

# 不同温度下焊接残余应力对含裂纹管道断裂行为的影响

何宗源<sup>1</sup>, 王芳<sup>2</sup>, 周江<sup>1</sup>, 李贺<sup>1</sup>, 林登科<sup>1</sup>, 丁明超<sup>3</sup>, 张朱武<sup>3</sup>

(1. 福建华电可门发电有限公司, 福州 350500; 2. 福建省锅炉压力容器检验研究院, 福州 350008;  
3. 福州大学, 福州 350108)

**摘要:** 【目的】文中旨在研究不同温度下焊接残余应力对含裂纹 P91 钢蒸汽管道断裂行为的影响机制, 通过数值模拟和试验验证, 评估焊接残余应力对管道完整性和安全运行的潜在威胁。【方法】通过 CT 试样试验验证了有限元模型的可靠性, 建立了 P91 钢蒸汽管道的含裂纹焊接模型, 并采用生死单元技术模拟焊接过程, 运用热传递模块计算焊接过程温度场, 通过热力耦合得出了焊接应力场的分布模式。【结果】焊接残余应力在焊接完成后沿焊缝中心对称分布, 沿轴向方向朝两端递减, 在管道厚度方向上, 从内层到外层呈现波浪状的增减的分布规律, 其中周向应力的数值最大。当管道中引入初始裂纹后, 裂纹尖端区域产生了明显的应力集中现象, 其中裂纹中心部分呈现拉应力, 而裂纹两端呈现压应力。远离裂纹尖端韧带部分, 焊接残余应力几乎不受裂纹引入的影响。随着温度的升高, 焊接残余应力逐渐降低, 并且不同温度下的焊接残余应力的分布规律保持相似。焊接残余应力显著降低了 P91 管道的启裂内压, 并且随着温度的升高, 降低比例逐渐增大, 在 800 °C 时, 焊接残余应力单独作用即可导致裂纹启裂。焊接残余应力对管道启裂过程中的应力分布具有重要影响, 沿管道厚度方向, 周向应力在裂纹尖端位置迅速上升, 并在一段距离达到最大值, 沿管道裂纹尖端方向, 裂纹中心附近应力均趋于稳定, 然后迅速下降, 在裂纹末端趋于平稳, 并且在较高温度时裂纹末端可能会转变为压应力。【结论】焊接残余应力降低了 P91 钢管道的启裂内压, 随着温度升高降低比例越大, 焊接残余应力促进了裂纹中心的启裂, 抑制了裂纹两端的启裂, 焊接残余应力还降低了启裂时裂尖所需应力, 增大了裂纹区域的应力梯度, 导致不同温度下裂纹区域的应力分布和启裂位置有所不同。

**关键词:** P91; 蒸汽管道; 焊接残余应力; 温度; 断裂行为

中图分类号: TG407 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20231223002](https://doi.org/10.12073/j.hj.20231223002)

## Effect of welding residual stress on fracture behavior of pipes with cracks at different temperatures

He Zongyuan<sup>1</sup>, Wang Fang<sup>2</sup>, Zhou Jiang<sup>1</sup>, Li He<sup>1</sup>, Lin Dengke<sup>1</sup>, Ding Mingchao<sup>3</sup>, Zhang Zhuwu<sup>3</sup>

(1. Fujian Huadian Kemen Power Generation Co., Ltd., Fuzhou 350500, China; 2. Fujian Boiler and Pressure Vessel Inspection Institute, Fuzhou 350008, China; 3. Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** [Objective] This work aims to investigate the influence mechanism of welding residual stresses on the fracture behavior of cracked P91 steel steam pipelines at different temperatures. Through numerical simulations and experimental verifications, the potential threats of welding residual stresses to pipeline integrity and safe operation are evaluated. [Methods] The reliability of the finite element model was validated through CT specimen tests. A cracked welded model of the P91 steel steam pipeline was established, and the welding process was simulated using the birth-and-death element technique. The heat transfer module was employed to calculate the temperature field during the welding process. The distribution model of welding stress field was obtained through the thermal mechanical coupling. [Results] After welding, welding residual stresses were symmetrically distributed along the weld center, decreasing towards both ends along the axial direction. In the

收稿日期: 2023-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51705077)

thickness direction of the pipeline, they initially increased from the inner layer to the outer layer, then decreased, and finally increased again, with the circumferential stress being the highest and the radial stress the lowest. Upon introducing an initial crack into the pipeline, significant stress concentration occurred at the crack tip region, where tensile stress was observed at the crack center and compressive stress at the crack ends. In the ligament area far from the crack tip, welding residual stresses were barely affected by the crack introduction. As the temperature rose, welding residual stresses gradually decreased, while their distribution patterns remained similar at different temperatures. Welding residual stresses significantly reduced the initiation internal pressure of the P91 pipeline, and the reduction ratio gradually increased with temperature. At 800 °C, welding residual stresses alone could lead to crack initiation. Welding residual stresses had a significant impact on the stress distribution during crack initiation in the pipeline. Along the thickness direction, the circumferential stress rapidly increased at the crack tip position, reaching a maximum value over a short distance. Along the crack tip direction, the stress near the crack center stabilized and then rapidly decreased, tending to stabilize at the crack end, which might transform into compressive stress at higher temperatures. **[Conclusion]** Welding residual stresses reduce the initiation internal pressure of P91 steel pipelines, with a larger reduction ratio at higher temperatures. They facilitate crack initiation at the crack center but inhibit it at the crack ends. Additionally, welding residual stresses decrease the stress required for crack tip initiation, increase the stress gradient in the crack area, and lead to different stress distributions and crack initiation locations in the crack area at various temperatures.

**Key words:** P91, steam pipeline, welding residual stress, temperature, fracture behavior

## 0 前言

火力发电是国内电力的主要来源之一,截止2021年国内火电机组占装机总量的46.7%,贡献了60%以上的发电量<sup>[1]</sup>,并且国内以火力发电为主的能源结构在相当长的时间内无法被改变。为了提高发电效率,火力发电机组越来越朝着高温高压的方向发展,这使得对锅炉蒸汽管道强度和韧度的要求更高。P91钢由于良好的耐高温性能、抗氧化性能、高温持久强度和高温抗蠕变性能,常被用作亚临界、超临界机组等火电厂主蒸汽管道材料<sup>[2]</sup>。蒸汽管道焊接过程,由于不均匀的温度变化必然会在焊接区域引入残余应力<sup>[3]</sup>,残余应力能够影响焊接区域的断裂特性、疲劳强度和形状尺寸精度等性能<sup>[4-6]</sup>。

蒸汽管道运行时,受焊接残余应力与内压的联合作用,焊接残余应力的存在会对结构的完整性构成威胁<sup>[4]</sup>,焊接残余应力作为内力预先是不可知的,这使得焊接残余应力对断裂性能的影响难以评估。由于P91钢良好的韧性,受载时裂纹尖端会产生较大面积的塑性应变,残余应力因此产生部分松弛,残余应力的作用不再是简单的线性叠加<sup>[7]</sup>,使得焊接残余应力对P91钢断裂性能的影响变得复杂。研究残余应力对P91钢断裂性能的影响对避免蒸汽管道断裂事故发生和安全运行有显著的现实意义。

Mahmoudi等人<sup>[8]</sup>利用机械预加载诱导残余应力的方法研究了残余拉应力和残余压应力对断裂性能

的影响,发现残余拉应力能够大幅度地降低断裂韧性,而残余压应力则能够提高断裂韧性。Wang等人<sup>[9]</sup>用中子衍射测量和弹塑性有限元分析相结合的方式定量分析了机械预加载引入的残余应力对加载情况下I型裂纹区域应力传递和断裂韧性的影响,发现局部拉伸残余应力不仅能降低了材料断裂韧性,还显著加速了CT试样沿裂纹传播方向的应力传递速度,而局部压缩残余应力的作用效果相反。在2种类型的残余应力中,残余拉应力降低了材料断裂性能,增大了材料失效风险,因此残余拉应力对断裂行为的影响亟待深入研究。

宋耀民等人<sup>[10]</sup>探究了天然气管道开裂的原因,发现焊接残余应力、工作应力和组装应力的叠加作用造成的局部高应力集中,从而引起管道的失效。Moshayedi等人<sup>[11]</sup>研究了焊接残余应力对内表面开裂管断裂行为的影响,发现相同断裂概率的情况下,残余应力有效降低了管道的断裂韧性。李铁萍等人<sup>[12]</sup>发现在含残余应力的管道中除了裂纹尺寸影响应力强度因子以外,径厚比 $R_0/t$ 也会影响应力强度因子,应力强度因子随着 $R_0/t$ 的增大而增大。刘维洋<sup>[13]</sup>通过有限元模拟的方法研究了焊接残余应力对压力管道断裂行为的研究,发现无论是表面裂纹还是穿透裂纹,裂纹尖端应力强度因子均由于残余应力的存在而增大,且随着裂纹长度和深度的增加,残余应力作用力逐渐减弱,残余应力还导致启裂压力大大下降。

国内外诸多学者对焊接残余应力对材料断裂行为的影响展开了研究<sup>[14]</sup>,但关于不同温度下焊接残余应力对材料断裂行为的影响研究还比较匮乏,鉴于P91钢广泛应用在高温高压下的工况,其焊接质量直接关系到整个蒸汽管道的安全性和可靠性。焊接过程产生的残余应力其分布规律及其对管道断裂行为的影响机制亟须深入研究,随着管道运行工况的变化,焊接残余应力的变化及其对裂纹扩展的促进作用或抑制作用变得尤为复杂。然而,焊接残余应力受温度影响显著,其在不同温度下的变化规律及其对管道断裂行为的具体影响机制尚未得到充分揭示。因此,文中以P91钢蒸汽管道为研究对象,利用有限元模拟的方法对不同温度下焊接残余应力对P91钢蒸汽管道断裂行为的影响展开研究。

## 1 有限元模型及试验验证

### 1.1 CT试样试验

参考标准GB/T 21143规定的试样形式和比例对测试试样进行设计,具体尺寸和比例如图1所示。试样采用直接从蒸汽管道中掏取的方式截取,试样采用中走丝切割机进行加工。蒸汽管道在实际运行中产生的裂纹是非常尖锐的,为了尽可能在试样中还还原真实裂纹,试样加工完成后需要使用疲劳试验机预制疲劳裂纹。预制疲劳裂纹时,采用载荷控制,正弦波加载,频率为30 Hz,载荷比为 $R=P_{min}/P_{max}=0.1$ 。为了便于观察疲劳裂纹的扩展情况,将试样表面打磨至光亮,加载同时采用放大镜观察。

为了在试样中引入稳定可重复的残余应力,采用面外局部压缩(LOPC)的方法对CT试样进行机械预

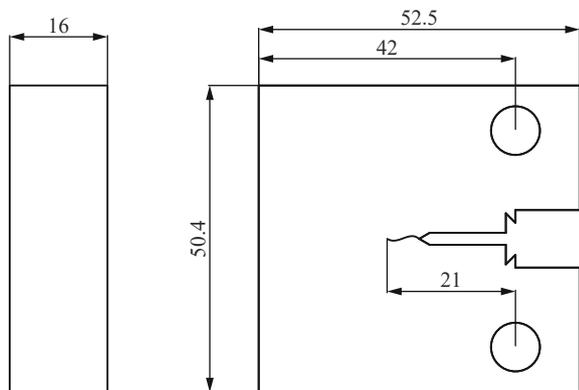


图1 CT试样尺寸示意图

Fig. 1 Diagram of CT sample size

加载。用定制的定位板固定冲头和试样的相对位置,装夹方式如图2所示,将定位板用螺栓固定在试样两侧,冲头置于定位板的加载孔内,为了避免在裂纹扩展韧带产生压痕,采用双面四冲头进行加载。冲头选用40CrNiMo钢,屈服强度为大于等于835 MPa,抗拉强度大于等于980 MPa。选择冲头直径 $r=7.5$  mm,加载孔相较裂纹尖端位置为 $x/r=1.0$ , $y/r=1.2$ 。为了减小表面摩擦,在冲头和试样表面涂上少量润滑油。

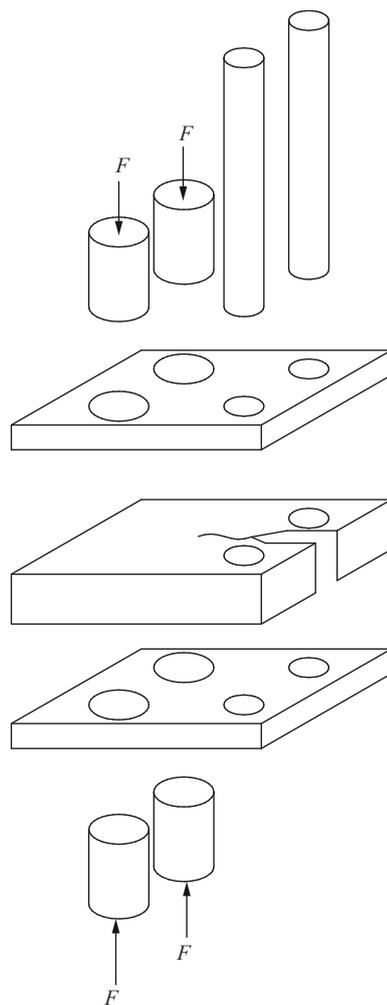


图2 面外局部外压缩装夹示意图

Fig. 2 External partial external compression clamping diagram

将装夹好的试样和冲头置于万能材料试验机中,施加适当预紧力以固定冲头和试样,采用控制位移的方式进行缓慢加载,加载速率为0.01 mm/s,分别加载到150 kN和175 kN以后停止加载。通过万能材料试验机进行准静态断裂拉伸测试,对载荷 $P$ 和引伸计张开位移 $V$ 的信号进行采集,绘制 $P-V$ 曲线,加

载过程通过控制位移的形式进行加载,加载速度为0.1 mm/s,为确保将试样拉裂,当引伸计位移拉开4 mm以后再停止加载。

图3为断裂拉伸前后试样对比照片,图中未拉伸的试样为制备好的初始试样,未压缩的试样为未进行冲头加载的试样,可以看出试样在拉力作用下明显塑性变形,缺口呈V形张开,裂纹尖端前小范围区域向内凹陷,疲劳裂纹尖端产生明显钝化。



图3 断裂拉伸前后试样形态对比

Fig. 3 Comparison of specimen morphology before and after fracture tensile

由试验机导出的载荷位移曲线如图4所示,可以看出有无残余应力的情况都显示出了明显的弹性阶段和强化阶段,残余应力的影响在弹性阶段最为明显,残余应力明显降低了弹性段曲线斜率,随着残余应力的增大弹性段曲线斜率逐渐降低,三条曲线在加载点位移为1 mm左右时相交,1 mm后三条曲线差异不大,但能明显看出较之前段呈现相反的趋势,更大的残余应力对应更大的拉伸载荷,在4 mm左右时,三条曲线又相交在一起。

试验结果汇总于表1,可以看出残余应力降低了试样的启裂载荷,增大了试样的启裂位移,随着残余应力的增加启裂载荷逐渐减小,启裂载荷位移逐渐增大。相较于无残余应力的试样,压缩载荷为150 kN和175 kN的试样的启裂载荷分别降低了2.3%和2.6%。

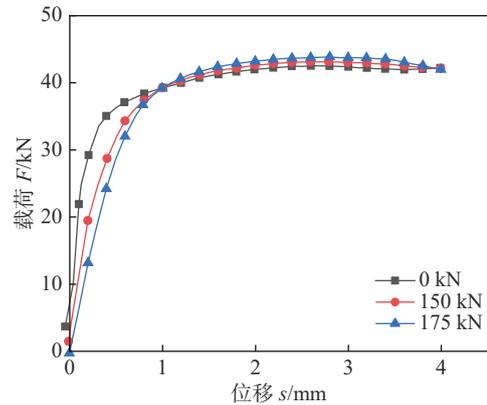


图4 断裂拉伸试验载荷位移曲线

Fig. 4 Fracture tensile test load displacement curve

表1 断裂拉伸试验数据及模拟结果对比

Tab. 1 Comparison of fracture tensile test data and simulation results

压缩载荷 $F/kN$	试验结果		模拟启裂载荷 $F_2/kN$	误差 $\delta(\%)$
	启裂载荷位移 $s/mm$	启裂载荷 $F_1/kN$		
0	0.67	37.56	33.42	11.02
150	0.75	36.71	32.64	11.08
175	0.79	36.58	32.15	12.11

## 1.2 CT 试样数值模拟

参照断裂拉伸试验的CT试样,建立尺寸一致的几何模型,初始裂纹长度为 $a/W=0.5$ ,为了便于后续划分网格,省去了缺口的建立,将重点关注的区域进行划分,并将试样模型划分为几个大小不一的部分,试样几何模型如图5所示。面外局部压缩的冲头采用离散刚体建立,置于CT试样上方,刚性冲头的半径为7.5 mm。由于模型具有对称性,为了节约计算成本,选择建立四分之一模型。

为了保证模拟的准确性,尽可能还原真实的试验条件,需要对试样的边界条件进行约束。分别在2个对称面上施加相应的对称约束,其中裂纹所在平面采用只在韧带部分设置对称约束,裂纹面不设置对称约束的形式模拟初始裂纹。局部外压缩时,设置刚体只在 $z$ 方向移动的位移约束,通过控制刚体在 $z$ 方向的运动位移实现加载和卸载的控制,给试样边缘的顶点施加一个固定约束防止试样滑动。断裂拉伸时,设置加载孔只能在 $y$ 方向移动,通过控制 $y$

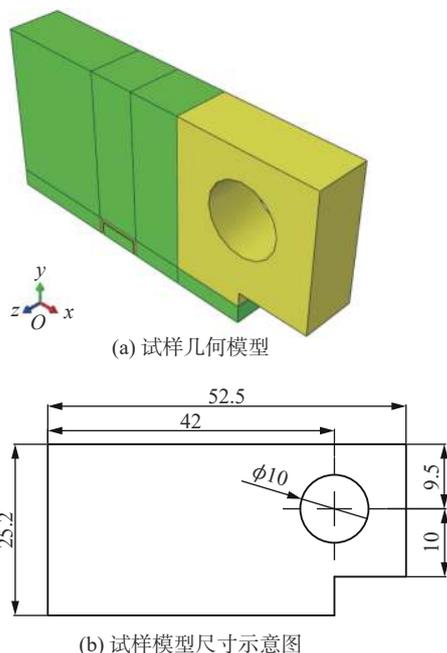


图5 试样有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the sample. (a) sample geometry model; (b) dimensional schematic model

方向位移进行加载,当裂纹前端等效应力达到断裂值时,解除对应位置的对称约束以此模拟裂纹的扩展。

为了验证有限元模型的正确性,设置与试验条件相同的模拟,采用与试验相同的数据处理形式,并将模拟结果和试验结果进行对比,结果见表1,试验和模拟所得启裂载荷误差约为10%,表明模拟结果真实可靠。

### 1.3 P91 蒸汽管道有限元模型

参考 P91 蒸汽管道实际尺寸及焊接工艺建立有限元计算模型,管段内径为 184 mm,厚度为 18 mm,由于管段的对称性,模拟过程采用 1/8 模型进行,为了消除载荷和边界约束对模拟计算的影响,管段长度大于  $2.5\sqrt{Rt}$  ( $R$  为管段名义半径;  $t$  为管段厚度),管道模拟的几何模型如图 6 所示。焊接形式为对接焊,坡口为双 V 形坡口,焊道分布及焊接顺序如图 7 所示,为 6 层 10 道焊。在焊接模拟的基础上进行断裂模拟,需要在管道环形对称面上引入初始裂纹,初始裂纹形状和位置如图 8 所示,初始裂纹为半椭圆形,位于焊缝中心。

如果热源直接施加在完整焊接区域,无法模拟焊接过程焊料的熔化和填充作用,显然不能反映真实

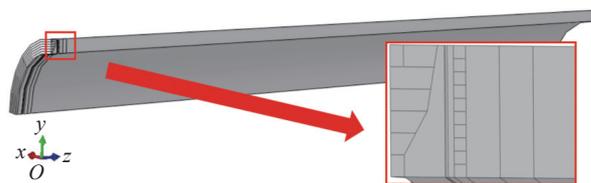


图6 管道模拟几何模型

Fig. 6 Pipeline simulation geometry model

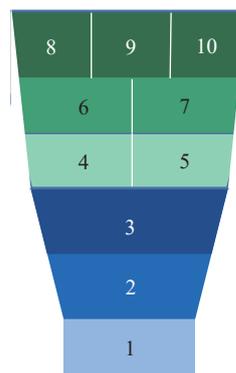


图7 焊道分布和焊接顺序示意图

Fig. 7 Weld bead distribution and welding sequence diagram

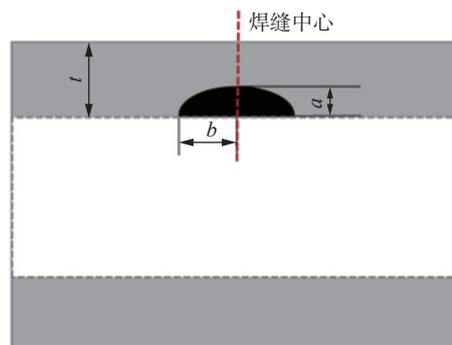


图8 初始裂纹形状和位置

Fig. 8 Initial crack shape and location

的焊接情形,为了更加贴近实际的焊接过程,采用生死单元技术模拟焊接过程中焊缝金属的填充作用,即在热源到达的同时向该区域加入填充金属。焊接开始前将焊缝区域的单元全部“杀死”,随着热源的移动逐渐激活相对应焊道的单元。

根据顺序耦合的分析思路进行焊接模拟,运用热传递模块计算焊接过程温度场,在得出焊接温度场分析结果之后运用静力通用模块进行焊接应力场的模拟。温度场计算时,在模型表面施加热对流与热辐射作为边界条件,将焊接前的管段各个位置的温度分布情况作为初始条件输入,假定管段在焊接前

的温度与环境温度相同且均匀分布,环境温度设为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。应力场计算时,首先在温度场分析所用模型的基础上将热传递分析步改为静力通用分析步,保持应力场每个分析步的时长和温度场分析一致,在初始条件设置中将温度场分析的结果导入应力场分析模型中,并设置各分析步从温度场分析结果中的读取的时间节点与温度场计算过程一一对应,并设置在和温度场相同的时间节点将单元格杀死和激活,仅在对称面施加相应对称约束,不施加其他约束。进行断裂模拟时,通过解除对应部位对称约束的形式引入初始裂纹,在管道内表面施加内压,并限制管道轴向方向位移。

在实际应用时,通常将关注区域选用致密的网格,无关区域选择较为稀疏的网格。文中关注的是焊接处的残余应力分布,因此将焊接区域的网格加密通过过渡网格逐渐放大其他区域的网格,划分结果如图9所示,最终划分了12 812个网格单元,模拟温度场时采用DC3D8网格,计算应力场时采用C3D8网格。

在有限元分析中,网格密度和计算结果精确性成正比,但是网格密度增大的同时也意味着计算量和计算成本的增加。因此需要进行网格无关性验证,在确保计算精度的同时,选择合适的网格尺寸和类型。网格无关性验证结果误差均不超过5%,能够较

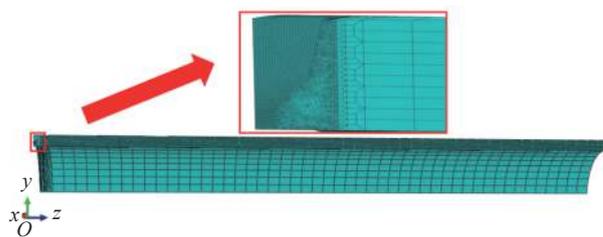


图9 网格划分结果

Fig. 9 Meshing result

好地消除网格依赖性。

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接残余应力分布情况

对P91八分之一管道进行焊接模拟时,为了还原真实焊接温度状态,每个分析步的时间按照完全尺寸设置,6层焊道焊接完成的时间分别为300 s, 300 s, 312 s, 320 s, 328 s, 340 s,随后进行3 000 s空冷,整个模拟过程耗时5 240 s。

刚完成焊接时,整个模型的温度由焊缝区向外逐渐减少,焊接区域温度约为 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,如图10(a)所示。冷却3 000 s以后,整个模型的温度都降低至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,与焊缝中心相同距离位置上的温度大致相同,远离焊缝位置的温度略有下降,但也近乎与室温一致,如图10(b)所示。

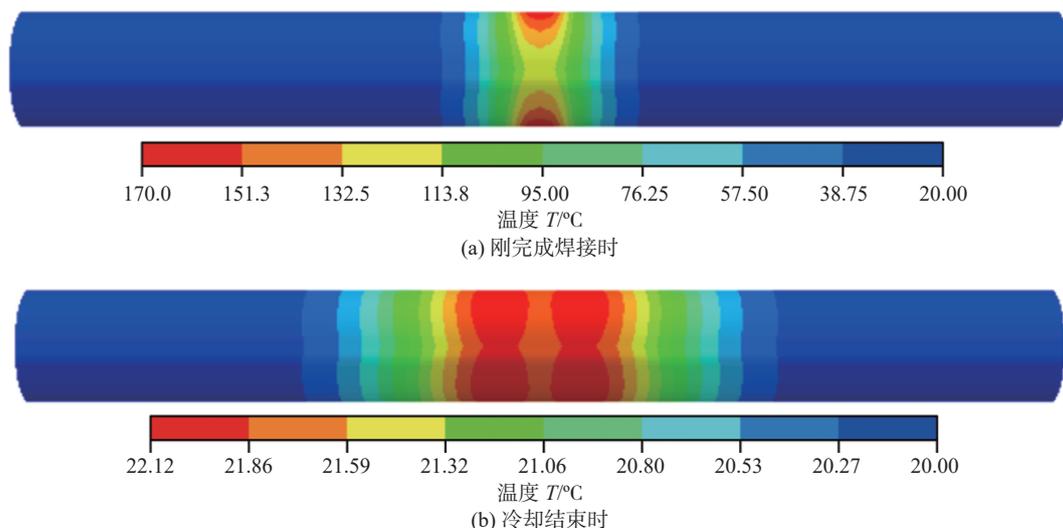


图10 焊接温度场云图

Fig. 10 Welding temperature field cloud image. (a) upon completion of welding; (b) at the conclusion of the cooling process

完成最外层焊接时,最大等效应力值约为688 MPa,如图11(a)所示。焊后冷却过程中最大等效应力值相

较之前有所下降,冷却至室温( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时最大焊接残余应力值约为528 MPa,如图11(b)所示。冷却完成

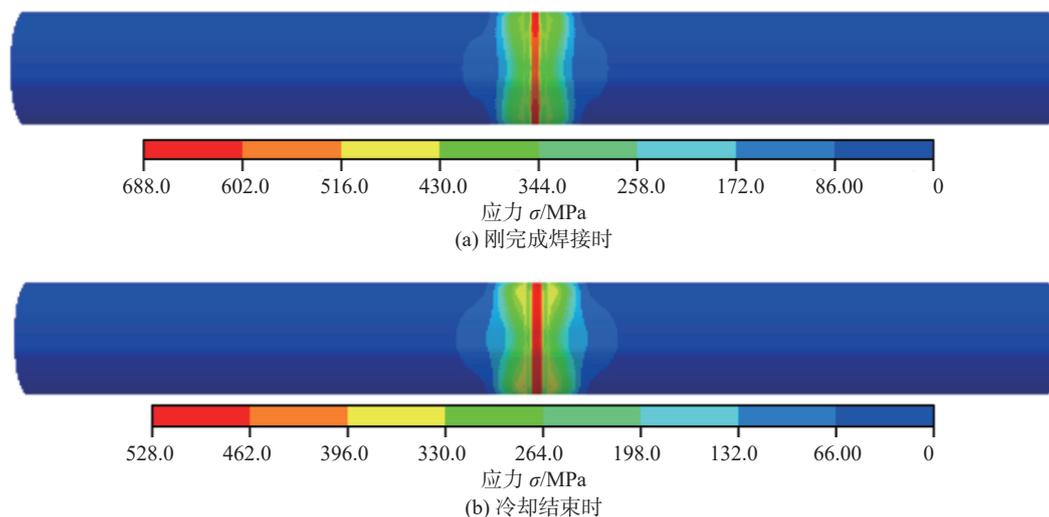


图 11 焊接接头等效应力场云图

Fig. 11 Cloud map of equivalent stress field of welded joint. (a) upon completion of welding; (b) at the conclusion of the cooling process

后,焊接残余等效应力集中分布于在焊缝和热影响区,焊缝中心处达到最高值,沿轴向方向逐渐降低,同一轴向位置等效应力几乎相同。

焊接完成后,焊缝中心沿厚度方向的应力分布如图 12 所示。由图 12 可以看出,周向应力是 3 个方向应力中最大的,并且 3 个方向主应力遵循相似的分布规律。从管道内层到外层,应力首先呈现上升的趋势,达到一个峰值后转而下降,随后再次上升,达到另一个峰值后,最终呈现下降趋势。这种分布规律呈现出一种波浪状的增减规律,其中最大的应力值出现在管道壁厚的特定位置。

引入初始裂纹前后裂纹尖端区域焊接残余应力场周向应力分布云图如图 13 所示,可以看出焊接

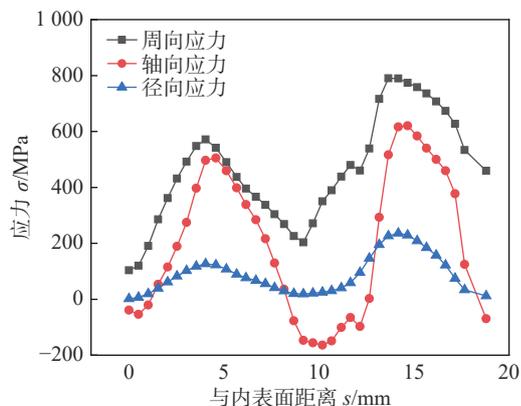


图 12 焊道中心残余应力沿厚度方向分布

Fig. 12 Distribution of residual stress at the center of the bead along the thickness direction

残余应力随着温度的升高而逐渐降低,不同温度下的焊接残余应力具有相似分布规律。引入裂纹后,在裂纹尖端产生了明显的应力集中现象,裂纹中心部分呈现拉应力,两端呈现压应力,远离裂纹尖端韧带部分的焊接残余应力几乎不受裂纹引入的影响。

## 2.2 管道断裂模拟结果与分析

不同温度下含焊接残余应力管道启裂内压如图 14 所示,启裂内压随着温度的升高逐渐降低,在 400 ~ 600 °C 区间下降幅度最大,800 °C 时启裂内压降至 0 MPa,即焊接残余应力单独作用就能使裂纹启裂。

为了更清晰的体现焊接残余应力对断裂行为的影响,将不含焊接残余应力管道启裂内压  $P_n$  和含焊接残余应力的启裂内压  $P_{rs}$  及下降比例汇总见表 2。启裂内压下降比例随着温度升高逐渐增加,可见温度越高焊接残余应力的影响越大。由于 P91 管道运行温度通常为 600 °C 左右,因此该温度时的启裂内压需要尤其关注,600 °C 时不含残余应力管道的启裂内压为 64.44 MPa,远高于运行内压 25.4 MPa,可见无焊接残余应力的轴向裂纹管道依然具有较高的安全性,但含焊接残余应力管道的启裂内压急剧下降至 6.88 MPa,已经远低于运行内压,因此焊接残余应力能够极大地降低 P91 管道的启裂内压,使其丧失运行能力。

为探究焊接残余应力对 P91 管道断裂行为的影响机理,需要明确焊接残余应力对管道启裂过程的

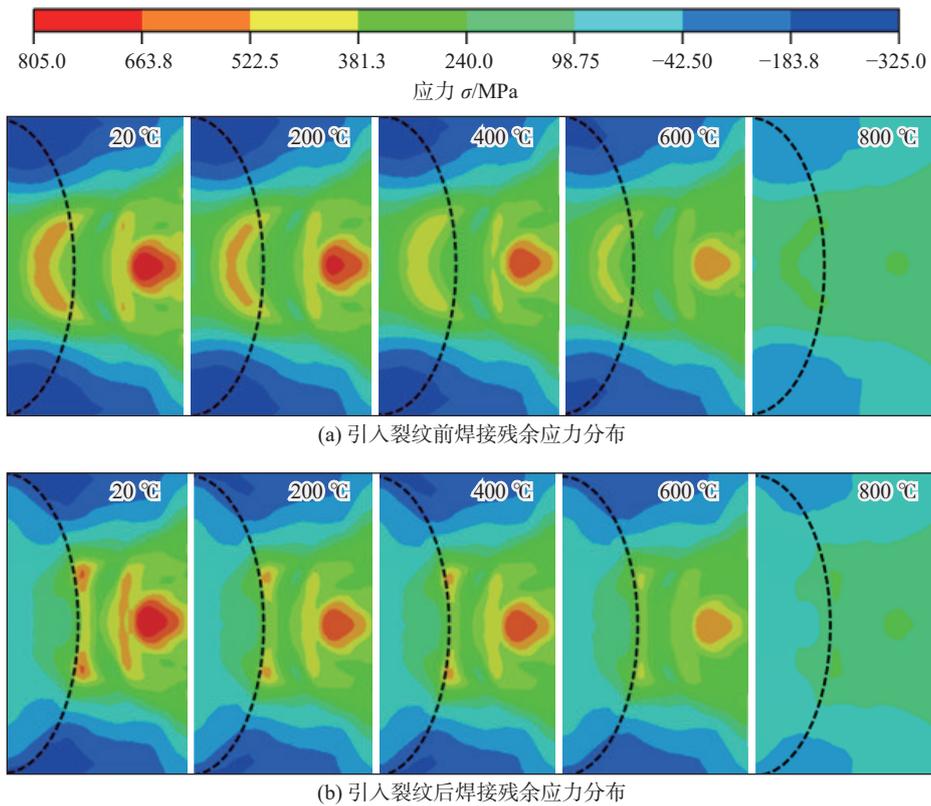


图 13 引入初始裂纹前后焊接残余应力分布

Fig. 13 Distribution of welding residual stress before and after initial crack introduction. (a) distribution of welding residual stress prior to crack introduction; (b) distribution of welding residual stress subsequent to crack introduction

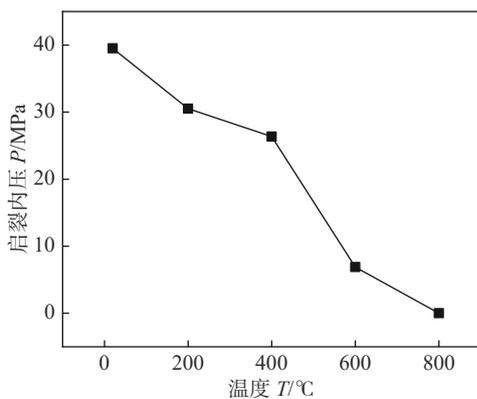


图 14 不同温度下含焊接残余应力管道启裂内压

Fig. 14 Internal crack initiation pressure of pipe with welding residual stress at different temperatures

应力分布影响规律。

不同温度下含焊接残余应力管道沿厚度方向和沿裂纹尖端周向应力分布如图 15 所示。沿厚度方向，周向应力在裂纹尖端位置迅速上升，在裂纹尖端后一段距离达到最大值，韧带区域周向应力与初始焊

表 2 P91 管道启裂内压和变化比例  
Tab. 2 Internal pressure and change ratio of P91 pipeline cracking

温度 $T/^\circ\text{C}$	不含焊接	含焊接	下降比例 $\eta(\%)$
	残余应力 管道启裂内压 $P_n/\text{MPa}$	残余应力的 启裂内压 $P_{rs}/\text{MPa}$	
20	118.20	39.51	66.57
200	105.00	30.51	70.94
400	95.03	26.34	72.28
600	64.44	6.88	89.32
800	17.09	0	100

接残余应力分布相似，可见韧带区域主要受焊接残余应力控制。沿裂纹尖端，裂纹中心附近应力均趋于稳定，然后迅速下降，在裂纹末端趋于平稳，随着温度升高应力达到最大值的位置逐渐向远离裂纹尖端方向移动，可见不同温度的启裂位置有所不同。

含焊接残余应力管道周向应力随着温度升高逐渐下降且下降速度逐渐增大。由于裂纹中心受残余拉应力, 两端受残余压应力, 周向应力在裂纹中段迅速下降, 较高温度时末端呈现压应力状态。

为了更清晰的体现出焊接残余应力对应力分布的影响, 将不同温度下有无焊接残余应力管道的应力分布进行对比如图 16 和图 17 所示。如图 16 所示, 沿厚度方向焊接残余应力降低了启裂时的最大应力,

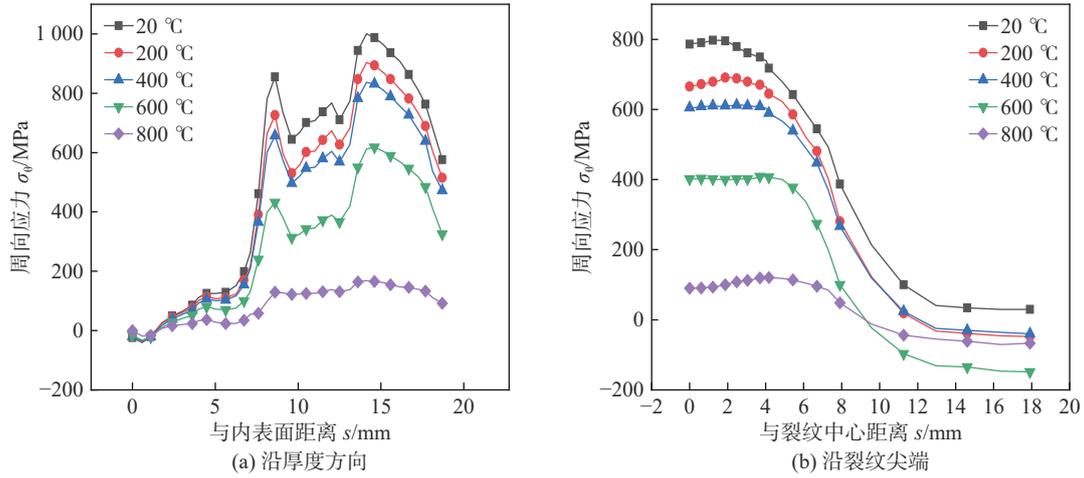


图 15 含焊接残余应力管道启裂时沿厚度方向和沿裂纹尖端周向应力分布

Fig. 15 Stress distribution along the thickness direction and around the crack tip of the pipe containing welding residual stress during crack initiation. (a) along the thickness direction; (b) along the crack tip

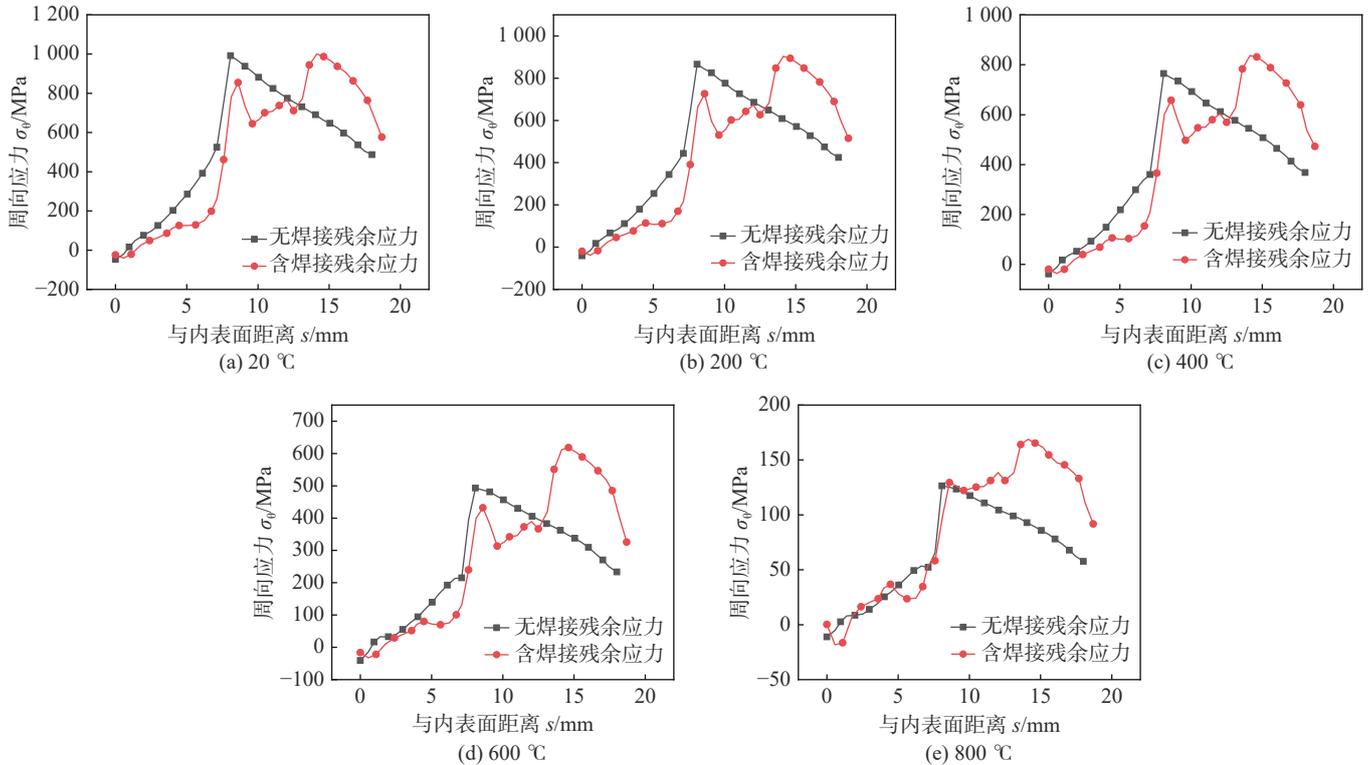


图 16 启裂时裂纹区域应力分布(厚度方向)

Fig. 16 Stress distribution in crack region during crack initiation (along the thickness direction). (a) 20 °C; (b) 200 °C; (c) 400 °C; (d) 600 °C; (e) 800 °C

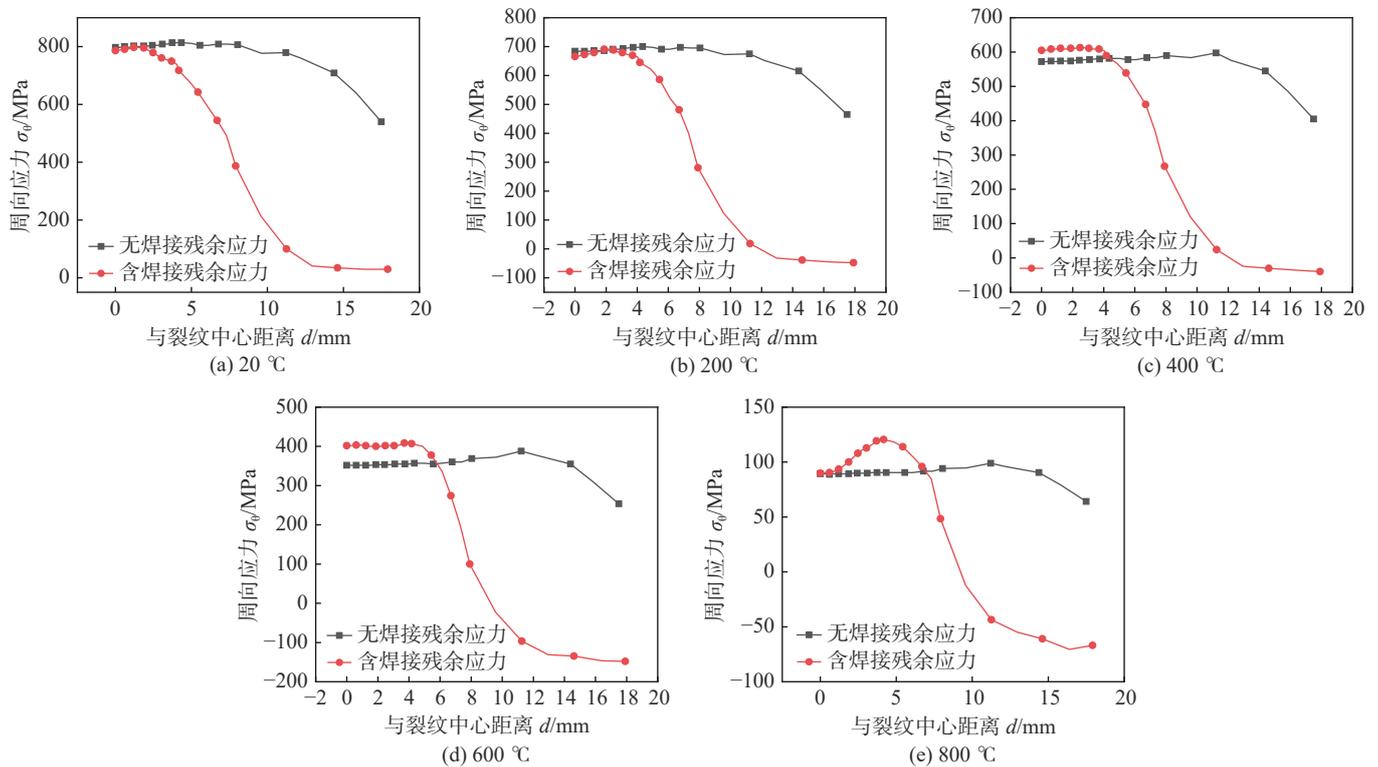


图 17 启裂时裂纹区域应力分布(沿裂纹尖端)

Fig. 17 Stress distribution in crack region during crack initiation (along the crack tip). (a) 20 °C; (b) 200 °C; (c) 400 °C; (d) 600 °C; (e) 800 °C.

增大了裂纹尖端附近的应力梯度, 裂纹尖端后的应力分布保持着焊接残余应力的分布特性, 随着温度升高韧带应力分布差距越大, 可见焊接残余应力消退速度小于裂纹启裂所需载荷的降低速度, 因此焊接残余应力所占比例随温度升高而增大。如图 17 所示, 沿裂纹尖端方向, 应力整体均呈现下降趋势, 由于裂纹两端残余压应力的作用, 含焊接残余应力管道的周向应力沿裂纹方向下降速度远大于不含焊接残余应力管道的应力降低速度, 200 °C 后裂纹末端应力变为压应力, 可见残余应力能够抑制裂纹两端的启裂, 随着温度的升高含焊接残余应力管道裂纹中心附近应力逐渐超过无焊接残余应力管道裂纹中心附近的应力且差距逐渐增大。

### 3 结论

(1) 焊接温度场和应力场冷却结束后沿焊缝中心对称分布, 沿轴向方向朝两端递减, 焊接残余应力沿管道厚度方向上呈现波浪状的增减分布规律, 其中周向应力数值最大。

(2) 焊接残余应力随着温度的升高而逐渐降低, 引入初始裂纹后, 裂纹尖端产生了明显的应力集中现象, 裂纹中心为拉应力, 两端为压应力。

(3) 焊接残余应力降低了 P91 管道的启裂内压, 随着温度升高降低比例越大, 焊接残余应力促进了裂纹中心的启裂, 抑制了裂纹两端的启裂。

(4) 焊接残余应力降低了启裂时裂尖所需应力, 增大了裂纹区域的应力梯度, 启裂时韧带位置主要受焊接残余应力作用, 温度越高残余应力占比越大, 不同温度下裂纹区域最大应力位置不同, 因此不同温度的启裂位置有所不同。

### 参考文献

- [1] 林伯强, 杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向 [J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2022, 42(5): 1-10.

Lin Boqiang, Yang Mengqi. China's power system research in the context of carbon neutrality: current status, challenges, and development direction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2022, 42(5):

- 1 – 10.
- [2] Yang K, Zhang Y, Zhao J. Elastoplastic fracture analysis of the P91 steel welded joint under repair welding thermal shock based on XFEM[J]. *Metals*, 2020, 10(10): 1285.
- [3] 游敏, 郑小玲, 余海洲. 关于焊接残余应力形成机制的探讨[J]. *焊接学报*, 2003(2): 51 – 54.  
You Min, Zheng Xiaoling, Yu Haizhou. Discussion and investigation on mechanism of welding residual stresses in mild steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003(2): 51 – 54.
- [4] Lee C H, Chang K H. Influence of the residual stresses and distortions on the structural behavior of girth-welded cylindrical steel members[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 41: 766 – 776.
- [5] Zhang G D, Zhou C Y. Numerical simulation of creep for welded joint under consideration of welding residual stress[C]//The Annual Conference of Fracture Mechanics (FM2006) and The 9th National Conference of High Temperature Strength of Material and Structure (HTSMS), 2006: 237 – 242.
- [6] Zhang W Y, Jiang W C, Zhao X, et al. Fatigue life of a dissimilar welded joint considering the weld residual stress: experimental and finite element simulation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 109: 182 – 190.
- [7] Coules H E, Smith D J, Orrock P J, et al. A combined experimental and modelling approach to elastic-plastic crack driving force calculation in the presence of residual stresses[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(8): 1313 – 1325.
- [8] Mahmoudi A H, Truman C E, Smith D J. Using local out-of-plane compression (LOPC) to study the effects of residual stress on apparent fracture toughness[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(6): 1516 – 1534.
- [9] Wang H, Woo W, Lee S Y, et al. Correlation of localized residual stresses with ductile fracture toughness using in situ neutron diffraction and finite element modelling[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 160: 332 – 342.
- [10] 宋耀民, 张亦良, 王晶, 等. 天然气管道开裂的原因[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(1): 88 – 92.  
Song Yaomin, Zhang Yiliang, Wang Jing, et al. Cracking causes of a natural gas pipeline[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2016, 40(1): 88 – 92.
- [11] Moshayedi H, Sattari-Far I. The effect of welding residual stresses on brittle fracture in an internal surface cracked pipe[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2015, 126: 29 – 36.
- [12] 李铁萍, 刘锐, 温丽晶, 等. 焊接残余应力对含缺陷管道 K-T 值的影响研究[J]. *应用力学学报*, 2013, 30(2): 251 – 256.  
Li Tieping, Liu Rui, Wen Lijing, et al. Effect of welding residual stress on K-T stresses of flawed pipelines[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2013, 30(2): 251 – 256.
- [13] 刘维洋. 压力管道焊接热影响区裂纹扩展研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.  
Liu Weiyang. Research on crack propagation in the heat affected zone of pressure pipeline welding[D] Chengdu, China: Southwest Petroleum University, 2017.
- [14] 吕刘帅. 镍基合金环形焊接模拟及其在结构失效评估中的应用[D]. 上海: 中国科学院大学, 2019.  
Lv Liushuai. Girth welding simulation of nickel-based alloy and application in structural failure assessment[D]. Shanghai, China: University of the Chinese Academy of Sciences, 2019.

第一作者: 何宗源, 工程师; 主要从事火力发电设备安全方面的研究; 571681159@qq.com。

通信作者: 张朱武, 博士, 教授; 主要研究方向为过程装备安全评价与失效分析; zwzhang@fzu.edu.cn。

(编辑: 曲畅)

本文引用格式:

何宗源, 王芳, 周江, 等. 不同温度下焊接残余应力对含裂纹管道断裂行为的影响[J]. *焊接*, 2024(11): 54 – 64.

He Zongyuan, Wang Fang, Zhou Jiang, et al. Effect of welding residual stress on fracture behavior of pipes with cracks at different temperatures[J]. *Welding & Joining*, 2024(11): 54 – 64.