

# 弧焊及搅拌摩擦焊工艺对高速铁路动车组 铝合金车体侧墙焊接变形的影响

刘 松 王亚男 耿 明 张欣盟 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] 受铝合金材质热导率与线膨胀特性的影响, 高速铁路动车组铝合金车体在焊接过程中极易产生焊接变形。有必要对目前较为成熟的弧焊工艺、新一代的搅拌摩擦焊工艺进行研究, 对这 2 种工艺引起的焊接变形进行对比分析。[方法] 介绍了试验的材料及试验方法, 选取车体侧墙的弧度、高度、挠度 3 个指标作为焊接变形对比的参数。针对反装组焊试验、正装组焊试验完成后的结果, 分别对弧焊、搅拌摩擦焊 2 种工艺下车体侧墙的弧度变形量、高度变形量、挠度变形量进行了对比, 分析了 2 种工艺下焊接变形的变化趋势。[结果及结论] 采用搅拌摩擦焊工艺制造的铝合金车体侧墙可以有效降低焊接变形。搅拌摩擦焊的焊后弧度变形量是弧焊焊后弧度变形量的 20%。搅拌摩擦焊不会引起侧墙型材在高度方向上的收缩变形。与弧焊的侧墙焊后挠度回弹量相比, 搅拌摩擦焊的焊后挠度回弹量更大。**关键词** 高速铁路; 动车组; 铝合金车体侧墙; 焊接变形; 搅拌摩擦焊工艺; 弧焊工艺

中图分类号 U270.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.030

## Effect of Arc Welding and Friction Stir Welding Processes on Sidewall Welding Deformation of Aluminum Alloy Carbody in High-speed Railway EMU

LIU Song, WANG Ya'nan, GENG Ming, ZHANG Xinmeng, GUO Chuncheng, YAN Gege

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

**Abstract** [Objective] Due to the influence of thermal conductivity and linear expansion characteristics of aluminum alloy materials, welding deformation is prone to occur during the welding process of aluminum alloy carbodies in high-speed railway EMU (electric multiple units). It is necessary to study the currently mature arc welding process and the next-generation friction stir welding process, so as to compare and analyze the welding deformations caused by these two methods. [Method] The experimental materials and methods are introduced, and three parameters of curvature, height, and deflection for

carbody sidewalls are selected as indicators for comparing welding deformation. Based on results from reverse-assembly welding and forward-assembly welding experiments, the curvature, height, and deflection deformation values of carbody sidewalls are compared in terms of the arc welding and friction stir welding processes. The welding deformation changing trends under the two processes are analyzed. [Result & Conclusion] The aluminum alloy carbody sidewalls manufactured using friction stir welding process can effectively reduce welding deformation. The post-weld curvature deformation of friction stir welding is 20% of that of arc welding. Friction stir welding will not cause shrinkage deformation of sidewall profiles in the height direction. However, compared with arc welding, the deflection rebound of the sidewalls after welding is greater with friction stir welding.

**Key words** high-speed railway; EMU; aluminum alloy carbody sidewall; welding deformation; friction stir welding process; arc welding process

受铝合金材质热导率与线膨胀特性的影响, 轨道交通车辆的铝合金车体在焊接过程中极易产生焊接变形。目前, 国内外大多采用成熟的弧焊工艺进行车体焊接。此外, 搅拌摩擦焊作为近年来新开发的工艺, 也逐渐在铝合金车体焊接中得到应用。本文以高速铁路动车组车辆为例, 对其车体侧墙部件进行试验, 深入分析弧焊、搅拌摩擦焊这 2 种工艺对高速铁路动车组车辆车体侧墙焊接变形的影响。

## 1 试验材料

每种工艺均准备了 15 个高速铁路动车组车辆车体侧墙型材, 共计 2 组 30 次组焊试验。其中, A 组为弧焊工艺, 试验材料序号为 1~15; B 组为搅拌摩擦焊工艺, 试验材料序号为 1~15。这 30 次试验使用的车体侧墙只在接头形式上有所区分, 其余参数(如外形、高度、宽度、壁厚等)均相同。车体侧墙断面结构及焊缝接头如图 1 所示。

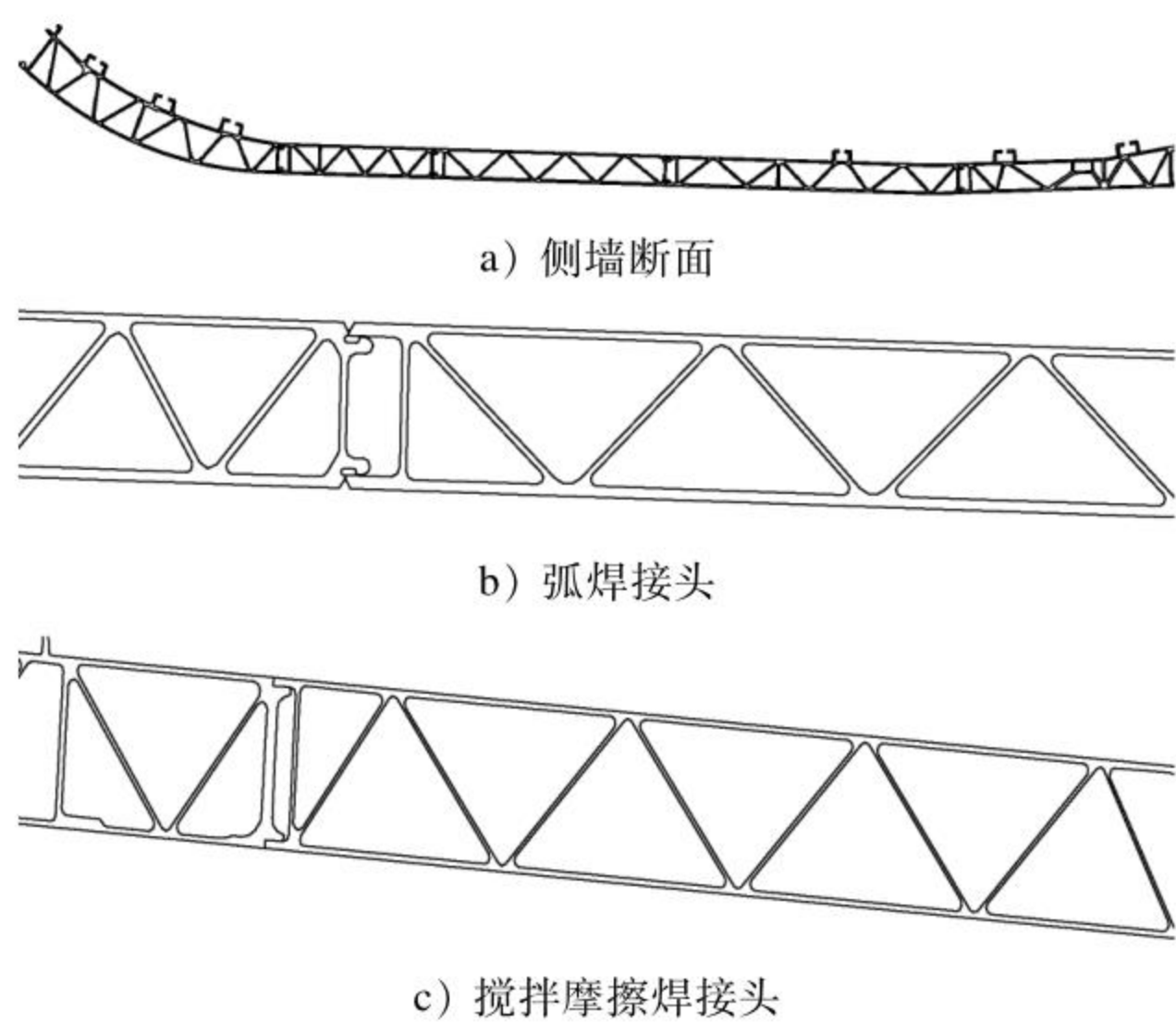


图 1 车体侧墙断面结构及焊缝接头示意图  
Fig. 1 Diagram of carbody sidewall cross-sectional structure and welded joints

## 2 试验方法

车体侧墙型材组焊时,工装约束分布、反变形预制、挠度预制(2种工艺的挠度预制值均为 12 mm)、压铁加载(沿侧墙长度方向均匀分布 3 根 1.6 t 压铁)等工艺条件均相同。车体侧墙组焊工装示意图如图 2 所示。2 种工艺的车体侧墙焊接顺序也相同,均为先反装组焊后再正装组焊。

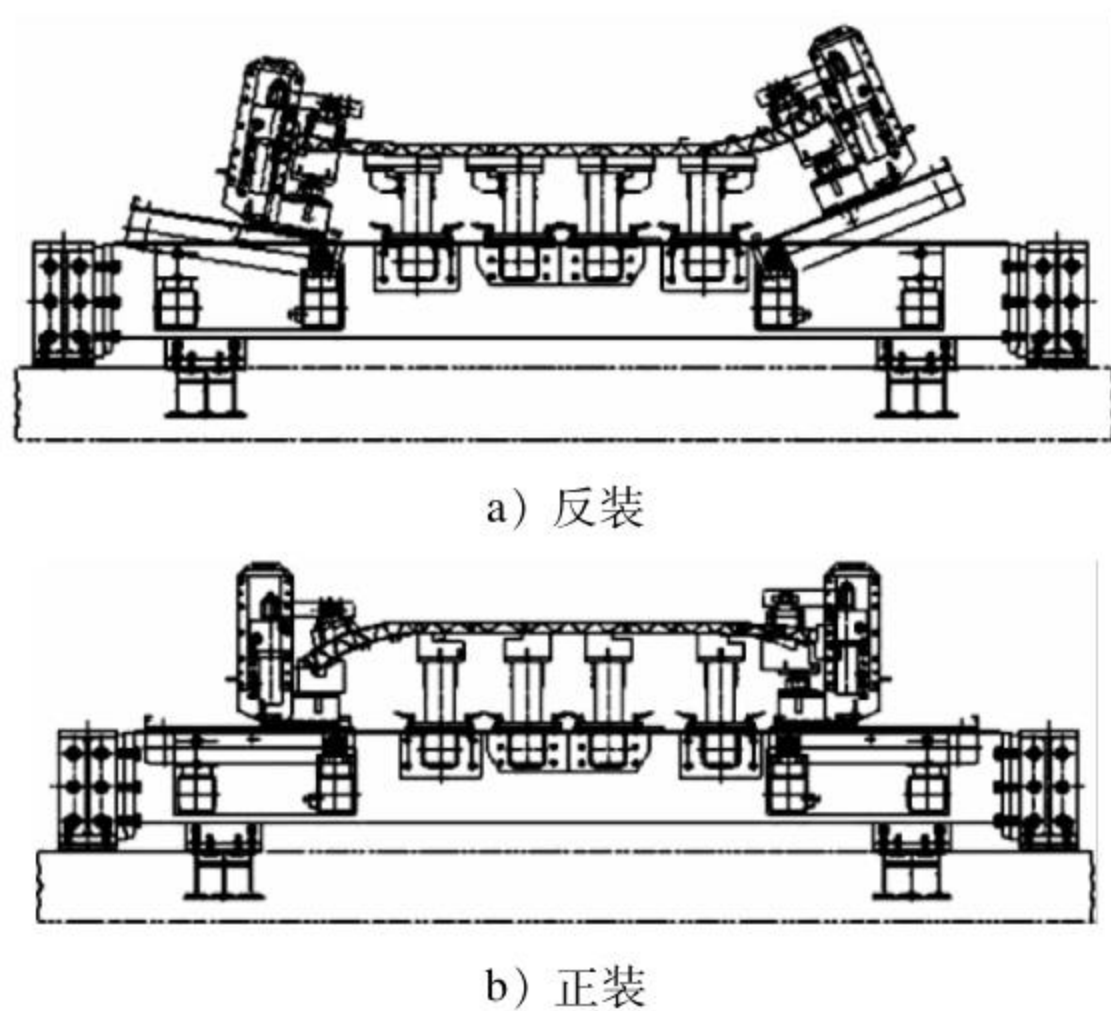


图 2 车体侧墙组焊工装示意图  
Fig. 2 Diagram of carbody sidewall assembly welding tooling

车体侧墙在反装、正装组焊后,分别对侧墙的弧度、高度、挠度 3 个指标进行测量,以分析 2 种工艺对车体侧墙焊接变形及尺寸的影响。车体侧墙焊后弧度、高度、挠度的测量方法如图 3 所示。

1) 弧度的测量方法为: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和样板

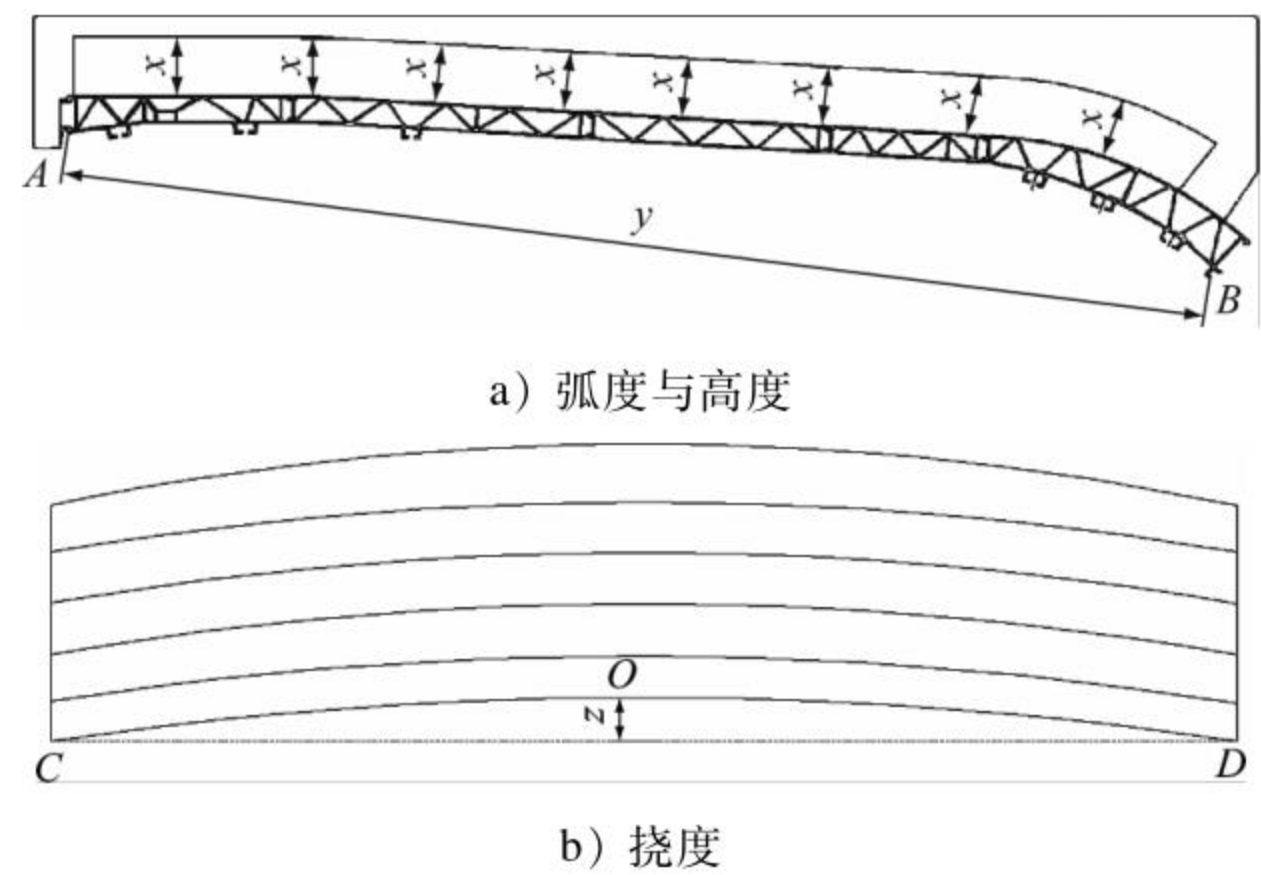


图 3 焊后车体侧墙弧度、高度、挠度测量方法示意图  
Fig. 3 Diagram for measuring the welded carbody sidewall curvature, height, and deflection

轮廓的间隙值设为  $x$ ,将  $x$  与理论值进行对比,进而得出车体侧墙的弧度变形量。

2) 高度的测量方法为:使用卷尺测量侧墙上端点  $A$ 、下端点  $B$  的间距  $y$ 。

3) 挠度的测量方法为:使用鱼线或莱卡测量仪,测量侧墙下型材中点  $O$  相对于左端点  $C$ 、右端点  $D$  连线在车辆高度方向上的位移量  $z$ 。

关于焊接变形的方向,本文规定如下:①弧度以向正装方向拱起为正,向反装方向塌陷为负;②高度以伸长为正,收缩为负;③挠度以增加为正,回弹为负。

## 3 试验结果分析

### 3.1 反装组焊试验结果分析

反装组焊试验完成后,2 种工艺下车体侧墙的弧度、高度、挠度变形量对比如图 4 所示。由图 4 可知:①弧焊工艺下,弧度最大变形量为 17 mm,高度最大变形量为 -3.5 mm,挠度最大变形量为 -1.0 mm;②搅拌摩擦焊工艺下,弧度最大变形量为 4 mm,高度最大变形量为 0.5 mm,挠度最大变形量为 -5.5 mm。

### 3.2 正装组焊试验结果分析

正装组焊试验完成后,2 种工艺下车体侧墙的弧度、高度、挠度变形量对比如图 5 所示。由图 5 可知:①弧焊工艺下,弧度在反装弧度变形的基础上向反方向再次变形,弧度最大变形量为 -22 mm;高度在反装收缩的基础上再次变形,高度最大变形量为 -2.0 mm;挠度回弹量在反装的基础上没有变化。②搅拌摩擦焊工艺下,弧度在反装的基础上再次向反方向变形,弧度最大变形量为 -5 mm;高度

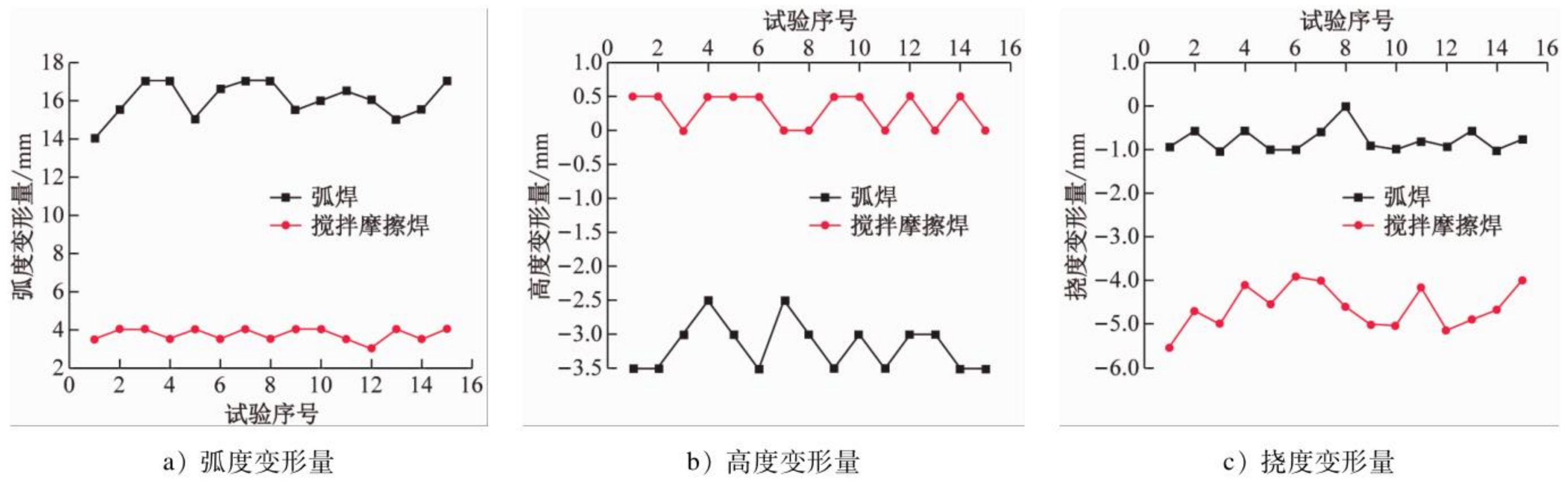


图4 反装焊后2种工艺下侧墙的弧度、高度、挠度变形量对比

Fig. 4 Comparison of sidewall curvature, height, and deflection deformation under two processes after reverse-assembly welding

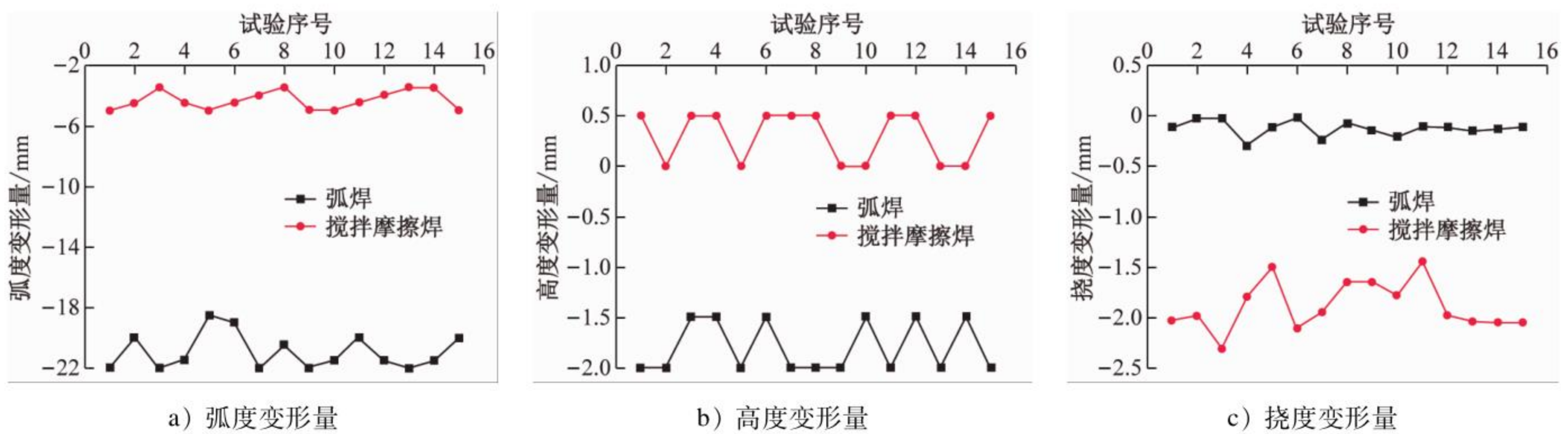


图5 正装焊后2种工艺下侧墙的弧度、高度、挠度变形量对比

Fig. 5 Comparison of sidewall curvature, height, and deflection deformation under two processes after forward-assembly welding

在反装的基础上再次变形,高度最大变形量为 0.5 mm;挠度在反装的基础上再次变形,挠度最大变形量为 -2.3 mm。

从图4、图5可知:

1) 在保证接头强度的条件下,相比于弧焊,搅拌摩擦焊对侧墙弧度变形的影响更小。这是由于与弧焊的熔池温度较高相比,搅拌摩擦焊的搅拌温度较低,其热输入量下降,进而致使焊接引起的膨胀变形量、收缩变形量减少。

2) 弧焊工艺下,侧墙高度在焊后呈现收缩变形趋势,其原因是弧焊熔化后焊缝产生了剧烈的收缩;搅拌摩擦焊接工艺下,侧墙高度在焊后呈现轻微伸长趋势,这是由于搅拌摩擦焊在接头处除了搅拌针的体力作用外,还有压轮的面力作用,面力作用向下压的过程中会阻碍焊缝处的母材向内收缩,并将母材向两侧挤压,从而产生轻微的伸长。

3) 搅拌摩擦焊工艺下挠度的回弹量大于弧焊工艺下挠度的回弹量,这是由于挠度预制在焊前属于弹性变形,在弧焊工艺下,经过焊缝的熔化和熔池的凝固,侧墙型材产生了塑性变形。而搅拌摩擦焊工艺属于非熔化焊接,挠度预制产生的弹性变形

在焊接过程中并没有转化为塑性变形,经过冷却放置后,其挠度会逐渐释放。

#### 4 结语

本文对弧焊、搅拌摩擦焊2种焊接工艺在高速铁路动车组铝合金车体侧墙型材组焊过程中引起的焊接变形进行了研究。

经分析发现,相对于传统的弧焊工艺,搅拌摩擦焊工艺引起的焊缝收缩、型材弯曲变形均更小:搅拌摩擦焊焊后弧度变形量是弧焊焊后弧度变形量的20%;高度方向没有收缩;预制挠度的回弹量更大。采用搅拌摩擦焊组焊后车体侧墙的尺寸精度较高,无须再经火焰与机械调修校正。因而,在进行整车拼焊及后续工序装配时,搅拌摩擦焊工艺较弧焊在尺寸上的匹配度更高。

下阶段的研究中,应深入探究搅拌摩擦焊焊接过程机理,如利用有限元软件仿真分析其焊接过程中的热力学行为、材料流动及相变等机制,以更好地理解搅拌摩擦焊的优点,并进一步优化其焊接工艺。此外,还应通过试验和模拟手段,对搅拌摩擦焊的工艺参数(如焊接速度、压力、摩擦热输入等)

进行优化,以找到最佳的工艺参数组合,进一步提高车体焊接的质量及效率。

## 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.  
WANG Yanan. Welding deformation control and fixture design of roof in 350 km/h EMU[J]. Welding & Joining, 2018(10): 58.
- [2] 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 Yanan. Distortion and control of end underframe structure in hybrid EMU[J]. Welding & Joining, 2015(1): 44.
- [3] 王亚男, 刘松, 鲍洪阳, 等. 铝合金轨道交通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 Yanan, 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.
- [4] 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.
- [5] 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 Yanan, 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.
- [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 Yanan. 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] 蒙波, 陈蓉. 轨道交通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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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.  
GENG Ming, WANG Yanan, 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.
- [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  
· 第一作者:刘松,高级工程师,124060693@qq.com  
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143页)

- [3] 窦顺坤. 基于无线通信的列车网络控制平台设计与实现[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.  
DOU Shunkun. Design and implementation of train network control platform based on wireless communication [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [4] 焦曰里, 晏鑫, 苏超. 欧洲下一代轨道交通车辆网络控制技术研究[EB/OL]. [2024-07-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1152.U.20240725.1016.002.html>.  
JIAO Yueli, YAN Xin, SU Chao. Research on next-generation rail vehicle network control technology in Europe [EB/OL]. [2024-07-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1152.U.20240725.1016.002.html>.
- [5] 林鸿, 王林美, 魏艳萍. 关于欧盟 Shift2Rail 计划的研究[J]. 国外铁道车辆, 2019, 56(1): 11.  
LIN Hong, WANG Linmei, WEI Yanping. A study of the EU Shift2Rail plan [J]. Foreign Rolling Stock, 2019, 56(1): 11.
- 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  
· 第一作者:王华伟,正高级工程师,whw\_huawei@163.com  
通信作者:高阳,正高级工程师,013200018545@crrecg.cc  
· ©《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