

# 焊接金属学

上海市工农教育教材《焊接》编写组

上海交通大学金相焊接教研组

华南工学院焊接教研组

# 焊接金属学

上海市工农教育教材《焊接》编写组  
上海交通大学金相焊接教研组  
华南工学院焊接教研组

一九七八·二

## 内 容 提 要

本书是根据焊接专业的需要编写的金属学。除了阐述金属学的基本原理如金属的组织结构,塑性变形,合金相图,凝固理论,固态相变,热处理原理,合金元素的作用等内容以外,还结合焊接专业的特点,有机地穿插分析了焊接过程所涉及的金属学问题,例如焊缝的结晶,热影响区的组织与性能,焊接裂缝的形成原因和特征,焊件的热处理等内容。最后概略地介绍了金属的断口分析和焊接裂缝的断口特征。

本书可作为高等院校和七·二一工大焊接专业用的金属学教材,也可供从事焊接工艺和焊接金相分析的技术人员参考。

# 目 录

前言	1
第一章 钢的组织与性能	2
第一节 钢及其性能	2
一 什么是钢和铁	2
二 钢的常规机械性能	4
第二节 碳钢的显微组织和性能的关系	10
一 含碳量对碳钢组织和性能的影响	10
二 加工状态对钢材组织和性能的影响	14
第三节 金属的晶体结构	16
一 纯铁的晶体结构	16
二 钢中各相的晶体结构	19
三 金属的实际晶体	20
四 金属晶体的结合方式	23
第四节 钢中常存元素的影响	24
一 硫	24
二 磷	25
三 锰	26
四 硅	26
五 铝	27
六 氧	27
七 氮	28
八 氢	28
第五节 钢中的非金属夹杂物	29
复习思考题	30
第二章 塑性变形与再结晶	32
第一节 金属的变形	32
一 弹性变形	32
二 单晶体的塑性变形	33
三 多晶体的塑性变形	38
四 合金的塑性变形	39
第二节 冷塑性变形后金属的组织与性能	40
一 显微组织的改变	40
二 亚结构的变化	41
三 产生内应力	41

四	加工硬化	42
五	变形织构	42
六	应变时效	43
第三节	回复与再结晶	43
一	回复	44
二	再结晶	44
三	晶粒长大	46
第四节	金属的热塑性变形	47
一	热加工的意义和目的	47
二	热加工钢材的组织及对性能的影响	48
三	层状撕裂	50
	复习思考题	50
第三章	铁—碳合金相图	51
第一节	纯铁在缓慢加热时的变化	51
一	铁丝加热现象	51
二	纯铁的同素异构转变	51
三	$\alpha$ -Fe— $\gamma$ -Fe转变时的相变热、体积变化	52
第二节	铁碳合金相图	53
一	铁碳相图的建立	53
二	铁碳相图的分析	54
三	杠杆原理	59
四	典型合金缓慢加热或冷却过程的分析	59
五	铁—碳相图小结	63
第三节	二元合金相图的基本类型和分析方法	65
一	相律及其应用	65
二	二元合金相图的基本类型	66
三	二元合金相图的分析方法	68
	复习思考题	69
第四章	焊缝金属的结晶	70
第一节	焊缝金属的凝固现象	71
一	焊接熔池结晶的特殊性	71
二	焊缝凝固组织的特征	71
三	焊接裂缝与凝固组织的关系	72
第二节	焊缝金属的凝固过程	73
一	形核	74
二	长大	76
第三节	焊缝金属的凝固组织(一次结晶组织)	77
一	晶体的成长方式和微观形态(胞状晶和树枝晶)	77
二	焊接条件对焊缝凝固组织的影响	82

三	共晶合金凝固组织的形态	87
第四节	焊缝中的偏析	88
一	固溶体合金的非平衡冷却	89
二	树枝晶偏析和胞状间界偏析(显微偏析)	89
三	中心线偏析	92
四	层状偏析	93
第五节	焊接时的热裂纹(凝固裂纹)	95
一	热裂纹的形态和特征	95
二	热裂纹的形成机理	97
三	含碳量和合金元素对热裂纹的影响	100
四	热裂纹的防止	104
第六节	改善焊缝一次组织的途径	105
	复习思考题	106
第五章	焊接接头的固态转变	109
第一节	钢在加热时的转变	109
一	奥氏体的等温形成	109
二	连续加热时奥氏体的形成	112
三	奥氏体晶粒的长大及奥氏体晶粒度	113
第二节	奥氏体在连续冷却时的转变	116
一	冷却速度对奥氏体转变的影响	116
二	连续冷却转变图	119
三	焊接用的连续冷却转变图	122
四	淬硬倾向的概念	123
五	奥氏体化温度对连续冷却转变图的影响	124
第三节	过冷奥氏体的等温转变	125
一	等温转变曲线	125
二	合金元素对转变曲线的影响	128
三	等温转变曲线和连续冷却转变曲线的关系	129
第四节	奥氏体转变产物的形成特点及性能	130
一	先共析铁素体的析出	131
二	珠光体的形成	134
三	马氏体转变	135
四	贝氏体的形态和性能	142
第五节	焊接热循环	149
一	焊接热循环	149
二	焊接温度场	151
三	焊接时的线能量	151
四	焊接热影响区的冷却速度和冷却时间	153
第六节	焊接接头的组织与性能	154

一	焊缝的二次组织	154
二	焊接热影响区的组织	156
三	热影响区的性能	166
第七节	焊接接头的冷裂纹	171
一	冷裂纹的特征	171
二	影响冷裂纹形成的因素	173
三	冷裂纹的形成	177
四	冷裂纹的防止	180
第八节	低碳钢中的时效	180
一	淬火时效的现象	180
二	淬火时效的本质	182
三	淬火时效和应变时效的异同	184
	复习思考题	184
第六章	钢与焊件的热处理	186
第一节	热处理的基本概念	186
一	热处理的实质	186
二	热处理的工艺参数和依据	186
三	热处理的基本类型	187
第二节	退火与正火	187
一	退火	187
二	正火(常化)	190
第三节	淬火	192
一	淬火工艺	192
二	淬硬性与淬透性	194
第四节	回火	196
一	回火过程及组织与结构的变化	196
二	回火过程中钢的机械性能变化	200
三	回火脆性	201
四	回火分类及其应用	204
五	二次硬化与再热裂纹	206
第五节	钢的表面热处理	209
一	表面淬火	210
二	钢的化学热处理	211
第六节	焊接构件的热处理	213
一	预热及预热温度的确定	213
二	焊后热处理	215
	复习思考题	217
第七章	钢中合金元素的作用	218
第一节	合金元素在钢中存在的状态	218

一	形成碳化物等化合物	219
二	形成固溶体	222
三	成为游离状态	222
第二节	合金元素和铁的相互作用	222
一	Fe—M二元相图	222
二	合金元素和铁相互作用的一些规律	225
三	合金元素与 Fe 相互作用规律的实用意义	226
第三节	合金元素对 Fe—C 相图的影响	227
一	对共析成份及 E 点成份的影响	227
二	对共析温度 ( $A_1$ 点) 及其他临界点的影响	227
第四节	三元相图简介	229
一	三元合金相图的表示方法	229
二	简单的三元相图	230
三	等温截面图与变温截面图	232
四	合金钢的三元截面图应用举例	234
第五节	合金元素对于相变过程的影响	237
一	合金元素对加热时奥氏体化的影响	238
二	合金元素对于过冷奥氏体转变的影响	238
三	合金元素对回火转变的影响	241
第六节	钢中加入合金元素的目的	241
一	使钢强化(包括韧化)	241
二	增加钢的淬透性	243
三	增加回火抗力	244
四	获得某种特殊性能	244
	复习思考题	244
第八章	金属断裂和断口分析	245
第一节	金属断裂的基本概念	245
一	延性断裂与脆性断裂	245
二	断裂的方式	247
三	断裂的机理	247
第二节	一次加载的断口分析	249
一	一次加载断口的一般特征(宏观分析)	249
二	断口的微观分析	252
第三节	疲劳断口的分析	257
一	疲劳断口的宏观分析	257
二	疲劳断口的微观分析	258
第四节	晶间断口和应力腐蚀、氢脆断口分析	259
一	晶间断裂	259
二	应力腐蚀和氢脆断口的微观特征	260



第五节	焊接裂缝的断口分析	264
一	高温裂缝(热裂缝)	264
二	低温裂缝(冷裂缝)	266
三	焊后热处理裂缝(再热裂缝)	268
第六节	实际构件的破断分析	269
一	破断分析的一般方法	269
二	实际破断分析举例	270
附录一	钢的牌号表示方法	275
附录二	碳素结构钢的牌号、成份、机械性能及主要用途	277
附录三	硬度及强度换算表	282
附录四	钢中晶粒度级别图	285
附录五	热影响区冷却速度和冷却时间的估算	287
编写说明		293

# 前 言

金属材料是焊接生产的对象，从生产实践中我们可体会到在同样的焊接工艺条件下，有的材料(如低碳钢)比较好焊，焊接接头的性能良好，但有的材料(例如中碳钢、高碳钢、铝合金等)就比较难焊，如不采取一定的工艺措施，焊接接头便会出现各种缺陷(如气孔、裂缝)，焊接接头的性能降低等等。即使同样材料采取不同的焊接工艺，所得到的焊接接头的性能和质量也不一样，在不合适的工艺条件下甚至造成废品。毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”上述焊接生产过程中常遇到的问题实质上反映了金属材料在焊接条件下内部的矛盾运动。“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用”。焊接条件(焊接方法，焊接材料，工艺规范，结构刚性等等)是外因，金属材料内部的特性(化学成分，组织结构等)才是内因，在焊接过程中金属受焊接热源的加热、熔化以及随后的凝固，冷却，金属内部(包括焊缝及近缝的母材处)发生了成分或组织结构等的变化，从而使焊接接头的性能发生了变化，或者出现各种缺陷。因此我们焊接生产者不仅要把金属材料焊成所要求的外形，而且要熟悉各种材料内部的“脾气”，掌握在外界条件下它们内部矛盾运动的规律；以便针对施焊材料的特点，找出合适的焊接工艺措施，使焊接过程中材料内部矛盾运动向有利于提高焊接接头的内在质量方面转化。这就是我们学习本课程的目的；正如毛主席所教导的：“无产阶级认识世界的目的，只是为了改造世界。”

金属学的主要任务是研究金属材料的成分、组织和性能三者之间的关系，它是热加工生产(铸造、锻压、焊接以及热处理)的基础理论，焊接过程对金属材料组织和性能的影响规律既符合金属学中的一般原理，但又具有它的特殊性。为了适应高等院校和七二一工大焊接专业学员，以及工厂中焊接技术人员的需要，编写了这本教材，试图在学习金属学一般原理的基础上，进而分析焊接条件下的一些特殊矛盾，以加强金属学理论与焊接生产实际的联系，又加深对金属学基本原理的理解。

由于焊接生产中经常遇到的材料是钢，特别是低碳钢及普通低合金钢，因此在本教材中以低碳钢和普低钢为主线来分析金属内部的组织结构与性能之间的关系，以及它们在焊接过程中的变化，从而了解和掌握金属学的普遍规律，因为“矛盾的普遍性即寓于矛盾的特殊性之中”，这就是从特殊到一般的认识过程。掌握了金属学的普遍规律后，我们必须联系焊接生产实践，用以分析研究焊接生产过程中出现的特殊矛盾。不仅如此，掌握了普遍规律，还为分析研究其他热加工生产过程(如热处理等)打下基础。这就是从一般到特殊的认识过程，上述二个过程是学习本课程应遵循的方法。

至于其他金属材料如耐热钢，不锈钢、铸铁、有色金属等的特殊规律将在后继课程《金属材料焊接》(注)中讨论。

〔注〕《金属材料焊接》系十四所高校焊接专业统编教材，1978年出版。

# 第一章 钢的组织与性能

## 内 容 提 要

本章主要以碳钢为例,从性能入手,由宏观到微观介绍钢材内部的组合情况,建立起成分—组织—性能之间关系的初步概念,达到对焊接对象有基本的了解。

## 第一节 钢 及 其 性 能

钢铁是工农业生产中应用最广的材料,在社会主义建设中,它是各项工业的基础。

我国劳动人民是世界上最早制造和使用铁和钢的民族之一。早在公元前十四世纪前后,商代劳动人民就开始了铁器的使用,例如河北荣城出土的商代的铁刃青铜钺,是迄今为止发现的我国最早的带铁器具。到春秋晚期我国劳动人民已能在固态下用木炭还原铁矿石,得到海绵铁。到战国中晚期,又发明了炼铁渗碳制钢的方法,开始了钢的生产和使用。在战国晚期我国劳动人民已将钢进行热处理,制造出锋利的钢剑。例如河北易县战国燕下都墓葬出土的钢剑,其刃部组织是至今为止在我国发现的最早淬火组织,这一切充分说明我国劳动人民的勤劳智慧,他们对世界文明和科学技术宝库作出了卓越的贡献,推动了历史车轮的前进。

今天我国人民在毛主席的无产阶级革命路线指引下,坚持“独立自主,自力更生”的方针,在钢铁生产和应用方面取得了很大成绩,在钢的品种和质量方面有了很大的提高。这相应地也促进了焊接生产的发展,对焊接技术和工艺提出了更高的要求。

铁和钢关系十分密切,究竟有什么区别?钢的品种极其繁多,其性能和用途也各不相同,我们如何加以分类,便于应用?我们又怎样来衡量钢的性能?

### 一、什么是钢和铁

我们知道,世界上所有的物质都是由化学元素所组成,在自然界里至今已发现的一百多种元素中,约有四分之三是金属。由两种或两种以上的元素组成的具有金属特性的物质称为合金。(主要由两种元素组成的称为二元合金,由三种元素组成的称为三元合金。)我们在生产中经常遇到的钢铁材料中,有铸铁、碳钢、纯铁等名称,它们都是由铁元素为主体,加上碳和其他元素所组成的具有金属特性的物质,统称为铁碳合金,其中铁和碳二种元素起主导作用。

铁和碳组成合金时,由于含碳量的不同,性能上有极大的差别。例如工业上用的铸铁是含碳量大于2.0%的铁碳合金,它的强度不高,性质较脆,不能锻打,只能铸造,用于受拉应力和冲击力较小的部件如机床床身、机件壳体等。含碳量在0.02~2.0%之间的铁碳合金称为钢,钢有良好的可锻性,可通过锻打成形或轧制成材,并能通过改变钢的含碳量和采用不同的加热及冷却条件(称为热处理),在很宽的范围内调节钢的机械性能,以适合各种用途的需要。所以钢广泛地用于各种受力的结构件和机械另件。根据钢的含碳量不同,习惯上把含碳<0.25%的称为低碳钢,含碳0.25~0.6%的叫中碳钢,含碳>0.6%(一般在0.6~1.3%范围)的叫高碳钢,这些统称为碳钢。

所谓纯铁即工业意义上的纯铁是指含碳量<0.02%,且其他元素极少的铁碳合金,例如

表 1—1 所列的成分。纯铁虽然有良好的塑性和韧性，但强度太低、太软。在工业上的用途有限(如制作磁铁芯等)。

表 1—1 纯铁的化学成分

名称 \ 杂质成分%	C	Si	P	S
电 解 铁 A	0.004	0.007	0.008	0.006
电 解 铁 B	0.013	0.003	0.02	0.001
阿 姆 可 铁	0.01	0.005	0.001	0.015

由上可知钢和铁从成分上的主要区别在于含碳量的不同。

钢中除含碳外，还含有其他元素，特意加入的称为合金元素，含有合金元素(例如Mn, Si, Cr, Ni, Mo等)的钢称为合金钢，按加入的合金元素总量的多少大致分为低合金钢(<5%)，中合金钢(5~10%)和高合金钢(>10%)。

非有意加入而残存在钢中的元素，称为杂质元素，通常有Mn, Si, S, P, N, O, H等，其中S和P是主要的有害杂质元素，对钢的质量有很大影响。根据杂质的含量，可把钢按质量等级分为三类：

普通钢，	$S \leq 0.055 \sim 0.065\%$ ，	$P \leq 0.045 \sim 0.085\%$ ，
优质钢，	$S \leq 0.03 \sim 0.04\%$ ，	$P \leq 0.035 \sim 0.04\%$ ；
高级优质钢，	$S \leq 0.02 \sim 0.03\%$ ，	$P \leq 0.03 \sim 0.035\%$ 。

钢是由生铁炼成的。不同的冶炼方法获得的钢的质量也不同，并直接影响到钢材的使用性能和焊接性能。例如普通钢一般是用转炉和大型平炉冶炼的，产量大，成本较低，但转炉钢质量较差，含氮、氧、磷及非金属夹杂物较多，冷脆倾向及时效敏感性大<sup>①</sup>，不宜用于重要的或低温工作的焊接构件，一般用作建筑材料或日常用具。平炉钢杂质较少，低温韧性较好，时效倾向低，可焊性好，用于较重要的金属结构，如焊接容器、桥梁、锅炉、船舶、车辆等。

大部分优质炭素钢和部分低合金钢也主要由平炉生产。电炉钢质量最好，成本亦最高，目前绝大部分合金钢，尤其是高合金钢都由电炉冶炼。合金钢都是优质钢或高级优质钢。

近年来发展的纯氧顶吹转炉钢，质量已可胜过平炉，且生产率高，正逐渐取代普通转炉及平炉。能生产低碳钢，低合金钢及部分合金钢。

按钢的脱氧方法及脱氧程度不同可分为沸腾钢、镇静钢及半镇静钢。这对钢材质量和焊接性能也有重要影响。所谓沸腾钢，是在出钢前未充分脱氧，钢液中保留相当数量的FeO，在浇注与凝固时，由于碳和FeO发生反应，钢液中不断析出CO，产生沸腾，故称沸腾钢。这种钢成材率高，但锭内分布有许多小气泡，偏析严重，钢锭中心区富集S, P, C，钢中气体含量较多，故冲击韧性低，冷脆倾向及时效敏感性较大，焊接性能也较差(易产生气孔和热裂缝)。所以不宜用于承受动载或严寒(-20°C以下)条件下工作的焊接结构。

镇静钢是钢液在浇注前经过充分脱氧，凝固时不沸腾，故称镇静钢。这种钢因为有集中缩孔(如图 1—1)，故成材率低，但含气体少，偏析程度小，质量较高。所以镇静钢用于制造

① 关于时效敏感性详见第二、五章。

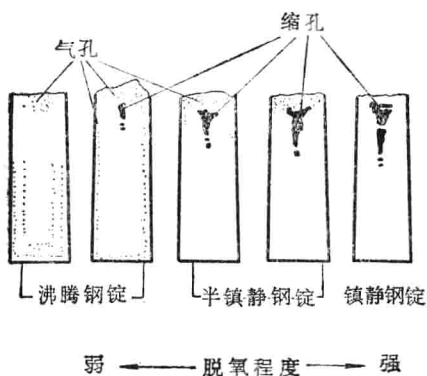


图 1-1 脱氧程度不同的钢锭剖面示意图

承受动载低温条件下工作的焊接结构，如锅炉、受压容器等。合金钢一般均为镇静钢。

半镇静钢的质量介于上述二者之间，成材率可达 90%，很有发展前途，许多国家用半镇静钢代替沸腾钢作为焊接结构用钢。

按钢的用途分类，钢材可分为：

### 1) 结构钢

① 工程钢：用作钢筋、钢架、钢轨、车辆、船舶、桥梁、容器等。这类钢大部分轧成型材，如角钢、槽钢、工字钢、钢板等。根据不同强度要求与用途有低碳钢、普通低合金高强度钢和超高强度钢等

等。在焊接生产中多数是采用这类钢材。

② 机器制造用钢——用于制造各种机器零件如齿轮、轴类等。一般都轧成圆钢、方钢、扁钢、线材等。包括调质钢，渗碳钢，弹簧钢，滚珠钢等。

2) 工具钢：用来制造各种工具。其中有刀具钢，模具钢和量具钢等。

3) 特殊性能钢：具有特殊物理和化学性能，如不锈钢、耐热钢、耐磨钢等。

关于各类钢的牌号表示方法，冶金部有统一规定，请参阅附录一。有关碳素结构钢的牌号、成分、性能及主要用途可参阅附录二。其他合金钢请参考《金属材料焊接》教材。

## 二、钢的常规机械性能

上面已经讲到，钢是金属材料中用途最广，用量最大的材料，这主要是由于它的性能适合各种用途的需要。一般金属材料的性能包括使用性能和工艺性能两个方面，使用性能是指机械性能（或称力学性能、包括强度、塑性、韧性等），物理性能（如熔点、导热性、热膨胀性、导电性、磁性等）及化学性能（抗氧化性、抗蚀性、耐酸性等）。工艺性能是指材料被加工制造时表现出来的各种性能，如焊接性能、锻造性能、铸造性能，热处理性能、切削加工性能等。在设计和制造某种产品选择材料时，必须全面考虑到使用性能和工艺性能两方面，不能片面追求使用性能而忽略工艺性能，否则将给生产造成困难。例如对于焊接产品来说，除了需满足所要求的机械性能外，还必须充分考虑钢材的焊接性能。此外在特定场合尚需满足特殊的使用要求，如化工容器就需满足抗蚀性的要求，此时的焊接性能还必须包括焊接以后不降低耐腐蚀性。

关于焊接性能如何评定，可焊性的意义等，将在《金属材料焊接》中专题讨论，这里仅就材料的机械性能包括那些主要指标及如何评定，作一简介。

### 1. 钢材的强度和塑性

我们已经知道，材料在静载荷下的强度和塑性可通过静拉伸试验测得。把一定形状和尺寸的试样置于拉伸试验机上，缓慢施加载荷，直至拉断，记录下载荷( $P$ )—试样变形量( $\Delta l$ )的关系曲线如图 1-2 所

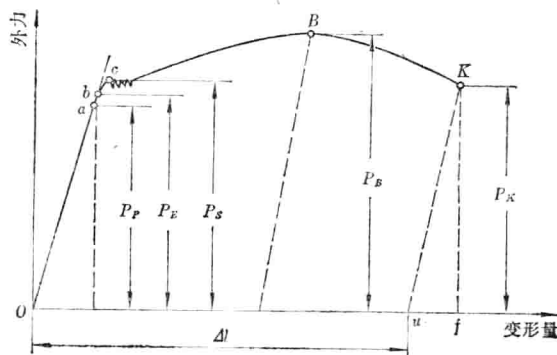


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

示。从曲线可以看到钢材受力后的变形过程，并可测得材料在静拉伸下的各项性能指标。

图 1—2 中，a 点的应力称比例极限

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)}$$

$F_0$ ——试样原始横截面积

b 点的应力称弹性极限

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)}$$

它表示不发生塑性变形(或保持弹性变形)的最大应力，弹性极限和比例极限对于弹性材料是重要的指标，对于一般结构材料主要有下面几个衡量指标。

屈服极限或屈服强度，即 c 点的应力， $\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$  (公斤力/毫米<sup>2</sup>)，表示开始发生塑性变形的最小应力，它反映材料抵抗微量塑性变形的能力。屈服强度是工程技术上的一个重要的力学性能指标，常作为设计计算的依据。但多数金属材料不象图 1—2 中的低碳钢那样有明显的屈服点，为了便于测量和比较，工程上规定以产生少量塑性变形(通常为 0.2%)时的应力值为“条件屈服强度”，以  $\sigma_{0.2}$  表示。

强度极限或抗拉强度，即 B 点的应力。

$$\sigma_b = \frac{P_B}{F_0} \text{ (公斤力/毫米}^2\text{)}$$

抗拉强度是材料在拉断前所能承受的最大应力值，超过此应力，材料就进入破断阶段，所以它表示材料抵抗断裂的能力。同时由于断裂是在大量塑性变形之后发生的，所以它也表示材料抵抗大量塑性变形的能力。

强度极限也是设计另件选择材料的重要依据。

塑性指标为延伸率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$ ，它们都反映了材料在破断前承受塑性变形的能力。它们虽然不能直接用来进行设计计算，但它们是衡量材料塑性好坏的重要指标。

延伸率

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \text{ ①}$$

$l_0$ ——原试样的标距长度。

$l_1$ ——拉断后试样的标距长度。

断面收缩率

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

$F_0$ ——试样原始横截面积。

$F_1$ ——试样断口处的横截面积。

生产上还常用“冷弯角”来衡量金属材料或焊接接头承受弯曲变形的能力，它也是塑性指标之一。

① 延伸率的数值与试样的尺寸和形状有关系，通常有  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$  两种：

$\delta_5$  表示标距长度为试样直径 5 倍时的延伸率；

$\delta_{10}$  表示标距长度为试样直径 10 倍时的延伸率。

冷弯角  $\alpha$  用冷弯试验测定, (如图 1-3a), 在室温下把金属试板在一定直径  $D$  的压头下进行弯曲, (压头直径根据试样板厚  $\delta$  来选取, 例如  $D=2\delta$ ), 当试板被弯曲到出现第一条裂缝时的角度定为冷弯角  $\alpha$ 。

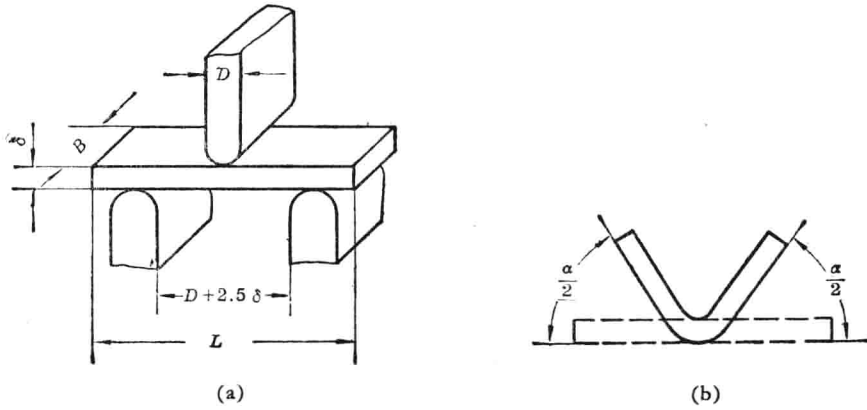


图 1-3 冷弯试验和冷弯角

弯曲角度越大, 试样在出现裂纹前的变形也越大, 即塑性越好。当冷弯角等于  $180^\circ$  时塑性最好。焊接接头的冷弯试验, 常以在一定弯曲角度下 (例如  $\alpha=120^\circ$  或  $180^\circ$ ) 是否出现裂缝为检验标准。

## 2. 钢的硬度

用一把钢刀, 很容易在铜块上刻划出痕迹, 但在玻璃上却不行, 然而用金刚石, 则很容易刻划玻璃。所以我们说钢比铜“硬”然而比起金刚石来又是“软”的了。由此可见“硬”和“软”是相对的, 生产上为了比较各种材料的软硬程度, 可以用规定的硬物以一定的载荷压入材料表面, 测量压痕的大小即可衡量材料的硬度。压痕越小, 表示抵抗硬物压陷的能力越大, 即材料对塑性变形的抗力越大, 也就是硬度越高。许多金属材料的硬度与其抗拉强度之间有着近乎正比的关系, 所以生产上常常用测得的硬度值来近似地估算强度指标。此外硬度还反映了材料的耐磨性, 硬度高耐磨性好, 但切削加工性能差。在焊接生产中硬度还可简略地衡量材料的可焊性。因此测定硬度在生产上有实用意义。加上各种硬度试验方法简便迅速, 又不破坏被测工件, 所以应用很广。

硬度的测定方法很多, 常用的有布氏硬度, 洛氏硬度和维氏硬度。

### (1) 布氏硬度

布氏硬度是用一定直径 ( $D$ ) 的淬硬钢球加上一定大小的载荷  $P$ , 使钢球压入被测金属的表面, 保持一定时间 (详见 GB-231-63) 后去除载荷, 如图 1-4, 以压力  $P$  和压痕面积  $F$

的比值表示金属的硬度, 用  $HB$  表示, 即  $HB = \frac{P}{F}$ 。

$$\left( F = \pi D \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \right)$$

实际试验时系测量压痕的直径  $d$  然后查表求得布氏硬度值。

布氏硬度只适用于硬度较低 ( $HB < 450$ ) 的材料, 这是由于淬硬钢球压入硬度高的被测材料表面时钢球本身将产生变形, 因此影响测量的准确性。

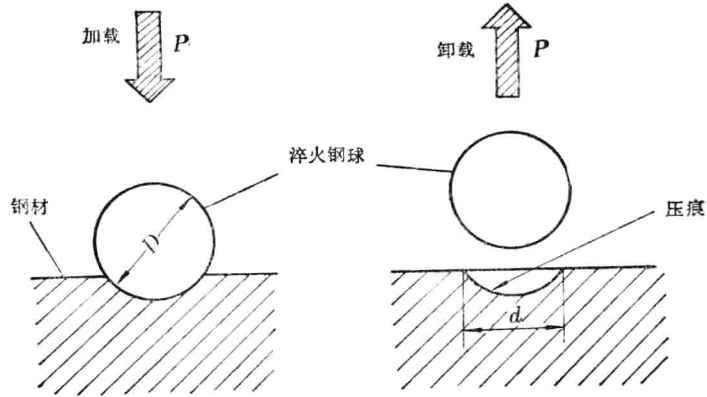


图 1-4 布氏硬度试验示意图

## (2) 洛氏硬度

洛氏硬度的特点是以顶角为  $120^\circ$  的金钢石圆锥体作为压头，测量压痕的深度作为硬度值。测量时先加 10 公斤的初载，使压头与钢材表面有良好的接触，此时得一浅的压痕  $h_0$ （此值不计算硬度值，将刻度调整至零位）（如图 1-5a），然后再加载荷（连初载共达 150 公斤力），得一压痕深度  $h_1$ ，当将主载卸去后（只剩初载），压头弹回少许，而得一最终深度  $h$ （见图 1-5b），以此值换算成钢材的洛氏硬度值。（ $HRC = 100 - \frac{h}{0.002}$ ）通常可从刻度盘的 C 标尺上直接读出洛氏硬度数值，写作 HRC。

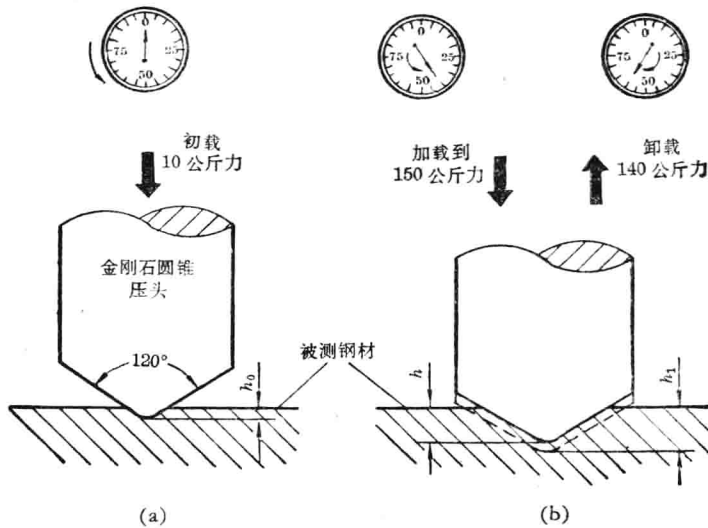


图 1-5 洛氏硬度试验示意图

对于较软的材料，压头用 1/16 吋之钢球，载荷为 100 公斤力，从 B 标尺读数，测得的洛氏硬度值记为 HRB。

对于有薄硬层或高硬度金属（如表面淬火的材料或硬质合金）测量时，用金钢石锥体作为压头，加 60 公斤力载荷，测得的硬度值用 HRA 表示。

洛氏硬度试验操作迅速简便，硬度值可以直接读出，不必测量压痕大小再查表，而且其



压痕较布氏硬度的小，不伤工作表面，因此在生产中得到广泛应用。缺点是洛氏硬度试验测量极软到极硬材料时，必须选择不同的标尺，且由于压痕不存在相似关系，不同标尺的硬度值之间无法直接比较。

### (3) 维氏硬度

其测量原理与布氏硬度相同，只是压头改用金钢石，制成锥面夹角为  $136^\circ$  的四方角锥体，试验时系测量方形压痕的两对角线长度，取其平均值，然后查表求得维氏硬度值，用 HV 表示(见图 1-6)。

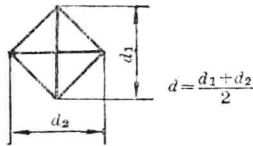
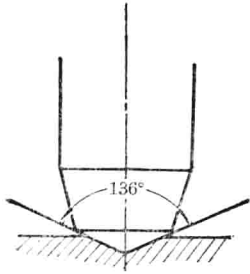


图 1-6 维氏硬度试验压头及压痕示意图

维氏硬度试验的载荷可任意选择，根据工件厚薄，材料硬度范围和硬度层深度来合理选定。维氏硬度试验测量的硬度范围广，对软的和硬的材料都能适应，特别适宜于测定焊接热影响区的硬度值分布，或测定很薄材料和表面层的硬度值。

三种硬度的换算以及硬度与强度的换算可参考附录三。

### (4) 显微硬度

布氏、洛氏、维氏硬度都反映了金属宏观的平均硬度值，对于金属微观组织的硬度须用显微硬度计测量，显微硬度计是带有显微镜的硬度计，其测量原理与维氏硬度相同，但载荷较小，为  $2\sim 200$  克，载荷的数值根据试样中微观组织的大小、硬度的高低来决定。显微硬度也用 HV 表示。

### 3. 钢的冲击韧性

许多机器另件和焊接构件在工作时，除受静力作用外，往往还承受动力的作用（即冲击载荷），故必须考虑到钢材抵抗冲击载荷的能力。冲击载荷不仅是力的作用，还有作用时的速度问题，所以冲击载荷是一个能量载荷，材料抵抗这种载荷的能力通常用冲击弯曲试验来测定。把一个规定形状和尺寸的试样(试样中间通常开一个 2 毫米深的“U”形缺口)放到支座上，用一个一定重量的摆锤自一定高度从缺口的正后方进行冲击。如图 1-7 所示测出冲断试样所消耗的功称为冲击功  $A_k$ ，除以缺口处的试样截面积  $F$ ，得冲击韧性值简称冲击值，即  $a_k = \frac{A_k}{F}$  (单位：公斤力·米/厘米<sup>2</sup>)<sup>①</sup>

冲断试样时单位面积所消耗的功越大，即冲击韧性值  $a_k$  越高，表示材料的冲击抗力越好。材料韧性高，反之表示材料韧性低即脆性大。

由于评定材料的冲击抗力是一个甚为复杂的问题，不仅由材料本身的性质所决定，还受冲击载荷的形式。大小、加载速度，试样和缺口的形状尺寸等多

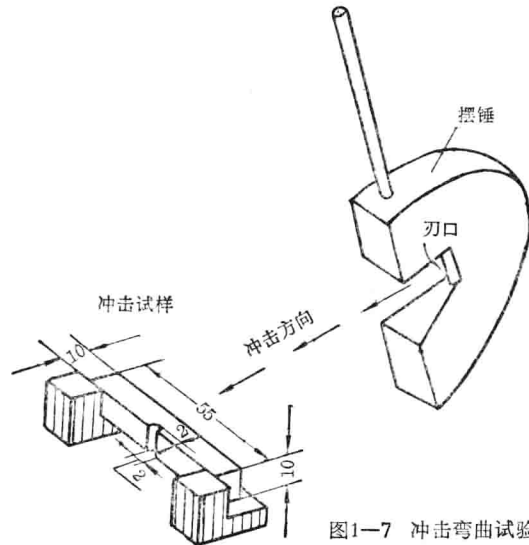


图 1-7 冲击弯曲试验示意图

① 英制：冲击功单位用英呎·磅力，面积单位用英吋<sup>2</sup>。