

## 焊后热处理对塔机 K 型焊接节点疲劳寿命的影响

吴慧娟<sup>1</sup>, 孙菁笛<sup>1</sup>, 吕世宁<sup>1</sup>, 吴靖凯<sup>2</sup>, 高有山<sup>1</sup>, 王爱红<sup>1</sup>

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024;

2. 山西科技学院 智能制造工程学院, 山西 晋城 048011)

**摘要:** 为了评估残余应力及焊后热处理对塔式起重机疲劳寿命的影响程度,以塔机疲劳危险位置焊接节点为研究对象,建立了带有焊缝结构的 K 型焊接管节点模型,对其进行了基于生死单元法的焊接温度场、应力场模拟计算。研究了焊后热处理对焊接节点残余应力的影响。通过名义应力法对不同热处理工况下结构的疲劳寿命进行评估。结果表明,焊后热处理可以有效降低残余应力,残余应力下降速率随着热处理温度升高而降低。在考虑残余应力的情况下,结构疲劳寿命大幅下降,焊后热处理可在一定程度上提高结构的疲劳寿命。

**关键词:** K 型焊接管节点;残余应力;热处理;疲劳寿命预测

**中图分类号:** TG404 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2025)06-0242-07

**DOI:** 10.13251/j.issn.0254-6051.2025.06.037

## Effect of post weld heat treatment on fatigue life of K-welded joint in tower crane

Wu Huijuan<sup>1</sup>, Sun Jingdi<sup>1</sup>, Lü Shining<sup>1</sup>, Wu Jingkai<sup>2</sup>, Gao Youshan<sup>1</sup>, Wang Aihong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;

2. School of Intelligent Manufacturing Engineering, Shanxi Institute of Science and Technology, Jincheng Shanxi 048011, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effects of residual stress and post-welding heat treatment on the fatigue life of tower crane, a K-shaped welded pipe joint model with welded joint structure was established based on the welded joints at the fatigue-prone location of tower crane fatigue. The temperature field and stress field of the welded parts were simulated by the life-death element method. The effect of post-welding heat treatment on the residual stress of welded joints was studied. The fatigue life of structures under different heat treatment conditions was evaluated by nominal stress method. The results show that post-welding heat treatment can effectively reduce the residual stress, and the reduction rate of residual stress decreases with the increase of heat treatment temperature. Considering the residual stress, the fatigue life of the structure is obviously reduced, and the post-welding heat treatment can improve the fatigue life of the structure to a certain extent.

**Keywords:** K-shaped welded pipe nodes; residual stress; heat treatment; fatigue life prediction

塔式起重机是一种常见的建筑用起重机械,其桁架结构的主要连接方式为焊接连接。焊接是一种通过加热、加压使焊件结合的连接方式,其形成的焊接接头连接强度高,但焊接过程中产生的残余应力也会增加结构的应力水平,减少结构的寿命<sup>[1]</sup>。同时消除残余应力采用的焊后热处理也会对材料的组织性能产生较大的影响<sup>[2-5]</sup>。评估塔式起重机焊接位置的疲劳寿命可为塔式起重机疲劳寿命设计计算提供一定的理论基础,更加准确地对塔式起重机的疲劳寿命进行预测。

石红昌等<sup>[6]</sup>研究了焊后热处理及热处理工艺参数对平板对接接头残余应力的影响,结果表明焊后热处理可有效降低残余应力的峰值。马岩<sup>[7]</sup>通过 FE-SAFE 软件研究了塔机焊接节点处的疲劳寿命。张鹏飞等<sup>[8]</sup>使用热点应力法对 T 型接头焊接节点的疲劳寿命进行了评估。但其均未对研究对象进行去残余应力处理,也未考虑到去残余应力过程对于结构疲劳寿命的影响。

目前的塔式起重机疲劳寿命大多只考虑到了外部冲击载荷作用,忽略了焊接过程中产生的残余应力,也

收稿日期:2024-12-04

修订日期:2025-03-23

基金项目:山西省自然科学基金(20210302123217);山西省研究生科研创新项目(2023SJ257)

作者简介:吴慧娟(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为重型机械疲劳寿命评估与焊接残余应力的预测,E-mail:1505574903@qq.com。通信作者:高有山,教授,博士,E-mail:2003011@tyust.edu.cn

引文格式:吴慧娟,孙菁笛,吕世宁,等. 焊后热处理对塔机 K 型焊接节点疲劳寿命的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(6): 242-248.

Wu Huijuan, Sun Jingdi, Lü Shining, et al. Effect of post weld heat treatment on fatigue life of K-welded joint in tower crane[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(6): 242-248.

并未研究焊后热处理对塔机焊缝疲劳寿命的影响。本文以某一在役塔式起重机的焊接疲劳危险位置的焊接 K 型管节点作为研究对象,基于名义应力法对该部位的疲劳寿命进行了考虑残余应力及焊后热处理的评估。

## 1 模型建立

### 1.1 有限元模型建立

研究对象取自某一在役塔式起重机起重臂架跨中下弦杆与斜腹杆连接处焊接危险位置,该塔式起重机臂架下弦杆(角钢)尺寸为  $\angle 95 \text{ mm} \times 95 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ ,斜腹杆尺寸为  $\phi 40 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 。斜腹杆与下弦杆焊接相交形成 K 型焊接管节点,为简化计算,取下弦杆和斜腹杆长度的五分之一建立带有焊缝的实体模型。重点关注焊缝区的温度及应力情况,故将模型分为如图 1 所示的 3 部分:焊缝区、过渡区和边缘区。进行温度场分析时,边缘区与焊缝区使用三维热实体单元 Solid70,网格划分方式为映射网格划分,边缘区网格大小为  $7 \text{ mm}$ ,焊缝区网格加密处理,尺寸大约为  $1.6 \text{ mm}$ 。过渡区需要连接边缘区与焊缝区,使用三维热实体单元 Solid90,其网格划分方式采用自由网格划分,网

格大小为  $3 \text{ mm}$ 。进行应力场分析时,将热单元转换为相应的结构单元,即边缘区和焊缝区采用三维结构实体单元 Solid185,过渡区采用三维结构实体单元 Solid186,网格划分方式及大小保持不变。

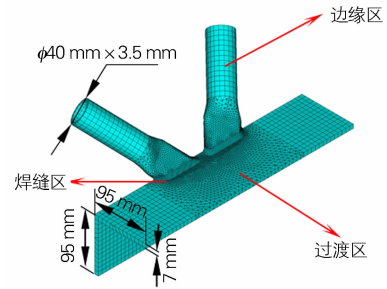


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

斜腹杆与下弦杆的材质为 Q355 钢,焊接采用 E5015 焊条,该焊条金属化学成分与 Q355 钢相近,故为简化模拟分析,可认为其热物理性能与 Q355 钢相同<sup>[9]</sup>。Q355 钢的热物理性能与力学性能如表 1 所示。在焊接分析计算过程中采用 BKIN(双线性随动强化)准则。

表 1 Q355 钢的热物理及力学性能参数

Table 1 Parameters of thermophysical and mechanical properties of the Q355 steel

温度/ $^{\circ}\text{C}$	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	热膨胀系数/ $\text{K}^{-1}$	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
20	206	345	0.28	7850	1.3	460	1
100	201	315	0.28	7850	1.3	500	45
500	147	265	0.28	7850	1.35	600	40
800	100	45	0.28	7850	1.35	710	30
1200	10	11	0.28	7850	1.4	710	37
1500	5	6	0.28	7850	1.4	720	42

### 1.2 焊接边界条件

温度场设置环境温度为  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,焊接过程中的换热采用综合空气对流系数  $M$  来考虑:

$$M = \begin{cases} 0.0668T & (0 \leq T < 500 \text{ }^{\circ}\text{C}) \\ 0.231T - 82.1 & (T \geq 500 \text{ }^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$  为焊接管节点表面温度。

应力场模拟计算时,下弦杆一端按照固定端进行约束,另一端仅允许轴向位移。斜腹杆对其环向与径向的位移进行约束,允许其轴向的位移。

## 2 焊接过程及热处理模拟分析

### 2.1 焊接温度场模拟

在真实的焊接过程中,焊缝区域随着热源的移动

而逐步填充,利用生死单元技术可实现上述过程的模拟仿真。设置环境温度为室温  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,焊接热源以体生热率模型施加,其热源函数为:

$$H = \frac{K \cdot U \cdot I}{A \cdot V \cdot \Delta t} \quad (2)$$

式中: $K$  为焊接热源效率,其值为  $0.5$ ;  $U$  为焊接电压,其值为  $220 \text{ V}$ ;  $I$  为焊接电流,其值为  $25 \text{ A}$ ;  $A$  为焊缝横截面积,其值为  $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ;  $V$  为焊接速度,其值为  $0.01 \text{ m/s}$ ;  $\Delta t$  为焊接载荷步时长,其值为  $1 \text{ s}$ 。

图 2 为各时间点温度云图,每道焊缝焊接用时为  $54 \text{ s}$ ,第一道焊缝焊接结束冷却  $10 \text{ s}$  后,进行第二道焊缝焊接,整个焊接过程耗时  $118 \text{ s}$ 。热源呈彗星状分布,其最高温度均大于焊条熔点 ( $1450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),且热源随

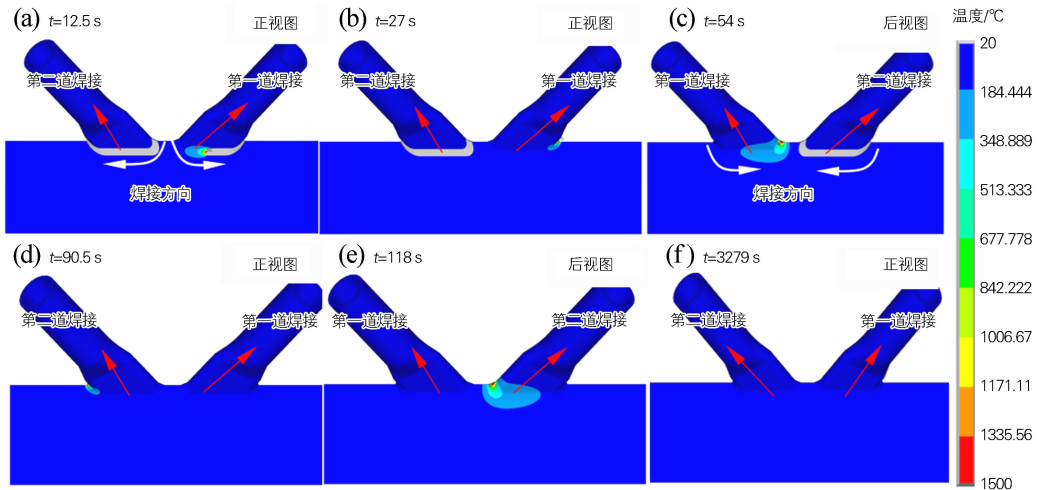


图 2 不同时刻焊件的温度云图

Fig. 2 Temperature cloud maps of the welded parts at different time points

着时间变化逐步向前移动,焊接结束后开始自然冷却,3279 s 时,焊缝的最高温度为 20.2 °C,可认为其已完成冷却,回到室温。

提取焊缝表面节点温度数据来进一步分析焊接时焊缝表面温度变化。由图 3 可以看出,当热源施加到节点上时,此处节点温度快速升高,超过材料熔点,此时焊条处于熔覆状态,热源离开后,节点温度快速下降,节点热循环曲线出现峰值。整个焊接过程完成后,温度降至室温。各个节点的焊接热循环曲线趋势基本相同。对于节点 1,该节点处于起焊位置,且焊缝为全周角焊缝,焊接结束位置与该节点极其靠近,故其受到焊接结束时热源的影响,产生两次峰值。节点 5 为第二道焊缝起焊位置,热源变化规律与节点 1 相同。

## 2.2 焊接应力场模拟

焊接过程中产生的应力可分为熔焊过程中的焊接热应力与焊接冷却结束后产生的残余应力。

图 4 为不同时刻焊件的应力云图,3279 s 时整个焊接过程结束,此时的应力分布即为焊接件最终的残余应力分布。可知,残余应力呈蝶型分布在焊缝处及焊缝周边热影响区域,其中焊缝处的残余应力值最大,为 425 MPa,超过了材料在常温下的屈服强度。通常认为 Q355 钢焊接残余应力不超过 355 MPa,但实际上 Q355 钢屈服强度大于 355 MPa,顾颖<sup>[10]</sup>和何志刚<sup>[11]</sup>利用有限元软件分析及实测得到的焊缝最大残余应力均超过了材料的屈服强度,分别为 422 MPa 和 475 MPa,戴国欣<sup>[12]</sup>及李国强<sup>[13]</sup>等所测定的 Q355 钢的屈服强度均大于 355 MPa,达到了 449.9 MPa 及 429 MPa。综上可认为该仿真结果具有一定的合理性。

提取焊缝上节点的应力数据来进一步研究其应力

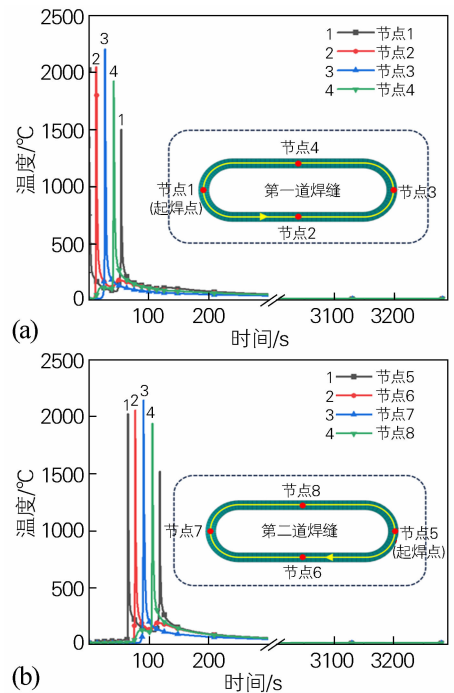


图 3 焊缝节点焊接热循环曲线

(a) 第一道焊缝; (b) 第二道焊缝

Fig. 3 Welding thermal cycle curves of the welded nodes

(a) the first weld; (b) the second weld

场变化规律如图 5 所示,所选节点位置可参照图 3。从图 5 可知,熔焊过程中随着热源的施加,焊缝区域及周边热影响区应力变化剧烈。对称位置节点变化趋势相似。热源加载到焊缝节点之前,焊缝节点不承受载荷;热源加载到焊缝节点上时,焊缝节点瞬时热应力接近于 0;焊接热源逐步离开后,焊缝区域开始冷却收缩,焊接热应力急速增加,经过一段时间的冷却之后,焊缝区域凝固,已凝固的焊缝区域焊接热应力趋于稳

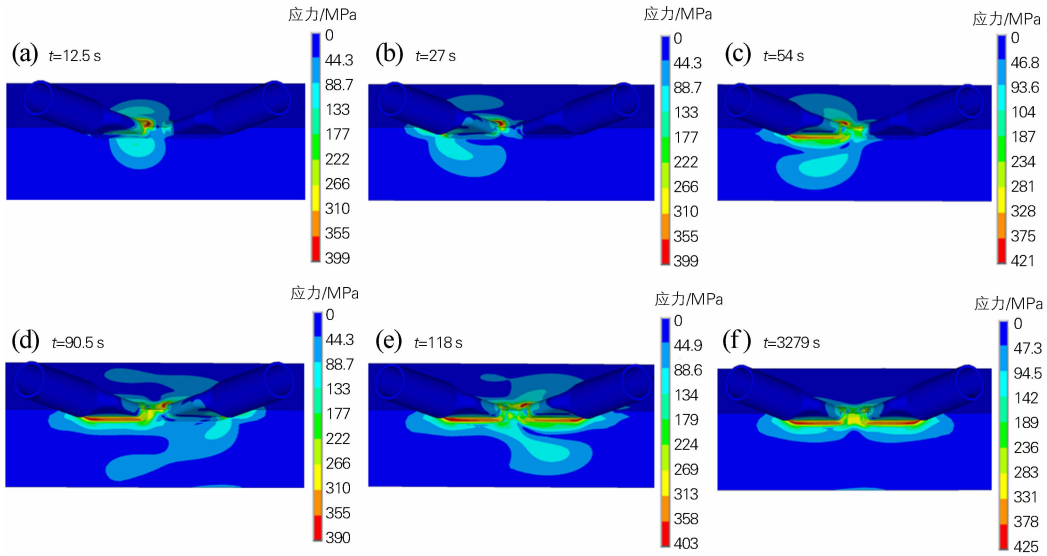


图 4 焊接过程中不同时刻焊件的应力云图

Fig. 4 Stress cloud maps of the welded parts at different time points during welding

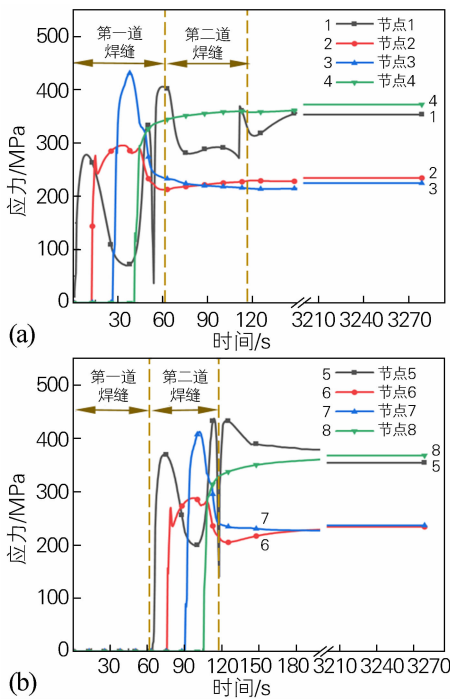


图 5 焊接过程中焊缝节点应力随时间变化曲线

(a) 第一道焊缝; (b) 第二道焊缝

Fig. 5 Stress variation curves of the welded nodes with time during welding

(a) the first weld; (b) the second weld

定,形成残余应力。对于节点 1 来讲,该节点位于第一道焊缝起焊位置,且靠近第二道焊缝起焊位置,其不仅受到第一道焊缝焊接结束热源的影响,也受到第二道焊缝起焊与焊终热源的影响,故其应力变化相较其他节点产生的波峰波谷较多。节点 5 位于第二道焊缝起焊位置,受到第二道焊缝焊接结束热源影响,于 118 s

即焊接结束时残余应力迅速降低并很快回升。

### 2.3 焊后热处理模拟分析

残余应力不仅会影响结构的强度,也会影响结构的刚度与受压杆件的稳定性。残余应力在焊缝处的集中使得焊缝部位极易产生裂纹,从而降低结构的使用寿命。消除残余应力对于延长结构的寿命具有重要意义。残余应力的消除方法有:整体热处理、局部热处理、机械拉伸法及温差拉伸法。焊后热处理是较为常用的一种消残方法,其通过升温引起材料内部应力松弛而逐步释放残余应力。

为探究不同热处理温度对于残余应力释放的影响,本文选定 3 组热处理温度即 600、650、700 °C,对含有残余应力的焊接节点模型进行热处理数值模拟。图 6 为热处理温度循环曲线。

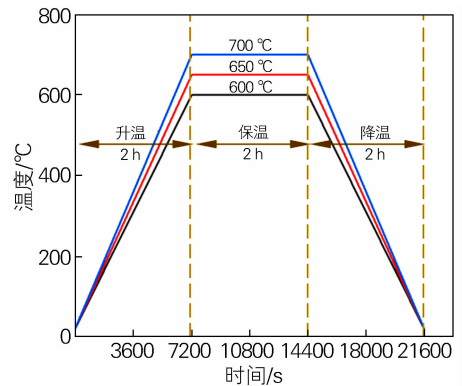


图 6 热处理温度循环曲线

Fig. 6 Heat treatment temperature cycle curves

热处理过程中材料升温,其塑性变形能力会增大,

残余应力随着塑性变形松弛而降低。同时,高温也会使得材料发生蠕变,屈服点降低,使得材料的残余应力发生松弛,从而降低。在焊后热处理过程中的蠕变效应遵循 Norton 模型<sup>[14]</sup>:

$$\varepsilon_{cr} = a_1 \sigma^{a_2} \exp\left(-\frac{a_3}{T_s}\right) \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_{cr}$ 为等效蠕变应变; $\sigma$ 为等效应力; $T_s$ 为温度; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 为蠕变参数,取值为 $a_1 = 4.09 \times 10^{-17}$ 、 $a_2 =$

2.1、 $a_3 = 10\ 660$ 。

热处理后的焊接管节点残余应力云图如图 7 所示,残余应力的分布形状基本不发生变化,其整体数值发生下降,600、650、700 °C 热处理后残余应力的峰值分别为 212、116、83.2 MPa,相较于未处理前分别降低了 213、309、341.8 MPa。随着热处理温度的升高,焊接管节点的残余应力呈现下降趋势,但随着温度的升高,残余应力的下降幅度会有所减缓。

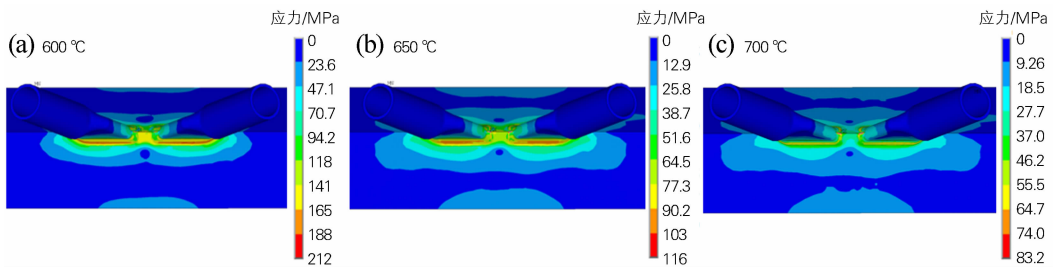


图 7 不同温度热处理后焊接件的残余应力云图

Fig. 7 Residual stress cloud maps of the welded parts heat treated at different temperatures

(a) 600 °C; (b) 650 °C; (c) 700 °C

为了进一步研究热处理过程中残余应力的变化情况,提取焊缝表面各节点的应力数据进行分析。图 8 展示了焊缝表面各节点的残余应力于 600 °C 热处理过程中的变化,所选节点的变化趋势基本相同。升温阶

段,由于材料升温导致其弹性模量与屈服强度降低,使得残余应力随时间匀速下降,由于蠕变效应的减弱,保温阶段残余应力虽呈现匀速降低趋势,但下降速率较升温阶段有所降低。在降温阶段,随着温度的逐步降低,材料的强度开始回升,残余应力略微有所升高,这是材料的微观应力状态随着冷却而固定引起的,但其值相较于未进行热处理前,仍然呈现降低趋势。

图 9 为不同温度下焊接环中心线上的残余应力分布曲线,定义焊接环起始节点 1、5 的角度为 0°,节点 2、6 的角度为 90°,节点 3、7 的角度为 180°,节点 4、8 的角度为 270°。从图 9 可知,两道焊缝中心线的残余应力沿焊接环的分布趋势基本相同,经过热处理之后,残余应力均有所降低,降低后的应力分布趋势仍与未热处理之前相似,热处理仅降低了焊缝区域的应力值,而未改变残余应力的分布。

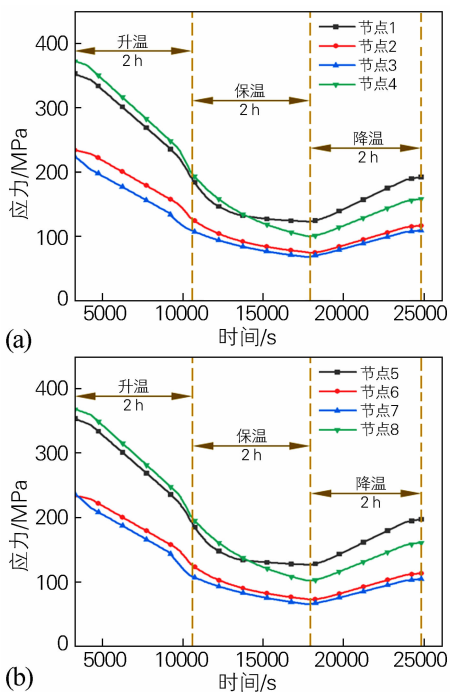


图 8 600 °C 热处理过程中不同焊接节点的残余应力变化曲线

(a) 第一道焊缝; (b) 第二道焊缝

Fig. 8 Residual stress variation curves of the different welded nodes during heat treating at 600 °C

(a) the first weld; (b) the second weld

### 3 基于名义应力法的疲劳寿命评估

#### 3.1 名义应力法

结构的疲劳是指结构在承受交变载荷的作用时产生裂纹的过程,结构的疲劳失效过程可以分为 3 个阶段,即裂纹萌生、裂纹扩展、裂纹失稳断裂(最终瞬断)。疲劳断裂是结构失效的主要原因之一。

名义应力法是基于 S-N 曲线与名义应力的一种使用较为广泛的疲劳寿命估算方法。其按照线性累积损伤理论对疲劳寿命进行评估。名义应力在计算时,不

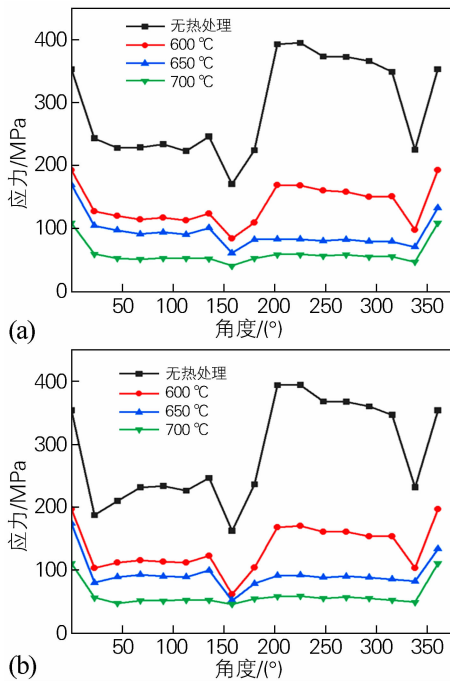


图 9 不同热处理温度下焊接环中心线上的残余应力分布  
(a) 第一道焊缝; (b) 第二道焊缝

Fig. 9 Residual stress distributions along the centerline of the welded ring heat treated at different temperatures  
(a) the first weld; (b) the second weld

考虑结构形状所导致的应力集中,只计算相关横截面上的应力。其不仅考虑到了载荷顺序的影响,也考虑到了焊接残余应力的影响。

在使用名义应力法对结构的疲劳寿命进行估算时,首先需要获得该结构的  $S-N$  曲线。工程中常用的  $S-N$  曲线表达式为:

$$S^m \cdot N = C \tag{4}$$

式中,  $C$  和  $m$  均为材料常数,对公式两边取对数得<sup>[15]</sup>:

$$m \cdot \lg S + \lg N = \lg C \tag{5}$$

此时,  $S-N$  曲线在对数坐标系中呈现直线状态。

为了更加准确的评估塔式起重机焊接节点的疲劳寿命,不仅要考虑 Q355 钢的材料性能,也需要考虑到塔式起重机的结构特点,对  $S-N$  曲线进行修正。给定寿命时,当寿命  $N = 10^3$  时,其疲劳缺口系数  $K_f = 1$ ,分散系数  $K_s = 1.3$ ,当寿命  $N = 2 \times 10^6$  时,  $K_f = 2.36$ ,  $K_s = 1.9$ <sup>[16]</sup>,将上述参数代入到公式(6)中,与公式(5)进行联立求解,得到材料常数  $m$  和  $\lg C$  的值,可得到塔式起重机 Q355 钢结构  $S-N$  曲线的高周疲劳区对数线性表达式为公式(7)。

$$S' = \frac{S}{K_f K_s} \tag{6}$$

$$\lg N = -3.82 \cdot \lg S + 12.84 \tag{7}$$

当塔机承受应力幅大于等于 47.5 MPa 时,塔机进入高周疲劳区(HCF);塔机承受应力幅低于 47.5 MPa 时,塔机进入亚疲劳区(SF)。对该  $S-N$  曲线进行进一步的修正,使得曲线中的亚疲劳区疲劳寿命是高周疲劳区疲劳寿命的 1.3 倍<sup>[16]</sup>,此时塔式起重机完整的  $S-N$  曲线表达式为:

$$\begin{cases} \lg N = -3.82 \cdot \lg S + 12.84 & (S \geq 47.5 \text{ MPa}) \\ \lg N = -4.97 \cdot \lg S + 16.69 & (S < 47.5 \text{ MPa}) \end{cases} \tag{8}$$

为进行下一步的疲劳寿命评估,将 2.1 及 2.2 节中得到的焊接管节点残余应力以初始应力场的方式加载到焊接管节点子模型上,并通过位移边界差值计算的方式,将每一步的冲击载荷施加到子模型边界,以此来得到子模型残余应力与冲击载荷的耦合应力场。

### 3.2 疲劳寿命估算结果

根据所监测的数据,该塔式起重机平均每天工作 75 次,一年工作 300 天,即该塔式起重机一年的工作循环次数为 22 500 次。计算所得的疲劳寿命如表 2 所示。考虑冲击载荷作用时,计算得到的疲劳寿命最高,为 17.91 年。不进行焊后热处理时,残余应力与冲击载荷耦合作用下焊接节点的疲劳寿命仅为 5.64 年。相较于仅考虑冲击载荷作用时,未消残的焊接节点疲劳寿命下降了 68.51%,600、650、700 °C 热处理后的焊接节点疲劳寿命分别下降了 38.02%、26.52%、20.71%。

表 2 不同应力场作用下的疲劳寿命  
Table 2 Fatigue life of components under different stress fields

外部载荷施加情况	初始应力施加情况	循环次数 $N / (\times 10^5)$	疲劳寿命/年
	不考虑残余应力	4.03	17.91
自重载荷 + 运行冲击载荷 + 风载荷	未进行消残处理的初始残余应力	1.27	5.64
	经过 600 °C 热处理后的残余应力	2.49	11.10
	经过 650 °C 热处理后的残余应力	2.96	13.16
	经过 700 °C 热处理后的残余应力	3.19	14.20

残余应力作用下的疲劳寿命相较于仅考虑冲击载荷作用时有显著降低,残余应力的存在会提升结构实际所承受的应力水平,此时在冲击载荷的作用下,更易使得结构达到疲劳极限,加快疲劳裂纹的萌生和扩展。而焊后热处理会在一定程度上降低残余应力,提高焊缝质量,从而增加结构的疲劳寿命。

## 4 结论

本文对塔式起重机疲劳危险位置焊接管节点进行

了焊接过程中的温度场及应力场模拟分析,研究了不同温度焊后热处理后残余应力的变化情况,并在此基础上对所研究对象进行了疲劳寿命评估,可得到如下结论:

1) 塔式起重机焊缝区域存在较强的残余应力集中现象,焊后热处理(600 ~ 700 °C)可有效消除残余应力。

2) 随着焊后热处理温度的升高,残余应力虽一直呈现降低趋势,但降幅却逐步降低。

3) 残余应力的存在会提升结构的应力水平,其更易达到疲劳极限,这使得结构的疲劳寿命降低。相较于只考虑冲击载荷的情况,在残余应力与冲击载荷的耦合应力场作用下的结构疲劳寿命降低了68.5%。

4) 焊后热处理可在一定程度上增加结构的疲劳寿命,焊后热温度升高,疲劳寿命也随之升高。但更高的热处理温度会增加能源的消耗以及材料和工艺成本,对于生产过程不一定经济。

#### 参考文献:

[1] Kollár D, Völgyi I, Joó A L. Assessment of residual stresses in welded T-joints using contour method [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 190: 110966.

[2] 王玉峰, 赵勇桃, 马洪浩, 等. 热处理对1Cr18Ni9Ti与2Cr13钢板焊接接头耐腐蚀性的影响[J]. *金属热处理*, 2021, 46(3): 7-11.  
Wang Yufeng, Zhao Yongtao, Ma Honghao, et al. Effect of heat treatment on corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti and 2Cr13 steel plate welded joint [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021, 46(3): 7-11.

[3] 张侠洲, 陈延清, 赵英建, 等. 热处理对极寒服役条件下弯管用X70钢焊接接头组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(10): 173-178.  
Zhang Xiazhou, Chen Yanqing, Zhao Yingjian, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of welded joint of X70 steel used for bent pipe under extremely cold service condition [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2022, 47(10): 173-178.

[4] 刘文明, 张新明, 程新路, 等. 焊后热处理对S30408/Q345R不锈钢复合板耐蚀性能的影响[J]. *金属热处理*, 2024, 49(1): 172-178.  
Liu Wenming, Zhang Xinming, Cheng Xinlu, et al. Effect of post-weld heat treatment on corrosion resistance of S30408/Q345R stainless steel clad plate [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2024, 49(1): 172-178.

[5] 赖春明, 李琴, 周家林, 等. 焊后热处理对热丝TIG焊接10Cr9Mo1VNb锅炉用钢组织性能的影响[J]. *金属热处理*, 2024, 49(9): 169-175.  
Lai Chunming, Li Qin, Zhou Jialin, et al. Effect of post weld heat treatment on microstructure and properties of hot wire TIG welded 10Cr9Mo1VNb boiler steel [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2024, 49(9): 169-175.

[6] 石红昌, 黄安明, 刘兴, 等. 焊后热处理对150 mm厚容器钢板

残余应力影响的数值模拟[J]. *金属热处理*, 2024, 49(5): 62-67.  
Shi Hongchang, Huang Anming, Liu Xing, et al. Numerical simulation on influence of post-weld heat treatment on residual stress in 150 mm thick vessel steel plate [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2024, 49(5): 62-67.

[7] 马岩. 基于等效结构应力法的塔式起重机焊接节点疲劳寿命研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.  
Ma Yan. Research on the fatigue life of welded joints-tower crane based on the equivalent structural stress method [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.

[8] 张鹏飞, 祝世纪, 田石柱. 基于热点应力法的钢箱梁隔板焊接节点疲劳性能研究[J]. *苏州科技大学学报(工程技术版)*, 2024, 37(1): 15-21.  
Zhang Pengfei, Zhu Shiji, Tian Shizhu. Research of fatigue performance of welded joints for steel box girder diaphragms based on hot spot stress method [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology Edition)*, 2024, 37(1): 15-21.

[9] 王留中, 罗伟, 王琛, 等. Q355钢管-管桁架结构焊接温度场及残余应力分析[J]. *材料科学与工程学报*, 2023, 41(3): 385-390.  
Wang Liuzhong, Luo Wei, Wang Chen, et al. Analysis of welding temperature field and residual stress of Q355 pipe truss structure [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2023, 41(3): 385-390.

[10] 顾颖. U肋加劲钢桥面板焊接残余应力与变形研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.  
Gu Ying. Research on welding residual stresses and distortions in steel bridge decks stiffened with U-shaped ribs [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[11] 何志刚. 正交异性钢桥面板焊接细节应力分析与疲劳特性[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.  
He Zhigang. Stress analysis and fatigue characteristics of welding details of orthotropic steel bridge deck [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.

[12] 戴国欣, 王飞, 施刚, 等. Q345与Q460结构钢材单调和循环加载性能比较[J]. *工业建筑*, 2012, 42(1): 13-17, 55.  
Dai Guoxin, Wang Fei, Shi Gang, et al. Comparison of monotonic and cyclic performances of structural steel Q345 and Q460 [J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(1): 13-17, 55.

[13] 李国强, 陈凯, 蒋首超, 等. 高温下Q345钢的材料性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2001(1): 53-55.

[14] 闫守海. 钢材高温蠕变性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015: 38-40.  
Yan Shouhai. Experimental study on creep behavior in steel at elevated temperature [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015: 38-40.

[15] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

[16] 王广广. 基于动态特性的塔机结构状态监控和寿命预测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
Wang Guangguang. Study on the monitoring and life prediction system of tower crane structure based on dynamic characteristics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.