

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

王亚男 刘 松 耿 明 康丽齐 高 雅 郭春成 严格格

(中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春)

摘 要 [目的] 目前, 铝合金车体焊接变形一直是市域铁路动车组制造过程中的痛点, 而传统预测与控制变形的的方法大多依据以往经验方法及实车试错的结果, 收效不佳。因此, 有必要采用数值仿真手段, 对市域铁路动车组铝合金车体侧墙焊接的变形趋势进行预测。[方法] 在简述试验材料的基础上, 阐述了基于热弹塑性理论及 ABAQUS 有限元分析软件的车体侧墙焊接变形数值仿真计算方法。在保证与计算具有相同工装分布位置、压力载荷及边界条件等情况下, 同步进行了车辆侧墙的实车组焊试验。分别对反装焊后、正装焊后 2 个试验阶段车体侧墙的仿真变形量和实测变形量进行了对比。选取了 4 个反变形量 (8 mm、10 mm、12 mm 及 15 mm), 对正装焊后不同反变形量下车体侧墙的最大仿真变形量、最大实测变形量进行了对比。[结果及结论] 仿真计算结果与实车测量结果在数值上较为相近, 二者的偏差小于 30%。反装焊后车体侧墙的最大仿真变形量为 16.31 mm, 最大实测变形量为 17.00 mm。正装焊后车体侧墙的最大仿真变形量为 4.10 mm, 最大实测变形量为 5.50 mm。车体侧墙反变形量的最优值为 12 mm, 此时车体侧墙的焊后变形量最小。

关键词 市域铁路动车组; 车体侧墙; 焊接变形; 数值模拟
中图分类号 U270.6: U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.009

Welding Deformation Trend Prediction for Aluminum Alloy Carbody Sidewalls of City Railway EMU Based on Elasticplastic Theory and Numerical Simulation

WANG Ya'nan, LIU Song, GENG Ming, KANG Liqi, GAO Ya, GUO Chuncheng, YAN Gege

(Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] Welding deformation in aluminum alloy carbodies remains a significant issue in the manufacturing process of city railway EMU. Conventional methods for predicting and controlling deformation often rely on past experience and actual vehicle trial-and-error, which have shown limited effectiveness. Therefore, it is necessary to use numerical

simulation methods to predict the welding deformation trends of aluminum alloy carbody sidewalls of city railway EMU.

[Method] The experimental materials are briefly introduced, followed by an explanation of the numerical simulation method for calculating sidewall welding deformation based on thermal elastoplastic theory and ABAQUS finite element analysis software. A real vehicle sidewall welding test is conducted simultaneously under conditions ensuring the same tooling distribution, pressure load, and boundary conditions as in the calculation. The simulated and measured deformation amounts of the sidewall are compared for the inverted welding and upright welding stages respectively. Four counter-deformation values (8 mm, 10 mm, 12 mm, 15 mm) are selected, and the maximum simulated and measured deformations of the vehicle sidewall after upright welding are compared under different counter-deformation values. [Result & Conclusion] The simulation calculation results are found to be numerically close to the actual measurements, with deviation between the two less than 30%. The maximum simulated deformation of carbody sidewall after inverted welding is 16.31 mm, while the maximum measured deformation is 17.00 mm. After upright welding, the maximum simulated deformation is 4.10 mm, and the maximum measured deformation is 5.50 mm. The optimal counter-deformation value for carbody sidewall is 12 mm, resulting in the minimal welding deformation of carbody sidewall.

Key words city railway EMU; carbody sidewall; welding deformation; numerical simulation

在轨道交通领域, 车辆铝合金车体制造时产生的焊接变形一直是行业内的痛点。传统的焊接变形控制方法通常是基于经验和实车试错, 缺乏精准性和预见性, 因此, 利用数值仿真技术来分析及预测焊接变形的的方法, 是近期的研究热点。本文以我国某市域铁路动车组车辆的铝合金车体侧墙为研究对象, 首先进行数值仿真计算, 然后进行车体侧

墙型材组焊试验,并将模拟结果与实车试验结果进行对照分析,以优化车体侧墙的组焊工艺及反变形方案。

1 试验材料

该市域铁路动车组铝合金车体的侧墙断面如图1所示,车体侧墙整体长度为25 m,在长度方向上均匀分布了4个车门。车体侧墙自上而下由5块型材拼焊而成,焊缝接头形式为4V(即采用V形接头,熔合深度为4 mm)。

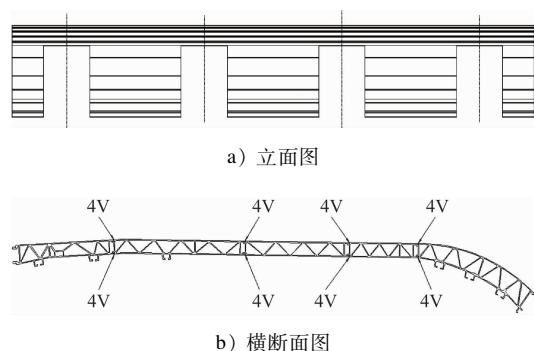


图1 市域铁路动车组铝合金车体侧墙立面及横断面示意图

Fig. 1 Diagram of the elevation and cross-section of city railway EMU aluminum alloy carbody sidewall

2 试验方法

2.1 车体侧墙焊接变形的数值仿真计算

使用通用的 ABAQUS 有限元分析软件进行数值分析计算。基于计算精度较高的热弹塑数值分析方法,对车体侧墙焊接过程进行顺序耦合求解,先通过瞬态传热分析求解温度场的分布情况,后将瞬态温度场模拟结果作为数据输入条件进行通用分析步计算,最终得到应力及应变的计算结果。

仿真选取的材料为铝合金车体侧墙,牌号为6005A-T6。车体侧墙温度场控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q$$

式中:

- ρ ——车体侧墙材料密度;
- c ——车体侧墙材料比热容;
- T ——温度场;
- t ——时间;
- x ——车体侧墙高度方向上的长度;
- y ——车体侧墙厚度方向上的长度;

z ——车体侧墙长度方向上的长度;

Q ——热量;

k_x —— x 方向的导热系数;

k_y —— y 方向的导热系数;

k_z —— z 方向的导热系数。

在车体侧墙变形的求解过程中,位移为未知量,节点温度为已知量。施加热源后,热源与物理装夹的外部载荷产生热应变,热场通过热膨胀和收缩、与温度相关的机械属性等因素影响机械场,由此进行机械场的应力求解。

仿真过程设置了4个分析步:①工装及反变形加载;②焊接;③冷却;④工装载荷释放。热源对标双椭圆,校核至与实际焊缝接头形貌偏差20%以内后,开始进行车体侧墙仿真计算。

车体侧墙载荷分布如图2所示,模拟了工装压紧与压铁、工装支撑与顶紧等工况,并在车辆长度方向上均匀分布载荷。每个作用点上压紧力的平均值为1 132 kN,顶紧力的平均值为1 207 kN,压铁的质量共计4.8 t。

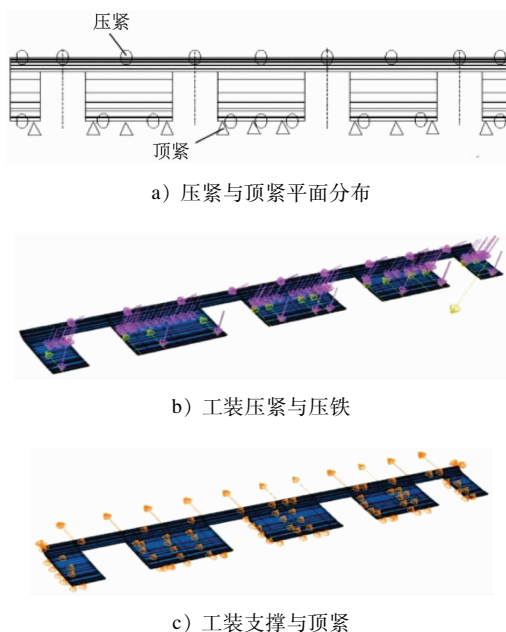


图2 车体侧墙载荷分布示意图

Fig. 2 Diagram of load distribution on carbody sidewall

反装焊后翻转至正装,正装的支撑压紧方式、顶紧方式与反装一致。正装焊接计算时模拟预制反变形,车体侧墙反变形预制示意图如图3所示。反变形的加载方法为:在车体侧墙中间2块型材下方施加1个向上的作用力 F (F 的方向如图3中箭头所示),通过作用力产生向上的位移。此时向上

的位移量就是反变形量,即正装焊接计算过程中预先将侧墙中间 2 块型材沿箭头方向推高 8 ~ 15 mm。

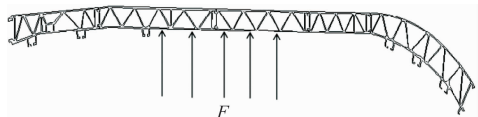


图3 车体侧墙反变形预制示意图

Fig. 3 Diagram of carbody sidewall counter-deformation prefabrication

仿真计算的焊接顺序为先反装后正装,即:先焊接中间 2 道焊缝(2 道焊缝同时焊接),后焊接两侧 2 道焊缝(2 道焊缝也是同时焊接)。在上文所述边界条件、载荷及焊接顺序(顺序均一致)的基础上,进行 4 组不同反变形量的对照计算。反变形在正装焊接过程中施加,即在车体侧墙中间 2 块型材的下方增加反变形量,4 组反变形量分别为 8 mm、10 mm、12 mm 及 15 mm。

2.2 车体侧墙实车组焊试验

对车体侧墙进行组对拼焊。工装支撑分布位置、压紧及顶紧力、压铁质量及摆放位置,以及反变形预制方法均与模拟计算保持一致,随后进行实车组焊试验。

3 试验结果分析

3.1 相同反变形量下的试验结果分析

计算完成后,先选取同一反变形量(12 mm)的 2 组试验(第 1 组为仿真模拟数值、第 2 组为实车数值)进行对照分析。由第 1 组数据可以得到车体侧墙仿真变形趋势如图 4 所示。由图 4 可知,反装焊后车体侧墙在断面方向上的焊接变形趋势为:中间向外(即车体侧墙的正装一侧)凸出,两侧向内(即车体侧墙的反装一侧)翘曲。

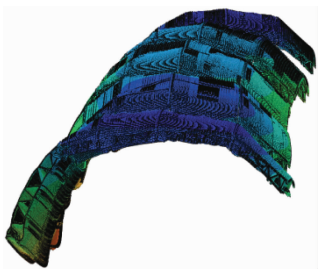
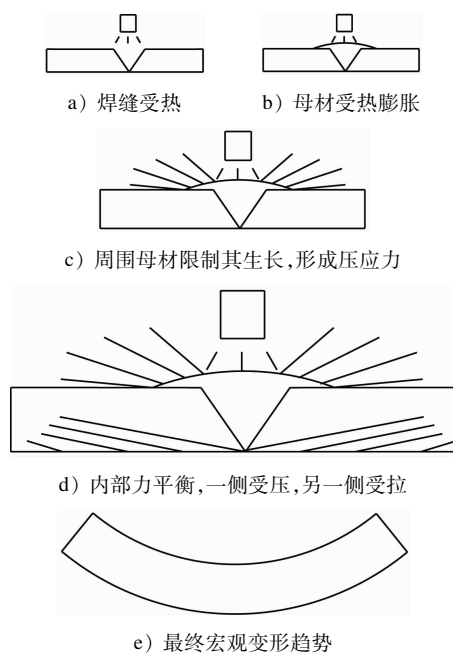


图4 车体侧墙仿真变形趋势示意图

Fig. 4 Diagram of carbody sidewall simulation deformation trend

第 2 组实车数据得到的车体侧墙变形趋势与第

1 组的仿真模拟计算结果一致。车体侧墙焊接变形机理如图 5 所示,在焊接过程中,焊缝处母材受热膨胀向外延伸。受到温度梯度的影响,焊缝处由远及近的母材向外延伸的速度不一致,近端母材延伸时受到远端母材的限制,进而产生了压应力。根据物体内部力的平衡原理,当一侧受压、另一侧受拉时,则表现为焊缝两侧母材向上翘曲、焊缝中心向下凹陷^[1-5]。同时,先焊接焊缝的周围母材还处于相对自由状态,焊接时热作用对其变形影响较大,后焊接焊缝由于其周围母材已经被焊缝约束住,形成了刚性固定,其变形较先焊接焊缝的变形小,故呈现出图 5 所示的焊接变形趋势^[6-11]。



e) 最终宏观变形趋势

图5 车体侧墙焊接变形机理示意图

Fig. 5 Diagram of carbody sidewall welding deformation mechanism

车体侧墙反装焊后变形的仿真计算结果云图如图 6 所示。由图 6 可知:反装焊后,相对于原来的理论轮廓,车体侧墙向车内方向的最大位移为 0.58 mm,发生在车体最上方与最下方型材边缘处;车体侧墙向车外方向外的最大位移为 15.73 mm,发生在中间型材处;车体侧墙的最大变形量为上述 2 个方向位移之和,即 16.31 mm。实车测量得到的车体侧墙最大变形量为 17.00 mm,与仿真计算结果之间的偏差很小(仅为 4%)。

为进一步验证仿真计算的精度,本研究在实车的车体侧墙上选取了多个点位进行变形量测量。

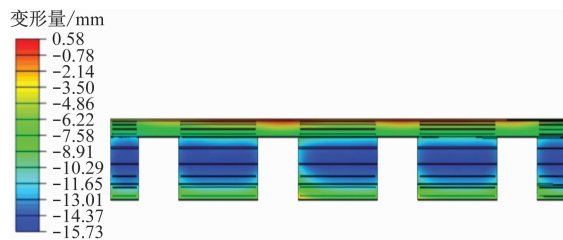


图6 车体侧墙反装焊后变形的仿真计算结果云图

Fig. 6 Nephogram of deformation simulation calculation results after inverted welding of carbody sidewall

实车车体侧墙变形的测量方式如图7所示。使用与型材外轮廓相同的间隙样板进行测量,将测量得到的外轮廓间隙值与样板轮廓的理论值进行对比,二者之差即为车体侧墙的弧度变形量。整个车体侧墙沿车辆长度方向选取了13个测量点位,在每个点位的横断面上自上而下再选取靠近焊缝的4个测点(测点A—测点D)进行测量。仿真模拟计算的测量点位、测量方式均与实车测量相同。

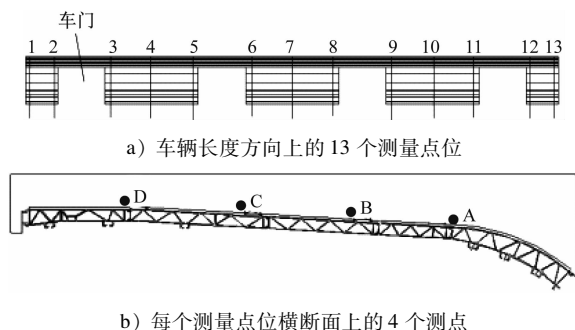


图7 实车车体侧墙变形测量方式示意图

Fig. 7 Diagram of measurement method for actual vehicle carbody sidewall deformation

仿真计算时,选取 path 路径并读取车体侧墙的变形量,对反装焊后车辆高度方向的上、下端点进行拟合,然后计算侧墙型材轮廓曲线与理论轮廓曲线的差值。根据图7a)中的13个测量点位,对每个点位横断面上的4个测点进行仿真计算及实车测量。

反装焊后车体侧墙13个测量点位横断面上的仿真变形量、实测变形量对比如图8所示。由图8可知,仿真变形量与实测变形量的结果近似,计算得到7号测量点位横断面上测点B的最大仿真变形量为10.19 mm,测点B的最大实测变形量为12.50 mm,二者的偏差为18.00%;对比各测点仿真变形量、实测变形量的偏差,7号测量点位横断面上测点B的偏差最大,其余测点的偏差均小于此偏差值。

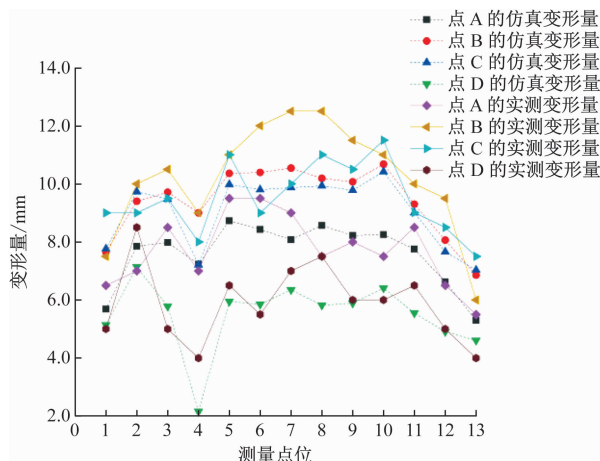


图8 反装焊后车体侧墙的仿真变形量、实测变形量对比

Fig. 8 Comparison of simulated and measured carbody sidewall deformations after inverted welding

与反装焊接的变形趋势恰好相反,车体侧墙正装焊后的变形趋势为中间向内凹陷、两侧向外翘曲。正装焊后车体侧墙的仿真变形量计算结果如图9所示。

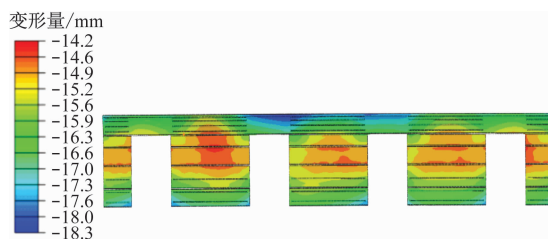


图9 正装焊后车体侧墙的仿真变形量计算结果云图

Fig. 9 Nephogram of carbody sidewall simulation deformation calculation results after upright welding

正装采用与反装焊后相同的多点测量方式,正装焊后车体侧墙的仿真变形量、实测变形量对比如图10所示。

由图9、图10可知:最大变形量出现在7号测量点横断面上的测点C处,此处最大实测变形量为5.50 mm,最大仿真变形量为4.10 mm,二者的偏差为25.45%。

3.2 不同反变形量下的试验结果分析

本文还进行了不同反变形量下的试验,以进行横向对照分析。因反变形量预制在正装阶段完成,因此横向对照只对正装焊后的数据进行对比分析。选取了4个反变形量(8 mm、10 mm、12 mm及15 mm),正装焊后4个反变形量下车体侧墙的最大仿真变形量、最大实测变形量对比如图11所示。由图11可知:仿真结果与实测结果的变化趋势相同,均

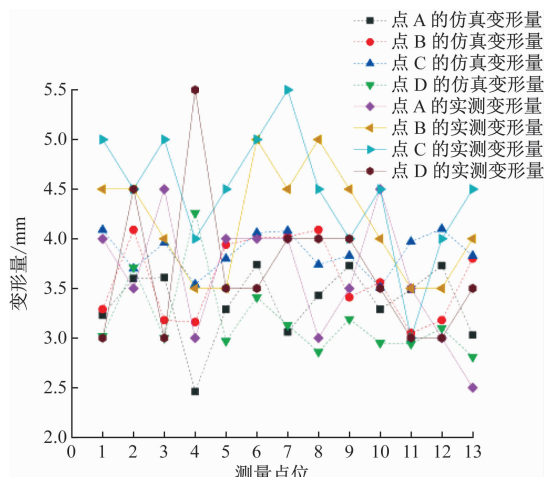


图 10 正装焊后车体侧墙的仿真变形量、实测变形量对比

Fig. 10 Comparison of carbody sidewall simulated and measured deformations after upright welding

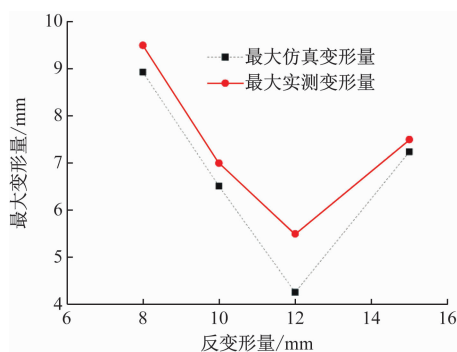


图 11 正装焊后 4 个反变形量下车体侧墙的最大仿真变形量、最大实测变形量对比

Fig. 11 Comparison of maximum carbody sidewall simulated and measured deformations under 4 counter-deformation amounts after upright welding

是随着反变形量的增加,最大变形量逐渐减少;当反变形量增加至 15 mm 时,最大变形量再次增加。这是由于反变形量预制可有效抵消焊接变形应力,但当反变形量超过临界值时,反变形应力会大于变形应力,使得正焊后呈现相反方向的变形。此时的反向变形也说明反变形量预制过大,该情况在工程应用中十分常见,因此,需要通过先期计算或实车试验反复调整反变形量,直至找到最优的反变形方案。

本文通过仿真计算与实车试验并行的方式,找到了市域铁路动车组铝合金车体组焊情况下车体侧墙反变形量的最优值(12 mm),同时也证明了仿真计算的结果具有较高的准确度。后续在铝合金车体焊接变形控制中,可以应用仿真计算来部分代

替实车试验。

4 结语

1) 仿真计算时,若工装分布位置、压力等载荷与边界条件同实车试验一致,则计算得到的车体侧墙焊接变形趋势同实车试验结果一致。且随着反变形量的变化,仿真计算得到的变形量变化趋势也同实车试验结果一致,二者的变形量偏差小于 30%。

2) 反装焊后,车体侧墙焊接变形趋势为:在断面方向上中间向外凸出,两侧向内翘曲,计算得到的最大变形量 16.31 mm,实测得到的最大变形量 17.00 mm。正装焊后,车体侧墙焊接变形趋势为:中间向内凹陷,两侧向外翘曲,计算得到的最大变形量为 4.10 mm,实测得到的最大变形量 5.50 mm。

3) 在反变形量预制从 8 mm 增加到 15 mm 的过程中,随着反变形量的增加,焊后车体侧墙的变形呈现先减少后增加的趋势。反变形量为 12 mm 时,车体侧墙焊后的最大变形量最小。

4) 仿真计算可对轨道交通车辆铝合金车体及部件的焊接变形进行有效预测,并可为铝合金车体焊接变形控制提供有效的技术支撑。

参考文献

- [1] 刘计文,宋长胜. 铝合金车体焊接变形控制研究[J]. 机车车辆工艺, 2016(1): 25.
LIU Jiwen, SONG Changsheng. Study on welding deformation control of aluminum alloy car body[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2016(1): 25.
- [2] 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.
WANG Ya'nan. Welding deformation control and fixture design of roof in 350 km/h EMU[J]. Welding & Joining, 2018(10): 58.
- [3] 王亚男. 混合动力型动车组底架端部结构的变形机理及控制方法[J]. 焊接, 2015(1): 44.
WANG Ya'nan. Distortion and control of end underframe structure in hybrid EMU[J]. Welding & Joining, 2015(1): 44.
- [4] 程虎,沈精虎,戴昆,等. B 型铝合金地铁枕梁焊接数值模拟分析[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2021, 36(1): 86.
CHENG Hu, SHEN Jinghu, DAI Kun, et al. Numerical simulation way of welding was on the bolster in the metro vehicle of type B aluminum car body[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2021, 36(1): 86.
- [5] 刘本末. 地铁车辆车体强度仿真分析与优化设计[D]. 大

- 连: 大连交通大学, 2023.
- LIU Benmo. Simulation analysis and optimization design of metro car body strength [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [6] 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.
- WANG Ya'nan. Study on welding deformation control and simulation of EMU vehicle side wall at 400 km/h[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(11): 94.
- [7] 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试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 31.
- QU Shuang, WANG Ya'nan, BAO Hongyang. Prefabrication method and experimental study of rail transit integral load-bearing aluminum alloy car body deflection[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 31.
- [8] 王亚男, 刘松, 鲍洪阳, 等. 铝合金轨道车辆不同枕梁结构的焊接变形机理及差异性分析[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 148.
- WANG Ya'nan, LIU Song, BAO Hongyang, et al. Analysis of welding deformation mechanism and differences in different sleeper beam structures of aluminum alloy rail vehicles[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 148.
- [9] 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.
- GENG Ming, WANG Ya'nan, XIAO Yu, et al. Study on welding deformation control and simulation for end wall of CR400BF EMU[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(3): 99.
- [10] 蒙波, 陈蓉. 轨道车辆铝合金车体焊接变形控制研究[J]. 内燃机与配件, 2019(11): 124.
- MENG Bo, CHEN Rong. Study on welding deformation control of aluminum alloy car body of rail vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(11): 124.
- [11] 王甫燕. 铝合金地铁车辆底架结构焊接变形控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- WANG Fuyan. Welding deformation control of aluminum alloy subway vehicle underframe structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 通信作者:王亚男,高级工程师,wangyn16041226@sina.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 41 页)

本文仅对市域轨道交通车辆维修的基础模式进行了论述。随着车辆维修技术的发展,部分市域轨道交通线路若条件成熟,也可以尝试开展智能运维和 AI(人工智能)等智能技术加持的检修工作,使车辆检修技术和检修模式向更先进的方向发展。

参考文献

- [1] 李加祺, 邱建平, 杨辉, 等. 市域铁路车辆检修模式及检修设施探讨[J]. 中国铁路, 2018(8): 83.
- LI Jiaqi, QIU Jianping, YANG Hui, et al. Research on mode and facility of vehicle maintenance in suburban railway[J]. China Railway, 2018(8): 83.
- [2] 邵来. 市域市郊铁路车辆选型与运用检修模式研究[J]. 中国科技信息, 2021(7): 68, 71.
- SHAO Lai. Study on selection and operation maintenance mode of railway vehicles in suburb of city[J]. China Science and Technology Information, 2021(7): 68, 71.
- [3] 周再玲, 刘致远, 龚辉波, 等. 城市轨道交通车辆大架修灵活工艺设计[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 219.
- ZHOU Zailing, LIU Zhiyuan, GONG Huibo, et al. Flexible process design for urban rail transit vehicle overhaul[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(1): 219.
- [4] 黄涛, 张正远, 史时喜. 城市轨道交通车辆均衡检修制度
- 和计划性检修制度对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 211.
- HUANG Tao, ZHANG Zhengyuan, SHI Shixi. Comparative analysis of balanced maintenance system and scheduled maintenance system for urban rail transit vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(3): 211.
- [5] 贾小平, 朱程, 戴焕云, 等. 地铁车辆车轮磨耗和镟修策略研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 127.
- JIA Xiaoping, ZHU Cheng, DAI Huanyun, et al. Research on metro vehicle wheel wear and reprofiling strategy[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 127.
- [6] 张春麟. FMECA(故障模式、影响及危害性分析)分析法在车辆检修规程中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(增刊 1): 93.
- ZHANG Chunlin. Application of FMECA analysis method in vehicle maintenance procedures[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(S1): 93.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 通信作者:王铁民,高级工程师,WTM_CRRRC@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license