

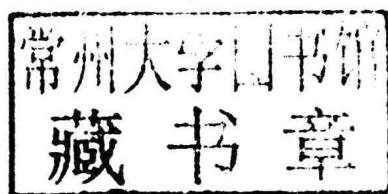


# 熔焊基础与金属材料焊接

丛树毅 陈美婷◎主编

# 熔焊基础与金属材料焊接

主 编 丛树毅 陈美婷



## 内容提要

本书根据劳动和社会保障部培训就业司最新颁发的教学大纲,并结合教学实践和焊接技术的发展状况编写而成。本书的内容编排结合岗位技术特点,贴近生产实际。在尊重教学规律的前提下,注重对部分专业知识的重新整合和对学生创新精神和实践能力的培养。全书在保证理论体系清晰、完整的前提下,力争做到实用为先、够用为度、宽基础、厚专业。全书共十章,主要内容为:金属学及热处理基础、焊接冶金基础、焊接材料、金属焊接性及其试验方法、碳钢的焊接、低合金高强钢的焊接、低合金特殊用钢的焊接、不锈钢的焊接、铸铁的焊接、常用有色金属的焊接等。本书注重工程实际,通过学习,使学生能对金属熔焊原理及常用金属材料的焊接性有充分认识,并能根据材料焊接性,结合工程实际,制定材料的焊接工艺参数。本书可供焊接专业、热加工工种的师生使用,也可作为岗位培训教材和相关工程技术人员的参考资料。

版权专有 侵权必究

### 图书在版编目(CIP)数据

熔焊基础与金属材料焊接 / 丛树毅, 陈美婷主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-5682-1943-3

I. ①熔… II. ①丛… ②陈… III. ①熔焊 ②金属材料—焊接 IV. ①TG442 ②TG457.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 042656 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)  
82562903 (教材售后服务热线)  
68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京通县华龙印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 18.75

字 数 / 400 千字

版 次 / 2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 / 62.00 元

责任校对 / 张沁萍

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# PREFACE // 前言

本套教材根据劳动和社会保障部培训就业司最新颁发的教学大纲,结合职业技能鉴定需求和焊接专业特点编写而成。全套教材包括《熔焊方法与工艺》《焊接电工电子技术》《焊接工程制图与 CAD》《焊接结构与制造》《焊接检测技术》《熔焊基础与金属材料焊接》《工程材料与热加工基础》《机械工程基础(焊接专业)》《焊接安全与卫生》《金工实习(焊接专业)》《材料连接与切割技术》《电弧焊工艺》《钳工与冷作工艺》《钣金连接技术》等。

在教材的编写过程中,我们始终坚持了以下几个原则。

(1) 坚持中高级技能人才的培养方向,从职业(岗位)需求分析入手,强调实用性,使学生掌握一定理论知识,培养学生分析问题、解决问题的能力。并引导学生理论联系实际,提高学生操作技能水平。

(2) 紧密结合教育教学实际情况,化繁为简,化难为易,全书以国家职业资格标准为依据,力求使教材内容在覆盖职业技能鉴定的各项要求的基础上拓展外延,以满足不同层次的各级各类学校和工矿企业的需求。

(3) 突出教材的时代感,力求较多地引进新知识、新技术、新工艺、新方法、新材料等方面的内容,较全面地反映焊接技术发展趋势。

(4) 打破传统的教材编写模式,树立以学生为主体的教学理念,强调培养学生自主学习能力。

本套教材是基于编者多年的教学实践积淀而成。编写时,取材力求少而精,突出实用性,内容紧密结合焊接工程实践。本套教程可供焊接专业、热加工工种师生使用,也可作为岗位培训教材和相关工程技术人员的参考资料。

编者

# 目 录

## Contents

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 绪 论 .....               | 1   |
| 第 1 章 金属学及热处理基础 .....   | 3   |
| 1.1 金属材料的性能 .....       | 3   |
| 1.2 金属的晶体结构 .....       | 12  |
| 1.3 金属与晶体的结晶 .....      | 17  |
| 1.4 铁碳合金相图 .....        | 23  |
| 1.5 钢的热处理 .....         | 29  |
| 第 2 章 焊接冶金基础 .....      | 46  |
| 2.1 焊接热过程 .....         | 46  |
| 2.2 焊缝成型 .....          | 55  |
| 2.3 焊接化学冶金 .....        | 68  |
| 2.4 焊接缺陷 .....          | 90  |
| 第 3 章 焊接材料 .....        | 106 |
| 3.1 焊条 .....            | 106 |
| 3.2 焊丝 .....            | 121 |
| 3.3 焊剂 .....            | 126 |
| 3.4 焊接用气体 .....         | 137 |
| 3.5 其他焊接材料 .....        | 143 |
| 第 4 章 金属的焊接性及其评定 .....  | 149 |
| 4.1 金属焊接性基础知识 .....     | 149 |
| 4.2 金属材料焊接性的分析与试验 ..... | 151 |
| 第 5 章 非合金钢（碳钢）焊接 .....  | 161 |
| 5.1 碳钢的焊接性 .....        | 161 |

|             |                   |     |
|-------------|-------------------|-----|
| 5.2         | 碳钢的焊接             | 164 |
| <b>第6章</b>  | <b>低合金高强钢焊接</b>   | 171 |
| 6.1         | 热轧及正火钢的焊接         | 171 |
| 6.2         | 低碳调质钢的焊接          | 177 |
| 6.3         | 中碳调质钢的焊接          | 181 |
| <b>第7章</b>  | <b>低合金特殊用钢的焊接</b> | 186 |
| 7.1         | 低温用钢的焊接           | 186 |
| 7.2         | 珠光体耐热钢的焊接         | 193 |
| 7.3         | 低合金耐蚀钢的焊接         | 198 |
| <b>第8章</b>  | <b>不锈钢的焊接</b>     | 201 |
| 8.1         | 奥氏体不锈钢的焊接         | 201 |
| 8.2         | 铁素体不锈钢的焊接         | 213 |
| 8.3         | 马氏体不锈钢的焊接         | 216 |
| 8.4         | 双相不锈钢的焊接          | 218 |
| <b>第9章</b>  | <b>铸铁的焊接</b>      | 223 |
| 9.1         | 灰铸铁的焊接            | 223 |
| 9.2         | 球墨铸铁的焊接           | 234 |
| <b>第10章</b> | <b>常用有色金属焊接</b>   | 239 |
| 10.1        | 铝及铝合金的焊接          | 239 |
| 10.2        | 铜及铜合金的焊接          | 253 |
| 10.3        | 钛及钛合金的焊接          | 276 |

# 绪 论

在各种金属加工工艺方法中,焊接属于连接加工,焊接工艺虽然发展历史不长,但近年来发展十分迅速,迄今为止,焊接已发展为一门独立的学科,在能源、交通、建筑,特别是在机器制造部门中,已成为不可缺少的工艺方法,并发挥着越来越大的作用。

焊接的目的是将两个或两个以上的物体(焊件)连接为永久结合的整体。在 GB/T 3375—1994《焊接术语》中,焊接的定义为:“焊接是通过加热或加压,或两者并用,并且用或不用填充材料,使工件达到结合的一种方法”。根据上述定义可知,焊接时必须加热或加压(或两者并用)。按照加热的程度以及是否加压,可将焊接划分为熔焊、压焊与钎焊三大类。焊接时,将待焊处的母材金属熔化以形成焊缝的焊接方法叫做熔焊;焊接过程中,必须对焊件施加压力(加热或不加热)以完成焊接的方法叫做压焊;采用熔点比母材熔点低的金属材料作钎料,将焊件与钎料加热到高于钎料熔点,低于母材熔化温度,利用液体钎料润湿母材,填充接头间隙,并与母材相互扩散实现连接的焊接方法叫做钎焊。

从焊接的定义可知,为使工件达到结合,焊接时需要外部能量,而且从焊接接头的外观上可明显看出,焊接的结合有别于螺栓联接、键联接、铆接等,是不可拆卸的,因此,可以认为需要外加能量与结合的不可拆卸(即永久性)是焊接在宏观上的特点。在微观上,焊接的特点则是在焊件之间达成原子间的结合。也就是说,原来分开的工件,经过焊接后在微观上形成了一个整体。对金属来说,就是在两焊件之间建立了金属键。

熔化焊是焊接方法中应用最广的方法之一。对大型、高参数(高温、高压下运行)设备,如在大吨位船舶、舰艇、发电设备、核能装置、化工机械的制造中,几乎全部采用熔焊。生产中常用焊条电弧焊、埋弧焊、气焊、 $\text{CO}_2$ 气体保护焊、氩弧焊、电渣焊、等离子弧焊、激光焊等都属于熔焊。

金属的熔焊,一般都要经历加热—冶金反应—结晶—固态相变—形成接头等几个过程。上述过程可归纳为以下三个互相交错进行且彼此联系的局部过程。

①焊接热过程。熔焊时,被焊金属在热源作用下将发生加热和局部熔化过程。因

此,在被焊金属中必然存在着热量的传播和分布问题,通常称之为焊接热过程。

②焊接化学冶金过程。熔焊时,在熔化金属、熔渣、气相之间进行着一系列的化学冶金反应,如金属的氧化、还原、脱硫等,这些冶金反应将直接影响焊缝金属的化学成分、组织和性能,因此控制冶金过程是提高焊接质量的重要措施之一。

③焊接时金属的结晶和相变过程。由于焊接条件是快速连续冷却,使焊缝金属的结晶和相变具有各自的特点,并且有可能在这些过程中产生诸如偏析、夹杂、气孔等缺陷。因此控制和调整焊缝金属的结晶和相变过程是保证焊接质量的又一关键。

与螺栓联接、键联接、铆接、粘结等其他连接方法相比,熔焊具有以下优点。

①节约材料。焊接接头在连接部位没有重叠部分,也不需要附加的连接件(如铆钉),从而减少了材料的消耗,降低了结构自重及生产成本。

②工艺过程比较简单。焊件不需开孔加工,也不需制造连接附件,同时焊接本身生产率高,大大缩短了制造周期。

③质量高。熔焊的结合部位(焊接接头)不仅可以获得与母材相同的力学性能,而且其他使用性能(耐热性,耐蚀能力等)也都能够与母材相匹配。特别是不需采用特殊措施即可获得优良的密封性,使其成为在压力容器与船舶制造中唯一的连接方法。

④可充分发挥设备和材料的潜力。焊接可以将较大的产品分段翻造,不仅能制造由不同材料连接而成的双金属结构,还可将不同方法制造的毛坯连成铸—焊、铸—锻—焊复合结构。这样,既可充分利用不同材料的特性,又可用较小的设备制造出尺寸较大的产品。

⑤劳动条件好,劳动强度低,噪声小。

另外,需要指出的是,熔焊过程的高温加热,会使某些金属材料的性能降低,甚至影响产品的安全运行。因此,目前还不能说熔焊技术可适用于任何一种金属材料。但可确信,随着焊接技术的发展,熔焊的应用范围会进一步扩大。

# 第1章

## 金属学及热处理基础

### 1.1 金属材料的性能

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中应具备的性能，它包括力学性能（强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等）、物理性能（密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性等）和化学性能（耐蚀性、抗氧化性等）。工艺性能是金属材料从冶炼到成品的生产过程中，适应各种加工工艺（如冶炼、铸造、冷热压力加工、焊接、切削加工、热处理等）应具备的性能。

#### 1.1.1 金属的力学性能

通常机器零件或工程结构在工作中都要受到外力的作用，金属在外力的作用下所表现的性能叫做力学性能。

按外力（载荷）作用性质的不同，可分为静载荷、冲击载荷和交变载荷。在不同性质的载荷作用下，金属所表现的特性与抵抗破坏的能力不同，因而需要用不同的力学性能指标。

常用的力学性能指标有强度、硬度、塑性和冲击韧性等。这些性能是机械设计、材料选择、工艺评定及材料检验的主要依据。

##### 1. 强度与塑性

强度是指金属材料在载荷作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力。由于作用力的性质不同，其判据可分为屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等，在生产中，最常用、最基本的是屈服强度和抗拉强度。金属材料的强度与塑性一般可以通过金属的拉伸试验来测定。

##### （1）拉伸试验

①拉伸试样。拉伸试样的形状通常有圆柱形和板状两类。为便于对不同材料的强度进行对比，拉伸试验所用试件的形状与尺寸应符合 GB/T 397—1986《金属拉伸试验

试样》的规定。图 1-1 (a) 所示为圆柱形拉伸试样。在圆柱形拉伸试样中  $d_0$  为试样直径,  $l_0$  为试样的标距长度, 根据标距长度和直径之间的关系, 试样可分为长试样 ( $l_0 = 10d_0$ ) 和短试样 ( $l_0 = 5d_0$ )。

②拉伸曲线。试验时, 将试样两端夹装在试验机的上下夹头上, 随后缓慢地增加载荷, 随着载荷的增加, 试样因逐步变形而伸长, 直到被拉断为止。在试验过程中, 试验机自动记录了每一瞬间负荷  $F$  和变形量  $\Delta l$ , 并给出了它们之间的关系曲线, 称为拉伸曲线 (或拉伸图)。拉伸曲线反映了材料在拉伸过程中的弹性变形、塑性变形和直到拉断时的力学特性。

图 1-1 (b) 为低碳钢的拉伸曲线。由图可见, 低碳钢试样在拉伸过程中, 可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

当载荷不超过  $F_p$  时, 拉伸曲线  $Op$  为一直线, 即试样的伸长量与载荷成正比例增加, 如果卸除载荷, 试样立即恢复到原来的尺寸, 即试样处于弹性变形阶段。载荷在  $F_p - F_e$  间, 试样的伸长量与载荷已不再成正比关系, 但若卸除载荷, 试样仍然恢复到原来的尺寸, 故仍处于弹性变形阶段。

当载荷超过  $F_e$  后, 试样将进一步伸长, 但此时若卸除载荷, 弹性变形消失, 而有一部分变形却不能消失, 即试样不能恢复到原来的长度, 称为塑性变形或永久变形。

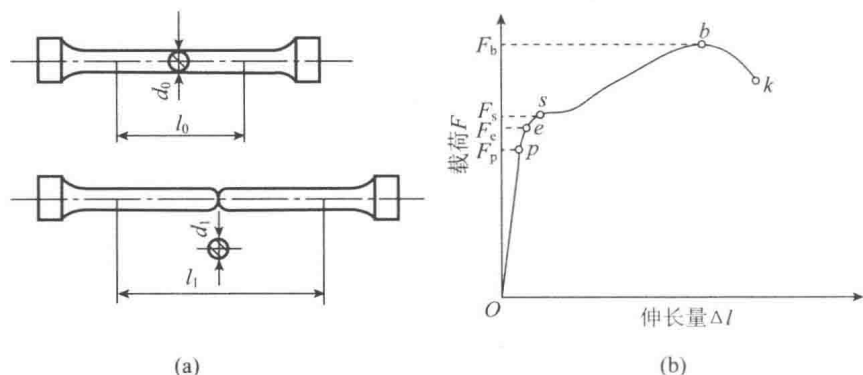


图 1-1 拉伸试样与拉伸曲线

(a) 拉伸试样; (b) 拉伸曲线

当载荷增加到  $F_s$  时, 试样开始明显的塑性变形, 在拉伸曲线上出现了水平的或锯齿形的线段, 这种现象称为屈服。

当载荷继续增加到某一最大值  $F_b$  时, 试样的局部截面缩小, 产生了颈缩现象。由于试样局部截面的逐渐减少, 故载荷也逐渐降低, 当达到拉伸曲线上的  $k$  点时, 试样就被拉断。

## (2) 强度

材料受外力作用时, 其内部产生了与外力大小相等方向相反的抵抗力, 即内力。单位面积上的内力称为应力, 用符号  $\sigma$  表示, 即

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

式中  $F$ ——拉伸力 (N);

$A_0$ ——试样原始截面积 ( $\text{m}^2$ )。

根据拉伸曲线可以求出材料的强度指标, 其强度指标主要有以下三项。

①弹性极限。金属材料在载荷作用下产生弹性变形 (即不产生永久变形) 时所能承受的最大应力称为弹性极限, 用符号  $\sigma_e$  表示:

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0}$$

式中  $F_e$ ——试样产生弹性变形时所承受的最大载荷;

$A_0$ ——试样原始横截面积。

$\sigma_e$  值越大, 表示材料的弹性越大。

②屈服强度 (又称屈服点)。金属材料开始明显塑性变形 (即在外力不增加仍能继续伸长) 时的最低应力称为屈服强度, 用符号  $\sigma_s$  表示:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中  $F_s$ ——试样屈服时的载荷;

$A_0$ ——试样原始横截面积。

生产中使用的某些金属材料, 在拉伸试验中不出现明显的屈服现象, 无法确定其屈服强度  $\sigma_s$ 。所以国标中规定, 以试样塑性变形量为试样标距长度的 0.2% 时, 材料承受的应力称为“条件屈服强度”, 并以符号  $\sigma_{0.2}$  表示。 $\sigma_{0.2}$  的确定方法如图 1-2 所示。在拉伸曲线横坐标上截取  $c$  点, 使  $Oc = 0.2\% l_0$ , 过  $c$  点作  $Op$  斜线的平行线, 交曲线于  $s$  点, 则可找出相应的载荷  $F_{0.2}$ , 从而计算出  $\sigma_{0.2}$ 。

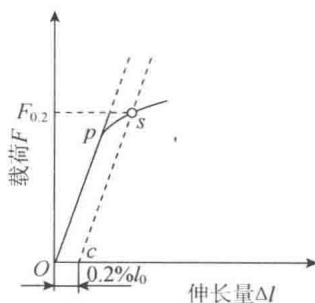


图 1-2 屈服强度测定

③抗拉强度 (又称强度极限)。金属材料在断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度, 用符号  $\sigma_b$  表示:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中  $F_b$ ——试样在断裂前的最大载荷;

$A_0$ ——试样原始横截面积。

$\sigma_s$  与  $\sigma_b$  都是金属材料的主要力学性能指标, 是设计及选材的重要依据。对于塑性材料, 考虑到主要因塑性变形过大而失效, 因此  $\sigma_s$  (或  $\sigma_{0.2}$ ) 是产品设计的强度指标, 脆性材料没有屈服现象, 则用  $\sigma_b$  作为强度指标。

$\sigma_s/\sigma_b$  称为屈强比。屈强比小, 表明材料的塑性储备高, 万一超载也不会立即破坏, 可靠性大; 但屈强比过低, 使材料的利用率降低。因此, 对不同钢种的屈强比有不同的要求。如低碳钢为 0.5 ~ 0.6, 低合金结构钢为 0.65 ~ 0.75, 合金结

构钢为 0.7 ~ 0.8。

当材料受到压应力或弯曲应力时，其抵抗破坏的能力分别称为抗压强度或抗弯强度，单位与抗拉强度相同。

### (3) 塑性

金属材料在载荷作用下，产生塑性变形而不破坏的能力称为塑性，即金属在外力作用下，断裂前发生不可逆永久变形的能力。常用的塑性指标有伸长率 ( $\delta$ ) 和断面收缩率 ( $\psi$ )。

①伸长率。试样拉断后，标距长度的增加量与原标距长度的百分比称为伸长率，用  $\delta$  表示：

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

式中  $l_0$ ——试样原标距长度 (mm)；  
 $l_1$ ——试样拉断后标距长度 (mm)。

材料的伸长率随标距长度增加而减少。所以，同一材料短试样的伸长率  $\delta_5$  大于长试样的伸长率  $\delta_{10}$ 。

②断面收缩率。试样拉断后，标距横截面积的缩减量与原横截面积的百分比称为断面收缩率，用  $\psi$  表示：

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

式中  $A_0$ ——试样原横截面积 (mm)；  
 $A_1$ ——试样拉断后最小横截面积 (mm)。

$\delta$ 、 $\psi$  是衡量材料塑性变形能力大小的指标， $\delta$ 、 $\psi$  大，表示材料塑性好，既保证压力加工的顺利进行，又保证机件工作时的安全可靠。

金属材料的塑性好坏，对零件的加工和使用都具有重要的实际意义。塑性好的材料不仅能顺利地进行锻压、轧制等成型工艺，而且在使用时万一超载，由于塑性变形，能避免突然断裂。

## 2. 硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。它是指金属表面抵抗局部变形或破坏，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力，是检验毛坯或成品件、热处理件的重要性能指标。此外，硬度又是反映材料的成分、组织与力学性能的综合指标。

一般来说，金属的硬度越高，则刚强度越高，而塑性和韧性越低。因此，硬度虽然不是零件设计计算的依据，但是对工作条件不同的零件，为保证其使用寿命，也会提出不同的硬度要求。由于硬度试验设备简单，操作方便、快捷，并可直接在零件或工具上进行测试而不破坏试件，故应用最广泛。

测定硬度的方法很多，在生产中应用最多的是压入硬度测试法中的布氏硬度法、洛氏硬度法和维氏硬度法。

## (1) 布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 1-3 所示。它是用一定直径的钢球或硬质合金球，以相应的实验力压入试样表面，经规定的保持时间后，卸除试验力，用读数显微镜测量试样表面的压痕直径。布氏硬度值 HBS 或 HBW 是试验力  $F$  除以压痕球形表面积所得的商，即：

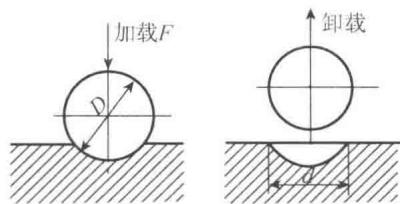


图 1-3 布氏硬度实验原理图

$$HBS (HBW) = F/A = 0.102 \times 2F / \pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

式中  $F$ ——压入载荷 (N)；

$A$ ——压痕表面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$d$ ——压痕直径 (mm)；

$D$ ——淬火钢球 (或硬质合金球) 直径 (mm)。

布氏硬度值的单位为 MPa，一般情况下可不标出。

压头为淬火钢球时，布氏硬度用符号 HBS 表示，适用于布氏硬度值在 450 以下的材料；压头为硬质合金球时，用 HBW 表示，适用于布氏硬度值在 650 以下的材料。符号 HBS 或 HBW 之前为硬度值，符号后面按以下顺序用数值表示试验条件：球体直径、试验力、试验力保持时间 (10 ~ 15 s 不标注)。

例如：125HBS10/1000/30 表示用直径 10 mm 淬火钢球在  $1\,000 \times 9.8$  N 试验力作用下保持 30 s 测得的布氏硬度值为 125；500HBW5/750 表示用直径 5 mm 硬质合金球在  $750 \times 9.8$  N 试验力作用下保持 10 ~ 15 s 测得的布氏硬度值为 500。

布氏硬度试验的优点是：测出的硬度值准确可靠，因压痕面积大，能消除因组织不均匀引起的测量误差；布氏硬度值与抗拉强度之间有近似的正比关系： $\sigma_b = K \cdot HBS$  (或 HBW) (低碳钢  $K=0.36$ ，合金调质钢  $K=0.325$ ；灰铸铁  $K=0.1$ )。

布氏硬度试验的缺点是：当用淬火钢球时不能用来测量大于 450 HBS 的材料；用硬质合金球时，亦不宜超过 650 HBW；压痕大，不适宜测量成品件硬度，也不宜测量薄件硬度；测量速度慢，测得压痕直径后还需计算或查表。

## (2) 洛氏硬度

以顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或一定直径的淬火钢球作压头，以规定的试验力使其压入试样表面，根据压痕的深度确定被测金属的硬度值，如图 1-4 所示。当载荷和压头一定时，所测得的压痕深度  $h$  ( $h_3 - h_1$ ) 愈大，表示材料硬度愈低，一般来说人们习惯数值越大硬度越高。为此，用一个常数  $K$  (对 HRC,  $K$  为 0.2；对 HRB,  $K$  为 0.26) 减去  $h$ ，并规定每 0.002 mm 深为一个硬度单位，因此，洛氏硬度计算公式是：

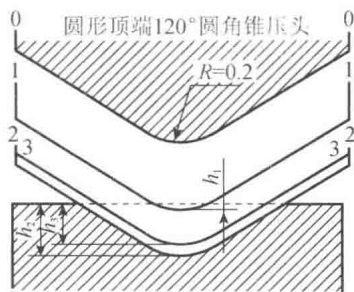


图 1-4 洛氏硬度实验原理图

$$HRC (HRA) = 0.2 - h = 100 - h/0.002$$

$$HRB = 0.26 - h = 130 - h/0.002$$

根据所加的载荷和压头不同,洛氏硬度值有三种标度:HRA、HRB、HRC,常用HRC,其有效值范围是20~67 HRC。

洛氏硬度符号HR前面的数字为硬度值,后面的字母表示级数。如60 HRC表示C标尺测定的洛氏硬度值为60。

洛氏硬度试验操作简便、迅速,效率高,可以测定软、硬金属的硬度;压痕小,可用于成品检验。但压痕小,测量组织不均匀的金属硬度时,重复性差,而且不同的硬度级别测得的硬度值无法比较。

### (3) 维氏硬度

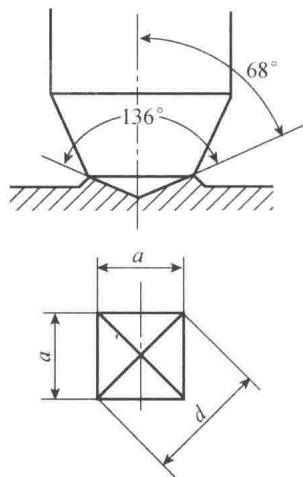


图 1-5 维氏硬度实验原理图

维氏硬度试验原理与布氏硬度相同,同样是根据压痕单位面积上所受的平均载荷计量硬度值,不同的是维氏硬度的压头采用金刚石制成的锥面夹角 $\alpha$ 为 $136^\circ$ 的正四棱锥体,如图1-5所示。

试验时,根据试样大小、厚薄选用 $(5 \sim 120) \times 9.8$  N载荷压入试样表面,保持一定时间后去除载荷,用附在试验机上测微计测量压痕对角线长度 $d$ ,然后通过查表或根据下式计算维氏硬度值:

$$HV = \frac{F}{A} = (1.8544 \times 0.102 \times \frac{F}{d^2}) \text{ MPa}$$

式中  $A$ ——压痕的面积(mm<sup>2</sup>);

$d$ ——压痕对角线的长度(mm);

$F$ ——试验载荷(N)。

维氏硬度符号HV前是硬度值,符号HV后附以试验载荷及保持时间。如640HV30/20表示在 $30 \times 9.8$  N作用下保持20 s后测得的维氏硬度值为640。

维氏硬度的优点是试验时加载小,压痕深度浅,可测量零件表面淬硬层,测量对角线长度 $d$ 误差小,其缺点是生产率比洛氏硬度试验低,不宜于成批生产检验。

### 3. 冲击韧性

生产中许多机器零件,都是在冲击载荷(载荷以很快的速度作用于机件)下工作。试验表明,载荷速度增加,材料的塑性、韧性下降,脆性增加,易发生突然性破断。因此,使用的材料就不能用静载荷下的性能来衡量,而必须用抵抗冲击载荷的作用而不破坏的能力,即冲击韧性来衡量。

目前应用最普遍的是一次摆锤弯曲冲击试验。将标准试样放在冲击试验机的两支座上,使试样缺口背向摆锤冲击方向(图1-6所示),然后把质量为 $m$ 的摆锤提升到 $h_1$ 高度,摆锤由此高度下落时将试样冲断,并升到 $h_2$ 高度。因此冲断试样所消耗的功为 $A_k = mg(h_1 - h_2)$ 。金属的冲击韧性 $a_k$ 就是冲断试样时在缺口处单位面积所消耗的功:

$$a_k = \frac{A_k}{A}$$

式中  $a_k$ ——冲击韧性 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ );  
 $A$ ——试样缺口处原始截面积 ( $\text{cm}^2$ );  
 $A_k$ ——冲断试样所消耗的功 ( $\text{J}$ )。

冲击吸收功  $A_k$  值可从试验机的刻度盘上直接读出。 $A_k$  值的大小, 代表了材料的冲击韧性的高低。材料的冲击韧性值除了取决于材料本身之外, 还与环境温度及缺口的状况密切相关。所以, 冲击韧性除了用来表征材料的韧性大小外, 还用来测量金属材料随环境温度下降由塑性状态变为脆性状态的冷脆转变温度, 也用来考查材料对于缺口的敏感性。

#### 4. 疲劳强度

许多机械零件是在交变应力作用下工作的, 如轴类、弹簧、齿轮、滚动轴承等。虽然零件所承受的交变应力数值小于材料的屈服强度, 但在长时间运转后也会发生断裂, 这种现象叫疲劳断裂。它与静载荷下的断裂不同, 断裂前无明显塑性变形, 因此具有更大的危险性。

交变应力大小和断裂循环周次之间的关系通常用疲劳曲线来描述 (图 1-7 所示)。疲劳曲线表明, 当应力低于某一值时, 即使循环次数无穷多也不发生断裂, 此应力值称为疲劳强度或疲劳极限。光滑试样的对称弯曲疲劳极限用  $\sigma_{-1}$  表示。在疲劳强度的测定中, 不可能把循环次数做到无穷大, 而是规定一定的循环次数作为基数, 超过这个基数就认为不再发生疲劳破坏。常用钢材的循环基数为  $10^7$ , 有色金属和某些超高强度钢的循环基数为  $10^8$ 。

疲劳破断常发生金属材料最薄弱的部位, 如热处理产生的氧化、脱碳、过热、裂纹。钢中的非金属夹杂物、试样表面有气孔、划痕等缺陷均会产生应力集中, 使疲劳强度下降。为了提高疲劳强度加工时要降低零件的表面粗糙度和进行表面强化处理, 如表面淬火、渗碳、氮化、喷丸等, 使零件表层产生残余的压应力, 以抵消零件工作时的一部分拉应力, 从而使零件的疲劳强度提高。

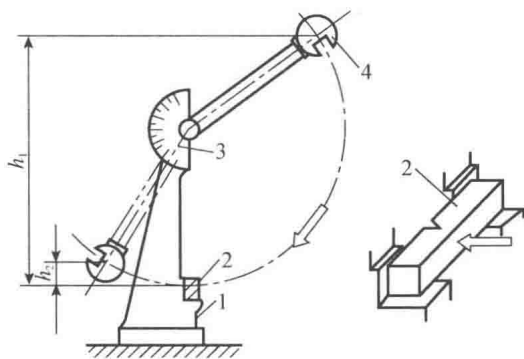


图 1-6 冲击试验原理  
 1—支座; 2—试样; 3—指针; 4—摆锤

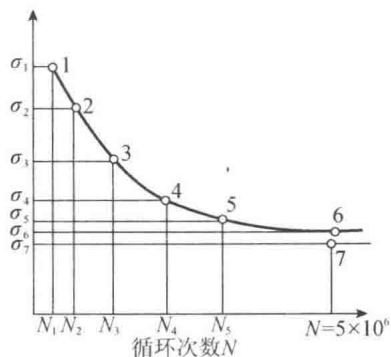


图 1-7 钢的疲劳曲线

#### 1.1.2 金属物理性能

金属物理性能是指金属在重力、电磁场、热力 (温度) 等物理因素作用下, 所表现出的性能或固有的属性。它包括密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等。

### 1. 密度

金属的密度是指单位体积金属的质量。密度是金属材料的特性之一。不同金属材料的密度是不同的。在体积相同的情况下,金属材料的密度越大,其质量(重量)也就越大。金属材料的密度,直接关系到由它所制造设备的自重和效能,如发动机要求质量轻和惯性小的活塞,常采用密度小的铝合金制造。在航空工业领域中,密度更是选材的关键性能指标之一。一般将密度小于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为轻金属,密度大于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为重金属。

### 2. 熔点

金属和合金从固态向液态转变时的温度称为熔点。纯金属都有固定的熔点。合金的熔点决定于它的化学成分,如钢和生铁虽然都是铁和碳的合金,但由于其碳的质量分数不同,其熔点也不同。熔点对于金属和合金的冶炼、铸造、焊接是重要的工艺参数。熔点高的金属称为难熔金属(如钨、钼、钒等),可以用来制造耐高温零件,它们在火箭、导弹、燃气轮机和喷气飞机等方面得到广泛应用。熔点低的金属称为易熔金属(如锡、铅等),可以用来制造印刷铅字(铅与锑的合金)、熔丝(铅、锡、铋、镉的合金)和防火安全阀等零件。

### 3. 导热性

金属传导热量的能力称为导热性。金属导热能力的大小常用热导率(亦称导热系数) $\lambda$ 表示。金属材料的热导率越大,说明其导热性越好。一般说来,金属越纯,其导热能力越大。合金的导热能力比纯金属差。金属的导热能力以银为最好,铜、铝次之。

导热性好的金属其散热性也好,如在制造散热器、热交换器与活塞等零件时,就要选用导热性好的金属。在制订焊接、铸造、锻造和热处理工艺时,也必须考虑材料的导热性,防止金属材料在加热或冷却的过程中形成较大的内应力,以免金属材料发生变形或开裂。

### 4. 导电性

金属能够传导电流的性能,称为导电性。金属导电性的好坏,常用电阻率 $\rho$ 表示。

取长1 m、截面积为 $1 \text{ mm}^2$ 的物体,在一定温度下所具有的电阻数,叫做电阻率。电阻率越小,导电性就越好。

导电性和导热性一样,是随合金化学成分的复杂化而降低的,因而纯金属的导电性总比合金好。因此,工业上常用纯铜、纯铝做导电材料,而用导电性差的铜合金和铁铬铝合金做电热元件。

### 5. 热膨胀性

金属材料随着温度变化而膨胀、收缩的特性称为热膨胀性。一般来说,金属受热时膨胀而且体积增大,冷却时收缩而且体积缩小。热膨胀性用线胀系数和体胀系数来表示。

体胀系数近似为线胀系数的3倍。在实际工作中考虑热膨胀性的地方颇多,如铺设钢轨时,在两根钢轨衔接处应留有一定的空隙,以便钢轨在长度方向有膨胀的余地;轴与轴瓦之间要根据膨胀系数来控制其间隙尺寸;在制订焊接、热处理、铸造等工艺

时也必须考虑材料的热膨胀影响,做到减少工件的变形与开裂;测量工件的尺寸时也要注意热膨胀因素,做到减少测量误差。

## 6. 磁性

金属材料在磁场中被磁化而呈现磁性强弱的性能称为磁性,通常用磁导率表示。根据金属材料在磁场中受到磁化程度的不同,金属材料可分类如下。

- (1) 铁磁性材料。在外加磁场中,能强烈地被磁化到很大程度,如铁、镍、钴等。
- (2) 顺磁性材料。在外加磁场中,呈现十分微弱的磁性,如锰、铬、铝等。
- (3) 抗磁性材料。能够抗拒或减弱外加磁场磁化作用的金属,如铜、金、银、铅、锌等。

在铁磁性材料中,铁及其合金(包括钢与铸铁)具有明显磁性。镍和钴也具有磁性,但远不如铁。铁磁性材料可用于制造变压器、电动机、测量仪表等;抗磁性材料则可用做要求避免电磁场干扰的零件和结构材料。

### 1.1.3 金属的化学性能

金属的化学性能是指金属在室温或高温时,抵抗各种化学介质作用所表现出来的性能,它包括耐腐蚀性、抗氧化性和化学稳定性等。金属材料在机械制造中,不但要满足力学性能、物理性能的要求,同时也要求具有一定的化学性能,尤其是要求耐腐蚀、耐高温的机械零件,更应重视金属材料的化学性能。

#### 1. 耐腐蚀性

金属材料在常温下抵抗氧、水及其他化学介质腐蚀破坏作用的能力,称为耐腐蚀性。金属材料的耐腐蚀性是一个重要的性能指标,尤其对在腐蚀介质(如酸、碱、盐、有毒气体等)中工作的零件,其腐蚀现象比在空气中更为严重。因此,在选择材料制造这些零件时,应特别注意金属材料的耐腐蚀性,并合理使用耐腐蚀性能良好的金属材料进行制造。

#### 2. 抗氧化性

金属材料在加热时抵抗氧化作用的能力,称为抗氧化性。金属材料的氧化随温度升高而加速。例如,钢材在铸造、锻造、热处理、焊接等热加工作业时,氧化比较严重。氧化不仅造成材料过量的损耗,也会形成各种缺陷,为此常采取措施,避免金属材料发生氧化。

#### 3. 化学稳定性

化学稳定性是金属材料的耐腐蚀性与抗氧化性的总称。金属材料在高温下的化学稳定性称为热稳定性。在高温条件下工作的设备(如锅炉、加热设备、汽轮机、喷气发动机等)上的部件需要选择热稳定性好的材料来制造。

### 1.1.4 金属的工艺性能

工艺性能是指金属材料在制造机械零件和工具的过程中,适应各种冷、热加工的性能。也就是金属材料采用某种加工方法制成成品的难易程度。它包括铸造性能、锻