

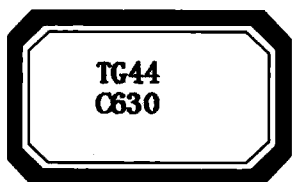
# 焊接工艺设计 与实例分析

陈裕川 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS





# 焊接工艺设计与实例分析

陈裕川 编著  
吴祖乾 审



TG44  
C630

机械工业出版社

本书论述了焊接工艺在焊接结构生产中的重要性,提出了焊接工艺的八大要素;系统地阐述了焊接工艺设计原理;详细地叙述了焊接接头设计、现代焊接工艺方法和各种材料的焊接工艺;介绍了焊接工艺规程的内容、编写程序和方法,焊接工艺评定的规则、试验方法和合格标准;分析了焊接工艺评定试验中必须考虑的焊接参数;列举了大量焊接工艺规程实例,并作出了必要的论证;介绍了国内外现行焊接工艺标准的主要内容。

本书可供从事焊接工艺的技术人员、焊接生产管理人员阅读,也可供相关专业人员和大专院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

焊接工艺设计与实例分析/陈裕川编著. —北京:机械工业出版社, 2009.9  
ISBN 978-7-111-27985-3

I. 焊… II. 陈… III. 焊接工艺-工艺设计 IV. TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第139110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:蒋有彩

版式设计:霍永明 责任校对:姚培新 吴美英

封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2010年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·48.25印张·1200千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-27985-3

定价:89.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面防伪标均为盗版

# 前 言

近 20 年来, 焊接技术的发展十分迅速, 已从一种传统的加工工艺和材料连接方法, 演变成为先进制造技术之一。焊接结构已广泛应用于能源、交通、建筑、化工、机械、航空航天和海洋工程等重要工业部门, 并不断向大型化、重型化和高参数方向发展。因此对焊接结构的制造质量提出了越来越严格的要求。世界各国都相继制定了设计规范、制造规程或法规, 对焊接质量的控制作出了科学的规定, 其中, 焊接工艺是最重要的核心技术。

在现代焊接结构的生产中, 焊接工艺起着极其重要的作用, 它不仅决定了产品的焊接质量, 而且直接关系到焊接生产的效率和经济效益。根据焊件的结构和技术要求, 设计正确而合理的焊接工艺却是一项十分艰巨的工作。这是因为焊接工艺的可变参数繁多, 对焊接质量的影响因素十分复杂, 且某些重要变量难以精确检测。因此对于一名称职的焊接工艺工程师来说, 不仅要求全面掌握有关的专业理论知识, 而且还应积累丰富的实践经验, 才能肩负起这一重任。因此, 编写出版专门论述焊接工艺设计的书籍, 很有必要。

本人从事焊接工艺工作逾 40 年, 通晓国内外焊接工艺的技术进步和发展趋势, 熟悉焊接结构的制造规范和技术标准, 掌握大量各类焊接结构生产工艺的第一手资料, 并在焊接工艺设计方面多有建树。本书的内容突出先进性、实用性和科学性。希望本书提供的资料, 对广大的焊接工作者解决各种焊接工艺问题, 以及正确而合理地设计焊接工艺规程有所裨益。

本书承蒙上海发电设备成套研究所吴祖乾高级工程师(教授级)认真审核, 并提出了许多宝贵的修改意见, 在此谨致以衷心的感谢。此外, 对本书所涉及的焊接试验研究和各类工程结构焊接生产中, 曾与作者合作的焊接工程师们表示深切的谢意。

鉴于焊接工艺的内容十分广泛, 相关的技术也在不断地改进和变革。本书的内容难免存在某些不足和错误, 敬请广大读者批评指正。

陈裕川

# 目 录

## 前言

## 第1章 焊接工艺设计概论 ..... 1

### 1.1 焊接工艺的发展概况 ..... 1

#### 1.1.1 焊接结构材料的发展 ..... 2

#### 1.1.2 焊接材料的发展 ..... 4

#### 1.1.3 焊接工艺方法的发展 ..... 5

#### 1.1.4 焊接设备的发展 ..... 9

#### 1.1.5 焊接结构的发展 ..... 11

### 1.2 焊接工艺工作的任务及其重要性 ..... 13

#### 1.2.1 焊接工艺的定义 ..... 13

#### 1.2.2 焊接工艺设计的任务 ..... 13

#### 1.2.3 焊接工艺的重要性 ..... 14

### 1.3 现代焊接工艺的特点 ..... 14

## 第2章 焊接工艺设计原理 ..... 16

### 2.1 焊接结构制造工艺概述 ..... 16

#### 2.1.1 原材料和焊接材料的检验与管理 ..... 16

#### 2.1.2 结构材料的预处理 ..... 17

#### 2.1.3 放样、划线与号料 ..... 19

#### 2.1.4 下料和边缘加工 ..... 20

#### 2.1.5 成形和弯曲加工 ..... 25

#### 2.1.6 装配与焊接 ..... 30

#### 2.1.7 焊后热处理 ..... 35

#### 2.1.8 焊件的质量检查 ..... 35

#### 2.1.9 焊接构件的后处理 ..... 40

#### 2.1.10 焊接结构的涂装 ..... 40

### 2.2 典型焊接结构制造工艺流程 ..... 41

#### 2.2.1 压力容器制造工艺流程 ..... 41

#### 2.2.2 船体制造工艺流程 ..... 49

### 2.3 焊接工艺设计工作的主要内容 ..... 54

#### 2.3.1 产品施工图样的焊接工艺性审查 ..... 54

#### 2.3.2 产品焊接工艺方案的制定 ..... 55

#### 2.3.3 焊接新材料、新工艺和新设备的试验 ..... 56

#### 2.3.4 焊接设备和焊接材料采购规范的编制 ..... 58

#### 2.3.5 产品焊接技术条件的编制 ..... 58

#### 2.3.6 焊接工艺专业标准的编制 ..... 60

#### 2.3.7 焊接工艺规程的编制 ..... 60

#### 2.3.8 焊接工艺评定的实施 ..... 61

#### 2.3.9 产品焊缝识别卡的编制 ..... 61

#### 2.3.10 其他焊接工艺文件的编制 ..... 62

### 2.4 焊接工艺设计工作程序 ..... 63

#### 2.4.1 基础焊接工艺设计标准准备 ..... 63

#### 2.4.2 焊接生产工艺设计准备阶段 ..... 64

#### 2.4.3 焊接工艺试验和技改措施实施阶段 ..... 65

#### 2.4.4 生产工艺文件准备阶段 ..... 65

#### 2.4.5 焊接生产过程质量监控阶段 ..... 66

#### 2.4.6 产品焊缝质量检查阶段 ..... 67

## 第3章 焊接接头的设计 ..... 68

### 3.1 概述 ..... 68

### 3.2 焊接接头的基本类型 ..... 68

#### 3.2.1 对接接头 ..... 68

#### 3.2.2 角接接头 ..... 71

### 3.3 焊接接头的工艺性设计 ..... 73

#### 3.3.1 焊接接头的可加工性 ..... 73

#### 3.3.2 焊接接头的可达性 ..... 74

#### 3.3.3 焊接接头的可检测性 ..... 75

### 3.4 焊接接头的坡口设计 ..... 77

#### 3.4.1 坡口设计的基本原则 ..... 77

#### 3.4.2 焊接坡口的设计准则 ..... 78

### 3.5 焊接接头坡口标准 ..... 94

#### 3.5.1 气焊、焊条电弧焊及气体保护焊焊缝坡口和尺寸标准 ..... 94

#### 3.5.2 埋弧焊焊缝坡口的基本形式和尺寸标准 ..... 94

#### 3.5.3 二氧化碳气体保护焊焊缝坡口和尺寸标准 ..... 94

### 3.6 焊接接头在焊接结构设计图样上的表示方法 ..... 118

#### 3.6.1 焊缝符号与焊接方法代号 ..... 118

#### 3.6.2 焊接接头在图样上的表示

|                                    |            |                            |            |
|------------------------------------|------------|----------------------------|------------|
| 方法 .....                           | 123        | 4.8.2 电渣焊的工艺方法 .....       | 186        |
| 3.6.3 焊接位置代号 .....                 | 130        | 4.8.3 电渣焊的焊接参数 .....       | 187        |
| <b>第4章 现代焊接工艺方法 .....</b>          | <b>132</b> | 4.8.4 电渣焊的操作技术 .....       | 189        |
| 4.1 概述 .....                       | 132        | 4.8.5 电渣焊的典型焊接参数 .....     | 191        |
| 4.2 焊条电弧焊 .....                    | 132        | 4.9 电子束焊 .....             | 192        |
| 4.2.1 焊条电弧焊的优缺点 .....              | 132        | 4.9.1 电子束焊的优缺点 .....       | 193        |
| 4.2.2 焊条电弧焊的工艺特点 .....             | 133        | 4.9.2 电子束焊的工艺方法 .....      | 193        |
| 4.2.3 焊条电弧焊的工艺参数 .....             | 133        | 4.9.3 电子束焊的焊接参数 .....      | 195        |
| 4.2.4 焊接操作技术 .....                 | 135        | 4.9.4 电子束焊的典型焊接参数 .....    | 195        |
| 4.2.5 典型的焊接参数 .....                | 135        | 4.10 激光焊 .....             | 196        |
| 4.3 埋弧焊 .....                      | 137        | 4.10.1 激光焊的优缺点 .....       | 196        |
| 4.3.1 埋弧焊方法的优缺点 .....              | 137        | 4.10.2 激光焊的工艺方法 .....      | 196        |
| 4.3.2 埋弧焊工艺方法 .....                | 137        | 4.10.3 激光焊的焊接参数 .....      | 197        |
| 4.3.3 埋弧焊工艺参数 .....                | 142        | 4.10.4 激光焊的典型焊接参数 .....    | 200        |
| 4.3.4 埋弧焊操作技术 .....                | 146        | 4.11 电阻焊 .....             | 200        |
| 4.3.5 埋弧焊典型焊接参数 .....              | 148        | 4.11.1 电阻焊的优缺点 .....       | 200        |
| 4.4 熔化极气体保护电弧焊 .....               | 150        | 4.11.2 电阻焊的工艺方法 .....      | 201        |
| 4.4.1 MIG/MAG 焊工艺特点及其优<br>缺点 ..... | 150        | 4.11.3 电阻点焊的焊接工艺 .....     | 201        |
| 4.4.2 熔化极气体保护焊工艺方法 .....           | 150        | 4.11.4 凸焊的焊接工艺 .....       | 203        |
| 4.4.3 MIG/MAG 焊的焊接参数 .....         | 156        | 4.11.5 缝焊的焊接工艺 .....       | 205        |
| 4.4.4 MIG/MAG 焊的操作技术 .....         | 159        | 4.11.6 电阻对焊的焊接工艺 .....     | 207        |
| 4.4.5 MIG/MAG 焊的典型焊接参数 .....       | 162        | 4.12 螺柱焊 .....             | 212        |
| 4.5 药芯焊丝电弧焊 .....                  | 164        | 4.12.1 电弧螺柱焊工艺 .....       | 212        |
| 4.5.1 药芯焊丝电弧焊的优缺点 .....            | 164        | 4.12.2 电容放电螺柱焊 .....       | 213        |
| 4.5.2 药芯焊丝电弧焊工艺方法 .....            | 165        | 4.13 摩擦焊 .....             | 214        |
| 4.5.3 药芯焊丝电弧焊焊接参数 .....            | 165        | 4.13.1 摩擦焊的优缺点 .....       | 214        |
| 4.5.4 药芯焊丝电弧焊的操作技术 .....           | 166        | 4.13.2 摩擦焊的工艺方法 .....      | 214        |
| 4.5.5 药芯焊丝电弧焊的焊接参数 .....           | 166        | 4.13.3 摩擦焊工艺 .....         | 215        |
| 4.6 不熔化极惰性气体保护电弧焊 .....            | 169        | 4.14 焊接工艺方法的选择 .....       | 217        |
| 4.6.1 TIG 焊的优缺点 .....              | 169        | 4.14.1 焊接工艺方法的选择原则 .....   | 217        |
| 4.6.2 TIG 焊的工艺方法 .....             | 170        | 4.14.2 焊接工艺方法的选择依据 .....   | 217        |
| 4.6.3 TIG 焊的焊接参数 .....             | 171        | 4.14.3 焊接工艺方法的实例分析 .....   | 218        |
| 4.6.4 TIG 焊的操作技术 .....             | 174        | <b>第5章 金属材料的焊接工艺 .....</b> | <b>223</b> |
| 4.6.5 TIG 焊的典型焊接参数 .....           | 177        | 5.1 概述 .....               | 223        |
| 4.7 等离子弧焊 .....                    | 178        | 5.2 碳素结构钢的焊接工艺 .....       | 223        |
| 4.7.1 等离子弧焊的优缺点 .....              | 178        | 5.2.1 碳素结构钢的基本特性 .....     | 223        |
| 4.7.2 等离子弧焊的工艺方法 .....             | 179        | 5.2.2 碳素结构钢的焊接性 .....      | 238        |
| 4.7.3 等离子弧焊的焊接参数 .....             | 181        | 5.2.3 碳钢焊接材料 .....         | 241        |
| 4.7.4 等离子弧焊的操作技术 .....             | 182        | 5.2.4 碳钢的焊接工艺要点 .....      | 256        |
| 4.7.5 等离子弧焊的典型焊接参数 .....           | 183        | 5.3 低合金结构钢的焊接工艺 .....      | 258        |
| 4.8 电渣焊 .....                      | 185        | 5.3.1 低合金结构钢的基本特性 .....    | 258        |
| 4.8.1 电渣焊的优缺点 .....                | 185        | 5.3.2 低合金结构钢的焊接性 .....     | 293        |
|                                    |            | 5.3.3 低合金结构钢焊接材料 .....     | 298        |

|                                |     |                                            |     |
|--------------------------------|-----|--------------------------------------------|-----|
| 5.3.4 低合金钢焊接工艺要点 .....         | 343 | 7.2.2 焊接工艺评定试验方法及合格标准 .....                | 524 |
| 5.4 中合金钢的焊接工艺 .....            | 353 | 7.2.3 钢结构焊接工艺评定试验项目 .....                  | 533 |
| 5.4.1 中合金耐热钢的基本特性 .....        | 354 | 7.2.4 钢结构焊接工艺评定试验方法及合格标准 .....             | 539 |
| 5.4.2 中合金低温钢的基本特性 .....        | 355 | 7.3 焊接工艺评定试验实例 .....                       | 543 |
| 5.4.3 中合金耐热钢的焊接性 .....         | 356 | 7.3.1 锅炉受压部件焊接接头工艺评定试验实例 .....             | 544 |
| 5.4.4 中合金低温镍钢的焊接性 .....        | 357 | 7.3.2 压力容器焊接接头工艺评定试验实例 .....               | 585 |
| 5.4.5 中合金钢焊接材料 .....           | 358 | 7.3.3 钢结构焊接接头工艺评定试验实例 .....                | 615 |
| 5.4.6 中合金钢焊接工艺要点 .....         | 365 | <b>第8章 焊接工艺规程实例分析</b> .....                | 625 |
| 5.5 高合金钢的焊接工艺 .....            | 367 | 8.1 概述 .....                               | 625 |
| 5.5.1 高合金不锈钢的基本特性 .....        | 368 | 8.2 锅炉受压部件各类焊接接头焊接工艺规程实例及其分析 .....         | 626 |
| 5.5.2 高合金不锈钢的焊接性 .....         | 384 | 8.2.1 锅炉锅筒焊接工艺规程实例及其分析 .....               | 626 |
| 5.5.3 高合金耐热钢的基本特性 .....        | 396 | 8.2.2 锅炉集箱焊接工艺规程实例及其分析 .....               | 644 |
| 5.5.4 高合金耐热钢的焊接性 .....         | 402 | 8.2.3 锅炉受热面管件对接焊接工艺规程实例及其分析 .....          | 663 |
| 5.5.5 高合金超高强度钢的基本特性 .....      | 406 | 8.3 压力容器各类焊接接头焊接工艺规程实例及其分析 .....           | 676 |
| 5.5.6 高合金超高强度钢的焊接性 .....       | 410 | 8.3.1 低碳钢压力容器筒体纵环缝典型焊接工艺规程实例及其分析 .....     | 676 |
| 5.5.7 高合金钢焊接材料 .....           | 412 | 8.3.2 低合金高强度钢压力容器筒体纵环缝典型焊接工艺规程实例及其分析 ..... | 683 |
| 5.5.8 高合金钢焊接工艺要点 .....         | 429 | 8.3.3 低合金耐热钢压力容器筒体焊接接头焊接工艺规程实例及其分析 .....   | 707 |
| <b>第6章 焊接工艺规程与焊接工艺评定</b> ..... | 450 | 8.3.4 低温压力容器壳体焊接接头焊接工艺规程实例及其分析 .....       | 715 |
| 6.1 概述 .....                   | 450 | 8.3.5 不锈钢压力容器壳体纵、环缝焊接工艺规程实例及其分析 .....      | 718 |
| 6.2 焊接工艺规程 .....               | 451 | 8.3.6 不锈钢复合钢板压力容器壳体焊接接头焊接工艺规程实例及其分析 .....  | 724 |
| 6.2.1 焊接工艺规程的定义 .....          | 451 |                                            |     |
| 6.2.2 焊接工艺规程的格式 .....          | 451 |                                            |     |
| 6.2.3 焊接工艺规程的内容 .....          | 455 |                                            |     |
| 6.2.4 焊接工艺规程的编制程序 .....        | 455 |                                            |     |
| 6.2.5 焊接工艺规程的编写方法 .....        | 455 |                                            |     |
| 6.2.6 焊接工艺规程的适用性和局限性 .....     | 460 |                                            |     |
| 6.3 焊接工艺评定 .....               | 461 |                                            |     |
| 6.3.1 焊接工艺评定的定义 .....          | 461 |                                            |     |
| 6.3.2 焊接工艺评定的依据 .....          | 461 |                                            |     |
| 6.3.3 焊接工艺评定的程序 .....          | 461 |                                            |     |
| 6.3.4 焊接工艺评定规则 .....           | 467 |                                            |     |
| 6.3.5 焊接参数 .....               | 503 |                                            |     |
| 6.3.6 焊接工艺评定报告 .....           | 514 |                                            |     |
| <b>第7章 焊接工艺评定试验</b> .....      | 518 |                                            |     |
| 7.1 概述 .....                   | 518 |                                            |     |
| 7.2 焊接工艺评定试验项目和试验方法 .....      | 518 |                                            |     |
| 7.2.1 锅炉与压力容器焊接工艺评定试验项目 .....  | 518 |                                            |     |

---

|                         |     |                       |     |
|-------------------------|-----|-----------------------|-----|
| 附录 .....                | 730 | 工艺导则) .....           | 742 |
| 附录 A 锅炉受压元件焊接技术条件 ..... | 730 | 附录 C 美国标准焊接工艺规程 ..... | 752 |
| 附录 B 通用焊接工艺标准 (焊接       |     | 参考文献 .....            | 764 |

# 第 1 章 焊接工艺设计概论

## 1.1 焊接工艺的发展概况

自从 1810 年俄国人发明碳弧焊接以来，焊接技术已走过了近 200 年的历程。在世界范围内，焊接技术的工业性应用始于 1900 年。之后又相继发明了 10 多种具有工业实用价值的焊接方法。表 1-1 列出主要焊接方法发明国家和年份。

表 1-1 主要焊接方法发明国家和年份

| 焊接方法                  | 英文缩写      | 发明国    | 发明年份        |
|-----------------------|-----------|--------|-------------|
| 电阻焊                   | RW        | 美国     | 1886 ~ 1900 |
| 氧炔气焊                  | OAW       | 法国     | 1900        |
| 铝热焊                   | TW        | 德国     | 1900        |
| 焊条电弧焊                 | MMA, SMAW | 瑞典     | 1907        |
| 电渣焊                   | ESW       | 俄国, 苏联 | 1908 ~ 1950 |
| 等离子弧焊                 | PAW       | 德国, 美国 | 1909 ~ 1953 |
| 钨极惰性气体保护焊             | TIG, GTAW | 美国     | 1920 ~ 1941 |
| 药芯焊丝电弧焊               | FCAW      | 美国     | 1926        |
| 螺柱焊                   |           | 美国     | 1930        |
| 熔化极惰性气体保护焊            | MIG, GMAW | 美国     | 1930 ~ 1948 |
| 埋弧焊                   | SAW       | 美国     | 1930        |
| CO <sub>2</sub> 气体保护焊 | MAG, GMAW | 苏联     | 1953        |
| 电子束焊                  | EBW       | 苏联     | 1956        |
| 激光束焊                  | LBW       | 英国     | 1970        |
| 搅拌摩擦焊                 | FSW       | 英国     | 1991        |

随着世界工业化的进程，特别是二次世界大战期间，军火工业急剧膨胀，刺激了焊接技术高速发展，并进入大规模工业生产领域，确立了其不可动摇的地位。

过 50 年来，全球工业现代化进一步促进了焊接技术的全面创新和开拓性的工程应用。世界各工业发达国家对焊接基础理论的大量深入研究，使焊接成为一门独立的、自成体系的应用学科。焊接学科所涉及的知识领域相当广泛。焊接基础理论包括焊接物理学、焊接冶金学、焊接力学及焊接控制学四大分支。焊接工程技术则包括以下内容：焊接结构材料焊接性的测定；焊接材料的研究与开发；焊接工艺方法的试验研究；焊接工艺的设计；焊接电源和设备的研制；焊接过程和焊接质量的监控；焊接结构的强度计算和断裂分析；焊接生产过程的机械化和自动化；焊件坯料的预处理；焊件的焊后热处理；焊件的后处理及涂装；焊件的质量检验及检测方法；焊接环保和劳动保护；焊接生产现场管理及焊接标准的制订等。它们之间的关系见图 1-1。可见，焊接技术领域已成为一个巨大的科技知识宝库，而焊接技术本

身也提升为现代化工业生产中知识密集型的先进制造技术。

### 1.1.1 焊接结构材料的发展

在现代焊接结构中,钢铁仍然是应用面最广的结构材料。随着焊接结构向大型化、轻型化、精密化和高参数化发展,结构材料的品种已从普通碳素钢和低合金钢,扩大到各种高强度钢、中合金钢、高合金钢、低温钢、耐热钢及不锈钢。特别是各类不锈钢在焊接结构制造业中的应用急速增长。图 1-2 的曲线表明,其年增长率约为 5.5%。2003 年,世界不锈钢消耗量为 2150 万 t,其中我国不锈钢用量占 54.2%,绝大部分用于各种压力容器、大型储罐和管道,包括部分输油、输气管线。

在改善低合金结构钢焊接性方面,已在以下各方面取得成功经验:①采用温度-形变控制工艺(TM),可以在较低的合金含量下保持相同的屈服强度,在最新的钢材标准中,已列入屈服强度达 460MPa 的低合金 TM 钢;②开发低碳、低杂质含量的微合金钢,最高屈服强度高于 500MPa,且具有较高的低温缺口冲击韧度;③采用淬火+回火调质处理,可在不增加钢材合金含量的前提下,提高强度和韧度,并具有良好的焊接性,屈服强度高于 780MPa 的调质高强度钢,只要求 50℃ 低温预热。

在耐热钢方面,新钢种的研发成果尤为突出。这归因于世界能源工业的高速发展,特别是大型火力发电站。为提高热效率、减少煤耗和保护环境,锅炉和汽轮机的工作参数大幅度提升,已从亚临界提高到超临界,甚至特超临界。锅炉受热面部件的温度已超过 600℃,某些新型电站锅炉的最高工作温度已接近 700℃。因此,现有的耐热钢种已经不能满足要求,新型耐热钢的开发势在必行。近 20 年来,世界各国投入大量人力、物力,不仅改进了经典的  $w(\text{Cr})=2\% \sim 2.5\%$  的低合金铬钼耐热钢,而且创造性地研发了一系列  $w(\text{Cr})=9\% \sim 12\%$  的多组元中合金耐热钢和奥氏体耐热钢,大大提高了钢材的蠕变极限。其中许多钢种已纳入美国 ASME 材料标准或欧共体工业标准。图 1-3 和图 1-4 分别列出  $w(\text{Cr})=9\% \sim 12\%$  的耐热钢和奥氏体耐热钢的演变过程。

为满足大型石化装备,输油、输气工程,造纸设备,饮料、乳品加工装置,海水、污水处理系统等制造行业不断增长的需求,不锈钢耐酸钢也进入一个新的发展阶段。其主攻方向是进一步提高在恶劣的腐蚀条件下,特别是在含氯化物的介质中,耐点蚀和应力腐蚀的性能。目前在新型不锈钢耐酸钢的研制中,已在铁素体-奥氏体双相不锈钢、超级双相不锈钢及超级奥氏体钢方面取得突破性的进展。其耐点蚀指数最高达 55,而普通超低碳不锈钢的耐点蚀指数平均为 25,可见耐蚀性明显提高。此外,新型不锈钢耐酸钢还具有较高的屈服强度,最

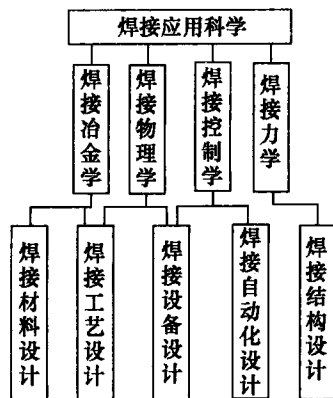


图 1-1 焊接应用科学涉及的知识领域及相互关系

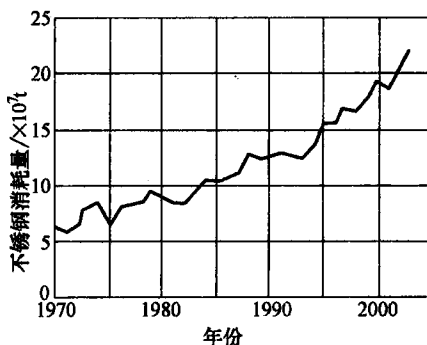


图 1-2 世界不锈钢消耗量增长曲线

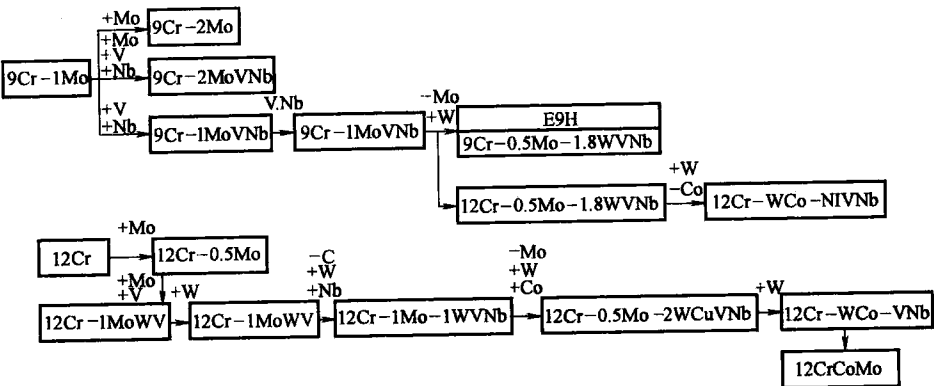


图 1-3 9% ~ 12% Cr 中合金耐热钢演变过程

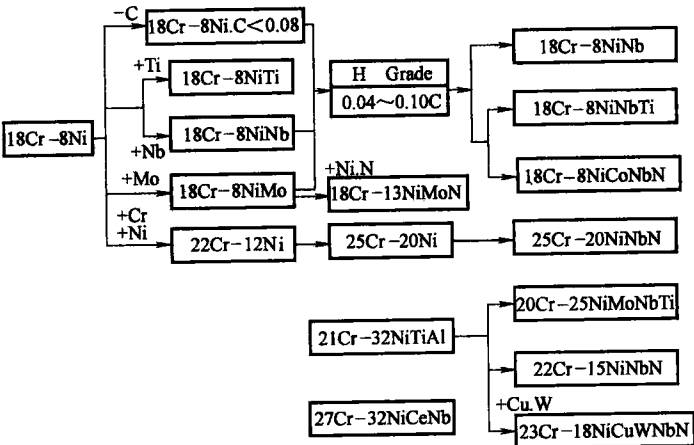


图 1-4 奥氏体耐热钢的最新发展过程

高可达 540MPa。这可节省大型不锈钢化工设备结构材料的消耗量，具有可观的经济价值。表 1-2 列出几种最具代表性的新型不锈钢耐酸钢的典型化学成分、力学性能和耐点蚀指数；表中同时列出普通奥氏体不锈钢的相关数据，以资比较。

表 1-2 新型不锈钢耐酸钢的典型化学成分、力学性能和耐点蚀指数

| 钢号或代号  | 化学成分（%，质量分数） |      |      |      |      |    | 拉伸性能            |                 | 耐点蚀指数 PRE <sup>①</sup> |
|--------|--------------|------|------|------|------|----|-----------------|-----------------|------------------------|
|        | C            | Cr   | Ni   | Mo   | N    | 其他 | $\sigma_s$ /MPa | $\sigma_b$ /MPa |                        |
| 304L   | 0.02         | 18.5 | 9.5  | —    | —    | —  | 205             | 520             | 19                     |
| 316L   | 0.02         | 17.0 | 11.5 | 2.7  | —    | —  | 205             | 500             | 27                     |
| N08904 | 0.01         | 20.0 | 25.0 | 4.5  | —    | Cu | 220             | 500             | 36                     |
| 超级奥氏体钢 |              |      |      |      |      |    |                 |                 |                        |
| S31254 | 0.01         | 20.0 | 18.0 | 6.20 | 0.20 | Cu | 300             | 650             | 43                     |
| S32654 | 0.01         | 24.2 | 17.9 | 7.20 | 0.45 | Cu | 430             | 750             | 55                     |

(续)

| 钢号或代号                  | 化学成分(%, 质量分数) |      |     |     |      |    | 拉伸性能            |                 | 耐蚀指数 PRE <sup>①</sup> |
|------------------------|---------------|------|-----|-----|------|----|-----------------|-----------------|-----------------------|
|                        | C             | Cr   | Ni  | Mo  | N    | 其他 | $\sigma_s$ /MPa | $\sigma_b$ /MPa |                       |
| 双相不锈钢<br>S31803/S32205 | 0.02          | 22.0 | 5.5 | 3.0 | 0.18 | —  | 480             | 680             | 35                    |
| 超级双相不锈钢<br>S32750      | 0.02          | 25.0 | 7.0 | 4.0 | 0.28 |    | 540             | 780             | 42                    |

① 耐蚀指数计算公式： $PRE = w(C) + 3.3\%w(Mo) + 16\%w(N)$ 。

近 10 年来，我国国民经济持续高速发展，促进了钢铁工业的发展。1996 年，我国钢产量突破 1 亿 t，成为世界钢产量和消耗量的第一大国。2007 年，我国钢产量增至 5.4 亿 t，全年钢材消耗量 4.8 亿 t。其中，焊接结构用钢量按占有比 60% 计算，接近 3.0 亿 t，堪称世界焊接大国。今后 10 年，我国钢产量和钢材消耗量仍将保持增长势头，必将促进我国焊接技术的全面、快速发展。

在现代焊接结构中，铝及其合金在许多工程领域得到了越来越广泛的应用。铝作为工程结构材料的优点是密度小、比强度高，且具有较好的耐蚀性。铝的缺点是弹性模量较低、刚度较小、热膨胀系数较大，使铝的焊接产生一定的困难。近年来，由于焊接技术的进步，铝的焊接难题已基本解决。目前许多重要焊接结构，如轿车车身、轨道车辆、游艇、高速渡轮、高压开关装置及化工储罐等，都已改用铝及其合金制造。2003 年，世界铝总产量达到 2600 万 t，并以年增长率 3% 的速度增长。可以预期，铝必将成为焊接结构主要结构材料之一，并占有相当重要的地位。

1.1.2 焊接材料的发展

焊接材料的发展与钢材消耗量的增长密切相关。表 1-3 列出 1996 ~ 2006 年我国钢材表观消耗量与焊材消耗量。2008 年，我国焊材消耗量达到 350 万 t。无疑，已稳居世界首位。

表 1-3 1996 ~ 2006 年我国钢材表观消耗量与焊材消耗量 (单位: 万 t)

| 年 份  | 钢材产量  | 钢材表观消耗量 | 焊材消耗量 | 年 份  | 钢材产量  | 钢材表观消耗量 | 焊材消耗量 |
|------|-------|---------|-------|------|-------|---------|-------|
| 1996 | 9338  | 10514   | 75    | 2003 | 23581 | 26200   | 200   |
| 2000 | 13146 | 14121   | 110   | 2004 | 27280 | 31200   | 230   |
| 2001 | 15745 | 16993   | 120   | 2005 | 34900 | 37000   | 280   |
| 2002 | 19218 | 21122   | 160   | 2006 | 41900 | 39800   | 310   |

一个国家所生产的焊材产品结构，往往直接反映了该国焊接技术的水平。图 1-5 示出近 10 年来，我国焊材产品结构变化示意图。从中可以看出，焊条电弧焊用药皮焊条，占焊材总产量的比例逐年下降，尤其在 2004 ~ 2006 年间，出现大幅度下降，已由 1996 年的 80%，下降到 2006 年的 58%。机械化焊接用焊丝的产量相应增加，目前已占 42.6%。实现了跨越式进步。但与工业发达国家相比，尚有较大的差距。图 1-6 示出西欧、美国、日本三地区 1975 ~ 1996 年焊材产品结构演变示意图。从中可见，早在 1996 年，西欧、美国和日本焊条

产量比例分别为18%，22%和15%。而 MIG/MAG 焊用实心焊丝和药芯焊丝的产量比高达70%~80%。说明在这些工业发达国家的焊接结构生产中，MIG/MAG 焊和药芯焊丝电弧焊等自动化焊接方法已占居绝对的优势。

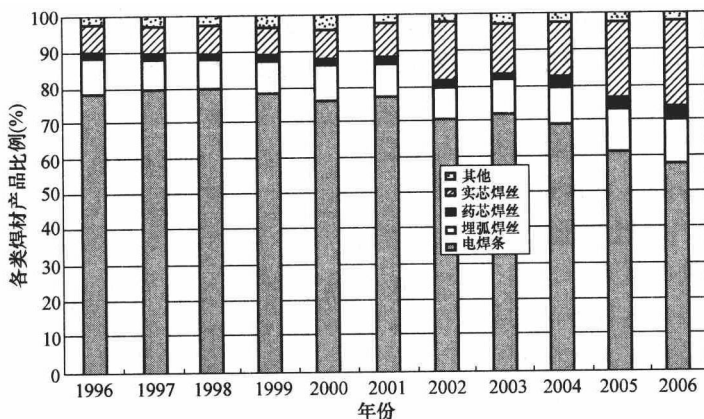


图 1-5 1996~2006 年我国焊材产品结构变化示意图

阻碍我国焊材制造行业全面、快速发展的瓶颈，是自主创新和研发力量相对薄弱，焊材的品种远远跟不上结构材料的发展速度，例如：石油加氢裂化装备用高纯度铬钼钢焊条和焊丝；高端化工设备用超级奥氏体钢焊条和焊丝；超级双相不锈钢焊条和焊丝；超临界和特超临界锅炉受热面高温部件用新型  $w(\text{Cr}) = 9\% \sim 12\%$  的耐热钢，以及新型奥氏体耐热钢焊条和焊丝等。在一些工业发达国家，上述新型焊材基本上与结构材料同步开发，并能及时提供商品焊材。

未来10年内，我国焊材的总产量将随着钢产量的持续增长而继续攀升，可望达到450万t；自动化焊接用焊接材料的产量比例将接近80%；焊材的品种将满足各类焊接结构的生产需要。

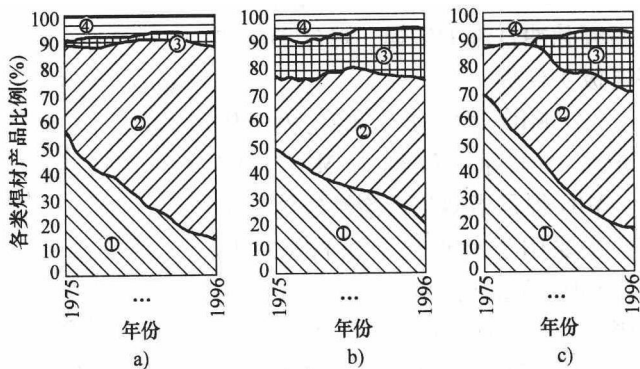


图 1-6 1975~1996 年间工业发达国家

国家焊材产品结构变化示意图

a) 西欧 b) 美国 c) 日本

①—MMA (焊条电弧焊) ②—MIG/MAG 焊  
③—FCW 药芯焊丝电弧焊 ④—SAW (埋弧焊)

### 1.1.3 焊接工艺方法的发展

在现代工业生产中应用的焊接工艺方法，基本上分成三大类：①传统焊接方法；②高能束焊接方法；③特种焊接方法。近20年来，这些焊接工艺方法都在不同程度上得到了新的发展。

#### 1. 传统焊接工艺方法的发展

传统焊接方法主要是指焊条电弧焊、钨极氩弧焊 (TIG 焊)、熔化极气体保护焊 (MIG/

MAG 焊)、药芯焊丝电弧焊 (FCW 焊)、埋弧焊 (SAW 焊)、电渣焊 (ESW 焊)、气电立焊 (GEW) 及接触焊等。其中各种弧焊方法占据主要地位, 尤其是 MIG/MAG 焊发展速度最快。目前在工业发达国家, 80% 以上的焊接工作量由 MIG/MAG 焊、药芯焊丝电弧焊和埋弧焊所完成。在各类焊接结构的生产中, 这三种焊接方法起着举足轻重的作用。近年来, 不锈钢和铝合金在焊接结构中的应用范围不断扩大, 促使这些材料的主要焊接方法——钨极氩弧焊进入了新的发展阶段。

(1) 钨极氩弧焊 钨极氩弧焊在国际上简称为 TIG 焊。它具有低电流下电弧稳定性好、焊缝成形美观、焊缝质量高等一系列的优点, 适用于薄壁精密部件的焊接。这种方法的最大缺点是焊接效率较低, 大大限制了其应用范围。近来经过大量的试验研究, 开发了多种新型、高效、优质的 TIG 焊工艺方法, 详见图 1-7。

在高效 TIG 焊接法中, 已在实际生产中得到应用, 并最具发展前途的是高频脉冲直流 TIG 焊、热丝 TIG 和多电极 TIG 焊。

(2) MIG/MAG 焊 熔化极气体保护焊在国际上统称为 MIG/MAG 焊。MIG 焊是指熔化极惰性气体保护焊, 主要用于易氧化金属材料的焊接。MAG 焊是指熔化极活性气体保护焊, 包括  $\text{CO}_2$  气体保护焊。MAG

焊与 MIG 焊相比, 因气体成本要低得多, 且工艺适应性强, 应用范围迅速扩大。但在早期, MAG 焊具有飞溅较大、焊缝成形不良, 以及短路过渡, 易形成未熔合等一系列缺点。近期为克服上述缺点, 完成了大量开拓性的工作、使 MIG/MAG 焊工艺方法更趋完善, 并开发成功如图 1-8 所列的各种新型、高效、优质 MIG/MAG 焊工艺方法。

在上述各种新型 MIG/MAG 焊工艺方法中, 对焊接技术发展贡献最大的是 T. I. M. E 高效 MIG/MAG 焊, 即电离转换熔化能气体保护焊接法; 双丝串列电弧高速 MIG/MAG 焊; 波形控制 MIG/MAG 焊。MIG/MAG 焊作为一种先进制造技术进入各高端工业部门, 其应用范围正在迅速扩大。

(3) 药芯焊丝电弧焊 在现代工业生产中使用的药芯焊丝, 分为自保护型和气体保护型两大类。药芯焊丝与普通实心焊丝 MIG/MAG 焊相比, 具有熔敷率高、飞溅少、焊缝成形美观等优点。在相同的焊接电参数下, 药芯焊丝的熔敷率通常比实心焊丝高 30%。新开发的金属粉芯焊丝可达到更高的熔敷率。从 1980 年开始, 世界各主要工业国家应用药芯焊丝电弧焊。最近在美国和日本, 其应用比率已提高到了 25% ~ 30%。这主要归因于药芯焊丝品种不断增加, 性能日趋完善、成本逐渐降低。在我国, 药芯焊丝电弧焊已在船舶、重型机

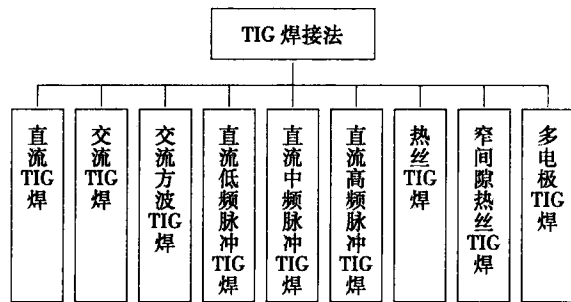


图 1-7 在工业生产中应用的各种 TIG 焊接法

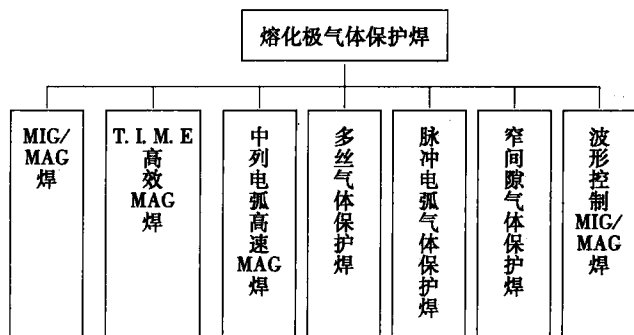


图 1-8 现代新型、高效 MIG/MAG 焊工艺方法

械和管线等制造行业得到较广泛的应用。

(4) 气电立焊 气电立焊是熔化极气体保护的特殊形式,是在垂直位置采用实心焊丝或药芯焊丝,完成焊接过程的高效焊接法。主要应用于大型船舶、大型储罐、冶金设备和重钢结构等制造行业。为进一步提高气电立焊的效率和改善焊缝质量,新近开发成功了双丝气电立焊,每根焊丝单独由一台焊接电源供电,焊接效率可成倍提高。

(5) 埋弧焊 埋弧焊是较早用于工业生产的高效焊接工艺方法。由于埋弧焊具有一系列的优点,目前在锅炉、压力容器、管道、船舶、机车车辆、钢结构、桥梁构件和重型机械等制造领域,仍保持较高的应用比率。近年来,为进一步提高焊接效率,改善焊缝质量,已成功开发了多种新型埋弧焊工艺方法,主要有:①双丝(单电源)埋弧焊;②串列电弧(双电源)埋弧焊;③多丝(多电源)埋弧焊;④全数字波控埋弧焊。

双丝埋弧焊是采用两根直径不大于2.0mm的焊丝,通过同一个导电嘴,由同一台焊接电源供电的焊接方法。与常规的单丝埋弧焊相比,其熔敷率可提高40%以上。

串列电弧埋弧焊也采用双丝,不过每根焊丝分别由各自的电源供电。通常的做法是两根焊丝沿焊缝轴线前后布置,其中前置焊丝由直流电源供电,选用较大的焊接电流,以达到深熔;后置焊丝由交流电源供电,以消除两电弧间的相互干扰,并增加填充金属量,其焊接效率与传统的单丝埋弧焊相比,至少可提高一倍。最近,为解决风力发电机组风塔立柱焊接生产周期长的问题,推出了两对双丝的串列电弧埋弧焊接法,英文名称为 Tandem Twin SAW。如采用4根 $\phi 2.5\text{mm}$ 的焊丝进行焊接,其最高熔敷速率可达 $38\text{kg/h}$ ,可大大缩短大直径厚壁风塔的焊接生产周期。

多丝埋弧焊是采用3~6根焊丝,并由单独的电源分别向每根焊丝供电,大大提高了熔敷率和焊接速度,例如:采用4根 $\phi 4.0\text{mm}$ 的4丝埋弧焊,其最高熔敷率可达 $80\text{kg/h}$ 。这种高效埋弧焊接方法已用于厚壁管纵缝、厚壁高压容器筒体纵缝、船体钢板拼接、风塔立柱筒体纵缝的焊接生产中。

全数字波控埋弧焊是最新研发成功的一项高新技术,全面采用了当今最先进的计算机数字控制技术、网络控制技术、晶体管开关逆变技术及焊接电流波形控制技术,大大提高了焊接电源的控制精度和反应速度,明显改善焊接电弧的动态特性,增强了埋弧焊的工艺适应性。从而将传统的埋弧焊技术推进到了一个崭新的发展阶段,并将扩大其在高端工业部门的应用范围。

## 2. 高能束焊接方法的发展

在工业生产中得到实际应用的高能束焊接方法,有等离子弧焊、电子束焊和激光束焊。这些焊接方法的共同特点是热源的能量密度高,可以一次行程穿透较厚的接头而无需预制坡口、简化了制造工艺,而且束流的中心温度相当高,足以熔化任何金属材料,因此具有较高的经济价值,工业应用前景广阔。

(1) 等离子弧焊 等离子弧焊已有40余年的历史。迄今具有工业实用价值的等离子弧焊工艺方法有:微束等离子弧焊、熔透型等离子弧焊、穿透型等离子弧焊、脉冲等离子弧焊、变极性等离子弧焊及粉末等离子弧堆焊等。其最突出的进步是成功开发了交流变极性等离子弧焊工艺方法,已成功应用于质量要求很高的航空航天铝制部件。

微束等离子弧焊技术也有很大改进,可以焊接壁厚 $0.01\sim 1.5\text{mm}$ 的各种接头。熔透型等离子弧焊的最高焊接速度可达 $480\text{m/h}$ 。穿透型等离子弧焊一次行程全焊透双面成形的厚

度可达 10mm。等离子弧焊由于焊缝质量优异,其在不锈钢、钛及其合金、镍及其合金、铜及其合金、铝及其合金加工工业中的应用范围正在不断扩大。

(2) 电子束焊 早在 20 世纪 80 年代初期,电子束焊已进入成熟的发展阶段。由于电子束的能量密度高达  $300 \sim 500 \text{ kW/mm}^2$ ,因此一次穿透能力强、生产效率高。焊接过程可在高真空、半真空和非真空条件下完成。焊缝的纯净度高,焊缝质量可达到顶级水平,已在飞机、火箭、汽车、机器传动部件及活性金属焊件的连接中得到较广泛的应用。目前,工业用电子束焊机的最大功率达 60kW、最高加速电压为 175kV,最大焊接厚度超过 200mm。标准型电子束焊机真空室的最大尺寸达  $60 \text{ m}^3$ 。

(3) 激光束焊 激光束焊虽然是 20 世纪 70 年代才发明的焊接方法,但近 40 年来,由于其具有独特的优点,发展十分迅速,已在许多重要工业部门得到应用。激光束的最大特点是聚焦后,在焦点上的能量密度可达  $10^6 \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ,加热范围小于 1.0mm,用于焊接金属材料,不仅焊接速度快、焊接接头的变形和应力也相当小。作为精密焊,无疑是较理想的焊接方法。当激光束的功率密度超过  $10^6 \text{ W/cm}^2$  时,激光束就具有较强的穿透能力,并产生穿透效应。采用功率为 12kW 的工业  $\text{CO}_2$  激光器,可一次行程焊接厚达 16mm 的对接接头。

激光束还具有在空气传播中不受干扰的特点,故可实现长距离的焊接。与电子束焊相比,其优点是不需要真空室,设备投资费用大大减少,焊接辅助时间相应缩短。此外,激光焊过程中不会产生电子束焊时的 X 射线,故可节省射线防护装置。在中、薄板制件的焊接中,激光焊将部分取代电子束焊。近 10 年来,激光焊机的核心部件——激光器的功能和性能有了很大的提高,目前已可提供最高功率达 45kW 的工业  $\text{CO}_2$  激光器。

激光束焊在工业生产中尚不能大规模普及的原因,除设备投资费用较高外,对接缝的焊前准备提出了十分严格的要求,即接缝间隙不应超过 0.5mm,接缝对接表面必须相当光洁。这对于许多金属结构生产企业,几乎是难以实现的。为解决这一矛盾,最近开发成功了激光-MIG 复合焊接法。将激光束和 MIG 电弧同时作用于接缝的对接面,并形成较宽的焊缝。激光束不但加大了熔透深度,也增加了电弧区的热量,加快了焊丝的熔化速度;MIG 焊焊丝的熔化金属填补了接缝的间隙,可适当降低焊前准备工作的要求。因此激光-MIG 复合焊很快用于工业生产中。激光-MIG 复合焊设备也进入了商品化生产阶段。

### 3. 特种焊接方法

在现代工业生产中应用的特种焊接方法,主要有冷压焊、摩擦焊、爆炸焊、螺柱焊及旋弧焊等。这些焊接工艺方法随着工业化的进程,都有不同程度的发展。其中,最引人注目的是新型摩擦焊接法——搅拌摩擦焊的发明和在工业生产中的应用。

搅拌摩擦焊的最主要特点,是利用高速旋转的搅拌头摩擦被焊金属,并对接缝施加一定的压力。摩擦热将焊接区加热至高温,使其处于热塑性状态,通过被焊金属的塑性流动形成焊缝。

搅拌摩擦焊与传统的焊接方法相比,具有下列优点:①焊缝质量高,再现性好,不会产生气孔和未熔合等缺陷;②焊接能量利用率高、热输入量低,焊接变形小,接头强度性能基本不受焊接热的影响;③焊前准备工作量少,不需要焊后热处理;④焊接过程中不产生光、烟尘和有毒气体,改善了工作环境;⑤不需要添加填充材料。其缺点是设备的投资费用较高。

1.1.4 焊接设备的发展

近 30 年来，为适应焊接工艺方法的发展，并满足焊接生产过程机械化和自动化日益增长的需要，焊接设备制造行业以相当快的速度发展，新设备、新技术不断涌现。焊接设备的结构和功能发生了根本的变化。特别是新型半导体器件、集成电路、数字控制技术、网络控制技术及计算机软件的应用，使焊接设备进入高度现代化、信息化的发展阶段。

现代焊接设备已形成一种门类齐全、自成体系的制造行业。它涵盖了各种焊接电源、送丝机、成套焊接设备、焊接工艺装备、焊接机器人、柔性制造系统和焊接生产线等。

用途最广的弧焊电源，已从最原始的交流变压器、电动机驱动直流弧焊机和硅整流焊接电源，发展到晶闸管整流焊接电源、晶体管逆变式焊接电源、微机控制焊接电源、数字网络控制焊接电源，以及计算软件波形控制焊接电源。图 1-9 示出当代最先进的数字控制晶体管逆变式弧焊电源外形及其控制面板的构型。图 1-10 示出具有网络控制功能的弧焊电源与相关焊接设备的无缝集成示意图。说明，这类先进的弧焊电源对于构建全自动化焊接装备创造了十分便捷的条件。

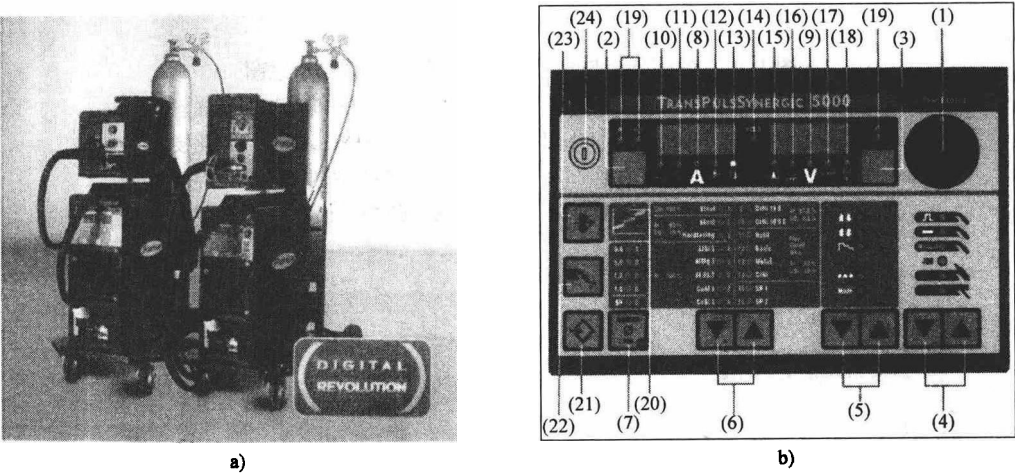


图 1-9 数字控制晶体管逆变式弧焊电源外形及其控制面板构型  
a) 焊接电源外形 b) 控制面板构型

成套自动焊接设备通常由焊接电源、送丝机、焊接机头、焊枪移动机构、焊件变位机及控制系统等组成。目前已成为自动化焊接生产中应用最普遍的机种之一，设备的功能和自动化程度不断提升。其控制系统从最简单的电磁继电器控制，发展到无触点电子控制、微机控制、PLC 程序控制及工业计算机控制。某些成套自动焊接设备已进入标准化批量生产，如图 11-1 所示的标准型薄板纵缝自动焊专机和图 1-12 所示的标准型环缝自动焊专机。这些自动化焊接专机通常配备 TIG、MIG/MAG 等离子弧焊和埋弧焊焊接电源及相应的送丝机构。亦可配备多功能焊接电源，使其具有通用性。如要求进一步提高焊接自动化程度，则可装备相应的焊缝自动跟踪器、电弧电压自动控制器（ALC）、电弧监控器及焊枪横摆器等自动化器件。