



先进制造实用技术
系列丛书

轨道交通先进焊接技术 实用案例


金属加工杂志社◎编



非外借

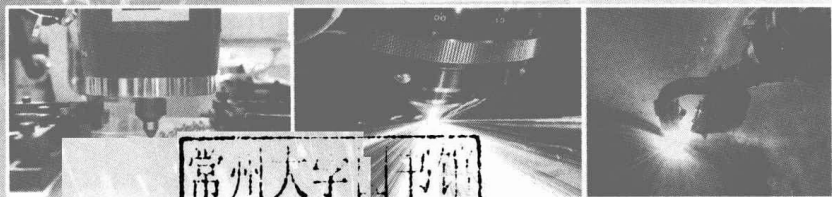


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

 先进制造实用技术
系列丛书

轨道交通先进焊接技术 实用案例

金属加工杂志社◎编



常州大学图书馆
藏书章

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书针对轨道交通领域近年来广泛应用的前沿焊接技术，按先进的焊接自动化技术、先进的激光加工技术、先进的搅拌摩擦焊技术三大板块，精选了64个典型案例，全面反映了新技术、新工艺、新设备、新材料在行业的典型应用。

本书对焊接行业科技工作者和管理人员，在进行焊接工艺制定、设备选型、产业升级中具有很高的参考价值，对高校科研人员 and 大学生也具有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

轨道交通先进焊接技术实用案例 / 金属加工杂志社

编. —北京: 机械工业出版社, 2019.10

(先进制造实用技术系列丛书)

ISBN 978-7-111-63689-2

I. ①轨… II. ①金… III. ①焊接工艺 IV. TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第198681号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张维官 责任编辑: 田文华 责任校对: 王颖

版式设计: 桑晓东 封面设计: 高长刚

北京联兴盛业印刷股份有限公司印制

2019年10月第1版第1次印刷

185mm × 260mm 1/16 · 19.5印张 · 468千字

0001 — 1200册

定价: 88.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

编委会

万升云 王育权 王春生 王秀琴

刘春宁 刘 静 吕纯洁 冯存义

汤旭祥 侍光磊 邱友胜 钟 奎

卢 源 张志昌 张连华 韩晓辉

戴忠晨

序

《金属加工》杂志是我们多年来一直关注的科技期刊，“以实用性为主，来源于实践，服务于生产”的办刊原则，保证了期刊内容的实用性、先进性、知识性和可读性。经过近七十年的沉淀与积累，它已经成为众多一线工程技术人员的良师益友。

随着轨道交通先进金属加工技术的不断发展，在我国轨道交通装备制造中，新材料、新工艺、新技术的应用越来越广泛。在此基础上，为搭建轨道交通装备制造企业工程技术人员之间的技术交流平台，中车焊接技术委员会、中车无损检测技术委员会与金属加工杂志社合作，举办了两次“轨道交通先进金属加工系列征文”活动，共征集了近600篇轨道交通领域先进的金属加工技术论文。《轨道交通先进焊接技术实用案例》的内容，主要来自于上述征文中先进的焊接技术应用案例，以及近年来《金属加工》杂志刊登的关于轨道交通领域先进焊接技术与装备的案例。

伴随我国铁路和城市轨道交通的快速发展，轨道交通装备产业规模不断扩大。需求的不断增长，助推了我国轨道交通装备制造技术与设备的转型升级与更新换代。焊接作为轨道交通装备制造中的关键技术之一，已经成为保证产品质量的重要影响因素。因此，高质高效的先进焊接技术与装备可为我国轨道交通装备的发展赋能。

《轨道交通先进焊接技术实用案例》分别归纳、整理了目前轨道交通装备制造领域应用最广泛的三大先进技术——焊接自动化技术、激光加工技术、搅拌摩擦焊技术。案例中既有IGM、松下、ABB焊接机器人的应用，百超、大族激光的加工技术，又有伊萨搅拌摩擦焊工艺的优化等，我们相信这些成功的实用案例，可以成为解决生产中技术难题的重要参考资料，同时也为生产一线的工程技术人员、企业管理者，以及大专院校、科研机构等提供重要的参考信息。

中国中车焊接和无损检测培训中心

2019年9月

前 言

近年来，随着城市轨道交通与高速铁路的快速发展，我国轨道交通装备制造技术取得了巨大的成就，各种新材料、新工艺、新技术不断推陈出新，如激光焊、激光复合焊、自动焊、搅拌摩擦焊等先进的焊接技术越来越广泛地在机车车辆制造过程中得到应用。先进焊接技术与传统焊接技术相比，具有焊接质量可靠、生产效率高、焊接速度快、自动化程度高等特点，对于现代企业倡导的高效生产具有实际意义。

为进一步促进轨道交通装备制造行业焊接技术的推广和应用，编辑出版一本集合轨道交通装备制造各行各业在先进焊接技术应用方面的实用案例图书，无疑会对企业的焊接从业人员提供巨大的帮助。

本书的实际应用案例全部来自金属加工杂志社近几年举办的“轨道交通先进金属加工系列征文”活动的论文，以及杂志出版的涉及到轨道交通装备制造行业的先进焊接技术应用案例。全书根据轨道交通装备制造工艺特点，分为焊接自动化、激光加工、搅拌摩擦焊三篇，可供各企业生产一线人员、质量管理人员、安全监督人员、工艺技术人员，以及研究机构、大专院校相关专业的师生学习参考。

本书在编辑整理过程中，中车科技质量部、中车焊接技术委员会提供了宝贵的建议和各方面支持，在此向他们表示真诚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在诸多不足和错误之处，恳请广大读者不吝指正。愿本书能够为轨道交通装备制造行业焊接技术水平的提高、保证先进焊接技术的正确应用、促进焊接技术的发展，起到积极的推动作用。

金属加工杂志社

2019年9月

目 录

序

前言

第一篇 先进的焊接自动化技术

“中国制造2025”之先进的轨道交通装备制造	2
智能化焊接在高速动车组铝合金车体制造上的应用和展望	8
智能化焊接装备及工艺评价系统研发	12
智能化焊接技术在高速铝合金车辆上的应用	22
弧焊机器人在铝合金车体组焊中的推广应用	26
焊接机器人在轨道交通装备制造中的应用	32
碳素钢厚板组合件机器人焊接	36
空心轴机器人焊接工艺研究	43
不锈钢薄板异形工件机器人焊接	50
IGM自动焊熔深不足缺陷的成因及防止对策	56
厚板工件多层多道机器人焊接工艺及难点分析	60
快运货车转向架摇枕疲劳焊缝机器人焊接编程优化	66
小型机械手自动焊焊接地铁横向管组成工艺研究	71
IGM焊接机器人焊枪碰撞安全保护故障诊断	78
复杂工件机器人焊接	82
IGM焊接机械手样板焊缝多层焊优势研究	87
铁路货车焊接机器人专用工艺装备的模块化和标准化设计	90
U形肋板单元机器人焊接试验研究	94
焊接机器人在货车转向架上的应用	97
松下焊接机器人在铝合金托盘焊接过程中的应用	101
真空吸盘系统在机器人焊接中的应用	104
ABB机器人在铝合金托盘生产中的应用	108
动车组铝合金小部件机器人焊接工作站的设计与应用	111
SW-220K横梁组成机器人焊接变形原因分析与控制	115

第二篇 先进的激光加工技术

激光焊和搅拌摩擦焊工艺技术研究及发展趋势	120
激光加工在轨道交通车辆制造中的应用现状及发展趋势	130
激光数控切割技术在铁路货车钣金制造中的应用和展望	134
激光-MIG复合焊接技术在高速列车铝合金车体焊接中的应用研究	138
10mm厚6005A铝合金激光-MIG复合焊接	146
激光叠焊工艺在轨道车辆不锈钢车体中的应用研究	151
坡口角度对激光-MIG复合焊接头性能的影响	155
城轨车辆铝合金空调板激光-MIG复合焊工艺研究	159
不锈钢轨道车辆侧墙激光焊快速装夹装置开发	164
轨道车辆铝合金车体枕梁激光-MIG复合焊接工艺研究	168
激光-MIG复合焊与其他焊接方法性能对比分析	173
SUS301L不锈钢激光焊接对接接头性能研究	178
激光-MIG复合焊接四种表面处理方式对比分析	182
铝合金薄板无气体保护激光焊接组织与性能研究	186
激光切割技术在铁路货车制造中的应用	190
激光切割弹簧托板的质量控制	196
激光切割机高频高压柜控制原理及典型故障分析	201
光纤激光切割技术在轨道交通行业的应用	204
三维激光切割技术在机车车辆制造中的应用	207
机器人激光切割技术在轨道车辆制造中的应用	211
大族光纤激光切割机在粮食干燥机制造中的应用	214
国铁打磨车底侧梁共边分区激光切割法	217
百超激光切割机切割质量控制及应用	221
CO ₂ 激光与光纤激光切割工艺及成本分析	225

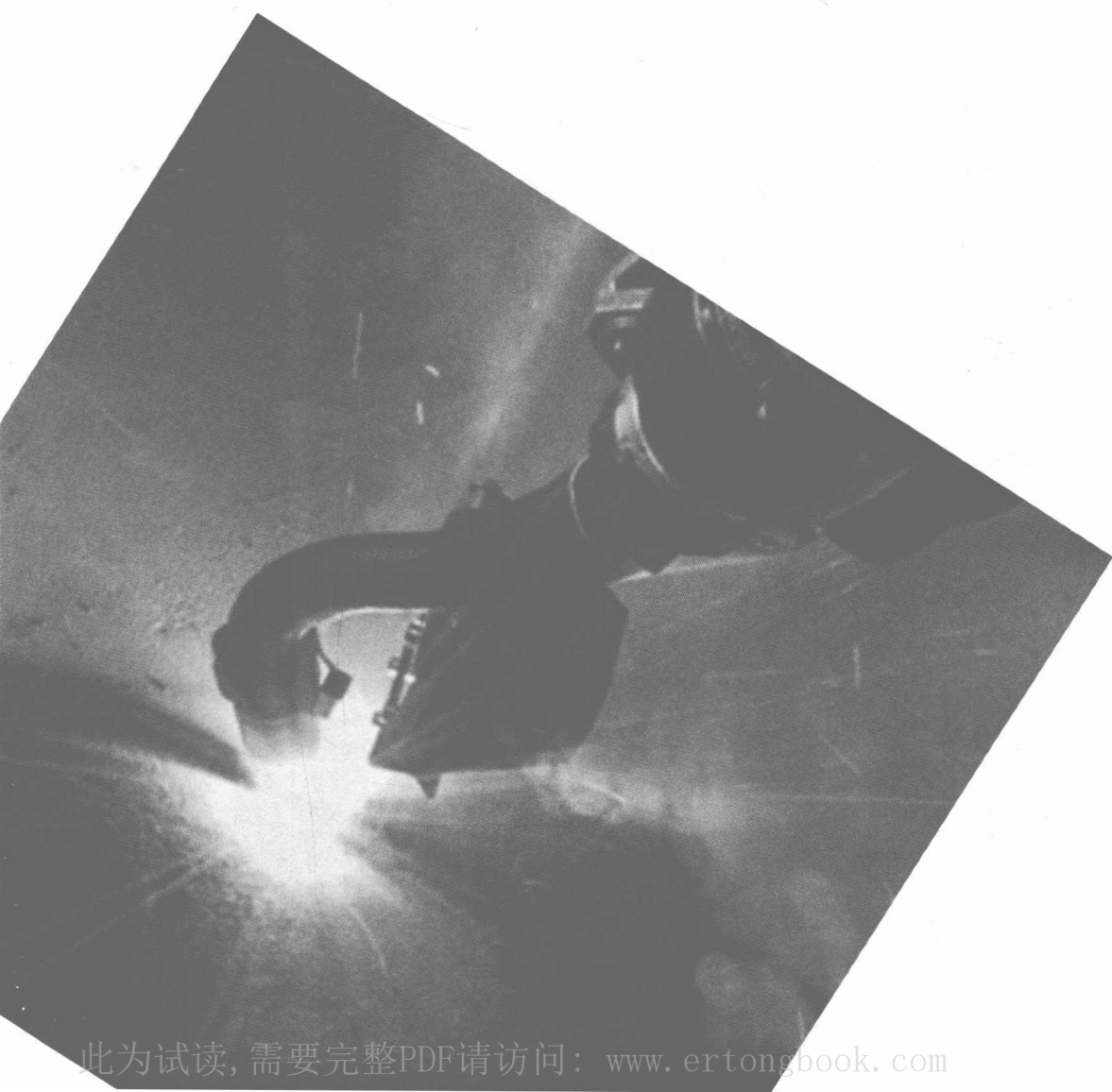
第三篇 先进的搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊技术在铝合金车体制造中的推广应用	230
镁/铝合金搅拌摩擦胶接点焊接头组织和性能研究	234
铝合金车体侧墙搅拌摩擦焊工业化生产应用研究	244
铝合金搅拌摩擦焊隧道形缺陷的研究及控制措施	248

轨道车辆铝合金侧墙搅拌摩擦焊工装柔性化设计	254
6082-T6铝合金材料搅拌摩擦焊工艺研究	259
高速列车用7N01铝合金搅拌摩擦焊接头的形貌及力学性能	265
轨道客车铝合金车体制造搅拌摩擦焊技术的应用研究	270
搅拌摩擦焊二次焊接工艺攻关	274
铝合金搅拌摩擦焊完全热力耦合数值模拟	279
地铁车辆侧墙模块搅拌摩擦焊变形控制	283
轨道车辆用6082铝合金搅拌摩擦焊焊接接头性能研究	286
轨道车辆铝合金6005A搅拌摩擦焊制造工艺	290
搅拌摩擦焊返工工艺研究	294
新型带肋单层板搅拌摩擦焊工艺研究	298
铝合金侧墙搅拌摩擦焊的隧道形缺陷改进技术研究	302

第一篇

先进的焊接自动化技术



“中国制造2025” 之先进的轨道交通装备制造

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纪录，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。

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，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素钢，但由于碳素钢制造的车体自身较重、耐腐蚀性差、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、侧墙的自动焊接

1) 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。

2) 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。

3) 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。

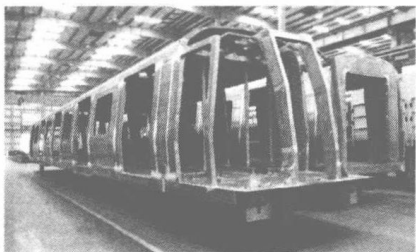


图1 铝合金车体结构

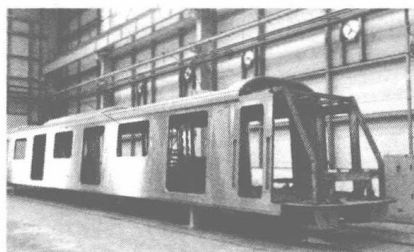


图2 不锈钢车体结构

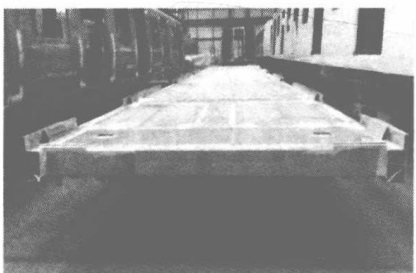


图3 底架组焊结构

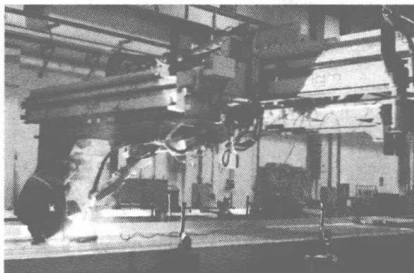


图4 底架组焊机器人焊接

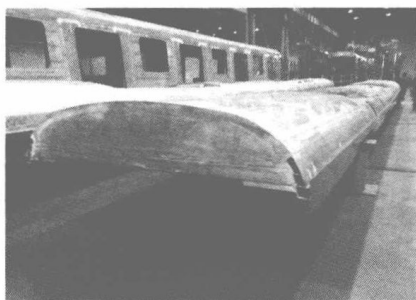


图5 顶盖组焊结构

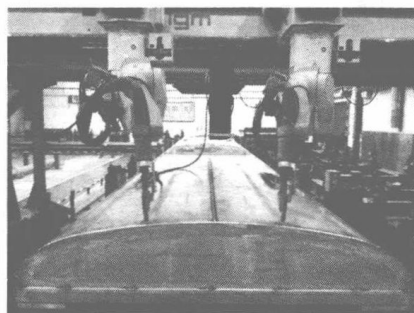


图6 顶盖组焊机器人焊接

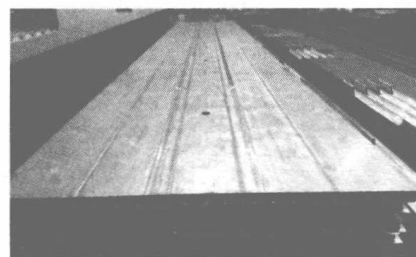


图7 地板结构

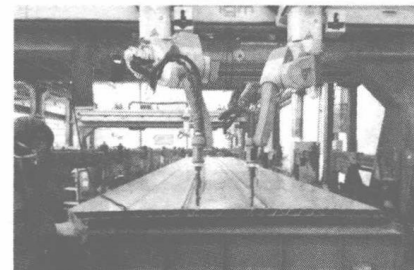


图8 地板组焊机器人焊接

4) 侧墙板组焊一般由五六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。

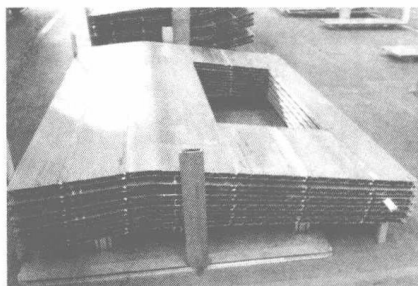


图9 侧墙板结构

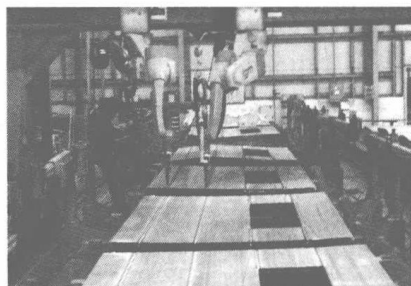
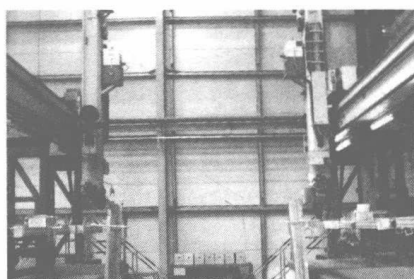


图10 侧墙板组焊机器人焊接

(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。



a)



b)

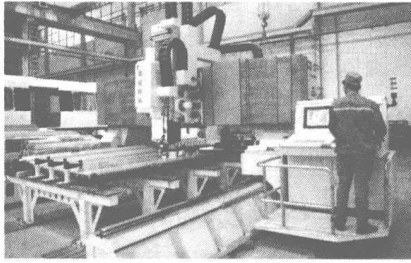
图11 车体组焊机器人焊接

2. 搅拌摩擦焊在铝合金车体上的应用

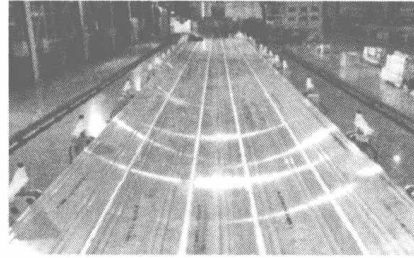
搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 于1991年发明于英国的TWI, 是一项新型的摩擦焊技术。经过十多年的发展, 搅拌摩擦焊技术已经成功应用于航空、航天、汽车、造船和高速铁路列车等诸多轻合金 (主要是铝、镁、铜、锌及其合金) 结构的制造领域, 并日趋完善, 其可焊厚度为2~50mm。对于异种金属间的连接及用常规熔焊方法难以焊接的轻金属材料, 采用搅拌摩擦焊一般均能获得成形及性能良好的的焊接接头。常用的搅拌摩擦焊设备主要有静龙门式搅拌摩擦焊专机和动龙门式搅拌摩擦焊专机。目前搅拌摩擦焊已在地板、侧墙、枕梁焊接进行推广应用, 如图12所示。

3. 电阻焊在不锈钢车体上的应用

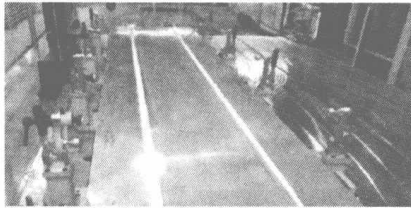
不锈钢车体主要是由底架、顶盖、侧墙、端墙组焊而成, 其中各部件大多数均采用电阻焊进行焊接, 如图13所示。



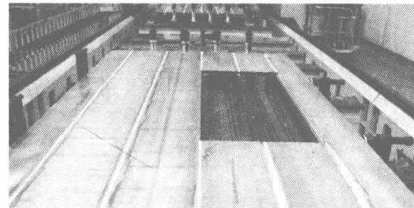
a) FSW产品焊接



b) FSW地板焊接

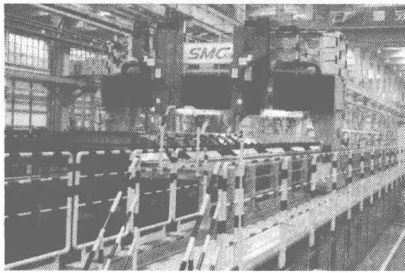


c) FSW枕梁焊接

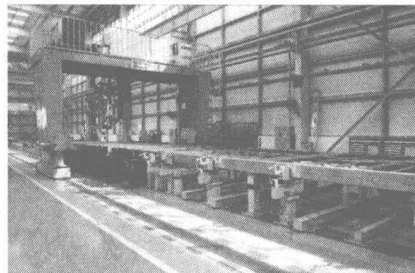


d) FSW侧墙焊接

图12 搅拌摩擦焊的应用



a) 底架电阻焊



b) 顶盖电阻焊

图13 电阻焊的应用

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形悬臂旋转式+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

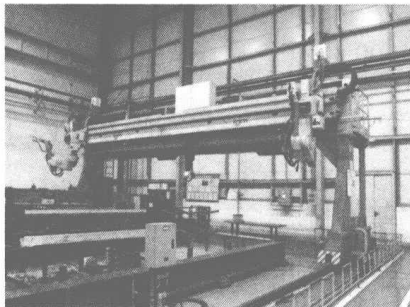


图14 龙门式焊接机器人

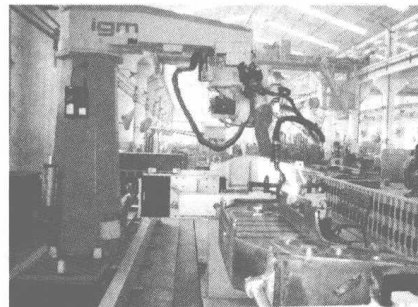


图15 C形悬臂旋转式+直线导轨

业微处理机。示教器采用Windows平台及视窗界面，编程操作过程简单可靠。具有触摸屏、按键及手柄操作杆，同时可进行中文、英文双层显示。焊接系统采用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、EN 15085、DIN 6700、TB/T 1580等相关体系标准要求。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。

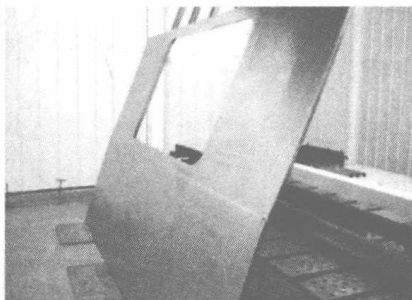


图16 激光焊的应用

激光焊具有以下特点：

- 1) 车体表面无压痕，外墙表面平整美观。
- 2) 热输入低，焊接变形极小。
- 3) 可连续高速精密焊接，密封性好，适用于高速列车。
- 4) 车体表面平整度较高，平面度误差可控制在 $\pm 1/1000$ 以内。
- 5) 焊接质量稳定性好，焊接速度高，可达 $5\sim 6\text{m}/\text{min}$ 。

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) 车体表面平整度较低，平面度误差可达 $\pm 3/1000$ 。
- 5) 焊接速度较低($1\text{m}/\text{min}$)，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，平面度误差不超过 $\pm 1.5/1000$ 。

4. 激光-电弧复合焊接技术

激光-电弧复合焊接是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。

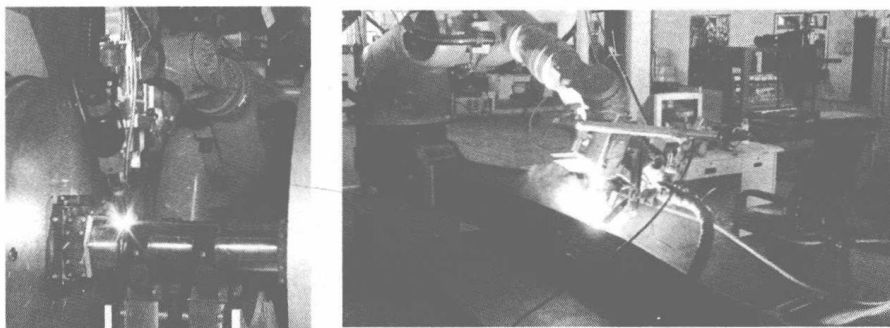


图17 激光-电弧复合焊接技术

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的增加，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大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。

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。

智能化焊接在高速动车组铝合金车体制造上的应用和展望

1. 概述

铝合金材料制作的车体具有重量轻、耐腐蚀、外观平整度好及材料可再生利用等优点，因而受到世界各城市交通公司和铁道运输部门的青睐。铝合金车体在高速铁路车辆制造上具有不可替代的优势，因此铝合金车体的发展速度特别快。

目前，全铝结构铝合金车辆已经广泛应用于我国铁路车辆动车组的制造和城市轨道交通车辆的制造，尤其高速动车组的钢结构全部是铝合金车体，应用最为广泛。在铝合金车体制造过程中，由于结构大量采用型材拼接，接头长且规则，便于自动化作业的实现，因此在该行业大量使用各种智能化焊接技术。

2. 智能化焊接在高速动车组铝合金车体制造上的应用

2001年，中车长春轨道客车公司建成了国内第一条铝合金车体自动化焊接生产线，并利用国产材料，先后开发制造了210km/h铝合金车体电动车组、270km/h铝合金高速试验列车等动车组铝合金车体。2002年，实现了可批量生产铝合金车体生产的硬件条件。2004年，中车长春轨道客车公司从法国阿尔斯通公司引进了200km/h铝合金车体动车组CRH5。在成功引进200km/h动车组的前提下，又从德国西门子公司引进了300km/h铝合金车体动车组CRH3。

自动焊在铝合金车体焊接中占有举足轻重的地位，它以焊接质量稳定，生产效率高等优点，得到焊接企业的广泛认可。现在，随着公司的发展与壮大，对于智能化焊接领域的需求大幅度提高。中车长春轨道客车公司高速动车组铝合金车体焊接生产，自动焊焊接量约占整车焊接总量的75%。主要采用的智能化焊接技术是自动MIG焊技术和搅拌摩擦焊技术，其中自动MIG焊应用最为广泛，约占自动焊焊接总量的95%，而搅拌摩擦焊还仅处于小面积应用和探索阶段，相信在不久的将来，搅拌摩擦焊技术也会得到长足的发展。

(1) 高速动车组铝合金车体结构特点 高速动车组铝合金车体，主要分为中间车铝合金车体和头车铝合金车体。中间车铝合金车体主要由底架、侧墙、车顶、端墙等四个部位组成，头车铝合金车体主要由底架、侧墙、车顶、端墙及车头等5个部位组成。图1所示为CRH380型动车组中间车铝合金车体，图2所示为CRH380型动车组头车铝合金车体。

CRH380型动车组铝合金车体，底架组成主要由地板、底架边梁、KK端/FE端、裙板以及各