

铝合金端墙板调修工艺优化研究

龙 刚¹ 张东明² 雒 洪³ 杨丽君⁴ 宋 丹⁵

中车成都机车车辆有限公司 四川 成都 610511

【摘 要】：随着轨道交通装备轻量化需求的日益增长，铝合金车体结构在铁路货运车辆制造中的应用愈发广泛。然而，薄壁铝合金型材及板材组焊过程中产生的焊接变形问题，严重制约了生产效率与产品质量。本文以出口澳大利来漏斗车项目为背景展开研究。通过因果分析，确定“压紧面积小”与“连续焊接”为主要要因。据此实施交叉分段焊接工艺优化及专用全覆盖工装研制。结果表明：单件调修时间由 6.5h 降至 2.3h，缩短 64.6%；平面度超差占比由 70.8%降至 17.4%，节约成本 15.65 万元。该成果有效攻克了薄壁铝合金焊接变形难题，显著提升了生产效率与产品质量，具备广泛推广价值。

【关键词】：薄壁铝合金；端墙板；焊接变形；调修时间；工艺优化；专用工装

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.035

1 引言

在全球倡导绿色低碳交通的背景下，铁路货运车辆的轻量化已成为提升运载效率、降低能耗的关键技术路径。铝合金因其密度小、比强度高、耐腐蚀性好等优点，逐渐取代传统碳钢成为车体制造的首选材料。然而，铝合金材料具有热导率高、线膨胀系数大（约为钢的 2 倍）、高温强度低等物理特性，导致其在焊接过程中极易产生较大的残余应力和焊接变形，尤其是对于薄壁结构件，变形控制难度极大。

本公司承接的出口澳大利亚铁路货运粮食漏斗车项目，首次采用全铝合金薄壁型材及板材组焊的车体结构。其中，端墙板组成作为车体的关键大部件，其制造质量直接关系到整车的外观精度与装配效率。在实际生产中，端墙板组成焊后平面度超差问题频发，导致后续打磨调修工作量巨大，平均耗时高达 6.5 小时，严重拖累了生产节拍，甚至影响产品交付。因此，开展端墙板组成调修时间的缩短研究，攻克薄壁铝合金焊接变形难题，对于提升项目整体效益、积累铝合金车体制造经验具有重要的现实意义。

2 现状调查与问题定义

2.1 工艺流程与现状

端墙板组成的制造工艺主要包括：端墙板组焊→正面焊接→端柱焊接→反面焊接→平面度测量→打磨调修→复测。统计近期生产的 6 件端墙板组成数据发现，调修环节成为制约产能的瓶颈。平均每件调修时间为 6.5 小时，远超公司既往地铁新造项目中碳钢或厚板铝合金端墙的调修水平。

2.2 问题影响分析

调修时间过长带来了多重负面影响：首先，过度的机械调修（如锤击、火焰矫正）会改变材料微观组织，降低产品疲劳强度，影响内在质量；其次，反复打磨破坏了铝合金表面的氧化膜及外观一致性，降低了产品美观度；最后，长时间的调修占用了大量工时，导致后工序组装等待，无法满足既定的生产节拍要求。

2.3 症结定位

为进一步明确问题根源，项目组对调修工作进行了细化分解，将调修内容分为端墙板平面度、端柱直线度、折弯角度及局部调修四个项点。统计数据显示，端墙板平面度超差的平均调修时间为 4.6 小时/件，占总调修时间的 70.8%。现场测量表明，焊后端墙板平面度普遍超差 5~8mm，呈现明显的波浪形变形。因此，“端墙板平面度超差”被确定为导致调修时间长的核心症结。

3 目标设定

基于现状数据，若彻底解决平面度超差问题，理论调修时间可计算为： $6.5h \times (1 - 70.8\%) = 1.9h$ 。参考公司内部成熟的地铁新造项目经验，其端墙平面度调修时间约为 2 小时。考虑到本项目采用的薄板组焊结构比地铁项目的型材组焊结构更易变形，难度系数更高，故设定目标值略高于理论值。经综合评估，将目标设定为：将薄壁铝合金端墙板组成调修时间缩短 60%，即控制在 2.5 小时以内。

4 主要原因确定

项目组运用质量管理工具，从人、机、料、法、环、测六个维度进行因果分析，初步筛选出 8 条末端因素，并通过现场跟踪、数据比对、试验验证等方法逐一进行要因确认。

4.1 非要因排除

板材平面度超差：抽检入库板材，平面度在 0.5~0.6mm 之间，符合技术标准（ $\leq 0.8mm$ ），排除。

焊接参数异常：核查电流、电压记录及焊接速度，均在工艺规程允许范围内，且焊缝成型良好，排除。

组对间隙过小：将间隙调整至工艺上限 4mm 并由专家施焊，变形无明显改善，排除。

环境因素：温湿度记录正常，厂房围挡防风效果良好，排除。

4.2 要因确认

经过严格验证,确认以下两条为导致平面度超差的主要要因:

压紧装置接触面积小:原有工装仅通过压铁和垫块对4根端柱进行点状压紧,端墙板大面积区域处于悬空状态,缺乏有效的反变形约束。焊接热输入导致的自由收缩使得未压紧区域产生严重的波浪形变形。

端墙板拼接焊采用一次连续焊:原工艺采用从上至下的一次性连续焊接,导致热量在焊缝沿线高度集中,局部温度梯度过大,产生了巨大的纵向收缩应力,加剧了薄板的失稳变形。

5 对策制定与实施

针对上述两大要因,项目组制定了针对性的改进措施并组织实施。

5.1 优化焊接顺序与工艺

为分散热输入,降低局部温升,废除“一次连续焊”工艺,推行“交叉分段焊接”策略。

具体实施:在端墙板拼接前,精确标定端柱位置与中心线。首先对端柱(1)中心线左右各150mm范围(共300mm)进行焊接,随后对端柱(2)中心线左右各100mm范围(共200mm)进行焊接。

顺序控制:确认压紧后,按照“先中间、后两边,从上往下”的原则进行对接焊。在端柱焊接环节,采取对称焊接法,先焊端柱(1)两侧,再焊端柱(2)两侧。

辅助措施:在焊接端柱(2)时,每完成一段焊缝,立即使用橡胶锤对焊缝周边进行适度敲击,利用机械振动释放部分焊接残余应力。

效果:该工艺有效避免了热量累积,使焊接变形由集中爆发转变为均匀微量分布,显著提升了焊后平面度。

5.2 研制端墙组焊专用工装

针对压紧面积不足的问题,设计并制造专用的端墙组焊转台工装。

设计理念:依据端墙板组成结构特点,设计全覆盖式压紧机构。工装压紧面除预留焊缝及热影响区外,覆盖端墙板其余所有区域。

实施过程:联合专业厂家进行设计与制造,确保工装型面与端墙板理论曲面高度贴合。现场安装调试后,实现了端墙板在组焊过程中的全方位刚性固定。

作用机理:大幅增加的接触面积提供了强大的反变形能力,强制限制了薄板在焊接热循环过程中的自由收缩与翘曲,从源头上抑制了波浪形变形的产生。

6 效果验证与效益分析

6.1 技术指标验证

对策实施后,项目组对后续批次的端墙板组成进行了跟踪统计。数据显示:

调修时间:单件平均调修时间由攻关前的6.5小时降至2.3小时,缩短比例为64.6%,优于设定的60%目标。

平面度合格率:端墙板平面度超差导致的调修工作量占比由70.8%大幅下降至17.4%,平面度超差已不再是影响生产效率的症结。

产品质量:焊后外观平整度显著提升,减少了因过度调修造成的表面损伤,产品一次交验合格率大幅提高。

6.2 经济效益分析

直接成本节约:工艺改进前,因变形超差导致的报废率约为10%。改进后,成功避免了约25件端墙板的报废。按每件端墙板价值5000元计算,减少报废损失12.5万元。

工时成本节约:调修工时的减少直接降低了人工成本及设备占用成本。综合计算,该项目累计节约直接经济成本约15.65万元。

6.3 社会效益与推广价值

本项目成功攻克了薄壁铝合金型材与板墙组焊变形的行业共性难题,不仅保障了出口澳大利亚项目的按期高质量交付,赢得了用户的高度认可,更形成了一套完整的薄壁铝合金焊接变形控制工艺规范。该成果具备极强的推广适配性,可直接迁移应用于各类轨道交通车体制造、航空航天结构件及其他轻量化焊接项目中,具有显著的示范效应和应用前景。

7 结论

本文通过对薄壁铝合金端墙板组成调修时间长的问题进行系统攻关,证实了优化焊接顺序与增大压紧接触面积是控制焊接变形的关键手段。通过实施交叉分段焊接工艺及研制专用全覆盖压紧工装,成功将调修时间缩短了64.6%,显著提升了产品质量与生产效率。这一实践证明,在铝合金薄壁结构制造中,合理的工艺规划与专用的工装设计是解决变形问题的根本途径。未来,随着数字化仿真技术在焊接变形预测中的应用,此类工艺优化将更加精准高效,进一步推动轨道交通装备制造业的高质量发展。

参考文献:

[1] 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册:第2卷材料的焊接[M].北京:机械工业出版社,2021.

- [2] 张文钺.焊接结构与生产[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2019.
- [3] 刘伟.薄壁铝合金结构焊接残余应力与变形控制[D].大连:大连交通大学,2022.
- [4] 赵志刚.大型铝合金结构件焊接工装设计与应用[J].焊接技术,2023,52(4):78-81.