

金属材料学参考资料

北方交大材料系编写组

中央广播电视大学出版社



金属材料学 参考资料

北方交通大学材料系编写组

中央广播电视大学出版社

金属材料学参考资料

北方交大材料系编写组

*

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

二二〇七厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 20 千字 448

1984年2月第1版 1985年1月第1次印刷

印数 1—22,000

书号: 13300·23 定价: 2.50 元

几点说明

一、本参考资料是为中央广播电视大学八三级工业企业经营管理(物资经济管理)专业《金属材料学》一书而编写的。目的是为了使读者在学习时,既能由浅入深,循序渐进地掌握基本理论、基本知识和基本技能;又能理论联系实际,学以致用,扩大知识面,为充实、提高打基础。

二、本参考资料的主要内容分为三部分:第一部分是《金属材料学》一书的补充资料;第二部分是实验指导书;第三部分是有关附录。

三、本参考资料的内容取材于有关教材、专业书籍、技术标准和产品目录等多种资料。为了使本参考资料与《金属材料学》一书各章相对应,因此本参考资料第一部分是按《金属材料学》一书各章编写的。由于各章补充资料有多,有少;有专业资料,有技术标准;有片段内容,有专题论述,故章下不设节,而以顺序号编排。其中第九、十三、十四章未编补充资料,特此说明。

四、本参考资料由龚惠芳、张庆颐、詹荷生、陈宝田、鞠颂东等同志编写。由于时间仓促,加上编写经验不足,本参考资料中难免存在缺点和错误,我们恳切地希望读者在阅读中提出批评和指正,以便进一步修改、完善。

编者

1984年2月

目 录

第一部分 《金属材料学》一书的补充资料

第一章 金属材料的性能	1
一 常用机械性能及其含义的归纳	1
二 关于国际单位制的简介	2
三 关于钢结构用钢的基本要求	2
第二章 金属的晶体结构与结晶	6
一 纯金属的显微组织	6
二 实际金属的晶体缺陷	7
三 金属的结晶	10
四 金属的同素异晶(异形)转变	15
第三章 合金的相结构和二元合金相图	17
一 合金相图的一般知识	17
二 具有固态转变的合金相图	21
三 合金的性能与相图之间的关系	23
四 三元合金相图	24
第四章 铁碳合金状态图	34
一 铁碳合金的基本相和基本组织	34
二 平衡状态下碳钢的组织 and 性能	38
第五章 钢的热处理	39
一 在退火与正火中常见的缺陷	39
二 钢的表面热处理	40
三 热处理技术的新发展	49
第六章 炼铁与炼钢	53
一 冶炼前铁矿石的处理	53
二 高炉构造及附属设备	54
三 钢的特殊精炼法	58
第七章 生铁、铁合金和铸铁	67
一 铸铁中的石墨化过程	68
二 影响石墨化的因素	69
第八章 钢	72
一 普通碳素钢(GB 700-79)	72
二 优质碳素结构钢(GB 699-65)	72
三 冷拉优质结构钢(YB 194-63)	77
四 易切结构钢(YB 191-75)	77
五 普通低合金结构钢(YB 13-69) 或 (GB1591-79)	79

六 合金结构钢(YB 6-71)	86
七 碳素工具钢(GB 1298-77)	101
八 合金工具钢(GB 1299-77)	103
九 高速工具钢(YB 12-77)	107
十 不锈钢(GB 1220-75)	109
十一 耐热钢(GB 1221-75)	122
十二 热轧弹簧钢(GB 1222-75)	128
十三 铬轴承钢(YB 9-68)	132
十四 无铬轴承钢(YB 9-70)(试行)	135
第九章 钢材的生产(略)	
第十章 钢材	137
一 钢材断面形状和重量计算公式及填写规格的表示方法	137
二 薄钢板理论重量表	139
三 低碳钢冷轧钢带(YB 209-63)	140
四 弹簧钢、工具钢冷轧钢带(YB 208-63)	142
五 锯条用冷轧钢带(YB 530-65)	145
六 冷轧不锈钢带(YB 532-65)	146
七 直径 5~152 毫米电焊钢管的尺寸及理论重量	149
八 水、煤气输送钢管的尺寸及理论重量(YB 234-63)	151
九 圆股钢丝绳主要用途推荐表	152
十 钢材常用名词解释	154
第十一章 铜及铜合金	162
一 结构用白铜	162
二 电工用白铜	163
第十二章 铝及铝合金	164
一 铝合金的强化作用	164
二 铝合金的热处理	165
三 铸造铝合金的变质处理	168
第十三章 锡、铅、铋及轴承合金(略)	
第十四章 粉末合金(略)	
第十五章 其他有色金属及其合金(钛及钛合金)	169
一 钛的主要性能	169
二 钛的应用范围	171
第十六章 稀有金属(简介)	175
一 稀有难熔金属	175
二 稀土在钢铁工业中的应用	179
三 稀土在有色合金中的应用	187
四 稀有分散金属	188
五 稀有贵金属(即铂族金属)	190
第十七章 金属材料的腐蚀和防腐	194

一 金属腐蚀及防护研究的发展·····	194
二 金属腐蚀的破坏形式分类·····	194
三 腐蚀程度的表示方法·····	195
四 电极电位的测定·····	197
五 金属的钝化·····	197
六 金属在各种条件下的腐蚀·····	199
七 库存金属材料的防锈·····	208
第十八章 金属材料的验收·····	211
一 无损探伤简介·····	211
二 进口金属材料的验收和索赔·····	212

第二部分 实验指导书

实验一 金属材料的机械性能试验·····	214
实验二 铁碳合金平衡组织观察·····	236
实验三 碳钢的热处理及热处理后的显微组织观察·····	251
实验四 典型合金钢、铸铁、有色金属的显微组织观察·····	261
实验五 显微组织的照相技术·····	265
实验六 钢铁的火花鉴别法及断口分析·····	269
实验七 钢铁的酸浸试验和硫印试验·····	275
实验八 其他试验·····	277

第三部分 附 录

附录一 硬度的换算和对照·····	298
附录二 结构钢按坯料截面与屈服极限选用钢种参考附表 4 ·····	302
附录三 金属材料常用的浸蚀剂·····	303
附录四 金属材料简易鉴别法·····	304

第一部分《金属材料学》一书的补充资料

第一章 金属材料的性能

一、常用机械性能及其含义的归纳

为了正确选择和合理使用材料, 必须从材料使用性能、工艺性能、经济效果等方面来考虑. 对一般的工程建筑、机械零件与工具制造主要是根据使用性能选择材料. 材料的使用性能首先指它的机械性能. 所谓材料的机械性能就是材料的力学性能, 即材料抵抗外力作用的能力. 常用

表 1-1 常用的机械性能指标及其含义

机械性能	性能指标			说 明
	符号	名 称	单 位	
强 度	σ_b	抗拉强度 (强度极限)	公斤/毫米 ² (kg/mm ²)	金属拉断前的最大应力. 当金属单位横断面上受的拉力达到 σ_b 时, 金属就会被拉断.
	σ_s	屈服强度 (屈服极限)	公斤/毫米 ² (kg/mm ²)	金属产生屈服现象时的应力, 是对微量塑性变形的抵抗能力. 当金属单位横断面积上受的拉力达到 σ_s 时, 金属在产生弹性变形的同时开始产生微量的塑性变形.
	$\sigma_{0.2}$	条件屈服强度 (条件屈服极限)	公斤/毫米 ² (kg/mm ²)	没有明显屈服现象的金属, 测定其发生塑性变形量达到 0.2% 时的应力作为条件屈服极限, 它标志材料对微量塑性变形的抵抗能力.
塑 性	δ δ_{10} δ_5	延伸率 (伸长率)	%	试样拉断后标距长度的增加量与原来标距长度比值的百分率. δ_{10} 和 δ_5 分别代表用长试样和短试样试验得到的伸长率. δ 愈大, 材料的塑性愈好.
	ψ	断面收缩率	%	试样拉断处横断面积减小量与原始横断面积比值的百分率. ψ 愈大, 材料的塑性愈好.
硬 度	HB	布氏硬度	kg/mm ² (习惯不写)	是单位压痕球面积上受的载荷数值. 一般用于 HB<450 的较软材料、毛坯、半成品硬度.
	HRC HRB HRA	洛氏硬度	—	根据压痕深浅来衡量硬度, 硬度数值直接从硬度机表盘上读出. HRC 应用最广, 一般经过淬火的钢件(硬度在 HRC 20~67 之间)都用此洛氏硬度标度.
	HV	维氏硬度	kg/mm ² (习惯不写)	是金刚石正四棱锥造成的压痕单位面积上受的载荷数值. 一般用于表面硬化钢件, 或薄的金属件的硬度.
韧 性	a_k	冲击韧性 (冲击值)	公斤·米/厘米 ² (kg·m/cm ²)	打断金属试样单位横断面积上所消耗的冲击功, a_k 愈大, 材料的韧性愈好.
抗疲 劳性	σ_{-1}	疲劳强度 (疲劳极限)	公斤/毫米 ² (kg/mm ²)	金属经受多次(钢为 10 ⁷ 周次)对称循环交变应力的作用而不发生疲劳破坏的最大应力.

的机械性能指标有: 抗拉强度(即强度极限)、屈服强度(即屈服极限)、延伸率(即伸长率)、断面收缩率(即截面收缩率)、硬度(分布氏、洛氏、维氏硬度等)、冲击韧性(即冲击值)、疲劳强度(即疲劳极限)等。材料的这些机械性能指标, 是设计时选材的重要依据。现根据教科书中的介绍, 归纳列表(表 1-1)如下:

应该说明: 上述机械性能指标除硬度外, 都是用小尺寸的光滑试样或标准试样, 在规定性质的载荷作用下测得的。实践证明, 他们不能直接代表材料制成机械零件或建筑结构构件后的性能。因为一方面, 实际机械零件或建筑结构构件的尺寸往往较大, 尺寸增大后, 材料中存在缺陷(如孔洞、夹杂物、表面损伤等)的可能性也就愈大; 另一方面, 机械零件或建筑结构构件在实际工作中所承受的载荷往往是复杂的, 机械零件或建筑结构构件的形状、加工表面光洁度等也与试样差异很大, 这些因素应加以考虑。因此, 应根据机械零件或建筑结构构件的工作状态、使用特点综合考虑材料的机械性能指标。

二、关于国际单位制的简介

在我国的国家标准(代号为“GB”, 是“国标”二字的汉语拼音缩写)、部颁标准(简称“部标”, 如冶金工业部代号是“YB”)中采用现用的基本计量制度——“公制”单位。金属材料学教科书也采用公制单位, 目的是与“国标”或“部标”一致, 便于对照和讲授。但是, 我国将逐步采用国际单位制(简称国际制, 代号为“SI”), 根据国际单位制的规定: 力的单位是牛顿, 代号牛(N)。而公制单位中, 力的单位是千克, 代号千克(Kg), 即公斤, 二者之间的关系为: $1 \text{ 公斤力(Kgf)} = 9.80665 \text{ 牛(N)}$ 。功和能的单位在国际制中是用“焦耳”, 代号焦(J), $1 \text{ 公斤力} \cdot \text{米(Kgf} \cdot \text{m)} = 9.80665 \text{ 焦(J)}$ 。

关于力、应力(即强度值, 如 σ_b 、 σ_s 、 σ_{-1} 等)和冲击值单位一律可按下列关系换算成国际制单位:

力(P): $1 \text{ 公斤力(Kgf)} = 9.8 \text{ 牛(N)}$;

应力(σ): $1 \text{ 公斤力/毫米}^2(\text{Kgf/mm}^2) = 9.8 \text{ 牛/毫米}^2(\text{N/mm}^2)$ 。若强度(σ_b 、 σ_s 等)指标的单位用百万牛顿/米²(MN/m²)表示, 它同公制单位的换算关系为: $1 \text{ MN/m}^2 \approx 0.1 \text{ Kgf/mm}^2$ 。

冲击值(a_k): $1 \text{ 公斤力} \cdot \text{米/厘米}^2(\text{Kgf} \cdot \text{m/cm}^2) = 9.8 \text{ 焦/厘米}^2(\text{J/cm}^2)$ 。若采用冲击功(A_k)作为冲击值(即冲击韧性)的指标, 其国际单位为 J(焦耳), A_k (以 J 为单位)与冲击值 a_k (以 $\text{Kgf} \cdot \text{m/cm}^2$ 为单位)的关系为: $1 A_k \approx 8 a_k$ 。

硬度的单位仍沿用公制单位(即公斤力/毫米²), 但通常不予标注。

三、关于钢结构用钢的基本要求

工业与民用的钢结构, 绝大部分是采用平炉冶炼的普通碳素钢及小部分低合金高强度钢, 所用的钢材必须保证结构的安全耐久和使用上的要求。不仅应有良好制造加工的工艺性能, 更重

要的是要有可靠的化学成分和机械性能，这一点对承重结构用钢材来说是十分必要的。兹分述如下

1. 极限强度

钢材的极限强度是钢材对巨量变形的抵抗力，在保证屈服强度外，还必须保证极限强度，它不仅是反应钢材质量的重要指标，而且与钢材的疲劳强度也有密切的关系。

从极限强度变化范围的数值，可以反应钢材内部组织的优劣。但在计算建筑结构的强度并不采用极限强度，有意义的是屈服强度和极限强度之比，也称之为屈服比，这个数值愈小，则二者之差愈大，结构的可靠性愈大。另一方面，屈服比愈大，则钢材的有效利用也愈高。因而在实际设计中规定一个理想的比值，约在 0.65~0.75 之间。钢材的极限强度是建筑结构要求的机械性能中第一个指标。

2. 伸长率和收缩率

钢材的伸长率(δ)和断面收缩率(ψ)都是衡量钢材的塑性性能的指标。钢材的塑性实际上是当结构受巨量残余变形时，抵抗断裂的能力。因之对于建筑结构用的钢材，无论在静荷载或动荷载作用下，以及在工厂的工艺加工条件下，除了具有高的强度外，还应要求有足够的塑性。一般结构工程中对塑性中的伸长率要求严格，在相同极限强度的条件下，伸长率越大，则材料承受动荷载的安全度越大，钢材的伸长率是建筑结构要求的机械性能中第二指标。桥梁结构用的钢材，除保证伸长率外，还要对钢材收缩率(ψ)提出要求。

3. 屈服强度

钢材的屈服强度是衡量建筑结构的承载能力和确定设计“计算强度”(或容许应力)的重要指标。普通含碳量的碳素钢在屈服点之后，应变急剧增长，结构的变形突然增加到不堪使用的情况。此时钢材已经暂时耗尽了承载能力。所以一般结构设计应力只能控制在低于屈服强度，不能超过。当结构构件的刚度满足使用要求时，屈服强度愈高，需要钢材截面愈小，耗料也愈少。钢材的屈服强度是建筑结构要求的机械性能中第三个指标。

4. 冷弯

钢材的冷弯也是衡量塑性指标之一，当试样弯到 180°时，其伸长率竟达 100%以上。通过冷弯不仅可以检验钢材的颗粒组织、结晶情况，以及非金属夹杂物的分布等缺陷，在一定程度上也是鉴定钢材可焊性的一个指标。同时结构构件在加工制造、安装运输过程中，必须用辊机、矫直机进行校直，尤其在焊接构件中由于温度引起的焊接变形的调直，因而在主要承重结构中，都要求钢材具有良好的冷弯性能。它是机械性能中的第四个指标。

5. 冲击性能

冲击韧性实质上是钢材断裂时所做的功。是抵抗冲击断口敏感性和承受振动功能的综合。

其值随金属组织和结晶状态的改变而急剧的变化着。例如钢中的非金属夹杂物、带状组织、脱氧不良等都会导致钢材冲击性能的降低。由于冲击韧性最能敏感地反应着钢材断裂的阻力和引起脆性的特征,尤其在动荷载作用之下,局部应力的集中促使钢材变硬,塑性降低,因而对于承受动荷载的结构所用的钢材,除要求保证其强度和塑性外,还必须保证有良好的冲击韧性。一般认为塑性是代表钢材在静力荷重和单向应力之下的可靠性,而韧性则是反应着钢材在冲击荷重或三轴受力之下的耐久性,所以钢材的冲击韧性也是一个主要指标。通常以常温冲击和负温冲击来表示。

(1) 常温冲击

钢材在 20°C 时用标准试样 [$55 \times 10 \times 10$ 毫米带梅氏缺口] 测得的冲击韧性值称之为“常温冲击”。用于经常直接承受动荷载的结构必须要求“常温冲击”,做为机械性能中的第五个指标。

(2) 负温冲击

钢材在 -20°C 时用标准试样测得的冲击韧性值称之为负温冲击。随着温度的降低,钢材塑性变形的阻力提高,屈服强度向极限强度值接近,屈服比增大,其冲击韧性值也因之降低,当温度降到使钢材产生急剧硬化变脆的程度即为钢材的脆性状态,此时的温度也称临界温度,这个温度越低,钢材转变为脆性状态的可能性也越小,结构的工作可靠性越大。所以对于直接承受动荷载的结构,当计算温度为 -20°C 或 -20°C 以下时,尚需具有 -20°C 时的负温冲击的附加保证。有时也称之为第六个指标。应该指出在常温下测定的冲击值,不能用来判断负温下的冲击韧性,所以有时不得不在各种温度下,进行各种试验,来确定冲击韧性值。

6. 时效

钢材的时效表示随时间的增长钢材性质的硬化,韧性降低,脆性增大,以致使建筑结构的原有安全储备有所降低,尤其在低温和动荷载条件下更加严重。所以在桥梁等重要的结构上,对钢材要求保证时效性能。一般是用人工时效后的冲击韧性的数值来衡量钢材的时效倾向性能。其值不得小于常温冲击值的 $40 \sim 50\%$ 。钢材的时效与冶炼工艺有密切关系,沸腾钢最敏感,镇静钢次之,用铝脱氧的钢材最不敏感,所以桥梁结构钢材常采用 16 桥等钢号,其优点不仅时效、低温冷脆等性能不敏感,而且具有较强的抗大气侵蚀性能。结构工件安全可靠。因此被列为钢材的第七个指标。

7. 疲劳强度

钢材的疲劳强度表示金属经受多次反复应力的周期变化而不断裂的能力,这个性能不仅与钢材的质量、极限强度有密切关系,而且也 and 结构形式、节点构造等的选择有重大的影响,所以在结构设计时应加注意。

8. 抗腐蚀性能

钢材的腐蚀实际上是指钢材在大气(介质中)环境下或化学的或电解的作用影响下金属损坏

的过程。腐蚀性能与表面状态、组织均匀程度、非金属夹杂物、残余应力的存在、化学成分以及与其它材料的接触等诸多因素都有关系,因此,对某些特殊用途的结构钢,应要求具有强大的抗腐蚀性能。

关于机械性能的检验,通常是指钢铁制品(如型钢、钢板、铸件等)在普通条件下,按国家技术标准的要求,分别对其强度、塑性、韧性以及其他工艺性能等在试验室内进行测定,以鉴定钢铁材料使用的技术指标。对于建筑工程用钢则指在轧制的成批钢材中,取出具有代表性试样,对其极限强度、伸长率、屈服强度、冷弯试验、常温冲击、负温冲击、时效性能、抗腐蚀等特性,分别按规定进行试验,依其所测定的结果来评定钢材的质量和使用性能。按国家技术标准达到极限强度、伸长率两项技术指标者,称为两项合格的甲类钢材(只保证机械性能),是钢材按机械性能供应的最低要求。当极限强度、伸长率、屈服强度三项都能合格者称之为三项合格的钢材。这三项技术指标是建筑结构用钢材的基本要求。如果按前述极限强度、伸长率、屈服强度、冷弯试验……顺序符合技术指标者,则分别称之为四项、五项、六项……等合格的钢材。有时生产厂方也称之为四点、五点、六点……等合格钢材。合格项目越多,表明钢材的机械性能越好,质量也越优良,但钢材的成品合格率则低,成本高,因而价格也较高。

第二章 金属的晶体结构与结晶

一、纯金属的显微组织

1. 纯金属的显微组织

如果取一小块纯铁从中锯开,将其截面经过磨平、抛光,使之亮如镜面,再在酸液(95%酒精+5%硝酸)中浸蚀后,用水洗净,吹干,就可在放大100~2000倍光学显微镜下观察其显微组织。如图2-1是纯铁放大二百倍的显微组织。

所谓金属的显微组织,是指金属的一种或多种晶体互相结合的形式在显微镜下所呈现出来的特征和形貌。用金相显微镜研究金属的内部构造已有百余年的历史,并建立起金属合金的组织与化学成分和性能之间的变化关系。近几十年来,虽然有先进的实验技术装备,如X射线衍射仪,电子显微镜等来揭示金属内部更为精细的组织结构,但用光学显微镜所观察到的组织,仍不失为标识金属和合金内部构造的重要组成部分。

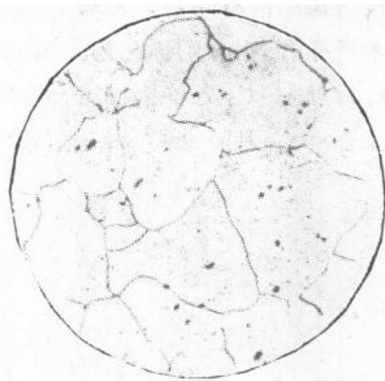


图 2-1 纯铁的显微组织

单一晶体结构的纯金属其显微组织与纯铁相同,是由许多外形不规则的多边形晶体集合而成。每个外形不规则的晶体称为晶粒;晶粒与晶粒之间互相接触的界面称为晶界。

在天然发育的矿物或人工精细培养出来的晶体,其外形有可能与其某些晶面之间有较为明显的联系,例如,呈小立方体的盐粒和六方柱体的水晶。但是工业用的大块金属和合金,是很难亲眼目睹与晶面相适应的规则外形的晶体,这是因为每个晶体在成长过程中,多种因素的作用足以抑制其向规整外形的趋势成长。尽管如此,通过X射线晶体结构分析表明,一颗晶粒确实是一个晶体,其内部原子排列的规则性并不亚于外形正规的盐粒或天然水晶。

工业用金属晶粒的横截面尺寸一般在0.1~0.025毫米范围内。在特定条件下,例如铸造状态的组织或经高温长期加热后的组织,不借助显微镜就可看到1毫米左右的粗大的晶粒;又如形变热处理状态的组织,晶粒尺寸可细小至0.001毫米。

2. 单晶体和多晶体

如果采用人工方法制取一颗晶粒,令其在空间的位置确定以后,则任一晶面及与其平行的晶面的位置和方向也就被确定,这就是所谓晶面取向一致的单颗晶粒—单晶体。

由于晶体结构的各种晶面和晶向上,原子分布状况有紧密、稀疏之区别,所以单晶体就显示

晶体所固有的特性,即金属的物理、化学和机械性能随方向而异,这个现象称为各向异性。

例如,体心立方晶胞的单晶体铁,沿晶胞棱边方向即 $[100]$,弹性模量 $E=13500$ 公斤/毫米²,而沿晶胞体对角线方向即 $[111]$, $E=29000$ 公斤/毫米²。这说明单晶体铁在不同方向上刚度迥然相异。又如,单晶体铜在不同方向作拉伸试验时,抗拉强度 σ_b 可以在14 公斤/毫米²到35 公斤/毫米²,伸长率 δ 在10%到50%范围内变化。

但是,工业用的金属是属于多晶体,即金属是由许多晶粒所组成。从金属整体来说,各个晶粒的晶面取向是任意的、紊乱的(图 2-2)。这样,单晶体的各向异性在多晶体的不同方向上彼此抵消,而显示多晶体的各向同性。例如,多晶体铁的 E 值在不同方向大致为上述二数的平均值,约21000 公斤/毫米²;又如经正确加工和退火的多晶体铜沿各个方向的性能为 $\sigma_b=22$ 公斤/毫米²而 $\delta=50\%$ 。

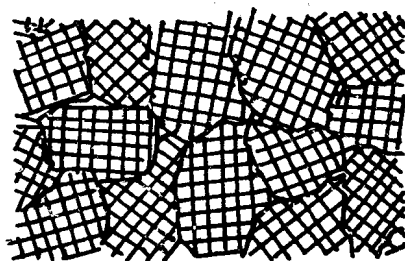


图 2-2 多晶体中各晶粒晶格取向不同示意图

如果对多晶体金属进行单向加工变形(冷轧、冷拔);强制各晶粒的某一晶面取向一致,这时多晶体仍能显示出各向异性。这就是对工业某些用材要求某些晶面有规定的取向,以充分发挥其使用性能的缘由,例如,电磁性能作单向变化的变压器铁芯——硅钢片就是一例。

二、实际金属的晶体缺陷

如果按前所述,晶体中原子严格地作周期性规则排列,这只是理想化的晶体而已。根据研究金属所观察到的一些现象(如扩散、形变等),以及用现代的科学实验方法进行探索的结果,都间接或直接地证实了在实际晶体中会出现某些不规则性,这些不规则性称为晶体缺陷。在这里概要地介绍以下几种缺陷。

1. 空位和脱位原子

在晶体中,任一原子与其相邻的原子是各以平衡距离为中心而作振动。在某一瞬间,个别原子可能获得足够大的振动能量,离开了正常平衡位置,这时在实际晶体中将出现两种缺陷:空位和脱位原子(图 2-3)。

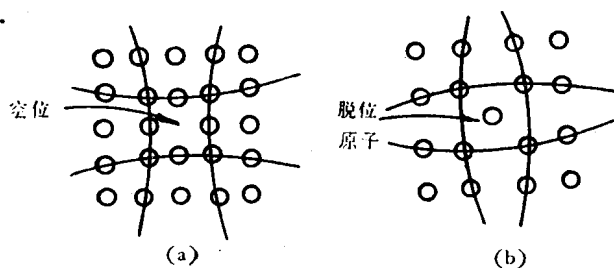


图 2-3 晶格中的点缺陷
(a)——空位; (b)——脱位原子

空位就是指原子离开平衡位置而留下未被原子占据的结点；脱位原子就是指晶格结点间隙处，处于不平衡位置的原子。

不论出现空位或脱位原子，在它们周围原子之间的作用力就失去平衡。空位周围的原子使晶格有紧缩的趋势；脱位原子周围的原子使晶格有胀开的趋势。在晶体中对正常晶格的外形或轮廓任何的偏离，称为晶格畸变。空位或脱位原子周围的晶体结构就产生晶格畸变。此外，它们都不是固定不动的，而是在晶体内部移动，或者消失，或者产生新的空位或脱位原子。空位或脱位原子在晶体中的移动，是固态金属原子进行扩散的根据。

空位不仅可以从液体凝固过程中产生，在固态下升高温度，加工变形，以及用高速粒子射击也能产生。脱位原子也可以通过剧烈的加工变形和辐射产生。

从几何形体来看，可以把空位或脱位原子称为晶体结构中的点缺陷。

2. 位错

在一个晶体中，相邻晶面内的原子排列发生错动，这种局部原子面的错排称为位错。最常见的一种位错形式就是如图 2-4 所示的刃型位错。刃型位错就是在晶体中沿某一面（CD 面）的上部分比下部分多出一列原子面（AB 面），这一原子面乃是由晶体上下两部分发生局部错排的结果。在空间位错的端部仍是一条线（垂直纸面），称为位错线。从几何形体来看，位错可看作晶体结构中的线缺陷。

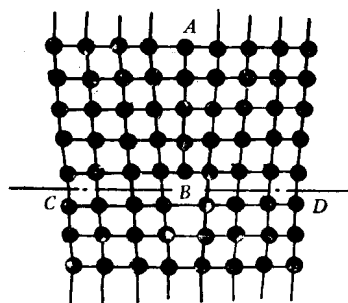


图 2-4 晶体中的线缺陷——刃型位错

位错线上部的原子处于受压状态，原子之间有斥力作用；位错线下部的原子处于受拉状态，原子之间有引力作用。因而位错线及其附近的原子受力不均衡，晶格发生畸变。不论在垂直位错线或平行位错线的方向上，距离位错线越远，晶格畸变程度越小。

刃型位错有正、负之分。对于上述的多出的原子面位于位错线上部，称为正刃型位错，用符号 $\perp$ 表示；对于多出的原子面位于位错线下部，称为负刃型位错，用符号 $\neg$ 表示。

晶体中位错的多少，可用位错密度来表示。位错密度 $\rho = S/V$ ，其中 S 是体积为 V 的晶体中位错线的总长度， ρ 的单位是厘米/厘米³ 或 1/厘米²。一般经过适当退火的多晶体金属，位错密度为 $10^6 \sim 10^8$ ；经过剧烈冷变形的金属，位错密度可增至 $10^{11} \sim 10^{12}$ ；经过良好控制制成的超纯单晶体金属，位错密度可低于 10^3 。

晶体中位错的存在和发现，位错的运动、增殖和相互之间的作用是现代关于金属的塑性变形、强化和相变的理论基础。

3. 嵌镶块

多晶体金属的每个晶粒实际上是由许多尺寸约为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 毫米的细晶块拼凑组成，这些

细晶块叫做嵌镶块(图 2-5)。在每个嵌镶块内部,晶面取向一致,近似理想晶体。但是各嵌镶块之间的晶面取向稍有偏差,一般只有几分到几十分,很少超过 $1\sim 2^\circ$ 。

嵌镶块往往是由于液体金属掺有杂质,结晶时金属体积收缩,以及晶体成长时受机械力的作用而形成;通过冷变形还可以使嵌镶块进一步细碎。

由于各嵌镶块之间的位向略有差别,在嵌镶块边界上原子排列较不规则,晶格发生畸变。通过实验已经证实,嵌镶块边界是由许多位错列队组成。

嵌镶块尺寸大小及其边界状况,对金属机械性能和组织结构转变有重要影响。细化嵌镶块尺寸是提高金属强度的重要途径之一。

金属的晶粒中,较大的嵌镶块($10^{-1}\sim 10^{-2}$ 毫米)可借助光学显微镜直接看到,细小的嵌镶块只能在放大倍率为几千到几万倍的电子显微镜下进行观察,或通过 X-射线晶体分析进行测定。

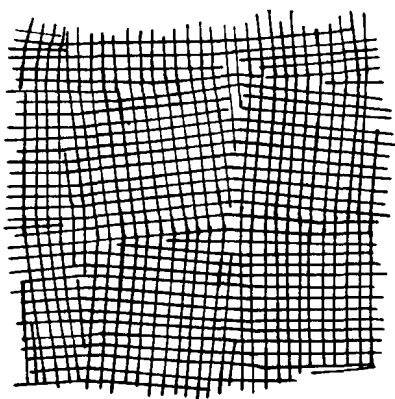


图 2-5 晶体内部嵌镶块示意图

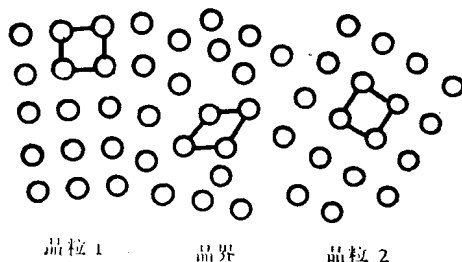


图 2-6 晶界处原子排列示意图

4. 晶粒间界

晶粒间界简称晶界,是晶面取向各不一致的晶粒互相接触的界面(图 2-6)。工业用金属材料,其相邻晶粒间的取向差一般都大于 $10\sim 15^\circ$ 。根据相邻晶粒取向差异和金属纯度高低,晶界厚度约在几个到几百个原子大小的范围内变化。晶界处的原子由于受着相邻晶粒不均衡力的作用,处于从一个晶粒取向向另一晶粒取向过渡的排列形式。因此,与晶粒内部比较,晶界处的晶格发生畸变,并且畸变程度随相邻晶粒取向差增加而加剧。

由于晶界处的原子处境偏离最低位能状态的平衡位置,所以晶界原子的平均能量高于晶粒内部原子的平均能量。这部分高出的能量称为界面能。

晶界处上述的原子排列状况和能量状态,对金属的许多性质起着重要的影响:在腐蚀介质中,晶界比起晶粒易受侵蚀;温度升高时,晶界先于晶粒发生熔化;当渗入其他元素时,异类原子在晶界处的扩散能力远比在晶粒内部高,等等。晶界对金属内部组织结构的转变,对金属塑性变形的过程,以及对金属的机械性能都起着重要的作用和影响。

5. 杂质原子

实际晶体结构不规则性的另一种表现,就是有异类元素原子的侵入。经过精炼提纯的金属,即使按重量计算纯度达 99.999% 谓之高纯度金属,尚且残存十万分之一(1×10^{-5})的杂质。这样微量的杂质按其原子个数来说是极为可观的量。

例如,当铁含有 0.001% 杂质时,在 1 立方厘米的体积内,杂质重量就占 7.8×10^{-5} 克。如果杂质元素是硫,而硫原子的绝对重量等于 $32 \times 1.622 \times 10^{-24}$ 克,则在 1 立方厘米的铁里,硫原子数目将是:

$$\frac{7.8 \times 10^{-5}}{32 \times 1.622 \times 10^{-24}} \div 1.5 \times 10^{18}$$

在这种情况下,甚至在边长为 0.1 毫米的立方体铁的晶粒里,也将有 1.5×10^{12} (一万五千亿) 个硫原子。

当然,实际使用的金属材料是难以达到如上所述的高纯度,并且掺入的杂质也绝非一种元素。但是,勿庸置疑,为数如此众多的杂质原子依其大小和化学性质,他们或以单个原子或以原子集团形式,分布在晶粒内,富集在位错处,吸附在嵌镶块或晶界上,足以影响金属的组织结构和性质。例如微量的铋(大于 0.002%),使铜在高于 270°C 的热状态下丧失塑性变形的能力;微量的硼(0.001~0.005%)可以部分代替贵重的合金元素以改善钢的热处理性能。

三、金属的结晶

(一) 液态金属结构特点和冷却曲线

1. 液态金属结构特点

已经知道,固态金属是晶体,其内部原子在很长行列内呈规则排列,并且以一定的平衡间距为中心长时间地作振动。固态金属的这种结构特征,称为“长程有序”。

当升高温度,原子的振幅增大,原子的动能和位能都增加。当温度升高到某一数值,金属原子所吸收的能量再也难以维持它们之间的牢固的结合,晶体的长程有序便遭破坏,这一温度称为金属的熔化温度。显然,金属的熔化温度随原子间的结合力增加而升高。

金属由晶体转变为液体后,金属的性质发生明显的变化。例如,液体有流动性,可以随容器改变形状;异类原子在液体里容易分布均匀;可分隔性,液体金属容易被隔离分开等等。这些性质说明,液态金属中原子之间的结合力较弱,活动能力较大,穿插运动较易。

但是,金属由固态转变为液态后,原子毕竟仍然处在与晶体相同的有形有体的聚合状态,而不象气体中的原子或分子相互间的距离较大,并在空间作无规则的运动。此外,某些性质还能表明,液态金属的内部构造近似晶体,而远异气体。如晶体转变为液体的熔化热只是液体转变为气体蒸发热的十几分之一(见表 2-1);固态转变为液态时,大多数金属体积增加约 3~5%;液体和晶体远非象气体那样容易压缩。