

Research on Welding Deformation of Aluminum Alloy Door-Type Structure and Its Control

Lixiang Lu Haiyang Yu Shunfan Hu Yuekai Jiang

Alstom Sifang (Qingdao) Transportation Ltd., Qingdao, Shandong, 266111, China

Abstract

With the wide application of aluminum alloy materials in the railway transportation industry, the control of welding deformation in the manufacturing process has always received extensive attention. The end wall of the aluminum alloy car body is welded from aluminum alloy profiles, and the key dimensions of the end wall during welding are difficult to ensure. This paper studies the principle and trend of welding deformation of the door-type structure of the end wall, analyzes the control measures for key points of the door-type structure, and compares the influence of single-point control method and double-point control method on the door size. Effective measures for welding deformation control of the end wall door-type structure have been obtained, effectively ensuring the size of the end wall door and the uniformity of the door size. It has universality in the control of welding deformation of aluminum alloy structures.

Keywords

Aluminum alloy door-type structure; Welding deformation; Process optimization

铝合金门式结构焊接变形产生及控制研究

卢立祥 于海洋 胡顺帆 姜悦凯

青岛四方阿尔斯通铁路运输设备有限公司, 中国·山东 青岛 266111

摘 要

随着铝合金材料在轨道交通行业的广泛应用, 其制造过程中的焊接变形控制一直受到广泛关注。铝合金车体的端墙由铝合金型材焊接而成, 其各项关键尺寸在焊接过程中不易保证, 本文对端墙门式结构的焊接变形原理、变形趋势进行了研究, 分析了门式结构关键点的控制措施, 并对比单点控制法与双点控制法对门口尺寸的影响, 获得了有效的端墙门式结构焊接变形控制措施, 有效的保证了端墙门口尺寸及门口尺寸的均匀性, 在铝合金结构的焊接变形控制方面具有通用性。

关键词

铝合金门式结构; 焊接变形; 工艺优化

1 引言

随着轨道交通行业的飞速发展, 轻量化已成为高速列车涉及与制造的核心趋势, 铝合金由于密度小、比强度高、耐腐蚀等优势, 逐步取代碳钢与不锈钢成为组成高速列车、城轨等车体的主要材料。其中 6A01、6005A 为代表的 6 系铝合金, 因其良好的挤压性能与焊接性能, 已经作为大型部件型材的原材料,^[1] 普遍应用于城轨与动车组的车体结构制造。^[2] 然而, 由于铝合金热膨胀系数高, 导热率高、弹性模量低, 导致其在生产制造过程中容易产生明显的焊接变形, 不易控制, 从而增加了整体制造工艺的复杂性。^[3]

端墙作为铁路客车的关键端部结构, 不仅与底架、侧墙、车顶焊接形成完整车体, 也是端门及众多附件的安装

基础, 因此其尺寸公差要求严格。本文聚焦于端墙门式结构在焊接过程中的变形控制问题, 系统探究不同控制措施对焊后关键尺寸的影响, 以期该类结构的设计优化与工艺制定提供理论参考和实践依据。

2 门式结构介绍

端墙门式结构主要由三部分焊接组成: 左墙板, 右墙板, 上墙板。墙板均为中空带斜筋型材, 厚度 4mm 材料为 6005A。左右墙板长度约为 2800 mm, 宽度约为 1200 mm。上墙板长度约为 900 mm, 宽度约为 750 mm。其中上墙板长度与门口宽度保持一致, 上墙板与左右墙板单侧对接焊缝长度约 750 mm。门口结构如图 1 所示。

门式结构尺寸要求来源于后续附件安装, 墙板焊后关键尺寸包括 1. 门口区域安装端门机构, 需要控制门口各处尺寸公差为 ± 1.5 mm; 2. 端墙板上需要焊接附件定位滑槽, 需要控制端墙板 2mm/m 平面度。

【作者简介】卢立祥 (1999—), 男, 中国山东日照人, 硕士, 助理工程师, 从事铝合金焊接研究。

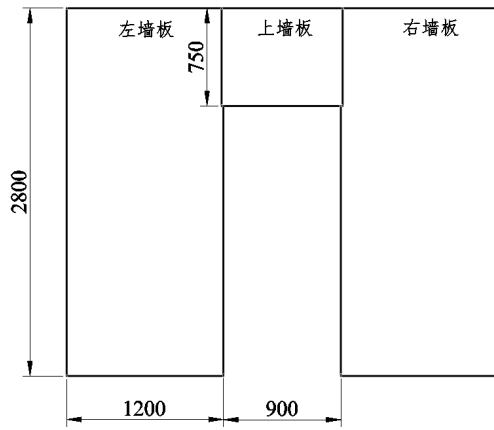


图 1 端墙门式结构示意图

3 门式结构焊接变形分析

门式结构焊接变形主要来源于上墙板与左、右墙板对接焊缝焊接收缩，其中包括 1、横向收缩：焊接导致左右墙板向中间收缩。2、不对称的收缩约束：仅在上部施焊时，焊接产生的收缩力与底部的自由状态形成力矩，导致门口下部向外张开，形成“喇叭口”3、翘曲：焊缝收缩导致墙板外侧向中心翘曲，影响对称度与平面度。

4 门式结构焊接变形控制

4.1 焊接变形工艺控制措施

门式结构焊接变形控制措施施加在三个阶段，焊前、随焊、焊后。其中焊接过程中的变形控制主要针对焊接方法与焊接工艺的选择、焊接顺序与方向。由于铝合金导热系数高，需要选择热输入集中的焊接方法 TIG 或 MIG 焊；而为了获得稳定的接头质量与表面成型，焊接工艺参数在焊接前已通过焊接工艺评定确定，因此对于门式结构的焊接变形控制主要在于焊前与焊后两个阶段。焊接前的变形控制措施主要包括刚性约束和预制反变形两种，刚性约束通过工装或辅具对工件尺寸、平面度进行固定，但由于铝合金弹性模量大，拆除工装后存在变形反弹的问题，实际生产往往采用预制反变形的的方法，根据经验判断焊接收缩与结构变化的趋势，焊前对工件施加相反趋势的变形。焊后变形控制主要为工件平面度的调修，包括机械调修与火焰调修，通过对焊缝区域再次加热引起母材的不均匀收缩调整平面度。^[4-5]

为控制端墙尺寸及平面度，在焊接前采取以下措施 1、施加刚性固定与约束：使用压紧器压紧墙板上表面，一方面用于控制墙板平面度，另一方面抵制墙板焊缝的收缩 2、焊前增加焊接间隙，预留焊缝收缩余量，使用焊接背板保证焊缝反面成型 3、正式焊接前施加定位段焊，固定构件的相对位置。4、焊接方向由中心向外侧焊接，抵御端墙焊接时形成喇叭口的趋势。5. 两侧焊缝对称焊接，使两道焊缝焊接过程产生的收缩力相互平衡，保证结构对称度。

4.2 焊前组装尺寸设置

除上述措施外，针对门式结构独有的门口尺寸收缩及喇叭口变形趋势，提出了以下两种控制方法：1、门口下部单点控制，使用单根工艺杆放置于距门口下部 400mm 处，该工艺杆能够提供支撑力抑制左右墙板收缩，工艺杆设置位置示意图如下图 2 所示；2、双点控制门口尺寸，在距门口上部 200mm，下部 300mm 处增加两处工艺杆，当仅在门口上部增加工艺杆时，上部焊缝收缩受到抑制，但形成的“杠杆结构”会增大门口的喇叭口趋势，因此在下部同步增加工艺杆施加拉力，抑制喇叭口形成。单点控制法与双点控制法焊前尺寸设置如表 1 所示。

表 1 门口位置焊前尺寸 /mm

控制方式	焊前组装尺寸		焊接间隙
	上部尺寸	下部尺寸	
单点控制	902	901	1
	902	901	1
双点控制	902	899	1~1.5
	902	900	1

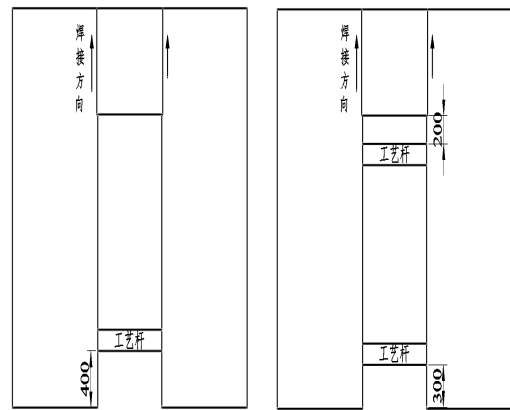


图 2 单点控制示意图

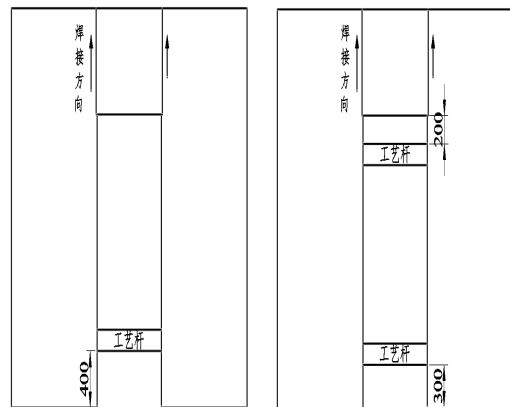


图 3 双点控制示意图

4.3 焊接过程

上墙板与左右墙板间对接焊缝的焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 焊接工艺参数

焊接方法	焊接位置	保护气 / 流量 L/min	焊接 电流	焊接 电压	焊接速度 cm/min
MIG	PA	纯氩 /20~25	210 ± 10	21.8 ± 1	50 ± 3

4.4 试验结果

焊后门口尺寸数据如表 3 所示。采用仅在门口下部增加工艺杆的控制方案时，门口上部处于自由状态，受焊缝收缩影响，尺寸显著减小，焊后尺寸约为 900mm。此时，焊缝收缩产生的拉力 F_1 和 F_1' 促使左右墙板向中间移动；而门口下部因受工艺杆支撑力 F_2 和 F_2' 的约束，尺寸变化较小，焊后保持在 900~901mm 之间。该工况下墙板受力状态如图 4 所示，门口整体呈现的喇叭口趋势有所减弱。

当同时采用上部与下部双工艺杆控制时，焊缝收缩产生的拉力 F_3 和 F_3' 仍作用于左右墙板，但此时门口上部收缩受到上部工艺杆支撑力 F_4 和 F_4' 的抑制，尺寸稳定在 900~901mm。值得注意的是，在双工艺杆构成的约束条件下，上部工艺杆与下部工艺杆之间形成类似杠杆的相互作用，导致门口下部在焊接过程中表现出向外扩张的趋势。该趋势被下部工艺杆所提供的拉力 F_5 和 F_5' 有效抑制，使下部尺寸同样控制在 900~901mm 范围内。在此方案下，门口喇叭口变形趋势已不明显。

表 3 焊后门口尺寸 /mm

控制方式	焊后尺寸	
	上部尺寸	下部尺寸
单点控制	899.5	900.5
	900	900.5
双点控制	900	900
	900	900.5

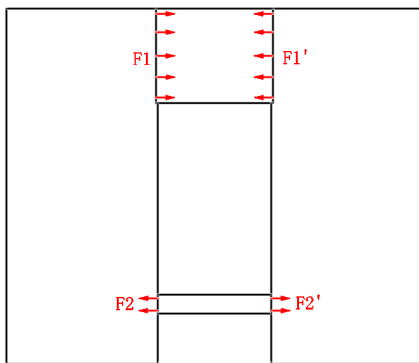


图 4 单点控制法左右墙板受力状态

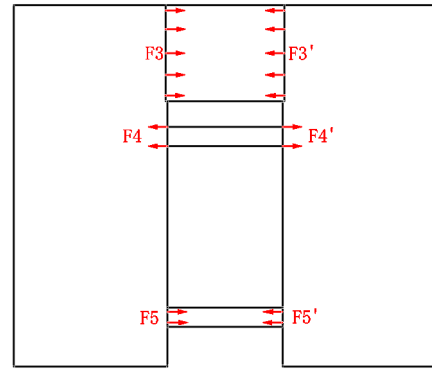


图 5 双点控制法左右墙板受力状态

5 结语

门式结构的焊接变形控制是焊前、焊中及焊后实施的多阶段、多维度的综合工艺调控。具体而言，在焊前阶段，通过预留焊缝收缩余量、施加反变形以及实施刚性固定等方式对工件进行约束与预变形；在焊接过程中，优先选用能量集中的焊接方法，减小热输入以降低焊接的变形倾向；焊后通过对墙板平面度进行调修，从而实现对接口整体平面度与关键尺寸的有效控制。

针对门口区域因上部焊缝收缩导致的门口宽度减小及“喇叭口”（即下宽上窄）变形趋势，本研究对比了两种工装控制策略。其一为单点控制法，即在焊前于门口下部增加工艺杆，该方法能有效抑制下部收缩，使门口总宽满足设计要求，但由于上部处于自由状态，其“喇叭口”变形趋势仍未能完全消除。其二为双点控制法，通过在门口上下位置同时设置工艺杆：上部工艺杆提供反向支撑力，以抵抗焊缝的纵向收缩；下部工艺杆则施加拉力，抑制门口下部的内收变形。结果表明，采用双点控制法后，门口各截面尺寸均匀性显著改善，焊后尺寸完全符合设计要求，实现了对门式结构焊接变形的有效控制。

参考文献

- [1] 张晓杰, 姚肖洁, 刘志森, 等. 轨道车辆铝合金车体中的焊接结构优化[J]. 焊接技术, 2025, 54(07):86-89.
- [2] 杨德惠, 李业雄, 张林儒, 等. 轨道车辆焊接结构轻量化发展趋势概述[J]. 焊接技术, 2021, 50(08):4-5.
- [3] 张子傲, 张知航, 黄继华, 等. 高速列车铝合金车体焊接工艺研究进展[J]. 轨道交通材料, 2023, 2(01):1-7.
- [4] 吴海龙, 樊继成, 李磊. 浅谈铝合金结构件焊接变形的控制[J]. 新疆钢铁, 2024, (01):37-39.
- [5] 刘志平, 王立夫. 铝合金部件焊接变形的产生及控制[J]. 焊接技术, 2007, (05):52-53.