

超高强度不锈钢厚板多道 TIG 焊温度场和应力场数值模拟

北京航空材料研究院(100095) 杜博睿 郭绍庆 李 能 孙兵兵 唐思熠

摘要 文中基于 SYSWELD 软件平台,对厚度 15 mm 的 Ferrium S53 超高强度不锈钢厚板进行了 TIG 多道焊接模拟仿真。建立了 Ferrium S53 钢的材料属性数据库,采用 SYSWELD 软件,以双椭球热源模型为热量分布形式,计算了自由装卡条件下焊接温度场、相分布、应力场及焊接引起的变形。结果表明,所得到的温度场变化规律符合实际性,焊缝区发生部分马氏体转变,残余应力主要存在于焊缝及附近熔合区,变形趋势与实际情况符合一致。

关键词: 超高强度不锈钢 多道焊 SYSWELD 数值模拟

中图分类号: TG404

0 前 言

Ferrium S53 是近年来新研制出的一种超高强度不锈钢,以满足无人作战飞机等军用和通用飞机对高坚韧耐蚀起落架等重要承力构件制造的需求。承力部件多为大厚度大截面,因此焊接时会采用多道 TIG 焊。焊接过程产生的焊接应力和变形,不仅在一定程度上影响结构的加工精度和尺寸的稳定性,而且还影响结构的使用性能。单纯的试验难以全面了解残余应力分布复杂而多样的特点,焊接数值模拟技术采用理论计算方法对焊接过程进行模拟计算,对环境条件、焊接工艺参数等进行分析、评价,从而全面了解影响残余应力的各种因素及其影响规律,可以经济而有效地为制定正确的焊接工艺提供理论依据。文中基于 SYSWELD 软件对 Ferrium S53 超高强度不锈钢对接多道焊的焊接过程进行了模拟仿真,以焊接温度场的分析为基础,同时考虑焊接区域组织转变对应力应变场带来的影响,对超高强度钢焊后残余应力和变形进行了数值分析,为掌握焊接应力和变形的规律,为指导实际操作提供重要参考。

1 有限元模型的建立

1.1 网格划分

试验采用 50 mm × 80 mm × 15 mm 规格的厚板,为减小焊接变形量,开 X 型坡口进行正反双面焊接,共 10 道焊缝。对于平板对接的焊接,焊后变形主要集中在

垂直于焊缝的方向,而沿焊缝的方向基本不发生变化。建立三维的焊接接头模型尽管能较直观地反映焊接过程中温度场的变化过程,但是必然导致网格粗化和数量增加,计算精度和计算速度均下降,因此,文中选用一个垂直于焊缝的截面作为研究对象,针对此截面建立二维的焊接接头的模型。焊接接头模型及网格划分如图 1 所示。焊缝及附近网格划分较精细,尺寸为 0.3 mm,远离焊缝的地方划分的较粗,尺寸为 1 mm。其中,节点 4 292 个,1D 单元 341 个,2D 单元 4 282 个。

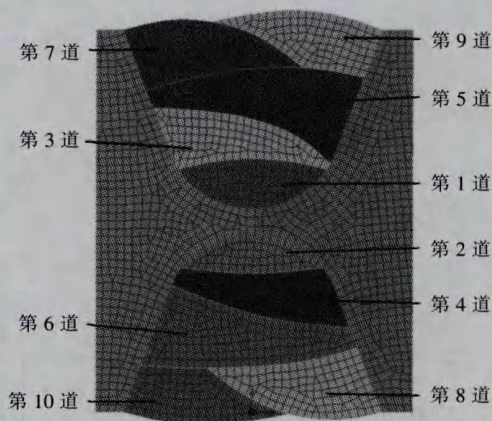


图1 焊接接头网格模型

1.2 材料参数

文中研究所用母材和焊丝材料均为为 Ferrium S53 超高强度不锈钢,其化学成分见表 1。根据材料不同温度下的热物理性能(热导率、比热容、密度)和力学性能参数(弹性模量、泊松比、热膨胀系数、屈服强度)在 SYSWELD 中自定义材料属性,建立针对 Ferrium S53

的材料属性数据库,室温力学性能如表 2 所示。

表 1 Ferrium S53 钢化学成分(质量分数,%)

C	Co	Cr	Ni	Mo	W	V	Fe
0.21	14	10	5.5	2	1	0.3	余量

表 2 Ferrium S53 钢室温力学性能

抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{el} /MPa	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)
1 931	1 469	11	44

1.3 热源模型的建立

对于多层多道焊,采用瞬态移动热源进行焊缝温度场的应力场的模拟计算将会由于迭代子步数繁多以及计算机能力的限制而影响计算效率。因此,采用焊缝平均热循环曲线代替瞬态移动热源的方法。

首先,采用双椭圆分布模型对 2 mm 的薄板进行热源校核,并根据此模型得到的温度场(如图 2 所示)模拟计算结果导出焊缝区节点的平均热循环曲线(如图 3 所示),将此热循环数据导入到多层焊焊接模拟计算所需要热源宏文件中,作为温度载荷进行温度场和应力场的模拟计算。

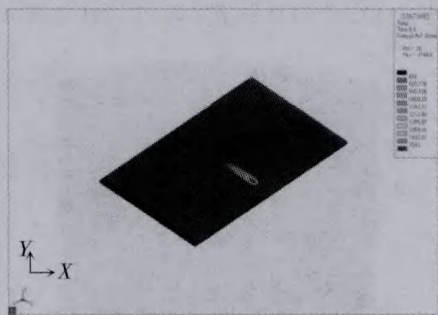


图 2 薄板表面温度场分布

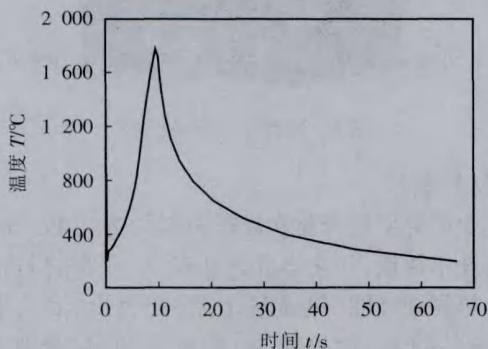


图 3 热循环曲线

1.4 装卡条件

进行应力计算时候要加载位移约束条件,是为了防止计算中产生刚性位移,使得计算不能收敛,但所施加的位移约束又不能严重阻碍焊接过程中应力自由释放和自由变形。结合实际试验,对厚板的焊接未施加任何约束,故对模型焊缝附近两点施加重力约束使计算收敛,如图 4 所示。

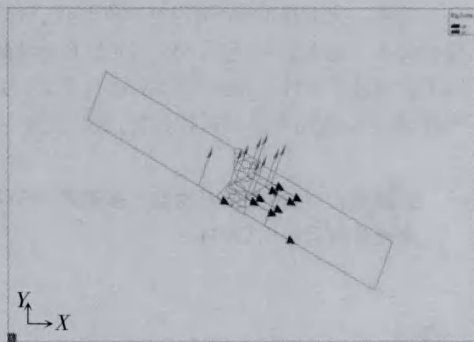


图 4 装卡条件

2 计算结果与分析

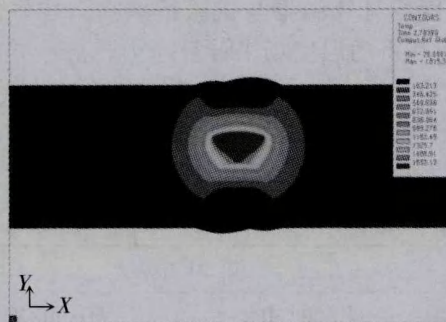
2.1 温度场计算结果

对于多层多道焊的计算过程,采用“生死”单元法。建立模型时,预先建立所有的焊缝单元,计算时,假设未焊层为死单元,随着焊接的进行,按顺序将死单元激活,来模拟焊缝金属的填充。死单元是设定的类似空气的材料,其材料热力学属性为材料正常值的 3~10 倍,单元激活后变为正常材料属性,进行计算过程。焊接过程从 0 开始,第一道焊缝完成时刻为 300 s,第二道焊缝 300~600 s,每道焊缝依次递加 300 s。图 5a 为第 1 道焊缝焊接过程中,第 2.783 99 s 的温度分布。图 5b 为第 4 道焊缝焊接过程中,第 902.784 s 的温度分布。图 5c 为第 9 道焊缝焊接过程中,第 1 802.78 s 的温度分布。图 5d 为第 10 道焊缝焊接过程中,第 2 702.78 s 的温度分布。

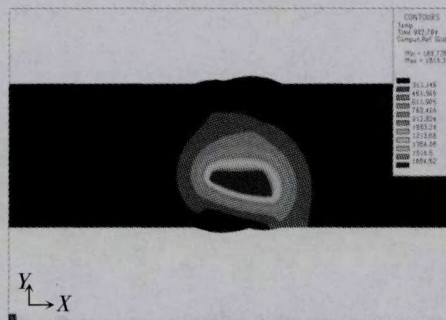
2.2 相分布

根据材料 CCT 曲线,在材料属性里设置可能出现的相,定义相 1 为材料初始相,即铁素体。定义相 2 为未填充材料相,即空气相。定义相 3 为马氏体相,相 4 为奥氏体相。如图 6a 为第 10 道焊缝完成后,铁素体相的分布情况,基体依然由铁素体组成,焊缝区不存在铁素体。图 6b 表示焊接前焊缝处未填充材料,其属性为空气。图 6c 为第 10 道焊缝完成后,马氏体相的分布情况,可以看出在焊接过程中发生了部分马氏体转变。

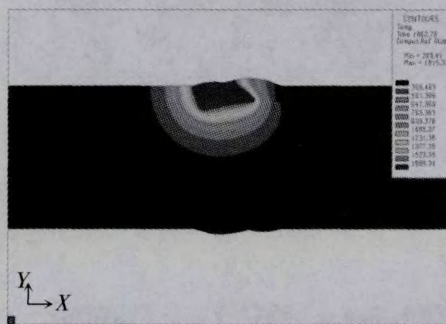
图 6d 为焊缝中奥氏体相的分布情况,熔合区由奥氏体、马氏体、铁素体共同构成。



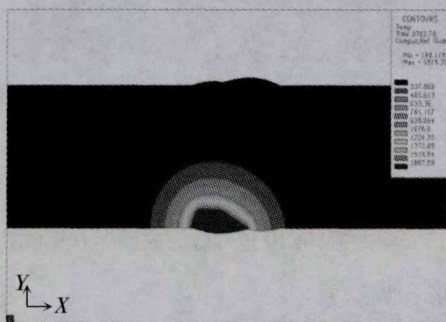
(a) 第 1 道焊缝



(b) 第 4 道焊缝

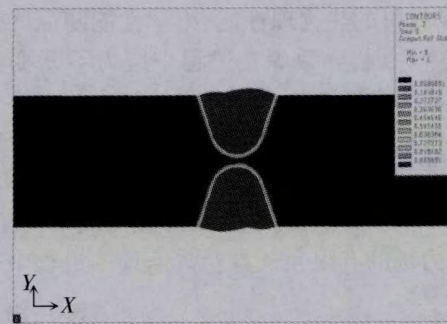


(c) 第 7 道焊缝

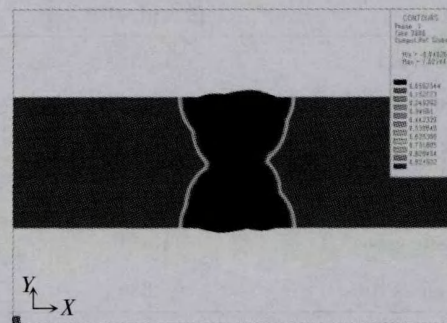


(d) 第 10 道焊缝

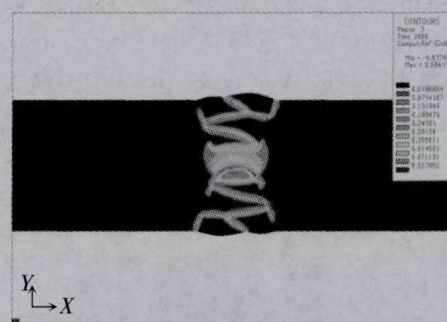
图 5 第 1,4,7,10 道焊缝的温度场分布云图



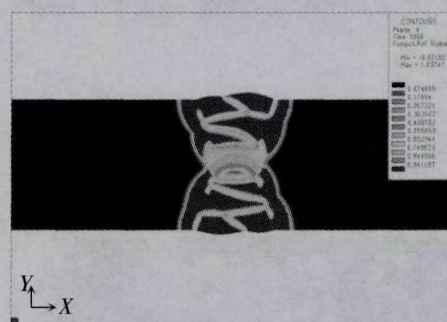
(a) 铁素体相分布图



(b) 空气相分布图



(c) 马氏体相分布图



(d) 奥氏体相分布图

图 6 焊接过程中相分布云图

2.3 应力场计算结果

由于焊接过程中局部高度集中的不均匀的瞬时热

输入,以及材料的热物理性能、力学性能随温度强烈非线性变化等原因,导致焊接过程中应力不断变化以及焊后残余应力和变形的产生。焊接应力的分布关系到构件的静强度和使用寿命,焊缝处应力集中易引起构件断裂,需对应力分布状态进行模拟校核。

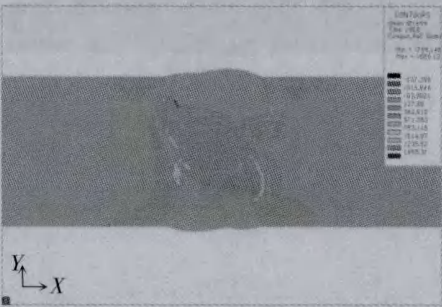
针对 TIG 多道焊接工艺,在焊接温度场的基础上,进行了应力场的有限元计算。数值计算过程中采用单

元生死法,逐道激活焊缝参与应力、应变计算。对焊接温度场的计算结果的分析表明该模型是正确的、可靠的。在温度场计算结果与试验结果吻合较好的前提下,利用所获得的温度场来计算应力、应变,并对应力场进行定量分析。抽取了第 5 道(1 500 s)与第 10 道(3 000 s)焊缝完成后的结果,每个方向应力的最大值和最小值见表 3,正值为拉应力,负值为压应力。

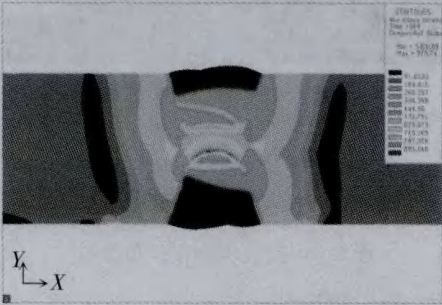
表 3 各个方向应力的最大值与最小值

应力方向	第 5 道焊缝		第 10 道焊缝	
	最大值/MPa	最小值/MPa	最大值/MPa	最小值/MPa
Sigma11	1 331	- 843	818	- 1 099
Sigma22	1 462	- 548	821	- 951
Sigma33	1 571	- 330	1 096	- 480
Sigma12	379	- 164	383	- 184
Mean stress	1 458	- 537	925	- 691
Von mises stress	886	92	893	118

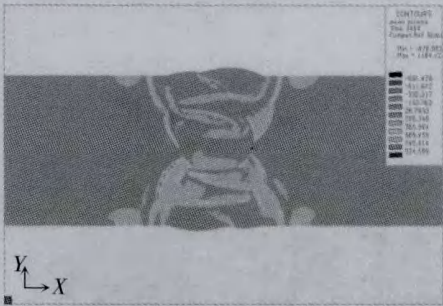
图 7 为第 5 道、第 10 道焊缝完成后 Mean stress 和 Von mises stress 应力的分布云图。经对比,可以看出拉应力主要分布在焊缝和近焊缝区域,Mean stress 拉应力最大值分布于熔合区,Von mises stress 应力最大值出现在焊缝区。



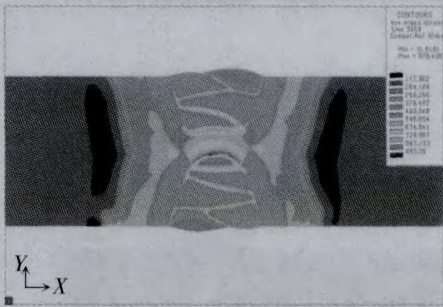
(a) 第 5 道焊缝 Mean stress



(b) 第 5 道焊缝 Von mises stress



(c) 第 10 道焊缝 Mean stress



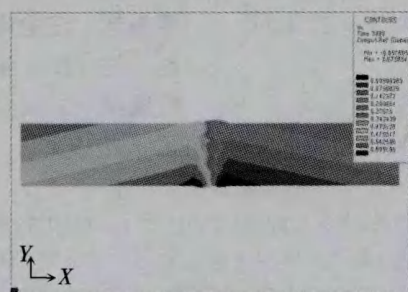
(d) 第 10 道焊缝 Von mises stress

图 7 第 5 道、第 10 道焊缝完成后应力分布图

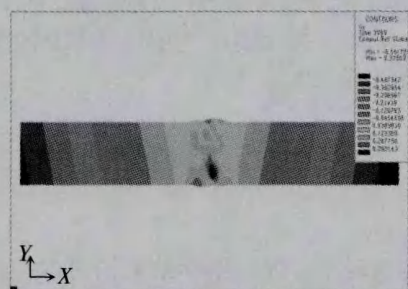
2.4 变形计算结果

计算了经多层多道焊接后 3 000 s 构件横截面的变形情况,如图 8a,8b 分别显示焊缝截面沿 X,Y 方向的变形情况。X 方向变形量最大值 0.6 mm,Y 方向变

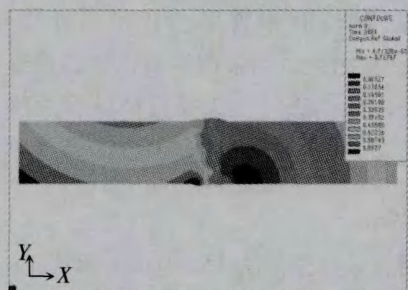
形量最大值 0.3 mm, 最小值 -0.5 mm。图 8c 为构件整体变形的效果图, 表示为焊件上对应同一部位焊接前、后之间的距离, 最大值为 0.65 mm。图 8d 为第 10 道焊缝完成后变形量放大 5 倍与原始的对比效果, 可以看出变形趋势是焊缝向上隆起, 向中间收缩。图 9 所示为



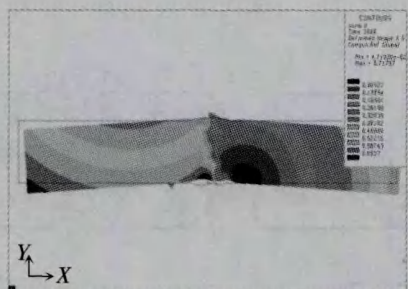
(a) X 方向变形情况



(b) Y 方向变形情况



(c) 整体变形



(d) 变形量放大 5 倍效果

图 8 焊缝变形分布云图

实际试验焊后变形情况, 与实际试验相比, 预测变形趋势是一致的, 变形量预测误差约为 0.4 mm。整个焊接过程中, 每道焊缝完成后的变形趋势及变形量如图 10 所示。



图 9 实际焊接变形情况图

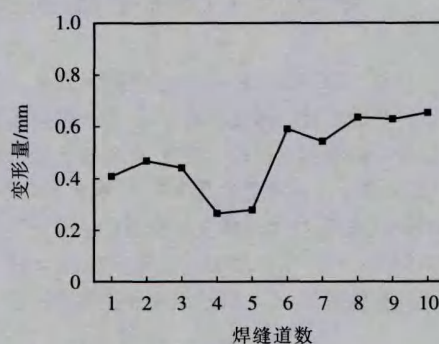


图 10 焊接各阶段变形趋势

3 结 论

(1) 利用焊缝节点平均热循环曲线成功实现超高强度钢厚板二维模型 TIG 多道焊模拟仿真。

(2) 焊接过程中, 焊缝发生部分马氏体转变, 熔合区由奥氏体、马氏体、铁素体共同构成。

(3) 残余应力主要存在于焊缝及附近熔合区, 变形趋势与实际情况符合一致。

参 考 文 献

- [1] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
- [2] 李少海. 基于 SYSWELD 的 TIG 堆焊试件应力及变形数值模拟分析[J]. 金属铸锻焊技术, 2012, 9: 145 - 150.
- [3] 蔡志鹏. 大型结构焊接变形数值模拟的研究与应用[D]. 北京: 清华大学硕士学位论文, 2001.
- [4] 朱瑞栋, 董文超, 陆善平, 等. 基于 SYSWELD 的 A7N01 铝合金缓冲梁结构焊接过程数值模拟[J]. 焊接, 2014(3): 42 - 47.
- [5] 路 浩, 邢立伟. 基于 Sysweld 的不锈钢板管焊接应力变形模拟[J]. 焊接, 2013(9): 35 - 37.
- [6] 陆汉忠, 沈大明, 黄 巍, 等. 计算机数值模拟控制超厚板焊接变形的工艺研究[J]. 焊接, 2011(6): 33 - 35.

作者简介: 杜博睿, 1988 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事焊接过程数值模拟及材料焊接性与工艺方面的研究。