



钢铁厂技术培训参考丛书

金属材料

冶金工业出版社

钢铁厂技术培训参考丛书

金属材料

范似鑫 译

张致时 校

冶金工业出版社

A944107



内 容 提 要

本书是为钢铁厂人员编写的知识读物,内容以钢铁材料为主。前几章叙述了钢铁材料的各种性质和试验检查方法,以及平衡状态图等一般基本知识;后面几章分别具体叙述了碳素钢的种类、组织、用途和各种热处理方法,并用较多的篇幅介绍了各种合金钢的组成、性能和组织变化,也谈到钢铁的腐蚀问题。

钢铁厂技术培训参考丛书

金 属 材 料

范似鑫 译

张效时 校

•

冶金工业出版社出版发行

(北京市东直门74号)

房山西地印刷厂印刷

•

787×1092 1/16 印张10 3/4 字数246千字

1982年10月第一版 1982年10月第一次印刷

印数00,001~7,000册

统一书号:15062·3663 定价1.15元

出版说明

《钢铁厂技术培训参考丛书》(以下简称《丛书》)是为了适应我国钢铁企业开展职工技术培训工作的需要,由我社组织翻译的一套日本的技术培训教材,拟分册陆续出版,由我社内部发行,供钢铁企业开展技术培训时参考,也可以供具有初中以上文化程度的职工自学技术时参考。

这套《丛书》包括技术基础知识11本,专业概论8本,冶炼和轧钢专业知识46本(冶炼专业13本,轧钢专业33本),共计65本(具体书名见书末的《钢铁厂技术培训参考丛书》书目)。

这套《丛书》所介绍的工艺、设备和管理知识,取材都比较新,反映了日本钢铁工业的技术水平和管理水平。这套书在编写时,对理论方面的知识,作了深入浅出的表达;对设备方面的知识,配有大量的结构图,简明易懂;对工艺方面的知识,给出了较多的操作工艺参数,具体明确。这套《丛书》的编写特点可以概括为:新、广、浅,即所介绍的知识比较新,所涉及的知识面比较广,内容的深度比较浅。

为了便于教和学,书的每章都附有练习题,概括了该章的主要内容;每本书的后面都附教学指导书,既有技术内容的补充深化和技术名词的解释,又有练习题的答案。

根据我们了解,日本对这套书的使用方法是:技术基础知识部分和专业概论部分是所有参加培训学员的共同课程;冶炼和轧钢专业知识部分是供专业教学用的。由此可以看出,日本的职工技术培训,主要强调的是扩大知识面,强调现代钢铁厂的工人,应该具有广博的科技知识。这一点,对我们今后制订技工学校和职工技术培训的教学计划,是会有参考意义的。

我们认为这套《丛书》不仅适合钢铁企业技工学校和工人技术培训作教学或自学参考书,也可作中等专业学校编写教材的参考书,其中的技术基础知识部分和专业概论部分也可作各级企业管理干部的技术培训或自学参考书。

在翻译和编辑过程中,对原书中与技术无关的部分内容我们作了删节。另外,对于原书中某些在我国尚无通用术语相对应的技术名词,我们有的作为新词引进了;有的虽然译成了中文,但可能不尽妥当,希望读者在使用过程中,进一步研讨。

参加这套《丛书》翻译、审校工作的有上海宝山钢铁厂、东北工学院、鞍山钢铁公司、北京钢铁学院、武汉钢铁公司、冶金部情报研究所等单位的有关同志。现借这套《丛书》出版的机会,向上述单位和参加工作的同志表示感谢。

整套《丛书》的书目较多,篇幅较大,而翻译、出版时间又较仓促,书中错误和不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

一九八〇年二月

序 言

本书主要是为钢铁厂人员写的，虽然叫“金属材料”，但内容以“钢铁材料”为主。

学习“金属材料”，总是先遇到诸如金属的晶体结构、状态图等棘手的问题。所以想学的人翻开书来，便兴趣索然。但是，开头很重要，如果上述这些问题不能充分地理解，就难以理解以后接连不断出现的各种问题，就不可能真正地懂得例如为什么用榔头把铁丝砸扁后铁丝会变硬？为什么钢有软有硬？钢的强度为什么有高有低？还有，钢在淬火后为什么会变硬等问题。

因此，对于“金属材料”的基础部分，我们作了尽量简要而又不失其正确性的详细说明。另外，对“热处理”、“焊接用钢材”等重要内容或目前尚未解决的各种问题，也做了较详尽的说明。

“钢铁材料”，从炼铁、炼钢开始，经热加工（轧制、锻造）、冷加工（冷轧、拉拔）或热处理、表面处理等直至成品，要经过多道复杂工序，并且在各道工序中还要进行严格的管理，这是众所周知的。可以这样说，由矿石炼成的钢铁要经过严格的“加工”，才能成为成品。

为什么每道工序都必须有如此严格的管理呢？这当然是为了制造品质优良的钢材。那么，要造出优质钢、易焊钢、高硬度钢、高强度钢、高韧性钢、低温用钢、高温用钢、不锈钢、耐腐蚀钢等又应怎样设计、怎样处理才好呢？现在使用的各种钢铁材料是怎样生产出来的呢？希望读者通过学习本书对这些问题有充分的了解，并且相信读者在知识水平提高后，必然对钢铁生产技术的提高发生作用。

目 录

第1章 金属的共性	1
1. 金属的结晶构造	1
2. 金属的塑性变形	3
(1) 晶体的滑移变形	4
(2) 孪生变形	5
(3) 冷加工组织	5
3. 加工硬化和再结晶	5
(1) 加工硬化	5
(2) 钢铁加工后的退火	6
练习题	9
第2章 材料试验和检查	10
1. 硬度试验	10
(1) 布氏硬度	10
(2) 洛氏硬度	10
(3) 维氏硬度	11
(4) 肖氏硬度	11
2. 拉伸试验	12
(1) 拉伸试验机及试样	12
(2) 拉伸试验结果	12
3. 冲击试验	14
(1) 冲击试验机及试样	14
(2) 冲击试验结果	14
4. 疲劳试验	15
(1) 疲劳试验机	15
(2) 疲劳试验结果	15
(3) 钢的疲劳极限和抗拉强度	16
5. 弯曲试验	17
6. 无损检查 (参见指导书2-6)	17
(1) 渗透探伤法	18
(2) 磁粉探伤法	18
(3) 放射线穿透探伤法	19
(4) 超声波探伤法	19
7. 金属的显微试验	19
(1) 显微组织观察	20
(2) 晶粒度测定	20
(3) 非金属夹杂物试验	20
8. 宏观组织试验	21
9. 硫印试验法	21
练习题	21

第3章 合金和它的平衡状态图	22
1. 纯金属、合金的相及其共性	22
(1) 纯金属的相	22
(2) 合金的相	22
(3) 固溶体的种类	22
(4) 固溶体的共性	23
(5) 金属间化合物	23
2. 纯金属、合金的凝固和熔化	24
(1) 纯金属的凝固状态	24
(2) 纯金属熔点的求法	24
(3) 合金的凝固及其表示方法	24
3. 状态图和它的读法	25
(1) 无限固溶体状态图	25
(2) 偏析和树枝状组织	28
(3) 共晶型状态图	28
练习题	31
第4章 铁与钢	32
1. 钢铁加工后性质的变化	32
(1) 钢锭	32
(2) 用热加工改良材料的性质	32
(3) 用加热改良材料的性质	34
(4) 加工温度和加工终止温度	35
2. 纯铁的组织转变	36
(1) 纯铁的杂质	36
(2) 纯铁的显微组织	36
(3) 纯铁的同素异构转变 (参见指导书1-8)	36
(4) 纯铁的磁性转变	37
3. 纯铁的机械性能	38
(1) 常温下的机械性能	38
(2) 低温下的机械性能	38
4. 碳素钢的状态图和组织	39
(1) 碳素钢	39
(2) 铁碳平衡状态图	39
(3) 用状态图说明组织的变化	41
5. 碳素钢的性质	43
(1) 机械性能	43
(2) 杂质对钢性质的影响	44
(3) 软钢的屈服点现象和应变时效	46

(4) 蓝脆性.....47	(2) 合金钢中的碳化物.....78
练习题.....48	2. 焊接结构用钢材.....73
第5章 碳素钢的热处理.....49	(1) 对焊接结构钢材的要求.....78
1. 退火.....49	(2) 焊接结构用轧制钢材.....20
(1) 消除内应力退火.....49	3. 合金元素对钢的淬透性的影响及合金钢的等温转变曲线(T.T.T.曲线)和连续冷却转变曲线(C.C.T.曲线).....88
(2) 中间退火.....49	4. 合金钢的回火.....89
(3) 完全退火.....49	(1) 合金结构钢的低温回火.....89
(4) 扩散退火.....50	(2) 合金钢的高温回火.....91
(5) 球化退火.....50	5. 合金结构钢.....96
2. 正火.....51	(1) 易切削钢.....96
(1) 以加热改良材质.....51	(2) 铬钢.....97
(2) 以空冷改良材质.....51	(3) 铬钼钢.....97
3. 淬火.....53	(4) 镍铬钢.....97
(1) 冷却速度对碳素钢转变的影响.....53	(5) 镍铬钼钢.....98
(2) 碳素钢的连续冷却转变.....55	(6) 高锰奥氏体钢.....98
(3) 碳素钢的等温转变与贝氏体.....57	6. 工具钢.....98
(4) 碳素钢的淬火.....59	(1) 碳素工具钢.....98
(5) 钢的淬透性及其表示方法.....62	(2) 合金工具钢.....99
4. 碳素钢淬火后的回火.....65	(3) 高速钢.....100
(1) 低温回火.....65	7. 钢铁的腐蚀.....100
(2) 高温回火.....68	(1) 腐蚀的一般知识.....101
练习题.....70	(2) 钢铁的各种防腐蚀法.....102
第6章 碳素钢的种类、组成及用途.....71	8. 不锈钢.....104
1. 一般结构用轧制钢材.....71	(1) 铬不锈钢(马氏体不锈钢和铁素体不锈钢).....104
2. 机械结构用碳素钢.....72	(2) 铬镍不锈钢(奥氏体不锈钢).....107
3. 碳素钢钢材的种类.....73	9. 耐热钢.....113
(1) 钢板.....73	(1) 作为耐热材料的必要条件.....113
(2) 钢管.....73	(2) 钢铁的高温性能.....113
(3) 条钢.....73	(3) 耐热钢.....116
(4) 线材.....74	(4) 超耐热合金.....116
4. 铸钢.....74	10. 硅钢片(电工钢片).....116
练习题.....75	练习题.....117
第7章 合金钢.....76	
1. 合金钢的状态图和碳化物.....76	
(1) 铁和合金元素的状态图.....76	

教 学 指 导 书

第1章 金属的共性	1-2 什么是展性.....119
1. 学习目的.....119	1-3 什么是延性.....119
2. 用语解释和补充说明.....119	1-4 为什么铁比其它金属的用途广.....119
1-1 什么是元素.....119	1-5 金属材料的分类.....119

1-6 什么是原子	120	4-7 磁性转变和磁分析法	129
1-7 什么是分子	120	4-8 珠光体转变	130
1-8 什么是同素异构转变	120	4-9 铜含量的规定和添加铜的钢	130
1-9 为什么金属会成为多晶体	121	4-10 利用磷的影响	130
1-10 晶胞中包含的原子个数	121	4-11 延迟断裂	130
1-11 冷加工、热加工是什么意思	121	4-12 用沸騰鋼轧制冷轧钢板的道理	131
3. 学习小结	121	3. 学习小结	131
4. 练习题解答或提示	122	4. 练习题解答	131
第2章 材料试验和检查	122	第5章 碳素钢的热处理	132
1. 学习目的	122	1. 学习目的	132
2. 用语解释和补充说明	123	2. 用语解释和补充说明	132
2-1 什么是材料的强度	123	5-1 什么是热处理	132
2-2 什么是硬度	123	5-2 为什么过共析钢在淬火前要 进行球化退火	132
2-3 硬度与其它机械性能的关系	123	5-3 什么是淬火敏感性	132
2-4 什么是应力	123	5-4 关于淬火油	132
2-5 应变	124	5-5 用临界直径表示淬透性	133
2-6 无损检查的特点	124	3. 学习小结	133
2-7 超声波的发生和接收	124	4. 练习题解答或提示	133
2-8 超声波探伤仪的构造	124	第6章 碳素钢的种类、组成及用途	134
2-9 金相显微镜	124	1. 学习目的	134
2-10 电子显微镜	125	2. 用语解释和补充说明	134
3. 学习小结	126	6-1 碳钢	134
4. 练习题解答或提示	126	6-2 轻合金钢	134
第3章 合金和它的平衡状态图	126	6-3 铁碳合金	135
1. 学习目的	126	6-4 硬合金	135
2. 用语解释和补充说明	126	6-5 零合金	136
3-1 什么是合金	126	6-6 与JIS规格相应的碳素钢铸 钢件化学成分	136
3-2 置换型固溶体的变种	127	6-7 碳素钢铸件的用途举例(表6-6)	136
3-3 固溶体的膨胀系数	127	3. 学习小结	137
3-4 什么是潜热	127	4. 练习题提示	137
3-5 共晶合金	127	第7章 合金钢	137
3. 学习小结	127	1. 学习目的	137
4. 练习题解答或提示	128	2. 用语解释和补充说明	137
第4章 铁与钢	128	7-1 合金钢按用途分类	137
1. 学习目的	128	7-2 各元素氧化物的种类	137
2. 用语解释和补充说明	128	7-3 SM钢和优质结构钢在JIS上 的不同点	138
4-1 热加工材料在纵向与横向上 机械性能的差异	128	7-4 合金钢的等温转变曲线(T.T. 曲线)和连续冷却转变曲线 (C.C.T.曲线)	138
4-2 纯铁的杂质	128		
4-3 相变点的代号	129		
4-4 热膨胀仪(杰拉德仪)	129		
4-5 强磁性材料和弱磁性材料	129		
4-6 铁碳合金状态图	129		

7-5	马氏体钢	138
7-6	超高强度钢	138
7-7	铬和钼在渗碳体和铁素体中 各有多大的溶入比例	138
7-8	高温回火脆性的机理和钼的 效果	139
7-9	含硫和复合含硫易切削钢的 JIS (日本工业标准)	140
7-10	铬钢的JIS	140
7-11	铬钼钢的JIS	141
7-12	镍铬钢的JIS	141
7-13	关于锰钢和锰铬钢	141
7-14	镍铬钼钢的JIS	142
7-15	高锰奥氏体钢的JIS	142
7-16	碳素工具钢的JIS	143
7-17	刀具用合金工具钢的JIS	143
7-18	高速钢的JIS	143
7-19	钢铁在大气和水中的腐蚀	143
7-20	电位序列和标准电极电位	146

7-21	为什么把13铬不锈钢称作马 氏体不锈钢, 把18铬不锈钢 称作铁素体不锈钢	147
7-22	马氏体不锈钢的JIS	149
7-23	马氏体不锈钢和铁素体不 锈钢的发展经过	149
7-24	铁素体不锈钢的JIS	149
7-25	475°C脆性的原因	151
7-26	奥氏体不锈钢的JIS	151
7-27	析出硬化型不锈钢的JIS	153
7-28	各种耐热合金在空气中的最 高抗氧化稳定温度	155
7-29	锅炉、热交换器用合金钢管 的JIS	156
7-30	耐热钢铸件(不锈钢)的JIS	156
7-31	耐热钢棒(不锈钢)的JIS	157
3.	学习小结	158
4.	练习题解答或提示	158

附:《钢铁厂技术培训参考丛书》书目	160
-------------------	-----

第1章 金属的共性

所谓金属，是地球上存在的100多种元素（参见指导书1-1）中70多种元素的统称。在自然界，金属一般以氧化物、硫化物、碳酸盐等化合物的形式出现，也有以金属状态出现的，但这个数量很少，如金、铂等贵金属和铜（即一般所知的自然铜）。人们将它们作为矿石开采，再从其中提取金属加以使用。

金属作为工业材料广泛使用，因为它有下列共同特征：

- (1) 在常温下是固体，是晶体（但也有例外，如水银）；
- (2) 富于展性和延性（参见指导书1-2、1-3）；
- (3) 是热和电的良好导体；
- (4) 不透光，有特殊的金属光泽。电波也不能穿过它。

在许多金属中，铁是自古以来人类使用最多的金属之一，也是使用范围最广的金属材料（参见指导书1-4、1-5）。

为了了解金属的基本知识，现在让我们学习上述特点中的（1）、（2）两项。

1. 金属的结晶构造

金属由原子（参见指导书1-6）构成。原子作有规则的排列称为晶体。金属虽是晶体，但原子按哪一种规则排列常常不能从外形上看出，而矿石却能从外形显露出来（如水晶）。金属的一大特点是受相当强的外力后发生变形，而不象矿石那样碎成细粒。还有，不管金属多薄或多细，它还是晶体。

图1-1是纯铁的金相显微组织照片^①，它是由许多多角形部分组成的。

普通金属是由许多小晶体混乱集合而成的，称为多晶体（参见指导书1-9），而每个小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界而称为晶界，用显微镜可以看到它们。

下面我们看一看晶粒的状态。在各晶粒中，原子排列很规则。这种有规则的原子排列方式，即配列方式称为晶格。各种金属都有特有的原子排列形式。不同的金属其晶格也不同。虽然我们日常所见的金属有板状、棒状等各种各样的形状，但从原子的角度来看都是有规则地叠积着的晶体结构。这种结构用显微镜看不到，但用X射线检查法能够确定它的排列情形^②。

现在我们来展示金属晶格即金属原子的排列。

要描绘原子的排列，首先作这样的设想：以刚性球体代表原子，研究它们最紧密排列的

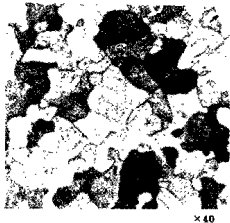


图1-1 纯铁的显微组织

后面会讲到，因为晶粒位向各不相同，经酸腐蚀后，各晶粒受腐蚀的程度不同。在显微镜下明暗可见

^① 金相显微组织和组织观察将在第2章7.中说明。

^② X射线遇上金属，有一小部分穿透，大部分在与金属表面及内部原子相撞后反射回来。依靠这些反射的X射线，可探得原子的排列方式。

方法。图1-2(a)表示在平面上间隙最小的单列排列。如果在同一平面内进一步将它们排成两行或更多行,则会出现如图(b)和(c)所示的两种排列形式,而(c)是最紧密的排列形式。下面,让我们再研究一下将球堆成立体的情况。

图1-3实线所表示的圆是按图1-2(c)方式排列的。如果要在它的上面再叠上第二层球,就必须叠在第1-3图中虚线圆的位置,间隙才最小。进而叠第三层球,可以考虑有两种方法:一种是把球叠于该图中○记号处,一种是叠于图中●记号处。叠在○记号处时,它处于第一层的正上方,和第一层完全一样,即重复了第一层。这种排列的特征,就是它具有最少的原子数,象图1-4(a)上图所示的那样。

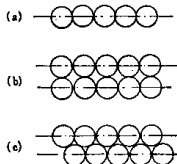


图1-2 球的排列模型(在同一平面内排列)

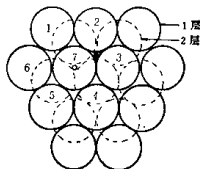


图1-3 同样体积的球作最小间隙排列的方式(立体排列)
实线表示第一层球,虚线表示第二层球,第三层球叠在●记号处时成面心立方晶格;叠在○记号处时成为密排六方晶格

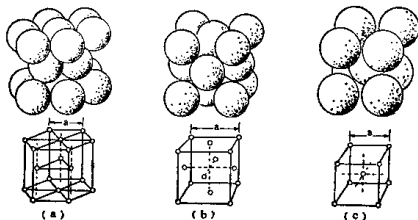


图1-4 晶格的三种类型

(a) 密排六方晶格;

(b) 面心立方晶格;

(c) 体心立方晶格

实际上,这样画球表示很麻烦,所以用球心即原子的重心点位置代表球体,而将原子排列表示成图1-4(a)的下图那样。

像图1-4(a)那样取最少原子的集合来代表其原子排列方式的叫单位晶胞(也称为单位晶格。参见指导书1-10)。

图1-4(a)那种原子排列即晶格称为密排六方晶格。锌(Zn)、镁(Mg)等金属即属于这类晶格。

其次,如果第三层处于图1-3的●记号位置,则它和第一层、第二层的排列部位都不同。这时候,它就不是前述的第一层和第二层的重复排列,而成了由三种不同部位排列的原子重复排列了,即第四层球处于第一层球正上方,和第一层球的排列部位一样。因此它就和前面的密排六方晶格的单位晶胞不相同。如果从第一层取一个球,从第二层取六个球,从第三层

也取六个球，最后再从第四层取一个球（第四层的排列和第一层相同，这层球恰好处于第一层的同部位上方），就可以用这总计十四个球的集合来代表这类晶体的原子排列。将它画成图，即成图1-5 (a) 那样。图 (b) 是将 (a) 右转45°后的形状。这样的单位晶胞可表示成图1-4 (b) 那样，并称之为面心立方晶格，金 (Au)、银 (Ag)、铜 (Cu)、铝 (Al) 和镍 (Ni) 等金属即属于这类晶格。

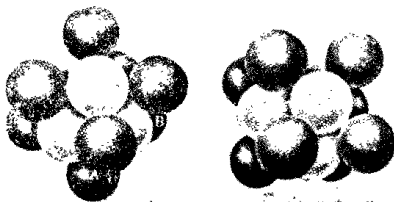


图 1-5 面心立方晶格设想图

设图 (a) 中的第一层、第二层、第三层为 A、B、C。从各层中共取出十四个原子 (1-6-1)，即成一个面心立方晶格。

将图 (a) 向右旋转45°即成图 (b) (照片上 B、C 层各有一个原子，不能看见。)

此外，还有图 1-4 (c) 所示的那种原子排列。这种晶格称为体心立方晶格。它的原子排列不是最密集的，与前述的密排六方晶格和面心立方晶格都不同。常温下的铁 (Fe)、铬 (Cr)、钼 (Mo) 和钨 (W) 等金属即属于这类晶格。

大多数金属都属于上述三类晶格中的某一种。

尽管属于同类型晶格的金属，由于种类不同原子大小当然不同，所以单位晶胞的大小也随之不同。因此，在表示某金属的结晶构造时，除晶格外，还要表示出原子间的距离（见图 1-4，下图棱边长为 a ，称为晶格常数，其单位用 $\text{\AA}$ (埃) 表示^①）。例如，前面讲过的常温下的铁是体心立方晶格，晶格常数为 $2.86\text{\AA}$ 。

2. 金属的塑性变形

铁和铜的板及棒，只要加给它们的力很小，它的弯曲变形会由于弹力而恢复原状。但是，若施加的力大，则弯曲后不会再回复原状，例如，经过轧辊压延后它们会变得扁平，通过拉模拉拔后会变细。金属在超过一定量的外力作用下变形而不回复原状，即发生永久变形。这称为金属的塑性变形。利用金属的这种性质将金属弯曲或锻成各种形状的加工称为塑性加工。这和切削加工是不同的。能够进行塑性加工是金属的一大特点。

但是，金属即使处于塑性变形状态，它的晶格（前面已介绍）并没有多大的变化，只是有点微小的变形。这一点是很重要的。例如，“蜡”在稍为加热后变软，能自由地改变形状，但因为“蜡”并非晶体，它的变形情况和水按容器改变形状是一样的。因此，“蜡”的变形不是塑性变形。

① $1\text{\AA} = 1\text{厘米的亿分之一} (10^{-8}\text{厘米})$ 。

另外，金、铜、铝、铁等容易延展成棒、板甚至细线、薄箔，而锌、镁等就难于制成细线、薄箔。这说明由于种类不同，有的金属易于塑性加工，有的不容易。

试想一下，前面讲的金属塑性变形是以怎样的机理进行的？以及为什么不同金属在塑性加工上有难有易呢？

金属的塑性变形有下述两种：（1）晶体的滑移变形；（2）孪生变形。

（1）晶体的滑移变形 将金属表面磨平并放在显微镜下拉伸，能见到图1-6所示的那样，在各个晶粒中出现一条条的平行线（也可以拉伸后再用显微镜看）。

以图示的多晶体来研究金属晶体的滑移，会很复杂，所以只取出一颗晶粒（称单晶）来讨论。

现在看一看图1-7所示单晶受箭头方向外力后的变形。在晶体中有“特别容易滑移的面和方向”。滑移发生在特定的面上，而那种滑移的集合就是塑性变形。这情况正好象叠好的卡片被挪动过一样（见图（b））。当这样的变形发生时，在表面出现了作为滑移面端部的位错线（呈断层状）。在图1-6中见到的许多直线就是这种线，称为滑移线，而滑动的面称为滑移面

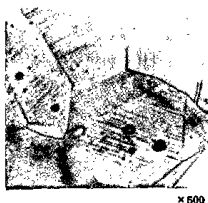


图 1-6 黄铜表面出现的滑移线
随着变形的进行，平行的滑移线逐渐弯曲

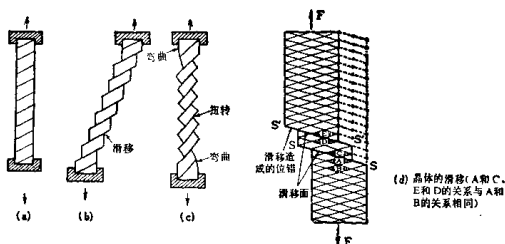


图 1-7 单晶体的滑移变形

然而，为了加外力限于在垂直方向上钳住金属，如同图1-7（c）所示，在晶体中发生向外力作用方向聚集的弯曲和扭转。

图1-7（d）将晶体内部发生的滑移表示得更详细。仔细看可以发现，即使内部发生滑移，滑移面的原子排列仍和原先的原子排列完全相同，并没有在滑移途中停留。这一点是很重要的。

因此，将表面出现了滑移线的金属研磨后再放在显微镜下观察，由于滑移线消失而不能看出其内部变化（断层错移的阶梯部被磨掉了）。

这样的滑移很容易接连进行下去，直至某个程度。因此，这种以晶体滑移变形的金属比较容易变形，也就是容易加工。而心立方晶格的金属（金、银、铜、铝、镍等）和体心立方晶格的金属（常温下的铁、钨等）不但会以这种方式产生塑性变形，而且容易滑移的面和滑移方向

是很多的，所以易于加工。

前面说过，以上是有关单晶体的说明。然而，实际上金属是多晶体，且各个单晶体的位向不相同。由于这种情况，即使某一个晶体要发生滑移，但因相邻晶体的滑移与它不同，成了阻碍，使变形的情形更为复杂。

(2) 孪生变形 由于金属的种类不同，有些金属的变形形式和滑移形式不同，作这种变形的有锌、镁等密排六方晶格的金属。由于晶格性质上的关系，它们难以发生滑移形式的变形，而会发生称作孪生变形的特殊变形。但孪生变形比滑移变形难进行，因此锌和镁的加工较困难。

在钢铁加工中，除特殊情况外，这种变形几乎不会发生。另外，这种变形的产生机理较复杂，所以在此不打算叙述。但是，18铬8镍不锈钢^①以及铜合金中常常出现孪晶组织。不过，这种孪晶很多不是加工引起的，而是由再结晶造成的。关于这一点将在后面再结晶一节中再学。

(3) 冷加工组织 前面讲到，金属的变形可由滑移引起。但实际上，如图1-7(c)所示，晶体会发生弯曲和扭转。加上金属通常是多晶体，相邻晶体相互阻碍，不能自由地滑移。金属作冷加工时的流动方向与加工方向一致，就产生图1-8那样的纤维状组织，而且晶格的轴向和某特定的晶面（原子整齐排列着的面）都朝加工方向齐聚。这样的加工组织称为“织构”。

即使是同种结晶的金属，由于加工方式不同，例如拉丝^②和轧制，它们的织构齐聚情形也随之不同。在冷轧钢板中，表面和中心不同，并且中心部分内也互有不同。这些织构给钢板深冲性^③等带来很大的影响。

3. 加工硬化和再结晶

(1) 加工硬化 一般地说，金属越处于高温就越软，越容易变形。因此，在高温下加工金属不需要很大的力。但高温会引起氧化等现象，使加工金属表面不美观，尺寸也难以正确控制，特别是薄板和细丝等，不能持续承受高温，不能在高温下加工。因此，要制造出表面美观的产品可以进行常温加工（冷加工）。

钢丝或钢丝被榔头砸扁后再弯曲很快就折断。金属在常温下加工后，变硬变脆的现象称为加工硬化。

图1-9表示钢在常温加工中压下率和机械性能的关系。随着加工的进行，硬度和抗拉强度逐渐增加，但延伸率反而小。这种趋势几乎所有金属都有，不过程度各不相同。

金属经常温加工后变硬变脆，是因为加工后有了一定程度的变形，晶体内发生了应变，

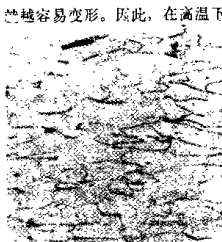


图 1-8 冷加工后的软钢组织
(压下率60%)
×500

① 约含18%铬、8%镍的不锈钢称为18铬8镍不锈钢。详见第7章8。

② 金属丝是通过拉模逐渐拉细的，这称为拉丝或拔丝。

③ 薄钢板冲压成各种形状时（例如杯形等），其能够进行深冲加工的性质称为深冲性。

再进行加工时滑移变形就难于发生。

另一方面,在很多情况下利用这种加工硬化现象来提高金属的强度,例如生产钢丝绳用的冷拉钢丝和钢琴丝等就可应用这种现象。

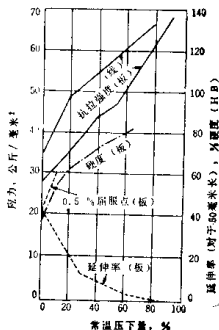


图 1-9 钢在常温加工后机械性能的变化●

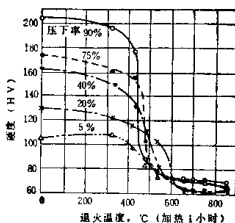


图 1-10 经过冷室加工的极软钢的退火软化曲线

(2) 钢铁加工后的退火 前面讲过,一般金属在常温下加工会变硬变脆,用于加工的力也就要增大,而以过大的力强行加工又会使之破坏。因此常温加工是有一定限度的。

但是,加工硬化的材料适当加热后会恢复到原来的软度。这道工序称为退火。金属经退火后软化是一个重要的特性。一般在常温加工金属时(例如拉丝加工),在中途插入退火工序。

图 1-10 表示用不同压下率轧制的极软钢经过各种温度退火后的硬度变化。在大约 500°C 左右的温度下发生急剧软化,而在 600~700°C 或更高温度时大致保持一定的软硬度。

a. 软化和再结晶 现在试想一下用退火方法使常温加工后硬化的材料变软的过程。

图 1-11 是加工硬化材料退火时的加热温度和硬度之间关系图,分成三个阶段(同时标出电阻和内应力的变化曲线以资参考)。首先在温度较低的区域中,即使温度上升,硬度也几乎不变,而且,从晶体外表也看不出变化。然而,因加工引起的内应力^②却消除了。物理性质如电阻有变化,有徐徐恢复加工前状态的趋势。因此这个区域称为回复期。

● 关于机械性能请参照第 2 章,横坐标是压下率,厚度为 H 的板材经轧制后厚度变成 h ,则其压下率为 $\frac{H-h}{H} \times 100$

(%)。断面积为 A 的线材经轧制后断面积变成 a ,则其压下率为 $\frac{A-a}{A} \times 100$ (%)。

② 当金属被加工时,内部发生拉伸应力和压缩应力。加工后这些应力仍留在内部,称为内应力或残余应力。造成金属内应力的有热膨胀、收缩及其它各种原因。

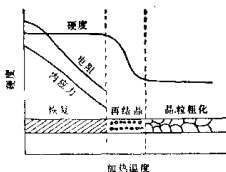


图 1-11 由再结晶引起的硬度变化

接着是硬度急剧下降的区域。如图1-12所示，在加工过的材料中出现新的小晶种（称为晶核）。这晶种逐渐长大，增加了未受加工影响的新晶体。终于，金属全部变成了新的结晶。这样，加工的影响消除了，达到了软化，这称为再结晶。

如果越过该温度区域，加热至更高温，则各相邻晶体合并，晶粒体积逐渐增大，晶粒变粗。这样，机械性能恶化，金属变脆。

b. 压下率和再结晶 如上所述，加工硬化金属的结晶要经过成核、长大的过程。

图1-13是以硬度变化表示的不同冷轧度纯铜经各种温度加热一小时，压下率和加热温度间的关系。由图可见，压下率大的金属的再结晶成核率高，再结晶在较低温度下完成，晶粒也细；而压下率小的金属，因为再结晶成核率低，如不加热到高温就不能完成再结晶，并且再结晶后的晶粒粗。

一般地说，晶粒粗大的金属的各种性能显著恶化，所以压下率小的金属不宜作高温回火。

c. 晶粒粗细和加工性能的关系 如上所述，金属晶粒的粗细和它的机械性能有密切的关系。深冲用钢板晶粒的粗细对性能有很大影响。试验加工性能的方法有埃里克森试验^①。图1-14表示晶粒大小不同的两种纯铁的埃里克森试验结果。

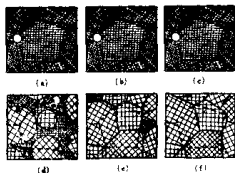


图 1-12 晶体的产生、成长过程示意图

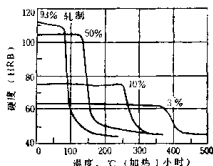
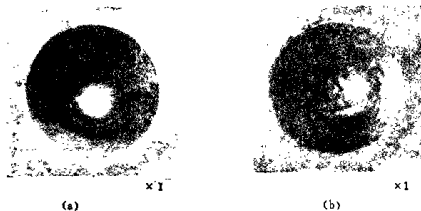
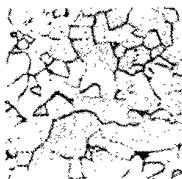


图 1-13 冷轧压下率和加热温度的关系 (纯铜)



① 埃里克森试验法是把一定直径的钢珠压入由模具支承的钢片中，直至凹痕后面破裂，再测定这时的压入深度。



×200

(c)



×200

(d)

图 1-14 晶粒的粗细和埃里克森试验结果

细晶粒纯铁的变形面光滑而整洁；而粗晶粒纯铁的表面粗糙（表面如桔皮状，称为桔皮状表面），容易夹有裂缝，加工性能差。从这试验结果可清楚地知道粗晶粒的薄板不适于深冲加工。

d. 再结晶温度（参见指导书1-11） 如前所述，加工过的金属在加热时发生的再结晶现象不仅与该材料的压下率有关，而且与加热温度、加热时间也有关。因此，不能说“某种金属再结晶温度是某度”这句话。一般单纯讲再结晶温度就是讲该金属发生再结晶的最低温度，而不管它的加工程度和加热时间。表1-1列出了在这种概念下的各种金属的再结晶温度。同时还标出了各种金属的熔点。从表中可知，再结晶温度和熔点间有密切的关系。

表 1-1 再结晶温度和熔点的关系

金属名称	再结晶温度 (°C)	熔 点 (°C)	再结晶温度(°K)/熔点(°K)
Sn	常温以下	232	0.60以下
Pb	常温以下	327	0.50以下
Zn	常 温	420	0.43
Al	150	660	0.45
Mg	200	659	0.51
Ag	200	960	0.38
Au	200	1063	0.41
Cu	200	1083	0.35
Fe	450	1536	0.40
Ni	600	1452	0.51
Mo	900	3560	0.31
W	1300	3370	0.40

注：°K是绝对温度。

金属的再结晶温度随该金属的纯度不同而不同，一般是纯度下降金属再结晶温度升高（相反，熔点随着纯度的下降而降低）。

e. 再结晶孪晶 如图1-12所示，对加工过的金属进行退火会产生新晶体，最后全部变成新晶体。在这种情况下，在铜和18铬8镍不锈钢等面心立方晶格的金属里，经常可见到