

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.08

电弧摆动对管堆焊温度场及微观组织的影响

叶义海, 徐少峰, 柏忠炼, 李诗易, 林腾飞

中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213

摘要: 为掌握电弧摆动对管堆焊过程的影响, 采用焊接仿真与工艺试验两种方式对比电弧摆动和不摆动操作的温度场、残余应力及焊接变形并进行了金相分析。首先, 基于有限元分析软件Abaqus, 采用热弹塑性有限元法建立焊接过程有限元模型, 对摆动焊与常规无摆动焊的温度场进行模拟, 并分析熔池的演变过程及温度场分布、热循环曲线等特征。结果表明: 摆动焊温度分布云图呈拉长状态, 其熔池形状相较于不摆动焊的椭圆形更接近波浪形, 摆动焊的温度场更均匀、残余应力更低, 可提高焊缝等轴晶比例, 细化晶粒, 改善焊缝显微硬度。其次, 通过金相分析对比了摆动焊与不摆动焊的显微组织, 结果表明, 摆动焊能够提高焊缝等轴晶的比例和焊缝显微硬度。

关键词: 堆焊; 摆动焊; 数值模拟; 温度场; 微观组织。

中图分类号: TG455 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0055-08

Effect of Arc Swing on the Temperature Field and Microstructure of Pipe Overlay Weld

YE Yihai, XU Shaofeng, BAI Zhonglian, LI Shiyi, LIN Tengfei

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China

Abstract: To know well the impact of arc swing on the process of pipe surfacing, the effects of swing operation on the temperature field and microstructure of the surfacing process were compared through welding simulation and process teste. First of all, based on the finite element analysis software Abaqus, the finite element model of the welding process is established by the thermal-elastoplastic finite element method, and the temperature field of swing welding and conventional non swing welding is simulated, and the evolution process of the molten pool, the temperature field distribution, thermal cycle curve and other characteristics are analyzed. the results show that the temperature distribution cloud map of swing welding is elongated, and the shape of the weld pool is closer to the wave shape than the ellipse of non swing welding, the peak temperature is also lower than that of non swing welding. Secondly, the microstructure of swing welding and non swing welding was compared through metallographic analysis. The results showed that during swing welding, only a small amount of columnar crystal structure was observed in the backing weld.

Keywords: overlay weld; swing welding; numerical simulation; temperature field; microstructure

引用格式: 叶义海, 徐少峰, 柏忠炼, 等. 电弧摆动对管堆焊温度场及微观组织的影响[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 55-62.

Citation: YE Yihai, XU Shaofeng, BAI Zhonglian, et al. Effect of Arc Swing on the Temperature Field and Microstructure of Pipe Overlay Weld[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 55-62.

0 引言

核电设备的各类管道在长期服役过程中不可避免地会出现性能劣化, 甚至出现裂纹扩展、壁厚

减薄甚至泄漏等局部失效现象。但由于失效部分常处于辐照、狭小空间, 对修复技术的研发提出了严苛的挑战。OVERLAY堆焊修复技术^[1-2]作为一种可靠的在线维修方法, 可以满足不停堆或隔离管

收稿日期: 2023-07-19 修回日期: 2023-09-06

作者简介: 叶义海(1983—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事特种焊接工艺研发工作。E-mail: yeyihai@163.com。

系统在线维修的需求,具有较高的工程适用性,近年来受到了国内外研究人员的关注,目前,国内已在 CRDM 的 Ω 密封焊缝和接管安全端异种金属焊缝等部件开展了 Overlay 堆焊修复应用案例。该技术主要通过在带缺陷或失效的结构(焊缝)上熔敷表面堆焊层,形成新的压力边界(密封)焊缝和结构加强,达到相关规范并继续服役的要求。

为获得更佳的堆焊效果,提高堆焊效率并降低热输入,常采用摆动焊接方式实施堆焊,一次性获得较宽的焊道,从而减少堆焊道次。张华军等人^[3]在经典的双椭球热源模型的基础上建立了摆动电弧动态热源模型,研究了摆动焊对温度场的影响,发现摆动焊的温度曲线在加热过程和冷却过程都有一个小波峰出现,且熔池峰值温度随着横向摆动速度的增大而减小。Biradar 等人^[4]研究了摆动焊对焊缝金属组织的影响,发现摆动焊可以减小熔合区晶粒尺寸,提高焊缝区域力学性能。宋树崎^[5]等人采用热弹塑性有限元法对铝合金槽焊接头摆动焊过程进行了数值模拟,发现槽焊接头摆动焊过程中焊缝中部温度要高于两侧;工件在中心焊缝区受纵向残余拉应力,横向与纵向残余应力峰值绝对值与焊接速度成正相关,与摆动速度则呈负相关。虽然国内外学者通过试验或数值模拟的方法对不同材料摆动焊已有较多研究,但这些研究主要集中于平板或对接接头,对管堆焊摆动焊的研究鲜有报道。

本文采用热弹塑性法建立管堆焊过程的三维有限元模型,对堆焊过程进行仿真,分析其温度场分布、热循环曲线及残余应力的特征,并通过金相显微分析摆动焊对微观组织的影响,为实际工程实施过程摆动焊相关工艺的制定提供理论参考。

1 管堆焊有限元模型建立

以某电站管道为研究对象,针对摆动焊与不摆动焊的实际应用情况,在保证堆焊整体宽度和高度一致的前提下,通过合理划分焊道,分别建立摆动焊与不摆动焊的三维模型,在 Abaqus 软件中通过输入各材料的热物理及力学性能参数、加载接触属性及边界条件、合理划分网格等建立管堆焊有限元模型,并结合热流分布子程序模拟堆焊过程的热流分

布,实现对堆焊过程的数值模拟。

1.1 管堆焊结构

核电厂某型核级管道几何结构如图 1 所示。管道在长期服役过程中可能在其表面出现缺陷,为确保后续正常运行,在不更换管道的前提下,采用堆焊技术进行预防性修复,从而保证结构的完整性与服役性能。



图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

本研究中的堆焊修复为多层多道焊,为兼顾计算过程的效率与精度,对摆动焊及不摆动的模型均进行一定的处理,基于焊道搭接率对每层焊道的几何形状进行一定简化,分别如图 2a、图 2b 所示。

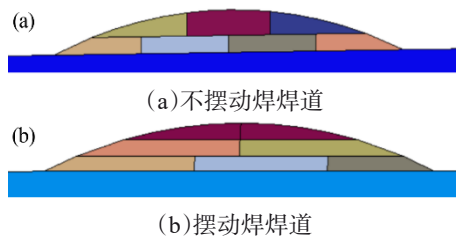


图 2 焊道规划

Fig. 2 Schematic diagram of the weld path plan

为提高计算精度,采用质量较高的六面体结构性或扫掠性网格,并对焊缝区网格进行密集布种,尽可能地实现网格精细化,远离焊缝区则逐渐由密集转为稀疏。网格模型如图 3 所示。

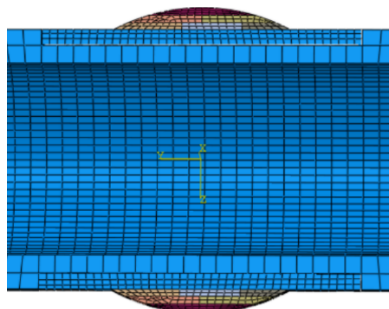


图 3 网格模型

Fig. 3 Mesh model

1.2 材料属性

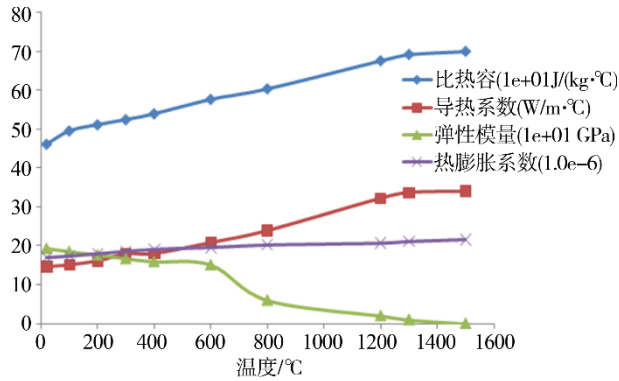
管道材料为 304 奥氏体不锈钢,堆焊材料为 308L 焊丝,两种材料的热物理性能及力学性能参数^[6-7]如图 4 所示。此外,由于焊接过程存在相变因素,对其温度变化产生一定影响,因此,在材料参数

中设置焓值来表征相变过程产生的热量变化^[8]。

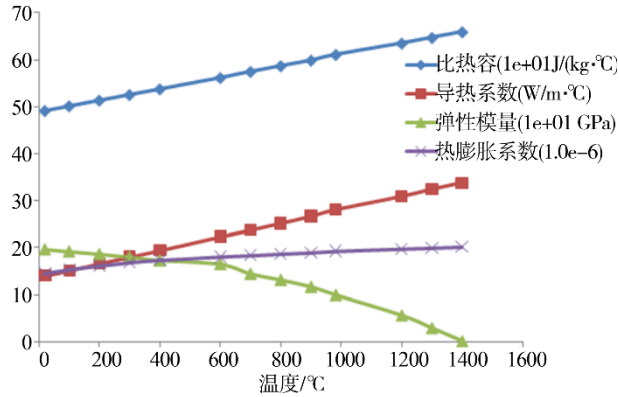
$$H(T) = \int \rho(T) c(T) dT \quad (1)$$

式中 $H(T)$ 为热焓; $\rho(T)$ 为随温度变化的密度; $c(T)$ 为随温度变化的比热容; T 为温度。

同时为了准确模拟焊接过程的热应变过程,在计算时假设材料屈服行为服从 Von-Mises 屈服准则,且满足塑性硬化准则。



(a) 304L 不锈钢



(b) 308L 不锈钢

图4 各材料热物理及力学性能参数

Fig. 4 Thermal physical and mechanical performance parameters of materials

1.3 热源模型及校核

热源模型是表达焊接过程热输入与时间、空间相关的数学模型,是决定后续计算准确性的关键要素。为更好地贴合实际的热输入状态,研究人员建立了不同的热源模型^[9-10],从二维的高斯平面热源到三维的椭球乃至双椭球等热源模型,逐步摸索出适合于不同焊接方法的热源模型。在实际应用过程中,再根据焊接工艺进行细节修正。

本文采用双椭球形热源模型进行描述,如图5所示。该模型不仅可以考虑热源在厚度方向的热

效应,同时也兼顾了焊接电弧的挖掘和搅拌效应,能够比较真实反映出沿焊接方向上,焊接束流对焊接温度的影响。

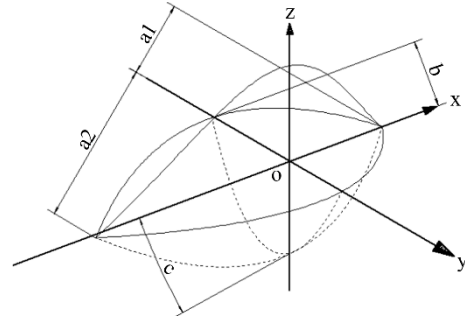


图5 双椭球形热源模型

Fig. 5 Double ellipsoid heat source model

由于椭球内热源分布在前半部分温度梯度变化迅速,而后半部分温度梯度变化较为缓慢,因此,数学表达式表示如下:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_1 Q}{\pi \sqrt{\pi abc}} e^{-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}}, x \geq 0 \quad (2)$$

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_2 Q}{\pi \sqrt{\pi abc}} e^{-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}}, x < 0 \quad (3)$$

式中 $Q = \eta UI$; a, b, c 为椭球形状的参数,分别与熔池的长度、宽度和深度相关; η 为热源效率; f_1, f_2 为椭球前半部分及后半部分的能量分数,且 $f_1 + f_2 = 2$ 。

焊接热源建立后,通过实际焊接试验和熔池金相照片对热源模型的参数进行调节,通过不断迭代运算,最终获得与实际熔池形状接近的热源模型。热源校核的结果如图6所示。

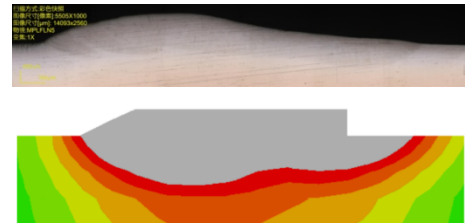


图6 热源校核结果

Fig. 6 Result of heat source check

1.4 边界条件

焊接温度场计算涉及到多种热交换状态,既有结构内部的热传导,也有表面对流传热和辐射传热,在计算过程中,将热对流及热辐射作为接触的边界条件分别加载在管堆焊结构的内外表面。对流换热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,设置辐射发射率为

0.85。此外,为模拟真实焊接环境,焊前设置环境温度为 20°C 。每道堆焊层在堆焊后均设置与实际相符的冷却时间,确保堆焊层焊缝温度均降至 150°C 以下后,再开始下一道堆焊。

焊接应力场与变形场计算则将温度场计算结果作为热载荷添加在结构上,并根据实际工件的夹持状态设定为计算过程的约束条件。

2 堆焊过程模拟结果及分析

2.1 温度场分布结果及分析

基于焊接速度 50 mm/min 、峰值电流 90 A 并每隔 30° 进行衰减、基值电流 60 A 、电压 $9.6\sim 10.1\text{ V}$ 的初始堆焊工艺,从起弧点开始堆焊,根据有限元分析模型,提交热学瞬态分析求解后获得温度场计算结果。其中摆动焊的摆动速度为 500 mm/min ,摆幅为 4 mm 。

管焊缝结构在 3 s 、 13.5 s 和 23.5 s 时刻的温度场分布云图如图 7 所示,左侧为不摆动焊状态下的温度场分布云图,右侧为摆动焊状态下的温度场分布云图。在 Abaqus 中,温度场分布云图不同颜色的色阶来体现温度的差异,从深蓝色到鲜红色表示为温度从低到高,灰色区域则表示该区域为熔化状态。可以看出,在焊缝表面,摆动焊和不摆动焊的温度场整体均呈现椭圆状,在热源附近等温线密集,这说明靠近热源附近的温度梯度大,而远离热源则等温线稀疏直至消失。且热源中心前方温度梯度相较于后方更密集,这些都与实际焊接过程的观测接近。在摆动焊时,熔池区域会随着焊枪的摆动发生形状上的变化,熔池区域并不是以一个椭圆斑的形状平移,而是类似于带着尾巴的椭圆形状,且熔池区域存在拉宽的现象。此外,通过对比峰值温度,可以看出在堆焊过程中,不摆动焊的峰值温度始终高于摆动焊的,且与不摆动峰值温度所在点始终处于焊缝中心相比,摆动焊过程中峰值温度随着偏摆会不断变化位置。

全部熔池形貌对比如图 8 所示,可以看出,不摆动焊的熔池截面整体呈椭圆形,而摆动焊的熔池截面呈现波浪形,且在同样线能量下,熔池深度较浅,熔池整体扁平,这是由于堆焊过程中热源中心一直

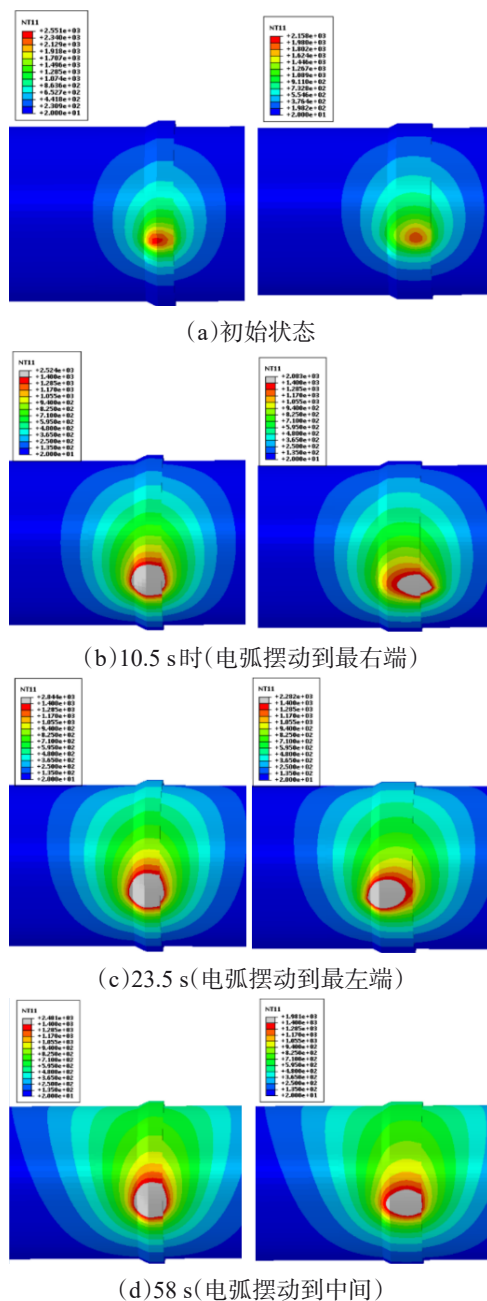


图 7 第一道时温度分布云图

Fig. 7 Distribution of temperature in first weld

在摆动状态,熔池两侧与中间受热相较于不摆动焊更为均衡。通过温度场分析,摆动焊因其温度场分布更均匀等特点,对焊缝成形更有利。

2.2 热循环曲线结果及分析

分别提取摆动焊与不摆动焊状态下,第一道堆焊层中心以及距离中心 2 mm 、 4 mm 、 6 mm 共四个点,对比其热循环曲线,如图 9 所示。可以看出,随着焊接热源中心的靠近,各点的温度迅速上升,摆

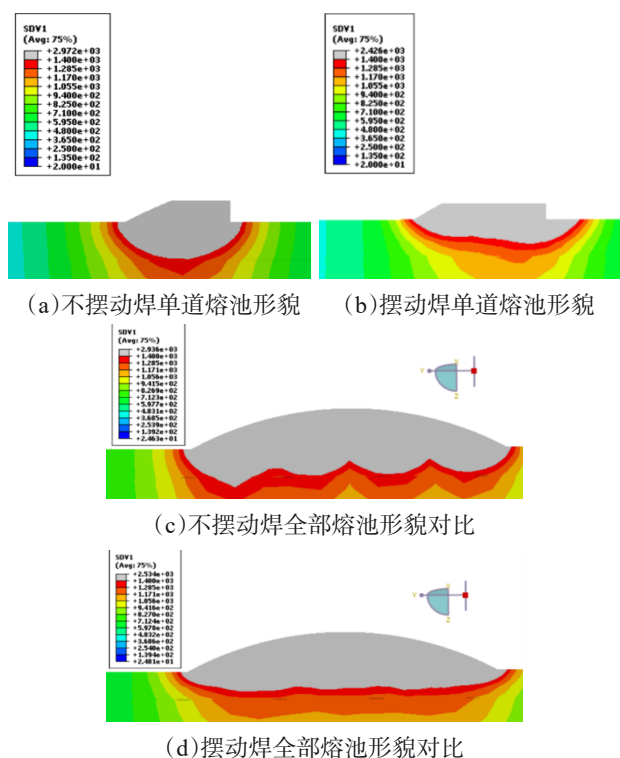


图8 全部熔池形貌对比

Fig. 8 Comparison of all weldpool morphology

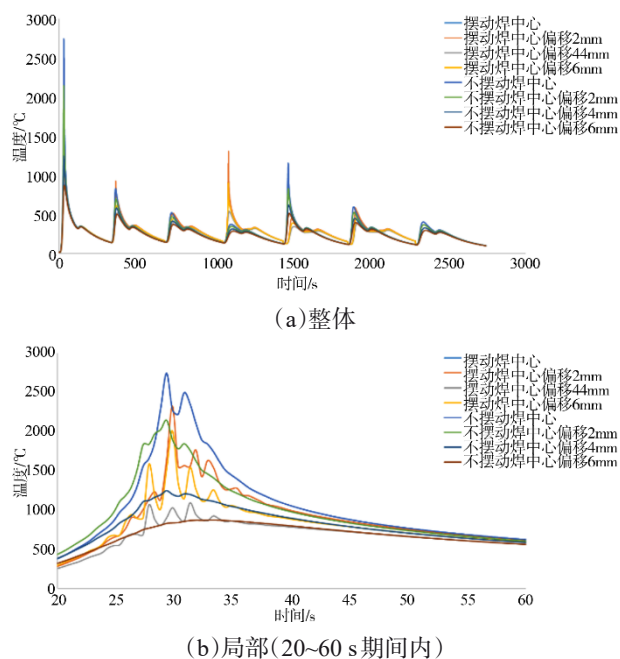


图9 热循环曲线

Fig. 9 Thermal cycle curve

动焊峰值温度约2 500℃,不摆动焊的峰值温度达2 900℃,随着焊接热源中心的远离,各点的温度在较短的时间内快速下降,表明高温状态下散热速度

非常快,但随着温度的降低,散热速度也逐渐降低,这是由于温差较大时,热传导、热对流和热辐射在高温状态下传热较为迅速,而低温状态下传热较为平缓。观察各点热循环曲线,各点均有温度波动,表现为温度先下降一小段时间又迅速升高一小段时间,这是由于脉冲效果造成,但摆动焊的各点在焊接过程中会经历更多次热波动,这是由于摆动焊过程中热源中心的偏摆,造成温度的多次波动。

摆动焊中心峰值明显低于不摆动焊,且沿着焊缝中心向两侧延伸过程中,各点的峰值温度的下降趋势也明显低于不摆动焊;同时,观察各点在周期历程的下降趋势,也能看出摆动焊状态下各点温度下降趋势也明显低于不摆动焊。这些都表明摆动焊相对于不摆动焊,熔池区域的温度分布和温度下降趋势都更平缓,这些因素会直接影响到焊缝微观组织及其力学性能。

2.3 焊接残余应力分布云图结果及分析

将温度场求解结果导入应力及变形分析模型后,通过热-力顺序耦合的方式进行残余应力及焊接变形的分析计算。

建立以管轴向为轴向方向的坐标系,焊后残余应力分布状态如图10所示。Von Mises等效应力结果表明摆动焊与不摆动状态下,应力集中区域集中于堆焊层两侧与母材接触的热影响区,同时,原管道的等效应力水平较低。其中摆动焊最大应力为288 MPa,不摆动最大应力为302 MPa,均超过奥氏体不锈钢的屈服强度,焊后冷却过程中均产生的一定的塑性形变。其中,热影响区的残余应力大于焊缝区域,这可能是因为焊缝区域晶粒生成大晶粒,长大的晶粒消除了焊缝区的部分残余应力,导

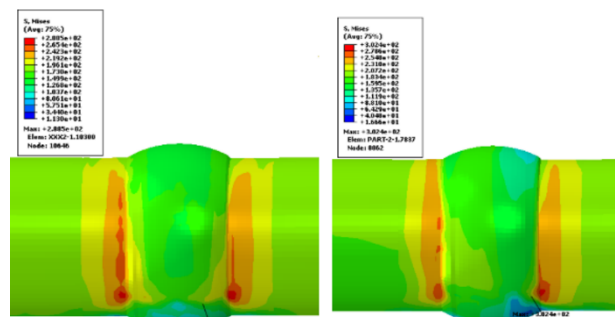


图10 应力分布云图

Fig. 10 Distribution of stress

致焊缝区的残余应力低于热影响区^[11-12]。

分别从母材、热影响区、焊缝、热影响区、母材进行选点,比较摆动焊和不摆动焊的应力分布,如图 11 所示。

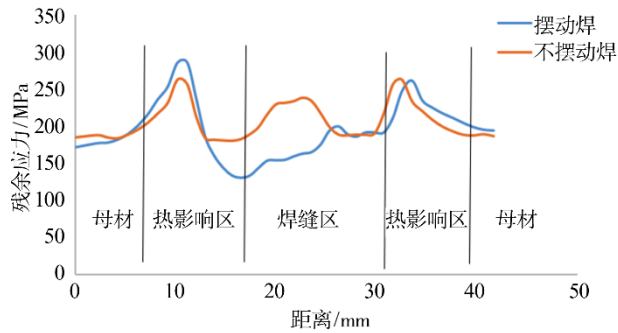


图 11 应力曲线对比

Fig. 11 Comparison of Stress curve

由图可知,热影响区的残余应力明显高于母材和焊缝区,且摆动焊的残余应力整体略低于不摆动焊,这是由于摆动焊过程温度分布和温度下降过程更为均匀,由焊接冷却造成的热应力更小,最终使得整体残余应力水平降低。

2.4 焊接变形结果及分析

柱坐标系下焊接变形如图 12 所示,计算结果显示采用堆焊工艺进行管焊缝结构修复时变形不明显,最大偏移仅为 0.23 mm,位于支管上端,母管及堆焊层区域变形较小。

变形结果显示管堆焊过程中最大变形量均不超过 1 mm,其中不摆动焊最大变形量为 0.6 mm,摆动焊最大变形量为 0.50 mm。其中,管道整体有向焊缝收缩的趋势,不摆动焊轴向(Y方向)最大收缩量为 0.53 mm,摆动焊轴向最大收缩量为 0.46 mm, X方向与 Z 方向变形量较为接近。

3 组织分析

摆动焊和不摆动焊截面金相组织形貌如图 13、图 14 所示。其中图 13a 为采用摆动焊后的宏观金相形貌,图 13b、13c 为熔合线和层间微观形貌。由图可知,摆动焊后,金相组织在熔合线和层/道间表现为典型的铸态柱状晶组织,单道焊内部为细小的等轴晶组织。不摆动焊时的焊缝组织形貌具有显著的柱状晶组织特征,尤其在母材熔合线附近和层

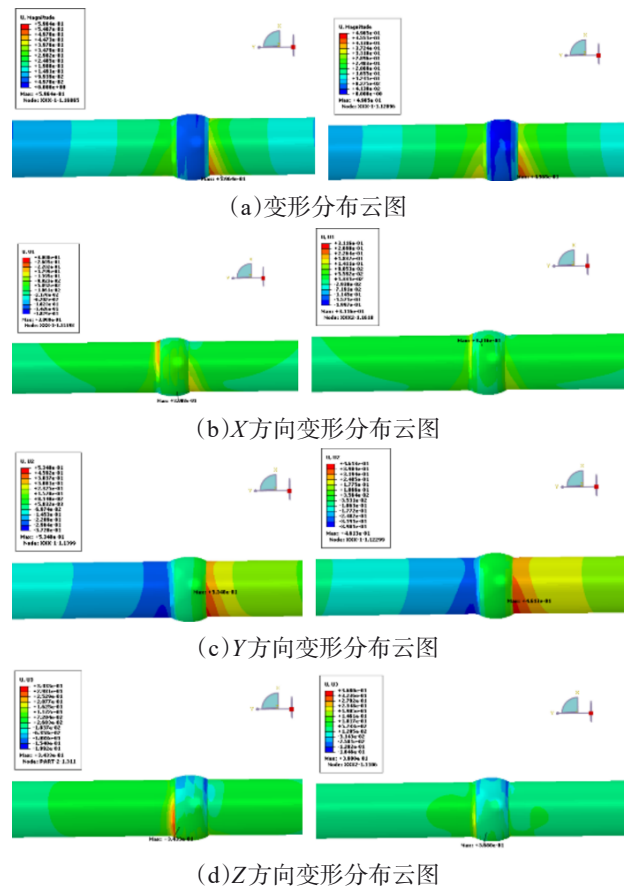
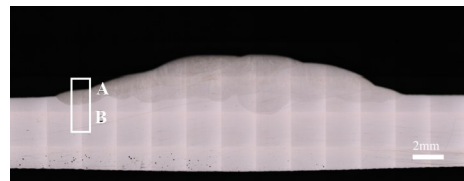
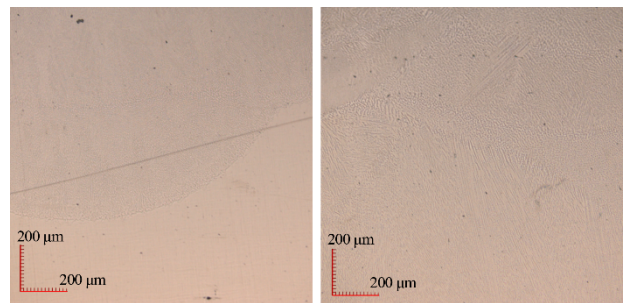


图 12 变形分布云图

Fig. 12 Distribution of deformation



(a) 摆动焊宏观金相形貌



(b) 熔合线区域(B区域)

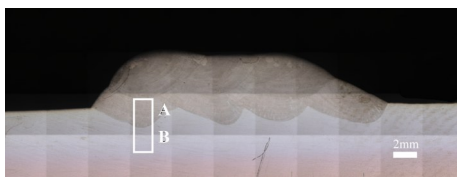
(c) 层间区域(A区域)

图 13 摆动焊焊缝金相形貌

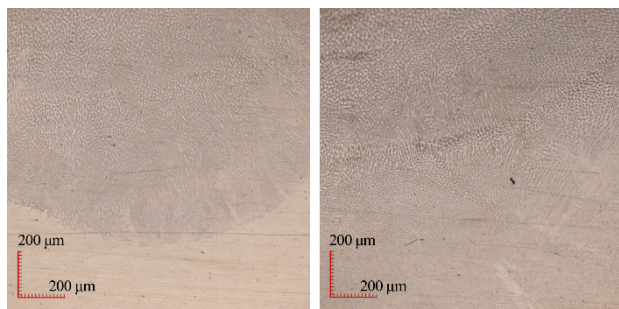
Fig. 13 Metallograph of swing welding

间区域更为显著。柱状晶组织在焊缝的比例高于摆动焊情况。分析认为,摆动焊过程中,热源在沿

焊缝前进方向的同时垂直于焊缝做往复运动,加强了熔池流动和搅拌作用,使得焊缝凝固过程中的枝晶破碎,抑制了柱状树枝晶的进一步长大,另一方面,通过焊枪摆动,加快了熔池传热传质,减小合金元素偏析,利于等轴晶的形成,从而扩大焊缝区域等轴晶的组成比例,可实现焊缝的细晶强化,与热循环分析结果具有良好的一致性。



(a)不摆动焊宏观形貌



(b)熔合线区域(B区域)

(c)层间区域(A区域)

图14 不摆动焊焊缝金相形貌

Fig. 14 Metallograph of no-swing welding

摆动和非摆动两种焊接策略下焊缝区域的显微硬度测试对比如图15所示,结果表明,摆动焊后焊缝显微硬度大于非摆动焊情况,与组织分析结果具有良好的一致性,即焊缝晶粒细小使得硬度提高。表明,在焊材、母材、焊接电参数等一致的情况

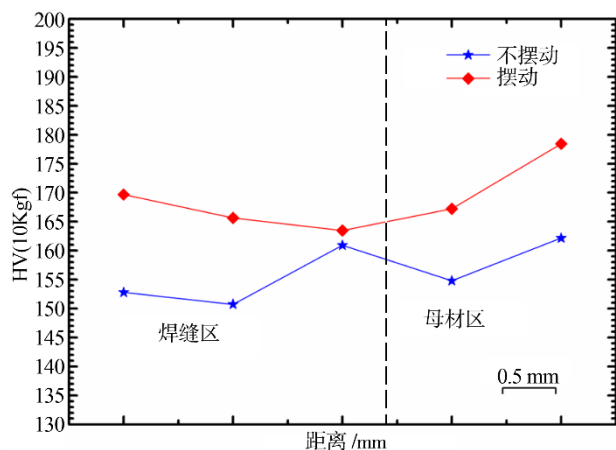


图15 显微硬度分布

Fig. 15 Distribution trend of microhardness

下,可通过摆动焊强化焊缝接头。

4 结论

本文基于Abaqus有限元仿真软件,建立了管堆焊的有限元模型,基于热弹塑性法和热-力耦合的方式模拟了堆焊过程,对比分析了摆动焊与不摆动焊温度场、残余应力及焊接变形的分布规律,最后通过金相分析掌握了焊缝区域的组织特点,得出了如下结论:

(1)温度场模拟结果表明摆动焊过程温度云图呈拉长状态,且其熔池形状相较于不摆动焊的均匀椭圆形状,下表面呈现波浪状态且更为平缓,同时摆动焊的峰值温度低于不摆动焊,在焊接过程各点的热波动次数更多,且温度下降趋势更平稳。

(2)残余应力与变形结果表明,摆动焊的残余应力和变形量低于不摆动焊。

(3)金相组织分析结果表明,焊缝熔合线和层/道间均表现为典型的铸态柱状晶组织,单道焊内部为细小的等轴晶组织,采用摆动焊策略,能够细化并提高焊缝等轴晶组织比例,提高显微硬度,改善接头性能。

参考文献:

- [1] 熊志亮,匡艳军,刘飞,等.核电机组Overlay堆焊修复技术的典型应用分析[J].电焊机,2022,52(11):43-51. XIONG Z L, KUANG Y J, LIU F, et al. Analysis of Typical Applications of Weld Overlay for Nuclear Power Units [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52 (11): 43-51.
- [2] 徐少峰,柏忠炼,叶义海,等.核级支管座焊缝结构堆焊修复数值模拟及分析[J].电焊机,2021,51(5):34-41. XU S F, BAI Z L, YE Y H, et al. Numerical simulation and analysis on overlay weld repair of structure of nuclear-grade weldolet weld [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(5): 34-41.
- [3] 张华军,张广军,蔡春波,等.摆动焊接动态过程温度场数值模拟[J].焊接学报,2008(02): 69-72+76+116. ZHANG H J, ZHANG G J, CAI C B, et al. Numerical simulation on temperature field of dynamic welding processing with weaving [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2008(02): 69-72+76+116.

- [4] Biradar N S, Raman R. Grainrefinement in Al-Mg-Si alloy TIG welds using transverse mechanical arc oscillation [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2012, 21(11): 2495-2502.
- [5] 宋树崎, 刘仁培, 赵文勇, 等. 槽焊接头摆动焊热过程与残余应力的数值分析[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2019, 283(05): 17-22.
- SONG S Q, LIU R P, ZHAO W Y, et al. Numerical analysis of thermal process and residual stress in swing welding of groove welded joints[J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2019, 283(05): 17-22.
- [6] 曹杰, 邓克剑, 李敏, 等. 核电站钢结构焊接仿真模拟进展分析[J]. 山西冶金, 2023, 46(04): 76-78.
- CAO J, DENG K J, LI M, et al. Progress Analysis of Welding Simulation for Steel Structures in Nuclear Power Plants [J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(04): 76-78.
- [7] 葛可可. 核电蒸汽发生器安全端异种钢焊接残余应力研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- GE K K. Study on welding residual stress of dissimilar steel at safety end of nuclear steam generator[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [8] 迟锁进, 李自良, 李春妹, 等. 考虑相变的Q345钢焊接残余应力的数值模拟[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(11): 103-107.
- CHI S J, LI Z L, LI C M, et al. Numerical Simulation of Welding Residual Stress in Q345 Steel with Phase Transformation [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(11): 103-107.
- [9] 莫春立, 钱百年, 国旭明, 等. 焊接热源计算模式的研究进展[J]. 焊接学报, 2001(03): 93-96+101.
- MO C L, QIAN B N, GUO X M, et al. The Development of Models about Welding Heat Sources' Calculation [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2001(03): 93-96+101.
- [10] 谷京晨, 童莉葛, 黎磊, 等. 焊接数值模拟中热源的选择原则[J]. 材料导报, 2014, 28(01): 143-146.
- GU J C, TONG L G, LI L, et al. Selection Criteria of Heat Source Model on the Welding Numerical Simulation [J]. Materials Reports, 2014, 28(01): 143-146.
- [11] 白庆伟, 麻永林, 邢淑清, 等. 核压力容器SA508Gr4钢焊接热影响区微区转变及残余应力分布[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(4): 200-206.
- BAI Q W, MA Y L, XING S Q, et al. Subzone evolution and residual stress distribution in welding heat-affected zone of steel SA508Gr4 of nuclear pressure vessel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(4): 200-206.
- [12] 俞颖, 张巍. 低合金钢焊接接头热影响区补焊残余应力模拟[J]. 中国特种设备安全, 2012(8): 40-43.
- YU Y, ZHANG W. Numerical Simulation on Repair Welding Residual Stress for Low Alloy Steel Welded Joint [J]. China Special Equipment Safety, 2012(8): 40-43.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>