随行辅助预热电子束薄板焊接的数值 模拟

宋巍^{1,*},曲树平²

1. 中国航空工业集团有限公司科学技术委员会,北京 100012

2. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

摘 要:电子束焊接薄板过程中,由于局部加热过快,易产生焊接变形。因此,在电子束焊接的主热源两侧引入基于高频 扫描技术的电子束辅助热源,进行焊前预热,以达到减小焊接变形的目的。建立了矩形均匀加热辅助热源模型,采用热弹 塑性有限元分析方法对 1.5mm 厚不锈钢薄板随行辅助预热电子束焊接进行数值模拟,并且进行了试验验证。结果表明,焊 后残余应力和变形的模拟结果与试验所得结论一致。电子束焊接随行辅助预热方法不仅可以改变熔池前方材料的应力状态, 而且当熔池形成瞬间熔池时,还可以减小前方材料的压应力峰值,有利于减小薄板结构的焊接变形。

关键词:电子束焊接;焊接变形;辅助预热

中图分类号: TG404 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.03.052

在航空、航天领域中,为了实现减重增效,薄壁结构件 已经广泛地应用于飞行器的蒙皮骨架、隔框、舱门等领域。 但是,在焊接过程中薄壁焊接结构极易产生焊接应力和热变 形。焊接应力和变形会引起裂纹和脆性断裂,影响结构的刚 度、强度和受压稳定性^[1-3]。无论采用哪一种焊接工艺,都需 要较复杂的辅助措施以减小焊接变形。

由于电子束焊接是在真空密闭的环境中进行,所以 很难采用常规手段抑制薄壁构件在焊接过程中产生的变 形。目前,研究者在多束流电子束焊接领域中做了大量的研 究工作,包括焊接温度场、焊缝区和热影响区的显微组织、焊 接熔池大小以及焊后残余应力^[4,5]等方面,但是对于焊接变 形控制方面的研究比较少。

本文基于 SYSWELD 软件,对 1.5mm 厚 304 不锈钢薄 板进行了随行辅助预热电子束焊接的数值模拟,并结合了试 验验证。结果表明,采用电子束焊接随行辅助预热的方法可 有效改善焊接残余应力分布并且减小焊接变形。

1 基本原理

采用高频偏转扫描技术,在距离焊缝D(10mm)处使

收稿日期:2018-01-29; 退修日期:2018-02-06; 录用日期:2018-03-04

引用格式: Song Wei, Qu Shuping. Numerical simulation of auxiliary preheating electron beam plate welding[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (03): 52–57. 宋巍,曲树平. 随行辅助预热电子束薄板焊接的数值模拟[J]. 航空科学技术, 2018, 29 (03): 52–57.

电子束快速偏转扫描出两个矩形加热辅助热源 FH1、FH2。 辅助热源功率密度为2.1W/mm²,尺寸为A(30mm)× B(25mm),超前焊接电子束流 H(10mm)。多束流电子束 焊接示意图如图1所示。



图 1 随行辅助预热电子束焊接示意图 Fig.1 EBW with simultaneous EB preheating

试验采用尺寸为1.5mm×170mm×80mm的轧制态 304不锈钢,基本的电子束焊接参数见表1。

表 1 常规电子束焊接工艺参数 Table 1 Parameters of conventional EBW

工作距离/	加速电压 /	束流 /	聚焦电流 /	焊接速度 /	扫描频率 /
mm	kV	mA	mA	(mm/s)	kHz
400	150	15	2470	25	10

^{*} 通信作者 . Tel.: 13691352255 E-mail: songrachel@126.com

焊后工件用 X 射线衍射法进行残余应力测量。焊后 变形采用百分表进行测量,如图 2 所示。图 2 中 1-1 中心 线为焊接变形、焊接应力的测量位置,也是焊接温度的取点 位置。



2 随行辅助预热电子束焊接的有限元模型建立 2.1 材料库模型的建立

由于 SYSWELD 软件本身自带 304.mat 材料库中的 304 不锈钢与实际生产中的 304 不锈钢仅在化学元素成分和含量 上有所区别,因此材料的高温性能方面有轻微差别,这里参考 304.mat 文件进行轻微调整,创建 304.mat 材料库。

2.2 有限元网格模型的建立

为了提高数值模拟的计算效率和精度,网格划分采用标准六面体八节点单元,焊缝区域网格细密,远离焊缝区网格逐渐变疏,建立的有限元网格模型如图3所示,共计有105171个节点和127796个单元。



图 3 有限元网格模型(单位:mm) Fig.3 Finite element mesh model (Unit:mm)

2.3 热源模型和边界条件的定义

2.3.1 焊接热源模型建立

焊接热源模型采用系统内置的 3D 高斯圆锥体热源模型,如图 4 所示,其功率密度在一定范围内呈三维高斯函数 分布,与电子束焊接能量作用方式相符。



图 4 高斯圆锥体热源模型 Fig.4 Gaussian heat source model with cone

数学表达式为:

$$Q(x, y, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right)$$
(1)

$$r_{0}(z) = r_{e} + \frac{r_{i} - r_{e}}{z_{i} - z_{e}}(z - z_{e})$$
(2)

式中: Q₀ 为热输入功率大小; r_e, r_i 均为模型高斯参数; z_e 为 该热源模型上平面座标值; z_i 表示该热源模型下底面座标 值。

2.3.2 辅助热源模型建立

辅助加热区域近似等效为均匀的面热源。因此,采用 Fortran 语言编写了矩形加热辅助热源函数程序,其热源模 型如图 5 所示。在矩形扫描加热区,热源均匀作用,热输入 功率为 *Q*₀,其他区域热输入为 0。



由于辅助热源为面热源,这里只考虑二维分布,简化的 数学表达式为:

$$Q_0(x, y) = Q_0(-a < x < a, -b < y < b)$$
(3)

式中:Q₀为热输入功率大小;2a为矩形加热辅助热源长度 (如图 5 所示);2b为矩形加热辅助热源宽度。

2.3.3 约束条件设定

由于电子束焊接是在真空条件下进行的,散热方式主要为热辐射,将发射率设置为0.8。

3 结果与讨论

3.1 温度场云图

采用 SYSWELD 有限元分析软件对 304 不锈钢随行辅助预热电子束焊接进行了数值模拟,计算过程分为焊接和 冷却两个阶段,焊后冷却至 1000s。多束流电子束焊接过程 中 4.0s 时的温度场云图如图 6 所示。图 6 (a) ~ 图 6 (d) 分 别为 304 不锈钢薄板在辅助预热电子束焊接过程中的温度 场云图。从图 6 (a) 中可以看到,刚开始作用时,辅助热源 的形状十分规则,局部温度场最高温度仅 75℃。图 6 (b)、 图 6 (c)和图 6 (d)展示的是薄板结构电子束焊接过程,温 度场向周围延伸,而且越来越均匀化;熔池局部最高温在 2500℃以上,远高于 304 不锈钢的熔点,而且熔池附近温度 梯度较大,等温线较密集;由于电子束焊接热输入量大、束 流作用点集中,并且真空环境下缺少空气介质,因此,散热缓 慢,可以在熔池后方形成一条很长的后拖带。图 6 (d)展示 的是 304 不锈钢薄板焊后冷却阶段温度场云图,从云图中可 以看到,试板整体温度逐渐下降。

3.2 温度场模拟

在试板 1-1 截面中心线上,依次选取焊缝、辅助热源边 缘及中心、试板边缘处 5 个节点,分别距离焊缝 0、10mm、 22.5mm、35mm、40mm。提取出各节点的温度时间历程 数据,利用 Origin 绘图软件可以得到各节点的温度时间历程 数据,和图 7 所示。距离焊缝 10~35mm (即辅助热源作用 区)节点最高温度在熔池未形成前已上升到 600℃左右, 达到焊前预热的目的。由图 7 (a)、图 7 (b) 对比可知,常 规电子束焊接熔池附近温度梯度较大,距焊缝 10mm 处 节点温度就下降到 250℃。而多束流电子束焊接距焊缝 40mm 处节点最高温度也超过 250℃,可见其温度梯度明显 减小。

3.3 焊接应力模拟

利用 SYSWELD 软件求解器 Postprocessing 模块中的 Display 功能,提取出 1000s 时刻各模拟参数下试板焊接纵 向应力数据,而后利用 Origin 制图软件获得纵向焊接应力 曲线图。纵向焊接应力 H 参数变化如图 8 所示。





如图 8 所示,可以看到当改变辅助热源中心与焊接电 子束流的距离 H 时,焊件纵向应力整体呈现出两个拉应力 尖峰,第一个峰值出现在焊缝中心附近,第二个尖峰出现在 辅助热源作用区。对比可以发现,当 H 值为 0~15mm 时,工 件焊接纵向应力基本一致;当 H 值变为 25mm 或者 50mm 时,试件纵向应力曲线图整体上移,辅助热源作用区拉应力 峰值提高约 100MPa,试板边缘 5mm 左右和距离焊缝中心 线 5~15mm 区域内压应力明显减小,相差约 75MPa。





图 9 (a) 是单独提取的仅辅助热源作用时的工件纵向 热应力曲线图,时间节点是 3.6s,此时辅助热源中心正好在 1-1 中心截面处;图 9 (b) 为焊后冷却至 1000s 时刻 D 参数 变化工件纵向应力曲线图。观察图 9 (a) 可知,辅助热源距 离试板中心线越近,辅助热源作用区所形成的压应力范围就 越窄;但是趋势上都是一致的,辅助热源作用的中心区域为 压应力,两侧为拉应力。





观察图 9 (b) 可知, D 值越小, 试板中心承受拉应力的 范围就越大, 而且焊缝区域拉应力值越大。当 D=0 和 5mm 时, 距离焊缝中心线 25mm 以内均为拉应力, 而且拉应力值 都超过 150MPa; 当 D=10mm 和 15mm 时, 工件纵向应力呈 拉应力、压应力交替分布。

3.4 焊接变形分析

根据上述 304 不锈钢薄板数值模拟的结果进行了随行 预热电子束焊接工艺试验,开展工艺适应性研究,所制定的 工艺参数及焊接结果见表 2。

从上述工艺试验及焊接结果可以看出:采用随行预热 电子束焊接技术可以减少焊接变形,其中功率密度 Q 决定 了辅助预热区域的热输入量,从而决定了预热的温度;A、B 决定预热区域的大小,D、H 决定了预热区域与焊缝之间的 距离,这些参数共同影响辅助预热产生热应力的大小、位置, 以及减小熔池前方压应力的效果。

序号	预热功率密度 <i>Q</i> /(W/mm ²)	<i>A</i> / mm	<i>B</i> / mm	D/ mm	<i>H</i> / mm	焊接变形 / mm		
1	常规电子束	_	_	_	_	3.95		
2	0.3	30	25	10	10	2.10		
3	1.0	30	25	10	10	2.89		
4	3.0	30	25	10	10	0.85		
5	2.1	30	25	10	10	0.82		
6	2.1	10	25	10	10	3.18		
7	2.1	30	10	10	10	8.50		
8	2.1	30	25	0	10	6.15		
9	2.1	30	25	5	10	7.24		
10	2.1	30	25	15	10	5.14		
11	2.1	30	25	10	0	0.88		
12	2.1	30	25	10	5	0.94		
13	2.1	30	25	10	15	0.92		

表 2 焊接工艺参数及焊后变形 Table 2 Welding distortions with different parameters

试验结果表明, Q=2.1W/mm²、A=30mm、B=25mm、D=H= 10mm时,可以获得最好的控制焊接变形,焊接变形可减小 79%。针对前文的模拟结果总结分析,可知当采用电子束 同步预热焊接时,辅助热源与焊缝中心线的距离 D=10mm、 与主热源的距离 H=10mm、热输入功率大小 Q=2.1W/mm²、 A=30mm、B=25mm,焊接变形控制效果较好。

3.5 焊接残余应力分析

当试件焊后冷却至1000s时,观察到的焊缝纵向残余 应力场云图如图10所示。分析应力场云图可知,常规电子 束焊接焊缝及其热影响区主要承受拉应力,拉应力最大在 300MPa左右。当远离焊缝区时,拉应力逐渐减小至零,而 后转变为逐渐增大的压应力。而随行预热电子束焊接应力 变化比较剧烈,在垂直焊缝方向拉,压应力交替出现。

实测工件焊后残余应力结果与模拟结果如图 11 所示。 由图 11 可知,常规电子束焊接的最大纵向拉应力模拟值达到 280MPa,随行预热的焊缝中心处拉应力则在 260MPa 左右。 常规电子束焊接焊缝纵向残余应力变化比较平缓,随着取样点 与焊缝的距离增大,纵向残余应力由拉应力逐渐转变成压应 力。随行预热电子束焊接纵向残余应力变化比较剧烈,受辅助 热源作用区域(距焊缝 10~35mm)的随行预热电子束焊接应力 场呈拉应力状态,而相应地常规电子束焊接则为压应力。

从模拟的焊缝纵向应力结果与工件 X 射线衍射法实测 焊后纵向残余应力结果比较可知,焊后纵向应力趋势基本一 致,证明了焊接应力模拟结果的准确性。



4 结论

通过分析,可得出以下结论:

(1) 基于 SYSWELD 软件的随行预热电子束焊接模拟 能够清晰反映薄板结构焊接应力场和焊后变形。

(2) 与常规单道电子束焊接相比,当 D=10mm、H=10mm 时,辅助热源尺寸为30mm×25mm,焊缝两侧辅助热源 分配2.1W/mm²的能量时,工件最大焊接变形量明显较 小。

(3)随行预热电子束焊接方法不仅可以改变熔池前方 材料的受力状态,而且可以减小熔池形成瞬间熔池前方材料 的压应力峰值;有利于减小熔池的前方压缩塑性应变,进而 减小薄板结构的焊接变形。

参考文献

[1] 刘西霞. 钛合金薄板激光焊接变形控制研究 [D]. 长沙: 湖南 大学, 2014.

Liu Xixia. Study on the control of laser welding deformation of titanium alloy[D].Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)

[2] Vasantharaja P, Vasudevan M, Palanichamy P. Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 304N stainless steel weld joints[J].Journal of Manufacturing Processes, 2015 (19): 187–193.

- [3] Fu Pengfei, Mao Zhiyong, Lin Jian. Temperature field modeling and microstructure analysis of EBW with multi-beam for near α titanium alloy[J]. Vacuum, 2014, 102; 54–62.
- [4] 尹昕,赵海燕,刘大成,等.双束电子束焊接温度场的数值模 拟[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(5):777-780.
 Yin Xin, Zhao Haiyan, Liu Dacheng, et al. Numerical simulations of temperature fields during electron beam welding using the double-beam technique[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(5): 777-780. (in Chinese)
- [5] 李智钟,周建平,许燕,等.基于 Sysweld 的 T 形管焊接件温度及应力应变场数值模拟分析 [J].焊接学报, 2016, 37 (4):77-81.
 Li Zhizhong, Zhou Jianping, Xu Yan, et al. Numerical simulation analysis on T-shaped pipe weldments temperature and stress-strain field based on Sysweld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37 (4):77-81. (in Chinese)

作者简介

宋巍(1980-)女,学士,高级工程师。主要研究方向:自动 控制,人力资源管理。 Tel:13691352255 E-mail:songrachel@126.com

Numerical Simulation of Auxiliary Preheating Electron Beam Plate Welding

Song Wei^{1,*}, Qu Shuping²

1. AVIC Science and Technology Committee, Beijing 100024, China

2. Material Science and Engineering School, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract: In the process of beam welding of thin plates, the welding deformation is easy to be produced because of rapid heating. Therefore, the electron beam auxiliary heat source based on high frequency scanning technology was introduced on both sides of the main heat source of electron beam welding to preheat before welding, so as to reduce the welding deformation. In this paper, a rectangular uniform heating auxiliary heat source model was established. The thermal elastoplastic finite element method was used to simulate the auxiliary preheating electron beam welding of 1.5mm thick stainless steel sheet, and the test was carried out. The results show that the simulation results of residual stress and deformation after welding are in agreement with the results obtained from the test. The auxiliary heating method of electron beam welding can not only change the stress state of the material in front of the pool, but also reduce the peak value of the compressive stress of the front material when the molten pool forms instant pool, which is beneficial to reduce the welding distortion of the thin plate structure.

Key Words: electron beam welding; welding deformation; auxiliary preheating

 Received:
 2018-01-29;
 Revised:
 2018-02-06;
 Accepted:
 2018-03-04

 *Corresponding author.Tel.:
 13691352255
 E-mail:
 songrachel@126.com