

厚板埋弧焊接头焊后感应热处理应力场的数值分析

王云,梁民航,赵朋成,王璐璐
(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:使用 ANSYS 软件建立厚板埋弧焊接头的热-力数值分析模型,计算焊接过程中接头的瞬态温度场和应力场分布,分析焊后感应热处理对残余应力的影响。将模拟计算所得的熔池轮廓和残余应力数据与实测厚板焊后值进行对比,验证模型的可靠性。结果表明:焊后厚板埋弧焊接头处的残余应力以拉应力为主,最大残余应力存在于焊缝处,数值为 233 MPa;焊后感应热处理后,焊接接头处焊缝区残余应力下降最为明显,下降至 160 MPa,减小 30%。

关键词:厚板;埋弧焊;感应加热;焊后热处理;残余应力

中图分类号:TG404 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)02-0049-03

Numerical Analysis of Residual Stress Fields in Submerged Arc Welded Thick-plate Joints after Post-weld Heat Treatment by Induction Heating

WANG Yun, LIANG Minhang, ZHAO Pengcheng, WANG Lulu

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: A thermal mechanical numerical model is established by ANSYS for thick-plate submerged arc welded joints to calculate the transient temperature and stress fields during welding process and to analyze the effects of post-weld heat treatment by induction heating on residual stress fields. Weld pool profile and residual stress data calculated in simulation are compared with measured one, which verifies the reliability of the model. The results show that the residual stress at the thick-plate submerged arc welded joints is chiefly composed by residual tensile stress, and the maximum stress exists at the weld seam with a value of 233 MPa. After induction heat treatment, the most significant decrease of the residual stress occurs in the weld area of the welded joint, descending to 160 MPa with an overall decrease of 30%.

Keywords: thick-plate; submerged arc welding; induction heating; post-weld heat treatment; residual stress

0 引言

机械、桥梁、船舶等工程制造项目中常用到厚度超过 20 mm 的厚板钢,一般使用埋弧焊成形。厚板钢在进行埋弧焊时,由于焊接时瞬时温度非常高,焊接接头与母材区形成较大的温差,使厚钢板焊件中存在较大的残余应力,严重影响厚板钢结构的使用性能,在实际的生产中常用焊后热处理来消除焊接结构中的残余应力^[1]。

与目前工程中常用的电阻和火焰加热等热处理方式相比较,感应加热具有能量利用率高、温度控制精确等优点。利用感应加热进行 >25 mm 的厚壁焊缝的焊后热处理加热,热处理效果更佳^[2]。此外,感应加热能够实现焊接结构的局部热处理,降低加热成本,提高加热生产效率。

多数学者采用实验方法来研究焊接工件中的残余应力^[3],然而常规的试验研究无法得到厚板内部的应力分布。计算机技术的发展使得利用模拟软件来研究焊接或热处理过程中工件内部的残余应力分布变得相对容易。张磊等^[4]模拟了双丝窄间隙埋弧焊接过程,指出双丝焊具有较大的熔敷率,焊接时电流波动对侧壁熔合区几乎无影响。DI LUOZZO N 等^[5]分析了感应加热碳钢管工件

的过程,通过调整参数,得到工件表面和内部温度随感应加热工艺参数不同而变化的规律,为感应加热工艺参数的选取提供了依据。然而,大多数学者只是单独地对埋弧焊热过程或者感应加热过程的温度场和应力场进行分析,并未涉及焊接后立即用感应加热进行焊后消应力热处理的研究,构建一个焊接后立即消应力的焊后热处理数值模型具有十分重要的工程应用价值。

本文使用 ANSYS 软件,建立 25 号钢的热-力数值分析模型,研究埋弧焊焊接 25 号厚板钢的温度场与应力场的分布规律以及焊后感应消应力热处理后工件的残余应力分布及变化,并分析产生变化的机理。

1 数值分析模型的建立

1.1 埋弧焊热-力模型

以尺寸 700 mm×130 mm×40 mm 的 25 号钢的埋弧焊为研究对象,建立了焊接过程的热-力耦合模型,坐标系统的设置如图 1 所示。所用焊接电流为 647 A,电弧电压为 32.9 V,焊接速度为 3.7 mm·s⁻¹,取热输入效率为 0.9^[6]。所用材料的各项参数详见文献[7]。

采用 ANSYS 进行模拟,热分析使用 solid70 单元,结构分析使用 solid185 单元。焊接接头处网格划分密集,以适应该处温度较高且瞬时变化较大。本文使用的热源是双椭球热源^[8],如图 1 所示,计算时,焊缝区采用生死单元,且只考虑工件表面与空气的对流换热。

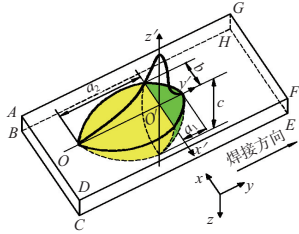


图 1 双椭球热源模型

1.2 感应热处理模型

本次研究主要针对焊后感应热处理对于降低厚板钢工件内部残余应力的作用效果,所以热处理温度是关键。采取的方法是将感应加热热处理随时间变化的温度作为热载荷作用在焊接接头上,以此来对焊后感应热处理应力场的分析。

焊后感应热处理时,将直径为 26 mm 的感应电缆缠绕成椭圆平面线圈,水平固定在焊缝所在的工件表面,如图 2 所示。热处理工艺为:焊后立即用保温棉包裹工件,感应加热至 550 °C,保温 2 h,然后冷却至 200 °C 解开保温棉空冷。感应加热参数分别是:功率为 1.5 kW,电流为 49.5 A,频率为 10.6 kHz。



图 2 感应加热线圈缠绕方式

2 结果与讨论

2.1 焊接温度场

利用所建立的热-力学模型,计算获得了厚板埋弧焊平板堆焊瞬态温度场。图 3 给出了埋弧焊焊接厚钢板过程中温度场随时间变化情况。可以看出,焊接刚开始时熔池尺寸随焊接的进行慢慢变大,在 8 s 后尺寸基本不再改变,稳定后的熔宽、熔深分别为 26 mm 和 8 mm。焊接熔池跟随焊接热源移动,熔池内最高温度为 1 800 °C,焊接接头处的温度梯度由大到小依次为焊缝区、热影响区和母材区。

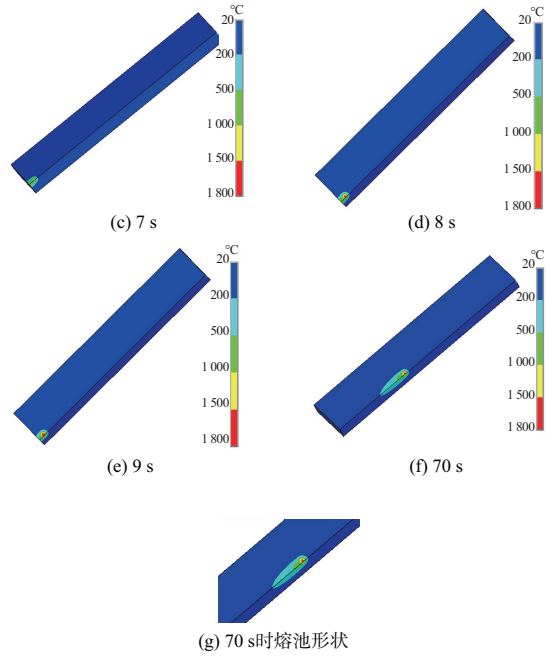
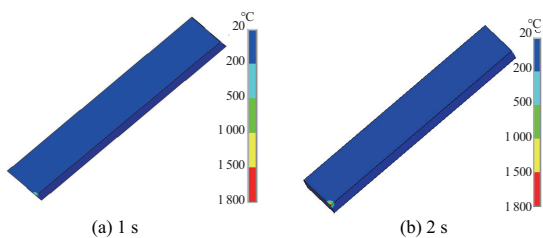


图 3 焊接接头瞬态温度分布

2.2 焊接应力场

经过计算得到了平板埋弧堆焊的瞬态应力场,图 4 给出了焊接过程等效应力场随时间变化的瞬态分布。结果表明:焊接过程中熔池内为液体,几乎没有等效应力;焊接等效残余应力最大的区域是焊缝处,为 251 MPa。从图 4(d)可以看出,焊接接头冷却至室温,距离焊缝中心越远的区域,等效残余应力数值越小。接头处等效残余应力数值由高到低依次为焊缝区 233 MPa、热影响区 189 MPa、母材区 51 MPa,焊缝区出现应力集中较为严重。

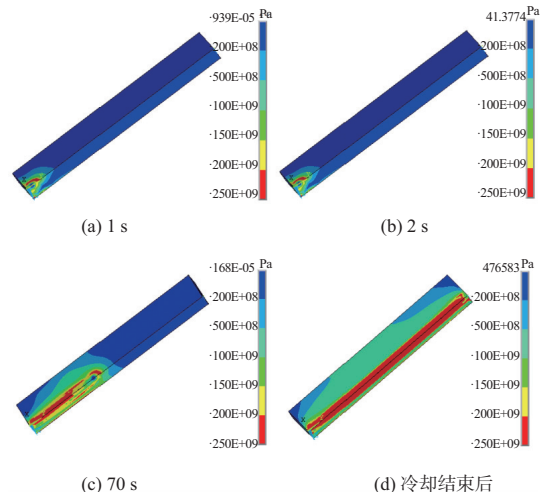


图 4 焊接接头瞬态等效应力分布

图 5(a)、图 5(b)分别为最终冷却结束后焊缝残余应力沿 x(垂直于焊缝方向)及 z 方向(熔深方向)的分布。由图 5(a)可知,残余应力在焊缝中心处最大,为 233 MPa。原因是焊缝中心温度最高,所以热应力最大。从焊缝区向母材方向温度逐渐降低,焊缝区的高温通过工件材料的热

传导将热量传递给母材区,离焊缝中心区域越远,温度越低,热应力越小,热应力减小的速率随之减小。此外,焊缝中的约束应力最大,热影响区和母材区的较小,这是因为焊缝区产生的变形比热影响区和母材区大得多^[1]。

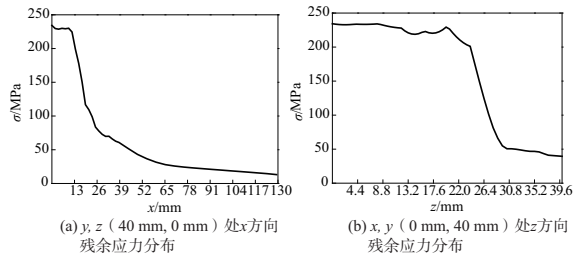


图5 焊后残余应力沿x、z方向分布

从图5(a)中可知,在点(20 mm、40 mm、0 mm)处的残余应力迅速降低,因为此区域处于焊接接头与母材区的交界处,焊接过程中,焊接接头的温度较高,比母材区的温度高得多,因此接头处的应力集中比母材严重很多,残余应力也比母材区大很多,所以二者之间存在很大的残余应力梯度。

由图5(b)可知,从z轴方向上看,等效残余应力在厚板表面一段距离内开始变化不大,之后迅速减小,在厚板的底部趋于稳定,在z方向0~20 mm内,残余应力稳定在220~240 MPa左右,在21~29 mm内急剧下降,在30~40 mm范围内趋于稳定。这是由于焊接时在z轴方向上温度梯度分布不均匀,图3中温度梯度先由1 800℃极速降到1 000℃,再由1 000℃降到500℃以内,最终稳定在室温。温度梯度逐渐减小,温度梯度变化速率先稳定再急剧减少,最终再趋于稳定。

2.3 焊后感应热处理应力场

焊接完成后立即进行感应加热消应力热处理,计算热处理后工件的残余应力分布。图6给出了感应后热处理过程中不同时刻工件的应力分布。比较图6(d)和图4(d)可以看出,感应热处理后,焊缝区的最大残余应力从233 MPa减小到160 MPa,热影响区的从189 MPa下降至135 MPa,母材区的从51 MPa下降至37 MPa,母材区下降幅度相对较小。由此可以看出,本文所设计的感应加热后热处理工艺能够明显降低工件中的残余应力。

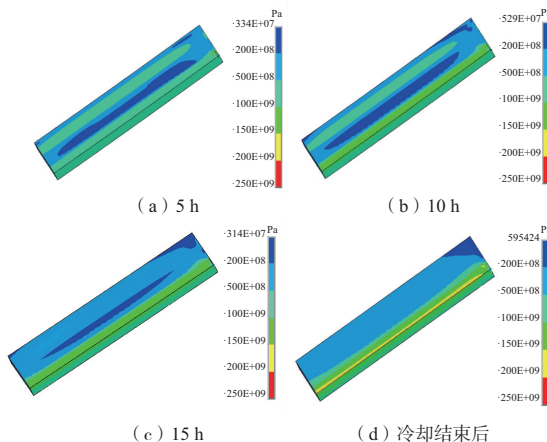


图6 感应加热过程中的等效应力分布

图7为焊后感应热处理前后不同方向等效残余应力对比。由图7(a)可知,在x轴方向上焊后感应热处理前后的残余应力分布曲线走向基本相同。焊缝区的最大残余应力在热处理后减小至160 MPa,比较热处理前降低了30%。这是因为感应热处理时,工件温度升高,屈服强度变小,从而使残余应力降低^[9]。由图7(b)可知,在z方向21 mm处,热处理前焊后工件中最大残余应力值为230 MPa,经过热处理后下降到90 MPa,最大降低了60%。由此证明,感应焊后热处理工艺能够有效消除残余应力。

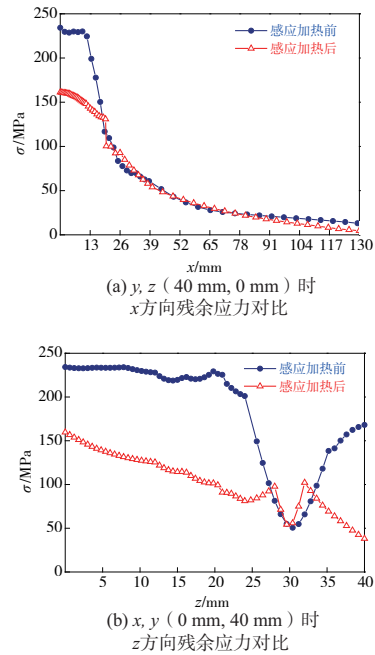


图7 感应加热前后残余应力对比

3 实验验证

埋弧焊接实验使用MZ-1000埋弧焊机,焊接材料与参数跟数值分析中所使用的一致。焊后横向剖开焊道,利用OLS4100激光共聚焦显微镜观察焊件熔池形状,获得焊缝轮廓,如图8所示。从图中可以看出,试验所得熔池宽度与计算值基本一致,但熔深有一定的误差,模拟值较实测值略小。这可能是因为模拟时忽略熔池内液体流动所致。

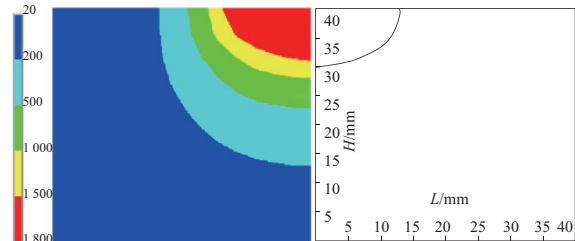


图8 实验与模拟熔池轮廓对比

(下转第56页)

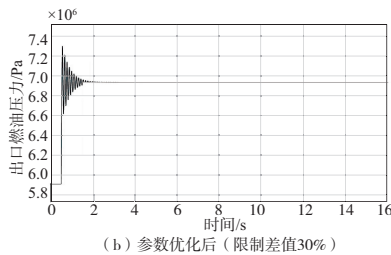


图8 出口燃油压力响应曲线

5 结语

1) 燃油计量装置是一个闭环控制系统,通过对非线性方程的线性化,利用闭环特征方程的根轨迹以及基于李雅普诺夫函数和遗传算法的多参数稳定性设计方法分析其稳定性是可行的。

2) 适当增大等压差活门和执行活门的弹簧刚度 k_d 、 k_z 的值,可以改善稳定性,但是会增大稳态误差,所以参数设计中要考虑两者的平衡。

3) 节流孔 a_6 是对稳定性有重要影响的参数,且当前设计值(孔面积)处于不合理的区域。节流孔 a_2 和 a_3 对稳定性的影响不显著;增大节流孔 a_5 和 a_7 能改善稳定性,但是不建议增大太多,因为会导致回油流量损失。

4) 利用李雅普诺夫稳定性理论,研究了多个设计参数同时作用时对系统稳定性的影响,并利用 MATLAB 的工具包 Optimization 中的遗传算法进行寻优,得到优化后的设计参数,提高了系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 廖光煌,黄金泉. 某型涡轴发动机数控系统的机械液压备份控制方案研究[J]. 航空动力学报,2015,30(11):2713-2720.
- [2] ZHANG S J. A simplified real-time engine model for developing aeroengine control system[C]//28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Nashville, TN. Reston, Virginia; AIAA, 1992.
- [3] 余玲,叶志锋. 航空发动机燃油计量装置的 AMESim 建模[J]. 现代机械,2014(5):26-29.
- [4] 周立峰. 发动机燃油计量装置特性仿真与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [5] 李洪胜,王曦,王华威,等. 压差控制器的稳定性分析和设计参数的研究[J]. 航空发动机,2016,42(3):12-16.
- [6] 高强,宋玉川,王睿,等. 高速开关阀控液位置伺服系统自适应鲁棒控制[J]. 航空动力学报,2019,34(2):503-512.
- [7] 黄妮,杜光超,戴作强,等. 液压约束活塞发动机的流量脉动仿真分析[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):75-77,90.
- [8] 田军南,谭光兴,冯楚楚,等. 基于 Lyapunov 理论的线控转向系统稳定性分析[J]. 机械设计与制造,2020(12):34-38,43.

收稿日期:2021-10-28

(上接第 51 页)

使用 ASM2-3-X 旋钮式应力检测仪检测焊接完成后工件内部的残余应力,共测 4 个点,分别距离焊缝中心 0 mm、16 mm、18 mm、70 mm。图 9 是实验测得的残余应力数据与数值分析结果的对比,二者的相符程度较好。因此,模拟分析结果可以较为准确地表征焊接过程及热处理效果。

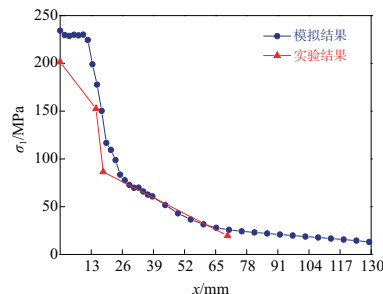


图9 实验与数值分析残余应力对比

4 结语

1) 在本研究所确定的焊接参数下(焊接电压为 32.9 V,焊接电流为 647 A),埋弧焊焊接时焊缝中心的温度最高,可达到 1 800 ℃,熔宽和熔深分别为 26 mm 和 4 mm,与试验结果基本符合。

2) 焊接接头处的焊后残余应力主要是拉应力,焊缝区最大残余应力值为 233 MPa,热影响区值为 189 MPa,母材区值为 51 MPa。

3) 焊后感应热处理工艺能明显地消除接头处的残余

应力。在本文制定的工艺下(热处理温度 550 ℃,保温 2 h,缓冷至 200 ℃后空冷),焊缝区最大残余应力值为 160 MPa,热影响区值为 135 MPa,母材区值为 37 MPa,焊缝区残余应力减小最多,达到 30%。

参考文献:

- [1] 修磊,吴杰峰,沈旭. 316LN 不锈钢焊后热处理工艺及对残余应力的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(5):67-71.
- [2] 卢新生,郭新芳,万夫伟,等. 不同加热方法对大径厚壁 P91 管道焊后热处理温度分布的影响[J]. 焊接技术,2019,48(增刊1):44-46.
- [3] 刘川,沈嘉斌,陈东俊,等. 大厚板内部焊接残余应力分布实验研究[J]. 船舶力学,2020,24(4):484-491.
- [4] 张磊,柳长青,于静伟,等. 窄间隙埋弧焊温度场数值分析[J]. 焊接学报,2016,37(3):83-87,132.
- [5] DI LUOZZO N, FONTANA M, ARCONDO B. Modelling of induction heating of carbon steel tubes; mathematical analysis, numerical simulation and validation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012,536:S564-S568.
- [6] 宗峰,霍光瑞,吴松林. 双丝埋弧焊工艺焊接温度场模拟分析[J]. 材料开发与应用,2016,31(4):51-56.
- [7] 郝子龙,石光林. 基于 ANSYS 的平板堆焊凝固过程的应力分析[J]. 广西科技大学学报,2016,27(1):54-57.
- [8] 王波,郭顺,蔡雅君. 高氮钢 TIG 焊接数值模拟及组织性能分析[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):25-28.
- [9] 陈爱国,耿军,黄亚军,等. 大型管板结构焊接残余应力的预测与消除[J]. 热加工工艺,2020,49(11):136-141,146.

收稿日期:2020-12-17