船板钢大线能量焊接过程有限元模拟

李国庆¹, 王知行¹, 郭福建^{1,2*}, 刘文乐¹, 张 盼², 张宇鹏³, 邵丹丹⁴, 王学林¹

¹阳江合金材料实验室,广东 阳江 ²广东海洋大学材料科学与工程学院,广东 阳江 ³广东省科学院中乌巴顿焊接研究所,广东 广州 ⁴中船黄埔文冲船舶有限公司,广东 广州

收稿日期: 2025年4月2日; 录用日期: 2025年5月5日; 发布日期: 2025年5月15日

摘要

船板钢的大线能量焊接技术是推动海洋工程发展的关键技术。准确预测不同焊接参数下的温度、应力变化,对焊接工艺的制定和优化有重要的指导意义。本文基于ABAQUS有限元软件,建立了三维有限元焊接模型,对EH36船板钢单丝300 kJ/cm大线能量焊接过程中的温度场和应力场进行了计算。结果表明,随着焊接速度提高,热影响区温度降低,焊缝和热影响区缩小;残余应力的数值随焊接速度变化不大,但分布有明显不同。

关键词

船板钢,有限元模拟,温度场,应力场

Finite Element Simulation of High Heat Input Welding Process for Ship Plate Steel

Guoqing Li¹, Zhixing Wang¹, Fujian Guo^{1,2*}, Wenle Liu¹, Pan Zhang², Yupeng Zhang³, Dandan Shao⁴, Xuelin Wang¹

¹Yangjiang Alloy Materials Laboratory, Yangjiang Guangdong

²School of Materials Science and Engineering, Guangdong Ocean University, Yangjiang Guangdong
 ³China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong
 ⁴CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Company Limited, Guangzhou Guangdong

Received: Apr. 2nd, 2025; accepted: May 5th, 2025; published: May 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李国庆, 王知行, 郭福建, 刘文乐, 张盼, 张宇鹏, 邵丹丹, 王学林. 船板钢大线能量焊接过程有限元模拟 [J]. 材料科学, 2025, 15(5): 927-933. DOI: 10.12677/ms.2025.155097

Abstract

The high heat input welding technology for ship plate steel is a key technology driving the development of marine engineering. Accurately predicting the temperature and stress changes under different welding parameters is of great guiding significance for the formulation and optimization of welding processes. In this paper, based on the ABAQUS finite element software, a three-dimensional finite element welding model was established to calculate the temperature field and stress field during the single-wire high heat input welding process (300 kJ/cm) of EH36 ship plate steel. The results show that as the welding speed increases, the temperature in the heat-affected zone decreases, and the weld and heat-affected zone shrink. The value of the residual stress does not change much with the welding speed, but the distribution is significantly different.

Keywords

Ship Plate Steel, Finite Element Simulation, Temperature Field, Stress Field

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC Open Access

1. 引言

大线能量焊接技术作为船舶制造领域的关键突破,在船板钢应用中展现出显著优势。大线能量焊接 通过单道次完成厚板焊接,例如 60 mm 钢板采用 500k J/cm 线能量可单道焊透,而传统方法需 30 道次, 效率提升 10 倍以上。该技术已应用于大型集装箱船、液化天然气运输船(LNG 船)、海上浮式生产储油船 (FPSO)等高端船型建造,显著缩短工期并降低人工和材料成本。然而,大线能量焊接同时也会使得焊接 过程热影响区的热循环发生变化,造成热影响区在高温区域停留时间过长,冷却缓慢,进而导致热影响 区显微组织粗大,降低其力学性能。焊接后的残余应力,也会对接头的性能产生很大影响。因此,了解 板材焊接过程中的应力场和温度场分布,对保证焊接质量,优化焊接工艺参数有很大的指导意义。在这 方面,有限元模拟法有着成本低、速度快的优势,已经成为解决各种焊接工程问题的有效工具。

李矗东等利用能量守恒定理以及傅里叶定律,建立了大线能量焊接热模拟试件的导热微分方程[1]。 杨春牛等利用 Visual-Environment 有限元软件对 30 mm 厚 EH420 船板钢进行三丝埋弧焊接数值模拟研 究,系统地分析了热影响区循环曲线以及熔池的熔深和熔宽变化[2]; 苗玉刚以 SYSWELD 软件为计算平 台,建立了基于固态相变的三维"热-冶金-机械"耦合的多物理场热弹塑性有限元计算方法,对局部 焊接接头结构即 DH36 高强度船板钢多层多道对接焊产生的焊接变形和残余应力进行了数值模拟和试验 分析[3]; 辽宁科技大学[4]的吴志洋对不同厚度的船板钢采用 ANSYS 软件进行气电立焊温度场有限元模 拟,在有限元模拟过程中通过引入潜热以及随温度变化的对流换热系数,使有限元模拟更符合实际焊接 过程;肖笛利用 ANSYS 有限元软件进行大线能量焊接温度场数值模拟,并结合热模拟实验对热影响区 的组织性能进行了研究[5]; Jiao Z 采用 COMSOL Multiphysics 软件进行计算模拟,评估了不同 t8/5 冷却 速率对 AH32 船板钢冲击性能的影响。通过实际焊接试验和冲击性能评价进一步证实了这一理论分析[6]。

大线能量焊接过程的有限元仿真已经有较多的研究,但大部分都是线能量≤ 200 kJ/cm 的模拟,200 kJ/cm 以上的计算模型相对较少,选用的热源也都为单一双椭球热源或者高斯热源模型。本文以

ABAQUS/CAE 有限元软件为平台,以 EH36 船板钢为研究对象,设计了二维高斯面热源 + 三维锥形高 斯旋转体热源组成的复合模型,建立了热输入量为 300 kJ/cm 大线能量焊接的模拟仿真模型,填补了这一 空白,对 EH36 船板钢在焊接过程中的温度、应力变化做出了模拟预报,为船板钢的焊接工艺优化提供 了数据参考。

2. 模型基础参数

2.1. 材料属性

模型选用 EH36 船板钢为焊接材料,其化学成分如表1所示。

 Table 1. Chemical composition of EH36 steel

 表 1. EH36 船板钢化学成分

С	Si	Mn	Ni	Al	Ti	0
0.185%	0.004%	1.520%	0.044%	0.025%	0.001%	0.02%

将材料的化学成分导入 JMatPro 软件,计算得出材料的物理性能,作为模型建立的依据。材料的部 分物理性能如表 2 所示。

Table 2. Physical parameters of EH36 steel 表 2. EH36 船板钢物理参数

温度/℃	密度/(g/cm3)	导热系数/(W/m ² *K)	杨氏模量/(GPa)	泊松比	比热/(J/(g*K))
25	7.83764	73.08558	212.21216	0.28887	0.44831
200	7.80408	58.29024	202.92867	0.29565	0.51983
500	7.69795	39.01823	172.30304	0.30778	0.70593
1000	7.55108	29.09759	107.06753	0.35163	0.62551
1500	7.15111	34.63277	3.35512	0.41409	5.29562

2.2. 几何模型和边界条件

模拟件尺寸为100mm*100mm*60mm,考虑到焊缝的对称性,出于提高计算效率考量,采用半模型进行计算,仅考虑外表面散热,焊缝内设为绝热面。

采用 ABAQUS 软件的建立焊缝的三维有限元模型,网格属性采用八结点热耦合六面体单元,减缩积分(C3D8RT),模拟钢板焊接过程中钢板的内部传热和对外散热过程。由于焊缝区温度梯度较大,为保证计算的准确性,对焊接接头进行切分并进行精细化网格划分,在远离焊缝的母材部分采用较为粗大的网格划分,以此提高计算效率[7]。

出于计算需求,对焊接过程做出如下加热:材料连续介质且各向同性;焊接过程视为准稳态过程; 材料热物理性能随温度的变化而变化;考虑熔化和凝固潜热,忽略汽化潜热;不考虑熔池的动力学行为 和冶金反应。在此基础上,进一步对边界条件进行设定,环境温度和焊板初始温度为 25℃,焊接速度 6 cm/min,焊接线能量为 300 kJ/cm。

3. 热源模型

在焊接过程的模拟仿真中,热源模型的选择非常重要。热源模型的准确度和精准度直接影响温度场、

应力场分析的准确性。目前较为常用的热源模型是高斯面热源模型,作为一种基于二位高斯分布的函数, 高斯面热源模型的特点是能精确模拟表面热输入分布,数学形式简单,计算速度快,内存占用低,很适 合大规模或者长时间的焊接模拟。但是其缺点也很明显,无法模拟深度方向的热源变化。因此,本文采 用二维高斯面热源+三维锥形高斯旋转体热源组成的复合模型,通过参数耦合提升整体计算精度。

复合热源模型中,高斯面热源某一点(x,y)的热流密度 $q_1(x,y)$ 方程如下所示:

$$q_1(x, y) = \frac{a * Q_s}{\pi * r_s^2} * \exp\left(-a * \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{r_s^2}\right)$$

式中,前半部分为热源幅值系数,控制热流密度的整体强度。后半部分为指数衰减项,描述热源从中心向外的空间衰减特性;参数 *a* 为热源集中度系数,数值越大能量越集中于中心;*Q*_s 为热输入功率,由焊接工艺参数计算所得;*r*_s 为热源作用半径,直接影响热影响区范围;*x*₀、*y*₀ 为实时更新的热源中心实时坐标,对应焊接路径位置。

三维锥形高斯旋转体热源中某一点 q2(x,y,z)的热源密度为:

$$q_{2}(x, y, z) = \frac{6 * Q_{v} * \left[H - b(z_{0} - z)\right]}{\pi * r_{v}^{2} * H^{2} * (2 - b)} * \exp\left(-3 * \frac{\sqrt[2]{(x - x_{0})^{2} + (y - y_{0})^{2}}}{r_{v}^{2}}\right)$$

类似的,前半部分体现了二维高斯分布的径向衰减特征,后半部分在二维面热源的基础上引进了 z 轴方向的线性变化参数 b,控制热流沿着深度方向的变化; r_v为热源作用半径; H 为热源有效深度,代表热源在 Z 轴方向上的作用范围; x₀、y₀、z₀为热源中心实时坐标; Q_v为体热源输入功率,需满足 Q_v和 Q_s之和等于热源总功率,满足能量守恒定律。

4. 结果分析

4.1. 模拟结果



Figure 1. Comparison of weld shape and parameters between the calculated results and the actual welding results (a) Schematic diagram of welding process simulation; (b) Actual weld profile; (c) Simulated weld profile; (d) Comparison between the actual welding results and the simulation results

图 1. 计算结果与实际焊接结果的焊缝形状及参数对比; (a) 焊接过程模拟示意图; (b) 实际焊缝剖面图; (c) 模拟焊 缝剖面图; (d) 实际焊接结果与模拟结果对比

在上述条件下,对 EH36 船板钢大线能量焊接过程进行了有限元模拟计算,通过对比有限元计算结果与实际焊接结果的焊缝熔池参数验证模型的可靠性,计算结果如图 1(a)所示。

经 JMatPro 软件计算,此种化学成分下 EH36 船板钢的熔点为 1515℃,以此温度为融合线与热影响 区之间的临界温度。为更好的比对计算结果与实际结果的误差,分别对熔池上表面宽度、厚度方向 1/2 处 熔池宽度和此处的热影响区宽度进行对比。考虑到有限元计算结果为半模型建模,因此如图 1(b)所示, 熔池的上表面宽度用 2a 表示, 1/2 处宽度用 2b 表示; c 代表 1/2 处热影响区宽度。经过测量,实际焊接 过程中, a 为 18 mm, b 为 14 mm, c 为 11 mm; 图 1(c)为模拟计算结果,其中 a 为 16.3 mm, b 为 14.8 mm, c 为 10.7 mm。图 1(d)为对比结果, a、b、c 三个位置的误差分别为 9.4%、5.7%和 2.7%,误差均在 10%以内,在可接受范围之内,说明模型具备准确性,有一定参考价值。

4.2. 焊接速度对热影响区温度场、应力场的影响

焊接工艺对焊接质量有着非常大的影响[8],在原有的6 cm/min 焊接速度基础上,增加焊接速度至9 cm/min,其他条件不变,以研究焊接速度对焊接过程热影响区位置温度场、应力场的影响。选取焊件中部热影响区相同位置点的热循环曲线来分析焊接温度场[9] [10]。

如图 2(a)所示,随着焊接速度的提高,在热源功率不变的情况下焊接线能量降低,热影响区的温度 峰值也随之降低。在焊接速度为6 cm/min 的情况下,热影响区的最高温度为1390℃。焊接速度为9 cm/min 时,同一个参考点更快达到温度峰值,但峰值温度仅为950℃。在较低的焊接速度下,热影响区温度升高, 高温停留时间较长,会导致焊接接头力学性能降低。





图 2(b)为两种不同焊接速度下,焊缝剖面 a、b、c 三个值的对比。在 9 cm/min 的焊接速度下,焊缝 宽度明显缩小。上表面宽度的半值 a 由 16.3 mm 降低至 12.3 mm,降低了 24.5%;厚度方向 1/2 处焊缝宽 度的半值由 14.8 mm 降低至 10.5 mm,降低了 29.1%。相比之下,热影响区宽度的降低则较为有限,由 10.7 mm 降低至 9.6 mm,仅降低了 10.3%。

应力方面,依照第四强度理论,采用米塞斯应力(S.Mises)来反应焊接后焊件的应力状态。图 3 为两种不同焊接速度下,焊板冷却至室温后,俯视角下的应力分布云图。



Figure 3. Stress contours at different welding speeds (a)v = 6 cm/min; (b) v = 9cm/min 图 3. 不同焊接速度下应力云图; (a) v=6 cm/min; (b) v=9 cm/min

从应力分布云图中可以看出,在无预热、无保温、焊接过程完全约束的情况下,EH36 船板钢在焊后存在相当大的残余应力,其焊缝两侧存在宽度约 50 mm 的高应力场。在 6 cm/min 的焊接速度下,焊缝与高应力区之间存在一个应力较低的过渡区。焊接速度提高至 9 cm/min,此过渡区消失。从焊缝中心位置向母材方向依次取多个参考点,统计两种工艺下的残余应力数值大小,结果如图 4 所示。



Figure 4. Stress values at reference points at different welding speeds 图 4. 不同焊接速度下参考点应力值

数值统计结果显示, 6 cm/min 的焊接速度下,焊缝与高应力区之间的过渡区宽度约为 7 mm 的过渡区,此过渡区内残余应力的数值逐渐升高,在距离焊缝中心 16.3 mm 处达到 643.4 MPa,并进入宽约 45 mm 的高应力区,此区域内残余应力数值变化不大,残余应力最大值为 663.5 MPa。9 cm/min 的焊接速度

下,没有过渡区,在距离焊缝中心 10.5 mm 处即达到 655.3 MPa,在 46 mm 处达到最大应力值 671.4 MPa。 两种焊接速度下残余应力的最大值差距仅有 1.17%,可以认为焊接速度的变化对残余应力的数值影响不 大,仅影响其分布。

两种工艺相比较,在距离焊缝中心 10 mm~20 mm 的热影响区范围内,9 cm/min 的焊接速度下的残 余应力显然比 6 cm/min 的焊接速度更大,会极大的影响接头的冲击韧性。例如,DH40 船板钢焊接接头 的冲击韧性值在热影响区位置因残余应力集中而明显下降[11]。同时,残余应力也会与腐蚀介质共同作用 加速应力腐蚀开裂,船板钢长期处于海水环境中,残余应力会导致热影响区位置更易发生腐蚀疲劳和氢 脆。因此,在电源功率不变的情况下,较慢的焊接速度有助于提高接头性能。

5. 结论

本文利用 ABAQUS 有限元软件,采取二维高斯面热源 + 三维锥形高斯旋转体热源复合模型,进行 了 EH36 船板钢大线能量焊接的有限元模拟计算。通过改变焊接速度,研究了不同焊接工艺对焊接温度 场、应力场的影响。得出结论如下:

(1) 在热源功率不变的情况下,热影响区的温度峰值随焊接速度升高而降低。在焊接速度为6 cm/min 时,热影响区的最高温度为1389℃。焊接速度为9 cm/min 时,同一个参考点峰值温度仅为946℃;

(2) 同样,在热源功率不变的情况下,焊接速度提高时,熔池宽度比热影响区尺寸下降的更快。焊接速度由 6 cm/min 提高至 9 cm/min,焊缝宽度降低了约 30%,热影响区宽度仅降低了 10%;

(3) 在热源功率不变的情况下,焊接速度的变化对焊后残余应力数值的影响较小,6 cm/min 和 9 cm/min 两种焊接速度下残余应力的最大值差距仅有 1.17%。但对焊后残余应力的分布状态有较大影响;

(4)9 cm/min 的焊接速度下残余应力场更靠近焊缝,热影响区位置残余应力更大,会导致接头力学性能和耐蚀性能的下降。

基金项目

感谢海洋工程用超大线能量钢焊接材料开发及示范应用(粤自然资合[2024]24号)项目对本研究的支持。

参考文献

- [1] 李矗东, 魏强, 李玉中, 等. 基于有限差分法的大线能量焊接热模拟试件的温度分布[J]. 工业加热, 2020, 49(1): 1-4+8.
- [2] 杨春牛, 郭志红, 王旗, 等. 30mm 厚 EH420 船板钢三丝埋弧焊接温度场数值模拟研究[J]. 河北工业科技, 2024, 41(3): 203-211.
- [3] 苗玉刚, 王林, 王子然, 等. DH36 高强度船板钢对接焊残余应力与变形数值模拟与试验分析[J]. 武汉理工大学 学报, 2023, 45(10): 104-111.
- [4] 吴志洋. 基于 ANSYS 的大线能量焊接船板钢焊接温度场模拟[D]: [硕士学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2022.
- [5] 肖迪. DH36 船板钢大线能量焊接温度场数值模拟及组织性能研究[D]: [硕士学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.
- [6] Jiao, Z., Wang, J., Li, L., et al. (2024) Numerical Simulation Study of Welding Process of AH32 Ship Plate Steel. Transactions of the Indian Institute of Metals, 77, 2439-2449.
- [7] 安爱玲, 严春妍, 祁帅. X80 管线钢四丝埋弧焊的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2016, 45(3): 220-223.
- [8] 刘治文, 贾书君, 杨浩, 等. 热输入对深海 X70 粗晶区组织和韧性的影响[J]. 河北科技大学学报, 2021, 42(5): 516-522.
- [9] 张顺. X80 石油管道多丝直缝埋弧焊的模拟研究与实验验证[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [10] 李培麟. 多丝埋弧焊热源模型与焊缝成形的模拟研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [11] 常婧. DH40 高强钢大厚板焊接及焊接残余应力有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2011.