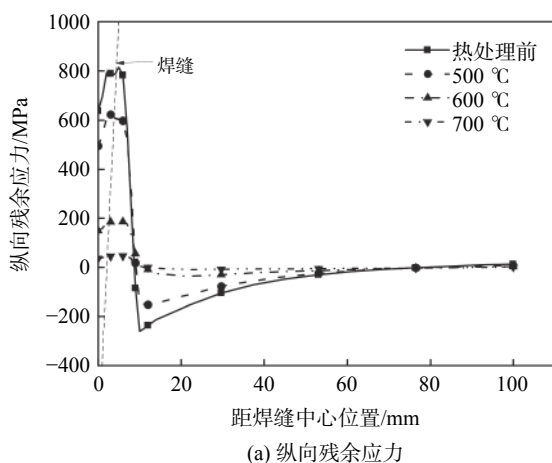
$$Z = A_2 \exp(\beta \sigma) \quad \alpha \sigma > 1.2 \quad (7)$$

$$Z = A_3 [(\sinh \alpha \sigma)]^{n_2} \quad \text{all } \sigma \quad (8)$$

式中, ε_c 为蠕变应变速率 (s^{-1}); Q 为热变形激活能 (J); R 为普适气体常数; T 为温度,取绝对零度; σ 为瞬时应力 (Pa); A 、 n_1 、 n_2 、 β 为材料常数; α 为应力水平指数, $\alpha = \beta / n_1$ 。

表 1 蠕变本构方程参数
Table 1 Creep constitutive equation parameters

温度/℃	A_3	n_2	α	$Q/(J \cdot mol^{-1})$
500	9.764e-6	6.00	0.002 89	19 213.78
600	9.764e-6	3.16	0.006 49	14 632.57
700	9.764e-6	2.14	0.020 7	19 967.6



2.2 热处理结果分析

为了解焊后热处理对于 TC4 对接板内部残余应力的消除情况,提取位于 TC4 钛合金对接板中部的 Path2 上的残余应力作进一步分析。图 7 为 TC4 钛合金对接板在不同温度下焊后热处理后的残余应力与热处理前的残余应力在路径 Path2 上的分布对比。由图 7 可知,经过 2 h 焊后热处理,横向残余应力与纵向残余应力在分布趋势上与热处理前基本一致,且残余应力出现不同程度的下降。在 Path2 上经过 500 °C×2 h 的焊后热处理后,横向残余应力峰值从 339.5 MPa 下降至 272 MPa,下降约 20%,纵向残余应力峰值由 814 MPa 下降至 622.5 MPa,下降约 23%。在经过 600 °C×2 h 的焊后热处理后,横向残余应力最大值下降了 235.3 MPa,下降约 69%,纵向残余应力最大值下降了 628.2 MPa,下降约 77%。在 700 °C×2 h 的焊后热处理工艺下横向残余应力峰值为 28 MPa,纵向残余应力峰值为 46.3 MPa,焊接残余应力下降程度接近 100%,该结果与文献 [14] 中试验结果几乎一致。由于 TC4 钛合金发生相变的温度在 900 ~ 1 000 °C,因此,焊后热处理工况下 700 °C×2 h 的焊后热处理工艺对接板内残余应力消除效果最好。

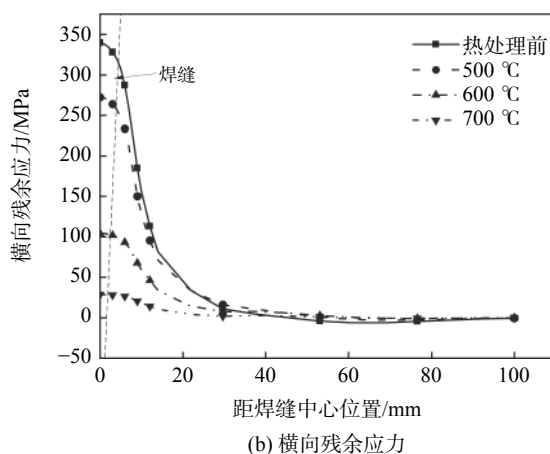


图 7 焊后热处理后对接板内部残余应力曲线

Fig. 7 Internal residual stress curve of butt plate after post-welding heat treatment

2.3 热处理消除残余应力的机理分析

焊后热处理过程中残余应力的释放主要受材料的软化、材料的塑性变形、蠕变效应等影响^[8],热处理过程中残余应力与总应变的数学表达式如下:

$$\sigma(T) = E(T) \varepsilon_e \quad (9)$$

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_T + \Delta \varepsilon_c \quad (10)$$

式中, T 为温度 (°C); $\sigma(T)$ 表示为该温度下的应力

(Pa); $E(T)$ 为该温度下的弹性模量; ε_e 为对应的弹性应变; $\Delta \varepsilon$ 表示总应变增量; $\Delta \varepsilon_e$ 表示弹性应变增量; $\Delta \varepsilon_p$ 表示塑性应变增量; $\Delta \varepsilon_T$ 表示热应变增量; $\Delta \varepsilon_c$ 为蠕变应变增量。

为具体探究不同热处理温度下 TC4 钛合金对接板残余应力变化情况,给出不同热处理温度下对接板焊缝内某一点的纵向残余应力变化曲线,如

图 8 所示, 图中 0~1 800 s 为升温过程, 在升温过程中该点的纵向残余应力随温度的升高迅速下降, 其主要原因是随着温度的上升, 材料发生软化效应, 弹性模量、屈服强度等力学性能下降。1 800~9 000 s 为保温过程, 此时该点的纵向残余应力先是迅速下降, 之后, 随着保温时间的增加, 残余应力变化逐渐趋于稳定, 导致这一变化趋势的原因是蠕变导致的应力松弛效应。9 000~16 200 s 为冷却过程, 在对接板冷却的过程中, 不同温度下该点的纵向残余应力均有不同程度的回升, 主要原因是随着温度的下降材料发生硬化, 屈服强度、弹性模量等各项性能随之增大, 钛合金的蠕变性能随着温度的升高而下降, 故在 500、600、700 °C 热处理温度下, 残余应力回升幅度也呈现逐渐减小的趋势^[8]。

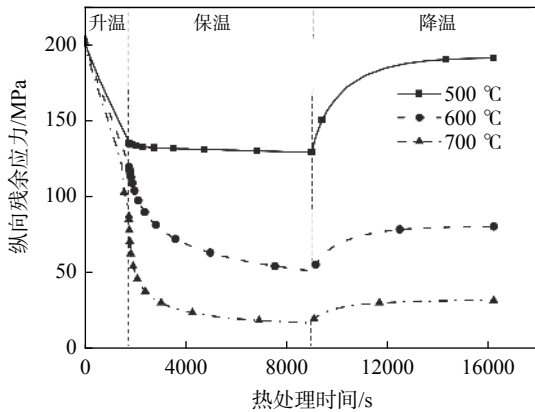


图 8 纵向残余应力变化曲线
Fig. 8 Longitudinal residual stress curve

为揭示热处理过程中残余应力的变化机理, 现以 700 °C 热处理工艺为例, 给出该点的纵向塑性应

变变化曲线、纵向弹性应变变化曲线及纵向蠕变应变变化曲线, 如图 9 所示, 进行热处理应力松弛的机理分析。可以看出, 在升温阶段纵向弹性应变变小, 纵向塑性应变数值变大, 出现这一现象的原因可以归结为材料的弹、塑性随着温度的升高逐渐减小, 且弹性模量的下降速率小于屈服强度的下降速率^[10]。参考式 (9) 可知, 应力的值等于弹性模量与弹性应变的乘积, 由于屈服强度下降速率大于弹性模量下降速率, 故随着升温过程的进行, 式 (9) 的平衡关系会被打破, 因此, 为保证应力、弹性应变与弹性模量之间的平衡, 此时弹性应变应该下降, 这一部分的弹性应变被转化为了塑性应变, 这便是在升温阶段该点残余应力出现下降的原因, 由于未考虑此阶段蠕变效应的影响, 故蠕变应变率为 0 且不变。在保温阶段, 纵向塑性应变保持不变, 纵向弹性应变持续下降, 下降速率逐渐减小, 在此阶段考虑了蠕变效应的影响, 故纵向蠕变应变率开始发生变化, 其变化趋势为随着保温阶段的进行逐渐增大, 增大的速率逐渐变小。在该过程温度不再发生变化, 故总应变增量应保持不变, 结合式 (10) 便可得出, 该阶段下降的纵向弹性应变被完全转变为蠕变应变。故此阶段残余应力的下降是由于材料蠕变效应引起的弹性应变向蠕变应变的转换。在降温阶段, 该点的纵向弹性应变、纵向蠕变应变与纵向塑性应变均保持不变, 随着降温过程的进行, 材料各项性能得到提升, 其弹、塑性均有一定程度的回升, 参考式 (9) 应力、弹性模量与弹性应变的关系, 弹性模量的上升导致了应力的增长, 故在降温的过程中残余应力出现了一定程度的增长。

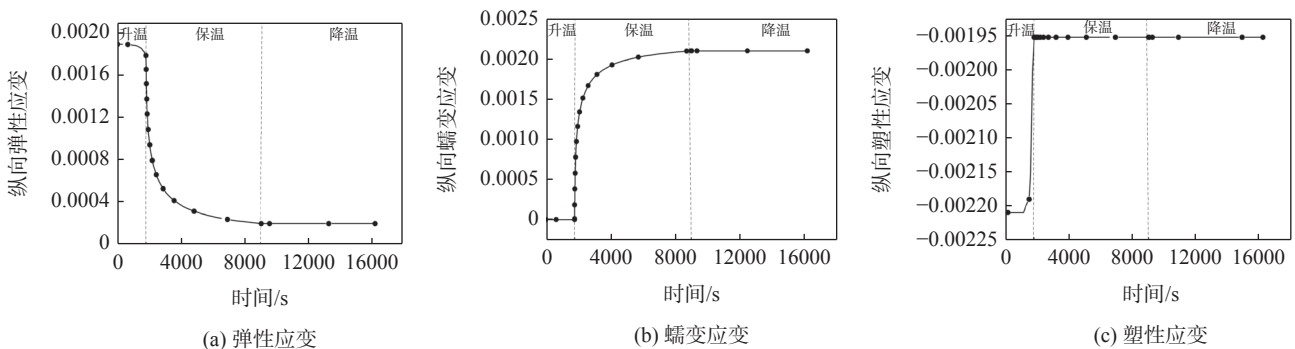


图 9 焊后热处理过程中弹性应变、塑性应变及蠕变应变随时间变化曲线
Fig. 9 Curves of elastic, plastic and creep strains with time during post-welding heat treatment

3 疲劳寿命分析

为探究焊后热处理对于 TC4 钛合金对接板疲

劳寿命的影响, 现采用专业疲劳寿命分析软件 fe-safe 对 TC4 钛合金对接板进行疲劳寿命分析, 结构疲劳寿命受多方面因素影响, 主要包括材料本身的

疲劳性能、表面粗糙度、加工工艺、外部载荷等,笔者主要探究残余应力对于疲劳寿命的影响。

在Abaqus中分别把700℃×2h焊后热处理后的残余应力和焊接后残余应力作为初始条件导入静力通用分析模型中进行静力分析,再建立不考虑残余应力的模型作为对照组。假定对接板工作时承受30 MPa的压强,故静力分析时在对接板上表面施加一个30 MPa的压强作为疲劳载荷,再将静力分析结果导入fe-safe中进行疲劳分析,疲劳分析时采用Miner线性法则对其进行疲劳分析,定义应力比为1, -1,高周疲劳寿命为 10^7 周次。

在Abaqus中打开疲劳分析结果,可以得到对接板疲劳安全系数,如图10所示,分别为不考虑残余应力(图10(a))、考虑焊接残余应力(图10(b))、

考虑焊后热处理残余应力(图10(c))的对接板疲劳安全系数,由于数值模拟过程中边界条件设定的原因,对接板两侧会产生应力集中,造成疲劳安全系数较低。笔者主要探究焊接残余应力的影响,因此,主要讨论焊缝及热影响区的疲劳安全系数,由云图可以看出在不考虑残余应力的情况下,在焊缝及热影响区疲劳安全系数约为0.8,考虑焊接残余应力的情况下,疲劳安全系数为0.192,进行700℃×2h焊后热处理后疲劳安全系数约为0.7。对比其疲劳安全系数可知,对接板经过焊接后焊缝及热影响区疲劳安全系数较低,极易产生损伤累积,进而产生疲劳裂纹,经过700℃×2h的焊后热处理后,焊缝及热影响的疲劳性能有了较大的改善。

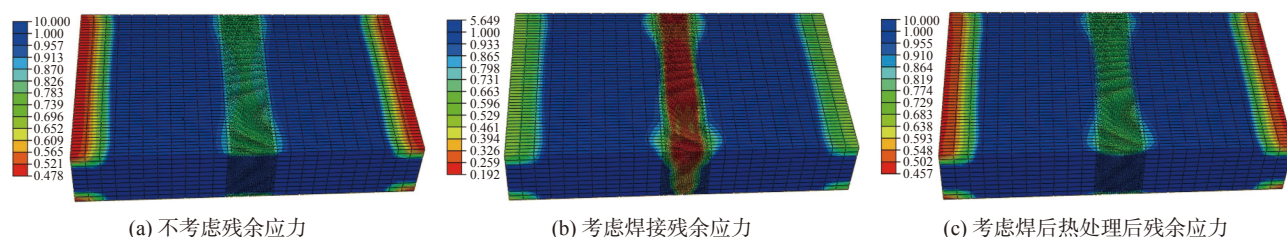


图10 疲劳安全系数

Fig. 10 Fatigue safety factor

4 结论

1) 采用双椭球热源与锥形热源组成的组合热源可以较好地模拟TC4钛合金厚板电子束焊接时的熔池形状,得到的残余应力分布较为准确。

2) 在焊后热处理的数值模拟过程中采用基于Arrhenius方程的双曲正弦型蠕变本构方程可以准确的描述TC4对接板热处理过程中由蠕变导致的应力松弛过程。

3) 最佳热处理工艺为700℃×2h, 30 mm厚的TC4钛合金对接板经过700℃×2h的焊后热处理

工艺后,其内部残余应力基本消除,横向残余应力峰值下降为28 MPa,纵向残余应力峰值下降为46.3 MPa,焊接残余应力下降程度接近100%,与试验结果较为接近。

4) 焊后热处理过程中对接板内部的残余应力的消除机理主要是高温引起的材料软化和蠕变效应引起的应力松弛,其中蠕变效应引起的应力松弛效应占主导地位。

5) 经过700℃×2h的焊后热处理,TC4钛合金对接板疲劳寿命有一定的提升,对接板焊缝及热影响区的疲劳安全系数由0.192提升至0.7左右。

参考文献

- [1] Yu Changli, Guo Qibo, Gong Xiaobo, *et al.* Fatigue life assessment of pressure hull of deep-sea submergence vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110528.
- [2] He Yifan, Chen Donggao, Zhang Long, *et al.* Study on microstructure and properties of TC4 titanium alloy MIG welded joint after heat treatment[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(6): 164-170.
(何逸凡, 陈东高, 张龙, 等. TC4钛合金MIG焊接接头热处理后组织性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(6): 164-170.)
- [3] Ou Peng, Cao Zengqiang, Rong Ju, *et al.* Molecular dynamics study on the welding behavior in dissimilar TC4-TA17 titanium alloys[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5606.
- [4] Li Dadong, Bai Wei, Deng Jian, *et al.* Study on vacuum electron beam welding of 50 mm thick plate TC4 and TA17 titanium

- alloy[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(3): 40–46.
(李大东, 白威, 邓健, 等. 50 mm厚板TC4及TA17钛合金真空电子束焊接工艺研究[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(3): 40–46.)
- [5] Liu Chuan, Wu Bing, Zhang Jianxun. Numerical investigation of residual stress in thick titanium alloy plate joined with electron beam welding[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2010, 41B(5): 1129–1138.
- [6] Zeng Qingji, Xu Lianrong, Han Yongdian, *et al.* Simulation of electron beam welding on titanium alloy (TC4)[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(11): 109–112, 118.
(曾庆继, 徐连勇, 韩永典, 等. 钛合金(TC4)电子束焊接模拟[J]. *焊接学报*, 2014, 35(11): 109–112, 118.)
- [7] Zhang Hong, Men Zhengxing, Li Jiukai, *et al.* Numerical simulation of the electron beam welding and post welding heat treatment coupling process[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2018, 37(9-10): 793–800.
- [8] Dong Pingsha, Song Shaopin, Zhang Jinmiao. Analysis of residual stress relief mechanisms in post-weld heat treatment[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2014, 122: 6–14.
- [9] Lu Shijie, Wang Hu, Dai Peiyuan, *et al.* Influence of creep on prediction accuracy and computational efficiency of residual stress in post-weld heat treatment[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(12): 1581–1592.
(逯世杰, 王虎, 戴培元, 等. 蠕变对焊后热处理残余应力预测精度和计算效率的影响[J]. *金属学报*, 2019, 55(12): 1581–1592.)
- [10] Liang Guangbing, Zhu Jinhong, Yin Danqing, *et al.* Numerical simulation of path selection for laser cladding of TC4 titanium alloy[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(6): 12–18.
(梁广冰, 朱锦洪, 尹丹青, 等. TC4钛合金激光熔覆路径选择数值模拟研究[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(6): 12–18.)
- [11] Zhuang Mingxiang, Zhao An'an, Wang Haojun, *et al.* Low cycle fatigue and fracture behavior of electron beam welding joint of TC4 titanium alloy[J]. *Welding*, 2022, (2): 39–45.
(庄明祥, 赵安安, 王浩军, 等. TC4钛合金电子束焊接接头低周疲劳性能与断裂行为[J]. *焊接*, 2022, (2): 39–45.)
- [12] Ge Keke, Zhang Bowen, Xu Qiang, *et al.* Simulation of residual stress in electron beam welding of thick titanium alloy plate[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(7): 151–155, 160.
(葛可可, 张博文, 徐强, 等. 钛合金厚板电子束焊接残余应力模拟研究[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(7): 151–155, 160.)
- [13] Ding Pan. Simulation modeling and process optimization of NC hot tension creep forming of titanium alloy profiles[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
(丁盼. 钛合金型材数控热拉弯蠕变成形仿真建模及工艺优化研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015.)
- [14] Yu Chen, Chen Jing, Chen Huining, *et al.* Three-dimensional stress of TC4 titanium alloy test plate with magnetically controlled narrow gap TIG welding before and after heat treatment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(6): 61–66.
(余陈, 陈静, 陈怀宁, 等. TC4钛合金磁控窄间隙TIG焊试板热处理前后三维应力[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(6): 61–66.)

编辑 唐肖

宝钛股份研制的高强韧钛合金管材顺利通过超深井钻井试验

(2023年10月12日消息)近日,宝鸡钛业股份有限公司高强韧钛合金管材制备的钻杆在新疆塔里木油田顺利完成8 000 m超深井钻井试验。

钛合金钻杆与钢钻杆相比,具有更高的比强度,可以使用相同的设备进行更深井的钻井作业;能降低扭矩,进一步提高钻速、减少钻时、降低钻井成本。同时,由于钛合金钻杆弹性模量小,具有更好的耐腐蚀及抗侵蚀的能力,使其在短半径水平井作业中优势明显,在特殊工况钻井中具有良好的适应性。

近年来,宝钛股份不断推动石油钻采领域产品和技术研发,联合中石油工程材料院等单位,以超深钻井用钛合金钻杆研制为目标,研制了多种强度级别、多种典型规格系列钛合金超长钻杆管材。强度高达827 MPa,直径分别为88.9 mm和101.6 mm的两种钛合金钻杆分别在塔里木油田8 296 m和8 579 m两口超深井顺利完成首次下井试验,进一步验证了钛合金钻杆的可行性,推动了新材料新技术落地,为我国开发苛刻环境下万米超深能源井提供了技术保障。

摘自 <http://www.baoti.com/view.php?id=18221>