

传承焊接基础的经典著作  
典藏焊接图书的必备书目

# 焊接科学基础

## — 材料焊接科学基础 —



中国机械工程学会焊接学会 编

杜则裕 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 焊接科学基础

## ——材料焊接科学基础

中国机械工程学会焊接学会 编

主 编 杜则裕

副主编 李亚江

主 审 邹增大



机械工业出版社

本书是由中国机械工程学会焊接学会组织编写的《焊接科学基础》之一。主要内容包括：绪论；金属熔焊基本原理（焊接热过程、焊接化学冶金、焊接材料设计基础、熔池结晶及焊缝固态相变、焊接热影响区、焊接缺欠等）；金属及先进工程材料焊接性（合金结构钢、不锈钢及耐热钢、轻金属、先进陶瓷材料、金属间化合物等材料的焊接）；以及表面熔覆与堆焊等理论基础与实践。本书结合我国当前焊接工程实际，系统、深入地阐述了焊接科学理论。本书在编写上注意反映前沿焊接科技发展的成果，贯彻执行最新的国家标准，具有新颖性和先进性。本书写作的指导思想是，不同于高校教材，也不同于技术手册，注意培养读者分析问题与解决问题的能力，具有实用性。

本书适用于焊接、材料成型及控制工程、材料加工工程、机械工程、能源及动力工程等相关专业从事焊接技术工作的科技人员阅读，也可以作为高校师生、研究生的教材及参考书。

## 图书在版编目（CIP）数据

材料焊接科学基础/杜则裕主编；中国机械工程学会焊接学会编. —北京：机械工业出版社，2012.8

（焊接科学基础）

ISBN 978-7-111-37951-5

I. ①材… II. ①杜…②中… III. ①焊接 IV. ①TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 125009 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：何月秋 责任编辑：何月秋 版式设计：霍永明

责任校对：潘蕊 封面设计：马精明 责任印制：乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·31.25 印张·2 插页·774 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-37951-5

定价：98.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

策划编辑（010）88379732

电话服务

网络服务

社服务中心：（010）88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：（010）68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：（010）88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：（010）88379203

封面无防伪标均为盗版

## 编委会名单

(排名不分先后)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 任 | 吴毅雄 |     |     |     |     |
| 副主任 | 王麟书 | 陈丙森 | 黄石生 | 杜则裕 | 陈清阳 |
| 顾 问 | 单 平 | 陈 强 | 张彦敏 | 冯吉才 | 何 实 |
|     | 薛振奎 | 田志凌 | 李宪政 |     |     |
| 委 员 | 赵熹华 | 薛家祥 | 华学明 | 李亚江 | 邹增大 |
|     | 陆 皓 | 赵海燕 | 吴志生 | 张友寿 | 蔡 艳 |
|     | 王文先 | 张彦华 | 王成文 | 康 龙 | 潘春旭 |
|     | 朱 胜 | 刘振英 | 何月秋 | 吕德齐 |     |
| 秘 书 | 黄彩艳 |     |     |     |     |

# 序

从与人们生活密切相关的日用品、电子产品到摩托车、汽车、轮船、高铁等交通工具，从建筑钢结构到锅炉、石油、化工、天然气领域，从核电站到航空航天，哪一个领域都离不开焊接；焊接在国民经济中发挥着越来越大的作用。

作为全国性的专业学术组织，中国机械工程学会焊接学会（以下简称焊接学会）对我国焊接事业的发展和传承，尤其是拓展专业知识、传播科学理论、推动技术进步、培养一流人才等方面有责任和义务做出贡献。

目前我国正处在由焊接大国向焊接强国迈进的时代，焊接科学与工程随着以数字技术为特征的时代发展而日益显现其宽广的发展和空间。然究其实质所以然的焊接基础乃是广大焊接工作者赖以做出贡献的基本。

鉴于高校教学的宽口径改革，大部分高校传统的焊接专业并入材料加工成型及控制专业，过去由国家有关部门承担的焊接教科书编写与出版工作已经停止等现实，焊接学会编辑出版委员会决定组织国内焊接领域相关学科的专家学者编辑出版一套《焊接科学基础》图书，以满足焊接学科进步和行业发展的实际需求。为此我们力求这套图书能够成为代表当前业界较高水平的精品著作，使之成为焊接学会的“看家书”。同时也希望今后经过一代代焊接人的不断补充、不断完善，使之成为我国焊接界的传承经典之作。

历时4年，经过焊接学会编辑出版委员会的努力，在广大焊接专家、学者的积极参与和大力支持下，《焊接科学基础》图书终于面世了。其宽广的知识范围和先进的技术内容，系统地反应了焊接学科和专业的理论基础，也体现了焊接科技的进步与积累；既可以作为高等学校教师和学生的教学书籍，还可成为从事焊接工作的广大科技人员的参考书目。期望也相信该套图书的出版必将对我国焊接事业的传承和发展起到重要的推动作用。

该套图书的编写出版得到了国内许多高等院校、科研院所及企事业单位的大力支持和积极参与，来自清华大学、上海交通大学、天津大学、华南理工大学、山东大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、吉林大学、北京工业大学、兰州理工大学、太原科技大学、装甲兵工程学院、沈阳工业大学、太原理工大学、中国石油大学、中国铁道科学研究院金属及化学研究所、北京材料及工艺研究所、哈尔滨焊接研究所、太原重工股份有限公司、北京嘉克新兴科技有限公司等单位的近百名教授、专家、学者参与了该套图书的编写和审校工作。在此焊接学会向各参与单位的大力支持和全体编审者的辛勤付出表示衷心的感谢！

焊接学会编辑出版委员会主任吴毅雄教授和主编黄石生教授、陈炳森教授、杜则裕教授、陈清阳教授级高工，以及编委会的各位成员、各位编审者都为该套图书的编纂耗费了大量的心血和精力，为此特表最诚挚的谢意！

犹如长期以来对焊接学会编辑出版工作的支持，从该套图书的策划到出版均得到了

机械工业出版社领导和编辑人员的大力协助，在此对他们的付出表示深深的感谢！

该套图书的内容多、涉及范围广，参与编纂人员的队伍庞大，编写过程中难免出现疏漏，敬请广大读者批评指正，以便我们更好地为焊接界服务！

中国机械工程学会  
焊接学会理事长

A large, stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to the president of the Chinese Society of Mechanical Engineering Welding Society.

# 前 言

随着我国经济建设的快速发展，焊接科学技术也取得了长足的进步。举世瞩目的载人航天、奥运工程、西气东输及高速列车等重大的焊接科学应用取得了辉煌的业绩。改革开放的大好形势，为焊接科学理论与工程技术的发展奠定了坚实的基础，并且创造了可持续发展的优良条件。

《材料焊接科学基础》是在中国机械工程学会焊接学会组织领导下编写的。其编写目的是：在我国由焊接大国向焊接强国发展的关键时期，促进我国焊接科学与技术的发展，传播焊接科学理论，培养基础扎实、技术过硬、学术优良的焊接科学技术人才。

本书主要包括：绪论；金属熔焊基本原理（焊接热过程、焊接化学冶金、焊接材料设计基础、熔池凝固及固态相变、焊接热影响区、焊接缺欠、焊接裂纹）；金属及先进工程材料焊接性（合金结构钢、不锈钢及耐热钢、轻金属、先进陶瓷材料、金属间化合物等材料的焊接）；表面熔覆与堆焊等理论基础与实践。本书的特点是：紧密结合我国当前焊接工程实际，系统、深入地阐述焊接科学理论；本书在编写上注意反映当前科技发展的成果，贯彻执行最新的国家标准，具有新颖性和先进性。本书写作的指导思想是：既不同于高校教材，也不同于技术手册，注意培养读者分析问题与解决问题的能力，具有实用性。本书适用于焊接、材料成型及控制工程、材料加工工程、机械工程、能源及动力工程等相关专业从事焊接技术工作的科技人员，也可作为高校本科师生、研究生的教材及参考书。

本书由天津大学博士生导师杜则裕教授任主编，山东大学博士生导师李亚江教授任副主编，山东大学博士生导师邹增大教授任主审。本书第1、9~13章由李亚江教授编写，第2章由山东大学博士生导师武传松教授编写，第3、5、7章由杜则裕教授编写，第4、6章由山东大学孙俊生教授编写，第8章由中国石油大学博士生导师王勇教授编写，第14章由山东大学王娟副教授编写。参加本书编写的还有韩彬、王引真、夏春智、赵朋成、刘光云、张德勤、赵卫民、蒋庆磊、李嘉宁、吴娜等。

本书的出版得到了机械工业出版社的大力支持与帮助。对于机械工业出版社的领导及编辑们为本书出版而付出的辛勤劳动，编者在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，引用了大量的相关技术文献，在此谨向这些文献的作者及所在单位表示衷心的感谢。向中国机械工程学会焊接学会的领导及编辑出版委员会的同志们为本书出版所做的努力，表示衷心的感谢。

由于本书编者的水平有限，书中不妥之处敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 序

## 前言

## 第1章 绪论 ..... 1

- 1.1 焊接科学的重要意义 ..... 1
- 1.2 焊接过程的物理本质 ..... 2
- 1.3 焊接科学的研究领域和发展趋势 ..... 2
- 1.4 焊接技术的应用前景 ..... 4
  - 1.4.1 不同材料焊接的应用 ..... 4
  - 1.4.2 先进焊接技术的应用 ..... 5

## 第2章 焊接热过程 ..... 9

- 2.1 焊接热过程的特点 ..... 9
  - 2.1.1 焊接热源的种类及特点 ..... 9
  - 2.1.2 焊接热效率 ..... 10
  - 2.1.3 焊接热源的作用模式 ..... 11
  - 2.1.4 高能束深熔焊的热源模式 ..... 15
- 2.2 焊接温度场 ..... 16
  - 2.2.1 焊接热传导问题的数学描述 ..... 16
  - 2.2.2 焊接热过程计算的解析法 ..... 18
  - 2.2.3 影响焊接温度场的主要因素 ..... 24
- 2.3 焊接热传导的数值分析 ..... 26
  - 2.3.1 数值分析的基本概念 ..... 26
  - 2.3.2 焊接热传导的有限差分法计算 ..... 27
  - 2.3.3 焊接热传导的有限单元法分析 ..... 27
- 2.4 焊接熔池形态的数值模拟 ..... 28
  - 2.4.1 焊接熔池形态 ..... 28
  - 2.4.2 焊接熔池流体流动与传热的数理描述 ..... 30
  - 2.4.3 熔池流场与热场的数值计算 ..... 31
  - 2.4.4 熔池流体流动对焊接质量的影响 ..... 34
  - 2.4.5 高能束焊熔池形态的特点 ..... 37
- 2.5 焊接热过程的测试 ..... 38
  - 2.5.1 热电偶测温法 ..... 38
  - 2.5.2 红外测温法 ..... 39
  - 2.5.3 基于视觉的熔池检测 ..... 40

## 第3章 焊接化学冶金 ..... 41

- 3.1 焊接化学冶金的特点 ..... 41

- 3.1.1 焊接区的金属保护 ..... 41

- 3.1.2 焊接化学冶金过程的区域性与连续性 ..... 43

- 3.1.3 焊接工艺条件对化学冶金反应的影响 ..... 45

- 3.1.4 焊接化学冶金系统的不平衡性 ..... 46

- 3.2 气相对金属的作用 ..... 46

- 3.2.1 焊接区内的气体 ..... 46

- 3.2.2 氮对金属的作用 ..... 49

- 3.2.3 氢对金属的作用 ..... 51

- 3.2.4 氧对金属的作用 ..... 55

- 3.3 焊接熔渣 ..... 58

- 3.3.1 焊接熔渣的作用 ..... 59

- 3.3.2 焊接熔渣的成分和分类 ..... 59

- 3.3.3 焊接熔渣的结构理论 ..... 60

- 3.3.4 焊接熔渣的性能 ..... 62

- 3.4 焊接熔渣对金属的作用 ..... 64

- 3.4.1 熔渣对金属的氧化 ..... 64

- 3.4.2 焊缝金属的脱氧 ..... 66

- 3.4.3 焊缝金属的脱硫、脱磷 ..... 69

## 第4章 焊接材料设计基础 ..... 72

- 4.1 焊条设计基础 ..... 72

- 4.1.1 焊条设计的原则和方法 ..... 72

- 4.1.2 焊条设计的步骤 ..... 73

- 4.1.3 焊条的药皮设计 ..... 77

- 4.1.4 合金元素对焊缝性能的影响 ..... 88

- 4.1.5 钛钙型药皮焊条的设计 ..... 89

- 4.1.6 低氢型药皮焊条的设计 ..... 92

- 4.1.7 不锈钢焊条和铸铁焊条的设计 ..... 97

- 4.2 焊丝设计基础 ..... 99

- 4.2.1 实心焊丝的设计 ..... 100

- 4.2.2 药芯焊丝的设计 ..... 102

- 4.3 焊剂设计基础 ..... 107

- 4.3.1 焊剂的分类 ..... 108

- 4.3.2 熔炼焊剂的设计 ..... 109

- 4.3.3 非熔炼焊剂的设计 ..... 111

|                            |     |                            |     |
|----------------------------|-----|----------------------------|-----|
| <b>第5章 熔池凝固及固态相变</b> ..... | 116 | 7.3.3 超标缺欠的返修              | 192 |
| 5.1 熔池凝固 .....             | 116 | <b>第8章 焊接裂纹</b> .....      | 193 |
| 5.1.1 熔池凝固的特点 .....        | 116 | 8.1 焊接裂纹的特点 .....          | 193 |
| 5.1.2 熔池结晶的一般规律 .....      | 117 | 8.1.1 焊接裂纹的危害性 .....       | 193 |
| 5.1.3 熔池结晶的线速度 .....       | 118 | 8.1.2 焊接裂纹产生的因素 .....      | 194 |
| 5.1.4 熔池结晶的形态 .....        | 121 | 8.1.3 焊接裂纹的分类及特征 .....     | 194 |
| 5.1.5 焊接接头的化学成分不均匀性 .....  | 122 | 8.2 焊接热裂纹 .....            | 196 |
| 5.2 焊缝固态相变 .....           | 126 | 8.2.1 热裂纹的形成机理 .....       | 197 |
| 5.2.1 低碳钢焊缝的固态相变 .....     | 127 | 8.2.2 热裂纹的影响因素 .....       | 200 |
| 5.2.2 低合金钢焊缝的固态相变 .....    | 128 | 8.2.3 热裂纹的防止措施 .....       | 203 |
| 5.3 焊缝性能的改善 .....          | 135 | 8.3 焊接冷裂纹 .....            | 205 |
| 5.3.1 焊缝金属的强化与韧化 .....     | 135 | 8.3.1 冷裂纹的产生机理 .....       | 205 |
| 5.3.2 改善焊缝性能的工艺措施 .....    | 136 | 8.3.2 冷裂纹的防止措施 .....       | 208 |
| 5.4 焊缝中的气孔和夹杂 .....        | 137 | 8.4 其他裂纹 .....             | 212 |
| 5.4.1 焊缝中的气孔 .....         | 137 | 8.4.1 再热裂纹 .....           | 212 |
| 5.4.2 焊缝中的夹杂 .....         | 145 | 8.4.2 层状撕裂 .....           | 217 |
| <b>第6章 焊接热影响区</b> .....    | 147 | 8.4.3 应力腐蚀裂纹 .....         | 220 |
| 6.1 焊接热循环 .....            | 147 | 8.5 焊接裂纹的综合分析 .....        | 225 |
| 6.1.1 焊接热循环的参数 .....       | 147 | 8.5.1 宏观分析 .....           | 225 |
| 6.1.2 焊接热循环主要参数的计算 .....   | 148 | 8.5.2 微观分析 .....           | 227 |
| 6.2 焊接热循环条件下的组织转变 .....    | 152 | 8.5.3 断口分析 .....           | 229 |
| 6.2.1 焊接加热过程中的组织转变 .....   | 153 | <b>第9章 合金结构钢的焊接性</b> ..... | 237 |
| 6.2.2 焊接冷却过程中的组织转变 .....   | 159 | 9.1 微合金控轧钢的焊接 .....        | 237 |
| 6.2.3 影响过冷奥氏体转变的因素 .....   | 162 | 9.1.1 微合金控轧钢的特点 .....      | 237 |
| 6.3 热影响区的组织及性能 .....       | 164 | 9.1.2 钢材焊接性评定中的问题 .....    | 242 |
| 6.3.1 焊接热影响区的组织分布 .....    | 164 | 9.1.3 微合金控轧控冷钢的焊接性         |     |
| 6.3.2 焊接热影响区的热模拟试验 .....   | 169 | 分析 .....                   | 244 |
| 6.3.3 焊接连续冷却转变图及其应用 .....  | 170 | 9.1.4 微合金钢的焊接工艺特点 .....    | 247 |
| 6.3.4 焊接热影响区的性能 .....      | 173 | 9.2 低碳调质钢的焊接 .....         | 252 |
| <b>第7章 焊接缺欠</b> .....      | 179 | 9.2.1 低碳调质钢的性能特点 .....     | 253 |
| 7.1 焊接缺欠与焊接缺陷 .....        | 179 | 9.2.2 低碳调质钢焊缝的强韧性匹配 .....  | 254 |
| 7.1.1 焊接缺欠与焊接缺陷的定义 .....   | 179 | 9.2.3 低碳调质钢的焊接性分析 .....    | 257 |
| 7.1.2 焊接产品的质量标准 .....      | 180 | 9.2.4 低碳调质钢的焊接工艺特点 .....   | 265 |
| 7.1.3 焊接缺欠对接头质量的影响 .....   | 180 | 9.3 低合金耐热钢的焊接 .....        | 267 |
| 7.2 焊接缺欠的分类 .....          | 183 | 9.3.1 低合金耐热钢的性能特点 .....    | 267 |
| 7.2.1 焊接缺欠的分类方法 .....      | 183 | 9.3.2 低合金耐热钢的焊接性分析 .....   | 273 |
| 7.2.2 熔焊接头的缺欠分类 .....      | 183 | 9.3.3 低合金耐热钢的焊接工艺特点 .....  | 280 |
| 7.2.3 压焊接头的缺欠分类 .....      | 185 | <b>第10章 不锈钢及耐热钢的焊接</b>     |     |
| 7.2.4 钎焊接头的缺欠分类 .....      | 186 | 冶金 .....                   | 283 |
| 7.3 焊接缺欠的评级与处理 .....       | 186 | 10.1 不锈钢及耐热钢的基本特性 .....    | 283 |
| 7.3.1 焊接缺欠的形成原因 .....      | 187 | 10.1.1 不锈钢及耐热钢的种类 .....    | 283 |
| 7.3.2 焊接缺欠的评级 .....        | 187 | 10.1.2 不锈钢及耐热钢的物理性能和       |     |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 耐蚀性 .....                        | 284        |
| 10.1.3 不锈钢及耐热钢的高温性能 .....        | 287        |
| 10.2 奥氏体不锈钢的焊接 .....             | 288        |
| 10.2.1 奥氏体不锈钢的类型及物理冶金 .....      | 288        |
| 10.2.2 奥氏体不锈钢的焊接性分析 .....        | 291        |
| 10.2.3 奥氏体不锈钢的焊接工艺特点 .....       | 301        |
| 10.3 铁素体及马氏体不锈钢的焊接 .....         | 304        |
| 10.3.1 铁素体不锈钢的焊接性分析 .....        | 304        |
| 10.3.2 铁素体不锈钢的焊接工艺特点 .....       | 309        |
| 10.3.3 马氏体不锈钢的焊接性分析 .....        | 311        |
| 10.3.4 马氏体不锈钢的焊接工艺特点 .....       | 313        |
| 10.4 奥氏体-铁素体双相不锈钢的焊接 .....       | 315        |
| 10.4.1 奥氏体-铁素体双相不锈钢的类型 .....     | 315        |
| 10.4.2 奥氏体-铁素体双相不锈钢的耐蚀性 .....    | 316        |
| 10.4.3 奥氏体-铁素体双相不锈钢的焊接性分析 .....  | 317        |
| 10.4.4 奥氏体-铁素体双相不锈钢的焊接工艺特点 ..... | 320        |
| <b>第 11 章 轻金属的焊接 .....</b>       | <b>323</b> |
| 11.1 轻金属焊接的战略意义 .....            | 323        |
| 11.1.1 发展轻金属结构的意义 .....          | 323        |
| 11.1.2 轻金属焊接的现状 .....            | 323        |
| 11.2 铝及铝合金的焊接 .....              | 325        |
| 11.2.1 铝及铝合金的种类和性能 .....         | 325        |
| 11.2.2 铝及铝合金的焊接性分析 .....         | 328        |
| 11.2.3 铝及铝合金的焊接工艺特点 .....        | 337        |
| 11.3 镁及镁合金的焊接 .....              | 346        |
| 11.3.1 镁及镁合金分类、成分及性能 .....       | 346        |
| 11.3.2 镁及镁合金的焊接性分析 .....         | 350        |
| 11.3.3 镁及镁合金的焊接工艺特点 .....        | 353        |
| 11.4 钛及钛合金的焊接 .....              | 359        |
| 11.4.1 钛及钛合金的分类及性能 .....         | 359        |
| 11.4.2 钛及钛合金的焊接性分析 .....         | 361        |
| 11.4.3 钛及钛合金的焊接工艺特点 .....        | 367        |
| 11.4.4 钛及钛合金的焊接实例 .....          | 372        |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| <b>第 12 章 先进陶瓷材料的焊接 .....</b>         | <b>377</b> |
| 12.1 陶瓷材料的性能特点 .....                  | 377        |
| 12.1.1 结构陶瓷的性能特点 .....                | 377        |
| 12.1.2 几种常用的结构陶瓷 .....                | 378        |
| 12.2 陶瓷连接的要求和存在问题 .....               | 381        |
| 12.2.1 陶瓷与金属连接的基本要求 .....             | 381        |
| 12.2.2 陶瓷与金属连接存在的问题 .....             | 381        |
| 12.2.3 陶瓷与金属的连接方法 .....               | 383        |
| 12.3 陶瓷材料的焊接性分析 .....                 | 384        |
| 12.3.1 焊接应力和裂纹 .....                  | 384        |
| 12.3.2 界面反应和形成过程 .....                | 385        |
| 12.3.3 连接界面的结合强度 .....                | 391        |
| 12.4 陶瓷与金属的钎焊 .....                   | 394        |
| 12.4.1 陶瓷与金属的钎焊特点 .....               | 394        |
| 12.4.2 陶瓷与金属的表面金属化法钎焊 .....           | 395        |
| 12.4.3 陶瓷与金属的活性金属化法钎焊 .....           | 398        |
| 12.5 陶瓷与金属的扩散焊 .....                  | 400        |
| 12.5.1 陶瓷与金属扩散焊的特点 .....              | 400        |
| 12.5.2 扩散焊的焊接参数 .....                 | 401        |
| 12.5.3 $Al_2O_3$ 复合陶瓷/金属扩散界面的特征 ..... | 404        |
| <b>第 13 章 金属间化合物的焊接 .....</b>         | <b>412</b> |
| 13.1 金属间化合物的发展及特性 .....               | 412        |
| 13.1.1 金属间化合物的发展 .....                | 412        |
| 13.1.2 金属间化合物的基本特点 .....              | 413        |
| 13.1.3 焊接结构中有发展前景的金属间化合物 .....        | 414        |
| 13.2 Ti-Al 金属间化合物的焊接 .....            | 421        |
| 13.2.1 TiAl 合金的电子束焊 .....             | 421        |
| 13.2.2 TiAl 和 $Ti_3Al$ 合金的扩散焊 .....   | 421        |
| 13.2.3 TiAl 异种材料的扩散焊 .....            | 424        |
| 13.3 Ni-Al 金属间化合物的焊接 .....            | 426        |
| 13.3.1 NiAl 合金的扩散焊 .....              | 426        |
| 13.3.2 $Ni_3Al$ 金属间化合物的熔焊 .....       | 428        |
| 13.3.3 $Ni_3Al$ 与碳钢或不锈钢的焊接 .....      | 430        |
| 13.4 Fe-Al 金属间化合物的焊接 .....            | 432        |
| 13.4.1 $Fe_3Al$ 金属间化合物的电子束焊 .....     | 432        |
| 13.4.2 $Fe_3Al$ 的填丝钨极氩弧焊 .....        | 433        |
| 13.4.3 $Fe_3Al$ 堆焊及焊条电弧焊 .....        | 438        |
| 13.4.4 $Fe_3Al$ 金属间化合物的扩散焊 .....      | 440        |

|                           |     |                         |     |
|---------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 第 14 章 表面熔覆与堆焊 .....      | 447 | 14. 2. 3 热喷涂的工艺特点 ..... | 458 |
| 14. 1 热喷涂与堆焊的物理化学本质 ..... | 447 | 14. 2. 4 激光熔覆技术 .....   | 463 |
| 14. 1. 1 热喷涂的物理基础 .....   | 447 | 14. 3 堆焊原理及特点 .....     | 467 |
| 14. 1. 2 表面熔覆的本质 .....    | 449 | 14. 3. 1 堆焊层的冶金结合 ..... | 467 |
| 14. 1. 3 堆焊的物理化学本质 .....  | 450 | 14. 3. 2 堆焊合金及性能 .....  | 468 |
| 14. 2 热喷涂与表面熔覆 .....      | 453 | 14. 3. 3 堆焊工艺特点 .....   | 475 |
| 14. 2. 1 覆层与界面的结合分析 ..... | 453 | 参考文献 .....              | 484 |
| 14. 2. 2 覆层性能及影响因素 .....  | 455 |                         |     |

# 第 1 章 绪 论

材料焊接科学是近年来形成的交叉学科和应用科学，与材料科学、机械、电子学、自动控制的联系非常密切。焊接曾被誉为是把金属材料制作成结构的“裁缝”，焊接技术的不断发展，促成了它作为一种全新的制造技术，变革了传统的工业化格局，推动了整个社会的发展。焊接逐步形成自己独立的科学体系，其科学内涵是多学科相互交叉融合的结晶，并日益受到各国政府、企业和众多学者的关注。

## 1.1 焊接科学的重要意义

传统意义上的焊接，是指采用物理或化学的方法，使分离的材料产生原子或分子间的结合，形成具有一定性能要求的整体，焊接不包括粘接、铆接等机械连接。发展至今，各种焊接工艺已有近百种，采用了力、热、电、光、声及化学等可以利用的能源。焊接技术的应用涉及机械、交通（船舶、车辆等）、航空航天、能源、电气工程、微电子等几乎所有工业领域。

“二战”以前，基础科学与工程的联系不十分紧密，各有自己的科学体系。随着现代科学技术的发展，基础科学与工程的关系日益紧密，甚至融为一体，并促进了新学科和交叉学科的发展。半个多世纪以来，随着现代物理、化学、材料科学、机械、电子、计算机等学科的发展，焊接技术取得了令世人瞩目的进展，已成为制造业中不可缺少的基本制造技术之一。特别是近年来随着计算机与自动化技术的应用，焊接技术已经发展成为具有一定规模的机械化、自动化和智能化焊接的独立加工领域，逐渐形成了焊接科学与工程这样一门新的学科。

材料焊接科学是一门以焊接为研究对象的应用科学，是促进社会发展和实现国防现代化的重要的科学技术领域之一。材料焊接科学涉及众多的学科领域，如机械、冶金学、力学、电子学、金属物理、计算机与控制工程等，并日益引起世界各国政府部门和科学工作者的高度重视。

20 世纪初，自从火焰和电弧发展成为焊接热源后，焊接作为一项专业化的技术才逐渐被人们认同。自从 1901 年瑞典人发明有药皮的焊条（标志着焊接技术的诞生）以来，焊接技术历经上百年来经验积累和技术提高，取得了长足的进步。特别是 20 世纪 50 年代以后，焊接技术得到了更快的发展。1956 年出现了以超声波和电子束作为热源的超声波焊和电子束焊；1957 年出现了等离子弧焊和扩散焊；1965 年和 1970 年出现了以激光束为热源的脉冲激光焊和连续激光焊；20 世纪末出现了搅拌摩擦焊和微波焊。

焊接技术几乎运用了一切可以利用的热源，其中包括火焰、电弧、电阻热、超声波、摩擦热、等离子弧、电子束、激光、微波等。从 19 世纪末出现碳弧到 20 世纪末出现微波焊的发展来看，历史上每一种热源的出现，都伴随着新的焊接方法的诞生，并推动了科学技术的发展。至今，焊接热源的研究与开发仍未终止，新的焊接方法和新的焊接工艺不断涌现，焊

接技术已经渗透到国民经济的各个领域。

科学技术的发展使新的焊接方法不断产生。20 世纪 80 年代以后，焊接技术渗透到了社会经济和工业领域的各个方面，呈现出加速发展的趋势。在世界高科技市场竞争中，一些发达国家相继建立了各自的材料焊接研究开发中心，支持开展先进焊接技术的研究和应用。我国在材料焊接科学领域的研究和应用也取得了高速发展。

焊接科学越来越引起更多国内外相关人士（如物理、材料、机械、计算机等）的关注。国内在先进焊接设备水平上与国外有一定差距，但在工艺研究水平和工程结构焊接应用上较为接近，在某些方面有自己的特色，例如航空航天飞行器、三峡工程、奥运主体育馆建造等。

先进焊接技术的出现和研发是多学科相互渗透的结果，焊接科学的发展对各种新型工程结构的广泛应用起着至关重要的作用，先进焊接技术在电子、能源、汽车、航空航天、核工业等部门中得到了应用，并极大地推动了社会进步。

## 1.2 焊接过程的物理本质

焊接是指通过适当的手段（加热、加压或两者并用），使两个分离的物体（同种材料或异种材料）产生原子间结合而形成永久性连接的加工方法。焊接的概念至少包含三个方面的含义：一是焊接的途径，即加热、加压或二者并用；二是焊接的本质，即微观上达到原子间的结合；三是焊接的结果，即宏观上形成永久性的连接。

研究表明，固体材料之所以能够保持固定的形状，是由于其内部原子之间的距离足够小，使原子之间能形成牢固的结合力。要想将固体材料分成两块，必须施加足够大的外力破坏这些原子间的结合才能达到。同样道理，要想将两块固体材料连接在一起，从物理本质上讲，就是要采取措施，使这两块固体连接表面上的原子接近到足够小的距离，使其产生足够的结合力，从而达到永久性连接的目的。

对于实际焊接件，不采取一定的措施，而使连接表面上的原子接近到足够小的距离是非常困难的。这是因为连接表面的表面质量较差，即使经过精密磨削加工，其表面从微观上看仍是凹凸不平的；而且连接表面常带有氧化膜、油污等，阻碍连接表面紧密地接触。因此，为了实现材料之间可靠的焊接，必须采取有效的措施。例如：

- 1) 用热源加热被焊母材的连接处，使之发生熔化，利用熔融金属之间的相溶及液-固两相原子的紧密接触来实现原子间的结合。

- 2) 对被焊母材的连接表面施加压力，在清除连接面上的氧化物和污物的同时，克服连接界面的不平，或使之产生局部塑性变形，使两个连接表面的原子相互紧密接触，并产生足够大的结合力。如果在加力的同时加热，结合过程更容易进行。

- 3) 对填充材料加热使之熔化，利用液态填充材料对固态母材润湿，使液-固界面的原子紧密接触，相互扩散，产生足够大的结合力从而实现连接。

以上三项措施正是熔焊、压焊和钎焊方法能够实现永久性连接的基本原理。

## 1.3 焊接科学的研究领域和发展趋势

焊接科学的发展依托于冶金学、物理学和能源科学的发展，形成了数十种各具特点的焊

接方法,如电弧焊、高能束焊、固相焊和钎焊等。不同的焊接热源作用于不同材质的结构,产生了不同的热力学、冶金学和力学相互交叉的焊接过程,形成了独具特色的焊接物理学、焊接冶金学、焊接结构力学和焊接自动控制等理论分支,并由此指导焊接工艺、焊接设备和焊接结构的发展,形成了一个完整的有科学基础、有广泛应用、有广阔前景的焊接科学体系。

焊接科学涉及的领域至少包括如下几个方面:焊接能源物理学、焊接冶金学与材料焊接性、焊接结构力学、焊接设备及自动控制、焊接质量控制,以及焊接工艺与组织性能的关系等基础理论的集合。

(1) 焊接能源物理学 包括各种能源的本质、在焊接过程中的作用及应用范围。焊接能源的应用非常广泛,例如化学反应产生的热源、光学和电子学热源(激光、电子束)、电能(电弧和电阻热)和机械能(摩擦热)等,可衍生出很多新的焊接方法、设备及工艺。这些能源的加热温度、集中程度和保护状态等影响着焊接质量和应用,因此焊接能源物理学是研发焊接工艺和设备的理论基础。

(2) 焊接冶金学与材料焊接性 以物理化学、材料科学原理为基础,研究材料在焊接条件下有关化学冶金和物理冶金方面的普遍规律,如焊接成形本质、焊缝化学冶金、热影响区组织性能、焊接缺欠的形成与防止等。在这个基础上分析各种条件下材料的焊接性,为制订合理的焊接工艺、探索高焊接质量的新途径提供理论依据。特别是从焊接角度研究材料的基本特性(包括焊接性、焊接工艺、焊接材料等),阐明材料的焊接性和材料焊接的基本理论和概念,分析不同材料的焊接特点和工艺要点。针对具体材料,研究焊接材料选择和制订焊接工艺的基本原则及方法。

(3) 焊接结构力学 焊接结构是指以焊接作为主要连接手段的工程结构,具有强韧性匹配好、接头密封性好等优点,广泛用于建筑钢结构、船舶、车辆及压力容器等。由于焊接温度场的不均匀性,焊接结构还存在应力、应变和变形问题。焊接力学是研究焊接结构接头区的焊接应力与变形及焊接结构的刚度、强韧性和稳定性、断裂等力学行为的理论基础。因此,焊接结构力学已成为焊接结构设计、焊接工艺制订、接头应力消除、结构变形控制的理论基础,为保证焊接结构的安全运行提供了科学依据。

(4) 焊接设备及自动控制 焊接控制包括多方面的内容,例如焊接热(能)源控制是指对焊接设备性能和特性的控制;焊接参数的柔性化和智能化控制是指对焊接生产过程执行和协调的控制;焊接过程自动控制是指对焊接过程稳定性和变化规律的自适应控制;焊接系统控制是指对整个焊接系统的综合和集中控制。通过焊接控制使得焊接全过程的智能化和自动化过程稳定,例如焊接机器人、轻便组合式智能焊接设备和低成本焊接自动化设备等的研究和应用,这对提高焊接质量和生产效率有关键的作用。

(5) 焊接质量与性能控制 焊接质量与性能控制在生产中是一个很重要的方面,特别是锅炉及压力容器、电力管道、石油化工管线、船舶制造等,保证装备正常运行涉及社会和企业的的生产安全。当今焊接结构和装备不断向大型化、重型化和高参数方向发展,这对焊接质量提出了越来越严格的要求,并以设计规范、制造法规或规程等形式,对生产企业的焊接质量控制和质量管理做出了科学的强制性规定。了解焊接质量体系的建立和运行、焊接工艺规程、焊接工艺评定以及焊接资质与认证等,掌握焊接质量与性能控制的基本技术要点,对保证焊接工程质量是十分必要的。

应当指出,所谓“性能”是指材料在焊接条件下的表现,包括环境因素、结构力学、焊接应力、整体结构寿命评价等。焊接科学的多学科性和跨学科性,使得上述焊接学科分支的界限并不十分明显,而且还在不断地演化。焊接科学与工程提供了一个良好的环境,使更多的学科有目的地联合起来去解决一个“焊接方面”的课题,这个课题可以是基础研发方面的,也可以是应用方面的。

焊接科学与工程具有以下几个特点:

- 1) 焊接科学与工程是多学科交叉的新型学科,需要广阔而坚实的理论基础。
- 2) 焊接科学与工程技术有不可分割的关系。
- 3) 焊接科学与工程有很强的应用目的、针对性和明确的应用背景。

焊接科学与工程发展到现代,已经不是一个科学家、发明家的个人行为,而是一项多学科、多领域融合的系统工程。焊接科学的重大使命就是要大力提高自主创新能力,在不断吸纳世界先进制造技术最新成就的同时,以可持续的创新发展为目标,向机械化、自动化、信息化、智能化、生态化方向前进。

经过 20 世纪的快速发展,焊接制造科学与工程作为现代工业中的一个重要环节和其他相关制造技术领域一样,以趋于成熟的体系进入了 21 世纪:即从手工制造向机械化、自动化、信息化、智能化制造方向发展,这标志着焊接科学与工程进入了一个崭新的发展时期。

## 1.4 焊接技术的应用前景

自古以来,人们都要把材料结合成一种结构才能更好地使用。因此,材料和结合手段就一直密不可分,而且彼此相互促进,不断发展。20 世纪初,电弧技术用于钢铁产品,促使焊接和钢结构出现了质的飞跃。进入 21 世纪仅短短十几年,我国钢产量已突破 5 亿 t,成为了世界第一产钢大国。钢的品种和质量迅速发展和提高,新型材料不断涌现,材料加工人员、焊接工作者的任务将更加突出。

### 1.4.1 不同材料焊接的应用

#### 1. 钢结构的焊接应用

“二战”时期,美国在制造钢船结构时用焊接大量代替了铆接,以至于“二战”结束后,美国海军的总结报告中说:“若没有焊接,就不可能在这样短的时间内建造这样一支为赢得这场战争起到重要作用的庞大舰队。”材料焊接的重要性还可以延伸到其他装备,例如坦克、载重汽车、飞机及航天器等。

先进的工业化国家都非常重视钢铁材料的研究和开发。合金结构钢近 30 年来受到世界各国的普遍重视,并仍将成为今后 20~30 年材料应用发展的基本方向。

在大量的工程结构中,目前金属材料仍处于主导地位,而且一直在不断地发展和更新,如超高强度钢、双相不锈钢、新型耐热钢等。合金结构钢综合性能优异,经济效益显著,是焊接结构中用量最大的一类工程材料。钢结构的应用范围广泛,涉及国民经济和国防建设的各个领域。尽管在一些发达国家中钢铁材料的主导地位正在发生变化,但钢铁材料在今后很长一个历史时期内仍将作为一种主要的工程材料发挥其重要作用。

## 2. 有色金属的焊接应用

有色金属的种类和品种很多，在制造业和社会经济发展中的应用十分广泛。当前全世界金属材料的总产量约8亿t，其中有色金属材料约占5%，处于补充地位，但有色金属的特殊作用却是钢铁材料无法代替的。随着科学技术进步和社会经济的发展，有色金属的应用越来越广泛，从原来的航空航天部门逐渐扩展到电子、信息、汽车、交通、轻工、医疗器械等领域。有色金属焊接结构也引起人们越来越多的关注。地壳中含量很高的铝、镁均为有色金属，其他有色金属还有铜、钛、锌、锡、镍、钼等，涉及结构材料、功能材料、环境保护材料和生物材料等。

有色金属及合金的分类方法很多，按基体金属可分为铝合金、镁合金、钛合金、镍合金等。近年来，随着航空航天事业的发展，以及现代交通工具（如高速列车、舰船、汽车等）轻量化的战略要求，镁合金和钛合金等轻质材料的焊接受到人们的关注。目前，轻金属的焊接应用几乎涉及国民经济和国防建设的所有领域。针对轻金属的焊接方法包括氩弧焊（TIG、MIG/MAG）、搅拌摩擦焊、激光焊、电子束焊等，大多实现了机械化或自动化的焊接生产。

## 3. 先进材料的焊接应用

先进材料是指除常规钢铁材料和有色金属之外已经开发或正在开发的具有特殊性能和用途的材料，如新型陶瓷、金属间化合物和复合材料等。先进材料的开发和应用是发展高新技术的重要物质基础，新材料和先进材料的研究开发是多学科相互渗透的结果，世界各发达国家都对先进材料的研究和开发应用非常重视。焊接技术对其推广应用起着至关重要的作用。

先进材料根据其使用性能可分为结构材料和功能材料。随着航空航天、新能源、电力等工业的发展，人们对材料的性能提出了越来越高的要求。开发适于在特殊条件下使用的先进材料是科学技术发展的趋势之一，而先进结构材料的发展是其中重要的组成部分。许多高性能新型结构材料主要是为开发能源、海洋，发展空间技术、交通运输以及冶金、电力、石化等工业需求而研制的，这些材料具有高强度、高韧性、耐高温、抗腐蚀等优点。

工程中经常涉及的先进材料主要包括先进陶瓷、金属间化合物、高温合金、复合材料等。这些材料的一个共同特点是硬度高、塑性和韧性差，焊接中极易产生裂纹，采用常规的熔焊方法很难对这类材料进行焊接。因此，先进材料的焊接与高新技术的发展密切相关，而且有独特的和难以替代的作用。针对先进材料的焊接方法主要是真空扩散焊、激光-电弧复合焊、电子束焊等。

## 1.4.2 先进焊接技术的应用

### 1. 高能束焊接

高能束流由单一的光子、电子和离子或两种以上的粒子组合而成，目前用在焊接领域的高能束流主要是激光束、电子束和等离子弧。高能束焊接的功率密度达到 $10^5 \text{ W/cm}^2$ 以上。属于高能束的焊接热源有等离子弧、电子束、激光束、复合热源（激光束+电弧）等。当前高能束焊接被关注的主要领域是：高能束设备的大型化（如功率大型化及可加工零件的大型化）、设备的智能化以及加工的柔性化、高能束品质的提高、高能束的复合及相互作用、新材料焊接及应用领域的扩展等。

高能束加工技术被誉为“21世纪最有希望的加工技术”，被认为“将为材料加工和制造技术带来革命性变化”，是当前发展最快、研究最多的技术领域。高能束焊接越来越引起

更多国内外相关人士（如物理、材料、计算机等领域）的关注。国内在高能束设备制造水平上与国外有一定差距，但在高能束工艺研究水平上较为接近，有自己的特色。

高能束焊接技术的特点是焊接时产生“小孔效应”（见图1-1），焊接熔深比热传导焊接方法显著提高。高能束加工技术在高技术及国防科技的发展中起着无可替代的作用。表1-1是高能束加工技术的特点及其应用领域。

由于有上述优势，高能束焊接技术可以焊接难熔合和难焊接的材料，并且具有较高的生产率。

在核工业、航空航天、汽车等工业部门得到广泛的应用。并且，随着高能束焊接技术的不断推广，也被越来越多的工业部门所选用。

高能束焊接设备向大型化发展有两层含义：一是设备的功率增大；二是采用该设备焊接的零件大型化。由于高能束焊接设备一次性投资大，特别是激光焊和电子束焊设备，因此增大功率，提高熔深和焊接过程的稳定性，可以相对降低焊接成本，这样高能束焊接设备才能为工业界所接受。大型焊接设备建立之后，高能束焊接的成本可以进一步降低，有利于在军用、民用各个工业领域中扩大应用。

高能束焊接的优势很明显，但目前高能束焊接的成本仍较高。因此以激光为核心的复合焊接技术受到人们的关注。事实上，激光-电弧复合焊接技术在20世纪70年代就已经提出，然而稳定的加工应用直至近几年才出现，这主要得益于激光技术以及电弧焊设备的发展，尤其是激光功率和电弧控制技术的提高。

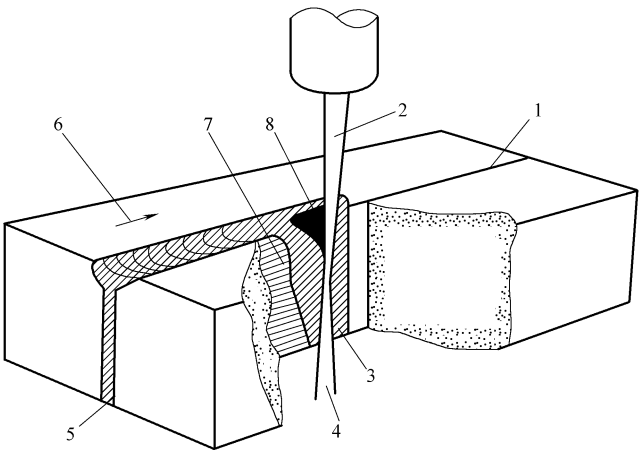


图1-1 高能束焊接过程的“小孔效应”  
1—紧密对接线 2—高能束流 3—熔融金属 4—穿过小孔  
的能量 5—全熔透的焊缝 6—焊接方向  
7—凝固的焊缝 8—液态金属

表1-1 高能束加工技术的特点及应用领域

| 特点        | 用途               | 适用性                         | 产品示例                                             |
|-----------|------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|
| 穿透性       | 重型结构的焊接          | 一次可焊透<br>300mm              | 核装置、压力容器、反应堆、核潜艇、飞行器、运载火箭、空间站、航天飞机、重武器、坦克、火炮、厚壁件 |
| 精密控制、微焦点  | 微电子与精密器件制造       | —                           | 超大规模集成元器件、结点、航天（空、海）仪表、膜盒、精密陀螺、核燃料棒封装            |
| 高能密度、高速扫描 | 特殊功能结构件制造        | 扫描速度<br>$10^3$ 个孔/s, 400m/s | 动力装置封严、高温耐磨涂层、沉积层、切割、气膜冷却层板结构、小孔结构、高温部件          |
| 全方位加工     | 特殊环境加工制造         | —                           | 太空及微重力条件、真空、充气、水下及高压条件                           |
| 高速加热、快速冷却 | 新型材料制备、特殊及异种材料连接 | 加热速度<br>$10^5$ K/s          | 超高纯材料冶炼、超细材料、非金属复合材料、陶瓷、表面改性、合成、非晶态、快速成形、立体制造    |

激光-电弧复合焊接主要是采用激光与钨极氩弧、等离子弧以及活性电弧的复合。通过激光与电弧的相互作用，可克服每一种焊接方法自身的不足，进而产生良好的复合效应。激