

# 平板对接接头焊接变形的数值模拟与试验研究

张红涛<sup>1</sup>,徐传波<sup>1,2</sup>,孙思远<sup>2</sup>,王秋实<sup>2</sup>

<sup>1</sup>郑州铁路职业技术学院;<sup>2</sup>西南交通大学牵引动力国家重点实验室

**摘要:** 为验证数值模拟方法在构件焊接变形预测应用中的可靠性,对某多层焊平板对接接头进行了数值模拟研究与试验验证。共进行了三组焊接试验,采用三维扫描仪对试验后的焊件进行测量,并分析其焊后的残余变形量。基于 SYSWELD 分析软件,应用热弹塑性有限元法对该平板接头进行了数值模拟。通过将数值模拟仿真结果与试验测量结果进行对比分析,证明了数值模拟方法在焊接变形预测中的可靠性。其中角变形误差为 7.8%,横向收缩变形误差为 23.3%,纵向收缩变形误差为 15.2%。

**关键词:** 焊接变形;平板对接;数值模拟;SYSWELD

**中图分类号:** TG441;TH162

**文献标志码:** A

## Numerical Simulation and Experimental Research on Welding Deformation of Plate Butt Joint

Zhang Hongtao, Xu Chuanbo, Sun Siyuan, Wang Qiushi

**Abstract:** In order to verify the reliability of the applying of the numerical simulation in predicting the welding deformation of components, the numerical simulation and experimental verification are carried out for a multi-layer welded plate butt joint. In the experiment, three sets of welding experiments are conducted. The three dimensional scanners are used to measure the welding deformation of the samples and rearrange the residual deformation after welding. In the simulation, the thermo elastic plastic finite element analysis method is applied to simulate the plate joint based on the SYSWELD analysis software. Comparing with the numerical simulation and experimental results, the results show that the numerical simulation method is reliable in the prediction of welding deformation, and the error of transverse shrinkage, longitudinal shrinkage and the angular deformation respectively are 7.8%, 23.3% and 15.2%.

**Keywords:** welding deformation; plate butt joint; numerical simulation; SYSWELD

## 1 引言

焊接作为一种使机械结构实现连接的组装工艺,已经广泛应用于各大生产制造领域中,例如铁道机车车辆、船舶、汽车、航空、铁路以及桥梁建筑等。焊接的接头形式主要有平板对接、T形角接、搭接等。焊接过程中,焊件由于不均匀受热造成的构件焊后的残余变形将极大地影响其装配合理性与设计安全,因此对焊后的残余变形的规律研究逐渐受到国内外学者的关注与重视<sup>[1-3]</sup>。

焊接变形的研究方法主要基于两种方法:试验法与数值模拟法。其中试验法主要依靠经验公式或者通过整理大量的实验数据分析获得焊接的相关规律进行的焊接变形预测和焊接变形的控制;而数值模拟是通过建立相应的计算模型和根据热传导理论与应力应变场理论建立条件假设,运用有限元等分

析方法对构件的焊接变形进行模拟与计算。

由于试验法需要对焊接件进行实际试验操作,因此较大地增加了实验成本与时间成本,且受人为环境因素的影响较大。数值模拟方法成本低,能适用于各种大小型复杂焊接结构的焊后变形预测,成为了当下焊接变形预测与规律研究的主要方法<sup>[4]</sup>。本文对某平板多层焊接接头的焊后残余变形进行了研究,对比试验法与数值模拟两种分析方法所得到的结果,说明数值模拟分析方法在构件焊后残余变形预测中的准确性与可靠性。

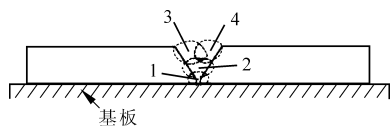
## 2 焊接试验方案制定与实施

### 2.1 方案制定

选取某平板对接接头进行实际的焊接实验。焊接构件如图 1 所示,尺寸为 300mm × 350mm × 12mm,焊接材料为 S355J2G3。根据焊接坡口设计指导书,将焊接坡口设计为 65°的 V 型坡口,左右焊接底板之间的间隙取 1mm。根据焊接工艺手册与指导书,设计该焊接实验总共进行四道焊接。按焊

接顺序依次为打底焊、填充焊、封面焊 1#与最后的封面焊 2#。脉冲 MIG 焊的具体工艺参数见表 1。

分别进行 3 组焊接实验,分组编号为 SJ-1-1、SJ-1-2、SJ-1-3。为了模拟平板在焊接过程中自由拘束的情况,以释放其焊接变形,仅采用一台夹具对一侧焊接板进行机械固定,操作方式与夹具安装位置如图 2 所示。



1. 打底焊道 2. 填充焊道 3. 封面焊道 1# 4. 封面焊道 2#

图 1 焊接接头结构



图 2 焊接拘束情况

## 2.2 试验结果测量与整理

焊后分别对 SJ-1-1、SJ-1-2、SJ-1-3 三组试样的残余变形进行测量统计。焊接的残余变形主要有以下三种形式<sup>[5]</sup>:横向收缩、纵向收缩、角变形。根据上述焊接残余变形的表现形式,设计焊接变形的测量方法见图 3。采用三维扫描仪进行测量,获得焊接后的残余变形的三维模型见图 4。通过将扫描的三维坐标参数生成参数化模型(.stl 格式),按照图 3 的方法进行焊接变形的测量,并整理数据(见表 1)。

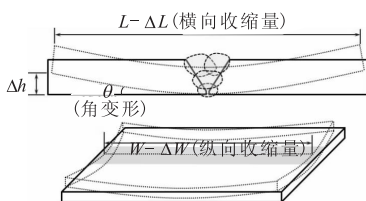


图 3 焊后测量位置



图 4 SJ-1-1 试样的焊后扫描模型

## 3 数值模拟研究

### 3.1 焊接变形理论<sup>[6]</sup>

采用热弹塑性有限元法对该平板对接接头进行

数值模拟计算,考虑了焊接构件在整个焊接过程中两个主要过程,即持续热输入时的升温过程与停止热输入后的自然空冷过程。

#### (1) 热传导基础理论

在不同的温度条件下,构件材料的物理属性也不同。移动热源使得焊接构件受热不均匀,导致其温度场分布也呈现为不均匀的阶梯分布,因此对焊接过程的温度场进行计算分析属于典型的非线性瞬态热传导的问题。由傅里叶传热定律和能量守恒定律,建立热传分析的关系式为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q \quad (1)$$

式中, $\rho$  为密度; $c$  为比热容; $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ 、 $\lambda_z$  为 X、Y、Z 向的导热系数; $Q$  为热输入量。

根据时间和时间的关系,传热问题可以分为稳态传热问题和瞬态传热问题。

稳态传热问题的方程式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

需通过时间间隔进行外推获得瞬态传热温度,即

$$T(\tau) = T(t - \Delta t) + \frac{\tau}{\Delta t} [T(t - \Delta t) - T(t - 2\Delta t)] \quad (3)$$

在对焊接温度场计算前,还需要代入一定已知条件,如初始条件和边界条件。对于初始条件,在时间为 0 时构件的温度分布均匀。对于边界条件,主要是构件的表面与外界的热传导,主要有以下的三个边界条件:

①边界上温度值的分布状况公式可表示为

$$T_s = T_s(x, y, z, t) \quad (4)$$

②边界上热流密度分布状况公式可表示为

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q_s(x, y, z, t) \quad (5)$$

③边界上物体与周围之间的热交换状况公式可表示为

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_a - T_s) \quad (6)$$

而在绝热条件下,有

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

以上各式中, $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  分别为表面法向 X、Y、Z 向的余弦值; $q$  为单位面积热输入; $h$  为换热系数; $T_a$  为介质的温度。

#### (2) 焊接应力应变场基础理论

热弹塑性有限元法是根据应力与应变之间的关系、应变与位移之间的关系、已知的边界条件,把最

表1 焊接工艺参数及实验测量结果

编号	焊道	电流(A)	电压(V)	焊接时间(s)	角变形(°)	横向收缩(mm)	纵向收缩(mm)
SJ-1-1	1	142.00	17.40	81.0	0.861	0.684	0.045
	2	257.00	26.81	71.0			
	3	254.00	26.80	65.0			
	4	256.00	26.71	58.0			
SJ-1-2	1	138.00	17.20	90.0	0.681	1.094	0.525
	2	256.00	26.82	80.0			
	3	252.00	26.70	70.0			
	4	254.00	26.71	60.0			
SJ-1-3	1	140.00	17.20	80.0	0.772	0.399	0.421
	2	253.00	26.61	77.0			
	3	252.00	26.80	65.0			
	4	260.00	26.80	57.0			

开始计算得到的温度场当作原始载荷,施加于焊接构件上进行温度场分析。建立有限元分析式为

$$[K]\{du\}_i = \{dF\}_i \quad (8)$$

式中, $[K]$ 为刚度矩阵; $\{du\}_i$ 是第*i*次位移增量; $\{dF\}_i$ 是第*i*次载荷增量。

材料处于弹性状态或塑性状态时,其应力与应变之间关系可表示为

$$\{d\sigma\} = \{D\}\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \quad (9)$$

式中, $\{D\}$ 为塑性矩阵; $\{C\}$ 为与温度有关的向量系数。

对于热应变公式可表示为

$$e_{ij}^T = a_{ij}(T - T_0)d_{ij} \quad (10)$$

式中, $e_{ij}^T$ 为热应变张量; $a_{ij}$ 为随温度变化的热膨胀系数; $T_0$ 为参考温度; $d_{ij}$ 为*d*算子。

### 3.2 建立模型

SYSWELD 软件可根据少量的有限元知识进行焊接质量的控制与优化,极大降低了制造成本<sup>[7]</sup>。应用 VISUAL-MESH 模块进行建模。由于热弹塑性有限元法是典型的非线性问题,为减少分析过程的工作量且保证可靠的精度,需要严格控制网格单元的数量与质量。根据有限元分析经验可知,六面体网格可以有效降低结构的单元数量,且计算结果也更加精确,运算的收敛性较好,故该平板焊接结构的

有限元模型采用六面体网格单元,网格大小由焊缝附近向两边增大。

有限元模型的坐标方向定义*X*轴向为垂直于焊缝的方向,*Y*轴向为平板的焊缝的方向,*Z*轴向为基板厚度的方向。参照图2的焊接试样进行建模与网格划分,有限元模型的尺寸与形状特征必须和实验焊件相同。焊接构件的约束施加方式见图5,在焊接底板一侧选择夹具安装区域的点进行约束,约束*X*、*Y*、*Z*方向。构件焊缝的局部网格分布见图6。

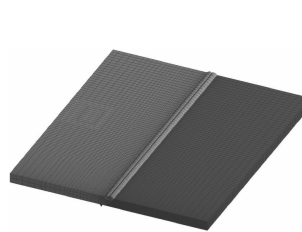


图5 试件有限元模型

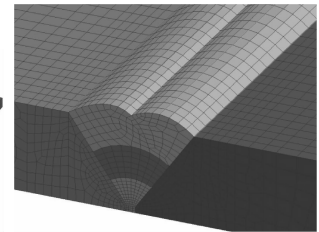


图6 焊缝局部图

### 3.3 材料性能

从 SYSWELD 的数据库中提取材料 S355J2G3 在各个温度下的物理性能(见表2)。在不同温度条件下,由于材料的物理性能发生了改变,因此在计算焊接构件的温度场时需代入的边界条件也发生了改变。材料 S355J2G3 的化学成分见表3<sup>[8]</sup>。

表2 焊接材料 S355J2G3 的物理性能

温度(K)	导热系数 $\lambda$ (W/mm·K)	比热容 $c$ (kJ/kg·K)	热膨胀系数 $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )	密度 $\rho$ (kg/mm <sup>3</sup> )	杨氏模量 $E$ (MPa)
293.0	5.12E-02	472.65	1.14E-05	7.82E-06	2.15E+05
373.0	1.99E-02	485.70	1.17E-05	7.79E-06	2.10E+05
573.0	4.46E-02	518.78	1.29E-05	7.73E-06	2.00E+05
773.0	3.68E-02	569.90	1.39E-05	7.66E-06	1.84E+05
1073.0	2.40E-02	693.65	1.22E-05	7.59E-06	1.42E+05
1373.0	2.81E-02	686.20	1.45E-05	7.44E-06	8.51E+04

表3 焊接材料 S355J2G3 的化学成分 (wt%)

材料	C	Si	Mn	P	S
S355J2G3	≤0.20	≤0.54	≤1.70	0.034	0.034
材料	Nb	V	Ti	Cr	Cu
S355J2G3	0.05	0.15	0.20	0.30	0.30

### 3.4 焊接工艺的参数

如表4所示,四道焊缝的工艺参数值分别取表1中三组焊接参数的平均值,初始温度取20℃。按照打底焊、填充焊与最后两道的封面焊的顺序依次进行焊机,没有中间冷却,方向相同。在仿真过程中采用生死单元法<sup>[9]</sup>,对第一道进行焊接仿真时,剩余的焊道单元处于未激活状态,其单元属性为零。即焊完打底焊之前,填充焊与最后两道的封面焊的单元属性处于未激活状态,知道打底焊焊接完成后,填充焊的单元将被激活,附上相应的单元属性。而后面两道封面焊的单元属性仍处于未激活状态,依次类推进行焊接,完成计算。

表4 仿真工艺参数

焊道	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	焊接速度 (mm/s)	效率	线能量 (J/mm)
打底焊道	140.0	17.3	4.2	0.8	461.3
填充焊道	255.4	26.7	4.6	0.8	1185.9
封面焊道#1	252.7	26.8	5.2	0.8	1041.9
封面焊道#2	256.7	26.7	6.0	0.8	913.9

### 3.5 仿真计算结果

#### (1) 温度场

参照上述工艺参数与条件进行焊接数值模拟。通过运算得到构件整个焊接过程的温度场分布情况,图7a、7b、7c、7d分别为打底焊、填充焊、第三封面焊与第四封面焊焊接完成后的平板温度场分布与热源温度分布云图。

由图7可知,焊接构件的焊缝及其热影响区都随着热输入的增加而快速上升,而热输入量随着焊接时间的增加而增加。可知,在热源的移动方向上,椭圆前半球的温度场梯度分布十分紧密,椭圆后半球的温度场梯度分布逐渐稀疏放缓。从整体焊接板件的温度场分布特征可看出,靠近焊缝中心线的温度场梯度较为紧密,越远离焊缝中心线的位置其温度场梯度分布越稀疏,最远端的温度与室温相同。

#### (2) 焊后残余变形

根据上述焊接试验,参照图3中的变形量测量方法,提取三条路径(Path-1、Path-2与Path-3)上的节点位移结果,计算出该平板焊接构件的角变形量、横向和纵向收缩量。即根据Path-1上节点在Z方向的位移量计算出构件的角变形;根据Path-2

和Path-4上的节点在X方向的位移量计算出构件的横向收缩量;通过计算Path-3两端节点在Y方向上的位移量计算出构件纵向收缩量(见图8)。

观察焊后等效位移云图,其位移变形趋势与试验件焊后变形趋势一致,非约束侧呈现明显的向上翘曲变形。约束侧位移呈现明显的梯度分布,距离焊缝区域越远,其位移变化量逐渐增大,其中最大等效位移量为5.93mm,位于焊缝附近区域。

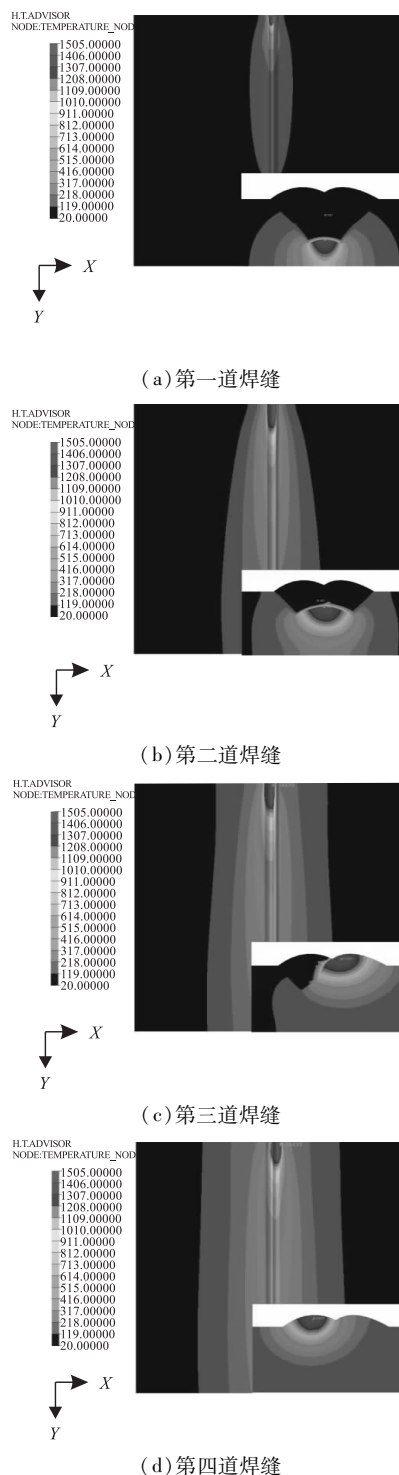
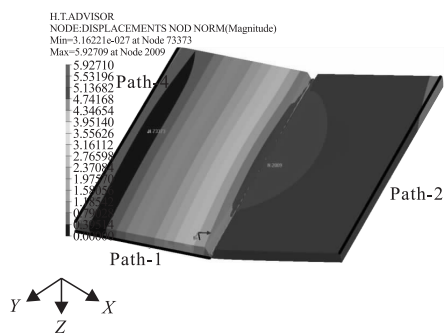
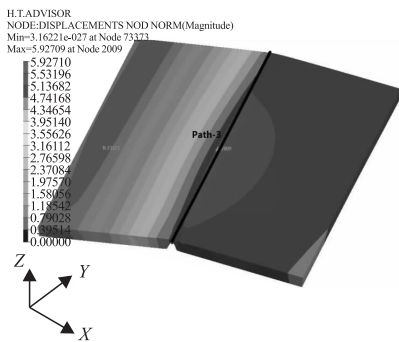


图7 四道焊缝焊后的温度场与熔池



(a) 正面



(b) 背面

图8 冷却后最终残余变形

#### 4 试验与仿真对比分析

参照表1中试样焊后测量所得的数据进行计算和整理,取3组试样测量值的平均数,结果见表5。通过观察数据可以发现,焊件的横向收缩远大于沿焊接方向纵向收缩,说明平板对接接头的焊后残余变形形式以横向收缩为主。而试验法的测量结果与数值模拟的仿真结果均反映了这一变形趋势。

表5 试验与仿真结果对比

	试验法	数值模拟		
		仿真值	绝对误差	相对误差
角变形(°)	0.77	0.83	-0.06	7.8%
横向收缩(mm)	0.73	0.90	-0.17	23.3%
纵向收缩(mm)	0.33	0.28	0.05	15.2%

对比分析焊件的角变形、横向收缩量以及纵向收缩量的试验值与仿真值,计算其绝对误差与相对误差,可见,数值模拟仿真结果较为精确,能较好地反映构件焊后的残余变形趋势与变形量。其中,角变形误差为7.8%,横向收缩变形误差为23.3%,纵向收缩变形误差为15.2%。

#### 5 结语

以平板对接接头为算例,研究了数值模拟方法在构件焊接变形预测中的可靠性,并进行了3组焊接试验予以验证。对比分析数据结果如下:

(1) 平板对接接头焊后呈现明显的翘曲变形,位移分布呈现梯度分布,随着距离焊缝区域越远,位移变化量逐渐增大;

(2) 平板对接接头的焊后残余变形形式以垂直于焊接方向的横向收缩变形为主,横向收缩是造成焊后翘曲变形的的主要原因;

(3) 数值模拟方法的仿真结果较为精确,能较好地反映构件焊后的残余变形趋势与变形量。

#### 参考文献

- [1] Satoh K, Terasaki T. Effect of welding conditions on residual stress distributions and welding deformation in welded structures materials[J]. Journal of Japan Welding Society, 1976, 45(1): 42-53.
  - [2] J D White, R H Leggatt, J B Dwight. Weld shrinkage prediction[J]. Welding and Metal Fabrication, 1980(2): 567-596.
  - [3] 吴言高, 李午申, 邹宏军, 等. 焊接数值模拟技术发展现状[J]. 焊接学报, 2002(3): 89-92.
  - [4] 张建强, 赵海燕, 吴甦, 等. 焊接过程三维应力变形数值模拟研究进展[J]. 焊接学报, 2003(5): 91-96.
  - [5] 王秋实. 转向架构架侧梁的焊接变形数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
  - [6] 蔡建鹏, 叶廷洪, 张彦杰, 等. 坡口形式对 Q345/SUS304 异种钢对接接头残余应力和变形的影响[J]. 机械工程学报, 2015(10): 55-61.
  - [7] 薛忠明, 杨广臣, 张彦华. 焊接温度场与力学场模拟的研究进展[J]. 中国机械工程, 2002(11): 83-86.
  - [8] 赵洪运, 舒风远, 张洪涛, 等. 基于生死单元的激光熔覆温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2010(5): 81-84.
  - [9] 朱瑞栋, 董文超, 林化强, 等. CRH2A 型动车组缓冲梁结构焊接残余应力的有限元模拟[J]. 金属学报, 2014(8): 944-954.
  - [10] 刘光洁. 转向架构架焊接变形数值模拟研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
  - [11] 李新平, 王荣辉, 李泽雨. 平板对接焊残余应力的三维有限元模拟与实验研究[J]. 热加工工艺, 2011(7): 138-141.
- 第一作者: 张红涛, 硕士, 讲师, 郑州铁路职业技术学院机车车辆学院, 450052 郑州市
- First Author: Zhang Hongtao, Master, Lecturer, Institute of Locomotive Vehicle, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou 450052, China