

TC2 钛合金板焊接接头残余应力分布及焊后热处理 应力松弛效应模拟

彭金波, 叶受智, 全琼蕊

(中国航发航空科技股份有限公司, 四川 成都 610506)

摘要: 利用 ABAQUS 软件对 TC2 钛合金薄板焊接接头的残余应力分布及焊后热处理过程中的应力松弛进行了模拟。首先基于 TC2 钛合金薄板焊接温度场模拟结果, 计算获得其焊后残余应力分布, 并通过残余应力实测值验证了模拟的合理性。其次通过试验标定 TC2 钛合金的蠕变模型参数, 以评估蠕变效应对焊后热处理过程中残余应力松弛的影响。结果表明, 焊接过程中焊缝区域温度迅速升高至 2679 °C, 形成准稳态温度场, 残余应力在焊缝附近达到峰值, 并随距离增加迅速衰减, Mises 应力峰值高达 847 MPa。焊后热处理时蠕变效应显著降低残余应力, 并改善了应力分布均匀性。随着保温时间延长, 高应力区蠕变变形持续, 使残余应力进一步松弛, 但蠕变速率递减使应力松弛趋于稳定。在试验温度 350 °C 下保温 1~2 h 残余应力松弛率高达 40%, 随后变化趋缓。因此, 延长保温时间对残余应力的松弛效果有限, 工程应用中应结合材料特性及经济成本合理控制保温时间。

关键词: TC2 钛合金板; 焊接接头; 焊接残余应力; 焊后热处理; 蠕变; 残余应力松弛

中图分类号: TG448.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2025)05-0300-09

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2025.05.047

Simulation of residual stress distribution and stress relaxation effect during post-weld heat treatment of TC2 titanium alloy plate welded joint

Peng Jinbo, Ye Shouzhi, Quan Qiongrui

(AECC Aero Science and Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610506, China)

Abstract: Residual stress distribution in TC2 titanium alloy thin plate welded joint and the stress relaxation effect during post-weld heat treatment were numerically simulated by using ABAQUS. Firstly, based on the simulation results of the welding temperature field of the TC2 titanium alloy thin plate, the residual stress distribution after welding was calculated, and the rationality of the simulation was verified through the measured residual stress values. Secondly, the creep model parameters of the TC2 titanium alloy were calibrated through tests to evaluate the creep effect on residual stress relaxation during post-weld heat treatment. The results indicate that during welding, the temperature in the weld zone rapidly rises to 2679 °C, forming a quasi-steady-state temperature field. The residual stress peaks near the weld and decreases sharply with increasing distance, with a maximum Mises stress of 847 MPa. During post-weld heat treatment, the creep effect significantly reduces residual stress and improves stress distribution uniformity. With holding time prolonging, creep deformation continues in high stress regions, leading to further residual stress relaxation. However, as the creep rate gradually decreases, stress relaxation stabilizes. At the test temperature of 350 °C, a holding time of 1-2 h results in a residual stress relaxation rate of up to 40%, after which the change slows down. Therefore, extending the holding time has a limited effect on residual stress relaxation, and in engineering applications, the holding time should be optimally controlled based on material characteristics and economic considerations.

Keywords: TC2 titanium alloy plate; welded joint; welding residual stress; post-weld heat treatment; creep; residual stress relaxation

TC2 钛合金因其低密度、高强度、优异的韧性及卓越的耐腐蚀性能, 展现出重要的工程价值, 被广泛应用于航空航天、机械制造和海洋工程等领域^[1-2]。然而, 在其薄壁结构的焊接过程中, 局部区域经历快速加热

与冷却, 导致焊缝区域产生非均匀热循环, 从而形成较高的残余应力和残余变形^[3], 可能影响结构的制造精度和服役安全性。因此, 研究焊接接头残余应力的分布特征及其演变规律对于提高工程结构的可靠性和延

收稿日期: 2025-03-04

修订日期: 2025-03-26

作者简介: 彭金波(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为材料力学性能分析, E-mail: Jinbo_peng@163.com

引文格式: 彭金波, 叶受智, 全琼蕊. TC2 钛合金板焊接接头残余应力分布及焊后热处理应力松弛效应模拟[J]. 金属热处理, 2025, 50(5): 300-308.

Peng Jinbo, Ye Shouzhi, Quan Qiongrui. Simulation of residual stress distribution and stress relaxation effect during post-weld heat treatment of TC2 titanium alloy plate welded joint [J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(5): 300-308.

长服役寿命具有重要意义。

近年来,试验测试与有限元模拟已成为钛合金焊接残余应力研究的主要方法。李菊等^[4]采用轮廓法测量 TC17 钛合金线性摩擦焊接头的残余应力,揭示了焊接振动方向与顶锻方向的应力差异。付鹏飞等^[5]利用 X 射线衍射技术研究了电子束局部热处理对 TC4 钛合金焊接接头残余应力的影响,揭示了热处理后的应力变化规律。何小东等^[6]采用钻孔法分析了激光焊和钨极氩弧焊对钛合金薄板残余应力的影响,并探讨了不同焊接方法及焊接线能量对应力分布的作用机制。张建勋等^[7]结合试验与有限元模拟,对钛合金薄板激光焊接残余应力进行深入分析,明确了焊接工艺参数对残余应力的影响规律。此外,陈梅峰等^[8]研究了板宽对 TC4 钛合金薄板焊接残余应力及变形的影响,邴羽等^[9]则提出了考虑固态相变的钛合金焊接残余应力数值仿真方法,并分析了温度与显微组织对 Ti-6Al-4V 焊接残余应力的作用机制。

焊接残余应力并非是恒定不变的,其在外部机械荷载和热荷载作用下会重新分布。喷丸强化、激光冲击处理、振动时效及焊后热处理等方法能够有效调控残余应力分布。例如,张洪伟等^[10]研究表明,喷丸强化显著影响 TC4 钛合金的残余应力场分布,陈彩红等^[11]进一步指出较高的喷丸覆盖率可能影响残余应力的热稳定性。激光冲击处理(LSP)方面,任旭东等^[12]发现 LSP 能有效提高钛合金表面残余压应力,并改善其疲劳性能。振动时效^[13]及超声冲击处理^[14-15]等方法也在不同程度上改善了焊接接头的残余应力状态,并提升了力学性能。此外,余陈等^[16]研究表明,焊后热处理可降低 TC4 钛合金焊接接头的纵向与横向残余应力,并改善表面压应力。代艳霞^[17]通过局部热处理优化了 TC21 钛合金电子束焊接接头的残余应力分布,取得了良好的效果。

尽管已有大量研究揭示了钛合金焊接接头残余应力的分布特征,但针对 TC2 钛合金薄板的研究仍相对匮乏,尤其是在热处理过程中的演变规律尚缺乏系统的分析。本文以 3.5 mm 厚的 TC2 钛合金薄板为研究对象,开展焊接接头的制备、残余应力测试及蠕变模型参数试验标定,并基于 ABAQUS 软件对焊接与 350 °C 热处理过程进行了数值模拟分析。通过与焊后残余应力实测结果的对比,验证了模拟结果的合理性,并进一步分析了焊后温度场及残余应力场的分布特征,探讨了焊后热处理对残余应力演变的影响规律,旨在为 TC2 钛合金焊接接头的优化设计及服役性能提升提供理论依据。

1 残余应力测试方法

本研究制作了 TC2 钛合金薄板焊接试板,尺寸为 410 mm × 260 mm × 3.5 mm。采用气体保护电弧焊(GTAW)工艺完成正反两道焊接,每道焊保持相同的焊接方向。具体焊接参数为:电压 12 V,电流 100 A,焊接速度 40 cm/min,焊缝宽度约为 15 mm。焊接时试板处于自由状态,焊后在室温下自然冷却。

为研究试板焊接残余应力的分布特征,采用钻孔法进行了残余应力测试。测点垂直于焊缝中心线布置,间距为 10 mm,共设置 7 个测点。考虑到试板的对称性,仅测试了焊缝一侧的残余应力分布。测试过程中,先在试板表面粘贴应变花,以记录钻孔前后的应变变化。在每个测点应变花的中心位置钻直径 $\phi 1.5$ mm、深度 1.8 mm 的小孔,通过应变仪检测钻孔前后应变的变化,再利用弹性力学原理计算钻孔区域内的原始残余应力分布。

焊接残余应力可分解为 3 个方向:沿焊缝方向的纵向残余应力、垂直于焊缝方向的横向残余应力,以及沿板厚方向的竖向残余应力。由于 TC2 钛合金板较薄,厚度方向约束较小,致使竖向残余应力通常较小且对结构性能影响较弱,因此在分析中不予考虑。通过钻孔法测得的残余应力为平面应力状态的纵、横向残余应力,能保证对焊接应力场分布规律的研究。

2 残余应力模拟方案

2.1 有限元模型及模拟过程

在 ABAQUS 软件中,建立了 TC2 钛合金薄板焊接试件的有限元模型(见图 1)。为有效捕捉焊缝及其周围区域的残余应力梯度,同时提高计算效率并减少计算成本,模型中焊缝及邻近区域采用了 1.5 mm 的密集网格,远离焊缝的区域则逐步过渡至 6.5 mm 的稀疏网格。焊缝及其周围区域沿焊接方向划分为 128 个网格,厚度方向划分为 8 层网格;而远离焊缝的区域则采用较为稀疏的网格,厚度方向仅划分为 2 层网格。

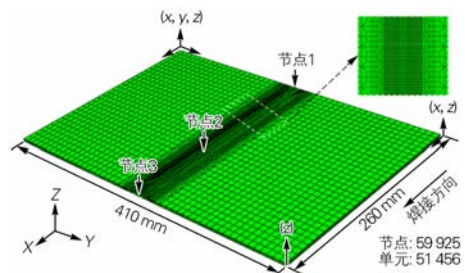


图1 TC2 钛合金薄板焊接接头有限元计算模型
Fig. 1 Finite element model of TC2 titanium alloy thin plate welded joint

焊接过程仿真模拟基于热弹性有限元法,采用单向热-力耦合分析。首先,模拟焊接过程中的温度场,得到温度分布后,将其作为初始条件导入模型,进一步计算焊接应力场。温度场的模拟使用具备传热能力的 DC3D8 单元,并设定环境温度为 20 ℃,通过表面热交换和辐射进行热传递。应力场模拟采用 C3D8 单元,并在试板的 3 个角点施加静定约束,以限制刚体位移。具体约束条件如图 1 所示。

焊后热处理模拟与焊接过程相似,温度场和应力场均采用一致类型的单元。设定热处理温度为 350 ℃。热处理过程中,温度场模拟综合考虑了加热速率、保温时间及冷却速率,并通过施加温度边界条件精确控制温度分布。同时,将焊接过程中形成的残余应力场作为初始应力条件输入,以计算热处理过程中的应力演变规律。

2.2 焊接热源模型及材料参数

为了准确模拟 TC2 钛合金薄板焊接过程中的热源移动,采用了 Goldak 双椭球热源模型(见图 2)。该模型通过前半部和后半部热源的数学表达式来描述热源分布,具体公式为:

$$q_1(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{ma_1bc\sqrt{\pi}} \times \exp\left(-3\frac{x^2}{a_1^2}\right) \times \exp\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right) \times \exp\left(-3\frac{z^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

$$q_2(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{ma_2bc\sqrt{\pi}} \times \exp\left(-3\frac{x^2}{a_2^2}\right) \times \exp\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right) \times \exp\left(-3\frac{z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

式中: f_1 和 f_2 分别为前后椭球的分布系数, $f_1 = 0.6$ 和 $f_2 = 1.4$; $Q = \eta UI = 1080 \text{ J/s}$, η 为热效率,取 0.9, U 为焊接电压,取 12 V, I 为焊接电流,取 100 A; Q 为热量; a_1 、 a_2 、 b 、 c 分别为双椭球热源形状参数,经过多次试算,确定了 Goldak 热源的几何形状参数如

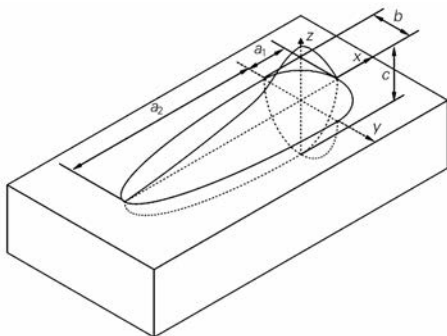


图2 Goldak 双椭球热源模型

Fig. 2 Model of Goldak double ellipsoid heat source

表 1 所示。

表 1 Goldak 双椭球热源形状参数
Table 1 Shape parameters of Goldak double ellipsoid heat source

形状参数	a_1	a_2	b	c
数值/mm	3	12	12.5	2.5

焊接过程涉及复杂的热-力学耦合,焊接温度场演化直接影响力场分布。因此,准确定义 TC2 钛合金的热物理和热力学性能参数至关重要,本次模拟基于相关文献和规范^[18-19],确定了 TC2 钛合金的材料参数和热物性参数(见图 3(a,b)),包括导热系数、密度和比热容,决定了材料的热传导能力及温度响应。导热系数影响焊缝及母材的热扩散速率,比热容决定单位质量材料的温升幅度,这些参数直接关系到温度场的模拟精度,并为后续的热应力分析提供基础。热力学性能参数(见图 3(c,d))涵盖弹性模量、屈服强度、线膨胀系数和泊松比。弹性模量和泊松比决定材料的应力-应变关系,屈服强度影响高温下的塑性变形行为,而线膨胀系数则是焊接变形及残余应力形成的关键因素。

2.3 热处理过程中蠕变参数

焊后热处理是消除残余应力的一种常用方法,其基本原理是通过加热使材料在高温下发生软化,进而发生塑性变形和蠕变流动,从而促进残余应力的松弛^[20]。TC2 钛合金的典型服役温度为 350 ℃,因此,为了评估高温蠕变对残余应力衰减的影响,本研究在 350 ℃下进行了不同应力条件下的高温蠕变试验,分别施加 100、200、300、400、450 和 500 MPa 的恒定应力。基于试验数据,采用 Norton-Bailey 蠕变模型(见式(3))对蠕变性能参数进行了标定,以支持焊后热处理过程的数值模拟。

$$\varepsilon_{cr} = A\sigma^n t^m \quad (3)$$

式中: ε_{cr} 为蠕变应变; σ 为应力; t 为时间; A 、 m 、 n 为待标定常数。

在蠕变试验过程中,首先将哑铃状试样加热至目标温度 350 ℃,并保持 1 h 以确保热平衡。随后施加恒定载荷,持续加载 20 h,试验过程中每 30 s 记录一次蠕变应变数据。图 4 展示了实测蠕变曲线与 Norton-Bailey 蠕变模型预测曲线的对比,结果表明二者吻合较好,且蠕变应变随着时间和应力的增加逐渐增大。标定得到蠕变模型参数见表 2,拟合精度 R^2 为 0.9625。基于该蠕变模型参数可进一步指导焊后热处理工艺优化,合理控制加热温度和保温时间,以最大化

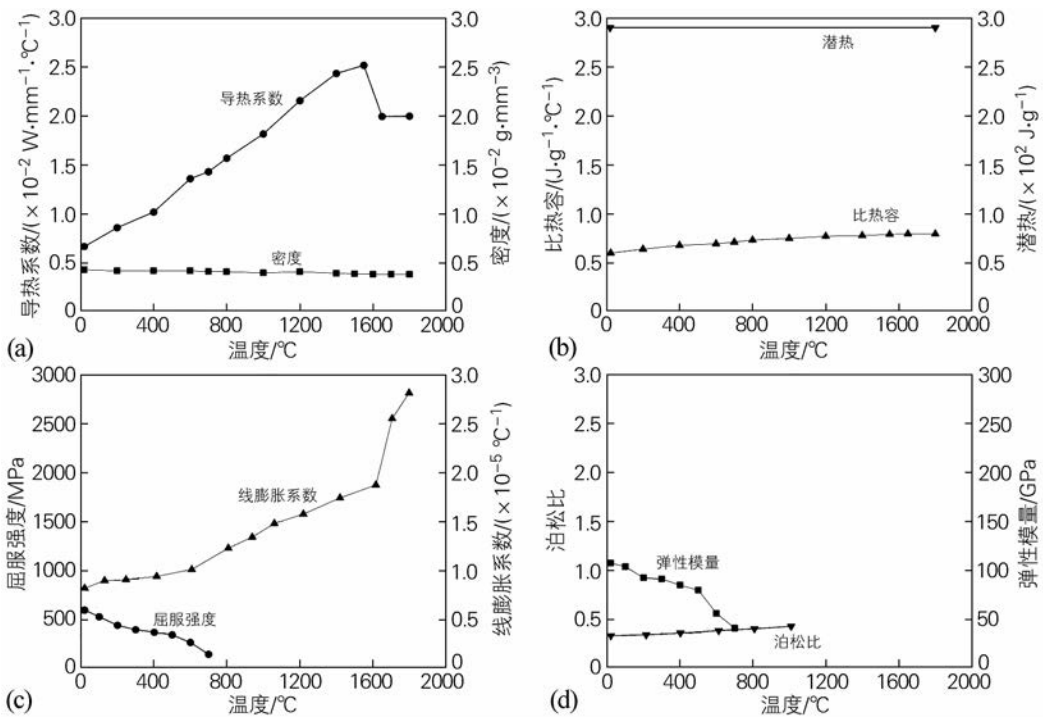


图 3 TC2 钛合金的热物性参数(a,b)及热力学性能参数(c,d)

Fig. 3 Thermophysical(a,b) and thermodynamic performance(c,d) parameters of the TC2 titanium alloy

蠕变效应对残余应力的衰减作用。

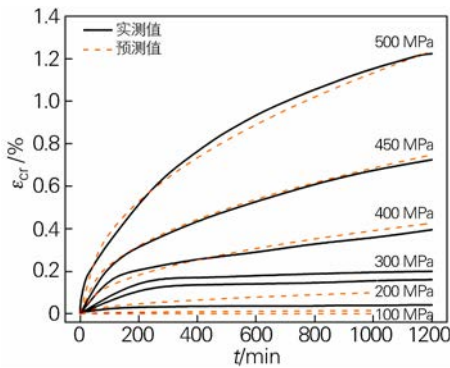


图 4 350 °C 不同载荷下 TC2 钛合金的蠕变曲线

Fig. 4 Creep curves of the TC2 titanium alloy at 350 °C with different stresses

表 2 Norton-Bailey 蠕变模型参数

Table 2 Parameters of the Norton-Bailey creep model

A	n	m	R ²
5.5877×10^{-15}	4.7741	0.4739	0.9625

3 模拟结果分析

3.1 焊接温度场

在温度场的模拟过程中,设定了 4 个分析步:加热、冷却、加热、冷却。每个加热步持续 104 s,第 1 个冷却步持续 300 s(用于保持焊道间的预热温度),第 2 个

冷却步则持续 18 000 s(使工件冷却至室温)。随着热源的移动,热源区域及其附近的温度梯度迅速增大,等温线呈现密集分布,而远离热源的区域温度变化较小,等温线则较为稀疏。在起弧阶段后,逐渐形成了随热源移动的准稳态焊接温度场。

图 5 显示了焊接 40 s 时的准稳态温度场。钛合金的熔点为 1500 ~ 1650 °C^[12],本文取 1600 °C 作为熔点。温度超过 1600 °C 的区域可视为熔池。从图 5 可见,热源区域的最高温度约为 2679 °C,熔池呈水滴状。随着热源的移动,高温区域及熔池逐渐向前推进,而远离焊缝的区域温度保持基本不变。焊接完成后,薄板通过表面热对流和热辐射与环境进行热交换,逐步冷却至室温。冷却结束后的温度场云图如图 6 所示。从图 6 可以看出,焊接完成后,TC2 钛合金接头趋于室

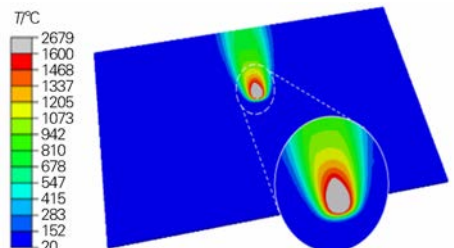


图 5 焊接 40 s 时 TC2 钛合金焊接接头的准稳态温度场
Fig. 5 Quasi steady state temperature field of the TC2 titanium alloy welded joint at 40 s during welding

温,温度梯度显著减小。

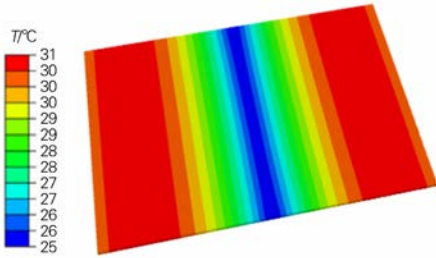


图6 焊接完成且冷却结束时 TC2 钛合金焊接接头的温度场 ($t = 18\ 508\ \text{s}$)

Fig. 6 Temperature field of the TC2 titanium alloy welded joint at the end of welding and cooling ($t = 18\ 508\ \text{s}$)

为进一步分析焊接过程中温度变化的规律,选取焊缝起点、中点和终点 3 个典型节点(见图 1),分别定义为节点 1、2 和 3,并绘制他们在前 2000 s 内的温度随时间变化曲线(见图 7)。结果表明,3 个节点的温度演化趋势相似:首先温度迅速升高至峰值,然后下降;在 400 s 后,温度再次快速升高至第 2 个峰值,之后逐渐下降直至恢复至室温。具体来看,节点 3 的最高温度达到 2547 °C,高于节点 1 (2051 °C) 和节点 2 (2505 °C),且节点 3 的峰值温度出现时间稍晚于节点 1 和节点 2。这一现象可以归因于热传导的时效性,导致各节点经历了不同的热历史。由于节点 3 受热时间较长,因此其最终峰值温度高于其他两个节点。

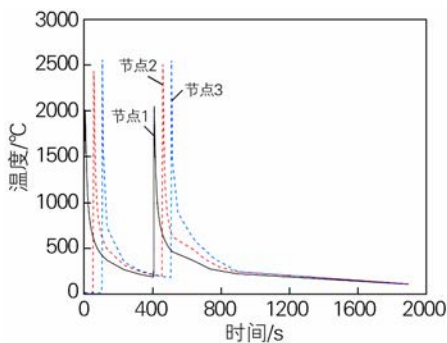


图7 TC2 钛合金焊接接头典型节点时间历程曲线
Fig. 7 Typical node time history curves of the TC2 titanium alloy welded joint

3.2 焊接残余应力场

基于 TC2 钛合金薄板焊接温度场计算结果,将其作为初始条件导入模型,计算获得其焊后残余应力分布。为验证数值模拟的准确性,垂直于试板中间位置提取残余应力模拟值,并将残余应力模拟结果与实测数据进行了对比(见图 8)。图 8 中的残余应力实测值以焊缝中线为对称轴进行镜像处理。结果表明,纵、横向残余应力模拟值与实测值在具体数值和整体分布上

吻合较好,验证了模拟结果的合理性。

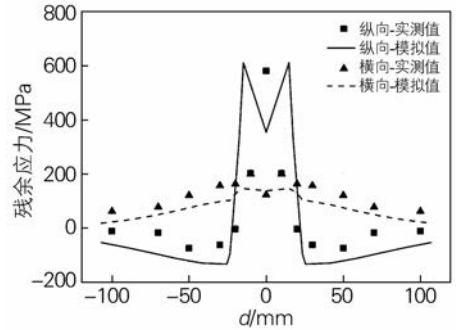


图8 TC2 钛合金焊接接头残余应力模拟值与实测值对比
Fig. 8 Comparison between simulated and measured values of residual stress of the TC2 titanium alloy welded joint

具体来看,纵向残余应力实测峰值为 580 MPa,位于焊缝中心线;模拟峰值为 611 MPa,出现在距焊缝中心约 15 mm 处,超过钛合金的常温屈服强度。实测谷值为 -74 MPa,模拟谷值为 -133 MPa。纵向残余拉应力在焊缝附近达到峰值,随着距焊缝中心的距离增加,其迅速下降,并在 20 mm 外逐渐转为压应力,最终趋于稳定。横向残余应力实测峰值为 200 MPa,位于距焊缝中心线 10 mm 处;模拟峰值为 146 MPa,出现在距焊缝中心约 15 mm 处。横向残余应力实测谷值为 62 MPa,模拟谷值为 18 MPa。与纵向应力相比,横向应力幅度较小。横向残余应力峰值集中在焊缝附近,随着距焊缝中心距离增加,横向拉应力逐渐趋于零,应力分布趋于平缓。这一差异主要与焊接过程中热应力主方向及焊缝周围材料的弹塑性响应有关。

图 9 展示了 TC2 钛合金薄板焊接残余应力分布云图。从图 9 可以看出,纵向 (S11)、横向 (S22) 残余应力以及 Mises 应力均沿焊缝区呈对称分布,且在焊缝附近表现出显著的应力梯度。高拉应力区处于焊缝及其邻近区域,峰值出现在焊缝中心线两侧热影响区。随着距焊缝中心距离的增加,残余应力逐渐减小,纵、横向残余应力逐渐由残余拉应力转变为残余压应力, Mises 应力则是在远离焊缝的区域趋近于零。此外,纵向残余拉应力峰值为 733 MPa,横向残余拉应力峰值为 290 MPa,二者均出现在靠近熄弧一侧的热影响区。纵向残余压应力的最大值为 227 MPa,位于起弧段;横向残余压应力的最大值约为 760 MPa,出现在试板端部的熄弧段,导致这一现象的原因与焊接过程中热输入的时空分布及两端约束条件有关。Mises 应力峰值达到 847 MPa (超过了钛合金的屈服强度),出现在焊缝中心附近;高 Mises 应力区域可能成为潜在的裂纹萌生部位,尤其在疲劳载荷或腐蚀环境下,更需引起

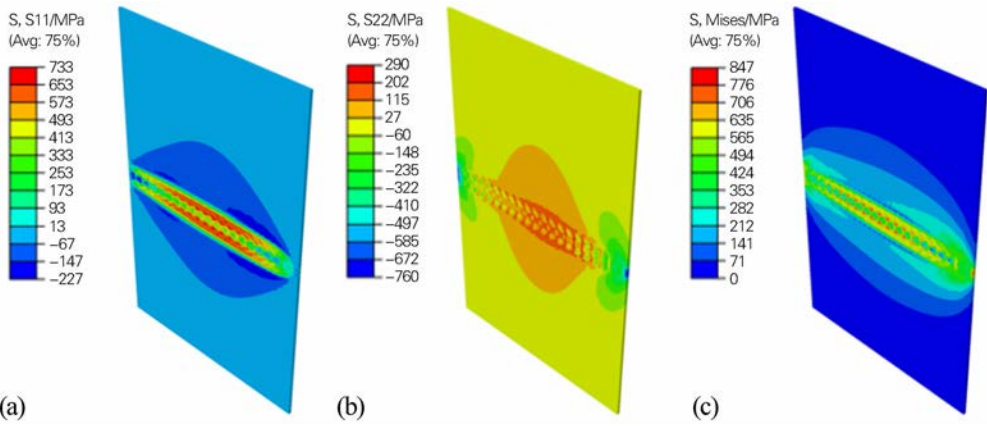


图 9 TC2 钛合金焊接接头残余应力分布云图

(a)纵向应力;(b)横向应力;(c)Mises 应力

Fig. 9 Residual stress contours of the TC2 titanium alloy welded joint

(a) longitudinal stress; (b) transversal stress; (c) Mises stress

关注。

3.3 热处理后残余应力场

焊后热处理包括加热、保温和冷却 3 个阶段,模拟过程中考虑了蠕变效应的影响,采用了标定的 Norton-Bailey 蠕变模型参数。对应热处理模拟过程参数设定为:以 60 °C/h 的速率从室温升至 350 °C,分别保温 0.5、1 和 2 h,随后以 50 °C/h 的速率随炉冷却至室温。

为评估焊后热处理对残余应力的影响,提取试件中部沿垂直于焊缝中线方向的残余应力分布(见图 10)。结果表明,在不同热处理保温时间下,残余应力保持着相似分布规律,仅在部分数值上出现变化;随着保温时间的延长,纵向残余应力峰值显著降低,焊缝区域的残余应力分布趋于均匀化。保温时间 0.5、1 和 2 h 时,纵向残余拉应力峰值分别从初始值 611 MPa 降至 490、449 和 439 MPa,相应的残余应力松弛率约为 20%、27% 和 28%。可见,纵向残余拉应力随着保温时间的增加而逐渐减小,并趋于稳定。与此同时,纵向残余压应力峰值在热处理过程中也出现一定程度的松弛,但幅度相对较小。这主要是由于初始残余压应力水平较低,使得塑性变形和蠕变效应较弱。然而,总体来看,纵向残余拉应力和压应力均随热处理保温时间的延长而降低。

横向残余应力与纵向残余应力类似,热处理能够在一定程度上降低峰值残余应力。然而,由于横向残余应力的数值相对较低,热处理对横向残余应力的松弛效果并不显著,主要表现在靠近焊缝中心线的峰值区域。具体而言,保温时间 0.5、1 和 2 h 时,横向峰值残余拉应力由 146 MPa 分别降低至在 136、130 和 129 MPa,相应的残余应力松弛率约为 7%、11% 和 12%。与此

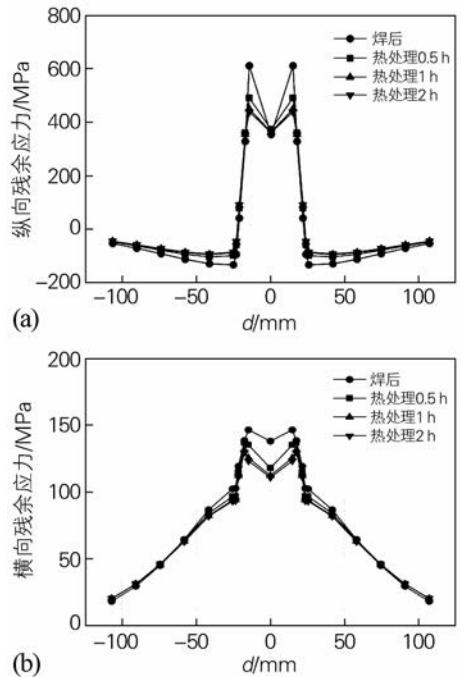


图 10 350 °C 热处理后 TC2 钛合金焊接接头的残余应力 (a)纵向应力;(b)横向应力

Fig. 10 Residual stress of the TC2 titanium alloy welded joint after heat treatment at 350 °C

(a) longitudinal stress; (b) transversal stress

同时,受应力重分布影响,热处理后峰值位置相较于焊后向远离焊缝中心线的方向偏移约 3 mm。而在远离焊缝中心线、残余应力值低于 100 MPa 的区域,热处理影响甚微。

上述演化规律表明,350 °C 热处理温度下,材料屈服强度下降,在残余应力作用下发生塑性变形和蠕变变形,从而导致残余应力松弛。随着保温时间增加,高应力区的蠕变变形持续进行,使残余应力峰值降低,并

促进应力分布均匀化。然而,随着时间延长,材料蠕变速率逐渐降低,导致残余应力松弛速率减缓并最终趋于稳定。这一趋势与 Norton-Bailey 蠕变模型的非线性递减特性相吻合,即蠕变应变增长速率随时间延长逐渐降低。

图 11 展示了热处理后试件纵、横向残余应力以及 Mises 应力的分布云图。随着热处理保温时间的增加,试件表面的焊接残余应力梯度逐渐减小,并趋于均匀化。对于纵向残余应力,当保温时间分别为 0.5、1 和 2 h 时,试件的峰值拉应力由焊后 733 MPa(见图 9(a))分

别降低至 528、483 和 472 MPa,相应的松弛率分别达到 28%、34% 和 36%;而峰值压应力由 227 MPa(见图 9(a))分别降至 213、200 和 196 MPa,松弛率分别达到了 6%、12% 和 14%。对于横向残余应力,峰值拉应力反而由焊后 290 MPa(见图 9(b))升高至 415、380 和 372 MPa,对应的“松弛率”分别为 -43%、-31% 和 -28%;峰值压应力则从焊后 760 MPa(见图 9(b))降至 479、438 和 428 MPa,松弛率分别为 37%、42% 和 44%。值得注意的是,热处理后横向残余拉应力峰值不降反增,这可能是由于纵向应力的松弛打破了原有

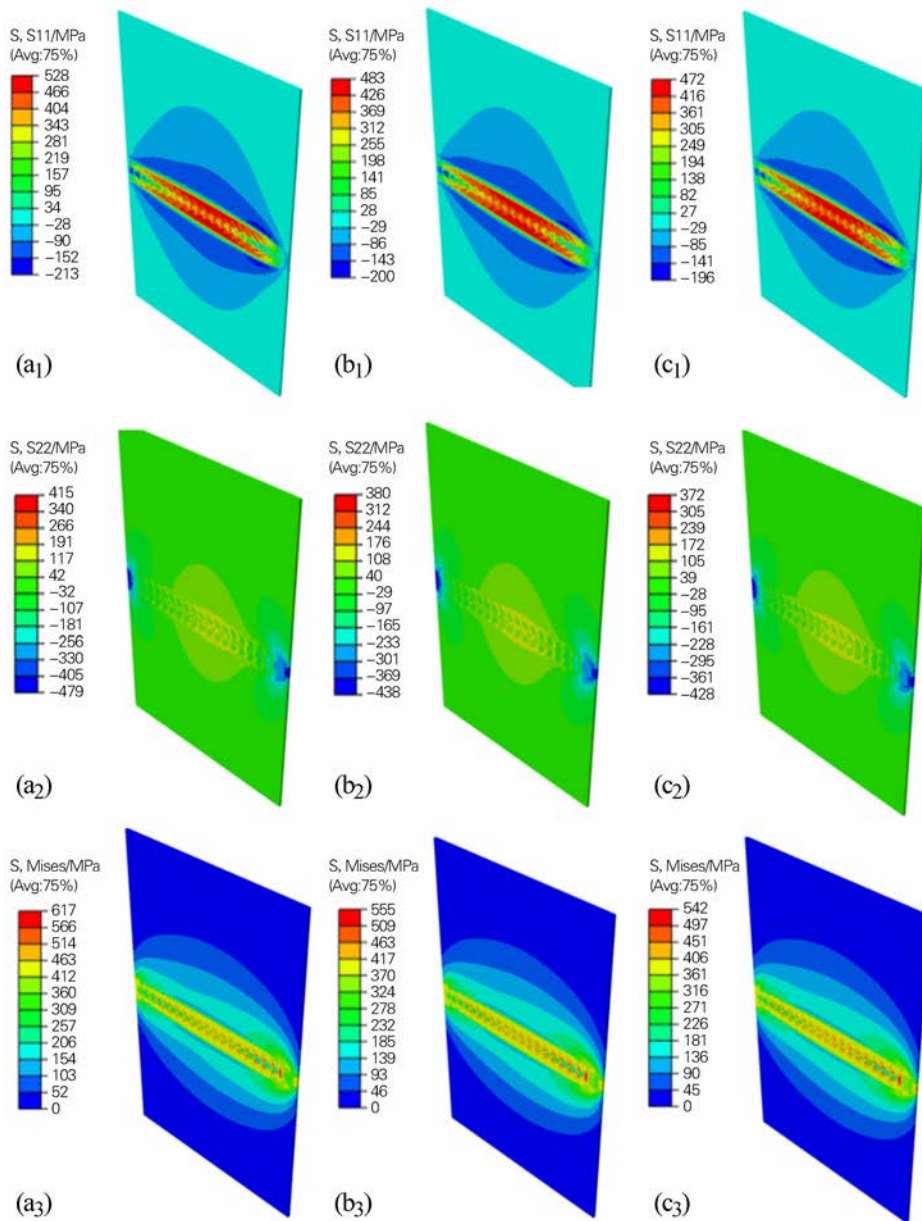


图 11 350 °C 热处理不同时间后 TC2 钛合金焊接接头的残余应力分布云图

(a) 0.5 h; (b) 1 h; (c) 2 h; (a₁~c₁) 纵向应力; (a₂~c₂) 横向应力; (a₃~c₃) Mises 应力

Fig. 11 Residual stress contours in the TC2 titanium alloy welded joint after heat treatment at 350 °C for different time

(a) 0.5 h; (b) 1 h; (c) 2 h; (a₁-c₁) longitudinal stress; (a₂-c₂) transversal stress; (a₃-c₃) Mises stress

的应力平衡,导致在应力重分布过程中横向残余应力增加。但从 Mises 应力云图来看,热处理后试件应力减小。

综合来看,焊后热处理能有效降低焊缝及周围区域的残余应力峰值,使应力分布更加均匀,但不会显著改变应力分布特征。然而,模拟结果表明,延长保温时间对残余应力的进一步松弛效果有限。在 1~2 h 的保温区间内,残余应力松弛率趋于平稳,表明蠕变效应对应力松弛的贡献已接近饱和。因此,在实际工程应用中,应综合考虑材料特性、焊缝几何形态及服役要求,优化热处理工艺参数,合理控制保温时间,以提高处理效率、降低能耗和经济成本,同时确保残余应力的有效降低。

4 结论

1) 焊接过程中,热传递具有显著的时间依赖性。随着热源移动,TC2 钛合金焊接接头焊缝区域温度迅速升高,形成准稳态温度场,焊缝中心温度峰值高达 2679 °C,熔池呈水滴状。远离焊缝区域的温度梯度较小。焊缝不同位置经历快速加热与冷却循环,熄弧段因较长时间的热输入而经历更高的峰值温度,最终冷却后趋于室温。

2) TC2 钛合金焊接接头残余应力数值模拟结果与实测数据吻合良好,验证了模拟方法的合理性。焊缝附近的残余应力达到峰值,并随距离增加迅速衰减,形成显著的应力梯度。纵向残余应力在焊缝区域呈对称分布,最大拉应力达 611 MPa, Mises 应力峰值高达 847 MPa,超过 TC2 钛合金的常温屈服强度,表明焊缝区域可能成为裂纹萌生的主要部位。相比之下,横向残余应力较低,分布相对平缓。

3) 焊后热处理能有效降低残余应力峰值,并改善应力分布均匀性。在保温时间为 0.5、1、2 h 下,随着保温时间的延长,纵向残余拉应力由 733 MPa 降至 528、483 和 472 MPa,对应的松弛率达 28%~36%;横向残余压应力峰值亦明显降低,松弛率达 37%~44%。然而,横向残余拉应力峰值略有上升,可能与纵向应力松弛引发的应力重分布有关。此外, Mises 应力整体降低,高应力集中区域减弱,从而降低裂纹萌生风险。

4) 蠕变效应在焊后热处理中起关键作用。加热至 350 °C 后,材料屈服强度降低,在残余应力作用下发生塑性变形和蠕变变形,促使应力松弛。随保温时间延长,高应力区蠕变持续发展,进一步降低残余应力峰值并优化应力分布。然而,随时间延长,蠕变速率递

减,导致松弛效应逐渐减弱并趋于稳定,这与 Norton-Bailey 蠕变模型相符。因此,延长保温时间对残余应力的松弛效果有限,在 1~2 h 保温区间内残余应力松弛率趋于平稳,工程应用中应结合材料特性及经济成本合理控制保温时间。

参考文献:

- [1] 彭 湃, 王庆娟, 李 辉, 等. 退火温度对 TC2 钛合金织构与冲压性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 72-75.
Peng Pai, Wang Qingjuan, Li Hui, et al. Effect of annealing temperature on texture and stamping property of TC2 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(1): 72-75.
- [2] 闫文萱, 邵洙浩, 李 伟, 等. 3 种钛合金富氧 α 层的生长规律[J]. 金属热处理, 2023, 48(11): 68-72.
Yan Wenxuan, Shao Zhuhao, Li Wei, et al. Growth law of oxygen-rich α layer of three titanium alloys [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(11): 68-72.
- [3] 强 斌, 谢云杰, 雷 电, 等. 钢桥塔中锚室焊接变形预测与工艺优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(2): 459-467.
Qiang Bin, Xie Yunjie, Lei Dian, et al. Welding deformation prediction and process optimization for the central anchor chamber in steel bridge tower [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55(2): 459-467.
- [4] 李 菊, 刘 川, 常川川, 等. TC17 钛合金线性摩擦焊接头内部残余应力测试分析[J]. 热加工工艺, 2024, 53(9): 34-38, 44.
Li Ju, Liu Chuan, Chang Chuanchuan, et al. Test and analysis on internal residual stress of linear friction welding joint of TC17 titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2024, 53(9): 34-38, 44.
- [5] 付鹏飞, 刘方军, 付 刚, 等. TC4 钛合金焊后电子束局部热处理及焊接残余应力测试研究[J]. 核技术, 2006, 29(2): 136-139.
Fu Pengfei, Liu Fangjun, Fu Gang, et al. Study of electron beam post-weld local heat treatment for TC4 titanium alloy and residual stress measurement of weld [J]. Nuclear Techniques, 2006, 29(2): 136-139.
- [6] 何小东, 张建勋, 巩水利, 等. 钛合金薄板激光和钨极氩弧焊残余应力测试研究[J]. 材料工程, 2003, 31(12): 7-10.
He Xiaodong, Zhang Jianjun, Gong Shuili, et al. Residual stress measurements with the hole-drilling technique in the joints by the laser and TIG welding for a thin plate of titanium alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2003, 31(12): 7-10.
- [7] 张建勋, 何小东, 段爱琴. 钛合金激光焊接残余应力试验与数值模拟[J]. 航空制造技术, 2004, 47(S1): 39-41.
Zhang Jianxun, He Xiaodong, Duan Aiqin. Investigations on welding residual stress in laser welding of a titanium alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(S1): 39-41.
- [8] 陈梅峰, 郭玉龙, 周广涛, 等. 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(7): 74-78.
Chen Meifeng, Guo Yulong, Zhou Guangtao, et al. Finite element

- simulation of laser welding deformation of TC4 titanium alloy thin sheet [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2019, 43(7): 74-78.
- [9] 郇羽, 万正权, 唐文勇. 考虑固相变的钛合金焊接残余应力数值仿真方法[J]. *船舶力学*, 2023, 27(1): 109-120.
Li Yu, Wan Zhengquan, Tang Wenyong. Numerical simulation method of welding residual stress of titanium alloy considering solid-state phase transformation [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(1): 109-120.
- [10] 张洪伟, 张家麟, 高师, 等. 喷丸残余应力对 TC4 钛合金疲劳寿命的影响及其松弛行为[J]. *中国表面工程*, 2024, 37(4): 171-178.
Zhang Hongwei, Zhang Jialin, Gao Shi, et al. Effect of shot-peening residual stress on fatigue life and relaxation of TC4 [J]. *China Surface Engineering*, 2024, 37(4): 171-178.
- [11] 陈彩红, 王欣, 周健, 等. 钛合金喷丸后的残余应力场与热松弛分析[J]. *金属热处理*, 2016, 41(6): 55-58.
Chen Caihong, Wang Xin, Zhou Jian, et al. Residual stress profile and thermal-relaxation of shot-peened titanium alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(6): 55-58.
- [12] 任旭东, 张永康, 周建忠, 等. 激光冲击钛合金表面退火后的残余应力分布[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(5): 165-167.
Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, et al. Study of annealing treatment on residual stresses of titanium alloy during LSP [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(5): 165-167.
- [13] 曲凤, 刘松良, 权纯逸, 等. 振动时效对 TA15 钛合金厚板残余应力及力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2015, 40(7): 180-182.
Qu Feng, Liu Songliang, Quan Chunyi, et al. Influence of vibratory stress relief on residual stress and mechanical properties of TA15 titanium alloy thick plate [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(7): 180-182.
- [14] 黄丽婷, 陈明和, 谢兰生, 等. 超声冲击载荷对 CP3 钛合金焊接接头残余应力的影响[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(1): 52-55.
Huang Liting, Chen Minghe, Xie Lansheng, et al. Influence of ultrasonic impact load on residual stresses distribution of welded joints for CP3 titanium alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(1): 52-55.
- [15] 尤逢海, 刘刚, 马杰, 等. 超声冲击对钛合金焊缝应力和组织的影响[J]. *金属热处理*, 2010, 35(10): 70-72.
You Fenghai, Liu Gang, Ma Jie, et al. Influence of ultrasonic impact treatment on welding beam stress and microstructure of titanium alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2010, 35(10): 70-72.
- [16] 余陈, 张宇鹏, 房卫萍, 等. 焊后热处理对 100 mm TC4 钛合金电子束焊接接头残余应力的影响[J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(7): 151-155.
Yu Chen, Zhang Yupeng, Fang Weiping, et al. Effect of post welding heat treatment on residual stress of 100 mm TC4 Ti-alloy welded joint by electron beam welding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2018, 39(7): 151-155.
- [17] 代艳霞. 局部热处理改善 TC21 钛合金板电子束焊接残余应力研究[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(15): 236-238.
Dai Yanxia. Investigation on improving electron beam welding residual stress of TC21 titanium alloy by zonal heat treatment [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(15): 236-238.
- [18] 海钦, 向俞, 刘明, 等. 中国工业材料大典—中卷[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999: 603-642.
- [19] 中国航空材料手册编辑委员会编. 航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 104-131.
- [20] Qiang Bin, Xie Yunjie, Xie Qiang, et al. Influence of post-weld heat treatment on welding residual stress in U-rib-to-deck joint [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 196: 111550.

“绿色热处理设备”评价

为落实《国务院关于加强建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》和《关于加快传统制造业转型升级的指导意见》[工信部联规〔2023〕258号]以及国务院关于印发《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》[国发〔2024〕7号]文件精神,推动热处理行业的绿色设计、绿色生产和绿色化转型升级,促进热处理设备制造企业发挥绿色制造的主体作用,建立企业“绿色制造”的管理理念,实现企业的绿色发展,同时为行业设备更新和选用低碳绿色热处理设备提供指导,全国热处理标准化技术委员会联合中国机械工程学会热处理分会对热处理设备制造企业开展“绿色热处理设备”评价。

“绿色热处理设备”评价按照 GB/T 38819《绿色热处理技术要求及评价》、JB/T 14765《热处理能耗限值及评价方法》等标准要求,综合评价热处理设备是否满足绿色设备的通用要求、专项指标要求和生产要求,对符合要求的企业颁发证书,有需求的企业可向全国热处理标准化技术委员会提出申请。

中国机械工程学会热处理分会及各地的热处理学会积极鼓励、帮助会员单位实施“绿色制造”,并向全国热处理标准化技术委员会推荐具有示范带头作用的会员单位优先进行“绿色热处理设备”评价。

联系人: 毕革平, 张甜, 李俏; E-mail: qgrclbwh@vip.sina.com; 联系电话: 010-82415082, 18910772187, 13810903682