



职业教育“十二五”规划教材

# 焊接技术

HANJIE JISHU

乌日根 主编

- 配套电子课件
- 习题参考答案



化学工业出版社

职业教育“十二五”规划教材

# 焊 接 技 术

乌日根 主 编

宋博宇 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书以焊接基础知识和实际应用为主线,兼顾当前国家焊工考试大纲,满足高职院校的“双证制”教学需要。书中内容共7章,包括熔焊基础,焊接应力与变形,焊接接头,焊接材料,常用熔化焊方法,常用金属材料焊接,焊接质量检测等。在典型焊接方法部分,如焊条电弧焊、二氧化碳气体保护焊及钨极氩弧焊突出“操作技术”,以期培养学生的典型焊接方法的操作能力。为方便教学,本书附有习题参考答案,配套电子课件。

本书可作为高职高专院校非焊接专业学生及工程人员使用,也可供生产一线从事焊接技术技能人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

焊接技术/乌日根主编. —北京:化学工业出版社,  
2014.5

职业教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-20009-9

I. ①焊… II. ①乌… III. ①焊接-职业教育-教材  
IV. ①TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第044909号

---

责任编辑:韩庆利

文字编辑:张绪瑞

责任校对:陶燕华

装帧设计:孙远博

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数348千字 2014年8月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:29.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

本教材是根据教育部高职高专教育的指导思想和高等职业教育教学改革与培养目标编写的，适合高职院校非焊接专业学生及工程人员使用，也可供生产一线从事焊接技术技能人员使用。

本教材共七章内容，第1章围绕熔化焊应知应会知识点，讲述焊接热过程、焊缝金属的构成、焊接接头的组织和性能、焊接缺陷；第2章讲述焊接应力与变形；第3、4章讲述焊接接头、焊缝形式及符号、焊接材料；第5章讲述常用熔化焊方法，并介绍几种典型焊接方法的操作技术；第6章讲述碳钢、合金结构钢、不锈钢、铸铁及铝合金等常用金属的焊接性及焊接工艺；第7章主要讲述焊缝无损检测技术，包括射线检测、超声波检测、磁粉检测及渗透检测。

本教材的编写具有以下特点：

(1) 教学内容以焊接基础知识和实际应用为主线，涵盖现代焊接技术的焊接冶金、材料焊接、焊接工艺、焊接质量检测、焊接结构所需知识能力点。

(2) “综合练习”的编写兼顾当前国家焊工考试大纲和试卷格式要求，满足高职院校的“双证制”教学需要，强化学生对焊接技术的综合练习。

(3) 按照“够用为度”原则，降低主要内容和习题的难度，删除推导等理论性较强的内容，突出应知应会的基础性知识。

(4) 典型焊接方法，如焊条电弧焊、二氧化碳气体保护焊及钨极氩弧焊增加“操作技术”部分，以期培养学生的典型焊接方法的操作能力。

本教材由以下人员编审：

主编乌日根负责全书统稿，并编写绪论、第6章、第7章；副主编宋博宇编写第3章、第5章；参编朱霞编写第1章；参编曹润平编写第4章；参编吴高峰编写第2章。

北方重工集团公司教授级高工高云喜主审。

在编写过程中，编者参阅了国内外出版的焊接技术相关教材、资料及一些网络文献，在此一并表示衷心感谢！

本书配套有电子课件，可赠送给用本书作为授课教材的院校和老师，如有需要可发邮件到 [hqlbook@126.com](mailto:hqlbook@126.com) 索取。

由于编者水平有限，教材中疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 绪论                      | 1  |
| 0.1 焊接定义、分类及其特点         | 1  |
| 0.1.1 金属连接方式            | 1  |
| 0.1.2 焊接的定义             | 1  |
| 0.1.3 焊接分类              | 1  |
| 0.1.4 焊接的特点             | 1  |
| 0.2 焊接技术的发展             | 2  |
| 0.3 焊接技术在现代制造业中的应用      | 4  |
| 0.3.1 西气东输工程            | 4  |
| 0.3.2 西电东送工程            | 5  |
| 0.3.3 钢桥建设              | 6  |
| 0.3.4 船舶制造              | 6  |
| 0.3.5 建筑钢结构             | 6  |
| 0.3.6 航空航天制造            | 7  |
| 0.4 本教材的内容及要求           | 8  |
| 第1章 熔焊基础                | 9  |
| 1.1 焊接热过程               | 9  |
| 1.1.1 焊接热源              | 9  |
| 1.1.2 焊接温度场             | 10 |
| 1.1.3 焊接热循环             | 11 |
| 1.2 焊缝金属的构成             | 15 |
| 1.2.1 焊条(焊丝)的加热与熔化      | 15 |
| 1.2.2 熔滴过渡的主要作用力及过渡形式   | 17 |
| 1.2.3 母材的熔化与熔池          | 18 |
| 1.3 有害元素对焊缝金属的作用及其控制    | 21 |
| 1.3.1 有害气体对熔池金属的作用及其控制  | 21 |
| 1.3.2 硫、磷对焊缝的危害及其控制     | 28 |
| 1.4 焊接接头的组织与性能          | 29 |
| 1.4.1 熔池的凝固与焊缝金属的固态相变   | 29 |
| 1.4.2 熔合区的特征            | 31 |
| 1.4.3 焊接热影响区加热特点及组织转变特点 | 31 |
| 1.5 焊接缺陷                | 34 |
| 1.5.1 焊接缺陷的种类及特征        | 34 |
| 1.5.2 焊接冶金缺陷种类及特征       | 35 |
| 【综合练习】                  | 38 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第2章 焊接应力与变形 .....              | 40  |
| 2.1 焊接应力与变形的基本知识 .....         | 40  |
| 2.1.1 焊接应力与变形 .....            | 40  |
| 2.1.2 焊接应力与变形产生的原因 .....       | 40  |
| 2.2 焊接残余变形 .....               | 43  |
| 2.2.1 焊接残余变形的分类 .....          | 43  |
| 2.2.2 焊接残余变形产生的原因及影响因素 .....   | 43  |
| 2.2.3 控制焊接残余变形的措施 .....        | 46  |
| 2.2.4 矫正焊接残余变形的办法 .....        | 52  |
| 2.3 残余应力 .....                 | 54  |
| 2.3.1 焊接残余应力的分类 .....          | 54  |
| 2.3.2 焊接残余应力的分布 .....          | 54  |
| 2.3.3 焊接残余应力对焊接结构的影响 .....     | 57  |
| 2.3.4 减小焊接残余应力的措施 .....        | 58  |
| 2.3.5 消除焊接残余应力的方法 .....        | 61  |
| 【综合练习】 .....                   | 62  |
| 第3章 焊接接头 .....                 | 65  |
| 3.1 焊接接头的组成、焊接接头及焊缝的基本形式 ..... | 65  |
| 3.1.1 焊接接头的组成 .....            | 65  |
| 3.1.2 焊接接头及焊缝的基本形式 .....       | 66  |
| 3.2 焊缝符号及标注 .....              | 69  |
| 3.2.1 常用焊接方法代号 .....           | 69  |
| 3.2.2 焊缝符号表示法及其用途 .....        | 70  |
| 3.2.3 焊接接头在图纸上的表示方法 .....      | 73  |
| 【综合练习】 .....                   | 75  |
| 第4章 焊接材料 .....                 | 77  |
| 4.1 焊条 .....                   | 77  |
| 4.1.1 焊条组成、分类及型号 .....         | 77  |
| 4.1.2 焊条的主要性能、用途及其选用 .....     | 83  |
| 4.2 焊丝与焊剂 .....                | 88  |
| 4.2.1 焊丝 .....                 | 88  |
| 4.2.2 焊剂 .....                 | 91  |
| 4.3 保护气体及钨极 .....              | 97  |
| 4.3.1 保护气体 .....               | 97  |
| 4.3.2 焊接用保护气体要求及其选用 .....      | 99  |
| 4.3.3 弧焊用钨极 .....              | 99  |
| 【综合练习】 .....                   | 101 |
| 第5章 常用熔化焊方法 .....              | 103 |
| 5.1 焊条电弧焊 .....                | 103 |
| 5.1.1 焊条电弧焊特点 .....            | 103 |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 5.1.2 | 坡口形式和焊接位置 .....              | 103 |
| 5.1.3 | 焊接参数的选择 .....                | 104 |
| 5.1.4 | 焊条电弧焊操作技术 .....              | 106 |
| 5.2   | 二氧化碳气体保护焊 .....              | 110 |
| 5.2.1 | CO <sub>2</sub> 焊特点 .....    | 110 |
| 5.2.2 | CO <sub>2</sub> 焊的冶金特性 ..... | 111 |
| 5.2.3 | CO <sub>2</sub> 焊工艺 .....    | 114 |
| 5.2.4 | CO <sub>2</sub> 焊操作技术 .....  | 115 |
| 5.3   | 钨极惰性气体保护焊 .....              | 117 |
| 5.3.1 | TIG 焊的特点及应用 .....            | 117 |
| 5.3.2 | TIG 焊的电流种类和极性 .....          | 118 |
| 5.3.3 | TIG 焊工艺 .....                | 121 |
| 5.3.4 | TIG 焊操作技术 .....              | 123 |
| 5.4   | 埋弧焊 .....                    | 126 |
| 5.4.1 | 埋弧焊特点及应用 .....               | 126 |
| 5.4.2 | 埋弧焊的冶金过程 .....               | 129 |
| 5.4.3 | 埋弧焊应用 .....                  | 131 |
| 5.5   | 等离子弧焊 .....                  | 132 |
| 5.5.1 | 等离子弧的形成及其特性 .....            | 132 |
| 5.5.2 | 等离子弧焊基本方法及应用 .....           | 135 |
| 5.5.3 | 等离子弧焊工艺 .....                | 137 |
|       | 【综合练习】 .....                 | 139 |
| 第 6 章 | 常用金属材料焊接 .....               | 141 |
| 6.1   | 金属材料的焊接性和焊接性试验 .....         | 141 |
| 6.1.1 | 金属材料焊接性的概念 .....             | 141 |
| 6.1.2 | 金属材料焊接性试验 .....              | 142 |
| 6.2   | 碳钢的焊接 .....                  | 147 |
| 6.2.1 | 碳钢的概述 .....                  | 147 |
| 6.2.2 | 低碳钢的焊接 .....                 | 147 |
| 6.2.3 | 中碳钢的焊接 .....                 | 148 |
| 6.2.4 | 高碳钢的焊接 .....                 | 149 |
| 6.3   | 合金结构钢的焊接 .....               | 150 |
| 6.3.1 | 合金结构钢的概述 .....               | 150 |
| 6.3.2 | 热轧及正火钢的焊接 .....              | 152 |
| 6.3.3 | 低碳调质钢的焊接 .....               | 157 |
| 6.3.4 | 中碳调质钢的焊接 .....               | 159 |
| 6.4   | 不锈钢的焊接 .....                 | 161 |
| 6.4.1 | 不锈钢的概述 .....                 | 161 |
| 6.4.2 | 不锈钢的焊接性分析 .....              | 162 |
| 6.4.3 | 奥氏体不锈钢的焊接工艺 .....            | 164 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 6.5 铸铁的焊接 .....           | 168 |
| 6.5.1 铸铁的概述 .....         | 168 |
| 6.5.2 灰铸铁的焊接性分析 .....     | 168 |
| 6.5.3 灰铸铁的焊接工艺 .....      | 170 |
| 6.6 铝及铝合金的焊接 .....        | 172 |
| 6.6.1 铝及铝合金概述 .....       | 172 |
| 6.6.2 铝及铝合金的焊接性分析 .....   | 173 |
| 6.6.3 铝及铝合金的焊接工艺 .....    | 174 |
| 【综合练习】 .....              | 177 |
| 第7章 焊接质量检测 .....          | 180 |
| 7.1 外观检测、致密性检测及水压试验 ..... | 180 |
| 7.1.1 外观检测 .....          | 180 |
| 7.1.2 致密性试验 .....         | 183 |
| 7.1.3 水压试验 .....          | 184 |
| 7.2 射线检测 .....            | 185 |
| 7.2.1 射线的产生、性质及其衰减 .....  | 185 |
| 7.2.2 射线照相法 .....         | 186 |
| 7.2.3 底片质量评定 .....        | 191 |
| 7.3 超声波检测 .....           | 193 |
| 7.3.1 超声波检测设备 .....       | 193 |
| 7.3.2 超声波检测方法 .....       | 195 |
| 7.3.3 焊缝质量评定 .....        | 197 |
| 7.4 磁粉检测 .....            | 198 |
| 7.4.1 磁粉检测原理及其特点 .....    | 198 |
| 7.4.2 磁化方法 .....          | 199 |
| 7.4.3 磁粉检测介质 .....        | 202 |
| 7.4.4 磁粉检测过程 .....        | 202 |
| 7.4.5 焊缝质量评定 .....        | 205 |
| 7.5 渗透检测 .....            | 205 |
| 7.5.1 渗透检测原理 .....        | 205 |
| 7.5.2 渗透检测工艺 .....        | 206 |
| 7.5.3 缺陷的判别分级 .....       | 209 |
| 【综合练习】 .....              | 210 |
| 部分《综合练习》答案 .....          | 214 |
| 参考文献 .....                | 216 |

# 绪 论

焊接是指被焊工件的材质（同种或异种），通过加热或加压或两者并用，并且用或不用填充材料，使工件的材质达到原子间的结合而形成永久性连接的工艺过程。近年来，焊接技术得到空前发展和进步，焊接结构的应用也越来越广泛，几乎渗透到国民经济的各个领域，如石油与化工设备、起重运输设备、宇航运载工具、车辆与船舶制造、冶金、矿山、建筑结构等。

## 0.1 焊接定义、分类及其特点

### 0.1.1 金属连接方式

在金属结构和机器的制造中，经常需要用一定的连接方式将两个或两个以上的零件按一定形式和位置连接起来。金属连接方式可分为两大类：一类是可拆卸连接，即不必毁坏零件（连接件、被连接件）就可以拆卸，如螺栓连接、键和销连接等；另一类是永久性连接，也称不可拆卸连接，其拆卸只有在毁坏零件后才能实现，如铆接、焊接和粘接等。

### 0.1.2 焊接的定义

焊接就是通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件达到结合的一种加工工艺方法。

由此可见，焊接最本质的特点就是通过焊接使焊件达到结合，从而将原来分开的物体形成永久性连接的整体。要使两部分金属材料达到永久连接的目的，就必须使分离的金属相互非常接近，使之产生足够大的结合力，才能形成牢固的接头。这对液体来说是很容易的，而对固体来说则比较困难，需要外部给予很大的能量如电能、化学能、机械能、光能、超声波能等，这就是金属焊接时必须采用加热、加压或两者并用的原因。

### 0.1.3 焊接分类

按照焊接过程中金属所处的状态不同，可以把焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊三类，如图 0-1 所示。

熔焊是在焊接过程中，将焊件接头加热至熔化状态，不施加压力完成焊接的方法。目前熔焊应用最广，常见的气焊、电弧焊、电渣焊、气体保护电弧焊等属于熔焊。

压焊是在焊接过程中，必须对焊件施加压力（加热或不加热），以完成焊接的方法。如电阻焊、摩擦焊、气压焊、冷压焊、爆炸焊等属于压焊。

钎焊是采用比母材熔点低的钎料作填充材料，焊接时将焊件和钎料加热到高于钎料熔点，低于母材熔点的温度，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接焊件的方法。常见的钎焊方法有烙铁钎焊、火焰钎焊等。

### 0.1.4 焊接的特点

#### (1) 主要优点

- ① 焊接结构不受外形尺寸限制，可以方便地拼成尺寸很大的工程结构。
- ② 与铆接或螺栓连接相比，焊接结构的重量较轻，没有铆钉或螺钉的附加重量。

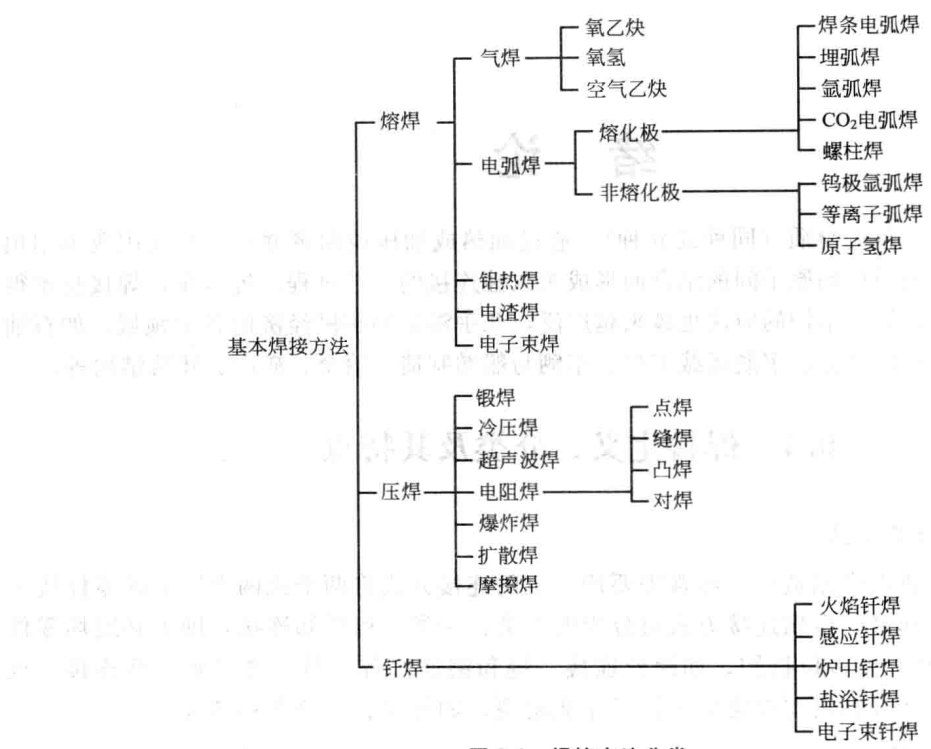


图 0-1 焊接方法分类

- ③ 与铸造相比，可方便地制成空心结构或封闭结构。
- ④ 焊接结构整体性、完整性好。
- ⑤ 焊接结构的密封性好，这对压力容器或真空容器的制造是不可缺少的条件。
- ⑥ 可根据结构服役及设计的需要，在不同的部位采用不同材质或不同级别的材料，也可采用不同厚度的材料，从而节省材料，包括节省贵重的材料，发挥材料的最大效能，而且结构也更为轻巧，降低成本。

(2) 主要缺点

- ① 止裂性能差，扩展的裂纹很容易穿过焊缝，可能导致灾难性的后果。
- ② 焊接结构及焊接接头的应力集中较大，焊接接头区域有可能存在缺陷，又是焊接残余应力较大的部位。
- ③ 必须采取科学的工艺设计进行控制，提高焊接接头的强韧性和结构寿命。

0.2 焊接技术的发展

在焊接技术中，应用最早的是钎焊技术。公元前 4000 年美索布达尼亚人就开始用铅 (Pb) 或锡 (Sn) 来连接铜 (Cu)，公元前 350 年罗马人开始用锡-铅合金连接铅制水管或铜制金属工具。我国在春秋中、晚期就开始采用锡或锡-铅合金作为钎料。安徽舒城九里墩春秋墓出土的鼓座，上面的龙身就是先铸造成若干段再钎焊起来，焊接处还残留有大块焊锡；曾侯乙墓出土的铜尊，就采用了 53Sn-41Pb 的钎料，钟荀铜套的钎料成分为 39Sn-61Pb，已与现今的某些钎料组成成分接近。著名的秦兵马俑坑出土的铜车马还采用了青铜铸焊技术，焊接质量上乘，被英国焊接杂志推崇为 2000 年前的中国焊接技术。1000 年前的唐代，我国已掌

握了铁器的锻焊技术，正如《天工开物》所述：凡铁性逐节粘合，涂上黄泥于接口之上，入火挥槌，泥滓成枵而去，取其神气为媒合，胶结之后，非灼红斧斩，永不可断也。

现代意义的焊接技术出现在 19 世纪初的西方国家，是从 1885 年出现碳弧焊开始，直到 20 世纪 40 年代才形成较完整的焊接工艺体系，特别是 40 年代初期出现了优质电焊条后，焊接技术得到了一次飞跃。焊接技术的重要发展阶段见表 0-1。

表 0-1 焊接技术的重要发展阶段

| 时 间  | 发明国家 | 焊接方法        | 时 间  | 发明国家              | 焊接方法                    |
|------|------|-------------|------|-------------------|-------------------------|
| 1802 | 俄国   | 电弧          | 1936 | 美国                | 熔化电极惰性气体保护焊 (MIG)       |
| 1867 | 美国   | 电阻焊         | 1939 | 美国                | 等离子喷涂                   |
| 1885 | 俄国   | 碳弧焊         | 1948 | 前苏联               | 摩擦焊                     |
| 1888 | 俄国   | 金属电极<br>电弧焊 | 1948 | 德国                | 电子束焊                    |
| 1890 | 法国   | 氧-乙炔焊       | 1951 | 前苏联               | 电渣焊                     |
| 1895 | 德国   | 热剂焊         | 1953 | 前苏联、日本等<br>国的企业采用 | CO <sub>2</sub> 气体气体保护焊 |
| 1908 | 瑞典   | 药皮电焊条       | 1957 | 前苏联               | 扩散焊                     |
| 1930 | 前苏联  | 埋弧焊         | 1960 | 美国                | 激光焊                     |

随着工业和科学技术的发展，焊接技术也在不断进步，焊接已从单一的加工工艺发展成为综合性的先进工艺技术。焊接技术的新发展主要体现在以下几个方面。

### (1) 计算机在焊接中的应用

弧焊设备微机控制系统，可对焊接电流、焊接速度、弧长等多项参数进行分析和控制，对焊接操作程序和参数变化等作出显示和数据保留，从而给出焊接质量的确切信息。目前以计算机为核心建立的各种控制系统包括焊接顺序控制系统、PID 调节系统、最佳控制及自适应控制系统等。这些系统均在电弧焊、压焊和钎焊等不同的焊接方法中得到应用。计算机软件技术在焊接中的应用越来越得到人们的重视。目前，计算机模拟技术已用于焊接热过程、焊接冶金过程、焊接应力和变形等的模拟；数据库技术被用于建立焊工档案管理数据库、焊接符号检索数据库、焊接工艺评定数据库、焊接材料检索数据库等；在焊接领域中，CAD/CAM 的应用正处于不断开发阶段，焊接的柔性制造系统也已出现。

### (2) 能源方面的应用

当今，焊接热源已非常丰富，如火焰、电弧、电阻、超声、摩擦、等离子、电子束、激光束、微波等，但焊接热源的研究与开发并未终止，其新的发展可概括为三个方面：首先是对现有热源的改善，使它更为有效、方便、经济适用，在这方面，电子束和激光束焊接的发展较显著；其次是开发更好、更有效的热源，采用两种热源叠加以求获得更强的能量密度，例如在电子束焊中加入激光束等；第三是节能技术。由于焊接所消耗的能源很大，所以出现了不少以节能为目标的新技术，如太阳能焊、电阻点焊中利用电子技术的发展来提高焊机的功率因数等。

### (3) 提高焊接生产率

提高焊接生产率是推动焊接技术发展的重要驱动力。提高生产率的途径有两个方面：其一，是提高焊接熔敷率，手弧焊中的铁粉焊、重力焊、躺焊等工艺，埋弧焊中的多丝焊、热

丝焊均属此类,其效果显著;其二,是减少坡口截面及熔敷金属量,近10年来最突出的成就是窄间隙焊接。窄间隙焊接采用气体保护焊为基础,利用单丝、双丝或三丝进行焊接。无论接头厚度如何,均可采用对接形式。窄间隙焊接的主要技术关键是如何保证两侧熔透和保证电弧中心自动跟踪处于坡口中心线上。为解决这两个问题,世界各国开发出多种不同方案,因而出现了种类多样的窄间隙焊接法。电子束焊、激光束焊及等离子弧焊时,可采用对接接头,且不用开坡口,因此是理想的窄间隙焊接法,这是它们受到广泛重视的重要原因之一。

#### (4) 焊接机器人和智能化

焊接机器人是焊接自动化的革命性进步,它突破了焊接刚性自动化的传统方式,开拓了一种柔性自动化新方式,焊接机器人的主要优点是:稳定和提高焊接质量,保证焊接产品的均一性;提高生产率,一天可24h连续生产;可在有害环境下长期工作,改善了工人劳动条件;降低了对工人操作技术要求;可实现小批量产品焊接自动化;为焊接柔性生产线提供了技术基础。为提高焊接过程的自动化程度,除了控制电弧对焊缝的自动跟踪外,还应实时控制焊接质量,为此需要在焊接过程中检测焊接坡口的状况,如熔宽、熔深和背面焊道成形等,以便能及时地调整焊接参数,保证良好的焊接质量,这就是智能化焊接。智能化焊接的第一个发展重点在视觉系统,它的关键技术是传感器技术。虽然目前智能化还处在初级阶段,但有着广阔前景,是一个重要的发展方向。有关焊接工程的专家系统,近年来国内外已有较深入的研究,并已推出或准备推出某些商品化焊接专家系统。焊接专家系统是具有相当于专家的知识 and 经验水平,以及具有解决焊接专门问题能力范围的计算机软件系统。在此基础上发展起来的焊接质量计算机综合管理系统在焊接中也得到了应用,其内容包括对产品的初始试验资料和分析、产品质量检验、销售监督等,其软件包括数据库、专家系统等技术的具体应用。

### 0.3 焊接技术在现代制造业中的应用

焊接俗称钢铁裁缝。中国钢产量2012年为7.16亿吨,占世界总产量的比重达46.3%,钢材消费量非常大。制造业的整体能力和水平,直接关系到国家的经济实力、国防实力、综合国力和在全球经济中的竞争与合作能力,也决定着我国实现现代化和民族复兴的进程。经过几代人的前仆后继,数亿人的奋发努力,我国已拥有相当规模和较高水平的制造体系,能够为国民经济和社会发展提供先进的产品和装备。这些成绩的取得均离不开焊接技术的发展和运用。

#### 0.3.1 西气东输工程

在新疆塔里木盆地北部库车附近发现五个大中型气田,天然气的地质探明储量为3110亿立方米,在库车以外的塔里木其他地区还有1006亿立方米的地质储量,而且随着勘探工作的深入,油气的地质储量还将增加。为了缓解东部经济发达地区的能源需求,改善东部地区的环境压力,开发西部,中央政府及时地提出了西气东输的发展战略。西气东输管线西起轮南,与陕北气田汇合,经郑州、南京至上海,全长4200km。图0-2为西气东输的中卫黄河跨越工程。

西气东输工程焊管的管径为1016mm,壁厚14.6~26.2mm,X70级管线钢。其中螺旋埋弧焊管约占80%,其余为直缝埋弧焊管,管线钢用量170万吨。X70级管线钢 $w(C)$ 为0.1%~0.14%,钢中除Mn、Si外,尽量降低S、P等杂质含量,还加入Ti、V、Nb等微

量合金元素。管线钢的碳含量低，淬硬倾向小，焊接性是好的。但在野外现场焊接时，还是要采取必要的措施，防止可能的冷裂纹倾向。

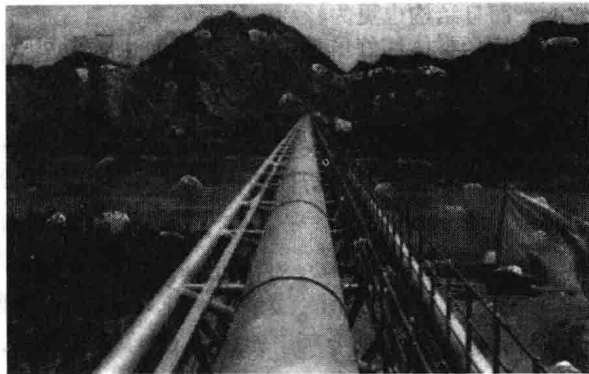


图 0-2 西气东输的中卫黄河跨越工程

在西气东输工程中，由于钢的强度等级较高，管径和板厚较大，管线建设中应以自动焊和半自动焊为主，焊条电弧焊为辅。技术关键是管道对口根焊道的焊接成形。自动焊主要涉及熔化极气体保护焊、自保护药芯焊丝电弧焊。焊条电弧焊主要为纤维素焊条下向焊和低氢焊条上向焊。

### 0.3.2 西电东送工程

西部可开发水能资源约 2.743 亿千瓦，占全国的 72%。西部已探明煤炭资源保有量为 3882 亿吨，约占全国的 39%。为了满足国民经济发展对电力增长的需要，实现能源资源和环境的可持续发展，必须加快开发西南和西北地区丰富的水能资源和煤炭资源丰富地区的火电厂，输往经济相对发达的东部沿海地区，实施电力发展的“西电东送”战略，以促进东西部地区经济和社会的协调发展。三峡工程是实现西电东送的最佳电源点。

三峡水电站总装机容量 18200MW，相当于 18 座大型核电站，是世界上最大的水电站。图 0-3 为三峡水轮机转子，转子材料为 410NiMo 马氏体不锈钢（13%Cr，4%Ni，0.5%Mo），焊接用于转子部件的组装和铸造缺陷的修补。主要焊接方法是焊条电弧焊及双丝埋弧自动焊，焊丝有实心及金属粉芯两种，每个转子的组装需焊接材料 7~10t。

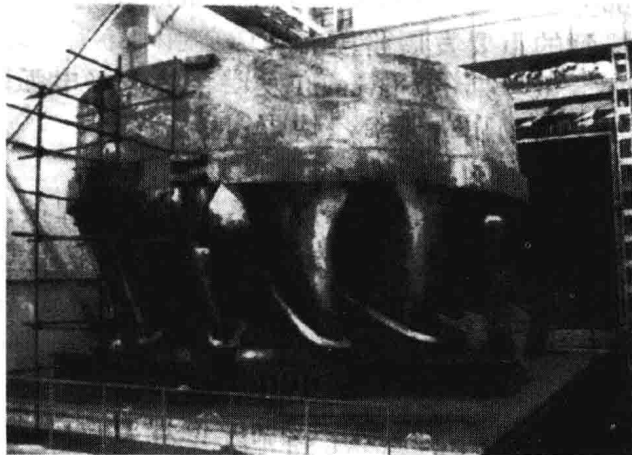


图 0-3 三峡水轮机转子

在内蒙古、山西及贵州等西部煤电基地的建设中,由于机组容量大,参数提高,使用的钢材及焊接材料品种规格复杂,焊接工作量及焊口可靠性的要求很高。

### 0.3.3 钢桥建设

随着我国铁路与公路建设的需要,钢桥建设得到了飞速的发展,设计与制造技术已接近世界先进水平。以公路桥为例,已建成的江阴长江大桥主跨 1385m,为全焊钢箱梁悬索桥,居世界第 4 位,采用全焊钢箱梁斜拉桥的南京长江二桥主跨 628m,居世界第 3 位。世界全部斜拉桥排名前 10 位的焊接钢桥中,我国就占有 6 座。铁路桥的发展也很快,铁路钢桥的跨度将达到 500m,钢桥的制造将从栓焊向全焊过渡,即从节点栓接过渡到全焊整体节点。

在公路斜拉桥和悬索桥钢箱梁的制造中,高效的  $\text{CO}_2$  自动焊和半自动焊得到了广泛应用。据润扬长江大桥建设统计, $\text{CO}_2$  焊已用到焊接工作量的 75%,埋弧焊约占 15%,其余为焊条手工焊。对于梁式铁路桥或公路铁路两用桥,主要采用埋弧焊,如芜湖长江大桥,埋弧焊占 60%, $\text{CO}_2$  焊约占 15%。图 0-4 为世界上最长的杭州湾跨海大桥,全长 36km,为全封闭六车道公路桥,已于 2008 年建成。

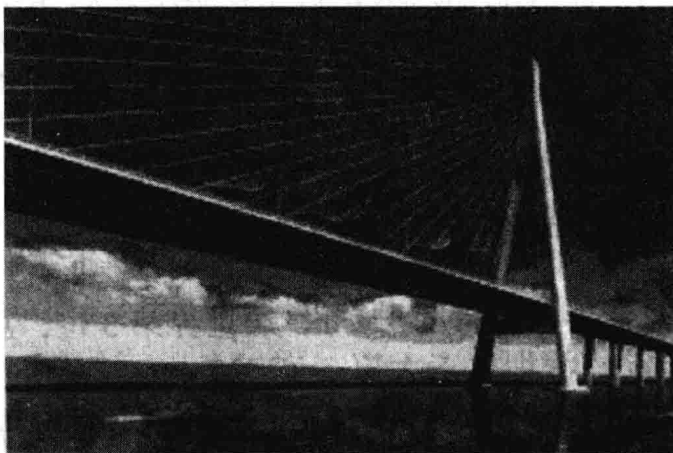


图 0-4 杭州湾跨海大桥

### 0.3.4 船舶制造

焊接技术在船舶制造中占有举足轻重的地位,是最主要的工艺技术。在大拼板工序中采用多丝埋弧焊,单面焊双面成形,焊接的板厚为 5~35mm,对船体的分段构件装焊采用自动及半自动气体保护焊。船厂已普遍采用药芯焊丝  $\text{CO}_2$  气体保护焊。造船厂是我国药芯焊丝的主要用户,目前我国船厂  $\text{CO}_2$  气体保护焊的应用比例已达 65%。图 0-5 为导弹驱逐舰“哈尔滨号”。

### 0.3.5 建筑钢结构

大型建筑钢结构广泛采用 H 形及箱形截面构件,由厚钢板焊接而成。常用材料为低碳结构钢 Q235、低合金结构钢 Q345、Q390 等牌号。广泛采用高效埋弧焊及气体保护焊。焊接构件的尺寸大、焊接工作量大是高层钢结构制造安装的突出问题,一般焊接梁柱的截面厚度都在 30mm 以上。在制造安装过程中,对装配、焊接应力和变形的控制要求也十分严格。图 0-6 为焊接钢结构建筑——鸟巢。“鸟巢”外形结构主要由巨大的门式钢架组成,共有 24 根桁架柱。建筑顶面呈鞍形,长轴为 332.3m,短轴为 296.4m,最高点高度为 68.5m,最低点高度为 42.8m。

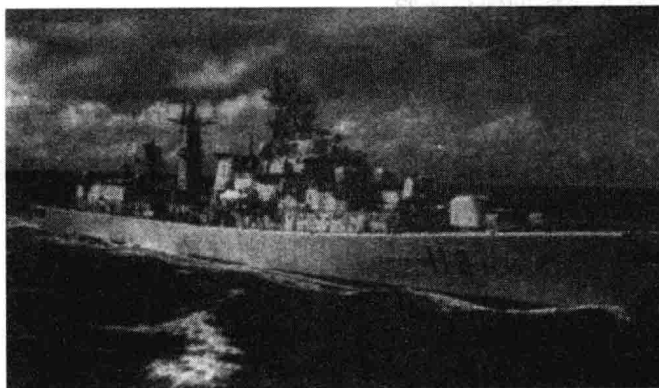


图 0-5 导弹驱逐舰“哈尔滨号”

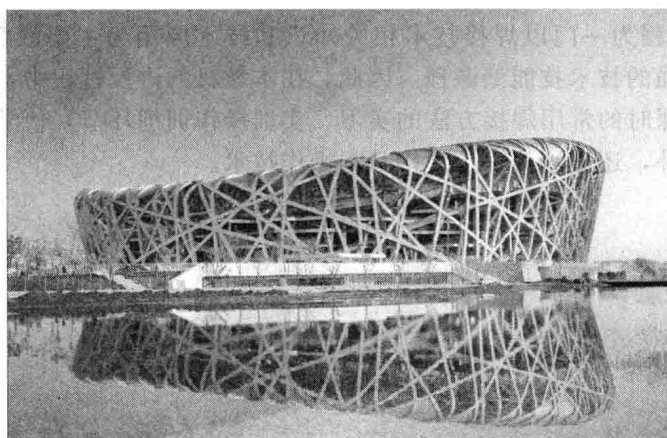


图 0-6 建筑钢结构——鸟巢

### 0.3.6 航空航天制造

在航空航天制造,飞船、飞机、发动机等的研制和生产中,焊接技术已经成为主导生产方法之一,它不仅能减轻产品的重量,而且还为其结构设计新构思提供技术支持。焊接结构件在喷气发动机零部件总数中所占的比例已超过 50%,焊接的工作量已占发动机制造总工时的 10%左右。我国的“神舟”系列飞船及大型空间环境模拟仓都采用了新型的焊接技术。

图 0-7 为大型空间环境模拟仓,是国内最大的空间环境模拟装置,属于大型不锈钢整体焊接结构,主舱是一个直径 18m、高 22m 的真空容器,辅舱直径 12m,主要应用在我国发

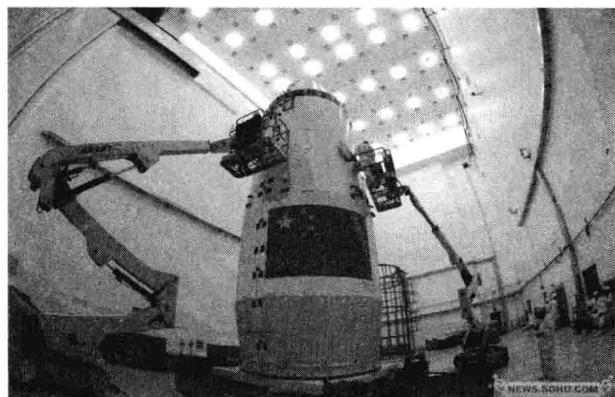


图 0-7 大型空间环境模拟仓

射的“神舟”号系列载人飞船的模拟实验。

## 0.4 本教材的内容及要求

本教材是根据焊接专业“焊接技术”课程教学大纲编写的，是介绍熔焊基础、焊接应力与变形、各种焊接方法及常用金属材料焊接性的一门主要专业课程。

本教材讲述的主要内容为：

- ① 焊接热过程，焊缝金属的构成、有害元素的影响等熔焊基础。
- ② 焊接应力与变形，焊接焊缝与接头的基本形式及标注方法。
- ③ 常用金属材料的焊接及各种熔化焊方法。
- ④ 焊接质量检验。

“焊接技术”课程为一门以焊接技术相关知识和技术应用为主要教学内容的综合课程，且是一门实践性较强的技术技能型课程。因此，在本教材的讲授过程中，特别要注重理论联系实际，安排一定课时的常用焊接方法的实习、实训操作训练环节，使学生不仅掌握焊接技术的应知应会知识外，还需培养学生焊接基本操作技术。

# 第 1 章 熔焊基础

## 1.1 焊接热过程

### 1.1.1 焊接热源

#### (1) 常用的焊接热源

生产中常用的焊接热源有以下几种。

① 电弧热 利用气体介质在两电极之间强烈而持续放电过程产生的热能作为焊接热源，是目前应用最广的一种焊接热源，如焊条电弧焊、气体保护焊、埋弧焊等。

② 化学热 主要是利用助燃和可燃气体或铝、镁热剂燃烧时产生的热量作为焊接热源，如气焊、热剂焊等。

③ 电阻热 利用电流通过导体时产生的电阻热作为焊接热源，如电阻焊、电渣焊等。

④ 摩擦热 利用机械摩擦产生的热能作为焊接热源，如摩擦焊。

⑤ 电子束 利用高压高速的电子束轰击金属局部表面所产生的热能作为焊接热源，即电子束焊。

⑥ 等离子弧 将自由电弧压缩成高温、高电离度及高能量的电弧热作为焊接热源，即等离子弧焊。

⑦ 激光束 利用高能量的激光束轰击焊件产生的热能进行焊接，即激光束焊。

焊接热源不仅影响焊接质量，而且对焊接生产率有决定性的作用。为了使焊接区能够迅速达到熔点并防止加热范围过大，我们希望焊接热源的加热面积小，单位面积的功率（功率密度）大，同时在正常的焊接条件下能达到较高的温度。近年来发展的电子束、等离子弧、激光束等新的焊接热源，其最小加热面积仅为  $10^{-5} \sim 10^{-8} \text{ cm}^2$ ，而功率密度可达  $10^7 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ ，温度高达  $10000 \sim 20000^\circ\text{C}$ ，从而可以获得很高的焊接质量与生产率。

#### (2) 焊接过程热效率

焊接热源所输出的功率在实际应用中并不能全部得到有效利用，而是有一部分热量损失于周围介质和飞溅中。一般来说，热源越集中，热量损失越少，热效率就越高，如气焊就比各种电弧焊的热效率要低得多。下面以电弧焊为例，来分析焊接过程中热效率的计算方法。

通常，电弧焊焊接时，电弧输出总功率为  $P_0$ ，则电弧输出功率为

$$P_0 = UI$$

式中  $U$ ——电弧电压；

$I$ ——焊接电流；

$P_0$ ——电弧功率，即电弧在电位时间内所析出的能量。

$$P = \eta' P_0$$

式中  $P$ ——有效热功率；

$\eta'$ ——焊接加热过程的热效率，或称功率有效系数。

$\eta'$ 值一般根据实验测定，不同焊接方法的  $\eta'$ 不同， $\eta'$ 值既与焊接方法有关，也与焊接参