

铝合金支撑骨架组焊工艺研究

杜委翰, 赵阳, 罗胜, 向勇, 赵鑫

中车成都机车车辆有限公司 四川成都 610511

摘要: 对铝合金支撑骨架的组焊工艺进行研究, 结合支撑骨架结构、焊缝形式和技术要求, 从工艺设计、焊接参数、焊接顺序及焊接变形控制等方面进行分析和研究。通过采取免划线定位的组装设计、焊接坡口深度优化、尺寸工艺放量、焊接反变形、刚性固定方法, 以及静压力调修方法, 实现了支撑骨架样品试制, 达到了技术指标, 可以为同类铝合金货车产品的制造提供技术借鉴。

关键词: 铝合金; 支撑骨架; 焊接工艺; 焊接变形

Study on welding process of aluminum alloy supporting framework

DU Weihang, ZHAO Yang, LUO Sheng, XIANG Yong, ZHAO Xin

CRRR Chengdu Rolling Stock Co., Ltd., Chengdu 610511, Sichuan, China

Abstract: The welding process of aluminum alloy support framework was studied, combined with the support framework structure, weld form and technical requirements, from the process design, welding parameters, welding sequence, welding deformation control and other aspects of analysis and control. By adopting the assembly design without marking positioning, the welding groove depth optimization, the size process volume, the welding reverse deformation, the rigid fixing method and the static pressure adjustment method, the support skeleton sample is trial-produced, and the technical index is reached, which can provide technical reference for the manufacturing of similar aluminum truck products.

Keywords: aluminum alloy; supporting framework; welding process; welding deformation

1 序言

铝合金因具有自身质量小、耐腐蚀、回收价值高等优点, 而被作为我国高速列车、地铁列车、运煤专用货车轻量化的首选材料, 已经大量应用在我国铁路运输中^[1]。某货车为实现轻量化要求, 其侧墙、车顶及底门等部件均采用铝合金结构。底门为货车的舱门, 采用全新设计结构。

为实现成熟可靠的铝合金货车制造工艺, 本文对底门结构中的主要承载结构支撑骨架组焊工艺开展工艺研究。

2 结构分析

支撑骨架由9根横梁型材和52块支撑板组焊而成, 整体长度2500mm、宽度1069mm; 其中相邻支撑板间距为 (50 ± 0.5) mm, 支撑骨架结构如图1所示。横梁为壁厚6mm的EN AW 6005A-T6型材, 支撑板为8mm厚的EN AW 6082-T6板材, 连接形式为T形接头对接HV形焊缝。支撑骨架作为底门中的主要承载结构, 用于支撑门板, 使其在底门结构中可以实现抽拉运动, 实现直径1mm左右粮食货物的卸车, 如菜籽等。为实现门板关闭时底部能完全密闭, 以

防止粮食漏出，支撑骨架的平面度要求非常高，技术指标要求焊后平面度控制在0.5mm以内，对角线 $\leq 2\text{mm}$ ，长度公差 $\pm 3\text{mm}$ ，无扭曲变形。同时支撑骨架为底门主要承载结构，用于支撑门板承受整车货物重量，因此焊缝质量非常关键。

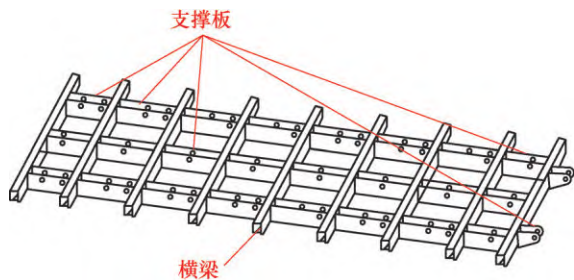


图1 支撑骨架结构

3 工艺设计

为实现产品关键尺寸精度要求，同时结合防错和快速定位理念，对产品进行工艺设计。一是要保证焊前的平面度达到0.5mm以内、对角线 $< 1\text{mm}$ ；二是零件多，要提升组装效率和防错；三是降低焊接难度，提升焊接操作性，同时避免焊接产生扭曲变形。

1) 为保证焊后上部平面度，工装采用反组方式组装支撑骨架。横梁为型材，平面度良好，支撑板为板材下料加工，上平面采用激光下料+机械加工方式保证组装时的整体平面度。

2) 为提升支撑骨架的组装效率，工装采用免划线定位组装设计。横梁和支撑板的定位均采用工装定位座定位，避免先人工划线再人工定位组装，提升作业效率。

3) 为提升焊接可操作性，降低焊工焊接难度，工装采用转胎，始终保证焊接位置为PA平焊位置，以降低焊接难度。焊接顺序采用中间向两端、中间和上下交叉跳焊焊接方式，避免产生扭曲变形。支撑骨架组焊工装如图2所示。



图2 支撑骨架组焊工装

4 焊前准备

4.1 焊缝坡口深度优化

支撑板与横梁为T形接头对接HV形焊缝，其中支撑板板厚8mm，两端开坡口，坡口角度 55° ，坡口深度5mm；横梁矩形管壁厚6mm。支撑板与横梁均采用手工MIG焊接，共有104条焊缝，支撑板与横梁之间焊缝尺寸如图3所示。为有效保证熔深，对焊缝坡口进行优化，将坡口深度由5mm增加到6mm。

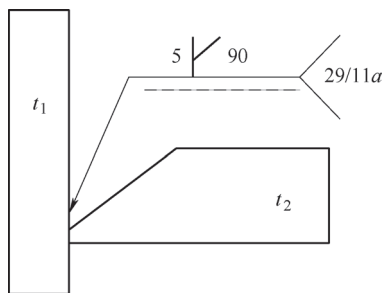


图3 支撑板与横梁之间焊缝尺寸

4.2 焊接参数制定

根据EN 15614-2: 2022《金属材料焊接工艺规范和评定 焊接工艺试验 第二部分：铝和铝合金的电弧焊》，结合焊接方法、母材材质、厚度、焊缝类型及焊缝尺寸等信息选择合适的焊接工艺评定（WPQR），编制焊接工艺规程（WPS），焊丝选用AWS A5.10 ER535，通过工作试件验证，支撑板与横梁焊接参数见表1。

表1 支撑板与横梁焊接参数

焊接位置	焊接材料规格/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm/s)	电流种类/极性
单道PA	$\phi 1.2$	165~185	17~18	9~11	DCEP/+

5 焊接变形及控制

5.1 焊接变形

在焊接过程中，不均匀加热会使焊缝及其附近的温度很高，而远离焊缝的大部分金属不受热，其温度仍保持室内温度。这样，不受热的冷金属部分便阻碍了焊缝及近缝区金属的膨胀和收缩。因此，冷却后的焊缝就产生了不同程度的收缩和内应力（纵向和横向），从而造成了焊接结构的各种变形^[2]。支撑骨架由多块板材和矩形管拼接组焊而成，焊缝数量多，会产生多种焊接变形，具体如下。

(1) 横向收缩变形 横向收缩变形是指垂直于

焊缝长度方向的收缩变形,表现在支撑骨架纵向的收缩变形。虽然焊接接头有2mm钝边,但由于焊缝

数量多,所以试制时发现支撑骨架纵向全长方向收缩了约3mm。支撑骨架焊后变形如图4所示。



图4 支撑骨架焊后变形

(2) 角变形 角变形主要产生在横梁矩形管上。位于中间部位的横梁由于两侧均需焊接支撑板,因此两侧的角变形量相互抵消;端部横梁只有单侧焊接支撑板,角变形量较大,试制时发现端部横梁两端向内变形约2mm(见图4)。

(3) 扭曲变形 扭曲变形是指因没有进行对称焊接,造成焊缝在纵向和横向的应力与变形上不对称而引起的变形。支撑骨架采用从中间向两端、中部和上下交叉跳焊的焊接方式,未产生明显扭曲变形。

(4) 翘曲变形 支撑骨架焊后呈现中部拱起变形,平面度4mm左右。

5.2 焊接变形控制

常用的焊接变形控制方法分为焊前预防、焊接过程控制和焊后矫正^[3]。焊前预防常用方法为反变形法和刚性固定法;焊接过程控制则是选择合适的焊接工艺和焊接顺序进行焊接;焊后矫正一般采用机械矫正、加热调修或两者结合的方式进行。

(1) 焊前预防 主要措施如下。

1) 增加长度工艺放量。根据试制时的全长收缩量3mm,在全长范围设置3~4mm的长度放量,采用平均分配到横梁间的支撑板上,每块支撑板长度公差从(-1, 0)mm提高到(0, +0.5)mm。同时调整工装上横梁定位块,相邻横梁的定位块间距各增加0.5mm,配合装配。焊后支撑骨架长度公差在2mm内,满足要求。

2) 增加刚性固定。端部横梁的角变形最佳的控制方式是预置反变形,但由于横梁刚度较高且支撑骨架组焊工装横梁定位块设置在横梁两端位置,

不利于施加反变形,因此采用刚性固定的方式增加焊接时端部抵抗角变形能力。通过F形卡兰将端部横梁两端与定位块夹紧来控制端部横梁角变形的方式(见图5),焊后端部横梁角变形量控制在1mm内,可避免焊后调修。

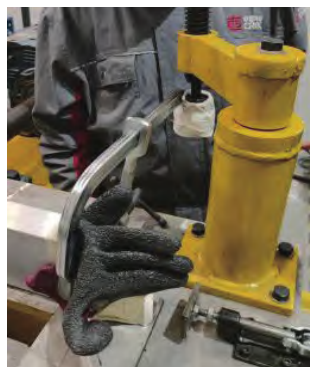


图5 端部横梁刚性固定

(2) 焊接过程控制 支撑骨架焊缝分为上中下6排,一共有104条,焊接量大且比较集中,因此合理的焊接顺序显得至关重要。在设计支撑骨架焊接顺序时要避免同一根横梁上热量集中,导致变形大和应力集中,应采用间隔、对称、交错的方式进行焊接。

焊接顺序如图6所示。焊缝排布为6行16列,行标记为A~F,列标记为1~16,图中序号1~32为前32道焊缝焊接顺序。首先旋转工装,使图6中C、A和E行焊缝处于平焊位置进行焊接,然后再旋转工装将B、D和F行焊缝处于平焊位置进行焊接。焊接从中间往两端、先中部再上下进行,即每次焊接时首先从C行端部往内数第4根横梁远离端部那一侧(C行第7列)开始,依次从中间往端部焊接相邻横

梁同一直线上的右侧焊缝，在焊完C行横梁右侧焊缝后，再分别焊接E行、A行横梁右侧焊缝，列顺序与C行焊接时一致（见图6中序号1~24）。在所有右侧焊缝均焊完后，再焊接横梁左侧焊缝（焊接顺序见图6中序号25~32），焊完C行横梁与左侧焊缝后再分别焊接E行、A行横梁左侧焊缝。C、A、E行焊接完毕后，将工装旋转180°，按相同要求焊接D、B、F行焊缝。采用对称、交叉跳焊方式焊接，可有效降低单根横梁热输入集中，避免产生较大变形和扭曲变形。

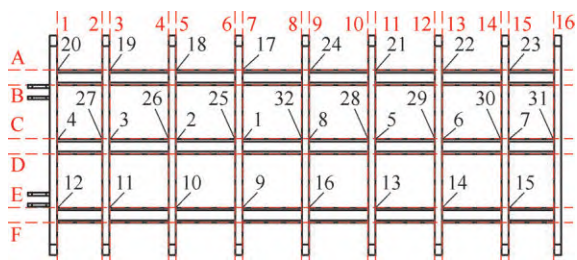


图6 焊缝焊接顺序示意图（前32道）

(3) 焊后矫正 机械矫正法是根据焊件的结构形状、尺寸大小、变形程度，选择锤击、压、拉等机械作用力，对焊接变形进行的矫正^[4]，包括锤击法、静力加压矫正法、焊缝滚压法等。

支撑骨架翘曲变形与焊接方向相关，焊接方向为从工装下部往外焊接，起收弧端焊接热量因存在差异而导致微小形变，形变累计产生整体平面度差值3mm作业。优先采用静力加压法调修，避免加热调修导致强度降低和调修失控。通过油压机对支撑骨架凸起部位施加压力产生反向变形，油压机压头与产品之间采用尼龙块进行防护，如图7所示。通过调修，平面度可以保证 $\leq 0.5\text{mm}$ ，对角线 $\leq 1\text{mm}$ ，满足设计要求。

6 结束语

本文通过对铝合金底门的支撑骨架组焊进行工艺研究，从工艺设计和焊接工艺两方面采取下列措施，实现了支撑骨架的试制，达到了技术指标，形成了工艺能力，可以为同类铝合金货车产品的制造提供技术借鉴。

1) 横梁、支撑板等大量规则零件采用免划线定位安装的设计，可以有效提升组装效率和质量。

2) 对坡口深度设置工艺放量，可以有效保证HV形焊缝的焊接熔深。

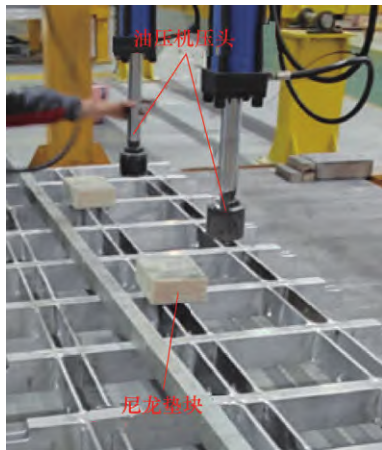


图7 静力加压法矫正焊接变形

3) 采取长度工艺放量可以有效控制长度方向的收缩；采取刚性固定法控制端部横梁角变形。

4) 采用间隔、对称、交错方式的焊接方法可以防止热输入量集中和应力集中，避免扭曲变形。

5) 采用静力加压法矫正焊后变形，可以避免热调修损失强度和失控。

参考文献：

- [1] 焦锐，陈积翠，唐亚红. 动力集中动车组全铝合金司机室制造工艺[J]. 金属加工（热加工），2022（12）：53-56.
- [2] 杨志，周燕. 焊接反变形在施工中的应用[J]. 中国高新技术企业，2009（23）：156-157.
- [3] 贾安东. 焊接结构与生产[M]. 北京：机械工业出版社，2007.
- [4] 魏书波. 铝合金车体结构焊接变形的调修方法研究[J]. 装备制造技术，2021（10）：61-62，69.

MW 20241209

（上接第92页）

(2)：126-131.

- [8] 蔡笑语，董博伦，林三宝，等. 新工科背景下高效焊接方法课程教学创新改革的思考与实践[J]. 高教学刊，2023，9（32）：137-140.
- [9] 康举，朱加雷，张华，等. 应用型高校焊接类课程思政融入教学的思路与实践[J]. 高教学刊，2023，9（20）：183-186.

MW 20250109