DOI: 10.3901/JME.2021.06.060

瞬态热拉伸强度对304L不锈钢焊接变形影响的计算分析*

易 斌¹ 周方明² 王江超¹

(1. 华中科技大学船舶与海洋工程学院 武汉 430074;

2. 江苏科技大学材料科学与工程学院 镇江 212003)

摘要: 薄板焊接极易产生失稳变形, 严重影响到薄板焊接结构件的生产效率和制造成本。以 304L 不锈钢薄板对接焊为研究对象, 通过试验观察到马鞍形变形模式, 并利用三维光学扫描仪测量焊接面外变形的大小。随后进行热-弹-塑性有限元分析再现焊接变形的过程, 测量结果与基于大变形理论的数值计算结果基本吻合, 而与基于小变形理论的计算结果差别很大, 进一步验证失稳变形的产生。同时, 在距离焊缝中心 110 mm 处施加随焊移动的辅助热源实现瞬态热拉伸来控制失稳变形, 并研究了附加热源强度的影响。结果表明, 瞬态热拉伸减小母材对焊缝处加热过程的压缩效应和冷却过程的拉伸效应, 且附加加热区域会产生残余压缩塑性应变, 降低了母材自身的纵向拘束度, 从而降低焊接压应力和变形; 并且附加加热区域最高温度达到 195 °C 和 273 °C 时, 沿焊缝方向面外变形最大值分别减小了 80% 和 72%, 很大程度控制了焊接失稳变形。

关键词: 瞬态热拉伸; 薄板焊接; 焊接失稳变形; 热-弹-塑性分析; 附加热源

中图分类号: TG404

Computation and Analysis of the Influence of Transient Thermal Tensioning Intensity on Welding Distortion in Butt Joint with 304L Stainless Steel

YI Bin¹ ZHOU Fangming² WANG Jiangchao¹

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

2. School of Materials Science and Engineering,

Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003)

Abstract: Welding induced buckling is common during thin plate welding and seriously affects the production efficiency and manufacturing cost of thin plate welding structures. 304L stainless steel thin plate butt joints are taken as the research object. The pattern of saddle shape is observed through experiments, and the magnitude of out-of-plane deformation is measured using a three-dimensional optical scanning system. Subsequently, a thermo-elasto-plastic (TEP) finite element analysis is carried out to represent the process of welding distortion. The numerical predicted results based on large deformation theory are in good agreement with the measured data, and are different from the results based on small deformation theory, which verifies the occurrence of welding induced buckling. Meanwhile, in order to achieve transient thermal tensioning, two symmetrical additional heat sources moving synchronously with welding arc are applied to the region, which is away from welding line with the distance of 110 mm. In addition, the influence of the intensity of the additional heat source is studied. The results show that transient thermal tensioning decreases the compressive force during heating process and the tensile force during cooling process in the weld from base material, which will reduce the longitudinal self-constraints of the base material as well as reducing welding induced buckling. When the maximum temperature of the additional heating area reaches 195 °C and 273 °C, the maximal deflection of points along the weld is decreased

* 国家自然科学基金资助项目(51609091)。20200508 收到初稿, 20201212 收到修改稿

by 80% and 72%, respectively, and the welding induced buckling is almost controlled.

Key words: transient thermal tensioning; thin plate welding; welding induced buckling; TEP analysis; additional heat source

0 前言

随着大型结构轻量化的趋势,奥氏体不锈钢薄板因其优良的耐腐蚀性、抗氧化性和良好的成形性被广泛应用在现代制造业中^[1-2]。熔化焊作为不锈钢结构连接的重要手段之一,由于局部加热和冷却过程的存在,不可避免地产生焊后变形和残余应力,对焊接结构使用性能产生负面影响^[3]。特别地,薄板结构保持稳定性的能力显著降低,在熔化焊过程中会因焊缝处产生的纵向收缩力而发生失稳变形^[4]。焊接失稳变形十分复杂,不但会影响结构完整性和制造精度;而且由于其极不稳定的特性,焊后矫正即便费时费力也很难完全消除^[5]。因此,随焊控制失稳变形的产生是先进薄板焊接结构制造技术的重要内容。由于试验方法的局限性,使得采用完全试验测量方法研究实际焊接结构很困难。随着高性能计算机的发展和计算焊接力学理论的完善,数值计算成为预测焊接变形、应力和应变的重要方式^[6]。

很多学者对随焊控制薄板焊接失稳变形已经做了相关研究。BURAK等^[7]最早提出在焊接过程中应用热影响来消除焊接变形和残余应力,热影响过程包括远离焊缝局部加热的电阻毯和焊缝正下方同时冷却的循环水;其中,水冷和电阻加热被应用到整个焊缝上,故称之为静态热拉伸。MICHALERIS等^[8]使用有限元计算,验证了静态热拉伸减小船体角焊接头焊接变形的有效性。ILMAN等^[9]利用试验方法研究静态热拉伸对AA5083 角接头MIG焊疲劳性能的影响,得到静态热拉伸能够一定程度上减小焊接变形和残余拉伸应力,从而提高结构的疲劳性能。静态热拉伸成本高且设备复杂,很难应用在实际结构中。为了进一步提高效率和节约成本,局部辅助热源跟随焊枪一起移动且不需要水冷的瞬态热拉伸方法被提出来控制薄板焊接变形。DEO等^[10]通过伴随焊枪一起移动的火焰加热装置来实现瞬态热拉伸,并分析指出瞬态热拉伸能够改变焊接纵向残余压应力,使之低于临界压应力,以此来消除焊接失稳变形^[11]。HUANG等^[12-13]详细阐述了瞬态热拉伸在轻量化船体结构制造中的优点,包括不需要额外的加工过程、易于后期装配、生产效率高、没有后期火焰矫正和节约成本等等。ZHANG等^[14]对多束预热的电子束SUS304 不锈钢薄板焊接过程进行数

值模拟和试验验证,指出多束预热的热拉伸过程可以有效减小结构的压缩应力和屈曲变形。SOUTO等^[15]研究高温瞬态热拉伸对角接头变形的影响,得到当附加热源离焊缝足够远时不会影响焊缝区域的残余应力,焊接变形改善的原因在于热拉伸区域产生新的压缩应力。PAZOOKI等^[16]利用试验和有限元计算研究 2 mm厚的DP600 对接接头有无瞬态热拉伸过程,并对比不同位置施加辅助热源对焊接变形的影响,得到瞬态热拉伸能够减小焊接变形,且控制效果与辅助热源施加位置呈现非线性关系。WANG等^[17-18]利用试验测量和有限元计算相结合,分析了薄板表面堆焊和加筋板结构的焊接失稳变形现象,探讨了薄板焊接失稳产生的内在机理;提出通过减小焊接固有变形,可以有效地控制薄板焊接失稳变形的产生。但是,目前大部分研究只是定性分析验证瞬态热拉伸控制焊接变形的有效性,对于具体的瞬态热拉伸工艺参数对结果的影响和从残余塑性应变角度分析消除焊接失稳的机理研究很不充分。此外,轻量化制造会越来越的采用不锈钢薄板结构,更加容易产生应力和变形^[3]。因此,分析瞬态热拉伸对不锈钢薄板焊接变形的影响具有重要的工程应用价值。

本文先进行厚度为 3.88 mm 的 304L 不锈钢薄板对接焊试验,并利用三维光学扫描仪获得焊接变形的大小和分布;随后根据试验参数建立相应的有限元模型,进行基于大/小变形理论的热-弹-塑性数值模拟计算。大变形理论的结果与测量结果吻合良好,而小变形理论得到的面外变形很小且与测量和大变形结果差别很大,验证了焊接失稳变形的产生。最后,在相同的有限元模型和焊接热输入条件下,在远离焊缝中心 110 mm 处增加附加热源,通过瞬态热拉伸法来控制焊接失稳变形,并讨论了附加热源强度对失稳变形的影响以及从固有应变(残余塑性应变)角度解释瞬态热拉伸法控制焊接失稳变形的内在机理。

1 试验过程及有限元验证

本文主要针对薄板对焊接失稳变形问题,对应的对接接头试验和有限元验证过程如下。

1.1 对接焊试验和测量

试验研究对象为板厚 3.88 mm 的 304L 不锈钢对接

接头,单块试板长度 500 mm,宽度 150 mm,焊接时不开坡口。焊接方法采用MIG焊,保护气为 $\text{Ar}+0.2\%\text{CO}_2$;填充材料为ER308L焊丝,直径 1.2 mm。施焊之前,先将 304L 不锈钢薄板焊缝附近区域清除氧化膜打磨光滑;然后将其按要求放置在操作平台上并用工装夹具进行固定,随后点焊进行定位如图 1 所示。除最后一个定位焊点外其他需要打磨平整,以免影响电弧。具体的焊接工艺参数如表 1 所示。

图1 试验中薄板夹具固定以及点焊位置

表1 薄板对接焊试验焊接工艺参数

	电流 /A	电压 /V	速度/ (mm/min)	气流量/ (L/min)	脉冲/ Hz
定位焊	240	23.9	1 000	20.4	5
单面焊	240	23.9	600	20.4	5

试验完成之后,待试板冷却至室温,清理焊件表面的氧化膜,如图 2 所示。随后,采用三维光学扫描测量系统对试板焊接变形进行测量;该系统借助两个不同位置数码相机对同一景物间的视差来获取目标点的三维信息,基于视差原理计算两幅不同观察点所获得图像对应点的位移偏差,从而可以获取目标点的三维信息^[19]。通过在试板上标记大量的识别点,可以采用三维光学扫描测量系统得到表征试板变形形状的点云坐标。最后利用Matlab软件对点云坐标数据进行后处理,得到薄板焊件面外变形的大小和分布,如图 3 所示。图中黑点表示测量数据,相对面外变形最大值达到 14.76 mm;薄板焊件最后呈现出马鞍形,即在沿焊缝方向和垂直于焊缝方向均有弯曲变形但是变形方向恰好相反。随后,对接头进行宏观金相处理,如图 4 所示,可以得到熔池的相关形状。

图2 薄板焊接接头照片(清除氧化膜)

图3 测量的薄板焊接面外变形

图4 接头焊缝处宏观金相

1.2 热-弹-塑性计算验证

采用顺序耦合的热-弹-塑性有限元方法来分析薄板焊接失稳变形,具体流程为,首先使用热传导理论计算得到瞬态温度场的分布,然后将热分析结果作为热载荷施加到随后的力分析过程中,得到整个薄板焊接产生的残余塑性应变、应力和变形。力分析过程中,材料的变形行为需要通过格林-拉格朗日几何方程来描述,如式(1)所示。考虑小变形时,应变是位移的线性函数,如式(1)的线性项;考虑大变形时,应变是位移的非线性函数。如果变形较小,基于大/小变形理论得到的结果差别不大;但是对于薄板焊接失稳变形,必须使用高阶响应来表征应变与位移的关系,才能得到准确的结果,也就是考虑大变形理论才能有足够的精度^[3, 20]。因此,结合大/小变形理论得到的结果差异以及实际测量结果的比较,能够用来判断是否产生焊接失稳变形。

根据实际薄板尺寸以及焊缝处的宏观金相,采用 8 节点 3 维实体单元进行建模。考虑到后面需要在远离焊缝区域施加附加热源实现瞬态热拉伸,将焊缝处以及远离焊缝一部分区域网格细化其余区域平稳过渡到相对粗糙,既可以保证计算精度又能提高计算效率。薄板有限元模型节点数 30 208 个、单元数 24 885 个,边界条件约束其刚体位移得到相对变形,如图 5 所示。

$$\begin{cases}
 \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \\
 \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \\
 \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \\
 \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \\
 \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \\
 \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} + \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}
 \end{cases} \quad (1)$$

式中, ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的应变; γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{xz} 分别为 x - y 、 y - z 、 x - z 平面内的切应变; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的位移。

图 5 有限元模型图

温度场计算过程中, 采用 GOLDAK 等^[21]提出的移动双椭球热源模型来模拟焊接热输入, 如图 6 所示^[21], 包括形状参数 a 、 b 、 c_1 、 c_2 和热流密度 q 。为了获得与实际情况相符的焊接温度场, 热源的形状参数依据焊缝处的宏观金相图片确定; 热流密度 q 的表达式如式(2)所示

$$q = \eta UI / V \quad (2)$$

式中, η 为热效率, U 为焊接电压, I 为焊接电流, V 为热源体积。

图 6 双椭球热源模型图

为了提高计算精度, 考虑 304L 不锈钢的高温热性能参数^[22], 计算时间步长取为 0.1 s, 初始温度设为 20 °C, 其余焊接工艺参数与试验保持一致。图 7 所示为焊枪经过试板中心处瞬态温度场分布, 焊枪正下方温度最高。当焊接失稳发生时, 面外变形比面内变形大得多, 这里主要对比薄板对接焊产生的面外变形大小。将上面温度场计算结果作为热载荷加载到力学分析过程中, 并考虑材料的高温力学性能^[22]以及大/小变形理论, 薄板焊接产生的面外变形如图 8 所示。从图中变形分布可以看到, 大变形理论计算得到的面外变形比小变形理论得到的结果大很多, 且变形模式不一样。大变形理论得到的面外变形呈现测量结果一样的马鞍形, 沿焊缝方向向上弯曲, 垂直于焊缝方向向下弯曲; 小变形理论得到的面外变形呈现出帆形, 沿焊缝方向和垂直于焊缝方向均向下弯曲。为了进一步对比计算结果的精度, 取图 9 所示接头上表面沿焊缝线 1 和垂直于焊缝线 2 上数据点的面外变形进行对比, 如图 10 所示。从图中可以得到, 测量结果与大变形结果吻合良好, 与小变形结果差别很大, 且线 1 的弯曲方向测量结果与小变形结果恰好相反。以上结果表明, 薄板对接接头发生了失稳变形以及所采用的数值计算方法的准确性。

图 7 常规焊接瞬态温度场

图 8 计算的常规焊接面外变形云图

图 9 面外变形曲线对比位置

(a) 线1上数据点的面外变形

(b) 线2上数据点的面外变形

图 10 测量和计算的常规焊接面外变形对比

1.3 薄板焊接失稳

图 11 所示为基于大变形理论计算得到的纵向(沿焊缝)塑性应变分布,在焊缝处以及附近区域存在残余压缩塑性应变。通过大量的试验和热-弹-塑性有限元分析发现,焊接产生的残余压缩塑性应变(固有应变)是产生焊接变形的根本原因^[23]。焊缝在加热过程中由于周围母材的拘束不能自由伸长,产生压缩塑性应变;而冷却过程恰好相反,焊缝不能自由收缩,产生拉伸塑性应变,会抵消部分加热过程产生的压缩塑性应变如图 12 所示^[23],而剩余的压缩塑性应变会产生一个面内的收缩

力^[24](Tendon force)。面内收缩力越大,板材纵向弯曲程度越明显。

图 11 纵向残余塑性应变分布

图 12 焊接过程中塑性应变变化的过程

板材由于厚度的减小,会导致自身刚度的减小;以至于薄板在焊接过程中在面内收缩力的作用下,容易失去稳定性产生焊接失稳变形,此时面外变形比面内变形要严重得多。焊接面外变形主要由角变形、横向弯曲变形和纵向弯曲变形组成;当失稳变形发生时,纵向弯曲变形远远大于其余分量。因此,需要通过减小纵向弯曲变形才能控制焊接失稳变形。通过以上分析得到,减小薄板焊接失稳变形一定要尽量减小面内收缩力的大小,而面内收缩力主要受到加热温度和母材拘束度双重影响^[25]。因此,薄板焊接过程中要尽量减小热输入或者降低母材自身的拘束度才能够控制焊接失稳变形。

2 瞬态热拉伸过程

焊接的同时,在远离焊缝一定距离的区域使用火焰或者电磁感应加热母材,产生一个跟随焊枪移动的附加热源,从而控制薄板焊接失稳变形的的方法称为瞬态热拉伸法。使用瞬态热拉伸法控制薄板焊

接产生的失稳变形, 是当前应用广泛且高效的方法之一。但附加热源施加的参数(区域、强度和时间等等)会显著影响控制失稳变形的效果, 需要具体分析才能达到比较理想的情况, 否则可能对焊接变形产生负面的影响。

2.1 附加热源参数

附加热源同样采用GOLDAK等^[21]双椭球热源模型进行焊接热输入模拟, 为了获得与实际工程应用相符的瞬态热源, 参考文献[26], 热源形状参数 $a=15\text{ mm}$, $b=12\text{ mm}$, $c_1=c_2=5\text{ mm}$; 给定不同的热输入能量, 可以使得附加加热区域达到的最高温度不同。附加热源施加的位置相关参数如图 13 所示, 采用两个完全一样关于焊缝中心线对称分布的附加热源, 距离焊缝中心线 110 mm 。附加热源起始位置和焊枪保持在同一条直线上, 并和焊枪以相同的速度向前移动直至焊接结束, 即附加热源与焊接是完全同步的。

图 13 附加热源施加的位置相关参数

2.2 温度场分布

确定好附加热源模型参数后, 采用前面的有限元模型, 增加两个附加热源。工程上改变不同热源强度比较常见且容易实现, 本文也研究了附加热源强度对瞬态热拉伸控制焊接失稳变形的影响。当给定附加热源不同的热输入强度时, 附加加热区域的最高温度分别达到 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $152\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $376\text{ }^{\circ}\text{C}$, 图 14 为瞬态温度分布云图和焊接稳定阶段垂直于焊缝方向温度分布曲线图。相较于常规焊接, 瞬态热拉伸法不会影响焊缝附近区域的温度分布, 只在附加加热区域会有温度的升高, 且随着附加热源强度的增大, 附加加热区域和薄板边界处达到的最高温度也会增加。加热过程中, 附加加热区域和焊缝均要膨胀, 减小对焊缝的压缩效应; 冷却过程中, 附加加热区域和焊缝均要收缩, 减小对焊缝的拉伸效应。这将使得焊缝周围母材变“软”, 弱化对

焊缝处的拘束强度。

(a) 温度分布云图(376 °C)

(b) 温度分布曲线图

图 14 瞬态热拉伸温度分布

3 热拉伸强度的影响

3.1 面外变形

将基于大/小变形理论计算得到的薄板面外变形分布放在同一尺度条中进行对比, 如图 15 所示。基于小变形理论计算得到的面外变形模式都呈现出很小的帆形形状, 而基于大变形理论得到的结果呈现马鞍形或者翘曲变形, 两者差别很大。依据大变形理论得到的结果, 附加加热区域最高温度达到 $152\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对减小焊接残余面外变形有着明显的效果, 而剩余两种情况对减小焊接失稳变形的效果并不好; 且当附加加热区域最高温度达到 $376\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 面外变形模式变成较大的翘曲变形, 反而产生负面的影响。三种比较好的情况下, 基于大/小变形理论得到的面外变形曲线如图 16 所示。三种热源强度下, 大/小变形理论得到的面外变形结果在图 9 中两条直线上的差别很大, 而小变形理论之间基本相同; 说明这三种情况下, 瞬态热拉

伸只是减小了焊接变形而并没有避免失稳的产生。因此,焊接结构的几何非线性很明显,基于小变形

理论得到的结果精度是不够的,而应采用大变形成理论来分析瞬态热拉伸控制焊接失稳变形的过程。

图 15 常规焊接和瞬态热拉伸法面外残余变形云图对比

图 17 常规焊接和瞬态热拉伸焊接面外变形对比

图 16 瞬态热拉伸下大/小变形理论计算的面外变形对比

取出图 9 中两条直线上基于大变形理论计算得到的面外变形进行对比,如图 17 所示。通过曲线对比图很直观地可以看到,当附加热源强度太低,虽然在一定程度上能够减小小焊接变形,但瞬态热拉伸

法需要的设备相对于常规焊接复杂,工程上得不到相应的收益;而当附加热源强度太高,瞬态热拉伸法反而产生负面的影响,使得焊接变形增大。在这种情况下,附加加热区域最高温度达到 195 °C 和 273 °C 时,面外变形很小,沿焊缝方向面外变形最

大值分别减小了 80% 和 72%，大大地减小了焊接失稳产生的面外变形。

3.2 纵向残余应力

常规焊接和不同附加热源强度下, 基于大变形理论计算得到的垂直于焊缝方向纵向残余应力分布如图 18 所示。附加热源的施加都会不同程度地减小残余压应力最大值, 当热源强度足够大时, 在附加热源区域应力方向改变, 形成残余拉应力。当焊接失稳变形发生时, 面外变形大小主要由纵向弯曲变形决定。随着残余应力的重新分布, 特别是残余压应力最大值减小, 就能使得纵向弯曲变形减小, 从而大大减小焊接面外变形。综合图 18 中残余压、拉应力的分布情况, 可以得到附加加热区域最高温度达到 195 °C 时, 效果是最好的, 和前面得到的结论一致。

图 18 不同附加热源强度下纵向残余应力分布

3.3 纵向残余应变

由于残余塑性应变是焊接变形和应力产生的根源^[23], 本文从残余塑性应变角度分析瞬态热拉伸控制焊接失稳的原因。图 19 所示为纵向残余塑性应变分布, 可以看出瞬态热拉伸法的应用, 都会在一定程度上减小焊缝处产生的残余压缩塑性应变的峰值和区域。附加热源的施加, 使得母材附加加热区域在焊接加热过程中与焊缝同时膨胀, 减小对焊缝的压缩作用; 在冷却过程中同样会收缩, 减小对焊缝的拉伸作用。这两个过程均有利于减小母材对焊缝的自拘束作用, 使得焊缝区域的固有应变变小。此外, 瞬态热拉伸法对比常规焊接, 不仅在焊缝附近会产生残余压缩塑性应变, 而且随着附加热源强度的增加, 附加加热区域也会产生残余压缩塑性应变, 并且附加加热区域最高温度越高, 产生的压缩塑性应变的值和区域也越大。瞬态热拉伸法得到的焊接接头, 在焊缝处和附加加热区域均存在收缩力, 且焊缝处的收缩力比常规焊接的要小。由于收缩力的

图 19 不同附加热源强度下纵向塑性应变分布

存在, 焊缝和附加加热区域均要收缩, 母材对焊缝处拘束作用减弱, 使得整体板材的残余压缩塑性应变减小, 从而明显地控制或者消除焊接失稳变形。

通过前面的分析也可以得到, 附加热源强度太高会使得失稳变形更严重, 而强度太低对于失稳变形的减小效果不明显; 存在一段附加热源强度区间, 对失稳变形的控制效果很好, 即可选择的合适强度参数有很多, 这具有十分重要的工程应用价值。当然, 附加热源施加的位置、时间等也会影响瞬态热拉伸法消除失稳变形的效果, 是今后研究需要进一步优化分析的方向。

4 结论

本文通过基于大/小变形理论的热-弹-塑性有限元计算, 先再现了薄板对接焊失稳变形的过程, 然后通过施加附加热源很好地控制了焊接失稳变形; 并研究不同附加热源强度对控制焊接失稳变形的影响。同时, 阐述了瞬态热拉伸减小焊接失稳变形的内在机理, 具体结论如下。

(1) 薄板由于厚度的降低, 稳定性下降, 焊接过程中容易产生失稳变形; 基于大变形理论的热-弹-塑性有限元分析能够再现薄板焊接失稳变形的整个过程, 并且计算结果与测量结果比较吻合。

(2) 薄板焊接过程中通过合适的附加热源强度实现瞬态热拉伸, 能够比较明显地减小薄板焊接失稳变形; 本研究中, 附加加热区域最高温度达到 195 °C 和 273 °C 时, 纵向弯曲变形最大值分别减小了 80% 和 72%, 但没有避免焊接失稳的产生。

(3) 瞬态热拉伸控制薄板焊接失稳变形的机理在于, 附加热源的施加减小母材对焊缝加热过程的压缩效应和冷却过程的拉伸效应, 薄板自身拘束度降低, 焊缝处产生的残余压缩塑性应变会减小。因此, 瞬态热拉伸能够有效地减小纵向的固有变形和

收缩力, 从而明显地控制焊接失稳变形。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Y Z, WANG J J, TAO N R. Tensile ductility and deformation mechanisms of a nanotwinned 316L austenitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 36(1): 65-69.
- [2] 李艺君, 杜东旭, 付瑞东. 焊后热处理对高氮奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(22): 47-53.
- LI Yijun, DU Dongxu, FU Ruidong. Effect of post-welded heat treatment on the microstructures and mechanical properties of friction stir welded joint of high-nitrogen austenitic stainless steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(22): 47-53.
- [3] 李滋亮, 刘剑桥, 任森栋, 等. 尺寸因素对 SUS304 不锈钢残余应力和焊接变形的影响[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(10): 59-67.
- LI Ziliang, LIU Jianqiao, REN Sendong, et al. Influences of dimension factors on residual stress and welding distortion in SUS304 stainless steel butt joint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(10): 59-67.
- [4] 王江超, 牛业兴, 易斌, 等. 基于固有变形的船用钢薄板对接焊失稳变形的数值分析[J]. *船舶工程*, 2018, 40(12): 47-52.
- WANG Jiangchao, NIU Yexing, YI Bin, et al. Numerical analysis of welding induced buckling of butt welds with thin plates based on inherent deformation[J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(12): 47-52.
- [5] 闫德俊, 王赛, 郑文健, 等. 1561 铝合金薄板随焊干冰激冷变形控制[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(6): 67-73.
- YAN Dejun, WANG Sai, ZHENG Wenjian, et al. Control of welding distortion by welding with trailing cooling drikold of 1561 aluminum alloy thin sheet[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(6): 67-73.
- [6] UEDA Y, MURAKAWA H, MA N. *Welding deformation and residual stress prevention*[M]. New York: Elsevier, 2012.
- [7] BURAK Y, BESEDINA L P, ROMANCHUK Y P, et al. Controlling the longitudinal plastic shrinkage of metal during welding[J]. *Avt. Svarka (Automated Weld.)*, 1977, 3: 27-29.
- [8] MICHALERIS P, SUN X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld buckling distortion[J]. *Welding Journal*, 1997, 76(11): S451-S457.
- [9] ILMAN M N, KUSMONO, MUSLIH M R, et al. Mitigating distortion and residual stress by static thermal tensioning to improve fatigue crack growth performance of MIG AA5083 welds[J]. *Materials & Design*, 2016, 99: 273-283.
- [10] DEO M V, MICHALERIS P. Mitigation of welding induced buckling distortion using transient thermal tensioning[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2003, 8(1): 49-54.
- [11] SONG J, SHANGHVI J Y, MICHALERIS P. Sensitivity analysis and optimization of thermo-elasto-plastic processes with applications to welding side heater design[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(42): 4541-4566.
- [12] HUANG T D, CONRARDY C, DONG P, et al. Engineering and production technology for lightweight ship structures, Part II: distortion mitigation technique and implementation[J]. *Journal of Ship Production*, 2007, 23(23): 82-93.
- [13] HUANG T D, DULL R, CONRARDY C, et al. Transient thermal tensioning and prototype system testing of thin steel ship panel structures[J]. *Journal of Ship Production*, 2008, 24: 25-36.
- [14] ZHANG W, FU H, FAN J, et al. Influence of multi-beam preheating temperature and stress on the buckling distortion in electron beam welding[J]. *Materials & Design*, 2018, 139: 439-446.
- [15] SOUTO J, ARES E, ALEGRE P, et al. Methodology to reduce distortion using a hybrid thermal welding process[J]. *Materials*, 2018, 11(9): 1649.
- [16] PAZOOKI A M A, HERMANS M J M, RICHARDSON I M. Finite element simulation and experimental investigation of thermal tensioning during welding of DP600 steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 22(1): 7-21.
- [17] WANG J, SHIBAHARA M, ZHANG X, et al. Investigation on twisting distortion of thin plate stiffened structure under welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(8): 1705-1715.
- [18] WANG J, YI B, ZHOU H. Framework of computational approach based on inherent deformation for welding buckling investigation during fabrication of lightweight ship panel[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 157: 202-210.
- [19] 王树勇. 采用数字图像相关法对平板堆焊变形的瞬态测量与研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2015.
- WANG Shuyong. Transient measurement and research on bead-on-plate welding distortion combining the digital image correlation method[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2015.
- [20] WANG J, YI B. Benchmark investigation of welding-induced buckling and its critical condition during thin plate butt welding[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(7): 71010.

- [21] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [22] 马坤明, 罗宇, 王江超. 304L 不锈钢结构焊接变形分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(1): 55-58.
MA Kunming, LUO Yu, WANG Jiangchao. Analysis of welding deformation of 304L stainless steel structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(1): 55-58.
- [23] 上田幸雄, 村川英一, 麻宁绪. 焊接变形和残余应力的数值计算方法与程序[M]. 罗宇, 王江超, 译. 成都: 四川大学出版社, 2008.
UEDA Y, MURAKAWA H, MA N. Numerical method and program of welding deformation and residual stress[M]. Translated by LUO Yu, WANG Jiangchao. Chengdu: Sichuan University Press, 2008.
- [24] WANG J, ZHOU H, ZHAO H, et al. Comparative study on evaluation of tendon force for welding distortion prediction in thin plate fabrication[J]. China Welding, 2017, 26(3): 1-11.
- [25] 易斌, 周方明, 王江超. 瞬态热拉伸消除薄板对接焊接失稳的数值分析[C]//2019 年船舶结构力学学术会议, 2019 年 8 月 21-23 日, 武汉, 中国造船工程学会, 2019: 7.
YI Bin, ZHOU Fangming, WANG Jiangchao. Numerical Simulation of Mitigating Welding Induced Buckling with Transient Thermal Tensioning during Thin Plate Butt Welding[C]//2019 Conference on Ship Structural Mechanics, August 21-23, 2019, Wuhan, Chinese Society of Naval Architecture and Marine Engineering, 2019: 7.
- [26] ZHOU H, YI B, WANG J, et al. Preliminary investigation on plate bending with multiple-line induction heating[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 25(2): 455-466.

作者简介: 易斌, 男, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为薄板焊接失稳变形的预测和控制。

E-mail: D201980503@hust.edu.cn

王江超(通信作者), 男, 1983 年出生, 工学博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为船舶海洋结构物建造工艺力学及力学性能评估。

E-mail: WJccn@hust.edu.cn