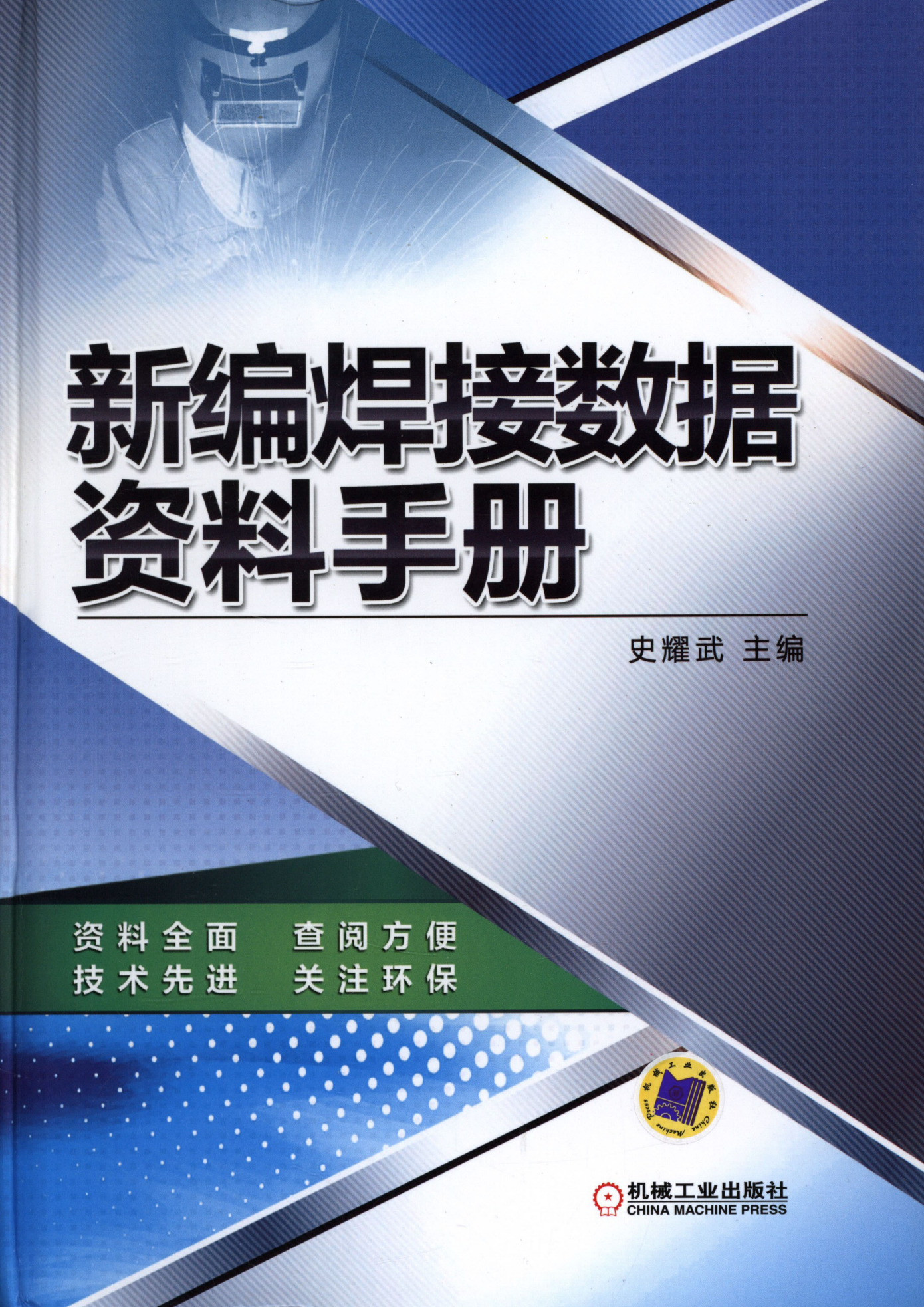


The background of the cover features a welder in protective gear, with bright sparks emanating from the welding point. The design is modern with diagonal lines and a blue-to-white gradient.

# 新编焊接数据 资料手册

史耀武 主编

资料全面 查阅方便  
技术先进 关注环保



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 新编焊接数据资料手册

主编 史耀武

参编 (按章节顺序排列)

|     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 雷永平 | 林 健 | 张元彬 | 罗 辉 | 霍玉双 | 刘 鹏 | 李晓延 |
| 栗卓新 | 陈树君 | 闫志鸿 | 刘 嘉 | 黄鹏飞 | 于 洋 | 肖荣诗 |
| 吴世凯 | 白韶军 | 唐 伟 | 李亚江 | 王 娟 | 吴 娜 | 魏守征 |
| 蒋力培 | 朱锦洪 | 俞建荣 | 杨德宇 | 王中辉 | 黄继强 | 薛 龙 |
| 邹 勇 | 史耀武 | 夏志东 | 李 辉 | 赵海燕 | 鲁 立 | 张建勋 |
| 陈振华 | 王智慧 |     |     |     |     |     |



机械工业出版社



本书收集了焊接与切割工程及科研中常用的资料数据,注重反映我国高端装备制造业和重大工程的需求,特别涉及汽车、建筑钢结构等支柱产业以及能源工程、轨道交通、船舶与海洋工程、长输管线、航空航天及军工装备制造业对焊接技术的需求。在保留传统焊接技术数据的同时还收集了高效电弧焊、高能束焊、搅拌摩擦焊、等离子弧切割、火焰数控切割、激光切割等先进技术的资料,以及高强韧钢、耐候钢、耐热钢、特种钢、新型不锈钢及铝、镁、钛轻金属合金的焊接性及高端绿色焊材的数据。同时反映了近年来优质高效、节能环保焊接新技术及新材料的进步。

本书主要供焊接工程技术人员、科研人员、焊接操作人员和大专院校师生使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

新编焊接数据资料手册/史耀武主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-111-45436-6

I. ①新… II. ①史… III. ①焊接-数据-技术手册 IV. ①TG4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 009284 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: 吕德齐 责任编辑: 吕德齐 版式设计: 霍永明  
责任校对: 刘志文 陈延翔 封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 68.75 印张 · 2 插页 · 2359 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-45436-6

定价: 218.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

网络服务

电话服务

策划编辑电话: (010) 88379732

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

# 前 言

本书是一部焊接工具书，以丰富的焊接数据、资料图表，反映了近十余年焊接技术的新进展。本书注重反映我国高端装备制造业和重大工程的需求，特别涉及汽车、建筑钢结构等支柱产业以及能源工程、轨道交通、船舶与海洋工程、长输管线、航空航天及军工装备制造业对焊接技术的需求。书中对传统焊接技术仍保留足够篇幅，同时收集了高效电弧焊、高能束焊、搅拌摩擦焊等先进焊接技术的资料、数据。为反映以低碳、洁净、细晶、强韧度为特征的新钢种推广应用，还收集了诸如高强韧钢、耐候钢、耐热钢、特种钢、新型不锈钢以及铝、镁、钛轻金属合金的焊接性及在高端绿色焊材领域的新资料。由于近年来大量新材料和新结构的采用，焊接装备机械化、自动化和信息化进展明显。俗称“钢铁裁缝”的焊接离不开切割技术，等离子弧切割、火焰数控切割已广泛应用，激光切割备受关注。同时，焊接结构制造也面临能耗高、材料利用率低和资源与环境的压力，因此本书还反映了近年来优质高效、节能环保焊接新技术及新材料的进步。

我国钢铁年产量已超过7亿t，近50%的钢材需要焊接加工，焊接技术已渗透到制造业各个领域。尽管焊接技术水平与发达国家还有一定差距，但是我国已是焊接制造大国，在生产和科研实践的基础上形成了丰富、宝贵的数据资料，焊接数据的不断积累和及时总结，对焊接技术和知识的传承与发展有重要价值。同时，编者也注意收集国外的先进焊接数据，供国内焊接工作者参考。

本书由北京工业大学史耀武主编并统稿。第1章由北京工业大学雷永平负责并编写1.3至1.5节，林健编写1.1节和1.2节及1.6~1.8节。第2章由山东建筑大学张元彬、罗辉、霍玉双、刘鹏编写。第3章由北京工业大学李晓延编写。第4章由北京工业大学栗卓新编写。第5章由北京工业大学陈树君负责并编写5.4和5.5节，闫志鸿编写5.1和5.9节，刘嘉编写5.2节，黄鹏飞编写5.3节，于洋参加编写5.4节，肖荣诗、吴世凯编写5.6节，白韶军编写5.7节，美国南卡罗来纳大学唐伟编写5.8节。第6章由山东大学李亚江、王娟、吴娜、魏守征编写。第7章由北京石油化工学院蒋力培负责，俞建荣、杨德宇编写7.3节，王中辉编写7.4节，黄继强编写7.5和7.7节，薛龙、邹勇编写7.6节，河南科技大学朱锦洪编写7.1和7.2节。第8章由史耀武、夏志东编写。第9章由北京工业大学李辉编写。第10章由清华大学赵海燕、鲁立编写。第11章由西安交通大学张建勋负责并编写11.3和11.4节，南昌航空大学陈振华编写11.1和11.2节，北京工业大学王智慧编写11.5节。附录由史耀武编写。

本书主要供工程技术人员、管理人员、焊接操作人员和大专院校师生使用。由于编写水平有限，书中难免存在缺欠，恳切读者提出批评和建议。

编 者

# 目 录

## 前言

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第1章 焊接成形              | 1  |
| 1.1 焊接方法与分类           | 1  |
| 1.2 焊接方法与热源特征         | 9  |
| 1.2.1 常用焊接方法的热源特性     | 9  |
| 1.2.2 常用焊接方法的热源       | 10 |
| 1.3 焊接热循环             | 11 |
| 1.3.1 焊接热循环及其特征       | 11 |
| 1.3.2 焊接热循环特征参数       | 12 |
| 1.3.3 多层焊的焊接热循环       | 12 |
| 1.4 焊接热作用的特点与温度场描述    | 15 |
| 1.4.1 焊接热作用特点         | 15 |
| 1.4.2 焊接温度场           | 15 |
| 1.4.3 热传播的基本定律        | 15 |
| 1.5 焊接温度场的计算          | 16 |
| 1.5.1 影响焊接温度场的因素      | 16 |
| 1.5.2 焊接温度场的解析求解      | 17 |
| 1.5.3 焊接温度场的数值求解      | 20 |
| 1.6 熔池形状与焊缝成形         | 43 |
| 1.6.1 熔池形状            | 43 |
| 1.6.2 焊缝形状            | 43 |
| 1.6.3 钢结构焊缝外形尺寸要求     | 44 |
| 1.7 焊接方法和工艺条件对焊缝成形的影响 | 47 |
| 1.7.1 焊条电弧焊           | 47 |
| 1.7.2 埋弧焊             | 48 |
| 1.7.3 熔化极气体保护焊        | 51 |
| 1.7.4 活性化钨极氩弧焊        | 52 |
| 1.7.5 等离子弧焊           | 55 |
| 1.7.6 电子束焊            | 55 |
| 1.7.7 激光焊             | 55 |
| 1.8 焊接成形工艺缺陷          | 63 |
| 1.8.1 产生焊接成形工艺缺陷的主要因素 | 63 |
| 1.8.2 焊接成形工艺缺陷质量分级的限值 | 63 |
| 1.8.3 压焊接头各类焊接工艺缺欠    | 67 |
| 参考文献                  | 70 |
| 第2章 材料焊接性             | 72 |
| 2.1 焊接热影响区的显微组织       | 72 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 2.1.1 焊接热影响区的组织分布      | 72  |
| 2.1.2 焊接冷却时间及计算        | 73  |
| 2.1.3 焊接热影响区性能评价       | 76  |
| 2.1.4 焊接热影响区热模拟        | 78  |
| 2.2 典型材料焊缝组织           | 80  |
| 2.2.1 低碳钢焊缝组织          | 80  |
| 2.2.2 低合金结构钢焊缝组织       | 81  |
| 2.2.3 不锈钢焊缝组织          | 83  |
| 2.3 焊接裂纹               | 88  |
| 2.3.1 热裂纹              | 90  |
| 2.3.2 冷裂纹              | 92  |
| 2.3.3 再热裂纹             | 97  |
| 2.3.4 层状撕裂             | 97  |
| 2.3.5 应力腐蚀裂纹           | 99  |
| 2.4 焊接性评价方法            | 99  |
| 2.4.1 焊接性概述            | 99  |
| 2.4.2 焊接性试验内容          | 99  |
| 2.4.3 焊接性试验方法分类        | 100 |
| 2.4.4 选择或设计焊接性试验方法的原则  | 100 |
| 2.4.5 常用工艺焊接性试验方法      | 100 |
| 2.4.6 焊接热(应力、应变)模拟试验方法 | 119 |
| 2.4.7 使用焊接性的试验方法       | 121 |
| 参考文献                   | 123 |
| 第3章 焊接接头设计             | 124 |
| 3.1 焊接接头的构成与基本形式       | 124 |
| 3.1.1 焊接接头的构成及其组织与力学性能 | 124 |
| 3.1.2 焊接接头的基本形式        | 125 |
| 3.2 焊缝及坡口的设计与表达        | 126 |
| 3.2.1 焊缝的工程标注          | 126 |
| 3.2.2 焊接接头坡口设计         | 133 |
| 3.3 焊接接头的静载强度设计        | 161 |
| 3.3.1 焊接接头静载强度设计原则     | 161 |
| 3.3.2 熔焊接头的静载强度设计      | 161 |
| 3.3.3 点焊和缝焊接头的静载强度设计   | 164 |
| 3.4 焊接接头疲劳设计           | 166 |
| 3.4.1 焊接构件应力确定方法       | 166 |
| 3.4.2 疲劳分析方法           | 169 |

|                                   |            |                                  |            |
|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| 3.4.3 疲劳分析方法的选择 .....             | 170        | 5.4.3 电阻焊的电极材料 .....             | 311        |
| 3.4.4 焊接接头疲劳设计 .....              | 171        | 5.4.4 点焊 .....                   | 311        |
| 3.4.5 焊接构件疲劳试验 .....              | 186        | 5.4.5 缝焊 .....                   | 327        |
| 参考文献 .....                        | 192        | 5.4.6 凸焊 .....                   | 330        |
| <b>第4章 焊接材料</b> .....             | <b>193</b> | 5.4.7 电阻对焊 .....                 | 333        |
| 4.1 焊条 .....                      | 193        | 5.4.8 闪光对焊 .....                 | 333        |
| 4.1.1 焊条分类 .....                  | 193        | 5.5 非熔化极气体保护焊 .....              | 335        |
| 4.1.2 焊条的组成 .....                 | 193        | 5.5.1 钨极惰性气体保护焊 .....            | 335        |
| 4.1.3 焊条的型号与性能 .....              | 196        | 5.5.2 等离子弧焊 .....                | 352        |
| 4.1.4 焊条的选用和用量计算 .....            | 219        | 5.6 激光焊 .....                    | 367        |
| 4.1.5 焊条检验 .....                  | 220        | 5.6.1 激光焊概述 .....                | 367        |
| 4.1.6 焊条的保管和使用 .....              | 222        | 5.6.2 激光焊系统 .....                | 367        |
| 4.2 焊丝 .....                      | 223        | 5.6.3 金属材料对激光的吸收 .....           | 369        |
| 4.2.1 焊丝的分类、型号和牌号 .....           | 223        | 5.6.4 金属材料的激光焊 .....             | 371        |
| 4.2.2 焊丝的检验和保管 .....              | 229        | 5.6.5 激光焊焊接参数的选择 .....           | 373        |
| 4.2.3 焊丝的选用 .....                 | 244        | 5.6.6 几种金属材料的激光焊工艺 .....         | 376        |
| 4.3 焊剂 .....                      | 245        | 5.7 电子束焊 .....                   | 380        |
| 4.3.1 焊剂的分类及质量要求 .....            | 245        | 5.7.1 电子束焊分类 .....               | 380        |
| 4.3.2 焊剂的牌号和型号 .....              | 249        | 5.7.2 电子束焊的准备 .....              | 381        |
| 4.3.3 焊剂的主要成分、性能及应用<br>特点 .....   | 251        | 5.7.3 电子束焊接参数的选择 .....           | 383        |
| 参考文献 .....                        | 260        | 5.7.4 常用材料电子束焊的焊接性 .....         | 386        |
| <b>第5章 焊接工艺技术</b> .....           | <b>262</b> | 5.7.5 电子束焊的焊缝缺陷 .....            | 390        |
| 5.1 焊条电弧焊 .....                   | 262        | 5.7.6 电子束焊的应用 .....              | 391        |
| 5.1.1 焊接位置 .....                  | 262        | 5.8 摩擦焊 .....                    | 391        |
| 5.1.2 焊接参数 .....                  | 262        | 5.8.1 旋转摩擦焊 .....                | 391        |
| 5.1.3 热输入 .....                   | 262        | 5.8.2 搅拌摩擦焊 .....                | 403        |
| 5.1.4 焊接操作技术 .....                | 262        | 5.8.3 线性摩擦焊 .....                | 423        |
| 5.2 埋弧焊 .....                     | 265        | 5.9 其他焊接方法 .....                 | 430        |
| 5.2.1 埋弧焊分类 .....                 | 265        | 5.9.1 螺柱焊 .....                  | 430        |
| 5.2.2 埋弧焊焊接条件 .....               | 265        | 5.9.2 水下焊接 .....                 | 432        |
| 5.2.3 焊接参数选择 .....                | 270        | 参考文献 .....                       | 439        |
| 5.2.4 高效埋弧焊 .....                 | 273        | <b>第6章 各种材料的焊接</b> .....         | <b>442</b> |
| 5.3 熔化极气体保护焊 .....                | 278        | 6.1 碳素结构钢的焊接 .....               | 442        |
| 5.3.1 概述 .....                    | 278        | 6.2 低合金高强度钢的焊接 .....             | 447        |
| 5.3.2 CO <sub>2</sub> 气体保护焊 ..... | 279        | 6.2.1 低合金结构钢的成分和性能 .....         | 447        |
| 5.3.3 MAG/MIG 焊 .....             | 282        | 6.2.2 低合金高强度钢的焊接性 .....          | 452        |
| 5.3.4 STT 焊接工艺 .....              | 296        | 6.2.3 低合金高强度钢焊接工艺及焊接<br>参数 ..... | 456        |
| 5.3.5 CMT 焊接工艺 .....              | 299        | 6.3 低合金调质钢的焊接 .....              | 462        |
| 5.3.6 TIME 焊接工艺 .....             | 300        | 6.3.1 化学成分和力学性能 .....            | 462        |
| 5.3.7 双丝焊焊接工艺 .....               | 302        | 6.3.2 低合金调质钢的焊接性 .....           | 462        |
| 5.3.8 窄间隙 MIG 焊 .....             | 307        | 6.3.3 低碳调质钢的焊接工艺 .....           | 470        |
| 5.4 电阻焊 .....                     | 310        | 6.3.4 中碳调质钢的焊接 .....             | 481        |
| 5.4.1 电阻焊类型 .....                 | 310        | 6.4 低合金耐热钢和低温钢的焊接 .....          | 486        |
| 5.4.2 金属材料电阻焊的焊接性 .....           | 310        | 6.4.1 低合金耐热钢的焊接 .....            | 486        |

|                           |     |                         |     |
|---------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 6.4.2 低温钢的焊接 .....        | 496 | 7.4 电阻焊设备 .....         | 726 |
| 6.5 不锈钢的焊接 .....          | 502 | 7.4.1 电阻焊设备的分类 .....    | 726 |
| 6.5.1 奥氏体不锈钢的焊接 .....     | 502 | 7.4.2 电阻焊设备的组成 .....    | 728 |
| 6.5.2 铁素体不锈钢的焊接 .....     | 513 | 7.4.3 电阻焊机的供电装置 .....   | 728 |
| 6.5.3 马氏体不锈钢的焊接 .....     | 523 | 7.4.4 电阻点焊机 .....       | 730 |
| 6.5.4 双相不锈钢的焊接 .....      | 531 | 7.4.5 电阻凸焊机 .....       | 736 |
| 6.6 有色金属的焊接 .....         | 540 | 7.4.6 电阻缝焊机 .....       | 737 |
| 6.6.1 铝及铝合金的焊接 .....      | 540 | 7.4.7 电容储能缝焊机、点焊机 ..... | 741 |
| 6.6.2 镁及镁合金的焊接 .....      | 554 | 7.4.8 电阻对焊机 .....       | 741 |
| 6.6.3 钛及钛合金的焊接 .....      | 563 | 7.4.9 电阻焊机的选用 .....     | 744 |
| 6.7 高温合金的焊接 .....         | 579 | 7.5 激光焊和电子束焊设备 .....    | 745 |
| 6.7.1 高温合金的成分与性能 .....    | 579 | 7.5.1 激光焊设备 .....       | 745 |
| 6.7.2 高温合金的焊接性 .....      | 585 | 7.5.2 电子束焊设备 .....      | 759 |
| 6.7.3 高温合金焊接工艺 .....      | 586 | 7.6 焊接自动化装备 .....       | 768 |
| 6.8 陶瓷与金属的连接 .....        | 591 | 7.6.1 通用型自动焊机 .....     | 768 |
| 6.8.1 陶瓷材料的组成与性能 .....    | 591 | 7.6.2 专用型自动焊装备 .....    | 770 |
| 6.8.2 陶瓷与金属的连接特点 .....    | 593 | 7.6.3 焊接机器人 .....       | 796 |
| 6.8.3 陶瓷与金属的扩散焊 .....     | 598 | 7.6.4 焊接变位设备 .....      | 826 |
| 6.9 铸铁的焊接 .....           | 604 | 7.6.5 焊接传感器与摆动器 .....   | 842 |
| 6.9.1 铸铁材料 .....          | 604 | 7.6.6 焊接自动化辅助工装夹具 ..... | 857 |
| 6.9.2 铸铁的焊接工艺 .....       | 607 | 7.7 其他焊接设备 .....        | 863 |
| 6.10 异种材料的焊接 .....        | 610 | 7.7.1 螺柱焊设备 .....       | 863 |
| 6.10.1 异种金属连接的特点 .....    | 610 | 7.7.2 超声波焊接设备 .....     | 871 |
| 6.10.2 异种钢的焊接 .....       | 614 | 7.7.3 摩擦焊设备 .....       | 876 |
| 6.10.3 异种有色金属的焊接 .....    | 623 | 参考文献 .....              | 885 |
| 6.10.4 复合钢的焊接 .....       | 628 | <b>第8章 钎焊</b> .....     | 887 |
| 6.10.5 钢与有色金属的焊接 .....    | 631 | 8.1 钎焊方法 .....          | 887 |
| 参考文献 .....                | 637 | 8.2 钎料 .....            | 897 |
| <b>第7章 焊接装备与自动化</b> ..... | 639 | 8.2.1 软钎料 .....         | 897 |
| 7.1 弧焊电源 .....            | 639 | 8.2.2 硬钎料 .....         | 903 |
| 7.1.1 弧焊电源的分类 .....       | 639 | 8.3 钎剂 .....            | 920 |
| 7.1.2 弧焊电源的主要特性 .....     | 641 | 8.3.1 软钎剂 .....         | 920 |
| 7.1.3 弧焊电源的原理 .....       | 641 | 8.3.2 硬钎剂 .....         | 927 |
| 7.1.4 焊条电弧焊电源 .....       | 644 | 8.4 钎焊接头设计 .....        | 928 |
| 7.1.5 埋弧焊电源 .....         | 649 | 8.5 钎焊试验方法 .....        | 931 |
| 7.2 埋弧焊设备 .....           | 653 | 8.5.1 钎焊润湿性能试验方法 .....  | 931 |
| 7.2.1 埋弧焊设备的组成与分类 .....   | 653 | 8.5.2 钎焊接头强度试验方法 .....  | 932 |
| 7.2.2 典型埋弧焊设备 .....       | 655 | 8.5.3 无铅软钎料试验方法 .....   | 935 |
| 7.2.3 埋弧焊配套设备 .....       | 661 | 参考文献 .....              | 940 |
| 7.3 气体保护焊设备 .....         | 667 | <b>第9章 热切割</b> .....    | 941 |
| 7.3.1 钨极惰性气体保护焊设备 .....   | 667 | 9.1 热切割方法 .....         | 941 |
| 7.3.2 熔化极气体保护焊设备 .....    | 677 | 9.2 气割 .....            | 943 |
| 7.3.3 等离子弧焊设备 .....       | 695 | 9.2.1 各种燃气的物理化学性质 ..... | 943 |
| 7.3.4 高效气体保护弧焊设备 .....    | 705 | 9.2.2 常见材料的气割性 .....    | 944 |
| 7.3.5 气体保护焊设备的选用 .....    | 719 | 9.2.3 割炬 .....          | 945 |

|                             |      |                                   |      |
|-----------------------------|------|-----------------------------------|------|
| 9.2.4 气割的主要工艺因素 .....       | 946  | 10.6 焊接应力与变形的降低或消除 .....          | 1010 |
| 9.2.5 气割工艺 .....            | 948  | 10.6.1 焊接变形的降低或消除 .....           | 1010 |
| 9.2.6 气割质量 .....            | 950  | 10.6.2 焊接残余应力的降低或消除 .....         | 1012 |
| 9.3 碳弧气刨 .....              | 953  | 参考文献 .....                        | 1013 |
| 9.3.1 碳弧气刨设备 .....          | 953  | <b>第 11 章 焊接质量与管理</b> .....       | 1015 |
| 9.3.2 碳弧气刨工艺 .....          | 955  | 11.1 焊接缺陷 .....                   | 1015 |
| 9.4 等离子弧切割 .....            | 958  | 11.1.1 焊接缺陷及其特征 .....             | 1015 |
| 9.4.1 等离子弧切割特点 .....        | 958  | 11.1.2 焊接缺陷的危害及对质量的<br>影响 .....   | 1021 |
| 9.4.2 等离子弧切割气体与电极 .....     | 959  | 11.2 焊接无损检测 .....                 | 1021 |
| 9.4.3 等离子弧切割工艺 .....        | 960  | 11.2.1 目视检测 .....                 | 1021 |
| 9.4.4 等离子弧切割质量 .....        | 964  | 11.2.2 射线检测 .....                 | 1023 |
| 9.5 激光切割 .....              | 966  | 11.2.3 超声检测 .....                 | 1031 |
| 9.5.1 激光切割原理与特点 .....       | 966  | 11.2.4 渗透检测 .....                 | 1038 |
| 9.5.2 激光切割设备与工艺 .....       | 966  | 11.2.5 磁粉检测 .....                 | 1041 |
| 9.5.3 激光切割质量及影响因素 .....     | 973  | 11.2.6 无损检测方法的选用 .....            | 1043 |
| 9.6 水下切割 .....              | 977  | 11.3 焊接接头强度试验方法 .....             | 1044 |
| 9.6.1 水下切割方法 .....          | 977  | 11.3.1 焊缝及熔敷金属拉伸性能检测 ..           | 1046 |
| 9.6.2 水下切割工艺 .....          | 979  | 11.3.2 焊接接头拉伸性能检测 .....           | 1046 |
| 参考文献 .....                  | 984  | 11.3.3 焊接接头弯曲及压扁性能检测 ..           | 1047 |
| <b>第 10 章 焊接应力与变形</b> ..... | 985  | 11.3.4 焊接接头冲击试验 .....             | 1050 |
| 10.1 金属的高温性能 .....          | 985  | 11.3.5 焊接接头硬度测试试验 .....           | 1052 |
| 10.2 焊接变形与应力的测量 .....       | 986  | 11.4 焊接从业人员与工艺信息化管理 .....         | 1054 |
| 10.2.1 焊接变形的测量 .....        | 986  | 11.4.1 焊接工艺设计与管理系统 .....          | 1054 |
| 10.2.2 焊接残余应力的测量 .....      | 987  | 11.4.2 焊工培训与档案管理数据库<br>系统 .....   | 1056 |
| 10.3 焊接变形的估算 .....          | 988  | 11.4.3 焊接生产与质量信息管理数据库<br>系统 ..... | 1057 |
| 10.3.1 焊接变形的分类 .....        | 988  | 11.4.4 焊接标准和知识咨询数据库<br>系统 .....   | 1058 |
| 10.3.2 横向变形的估算 .....        | 988  | 11.4.5 现代焊接教育与培训模式 .....          | 1059 |
| 10.3.3 纵向变形的估算 .....        | 991  | 11.4.6 焊工技术档案管理系统开发 .....         | 1060 |
| 10.3.4 弯曲变形的估算 .....        | 992  | 11.5 焊接安全与卫生 .....                | 1062 |
| 10.3.5 角变形的估算 .....         | 992  | 11.5.1 概述 .....                   | 1062 |
| 10.4 焊接残余应力的典型分布 .....      | 996  | 11.5.2 焊接安全与卫生标准 .....            | 1062 |
| 10.4.1 平板对接焊缝的残余应力 .....    | 996  | 11.5.3 焊接安全技术 .....               | 1067 |
| 10.4.2 厚板对接焊缝的残余应力 .....    | 998  | 11.5.4 焊接劳动卫生防护 .....             | 1072 |
| 10.4.3 圆筒体和球壳焊缝的残余应力 .....  | 998  | 参考文献 .....                        | 1079 |
| 10.4.4 圆形封闭焊缝的残余应力 .....    | 1002 | <b>附录</b> .....                   | 1081 |
| 10.4.5 梁构件的焊接残余应力 .....     | 1002 | 附录 A 国家及行业焊接标准目录 .....            | 1081 |
| 10.4.6 表面堆焊的残余应力 .....      | 1002 | 附录 B 常用英语焊接缩略语 .....              | 1084 |
| 10.4.7 点焊接头的残余应力 .....      | 1002 | 附录 C 化学元素周期表 .....                | 1087 |
| 10.4.8 角接头的残余应力 .....       | 1004 | 附录 D 常用单位换算 .....                 | 1088 |
| 10.4.9 搅拌摩擦焊接头的残余应力 .....   | 1004 |                                   |      |
| 10.5 焊接残余应力的估算 .....        | 1008 |                                   |      |
| 10.5.1 纵向残余应力的估算 .....      | 1008 |                                   |      |
| 10.5.2 对接接头的横向拘束应力估算 ..     | 1009 |                                   |      |
| 10.5.3 筒体环缝焊接的残余应力估算 ..     | 1009 |                                   |      |



# 第 1 章 焊 接 成 形

## 1.1 焊接方法与分类

焊接方法分类繁多，而且新的方法仍在不断涌现，这里主要列出族系法、一元坐标法和二元坐标法。

在族系法分类中，首先将焊接方法划分为三大

类，即熔焊、固相焊和钎焊。其次，将每一大类方法，例如熔焊，按能源种类细分为电弧焊、气焊、铝热焊、电渣焊等类；电弧焊，又分为熔化极电弧焊、非熔化极电弧焊，如图 1.1-1、表 1.1-1 ~ 表 1.1-3 所示。表 1.1-4 和表 1.1-5 分别为一元法和二元坐标法分类。表 1.1-6 ~ 表 1.1-8 为常用焊接方法的适用性。

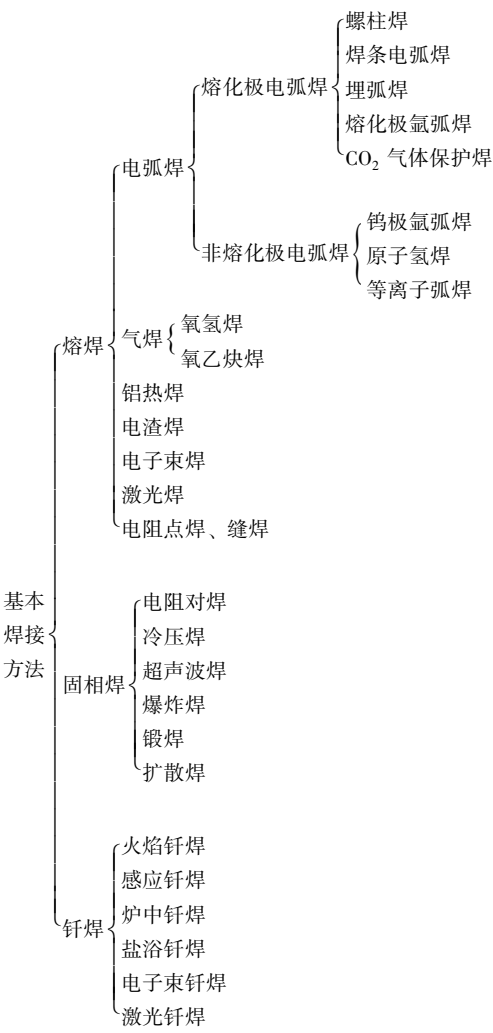


图 1.1-1 焊接方法分类（族系法）

表 1.1-1 熔焊的分类（族系法）

|     |      |     |      |            |
|-----|------|-----|------|------------|
| 熔焊  | 电能   | 电弧  | 气体保护 | 钨极惰性气体保护焊  |
|     |      |     |      | 金属极气体保护电弧焊 |
|     |      |     |      | 等离子弧焊      |
|     |      |     |      | 气电焊        |
|     |      |     |      | 氢原子焊       |
|     |      |     | 碳弧焊  | 裸焊条电弧焊     |
|     |      |     | 焊剂保护 | 金属电极保护电弧焊  |
|     |      |     |      | 潜弧焊        |
|     |      |     |      | 药芯焊丝气体保护焊  |
|     |      |     | 压力成形 | 气电焊        |
|     |      |     |      | 闪光焊        |
|     |      |     | 加压   | 螺柱焊        |
|     |      |     |      | 锻焊         |
|     |      | 电阻  | 熔剂   | 电渣焊        |
|     |      |     |      | 电阻点焊       |
|     |      |     | 加压   | 缝焊         |
|     |      |     |      | 凸焊         |
|     |      | 放射能 | 真空   | 电子束焊       |
|     |      |     |      | 激光焊        |
|     |      | 感应  |      | 感应焊        |
| 化学能 | 火焰反射 | 火焰  |      | 氧乙炔焊       |
|     |      |     |      | 氧氢焊        |
|     | 固体反应 | 熔剂  |      | 铝热焊        |

表 1.1-2 固相焊的分类（族系法）

|      |     |      |      |      |         |
|------|-----|------|------|------|---------|
| 固相焊接 | 电能  | 辐射能  | 压力成形 | 气体   | 热压焊     |
|      |     |      |      | 真空   | 热压焊     |
|      |     |      | 无保护  |      | 锻焊      |
|      |     |      |      |      | 热辊压焊    |
|      |     |      |      |      | 混合挤压焊   |
|      |     | 加压   | 气体   |      | 扩散焊     |
|      |     |      | 真空   |      | 扩散焊     |
|      |     |      | 气体   |      | 感应焊     |
|      |     | 压力   | 真空   |      | 感应焊     |
|      |     |      |      |      |         |
|      | 电阻  | 压力成形 | —    |      | 电阻对焊    |
|      |     |      | —    |      | 电阻点焊、缝焊 |
|      |     | 加压   | —    |      |         |
|      |     |      | —    |      |         |
|      | 化学能 | 火焰   | 压力成形 | —    | 气压焊     |
|      |     |      | 加压   | 气体保护 | 扩散焊     |
|      |     | 辐射能  | 压力成形 | —    | 锻焊      |
|      |     |      |      |      | 热辊压焊    |
|      |     |      |      |      | 混合挤压焊   |
|      | 机械能 | 摩擦   | 压力成形 | —    | 摩擦焊     |
|      |     |      | 加压   | —    | 超声波焊    |
|      |     | —    | 压力成形 | —    | 冷压焊     |

表 1.1-3 钎焊的分类（族系法）

|     |      |     |    |    |         |
|-----|------|-----|----|----|---------|
| 钎焊  | 电能   | 电弧  | —  | 熔剂 | 间接碳弧钎焊  |
|     |      |     | —  | 气体 | 间接碳弧钎焊  |
|     |      | 电阻  | 加压 | 熔剂 | 电阻硬、软钎焊 |
|     |      |     | —  | 熔剂 | 铬铁钎焊    |
|     |      | 感应  | —  | 气体 | 感应硬钎焊   |
|     |      |     | —  | 熔剂 | 感应硬、软钎焊 |
|     |      |     | —  | 真空 | 感应硬钎焊   |
|     |      |     | 加压 | 气体 | 扩散钎焊    |
|     |      |     |    | 真空 | 扩散钎焊    |
|     |      | 放射能 | —  | 气体 | 炉铜焊     |
|     |      |     |    |    | 红外线硬钎焊  |
|     |      |     | —  | 熔剂 | 炉铜焊     |
|     |      |     |    |    | 红外线硬钎焊  |
|     |      |     | —  | 真空 | 炉铜焊     |
|     |      |     |    |    | 红外线硬钎焊  |
|     |      | 加压  | 气体 |    | 扩散钎焊    |
|     |      |     | 真空 |    | 扩散钎焊    |
| 化学能 | 火焰反射 | —   | 熔剂 |    | 火焰钎焊    |
|     |      | —   | 熔剂 |    | 炉铜焊     |
|     | 放射能  | —   | 熔剂 |    | 炉铜焊     |
|     |      | —   | 气体 |    | 块钎焊     |
|     | 传导   | —   | 熔剂 |    | 铸钎焊     |
|     |      | —   | 熔剂 |    | 铸钎焊     |

表 1.1-4 焊接方法分类（一元坐标法）

| 焊接方法分类   |         |      |            |                          |           |                          |          |
|----------|---------|------|------------|--------------------------|-----------|--------------------------|----------|
| 热源       | 保护方法    |      |            |                          |           |                          | 机械排除     |
|          | 真空      | 惰性气体 | 气体         | 熔剂                       | 无保护       |                          |          |
| 不加热或无传导热 | 冷压焊     | 热压焊  | —          | —                        | —         |                          | 热压焊、冷压焊  |
| 机械能      | 爆炸焊     | —    | —          | —                        | 爆炸焊       |                          | 摩擦焊、超声波焊 |
| 化学热      | 火焰、等离子体 | —    | 等离子弧焊      | 原子氢焊                     | —         | 锻焊                       | 压力对接焊    |
|          | 放热反应    | —    | —          | —                        | 热剂焊       | —                        | —        |
| 电阻热      | 感应电阻热   | —    | —          | —                        | —         | 感应高频焊                    | 感应对接焊    |
|          | 直接电阻热   | —    | —          | —                        | 电渣焊       | 闪光焊、高频电阻焊、凸焊             | 点焊、缝焊、对焊 |
| 电弧热      | 熔化极     | —    | 熔化极惰性气体保护焊 | 熔化极CO <sub>2</sub> 气体保护焊 | 焊条电弧焊、埋弧焊 | 光焊丝电弧焊、螺柱电弧焊、火花放电焊、冲击电弧焊 | —        |
|          | 非熔化极    | —    | 钨极惰性气体保护焊  | —                        | —         | 碳弧焊                      | —        |
| 放射能      | 电磁      | —    | 激光焊        | —                        | —         | —                        | —        |
|          | 粒子      | 电子束焊 | —          | —                        | —         | —                        | —        |

表 1.1-5 焊接方法分类（二元坐标法）

| 两材料结<br>合时状态 | 焊接过程<br>中手段        | 焊接方<br>法类型 | 电弧热                  |          |                       |                       | 电阻热       |            |                  |                  | 高能束      |      | 化学反应热 |     | 机械能 |     | 间接加热 |    |    |        |   |   |      |     |
|--------------|--------------------|------------|----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|------------|------------------|------------------|----------|------|-------|-----|-----|-----|------|----|----|--------|---|---|------|-----|
|              |                    |            | 涂料(焊剂)保护             |          |                       |                       | 气体保护      |            |                  |                  | 熔渣<br>电阻 | 固体电阻 |       |     |     | 电子束 | 激光束  | 火焰 | 热剂 | 炸<br>药 |   |   | 传热介质 |     |
|              |                    |            |                      |          |                       |                       |           |            |                  |                  |          | 接触式  | 工频    | 感应式 | 接触式 |     |      |    |    |        |   |   | 高频   | 感应式 |
| 液相           | 熔化不<br>加压力         | 基本型        | 焊条<br>电弧<br>焊        | 埋弧<br>焊  | —                     | —                     | 钨极氩<br>弧焊 | 等离子<br>弧焊  | 熔化极<br>气体保<br>护焊 | 电渣<br>焊          | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — | —    |     |
|              |                    | 变型<br>应用   | 堆焊<br>焊条<br>电弧<br>堆焊 | 埋弧<br>堆焊 | 水下<br>电弧<br>焊         | 电弧<br>点焊              | 碳弧<br>气刨  | 钨极氩<br>弧堆焊 | 等离子<br>弧堆焊       | 管状焊<br>丝电弧<br>堆焊 | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — |      |     |
|              | 熔化加<br>压力          | 基本型        | —                    | —        | —                     | —                     | —         | —          | —                | —                | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — |      |     |
|              |                    | 变型应<br>用   | —                    | —        | 电<br>能<br>储<br>能<br>焊 | 电<br>弧<br>螺<br>柱<br>焊 | —         | —          | —                | —                | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — |      |     |
| 固相           | 加压力<br>不<br>熔<br>化 | —          | —                    | —        | —                     | —                     | —         | —          | —                | —                | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — |      |     |
|              |                    | —          | —                    | —        | —                     | —                     | —         | —          | —                | —                | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — |      |     |
| —            | 加压力<br>熔<br>化      | —          | —                    | —        | —                     | —                     | —         | —          | —                | —                | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — |      |     |
|              |                    | —          | —                    | —        | —                     | —                     | —         | —          | —                | —                | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — |      |     |
|              | 固相兼<br>液相          | —          | 基本型<br>钎焊            | —        | —                     | —                     | —         | —          | —                | —                | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — |      |     |
|              |                    |            | 变型热<br>喷涂            | —        | —                     | —                     | —         | —          | —                | —                | —        | —    | —     | —   | —   | —   | —    | —  | —  | —      | — | — | —    |     |

表 1.1-6 常用焊接方法的适用范围

| 焊接方法 |       | 材料 |      | 接头形式 |      |    | 板厚 |    |     | 焊件种类 |    |    |    |    |      |      |    |    |      | 费用   |      |
|------|-------|----|------|------|------|----|----|----|-----|------|----|----|----|----|------|------|----|----|------|------|------|
|      |       | 钢铁 | 有色金属 | 对接   | T形接头 | 搭接 | 薄板 | 厚板 | 超厚板 | 建筑   | 机械 | 车辆 | 桥梁 | 船舶 | 压力容器 | 核反应堆 | 汽车 | 飞机 | 家用电器 | 设备费用 | 焊接经费 |
| 熔焊   | 焊条电弧焊 | A  | B    | A    | A    | A  | B  | A  | B   | A    | A  | A  | A  | A  | A    | A    | B  | B  | B    | 少    | 少    |
|      | 螺柱焊   | A  | C    | C    | A    | D  | C  | A  | B   | A    | A  | A  | B  | A  | B    | B    | B  | C  | B    | 中    | 少    |
|      | 埋弧焊   | A  | B    | A    | A    | A  | A  | C  | A   | A    | A  | A  | A  | A  | A    | A    | B  | C  | C    | 中    | 少    |
|      | MAG 焊 | A  | D    | A    | A    | A  | C  | A  | B   | A    | A  | A  | A  | A  | A    | B    | B  | C  | B    | 中    | 少    |
|      | MIG 焊 | B  | A    | A    | A    | A  | C  | A  | A   | B    | B  | B  | C  | B  | B    | A    | A  | A  | A    | 少    | 中    |
|      | TIG 焊 | B  | A    | A    | A    | A  | A  | B  | C   | B    | B  | B  | C  | B  | B    | A    | A  | A  | A    | 少    | 中    |
|      | 气焊    | A  | B    | A    | A    | A  | A  | B  | D   | C    | C  | C  | C  | C  | D    | D    | B  | B  | B    | 少    | 中    |
|      | 铝热焊   | A  | D    | A    | A    | B  | D  | C  | A   | C    | B  | C  | C  | D  | C    | D    | D  | D  | D    | 少    | 中    |
|      | 电子束焊  | A  | A    | A    | A    | B  | A  | B  | B   | D    | D  | D  | D  | B  | B    | B    | C  | B  | C    | 多    | 中    |
| 压焊   | 电渣焊   | A  | D    | A    | A    | B  | D  | C  | A   | C    | B  | C  | C  | B  | B    | B    | D  | D  | D    | 多    | 少    |
|      | 气压焊   | A  | D    | A    | B    | C  | C  | A  | C   | B    | C  | C  | C  | C  | C    | D    | C  | C  | D    | 中    | 少    |
|      | 点焊    | A  | A    | D    | C    | A  | A  | C  | D   | C    | C  | B  | C  | C  | C    | C    | A  | A  | A    | 多    | 中    |
|      | 缝焊    | A  | B    | D    | D    | A  | A  | C  | D   | D    | C  | B  | C  | C  | D    | C    | A  | A  | A    | 多    | 中    |
|      | 凸焊    | A  | B    | C    | C    | A  | A  | C  | D   | D    | D  | C  | D  | D  | D    | D    | B  | B  | A    | 多    | 中    |
|      | 锻焊    | A  | C    | A    | C    | D  | C  | A  | C   | C    | C  | C  | D  | C  | D    | C    | B  | C  | C    | 中    | 少    |
|      | 闪光对焊  | A  | B    | A    | C    | D  | C  | A  | C   | B    | B  | B  | C  | B  | C    | B    | A  | A  | B    | 多    | 少    |
|      | 冷压焊   | B  | B    | C    | C    | A  | A  | C  | D   | D    | C  | D  | D  | C  | D    | C    | C  | C  | B    | 中    | 少    |
|      | 超声波焊  | A  | A    | D    | C    | A  | A  | C  | D   | D    | C  | D  | D  | D  | D    | C    | B  | B  | B    | 中    | 少    |
| 钎焊   |       | A  | B    | C    | C    | A  | A  | B  | D   | D    | C  | D  | D  | C  | D    | B    | B  | B  | B    | 少    | 中    |

注：A—最佳；B—佳；C—差；D—极差。

表 1.1-7 常用焊接方法所适用的接头形式及焊接位置

| 适用条件 |     | 焊条电弧焊 | 埋弧焊 | 电渣焊 | 熔化极气体保护焊 |    |      |      | 氩弧焊 | 等离子弧焊 | 气电立焊 | 电阻点焊 | 缝焊 | 凸焊 | 闪光对焊 | 气焊 | 扩散焊 | 摩擦焊 | 电子束焊 | 激光焊 | 钎焊 |
|------|-----|-------|-----|-----|----------|----|------|------|-----|-------|------|------|----|----|------|----|-----|-----|------|-----|----|
|      |     |       |     |     | 喷射过渡     | 潜弧 | 脉冲喷射 | 短路过渡 |     |       |      |      |    |    |      |    |     |     |      |     |    |
| 接头形式 | 对接  | A     | A   | A   | A        | A  | A    | A    | A   | A     | A    | C    | C  | C  | A    | A  | A   | A   | A    | A   | C  |
|      | 搭接  | A     | A   | B   | A        | A  | A    | A    | A   | A     | C    | A    | A  | A  | C    | A  | A   | C   | B    | A   | A  |
|      | 角接  | A     | A   | B   | A        | A  | A    | A    | A   | A     | B    | C    | C  | C  | C    | A  | C   | C   | A    | A   | C  |
| 焊接位置 | 平焊  | A     | A   | C   | A        | A  | A    | A    | A   | A     | C    |      |    |    |      | A  |     |     | A    | A   |    |
|      | 立焊  | A     | C   | A   | B        | C  | A    | A    | A   | A     | A    |      |    |    |      | A  |     |     | C    | A   |    |
|      | 仰焊  | A     | C   | C   | C        | C  | A    | A    | A   | A     | C    |      |    |    |      | A  |     |     | C    | A   |    |
|      | 全位置 | A     | C   | C   | C        | C  | A    | A    | A   | A     | C    |      |    |    |      | A  |     |     | C    | A   |    |
| 设备成本 |     | 低     | 中   | 高   | 中        | 中  | 中    | 中    | 低   | 高     | 高    | 高    | 高  | 高  | 高    | 低  | 高   | 高   | 高    | 高   | 低  |
| 焊接成本 |     | 低     | 低   | 低   | 中        | 低  | 中    | 低    | 中   | 中     | 低    | 中    | 中  | 中  | 中    | 中  | 高   | 低   | 高    | 中   | 中  |

注：A—好；B—可用；C—一般不用。



表 1.1-8 各种常用金属材料适用的焊接方法

| 母 材           | 焊接方法      |           |           |     |              |             |     |          |          |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----|--------------|-------------|-----|----------|----------|
|               | 焊条电<br>弧焊 | 钨极氩<br>弧焊 | 等离子<br>弧焊 | 埋弧焊 | 熔化极气体<br>保护焊 | 药芯焊丝<br>电弧焊 | 电渣焊 | 电子<br>束焊 | 氧乙<br>炔焊 |
| 铝             | C         | A         | A         | No  | A            | No          | Exp | B        | B        |
| 黄铜            | No        | C         | C         | No  | C            | No          | No  | A        | A        |
| 青铜            | A         | A         | B         | No  | A            | No          | No  | A        | B        |
| 纯铜            | C         | A         | A         | No  | A            | No          | No  | A        | A        |
| 铜镍合金          | B         | A         | A         | No  | A            | No          | No  | A        | A        |
| 灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁 | A         | B         | B         | No  | B            | B           | No  | A        | A        |
| 熟铁            | A         | B         | B         | A   | A            | A           | No  | A        | A        |
| 铅             | No        | B         | B         | No  | No           | No          | No  | No       | A        |
| 镁             | No        | A         | B         | No  | A            | No          | No  | No       | No       |
| 因康镍合金         | A         | A         | A         | No  | A            | No          | No  | A        | B        |
| 蒙乃尔合金         | A         | A         | A         | C   | A            | No          | No  | A        | A        |
| 镍             | A         | A         | A         | C   | A            | No          | No  | A        | A        |
| 镍银合金          | No        | C         | C         | No  | C            | No          | No  | A        | B        |
| 贵金属           | No        | A         | A         | No  | Exp          | No          | No  | A        | B        |
| 合金钢           | A         | A         | A         | B   | A            | A           | A   | A        | A        |
| 低合金钢          | A         | A         | A         | A   | A            | A           | A   | A        | A        |
| 中碳钢和高碳钢       | A         | A         | A         | B   | A            | A           | A   | A        | A        |
| 低碳钢           | A         | A         | A         | A   | A            | A           | A   | A        | A        |
| 不锈钢           | A         | A         | A         | A   | A            | B           | A   | A        | C        |
| 工具钢           | A         | A         | A         | No  | C            | No          | No  | A        | A        |
| 钛             | No        | A         | A         | Exp | A            | No          | No  | No       | No       |
| 钨             | No        | B         | A         | No  | No           | No          | No  | No       | No       |
| 镁             | No        | C         | C         | No  | No           | No          | No  | No       | C        |

注：A—推荐使用或焊接性好；B—可用，但非最佳选择，或焊接时需采取一定的处理措施；C—可用，但很少选用，或焊接性不好；No—不推荐使用或焊接性极差；Exp—试验中。

表 1.1-9 ~ 表 1.1-12 为各种电弧焊接方法、焊接 作方式下的人-机关系。  
性及应用范围的比较。表 1.1-13 给出了不同焊接操

表 1.1-9 电弧焊方法比较

| 焊接方法           |            | 焊条电弧焊                            |     |     | CO <sub>2</sub> 气体保护焊    |     |     | 钨极氩弧焊                             |     | 熔化极氩弧焊               |     |      | 埋弧焊               |            | 等离子弧焊                          |     |     |
|----------------|------------|----------------------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|-----------------------------------|-----|----------------------|-----|------|-------------------|------------|--------------------------------|-----|-----|
| 焊接设备           |            | 交、直流弧焊机                          |     |     | CO <sub>2</sub> 半自动焊机    |     |     | TIG 焊机                            |     | MIG 焊机               |     |      | 埋弧焊机              |            | 等离子弧焊机                         |     |     |
| 焊件材质及板厚        |            | 低碳钢、高强度钢、不锈钢、特种钢、铜合金<br>1.6mm 以上 |     |     | 低碳钢、高强度钢、特种钢<br>1.6mm 以上 |     |     | 低碳钢、不锈钢、特种钢和铝、铜、钛及其合金<br>0.5mm 以上 |     | 高强度钢、特种钢<br>3.2mm 以上 |     |      | 低碳钢、不锈钢<br>6mm 以上 |            | 低碳钢、高强度钢、不锈钢和钛、铜合金<br>0.2mm 以上 |     |     |
| 焊接位置           |            | 平焊、立焊、横焊、仰焊                      |     |     | 平焊、立焊、横焊、仰焊              |     |     | 平焊、立焊、仰焊                          |     | 平焊、立焊                |     |      | 平焊                |            | 平焊、立焊                          |     |     |
| 典型焊接实例<br>(平焊) | 板厚/mm      | 3.2                              | 9   | 25  | 3.2                      | 9   | 25  | 1.6                               | 3.2 | 3.2                  | 9   | 25   | 9                 | 25         | 1.6                            | 3.2 | 9   |
|                | 坡口形式       | I                                | V   | X   | I                        | V   | X   | I                                 | V   | I                    | V   | X    | V                 | X          | I                              | I   | I   |
|                | 焊接电流/A     | 100                              | 170 | 300 | 120                      | 320 | 450 | 80                                | 130 | 120                  | 350 | 400  | 800               | 800 ~ 1200 | 80                             | 95  | 200 |
|                | 焊接速度/(m/h) | 6                                | 2.5 | 5.5 | 3.6                      | 6.5 | 20  | 5                                 | 6.7 | 4.7                  | 7.2 | 22.3 | 3.6               | 13.8       | 2                              | 2.5 | 4   |

(续)

| 焊接方法       | 焊条电弧焊                   | CO <sub>2</sub> 气体保护焊                   | 钨极氩弧焊                | 熔化极氩弧焊                         | 埋弧焊                      | 等离子弧焊             |
|------------|-------------------------|-----------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------|
| 焊接设备       | 交、直流电弧焊机                | CO <sub>2</sub> 半自动焊机                   | TIG 焊机               | MIG 焊机                         | 埋弧焊机                     | 等离子弧焊机            |
| 操作范围       | 焊钳和焊机间距 50m 以下          | 焊炬与送丝装置间距 3m; 送丝装置与焊机间距 25m 以下          | 焊枪与焊机间距 4 ~ 8m       | 焊枪与送丝装置间距 3m; 送丝装置与焊机间距 25m 以下 | 焊接小车与焊机间距 25m 以下         | 焊枪与焊机间距 5 ~ 10m   |
| 与交流焊机的价格比  | 直流焊机为 3 ~ 4             | 5 ~ 7                                   | 4 ~ 6                | 8 ~ 10                         | 20 ~ 30                  | 10 ~ 20           |
| 焊接材料       | 焊条                      | CO <sub>2</sub> 焊用焊丝、CO <sub>2</sub> 气体 | 焊丝、氩气                | MIG 焊用焊丝、氩气                    | 焊丝、焊剂                    | 氩气、焊丝             |
| 焊道外观       | 良                       | 稍差                                      | 良                    | 良                              | 良                        | 良                 |
| 受风的影响      | 小                       | 大                                       | 大                    | 大                              | 小                        | 大                 |
| 受焊工操作技术的影响 | 大                       | 中                                       | 大                    | 中                              | 小                        | 小                 |
| 焊接辅具       | 焊钳                      | 导电嘴、喷嘴                                  | 喷嘴、钨极                | 导电嘴、喷嘴                         | 导电嘴                      | 喷嘴、钨极             |
| 备注         | 灵活性高,既能焊薄板,也能焊厚板<br>效率低 | 薄板、厚板均适用<br>效率高                         | 适于一切金属的焊接<br>质量好,效率低 | 主要适于有色金属<br>效率高                | 适于直焊缝和环焊缝,要求坡口精度高<br>效率高 | 适于直焊缝或环焊缝;要求坡口精度高 |

表 1.1-10 MIG 焊、CO<sub>2</sub> 气体保护焊、TIG 焊的比较

| 焊接方法 |       | MIG 焊                                           |           | CO <sub>2</sub> 气体保护焊 |                      |           | TIG 焊         |           |
|------|-------|-------------------------------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|-----------|---------------|-----------|
| 电源   |       | 无脉冲                                             | 有脉冲       | 无脉冲                   | 无脉冲                  | 有脉冲       | 无脉冲           | 有脉冲       |
| 焊丝   |       | 实心焊丝                                            | 实心焊丝      | 实心焊丝                  | 药芯焊丝                 | 实心焊丝      | 实心焊丝          |           |
| 保护气体 |       | Ar (Ar + CO <sub>2</sub> 、Ar + O <sub>2</sub> ) |           | CO <sub>2</sub>       | CO <sub>2</sub> + Ar |           | Ar            |           |
| 工艺性能 | 全位置焊  | 稍差                                              | 佳         | 差                     | 佳                    | 佳         | 最佳            |           |
|      | 单面焊   | 佳                                               | 佳         | 稍差                    | 较佳                   | 较佳        | 佳             |           |
|      | 电弧稳定性 | 良                                               | 良         | 稍差                    | 良                    | 良         | 佳             |           |
|      | 飞溅量   | 粒小且少                                            | 几乎没有      | 粒大、较多                 | 粒小、较少                | 粒小、较少     | 无             |           |
|      | 脱渣性   | 良                                               | 良         | 差                     | 良                    | 较差        | 无渣            |           |
|      | 焊丝送给  | 良                                               | 良         | 良                     | 较差                   | 良         | 良             |           |
|      | 电弧声音  | 柔和                                              | 柔和        | 较大                    | 稍柔和                  | 稍柔和       | 非常柔和          |           |
| 焊接质量 | 外观    | 烟尘量                                             | 少         | 少                     | 较多                   | 多         | 较少            |           |
|      |       | 焊波                                              | 细         | 细而匀                   | 粗                    | 较粗        | 较粗            |           |
|      | 内部    | 余高                                              | 平         | 平                     | 凸                    | 稍凸        | 稍凸            |           |
|      |       | 熔深                                              | 稍浅        | 稍浅                    | 深                    | 稍深        | 稍深            |           |
|      |       | 抗气孔性                                            | 稍差        | 稍差                    | 良                    | 良         | 良             |           |
| 效率   |       | 抗裂性                                             | 良         | 良                     | 良                    | 较差        | 良             |           |
|      |       | 焊接电流范围/A                                        | 200 ~ 350 | 200 ~ 300             | 200 ~ 350            | 200 ~ 350 | 200 ~ 300     | 150 ~ 300 |
|      |       | 熔敷率/(g/min)                                     | 60 ~ 140  | 60 ~ 110              | 60 ~ 140             | 60 ~ 140  | 60 ~ 110      | —         |
|      |       | 熔敷效率(%)                                         | 96 ~ 99   | 96 ~ 99               | 90 ~ 95              | 85 ~ 90   | 90 ~ 95       | 100       |
| 适用材料 |       | 熔渣去除                                            | 易         | 易                     | 稍难                   | 较易        | 较易            | (无熔渣)     |
|      |       | 碳钢                                              | 佳         | 佳                     | 最佳                   | 最佳        | 厚板:佳<br>薄板:最佳 | 佳         |
|      |       | 高强度钢                                            | 最佳        | 最佳                    | 较差                   | 较差        | 较差            | 佳         |
|      |       | 不锈钢                                             | 佳         | 佳                     | 差                    | 差         | 差             | 最佳        |
|      |       | 有色金属                                            | 佳         | 佳                     | 差                    | 差         | 差             | 最佳        |

(续)

| 焊接方法           |         | MIG 焊                                           |      | CO <sub>2</sub> 气体保护焊 |                      |      | TIG 焊 |     |
|----------------|---------|-------------------------------------------------|------|-----------------------|----------------------|------|-------|-----|
| 电源             |         | 无脉冲                                             | 有脉冲  | 无脉冲                   | 无脉冲                  | 有脉冲  | 无脉冲   | 有脉冲 |
| 焊丝             |         | 实心焊丝                                            | 实心焊丝 | 实心焊丝                  | 药芯焊丝                 | 实心焊丝 | 实心焊丝  |     |
| 保护气体           |         | Ar (Ar + CO <sub>2</sub> 、Ar + O <sub>2</sub> ) |      | CO <sub>2</sub>       | CO <sub>2</sub> + Ar |      | Ar    |     |
| 评价             | 高精度自动化  |                                                 | 佳    | 最佳                    | 较差                   | 差    | 佳     | 最佳  |
|                | 质量      |                                                 | 佳    | 最佳                    | 稍差                   | 稍差   | 稍差    | 最佳  |
|                | 效率      | 厚板                                              | 最高   | 高                     | 最高                   | 最高   | 高     | 低   |
|                |         | 薄板                                              | 高    | 最高                    | 高                    | 较低   | 高     | 低   |
| 适合<br>焊件<br>类型 | 造船、桥梁   |                                                 | 佳    | 差                     | 最佳                   | 最佳   | 佳     | 差   |
|                | 生产机械、车辆 |                                                 | 佳    | 佳                     | 佳                    | 差    | 最佳    | 差   |
|                | 压力容器    |                                                 | 最佳   | 最佳                    | 差                    | 差    | 差     | 佳   |
|                | 原子能配管   |                                                 | 佳    | 佳                     | 差                    | 差    | 差     | 最佳  |
|                | 飞机、潜水艇  |                                                 | 差    | 差                     | 差                    | 差    | 差     | 最佳  |

表 1.1-11 MIG 焊、TIG 焊焊接性能比较

| 焊接方法    |               | MIG 焊                                     |              |             |      | TIG 焊  |            |            |
|---------|---------------|-------------------------------------------|--------------|-------------|------|--------|------------|------------|
|         |               | 大电 流焊接                                    | 短路过渡焊接       | 脉冲焊         |      | 大电 流焊接 | 脉 冲 焊      |            |
|         |               |                                           |              | 高频          | 低频   |        | 高频         | 低频         |
| 焊 接 材 料 | 焊 丝           | 实心焊丝                                      |              |             |      | 实心焊丝   |            |            |
|         | 保 护 气 体       | Ar + CO <sub>2</sub> 、Ar + O <sub>2</sub> |              |             |      | Ar     |            |            |
| 焊 接 设 备 | 电 源 特 性       | 平特性                                       |              | 平特性<br>陡降特性 | 平特性  | 陡降特性   |            |            |
|         | 脉 冲 频 率       | —                                         |              | 50Hz、100Hz  | ≤2Hz | —      | 10 ~ 25kHz | 0.5 ~ 10Hz |
|         | 送 丝 方 式       | 等速送进                                      |              | 高、低速送进      |      | 等速送进   | 等速或变速送进    |            |
| 焊 接 位 置 |               | 平焊、横焊、<br>横角焊                             | 全位置焊         |             |      | 平焊、立焊  | 全位置焊       |            |
| 焊 接 性 能 | 焊 缝 金 属 性 能   | 良好                                        |              |             |      | 极好     |            |            |
|         | X 射 线 检 测 性 能 | 良好                                        | 单层良好，<br>多层差 | 良好          |      | 良好     |            |            |
|         | 焊 道 形 状       | 焊波细、<br>焊道平                               | 焊波细，<br>呈凸状  | 焊波细、焊道平     |      | 焊波细而匀  |            |            |
|         | 熔 深           | 稍深呈指状                                     | 浅            | 可控          |      | 可控     |            |            |

(续)

| 焊接方法 |       | MIG 焊             |                     |                      |              | TIG 焊             |                        |    |
|------|-------|-------------------|---------------------|----------------------|--------------|-------------------|------------------------|----|
|      |       | 大电流焊接             | 短路过渡焊接              | 脉冲焊                  |              | 大电流焊接             | 脉冲焊                    |    |
|      |       |                   |                     | 高频                   | 低频           |                   | 高频                     | 低频 |
| 焊接性能 | 电弧稳定性 | 良好                |                     |                      |              | 良好                |                        |    |
|      | 飞溅    | 基本没有              | 少且粒小                | 基本没有                 |              | 基本没有              |                        |    |
|      | 熔滴过渡  | 喷射过渡              | 短路过渡                | 脉冲喷射过渡               | 喷射过渡<br>短路过渡 | 搭桥过渡              |                        |    |
|      | 接头精度  | 要求高               | 要求低                 | 要求较高                 |              | 要求高               |                        |    |
| 特点   |       | 工艺性好,熔深大,焊接接头性能良好 | 可控制焊接热输入,可焊薄板和全位置焊接 | 可控制焊接热输入,可进行中厚板全位置焊接 |              | 工艺性好,焊道外观好,接头性能良好 | 可控制焊接热输入,可焊接薄板和进行全位置焊接 |    |

表 1.1-12 几种气体保护焊接方法的应用及特点

| 焊接方法                                         | 焊接位置                        | 被焊材料                      | 板厚             | 特点                                                             |
|----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub> 短路过渡焊                        | 全位置                         | 低碳钢和低合金结构钢                | 薄板和中厚板         | 生产率较低(每分钟熔化焊丝 20g 左右), 飞溅较大, 焊接厚板时易产生夹渣和未焊透                    |
| TIG 焊                                        | 全位置                         | 碳钢、低合金钢、合金钢和铝、镁、铜、钛及其合金等  | 薄板和中厚板, 也可以焊厚板 | 生产率较低(每分钟熔化焊丝 10g 左右), 无飞溅。焊厚板时为增加熔透能力, 可加 1% 的 H <sub>2</sub> |
| 脉冲 TIG 焊                                     | 全位置                         | 碳钢、低合金钢、合金钢和铝、镁、铜、钛及其合金等  | 薄板和中厚板, 也可以焊厚板 | 生产率较低(每分钟熔化焊丝 10g 左右), 无飞溅。尤其适于根部焊道, 单面焊双面成形                   |
| MIG 焊(包括混合气体)射流过渡                            | 射流过渡只能用于平焊。采用细丝时, 也可用于立焊和横焊 | 碳钢、低合金钢、合金钢和铝、镁、铜、钛及其合金等  | 中、厚板           | 生产率高(每分钟熔化焊丝 30g 左右), 适于填充焊道。电弧稳定, 飞溅小                         |
| 混合气体保护短路过渡焊 (Ar + CO <sub>2</sub> 40% ~ 50%) | 全位置                         | 低碳钢和低合金钢                  | 可以焊 30mm 以下的板材 | 生产率较高(每分钟熔化焊丝 25g 左右), 焊接电流可达 160 ~ 180A 左右, 电弧稳定, 飞溅小, 熔深较大   |
| 脉冲 MIG 焊(氩或富氩气体)                             | 全位置                         | 低碳钢、低合金钢、不锈钢和铝、镁、铜、钛及其合金等 | 薄板和中厚板, 也可以焊厚板 | 生产率较低(每分钟熔化焊丝 20g 左右), 焊接电流可达 120 ~ 160A, 电弧稳定, 飞溅小            |

注: 表中百分数为气体的体积分数。

表 1.1-13 不同焊接操作方式下的人-机关系

| 操作方式        | 焊条电弧焊<br>(闭环)                                                                     | 半自动焊<br>(闭环)                                                                      | 机械化焊接<br>(闭环)                                                                     | 自动焊<br>(开环)                                                                       | 机器人焊接<br>(开环或闭环)                                                                    | 自适应焊接<br>(闭环)                                                                       |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 操作功能        |  |  |  |  |  |  |
| 引弧、维弧和弧长调节  | 焊工                                                                                | 焊机                                                                                | 焊机                                                                                | 焊机                                                                                | 焊机                                                                                  | 焊机                                                                                  |
| 焊丝/焊条的送进及指向 | 焊工                                                                                | 焊机                                                                                | 焊机                                                                                | 焊机                                                                                | 焊机                                                                                  | 焊机                                                                                  |
| 调节电弧以控制熔池行为 | 焊工                                                                                | 焊工                                                                                | 焊机                                                                                | 焊机                                                                                | 不装或装有传感器的焊机(机器人)                                                                    | 装有传感器的焊机                                                                            |
| 沿焊接方向移动电弧   | 焊工                                                                                | 焊工                                                                                | 焊机                                                                                | 沿着预定的路径                                                                           | 不装或装有传感器的焊机(机器人)                                                                    | 装有传感器的焊机                                                                            |
| 焊缝跟踪        | 焊工                                                                                | 焊工                                                                                | 焊接操作人员                                                                            | 沿着预定的路径                                                                           | 不装或装有传感器的焊机(机器人)                                                                    | 装有传感器的焊机                                                                            |
| 校正电弧以克服偏差   | 焊工                                                                                | 焊工                                                                                | 焊接操作人员                                                                            | 不校正,因此可能会有焊缝缺陷                                                                    | 装有传感器的焊机(机器人)                                                                       | 装有传感器的焊机                                                                            |

1.2 焊接方法与热源特征

1.2.1 常用焊接方法的热源特性

各种焊接热源的主要特性见表 1.2-1; 表 1.2-2 和表 1.2-3 分别给出不同焊接方法的电弧热效率  $\eta$  和常用电弧焊接方法的有效功率因数。常用焊接热源的功率密度和热量消耗如图 1.2-1 所示, 图 1.2-2 比较了常用焊接热源的电弧热输入。

表 1.2-1 各种焊接热源的主要特性

| 热 源                         | 最小加热面积/ $\text{m}^2$ | 最大功率密度/ $(\text{kW}/\text{cm}^2)$ | 正常焊接条件下温度/ $\text{K}$ |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 氧乙炔焰                        | $10^{-6}$            | $2 \times 10^4$                   | 3473                  |
| 金属极电弧                       | $10^{-7}$            | $10^5$                            | 6000                  |
| 钨极氩弧                        | $10^{-7}$            | $1.5 \times 10^5$                 | 8000                  |
| 埋弧焊                         | $10^{-7}$            | $2 \times 10^5$                   | 6400                  |
| 电渣焊                         | $10^{-6}$            | $10^5$                            | 2300                  |
| 熔化极氩弧和 $\text{CO}_2$ 气体保护电弧 | $10^{-8}$            | $10^5 \sim 10^6$                  | —                     |
| 等离子弧                        | $10^{-9}$            | $1.5 \times 10^6$                 | 18000 ~ 24000         |
| 电子束                         | $10^{-11}$           | $10^8 \sim 10^{10}$               | —                     |
| 激光束                         | $10^{-12}$           | $10^8 \sim 10^{10}$               | —                     |

表 1.2-2 不同焊接方法的电弧热效率  $\eta$

| 焊接方法           | 碳弧焊        | 厚皮焊条电弧焊     | 埋弧焊         | 电渣焊  | 电子束焊及激光焊 | 钨极氩弧焊       |             | 熔化氩弧焊       |            |
|----------------|------------|-------------|-------------|------|----------|-------------|-------------|-------------|------------|
|                |            |             |             |      |          | 交流          | 直流          | 钢           | 铝          |
| 热效率 $\eta$ (%) | 0.5 ~ 0.65 | 0.77 ~ 0.87 | 0.77 ~ 0.90 | 0.83 | >0.9     | 0.68 ~ 0.85 | 0.78 ~ 0.85 | 0.66 ~ 0.69 | 0.7 ~ 0.85 |

表 1.2-3 常用电弧焊方法的有效功率因数

| 电弧焊方法      | 直流焊条电弧焊     | 交流焊条电弧焊     | 埋弧焊         | $\text{CO}_2$ 气体保护焊 | 钨极氩弧焊       | 熔化极氩弧焊      |
|------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|
| 有效功率因数 (%) | 0.75 ~ 0.85 | 0.65 ~ 0.75 | 0.80 ~ 0.90 | 0.75 ~ 0.90         | 0.65 ~ 0.75 | 0.70 ~ 0.80 |