



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

金属学及热处理

范培耕 主编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

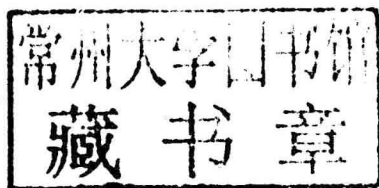


普通高等教育“十三五”规划教材

金属学及热处理

主 编 范培耕

副主编 陈 刚 王泽民



北 京

冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书内容包括金属的力学性能、金属学基础理论、热处理原理与工艺、金属材料四个部分,共10章。金属的力学性能介绍了金属材料的主要力学性能指标;金属学基础理论介绍了金属的晶体结构、纯金属的结晶、二元合金相图、铁碳合金相图、金属的塑性变形与再结晶理论等内容;热处理原理与工艺介绍了热处理的基本原理及常规的热处理工艺;金属材料部分介绍了工业用钢、铸铁、有色金属及合金。本书内容贴近当今国内外生产实际,应用性和实用性较强。

本书可作为高等院校冶金、材料类专业的教学用书,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属学及热处理/范培耕主编. —北京:冶金工业出版社, 2017. 1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7427-0

I. ①金… II. ①范… III. ①金属学—高等学校—教材
②热处理—高等学校—教材 IV. ①TG1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第016171号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 赵亚敏 杨 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 彭子赫

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7427-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017年1月第1版,2017年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;18.75印张;452千字;287页

38.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

“金属学及热处理”是冶金、材料类专业的一门专业基础课程，学习该课程之前，工科类本科院校的学生首先应先修“物理化学”和“工程力学”等课程；其次应已经完成金工实习这一实践环节，对冶金、金属材料成型和热处理等生产环节具有一定的感性认识。

本书根据工科类本科院校冶金、材料类专业教学计划编写而成，主要内容包括金属的力学性能、金属学基础理论、热处理原理与工艺、金属材料四个部分，共10章。本书内容可适合40~64学时的课程教学。

本书由重庆科技学院冶金与材料工程学院范培耕担任主编。具体编写分工为：第1~5章由范培耕编写，第6、7、10章由重庆科技学院冶金与材料工程学院陈刚编写，第8、9章由上海应用技术学院材料工程系王泽民编写。上海应用技术学院陈慧芬老师对本书进行了审阅。此外，本教材的编写还得到了重庆科技学院冶金与材料工程学院曾文、黄佳铭、刘形等同志的大力支持和帮助。本书的出版得到了重庆科技学院冶金与材料工程学院的相关资助，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，且时间仓促，若有不妥之处，希望读者提出宝贵的意见。

作 者

2016年10月

目 录

1 金属材料的力学性能	1
1.1 强度指标	1
1.1.1 比例极限	2
1.1.2 弹性极限	2
1.1.3 屈服强度	2
1.1.4 抗拉强度	3
1.1.5 弹性模量	3
1.1.6 疲劳强度	3
1.2 塑性指标	4
1.2.1 伸长率	4
1.2.2 断面收缩率	4
1.3 硬度指标	5
1.3.1 布氏硬度	5
1.3.2 洛氏硬度	6
1.4 韧性指标	8
1.4.1 冲击试验原理	8
1.4.2 冲击韧性值的影响因素	8
习题与思考题	11
2 金属的晶体结构	12
2.1 金属	12
2.1.1 金属的特性	12
2.1.2 金属原子的结构特点	12
2.1.3 金属原子间的结合方式 (金属键)	12
2.2 金属的晶体结构	14
2.2.1 晶体结构的基础知识	14
2.2.2 金属中常见的三种晶体结构	15
2.2.3 晶体结构特征的几个参数	18
2.2.4 晶面指数和晶向指数	19
2.2.5 晶体的各向异性	23
2.3 金属的实际晶体结构	24
2.3.1 点缺陷——空位和间隙原子	24

2.3.2 线缺陷——位错	26
2.3.3 面缺陷——晶界和亚晶界	27
2.4 金属中的原子扩散	28
2.4.1 固态金属中原子扩散的方式	29
2.4.2 扩散速度的主要影响因素	30
习题与思考题	31
3 纯金属的结晶	32
3.1 结晶的热力学条件	32
3.2 液态金属的性质和结构	33
3.2.1 液态金属的性质	33
3.2.2 液态金属的结构	34
3.3 金属结晶的现象	35
3.3.1 金属结晶的过冷现象	35
3.3.2 金属结晶的一般过程	36
3.4 晶核的形成	37
3.4.1 均匀形核（自发形核）	37
3.4.2 非均匀形核（非自发形核）	39
3.4.3 形核率与过冷度的关系	42
3.5 晶核的长大	44
3.5.1 晶体长大的驱动力	44
3.5.2 液-固界面的微观结构	44
3.5.3 液-固界面前沿液体中的温度梯度	45
3.5.4 晶体生长机制和生长速率	46
3.5.5 晶体的形貌	48
3.5.6 过冷度对晶体长大的影响	50
3.5.7 结晶过程中结构缺陷的形成	50
3.6 金属结晶后的晶粒大小	52
3.6.1 晶粒度对金属性能的影响	52
3.6.2 晶粒度的决定因素	53
3.6.3 晶粒度的控制方法	53
3.7 铸锭的结晶及组织	54
3.7.1 铸锭的宏观组织	55
3.7.2 三晶带的形成	55
3.7.3 结晶时的体积变化	57
3.7.4 气泡的形成	58
3.7.5 夹杂物的形成	59
3.8 金属的同素异晶转变	59
习题与思考题	60

4 金属的塑性变形与再结晶	61
4.1 金属的塑性变形	61
4.1.1 单晶体的变形	61
4.1.2 多晶体的塑性变形	67
4.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	68
4.2.1 对性能的影响	68
4.2.2 对组织结构的影响	69
4.2.3 产生残余应力	70
4.3 冷变形金属在加热时的变化	71
4.3.1 回复	71
4.3.2 再结晶	72
4.3.3 晶粒长大	73
4.3.4 影响再结晶后晶粒大小的因素	74
4.3.5 冷塑性变形金属的热处理	75
4.4 金属的热塑性变形	76
4.4.1 金属的热加工与冷加工的本质区别	76
4.4.2 热加工对钢组织和性能的影响	77
习题与思考题	78
5 二元合金的相结构与结晶	79
5.1 基本概念	79
5.2 固态合金中的相结构	79
5.2.1 固溶体	80
5.2.2 金属化合物	87
5.3 二元合金相图的基本知识	91
5.3.1 二元合金相图的表示方法	91
5.3.2 二元合金相图的测定方法	92
5.3.3 相律	93
5.3.4 平衡相的定量法则——杠杆定律	94
5.4 匀晶相图	96
5.4.1 匀晶相图分析	96
5.4.2 合金的平衡结晶及其组织	97
5.4.3 结晶过程中溶质组元重的分配和分配系数	99
5.4.4 合金的非平衡结晶及显微偏析	99
5.4.5 区域熔炼（提纯）	102
5.4.6 成分过冷在固溶体结晶中的作用	102
5.4.7 合金的性能与成分的关系	104
5.5 共晶相图	105

5.5.1	相图分析	105
5.5.2	合金的平衡结晶及其组织	106
5.5.3	合金非平衡结晶及其组织	111
5.5.4	密度偏析和区域偏析	113
5.5.5	合金性能与成分的关系	114
5.6	包晶相图	115
5.6.1	相图分析	115
5.6.2	合金的平衡结晶及其组织	116
5.6.3	合金的非平衡结晶及其组织	118
5.6.4	包晶转变的细化晶粒作用	119
5.7	形成金属化合物的相图	119
5.7.1	形成稳定化合物的相图	120
5.7.2	形成不稳定化合物的相图	121
5.8	具有固态相变的相图	122
5.8.1	具有同素异晶转变的相图	122
5.8.2	具有共析转变的相图	123
5.8.3	具有包析转变的相图	123
	习题与思考题	124
6	铁碳合金相图	125
6.1	铁碳合金的基本相	125
6.1.1	铁素体	125
6.1.2	奥氏体	126
6.1.3	渗碳体	126
6.2	相图分析	127
6.2.1	包晶转变线	128
6.2.2	共晶转变线	128
6.2.3	共析转变线	129
6.2.4	其他重要曲线	129
6.3	典型合金的结晶及其组织	130
6.3.1	工业纯铁的结晶过程及组织转变	130
6.3.2	共析钢(碳含量0.77%)的结晶过程及组织转变	131
6.3.3	亚共析钢的结晶过程及组织转变	132
6.3.4	过共析钢的结晶过程及组织转变	134
6.3.5	共晶白口铸铁(含4.3%C)的结晶过程及组织转变	135
6.3.6	亚共晶白口铸铁的结晶过程及组织转变	136
6.3.7	过共晶白口铸铁的结晶过程及组织转变	136
6.4	碳含量对铁碳合金平衡组织和性能的影响	138
6.4.1	碳含量对平衡组织的影响	138

6.4.2 碳含量对力学性能的影响	139
6.5 铁碳相图的运用	140
6.5.1 在钢铁选材方面的应用	140
6.5.2 在制订热加工工艺方面的应用	140
习题与思考题	141
7 钢的热处理	142
7.1 概述	142
7.2 钢在加热时的转变	142
7.2.1 共析钢的奥氏体化	143
7.2.2 影响奥氏体化的因素	145
7.2.3 奥氏体晶粒的长大	146
7.3 钢在冷却时的转变	148
7.3.1 过冷奥氏体等温转变	149
7.3.2 影响奥氏体等温转变的因素	157
7.3.3 过冷奥氏体的连续冷却转变	158
7.3.4 马氏体转变	161
7.4 钢的退火与正火	165
7.4.1 退火	165
7.4.2 正火	168
7.5 钢的淬火	169
7.5.1 淬火工艺	169
7.5.2 淬火方法	172
7.5.3 淬火缺陷及防止方法	174
7.6 钢的回火	175
7.6.1 回火的目的	175
7.6.2 淬火钢的回火转变	176
7.6.3 回火转变产物的组织与性能	177
7.6.4 回火的种类及应用	180
7.6.5 回火脆性	181
7.7 钢的淬透性	182
7.7.1 淬透性的概念	182
7.7.2 影响淬透性的因素	183
7.7.3 影响淬透层深度的因素	183
7.7.4 淬透性的测定与表示方法	184
7.7.5 淬透性的实际意义	185
7.8 钢的表面热处理	186
7.8.1 表面淬火	186
7.8.2 化学热处理	188

习题与思考题	195
8 工业用钢	196
8.1 钢中的合金元素及作用	196
8.1.1 合金元素在钢中的存在形式	196
8.1.2 合金元素对铁碳合金相图的影响	200
8.2 钢的分类及牌号	204
8.2.1 钢的分类	204
8.2.2 钢材的分类	205
8.2.3 钢铁产品的牌号	206
8.3 工程结构用钢	208
8.3.1 碳素结构钢 (GB/T 700—2006)	208
8.3.2 优质碳素结构钢 (GB/T 699—1999)	210
8.3.3 低合金高强度结构钢 (GB/T 1591—2008)	211
8.4 机械零件用钢	214
8.4.1 调质钢	215
8.4.2 渗碳钢	216
8.4.3 弹簧钢	219
8.4.4 滚动轴承钢	222
8.5 工具钢	225
8.5.1 刀具钢	225
8.5.2 模具钢	232
8.5.3 量具钢	234
8.6 特殊性能钢	235
8.6.1 不锈钢	235
8.6.2 耐热钢	240
8.6.3 耐磨钢	241
习题与思考题	242
9 铸铁	243
9.1 铸铁的石墨化过程及分类	243
9.1.1 铸铁的石墨化过程	243
9.1.2 铸铁的分类	244
9.2 灰口铸铁	245
9.2.1 灰口铸铁的化学成分、组织和性能	245
9.2.2 灰口铸铁的牌号和用途	246
9.2.3 影响灰口铸铁组织与性能的因素	248
9.2.4 灰口铸铁的孕育处理	248
9.2.5 灰口铸铁的热处理	249

9.3 球墨铸铁	249
9.3.1 球墨铸铁的化学成分、组织和性能	249
9.3.2 球墨铸铁的牌号和用途	250
9.3.3 球墨铸铁的热处理	250
9.4 蠕墨铸铁	252
9.4.1 蠕墨铸铁的化学成分与金相组织	252
9.4.2 蠕墨铸铁的牌号、性能与用途	252
9.5 可锻铸铁	253
9.5.1 可锻铸铁的化学成分、组织及石墨化退火	253
9.5.2 可锻铸铁的牌号、性能及用途	254
9.6 特殊性能铸铁	254
9.6.1 耐磨铸铁	255
9.6.2 耐热铸铁	255
9.6.3 耐蚀铸铁	255
习题与思考题	256
10 有色金属及合金	257
10.1 铝及铝合金	257
10.1.1 纯铝	257
10.1.2 铝合金的分类	257
10.1.3 铝合金强化	259
10.1.4 变形铝合金	261
10.1.5 铸造铝合金	264
10.2 镁及镁合金	268
10.2.1 纯镁	268
10.2.2 镁合金	268
10.3 铜及铜合金	275
10.3.1 纯铜	275
10.3.2 黄铜	276
10.3.3 青铜	278
10.4 钛及钛合金	280
10.4.1 纯钛	280
10.4.2 钛合金	280
10.4.3 工业用钛合金	282
10.4.4 钛合金的热处理	283
习题与思考题	286
参考文献	287

研究金属及合金的性能、组织结构、化学成分之间的关系及正确和合理使用材料，需了解有关金属材料相关力学性能的基本概念。

一般而言，可以把金属材料的力学性能分为使用性能和工艺性能，其中使用性能包括力学性能、物理性能、化学性能等，工艺性能则随着制造工艺的不同可分为可锻性、铸造性、焊接性及切削加工性等。

力学性能是设计和制造机器零件最重要的指标，也是控制材料质量的重要参数。每种金属材料，除了应对其成分范围作规定外，还应对其力学性能指标作出必要的规定。制造各类构件的原材料都应满足规定的相应性能指标。所谓力学性能是指金属材料在载荷作用下抵抗破坏的能力。金属材料的力学性能包括：弹性、强度、塑性、硬度、冲击韧性等。

1.1 强度指标

在外力作用下，材料抵抗变形和断裂的能力称为强度。为了便于比较各种材料的强度，常用材料单位面积上的抗力来表示，称为应力，即

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

式中 σ ——应力，Pa；

F ——外力，N；

S_0 ——材料横截面积， m^2 。

测定金属材料强度、塑性的主要方法是进行拉伸试验。拉伸试验需要在拉伸试验机上进行。低碳钢试棒的拉伸过程具有典型意义。方法是将拉伸试样（图 1-1）放在拉伸试验机上拉伸，便可获得图 1-2 所示的应力-应变关系曲线，通常称为拉伸曲线。在拉伸曲线上可以确定相关的强度性能指标。

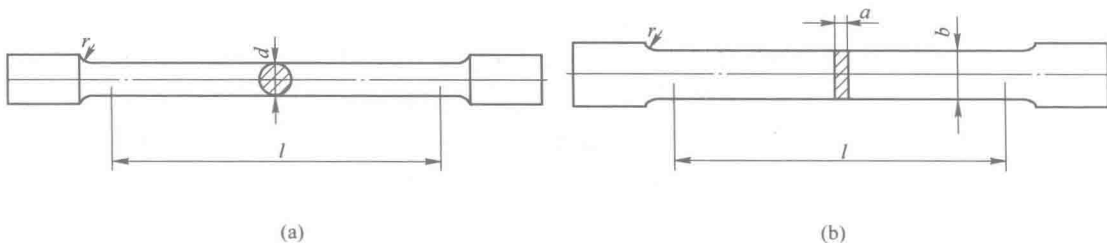


图 1-1 拉伸试样

(a) 圆形截面试样；(b) 矩形截面试样

1.1.1 比例极限

当外力小于 F_p 时, 试棒的伸长与外力的增加成正比关系 (符合虎克定律), 当外力去除后, 变形即随之消失, 所以在这阶段的变形是弹性变形, F_p 是能够保持正比关系的最大外力。材料承受的外力与变形成正比时的最大应力称比例极限, 即

$$R_p = \frac{F_p}{A}$$

式中 R_p ——比例极限;

F_p —— p 点时的外力, 即外力与变形成正比时的最大外力, N;

A ——试棒原始截面积 (见图 1-1 (a)), m^2 。

1.1.2 弹性极限

在图 1-2 中 e 点以前, 若卸去载荷, 试样能恢复原状, 但在 pe 部分已不成直线而略有弯曲。当外力超过 F_p 后, 试样的伸长不再与外力成正比关系; 当外力去除后, 变形仍然立即消失。材料在外力作用下产生弹性变形时所能承受的最大应力称弹性极限 (R_e), 即

$$R_e = \frac{F_e}{A}$$

式中 F_e ——对应于 e 点所加的外力, N。

弹性极限较比例极限稍大一些, 但两者颇为接近。

1.1.3 屈服强度

当载荷增加至超过 F_e 后, 试棒发生塑性变形, 外力达到 F_s (单位为 N) 时, 曲线出现一个小平台 es 。此平台表明不增加载荷, 试棒继续变形, 材料已被屈服, 以致失去抵抗外力的能力。试棒产生屈服时的应力称为材料的屈服强度或屈服极限 (R_{el}), 即

$$R_{el} = \frac{F_s}{A}$$

很多金属材料, 如大多数合金钢、铜合金以及铝合金的拉伸曲线不出现平台; 脆性材料如普通铸铁、镁合金等甚至在断裂之前不发生塑性变形。因此, 工程上规定将试样发生某一微量塑性变形 (0.2%) 时的应力作为该材料的屈服强度, 称为条件屈服强度, 并以 $R_{e0.2}$ 表示。要求严格时也可规定为 0.1%、0.05% 的变形量, 并相应以符号 $R_{e0.1}$ 、 $R_{e0.05}$ 表示。

大多数机器零件和工程结构的构件, 常因过量的塑性变形而失效, 所以一般零件都不允许产生塑性变形, 因此材料的屈服强度是机械零件及构件设计时的主要依据。屈服强度也是评定金属材料质量的重要力学性能指标。

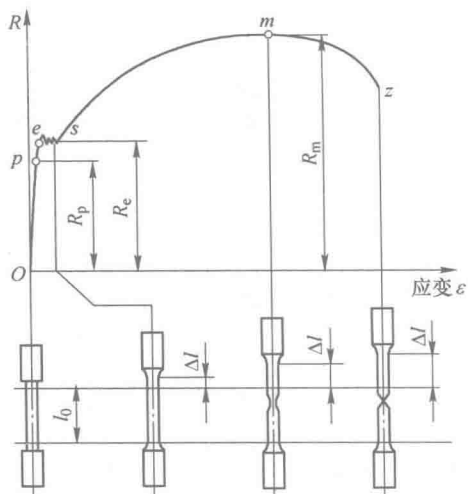


图 1-2 低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

1.1.4 抗拉强度

试棒在屈服时,由于塑性变形产生加工硬化(关于塑性变形和加工硬化现象将在本书后面章节讨论),所以只有载荷继续增大,变形才能继续增加,直至增至最大载荷 F_b 。拉伸曲线的这一阶段,试棒沿整个长度均匀伸长,当载荷达到 F_b 后,试棒就在某薄弱部分形成“缩颈”现象,此时不增加载荷,试棒也会发生断裂。 F_b 是试棒所能承受的最大外力,相应的应力就是材料的抗拉强度,又称强度极限(R_m),即

$$R_m = \frac{F_b}{A}$$

抗拉强度反映了材料在最大均匀变形时的最大抗力,表征材料在拉伸条件下所能承受的最大载荷的应力值,它是设计和选材的主要依据之一。

屈服强度与抗拉强度的比值称为屈强比。屈强比愈小,工程构件的可靠性愈高,即使超载荷也不至于马上断裂,但此值太小时,材料强度的有效利用率太低。

1.1.5 弹性模量

在图1-2中,试棒在 O_p 阶段所受应力 σ 和产生的应变 ε 之间服从虎克定律,即

$$\sigma = E\varepsilon$$

E 称为弹性模量,应变是指单位长度的变形量,即 $\varepsilon = \Delta L/L_0$ 。弹性模量 E 是拉伸曲线上弹性阶段的斜率,它是衡量材料产生弹性变形难易程度的指标。材料的弹性模量愈大,则使其产生一定量弹性变形的应力值也愈大,所以工业上也常称之为材料的刚度。

1.1.6 疲劳强度

某些机器零件,如轴、弹簧等,在交变载荷长期作用下,常常是在工作应力低于屈服极限的情况下突然破坏的。材料在多次交变载荷作用下的破坏现象,称为疲劳。交变载荷可以是载荷大小交变、方向交变,或同时改变大小和方向。

金属材料的疲劳破坏过程首先在其薄弱地区,如在应力集中或缺陷(划伤、夹渣、显微裂纹等)处产生裂纹,这种微细裂纹是疲劳源,而且一般出现在零件表面上,形成疲劳扩展区。当此区达到某一尺寸时,零件就在甚至低于屈服极限的应力下突然脆断。最终的破断区称为瞬间破坏区。图1-3是典型断口三个区域的示意图。

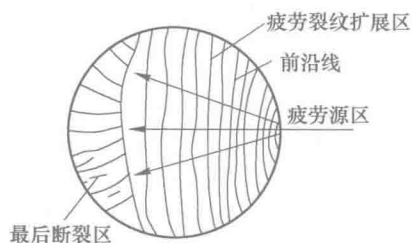


图 1-3 典型断口三个区域的示意图

测定材料的疲劳强度时,要用较多的试样,在不同交变载荷下进行试验,作出疲劳曲线,如图1-4所示。由该图可见,循环次数增加,应力降低,当应力降到某一值后,疲劳曲线变成水平直线,这意味着材料可以经受无限次循环载荷而不发生断裂疲劳。把试样承受无限次应力循环或达到规定的很多次循环不断裂的最大应力,称为疲劳强度或疲劳极限。对在弯曲循环载荷下测定的疲劳强度用符号 σ_{-1} 表示。

图1-4所示是钢铁材料的疲劳曲线,在试验循环数达到 10^7 次时,出现水平直线,所

以对于钢铁材料,把循环次数达到 10^7 次时的最大应力称为疲劳强度。有色金属和合金的疲劳曲线不出现水平直线,因此工程上规定循环数到 10^8 时的最大应力称为它们的疲劳强度。

材料的 σ_{-1} 和 σ_b 是紧密相关的,对钢来说其关系为经验公式 $\sigma_{-1} = (0.45 \sim 0.55) \sigma_b$, 由此可见,材料的疲劳强度随其强度极限增高而增大。

零件的疲劳强度除了取决于材料的成分及其内部组织外,还与零件的表面状态有关。表面应力集中(如损伤、腐蚀斑点等)会使疲劳强度大大降低。提高零件疲劳强度可采用如下的方法:设计上使零件的断面避免出现锐角、缺口,以减小应力集中;降低零件表面粗糙度;尽可能减少各种热处理缺陷(如脱碳、氧化、淬火裂纹等);采用强化表面处理如化学热处理、表面淬火、喷丸、表面滚压等,使零件表面产生残余应力,抵消一部分拉应力可以显著提高零件的疲劳强度。

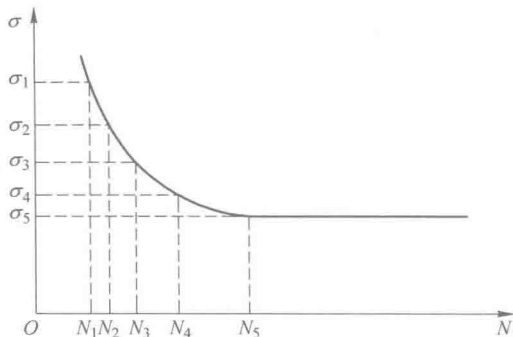


图 1-4 疲劳曲线

1.2 塑性指标

塑性是指金属材料在载荷作用下产生塑性变形(永久变形)而不破坏的能力。评定材料塑性的指标通常是用拉伸试验时的试棒伸长率和断面收缩率来表示。

1.2.1 伸长率

伸长率用下式确定:

$$A_1 = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_0 ——试棒原标距长度;

L ——拉断后试棒的长度。

所以伸长率是试样拉伸后的相对伸长量。

在材料手册中 δ_5 和 δ_{10} 分别表示 $L = 5d$ 和 $L = 10d$ (d 为试棒的直径)两种不同长度试棒测定的伸长率。 L 为试棒的均匀伸长和产生细颈后伸长的总和。相对来说,短试棒中细颈后伸长量所占的比例大,故同一材料的 δ_5 和 δ_{10} 值是不同的, δ_5 的值较大,而 δ_{10} 的值较小,例如钢材的 δ_5 大约为 δ_{10} 的 1.2 倍,所以只有相同符号的伸长率才能相互比较。

1.2.2 断面收缩率

断面收缩率 Z 用下式求得:

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

式中 A_0 ——试棒原来的截面积;

A_1 ——试棒断后细颈处的截面积。

所以断面收缩率是试样断裂后截面的相对收缩值。由于断面收缩率不受试棒标距长度的影响，因此它能够反映材料的塑性。

A_1 和 Z 都是材料的塑性指标，它们的值越大，材料的塑性越好。例如：工业纯铁 $A_1 = 40\%$ ， $Z = 80\%$ ；而45号钢的 $A_1 = 20\%$ ， $Z = 60\%$ ，这些数据表明工业纯铁的塑性比45号钢要好。

1.3 硬度指标

硬度是指材料表面抵抗塑性变形或断裂的能力。硬度值的物理意义随试验方法不同而异，在应用广泛的压入法硬度试验中，硬度为材料表面抵抗其他物体压入的能力。

工业生产上常用的硬度试验方法有以下几种。

1.3.1 布氏硬度

布氏硬度试验是用一定载荷 P ，将直径为 D 的圆球压入被测材料表面（图1-5），保持一定时间后卸载，以载荷与压痕表面积 A 的比值，作为布氏硬度值，用HB表示。

在实际试验中，压痕深度 h 的测量比较困难，而测量压痕直径 d 比较方便，因此将上式中的 h 换算成 d 。图1-5中直角三角形的关系可求出：

$$\frac{1}{2}D - h = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

$$h = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

所以，HB值的计算式变为：

$$HB = \frac{F}{\pi Dh} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-1)$$

式中只有 d 是变量，只要在试验后测出压痕直径 d 就可以求得HB值。通常 F 以kgf（1kgf=9.8N）计， D 与 d 以mm计，所以布氏硬度的单位为kgf/mm，但一般都不标出。布氏硬度值越高，材料越硬。由于计算比较麻烦，生产中可用钢球直径 D 与HB值的对照表，用目测显微镜读出压痕直径 d 后，直接查表就可获得HB硬度值。

在工业生产中所使用的金属有硬有软，工件有薄有厚，有大有小，如果只采用一种载荷 F 和压球直径 D ，就会出现对硬材料合适，而对软材料不合适（因钢球压入太深，可能影响硬度值的正确性）；对厚的材料合适，对薄的材料可能发生压透的现象，因此，在生产中应采用大小不同的载荷和钢球直径。对于同一材料，当采用不同的载荷 F 和钢球直径 D 进行试验时，应得到同一布氏硬度值。要达到这一目的需要运用相似原理，即必须使 F 和 D 之间维持某一制约关系，以保证所得到的压痕形状保持几何相似的关系，也就是要保证所得的压入角 φ 都相等。 F 和 D 这一相互制约关系可以根据 φ 角保持不变的条件，将 φ 代入公式（1-1）中求出。

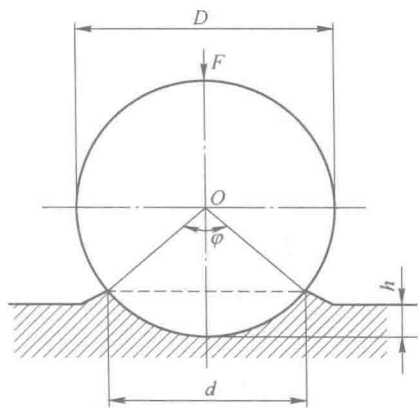


图1-5 布氏硬度试验原理

从图 1-5 可见, d 和 φ 的关系是: $\frac{D}{2} \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{d}{2}$ 或 $d = D \sin \frac{\varphi}{2}$

以此代入公式 (1-1), 得:

$$HB = \frac{F}{D^2} \left[\frac{2}{\pi \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right] \quad (1-2)$$

公式 (1-2) 说明, 假如压入角为一常数, 为使同一材料所得的 HB 值也为一常数, F/D^2 也应保持为常数, 故以不同的 P_1 、 P_2 、 \dots 及 D_1 、 D_2 、 \dots 代入式 (1-2) 时, 得出:

$$\frac{F_1}{D_1^2} = \frac{F_2}{D_2^2} = \dots = \frac{F_n}{D_n^2}$$

这就是 F 和 D 的制约关系。因此, 无论采用怎样大小的载荷和钢球, 只要能满足 $F/D^2 = \text{常数}$ 时, 则对同一材料而言, 所得的 HB 值是一样的; 对于不同的材料来说, 所得 HB 值也是可以进行比较的。

布氏硬度试验用钢球直径, 规定有 10mm、5mm 和 2.5mm 三种。 F/D^2 的比值规定有 30、10 和 2.5 三种, 根据金属种类及硬度不同进行选择。

在试验时, 钢球压入试样表面后, 为了使塑性变形能够充分进行, 载荷必须保持一定时间。布氏硬度试验时, 钢球直径 D 、载荷 F 与载荷保持时间, 应根据试样材料的种类、硬度、厚度选择。

试验后压痕直径的大小应在 $10.25D < d < 0.6D$ 范围内, 否则试验结果无效, 应换其他载荷或钢球直径重做试验。

布氏硬度试验的优点是: 压痕面积较大, 能反映较大范围的平均硬度; 具有很高的测量精度, 试验数据稳定, 数据重复性好。缺点是因所用压头为淬火钢球, 不能测试太硬的材料, 一般在 HB450 以上就不能使用, 布氏硬度试验通常用于铸铁、有色金属和未淬火的各种钢及其他材料, 应用范围很广。

1.3.2 洛氏硬度

洛氏硬度同布氏硬度一样, 也属压入硬度法, 但它不是测定压痕面积, 而是根据压痕深度来确定硬度值指标。

以规定的钢球 ($\phi 1.59\text{mm}$) 或以锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体为压头, 先加初载荷 F_0 (10kgf), 然后再加主载荷 F_1 (F_1 的大小取决于压头类型及试验的种类), 垂直压入试样表面后, 卸除主载荷, 在保留初载荷 F_0 的情况下, 用所测得的主载荷所引起的残留压入深度来确定硬度值, 如图 1-6 所示。

图 1-6 是洛氏硬度试验过程示意图。图 1-6 (a) 为压头与试样接触并施加初载荷 F_0 后, 压头压入试样表面深度为 h_0 时位置, 图 1-6 (b) 为施加主载荷 F_1 后, 压头深度为 h_1 时的位置; 图 1-6 (c) 为卸除主载荷, 但仍保持初载荷 F_0 时压头的位置。由于试样弹性变形的恢复, 压头位置提高到 h , 此时压头在主载荷作用下实际压入的深度为 h 。显然, h 值越小, 材料越硬; h 值越大, 材料越软。为了照顾习惯上数值越大硬度越高的概念, 用一个常数 K 与 h 的差值来表示硬度的大小, 并规定用每 0.002mm 为一个硬度单位值来进行刻度。因此洛氏硬度没有单位, 为一无单位数值, 洛氏硬度用 HR 表示。