



“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

高速列车激光-电弧复合 焊接技术

· 陈 辉 吴圣川 著 ·



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21 世纪先进制造技术丛书

高速列车激光-电弧复合 焊接技术

陈 辉 吴圣川 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

全书系统介绍高速列车主承载结构关键部件所涉及的材料激光-电弧复合焊接过程机理、焊接关键工艺技术、焊接过程数值模拟、焊接过程智能化控制、接头的服役性能及安全可靠性评价,将激光-电弧复合焊接的研究成果与工程化应用实例展现给读者,使读者能够更深层次地了解高速列车主承载结构关键部件激光-电弧复合焊接关键技术及其工程化应用前景。

本书可作为材料加工方向高年级本科生及研究生的教材,也可供相关领域的科研工作者、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速列车激光-电弧复合焊接技术/陈辉,吴圣川著. —北京:科学出版社, 2019.6

(“十二五”国家重点图书出版规划项目;21世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-059899-8

I. ①高… II. ①陈…②吴… III. ①高速列车-焊接工艺 IV. ①U260.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 268168 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张:12 1/4 彩插:4

字数:250 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

陈辉,西南交通大学教授、博士生导师,“轨道交通关键材料及服役安全评价技术”四川省青年科技创新研究团队带头人,四川省学术与技术带头人,四川省有突出贡献优秀专家,四川省科技创业领军人才。西南交通大学轨道交通材料及工艺研究中心常务副主任,四川省先进焊接及表面工程技术研究中心常务副主任,成都市科学技术顾问团特聘专家,成都新材料产业研究院专家咨询委员会委员,中国焊接学会四川省地方委员会主任,四川省机械工程学会焊接专委会主任。承担国家重点研发计划课题、973 计划前期研究课题、国家科技支撑计划课题、国家自然科学基金项目 10 余项。近 5 年出版专著 2 部,其中《高速列车铝合金车体的焊接技术》获得“首届四川高校出版社图书奖”优秀学术著作一等奖;发表论文 120 余篇;授权发明专利 4 项,实用新型专利 9 项。获得四川省科技进步奖一等奖 1 项,四川省第八届高等教育教学成果奖二等奖 1 项,教育部创新创业大赛国奖银奖 1 项。



《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编 熊有伦(华中科技大学)

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 汉(华中科技大学)

张宪民(华南理工大学)

王 煜(香港中文大学)

周仲荣(西南交通大学)

王田苗(北京航空航天大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

查建中(北京交通大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

柳百成(清华大学)

王越超(中国科学院理化技术研究所)

钟志华(同济大学)

冯 刚(香港城市大学)

顾佩华(汕头大学)

冯培恩(浙江大学)

徐滨士(陆军装甲兵学院)

任露泉(吉林大学)

黄 田(天津大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

黄 真(燕山大学)

江平宇(西安交通大学)

黄 强(北京理工大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

管晓宏(西安交通大学)

李泽湘(香港科技大学)

雒建斌(清华大学)

李涤尘(西安交通大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

谭建荣(浙江大学)

宋玉泉(吉林大学)

熊蔡华(华中科技大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

翟婉明(西南交通大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪,先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点,同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展,为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术,出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合,产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战,要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展,激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升制造学科的学术水平。我们相信,有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,本丛书将为发展制造科学,推广先进制造技术,增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物,在制造业中的应用范围很广,从喷漆、焊接到装配、抛光和修理,成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科,已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一,并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展,因此,本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后,我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对丛书的厚爱。

熊有伦

华中科技大学

2008年4月

序

高速铁路的钢轨、桥梁、隧道开挖等工程机械和机车车辆的制造都离不开焊接,而焊接是决定其结构服役安全可靠性的关键技术。西南交通大学轨道交通材料及工艺研究中心几十年如一日,长期从事铁路焊接研究工作。在钢桥方面,针对梁板钢桥焊接、16Mn 钢桥栓焊和大跨度微合金化钢桥梁整体节点的焊接,承担了多项研究工作。在工程机械方面,在国家“六五”攻关中承接了工程机械用 15MnMoVNRe 高强钢焊接强韧性的研究,进行了筑路机械捣头和盾构机开挖刀具研究并组织产品生产。在钢轨焊接方面,西南交通大学起步较晚,但发展很快,从钢轨补焊到铝热焊和小型气压焊焊接钢轨,到修理进口闪光焊机,再到研制大型闪光焊机和气压焊机,相关技术和装备已出口国外,在轨道交通和高速铁路的建设中起着重要作用。在高速列车方面,在国家“八五”攻关中承接了高速列车机车车体不锈钢焊接项目和客车车体铝合金焊接项目。

近十年来,作者团队参加了多项与高速列车制造相关的国家科技支撑计划项目,承担了各系列高速列车的焊接残余应力测试分析,对高速列车焊接结构易出现的问题,特别是接头疲劳和应力腐蚀进行了深入的试验研究和理论分析,为提高结构安全性起到了重要作用。针对存在的接头强度低、气孔倾向大等问题,提出将激光-电弧复合焊接技术应用于高速列车铝合金的焊接,降低焊缝的气孔倾向,提高接头强度系数,克服了搅拌摩擦焊接在底架复杂短焊缝上应用的不足,为高速列车焊接技术创新提供了新思路。作者团队近年来开展了铝合金枕梁、不锈钢端部底架、耐候钢转向架等部件的激光-电弧复合焊接研究,根据近几年的研究成果,总结分析并撰写此专著。

《高速列车激光-电弧复合焊接技术》一书总结了近期高速列车激光-电弧复合焊接研究成果,内容丰富新颖,对进一步研究高速列车焊接结构可靠性和促进优质高效的智能化生产有着重要作用。

西南交通大学教授 王元良

2018年9月于成都

前 言

为打造我国高速列车自主化制造技术平台和高速铁路品牌,保障高速列车全寿命周期的安全可靠,迫切需要优化升级高速列车主承载结构关键部件焊接技术。目前,国内外高速列车制造主要采用电弧焊接技术,但是高强度铝合金电弧焊接存在热影响区软化严重、气孔率高、接头强度系数低等突出问题,严重制约了高速列车焊接制造品质的提升。搅拌摩擦焊接适用于铝合金车体长直对接焊缝,难以满足车体底架、转向架构架等复杂结构多接头形式、空间位置的焊接要求。双丝焊接技术可提高焊接效率,但依然存在焊后变形严重、残余应力较大等问题。激光-电弧复合焊接技术是一种高质量、高适应、高可控的焊接方法,是高速列车主承载结构焊接技术创新的主要发展方向。

在国家重点研发计划课题、国家科技支撑计划课题、973 计划前期研究课题、国家自然科学基金项目、四川省科技计划项目以及众多企业委托重大科技攻关项目的资助下,作者所带领的研究团队组建了“轨道交通关键材料及服役安全评价技术”四川省青年科技创新研究团队,通过跨学科、跨单位联合攻关,系统地开展高速列车主承载结构关键部件激光-电弧复合焊接关键技术及工程应用研究,取得了系列创新成果。

本书由陈辉规划整体结构及内容。全书撰写分工如下:第 1 章由陈辉、蔡创撰写;第 2 章由陈辉、朱宗涛、吴圣川撰写;第 3 章由陈静青撰写;第 4 章由杨涛、熊俊撰写;第 5 章由朱宗涛、李远星、余敏、刘艳撰写。全书由陈辉、吴圣川统稿。

本书是作者所带领的研究团队成果的总结。书中引用了大量国内外文献资料,在此对文献作者深表感谢。在本书撰写过程中,西南交通大学材料科学与工程学院王元良教授、王一戎教授、车小莉工程师提出了很多宝贵的建议,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请各位专家读者批评指正。

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

序

前言

第 1 章 高速列车激光-电弧复合焊接过程机理	1
1.1 高速列车用材料及激光-电弧复合焊接技术	1
1.1.1 高速列车结构概述	1
1.1.2 高速列车用材料及其焊接性分析	3
1.1.3 激光-电弧复合焊接技术	6
1.2 激光、电弧与材料之间的相互作用	10
1.2.1 激光和电弧的相互作用	10
1.2.2 复合等离子行为	10
1.2.3 匙孔效应	15
1.2.4 能量传输特性	17
1.2.5 熔滴过渡行为	17
1.2.6 熔池动态特征	23
1.3 激光-电弧复合焊接冶金特征	24
1.3.1 激光-电弧复合焊接熔池热场分布特征	24
1.3.2 铝合金激光-MIG 复合焊接接头组织	26
参考文献	35
第 2 章 高速列车激光-电弧复合焊接关键工艺技术	37
2.1 高速列车焊接工艺现状	37
2.1.1 铝合金车体 MIG 焊接技术	37
2.1.2 转向架构架 MAG 焊接技术	38
2.1.3 其他焊接技术	39
2.2 激光-电弧复合焊接关键工艺参数匹配	40

2.2.1	激光-MAG 复合焊接激光与电弧参数的匹配	40
2.2.2	工艺参数对铝合金焊缝成形的影响	43
2.2.3	激光-MIG 复合焊接激光与电弧空间位置关系	46
2.3	铝合金激光-电弧复合焊接气孔控制技术	54
2.3.1	气孔形成机理	54
2.3.2	气孔对接头性能的影响	60
2.3.3	气孔的抑制措施	67
2.4	铝合金激光-电弧复合焊接热裂纹	70
2.4.1	裂纹产生原因	70
2.4.2	裂纹控制措施	72
2.5	激光-电弧复合焊接接头应力与变形	73
2.5.1	焊接残余应力的测试	73
2.5.2	应力与变形分布规律	74
2.5.3	应力与变形调控措施	76
	参考文献	77
第3章	激光-电弧复合焊接数值模拟	78
3.1	焊接数值模拟技术	78
3.1.1	焊接热过程的数值模拟	78
3.1.2	焊接应力与变形的数值模拟	82
3.1.3	焊接熔池流动行为的数值模拟	85
3.2	激光-电弧复合焊接热源模型	87
3.3	电弧熔池的耦合数值分析	88
3.3.1	基本假设	88
3.3.2	控制方程	89
3.3.3	计算域模型与求解	91
3.3.4	电弧熔池耦合温度场	93
3.3.5	电弧熔池耦合流场	93
3.4	激光-电弧复合焊接的温度场模拟	95
3.4.1	激光-电弧复合焊接热源模型	95
3.4.2	计算模型及边界条件	96

3.4.3 激光-电弧复合焊接的温度场分布	97
3.5 大型结构激光-电弧复合焊接的有限元分析	98
3.5.1 试验条件及数值模型	98
3.5.2 激光-电弧复合焊接接头的温度场分布及固有应变提取	99
3.5.3 大型结构激光-电弧复合焊接的变形分布	102
参考文献	103
第4章 激光焊接过程智能化系统	104
4.1 智能化和信息化在激光焊接过程中的应用	104
4.1.1 智能化焊接的概念	104
4.1.2 转向架智能激光焊接系统	106
4.2 激光-电弧复合焊接过程视觉监测	110
4.2.1 激光焊接熔池形态监测技术	111
4.2.2 激光-电弧复合焊接焊缝三维扫描技术	112
4.2.3 激光-电弧复合焊接焊缝视觉跟踪技术	115
4.3 激光焊接过程的跟踪技术	117
4.3.1 激光三维扫描技术	117
4.3.2 激光焊接跟踪技术	119
4.3.3 激光焊接过程的路径规划	120
4.3.4 激光焊接过程的离线编程技术	122
4.4 激光焊接过程质量监测技术	123
4.4.1 基于激光熔深在线监测技术的质量反馈	124
4.4.2 激光焊接的光谱诊断	126
4.4.3 匙孔行为的质量监测	128
参考文献	131
第5章 高速列车激光-MIG 复合焊接接头的服役性能与安全可靠性	134
5.1 激光-MIG 复合焊接接头静强度分析	134
5.2 激光-MIG 复合焊接接头腐蚀行为	137
5.2.1 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接接头腐蚀及时效制度的影响	138
5.2.2 7B05 铝合金激光-MIG 复合焊接接头腐蚀及扩展形式	139
5.2.3 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接接头各微区腐蚀性能	143

5.2.4 激光-MIG 复合焊接接头腐蚀疲劳性能	152
5.3 可靠性分析	157
5.3.1 焊接接头的疲劳及影响因素	157
5.3.2 焊接接头的疲劳强度分析方法	159
5.3.3 A7N01S-T5 铝合金激光-MIG 复合焊接接头疲劳性能	161
5.3.4 A6N01S-T5 铝合金激光-MIG 复合焊接接头疲劳性能	170
5.3.5 A6N01S-T5 铝合金薄板的疲劳性能特征	172
参考文献	175

彩图

第1章 高速列车激光-电弧复合焊接过程机理

高速列车的制造涉及铝合金、耐候钢和不锈钢等多种材料,而焊接技术是实现列车部件装配的关键制造技术。传统的电弧焊接技术存在接头强度系数低、气孔率高、应力及变形大、对复杂空间位置焊接适应性差的问题,而激光-电弧复合焊接技术具有效率高、间隙适应性强、应力变形小、智能化程度高等特点,是高速列车承载结构焊接技术的主要发展方向。

本章主要介绍高速列车激光-电弧复合焊接的过程机理。首先,概述高速列车结构特点及其常用材料的焊接性,以及激光-电弧复合焊接技术在高速列车制造中的优势。其次,针对高速列车常用典型材料,阐述激光、电弧、材料的相互作用,复合焊接过程等离子、匙孔和熔滴过渡行为,从而明确激光-电弧复合焊接过程能量传输及传质模式,从匙孔行为和熔池的动态行为综合分析焊缝中气孔缺陷的形成机制。最后,以铝合金材料为例,分析激光-电弧复合焊接过程热场分布及焊缝冶金特征。

1.1 高速列车用材料及激光-电弧复合焊接技术

1.1.1 高速列车结构概述

自1964年10月1日,日本东海道新干线建成通车(最高运行速度为210km/h)。从此之后,世界各国开始争相规划和建设高速铁路。1986年,国际铁路联盟(International Union of Rail ways, UIC)对高速铁路的定义是:最高速度至少达到250km/h的专用线或最高速度达到200km/h的既有线。目前,一般可以将铁路速度分级定义如下:①100~120km/h称为常速;②120~160km/h称为中速;③160~200km/h称为准高速或快速;④200km/h以上称为高速。因此,以最高速度200km/h以上运行的列车称为高速列车。高速列车可以是由机车牵引客车组成的列车,但一般是指动车组组成的列车,称为高速动车组。

我国于 2007 年 4 月 18 日实施了铁路第六次大提速,研制的高速列车也正式投入运营。2017 年 12 月 28 日,石济高铁正式开通,标志着中国高铁“四横四纵”的线路网正式完成,里程超过 25000km,占全世界高铁里程的 2/3,稳居世界第一。我国已拥有完整的铁路技术装备科研,设计和制造体系,具有自主研制高速铁路技术装备所需的扎实的技术和工业基础。图 1.1 为我国自主研制的高速试验列车。

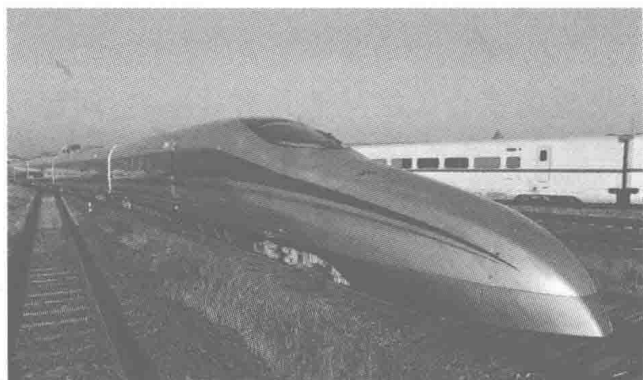


图 1.1 中国高速试验列车

高速列车主要由以下几个部分组成^[1]:

(1) 车体。车体主要分为带司机室车体和不带司机室车体两种,它可容纳乘客和供司机驾驶,又是安装与连接其他设备和部件的基础。车体主要由顶棚、侧墙、端墙、底架等大部件和车体附件等组成。

(2) 转向架。转向架是保证高速列车运行品质和安全的关键部件。转向架一般由轮对轴箱装置、构架、弹簧悬挂装置、车体支承装置和制动装置组成。高速列车转向架分为动力转向架和非动力转向架。

(3) 车辆连接装置。车辆编成动车组运行必须借助连接装置,其中,机械连接包括车钩缓冲装置和风挡等;同时还有车辆之间的电气和空气管路的连接、高压电器连接、辅助系统和动车组供电连接以及控制系统连接等。

(4) 制动装置。高速列车常采用电气制动与空气制动的复合制动模式,此外还有电子防滑器及基础制动装置等。

(5) 车辆内部设备。车辆内部设备是指服务于乘客的车内固定附属装置,如车内电气、供水、通风等。

(6) 牵引传动系统。牵引传动系统由主电路、高压设备、受电弓、牵引

变流器、牵引电机等组成。

(7) 辅助供电系统。辅助供电系统包括空气调节系统、照明设备、旅客服务设备、应急通风装置及维修用电等。

1.1.2 高速列车用材料及其焊接性分析

高速列车制造中常用的金属材料有铝合金、耐候钢和不锈钢等,焊接技术是连接各金属材料的关键技术。下面将分别介绍高速列车中常用的金属材料及其焊接特点。

1. 高速列车常用材料

目前,国内外高速列车的车体材料主要有不锈钢、高强度耐候钢、铝合金^[2]。

1) 耐候钢车体

耐候钢即耐大气腐蚀的钢,一般含有 Cu、Ni 等耐腐蚀元素。其中,含钛耐候钢具有较好的耐大气腐蚀性能和较高的强度,可焊性也比含铜耐候钢好。

2) 不锈钢车体

不锈钢车体选择耐腐蚀性好、屈服点高、疲劳强度高和焊接加工性能好的低碳奥氏体不锈钢作为车体材料,相比耐候钢车体结构减重较多。

3) 铝合金车体

早在 20 世纪上半叶铝合金就已经用于车体制造,最早用于地铁和市郊列车,后来用于普通列车。20 世纪 90 年代后,与车体等长的多品种大型中空挤压型材的出现,使铝合金成为生产高速列车的主导材料。目前,高速列车中主要采用 5XXX 系、6XXX 系、7XXX 系铝合金。铝合金车体的优势可综合为以下几点:

(1) 制造工艺简单,节省加工费用。铝合金具有良好的塑性,易挤压成形,可以根据车体结构优化设计的要求,挤压出各种复杂形状的铝型材,其宽度可达 600~800mm,长度可达 30m;可大幅度减少焊接工作量,简化车辆的制造工艺;总的制造工作量比钢质车体减少 40%左右。

(2) 减重效果好。由于型材为薄壁、中空,减少了很多横向构件,用大型挤压铝型材组焊的铝合金车体重量大幅度降低。耐候钢车体、不锈钢车体、铝合金车体的重量比达到了 10:7:5 左右。另外,大型挤压铝型材组

焊的车体,其当量弯曲刚度较高,可以达到设计要求。

(3) 运行品质良好。铝合金车辆自重小,可节省牵引功率、提高加速性能、降低制动功率,改善动力性能,且具有良好的密封和隔声性能,提高了舒适性。铝合金车体还具有外表平滑、美观等优点。

(4) 耐腐蚀、维修费降低。铝合金具有良好的耐腐蚀性,从而延长了客车的使用寿命,减少了检修工作量。

2. 高速列车常用材料的焊接性

1) 耐候钢

耐候钢通过向钢中添加 P、Cu、Cr、Ni、Mo 等元素,使金属表面在常温下形成一层氧化膜,达到耐大气腐蚀的目的。

耐候钢的焊接性良好,焊接热影响区(heat affected zone, HAZ)的最高硬度不超过 350HV,选择焊材时,除了要满足强度要求外,还需要保证焊缝(weld metal, WM)金属的耐蚀性能与母材匹配。焊前准备时,需清除坡口及其周围的氧化层。耐候钢不易产生热裂纹,冷脆倾向也不大,但是随着耐候钢厚度和强度等级的增加,冷裂纹的倾向也逐渐增大。焊接接头处若出现冷裂纹,可能与下列因素有关:焊缝金属中扩散氢的总量、热影响区中的马氏体或贝氏体、接头处出现明显的拉应力。

2) 不锈钢

不锈钢按照金相组织的不同可以分为奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢和双相不锈钢。高速列车常用的不锈钢材料为奥氏体不锈钢。

奥氏体不锈钢热导率低、电阻率高、线膨胀系数大,焊接过程中容易产生压应力。奥氏体不锈钢焊缝的柱状晶方向性很强,有害杂质元素易于偏析产生热裂纹。接头在敏化温度区间 $450\sim 850^{\circ}\text{C}$ 长时间停留,会使碳化铬(Cr_{23}C_6)在晶界析出,产生晶间腐蚀现象,常见形式为焊缝晶间腐蚀、过热区“刀蚀”、热影响区敏化区晶间腐蚀。当奥氏体不锈钢中存在铁素体时,如焊缝长时间处于 $650\sim 850^{\circ}\text{C}$,有可能析出硬脆的金属间化合物,使接头处的塑性、韧性和耐蚀性降低。

奥氏体不锈钢焊前不需要预热,常用的焊接方法包括钨极惰性气体保护(tungsten inert gas, TIG)焊接、熔化极惰性气体保护(metal inert gas, MIG)焊接等。应选择碳含量低和含有稳定化元素的焊材,控制焊材中 C、P、S 等元素的含量。宜采用小线能量的焊接工艺,使接头焊后快速冷却,避