

基于固有应变理论的高铁车顶 MIG 焊接变形仿真研究

韩春花, 徐 娜, 张兴芳, 张 玮

(太原理工大学 化学化工学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 高铁车顶焊接变形一直是工程中亟需解决的问题, 对车顶焊接过程进行数值模拟, 能快速、有效预测焊接变形, 为改进其焊接工艺提供依据。然而高铁车顶尺寸大、焊缝多, 采用目前数值计算方法难以准确、高效获得其焊接变形。因此, 基于常用的固有应变理论, 根据铝合金车顶型材 MIG 焊工艺, 通过改进现有计算模型, 快速、准确地得到了高铁车顶整体焊接变形。结果显示, 高铁车顶多条焊缝采用不同焊接顺序时得到的变形趋势基本一致, 但变形量不同, 其中先焊车顶外弧面接缝再焊内弧面接缝, 同一弧面先焊弧面中间接缝再焊两侧接缝的方案变形最小。

关键词: 高铁; 车顶; MIG 焊; 焊接变形; 固有应变

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20201936

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)05-0123-05

Deformation Simulation of MIG Welding of High-Speed Rail Roof Based on Intrinsic Strain Theory

HAN Chunhua, XU Na, ZHANG Xingfang, ZHANG Wei

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The welding deformation of high-speed rail roof has been a problem to be solved in engineering, the numerical simulation on the welding process of roof can predict the welding deformation quickly and effectively, and therefore it can provide the basis for improving the welding process. However, the rail roof is very huge and has numbers of welding lines, it is difficult to predict the deformation accurately and efficiently by using the present simulation method. Based on the intrinsic strain theory, the welding deformation of roof was quickly and accurately obtained by improving the existing calculation model according to the MIG welding process of aluminum alloy. The results show that when the high-speed train roof welds are welded with different sequences, the deformation trend is almost same but the deformation degree is quite different. And the roof has the minimum deformation when welding in the order from outer arc surface to inner arc surface and from center to two sides for the same arc surface.

Key words: high-speed rail; roof; MIG welding; welding deformation; intrinsic strain

目前, 我国高铁事业发展迅速, 高速列车制造是高铁事业发展中的一个重要环节^[1]。焊接作为高速列车生产中最基础、最重要的连接方式, 焊接质量的高低直接影响车体的承载能力和使用寿命。

焊接变形一直是大型结构制造上存在的一个重要问题^[2]。高速列车的车体壁薄、外观尺寸大, 焊接变形问题更为突出。此外, 出于高速、轻量化的需求, 高速列车往往采用减薄的铝合金型材, 这也加剧了车体焊接过程中的变形收缩^[3]。尤其是列车的车顶,

弧度最大, 焊接变形控制难度也最大, 车顶的焊接变形不仅会造成焊接结构的形状变异、尺寸精度及承载能力下降, 而且对车体总体装配精度及后续交付使用都会产生严重不良影响。高速列车的焊接实验成本高、用时长, 而采用计算机数值模拟技术对车体焊接过程进行仿真, 能够快速、有效地预测和控制焊接变形。因此, 能够科学、定量、快速地分析出高速列车车顶焊接变形分布规律, 并在此基础上优化焊接工艺以降低焊接变形量对于提高高速列车制造水平具有十分重要的工程意义。

目前焊接变形数值模拟方法主要有热弹塑性有限元法和固有应变法。本文采用将局部接头模型热弹塑性有限元计算与整体模型固有应变计算

收稿日期: 2020-08-04

作者简介: 韩春花(1996-), 女, 山西朔州人, 硕士, 主要研究方向为传统焊接、激光焊接及复合焊接在高铁及压力容器等设备焊制中的数值模拟; 电话: 13393514733; E-mail: hanch4733@163.com

相结合的方式模拟计算高速列车车顶结构在焊后的整体变形量。原因在于,热弹塑性有限元法虽然精度较高,但对于大型复杂的焊接结构分析较为困难,一般不予采用;而固有应变法避开了复杂的焊接过程,只将焊接以后在焊缝区存在的固有应变作为初始载荷进行一次弹性计算,来获得整个结构的焊接变形,大大减少计算量,更适合大型结构件焊接变形的预测^[4-6],应用越来越广泛。然而,目前采用固有应变法进行车体焊接模拟计算时,通常直接进行整体模型的固有应变计算,未考虑对局部接头模型进行热弹塑性有限元计算与平均固有应变的提取、施加^[7-8],这在一定程度上降低了计算结果的准确度。

基于以上背景,本文通过将局部接头模型热弹塑性有限元计算与整体模型固有应变计算相结合的方式改进计算模型,模拟计算高速列车车顶结构在 MIG 焊后的整体变形量,并在此基础上对车顶的焊接顺序进行优化设计,为改进车顶结构的实际焊接工艺提供参考。

1 固有应变计算模型的改进

根据固有应变理论,焊接过程中总应变 ε 一般可分解为弹性应变 ε^e 、塑性应变 ε^p 、热应变 ε^T 、蠕变应变 ε^c 和相变应变 ε^r ,即:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^T + \varepsilon^c + \varepsilon^r \tag{1}$$

固有应变为总应变减去弹性应变,即:

$$\varepsilon^* = \varepsilon - \varepsilon^e = \varepsilon^p + \varepsilon^T + \varepsilon^c + \varepsilon^r \tag{2}$$

式中:热应变在焊件的加热-冷却过程中相互抵消,不予考虑;对于铝合金,相变应变可以忽略;另外,由于焊接中处于蠕变温度区间的时间很短暂,相比塑性应变,蠕变应变很小,其对残余应变的影响也很小,因此固有应变可以认为全部来自塑性应变。

针对铝合金 MIG 焊接,一般通过三维热弹塑性有限元计算可获得焊接模型整体塑性应变的大小和分布,但是由于高铁车顶结构尺寸大,导致对整体车

顶模型的三维热弹塑性有限元计算不易实现,因此本文尝试采用局部 MIG 焊接接头模型三维热弹塑性有限元计算与整体模型固有应变计算相结合的方式来计算。即首先建立车顶几何模型:对车顶三维模型抽取中面得到二维壳模型建立整体模型,截取车顶型材 MIG 焊接接头部位建立局部模型;然后对适用于 MIG 焊的双椭球体热源模型进行热源校核以获取与实际试验热源相吻合的热源模型;最后利用修正后的热源模型对三维局部接头模型进行热弹塑性有限元计算,依据应变沿焊缝均匀分布的原理,提取局部焊缝的平均固有应变再加载于整体焊缝上,从而快速、准确地得到大尺寸高铁车顶的整体焊接变形。

2 模型建立

2.1 几何模型与网格模型

高铁车顶一般是由 5 块与车身等长度的大型中空挤压铝合金型材焊接而成的弧面焊接结构。整个车顶共 8 条焊缝,正反两面各 4 条,焊缝为规则的纵向直平行焊缝^[1]。目前时速为 200~400km 的列车车体一般宽 2.5~3.6 m^[9]、长 25~25.5 m^[10],本文计算取车顶模型总长度为 25 m,宽度为 2.5 m。采用 Hypermesh 软件抽取车顶结构的中面,建立简化模型,如图 1(a)、(b)所示。由于车顶结构在长度方向上完全相同,为了减少计算量,沿简化模型长度方向随机截取一段(长 1014 mm)建立网格模型,如图 1(c)所示。为了提高计算精度,在焊缝处及热影响区对网格进行细化,网格最小单元为 2 mm;兼顾计算效率,在远离焊缝的母材位置采用了大网格进行划分,最大单元为 40 mm。焊接处局部对接接头采用三维实体网格划分,其厚度与型材焊缝处厚度一致,为 3 mm^[11],采用 Visual Mesh 软件对局部接头模型进行网格划分,如图 2 所示。

2.2 热源模型

常见的焊接热源模型有高斯热源模型、双椭球

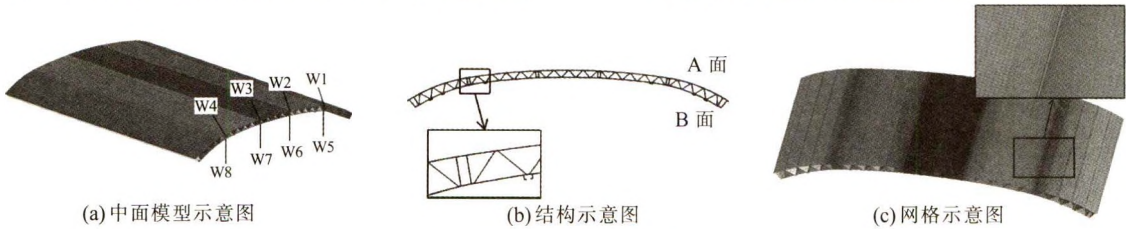


图 1 高铁车顶模型示意图
Fig.1 Schematic of high-speed rail roof model

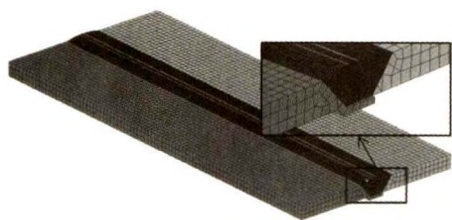


图 2 局部接头网格模型
Fig.2 Mesh model of local joint

热源模型和半球热源模型等^[12-13]。车顶采用单丝 MIG 焊^[14],这种焊接方法的电弧穿透能力较大,熔深大。双椭球热源模型相较于传统高斯热源模型考虑了熔透,计算精度较高,因此本文在仿真中采用的是双椭球热源模型。

由于电弧沿焊接方向运动,电弧热流分布不对称,电弧前方的加热区域要比电弧后方的小,为了体现焊接过程中移动热源前后端的温度梯度分布,双椭球体热源模型分为前半球和后半球,分别用式(3)、(4)表示。

$$q(x,y,z,)=\frac{6\sqrt{3}f_tQ}{a_fb_c\pi\sqrt{\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{3x^2}{b^2}-\frac{3y^2}{a_f^2}-\frac{3z^2}{c^2}\right)\quad (y\geq 0)\quad (3)$$

$$q(x,y,z,)=\frac{6\sqrt{3}f_rQ}{abc\pi\sqrt{\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{3x^2}{b^2}-\frac{3y^2}{a_r^2}-\frac{3z^2}{c^2}\right)\quad (y< 0)\quad (4)$$

式中: Q 为有效热输入; a_f 、 a_r 、 b 、 c 为半椭球体的半轴长; f_f 、 f_r 分别为输入功率在熔池前后部分的能量分布系数。

模拟中母材选用 6A01-T5 铝合金^[15],填充材料选用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的 ER5356 焊丝,化学成分见表 1。两板材尺寸均为 $100\text{mm}\times 20\text{mm}\times 3\text{mm}$,焊接坡口尺寸如图 3 所示,其中, $\alpha_1=50^\circ$, $\alpha_2=40^\circ$, $b\leq 0.4\text{mm}$, $c=1\text{mm}$,焊接电流为 260A ,焊接电压为 26V ,焊接速度为 12mm/s 。

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of base material and welding wire (wt%)

材料	Mg	Fe	Si	Zn	Ti	Mn	Cu	Cr	Al
6A01-T5	0.62	0.14	0.53	0.049	0.03	0.2	0.02	0.15	余量
ER5356	5.0	0.4	0.25	0.25	0.15	0.1	0.1	0.03	余量

经过对热源模型参数进行调节,各参数的选择为 $a_f=6\text{mm}$, $a_r=7.5\text{mm}$, $b=4.3\text{mm}$, $c=3.3\text{mm}$ 。调节热

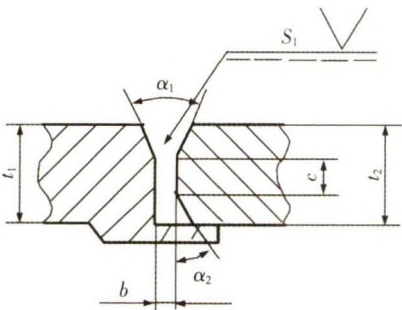


图 3 坡口示意图
Fig.3 Groove diagram

源模型参数后得到的焊缝横截面温度场云图如图 4 所示,实验所得焊缝截面形貌如图 5 所示。将焊缝横截面局部熔池与试验所得焊缝横截面进行对比,两者形貌相近,说明模拟热源与实际试验热源相吻合,计算模型比较合理、准确。

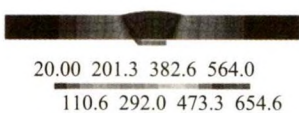


图 4 温度场云图(°C)
Fig.4 Nephogram of temperature field(°C)



图 5 焊缝截面形貌
Fig.5 Weld section morphology

2.3 固有应变的提取

依据实际焊接过程中对接接头的装夹情况,在两对接板的两侧外边缘一圈节点上施加刚性约束,然后对对接接头局部模型进行热弹塑性有限元计算,并依据式(5)通过调节线膨胀系数来间接施加固有应变。

$$\varepsilon=\alpha\cdot\Delta T\quad (5)$$

式中: ε 为应变变量; α 为线膨胀系数; ΔT 为温度差值,表示材料熔点与焊接起始温度的差值。

计算所得的平均固有应变分布如图 6 所示。由图可知,固有应变主要集中在对接接头的焊缝区,且沿着焊缝方向近似均匀分布。图 7 显示了焊缝处节点的平均固有应变值随着时间的变化趋势。从图中



图 6 平均固有应变分布
Fig.6 Distribution of mean intrinsic strain

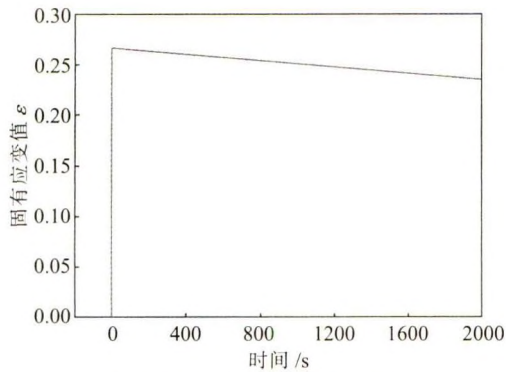


图 7 平均固有应变值变化曲线
Fig.7 Curve of mean intrinsic strain value

可知，在 2000 s 焊接完成后平均固有应变值为 0.0235，根据式(5)即可得到线膨胀系数 α 。

3 焊接模拟计算结果分析

因固有应变沿焊缝均匀分布，将 8 条纵焊缝都均分为 5 段，如图 8 所示，把已提取的固有应变沿纵向依次施加在分段焊缝上，从而实现对焊接方向的模拟。实际焊接接头截面如图 9 所示，焊缝宽度为 8 mm，据此将计算过程中的电弧作用平均宽度设为 4 mm。8 条纵焊缝的焊接顺序，如表 3 所示，有 4 种方案。以第 1 组的焊接顺序为例，车顶焊接变形的计算结果如图 10(a)所示。从图中可见，车顶变形呈现中间向反面拱起的弧形趋势，变形方向与车顶结构弧形相反；且以车顶断面中心线为轴，两侧变形趋势一致、大小相同，断面中心处变形量最大，约为 3.31 mm。焊接变形较大部分，处于先焊的两条焊缝中间，这是由于先焊接的型材缺少其它型材的约束与

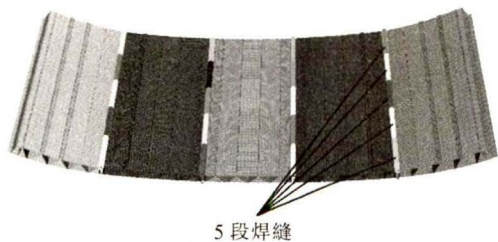


图 8 模型示意图
Fig.8 Model diagram

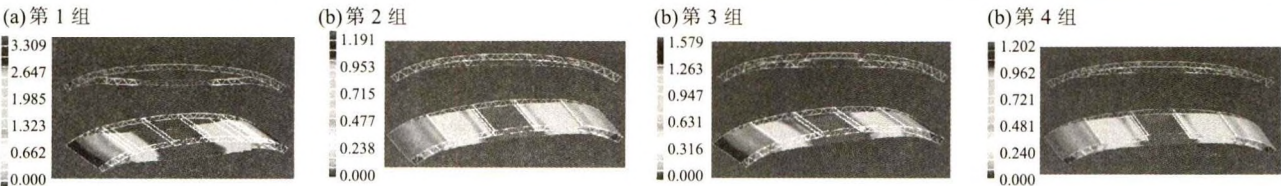


图 10 焊后车顶整体变形云图(mm)
Fig.10 Nephogram of deformation of the roof after welding (mm)

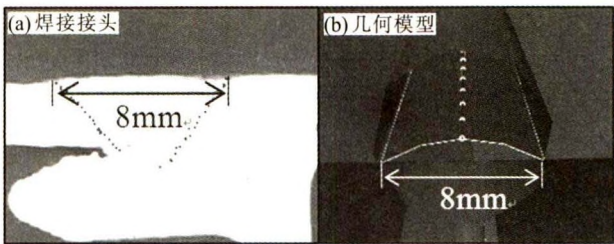


图 9 实际焊接接头截面图与几何模型对比
Fig.9 Comparison diagram of actual welded joint cross section and geometric model

固定，收缩移动相对自由，导致先焊的两条焊缝中间部分的型材变形较大；后焊接的型材受到其它已焊型材的约束，焊接变形受到限制，变形量相对小，即越靠后焊接的型材变形量也越小。此组计算结果与王亚男^[8]在对高铁侧墙焊接变形模拟中对应案例的计算结果是一致的，这也验证了本文计算模型的正确性。

为了降低车顶焊接变形量，需要优化车顶焊缝的焊接顺序，因此进一步对表 2 中其它 3 组焊接方案进行计算，计算结果如图 10(b)~(d)所示，分别提取图 10 中 4 组车顶焊接方案的焊接变形量，得到的焊接变形曲线见图 11。以车顶宽度方向为横轴，取车顶宽度方向左侧边缘作为横轴 0 点；以车顶变形量为纵轴，取车顶截面弧形的最低点作为纵轴 0 点，弧形向下弯曲为纵轴正向。由图 11 可知，4 组焊接方案得到的车顶焊接变形趋势基本一致，均为中间向反面拱起的弧形变形，变形均以车顶断面中心线为轴左右对称；均是车顶断面中心处变形量最大，其中 2~4 组最大变形量依次约为 1.19、1.57、1.20 mm。对比可知，4 组焊接方案中，第 1 组的变形最大，其它 3 组变形相近且较小，第 2 组与第 4 组在车

表 2 车顶焊接顺序对照表
Tab.2 Comparison table of welding sequences for roof

组别	弧面焊接顺序 *	焊缝焊接顺序
1	先 B 面后 A 面	先中间后两侧
2	先 A 面后 B 面	先中间后两侧
3	先 B 面后 A 面	先两侧后中间
4	先 A 面后 B 面	先两侧后中间

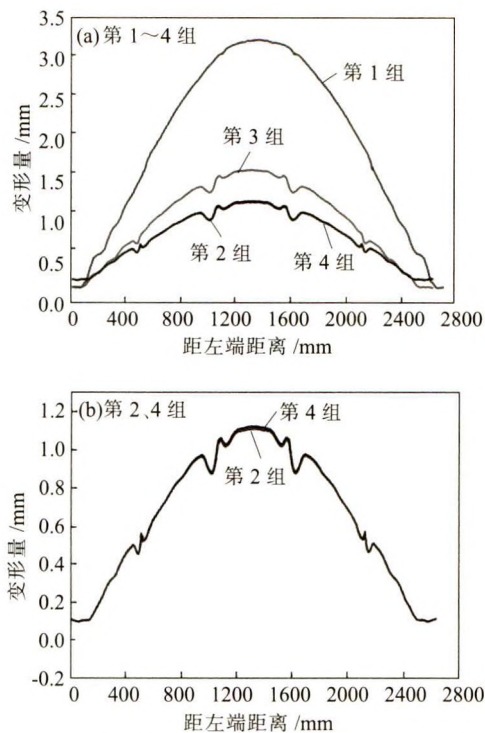


图 11 不同焊接方案的车顶焊接变形量曲线
Fig.11 Curves of welding deformation of the roof
in different welding schemes

顶的中顶型材变形上有一定的差别,其中又以第2组的变形为最小。因此,为了降低高铁车顶在实际焊接过程中的变形量,应该选择第2组的焊接顺序,即先焊车顶外弧面(即A面)接缝再焊内弧面(即B面)接缝,同一弧面接缝先焊弧面的中间接缝再焊两侧接缝。

4 结论

(1) 采用将局部接头模型热弹塑性有限元计算与整体模型固有应变计算相结合的方式模拟计算高速列车车顶结构在焊后的变形情况,具有可行性。

(2) 模拟结果显示,高铁车顶焊接时,主要趋势为中间向反面拱起的弧形变形,变形均以车顶断面中心线为轴左右对称,车顶断面中心处变形量最大。

(3) 通过优化焊接顺序控制焊接变形,结果显示,先焊车顶外弧面接缝再焊内弧面接缝,同一弧面接缝先焊弧面的中间接缝再焊两侧接缝的焊接方案

的焊接变形最小。

参考文献:

- [1] 王亚男. 时速 350 km 动车组车顶焊接变形控制与工装夹具设计研究[J]. 焊接, 2018(10): 64-68.
- [2] Yang Xinhua, Wang Chunsheng, Chang Li, et al. Numerical simulation of the welding deformation for the side sill of the bogie frame based on local-global method [J]. China Welding, 2007, 16(4): 11-14.
- [3] 李书齐. 6N01 铝合金型材及其焊接接头疲劳性能预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [4] Li Y N, Xie S M, Zhang J H. Prediction of welding deformations of CRH380 aluminum alloy side-wall with equivalent thermal load method based on inherent strain [J]. Advanced Materials Research, 2013, 652-654: 2303-2310.
- [5] Lu Yaohui, Lu Chuan, Zhang Dewen, et al. Numerical computation methods of welding deformation and their application in bogie frame for high-speed trains [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 204-213.
- [6] Murakawa H, Deng D, Ma N. Applications of inherent strain and interface element to simulation of welding deformation in thin plate structures [J]. Computational Materials Science, 2012, 51(1): 43-52.
- [7] 李树栋, 祝航, 戴忠晨, 等. 基于固有应变法的不锈钢车体车顶焊接变形仿真[J]. 电焊机, 2018, 48(8): 9-12.
- [8] 王亚男. 时速 400 km 动车组车体侧墙焊接模拟仿真及变形控制研究[J]. 电焊机, 2018, 48(11): 102-107.
- [9] 李春广, 尹洪权, 向银强, 等. 不锈钢车顶结构焊接变形的数值模拟研究[J]. 机械制造文摘-焊接分册, 2018(2): 10-13.
- [10] 韩德成, 汪认, 陈东方, 等. 预置装夹方法对高速列车地板焊接变形及残余应力影响的数值模拟 [J]. 机械, 2017, 44(11): 73-76.
- [11] Zhu Z Y, Chen P, Zhou H M, et al. Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-weld of high-speed train [J]. Advanced Materials Research, 2011, 337: 255-261.
- [12] Eager T W, Tsai N S. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources [J]. Welding Journal, 1983, 62 (12): 346-355.
- [13] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [14] Chen Y H, Chen P, Tian A Q. Research on the effects of welding sequence on welding residual stress of high-speed train based on SYSWELD [J]. Advanced Materials Research, 2011, 399-401: 1806-1811.
- [15] 雷振, 常云峰, 徐富家, 等. 高速列车 6N01 铝合金型材激光-MIG 复合填丝焊接技术[J]. 焊接, 2019(5): 18-22. 