

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.07

轨道车辆铝合金车体不同断面型材的 焊接变形数值模拟计算分析

耿明, 王亚男, 刘松, 王隽, 邵有发, 郭春成

中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062

摘要: 为优化轨道车辆铝合金车体焊接变形控制工艺, 本研究提出一种宽幅断面型材设计方案, 即侧墙使用两块型材替代四块型材, 地板使用三块型材替代五块型材, 车顶使用三块型材替代五块型材, 并进行数值模拟仿真计算对比分析宽幅型材断面与窄幅(既有)型材断面的焊接变形趋势与变形量。结果表明: 宽幅与窄幅型材的焊接变形趋势一致, 均表现为焊缝区域向下凹陷、周围母材向上翘曲, 且自由边缘变形量更大; 但宽幅型材的变形幅度显著降低。具体数据为: 侧墙最大变形量由 24.2 mm 降至 14.0 mm (降幅 42.2%), 地板由 140 mm 降至 57.4 mm (降幅 59%), 车顶由 178.2 mm 降至 46.4 mm (降幅 74%)。从工艺层面来说, 宽幅断面型材焊接变形小, 尺寸精度更容易保证, 制造效率更高, 结构更合理。该研究成果为铝合金车体轻量化设计及工艺优化提供了理论依据。

关键词: 宽幅断面; 型材拼焊; 侧墙; 地板; 车顶; 变形量

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0073-06

Numerical Simulation and Analysis of Welding Deformation of Aluminum Alloy Profiles for Rail Vehicle Bodies

GENG Ming, WANG Yanan, LIU Song, WANG Jun, SHAO Youfa, GUO Chuncheng

CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China

Abstract: To optimize the welding deformation control process for aluminum alloy bodies in rail vehicles, this paper proposes a wide-section profile design. The design involves replacing four profiles with two for the side wall, five with three for the floor, and five with three for the roof. A numerical simulation analysis was conducted to compare the welding deformation trends and magnitudes between the wide-section profiles and the conventional narrow-section (existing) profiles. Results indicate that both wide- and narrow-section profiles exhibit consistent deformation trends: weld zones show downward concavity, surrounding base metal warps upward, and free edges experience greater deformation. However, the wide-section profiles demonstrate significantly reduced deformation. Specific data reveal that the maximum deformation of the side wall decreases from 24.2 mm to 14.0 mm (a reduction of 42.2%), the floor from 140 mm to 57.4 mm (a reduction of 59%), and the roof from 178.2 mm to 46.4 mm (a reduction of 74%). From a process perspective, wide-section profiles exhibit smaller welding deformation, improved dimensional accuracy, higher manufacturing efficiency, and a more rational structure. This study provides theoretical support for lightweight design and process optimization of aluminum alloy vehicle bodies.

Keywords: wide cross-section; profile welding; side wall; floor; roof; deformation

引用格式: 耿明, 王亚男, 刘松, 等. 轨道车辆铝合金车体不同断面型材的焊接变形数值模拟计算分析[J]. 电焊机, 2025, 55(7): 73-78.

Citation: GENG Ming, WANG Yanan, LIU Song, et al. Numerical Simulation and Analysis of Welding Deformation of Aluminum Alloy Profiles for Rail Vehicle Bodies[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 73-78.

收稿日期: 2024-08-15 修回日期: 2025-01-21

作者简介: 耿明(1983—), 男, 正高级工程师, 主要从事铝合金车体制造工艺及焊接工艺技术开发研究。E-mail: jolin-navy@163.com。

0 引言

近年来轨道车辆铝合金车体的设计结构在不断优化。在设计结构满足强度要求的基础上对于降低铝合金车体焊接变形的要求在不断增加。文献^[1-6]对铝合金车体部件焊接变形的趋势,影响因素和控制手段优化方案等方面进行了详细阐述,同时文献^[7-11]运用有限元技术对焊接变形进行了仿真计算,上述这种数值模拟与实际制造结合的方式对铝合金车体焊接反变形积累了大量数据,本文在此基础上对优化结构层面进行焊接变形控制,以现阶段正在制造的铝合金车体为例,首次提出使用宽幅型材断面,即侧墙使用两块型材,地板使用三块型材,车顶使用三块型材代替现有窄幅断面的结构,利用数值模拟计算变形量,进行优化前后数据对比,为后续结构设计提出合理化建议。

1 试验方法

本文将侧墙,地板,车顶分成两组进行仿真计算。1组为宽幅断面,2组为现阶段正在使用的窄幅断面(侧墙四块型材,地板五块型材,车顶五块型材),结构如图1所示。

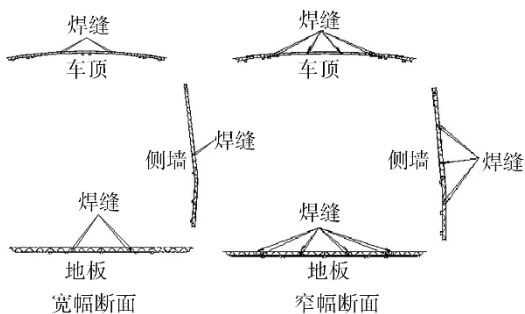


图1 型材结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of profile structure

计算之前对断面进行建模,将所有断面建立成为4m试验模型,后对试验模型进行网格划分,如图2所示。为了更精确的计算型材断面对焊接变形的影响,将其他计算条件设定完全相同,网格划分规律一致,约束位置与约束点大小与数量保持一致。为保证计算准确率与计算效率,焊缝以及焊缝区域两侧网格划分致密,远离焊缝的母材区域网格相对

焊缝区域稀疏,所有网格尺寸大小在2~10 mm。宽断面侧墙网格数量共计261 202,地板网格数量为457 850,车顶网格数量为564 906。窄断面侧墙网格数量为280 922,地板网格数量为470 124,车顶网格数量为579 980。

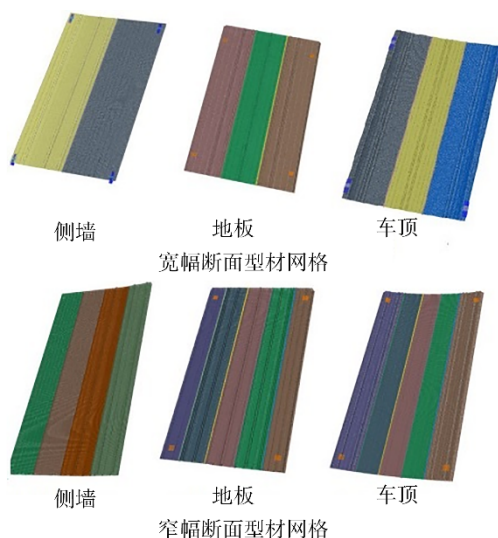


图2 型材网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wide section profile grid

仿真计算采用ESI旗下的weld planner模块。同一部件两组断面材质,厚度,熔池宽度等参数保持一致,焊缝的焊接顺序与实车作业保持一致,侧墙与地板先焊接正装后焊接反装,车顶先反装,后正装,窄幅断面焊缝先焊接中间,后两侧。焊接时模拟实车作业的双枪焊接,焊接顺序如图3所示。

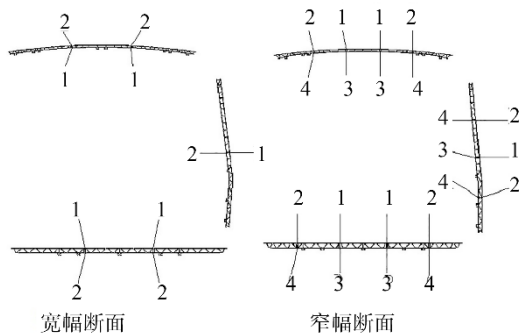


图3 焊接顺序示意

Fig. 3 Welding sequence diagram

因本文旨在研究断面宽窄这个变量对焊接变形的影响,故为了提高计算效率,仿真计算时只进行了两端压紧作为边界约束条件,如图4所示,约束点限制X、Y、Z方向位移。边界条件设定完毕之后

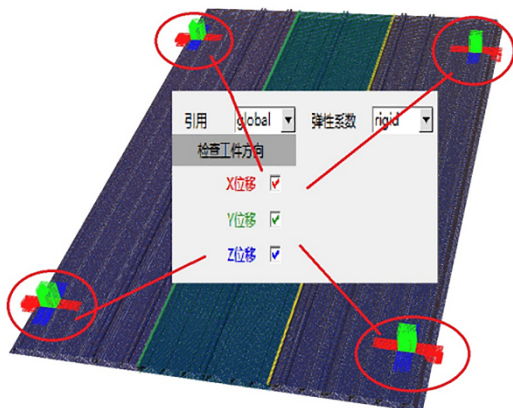


图4 约束条件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of constraint conditions

对6个网格模型进行焊接模拟仿真计算。

2 试验结果分析

两组侧墙的计算云图如图5、图6所示,结果显示两组侧墙焊接变形总体趋势一致,均是焊缝部位向下凹陷,周围母材部位向上翘曲。这是由于焊缝处母材受热膨胀,向外生长,如图7所示。受到温度梯度的影响焊缝处由近及远的母材生长速度不一致,焊缝处母材的生长受到远离焊缝处母材的限制,受到压应力,根据物体内部力的平衡原理,一侧受压应力时另一侧受拉应力,则表现在宏观为焊缝两侧母材向上翘曲,焊缝处向下凹陷。

同时整体侧墙又表现为中间向反装方向凹陷,两侧向正装方向翘曲。这是由于先焊接的焊缝周围的母材还处于相对自由的状态,焊接时对周围母材造成的变形影响较大,后焊接的焊缝由于其周围母材已经被焊缝约束住,形成了刚性固定,焊缝对其造成的变形影响受到了限制,还有被先前焊缝的焊接残余应力抵消等因素,产生的焊接变形要比先焊接产生的变形小,故呈现出图8所示的焊接变形趋势。同时可以看出边缘母材变形量越大,这是由于边缘处母材缺少边界约束,缺少周围母材对其的约束作用,在其位置处于自由变形状态,产生的变形严重^[8-11]。

由图5、图6可以看出,宽窄断面的侧墙焊接变形虽然趋势一致,但变形量有很大区别。表1、表2为两种侧墙在X、Y、Z三个方向与整体上的变形量,

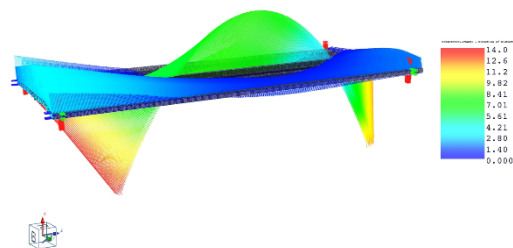


图5 宽断面侧墙计算云图

Fig. 5 Cloud diagram of wide section side wall calculation

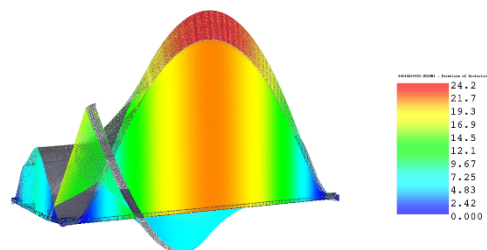


图6 窄断面侧墙计算云图

Fig. 6 Cloud diagram of narrow section side wall calculation

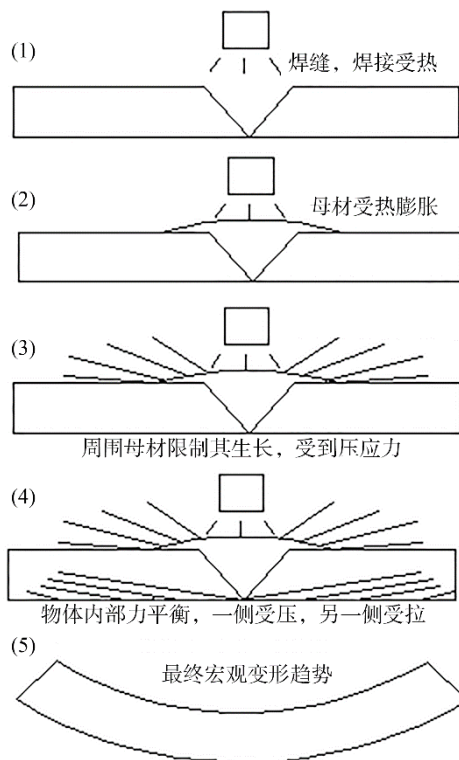


图7 变形机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of deformation mechanisms of two types of structures

可以看出,两种断面在每个矢量上的变形方向一致,但宽幅断面的变形量在所有矢量上均不同程度的下降,从整体变形上来看,宽断面最大变形量为

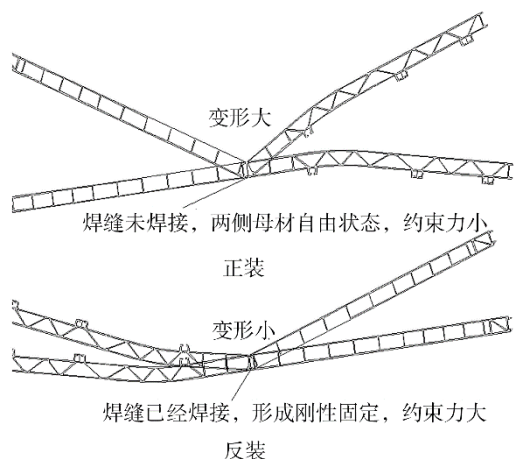


图8 焊接顺序影响示意图

Fig. 8 Impact diagram of welding sequence

14.0 mm, 窄断面的最大变形量为 24.2 mm, 宽断面侧墙最大焊接变形量下降 42.2%。这是由于: ①焊缝减少, 焊接热输入量下降; ②型材断面加宽, 型材刚度增加, 焊缝受热时, 母材对热膨胀的约束增加, 变形受到限制的程度增加; ③型材宽度增加, 散热量增加, 单位体积内的焊接热输入量下降。

表1 宽幅侧墙焊接位移量(mm)

Table 1 Wide side wall welding displacement

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	整体
-11.9	-1.08	-0.362	0
-9.57	-0.835	-0.683	1.75
-7.29	-0.591	1.73	3.51
-5.00	-0.347	2.77	5.26
-2.72	-0.103	3.82	7.01
-0.43	0.141	4.86	8.77
1.86	0.385	5.91	10.5
4.14	0.629	6.95	12.3
6.43	0.873	8.00	14.0

两种地板仿真计算结果云图如图9、图10所示, 可以看出两种地板的焊接变形趋势也一致, 都是中间向反装凹陷, 两侧向正装翘曲, 缺少边界约束条件的母材边缘处变形大, 变形趋势机理与侧墙相同, 均是受到焊接顺序的影响(分析见前文)。宽断面地板的最大变形量为 57.4 mm, 窄断面地板的最大变形量为 140 mm。宽断面地板最大焊接变形量下降 59%。

车顶仿真计算云图如图11、图12所示, 两种车顶的焊接变形趋势一致, 均呈现中间向正装凹陷, 两侧向反装翘曲的趋势, 缺少边界约束条件的母材

表2 窄幅侧墙焊接位移量(mm)

Table 2 Narrow side wall welding displacement

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	整体
-24.2	-9.36	-5.24	0
-20.4	-6.89	-4.30	3.02
-16.6	-4.42	2.25	6.04
-12.8	-1.95	3.37	9.06
-9.06	-0.515	5.85	12.1
-5.28	2.98	6.59	15.6
2.50	5.45	8.43	18.3
2.27	7.92	9.67	21.5
6.05	10.4	11.8	24.2

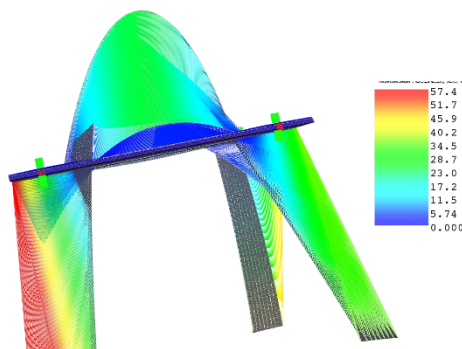


图9 宽断面地板计算云图

Fig. 9 Cloud diagram of wide section floor calculation

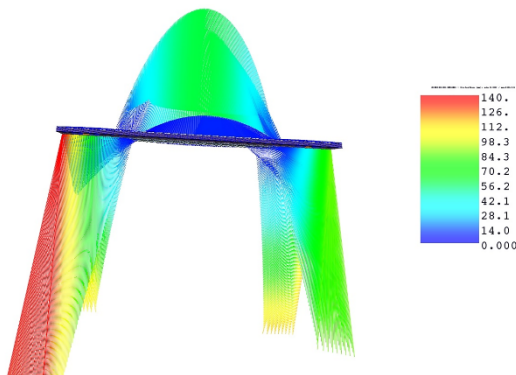


图10 窄断面地板计算云图

Fig. 10 Cloud diagram of narrow section floor calculation

边缘处变形越大。宽断面车顶最大焊接变形量为 46.4 mm, 窄断面车顶最大焊接变形量为 178.2 mm。宽断面车顶最大焊接变形量下降 74%。

两种地板与车顶在 *X*、*Y*、*Z* 方向上的变形量也显示出了宽幅断面变形量小的规律。如表3~表6所示。

从计算结果可以看出, 三种部件的焊接变形量有很大不同, 侧墙<地板<车顶。这是由于: ①侧墙焊缝数量最少, 焊接热输入量最小。②车顶型材厚

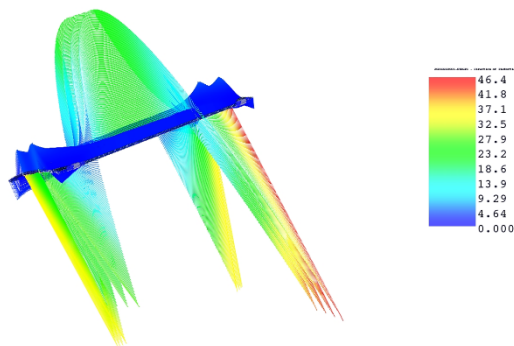


图 11 宽断面车顶计算云图

Fig. 11 Cloud diagram of wide section roof calculation

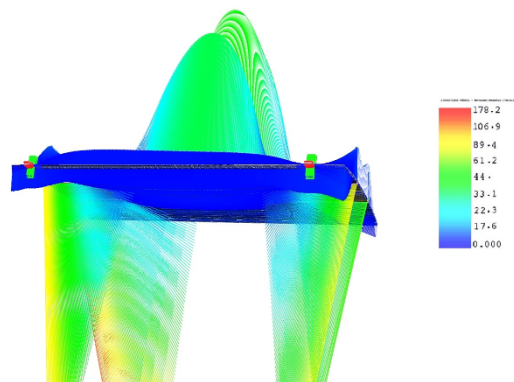


图 12 窄断面车顶计算云图

Fig. 12 Cloud diagram of narrow section roof calculation

表 3 宽幅地板焊接位移量(mm)

Table 3 Wide floor welding displacement

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	整体
-32.0	-19.1	-4.54	0
-22.9	-11.4	-3.48	7.18
-13.8	-3.8	-2.43	14.4
-4.73	3.83	-1.37	21.5
4.38	11.5	-0.309	28.7
13.5	19.1	0.75	35.9
22.6	26.7	1.81	43.1
31.7	34.4	2.87	50.3
40.8	42.0	3.92	57.4

度最薄,立筋分布最稀疏,刚度最差。不同部件之间的横向对比与同一个部件的两种断面纵向对比获得的变形量变化规律一致,也证明了数值模拟计算趋势的准确性。

如图 13 所示,在同样的边界约束条件之下,宽断面的侧墙,地板,车顶的焊接变形量均比窄断面变形量小,最大焊接变形量降低一半及以上,这种变形量的降低对工艺制造十分有利,可有效提升部

表 4 窄幅地板焊接位移量(mm)

Table 4 Narrow floor wall welding displacement

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	整体
-63.3	-96.3	-13.8	0
-42.8	-69.5	-10.7	17.6
-22.2	-42.7	-7.58	35.1
-6.51	11.0	-4.49	52.7
18.9	19.5	-1.40	70.2
39.4	37.8	1.69	87.8
60.0	64.6	4.78	105
80.5	91.4	7.87	123
101	118	11.0	140

表 5 宽幅车顶焊接位移量(mm)

Table 5 Wide roof welding displacement

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	整体
-7.16	-38.7	-6.40	0
-3.26	-31.0	-4.49	5.80
0.638	-23.3	-2.59	11.6
4.54	-15.6	-0.684	17.4
8.44	-7.95	1.22	23.2
12.3	-0.255	3.13	29.0
16.2	7.44	5.03	34.8
20.1	15.1	6.94	40.6
24.0	22.8	8.84	46.4

表 6 窄幅车顶焊接位移量(mm)

Table 6 Narrow roof welding displacement

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	整体
-78.1	-96.5	-9.70	0
-53.7	-55.5	-11.2	17.6
5.24	-39.6	-9.45	22.3
17.5	-30.1	-6.49	33.1
21.9	-22.9	10.6	44.0
27.1	-7.90	8.97	61.2
42.8	17.4	14.7	89.4
85.8	35.2	21.2	106.9
101	40.5	38.5	178.2

件焊后的尺寸精度,降低火焰调修时长,降低返修率。

3 结论

(1)轨道车辆铝合金车体宽幅断面型材拼焊而成的侧墙,地板,车顶与既有断面型材拼焊而成的侧墙,地板,车顶利用数值模拟仿真进行焊接变形计算分析,计算结果显示在母材厚度,热源参数,焊

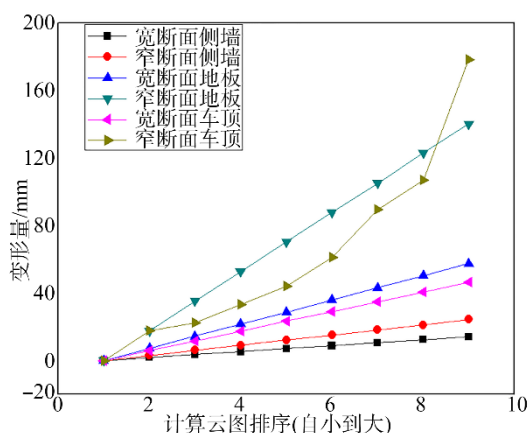


图 13 变形量对比

Fig. 13 Schematic diagram of deformation comparison

接顺序,边界约束等条件相同的条件下,宽窄两种断面得到的焊接变形趋势一致。

(2)宽断面侧墙最大变形量为 14.0 mm,窄断面的最大变形量为 24.2 mm,宽断面侧墙最大焊接变形量下降 42.2%。

(3)宽断面地板的最大变形量为 57.4 mm,窄断面地板的最大变形量为 140 mm。宽断面地板最大焊接变形量下降 59%。

(4)宽断面车顶最大焊接变形量为 46.4 mm,窄断面车顶最大焊接变形量为 178.2 mm。宽断面车顶最大焊接变形量下降 74%。

(5)从工艺制造层面来说,宽幅断面的型材焊接变形大幅度减小,焊后尺寸精度高,提升作业效率,降低劳动强度。建议采用宽断面型材。

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): 58-61.
WANG Y N. Welding deformation control and fixture design of roof in 350 km/h EMU[J]. Welding & Joining, 2018(10): 58-61.
- [2] 赵为松, 赵维树. 高速列车铝合金车体焊接可靠性[J]. 电焊机, 2011, 41(11): 103-105.
ZHAO W S, ZHAO W S. Research on welding reliability of aluminum alloy on high-speed train[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(11): 103-105.
- [3] 刘计文, 宋长胜. 铝合金车体焊接变形控制研究[J]. 机车车辆研究, 2016(1): 25-27.
- LIU J W, SONG C S. Research on Controlling Welding Deformation of Aluminum Alloy Vehicle Body[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2016 (1): 25-27.
- [4] 薛忠明, 曲文卿, 柴鹏, 等. 焊接变形预测技术研究进展[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 87-90.
XUE Z M, QU W Q, CAI P, et al. Review on prediction of welding distortion [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2003, 24(3): 87-90.
- [5] 崔晓芳, 岳红杰, 兆文忠, 等. 高速机车构架侧梁的焊接顺序[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 101-104.
CUI X F, YUE H J, ZHAO W Z, et al. Study of different welding sequences in the bogie frame of the high-speed locomotive[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2006, 27(1): 101-104.
- [6] 王亚男. 混合动力型动车组两种底架端部结构的变形机理及控制方法[J]. 焊接, 2015(1): 44-47.
WANG Y N. Distortion and control of end underframe structure in hybrid MU [J]. Welding & Joining, 2015 (1): 44-47.
- [7] 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): 94-97.
WANG Y N. Study on welding deformation control and simulation of EMU vehicle side wall at 400 km/h [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(11): 94-97.
- [8] 侯志刚. 薄板结构焊接变形的预测与控制[D]. 湖北: 华中科技大学, 2005.
HOU Z G. Prediction and Control of Welding Deformation in Thin Plate Structures[D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [9] 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, 2001.
CAI Z P. Research and Application of Numerical Simulation of Large Structure Welding Deformation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.
- [10] 陆皓, 陈俊梅, 刘俊龔, 等. 薄板焊接失稳变形的简化模型及其应用[J]. 焊接, 2007(5): 16-18.
LU H, CHEN J M, LIU J Y, et al. Buckling distortion prediction model and application in welded thin plate [J]. Welding & Joining, 2007(5): 16-18.
- [11] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.