



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

金属熔化焊基础

(焊接专业)

英若采 主编



机械工业出版社



中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2001 年 10 月

前 言

本教材为《面向 21 世纪中等职业教育国家规划教材》之一。根据国家教育部职教司 2001 年颁布的中等职业学校焊接专业“金属熔化焊基础”课程教学大纲编写。

《金属熔化焊基础》是中等职业学校焊接专业一门重要的专业课教材。其任务是使学生在具备一定的基础知识和操作技能的基础上,掌握培养目标所必备的专业基础理论,并为学好后续课程打下基础。根据中等职业教育培养中、初级专门人才的目标,适当考虑毕业生在日后工作中进一步提高的需要,教材内容以培养学生分析和解决生产中实际问题的能力为中心,在体系与内容安排上,打破原中专课程体系,将原来涉及二、三门课程的内容有机结合在一起。这样不仅可以在很大程度上克服过去由于强调学科完整性而造成的理论过多、过深的弊端,以减轻学生的负担,而且也有利于淡化中专与职业高中培养对象的差异,淡化技术人员和操作人员的界限。

全书共分六章,第一章介绍金属学的基础知识;第二章介绍热处理工艺及基本理论;第三章介绍工业中常用的金属材料;第四章介绍金属在熔化焊过程中成分、组织及性能变化的规律;第五章介绍常用的焊接材料;第六章介绍生产中常见焊接缺陷的产生与防止。

本书由四川工程职业技术学院英若采、杨智民编写。其中第一、二、三章由杨智民编写,其余部分由英若采编写。由英若采担任主编,经董芳审阅。

本书由燕山大学崔占全教授担任责任主审。由崔占全、赵品老师审稿。审稿中对书中内容及体系提出很多中肯的宝贵意见,仅对此表示衷心的感谢。

在编写中,四川工程职业技术学院有关领导及焊接实验室在人力、物力上给予了大力支持,对此亦表示感谢。

由于编者水平有限,书中缺点与错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2002 年 1 月

主要名词符号对照表

A——奥氏体	P ——电弧功率
A_K ——冲击吸收功	S——索氏体
a_K ——冲击韧度	T——托氏体
B——贝氏体	t ——摄氏温度
E——热输入	T ——热力学温度
F——铁素体	U ——电压
F ——力, 载荷	v ——焊接速度
G ——温度梯度	α_l ——线膨胀系数
G ——石墨	δ ——高温铁素体
H ——熔深	δ ——板厚
B ——熔宽	θ ——熔合比
I ——电流	η ——合金元素过渡系数
IIW——国际焊接学会	ψ ——缩面收缩率, 飞溅率
L ——分配常数	ϕ ——焊缝成形系数
L——液相	k_b ——药皮重量系数
M_s ——马氏体转变开始温度	T_m ——熔化温度
M_f ——马氏体转变终了温度	α_H ——焊条熔敷系数
P——珠光体	α_p ——焊条熔化系数

目 录

前言	
主要名词符号对照表	
绪论	1
第一章 金属学基础	4
第一节 金属的力学性能	4
一、硬度	4
二、强度与塑性	7
三、韧性	9
第二节 金属的物理性能	10
一、密度	10
二、熔点	11
三、热膨胀性	11
四、导热性	12
五、导电性	12
第三节 金属的晶体结构	12
一、金属的特性	12
二、晶格与晶胞	13
三、常见金属的晶体结构类型	13
四、金属的实际晶体结构与晶体缺陷	14
五、金属的同素异构转变	16
第四节 金属的结晶	17
一、结晶的概念	17
二、金属的结晶过程	17
三、晶核形成与晶粒长大	18
四、控制晶粒大小的措施	18
五、铸锭的结晶结构	18
第五节 合金的结构与结晶	19
一、基本概念	19
二、合金的结构特点与相的概念	20
三、合金的结晶特点	22
第六节 铁碳合金相图	22
一、有关相图的基础知识	22
二、铁碳合金的组元与基本相	27
三、铁碳合金相图分析	29
四、典型铁碳合金结晶过程分析	31
五、铁碳合金成分、组织、性能之间的关系	34
第七节 金属受力时结构和性能的变化	35
一、金属的塑性变形	36
二、冷变形金属在加热时组织与性能的变化	36
三、金属的热加工与冷加工	37
习题与思考题	38
〔实验一〕 显微试样的制备实训	38
〔实验二〕 铁碳合金组织观察	39
第二章 焊件热处理基础	41
第一节 概述	41
一、热处理在机器零件制造中的作用	41
二、热处理的实质及分类	41
第二节 钢在加热时的组织转变	42
一、奥氏体的形成与长大	42
二、奥氏体晶粒的大小及控制	43
第三节 钢在冷却时的组织转变	44
一、过冷奥氏体的等温转变	44
二、过冷奥氏体的连续冷却转变	49
第四节 退火与正火	52
一、钢的退火	52
二、钢的正火	54
第五节 淬火与回火	55
一、淬火	55
二、淬火钢的回火	58
第六节 钢的表面热处理	60
一、表面淬火	60
二、化学热处理	61
习题与思考题	62
〔实验〕 钢的热处理实训	63
第三章 常用金属材料	65
第一节 碳素钢(非合金钢)	65
一、碳及杂质对钢性能的影响	65
二、碳素钢的分类	66
三、碳素结构钢	67
四、碳素工具钢	71
第二节 合金钢	73
一、合金元素在钢中的作用	73

二、合金钢的分类	77	一、焊缝金属的结晶	134
三、合金结构钢	78	二、焊缝金属的偏析	135
四、合金工具钢	83	三、焊缝金属的固态相变	136
五、特殊性能钢	86	四、改善焊缝组织与性能的途径	137
第三节 铸铁	91	第八节 焊接热影响区	139
一、铸铁的组织与性能特点	91	一、焊接热影响区的组织	139
二、铸铁的分类	92	二、焊接热影响区的性能变化规律	142
三、铸铁的石墨化及其影响因素	92	习题与思考题	144
四、灰铸铁	94	〔实验一〕焊条熔化系数与熔敷系数	
五、球墨铸铁	95	的测定	145
第四节 非铁金属(有色金属)	96	〔实验二〕熔敷金属扩散氢的测量	145
一、铝及铝合金	96	〔实验三〕焊接接头金相组织观察	146
二、铜及铜合金	100	第五章 焊接材料	148
三、钛及钛合金	102	第一节 焊条	148
习题与思考题	103	一、焊条的分类	148
第四章 焊接冶金基础	105	二、焊条的型号与牌号	149
第一节 焊接热过程	105	三、焊芯	150
一、焊接热源	105	四、焊条药皮	151
二、焊接温度场	106	五、焊条的工艺性能	154
三、焊接热循环	109	六、焊条的冶金性能	156
第二节 焊缝金属的构成	112	七、焊条的选用及保管	158
一、焊条的加热与熔化	112	第二节 焊丝	160
二、母材的熔化与熔池	115	一、焊丝的分类	160
三、焊缝金属的熔合比	115	二、实芯钢焊丝	161
第三节 焊接化学冶金的特点	117	三、药芯焊丝	162
一、焊接化学冶金过程进行的条件	117	第三节 焊剂	164
二、焊接时焊缝金属的保护	117	一、焊剂的分类	164
三、焊接化学冶金反应区	118	二、焊剂的型号和牌号	165
四、焊接参数的变化对焊接化学冶金的影响	119	三、对焊剂的要求	168
第四节 焊接熔渣	119	四、常用焊剂的性能及用途	169
一、熔渣的作用	120	习题与思考题	171
二、熔渣的分类	120	第六章 焊接缺陷的产生与防止	172
三、熔渣的碱度	120	第一节 焊接缺陷的种类与特征	172
四、熔渣的物理性能	120	一、气孔的分类与特征	172
第五节 有害元素对焊缝金属的作用及其控制	122	二、固体夹杂的分类与特征	173
一、氢对焊缝金属的作用及其控制	122	三、焊接裂纹	173
二、氮对焊缝金属的作用及其控制	124	四、未熔合与未焊透的特征	174
三、氧对焊缝金属的作用与脱氧反应	125	五、焊缝形状缺陷	175
四、对焊缝金属中硫、磷的控制	129	第二节 气孔与夹杂产生的原因及防止措施	176
第六节 焊缝金属的合金化	131	一、气孔产生的原因	176
第七节 焊缝的组织与性能	134	二、影响气孔形成的因素	178
		三、防止气孔产生的措施	180

四、焊缝中的夹杂物	181	二、形成冷裂纹的基本因素及其作用	187
第三节 结晶裂纹产生的原因及防止		三、防止冷裂纹产生的措施	188
措施	181	第五节 其它焊接裂纹	189
一、结晶裂纹的特征	182	一、液化裂纹	189
二、结晶裂纹形成的原因	182	二、消除应力裂纹	191
三、影响结晶裂纹形成的因素	183	三、层状撕裂	192
四、防止结晶裂纹产生的措施	184	习题与思考题	194
第四节 焊接冷裂纹	186	主要参考文献	195
一、冷裂纹的特征	186		

绪 论

在各种金属加工工艺方法中，焊接属于连接加工，它在机器制造中占有重要的地位。而熔化焊则是若干焊接方法中应用最广泛的焊接方法，简称熔焊。

1. 焊接的定义与熔焊的分类

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/T3375—1994《焊接术语》中，对焊接所下的定义是：“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，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。本教材的内容就是介绍与熔焊相关的基础知识。

熔焊包括了一些不同的焊接方法，生产中常用的如图 1 所示。

熔焊是国防与民用工业装备制造中应用最多的一类焊接方法。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。

2. 熔焊的特点

在机械制造中，连接的方法很多，除焊接外，还有螺栓连接、铆钉连接、粘接等（图 2）。其中螺栓连接是可以拆卸的；而其它几种连接则只有将接头破坏才能拆开，属于不可拆卸（或永久性）的连接。

与其它连接方法相比，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，而且其它使用性能（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制造，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。

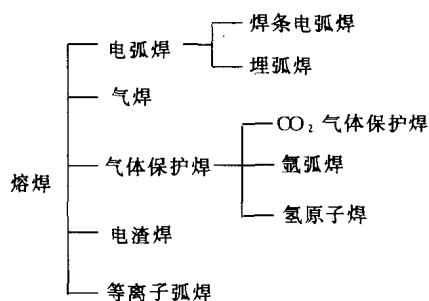


图 1 熔焊方法分类

(5) 劳动条件好 劳动强度低, 噪声小。

由于具备了上述优点, 使熔焊获得了广泛应用, 在工业发达国家, 制造焊接结构所用的钢材约占钢材总量的一半。

但也要指出, 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。

3. 焊接技术发展简况

熔化焊技术在 19 世纪 80 年代末开始用于工业生产, 时间不长, 但发展非常迅速。

焊接技术的发展进步, 主要表现在新方法、新技术的应用; 设备的机械化、自动化程度不断提高和应用范围日益扩大等几个方面。焊接技术是随科学技术的进步而发展的。新能源的开发与应用, 为焊接新方法的研制提供了理论与物质基础, 从而使焊接技术的应用范围不断扩大。而高、新、精产品的面世, 又对焊接技术提出了更高的要求。目前, 焊接已发展为一门独立的学科, 成为工业生产中不可缺少的加工工艺, 并将发挥越来越大的作用。

我国的焊接事业基本上是中国成立后才开始起步的, 在较短的时间就取得了惊人的进步和可喜的成就。早在建国初期, 我们就掌握了桥式起重机和客货轮的焊接技术。在 20 世纪 60 年代, 成功地设计与制造了全焊结构的 $12000 \times 10^4 \text{N}$ 水压机, 解决了当时缺乏大型加工及冶金设备的困难。

改革开放以来, 随着国家重点开发材料、能源、交通、石油化工等基础工业的战略实施, 焊接技术的应用与进步取得了举世瞩目的成就。焊接技术不仅成功地应用于大型水力火力发电成套设备、国内容积最大的高炉、跨度最大的大吨位桥式起重机的制造中, 还成功地用于核电站, 以及过去完全依赖进口的热壁加氢反应器等建造中。与此同时, 在引进国外先进技术的基础上, 还对大中型骨干企业进行了设备更新与改造。先进的焊接技术与控制系统, 已在较大范围内得到应用。

目前, 三峡水利枢纽、西气东输等“十五”计划期间的重点工程已开始启动, 焊接技术在其中有举足轻重的作用。为了尽快缩短与发达国家之间的差距, 今后, 在推广焊接新技术、研制焊接专机与辅机、以电子技术改造传统技术等方面, 还有大量的工作要做。不仅需要较多的高层次专门人才, 更需要大量的在生产第一线工作的高素质的劳动者及中、初级技术人才。

4. 本教材的主要内容

根据中等职业学校的培养目标和课程教学大纲的要求, 本教材安排了以下的内容:

(1) 金属学基础 主要有金属的力学性能、物理性能; 金属的晶体结构、结晶过程; 合金及铁碳合金相图等内容。

(2) 焊件热处理基础 主要有钢在加热和冷却时的变化, 常用热处理方法及工艺等内

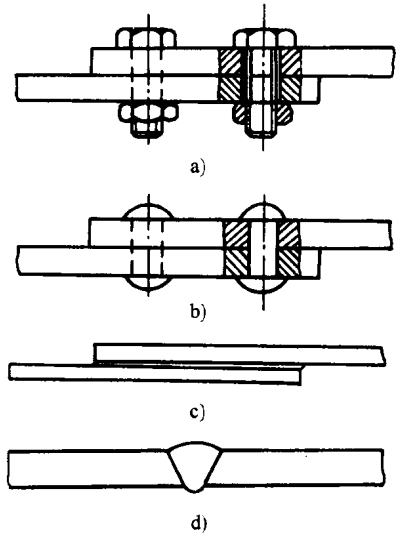


图 2 几种常用的连接形式

a) 螺栓连接 b) 铆钉连接
c) 粘接 d) 熔焊

容。

(3) 常用金属材料 包括碳钢、合金钢、铸铁、非铁合金（铝、铜、钛及其合金）等内容。

(4) 焊接冶金过程 主要有焊接化学冶金基本知识、焊缝及焊接热影响区的组织与性能等内容。

(5) 焊接材料 主要有焊条、焊丝 焊剂等内容。

(6) 焊接缺陷的产生与防止 重点介绍气孔、夹杂物、裂纹等冶金缺陷。

5. 本教材的教学目标及学习方法

本教材的教学任务是使学生具备金属熔化焊技术的基本知识和基本技能，为今后从事焊接技术工作打下基础。

(1) 本教材的教学目标

1) 了解金属与合金结晶的基本理论，金属与合金的晶体结构和塑性变形与再结晶的基本知识，初步具有制备金相试件及显微分析的能力。

2) 理解金属热处理的原理及方法。

3) 了解常用金属材料的成分、组织结构与性能之间的关系。

4) 了解金属熔化焊过程的基本规律。焊接冶金特点。

5) 理解焊缝在其形成过程中成分、组织变化的规律。

6) 理解焊接热影响区金属组织与性能变化的规律。

7) 掌握焊接材料的特点、选用原则及焊条性能测定方法，能借助工具书正确选择和使用常用的焊接材料。

8) 了解熔化焊过程中常见缺陷产生的原因及控制方法，初步具备根据生产实际条件判断焊接缺陷的性质，并提出防止措施的能力。

(2) 对学习方法的建议

1) 坚持理论联系实际，学习理论不仅要结合本教材有关的实践教学内容，而且要联系专业技能训练内容，做到勤于动手，认真观察，将实践中发现的问题到理论学习中寻求解决的途径。

2) 注意综合利用学到的知识，因解决焊接生产实际问题，不仅要涉及本教材的内容，而且与物理、化学及其它专业课程的内容有密切关系。只有将各方面的知识加以综合利用，才能提高分析问题和解决问题的能力。

3) 善于全面分析问题，因在熔焊过程中的影响因素是错综复杂的，在学习中学要学会根据具体条件找到起主要作用的因素，从而明确解决问题的方向。

第一章 金属学基础

工业上使用的材料虽然品种繁多，但归结起来，不外乎分为金属与非金属两大类。由于金属材料具有优良的使用性能，并可通过不同的加工方法生产出性能与形状都能满足使用要求的机械零部件、工具及其它制品，因而在工农业和国防各个领域中获得广泛的应用。如在各种机器设备、车辆、舰船、航空航天器以及工程结构等所用材料中，金属材料约占 90% 以上，人们日常生活用品也大量使用了金属材料。

金属学是研究金属和合金的成分、组织、结构以及它们和性能之间关系的一门科学。对于焊接工艺人员来说，只有掌握了必要的金属学基础知识，才能对金属在熔焊过程中所发生的变化（包括成分、组织与性能的变化）规律有所理解，以便利用这些规律指导生产，获得优质的焊接接头。

第一节 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硬度、强度、塑性和韧性等。在产品设计和选材时，力学性能是确定产品主要尺寸的依据。

一、硬度

硬度是表示固体材料表面抵抗局部变形，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

布氏硬度试验是将一定直径的球体（淬火钢球或硬质合金球）以相应的试验压力压入被测材料的表面，保持规定时间使其达到稳定状态后，将试验力卸除（图 1-1）后，测量材料表面压痕直径，将试验力与球面压痕单位表面积比值称为布氏硬度值，用符号 HBS (HBW) 表示。

计算公式如下

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

式中 HBS(HBW)——用淬火钢球(硬质合金球)试验时的布氏硬度值 (MPa);

F ——试验力 (N);

D ——球体直径 (mm);

d ——压痕平均直径 (mm)。

由上式可知, 当 F 、 D 一定时, 布氏硬度值仅与压痕直径 d 有关。 d 越小, 布氏硬度值越高, 即材料的硬度越高。在实际测定时, 并不需要每次都按上式进行计算, 而是用专用的读数放大镜测出压痕直径 (图 1-2) 后, 可直接从硬度换算表中查出硬度值。

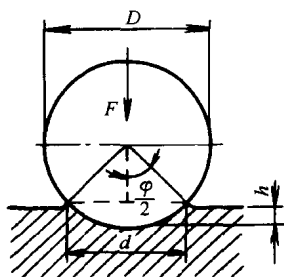


图 1-1 布氏硬度试验原理图

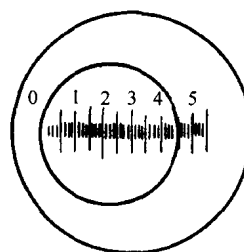
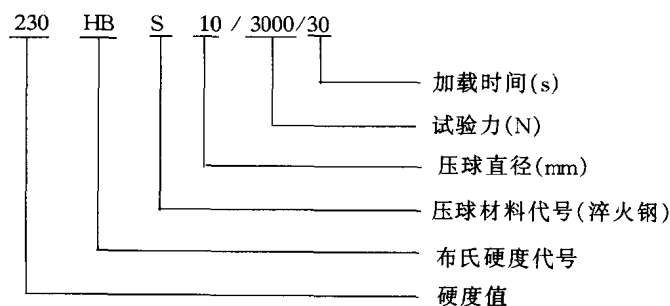


图 1-2 布氏硬度试验压痕测量图

不同材料的压球适用的被测材料不同, 淬火钢球多用于测定 450HBS 以下的材料; 硬质合金球多用于布氏硬度值 HBW 在 650 以下的材料。

按国标 GB/T231—1984 的规定, 布氏硬度值的标记应包括硬度试验符号、压头代号、压头直径、试验力和加载时间, 如:



当保荷时间为 10~15s 时, 不用标注, 通常在工艺文件上只标注前三项, 如 230HBS。

布氏硬度试验的优点是误差较小、数据稳定、重复性强, 常用于测量灰铸铁、结构钢有色金属及非金属材料等的硬度, 但它测量费时, 压痕较大, 不适于成品零件或薄件的硬度测量。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度是用锥角为 120° 的金刚石圆锥或直径为 1.588mm 的淬火钢球压头压入试样表面, 根据压痕深度来确定金属硬度的。金刚石压头用于测定较硬的材料, 如淬火后的钢件; 淬火钢球压头则用于测定较软的钢件。试验时, 为了使压头与试件表面接触良好, 以保证测

量结果准确, 先加初始试验力 F_0 , 压入深度 h_0 ; 然后再加主试验力 F_1 , 压入深度 h ; 总试验力 F 为 F_0 与 F_1 之和 ($F = F_0 + F_1$)。压头在总试验力作用下压入试件表面, 经规定的保持时间后卸, 除 F_1 , 压入深度返回到 h_1 , 在保持初始力 F_0 的情况下测量残余压痕深度 $h_1 - h_0$, 用此值来计算被测材料的洛氏硬度值。洛氏硬度试验原理图如图 1-3 所示。

洛氏硬度用符号 HR 表示。为了扩大硬度计的测量范围, 采用不同压头和试验力, 可组成多种不同的硬度标度, 并在符号 HR 后缀字母加以标明。最常用的是 HRC、HRB 和 HRA 三种, 见表 1-1。

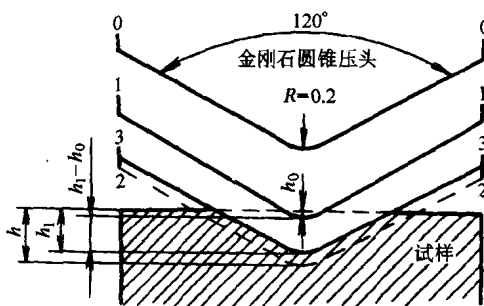


图 1-3 洛氏硬度试验原理示意图

1—加初始试验力 2—加主试验力
3—卸除主试验力

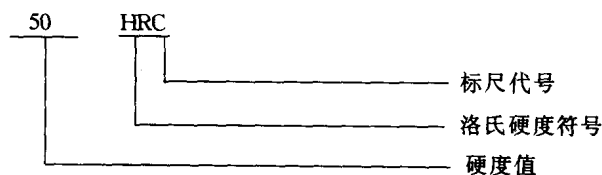
表 1-1 常用洛氏硬度标尺的试验条件与适用范围

硬度标尺	压头类型	总试验力 (N)	硬度值有效范围	应用举例
HRC	120°金刚石圆锥体	1471.0	20~67HRC	一般淬火钢件
HRB	φ1.588mm 淬火钢球	980.7	25~100HRB	软钢、退火钢、铜合金等
HRA	120°金刚石圆锥体	588.4	60~85HRA	硬质合金、表面淬火钢等

洛氏硬度与布氏硬度之间, 没有理论上的对应关系, 不能通过计算进行对比。但对同类材料, 在相同状态下和一定硬度值范围内, 在试验的基础上可得到一些经验换算关系。如当材料硬度 $> 220\text{HBS}$ 时, 有 $1\text{HBS} \approx 10\text{HRC}$ 的近似关系, 可在实践中进行对比。

洛氏硬度试验操作迅速简单, 压痕小, 不损伤试样表面, 测量范围大, 故应用范围较广。但也因压痕小, 对于组织粗大且不均匀的材料, 测试结果误差较大, 数值重复性差。通常要求从试件不同位置测试三点, 然后取平均值。

按 GB/T230—1991 规定, 洛氏硬度的标记包括硬度实验符号、所用标尺代号及硬度值, 如:



3. 维氏硬度

维氏硬度试验原理与布氏硬度基本相同, 也是根据压痕单位面积上所承受的压力大小来计量硬度值。区别是维氏硬度实验是用两面夹角为 136° 的金刚石四棱锥体作压头。维氏硬度实验原理如图 1-4 所示。

试验时, 在一定试验力 F 的作用下将压头压入试件表面, 在试件表面压出一个四方锥形的压痕, 测量压痕对角线长度 d_1 和 d_2 , 以其平均值计算出压痕的表面积 A , 用 F/A 表示维氏硬度值, 符号为 HV。

$$\text{HV} = F/A = 1.891F/d^2$$

式中 F ——试验力 (N);

A ——压痕表面积 (mm^2);

d ——压痕两对角线的算术平均值 (mm)。

根据试件大小、厚度和其它条件, 试验力可在一定范围内选择。

压痕对角线长度是用试验硬度计上的测微器测量的, 求出 d 后可通过计算或查表得出维氏硬度值。

与布氏、洛氏硬度试验相比, 维氏硬度试验的优点是: 不存在受布氏硬度中试验力与压头直径比例关系的约束; 也不存在压头变形问题; 而且压痕清晰, 保证了测量的精确度, 硬度值误差较小。所以此法更适合测定极薄试件的硬度。但是由于维氏硬度值需要测量对角线长度, 并进行计算或查表, 其效率比洛氏硬度试验低, 不宜用于成品生产的常规测量。

维氏硬度实验广泛用来测定金属镀层、薄片、化学热处理后的表面硬度, 以及焊接热影响区的硬度等。

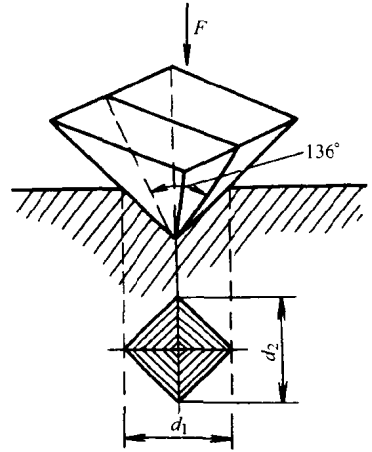


图 1-4 维氏硬度实验原理示意图

二、强度与塑性

1. 强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力。由于作用力的性质不同, 其判据可分为屈服点、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等, 在生产中, 最常用、最基本的是屈服点、抗拉强度。试验方法为拉伸试验法。

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 6397—1986《金属拉伸试验试样》的规定, 图 1-5 为圆形试件的示意图。图中 d_0 为试样直径, l_0 为标距长度, 根据规定试样分长试样 ($l_0 = 10d_0$) 和短试样 ($l_0 = 5d_0$) 两种。

在拉伸过程中, 随外力增加, 试件将伸长, 拉伸力 F 与试件伸长量 Δl 之间的关系称为力-伸长曲线。图 1-6 为低碳钢的力-伸长曲线。

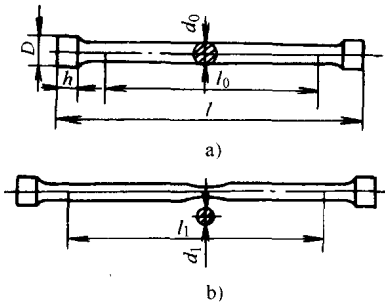


图 1-5 圆形拉伸试样

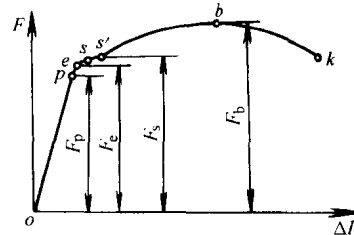


图 1-6 低碳钢力-伸长曲线图

材料受外力作用, 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 σ 表示, 即

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

式中 F ——拉伸力 (N);

A_0 ——试样原始截面积 (m^2)。

根据拉伸曲线可以求出材料的强度指标，主要有：

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

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

式中 F_e ——试件弹性极限拉伸力 (N)。

σ_e 值大，表示材料的弹性大。

(2) 屈服点 试件在外力不增加仍能继续伸长的应力，以 σ_s 表示，即

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

式中 F_s ——屈服时的拉伸力 (N)。

有些材料没有明显的屈服现象，为此国标规定：以试件产生标距的 0.2% 残余伸长时的应力作为条件屈服点，以 $\sigma_{0.2}$ 表示，常称之为屈服强度。

(3) 抗拉强度 试件在断裂前所承受的最大标称拉应力，以 σ_b 表示，即

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

式中 F_b ——拉断试样的最大拉伸力 (N)。

σ_s 与 σ_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 σ_s (或 $\sigma_{0.2}$) 是产品设计的强度指标，脆性材料则用 σ_b 作为强度指标。

σ_s/σ_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，其抵抗破坏能力分别称为抗压强度或抗弯强度，单位与抗拉强度相同。

由于抗拉强度和硬度是以不同形式反映了材料在外力作用下抵抗塑性变形的能力，因而二者之间有着近似的比例关系。布氏硬度值与抗拉强度的经验换算关系如下：

退火状态的低、中碳钢	$\sigma_b \approx 3.6\text{HBS}$
调质的低、中碳钢	$\sigma_b \approx 3.4\text{HBS}$
调质合金钢	$\sigma_b \approx 3.25\text{HBS}$
灰铸铁	$\sigma_b \approx \text{HBS}$
纯铝	$\sigma_b \approx 2.7\text{HBS}$
纯铜	$\sigma_b \approx 5.5\text{HBS}$

换算中 σ_b 的单位为 MPa。

2. 塑性

塑性是金属在外力作用下，断裂前发生不可逆永久变形的能力。

金属材料的塑性指标为伸长率与断面收缩率，它们同样可通过拉伸试验测定。

(1) 伸长率 试件拉断后标距长度的伸长量与其原始标距之比值的百分率，用符号 δ 表示。即

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

式中 l_1 ——试件拉断后的标距长度；

l_0 ——标距的原始长度。

长试件用 δ_{10} 表示，短试件用 δ_5 表示。

(2) 断面收缩率 试件拉断后断面面积的收缩量与其原始面积比值的百分率，用符号 ψ 表示，即

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

式中 A_0 ——试样的原始截面积；

A_1 ——试样拉断后的截面积。

δ 和 ψ 值越大，表明金属材料的塑性越好。

三、韧性

韧性又称为韧度，是指金属在断裂前吸收变形能量的能力。金属的韧性随加载速度的提高、温度的降低而下降。在断裂前发生明显塑性变形的材料称为韧性材料。

韧性通常通过摆锤式一次冲击试验测定。图 1-7 为冲击试验装置示意图。试验所用试件尺寸见图 1-8。我国有关标准规定，试样缺口以 U 形与 V 形缺口为主。

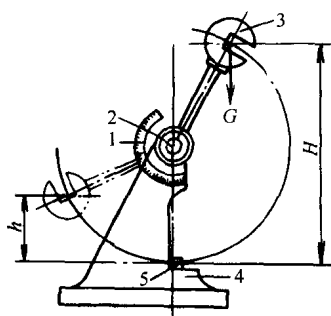


图 1-7 冲击实验装置示意图

1—刻度盘 2—指针 3—摆锤
4—机架 5—试样

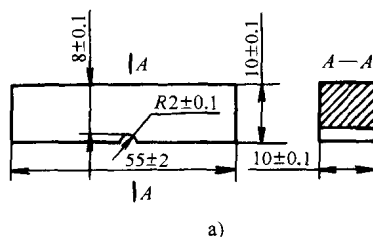


图 1-8 冲击试样及安装位置

a) 冲击试样 b) 试样安放

试验时，将试件放在试验机的支承架面上，缺口背向摆锤方向（图 1-8b），然后将重力为 G 的摆锤由高度 H 自由落下，击断工件后升至高度 h 。因此，摆锤冲击试样时，断口处所消耗的冲击吸收功可用下式计算：

$$A_K = G (H - h)$$

式中 A_K ——被试样断口的冲击吸收功 (J)；

G ——摆锤重力 (N)；

H ——冲断试样前摆锤高度 (m)；

h ——冲断后摆锤回升高度 (m)。

试件断口单位面积所消耗的冲击吸收功称为冲击韧度，以 a_K 表示，即

$$a_K = \frac{A_K}{A_0} \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

式中 A_0 ——试样断口的原始截面积 (cm^2)。

A_K 和 a_K 是表征材料抵抗冲击负荷能力的一个参考性指标, 也代表了材料在断裂时吸收能量的能力。冲击试验集中了高冲击速度及缺口的作用, 对金属的韧性可做出更为安全合理的评价。

脆性是与韧性相反的概念, 韧性低的材料在断裂时断口不发生明显的变形, 称为脆性材料。典型的脆性金属材料如铸铁及淬火后的工具钢, 均表现出明显的脆性。

对同一种材料, 随着试验温度降低, 韧性断裂可以转变为脆性断裂, 即材料由韧性材料变为脆性材料, 这种现象称为韧脆性转移。

韧脆性转移的温度称为韧脆转变温度。不同的金属, 其韧脆转变温度不同。韧脆转变温度决定了金属材料的最低工作温度。

冲击韧度值随试验温度与缺口形式而变化, 所以, 对冲击试验结果必须注明试验温度和缺口形式。

冲击韧度值不仅可表示金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力, 而且还反映了产品发生脆性断裂倾向之大小。因此, 在生产中, 不仅要长期在冲击载荷下工作的零件进行冲击试验, 而且对在静载荷作用下的重要产品 (如低温压力容器、高压容器), 其材料也要求进行冲击韧试验。

第二节 金属的物理性能

物理性能是指金属在固态下所表现出的一系列物理现象。物理性能属于材料的使用性能, 它不仅影响金属材料的应用范围和产品质量, 而且对加工工艺, 特别是对焊接的工艺性与质量有较大的影响。

一、密度

密度是单位体积物质的质量, 用符号 ρ 表示、单位为 kg/cm^3 。计算公式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中 m ——物质的质量 (g);

V ——物质的体积 (cm^3)。

不同金属的密度不同。按密度的大小, 将金属分为轻金属与重金属两类。密度 $\rho < 5\text{g/cm}^3$ 的金属称为轻金属, 如铝、镁、钛等及其合金; 密度 $\rho > 5\text{g/cm}^3$ 的金属称为重金属, 如铁、铜、锡、铅等及其合金。

在生产中, 常利用金属的密度来计算毛坯或零件的质量。此外, 密度又是选用零件材料的依据。如飞机、船舶、航天器等产品, 为了减轻自重、节约燃料、提高承载能力, 需要选用密度小而强度高的轻金属; 而深海潜水器、平衡重锤等, 为了提高稳定性, 需要增加自重, 常选用重金属制造。

常用金属及合金的密度见表 1-2。