

SUS304 不锈钢薄板 GTAW 对接接头焊接变形的有限元预测

王浩¹, 李莉²

(1. 河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473009; 2. 河南省科学技术馆, 河南 郑州 450008)

摘要:采用三维热弹塑性大变形有限元方法模拟 1.5 mm 厚 SUS304 不锈钢薄板 GTAW 对接接头的变形, 考虑焊接温度场的演变, 分析了热诱导变形产生的原因。最后比较了焊接变形的模拟结果与实测值, 发现两者比较吻合, 证明预测结果具有一定的可信度。

关键词:SUS304 不锈钢; GTAW 对接; 焊接残余变形; 数值模拟

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2013)01-0177-03

Finite Element Prediction of Welding Deformation of GTAW Butt-welded Joint of SUS304 Stainless Steel Thin Plate

WANG Hao¹, LI Li²

(1. Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473009, China; 2. Henan Science and Technology Museum, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: Three-dimensional thermal elastic-plastic large deformation finite element method was adopted to simulate the deformation of GTAW butt-welded joints SUS304 stainless steel thin plate with 1.5 mm thick. Moreover, the evolution of the welding temperature field was considered and the reasons for thermally deformation induced by heat source were analyzed. Finally, the comparison of welding deformation between predicted and measured results was carried out, and it can be found that the two results are in agreement, which can prove that the predicted results have a certain credibility.

Key words: SUS304 stainless steel; GTAW butt welding; welding residual deformation; numerical simulation

焊接过程的非均匀热输入容易导致焊缝及邻缝金属的非均匀膨胀, 进而引起焊接结构的变形, 而焊接变形会影响到焊接结构的装配精度^[1-2]。在实际生产中, 对于发生变形的焊接结构, 一般采用焊后矫正的方法予以纠正^[3], 但这会提高制造成本, 并且耽误产品生产安排。另一方面, 工程构件设计精度要求越来越高, 这就要求焊接结构变形越来越小。基于上述原因, 预测和控制焊接变形就显得至关重要。

在过去的 10 年中, 采用实验和数值分析方法预测焊接变形已有较多报道^[4-5], 但对于如何预测薄板结构焊接变形的文献却鲜有报道。近年来, 汽车行业的迅速发展, 大量的薄板焊接结构被需求。由于薄板结构刚度较小, 因此容易发生明显的焊接变形^[3]。为了深入理解薄板焊接结构的变形特性, 同时采用实验和数值分析的方法进行深入研究是很有必要的。本研究基

于三维热弹塑性有限元(FEM)理论, 模拟 1.5 mm 厚 SUS304 不锈钢薄板 GTAW 对接接头的变形, 预测其焊接变形情况, 并进行了简单的实验验证。

1 有限元分析

1.1 有限元模型

网格划分时, 为了保证计算精度且节省计算时间, 焊缝及其附近的区域网格划分得比较细, 远离焊缝区域的网格划分得较粗。在有限元模型中, 对应于实际的焊接过程, 需要定义焊接轨迹、参考线、焊接起始节点、焊接节点。完成的有限元模型见图 1, 其节点总数为 22839, 单元总数为 27260。模型网格划分如图 1 所示。

1.2 热源模型

热源模型采用 3-D 双椭圆热源模型, 热流密度在前后半球区域内的分布用下面两个数学公式来描述:

前半椭圆:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad x \geq 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2012-07-03

作者简介: 王浩(1979-), 男, 河南镇平人, 工程硕士, 主要研究方向为机械设计及数值分析; 电话: 13503778923;
E-mail: 54602195@qq.com

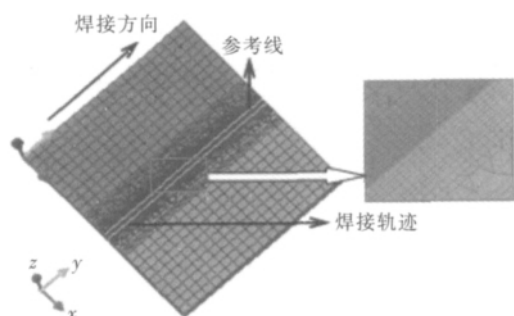


图1 有限元网格模型
Fig.1 Finite element mesh model

后半椭球:

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad x < 0 \quad (2)$$

式中: $Q = \eta UI$, 为热输入功率, η 为电弧的热效率, 本文假定 $\eta = 0.8$ [6], U 为焊接电压, I 为焊接电流; a_f, a_r, b, c 分别为热源模型高斯参数; f_f, f_r 为前、后半椭球体内热输入的份额, 且 $f_f + f_r = 2$, 本文 f_f, f_r 的取值分别为 1.2 和 0.8。热源模型参数见表 1。

表1 热源模型参数
Tab.1 Heat source model parameters

U/V	I/A	$q_f/(W \cdot mm^3)$	$q_r/(W \cdot mm^3)$	a_f/mm	a_r/mm	b/mm	c/mm
26.1	180	36	24	3	5	5	5

热源在对模型加热过程中的热传导是一个非线性的过程, 对于此过程中的瞬态非线性传热分析方程可表述为 [6]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_1 \quad (t \geq 0) \quad (3)$$

式中: T 为材料的瞬时温度, $^{\circ}C$; λ 为材料的热导率, $W/(mm \cdot ^{\circ}C)$; q_1 为热源单位时间产生的热量, W/mm^3 ; ρ 为材料密度, g/mm^3 ; c 为材料的比热容, $J/(g \cdot ^{\circ}C)$ 。

1.3 边界条件

假设加热区域内部温度一致, 没有热的对流, 只考虑热源与周边区域的热传导以及工件与空气的对流和辐射。工件与空气之间的对流热交换遵循 Newton 冷却方程 [7]:

$$q_a = -h_a(T_s - T_a) \quad (4)$$

式中: q_a 为工件与空气之间的热交换能量; h_a 为对流热交换系数; T_s 为工件表面温度; T_a 为周围空气的温度, 取为 $20^{\circ}C$ 。在模拟计算中, 假设 h_a 是不随温度变化的定值 [8], 取值为 $10 \times 10^{-6} W/(mm^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。

热辐射散失的热量 q_r 遵循 Stefan-Boltzman 定理 [7]:

$$q_r = -\varepsilon \sigma [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (5)$$

式中: ε 为辐射系数, 取值为 0.8 [8]; σ 为 Stefan-Boltzman 常量, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot k^4)$ 。

1.4 材料热物理性能参数

力学计算采用与温度计算时完全相同的有限元模型。力学计算中, 假设材料弹性应力-应变关系符合各向同性 Hooke 定律, 塑性行为符合 Von Mises 准则; 材料加工硬化性能通过各向同性准则来描述, 应力应变关系可表述为 [8]:

$$[d\sigma] = [D_{ep}][d\varepsilon] - [C_{th}]dT \quad (6)$$

$$[D_{ep}] = [D_e] - [D_p] \quad (7)$$

式中: $[D_e]$ 为弹性刚度矩阵; $[D_p]$ 为塑性刚度矩阵; $[C_{th}]$ 为热刚度矩阵; $d\sigma$ 为应力增量; $d\varepsilon$ 为应变增量; dT 为温度增量。总应变可描述为 [9]:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{th} \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_e, \varepsilon_p, \varepsilon_{th}$ 分别表示弹性应变、塑性应变和热应变。其中, 热应变是通过各向同性准则来表述, 即 $L_x = L_y = L_z = L$ 。

热学计算需要用到的材料热物理性能参数有导热率、比热容、密度, 其中比热和密度是从室温到熔点间取值, 热导率是从室温到固相线之间取值; 力学计算需要用到的材料力学性能参数有弹性模量、屈服应力、热应变、泊松比(本研究取定值为 0.3), 取值范围为室温到固相线之间。

1.5 约束条件

根据实际约束条件, 依据约束条件加载的基本原则, 数值模拟时, 在焊缝两侧加持位置(加载平面内)施加向下(z 轴负方向)100 N/mm 的弹性约束; 在两角节点施加 x 和 z 方向上的刚性约束。其约束情况如图 2 所示。

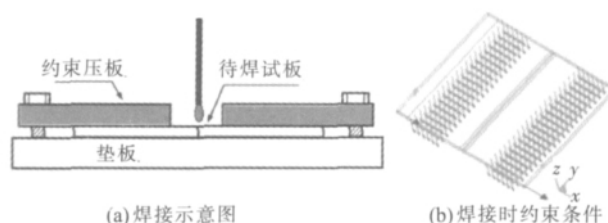


图2 约束条件设置
Fig.2 Constraint conditions setting

2 模拟结果分析

2.1 温度场演变

图 3 (a) 为焊接开始引弧阶段的温度场分布云图, 可看出, 在 $t=0.75\text{ s}$ 时刻, 熔池最高温度为 $1390.89\text{ }^{\circ}\text{C}$, 尚未达到 SUS304 不锈钢的熔点 $1404\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这是因为焊接刚开始, 热输入尚不足, 没有足够的热量使熔池金属熔化; 图 3(b) 为熔池进入准稳态阶段的温度场分布, 可看出, 准稳态阶段熔池形状为近似椭球状, 这 and 实际熔池形状相吻合, 至 $t=6.73\text{ s}$

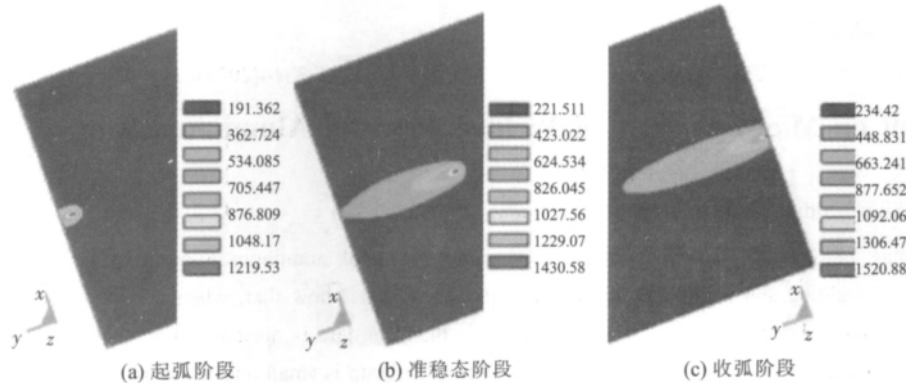


图 3 温度场演变云图 ($^{\circ}\text{C}$)
Fig.3 Cloud pictures of temperature field evolution ($^{\circ}\text{C}$)

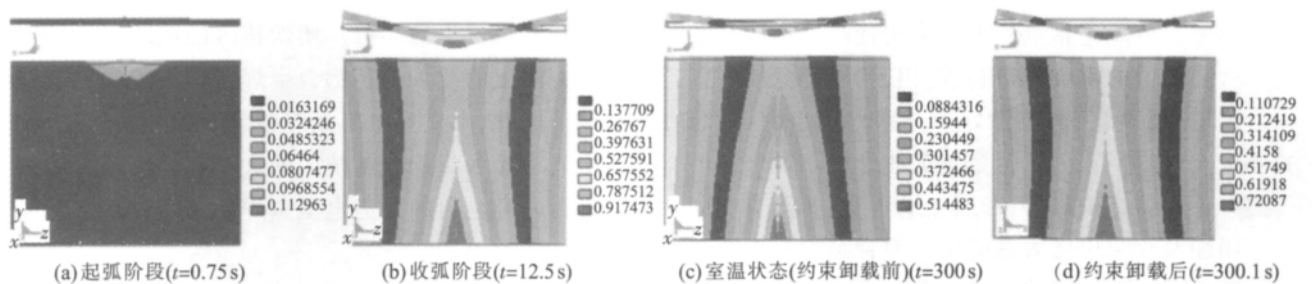


图 4 焊接变形演变云图 (mm)
Fig.4 Cloud pictures of welding deformation evolution (mm)

两侧)又受到周围条件的制约, 而不能自由收缩, 在不同程度上又被拉伸而卸载, 所以变形量有所减小; 与此同时, 熔池金属凝固, 金属冷却收缩时也会产生相应的收缩拉应力与变形。图 4(d) 显示, 室温状态外加约束卸载后 ($t=300.1\text{ s}$) 的最大变形约为 0.82 mm , 比卸载前增加约 0.23 mm 。根据图 2 所设置的约束条件, 数值模拟时, 压板对待焊试板所施加的约束力以弹性约束替代(即施加 100 N/mm 的弹性约束), 方向为 z 轴负方向, 见图 3(b), 焊接结束后, 去除弹性约束, 焊接结构可以自由收缩, 部分残余应力以变形的形式得到释放, 从而造成残余变形略有增大。

图 5 为实测焊接残余变形示意图及其实测结果。根据图 5(a), 变形量最大值计算公式为 $w=h_0-h_1$ 。由图 5(b) 可知, 约束卸载后焊接最大残余变形约为 1 mm ; 又由图 4(d) 焊接变形模拟结果可知, 薄板对

时, 熔池最高温度 $1632.09\text{ }^{\circ}\text{C}$; 图 3(c) 为热源中心离开焊件时 ($t=12.5\text{ s}$), 熔池最高温度为 $1735.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 变形云图分析

图 4 为四个典型时间步的变形云图。图 4(a) 显示, 在引弧阶段, 焊接变形主要发生在熔池周围, $t=0.75\text{ s}$ 时, 最大变形量为 0.129071 mm 。焊接开始时, 熔池金属达到熔化状态, 而与熔池毗邻的高温区材料的热膨胀则受到周围材料的限制, 产生不均匀的压缩塑性变形; 图 4(b) 显示, 焊接结束时刻 ($t=12.5\text{ s}$), 最大变形量约为 1.05 mm , 发生在焊接结束端位置; 图 4(c) 显示, 冷却至室温时 ($t=300\text{ s}$), 最大变形量约为 0.59 mm , 比焊接结束时有所减小, 这是因为, 在焊缝冷却过程中, 已发生压缩塑性变形的那部分材料(如焊缝

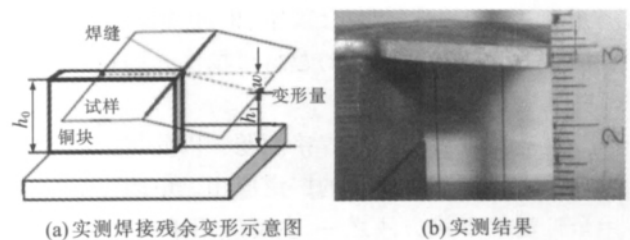


图 5 焊接变形实测结果

Fig.5 The measured results of welding deformation

接焊接变形主要为角变形, 预测最大值约 0.82 mm 。模拟预测结果和实测结果基本吻合, 预测结果具有一定的可信度。

3 结论

(1) 对于不锈钢薄板 GTAW 对接焊缝, 主要发生角变形, 最大变形区域位于焊缝结束位置, 在焊缝冷却过程中, 弹性约束未卸载的条(下转第 182 页)

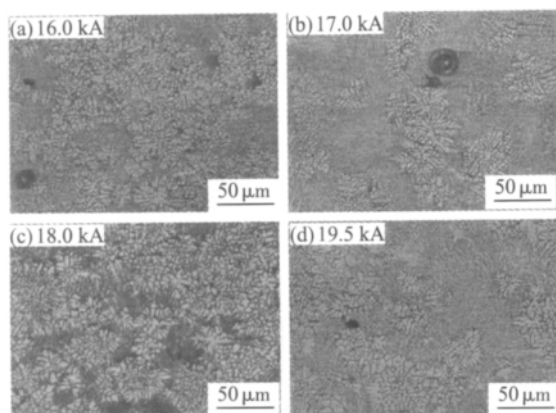


图4 不同焊接电流下焊核芯部显微组织
Fig.4 Microstructure of nugget core under different welding currents

(b)相图中存在少量气孔,这是由于铝合金点焊时,表面有氧化膜,焊接时气体得不到有效排出造成的。

2.2.4 熔核缺陷分析

与弧焊相比,铝合金在点焊时金属的熔化量较少,其导热系数比较大,所以熔核的冷却速度非常快;另外,铝合金是非导磁材料,液态熔核区的流动速度非常小,使得熔核在凝固时极易形成缩孔、缩松和气孔,如图5所示,这对接头的疲劳性能有很大影响。

3 结论

(1) 6082-T6 铝合金点焊组织主要分为两部分,焊点中间的小圆为熔核部分,其微观组织主要为等轴晶,晶粒细小,组织分布均匀而且弥散;焊点外

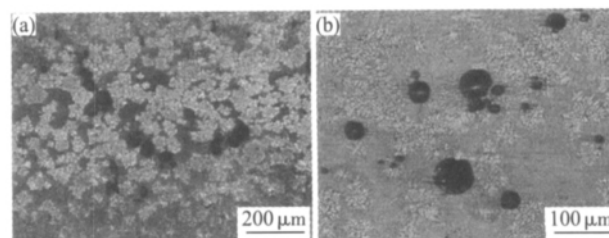


图5 熔核区缺陷处显微组织($I=18.0$ kA)
Fig.5 The defects microstructure of nugget area ($I=18.0$ kA)

圆为热影响区,其微观组织主要为树枝晶和等轴晶,其晶粒有明显的长大趋势。

(2) 通过对 2 mm+2 mm 的 6082-T6 铝合金点焊试验研究,由于铝合金导电性好、散热快,所以点焊时必须使用高的热输入量,也就是大电流才能形成有效熔核。

(3) 铝合金导热系数较大,熔核的冷却速度非常快,并且是非导磁材料,液态熔核区的流动速度非常小,熔核在凝固时极易形成缩孔、缩松和气孔,这对接头的疲劳性能有很大影响。

参考文献:

- [1] 李庆宏. 从全国铝企业技术经济指标分析看我国铝工业的现状与发展特点[J]. 轻金属, 1999, (3):12-14.
- [2] 王元良. 铝合金载运工具轻量化及其焊接新技术的发展[J]. 电焊机, 2005, 35(9):11-14.
- [3] 赵熹华. 压力焊[M]. 北京:机械工业出版社, 1988. ■

(上接第 179 页)件下,焊接变形总的变化趋势是随着冷却时间的增大而减小;弹性约束卸载后,部分残余应力以变形的形式得到释放,从而造成残余变形略有增大。

(2) 基于本研究所采用的实验材料和焊接规范,采用数值分析方法预测的焊接变形为 0.82 mm,实际测量结果为 1 mm,预测值和实测值基本吻合,说明所采用的数值分析模型科学合理。

参考文献:

- [1] Soul F A, Zhang Y H. Numerical study on stress induced cambering distortion and its mitigation in welded titanium alloy sheet[J]. Sci Technol Weld Join, 2006, 11:688-93.
- [2] Tsirkas S A, Papanikos P, Kermanidis T. Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens [J]. J

Mater Proc Tech, 2003, 134: 59-69.

- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [4] 李金阁,凌泽民,王高见. ZS125-70 型摩托车平叉轴管与侧管 CO₂ 焊数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (21): 164-167.
- [5] Deng D A. Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method [J]. Mater Des, 2009, 30: 359-366.
- [6] 武传松. 焊接热过程与熔池形态 [M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [7] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metal Tran B, 1984, 15: 299-305.
- [8] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 2003. ■