

普通高等教育“十三五”重点规划教材

# 焊接制造导论

天津大学 胡绳荪 © 主编



**机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS



**胡绳荪** 安徽黟县人，1956年4月出生于天津市，1981年12月毕业于天津大学焊接专业。现为天津大学二级教授、博士生导师；中国焊接学会常务理事、天津市焊接学会理事长。长期从事现代弧焊电源、先进焊接方法、焊接过程控制与自动化等领域的教学与科研，是国家级精品课“弧焊电源及控制”的负责人，天津大学现代连接技术天津市重点实验室首任主任。承担了4项国家自然科学基金及多项省部级、企业的科研项目；主编教材5部，发表论文200余篇，其中80余篇被SCI检索，150余篇被EI检索；曾获国家教学成果二等奖，国家教委、天津市科技进步奖；已培养博士生、硕士生80余名。

普通高等教育“十三五”重点规划教材

# 焊 接 制 造 导 论



主编 胡绳荪

参编（按姓氏笔画排序）

王 颖 王志江 邓彩艳 叶福兴  
申俊琦 邸新杰 杨立军 杨振文  
杨新岐 龚宝明 崔 雷



机 械 工 业 出 版 社

本书利用焊接工程应用案例的讲述,将学生引入焊接科学技术的殿堂。然后,介绍了熔焊、压焊、钎焊等基本焊接方法、特点以及焊接的基础知识,论述了焊接工程安全以及焊接操作安全,明确了焊接科学要解决的问题,讲述了激光焊、电子束焊、超声波焊等焊接新技术,介绍了计算机焊接数值模拟,以及机器人焊接、增材制造等智能焊接制造技术等。最后简要介绍了中国焊接专业高等教育的发展历程、焊接人才培养的目标等。

本书是普通高等教育焊接技术与工程专业、材料成型及控制工程专业(焊接方向)入门教材,也可作为焊接专业知识的普及教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

焊接制造导论/胡绳荪主编. —北京:机械工业出版社, 2018. 8

普通高等教育“十三五”重点规划教材

ISBN 978-7-111-60372-6

I. ①焊… II. ①胡… III. ①焊接-高等学校-教材 IV. ①TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第146480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:冯春生 责任编辑:冯春生 张丹丹

责任校对:王明欣 封面设计:路恩中

责任印制:张博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.75印张·334千字

标准书号:ISBN 978-7-111-60372-6

定价:36.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版



# 前 言

随着《中国制造 2025》的提出，我国制造业得到了快速发展，正在逐步实现制造强国的“中国梦”。焊接制造作为机械制造中的重要技术之一也得到了迅速发展，不仅广泛地应用于大国重器、超级工程中，而且渗透到各行各业的制造领域。因此，需要高等院校培养更多的焊接科学技术人才。为了满足高等院校新生入学后对专业的认识与认知，我们编写了本书。

本书是普通高等教育焊接技术与工程专业、材料成型及控制工程专业（焊接方向）的入门教材。本书通俗易懂，既考虑了内容的广度与科学性，同时也注意了内容的通俗性、科普性以及先进性，力求满足不同层次读者的需求。

本书从焊接工程应用案例讲起，将学生引入焊接科学技术的殿堂。然后介绍了熔焊、压焊、钎焊等基本焊接方法与特点以及焊接的基础知识，论述了焊接工程安全以及焊接操作安全，明确了焊接科学要解决的问题，讲述了激光焊、电子束焊、超声波焊等焊接新技术，介绍了计算机焊接数值模拟，以及机器人焊接、增材制造等智能焊接制造技术等，最后简要介绍了中国焊接专业高等教育的发展历程、焊接人才培养的目标等。希望通过对本书的学习，使学生对焊接专业的知识体系、学习内容、学习方法和就业前景、职业发展有比较系统、清晰的认识，能够坚定信念、明确目标、激发兴趣，做好自己的学习规划与职业生涯规划。

本书是由天津大学从事焊接专业教学的一批教师集体编写完成的。本书共分 7 章，作为本书主编的胡绳荪教授负责编写第 1 章、第 3 章、第 7 章以及全书统稿的工作；王志江副教授编写了第 2 章的 2.1、2.2 和 2.3 节以及第 5 章的 5.1、5.2.2、5.3 和 5.4 节；王颖副教授编写了第 2 章的 2.4 和 2.5 节；邸新杰副教授编写了第 4 章的 4.1、4.3 和 4.4 节；杨振文副教授编写了第 4 章的 4.2 节以及第 6 章的 6.4 节；龚宝明副教授、邓彩艳副教授编写了第 4 章的 4.5 节；崔雷讲师编写了第 5 章的 5.2.1 节；叶福兴教授编写了第 5 章的 5.5 节；龚宝明副教授、杨新岐教授编写了第 6 章的 6.1 节；杨立军教授编写了第 6 章的 6.2 节；申俊琦讲师编写了第 6 章的 6.3 节。

此外，上海锅炉厂有限公司的傅育文高级工程师、上海航天设备制造总厂的尹玉环高级工程师、天津航空机电有限公司程林工程师提供了焊接工程案例与照片。天津新港船舶重工有限责任公司的王莲教授级工程师对于焊接人才需求以及焊接工程师职责的论述给出了很好的意见与建议，在此一并表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，通过网络检索得到了相关内容信息，并应用到本书中，但是由于作者不详，没能给予标注，在此表示歉意，并对这些作者表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，本书难免有错误和不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前 言

## 第 1 章 绪论..... 1

- 1.1 焊接的应用 ..... 1
- 1.2 焊接概述 ..... 11
- 1.3 焊接的发展 ..... 16
- 1.4 课程学习目的和要求 ..... 23
- 复习思考题 ..... 23

## 第 2 章 基本焊接方法 ..... 25

- 2.1 基本焊接方法的分类 ..... 25
- 2.2 熔焊 ..... 25
  - 2.2.1 焊条电弧焊 ..... 26
  - 2.2.2 熔化极气体保护电弧焊 ..... 31
  - 2.2.3 不熔化极气体保护电弧焊 ..... 34
  - 2.2.4 埋弧焊 ..... 39
- 2.3 压焊 ..... 41
  - 2.3.1 摩擦焊 ..... 41
  - 2.3.2 电阻焊 ..... 43
  - 2.3.3 爆炸焊 ..... 47
- 2.4 扩散焊 ..... 49
- 2.5 钎焊 ..... 52
- 复习思考题 ..... 57

## 第 3 章 焊接安全 ..... 59

- 3.1 焊接工程安全 ..... 59
  - 3.1.1 焊接工程结构安全事故案例 ..... 59
  - 3.1.2 影响焊接工程结构安全性能的主要因素 ..... 63
- 3.2 焊接缺欠与焊接质量检测 ..... 63
  - 3.2.1 常见的焊接缺欠 ..... 64
  - 3.2.2 常用焊接质量检测方法 ..... 69
- 3.3 焊接操作安全 ..... 72
  - 3.3.1 焊接对环境的影响 ..... 72
  - 3.3.2 焊接污染的防治 ..... 74
  - 3.3.3 焊接用电安全 ..... 75
- 复习思考题 ..... 76

## 第 4 章 焊接科学基础 ..... 78

- 4.1 焊接基本原理 ..... 78
  - 4.1.1 焊接的物理本质 ..... 78
  - 4.1.2 基本焊接方法的原理 ..... 80
  - 4.1.3 焊接接头的组织结构与性能 ..... 81
  - 4.1.4 熔焊接头的形成过程 ..... 82
- 4.2 焊接传热 ..... 85
- 4.3 焊接冶金 ..... 89
  - 4.3.1 焊接化学冶金 ..... 90
  - 4.3.2 焊接物理冶金 ..... 95
- 4.4 材料焊接性 ..... 100
- 4.5 焊接结构与焊接力学 ..... 102
  - 4.5.1 焊接应力与变形 ..... 102
  - 4.5.2 基本焊接结构与焊接接头 ..... 110
  - 4.5.3 减少焊接变形的焊接工艺设计 ..... 115
  - 4.5.4 焊接结构失效分析与安全评定 ..... 117
- 复习思考题 ..... 121

## 第 5 章 先进焊接技术 ..... 122

- 5.1 高能束焊接 ..... 122
  - 5.1.1 激光焊 ..... 122
  - 5.1.2 电子束焊 ..... 127
- 5.2 压焊新技术 ..... 130
  - 5.2.1 搅拌摩擦焊 ..... 130
  - 5.2.2 超声波焊 ..... 135
- 5.3 复合热源焊 ..... 137
- 5.4 高效弧焊方法 ..... 140
- 5.5 热喷涂与堆焊 ..... 145
  - 5.5.1 金属表面的磨损、腐蚀与失效 ..... 146
  - 5.5.2 热喷涂 ..... 147
  - 5.5.3 表面堆焊 ..... 151
- 复习思考题 ..... 155

## 第 6 章 计算机与智能焊接制造 ..... 157

- 6.1 计算机焊接数值模拟 ..... 157
  - 6.1.1 焊接数值模拟基础 ..... 157
  - 6.1.2 焊接数值模拟应用 ..... 164
- 6.2 焊接电源技术 ..... 171

|                                 |     |                          |     |
|---------------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 6.2.1 弧焊电源概述 .....              | 171 | 6.4.2 增材制造技术的特点 .....    | 194 |
| 6.2.2 弧焊电源的分类与基本工作<br>原理 .....  | 172 | 6.4.3 金属零件的增材制造技术 .....  | 196 |
| 6.2.3 数字控制技术在弧焊电源中的<br>应用 ..... | 174 | 复习思考题 .....              | 204 |
| 6.3 焊接自动化与机器人焊接 .....           | 181 | <b>第7章 焊接人才培养</b> .....  | 205 |
| 6.3.1 焊接自动化 .....               | 181 | 7.1 焊接人才需求 .....         | 205 |
| 6.3.2 机器人焊接 .....               | 187 | 7.2 焊接工程师的基本概念 .....     | 206 |
| 6.4 金属材料的增材制造 .....             | 193 | 7.3 焊接专业人才的基本知识结构 .....  | 207 |
| 6.4.1 增材制造的定义 .....             | 193 | 7.4 我国焊接专业高等教育发展简介 ..... | 210 |
|                                 |     | 复习思考题 .....              | 213 |
|                                 |     | <b>参考文献</b> .....        | 214 |





什么是焊接？哪里需要焊接？如何焊接？焊接在国民经济建设、工业生产中的地位与作用如何？这一系列问题是刚刚踏入焊接科学技术殿堂的学生或读者所好奇与关心的。

本章简要介绍一些焊接应用的实例，在此基础上给出焊接的概念，并结合焊接发展的历史讲述焊接与社会需求、科学技术发展之间的关系，使读者对焊接有初步的认识。

## 1.1 焊接的应用

焊接作为一种制造加工方法与工艺，在机械制造、航空航天、石油化工、船舶制造、海洋工程、大型建筑、国防装备、微电子、日用产品等各个领域得到了广泛的应用。

图 1-1 所示为 2011 年建成的南京大胜关长江大桥，它代表了当时中国桥梁建造的最高水平，被誉为“世界铁路桥之最”。该桥全长 9273m，跨水面正桥长 1615m，桥梁钢结构的总量高达 36 万 t。从图 1-1 可以看到，钢结构的焊接是该桥梁的主要制造方法。

图 1-2 所示为北京新机场的局部网架结构。北京新机场航站楼是世界上规模最大、技术难度最高的单体航站楼，由主航站楼核心区和向四周散射的五个指廊组成，整体呈凤凰造型。航站楼钢网架结构由支撑系统和屋盖钢结构组成，形成了一个不规则的自由曲面空间，总投影面积达 31.3 万 m<sup>2</sup>，大约相当于 44 个标准足球场，自重超过 5.2 万 t。该网架结构也是采用焊接方法进行加工的。



图 1-1 南京大胜关长江大桥



图 1-2 北京新机场的局部网架结构

2017 年 4 月 26 日，万众瞩目的国产 001A 航母正式下水，这是我国首艘完全自主研制的国产航母（图 1-3）。001A 航母的排水量约 6 万 t，航母甲板采用了自动焊接技术，甲板非常平整，焊接质量好。

汽车制造业已经成为我国重要的经济建设支柱产业之一，而焊接是汽车制造中的重要加

工方法，仅汽车车身就有几千个电阻焊焊点。为了提高汽车制造的柔性化，现在汽车制造厂都是采用机器人电阻点焊，通过改变机器人运动与焊接程序就可以适应不同型号汽车的焊接要求。图 1-4 所示为汽车铝合金车身的机器人电阻点焊。



图 1-3 国产 001A 航母



图 1-4 汽车铝合金车身的机器人电阻点焊

除了比较庞大的工程结构需要焊接以外，人们的日常生活中也离不开焊接。图 1-5 所示为自行车车架焊接接头。图 1-6 所示为注射器，你能想象注射器针头在制造中是如何采用焊接技术的吗？



图 1-5 自行车车架焊接接头

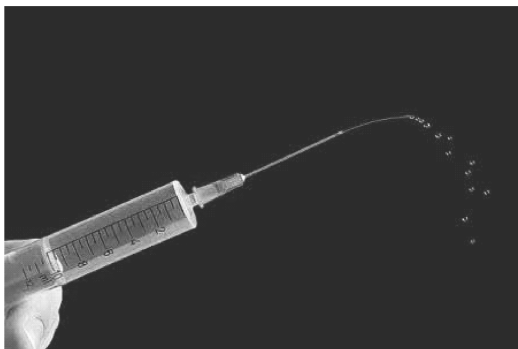


图 1-6 注射器

中国是世界第二大经济体，中国制造正在发展为中国创造，一大批中国人引以为傲的标志性工程展现在世人面前，而这些标志性工程都离不开焊接。走进这些标志性工程，可以更深地感受到焊接科学技术的发展。

### 1. 焊接在航天运载火箭制造中的应用

60 多年来，中国航天事业从无到有、从小到大、从弱到强，走出了一条具有鲜明中国特色的发展道路。今日的中国，卫星、宇宙飞船、空间站被送入太空，而这些都离不开焊接。

众所周知，中国航天事业的标志性成果之一就是长征系列运载火箭。“长征五号”目前是我国运载能力最大的火箭之一，图 1-7 所示为“长征五号”运载火箭。“长征五号”运载火箭外形巨大，芯级直径达 5m，四个助推器直径为 3.35m，而长征系列的其他火箭箭体芯级直径最大的只有 3.35m。

大火箭的结构主要是一个薄壁圆柱壳体，由蒙皮、纵向和横向的加强件构成。“长征五号”火箭是液体火箭，由头部整流罩、液氧箱（氧化剂贮箱）和液氢箱（燃烧剂贮箱）、级间段、发动机、助推器等部分组成，其结构如图 1-8 所示。



图 1-7 “长征五号”运载火箭

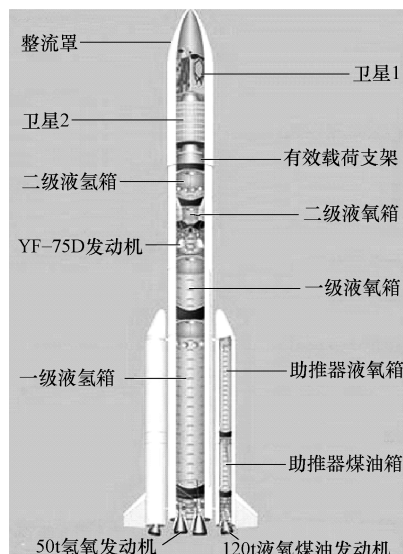


图 1-8 火箭结构示意图

贮箱是火箭的关键结构件，用来贮存燃料。图 1-9 所示为运载火箭贮箱结构示意图，主要由箱底、筒段等部件焊接而成。有筒段纵缝、贮箱环缝、箱底纵缝和箱底环缝等主要焊缝。

“长征五号”采用无毒无污染的 $-183^{\circ}\text{C}$ 的液氧和 $-252^{\circ}\text{C}$ 的液氢作为推进剂，因此它还有个形象的称谓，叫“冰箭”。这些超低温的液态推进剂就分别贮藏在巨大的箭体贮箱内。贮藏液体燃料推进剂的贮箱必须具有很好的密封性，因此需要采用焊接制造。如果焊接的贮箱出现了裂缝，导致火箭在飞行中发生破裂，燃料供给就会出现问题的，整个火箭也会失稳，火箭发射就会失败。因此贮箱的焊接要求是非常高的。“长征五号”运载火箭的贮箱采用新型铝合金材料，贮箱直径达 5m。为减轻自重，箱体最薄的地方只有几毫米，属于大直径、薄壁低温贮箱，其焊接难度是非常高的。中国航天人团队经过三年反复研究、试验，最后通过改善受力设计和焊接工艺的综合办法攻克了该结构的焊接制造难题。

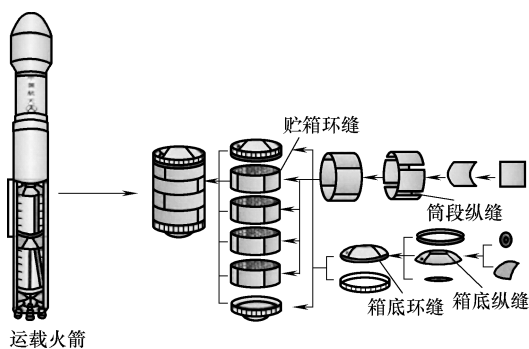


图 1-9 运载火箭贮箱结构示意图

“长征五号”运载火箭贮箱主要采用了变极性钨极氩弧焊（简称 VPTIG）等焊接方法，并设计了专用的焊接工装夹具，应用自动焊接技术，实现了高质量的火箭贮箱焊接。图 1-10 所示为大火箭总装现场，图 1-11 所示为第一个“长征五号”火箭贮箱。





图 1-10 大火箭总装现场



图 1-11 大火箭贮箱

图 1-12 所示为“长征五号”运载火箭贮箱环缝自动焊接系统，该自动焊接系统可以实现最大直径 5.05m、长度 24m 大火箭贮箱环缝的变极性钨极氩弧自动焊接。图 1-13 所示为“长征五号”运载火箭贮箱底焊铣复合加工系统，该系统实现了直径为 5m 贮箱箱底瓜瓣变极性钨极氩弧焊纵缝自动焊接，也是目前国内规模最大的一台氩弧焊、铣削复合加工设备。

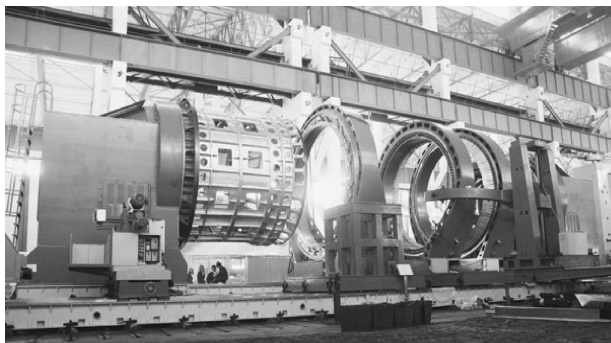


图 1-12 “长征五号”运载火箭贮箱环缝自动焊接系统

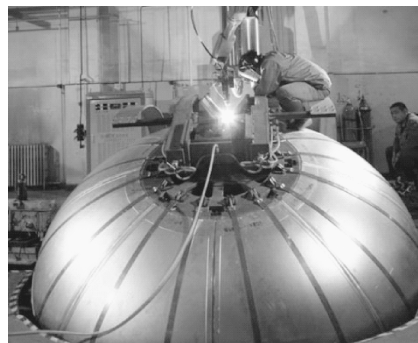


图 1-13 贮箱箱底焊铣复合加工系统

大火箭离不开大推力，“长征五号”火箭需要大推力发动机。图 1-14 所示 4 台全新的 YF-77 氢氧发动机安装在一级和二级火箭上，图 1-15 所示 8 台全新的 120t 液氧煤油 YF-100 发动机被装配在 4 个助推器上。

火箭发动机的制造同样离不开焊接。在火箭发动机的喷管上，有数百根空心管线，管壁的厚度只有 0.33mm，需要通过 3 万多次精密的填丝钨极氩弧焊接（简称填丝 TIG 焊），才能把它们编织在一起。这些细如发丝的焊缝加起来长度超过了 1600m。而最“要劲儿”的是，每个焊点只有 0.16mm 宽，完成焊接允许的时间误差是 0.1s。发动机是火箭的心脏，一小点焊接瑕疵都可能导致一场灾难，为了保证一条细窄而“漫长”的焊缝质量，整个焊接过程中要求操作者必须发力精准，心平手稳，保持住氩弧焊枪、焊丝与焊件的恰当角度，才能让焊缝均匀，不出现焊接缺陷。图 1-16 所示为中央电视台《大国工匠》报道的高凤林进行发动机喷管焊接的情况。

## 2. 焊接在高铁列车制造中的应用

2017 年 6 月具有完全自主知识产权、按照达到世界先进水平的中国标准制造的“复兴号”（图 1-17）动车组率先在京沪高铁两端双向首发，这标志着我国铁路成套技术装备，特别是高速动车组已经走在世界前列。



图 1-14 YF-77 氢氧发动机

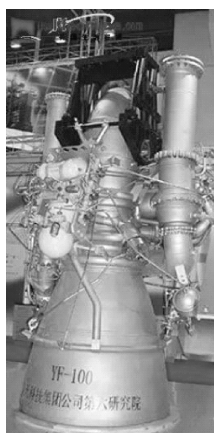


图 1-15 YF-100 发动机



图 1-16 发动机喷管焊接

图 1-18 所示为铝合金车体生产车间。机车主要由车体、转向架、车下车顶设备、车内设备四部分组成。

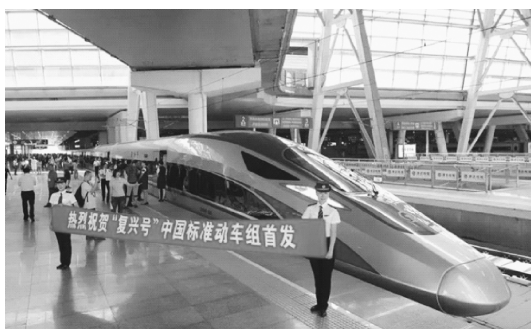


图 1-17 “复兴号”动车组



图 1-18 铝合金车体生产车间

图 1-19 所示为不带驾驶室车辆车体的基本结构与组成示意图。车体主要由车顶、车侧墙、端墙与底架组成。

车体大量采用了不同断面的铝合金大截面中空挤压型材，即型材中间是空的，两个面之间夹支撑的肋板（图 1-20），从而可以减轻车体的自重。铝合金型材最薄的地方为 1.5mm，最厚的地方为 4mm。铝合金薄板焊接具有较大的难度，如何进行高效率、高质量铝合金车体焊接是动车生产必须要解决的技术问题。

铝合金车体焊接通常分为车体大部件自动焊、小部件自动焊和总组成自动焊。大部件自动焊是指车顶板、平顶板、地板、车顶及侧墙自动焊；小部件自动焊是指端墙、车头、隔墙等自动焊；总组成自动焊一般指侧墙和车顶、侧墙和底架连接缝自动焊。

一辆动车有近万条焊缝，没有哪条是不重要的。采用的焊接方法主要是熔化极惰性气体保护焊（简称 MIG 焊）等。图 1-21 所示为车体板材自动切割系统，采用了双机器人等离子切割。

图 1-22 所示为车体机器人 MIG 焊系统，采用双机器人进行平焊位置的焊接。图 1-23 所示为车身小部件柔性机器人焊接系统，采用了机器人与旋转变位机协同运动控制，可以完成车身侧梁定位臂和横梁的焊接。采用机器人焊接大大减少了人为因素的影响，提高了焊接质量与效率。





对于高铁动车组来说,转向架是承载 50t 整车质量的关键,对动车高速运行安全具有重要影响。一个转向架通常安装两对车轮与两台电动机。图 1-24 所示为动车转向架。

转向架焊接决定着转向架焊接结构的强度与疲劳性能,是高速动车组的核心技术之一。转向架的材料主要是耐大气腐蚀钢,采用自动或半自动熔化极活性气体保护焊接(简称 MAG 焊)工艺,保护气体选用混合保护气体 [80%Ar+20%CO<sub>2</sub> (体积分数)]。

图 1-25 所示为《大国工匠》介绍的高级技师李万君采用半自动 MAG 焊进行动车转向架的焊接。图 1-26 所示为不同的机器人焊接系统进行转向架及其构件的自动 MAG 焊。

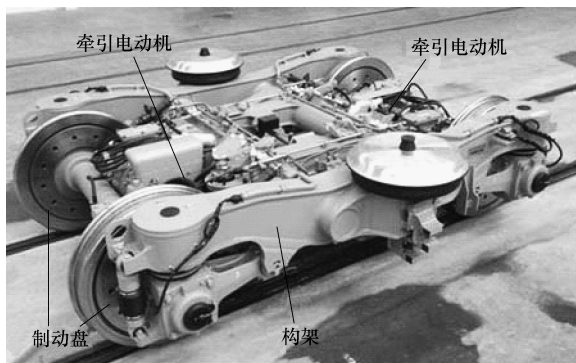


图 1-24 动车转向架



图 1-25 动车转向架半自动 MAG 焊



a)



b)

图 1-26 转向架及其构件的自动 MAG 焊

a) 转向架机器人自动焊接 b) 龙门式转向架机器人自动焊接

### 3. 焊接在港珠澳大桥制造中的应用

图 1-27 所示为建造中的港珠澳大桥。港珠澳大桥是一座跨海大桥,是连接香港、珠海、澳门的超大型跨海通道,全长 55km,是世界最长的跨海大桥,也是我国的超级工程之一。

港珠澳大桥是国内首个大规模使用钢箱梁的外海桥梁工程,钢箱梁的用钢量超过 42 万 t。钢箱梁采用分段预制,预制好的钢箱梁在现场最终完成拼装焊接。钢箱梁制造的 90% 工作量都在车间中完成,实现了大型化、标准化、工厂化、装配化的大型桥梁建设理念。分段钢箱梁的长度超过 130m,宽度约 33m,质量接近 3000t。

图 1-28 所示为钢箱梁标准段示意图。在钢箱梁预制中采用了大量的自动焊接,焊接方

法主要是细丝埋弧焊、 $\text{CO}_2$ 气体保护电弧焊，并且选用了药芯焊丝，使得焊接效率与焊接质量得到极大的提升。

图 1-29~图 1-33 所示分别为钢箱梁 U 形肋板、肋板、横隔板等组对与焊接系统。由这些自动化焊接系统可以看到，焊接机器人得到了广泛的应用。

图 1-34 和图 1-35 所示分别为分段钢箱梁横、纵隔板以及顶板拼装现场。通过拼装完成钢箱梁的分段预制。



图 1-27 建造中的港珠澳大桥

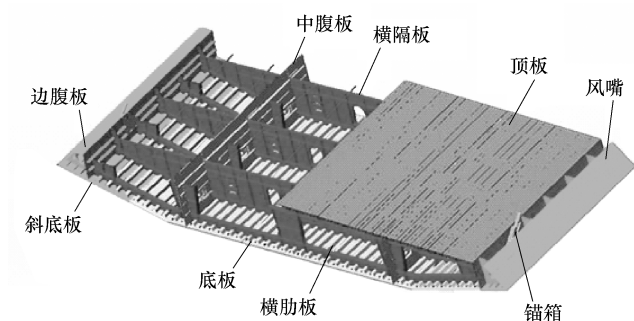


图 1-28 钢箱梁标准段示意图



图 1-29 U 形肋板自动组对系统



图 1-30 U 形肋板自动焊接

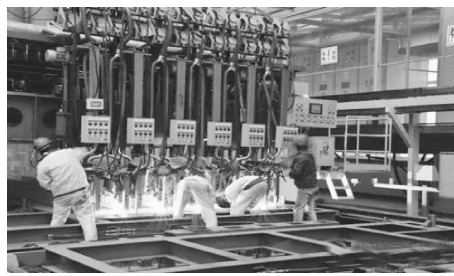


图 1-31 肋板焊接



图 1-32 横隔板安装



图 1-33 横隔板自动焊接

图 1-36 和图 1-37 所示分别为分段预制的钢箱梁海上吊装、港珠澳大桥“合龙”。





图 1-34 钢箱梁横、纵隔板拼装



图 1-35 钢箱梁顶板拼装现场



图 1-36 钢箱梁海上吊装



图 1-37 港珠澳大桥“合龙”

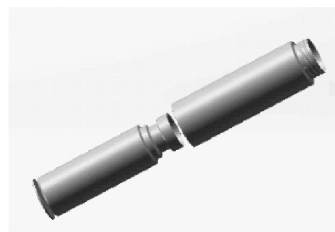
#### 4. 焊接在日常生活中的应用

焊接不仅在国家经济建设重大工程中得到广泛的应用，在人们的日常生活中也离不开焊接。特别是在电子产品飞速发展的今天，人们生活中到处都可以见到焊接。下面再以人们日常生活中常用的双层不锈钢保温杯和电子产品的焊接为例进行介绍。

(1) 不锈钢保温杯的焊接 不锈钢保温杯由内外双层不锈钢制造而成，利用焊接技术把内胆和外壳结合在一起，再用真空技术把内胆与外壳夹层中的空气抽出来，以达到真空保温的效果。图 1-38 所示为不锈钢保温杯。



a)



b)

图 1-38 不锈钢保温杯

a) 保温杯 b) 内胆与外壳

内胆与外壳焊接的部位一般是在保温杯的杯口，所采用的焊接方法可以是钨极氩弧焊（简称 TIG 焊），也可以是激光焊。图 1-39 所示为不锈钢保温杯焊接。