

# 基于逆焊接技术的 T122/P122 钢环焊缝 残余应力消除工艺

曹 俊, 赵建平, 杨 阳

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 211816)

**摘 要:** 采用 ABAQUS 有限元软件生死单元技术针对逆焊接消除残余应力的工艺方法进行分析, 模拟计算了 T122/P122 钢环焊缝的逆焊接消除焊接残余应力的工艺过程, 分析了逆焊接消除残余应力的工艺过程中不同热处理温度、冷却速率、冷却范围、冷却时间对消除残余应力效果的影响。结果表明, 经过逆焊接处理后, Mises 残余应力及环向残余应力均明显降低, 且热处理温度对残余应力的消除影响最为显著, 其次是冷却时间和冷却速率。当热处理温度为 400 °C, 冷却时间为 20 s 时不仅可以消除焊接残余应力, 还可以在处理表面形成 1.3 mm 厚的压应力层。

**关键词:** 逆焊接工艺; 焊接残余应力; 有限元模拟; 压应力层

**中图分类号:** TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)03-0109-04

## 0 序 言

在石化行业, 焊接技术被广泛应用于各类承压设备的安装和制造过程中, 由于焊接过程瞬间对焊缝集中加热, 因而引起了接近于屈服应力的残余应力和变形, 在大量的设备和管道失效的事故中, 由焊缝失效引发的事故频繁发生<sup>[1-3]</sup>。

逆焊接加热处理消除焊接残余应力是采用与焊接过程相反的方法, 用冷源使目标区域的温度低于相邻区域形成负温差。目标区的冷收缩受到临区限制, 产生塑性伸长形变。如果处理工艺得当, 不止可以消除焊接残余应力还可以在处理区域形成一定厚度的压应力层<sup>[4]</sup>。其中试样的预热温度, 冷源的冷却时间, 目标区域的范围等都对逆焊接消除残余应力的效果有很大影响。

近年来由于 T122/P122 钢具有良好的焊接性和耐腐蚀性, 是高温管道的代表材料之一。高温管道在长期服役的过程中, 焊缝区因具有较高的残余应力一直是事故发生的高危区域。为了确保高温管道能安全运行, 需要尽可能的减少焊接残余应力。

## 1 逆焊接数值模拟过程

### 1.1 材料参数及焊接工艺参数的确定

T122/P122 钢材料参数如图 1 所示<sup>[5,6]</sup>, 焊接结

构如图 2 所示。焊接过程由 3 条焊道完成, 第 1 道采用钨极气体保护焊 (GTAW), 第 2, 3 道采用焊条电弧焊 (SMAW), 焊接工艺参数如表 1 所示。

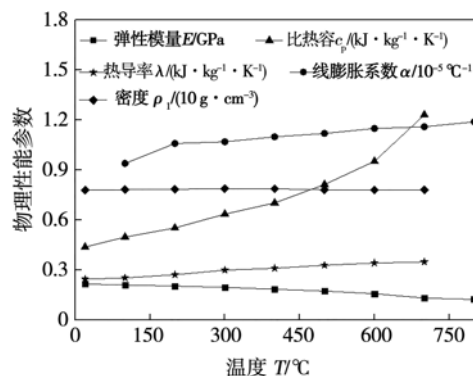


图 1 T122/P122 钢材料物理参数  
Fig. 1 Material physical parameters

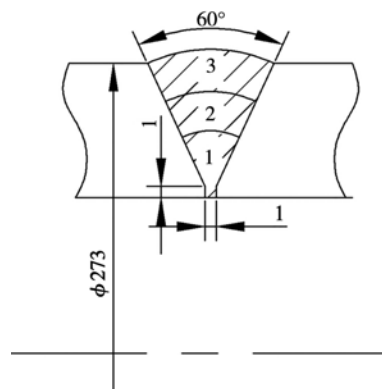


图 2 焊接接头结构形式 (mm)  
Fig. 2 Welded joint of model

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding parameters

焊道	电弧电压 $U/V$	焊接电流 $I/A$	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$
1	11	105	61
2	19	180	107
3	19	150	212

## 1.2 逆焊接工艺参数

文中选取热处理温度、冷却时间、冷却范围、冷却速率 4 个逆焊接参数进行研究. 讨论不同逆焊接处理参数下, 消除焊接残余应力的处理效果.

## 1.3 模拟方法

数值模拟可分为焊接残余应力模拟过程和逆焊接消除残余应力模拟过程. 焊接模型采用 ABAQUS 生死单元技术, 将温度场与应力场顺次耦合, 焊接温度场计算采用 DC3D8 单元, 焊接残余应力场计算采用 DC3D8R 单元, 有限元网格及其划分如图 3 所示.

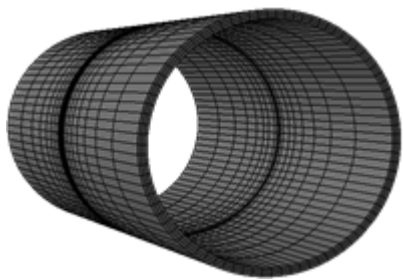


图 3 有限元网格模型  
Fig. 3 Mesh of finite model

逆焊接采用内生热源的方式将整体工件加热到预定的热处理温度, 再对待处理区域进行局部冷却<sup>[7]</sup>. 焊接的初始温度取室温 25 °C, 考虑到空气与板材之间的对流和辐射边界条件, 对流传热系数取 10 W/m<sup>2</sup>·K, 辐射率为 0.85. 为了防止发生刚性位移, 对结构施加固定约束<sup>[8,9]</sup>.

## 2 逆焊接数值模拟结果

### 2.1 温度场和残余应力场的分布

在 ABAQUS 热力耦合模拟中, 温度场模拟是应力场模拟的基础和前提, 因此温度场对应力场的分布规律有很大的影响. 图 4 为 300 mm × 300 mm × 26 mm 平板对接焊缝和  $\phi 273$  mm × 10 mm 环形焊缝在表面焊缝二分之一处的逆焊接热循环曲线, 其中平板对焊的逆焊接工艺为热处理温度 300 °C、冷却时间 5 s, 环形焊缝的逆焊接工艺为热处理温度 350 °C、冷却时间 10 s. 图 4 中可以看到不同焊接结构在

不同处理工艺下冷却曲线的变化规律基本相同, 冷却时间越长冷却后温差越大, 冷却效果越明显.

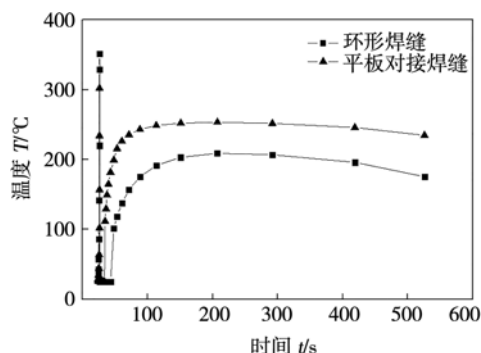


图 4 逆焊接热循环曲线  
Fig. 4 Temperature field of PWCT

图 5 为  $\phi 273$  mm × 10 mm 的 T122/P122 钢环形焊缝经 400 °C、20 s 逆焊接处理后的残余应力场, 其中横坐标为距离处理表面距离, 处理表面选择接触介质的内壁面. 结果表明  $\sigma_x$  (环向残余应力  $S_{11}$ ) 和  $\sigma_z$  (厚度方向残余应力  $S_{33}$ ) 在厚度方向的分布均较未处理之前的情况明显减小, 尤其是  $\sigma_x$  (环向残余应力  $S_{11}$ ) 在壁厚方向产生了 1.3 mm 厚的压应力层.

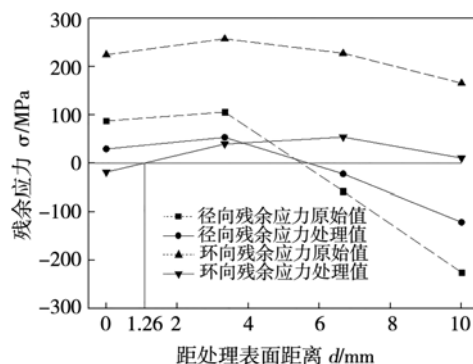


图 5 焊接残余应力场  
Fig. 5 Residual stress field of PWCT

### 2.2 不同热处理温度下逆焊接残余应力场

图 6 和图 7 为环形焊缝在逆焊接过程中不同热处理温度下 Mises 残余应力及环向残余应力  $\sigma_x$  ( $S_{11}$ ) 在厚度方向上的分布结果, 其中逆焊接处理时间为 20 s, 处理区域为焊缝宽度 12 mm. 图 6, 图 7 中横坐标为距离处理表面的距离. 结果表明, 不同处理温度下应力变化趋势基本一致, 热处理温度越高, 温差越大, 消除效果越明显. 当热处理温度在 400 °C 时处理表面形成了压应力层, 处理效果超过传统的焊后热处理方式. 因此若想获得足够厚度的压应力层可通过适当提高热处理温度实现.

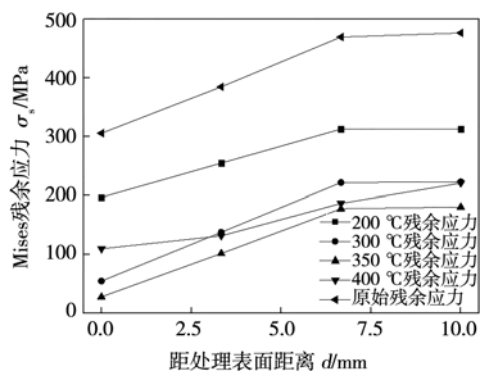


图6 不同热处理温度下的 Mises 残余应力

Fig. 6 Mises stress in different temperature

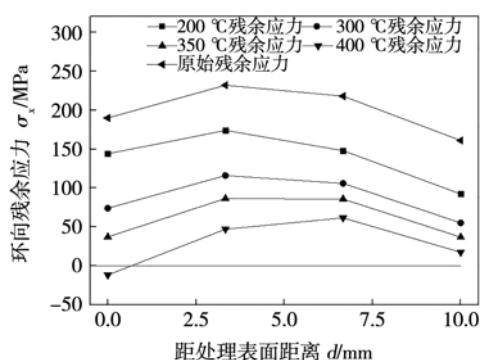


图7 不同热处理温度下环向残余应力

Fig. 7  $S_{11}$  stress in different temperature

### 2.3 冷却时间对焊接残余应力的影响

图8和图9为环形焊缝在逆焊接过程中不同冷却时间下 Mises 残余应力及环向残余应力  $\sigma_x (S_{11})$  在厚度方向上的分布结果,其中热处理温度为 350 °C,处理区域为焊缝宽度 12 mm. 结果表明,冷却时间的变化对消除残余应力的效果没有温度变化明显;尤其是在处理表面的残余应力消除效果相似,随着处理时间越久沿厚度方向残余应力的消除结果越明显. 但在 10 ~ 20 s 之间处理结果已较相近. 因此

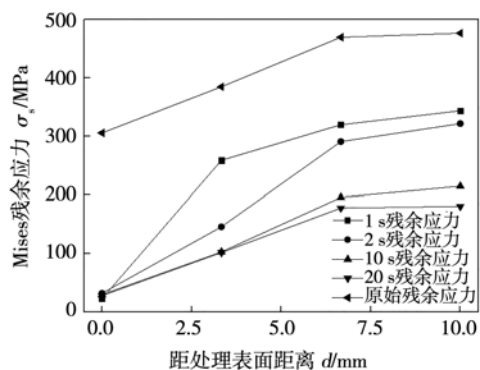


图8 不同热处理时间下的 Mises 残余应力

Fig. 8 Mises stress in different time

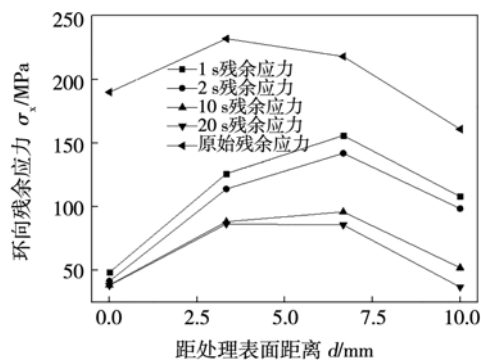


图9 不同热处理时间下环向残余应力

Fig. 9  $S_{11}$  stress in different time

处理时间过长不仅达不到处理要求,还会造成浪费,因此处理时间在 10 ~ 20 s 效果最佳.

### 2.4 不同处理范围下焊接残余应力场

图10和图11为环形焊缝在逆焊接过程中不同处理范围下 Mises 残余应力及环向残余应力  $\sigma_x (S_{11})$  在厚度方向上的分布结果.

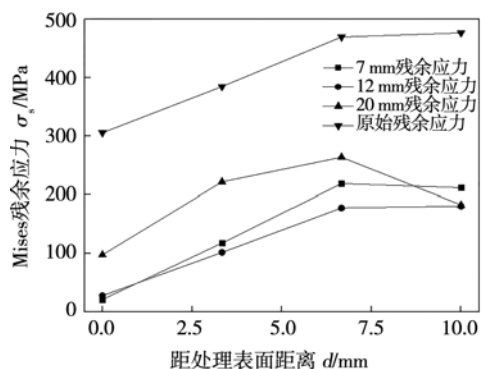


图10 不同冷却范围下的 Mises 残余应力

Fig. 10 Mises stress in different range

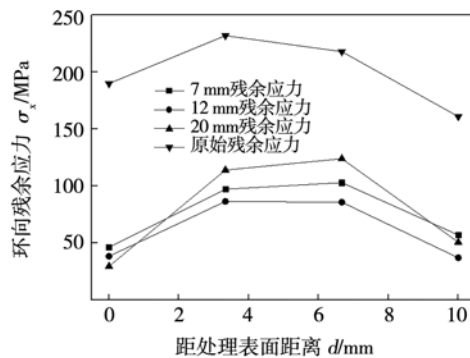


图11 不同冷却范围下环向残余应力

Fig. 11  $S_{11}$  stress in different range

热处理温度为 350 °C,冷却时间 20 s,其中 12 mm 为根据 V 形坡口计算所得焊缝宽度. 结果表明,处理范围在 20 mm 时比 12 mm 和 7 mm 效果明显降

低,且 7 mm 和 12 mm 下的处理结果相差不大,因此在选择处理区域时根据焊缝的宽度或具体情况适当减小。

## 2.5 不同冷却速率下的焊接残余应力场

图 12 和图 13 为环形焊缝在整体冷却、10 cm/s、5 cm/s 冷却速率下的 Mises 残余应力及环向残余应力在厚度方向上的分布,由图 12 和图 13 可知在不同的冷却速率处理条件下所得到的消除残余应力的效果相似,尤其是在整体冷却和 10 cm/s 下处理结果基本保持一致,因此在选择局部处理和整体处理时可依据实际情况避免过慢冷却,降低处理结果。

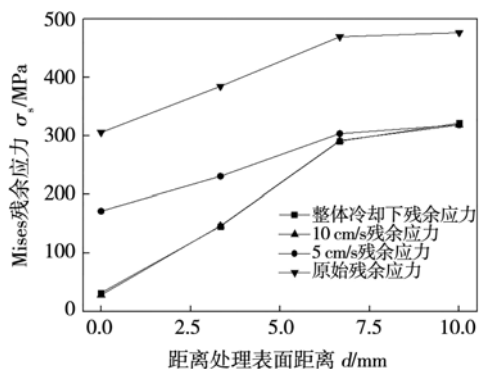


图 12 不同冷却速率下的 Mises 残余应力  
Fig. 12 Mises stress in different cooling rate

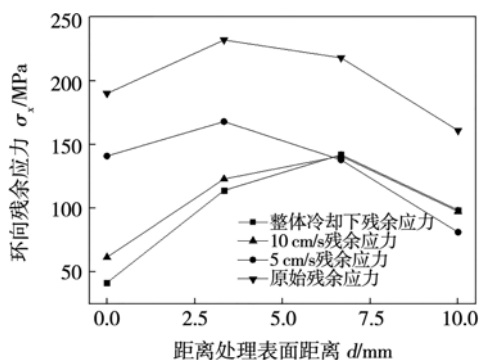


图 13 不同冷却速率下环向残余应力  
Fig. 13  $\sigma_{11}$  stress in different cooling rate

## 3 结 论

(1) 当热处理温度为 400 ℃、冷却时间为 20 s、处理区域为焊缝宽度时不仅可以消除焊接残余应力

还可以在处理表面形成 1.3 mm 厚的压应力层。

(2) 对逆焊接消除残余应力的各工艺参数研究表明,热处理温度是影响压应力产生的主要原因,其次为冷却介质的停留时间和冷却介质的性能参数。

(3) 热处理温度越高产生的消除残余应力效果越明显,若想获得合理的压应力层可适当提高热处理温度。

## 参考文献:

- [1] 陈怀宁,陈亮山,林泉洪. 逆焊接加热处理防止复板结构应力腐蚀开裂的研究[J]. 焊接学报, 1999, 20(s1): 18-22.  
Chen Huaining, Chen Liangshan, Lin Quanhong. Study of preventing SCC of cladding by anti-welding-heating treatment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(s1): 18-22.
- [2] 胡桂明,周昌玉. 焊接残余应力对接头尘化腐蚀影响的有限元模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(1): 42-46.  
Hu Guiming, Zhou Changyu. Finite element simulation on the effect of welding residual stress on the metal dusting corrosion of welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(1): 42-46.
- [3] Viswanathan R. Failure experience with seam-welded hot reheat pipes in the USA[C]// ASME Pressure Vessels & Piping Conference 1995, New York, United State, 1995: 187-205.
- [4] 陈怀宁,陈亮山,林泉洪. 逆焊接加热消除残余应力原理与工艺研究[C]// 中国机械工程学会焊接学会. 第九次全国焊接会议论文集(2), 哈尔滨, 1999: 122-125.
- [5] 杨 富,章应霖,任永宁,等. 新型耐热钢焊接[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [6] 谭 真,郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [7] Han Y, Yu E L, Zhang H L. Numerical analysis on the medium-frequency induction heat treatment of welded pipe[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(6): 212-217.
- [8] 张国栋,薛吉林,周昌玉. 基于正交试验设计的高温管道焊接工艺优化[J]. 焊接学报, 2008, 29(11): 53-56.  
Zhang Guodong, Xue Jilin, Zhou Changyu. Optimization on welding procedure of high temperature pipeline based on orthogonal test design[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(11): 53-56.
- [9] 冀晓来,秦旭达. 基于 Abaqus\_Explicit 冷却条件下钛合金插铣过程温度场研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.

**作者简介:** 曹 俊,男,1991 年出生,硕士研究生. 主要研究方向为化工设备可靠性与高风险评估. Email: 15261806718@163.com

**通讯作者:** 赵建平,男,博士,教授,博士研究生导师. Email: jpzhao71@163.com