

普通中等专业教育机电类规划教材

# 焊接生产基础

四川省机械工业学校 英若采 主编

机械工业出版社



本教材系根据机械中专焊接专业新的指导性教学计划与《焊接生产基础》课程教学大纲编写的,书中全面、系统地介绍了手弧焊、气焊与气割的原理、工艺、设备特点及基本操作,并简要介绍了焊接结构常用的金属材料以及焊接结构制造及检验的全过程,对其它焊接方法也作了概述。

本书主要作为焊接专业教学实习中讲授专业基础知识的教材。结合实际操作,使学生在掌握基本操作技能的同时,初步掌握与实习内容有关的专业基本知识,本书也可作为复合型热加工专业的专业课教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

焊接生产基础/英若采主编. —北京:机械工业出版社, 1996.5 (2000 重印)  
普通中等专业教育机电类规划教材  
ISBN 7-111-04818-0

I. 焊… II. 英… III. 焊接-中等专业教育-教材  
IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 63838 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王海峰 董连仁 版式设计:张世琴 责任校对:姚毅

封面设计:肖晴 责任印制:洪汉军

北京中兴印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 7 月第 1 版第 4 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·13 印张·309 千字

定价:19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

## 前 言

本书是中专焊接专业的试用教材，是根据机械中专焊接专业新的指导性教学计划及《焊接生产基础》教学大纲编写的。

本书内容共分七章，其中第二、三两章，全面、系统地介绍了手弧焊、气焊与气割的原理、工艺、设备特点及基本操作，其它各章主要介绍焊接结构常用材料及焊接结构制造和检验的全过程，并对其它焊接方法作一定概述。

根据教学计划的安排，本教材在专业教学实习中使用。教材内容中除二、三两章外，其它各章均以简单的低碳钢结构为研究对象，以适应低年级学生的年龄及知识特点。

本书由四川省机械工业学校英若采主编。其中第二章由四川省机械工业学校雷世明编写；第三章由兰州石油学校王建勋编写；第四章由北京机械工业学校王云鹏编写；其余各章均由英若采编写，并由英若采统稿。全书由西南交通大学王一戎教授主审。

在编写中，参考了高等学校、中等专业学校及技工学校的有关教材。四川省机械工业学校焊接实验室、电教室及文印室为本教材提供了照片。审稿中，新疆机械电子工业学校、山东机械工业学校、浙江省机械工业学校、包头机械工业学校等有关同志对书稿提出了宝贵意见，在此，对上述有关单位及同志表示感谢。

编 者

# 目 录

## 前言

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 绪论 .....                | 1  |
| 一、焊接的定义及特点 .....        | 1  |
| 二、焊接技术的发展概况 .....       | 2  |
| 三、本教材的研究对象及内容 .....     | 3  |
| 四、本教材的学习方法 .....        | 3  |
| 第一章 金属材料基本知识 .....      | 4  |
| 第一节 金属的性能 .....         | 4  |
| 一、金属的力学性能 .....         | 4  |
| 二、金属的工艺性能 .....         | 10 |
| 第二节 钢的分类、牌号与钢材 .....    | 11 |
| 一、钢的分类 .....            | 11 |
| 二、钢材 .....              | 11 |
| 第三节 焊接结构制造中的常用钢 .....   | 15 |
| 一、碳素结构钢 .....           | 15 |
| 二、低合金结构钢 .....          | 16 |
| 三、专业用钢 .....            | 16 |
| 四、不锈钢和耐热钢 .....         | 17 |
| 第四节 有色金属基本知识 .....      | 17 |
| 一、铝及铝合金 .....           | 18 |
| 二、铜及铜合金 .....           | 18 |
| 第五节 金属材料的验收、保管与发放 ..... | 19 |
| 思考题 .....               | 20 |
| 第二章 手弧焊 .....           | 21 |
| 第一节 手弧焊的焊接过程及特点 .....   | 21 |
| 一、手弧焊的焊接过程 .....        | 21 |
| 二、手弧焊的特点 .....          | 21 |
| 第二节 焊接电弧 .....          | 22 |
| 一、焊接电弧的引燃 .....         | 22 |
| 二、焊接电弧的构造及温度分布 .....    | 23 |
| 三、焊接电弧的静特性 .....        | 24 |
| 四、焊接的极性及应用 .....        | 25 |
| 五、焊接电弧的稳定性及影响因素 .....   | 25 |
| 六、焊接电弧的偏吹 .....         | 26 |
| 第三节 焊条 .....            | 28 |
| 一、焊条的作用及对焊条的要求 .....    | 28 |
| 二、焊条的组成 .....           | 28 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 三、焊条的分类、型号及牌号 .....     | 29 |
| 四、常用碳钢焊条 .....          | 31 |
| 五、焊条的选用与保管 .....        | 31 |
| 第四节 手弧焊的接头形式与焊缝分类 ..... | 32 |
| 一、焊接接头形式 .....          | 32 |
| 二、坡口 .....              | 33 |
| 三、焊缝分类及焊缝符号 .....       | 34 |
| 第五节 手弧焊工艺 .....         | 40 |
| 一、焊前准备 .....            | 40 |
| 二、手弧焊焊接工艺参数的选用 .....    | 40 |
| 三、手弧焊基本操作技术 .....       | 43 |
| 四、典型产品的焊接工艺 .....       | 45 |
| 第六节 手弧焊设备及主要工具 .....    | 48 |
| 一、手弧焊对弧焊电源的要求 .....     | 48 |
| 二、焊机的编号及铭牌 .....        | 49 |
| 三、常用的手弧焊电源 .....        | 51 |
| 四、手弧焊电源的选择与正确使用 .....   | 57 |
| 五、手弧焊工具 .....           | 58 |
| 思考题 .....               | 60 |
| 第三章 气焊与气割 .....         | 61 |
| 第一节 气焊与气割用材料 .....      | 61 |
| 一、氧气 ( $O_2$ ) .....    | 61 |
| 二、乙炔 ( $C_2H_2$ ) ..... | 62 |
| 三、气焊丝 .....             | 63 |
| 四、气焊熔剂 .....            | 64 |
| 第二节 氧乙炔火焰 .....         | 65 |
| 一、氧乙炔火焰的种类及性质 .....     | 65 |
| 二、氧乙炔火焰的调节及适用范围 .....   | 66 |
| 第三节 气焊设备及工具 .....       | 67 |
| 一、氧气瓶 .....             | 67 |
| 二、乙炔发生器 .....           | 68 |
| 三、乙炔钢瓶 .....            | 70 |
| 四、减压器 .....             | 71 |
| 五、回火防止器 .....           | 73 |
| 六、焊炬 .....              | 75 |
| 七、辅助工具 .....            | 77 |
| 第四节 气焊工艺 .....          | 77 |
| 一、焊接接头形式及坡口 .....       | 77 |
| 二、焊前准备 .....            | 78 |
| 三、气焊工艺参数的选择 .....       | 79 |
| 四、气焊操作 .....            | 80 |
| 五、碳素钢的气焊 .....          | 80 |
| 第五节 氧气切割 .....          | 81 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 一、氧气切割过程及条件 .....         | 81  |
| 二、割炬 .....                | 82  |
| 三、手工氧气切割技术 .....          | 83  |
| 四、各种工件的气割方法 .....         | 85  |
| 五、氧-丙烷和氧-天然气切割 .....      | 87  |
| 六、高速气割 .....              | 88  |
| 七、机械化市割简介 .....           | 89  |
| 第六节 气焊及气割安全技术 .....       | 93  |
| 一、使用乙炔发生器的安全技术 .....      | 93  |
| 二、使用氧气瓶的安全技术 .....        | 93  |
| 三、使用乙炔瓶的安全技术 .....        | 93  |
| 四、使用减压器的安全技术 .....        | 94  |
| 五、使用焊炬和割炬的安全技术 .....      | 94  |
| 思考题 .....                 | 94  |
| 第四章 焊接结构的备料工艺 .....       | 95  |
| 第一节 备料加工的目的、要求及主要内容 ..... | 97  |
| 一、备料加工的目的、要求 .....        | 97  |
| 二、备料加工的主要内容 .....         | 97  |
| 第二节 原材料的矫正 .....          | 97  |
| 一、钢材变形的原因 .....           | 97  |
| 二、矫正的基本原理 .....           | 98  |
| 三、矫正方法与设备 .....           | 99  |
| 四、钢材的清理及预处理 .....         | 101 |
| 第三节 划线、放样及号料 .....        | 102 |
| 一、划线工具及其使用 .....          | 102 |
| 二、放样 .....                | 103 |
| 三、号料 .....                | 106 |
| 四、零件的展开 .....             | 106 |
| 五、钢材展开尺寸的计算 .....         | 109 |
| 第四节 下料 .....              | 112 |
| 一、常用下料的方法、特点及应用范围 .....   | 112 |
| 二、常用的机械冲剪设备 .....         | 113 |
| 第五节 零件下料后的加工 .....        | 115 |
| 一、焊接坡口的加工 .....           | 115 |
| 二、孔加工 .....               | 117 |
| 第六节 构件的成形 .....           | 118 |
| 一、板料的成形 .....             | 118 |
| 二、型钢的弯曲 .....             | 120 |
| 三、管子弯曲 .....              | 120 |
| 思考题 .....                 | 122 |
| 第五章 焊接结构的装配 .....         | 123 |
| 第一节 焊接变形与应力 .....         | 123 |
| 一、焊接变形与应力的形成 .....        | 123 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 二、焊接变形的种类与分布 .....          | 124 |
| 三、控制和减小焊接变形与残余应力的措施 .....   | 127 |
| 四、焊后残余变形的矫正与应力消除 .....      | 131 |
| 第二节 焊接结构装配所用的工夹具及简单装备 ..... | 134 |
| 一、装配工具及其使用 .....            | 134 |
| 二、装配平台 .....                | 136 |
| 三、装配夹具 .....                | 137 |
| 四、装配中常用的吊具 .....            | 139 |
| 第三节 焊接结构的装配工艺 .....         | 141 |
| 一、装配前的准备工作 .....            | 141 |
| 二、零件的定位 .....               | 141 |
| 三、装配方案及其选用 .....            | 142 |
| 四、装配方法 .....                | 143 |
| 五、典型结构的装配 .....             | 144 |
| 第四节 典型产品的制造工艺 .....         | 149 |
| 一、箱形梁的结构与技术条件 .....         | 149 |
| 二、划线及下料 .....               | 150 |
| 三、装配—焊接 .....               | 150 |
| 思考题 .....                   | 152 |
| 第六章 常见的焊接缺陷与焊接质量检验 .....    | 153 |
| 第一节 常见的焊接缺陷 .....           | 153 |
| 第二节 焊接质量检验的分类与内容 .....      | 158 |
| 一、按检验的数量分类 .....            | 158 |
| 二、按检验方法分类 .....             | 158 |
| 三、按检验程序分类 .....             | 158 |
| 第三节 焊缝外观及尺寸检验 .....         | 160 |
| 一、焊缝外观检验 .....              | 160 |
| 二、焊缝尺寸检验 .....              | 160 |
| 第四节 密封性试验 .....             | 162 |
| 第五节 焊接接头的无损探伤 .....         | 163 |
| 一、超声探伤 .....                | 163 |
| 二、射线探伤 .....                | 165 |
| 三、磁粉探伤 .....                | 168 |
| 四、渗透探伤 .....                | 169 |
| 第六节 焊接产品的耐压试验 .....         | 170 |
| 一、水压试验 .....                | 170 |
| 二、气压试验 .....                | 171 |
| 思考题 .....                   | 172 |
| 第七章 其它焊接方法与切割方法 .....       | 173 |
| 第一节 埋弧焊 .....               | 173 |
| 一、埋弧焊的特点 .....              | 173 |
| 二、埋弧焊的焊接材料 .....            | 174 |
| 三、埋弧焊焊机 .....               | 175 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 四、埋弧焊技术 .....                      | 176 |
| 第二节 二氧化碳气体保护焊 .....                | 178 |
| 一、CO <sub>2</sub> 气体保护焊的特点 .....   | 178 |
| 二、CO <sub>2</sub> 气体保护焊的焊接材料 ..... | 179 |
| 三、CO <sub>2</sub> 气体保护焊设备 .....    | 179 |
| 四、CO <sub>2</sub> 气体保护焊工艺 .....    | 180 |
| 第三节 氩弧焊 .....                      | 181 |
| 一、氩气 (Ar) .....                    | 181 |
| 二、钨极氩弧焊 .....                      | 181 |
| 三、熔化极氩弧焊 .....                     | 183 |
| 第四节 电阻焊 .....                      | 184 |
| 一、电阻焊的分类、特点及应用 .....               | 184 |
| 二、电阻焊的电极材料 .....                   | 185 |
| 三、点焊工艺 .....                       | 186 |
| 四、缝焊工艺 .....                       | 187 |
| 五、对焊工艺 .....                       | 188 |
| 第五节 电渣焊 .....                      | 189 |
| 一、电渣焊的过程及特点 .....                  | 189 |
| 二、电渣焊的分类 .....                     | 190 |
| 三、电渣焊的焊接材料 .....                   | 191 |
| 四、丝极电渣焊工艺 .....                    | 191 |
| 第六节 等离子弧焊接与切割 .....                | 192 |
| 一、等离子弧的形成、特点及应用 .....              | 192 |
| 二、等离子弧切割 .....                     | 193 |
| 三、等离子弧焊接 .....                     | 194 |
| 第七节 碳弧气刨 .....                     | 194 |
| 一、碳弧气刨的特点及应用范围 .....               | 194 |
| 二、碳弧气刨的电源、工具及电极材料 .....            | 195 |
| 三、碳弧气刨工艺 .....                     | 195 |
| 思考题 .....                          | 196 |
| 附录 有关国家标准目录 .....                  | 197 |
| 参考文献 .....                         | 198 |

## 绪 论

焊接是金属加工的主要方法之一，虽然应用的时间不长，但发展非常迅速，目前在机器制造业中获得了广泛的应用，已成为大型金属结构制造中必不可少的加工手段。

### 一、焊接的定义及特点

焊接是一种连接方法，通过焊接可将两个分开的物体（焊件）连接而达到永久性的结合。为了明确焊接的特点与实质，并与其它的连接方法（如铆接、螺栓连接）加以区别，GB3375—82《焊接名词术语》中规定了焊接的定义：“焊接是通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充金属，使焊件间达到原子结合的一种加工方法”。

根据上述定义，焊接最本质的特点就是通过焊接使焊件达到了原子结合，从而将原来分开的物体构成了一个整体，这是任何其它连接形式所不具备的。常用的连接形式如图1所示。为了达到原子结合，焊接时必须对焊接区进行加热、加压。

根据加热的程度及是否加压，焊接分为熔焊与压焊两大类。焊接过程中，将焊件加热至熔化状态，不加压力完成的焊接方法通称为熔焊。在焊接过程中必须对焊件施加压力（加热或不加热），以完成的焊接方法，叫做压焊。熔焊与压焊各自包括的焊接方法见图2。

上述特点决定了焊接具有下列的优点：

1) 与铆接相比，焊接可以节省金属材料，从而减轻了结构的重量；与粘接相比，焊接具有较高的强度，焊接接头的承载能力可以达到与焊件材料相同的水平。

2) 焊接工艺过程比较简单，生产率高，焊接既不需像铸造那样要进行制作木型、造砂型、熔炼、浇铸等一系列工序，也不像铆接那样要开孔、制造铆钉并加热等，因而缩短了生产周期。

3) 质量高，焊接接头不仅强度高，而且其它性能（物理性能、耐热性能、耐腐蚀性能及密封性）都能够与焊件材料相匹配。

4) 焊接可以化大为小，并能将不同材料连接成整体制造双金属结构；还可将不同种类的毛坯连成铸—焊、铸—锻—焊复合结构，从而充分发挥材料的潜力，提高设备利用率，用

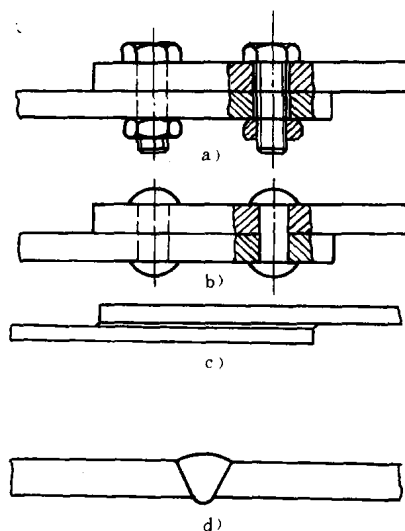


图1 几种常用的连接形式

a) 螺栓连接 b) 铆钉连接 c) 粘接 d) 焊接

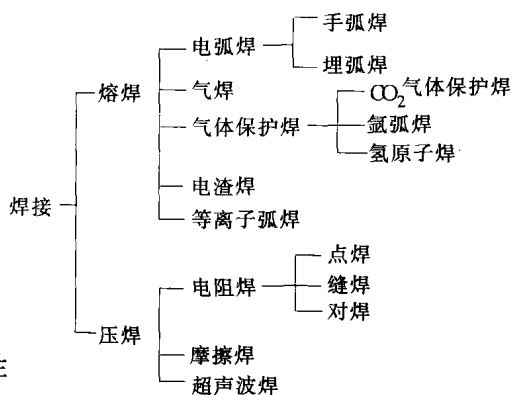


图2 焊接方法分类

较小的设备制造出大型的产品。

5) 焊接的劳动条件比铆接好, 劳动强度小, 噪声低。

由于具备了上述优点, 在锅炉压力容器、船体和桥式起重机制造中, 焊接已全部取代了铆接。在工业发达国家, 焊接结构所用钢材约占钢材总产量的 50%。

需要说明的是, 焊接时的高温加热, 会引起某些金属材料性能变坏或承载能力下降。这些问题随着焊接技术的发展逐步得到改善, 但仍使焊接的应用受到一定的局限。

## 二、焊接技术的发展概况

焊接技术应用于工业生产是始于 19 世纪 80 年代, 至今不过百年左右。

焊接技术的发展主要表现在新方法的研制、应用与机械化自动化程度的提高。经济的发展对焊接技术提出了更高的要求, 而科技的进步也为焊接方法与设备的发展提供了条件。目前, 各种电弧焊、电阻焊、气体保护焊已成为生产中使用的常规焊接方法, 而等离子弧焊接、电子束焊接等一些高效、节能的新技术也逐步得到推广, 从而大大扩展了焊接技术应用领域, 一些具有特殊性能的高合金钢、有色金属、稀有金属等, 都可以用焊接的方法获得高质量的接头。焊接不仅用于大型结构的制造, 在一些精密、尖端的产品制造中也发挥了重要作用。

由于先进的电子技术、自动控制技术和计算机技术的应用, 焊接设备的可靠性明显提高, 功能不断完善。现在不仅有机械化、自动化的单机, 还有程序控制的自动焊接生产线和焊接机器人。

我国的焊接技术是新中国成立后才获得发展的, 虽然起步较晚, 但已取得令人瞩目的成就。

早在 60 年代, 我国就掌握了万吨级巨轮和桥式起重机的焊接技术, 并成功地设计和制造了全焊的 12000t 水压机。

改革开放以来, 为了重点发展材料、能源、交通、化工等基础工业, 满足制造大型焊接结构的要求, 我国在拓宽高合金钢的应用、提高焊接机械化与自动化水平等方面做了大量的工作。高效、节能的焊接技术、自动跟踪技术、计算机应用和焊接机器人的应用都有了很大的发展。在引进国外先进技术与设备的同时, 很多大中型骨干企业还进行了设备的更新与改造。近年来成功地制造了一批重型、大型的焊接结构, 焊接技术也得到明显的提高。80 年代以来, 在制造的大型发电与冶金设备中具有代表性的焊接结构有:

1) 300MW 和 600MW 电站锅炉的主要部件, 包括壁厚 170~200mm 的锅炉气包; 直径 900mm、最大壁厚 120mm 的联箱, 以及省煤器、水冷壁等。

2) 大型水电设备的水轮机转子、涡壳、座环等部件。其中刘家峡及雁滩电站的水轮机转子直径为 8m、高度 5.2m, 叶片最大厚度 220mm, 重量 300t, 采用异种钢焊接工艺制造, 是当前世界上最大的异种钢水轮机转子。

3) 秦山核电站中的核容器、燃料棒外壳及不锈钢管道等部件的焊接。其中燃料棒外壳用特殊铝合金制造, 直径 10mm, 厚度只有 0.7mm, 是用真空电子束焊接方法制造的。

4) 宝山钢铁公司的 2 号、3 号高炉, 其容积为 4063m<sup>3</sup>, 是目前国内最大的高炉。炉体由几个不同直径, 不同壁厚的筒节组成, 其中最大直径为 17.3m, 外壳壁厚为 32~90mm, 总高为 44.9m, 各个筒节的纵缝和筒节间的环缝都是用焊接方法连接的。

5) 成功焊接了大跨度大吨位桥式起重机的金属结构, 其中最有代表性的是宝钢的跨度 39.5m、截面 2.3m×2.7m 的重型起重机上的大梁。

上述产品尺寸大，质量要求高，采用传统的常规焊接技术难以达到质量要求。因此，在制造中分别采用了窄间隙埋弧焊、带极埋弧堆焊， $\text{CO}_2 + \text{Ar}$  混合气体保护焊以至真空电子束焊等先进的焊接方法，并应用了自动跟踪、程序控制、磁控技术等先进的控制技术。

我国是一个人口众多的发展中国家，近年来焊接事业虽然取得巨大的进步，但与工业发达国家相比还有较大的差距，在推广高质、高效、低成本的焊接技术，在焊接专机与辅机的研制，在用电子技术改造传统技术等方面，还有大量的工作要做。

### 三、本教材的研究对象及内容

本教材是根据机电中专焊接专业《焊接生产基础》课程教学大纲编写的。该课程属于焊接专业入门课，其目的是配合专业教学实习，使学生在掌握焊接基本操作技能的同时，初步掌握与实习内容有关的基本理论，并对本专业所涉及的生产领域与知识范畴有初步的、但较全面的了解，为开好后续课作好准备。

根据课程开设目的和教学计划总体安排，考虑到学生的知识水平与年龄特点，教材围绕简单的焊接结构制造，安排了以下内容：

- 1) 手弧焊、气焊、气割基本原理、工艺与设备使用。
- 2) 金属材料的基本知识。
- 3) 焊接结构制造过程，简单的典型结构的制造方法及所用设备。
- 4) 焊接缺陷的识别与常用质量检验方法。
- 5) 其它常用的焊接方法与切割方法简介。

### 四、本教材的学习方法

本教材内容与生产实际联系紧密，学习中应掌握以下的方法：

- 1) 注意知识的实际应用，特别是注意用教材中的基本知识解决实习中遇到的问题。
- 2) 处理好理论与实践的关系，防止脱离现有知识水平进行过多过深的理论探讨，追求理论完整性的倾向。
- 3) 自觉注意教材涉及的知识领域与其它课程的关系，特别是注意与普通课、技术基础课的关系。
- 4) 积极参加生产实践，并做好仔细观察，积极思考。

# 第一章 金属材料基本知识

当前的焊接结构几乎全部用金属制造。在开始学习与焊接结构制造的有关理论与操作技能时，首先应对金属材料的基本知识有所了解。

## 第一节 金属的性能

在机器制造中，金属之所以获得最广泛的应用是由其优异的性能所决定的。不同类的金属性能与特点各不相同，因此，产品设计人员必须根据各种金属材料的性能特点来正确、合理地选材；从事制造工艺的人员，也必须掌握所用材料的性能特点，才能编制正确、合理的工艺方案，从而在保证产品质量的前提下获得最佳的经济效益。

金属的性能包括使用性能与工艺性能。使用性能就是金属对不同工作条件的适应性，又分为力学性能、化学性能和物理性能；工艺性能是指金属对各种加工工艺方法的适应性，包括切削性、焊接性、铸造性、锻造性等。金属使用性能这里只介绍力学性能。

### 一、金属的力学性能

金属在力的作用下所表现的行为称为力学性能。

产品设计选用材料时，除考虑材料的物理、化学性能外，主要是以力学性能指标来作为确定产品主要几何尺寸的依据。力学性能指标包括强度、塑性、韧性、硬度等。

1. 强度 材料或零件受载时，抵抗变形和破坏的能力叫强度，抵抗外力的能力越大，则强度越高。根据外力性质之不同，强度又可分为抗拉、抗压、抗扭和抗剪强度，以抗拉强度应用最普遍。

为了比较不同材料的强度，必须制定一个统一的指标。抗拉强度的指标是通过将标准试件，按照规定的试验程序在材料试验机上测定的。试验程序应按 GB228—87 规定进行，试件的形状与尺寸应符合 GB6397—86 的规定，常用的圆形试样如图 1-1 所示。

在拉伸过程中，随外力增加试件将伸长。试件拉伸时外力  $F$  与伸长量  $\Delta l$  之间的关系曲线叫做拉伸图或拉伸曲线。

图 1-2 为低碳钢的拉伸曲线。曲线中  $oe$  段为直线，即伸长量  $\Delta l$  随力  $F$  成正比地增加，外力增加不超过  $F_e$  时，卸载后试样可以恢复原有尺寸，这种在除去外力后即可消失的变形，叫做弹性变形。线段  $oe$  称为弹性变

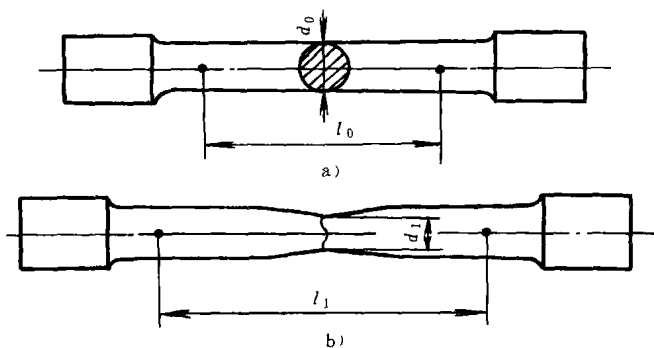


图 1-1 圆形拉伸试样

a) 拉伸前 b) 拉伸后

$d_0$ —试件直径  $l_0$ —标距长度  $d_1$ —拉断后最细处直径  
 $l_1$ —拉断后的标距长度

形阶段, 载荷  $F_e$  称弹性极限载荷, 即试件不产生永久变形所能承受的最大载荷。而载荷超过  $F_e$  时, 卸载后试件的伸长只能部分恢复, 保留了一部分永久变形, 这部分永久变形叫做塑性变形。载荷达到  $F_s$  后继续增大时, 曲线出现一段平台或锯齿状, 说明外力不变塑性变形继续增加, 这一现象叫做屈服,  $F_s$  则为屈服点载荷。屈服阶段以后, 欲使试件继续变形, 必须相应增大载荷, 曲线上升至  $b$  点载荷达到  $F_b$  为最大值。曲线超过  $b$  点后为断裂段, 此时试件截面产生局部收缩, 称为缩颈, 试件在  $k$  点断裂。

金属在外力作用下发生变形时, 其内部间将产生一个相互作用的力, 这种由外力作用而在内部引起的力称为内力。内力实际是物体的一部分与另一部分之间相互作用的力。单位面积上的内力称为应力。

应力以  $\sigma$  表示, 其计算式为:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{N/m}^2)$$

式中  $F$ ——外力 (N);

$A$ ——试件断面面积 ( $\text{m}^2$ )。

$\text{N/m}^2$  称为帕斯卡, 简称帕, 用 Pa 表示。一般应力数值较大, 习惯上以 MPa 为单位。1 MPa =  $10^6$  Pa, 称为兆帕。

金属抗拉强度的主要指标有:

(1) 弹性极限 材料不产生永久变形时所承受的最大应力, 以  $\sigma_e$  表示。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (\text{MPa})$$

式中  $F_e$ ——试件的弹性极限载荷 (N);

$A_0$ ——试件拉伸前的截面积 ( $\text{m}^2$ )。

$\sigma_e$  值大, 表示金属的弹性大。

(2) 屈服点 材料在外力作用下, 开始发生屈服现象的应力叫做屈服点, 以  $\sigma_s$  表示。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (\text{MPa})$$

有些金属材料拉伸时并无明显的屈服现象, 通常以试件产生 0.2% 塑性变形时的应力作为屈服点, 以  $\sigma_{0.2}$  表示 (图 1-3)。

由于大多数构件常因塑性变形过大而失效, 因此, 构件在工作过程中一般不允许产生塑性变形, 即工作应力应低于材料的  $\sigma_s$  或  $\sigma_{0.2}$ 。 $\sigma_s$  或  $\sigma_{0.2}$  是产品设计的主要强度指标, 也是评定金属材料力学性能的重要指标。

(3) 抗拉强度 试件在拉断前所承受的最大拉应力叫抗拉强度, 又叫强度极限, 以  $\sigma_b$  表示。

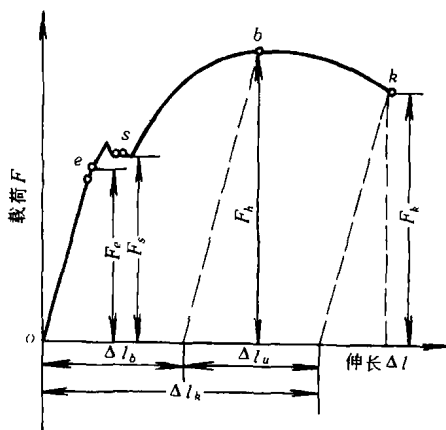


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

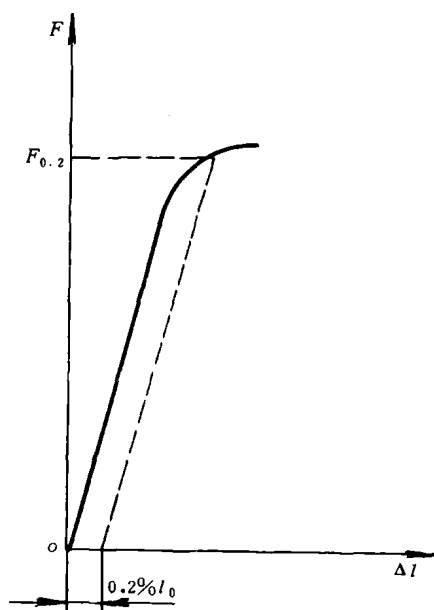


图 1-3  $\sigma_{0.2}$  的示意图

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \text{ (MPa)}$$

$\sigma_b$  值越大, 说明材料抵抗破坏的能力越强。因此,  $\sigma_b$  也是一个重要的强度指标。

2. 塑性 固体材料在外力作用下, 能够产生永久变形而不破坏的能力叫做材料的塑性。它是用开始破坏时的永久变形量来衡量的, 常用的塑性指标是拉断后的伸长率和断面收缩率。

伸长率是试件拉断后, 标距的伸长量与原标距的百分比, 用  $\delta$  表示, 单位 %。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

标距  $l_0 = 10d_0$  时, 伸长率用  $\delta_{10}$  表示;  $l_0 = 5d_0$  时, 伸长率用  $\delta_5$  表示。

断面收缩率是试件拉断后缩颈处横截面积的最大缩减量与原截面的百分比, 用  $\psi$  表示。单位 %。

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中  $A_0$ ——试件拉伸前的横截面积;

$A_1$ ——试件拉断后断裂处的最小面积。

3. 硬度 一般认为, 硬度是表示固体材料局部表面抵抗弹性变形, 特别是塑性变形、压痕或划痕的能力, 是衡量金属软硬的力学指标。

金属的硬度通常以抵抗更硬物体压入表面的能力来衡量。在条件一定时, 压痕越浅, 面积越小, 则金属的硬度越高。

常用的硬度试验方法有:

(1) 布氏硬度试验法 布氏硬度试验是以相应的试验压力  $F$  将直径为  $D$  的硬钢球或硬质合金球压入试件表面, 经规定时间后卸载, 其原理如图 1-4 所示。GB231—84 中规定了布氏硬度试验的程序、压头直径、力的选用及技术条件。

布氏硬度值以球面压痕单位面积上所受平均压力表示, 其数值可按下式计算:

$$HB = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中  $F$ ——试验力 (N);

$D$ ——压头直径 (mm);

$d$ ——压痕直径 (mm)。

HB 值也可根据  $d$  值, 在 GB231—84 中所附的硬度表中直接查出。

按照所用压头材料不同, 布氏硬度又可分为 HBS (钢球) 与 HBW (硬质合金球) 两个系列。HBS 多用于硬度值小于 450 的材料, HBW 多用于小于 650 的材料。

布氏硬度值的表示方法: 如用  $\phi 10\text{mm}$  钢球、试验压力为  $9.807\text{kN}$  ( $1000\text{kgf}$ ), 保持 30s, 测得硬度值为 120 时, 则写作

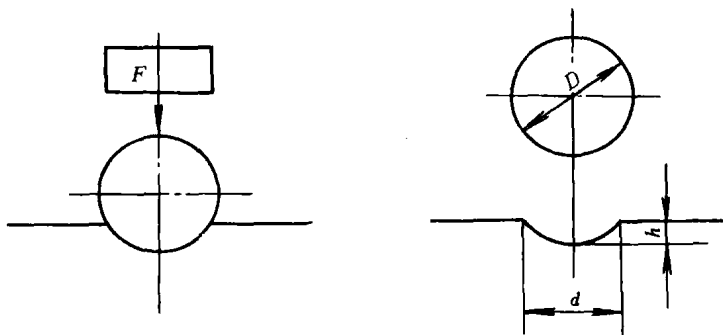


图 1-4 布氏硬度试验原理试验图

120HBS10/1000/30。而 500HBW5/750，则表示用  $\phi 5\text{mm}$  硬质合金球在 7.355kN (750kgf) 试验力下保持 10~15s，测得的硬度值为 500（试验压力保持时间在 10~15s 时不用标注）。

布氏硬度试验方法的优点是测量结果比较准确、稳定、重复性强，且 HB 与金属的  $\sigma_b$  之间存在近似的比例关系。可根据 HB 近似确定金属的抗拉强度。但对于高硬度材料，由于压入时会因钢球变形而影响试验结果的准确性，因而这一方法不适用于 650HBW 以上的材料，此外由于压痕较大，检验成品受到限制。

布氏硬度试验常用于测定铸铁、有色金属、低合金结构钢等原材料的硬度。

(2) 洛氏硬度试验法 洛氏硬度试验法是目前应用最广泛的试验方法，也属于压入式硬度试验，根据压痕深度来确定金属的硬度。

洛氏硬度试验采用锥角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的钢球作压头。试验时分两次加载，在初负荷  $F_0$ 、总负荷  $F = F_0 + F_1$  的分别作用下，将压头压入试样表面，卸除主负荷  $F_1$ ，在  $F_0$  作用下测量压痕残余增量  $e$  值，计算洛氏硬度，其工作原理如图 1-5 所示。 $e$  值越小，材料的硬度越高。

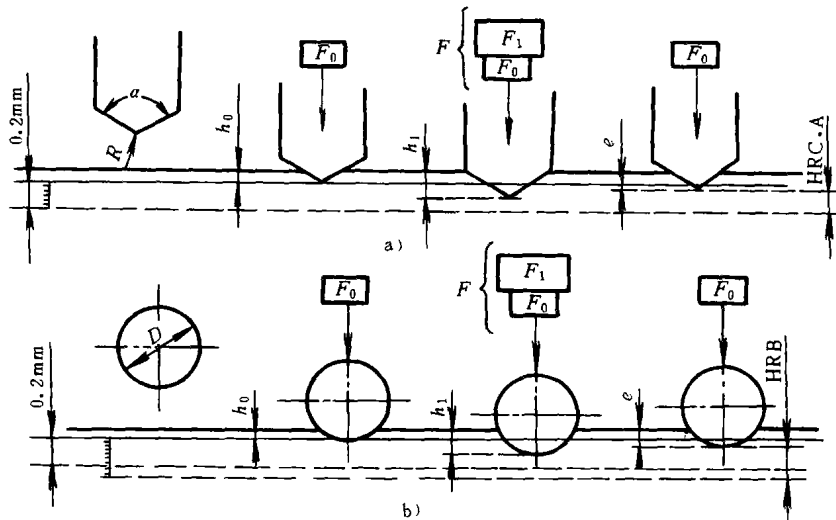


图 1-5 洛氏硬度试验原理示意图

洛氏硬度以 HR 表示。根据压头与所加载荷之不同，洛氏硬度经常用的是 HRA、HRB、HRC 三种。每种所用之压头材料、载荷与其适用范围见表 1-1。洛氏试验结果可直接由试验机表盘上读出，表盘上则有 A、B、C 三个标尺。

表 1-1 洛氏硬度的压头、负荷与适用范围

| 符 号 |     | 压 头               | 负 荷 (N) |       | 适 用 范 围                   |
|-----|-----|-------------------|---------|-------|---------------------------|
| 标尺  | 硬度值 |                   | $F_0$   | $F_1$ |                           |
| B   | HRB | $\phi 1.588$ 钢球压头 | 98.1    | 882.6 | 25~100HRB 的软金属，如铜合金、中低碳钢等 |
| C   | HRC | $120^\circ$ 金刚石圆锥 | 98.1    | 1373  | 20~67HRC 的硬金属，如淬火、回火处理的钢  |
| A   | HRA | $120^\circ$ 金刚石圆锥 | 98.1    | 490.3 | 60~85HRA 很硬及硬而薄的金属        |

洛氏硬度的优点，是测定迅速，可直接从表盘上读到结果，并可测定高硬度材料。洛氏硬度试验的压痕小，因此适用于测定成品或较薄材料的硬度。但压痕小也使测量结果不够准确，一般需要在被测材料的不同部位测定数次，再取平均值。

有关洛氏硬度试验的程序及技术条件见 GB230—83。

(3) 维氏硬度 布氏硬度只适用于测定硬度值在 650HBW 以下的金属材料。洛氏硬度测定材料的硬度范围虽无限制，但不同材料所用的压头与总载荷不同，各个结果之间不存在直接的换算关系。为了使从软到硬的各种金属有一个连续一致的硬度指标，研制了维氏硬度试验法。

维氏硬度试验的原理与布氏硬度基本相同，也是根据压痕在单位面积上的载荷来计算硬度值。试验时用正四棱锥体的金刚石作为压头，在试验力  $F$  的作用下将压头压入试件表面，经规定时间后卸载，测量正方锥形压痕的对角线长度，算出压痕的表面积  $A$ ，则  $F/A$  即为维氏硬度值，以 HV 表示。其工作过程如图 1-6 所示。

压痕面积  $A$  与对角线  $d$  之间的关系为：

$$A = d^2 / 2 \sin \frac{\alpha}{2}$$

试验用压头两相对平面的夹角  $\alpha$  为  $136^\circ$ ，因此， $A = d^2 / 2 \sin 68^\circ = d^2 / 1.8544$

$$\text{则 } HV = F/A = 1.8554 F/d^2$$

式中  $d$ ——两对角线的算术平均值 (mm)；

$F$ ——试验压力 (kgf)。

如  $F$  的单位取 N，则

$$HV = 0.1891 F/d^2$$

HV 值也可通过查表确定。

试验用载荷  $F$  可在 0.5~120kgf 范围内，根据试件大小、厚度及其它条件确定，常用的载荷有 0.5、1、5、10、30kgf 几个档次。

维氏硬度的表示方法：如 640HV30，表示用 30kgf (294.2N) 试验力保持 10~15s，测定维氏硬度值为 640；580HV30/20，表示用 30kgf 试验力保持 20s 测定维氏硬度值为 580。

维氏硬度试验的优点较多，它既不存在布氏硬度试验时载荷与压头直径间比例关系的约束，也不存在压头变形的问题，而且由于压痕轮廓清晰，计量结果精确可靠。维氏硬度试验也不存在洛氏硬度各级无法统一换算的问题。其缺点则是测量对角线后，必须通过换算或查表才能得到结果，故效率比洛氏硬度试验低，不宜用于成批生产中的常规检验。

维氏硬度的应用范围为 5~1000HV。GB4340—84 中规定了维氏硬度试验的程序及技术条件。

上述三种试验均属静压入法。此外还有动载压入法和刻痕法，但应用不普遍。

(4) 硬度与强度的换算 硬度试验是力学性能试验中最为简单易行的。为使硬度试验能

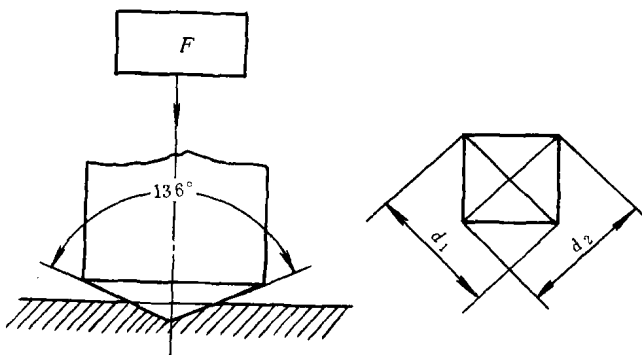


图 1-6 维氏硬度试验原理示意图

取代一些其它试验，需要建立一个较准确的硬度与强度之间的关系。

实验证明，一种金属的各种硬度值之间、硬度与强度之间都存在固定的对应关系。总的规律是金属的硬度值越高，强度也越高。目前，在实验的基础上，建立了常用金属材料的硬度与强度换算关系，并将换算值制表编制了相应的国家标准。

4. 韧性 是指金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力，用试件在冲击力作用下折断时所吸收的功来衡量。

测定金属材料韧性最常用的方法是冲击试验。试验时，将规定尺寸带缺口的试件放在冲击试验机机座上，试件缺口背向摆锤冲击方向，随后将试验机上重量为  $m$  的摆锤自高度  $H_1$  自由落下。冲断试件后，摆锤上升高度为  $H_2$  (图 1-7)。

冲击试件断裂所消耗的功  $A_K$  为

$$A_K = m (H_1 - H_2)$$

$A_K$  称为被测金属材料的冲击吸收功。试件缺口底部单位横截面积的吸收功叫做该材料的冲击韧度，用  $a_K$  表示，则

$$a_K = \frac{A_K}{A} \quad (\text{J}/\text{cm}^2)$$

$A_K$  和  $a_K$  值越大，表明材料的韧性越高，即抵抗冲击的能力越强。

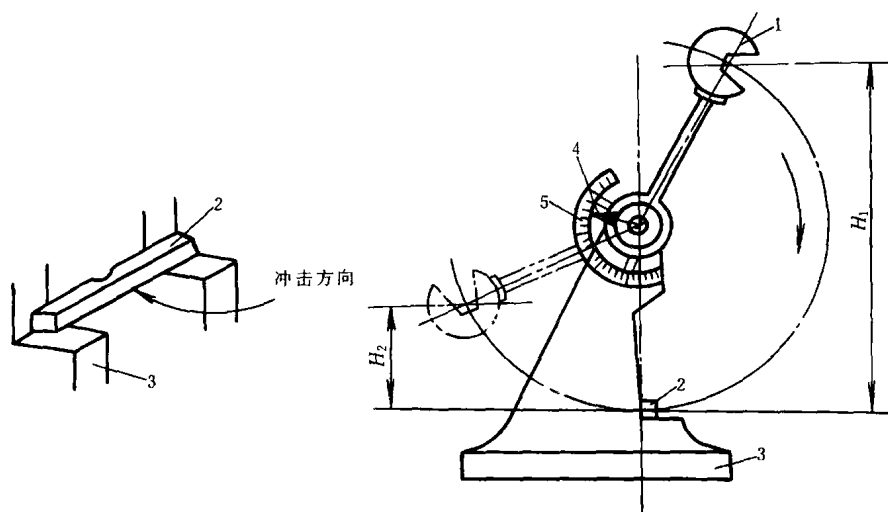


图 1-7 冲击试验原理图

1—摆锤 2—试件 3—支座 4—指针 5—刻度盘

根据试件缺口形状之不同，冲击试件分为 U 型缺口与 V 型缺口试件 (图 1-8)。

两种试件的尺寸、试验程序及技术条件分别规定于 GB229—84 和 GB2106—80 中。不同缺口的试件其试验结果不同。为加以区别两种缺口试件下的冲击吸收功和冲击韧度，分别以  $A_{KU}$ 、 $a_{KU}$  和  $A_{KV}$ 、 $a_{KV}$  表示。

U 型缺口冲击试验仅用于测定材料的常温冲击韧度；V 型缺口冲击试验可用于常温、高温、低温冲击试验，不同温度的试验有各自的国家标准。

最后需要说明的是，各种力学性能试验的结果还与被测材料的制造工艺（如铸件或锻件