



“中国制造2025” 之先进的轨道交通装备制造

李呈祥 王波

随着全球轨道交通装备的快速发展，现代轨道交通装备运行速度不断刷新记录，高速动车组、城际动车及城轨车辆等已成为国内客运的主型车辆，特别是高速动车、城轨车辆的轻量化生产制造是铁道运输现代化研究与探讨的主要议题。

针对现代化的城轨车辆对焊缝质量要求较高，先进的机器人制造技术不断成熟，产品质量稳定可靠，生产效率高等特点，同时市场劳动力成本不断飙升，焊接机器人生产线成本日趋下降，使焊接机器人在城轨车辆制造中应用越来越广泛。

一、轨道交通装备车辆的发展

城轨车辆车体制造目前多为全焊接整体承载结构，主要采用的材料有铝合金和不锈钢两种。20世纪早期车体制造材料基本上全部为碳钢，但由于碳钢制造的车体自身较重、防腐性差、运行噪声大及外形不美观等诸多因素，所以目前已基本无法满足市场的需求。

城轨车辆车体结构由底架、顶盖、侧墙及端墙四大部件组成，拖车则多一个司机室部分。常见的铝合金车体结构如图1所示，整个车体外壳均采用大型中空挤压铝合金型材，并采用机器人焊接而成。常见不锈钢车体结构如图2所示，不锈钢车体多为板梁结构，采用电阻焊接。

二、先进焊接技术的应用

1. 焊接机器人在铝合金车体上的应用

铝合金车体部件大多由中空挤压铝合金型材拼焊而成，由于长直焊缝的结构形式较多，非常适合采用自动化焊接，所以在铝合金车体生产制造中广泛应用。焊接机器人主要分为龙门式、悬挂式、悬臂式等结构形式，多采用示教编程、激光跟踪，主要用于底架、顶盖、车体、地板及侧墙等部件的焊接。焊接机器人最大的优点是焊接柔性好，焊接过程稳定，焊缝质量可靠，成形美观，同时可实现在线修改所有工艺参数。

(1) 底架、顶盖、地板、侧墙的自动化焊接 第一，底架组焊主要由端部结构、底架边梁、地板及端梁四部分组成，其产品结构如图3所示。底架地板与底架边梁为搭接的长直焊缝，为保证焊接质量，降低员工劳动强度，常采用IGM焊接机器人激光跟踪完成地板与边梁搭接焊缝焊接，如图4所示。



图1 铝合金车体结构示意



图2 不锈钢车体结构示意



图3 底架组焊结构示意

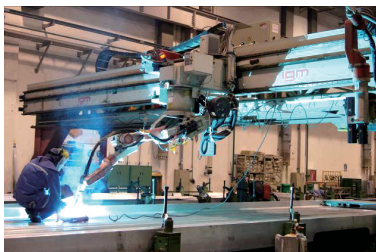


图4 底架组焊机器人焊接

第二，顶盖组焊主要由顶盖边梁组件、空调隔墙、端墙、圆弧顶盖、空调底板及受电弓底板等部件组成，其产品结构如图5所示。其中顶盖边梁组件、空调底板、受电弓底板三大部件的焊接，均采用IGM焊接机器人完成焊接，如图6所示。

第三，地板组焊一般由5块铝合金中空型材组焊合成，其产品结构如图7所示，接头型式为自带焊接垫板的对接接头，在使用工装将工件夹紧后，采用双枪焊接机器人激光跟踪完成该部件的焊接，如图8所示。

第四，侧墙板组焊一般由5/6块铝合金中空型材组焊合成，其产品结构如图9所示，接头型式为自带焊接垫板的对接接头。在使用工装将工件夹紧后，采用双枪焊接机器人完成该部件的焊接，如图10所示。

(2) 车体总组焊自动化焊接 车体总组焊主要是通过将底架、顶盖、侧墙、端墙组焊成车体，其中侧墙与底架、顶盖相接处左右两侧4条长直焊缝，此焊缝要求外观成形美观，而且为车体的主要受力焊缝，焊接量较大，变形不易控制。早期焊接机器人在轨道交通装备上应用相对较少，大多数制造单元基本采用机械式跟踪焊接专机进行焊接，

后期为提高自动化焊接的柔性，各制造单元广泛采用焊接机器人自动焊焊接工艺，如图11所示。

2. 搅拌摩擦焊在铝合金车体上的应用

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, 简称FSW) 于1991年发明于英国的TWI，是一项新型的摩擦焊技术。经过十多年的发展，搅拌摩擦焊技术已经成功应用于航空、航天、汽车、造船和高速铁路列车等诸多轻合金（主要是铝、镁、铜、锌及其合金）结构的制造领域，并日趋完善，其可焊厚度为2~50mm。对于异种金属间的连接及用常规熔焊方法难以焊接的轻金属材料，采用搅拌摩擦焊一般均能获得成形及性能良好的焊接接头。常用的搅拌摩擦焊设备主要有静龙门式搅拌摩擦焊专机和动龙门式搅拌摩擦焊专机。目前搅拌摩擦焊已在地板、侧墙、枕梁焊接进行推广应用，如图12所示。



图5 顶盖组焊结构示意图



图6 顶盖组焊机器人焊接



图7 地板结构示意图



图8 地板组焊机器人焊接



图9 侧墙板结构示意图



图10 侧墙板组焊机器人焊接

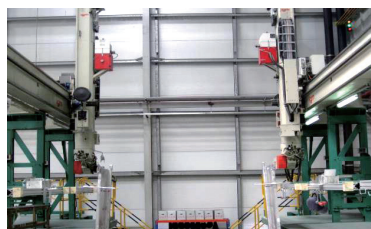


图11 车体组焊机器人焊接



(a) FSW产品焊接示意



(b) FSW地板焊接示意



(c) FSW枕梁焊接示意



(d) FSW侧墙焊接示意

图12 搅拌摩擦焊的应用

3.电阻焊在不锈钢车体上的应用

不锈钢车体主要是由底架、顶盖、侧墙、端墙组焊而成，其中各部件大多数均采用电阻焊进行焊接，如图13所示。

三、先进焊接技术应用发展趋势

1. 机器人焊接技术

焊接机器人的基本结构分为龙门式、固定式、悬挂式及C型悬臂旋转式+直线导轨结构，如图14、图15所示。机械手臂为多轴式，适合于在有效焊接区域内进行全方位焊接，控制系统采用工业微处理器，示教器采用Windows平台及视窗界面，编程操作过程简单可靠、触摸屏、按键及手柄操作杆三用，同时可进行中、英文双层显示及使用。焊接系统实现全数字化控制的逆变焊接电源，可适用于多种焊接方法，焊缝质量达到IRIS、EN15085、DIN6700、TB/T 1580—1995及相关体系标准

要求。跟踪系统采用电弧传感器（激光传感器）传感技术跟踪焊缝，电弧传感器用于在焊接过程中实现实时跟踪，有效提高编程工作效率，并保证焊接顺利进行。机器人焊枪分为单、双枪两种，双枪目前采用单独一个示教器进行控制实现焊接。

2. 激光焊接技术

激光焊是通过聚焦高能量的

激光束，在移动的过程中照射到材料被连接部位的表面而进行冶金连接的一种高效精密的焊接方法。主要用于不锈钢材质轨道车辆焊接，如图16所示。

激光焊具有以下特点：

◆车体表面无压痕，外墙表面平整美观。

◆热输入低，焊接变形极小。

◆可连续高速精密焊接，密封性好，适用于高速列车。

◆车体表面平整度较高，不平度可控制在 $\pm 1\text{mm/m}$ 以内。

◆焊接质量稳定性好，焊接速度快，可达 $5\sim 6\text{m/min}$ 。

3. 电阻焊技术

(1) 常规电阻点焊技术 ①车体表面形成直径 1cm 左右的压痕，墙板表面不美观。②焊点非常多，容易发生外板聚集性变形。③间断焊接，密封性差，不适于快速列车。④车



(a) 底架电阻焊示意



(b) 顶盖电阻焊示意

图13 电阻焊的应用



图14 龙门式焊接机器人



图15 C型悬臂旋转式+直线导轨



图16 激光焊的应用



图17 激光-电弧复合焊接技术

体表面平整度较低，不平度可达 $\pm 3\text{mm/m}$ 。④焊接速度较低(1m/min)，生产效率不高。

(2) 电极带式新型点焊技术 ①车体表面焊点成形几乎无压痕，墙板表面美观。②焊点相对较少，不易发生外板聚集性变形。③间断焊接，密封性较好，可适于快速列车。④车体表面平整度较高，可达 $\pm 1.5\text{mm/m}$ 。

4. 激光-电弧复合焊接技术

激光-电弧复合焊接是将激光焊接和电弧焊接结合起来的一种优质高效焊接新技术，如图17所示。同时具有以下工艺特点：①小电流(15A)条件下电弧过程依然稳定。②焊缝成形美观，优于激光焊。③熔深大，焊速快，优于激光焊和电弧焊。④焊接热输入低，变形小，与激光焊相当。

⑤对接头间隙不敏感；比激光焊好得多。⑥通过焊丝可改善焊缝性能，优于激光焊且焊速快。⑦焊缝和热影响区的组织比电弧焊细小、热影响区窄、应力与应变小，可整体提高焊接接头的综合力学性能。

四、焊接自动化、智能化应用需求

随着我国轨道装备制造业的振兴与市场需求，国内轨道车辆制造企业在产品质量和管理上与国际企业逐步接轨，同时世界机器人巨头企业也高举进军轨道交通装备制造市场。由于焊接自动化装备制造技术含量高，通常集焊接工艺、自动控制及精密机械设计制造等多种技术于一体，所以随着工业自动化、智能化及数

字化等技术的日益发展和广泛应用，焊接自动化装备正在向焊接自动化生产线和数字化焊接车间发展。目前我部已广泛应用于马来西亚动车组、马其顿、长沙磁浮、深圳、上海、安卡拉及淮安低地板等多个项目。

“十三五”期间，随着“中国制造2025”计划的出台，振兴中国制造，实现工业转型升级和新型产业的发展，大量先进的自动化、智能化、数字化技术的应用，必将为焊接自动化行业提供广阔的发展空间。

作者简介：李呈祥，中车株机公司副总经济师，城轨事业部总经理；王波，中车株机公司城轨事业部铆焊车间工段长。

MW 20160106

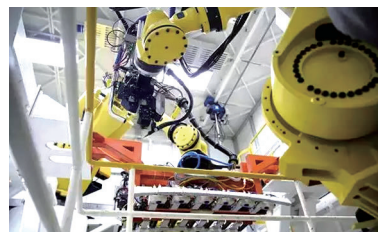
突破汽车领域核心技术，华工激光获国家科技进步一等奖

由华工激光联合华中科技大学、神龙汽车、江淮汽车、长城汽车、上汽通用、江铃汽车、中航精机、凌云股份及武汉法利莱等多家单位共同自主研发的“汽车制造中的高质高效激光焊接、切割关键工艺及成套装备”项目，荣获国家科技进步一等奖。

该项目历经12年技术攻关，

在全球汽车制造技术史上实现了5个首创，多项关键技术创新，共获发明专利26项，实用新型39项，软件著作权2项，形成地方和企业标准3项。其典型装备之汽车白车身智能激光焊接生产线，可满足不同车型混线生产，白车身快速定位、激光钎焊、焊接与搬运工业机器人应用等技术

融为一体，平均1min可焊接完成一部车。



汽车白车身智能激光焊接生产线
(华工科技)