

金属材料学基础

〔苏〕Ю. М. 拉赫金著

印 有 胜 译

李 见 校

辽宁科学技术出版社

87
TG14
47
3

金属材料学基础

印有胜译

BX-72/17

辽宁科学技术出版社

一九八六年六月

金属材料学基础

印有胜 译

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行 沈阳市印刷制夹厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 17 字数: 350,000

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

责任编辑: 马凤兰

责任校对: 苏太和

封面设计: 秀 中

印数: 1—9000

统一书号: 15288·199

定价: 3.35元

(委托出版)

说 明

本教科书共二十一章，前七章简明介绍了金属材料科学的基本原理。从第八章以后讲述了各种钢铁及有色金属的热处理理论和实践的基本知识。给出了关于结构钢，工具钢和耐热钢，特殊物理性能的合金以及广泛使用的基于钛、铜、铝、镁等金属的合金的大量资料。

本书的特点，对问题阐述简炼，清楚，内容较新。

此书可作为金属材料与热处理专业的工程技术人员参考书，更可以作为专科学校以及大学（非金属材料专业）的教学用书。

本书由沈阳工业大学印有胜同志翻译，由东北工学院金属材料系李见同志审校。

在本书出版过程中得到了沈阳市科技干部进修学院申建华同志的大力帮助，在此谨表谢意。

译 者

一九八四年十月于沈阳工业大学

英文译者的介绍

这本教科书的第一版在1974年用英文出版。本版是经彻底修改过的第二俄文版(1977)的英文译本(1979年)。

该版在晶格缺陷,相变热力学等学科中增添了新的材料;金属与合金的力学性能的说明也是新的,其中引用了在静载和周期性载荷条件下,结构强度和破断机制的一些最新概念。

本书是供加工与冶金工程专业的学生和冶金工程或机械工程学院中的有关人员使用的。对于冶金和机械制造厂的工程技术人员也有重要的价值。

本教科书论述了金属的晶体构造,并且也论述了结晶、塑性变形以及再结晶对金属结构的影响。分析了在合金中形成的相及二元和三元相图。本书提供了钢的热处理理论和实践的基础知识。给出了关于结构钢、工具钢、不锈钢、耐热钢、特殊物理性能的合金以及广泛应用的基于钛、铜、铝、镁等金属的合金的大量资料。

本书是由物理冶金学方面的著名科学家,教授IO.M.拉赫金著作的。

拉赫金教授是莫斯科公路工程学院的副校长和这个学院的物理冶金及热处理系的主任。他著过许多科学著作与教科书。他的大部分著作是表面硬化(化学热处理)方面的。他的专著《渗氮过程的物理学》以及《钢的氮化》(俄文)已受到了广泛的欢迎。拉赫金教授的教科书《工程物理冶金学及热处理》以及《工程物理冶金学》在工程学院的学生和教师中间享有很高的声誉。

1979尼科拉斯 维因斯坦

序 言

物理冶金学是研究金属和合金的成分、组织和性能间的关系以及在外部的影响下,例如在热的、化学的、机械的、电磁的和放射性的影响下,这些属性变化规律的一门科学。

首先确立钢的组织 and 性能之间的相关性的,是P. P. 安诺索夫(1797—1851),他是很早将显微镜用于抛光和腐刻的截面上研究金属组织,并且是19世纪在欧洲第一个作成大马士革钢的宝剑而著名的一位俄国冶金学家。

现在被称为物理冶金的金属科学研究的基础是由伟大的俄国冶金学家П. К. 切尔诺夫(1839—1921)奠定的。

在1868年出版的著作中,切尔诺夫指出:在固体状态下,当钢被加热(或冷却)到某一温度时(后来叫临界点),发生组织(相)转变,导致钢在性能上的急剧变化。在1878年,切尔诺夫阐述了金属结晶(凝固)的新理论的基础,这项工作和他后来的著作成为今天的物理冶金和热处理的基石。

另一著名的俄国科学家,苏联科学院院士H. C. 库尔纳阔夫在金属的研究中,首先广泛利用了物理—化学分析的方法(电学法、膨胀法、磁性法),在本世纪初他的工作对物理冶金的发展起了重要的作用。库尔纳阔夫和他的同事研究了大量的金属合金系,测绘了它们的相图,并且确立了各种合金的成分、组织和性能之间的关系。

X—射线结构分析的广泛应用,使金属合金和相的晶体结构可以得到确定,并且当合金用各种方法处理时,能够研究其结构的变化。这项重要的研究是由德国的劳埃和P. 德拜、苏联的Г. Б. 乌立夫、英国的W. H. 布拉格和W. L. 布拉格、瑞典的A. 韦斯特格林和G. V. 佛格梅门等进行的。

从1928年开始,人们对于合金中相变的理论给予越来越多的注意。这就使各种相变的机制得以建立,并且对于在工业实践中最重要的钢、硬铝和许多其它的合金的热处理的理论和实践问题的解决是有帮助的。在这个方面的工作中,尤其应该提到由苏联的C. C. 石坦恩别尔格和他的学派、美国的E. C. 贝茵和R. F. 梅尔以及德国的A. 沃勒尔所完成的研究。

苏联的Г. Б. 库久莫夫、A. A. 巴奇瓦尔、П. Б. 沙道夫斯基以及C. T. 康诺别耶夫斯基、英国的W. 休漠罗哲里和N. F. 莫特、美国的F. 塞茨等人的工作,在金属物理和物理冶金的发展中都具有伟大的意义。

苏维埃科学家H. A. 明克维奇、H. T. 古德错夫、A. A. 包奇瓦尔等对于钢的新的热处理和化学热处理技术以及在探索新成分的合金中都作出了有价值的贡献。

由于逐年提高的现代化工程的高标准以及对金属合金的性能和质量提出的更复杂和

更广泛的要求，使得物理冶金今天仍继续着它的发展过程。近年来，已经实行了一些钢的新热处理和化学热处理技术，已经建立了一些钢的合金化的基本原理，一些新的高强钢、耐蚀和耐热钢、超合金以及Al、Ti等金属为基础的合金已被引用到实践中。随着真空电子技术，半导体电子学和核能生产的发展，稀有金属及其合金在工程实践中正在得到越来越广泛的应用。

符号表

a, b, c = 点阵常数

$\perp$ = 正位错

$\perp$ = 负号位错

ρ = 位错密度

D = 扩散系数

R = 气体常数

T = 温度, K

Q = 激活能

ΔT = 过冷度

E = 系统的自由能

H = 系统的总能

S = 系统的熵

T_s = 平衡结晶温度

V = 冷却速度

R_c = 晶核的临界尺寸

R_N = 成核速度

RG = 晶体生长速度

δ = 延伸率 (%)

σ_p = 比例极限

$\sigma_{0.2}$ = 标称屈服点

σ_y = 屈服点

σ_t = 抗拉 (极限) 强度

Ψ = 断面收缩率

S_r = 真实失效力

S_b = 脆性破坏抗力 (脆性强度)

B_{hn} = 布氏硬度值

R_c = 洛氏硬度, C标

R_B = 洛氏硬度, B标

R_A = 洛氏硬度, A标

DPH = 维氏硬度 (金刚石锥体) 硬度值

a_n = 冲击强度

N = 应力循环数

σ_R = 持久极限

E = 杨氏模量 (弹性模量)

G = 剪切模量

b = 柏氏矢量

α = 应变硬化系数

t_{rr} = 再结晶温度限

F = 系统的自由度

C = 形成系统的组元数目

P = 在平衡时系统中相的数目

$GP = G-P$ 区

L = 液体金属或合金

A = 奥氏体

B = 贝氏体

C_s = 渗碳体

Car = 碳化物

F = 铁素体

G = 石墨

L_s = 莱氏体

M = 马氏体

P = 珠光体

S = 索氏体

T = 屈氏体

T_{cl} = 冷脆限

V_{cr} = 临界冷却速度

H_c = 矫顽力

Br = 剩磁

目 录

序 言

第一章 金属的晶体结构	1
第一节 金属的一般特征.....	1
第二节 金属的原子晶体结构.....	5
第三节 金属晶格中的缺陷.....	10
第四节 扩散.....	14
第二章 结晶和金属铸锭组织	16
第一节 在凝固过程中金属的一次结晶.....	16
第二节 金属铸锭组织.....	22
第三节 同素异晶（多晶型）转变.....	24
第三章 塑性变形和机械性能	25
第一节 应力的种类.....	25
第二节 弹性和塑性变形.....	26
第三节 金属的破坏.....	29
第四节 测定金属和合金机械性能的主要方法.....	31
第五节 金属的工程强度及其强化途径.....	35
第四章 加热对变形金属的结构和性能的影响	41
第一节 回复.....	41
第二节 再结晶.....	43
第三节 冷变形和热变形.....	45
第四节 热加工对宏观组织和机械性能的影响.....	46
第五章 金属合金中的相	47
第一节 固溶体.....	47
第二节 化合物.....	50
第三节 多相组织.....	52
第六章 相图及合金的结构	53
第一节 合金中相平衡的热力学条件.....	53
第二节 合金的结晶过程.....	55
第三节 形成无限固溶体的合金状态图.....	56
第四节 形成有限互溶固溶体的相图.....	60
第五节 有化合物的平衡相图.....	66
第六节 在固态下合金的相变.....	67

第七节	温度降低时固溶体部分分解的平衡图	69
第八节	由于固态有限溶解而产生的组织转变	70
第九节	组元有同素异晶转变的平衡图	74
第十节	三元合金相图	75
第七章	铁及其合金	79
第一节	铁—碳系的组元和相	79
第二节	铁—渗碳体相图 (亚稳平衡)	80
第三节	铁—石墨状态图 (稳定相图)	87
第四节	碳和杂质对钢性能的影响	89
第五节	钢中的合金元素	91
第六节	合金钢的组织分类	97
第八章	铸 铁	99
第一节	灰口和白口铸铁	99
第二节	高强度球墨铸铁	104
第三节	可锻铸铁	105
第九章	铁合金相变 (钢的热处理理论)	107
第一节	钢在加热时的相变	107
第二节	加热时奥氏体晶粒长大	110
第三节	过冷奥氏体转变特性 (TTT图)	113
第四节	珠光体相变	115
第五节	钢中的马氏体相变	118
第六节	中温 (贝氏体) 转变	122
第七节	在合金钢中奥氏体的等温转变	123
第八节	连续冷却时奥氏体的转变	125
第九节	过冷奥氏体转变的热动力学图	127
第十节	在加热时马氏体和残余奥氏体的转变 (钢的回火)	128
第十一节	碳钢的热时效和应变时效	131
第十章	钢的热处理	133
第一节	第一类退火	133
第二节	第二类退火 (相变再结晶)	134
第三节	钢的淬火	137
第四节	钢的回火	147
第五节	钢的热机械处理	149
第六节	钢的热处理缺陷	150
第七节	钢的表面淬火	150
第十一章	钢的化学热处理	154
第一节	钢化学热处理的一般特点	154
第二节	钢的渗碳	156
第三节	钢的氮化	160

第四节	钢的氮化和碳氮共渗	164
第五节	扩散渗镀	166
第十二章	结构钢	169
第一节	碳素结构钢	169
第二节	易切钢	173
第三节	结构钢中的合金元素	174
第四节	低合金结构钢	176
第五节	渗碳(碳氮共渗)的合金结构(工程)钢	177
第六节	适于调质的合金结构(工程)钢	182
第七节	高强度马氏体时效钢	185
第八节	通用的片簧和盘簧钢	186
第九节	轴承钢	187
第十节	耐磨(奥氏体)钢	188
第十一节	耐腐蚀(不锈)钢及合金	189
第十二节	耐热钢及耐热合金	193
第十三章	工具钢	201
第一节	碳素合金工具钢	201
第二节	高速钢	203
第三节	量具和仪器钢	206
第四节	冷作模具钢	207
第五节	热锻模具钢(半耐热和耐热)	208
第十四章	特殊物理性能的钢及合金	210
第一节	磁钢及磁合金	210
第二节	用作加热元件的高电阻钢及合金	213
第三节	具有特定线胀温度系数的合金	214
第四节	特殊弹性的钢及合金	214
第十五章	难熔金属及合金	215
第十六章	钛及钛基合金	217
第一节	钛	217
第二节	钛基合金	217
第十七章	铝及铝基合金	223
第一节	铝	223
第二节	铝合金的分类	224
第三节	铝合金的热处理	225
第四节	可热处理的变形铝合金	228
第五节	非热处理变形铝合金	230
第六节	铸铝合金	231
第七节	烧结铝合金	234

第十八章 镁及其合金	236
第一节 镁.....	236
第二节 镁合金.....	236
第十九章 铍	240
第二十章 铜及铜基合金	241
第一节 铜.....	241
第二节 铜基合金.....	242
第二十一章 巴氏合金	250

第一章 金属的晶体构造

第一节 金属的一般特征

今天已知的106种元素中, 76种是金属元素。在表1.1所示的新的门捷列夫元素周期表中, 非金属元素位于右侧, 并且在每一横排中由粗竖线与金属元素隔开。象Si、Ge、As、Se以及Te这样的一些元素被认为是处在金属和非金属之间的元素。

各种金属在固体状态下, 在某种程度上, 在液体状态下具有一些典型的性质:

- (1) 高的热和电的传导率;
- (2) 正的电阻温度系数(纯金属的电阻随温度的提高而增加; 大约30种金属显示超导率, 在接近绝对零度的温度下, 它们的电阻陡然地下降到实际为零);
- (3) 热离子发射, 即当加热时发射电子的能力;
- (4) 良好的光反射(金属是不透明的并具有特有的金属光泽);
- (5) 它们很适合于塑性变形。

上述几项表示了物质所谓的金属状态的性质。

所有的金属和合金都是晶体, 它们的原子(或离子)成规则排列, 这种规则是在三个方向上周期重复的。这就把晶体和原子紊乱无序的非晶体区别开了。

通过常规的方法得到的金属是由大量的彼此之间相对不同取向的细小晶体所组成的多晶体(尺寸在 $10^{-1} \sim 10^{-5} \text{cm}$)。

由于它们结晶模式的不同, 这些晶体可能具有各种各样的不规则的形状, 并且被称为晶粒。

金属所有典型的性质都可用其中含有高度可动的传导电子这一事实加以解释。

金属原子的外层能级仅有少量的电子。外层电子和原子之间的结合由逸出功(电离势)表征, 即从一孤立的原子取出一个电子所需要的功。金属的电离势从4到9电子伏特不等, 而对于非金属来说, 单电离(即, 单一电子的分离)通常超过10电子伏特。中间元素(Si、As、Se等)的电离势在8~10的范围。这些数据表明金属的外层电子比较弱地被束缚在原子核上, 因此是在相对地自由状态下, 形成电子气。

金属状态好象是紧靠在一起的原子的组合体, 外层电子失去和某些固定原子的结合而成为大家共有, 并且在带正电的和周期性分布的离子之间自由地运动。

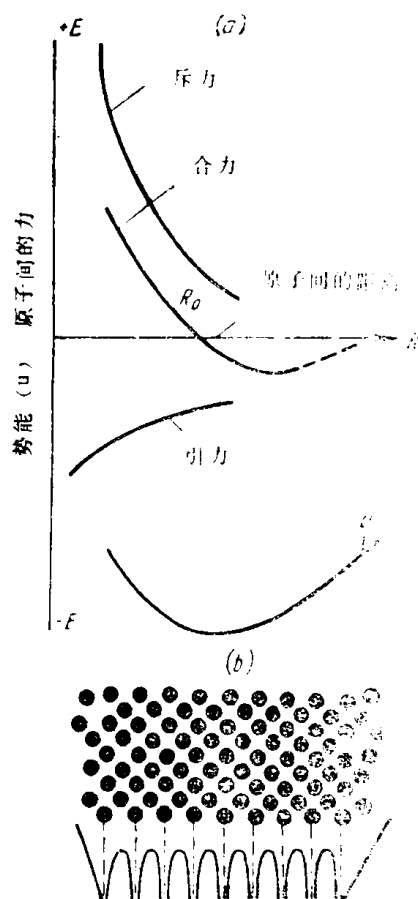


图1.1 (a)两个原子的相互作用力
(b)在晶体点阵中原子位能的变化

表1.1 门捷列夫元素周期表

Legend for Crystal Structures:

- (with dot) : 体心立方 (Body-centered cubic)
- (with x) : 面心立方 (Face-centered cubic)
- : 密排六方 (Hexagonal close packing)
- ◇ : 菱形 (Rhombohedral)
- : 正立方 (Simple cubic)
- (with cross) : 其它立方点阵 (Other cubic lattice types)

																1 H																	2 He																
																3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F																	10 Ne										
																11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl																	18 Ar										
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																																
																		37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
																		55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw	104 Ku																																

金属（离子—电子所组成的体系）的稳定性是由带正电荷的离子和全部电子之间的静电吸引所确定。离子构架和电子气之间的相互作用叫金属键。金属键是共价键和离子键的结合。

金属中键的强度由离子与电子之间的排斥力和吸引力来决定，而这些力没有明显的方向性。原子（或离子）彼此相互作用而处于最小距离(图1.1a)。象图1.1(a)中所表明的那样，这个条件对应于平衡距离 R_0 。

若使原子（或离子）之间的距离小于或大于 R_0 ，则需要克服斥力或引力而作一定量的功。因此，在金属中各原子按一定的秩序定位，形成了对应于原子之间最小相互作用能的规则的晶体（空间）点阵。

在图1.1(b)中用图解说明了在晶体点阵中原子势能的变化。原子（或离子）占据最小位能的位置。构成表面层的原子有较高的位能。

典型的金属状态的特征是原子之间的结合能高。这个能量的量度升华热，是从凝聚体系（即固体金属）转变到蒸气状态需要的全部能量；蒸气中的原子在电学上是中性的，所以不再因离化能而结合在一起。

金属的升华热在20~200千卡/克—原子范围内变化。

上面所叙述的情况能使金属所有的典型性质得到解释。金属的高电导率，是由于在点阵势场中有运动的自由电子。当温度升高时，离子（或原子）的热振动增大，形成空位并且势场的正常周期性被破坏。这就阻碍了原子的移动，因而增加电阻。在低温时，离子（或原子）的振动急剧地减小，导电率增加。某些金属中由于形成电子对的结果，在极低温度下（在20K以下）呈有序的运动，电导率变为无限大。这就是所谓的超导现象。金属的高导热性，主要是由于自由电子的高流动性，在较小的程度上也由于离子振动（声子分量）的结果，由于这种原因，在金属体积内温度被迅速均匀化。

金属的高塑性是由于它们的原子结构的周期性以及金属键没有方向性的结果。金属塑性变形时（锻打、轧制等），即金属的某部分体积相对其它部分发生位移时，离子（或原子）之间的键合未受破坏。具有共价键或离子键的晶体，即具有方向键的晶体是脆的，由于这些键在变形时被破坏。

众所周知，在原子中的电子被分布在各能量级中，按着能量增加的顺序这些量级是：1S、2S、2P、3S、3P、4S、3d、4P、5S、4d、5P、6S、4f、5d、6P、7S、6d和f5。这是填充电子的能级序列。然而，在第四、第五、第六周期的金属中（Sc—Ni，Y—Pd，La—Pt等），只有4S、5S和6S能级被填满电子之后才分别填入3d、4d和5d以及4f和5f能级。不完全充满d和f能级的这些金属称作过渡金属。其它金属已完全充满d和f能级（或低原子序数的金属具有未占用的d能级）。

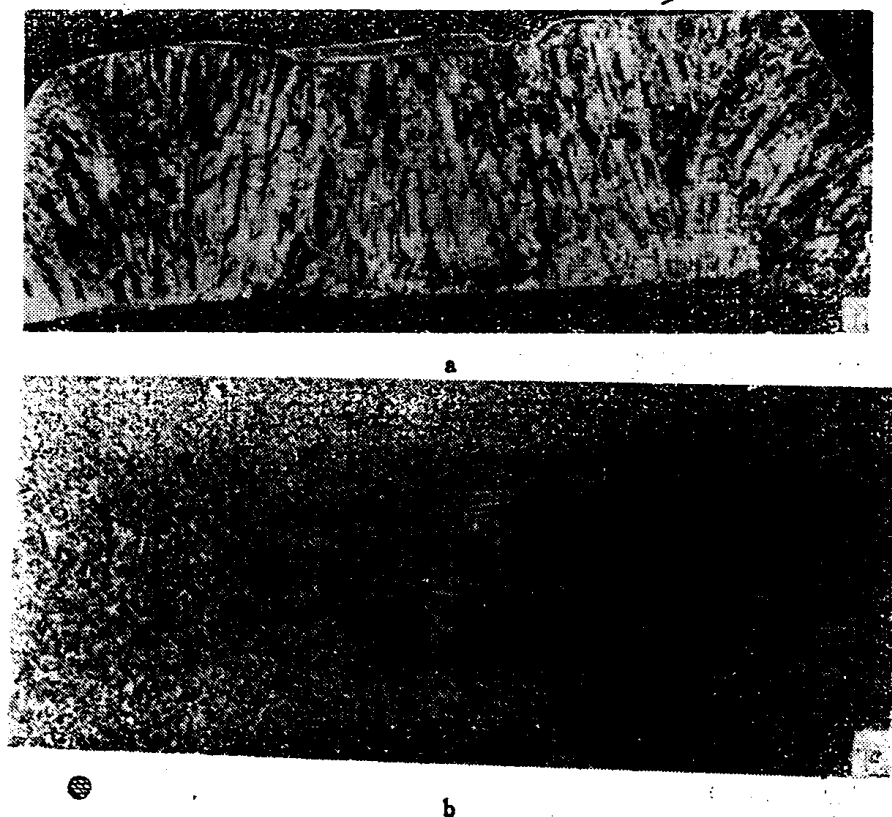
过渡金属的性质与其它金属不同。过渡金属的内部不满的d或f亚层决定了它的性质：可变化的原子价、顺磁性、某些元素的铁磁性（Fe、Ni、Co、Gd、Er、Tm和Ho）、高的升华热以及高熔点。

在通常的结构状态下，纯金属*往往是强度低，而且不具有所要求的物理化学和工艺性能。因此，它们很少在工程中使用。而应用的金属绝大多数是合金。合金是把两种以上的金属或者是金属和非金属熔合或烧结**而成。合金具有金属状态的固有性质。构成合金的化学元素叫合金的组元。合金可以由两个或更多的组元组成。在物理冶金中广泛使用的有关相和组织的概念，已被用于研究金属和合金的组成、相变及性能。在平衡状态下，相的结合叫做系统。相是系统中通体具有相同组成和相同聚集状态的一部分，它

* 纯金属的概念完全是人为的。严格地说，任意纯金属都含有或多或少量的杂质，都可看成合金。此处以及后边，纯金属一词被理解为其基础金属含量为99.99~99.99%的金属。在所有其它情况下，指的是具有少量杂质和通过普通工业方法获得的商品纯金属（99.5~99.9%）。

** 生产某些合金不经熔炼，即不将组元熔为液体状态，而是在固态下将金属粉末或化合物的混合物烧结而成。

通过界面与该系统其它部分分开。例如，均匀的纯金属或合金是单相系统。液体合金（或金属）与其晶体共存的状态是两相系统。组织指的是在金属或合金中相应相的形状、大小或相互间排布。合金的结构组元是其中的各个独特部分，它们各具其特征形态的单一结构。



(a) 锌锭的断口； (b) 铜锭的宏观组织

图1.2 宏观组织

宏观组织（肉眼或低倍放大： $\times 30$ 或 $\times 40$ 所见到的金属或合金的组织）和微观组织（高倍显微镜观察的金属或合金的组织）之间存在着差别。

宏观组织既可在断口上又可在专门制备的宏观断面上进行检测。研究断口是揭示金属晶体构造的最简单的方法。与非晶物体（玻璃、树脂等）不同，晶体具有粒状（结晶的）断口（图1.2a）。断口使人们对晶粒尺寸、熔炼或铸造时的某些特性（浇注温度、合金冷却时的速度与均匀性等）、使用的热处理以及相应地对金属的某些性能有所了解。断口被作为确定钢的脆性破断倾向的一个判据。

如果要在某些特定宏观断面上研究宏观组织，则需在大的钢坯（铸锭、锻件等）或机器部件上切取试样，然后在试样的表面上磨削，抛光并用专门的试剂（侵蚀剂）侵蚀。

检查宏观断面能够显露出由结晶过程所形成的或由热处理与化学热处理（渗碳、氮化等）引起的铸造金属中的晶粒的形状和排列（见图1.2b）；在锻冶和闭模锻造时的晶粒流线的方向；破坏金属连续性的缺陷（缩腔、气孔、砂眼、裂缝等）；化学不均匀性等。

显微组织（图1.3）可显露相的相互排列，相的形状以及大小。由被分析的金属制作的金相切片上来研究显微组织。金相切片是经细心地研磨一个表面，抛光并用专门的试