

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.08

高速列车铝合金车体焊接变形的多维度协同控制

耿明, 孙明双, 安志飞, 范明保

中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062

摘要: 高速列车铝合金车体因焊接量大、热膨胀系数高, 易产生显著焊接变形, 传统调修手段难以矫正, 严重影响制造精度与效率。以复兴号智能动车组车体为研究对象, 通过分析整车关键尺寸变形机理, 提出多维度协同控制策略: 针对车体轮廓变形, 优化侧墙与车顶反变形量组合(宽度方向+4~+6 mm, 高度方向+5~+7 mm); 针对挠度变形, 采用底架与侧墙等量反变形预置(+8 mm); 结合内定位工装优化与对称焊接顺序调整, 实现焊接变形主动控制。试验表明, 该方法可有效抑制车体弯曲与轮廓变形, 焊后关键尺寸稳定性显著提升, 调修工作量大幅减少。研究结果为高速列车铝合金车体高精度焊接提供了可复用的工艺方案。

关键词: 高速列车; 铝合金车体; 焊接变形控制; 反变形优化; 工装设计

中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0065-07

Multidimensional Coordinated Control of Welding Deformation Control of Aluminum Alloy Carbody for High-Speed EMUs

GENG Ming, SUN Mingshuang, AN Zhifei, FAN Mingbao

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

Abstract: Due to the large amount of welding and high coefficient of thermal expansion, the aluminum alloy carbody of high-speed trains is prone to significant welding deformation. Traditional adjustment methods are difficult to correct, severely affecting manufacturing precision and efficiency. Taking the Fuxing Hao intelligent EMU carbody as the research object, through analyzing the deformation mechanism of key dimensions of the whole vehicle, a multidimensional coordinated control strategy is proposed: for the contour deformation of the carbody, optimize the combination of sidewall and roof anti-deformation amount (width direction +4~+6 mm, height direction +5~+7 mm); for the deflection deformation, adopt the equal anti-deformation presetting of the underframe and sidewall (+8mm); combined with the optimization of internal positioning tooling and adjustment of symmetrical welding sequence, achieve active control of welding deformation. Tests show that this method can effectively suppress the bending and contour deformation of the carbody, significantly improve the stability of key dimensions after welding, and greatly reduce the adjustment workload. The research results provide a reusable process scheme for the high-precision welding of high-speed train aluminum alloy carbody.

Keywords: high-speed EMU; aluminum alloy carbody; welding deformation control; anti-deformation optimization; fixture design

引用格式: 耿明, 孙明双, 安志飞, 等. 高速列车铝合金车体焊接变形的多维度协同控制[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 65-71.

Citation: GENG Ming, SUN Mingshuang, AN Zhifei, et al. Multidimensional Coordinated Control of Welding Deformation Control of Aluminum Alloy Carbody for High-Speed EMUs[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 65-71.

0 引言

高速列车作为现代化公共交通系统的核心组

成部分, 正朝着更高速度、更安全、更舒适和更经济的方向发展^[1-3]。铝合金车体是高铁的重要部件之一, 其制造精度影响着整车装配质量和运行稳定

收稿日期: 2024-03-21 修回日期: 2024-11-10

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。

性,是车辆安全与性能的直接体现。然而,由于铝合金传热快、热膨胀系数较大,在焊接过程中不可避免地产生较大的焊接残余应力和明显的焊接变形,且过大的焊接变形很难有合适的矫形手段可以解决,对车体尺寸精度造成很大的影响。尤其是在随着车体轻量化趋势下,车体结构减薄^[4-6]和大量薄板焊接的应用进一步加剧了焊接变形问题。尽管已有研究关注于车体各部件(如侧墙、车顶、底架、端墙)的焊接变形^[7-12],但对整车焊接变形的综合控制仍缺乏深入研究和有效的解决方案。

本文以复兴号智能动车组车体为研究对象,系统研究车体整车焊接变形趋势及影响因素,提出多维度的协同控制策略,通过优化反变形、工装设计和焊接工艺等措施,有效控制焊接变形,提升车体制造精度,为实现高速列车的高效生产提供技术支持。

1 车体结构及变形分析

车体主要由底架、车顶、侧墙、端墙等部件组成,各部件间为插口对接形式,整体拼焊形成一个大型的筒形结构,如图1所示。这种筒形车体为非稳定结构,焊接过程中产生的焊接应力极易引起部件间发生弯曲变形,从而导致车体轮廓明显变化。此外,由于车体各部件拼接的焊缝众多且焊接量大,焊接变形也相应大,会进一步加剧车体变形。

此外,车体的各个部件自身也是焊接结构,其完工后的尺寸精度对整车组装有较大的影响。若部件尺寸不匹配,为保证整车尺寸精度,需通过外力进行车体组装以满足精度要求,这会导致部件内部产生较大的预应力,这种预应力与车体焊接时的焊接应力相互作用,使车体焊接变形的控制更加困难。

2 车体焊接变形控制与优化

车体焊接变形是由多种因素引起的,包括焊接应力和部件尺寸等,因此,控制车体焊接变形主要从以下两方面入手:(1)整车焊前、焊中变形控制;(2)部件尺寸优化。其中,焊前控制主要是通过刚

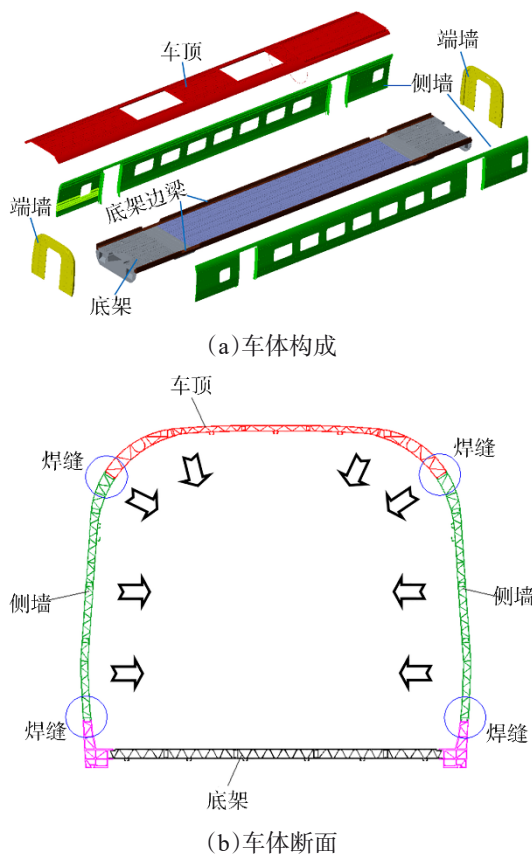


图1 车体结构示意图

Fig. 1 The diagram of carbody structure

性固定(焊接工装优化)和反变形等方法,预先抵消或减少焊接变形;焊中控制主要是通过优化焊接参数和焊接顺序等方式,减少或消除焊接过程中的变形。

由于车体是一个复杂的焊接系统,不同位置的变形程度和原理各不相同。因此需要采取多种控制方式来实现有效的变形控制。

2.1 焊前反变形优化

2.1.1 车体轮廓的反变形预制

为保证焊后尺寸精度,针对车体轮廓(宽度、高度)的焊接变形,在整车焊接前对部件进行反变形预制。其中,侧墙弧度及车顶宽度对车体宽度影响较大,侧墙高度及车顶弧度对车体高度影响较大。因此,通过对侧墙、车顶焊后的外形尺寸进行优化,以抵消整车焊接时车体轮廓出现变形,如图2所示。

实际生产中,对侧墙弧度和车顶宽度的反变形量进行了多种组合试验。例如,侧墙弧度的反变形

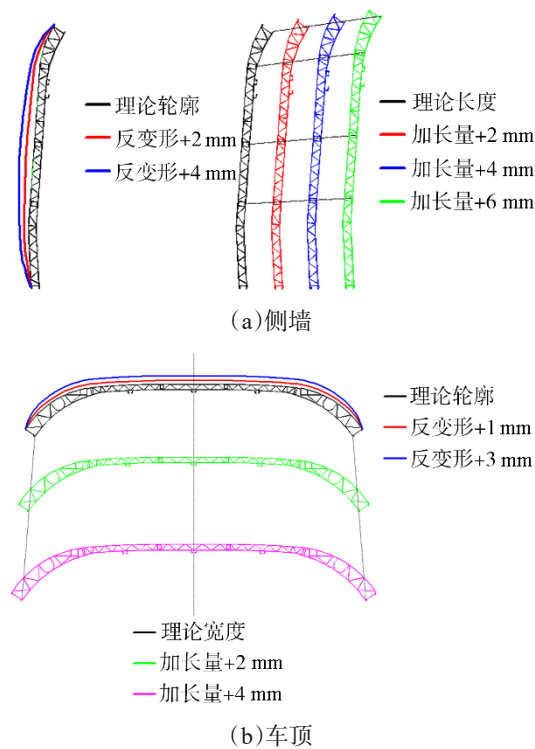
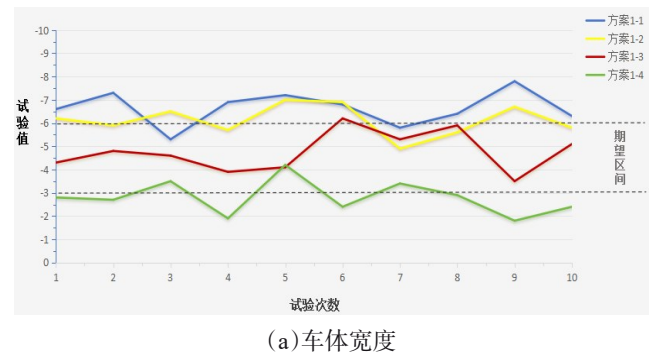


图2 侧墙和车顶的反变形预制

Fig. 2 The side wall and roof are prefabricated anti-deformation

量分别选用了+2 mm和+4 mm,车顶宽度的加长量分别选用了0、+2 mm和+4 mm,二者组合试验如表1所示;针对车体高度的控制方案,侧墙加长量分别



(a)车体宽度

选用了+2 mm、+4 mm和+6 mm,车顶弧度反变形量分别选用了+1 mm和+3 mm,二者组合试验如表2所示。每组试验共进行10次。

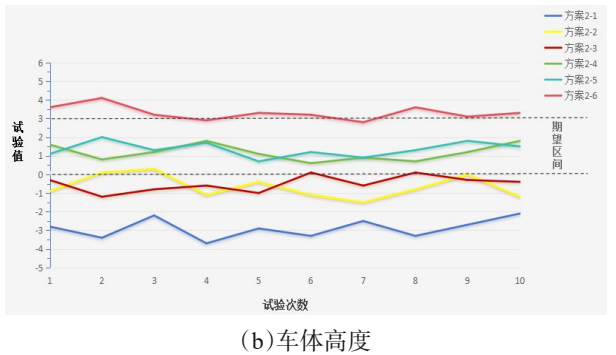
表1 车体宽度反变形设置

Table 1 Anti-deformation setting of carbody width			
组合	侧墙弧度/mm	车顶宽度/mm	反变形量/mm
方案 1-1	理论值+2	理论值	+2
方案 1-2	理论值+2	理论值+2	+4
方案 1-3	理论值+4	理论值+2	+6
方案 1-4	理论值+4	理论值+4	+8

表2 车体高度反变形设置

Table 2 Anti-deformation setting of carbody height			
组合	侧墙高度/mm	车顶弧度/mm	反变形量/mm
方案 2-1	理论值+2	理论值+1	+3
方案 2-2	理论值+2	理论值+3	+5
方案 2-3	理论值+4	理论值+1	+5
方案 2-4	理论值+4	理论值+3	+7
方案 2-5	理论值+6	理论值+1	+7
方案 2-6	理论值+6	理论值+3	+9

试验结果表明,在刚性固定(工装夹紧)的情况下,方案1-3在宽度变形控制中效果最佳,方案2-4和2-5在高度变形控制中效果最佳,如图3所示。车体焊接后,只需简单调修或无需调修,即可满足设计要求的轮廓尺寸。



(b)车体高度

图3 车体轮廓反变形试验结果

Fig. 3 The test result of anti-deformation of carbody contour

2.1.2 车体挠度的反变形预制

车体焊接后需形成一定挠度(最小值),以抵消车辆在静止和运行过程中受到的车辆设备和乘客的垂向载荷引起的位移^[13]。但在整车焊接时,焊接变形会导致车体向平直状态变形。因此,为保证焊后挠度,需在整车焊接前对车体各部件预制反变形,由于车顶、端墙对挠度的影响较小,故仅对底

架、侧墙进行反变形设置,如图4所示。其中,底架反变形是利用车体焊接工装预制的弹性变形,侧墙反变形是侧墙单件焊接后形成塑性变形。

实际生产中,将底架、侧墙的反变形量分别预设为+4 mm、+6 mm、+8 mm、+10 mm、+12 mm、+14 mm,二者组合试验如表3所示。每组试验共进行5次,取平均值。

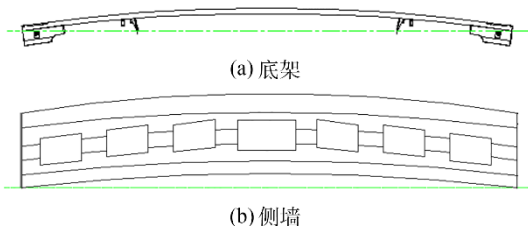


图4 车体挠度的反变形预制

Fig. 4 Anti-deformation presetting of carbody deflection

表3 车体挠度反变形设置

Table 3 Anti-deformation setting of carbody deflection

组合	底架反变形 /mm	侧墙反变形 /mm	组合	底架反变形 /mm	侧墙反变形 mm
方案1	理论值+4	理论值+2	方案10	理论值+10	理论值+8
方案2	理论值+4	理论值+4	方案11	理论值+10	理论值+10
方案3	理论值+4	理论值+6	方案12	理论值+10	理论值+12
方案4	理论值+6	理论值+4	方案13	理论值+12	理论值+10
方案5	理论值+6	理论值+6	方案14	理论值+12	理论值+12
方案6	理论值+6	理论值+8	方案15	理论值+12	理论值+14
方案7	理论值+8	理论值+6	方案16	理论值+14	理论值+12
方案8	理论值+8	理论值+8	方案17	理论值+14	理论值+14
方案9	理论值+8	理论值+10	方案18	理论值+14	理论值+16

试验结果表明:方案4~12都可满足整车焊后的期望挠度需求,如图5所示。其中:(1)底架和侧墙预制挠度值的一致性对整车焊后挠度的影响较小,但考虑到整机组装、焊接的难易程度,底架和侧墙反变形量相同为宜;(2)随着底架、侧墙反变形增加,整车焊后挠度随之增大,但控制效果却逐步减弱。这主要是由于底架预制的反变形为弹性变形,焊接热输入会导致部分弹性变形转换为塑性变形,由于整车焊接时热输入量是一定的,导致底架预制的弹性变形转变为塑性变形的量也相对稳定。考虑到侧墙预制的反变形是塑性变形,对底架反变形的转化起到一定的促进作用,因此随着预制反变形的增加,反变形转化量也随之增加。

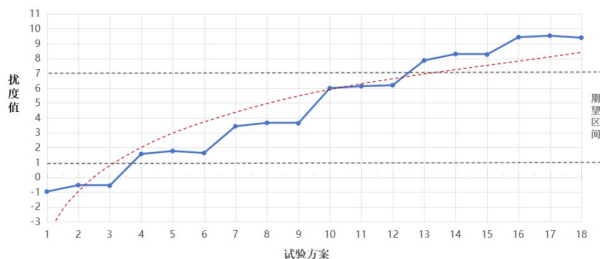


图5 车体挠度变化趋势

Fig. 5 Variation trend of carbody deflection

此外,由于底架预制的反变形是利用车体焊接工装预制的,而底架结构本身的刚度会阻碍反变形的预制,导致预制的反变形越大,对工装支撑力的要求就越高,工装的复杂性就越大。因此,综合考虑焊接变形的不稳定性导致整车挠度控制的波动,以及车体组装焊接工艺的便捷性,底架、侧墙的反变形设置在+8 mm左右为宜,且保持相等,即方案8为最佳实践。

2.2 工装优化

为了更好地控制整车焊接变形并实现焊前反变形预制,对车体焊接工装进行优化设计。工装设计包括以下几个方面:

(1)整车高度定位。由2个端部支撑和9个底架支撑组成,如图6a所示。其中,2个端部支撑位于底架端部(如图6b所示),不预制反变形,仅防止车体端部发生“低头”变形;9个底架支撑在底架边梁上(如图6c所示),除了定位作用外,还需预制底架挠度反变形。9个支撑位置即为9个控制点,分别标定为Q-4, Q-3, Q-3, Q-2, Q-1, Q0, Q1, Q2, Q3, Q4。其中, Q0为车体纵向正中心点,反变形量最大,依次向两侧逐渐减少,直至Q4和Q-4。Q4和Q-4为转向架安装点,反变形量为0。

(2)支撑点优化。由于底架门口位置未进行焊接,导致预制的弹性反变形难以转变成塑性变形,此处预制反变形的效果不佳。因此,为了更好地控制焊接变形,优化9个支撑点在车体纵向上的位置,在均值分布的基础上,对于门口区域的底架支撑位置进行适当调整。如Q0点,原位置在门口下部,需调整至门口外侧,在Q0'和Q0''各安置一个。同时,每个底架支撑都配备一个底架下拉装置,将底架与底架支撑紧密贴合,实现底架反变形的预制,并起到刚性固定作用。底架下拉主要利用底架边梁自带滑槽结构进行安置,如图6d所示。

(3)侧墙部位。在侧墙的窗口位置增加侧墙下拉装置,以确保与底架间焊缝的尺寸精度并控制焊接变形。同时,为增大下拉装置与侧墙窗口接触面积,且防止下拉装置损坏窗口,在下拉装置与窗口间设置一种窗口保护块,如图6e所示。

(4)门口区域加固。由于门口区域刚性较弱,整车焊接时易产生弯曲变形,因此在门口区域增加

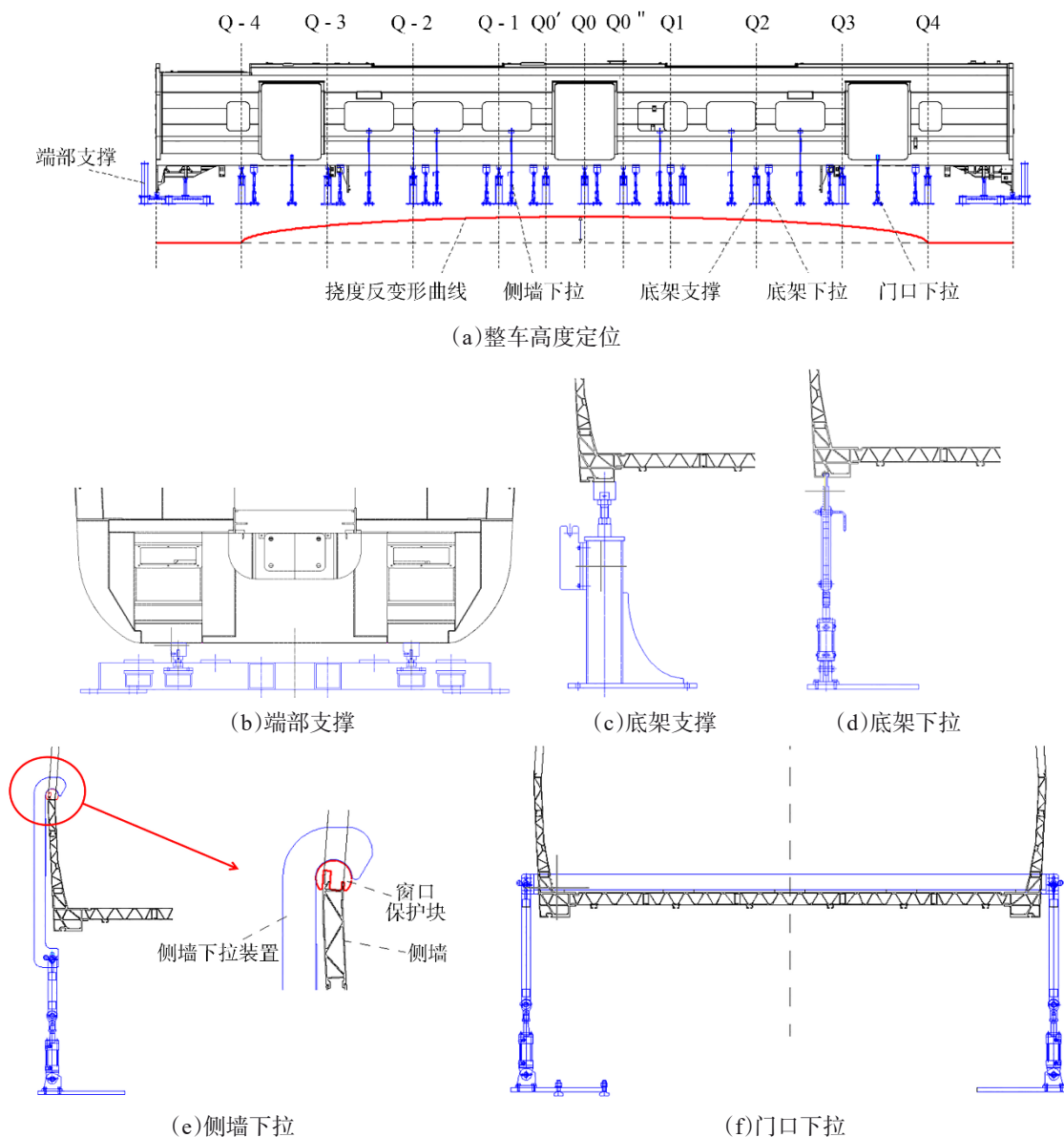


图6 车体合成示意

Fig. 6 Diagram of carbody assembly

门口下拉装置,以提供额外的刚性固定,如图6f所示。

(5)在车体轮廓定位上,为控制筒形结构的焊接变形,采取内定位方式进行整车焊接,如图7所示。整个内定位包括对角线支撑、高度支撑及宽度支撑。由于侧墙面积较大,单点支撑难以取得理想效果,因此在宽度支撑1的基础上,增加宽度支撑2,其中宽度支撑1支撑在侧墙窗口上沿,宽度支撑2支撑在侧墙窗口下沿。同时,在底架下部增加宽度支撑3,支撑在底架边梁内侧,防止底架边梁发生角

变形。

(6)在整车纵向方向上,对角线支撑和宽度支撑需同位布置,均值分布5~7组,同时在门口两侧各增加1组。由于不同车型的门口布置不同,因此对角线(宽度)支撑的位置及数量也有所差异。而高度支撑与对角线(宽度)支撑可间隔布置,即高度支撑布置在两组对角线(宽度)支撑之间的中间位置,门口处则无需增设。

2.3 焊接工艺优化

为更好地控制焊接变形,对整车焊接时的焊接

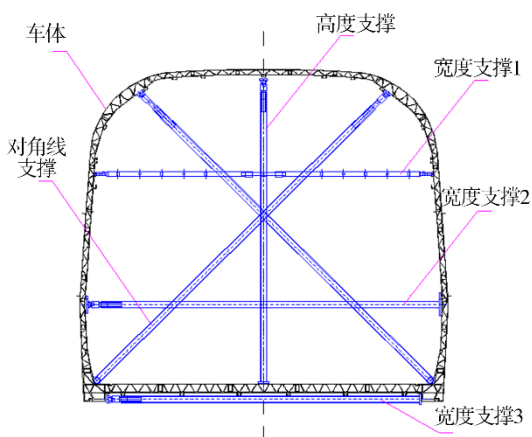


图7 车体内定位示意

Fig. 7 The diagram of carbody internal jig

顺序和焊接方向进行调整。在焊接顺序优化上,整个车体焊接采用“先外后内,先长后短”的焊接顺序,即先焊车体外侧的长大焊缝,再焊内侧的长大焊缝;先焊底架与侧墙间的焊缝,再焊侧墙与车顶间的焊缝,最后焊接端墙焊缝。其中,外侧长大焊缝采用Fronius专机进行自动焊接,内侧长大焊缝及其他部位焊缝采用Fronius TPS5000手工焊接而成。

在焊接方向优化上,外侧长大焊缝焊接时,对车体两侧对称的两道焊缝同向同时进行焊接;而内侧长大焊缝焊接时,由车体中间向两端焊接,且对车体两侧对称的两道焊缝反向同时进行焊接,如图8所示。

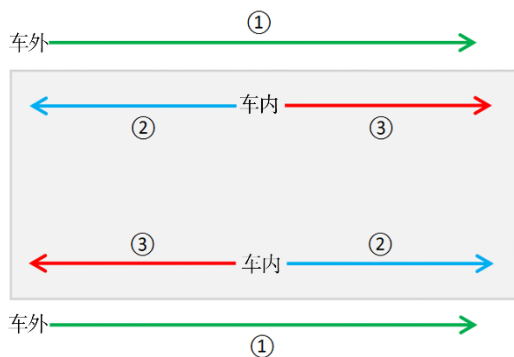


图8 车体焊接顺序及方向

Fig. 8 The diagram of carbody welding sequence and direction

3 结论

针对高速列车铝合金车体焊接变形问题,提出了多维度协同控制策略,并通过试验试验了其有效

性。主要结论如下:

(1)车体焊接变形是多因素共同作用的结果,包括焊接应力、部件尺寸、工装设计、焊接顺序和焊接方向等。因此,控制车体焊接变形需要综合考虑多种因素,并采取多种控制手段协同作用。

(2)焊前反变形预制是控制车体焊接变形的有效手段。通过优化侧墙和车顶的反变形量组合,以及底架和侧墙等量反变形预制,可以有效抑制车体轮廓变形和挠度变形。

(3)工装优化设计可以进一步提高焊接变形控制效果。通过优化支撑点位置、增加下拉装置和窗口保护块等措施,可以有效提高工装的支撑刚度和稳定性,从而更好地控制焊接变形。

(4)焊接工艺优化对控制焊接变形具有重要意义。通过调整焊接顺序和焊接方向,可以使焊接变形在焊接过程中得到有效控制,从而提高车体制造精度。

(5)通过优化改善的措施,车体各项关键尺寸得到了稳定的控制,实现了车体宽度在 $(-3, -6)$ mm,高度在 $(0, +3)$ mm,挠度在 $(+3, +5)$ mm较为理想的尺寸精度区间。

参考文献:

- [1] 邓海,张国芹,张岩,等. 下一代高速智能化动车组研发构想[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 11-15.
DENG H, ZHANG G Q, ZHANG Y, et al. Concepts for the Development of the Next Generation of High-speed Intelligent EMUs [J]. Urban Rail Transit Research, 2022, 25(2): 11-15.
- [2] 缪炳荣,张卫华,池茂儒,等. 下一代高速列车关键技术特征分析及展望[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 58-70.
MIAO B R, ZHANG W H, CHI M R, et al. Analysis and prospects of key technical features of the next-generation high-speed train [J]. Journal of Railway Transportation, 2019, 41(3): 58-70.
- [3] 耿明,张临琳,张力,等. 镁合金AZ31/Zn-7Al/铝合金6061 接触反应钎焊研究[J]. 电焊机, 2018, 48(3): 317-319.
GENG M, ZHANG L L, ZHANG L, et al. Research on Contact Reaction Brazing of Magnesium Alloy AZ31/Zn-7Al/Aluminum Alloy 6061 [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(3): 317-319.
- [4] 于庆斌,王成涛,夏东伟,等. 基于参数优化的动车组

- 铝合金车体轻量化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(4): 1-8.
- YU Q B, WANG C T, XIA D W, et al. Lightweight design of high-speed train aluminum alloy body based on parameter optimization [J]. Urban Rail Transit Research, 2023, 26(4): 1-8.
- [5] 高月华, 石晓飞, 谢素明, 等. 高速列车车体的灵敏度分析及轻量化设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 885-891.
- GAO Y H, SHI X F, XIE S M, et al. Sensitivity Analysis and Lightweight Design of High-speed Train Body [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5): 885-891.
- [6] 贺小龙, 张立民, 鲁连涛, 等. 基于轻量化及刚度的铝合金车体承载结构参数选择研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(11): 26-32.
- HE X L, ZHANG L M, LU L T, et al. Research on the Selection of Aluminum Alloy Car Body Load-bearing Structure Parameters Based on Lightweight and Stiffness [J]. Journal of Railway Transportation, 2016, 38(11): 26-32.
- [7] 王亚男, 刘松, 耿明, 等. 基于弹塑性理论及数值仿真的市域铁路动车组铝合金车体侧墙焊接变形趋势预测[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(2): 42-47.
- WANG Y N, LIU S, GENG M, et al. Prediction of welding deformation trends for urban rail transit aluminum alloy bodies based on elastoplastic theory and numerical simulation [J]. Urban Rail Transit Research, 2025, 28(2): 42-47.
- [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): 94-99.
- WANG Y N. Simulation and deformation control research of the 400 km/h high-speed train body side wall welding [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(11): 94-99.
- [9] 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): 44-48.
- WANG Y N. Research on Control of Roof Welding Deformation and Design of Fixtures for High-speed Train at 350 km/h [J]. Welding & Joining, 2018(10): 44-48.
- [10] 耿明, 王亚男, 肖宇, 等. CR400BF动车组车体端墙焊接模拟仿真与变形控制研究[J]. 电焊机, 2024, 54(3): 99-104.
- GENG M, WANG Y N, XIAO Y, et al. Simulation and Deformation Control Research of CR400BF High-Speed Train Body End Wall Welding [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(3): 99-104.
- [11] 赵丽玲, 葛少平, 唐衡柳, 等. 高速动车组端墙焊接变形控制[J]. 电焊机, 2018, 48(03): 344-348.
- ZHAO L L, GE S P, TANG H C, et al. Control of end wall welding deformation for high-speed train sets [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(03): 344-348.
- [12] 王立夫, 尹德猛, 杨仲林, 等. 动车组铝合金车体底架焊接变形控制[J]. 电焊机, 2017, 47(10): 89-93.
- WANG L F, YIN D M, YANG Z L, et al. Control of Welding Deformation of Aluminum Alloy Carbody Frame for High-speed Trains [J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(10): 89-93.
- [13] 曲双, 王亚男, 鲍洪阳. 轨道交通整体承载式铝合金车辆车体挠度的预制方法及实验研究[J]. 城市轨道交通, 2022, 25(2): 31-34.
- QU S, WANG Y N, BAO H Y. Prefabrication Method and Experimental Research on the Deflection of the Whole Bearing Aluminum Alloy Vehicle Body in Rail Transit [J]. Urban Rail Transit, 2022, 25(2): 31-34.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>