

# 电力机车车体总成自动化焊接应用研究

梁喜成, 王兴文, 文军

中车株洲电力机车有限公司 湖南株洲 412001

**摘要:** 电力机车车体是整个电力机车的承载主体, 稳定的焊接质量对于保证行车安全至关重要。选取典型HXD1型电力机车车体总成为对象, 从电力机车车体总成结构特点、自动化焊接工位布局、自动焊设备选型、自动焊焊接参数调试、样件验证及实物应用等方面进行了介绍。通过批量生产验证将自动焊台位与上下工序连通, 满足了电力机车车体总成的自动上下料、自动化焊接要求, 最终电力机车车体总成在行业内首次实现自动化焊接工程化应用。

**关键词:** 电力机车; 车体总成; 自动化焊接

## Research on the application of automated welding of electric locomotive body assembly

LIANG Xicheng, WANG Xingwen, WEN Jun

CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China

**Abstract:** The body of an electric locomotive is the load-bearing body of the entire electric locomotive, and stable welding quality is crucial for ensuring driving safety. Select the typical model of HXD1 electric locomotive body assembly object, and introduces the structural characteristics of electric locomotive body assembly, layout of automatic welding stations, selection of automatic welding equipment, automatic welding process parameter debugging, sample verification, and physical application. Through batch production verification, the automatic welding station was connected to the upper and lower processes, achieving the requirements of automatic loading and unloading and automatic welding of the electric locomotive body assembly. Finally, the electric locomotive body assembly achieved the engineering application of automated welding for the first time in the industry.

**Keywords:** electric locomotive; vehicle body assembly; automated welding

### 1 序言

传统焊接由作业人员操作焊枪进行, 焊接质量极大地依赖于作业人员的经验与状态, 不能保持稳定, 且成本投入高、焊接效率低。此外, 焊接中会产生有毒有害气体、粉尘及弧光等, 对人体健康造成威胁。而利用焊接机器人进行作业可极大地提高生产效率, 保证焊接质量, 减少对作业人员健康的

危害<sup>[1]</sup>。

近年来, 一些致力于焊接领域的焊接设备厂家不断推进针对大尺寸结构件的焊接技术, 其中焊缝识别技术的应用可以大幅提高焊接的自动化程度和精度, 减少人工干预的需求, 提高焊接质量和生产效率。同时, 焊缝识别技术还可以为焊接过程的监测和控制提供重要的数据支持, 帮助优化焊接参

数,提高焊接质量<sup>[2]</sup>。这也为解决电力机车车体总成自动化焊接奠定了基础。

## 2 车体总成的结构介绍

本文以HXD1型电力机车车体总成<sup>[3]</sup>(以下简称“车体总成”)为例,对车体总成的自动化焊接工艺展开研究。电力机车车体是整个电力机车的承载主体,主要是将底架、司机室、侧墙及后端墙等模块化组焊部件进行总装焊接(见图1),焊接质量及变形将直接影响到机车承载、密封防漏、外观颜值。

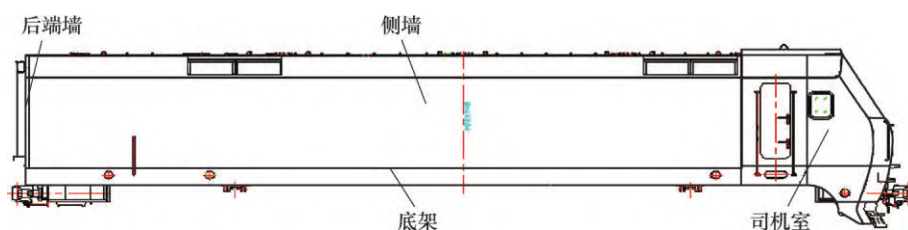


图1 HXD1型电力机车车体总成

## 3 车体总成自动化焊接工位布局

在整个机车车体总成生产线设计之初,就考虑了机车车体总成流水线节拍化的布局,车体总成自动化焊接工位作为其中最重要的一环也已进行了场地预留,但由于场地宽度限制,车体总成自动焊系统需布局紧凑,因此外部轴等配置成为项目实施的难题。

通过配置电动刚性假台车,使待焊机车车体从上工序自动运输进入车体总成自动化焊接工位,到达指定位置后停止锁死,开始机器人自动化焊接作业,焊接完成后电动刚性假台车解锁后移动至下一工序。

为了解决不同车型车体总成工件定位问题,采取了模块化、柔性化的设计理念,将电动刚性假台车设计为主体+托架模块的形式,其中电动刚性假台车主体设计成通用模块,通过轮轨关系和制动系统来控制横向、纵向的定位;托架模块设计成柔性化可调,针对不同车型只需调整托架高度和宽度尺寸即可实现高度方向的定位和横向对中。

## 4 车体总成自动焊系统选型

### 4.1 车体总成自动焊系统方案概述

车体总成自动焊系统总体方案为单工位双机器

人由于电力机车车体总成是由多个焊接部件组成的复杂结构,前工序的下料精度、装配精度和焊接收缩直接导致机车车体总成装配的一致性较差;车体总成的焊缝主要分为搭接焊缝和对接焊缝,搭接焊缝为侧墙蒙皮与底架、侧墙蒙皮与弦梁的连接焊缝,焊缝接头形式为a2;对接焊缝为侧墙蒙皮与蒙皮、侧墙蒙皮与司机室,以及侧墙蒙皮与后端墙的连接焊缝,焊接接头形式为3||。由于厂房空间限制机车车体总成不能配置翻转工装,因此需要PB、PC、PD、PG多位置焊接,大幅增加了焊接难度。

人沿车体纵轴线对称布置,并可在导轨上进行水平移动,其主要由机器人系统和电动刚性假台车组成(见图2)。通过与已有电动刚性假台车配合,实现车体总成的工件自动进出及全部焊缝焊接要求。机器人系统由机械手、控制系统、外部轴、焊接电源、焊缝寻位系统、焊缝跟踪系统、水冷焊枪、送丝机构、实时观察系统、附属设施及软件系统等组成。

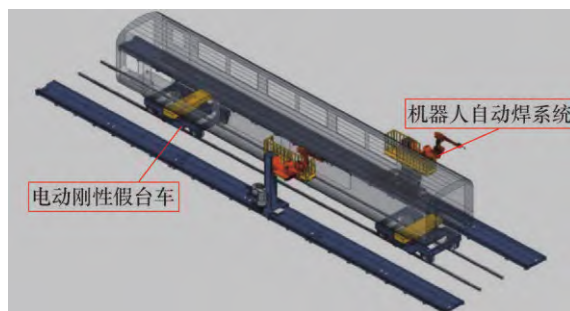


图2 车体总成自动焊系统

### 4.2 车体总成机器人系统方案特点

车体总成均为长对称结构,单侧焊缝主要布局在高度和长度范围,为了解决焊接机器人的可达性、焊接质量稳定性、操作安全性等问题,车体总成自动焊系统较以往应用的自动焊系统有如下特点。

(1) 外部轴 为了满足各种主型机车车体总成焊缝焊接要求,必须实现在垂向分布焊缝的全覆盖,车体总成自动焊系统采用了双侧地轨布局,机器人焊接长度覆盖可达20m;在地轨上增加了可沿地轨移动立柱,机械手通过线性滑轨与立柱相连,并可通过齿轮传动系统实现垂直方向升降。通过该外部轴可实现高度1100~4100mm焊缝的焊接。同时,为了满足首件示教编程要求,配备了升降行走平台,平台与机器人共用底座,具有横向伸缩功能,可调整平台与车体的距离。

(2) 机械手 配置2台QIROX®机器人系统,机器人的手臂具有细长而紧凑的设计结构,由于各个轴的动态性能高,且具有优良的焊接精度、速度和重复定位精度。电动机传动轴上安装有制动器,通过闭合电路原理动作,在失电的情况下自动抱闸,避免危险性的运动。

(3) 焊接电源 焊接电源选用了克鲁斯QINEO®PULSE系列,其亮点就在于其良好的起弧性能、安静稳定的电弧和完美的焊缝成形。内置控制焊接、脉冲焊、高速脉冲焊、深熔焊、双脉冲焊共5种不同的焊接工艺。其中控制焊接工艺可产生均匀的电弧、热输入量低、间隙桥接能力强,特别有利于薄板焊接。

(4) 触觉式气嘴传感系统 在机器人电弧焊接过程中,机器人通常在同一轨迹中按被编程的运动执行,鉴于焊件预制件中经常出现某些偏差,如夹紧装置的定位误差、焊接变形,或其他原因造成的偏差,焊前机器人必须搜索接头位置。为了搜索工件或搜索单点,车体总成自动焊系统搭载了触觉式气嘴传感系统。其优点为能抵消焊接接头位置的偏差、高的精度和长的耐磨可靠性,以及工件搜索的自动化使每次搜索前传感器不需要标定。

(5) 激光实时跟踪系统 由于工件预制件的形状和位置可能出现偏差或焊接期间产生变形,因此

在焊接过程中,要求机器人跟踪焊接接头。同时,由于车体总成焊缝大部分为3∥对接焊缝,电弧跟踪难以满足跟踪要求,因此车体总成自动焊系统增配了激光实时跟踪系统。其针对外露焊缝焊达率高、不受电弧焊接的影响、实时焊缝跟踪精度高,可以根据焊缝填充量的变化自动调整焊接速度和送丝速度,以保证精确的焊接位置和完美的成形。

(6) 实时观察系统 实时观察系统用于焊缝熔池的观察和机器人运动路径的观察,并配置不同的摄像头,所采用的摄像头具有良好的焊接保护套。摄像头成像显示在液晶显示屏上,操作人员可以在地面通过显示屏对焊接过程及焊缝状态进行有效地观察与监控,有效解决高处焊接人工检测难题。

5 车体总成自动化焊接工艺

5.1 焊缝类型及焊接顺序

焊缝类型及焊接顺序以机车车体总成右侧墙为例说明。车体总成单侧蒙皮共有14条焊缝、2种焊缝接头类型、4种焊接位置,详见表1。

表1 车体总成蒙皮焊缝类型清单

| 序号 | 接头类型 | 焊缝长度/mm | 焊接位置 | 是否带垫板 | 焊缝编号      |
|----|------|---------|------|-------|-----------|
| 1  | 3∥   | 14000   | PC   | 是     | ①         |
| 2  | 3∥   | 1460    | PG   | 是     | ③         |
| 3  | 3∥   | 5400    | PG   | 否     | ⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭ |
| 4  | a2   | 14000   | PD   | —     | ②         |
| 5  | a2   | 5200    | PB   | —     | ④⑤        |

为了降低工件在焊接过程中因薄板蒙皮产生波浪变形而对焊接的影响,所以焊接顺序至关重要。基于车体总成的结构特点,采用先焊接蒙皮中间长直主焊缝,再焊接周边焊缝,最后焊接蒙皮板的分段焊缝顺序。机车车体总成的自动化焊接顺序如图3所示。

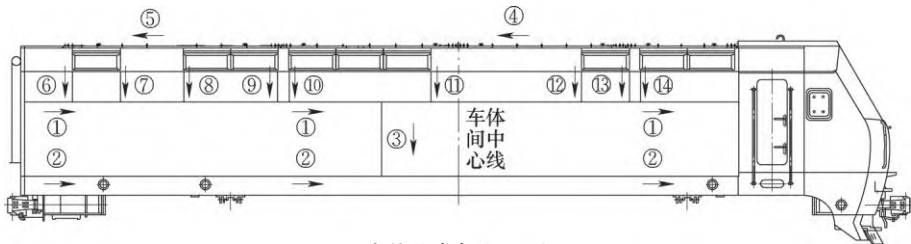


图3 车体总成自动化焊接顺序

注:①~⑭代表焊接顺序。

## 5.2 焊接参数选择

针对薄板蒙皮焊接,焊接参数的选择即确定合适的热输入,若热输入过大,则易导致焊穿;若热输入过小,则容易产生未焊透和未熔合等缺陷。

正式焊接产品前,先制作金相试样,验证车体总成自动化焊接参数的可行性。对车体总成所涉及的各个类型焊缝进行取样并制作宏观金相,每条焊缝取3个试样。图4所示为2种类型自动焊焊缝的宏观金相。

由图4可知,焊缝与母材熔合良好,熔深符合图样要求,说明焊接参数正确可行;在每个焊接接头中,焊缝未见明显的夹渣、气孔等缺陷。经优化后,最终确定的焊接参数见表2。

车体总成产品由于配件加工精度、前工序焊接变形、车体挠度预置等因素影响,其实际装配精度较试板装配精度差,因此特在焊接正式产品前,制作模拟实际工况的样件进行焊接验证,该阶段主要验证装配间隙和焊缝直线度变化时,激光实时跟踪系统识别精度及系统在程序调用时的及时性和可靠



a) 接头类型a2、焊接位置PD



b) 接头类型3Ⅱ、焊接位置PG

图4 自动焊焊缝宏观金相

表2 优化后焊接参数

| 序号 | 接头类型 | 焊接位置 | 焊接材料直径/mm | 摆宽/mm | 送丝速度/(m/min) | 焊接速度/(mm/min) | 焊接电流/A  | 电弧电压/V |
|----|------|------|-----------|-------|--------------|---------------|---------|--------|
| 1  | 3Ⅱ   | PC   | 1.0       | 3~4   | 3.3          | 180~210       | 85~110  | 14~18  |
| 2  | 3Ⅱ   | PG   | 1.0       | —     | 5            | 260~340       | 110~140 | 17~19  |
| 3  | 3Ⅱ   | PG   | 1.0       | —     | 6            | 300~420       | 110~140 | 17~20  |
| 4  | a2   | PD   | 1.0       | —     | 6            | 420~460       | 140~160 | 17~20  |
| 5  | a2   | PB   | 1.0       | —     | 7            | 450~470       | 140~160 | 17~20  |

性。通过采用以上焊接工艺,实际工况模拟样件的焊缝得以顺利焊接完成。如图5所示,样件自动化焊接的焊缝,成形美观,质量良好,焊缝接头尺寸满足设计要求。



a) 样件整体



b) 样件正面成形放大



c) 样件背面成形

图5 样件自动焊焊缝

## 6 应用效果

通过模拟实际工况样件验证合格后,将以上焊

接参数输入参数库保存,开始进行正式产品车体总成的焊接,通过触觉式气嘴传感+激光实时跟踪相

结合的方式，很好地解决了因装配精度低而引起的焊接难题，同时与人工相比，机器人在多焊接位置焊接时更加稳定可靠。现车体总成机器人自动化焊接已实现批量生产，产品焊接质量较手工焊大幅提升，同时达到以下效果。

1) 稳定并提升了焊接质量。有效控制大型结构件的焊接变形，实现工件焊后尺寸的高度一致。该技术克服各类不利环境因素对产品质量的干扰，保证焊接始终在规范、合理的工艺条件下进行，对稳定焊接质量意义重大。同时，其节拍的一致性保障了生产节点，为公司的计划性生产与排产提供有力支撑。去除不稳定因素后，焊接一次性合格率大幅提高，减少返工时间，节省了时间、人工和材料成本。

2) 改善了工人的劳动环境。车体总成自动化焊接系统将原本的人工焊接转变为机器人自动焊接。工人无需反复移位焊接，也不用频繁转换PB、PC、PD、PG等不同焊接姿态。并且，自动化焊接工位与原组焊工位分离，降低了工人暴露在高温、烟尘、弧光及高处等危险环境的风险，有效避免焊接弧光对作业人员的伤害，极大地提高了生产过程的安全性，改善了工人的劳动条件。

3) 提高劳动生产效率，降低生产节拍。车体总成自动化焊接系统通过配置的触觉式气嘴传感系统和激光实时跟踪系统，可以通过机器人实现焊接过程的自动纠偏和调整；通过配置的实时观察系统

实现了一人同时监控两台机械手，作业人员减少了50%，且生产节拍可控。

4) 推动工艺水平的提升。焊接机器人的使用，推动了装配质量的提升，质量控制前移，能够在根本上控制缺陷的产生。首先，根据焊装工序出现的问题，调整下料和成形工序的工艺尺寸，并形成统一要求后固化、执行，为保证后续焊接装配工序的精度奠定基础；其次，对焊接装配工序制订了规范，规定了定位焊的位置、长度等，确保各项参数均不会对后面的自动焊接工序产生较大影响。

5) 产品通用性强。车体总成自动化焊接系统配有高效柔性电动刚性假台车，其采用通用底座+柔性模块化托架的方式，实现了不同产品的快速换型及上下料，并调用相应的焊接程序，可实现自动化焊接。

#### 参考文献：

- [1] 刘丹，郑博方，王帅，等. 机器人焊接关键技术及应用[J]. 金属加工（热加工），2020（2）：41-44.
- [2] 陆建卫. 焊接机器人在焊接技术应用中的关键技术分析[J]. 内燃机与配件，2024（3）：57-59.
- [3] 杨湘键，金希红，曾燕军，等. 神华大功率交流传动电力机车车体设计[J]. 电力机车与城轨车辆，2015（5）：7-12.

MW 20241218

（上接第73页）

- 应用[J]. 中国铁路，2023（6）：66-71.
- [10] 宋宏图. 钢轨交流闪光焊接过程过梁爆破特征分析[J]. 焊接学报，2018，39（3）：120-123，134.
  - [11] 丁韦，李力，赵国，等. 钢轨闪光焊灰斑缺陷形成原因及预防方法[J]. 铁道建筑，2018，58（10）：128-131.
  - [12] HU J, ZHANG Q, YANG Q, et al. Cause analysis of surface cracks in flash butt welding joint of high manganese steel frog[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: 107683.
  - [13] 蒋文娟，向鹏程，丁昊昊，等. U71Mn钢轨气压焊

焊接接头滚动磨损与损伤性能研究[J]. 摩擦学报，2020，40（5）：579-585.

- [14] 张玉华，李澳，胡伟平. 钢轨铝热焊焊缝材料与母材力学性能对比分析[J]. 高速铁路新材料，2023，2（2）：79-84.
- [15] 赵国. 基于过梁爆破特征定量分析的交流闪光焊研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2024.
- [16] 谭锦红，张新平，曹姗姗，等. U71Mn钢闪光-摩擦复合焊接接头组织性能[J]. 焊接学报，2024，45（9）：62-68.

MW 20241229