

高等学校材料成型及控制工程专业系列教材——焊接技术



# Welding

Science and Engineering

# 焊接科学与工程

王元良 陈 辉 编著  
王一戎 主审



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等学校材料成型及控制工程专业系列教材 —— 焊接技术

# 焊接科学与工程

王元良 陈 辉 编著  
王一戎 主审

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

-----  
**图书在版编目 ( C I P ) 数据**

焊接科学与工程 /王元良, 陈辉编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2008.11

(高等学校材料成型及控制工程专业系列教材. 焊接技术)

ISBN 978-7-81104-952-7

I. 焊… II. ①王… ②陈… III. 焊接—高等学校—教材  
IV. TG4

-----  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 107491 号  
-----

高等学校材料成型及控制工程专业系列教材—焊接技术

**焊 接 科 学 与 工 程**

王元良 陈 辉 编著

\*

责任编辑 高 平

特邀编辑 刘 恒

封面设计 翼虎书装

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 210 mm×285 mm 印张: 18.75

字数: 622 千字 印数: 1—3 000 册

2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

**ISBN 978-7-81104-952-7**

定价: 34.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

焊接是钢结构制造的主要方法。目前正在发展异种材料焊接和复合高性能材料及器件焊接工艺,它们广泛用于大型基础设施建设和装备制造等行业,在这些行业中焊接都起着关键作用,同时,它们对焊接质量和可靠性提出了越来越高的要求。特别是轨道交通要大力发展高速铁路和重载运输,这对线路和桥梁基础设施建设、机车车辆和工程机械的装备制造提出了较高要求,而焊接在其主体结构有效工作和安全运行中都起着极其重要的作用,所以这些行业也是焊接技术应用最广的领域。

焊接结构的优质可靠需要众多学科的科技工作者共同努力:冶金和材料工作者必须致力于提高焊接结构材料的焊接性和与之相匹配的焊接材料;结构设计工作者必须致力于按焊接接头的特点和所用材料及工艺的要求来设计焊接结构;焊接工作者必须致力于按结构设计要求,用最优的焊接方法和焊接工艺优质高效地完成焊接结构的焊接;焊接设备和材料工作者必须致力于提供焊接所需的优质焊接材料和焊接设备等。因此,焊接工作者必须具有焊接冶金和结构、焊接材料、焊接结构力学和强度、焊接方法和工艺、焊接设备和控制等多方面较为深广的知识和运作能力;与焊接结构关系密切的冶金和材料工作、各种结构设计工作、焊接设备和材料工作诸方面的技术和管理人材也必须具备“焊接科学与工程”的基本知识。

本书可作为与焊接结构关系密切的学生和技术及管理人员的教材和参考书。在作为教材时不同专业可以有所侧重,如通用的材料科学与工程、材料成型加工及控制专业的非焊接方向学生,学时较多时选择面可较宽,对土木(如桥梁、铁道、工程结构等与焊接密切相关的专业方向)、机械(如机车、车辆、工程及起重机械、石化机械、矿山机械、汽车及拖拉机等与焊接密切相关的专业方向)专业,就可仅在其中选择必要章节。另外,高速铁路的发展,对桥梁焊接、道岔及轨道焊接、机车车辆及其他运载工具的焊接提出了更高的要求,因此这本《焊接科学与工程》同时也是高速铁路焊接丛书的基础卷,为高速铁路《轨道焊接》、《桥梁焊接》、《机车车辆焊接》等分卷的基础。

本书强调阐述焊接科学基础与工程的结合,不只着眼于现在,也着眼于未来,按此原则对内容和图表进行了整合,不过于汇集知识和资料及细节描述,而尽可能做到深而不精、宽而不细,目的在于着重其规律和发展的比较与分析,以启迪读者的思维和创意,为开拓技术创新打基础。

本书是在1986年中国铁道出版社出版的《焊接及焊接结构》高校试用教材的基础上改编的,吸收了该教材部分内容,吸收了国内外近20年来焊接技术的发展成果,特别是我校近20年来的科研成果,延伸了焊接科学的范畴,在焊接科学理论的指导下大幅度地增加了新能源和高效焊接方法,扩充了材料和新材料的焊接内容,集中和重点阐述了焊接变形应力和接头强度,故本书被赋予了全新的内容。

在此,对本书文献和素材的提供者表示衷心的感谢。本书的编著和出版得到了西南交通大学教务处和出版社的大力支持,对此也表示衷心的感谢。

本书由王元良、陈辉编著;王一戎主审;刘拥军、荀国庆参加了部分编写工作。

王元良 陈 辉

2008年10月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 材料连接与焊接 .....         | 1  |
| 1.1 接头形式与连接方法 .....         | 1  |
| 1.2 焊接过程与能源及焊接方法 .....      | 4  |
| 1.3 焊接技术的学科领域及应用 .....      | 6  |
| 1.4 材料及焊接接头性能 .....         | 8  |
| 第 2 章 化学能源及其焊接和加工 .....     | 11 |
| 2.1 气焊和火焰加工热源及其应用 .....     | 11 |
| 2.2 氢气能源及其焊接与切割 .....       | 17 |
| 2.3 铝热焊 .....               | 18 |
| 第 3 章 电弧能源及其电弧焊接和加工 .....   | 22 |
| 3.1 焊接电弧物理 .....            | 22 |
| 3.2 焊接电源及其特性 .....          | 25 |
| 3.3 电弧切割和焊接方法 .....         | 29 |
| 3.4 钨极氩弧保护焊 (TIG 焊) .....   | 34 |
| 3.5 熔化极气保护焊 .....           | 37 |
| 3.6 药芯焊丝焊 .....             | 42 |
| 3.7 等离子弧及其应用 .....          | 48 |
| 第 4 章 电阻热的利用及电渣焊和接触焊 .....  | 55 |
| 4.1 电阻热及其利用 .....           | 55 |
| 4.2 电渣焊 (液体电阻焊) .....       | 55 |
| 4.3 电阻焊 (固体电阻焊) .....       | 58 |
| 4.4 电阻热在焊接及切割中的其他应用 .....   | 64 |
| 第 5 章 其他能源的焊接 .....         | 66 |
| 5.1 电子束焊接 .....             | 66 |
| 5.2 激光焊接 .....              | 68 |
| 5.3 摩擦焊 .....               | 70 |
| 5.4 超声波在焊接工程中的应用 .....      | 74 |
| 5.5 爆炸焊接与加工 .....           | 75 |
| 第 6 章 焊接时金属加热和焊接规范的选择 ..... | 76 |
| 6.1 焊接温度场与热循环 .....         | 76 |
| 6.2 电弧对金属的加热及焊接规范选择 .....   | 80 |
| 6.3 焊接规范的选择 .....           | 84 |
| 6.4 焊接规范对焊缝形状的影响 .....      | 86 |
| 6.5 焊接接头形式及坡口尺寸 .....       | 89 |
| 6.6 提高焊接生产率的方法 .....        | 91 |
| 第 7 章 电弧焊冶金过程及焊接材料的选择 ..... | 92 |
| 7.1 焊接冶金过程的特点 .....         | 92 |

|               |                               |            |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 7.2           | 熔渣与焊缝金属的作用 .....              | 94         |
| 7.3           | 熔渣的作用 .....                   | 94         |
| 7.4           | 手工焊焊条 .....                   | 96         |
| 7.5           | 埋弧焊焊丝及焊剂 .....                | 101        |
| 7.6           | 气体保护焊材料 .....                 | 105        |
| 7.7           | 自保护药芯焊丝 .....                 | 109        |
| <b>第 8 章</b>  | <b>焊接接头组织性能及主要金属的焊接 .....</b> | <b>111</b> |
| 8.1           | 焊缝结晶及其组织 .....                | 111        |
| 8.2           | 焊接热影响区及其组织 .....              | 113        |
| 8.3           | 材料的焊接性 .....                  | 121        |
| 8.4           | 碳素钢的焊接 .....                  | 131        |
| 8.5           | 合金结构钢的焊接 .....                | 137        |
| 8.6           | 高合金钢焊接 .....                  | 152        |
| 8.7           | 铸铁的焊接 .....                   | 157        |
| 8.8           | 有色金属的焊接 .....                 | 160        |
| 8.9           | 特种合金及材料的焊接 .....              | 166        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>焊接变形及应力 .....</b>          | <b>174</b> |
| 9.1           | 焊接变形及应力的产生原理 .....            | 174        |
| 9.2           | 纵向收缩变形及所引起的变形和应力 .....        | 177        |
| 9.3           | 构件边缘加热时的收缩变形和弯曲变形 .....       | 183        |
| 9.4           | 横向收缩所引起的变形 .....              | 185        |
| 9.5           | 横向收缩引起的角变形和弯曲角变形 .....        | 188        |
| 9.6           | 影响焊接变形的因素及防止措施 .....          | 193        |
| 9.7           | 焊接组织应力 .....                  | 199        |
| 9.8           | 焊接残余应力 .....                  | 202        |
| 9.9           | 焊接残余应力的测定 .....               | 212        |
| <b>第 10 章</b> | <b>焊接接头的强度计算 .....</b>        | <b>219</b> |
| 10.1          | 焊接接头应力集中与应力分布 .....           | 219        |
| 10.2          | 焊缝的静载强度计算 .....               | 222        |
| <b>第 11 章</b> | <b>焊接接头和结构断裂分析 .....</b>      | <b>233</b> |
| 11.1          | 焊接结构的断裂失效分析 .....             | 233        |
| 11.2          | 焊接接头的静载断裂强度分析 .....           | 237        |
| 11.3          | 焊接结构的脆性断裂 .....               | 245        |
| 11.4          | 焊接结构的疲劳强度 .....               | 263        |
| 11.5          | 焊接接头的应力腐蚀 .....               | 282        |
| 11.6          | 焊接接头的质量控制及检验 .....            | 288        |
| <b>参考文献</b>   | <b>.....</b>                  | <b>293</b> |

# 第1章 材料连接与焊接

焊接结构是由材料焊接而成的承载结构，其连接质量对整个结构的安全和寿命起着关键作用。因此，合理设计结构，选择合理的焊接方法、焊接设备、焊接材料、焊接工艺及质量保证措施，设计或改造工艺装备，建立完整的质量保证体系，在制造过程中确保焊接结构制造质量，是焊接结构生产的关键。在此基础上还要选用优质高效节能的焊接技术。

## 1.1 接头形式与连接方法

### 1.1.1 机械连接与连接形式

把两种材料连接为一体，连接的方法最早是机械连接，如常见的螺栓连接和铆接。螺栓连接是将板制孔，穿入螺栓用螺母旋紧为一体，由于其具有可拆卸和重装性，至今仍为机械组装连接所采用；在大型结构中则多采用铆接，即将板制孔，穿入加热（高塑性小铆钉可不加热）的铆钉将另一头热压成型，同时收缩紧固，可拆卸但不能重装，只能换铆钉重铆。螺栓连接和铆接都是由其承载截面（单钉截面×钉数）传递剪力，仅实用于搭接接头，如需作成对接接头则需加盖板，螺栓连接和铆接的形式如图 1-1 所示。另外，还有两种机械连接接头，即套管螺栓接头和热压接头，前者是用两端各有正反内螺纹的套管套入两端各有相应的正反外螺纹的杆件，转动套管直到内杆件靠近至接触形成套管接头；如果套管接头未加工螺纹，套管内杆件靠近至接触后加热，加压成不同程度的凹凸接触形成套管接头，叫热压接头。机车轮毂与轮圈的连接是将两者的配合留一定的过盈量，将轮圈加热膨胀后套进轮毂然后冷却收缩与轮毂形成整体。实际上这两种连接与前述连接原理相似。

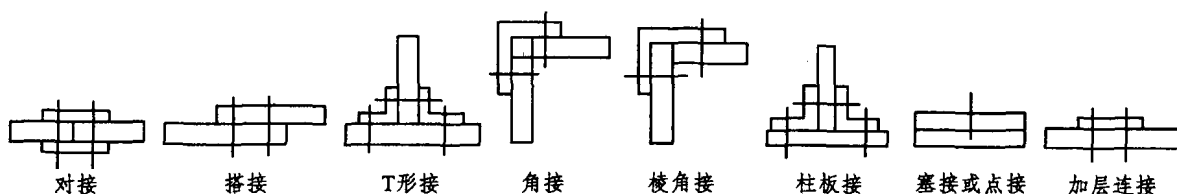


图 1-1 螺栓连接和铆接的形式

### 1.1.2 焊接连接与连接形式

近几十年发展最快的是焊接连接，可以直接连接成各种接头，该类接头如永久性接头，不可拆卸，如图 1-2 所示。各类机械由于需要经常拆装修理，而且通常要在不大的空间安装很多零件，因此用螺栓连接较好，但对不需经常拆卸的机械，如大型机械的机体和大型部件，现在也改用焊接件代替铸件和锻

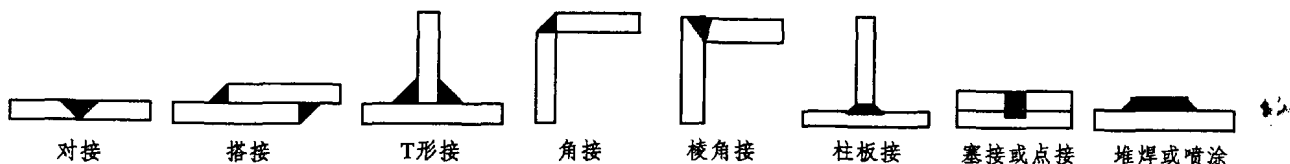


图 1-2 焊接连接的各种接头形式

件或采用铸-焊或锻-焊联合结构。对于大中型的工程（桥梁、水工、建筑等）结构，运载工具（机车车辆、轮船、起重工程机械等）结构，容器（锅炉、罐车、化工设备等）结构，过去都用铆接，现在都采用焊接。

### 1.1.3 焊接接头形式在结构图上的标注

焊接结构是由各种焊接接头组成，在一个结构设计图纸上都有焊接接头接头形式的代号，其表示方法如图 1-3 所示。

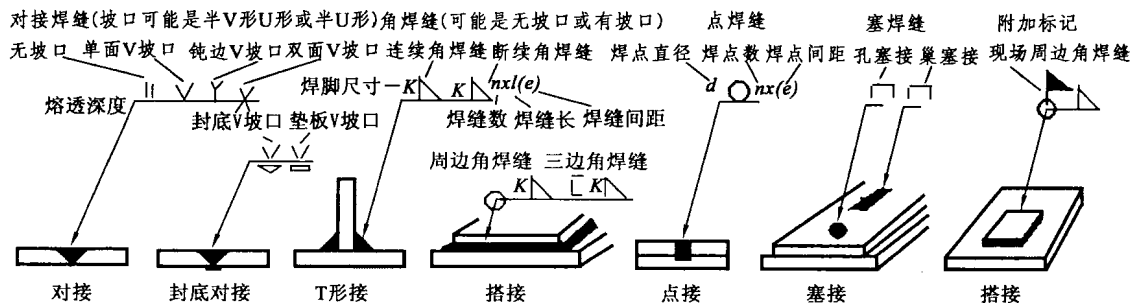


图 1-3 焊接结构图纸上焊接接头形式的代号

### 1.1.4 接头形式与应力集中

#### 1. 应力集中

从力学理论得知，有孔的板受拉力，由于孔截面削弱了母材，不能传力，应力向孔边密集而引起应力集中，最大应力  $\sigma_{\max}$  与平均应力  $\sigma$  之比叫应力集中系数  $K_T$  如图 1-4(a) 所示，根据理论和实验分析， $K_T$  与孔形和方向有关：

$$K_T = 2 + \frac{a}{b} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma}$$

式中  $a$ ——垂直于受力方向的孔径；

$b$ ——平行于受力方向的孔径。

由上式看出，圆孔  $a$  等于  $b$ ，所以  $K_T$  等于 3；如  $a$  大于  $b$ ， $K_T$  就大于 3，反之就小于 3。

#### 2. 接头形式的应力集中

几种接头应力集中如图 1-4(b)~(e)所示，其中 (b) 为铆接及栓接的应力集中，相当于多个圆孔应力集中，应力集中大，c 和 d 为对接接头，其板宽方向无应力集中；但板厚方向有应力集中，其  $K_T$  与焊缝形状有关。但如用侧面搭接的焊接接头，其应力集中可能比铆接及栓接接头还要大。目前钢桥中使用的高强度栓接结构是用在所加盖板和母材的接触面喷铝提高摩擦系数，用高强螺栓旋紧产生的拉力压紧用盖板和母材的摩擦力传力可减少应力集中。

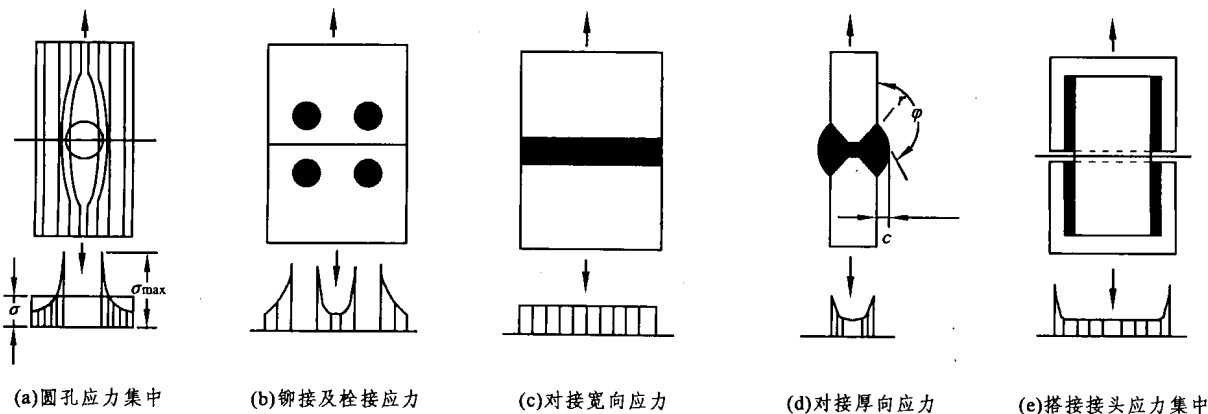


图 1-4 几种接头应力集中比较

$$K_T = 1 + 2\sqrt{\frac{c}{r}} \sin \varphi$$

式中  $c$ ——焊缝余高, mm;

$r$ ——焊缝到母材的过渡半径, mm;

$K_T$ ——焊缝宽度系数, 一般取 0.7~0.8;

$\varphi$ ——焊缝余高过渡面与母材面的夹角, 度。

由上式看出, 焊缝余高越大, 焊缝到母材的过渡半径越小, 越急, 应力集中系数就越大; 如加工去除余高应力集中系数为 1, 即无应力集中。

### 3. 焊接缺陷的应力集中

如焊缝中有垂直于受力方向的未焊透和裂纹等缺陷, 也会引起较大的应力集中, 其  $K_T$  与裂纹的长度和尖端尖锐程度有关, 即

$$K_T = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

式中  $a$ ——裂纹与受力垂直方向的半长, mm;

$\rho$ ——与受力垂直方向裂纹的尖端半径, mm。

由上式看出, 与受力垂直方向裂纹应力集中系数  $K_T$  大, 其长度  $2a$  越大, 尖锐度越大, 即  $\rho$  越小,  $K_T$  越大; 如裂纹与受力方向平行, 则  $K_T$  很小。

### 4. 应力集中对结构强度和寿命的影响

应力集中对结构的精度、强度和寿命都有一定影响, 特别是承低温冲击和疲劳载荷的结构影响很大, 若采用高碳钢和高强钢其影响更大, 在高速和重载的运行情况下应力集中对结构强度和寿命的影响更加突出。根据世界各国的调查, 很多焊接结构的断裂都起始于焊缝与母材交界的焊趾应力集中处或焊接缺陷的应力集中处, 在高碳钢轨和高强钢运载工具和工程结构的设计中, 避免结构和焊接接头的不连续性引起的应力集中, 选择焊接性能好的母材、焊接材料、焊接方法和焊接工艺, 避免焊接工艺和缺陷引起的应力集中。因此只有从焊接结构的设计、选材、焊接工艺多方面进行质量控制才能保证结构的安全运行。

## 1.1.5 焊接结构与其他结构的比较

### 1. 与铆接及栓接结构比较

焊接结构与铆接及栓接结构比较: ① 可节省金属材料量 15%~20%; ② 无需钻孔加工和铆钉及螺栓螺母, 节省加工和材料; ③ 减轻结构重量, 这就意味运载工具可多装快跑, 工程结构可减轻基础的压力; ④ 结构形式设计的自由度大, 应力集中小; 整体性强, 现场安装工作量少, 但脆断整体破坏的倾向较铆接及栓接结构要大; ⑤ 可目测检查性较铆接及栓接结构低。维修较铆接及栓接结构难。

### 2. 与锻压和铸造相比较

① 比铸铁结构节省材料 50%~60%; 比铸钢结构节省 30%。② 减轻结构重量, 这就意味运载工具可多装快跑, 节约能源和减少温室气体排放。上部结构可减轻基础的压力。③ 可节约固定资产投资, 无需大型锻压和铸造设备和加热熔化设备及其大型厂房的投资。④ 与锻压和铸造相比, 大大减少劳动量和制模工作量, 以某重型落地镗铣机床铸钢改焊接结构为例, 焊接工时只有铸造木模工时的 52%, 节约优质木材 40 m<sup>3</sup>, 节约金属 33%, 节约成本 19.76%。缩短生产周期, 一般速度要提高 1.7~3.5 倍; 提高劳动生产率, 同时便于结构产品的更新换代。⑤ 与锻压和铸造相比, 降低劳动强度, 改善劳动条件, 环保节能。

### 3. 混合结构的比较

① 压型-焊接联合结构: 薄板结构多用压型-焊接联合结构, 如汽车车身和底架都是, 客车车体和很多箱体结构也是。② 锻压-焊接结构: 对一些中小型复杂组件用锻压比较合适, 可减少复杂组件的焊接难度,

可减少结构总体的变形和应力；对一些锻钢件采用双金属锻件焊接结构，如大型齿轮可以用锻压加工和热处理后的耐磨齿圈和中等强韧钢的锻造轴套与钢板幅条焊接成大型齿轮，如柴油机阀体，可用耐热钢阀座和一般材料的阀杆成为阀体焊接可节约大量贵重金属。③ 铸钢-焊接结构：与整体铸钢结构相比，可以小拼大，可利用一些铸钢件的优点，又降低了对大型铸钢熔炼和浇注设备的要求，还可与锻压-焊接双金属结构一样作成铸钢-焊接双金属结构。④ 表面复合结构：用堆焊或喷涂的方法在一般金属构件上堆焊或喷涂一层合金钢以达到耐磨、耐蚀、耐高温、导电、绝热等特殊要求的表面复合结构，可节约大量贵重金属。⑤ 金属与非金属组成的复合结构：如钢管混凝土结构目前开始用于桥梁桁架结构，可充分利用钢管的抗拉特性和混凝土的抗压特性，同时也用于桥梁的基础和塔架结构；在金属结构表面喷铝或塑料可以防腐蚀以延长结构寿命。⑥ 栓-焊结构：在桥梁建设中广泛采用高强螺栓的栓焊桁架结构，其杆件为焊接结构，在现场用高强螺栓加盖板连接，在盖板与母体接触面喷铝提高摩擦系数，使在高强螺栓拉力作用下形成整体，目前已发展到整体节点的栓-焊结构，即将每一杆件节点在工厂焊接而成，到现场用高强螺栓在节点外连接，这样节约材料和现场焊接量。栓-焊结构的优点是减少大型结构的运输难度，对防止结构整体脆断有利。与栓-焊结构不同，栓-焊或铆-焊接头传力接头则不可用，因为焊接接头是刚性接头，栓-接或铆-接接头为半刚性接头，在受力时首先加到焊接接头上，在其破坏后栓-接或铆-接接头才受力，两者不能共同受力。

## 1.2 焊接过程与能源及焊接方法

两种或两种以上的材料（同种或异种）通过原子或分子之间的结合和扩散形成永久性连接的工艺过程叫做焊接。焊接与其他的连接方法不同。通过焊接被连接的材料不仅在宏观上建立了永久性的联系，而且在微观上建立了组织之间的内在联系。接头处是共同熔化凝固结晶形成共同的原子分子结构，也可是固体金属表面紧密接触，在表面上进行扩散、再结晶等物理化学过程，形成金属键，达到焊接的目的。还有一种与焊接十分相似的连接方法是热喷涂和胶接，前者是机械坎入结合，后者是化学键结合，两者与母材的结合强度都不如焊接结合。

### 1.2.1 焊接过程与焊接方法

按焊接过程可分为熔化焊、压力焊和钎焊，如图 1-5 所示。三者主要在于焊接时加热温度、加热对象、加热金属状态和连接过程不同，这是焊接过程的本质。

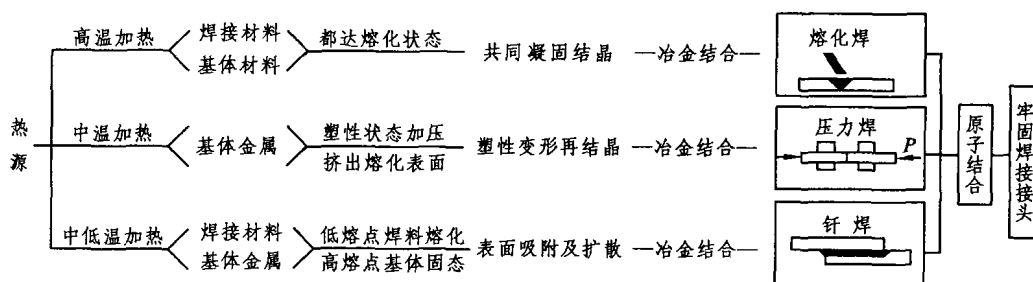


图 1-5 焊接过程及分类

#### 1. 熔化焊

将两工件的结合处加热到熔化状态（常需加入填充金属），并形成共同的熔池，冷却凝固结晶后，形成牢固的接头。

#### 2. 压力焊

利用力（或同时加热）的方法，使两工件接合面紧密接触在一起，加热到塑性状态或表面熔化状态，并产生一定的塑性变形，使它们的原子组成新的结晶，加压是使连接处发生局部塑性变形，目的是加速接触面氧化膜的破坏，增加有效接触面积，从而达到紧密的接触，继续加压产生大塑性变形后再结晶，形成

牢固的接头。加热被焊金属的连接处，降低金属变形的阻力。不加热的压力焊只有在高塑性的纯铝或纯铜的接头中才用，叫冷压焊，其他压力焊都要加热到塑性状态或表面熔化状态。真空扩散焊也属于压力焊，与前不同的是对焊接工件先加以较大压力再加热而靠其清洁面膨胀接近的原子扩散结合，无需加热到塑性状态和产生整体塑性变形，只有微小的塑性流动；对某些金属还需加入扩散剂，以起到增加扩散速度，减少焊接压力、加热温度和保温时间；如加中间金属为钎料，又称扩散钎焊。

### 3. 钎 焊

对工件和作为填充金属的钎料进行适当的加热，工件金属不熔化，但熔点低的钎料被熔化后填充到工件之间，与固态的被焊金属相互溶解和扩散，钎料凝固后，将两工件焊接在一起。这时加热被焊金属的连接处，目的是增加原子的热振动能，促进扩散、互溶过程的发展。

### 1.2.2 焊接能源与焊接方法

除冷压焊外，所有的焊接方法都需要用能源加热，大多数能源可适用于多种焊接方法，其能源不同所用工具设备明显不同，其加热的结果也不同，其应用的范围也有所不同，所以经常是按能源系统来命名焊接方法（如图 1-6 右所示）。与焊接相似的是喷涂，所用的能源与方法也与焊接大体相同，不过结合过程不

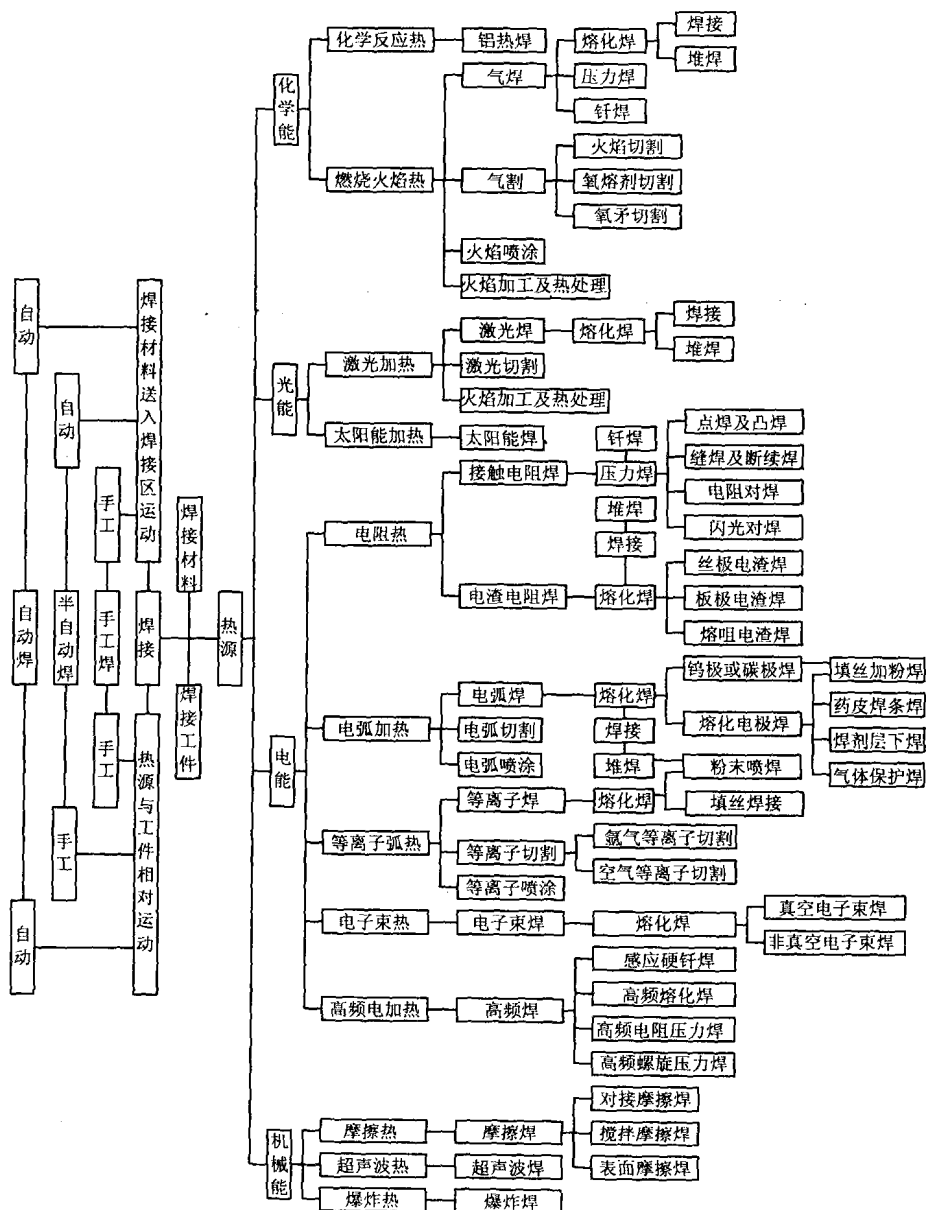


图 1-6 按能源系统（右）和焊接运动（左）来命名焊接方法

是焊接结合而是机械坎合。与焊接相反的是切割，所用的能源与方法也与焊接大体相同，但其作用是使材料一分为二，是原子分离。焊接能源还可作很多其他加工，如合金冶炼、材料热处理、材料机械加工、新材料和一次成型制造。

### 1.2.3 焊接运动与焊接方法

焊接运动是由焊接材料送给运动和热源与工件的相对运动来完成焊接。如这两种运动都是手工完成就是手工焊(如最常见的药皮焊条手工焊);如这两种运动都是自动进行就是自动焊(如最常见的埋弧自动焊);如焊接材料送给运动是自动进行而热源与工件的相对运动由手工完成叫做半自动焊(见图 1-6 左)。

## 1.3 焊接技术的学科领域及应用

焊接科学技术的发展依托于物理和能源科学的发展，形成了几十种各具特性的焊接新方法。由于不同的焊接热源作用于不同金属的结构，产生了不同的热力学、冶金学和力学相互交叉和依存的焊接过程，形成了独具特色的焊接物理学、焊接冶金学和焊接力学等科学理论，并由此指导焊接工艺、焊接设备和焊接结构工程的发展，形成了有科学基础有广泛的应用范围和发展前景十分广阔的焊接科学与工程，如图 1-7 所示。

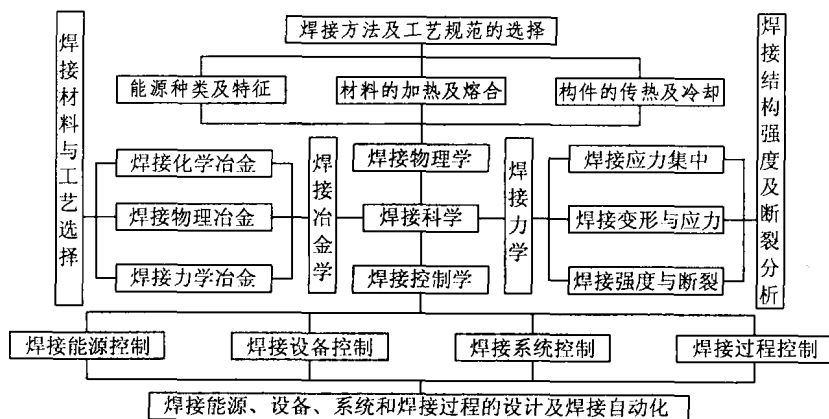


图 1-7 焊接科学与工程

### 1.3.1 焊接能源物理学与焊接方法

焊接能源物理学包括各种能源的本质及其在焊接过程中的作用以及应用范围,焊接能源设备及其控制,形成了焊接物理学。焊接能源的应用非常广泛,包括化学反应产生的热源、光学热源、电能(电弧和电阻热)和机械(摩擦热或其他)能,可衍生很多新的焊接方法设备及工艺,常用的热源及相应的焊接方法如图 1-8 所示。这些能源的加热最高温度、集中程度和保护状态都影响到焊接质量和应用范围,因此焊接能源物理学是选用、发展和研究焊接工艺和设备的理论基础,焊接也是新能源最先应用和发展最快的领域之一。

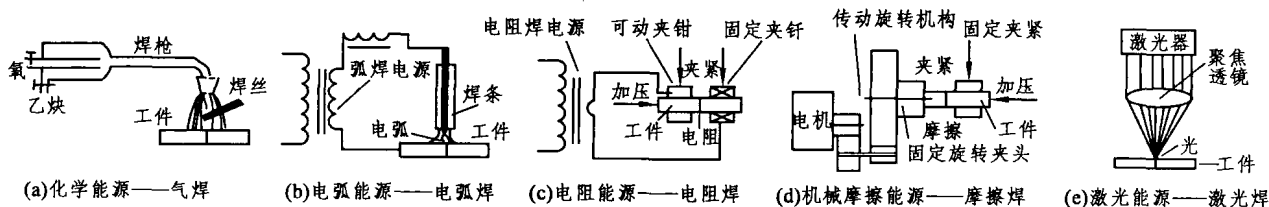


图 1-8 不同能源所形成的焊接方法

### 1.3.2 焊接冶金学与材料焊接

材料加热焊接过程是一个复杂而特殊的冶金过程：其熔化焊过程的熔池的凝固结晶相当于化学冶金过程（炼钢和铸造）；而相邻的区域材料被加热到不同温度以不同速度冷却相当于物理冶金过程（热处理）；在压力焊时是加热到材料塑性状态加以压力产生塑性变形再结晶，相当于力学冶金过程（压力加工）；这一系列的冶金过程，形成了焊接接头不同的组织性能，而这一系列的冶金过程又与炼钢和铸造、热处理和压力加工既相似又有不同，形成了在一个焊接接头内有明显不同的组织性能区，而且与焊接能源、焊接方法、焊接工艺参数有很密切的关系，形成了特殊的焊接冶金学，这是指导各种材料焊接的基础，是各种材料焊接性能研究、焊接材料选择、焊接方法及工艺的选择和相应焊接参数选择的基础。

### 1.3.3 焊接力学与焊接结构强度

焊接与一般热加工不同，从加热来看，它加热区很小而且温度梯度很大，加热速度、最高温度和冷却速度绝大多数情况都不是由均匀炉温和冷却介质决定，而是由本身的极不均匀的温度场决定，因而会在焊接接头区域产生很大的变形和应力，对裂纹的产生有重要影响，进而保持到室温为焊接残余变形和残余应力，在焊缝和热影响区的峰值残余应力可能达到屈服极限，这对焊接结构强度在很多情况下要产生重要影响。另外，焊缝及焊接接头的形式和焊接缺陷会产生应力集中，在很多情况下也会对焊接结构强度产生重要影响。这二者又正处于组织性能不均质的焊接接头部位，加载时形成了焊接接头特殊的力学行为，如果质量控制不好，在使用中的起裂往往由此开始，这点在高速列车和重载货车结构、高速铁路的钢轨和桥梁结构等高速动载结构特别重要。还有就是焊接接头一般都不是以一个零件参与工作，而是在一个结构整体中起连接传力作用又具有整体性，一旦发生断裂，就会危及到整个结构安危，因而对焊接结构的质量控制理论和方法研究，以及安全的科学监测和评定就显得特别重要。这些焊接结构强度分析和控制的基础就在焊接力学。

### 1.3.4 焊接控制学与焊接工程控制

焊接控制学包括多方面：焊接能源的控制是对焊接能源的性能和特性的控制，焊接参数的控制；焊接设备工程控制是焊接过程执行和协调的控制；焊接过程的自动控制是指焊接过程稳定性和变化规律的自适应控制；焊接系统控制是指整个焊接系统的综合和集中控制。这使焊接全过程的自动化过程的提高，对提高焊接质量和生产率起到关键作用。

### 1.3.5 焊接与再制造工程

焊接结构有些特殊用途部位需要堆焊特殊合金层，如某些化工容器需要在内层堆焊不锈钢，如某些工程机械需要在工作刀具面上堆焊耐磨合金，如某些冶金机械需要在轧辊工作面上堆焊耐热耐磨合金。表面喷涂及喷熔技术应用很广，其所用设备、材料、能源与焊接类似甚至相同，它可形成不同使用性能材料的表面层，使达到耐磨、耐冲刷、耐蚀、耐热、隔热、导电（或半导体）及超导、绝缘、辐射、催化、仿生等特殊功能，可合理利用材料，扩展零部件用途和延寿。发展再制造工程还可制造出很多新材料和特殊表层的零部件及新产品，可大大节材（特别是贵重材料）和延寿，可创造出很大的经济效益和社会效益。但热喷涂的喷涂材料与基体结合为机械结合，这点与焊接不同，因此其结合强度不如焊接，最适合于不直接传力（特别是冲击力）的薄层平面表面制备和加厚修复，以及钢结构长效防腐中应用。

### 1.3.6 焊接技术的发展

#### 1. 焊接新能源及其方法设备的应用

如高能密度的等离子焊接、电子束焊接和激光焊接，如低耗能的摩擦焊和搅拌摩擦焊，采用一些新能源和复合能源焊接和切割的应用。

## 2. 焊接高效化和自动化

焊接、切割、堆焊自动化是焊接技术发展方向。包括焊接机器人的研究开发及应用、研究开发灵巧轻便组合式智能焊机 and 生产过程低成本自动化。

## 3. 焊接过程的计算机模拟和仿真

焊接技术的计算机仿真是利用物理或数学模型进行数值模拟和试验研究, 可以对焊接热过程、焊缝和加热区的相变过程和组织性能、焊接变形应力的发展过程、焊接熔池流动和焊缝形成过程、不均质焊接接头的力学行为和焊接结构及其部件的应力分析等进行计算机数值模拟, 使焊接技术研究变为“理论-计算机模拟-生产应用”循环, 可达到组织性能预测及优化, 裂纹预测及诊断, 材料及工艺优化, 焊接缺欠及结构安全评定的目的, 使其分析逐步由定性到定量 (如图 1-9(a)所示)。同时还可对产品设计制造过程的实际系统采用一定的建模方法来建立一定数学模型; 用计算机仿真算法转换成仿真模型, 用仿真软件进行仿真试验, 在装备和结构设计、焊接工艺和焊接过程和系统设计方面, 由此可大大节约设计和试制成本 (如图 1-9(b)所示)。

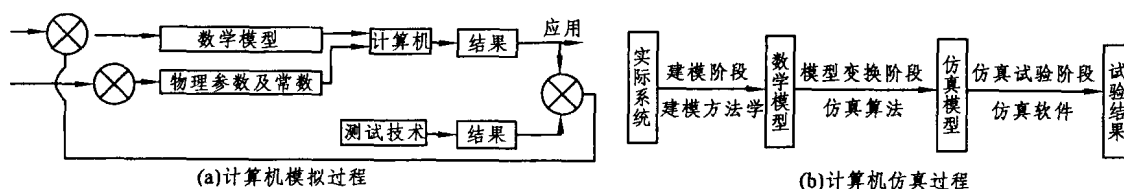


图 1-9 焊接过程的计算机模拟和仿真过程

## 4. 最优化技术

它是用计算机研究和解决在一切可能的方案中寻求最优方案的科学方法, 其本质是以所期望的目标为目标函数, 与此相关联的关系为一些约束条件, 建立目标函数与约束条件之间的函数关系, 求出此函数的极大值来确定其约束条件的数值为最优值。可用于焊接结构及机械产品设计优化, 焊接接头品质及焊接材料选择优化, 焊接工艺方法、过程及其参数的优化, 焊接自动化方案及其系统设计的优化, 工厂及车间及其工段的布置优化, 生产计划、材料库存及运输优化, 焊接材料配方设计优化等。其涉及面很宽和应用面很广, 应用得好就会达到优质高效节材节能的目的。

## 5. 焊接专家系统

它是一种基于专家的知识 and 经验求解难题的计算机程序, 利用专家的知识 and 经验形成的数据库中提取所需的知识、信息和图表, 与用户工程师人机对话作出推理和解释后作出决策。专家系统是目前人工智能中用于实践最多体现效益最好的领域。各专业都可作出相应领域的专家系统, 神经网络技术的发展更加速了专家系统的完善与发展。

# 1.4 材料及焊接接头性能

## 1.4.1 材料及焊接接头拉伸性能

常规材料拉伸性能有强度和塑性。强度为单位面积上的极限承载能力, 在一定的温度条件和外力的作用下抵抗断裂的能力, 工程上常用的强度指标有抗拉强度 (强度极限  $\sigma_b$ )、屈服强度 (屈服极限  $\sigma_s$ ), 这一般都是指静载强度。塑性是金属材料在外力作用下产生永久变形的能力, 常用的塑性指标有延伸率  $\delta$ 、断面收缩率  $\psi$ 。钢材的强度和塑性指标可以通过拉伸试验获得, 其获取过程如图 1-10 所示, 在实验过程中, 随载荷的增加至  $P_s$  开始塑性变形 (屈服), 由于变形硬化, 强度随变形增加而有所增加, 达到最大值  $P_b$  产生缩颈, 形成应力集中和三向应力状态在脆性点启裂并扩展直至断裂 (如图 1-10 (a) 所示), 这一过程会由记录仪自动记录 (如图 1-10(b)所示), 将断裂的试件合拢测出其标称长度 (5 倍直径或 10 倍直径) 的塑

性变形增加量 ( $L_b - L$ ) 和断面的塑性变形减少量 ( $F - F_b$ ), 由此可求出  $\sigma_b$ 、 $\sigma_s$ 、 $\delta_5$  和  $\delta_{10}$ 、 $\psi$  (如图 1-10(c) 所示)。图 1-10(b) 中的面积代表塑性变形功和断裂功 (弹性变形功在卸载后复原), 实际上就是静力韧性。对一些高碳钢或某些合金钢, 往往没有明显的屈服点, 就以其产生 0.2% 的塑性变形量载荷  $P_{0.2}$  计算出的  $\sigma_{0.2}$  为屈服极限。这时强度有较大提高, 但塑性指标大幅下降, 塑性储备很少。上述是由拉伸试验所得的指标。如果将材料进行压缩和扭转试验, 则可得出抗压或抗剪和抗扭性能指标。在焊接接头中除焊缝金属可作标准的拉伸试验外, 焊接接头可作全厚度的焊接接头拉伸试验, 以断裂时 (断在母材区、各热影响区或焊缝区) 的强度为焊接接头强度, 不一定求其他指标。如果要求求出焊缝或热影响区的强度则需将试件该部分削弱, 以便在此断裂, 即可得出该部位的断裂强度。

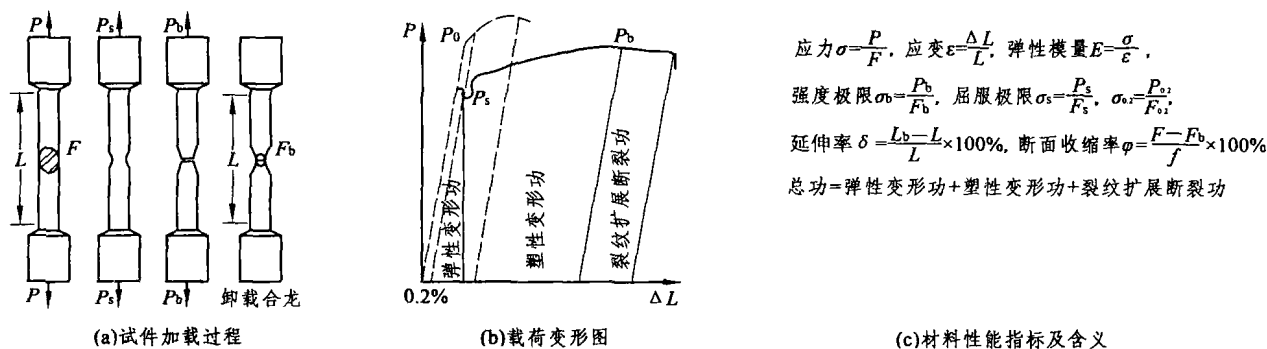


图 1-10 材料的基本性能图解

### 1.4.2 材料及焊接接头的弯曲性能

如果对在一定支点距上的试件或构件作三点弯曲或悬臂弯曲试验, 会产生弯曲, 以断裂前的弯曲角和下弯变形量作为塑性指标, 以断裂前所加的载荷可计算出抗弯强度。在做板试件弯曲时对不同板厚的压头半径和支座间距有一定规定。焊接接头的弯曲试验有面弯和背弯两种, 是考验焊接接头塑性和抗弯性能的重要方法。对焊接构件也可进行弯曲试验, 例如在钢轨焊接中的焊接接头就作静弯试验, 其支点距离为 1 m, 试验机的容量需 2 000 kN, 用断裂前的最大应力为抗弯强度, 用断裂前的最大下弯距离  $f$  为塑性指标。

### 1.4.3 材料及焊接接头的韧性

韧性是指金属材料在载荷下破断前吸收的能量, 采用冲击加载, 可以是悬臂弯曲、三点弯曲、拉伸或扭转。从冲击载荷—变形曲线可得出冲击韧性, 一般多用 10 mm × 10 mm × 55 mm 切口深 2 mm 的标准试件的三点弯曲试验的冲击功  $A_{KV}$  (试样刻槽缺口是“V”形叫却贝试件) 或  $A_{KU}$  (试样刻槽缺口是“U”形, 叫梅氏试件) 表示, 单位为 (J)。有时也用单位面积 (计算面积为 0.8 cm<sup>2</sup>) 上的冲击功  $\alpha_{KV}$  或  $\alpha_{KU}$  表示, 单位为 (J/cm<sup>2</sup>)。焊接接头的韧性测试则要麻烦一些, 要在试件磨光腐蚀后显出焊接接头各区后, 在指定区开切口, 以测出该指定区的韧性值。可以在常温冲击得出常温冲击韧性, 也可在指定低温冲击得出低温冲击韧性, 都以三个试件平均值为准。还可以作系列温度的冲击功绘出显示韧—脆转变的  $A_K-T$  曲线。

### 1.4.4 材料及焊接接头的硬度

硬度是衡量钢材软硬程度的一种指标, 以布氏硬度、维氏硬度、洛氏硬度和肖氏硬度表示 (如图 1-11 所示)。布氏硬度用符号 HBS (压头为钢球) 或 HBW (压头为硬质合金球) 表示 (如图 1-11(a) 所示), 它的大小表示压痕单位面积上所承受的压力  $P/F$ , 一般不标出单位。硬度愈高, 表示材料愈硬; HBS 适用于布氏硬度值在 450 HB 以下材料, 为一般常用, 称为 HB, 另外还有 HBW 适用于布氏硬度值在 650 HB 以下的材料。洛氏硬度以金刚石圆锥形压头压入深度来表示硬度 (如图 1-11(b) 所示), 有几种不同的硬度标尺, 我国常用的有 HRA、HRB、HRC 三种, 最常用的是 HRC。维氏硬度值是以金刚石四面锥形压头压入的压痕的对角线来计算面积所承受的压力  $P/F$  表示硬度 (如图 1-11(c) 所示) 用符号 HV 表示, 其优点是从低到高有一个连续的标尺; 用显微镜配小载荷 (以克力计量) 的维氏硬度测量出的硬度 (可测出显微组织

组成体的硬度) 又称显微硬度, 用  $HM$  表示。还有一种与上面不同原理测出的硬度 (如图 1-11(d)所示), 即用一金刚石圆头的重锤提升到一定高度后落下锤击金属后回弹的高度来确定硬度, 称之为邵氏 (肖氏) 硬度  $HS$ , 此法的优点也是从低到高有一个连续的标尺, 除了能在试验机上对试件测试外, 还可用手持机头在大机件上测出肖氏硬度值。以上几种硬度的相互换算如表 1-1 所示, 还可得到相近的抗拉强度  $\sigma_b$  的近似值。目前还有一种里氏硬度计, 其测试原理与肖氏相似, 测出值叫里氏硬度  $HL$ , 可用多种冲击装置测量  $HRC$ 、 $HRB$ 、 $HB$ 、 $HV$ 、 $HS$  等硬度和对多种工件形状和材料测量硬度, 轻巧简便易用。目前各种硬度计都有很快的发展, 不少硬度计能有自动操作、数据处理、数据存储数显和打印、硬度数据转换和与计算机联结接口。在材料的硬度测试中, 一般以测出三点的平均值为其硬度值。对焊接接头的硬度测试比较麻烦一些, 要用在焊接接头表面或横截面磨光腐蚀后显出焊接接头各区, 然后再跨三区的直线上以  $1\text{ mm}$  甚至更小的间距测量其  $HV$  值, 由此可得到焊接接头的硬度分布, 也可确定其近似的焊接接头的强度分布或各区的三点平均值。

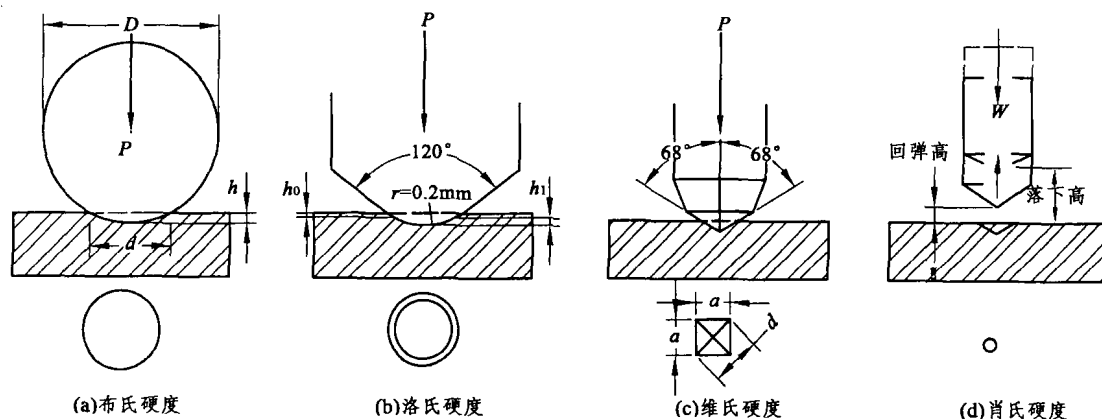


图 1-11 几种常用硬度测试方法示意

表 1-1 各种硬度指标和抗拉强度对照表

|                                   |     |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |
|-----------------------------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| HV                                | 940 | 680  | 560 | 520  | 480  | 440  | 400  | 360  | 320  | 290  | 270  | 250  | 220 | 180 |
| HB                                |     |      |     | 480  | 448  | 415  | 379  | 341  | 303  | 275  | 256  | 238  | 209 | 171 |
| HRC                               | 68  | 59.2 | 53  | 50.5 | 47.7 | 44.5 | 40.8 | 36.6 | 32.2 | 28.5 | 26.6 | 22.2 |     |     |
| HS                                | 97  | 80   | 71  | 67   | 64   | 59   | 55   | 50   | 45   | 41   | 38   | 36   | 32  | 26  |
| $\sigma_b$ 约 ( $\text{kg/mm}^2$ ) | 232 | 189  | 176 | 162  | 148  | 134  | 120  | 106  | 96   | 89   | 82   | 71   | 59  |     |

## 第2章 化学能源及其焊接和加工

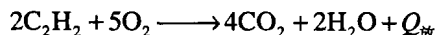
化学能源焊接是应用最早的焊接方法，其中锻焊在公元前 5 000 多年就开始应用，一种用碳燃烧产生的能源加热需要连接的接头，“涂黄泥于上入火”，加热到 1 200 ℃ 锤击，“取其神气为媒合”，形成牢固接头。涂黄泥是为了防止氧化，取其神气为媒合则是在高温塑性状态锤击加压使其达到原子结合。这是我国最早的焊接理论和焊接方法，在古代的刀剑和农具生产中的刃-体焊接中得到广泛应用，而今已为先进能源的压力焊所代替。铸焊也有很悠久的历史，用熔化的高温金属浇铸到连接接头的型框内使成为一体，这在四川三星堆的复杂的青铜器焊接中得到应用，以后发展成用化学反应热焊接的铸焊-铝热焊，至今仍是钢轨焊接的重要方法之一。气焊是应用最广的化学能源焊接，在 20 世纪二三十年代是焊接方法的主流，可用于熔化焊接、压力焊、钎焊、热喷涂、切割和表面热处理等。

### 2.1 气焊和火焰加工热源及其应用

气焊及火焰加工的特点是用气体的火焰作为热源。乙炔、氢气、石油蒸汽、天然气及其他燃气均可作为燃料，但最常用的是乙炔，因为它燃烧的火焰，热量最集中，因而温度最高，适用于作焊接热源。在气割、预热、火焰淬火和正火等也用其他气体火焰作为热源。为了充分燃烧，常用氧气作为助燃气体加入。

#### 2.1.1 氧-乙炔火焰热源

氧-乙炔气混合后一点火就剧烈燃烧为火焰，反应如下：



##### 1. 火焰的性质

氧 ( $\text{O}_2$ ) 和乙炔 ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) 的比例一般按 1~1.2 的比例混合，如果  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  在 1~1.2 则成为中性焰，为焊接和火焰加工所常用，这时火焰高温区为还原性气氛可防止氧化，外焰可起隔绝空气起保护作用。 $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  小于 1 时为碳化焰，这时火焰变长变软，出现冒黑烟，如用以焊接，易使金属有增碳作用，降低焊缝质量，除有时焊易氧化金属时用  $\text{C}_2\text{H}_2$  稍多的还原焰，碳化焰很少使用。当  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$  大于 1.2 时则成为氧化焰，火焰变短有吱吱声，这时火焰中有多余的氧可氧化金属，使焊缝性能变坏，故一般不用这种火焰进行焊接和火焰加工。火焰的性质可用焊枪上的阀门来调节氧和乙炔的比例来获得所需的火焰性质。

##### 2. 氧-乙炔气体火焰的化学反应热源

$\text{C}_2\text{H}_2$  和  $\text{O}_2$  混合后一点火就剧烈燃烧生成  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$ ，同时放出热量  $Q$  作为焊接和各种火焰加工热源：



过去用的乙炔由电石和水在乙炔发生器中反应生成乙炔和熟石灰，即  $\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{C}_2\text{H}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ，可随时发生使用。现在一般都用瓶装乙炔，既方便又安全。

##### 3. 火焰结构

由图 2-1 看出，这里  $\text{C}_2\text{H}_2$  和  $\text{O}_2$  混合的区域叫焰心，生成的  $4\text{CO} + 2\text{H}_2$  是还原气体，故称为还原区名叫内焰，这个区域内由于猛烈地燃烧，而且燃烧区域小，因而温度高可达 3 000 ℃ 以上；不完全燃烧的生成物  $4\text{CO} + 2\text{H}_2$  与空气中  $\text{O}_2$  相遇进一步进行完全燃烧，即：