

# 基于 SYSWELD 的激光复合焊焊接变形数值模拟

唐琪<sup>1</sup>, 陈鹏<sup>1</sup>, 陈静青<sup>2</sup>, 梁勇<sup>1</sup>, 刘贊<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 610031;  
2. 西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室, 成都 610031)

**摘要:** 地铁作为一种重要的交通工具, 在城市生活中起着越来越重要的作用, 地铁同时具有绿色无污染、准时、运载能力强等优点。选用 3D 高斯+双椭球热源, 采用固有应变法, 对地铁牵引梁在不同约束情况下的焊接变形进行了模拟。在模拟现有约束情况的基础上, 另外设计了 3 种约束情况。结果表明, 采用固有应变法的模拟与实测结果吻合较好,  $x, z$  向最大变形都出现在方案 2 中, 分别为 2.46 和 13.13 mm,  $y$  向变形稳定在 1.63 mm 左右; 将变化率方差最大的角变形作为评价标准, 得到方案 4 最合理, 角变形最小为 1.21°。

**关键词:** 固有应变法; 有限元软件 SYSWELD; 激光复合焊; 焊接变形

中图分类号: TG 404 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400067

## 0 序言

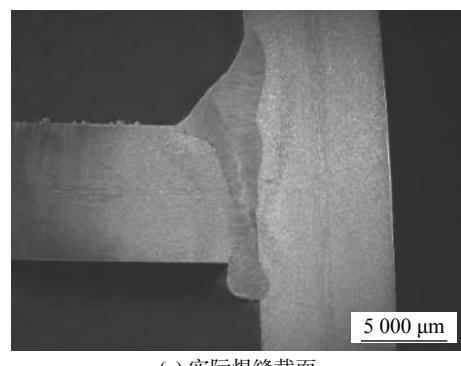
地铁作为一种重要的交通工具, 在城市生活中起着越来越重要的作用, 它不仅不阻碍地面交通, 而且还具有绿色无污染、准时、运载能力强等优点。牵引梁作为地铁底架重要组成部分, 由于焊缝多且长, 因此在焊接过程中, 容易形成应力集中, 从而使焊接结构变形, 不利于地铁车辆的运行安全, 成为制约地铁发展的一个关键因素<sup>[1]</sup>。

由于牵引梁属于大型构件, 通过试验的方法来研究焊接变形不仅耗时, 而且成本高昂, 因此采用数值模拟的方法逐步发展起来。日本学者 Ogaiva 等人<sup>[2]</sup>最先提出了固有应变法, 它不同于热弹塑性法, 固有应变法专注于焊后结果而不考虑焊接过程中复杂的瞬态过程, 从而大大缩短了计算量, 是现在大型构件焊接变形模拟的主要方法<sup>[3-5]</sup>。文中采用有限元软件 SYSWELD, 通过固有应变法对某型号地铁牵引梁在不同约束条件下的焊接变形进行了模拟计算, 并与实测结果相比较, 验证了焊接变形模拟的可靠性, 通过优化约束条件, 减小了焊接变形。

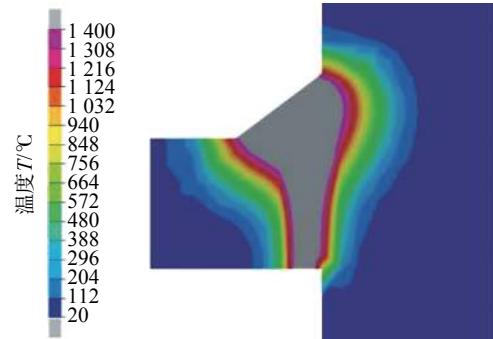
## 1 热源模型建立

牵引梁材料为 304 不锈钢, 为使模拟结果更准

确, 在对牵引梁整体进行模拟计算前, 需要对构件的 T 形接头和对接接头进行热源校核。实际生产中采用的是激光-MIG 复合焊接工艺, 为使模拟结果与实际吻合, 在不考虑熔池流动的情况下, 选用 3D 高斯+双椭球热源<sup>[6-8]</sup>。将模拟结果与实际焊接接头比较, 得到模拟熔池与实际焊缝截面基本一致, 如图 1 和图 2 所示, 证明了所选热源模型的正确性。



(a) 实际焊缝截面



(b) 模拟焊缝截面

图 1 T 形接头焊缝截面对比  
Fig. 1 Cross section comparison of T-joint welds

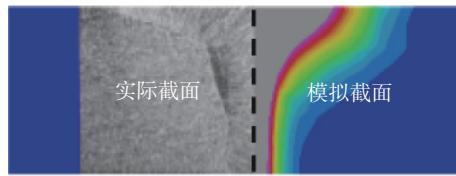


图 2 对接接头焊缝截面对比  
Fig. 2 Cross section comparison of T-joint welds

## 2 数值模拟过程

### 2.1 有限元模型

如图 3 所示, 该型号牵引梁长约 2 m, 由 4 块上盖板、1 块下盖板、2 块腹板、2 块筋板和 1 块端板构成, 包括 32 条不同类型的焊缝, 最长约 1 800 mm, 最短约 105 mm. 为了保证计算精度, 同时又尽量减少计算量, 采用渐变的六面体网格对模型进行离散



图 3 牵引梁实物图  
Fig. 3 Traction beam

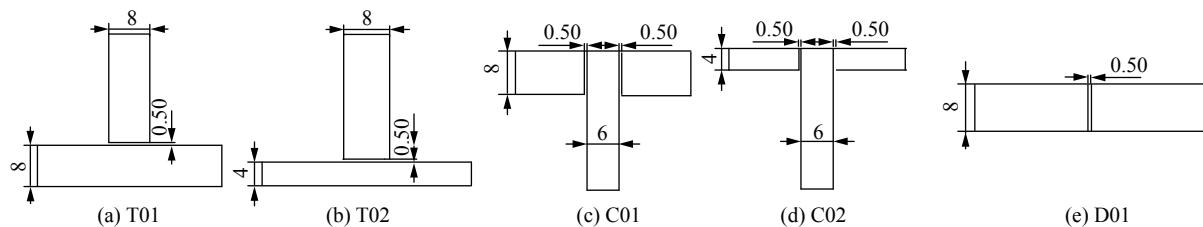


图 5 接头形式及编号 (mm)  
Fig. 5 Forms and numbering of welded joints

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding process parameters

接头编号	焊接方法	电流 I/A	电压 U/V	速度 v/(m·min <sup>-1</sup> )	功率 P/kW
T01 和 T02	激光焊	—	—	1	7
	复合焊	225	27.5	1.3	3
C01	复合焊	283	29.7	1.68	5
C02	复合焊	225	29.7	1.68	4
D01	复合焊	283	29.7	1.68	5

化处理. 在焊缝及其附近区域尺寸约为 1 mm, 远离焊缝区单元尺寸增大, 约为 10 ~ 18 mm. 最终得到总的单元约为 490 000 个, 如图 4 所示.

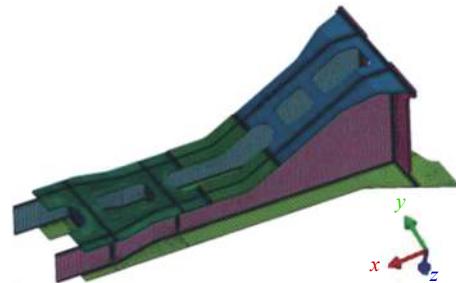


图 4 牵引梁整体网格模型  
Fig. 4 Mesh model of traction beam

### 2.2 固有应变的提取和施加

当校核焊缝截面与实际焊缝截面一致后, 进行力学计算, 并提取焊缝附近节点的固有应变. 该牵引梁焊接接头主要分为 3 种, 即 T 形接头、插接接头和对接接头. 根据不同板厚, 将 8 mm × 8 mm 和 8 mm × 4 mm 的 T 形接头分别命名为 T01 和 T02; 6 mm × 8 mm 和 6 mm × 4 mm 的插接接头命名为 C01 和 C02; 8 mm × 8 mm 对接接头命名为 D01, 如图 5 所示. 焊接时, C01, C02 和 D01 直接使用激光-MIG 复合焊焊接, 而 T01 和 T02 需先用激光焊打底, 各焊接工艺参数如表 1 所示, 提取各焊接接头长度方向中间截面的应变, 计算得到的平均值如表 2 所示.

表 2 平均应变值  
Table 2 Average strain of welded joints

接头编号	平均值 ε/mm
T01	0.084
T02	0.064
C01	0.060
C02	0.075
D01	0.060

现有的有限元软件一般不能直接将固有应变作为载荷进行加载,需要对固有应变进行转化才能施加到构件中进行变形的计算.根据提取和施加方式的不同,主要分为等效载荷法和温度载荷法.

### 2.2.1 等效载荷法

等效载荷法是将焊缝及其附近的固有应变积分后,转化为等效力和力矩来施加的一种方法<sup>[9]</sup>. White 等人<sup>[10]</sup>提出 Tendon force 的概念可以用于计算纵向收缩,它们的关系如下式

$$F_T = \int E \varepsilon_x dy dz \quad (1)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $\varepsilon_x$  为纵向固有应变.

### 2.2.2 温度载荷法

温度载荷法是在施加温度不变的情况下,通过改变材料线膨胀系数来施加固有应变的一种方法<sup>[11]</sup>. 温度、应变和材料线膨胀系数三者之间的关系满足

$$\varepsilon_x = W/F = \alpha \Delta T \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_x$  为固有应变;  $F$  为施加固有应变单元的截面积;  $W$  为单位长度的焊缝收缩量;  $\alpha$  为线膨胀系数;  $\Delta T$  为温度载荷.

### 2.3 约束条件

焊接约束的施加对焊接变形结果的影响很大,由于牵引梁上盖板不在同一平面内,故根据实际情况,只对下盖板的约束情况进行调整,其它工艺条件保持不变. 将约束情况分为 4 个方案,其中,方

案 1 用于实际生产,方案 2~方案 4 为设计方案,约束分布如图 6 所示. 为方便表述,除下盖板外,其余位置约束情况不发生变化,故未标出.

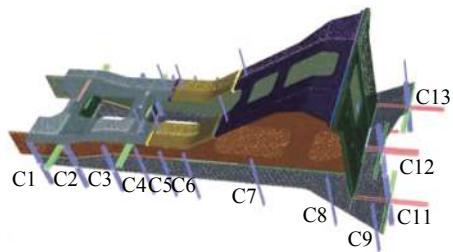


图 6 牵引梁约束位置示意图

Fig. 6 Constraint position of traction beam

方案 1: C1~C7 先全部约束,当焊到相应位置时移除约束,焊完后再恢复约束,不约束 C12.

方案 2: 移除约束 C2~C7,不约束 C12.

方案 3: 整个过程不移除约束,不约束 C12.

方案 4: 整个过程不移除约束,约束 C12.

## 3 试验结果

### 3.1 模拟结果

方案 1~方案 4 各方向上的模拟焊接变形结果分别如图 7~图 10 所示,不同的约束方案下牵引梁的各向焊接变形最大值分布较为一致.  $x$  向变形主要分布在上盖板与侧板的连接处,  $y$  向变形主要分

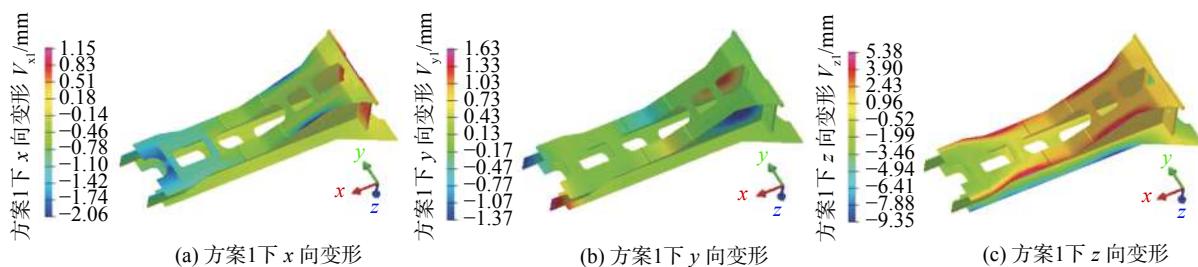


图 7 方案 1 下各向焊接变形云图  
Fig. 7 Welding distortion contour under scheme 1

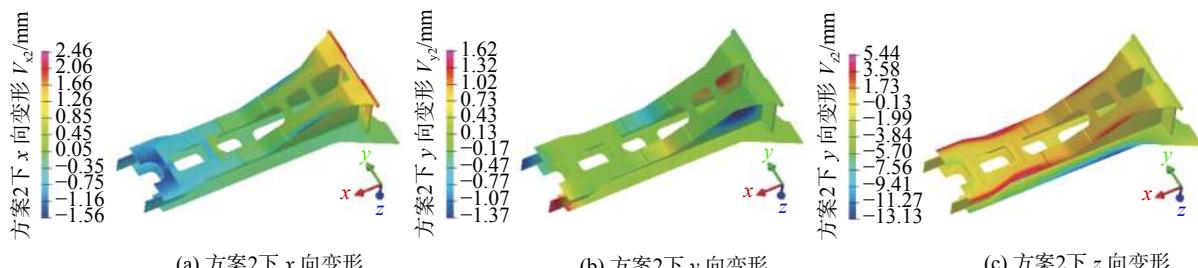


图 8 方案 2 下各向焊接变形云图  
Fig. 8 Welding distortion contour under scheme 2

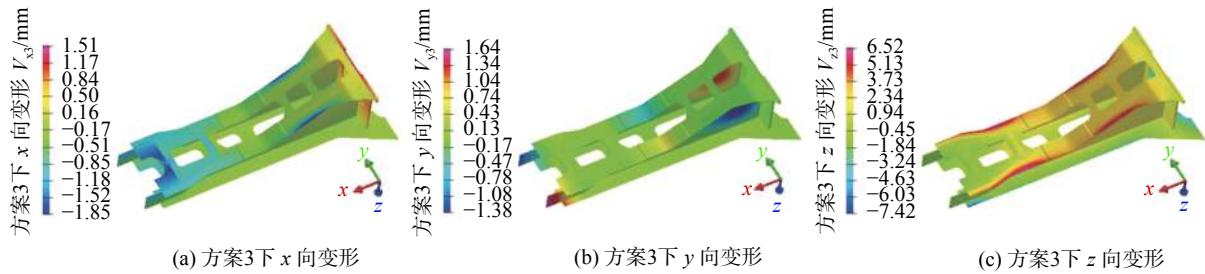


图9 方案3下各向焊接变形云图

Fig. 9 Welding distortion contour under scheme 3

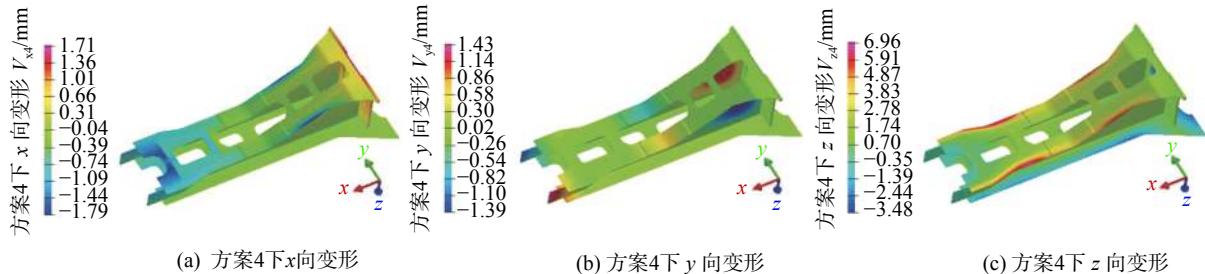


图10 方案4下各向焊接变形云图

Fig. 10 Welding distortion contour under scheme 4

布在肋板端部,  $z$  向变形主要分布在上盖板边缘, 直接读取各图最大焊接变形, 得到表3. 由表3可知, 牵引梁在  $y$  向的最大变形量与约束情况关系不大, 这是由于牵引梁在  $y$  向尺寸较小, 且热输入大的长直焊缝主要沿  $x$  向分布所致. 因此, 牵引梁在尺寸大的  $x$  向和盖板厚度的  $z$  向变形受约束情况影响较大,  $x, z$  向最大变形都出现在方案2中, 分别为2.46和13.13 mm. 其中,  $z$  向变形明显主要出现在上盖板边缘, 是因为上盖板厚度有限, 过大的热输入使上盖板发生变形.

表3 不同方案下的各向最大变形

Table 3 Maximum deformation under different schemes

方案编号	$x$ 向变形 $V_x$ /mm	$y$ 向变形 $V_y$ /mm	$z$ 向变形 $V_z$ /mm
方案1	-2.06	1.63	-9.35
方案2	2.46	1.62	-13.13
方案3	-1.85	1.64	-7.42
方案4	-1.79	1.43	6.96

### 3.2 试验验证

为证明2.3中方案1模拟结果的正确性, 需要将模拟结果与实测结果进行对比, 如图11. 分别在牵引梁上下盖板边缘取点, 测量和提取图3及方案1中对应位置的  $z$  向变形, 结果如表4所示, 模拟结果与实际结果接近, 绝对误差小于1 mm, 相对误差

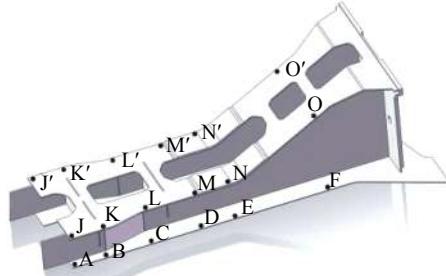


图11 牵引梁取点位置

Fig. 11 Points position of traction beam

表4 实测及模拟测量点变形结果

Table 4 Measured and simulated measurement results of point deformation

测量点	实测变形 $V_j$ /mm	模拟变形 $V_m$ /mm	绝对误差 $\Delta V$ /mm	相对误差 $\Delta \delta(\%)$
A	7.9	8.54	0.64	8.10
B	6.4	5.96	0.44	6.88
C	6.3	6.99	0.69	10.95
D	6.5	6.07	0.43	6.62
E	7.0	6.08	0.92	13.14
F	8.4	8.37	0.03	0.36
J	2.5	2.44	0.06	2.40
K	2.8	3.15	0.35	12.50
L	4.3	4.81	0.51	11.86
M	3.1	3.30	0.20	6.45
N	2.4	2.66	0.26	10.83
O	4.5	4.11	0.39	8.67
平均值	—	—	—	8.23

平均值为 8.23%，说明模拟结果与试验结果能够较好的吻合，可以通过模拟的方法来优化牵引梁在实际焊接中的约束情况，减小焊接变形。

为更好的选择最优约束方案，需要进一步考虑牵引梁焊接的角变形，收缩变形和挠度。在模型对应方向上取若干点并将这些点的平均值作为该方向上的变形量，如表 5 所示。变化率方差用于描述焊接变形在不同约束下的波动情况，表 5 中角变形方差最大，因此将角变形作为评价标准，方案 4 的焊接角变形最小，故牵引梁在焊接过程中的最佳约束情况为方案 4。

表 5 不同焊接约束变形结果

Table 5 Deformation results under different welding constraints

方案编号	角变形 $\delta/^\circ$	收缩变形 $V_s/\text{mm}$	挠度 $\gamma/\text{mm}$
方案1	5.25	0.5	1.63
方案2	5.98	0.54	1.43
方案3	2.73	0.48	1.64
方案4	1.21	0.51	1.54
变化率方差	0.215 4	0.003 6	0.004 2

## 4 结 论

(1) 采用固有应变法的模拟与实测结果吻合较好， $x, z$  向最大变形都出现在方案 2 中，分别为 2.46 和 13.13 mm， $y$  向变形稳定在 1.63 mm 左右。

(2) 将变化率方差最大的角变形作为评价标准，得到方案 4 最合理，角变形最小为 1.21°。

## 参考文献：

- [1] 唐 琪, 陈 鹏, 黄菁婧, 等. 基于 SYSWELD 的地铁底架枕梁焊接变形的数值模拟 [J]. 电焊机, 2017, 47(6): 101–104.  
Tang Qi, Chen Peng, Huang Jingjing, et al. Numerical simulation of welding deformation for body bolster on subway underframe based on SYSWELD[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(6): 101–104.
- [2] Ueda Y, Yuan M G. Prediction of residual-stresses in butt welded plates using inherent strains[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 1993, 115(4): 417–423.
- [3] Ogawa K, Deng D, Kiyoshima S, et al. Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(4): 1031–1042.
- [4] 张庆移. 6061 铝合金薄板的焊接变形数值模拟 [D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [5] Deng D, Murakawa H, Liang W. Numerical simulation of welding distortion in large structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2007, 196: 4613–4627.
- [6] 李瑞英, 赵 明, 吴春梅. 基于 SYSWELD 的双椭球热源模型参数的确定 [J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 93–96.  
Li Ruiying, Zhao Ming, Wu Chunmei. Determination of shape parameters of double ellipsoid heat source model in numerical simulation based on SYSWELD software[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(10): 93–96.
- [7] 李培麟, 陆 哲. 双椭球热源参数的敏感性分析及预测 [J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 89–95.  
Li Peilin, Lu Hao. Sensitivity analysis and prediction of double ellipsoid heat source parameters[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 89–95.
- [8] 顾 颖, 李亚东, 强 斌, 等. 基于 ANSYS 优化设计求解双椭球热源模型参数 [J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 15–18.  
Gu Ying, Li Yadong, Qiang Bin, et al. Parameter optimization of double ellipsoidal heat source model by ANSYS[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 15–18.
- [9] Zhan Yu, Liu Changsheng, Zhang Fengpeng, et al. Experimental study and finite element analysis based on equivalent load method for laser ultrasonic measurement of elastic constants[J]. Ultrasonics, 2016, 69: 243–247.
- [10] White J D, Leggatt R H, Dwight J B. Weld shrinkage prediction[J]. Welding & Metal Fabrication, 1980, 11(9): 587–596.
- [11] 徐 超, 余绍蓉, 郑晓亚, 等. 机械螺栓法兰连接的有限元力学模型比较研究 [J]. 机械设计与制造, 2009(6): 37–39.  
Xu Chao, Yu Shaorong, Zheng Xiaoya, et al. Comparative evaluation of finite element models for mechanical structures with bolted joints[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(6): 37–39.

**第一作者简介:** 唐 琪, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要从事焊接数值模拟和激光增材制造仿真分析。Email: [tq\\_swjtu@163.com](mailto:tq_swjtu@163.com)

**通信作者简介:** 陈 鹏, 男, 副教授。Email: [cpx28@sina.com](mailto:cpx28@sina.com)