

# 金属塑性成形原理

鲁世红 谢兰生

航空宇航制造工程系

2001.6.

# 本书所用符号

<p>P——外力；变形力</p> <p>—</p> <p><math>\bar{\epsilon}</math> ——等效应变(应变强度)</p> <p>P ——单位(流动)压力</p> <p>S——全应力</p> <p>F ——面积</p> <p>S——流动应力(真实应力)</p> <p><math>\sigma</math> ——正应力</p> <p><math>\sigma_s</math> ——屈服极限(初始屈服应力)</p> <p><math>\tau</math> ——剪应力</p> <p><math>\sigma_b</math> ——强度极限</p> <p><math>\sigma_0</math> ——条件(正)应力</p> <p>u、v、w——位移分量</p> <p><math>\sigma_{ij}</math> ——应力张量</p> <p><math>\dot{u}</math>、<math>\dot{v}</math>、<math>\dot{w}</math> ——速度分量</p> <p><math>\epsilon_{ij}</math> ——应变张量</p> <p><math>\dot{\epsilon}_x</math>、<math>\dot{\epsilon}_y</math>、<math>\dot{\epsilon}_z</math> ——应变速率分量</p> <p><math>\sigma_1</math>、<math>\sigma_2</math>、<math>\sigma_3</math> ——主应力</p> <p><math>\epsilon</math> ——对数应变(真实应变)：</p> <p><math>\epsilon_1</math>、<math>\epsilon_2</math>、<math>\epsilon_3</math> ——主应变</p> <p>K——屈服时的最大剪应力</p> <p><math>\left. \begin{matrix} \sigma_x、\sigma_y、\sigma_z \\ \tau_x、\tau_y、\tau_z \end{matrix} \right\}</math> ——应力张量分量</p> <p><math>\delta</math> ——延伸率</p> <p><math>\left. \begin{matrix} \epsilon_x、\epsilon_y、\epsilon_z \\ \gamma_{xy}、\gamma_{yz}、\gamma_{zx} \end{matrix} \right\}</math> ——应变张量分量</p> <p><math>\psi</math> ——断面收缩率</p> <p><math>\epsilon_{xy}</math>、<math>\epsilon_{yz}</math>、<math>\epsilon_{zx}</math> ——工程剪应变</p> <p><math>J_1</math>、<math>J_2</math>、<math>J_3</math> ——应力张量第一、二、三不变量</p> <p><math>\sigma'_{ij}</math> ——应力偏张量</p>	<p><math>J_1</math>、<math>J_2</math>、<math>J_3</math> ——应力偏量第一、二、三不变量</p> <p><math>I_1</math>、<math>I_2</math>、<math>I_3</math> ——应变张量第一、二、三不变量</p> <p><math>\epsilon'_{ij}</math> ——应变偏张量</p> <p><math>\sigma_{\square}</math> ——平均(正)应力</p> <p><math>\epsilon_{\square}</math> ——平均(正)应变</p> <p><math>\sigma_0</math> ——静水(压)应力</p> <p><math>\delta_{ij}</math> ——克氏符号，单位球张量</p> <p><math>\delta_{ij} \epsilon_{\square}</math> ——应变球张量</p> <p><math>\tau_{\max}</math> ——最大剪应力</p> <p><math>\tau_{\max}</math> ——最大剪应变</p> <p><math>\delta_{ij} \sigma_{\square}</math> ——应力球张量</p> <p><math>\tau_{\text{H}}</math> ——八面体剪应力</p> <p><math>\sigma_{\text{H}}</math> ——八面体正应力</p> <p>—</p> <p><math>\bar{\sigma}</math> ——等效应力(应力强度)</p> <p><math>\epsilon_c</math> ——相对压缩</p> <p><math>\epsilon</math> ——相对伸长，小应变</p> <p><math>\psi_r</math> ——相对断面收缩</p> <p>W(w) ——变形功</p> <p><math>\mu_0</math> ——罗代应力参数</p> <p><math>\mu_c</math> ——罗代应变参数</p> <p><math>\mu</math> ——摩擦系数</p> <p><math>\nu</math> ——泊桑比</p> <p><math>T_i</math> ——表面力</p> <p><math>l_i</math> ——方向余弦</p> <p><math>T_i^*</math> ——假想表面力</p> <p><math>\sigma^*_{ij}</math> ——假想应力张量</p> <p><math>\epsilon^*_{ij}</math> ——假想应变张量</p> <p><math>\sigma'^*_{ij}</math> ——假想应力偏张量</p> <p><math>S_0</math> ——速度不连续面</p> <p><math>S_u</math> ——位移边界面</p> <p><math>S_r</math> ——力边界面</p>
--	--

<b>第一章 绪 论</b> .....	<b>1</b>
§1.2 金属塑性成形方法的分类.....	1
§1.3 金属塑性成形原理课程的目的和任务.....	3
§1.4 金属塑性成形理论的发展概述.....	3
思考题.....	5
<b>第二章 金属的晶体结构和塑性变形</b> .....	<b>6</b>
§2.1 金属的晶体结构.....	6
§2.2 三种常见的晶格.....	7
§2.3 晶体指数和晶向指数.....	8
§2.4 实际金属的晶体结构.....	10
§2.5 弹性变形和塑性变形.....	13
§2.6 单晶体的塑性变形.....	14
§2.7 位错简述.....	18
§2.8 多晶体的塑性变形.....	22
§2.9 金属的断裂.....	24
§2.10 金属的加工硬化、回复和再结晶.....	28
§2.11 再结晶全图.....	31
§2.12 塑性成形时变形的分类.....	32
§2.13 附加应力和残余应力.....	33
习 题.....	33
<b>第三章 应力分析</b> .....	<b>35</b>
§3.1 外力和内力.....	35
§3.2 直角坐标系中一点的应力状态.....	36
§3.3 平衡微分方程.....	48
§3.4 平面应力状态和轴对称应力状态.....	49
习 题.....	53
<b>第四章 应变分析</b> .....	<b>55</b>
§4.1 有关变形的一些基本概念.....	55
§4.2 小变形分析.....	56
§4.3 应变增量和应变速率张量.....	69
§4.4 平面变形问题和轴对称问题.....	72
习 题.....	75
<b>第五章 金属的塑性和变形抗力</b> .....	<b>77</b>
§5.1 塑性、塑性指标、塑性图和变形抗力的概念.....	77
§5.2 真实应力——应变曲线.....	79
§5.3 金属的化学成分和组织状态对塑性和变形抗力的影响.....	85
§5.4 变形温度、变形速度对塑性和变形抗力的影响.....	88
§5.5 变形速度对塑性和变形抗力的影响.....	90

§5.6 应力状态对塑性和变形抗力的影响 .....	93
§5.7 超塑性变形 .....	97
习 题 .....	101
<b>第六章 屈服条件 .....</b>	<b>103</b>
§6.1 应力空间与屈服条件 .....	103
§6.2 两种常用的屈服条件 .....	104
§6.3 两种屈服条件的比较 .....	108
§6.4 强化材料的屈服条件和强化面 .....	111
<b>第七章 塑性应力应变关系 .....</b>	<b>115</b>
§7.1 广义虎克定律 .....	115
§7.2 全量理论及基本方程组 .....	117
§7.3 增量理论及基本方程组 .....	123
§7.3 全量理论与增量理论的比较 .....	127
<b>第八章 金属塑性成形问题的简化求解方法 .....</b>	<b>137</b>
§8.1 功平衡法 .....	137
§8.2 上限法 .....	140
§8.3 主应力法 .....	146
§8.4 塑性材料力学法 .....	148
<b>第九章 金属材料体积成形问题力学分析 .....</b>	<b>151</b>
§9.1 圆柱体镦粗 .....	151
§9.2 金属挤压变形 .....	154
§9.3 金属拉拔变形 .....	160
<b>第十章 金属材料板料成形问题力学分析 .....</b>	<b>171</b>
§10.1 板料弯曲 .....	171
§10.2 拉 深 .....	176
§10.3 翻边与缩口 .....	179

# 第一章 绪 论

## § 1.1 金属塑性成形在国民经济中的作用

金属塑性成形是金属加工方法之一。它是利用金属的塑性——金属产生塑性变形的能力，使金属在外力作用下成形的一种加工方法。因而也称为金属塑性加工或金属压力加工。

常见的金属压力加工方法，如轧制、挤压、拉拔、锻造、冲压等，都是利用金属的塑性而进行成形加工的。通常，轧制、拉拔、挤压是生产型材、板材、管材和线材等金属材料的加工方法，属于冶金工业领域，而锻造、冲压则通常是利用金属材料来制造机器零件的加工方法，属于机械制造工业领域。

金属塑性成形方法的主要优点有：

1. 金属材料经过相应的塑性加工后，其组织、性能都能得到改善和提高，特别是对于铸造组织，效果更为显著。例如铸锭必须通过锻造、轧制或挤压，才能使其结构致密、组织改善、性能提高。

2. 金属塑性成形主要是靠金属在塑性状态下的体积转移，而不需靠部分地切除金属的体积，因而制件的材料利用率高，流线分布合理，从而也提高了制件的强度。

3. 用塑性成形方法得到的工件可以达到较高的精度。近年来，应用先进的技术和设备，不少零件已达到少、无切削的要求。例如，精密锻造的伞齿轮，其齿形部分精度可不经切削加工直接使用，精锻叶片的复杂曲面可达到只需磨削的精度。

4. 塑性成形方法具有很高的生产率。这一点对于金属材料的轧制、拉丝、挤压等工艺尤其明显。随着锻压生产机械化的发展，机械零件的生产情况也是如此。例如，在  $12000 \times 10\text{kN}$ <sup>(1)</sup> 机械压力机上锻造汽车用的六拐曲轴仅需 40s；在曲柄压力机上压制一个汽车覆盖件仅需几秒钟。

由此可见，利用金属塑性成形方法，不但能获得强度高、性能好、形状复杂和精度高的工件，而且具有生产率高、材料消耗少等优点，因而在国民经济中得到广泛的应用。特别是在汽车、拖拉机、宇航、船舶、军工、电器和日用品等工业部门中，塑性成形更是主要的加工方法。

## § 1.2 金属塑性成形方法的分类

金属塑性成形方法可分为轧制、拉拔和挤压三大类。每类又包括多种加工方法，形成各自的工艺领域。

轧制是使金属锭料或坯料通过两个旋转轧辊间的特定空间(直线的或异型的)，以获得一定截面形状材料的塑性成形方法(见表 1-1a)。这是由大截面材料变为小截面材料用加工过程。利用轧制方法可生产出型材、板材和管材。




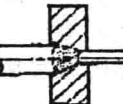


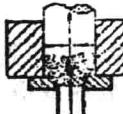


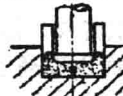


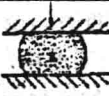





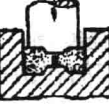


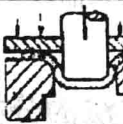


拉拔是将中等截面的坯料拉过有一定形状模孔，以获得小截面的坯料的塑性成形方法(表 1-1b)。利用拉拔方法可以获得棒材、管材、和线材。

挤压是将在筒体中的大截面坯料或锭料一端加压，使金属从模孔中挤出，以获得符

(1) 压力机的吨位是 12000t，按照我国法定单位的规定，其压力应为  $12000 \times 10\text{kN}$ 。

合模孔截面形状的小截面坯料的塑性成形方法（表 1-1c、d）。因为挤压是在三向受较大的压应力状态下的成形过程，所以更适于生产低塑性材料的型材和管材。

表 1-1 塑性成形方法分类

序号	成形方法名称	工序简图	变形区域 (阴影图)	变形区 主应力图	变形区 主应变图	变形区塑性 流动性质
a	轧制 (纵扎)		轧辊间			变形区不变 稳定流动
b	拉拔		模子 锥形腔			变形区不变 稳定流动
c	正挤压		接近 凹模口			变形区不变 稳定流动
d	反挤压		冲头 下部分			变形区不变 非稳定流动
e	墩粗		全部 体积			变形区不变 非稳定流动
f	开式模锻		全部 体积			变形区不变 非稳定流动
g	闭式模锻		全部 体积			变形区不变 非稳定流动
h	拉延		压边圈 下板料			变形区不变 非稳定流动

以上几种金属材料的塑性成形方法，一般在加热状态下进行，但有时也可在室温下进行，视具体条件下金属的塑性和具体要求而定。这些方法通常都用于连续生产等截面金属材料，因而有很高的生产率。

机械制造中的塑性成形方法也称锻压加工，包括锻造和冲压两大方面。

锻造属体积成形，就是通过金属体积的转移和分配来获得机器零件(毛坯)的塑性成形方法。为使金属易于成形和有较好的塑性，锻造多在热态下进行，所以锻造也常称为热锻。

锻造通常分自由锻和模锻两大类。自由锻一般是在锤或水压机上，利用简单的工具将金属锭料或块料锻成特定形状和尺寸的加工方法。表 1-1 中的 e—平砧下墩粗即为一例。进行自由锻时不使用专用模具，因而锻件的尺寸精度低，生产率也不高，所以自由

锻主要用于单件、小批生产或大锻件的生产。

模锻是适于大批量生产的锻造方法，锻件的成形要用适合于每个锻件的模具来进行，表 1-1f、g 是两种模锻形式。由于模锻时金属的成形由模具控制，因此模锻件就有相当精确的外形和尺寸，也有相当高的生产率。

由于生产技术的发展，锻造中也引入了挤、轧等变形方式来生产锻件，例如用辊锻方法生产连杆；用三辊横轧方法生产长轴锻件；用挤压方法生产汽阀、转向节等等。这样就扩展了锻造工艺的领域，促使生产率得到进一步的提高。

近年来，随着技术的发展以及锻压设备能力的增加、新模具材料的应用，对于某些中、小型锻件采用了不加热或少加热的锻造方法，即所谓冷锻、冷挤或温锻、温挤等工艺。这样，一方面节约了能源，另一方面减少或免除了氧化、脱碳等缺陷，这就为提高锻件的精度创造了条件，是实现少无切削的重要途径。

冲压和上述各种体积成形方法不同，它属于板料成形，是利用专门的模具对板料进行塑性加工的方法，故也称板料冲压。同时，由于一般都在室温下进行，故也常称为冷冲压。板料冲压时厚度基本不发生变化。板料冲压的基本方式有冲裁、弯曲、拉延(表 1-1h)成形等多种工序。

各种塑性成形方法，除上述生产上的特点而外，在变形区的应力状态、变形状态和金属流动性等方面也各有特点，如表 1-1 所示。表中的应力、应变状态只是从总体的角度上表示了变形区域中主应力、应变的正或负，没有表示出大小，因而是近似的分析方法。成形过程中变形区域不变的属稳定塑(性)流(动)，变形区域随变形过程而变化的属非稳定塑(性)流(动)。仔细观察可以发现，机器零件的塑性加工多数属于非稳定塑流过程。当然非稳定塑流过程比稳定塑流要复杂得多。

## § 1.3 金属塑性成形原理课程的目的和任务

金属塑性成形方法多种多样，具有各自的特点，但它们在塑性变形的金属学和力学方面则有着共同的基础和规律。金属塑性成形原理课程的目的就在于科学地、系统地阐明这些基础和规律，为学习后续地工艺课程作理论准备，也为合理制订塑性成形工艺奠定理论基础，因此，本课程的任务是：

1. 阐明金属塑性变形的金属学基础，研究金属的塑性变形行为以及外部条件对塑性和流动应力的影响，以便获得最佳的塑性状态、最高的变形效率和优质的性能。
2. 阐明应力、应变、应力应变关系和屈服准则等塑性理论知识，分析研究塑性成形力学问题的各种解法及其在具体工艺中的应用，从而科学地确定变形体中的应力、应变分布和所需的变形力和功，为选择锻压设备吨位和设计模具提供依据。
3. 阐述塑性成形时的金属流动规律和变形特点，以便确定适当的锻压工步和合理的坯料尺寸，使工件顺利成形。

## § 1-4 金属塑性成形理论的发展概述

金属塑性成形理论是在塑性成形的物理、物理—化学和塑性力学的基础上发展起来的一门工艺理论。本世纪四十年代，在大学中设立了这门课程，并出版了相应的教科书。

金属塑性变形的物理和物理化学方面所研究的内容，属于金属学范畴。本世纪三十年代提出的位错理论从微观上对塑性变形的机理作出了科学的解释。

金属材料的永久变形能力——塑性，也是变形物理方面的一个主要研究内容。1912

年卡尔曼(Von Karman)对大理石和红砂石的著名压缩试验,揭示了通常认为是脆性的石料在三向压应力下却能发生塑性变形(大约 $\epsilon = 8\%$ )的事实。1964年勃立奇曼(P. W. Bridgman)在3万atm(3040MPa)下对中碳钢试棒进行拉伸试验,获得了99%的断面收缩率,由此建立了静水压力能提高材料塑性的概念。合适的加工温度、速度条件也能创造良好的塑性状态。例如,近年来,一些难变形合金、耐热合金,通过利用先进的成形技术,如等温锻造、超塑性成形等,均可以获得满意的结果。

金属塑性成形原理的另一重要内容是塑性成形力学,它是在塑性理论发展和应用中逐渐形成的。塑性理论的发展历史可追溯到1864年,当时,法国工程师屈雷斯加(H. Tresca)首先提出了最大剪应力屈服准则,即屈雷斯加屈服准则。1870年圣维南(B. Saint-Venant)第一次利用屈雷斯加屈服准则求解了管子受弹塑性扭转和弯曲时的应力,随后又研究了平面应变方程式。同年,列维(M. Levy)按圣维南的观点提出了三维问题的方程式和平面问题方程式的线性化方法。但后来一段时间,塑性理论发展缓慢,直到本世纪初才有所进展。德国学者在这方面有很大贡献。1913年密席斯(Von Mises)从纯数学角度提出了另一新的屈服准则——密席斯屈服准则。1923年汉基(H. Hencky)和普朗特(L. Prandtl)论述了平面塑性变形中滑移线的几何性质。1930年,劳斯(A. Reuss)根据普朗特的观点提出了考虑弹性应变增量应力应变关系式。至此,塑性理论的基础已经奠定。到四十年代以后,由于工业生产的需要,塑性理论在很多国家中相继发展,利用塑性理论求解塑性成形问题的各种方法陆续问世,塑性成形力学逐渐形成并不断得到充实。

第一次将塑性理论用于金属塑性加工的学者可认为是德国的卡尔曼。他在1925年用初等方法分析了轧制时的应力分布,其后不久,萨克斯(G. Sachs)和齐别尔(E. Siebel)在研究拉丝过程中提出了相似的求解方法——切块法(slab method),即后来所称的主应力法。五十年代中,苏联学者翁克索夫(Унксов)提出了一个实质上与主应力法相似的方法——近似平衡方程和近似塑性条件的联解法,并对镦粗时接触表面上的摩擦力分布提出了新见解。

近二十年来,应用滑移线理论求解金属塑性成形问题的工作和论文逐渐增多。现在,滑移线方法除应用于求解各向同性硬化材料的平面变形问题外,人们还正在研究用它来求解平面应力问题、轴对称问题和各向异性材料方面的问题。

五十年代,英国学者约翰逊(W. Johnson)和日本学者工藤(H. Kudo)等人,根据极值原理提出了一个比滑移线法简单的求极限载荷的上限法。利用该方法计算出的塑性成形载荷一般高于真实载荷,因此称之为上限法。其后,对于复杂形状的工件,又发展出了所谓单元上限法。

在五十年代中,美国学者汤姆生(E. G. Thomsen)等提出了视塑性法(VisioPlasticity),这是一种由实验结果和理论计算相结合的方法。利用该方法,可以根据实验求得的速度场计算出变形体内的应变场和应力场。

近年来已开始用有限元方法来研究金属塑性成形方面的问题。国内外一些学者对镦粗、挤压、摩擦等问题的有限元解发表过不少文章。一般认为有限元法是预测变形体应力、应变、应变速度和温度分布的强有力的手段。

塑性成形中求解应力、应变等是一项繁重的计算工作。近年来电子计算机技术的引入,对塑性成形问题的求解起了很大促进作用。有限元方法过程复杂,计算工作繁重,必须借助电子计算机才能演算;而其他解法中的一些求解过程,如作滑移线场、求应力分布、确定分流点、标定摩擦系数等,都需经大量的计算工作,利用电子计算机,运用数值计算方法,可以快速地获得较精确的解答,或可直接画出滑移线场和相应的曲线,极大地提高了解题的效率。可以相信,在金属塑性成形理论今后的发展中,计算技术会愈来愈发挥它的作用,电子计算机的应用也必将日益广泛。



## 思考题

1. 试论述金属塑性成形方法在国民经济中的重要性。
2. 选择日常所见的机械或零件，试分析一下它所采用的加工方法。如果认为是塑性加工件，能否分析一下其所用成形方法。
3. 表 1-1 中的成形方法有的属于稳定塑性流动，有的属于不稳定塑性流动，其特征是什么？对于具有相同主应力图和主变形图的成形方法，你是否认为它们有相同的成形性能？为什么？
4. 本课程的任务是什么？本课程和哪些课程关系比较密切？为什么？

## 第二章 金属的晶体结构和塑性变形

### § 2.1 金属的晶体结构

一切固态物质按其原子(或分子)的聚集状态可分为两大类,晶体和非晶体。所谓晶体,系原子(或分子)在三维空间作有规则的周期性重复排列的固体,而非晶体就不具备这一特点,这是两者的根本区别。所有固态金属和合金都是晶体。

由于金属原子的价电子与核的结合,易于脱离,所以金属原子间采取如下特有的结合形式:原子都脱离其价电子变成正离子,正离子按照一定的几何形式规则地排列起来,在各个固定点上作轻微的振动;而所有价电子则都呈自由电子的形式在各个正离子间自由运动,为整个金属所公有,形成所谓“电子气”;带负电的自由电子与带正电的金属正离子之间产生静电吸引力,使金属原子结合在一起。金属原子间的这种结合形式称为“金属键”(图 2.1)。

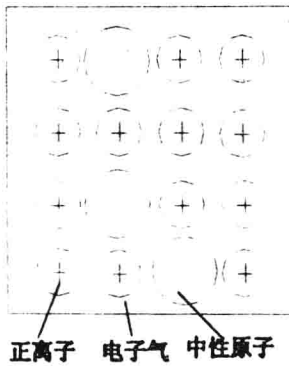


图 2.1 金属键

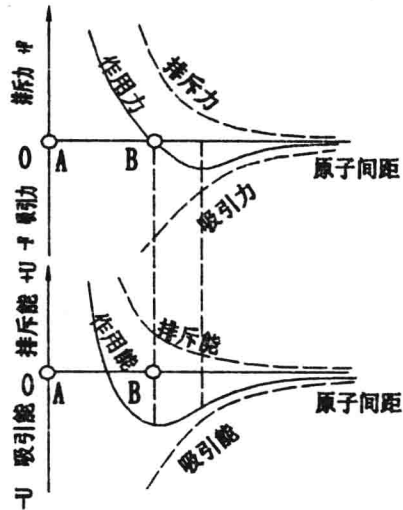


图 2.2 双原子作用模型

因此,金属内原子都处在异号电荷的吸引力和同号电荷的排斥力的作用下.以相邻两原子为例,它们之间便有两种相互作用:一种是相互吸引作用,它来自金属正离子与周围电子气之间的静电吸引力,它促使原子彼此接近;另一种是相互排斥作用,它来自正离子与正离子之间和电子与电子之间的静电排斥力,它促使原子彼此离开。图 2.2 是双原子作用模型,表示了 A 原子对 B 原子的作用力和作用能随原子间距离  $D$  的变化。由图可知,当原子间距离过大时,吸引力大于排斥力,原子互相吸引,自动靠近;当原子间距离过近时,排斥力大于吸引力,原子便互相排斥,自动离开。当原子间距离为  $D$  时,吸引力和排斥力恰好相等,原子既不会自动靠近,也不会自动离开,恰好处于平衡位置。这时,原子处于作用能曲线的谷底,势能最低,构成了晶体的稳定状态。事实上,在金属晶体中每个原子都被相邻后的原子包围着,每个原子都处于周围原子共同形成的势能谷中,而且能谷更深了。能谷的深浅反映出原子间结合的强弱,能谷越深,给合能越大,金属键越强。

晶体内原子(离子)在空间的规则排列,称为空间点阵。为了便于描述晶体内原子排列的情况,常通过直线把各原子中心联结起来,构成一空间格子,即假想处于平衡状态各原子都位于该空间格子的各结点上,如图 2.3a 所示。这种描述原子排列形式的空间格子,简称晶格。晶体中各种方位的原子层,称为晶面。如图 2.3b 所示,晶格中能反映晶格特征的最基本的几何单元,称为晶胞。晶胞的各边尺寸— $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,即原子间距离,称为晶格常数(或点阵常数)。其度量单位为埃( $\text{\AA}$ , $1\text{\AA}=10^{-8}$  厘米)。各种晶体的主要差别,就在于晶格形式和晶格常数的不同。

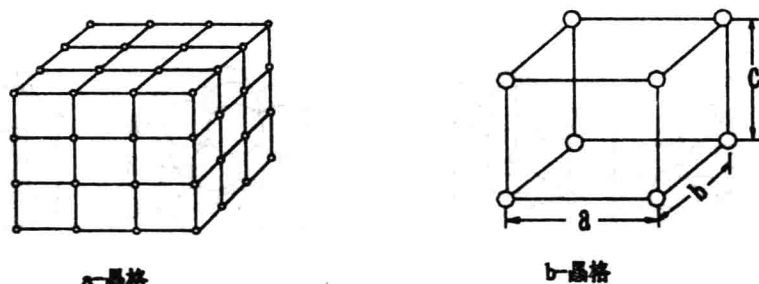


图 2.3 晶格示意图

## § 2.2 三种常见的晶格

如上述,晶格是由一些最基本的几何单元晶胞堆砌而成。工业上使用的几十种金属中,最常见的金属晶格结构有下面三种:

一、**体心立方晶格** 体心立方晶格的晶胞是一个立方体,棱边长度彼此相等,三轴互相垂直,八个顶角和中心各有一个原子(图 1.4)。立方体的对角面(ABCD)是原子紧密排列的面。属于体心立方晶格的金属有:Cr、W、V、Mo、 $\alpha$ -Fe、 $\gamma$ -Ti 等。

二、**面心立方晶格** 面心立方晶格的晶胞也是一个立方体,棱边长度彼此相等,三轴互相垂直。它的特点是除立方体八个顶角各有一个原子外,六个面的中心还各有一个原子(图 1.5)。面心立方晶格原子紧密排列的面,是垂直于立方体空间的对角线的对角面(图 1.6, C)。在这密排面 C 的原子空隙中心堆积第二层 B 的原子,在第二层 B 的原子空隙中心堆积第一层 A 的原子,而第一层 A 的原子中心和第三层 C 重复。以后的原子堆积又重复以上第一、二、三层的堆积方式。所以它的堆积方式为 ABCABC……。属于面心立方晶格的金属有:Al、Ni、Cu、 $\gamma$ -Fe 等。

三、**密排六方晶格** 密排六方晶格的晶胞是在六方柱体的十二个顶角上各有一个原子,



图 2.4 体心立方晶格

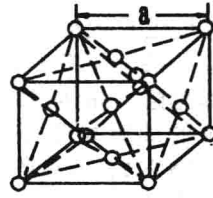
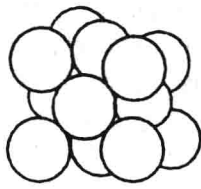


图 2.5 面心立方晶格

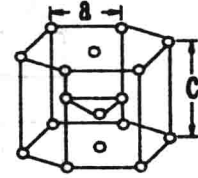
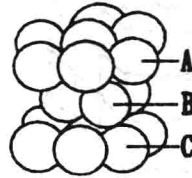
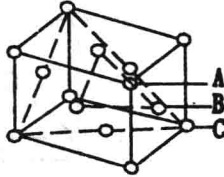
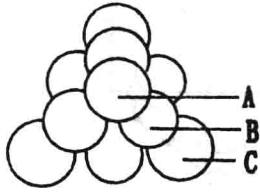


图 1.6 面心立方晶格原子的排列

图 2.7 密排立方晶格

上下面的中心各

有一个原子，在晶胞的中间层还有三个原子（图 2.7）。密排六方晶格有两个晶格常数，六方底面的边长  $a$  和上下面间的距离  $c$ 。一般密排六方晶格的金属  $c/a=1.57\sim 1.64$ 。密排六方晶格原子紧密排列的面是其底面。以底面 A 作为第一层，在第一层的原子空隙中心，堆积第二层 B 的原子，第二层原子中心又和第一层原子中心重合，因而其堆积方式是 ABAB……。属于密排六方晶格的金属有：Zn、Mg、Be、 $\alpha$ -Ti 等。

## § 2.3 晶体指数和晶向指数

晶格中由原子组成的平面，叫晶面；由原子组成的直线，代表晶体空间内的一个方向，叫晶向。由于晶体在不同的晶面晶向上，原子排列不同，原子的密度和原子间的结合力大小不同，因而引起机械、物理、化学性能的差异。因此，为了便于研究，有必要给晶面和晶向规定符号。表示晶面的符号，叫晶面指数；表示晶向的符号，叫晶向指数。

### 一. 立方晶格的晶面指数

立方晶格的晶面指数这样确定：1) 以晶胞互相垂直的三棱边为坐标 X、Y、Z，坐标原点应位于欲确定的晶面之外，避免出现零截距；2) 求出晶向在三坐标轴上的截距（以晶格常数  $a$  为截距的度量单位），如晶面与某一轴不相截交，则截距定为  $\infty$ ，表示在无限远处相交，如晶面与坐标轴的截距为负值，则在相应指数上方加一负号；3) 分别取三轴截距的倒数，乘以分母的最小公倍数，化简为最小整数，依次写在圆括号内如 (hkl)，就表示为晶面指数（图 2.8 a）。晶面指数并非仅表示某一晶面，而是表示一组平行的晶面。凡是互相平行的晶面，具有同一晶面指数。同一晶胞中，有些晶面虽然空间位置不同，但具有相同的原子排列，则这些晶面属于同一晶面族，如下表示： $\{hkl\}$ 。例如晶面族  $\{10\bar{7}\}$  包括晶面  $(100)$ 、 $(010)$ 、 $(001)$ ；晶面族  $\{110\}$  包括晶面  $(110)$ 、 $(1\bar{1}0)$ 、 $(011)$ 、 $(110)$ 、 $(101)$ 、 $(011)$ 。

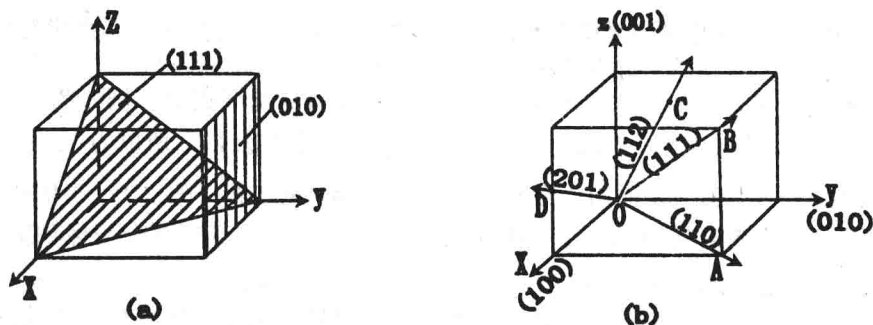


图 2.8 立方晶格的晶面指数和晶向指数

## 二、立方晶格的晶向指数

立方晶格的晶向指数如下确定：1) 在晶胞中取座标，把原点放在欲确定晶向的直线上，或自原点作一有向直线与待定晶向平行；2) 在该直线上取距原点最近的原子，求出该原子在 X、Y、Z 三座标轴上的投影值(以晶格常数 a 为度量单位)，如为负值，则在相应指数上方加一负号；3) 把求得三值化简为最小整数，依次写在方括号内，如  $[uvw]$ ，就表示为该方向的晶向指数(图 1. 8b)。晶向指数所表示的不仅仅是某一条直线的位向，而是一组平行线的位向。只要是同向而平行的晶向，都具有同一晶向指数。同一直线有相反的两个方向，其晶向指数的数字和顺序都相同，只是符号完全相反。同样，也存在着原子排列相同而空间位向不同的晶向族，以  $\langle uvw \rangle$  表示。如晶向族  $\langle 100 \rangle$  包括晶向  $[100]$ 、 $[101]$ 、 $[001]$ ；又如晶向族  $\langle 110 \rangle$  包括晶向  $[110]$ 、 $[101]$ 、 $[011]$ 、 $[\bar{1}10]$ 、 $[10\bar{1}]$ 、 $[01\bar{1}]$ 。

可以看出，在立方晶格中同指数的晶面和晶向互相垂直，如： $[100] \perp (100)$ ， $[110] \perp (110)$ ， $[111] \perp (111)$ 。另外，如果  $[uvw]$  和  $(hkl)$  符合如下关系式， $uh+vk+wl=0$ ，则  $[uvw] \parallel (hkl)$ 。

## 三、六方晶格的晶面指数和晶向指数

六方晶格晶面指数的确定方法与立方晶格相似，只是所取座标轴不同。六方晶格取四个座标轴，其中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  三轴位于晶胞的同一底面上，并互成  $120^\circ$ ，度量单位为晶格常数 a；另一轴垂直于晶胞底面，度量单位为另一晶格常数 c。晶面指数以  $(hkil)$

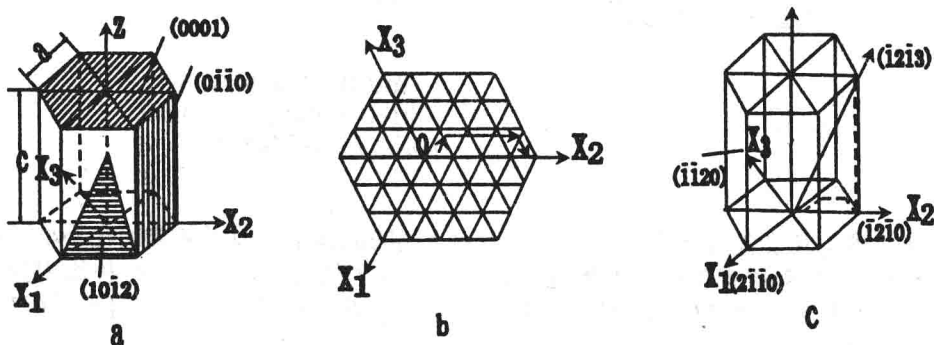


图 2.9 六方晶格的晶面指数、晶向指数

表示(图 2.9a)。六方晶格的晶向指数以 $[uvw]$ 表示。由于六方晶格中四个坐标轴的夹角不同, 平面上三个坐标夹角为 $120^\circ$ , 而轴与平面上三个轴夹角为 $90^\circ$ , 所以下宜用述在坐标轴上取投影值的办法, 而需用“分矢量法”来确定晶向指数。例如图 2.9b 所示, 底面上 OA 晶向为沿  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  轴的三个分矢量之和(图中虚线), 所以为 $[\frac{1}{3} \frac{2}{3} \frac{1}{3} 0]$ , 化简后为 $[\bar{1}2\bar{1}0]$ 。同理, OB 晶向为沿四个坐标轴上分矢量之和(图 2.9c 中虚线), 所以为 $[\frac{1}{3} \frac{2}{3} \frac{1}{3} 1]$ , 化简后为 $[\bar{1}2\bar{1}3]$ 。还应指出, 由于平面上一点有两个坐标轴就能确定, 因此, 六方晶格的晶面指数 $(hki1)$ 中存在着 $i=-(h+k)$ 的关系, 同样晶向指数 $(uvw)$ 也有 $t=-(u+v)$ 的关系。在用“分矢量法”确定六方晶格的晶向指数时, 必须满足上述关系。另外, 在立方晶格中判断一个晶向和一个晶面是否垂直或平行的关系式, 在六方晶格中仍然适用。即指数相同的晶向和晶面必然互相垂直。直例如 $[0001] \perp (0001)$ ; 又如果 $hu+kv+it+lw=0$ , 则 $[uvw] \perp (hkil)$ 。

## § 2.4 实际金属的晶体结构

由位向相同的一群同类晶胞聚合在一起, 组成单晶体。单晶体由于不同晶面和晶向上原子的排列不同, 因而引起机械、物理、化学性能的不同, 称为晶体的各向异性。目前已用人工方法获得某些金属的单晶体, 尺寸之大足以制造力学性能试验用的试件, 这在很大程度上为我们研究金属的塑性变形提供了方便。

熔化的金属在凝固时产生大量的结晶核心, 然后晶核长大, 完成结晶过程。所以工业用金属是由许多尺寸很小、位向不同的小晶体所组成, 称为多晶体(图 2.10)。这些小晶体系由许多位向基本一致的晶胞组成, 类似单晶体, 称为晶粒。晶粒在显微镜下可以看到。由于单晶体是由许多不同位向的晶粒组成, 晶粒的各向异性被互相抵消, 因而多晶体一般不显示方向性。多晶体中各晶粒之间的过渡区, 称为晶界。

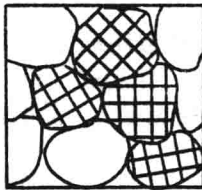


图 2.10 多晶体

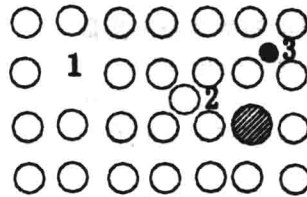


图 2.11 晶体中点缺陷  
1-空位; 2-间隙原子; 3-异质  
间隙原子; 4-置换原子。

现代理论和实验方法研究指出, 在实际金属的晶体中, 原子并非闭定不动, 而是以晶格结点——平衡位置为中心不停地作热运动; 原子的规则排列由于种种原因受到干扰和破坏, 并非象理想晶体那样绝对完整, 而是存在着一系列的缺陷。实际金属晶体的缺陷按其几何形态有下列几种。

一、点缺陷 晶体中的点缺陷包括空位、间隙原子和置换原子。在晶体中, 原子以平衡位置为中心振动着的。振动能量与温度有关系, 温度愈高, 能量愈大, 而且每个原子的能量也不完全相同, 尤其当晶体受到热或辐射时, 使某些原子在瞬时具有较高的能

量，超出原子间的结合能，离开原来的平衡位置，进入晶格中原子间空隙，或跑到晶体表面去。前一种情况，晶格内产生空位，同时也产生了间隙原子（图 2.11）。空位和间隙原子会使周围的原子偏离平衡位置，发生晶格的畸变。异质间隙原子大都是原子半径很小的原子，如钢中的碳、氮、氢、硼等原子，但仍比原子间隙大，同样会使周围晶格畸变。异质原子溶入晶体时，如占据原来基本原子的平衡位置，称为置换原子。由于置换原子的半径总比基体原子大些或小些，因此也使周围原子偏离平衡位置，造成晶格畸变。当空位周围的原子获得足够能量时，就有可能进入空位，使空位产生移动。空位移向晶界或晶体表面，空位即消失。间隙原子也时能由一个位置移到另一个位置；也可能与空位相遇，二者同时消失。空位与间隙原子的迁移运动，是晶体中发生原子扩散的一种主要方式。而原子的扩散与金属的热处理、化学处理、蠕变、高温变形等过程密切相关。

**二、线缺陷** 各种类型的位错是晶体中的线缺陷，也就是位错是长度范围内存在的体微观缺陷。位错最基本的形式有刃型位错和螺型位错。如图 2.12 所示，在一个晶体

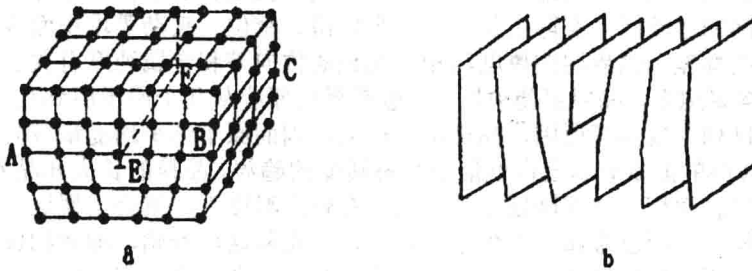


图 2.12 刃型位错示意图

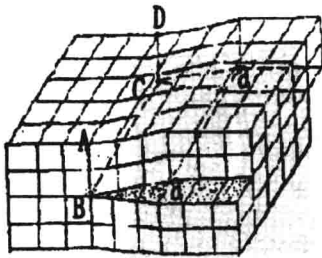


图 2.13 螺型位错示意图

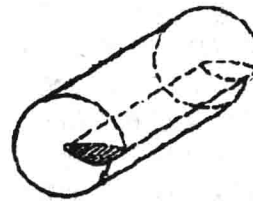


图 2.14

内，有一个原子平面中断在晶体内部，这个半原子面象刀刃一样，使位于 ABC 面上下两部分晶体产生错排现象，称为刃型位错。EF 线就是位错线。中断的半原子面在上部的称为正刃型位错，用符号“ $\perp$ ”表示；半原子面在下部的称为负刃型位错用符号“ $\dashv$ ”表示。另一种原子错排的形式如图 2.13 所示，在晶体中 BC 线的右边，晶体上下两部分原子发生了前后错动，错动了一个原子间距，使 BC 线和 aa' 线之间造成了上下层原子不

正常的过渡地带，此过渡地带即为螺型位错。BC 线是螺型位错线。图 2.14 表示一个圆柱形晶体沿其轴向发生了一个螺型位错，使原来垂直于轴线的圆柱平面变成了螺旋面，这就形象地说明了为什么称为螺型位错。图 2.13、2.14 均为右旋螺型位错。如果原子错排区发生在 BC 线左边(参阅图 2.13)，则形成左旋螺型位错。上述两种位错在位错线附近，都发生晶格的畸变。

晶体单位体积中所包含位错线的总长度，称为位错密度。退火的多晶体金属中位错密度为  $10^6 \sim 10^8 / \text{厘米}^2$ ，经过强烈冷变形后的金属中，位错密度可达  $10^{11} \sim 10^{12} / \text{厘米}^2$ 。金属中位错密度越高，金属便难于变形，金属的强度也越高。

**三、面缺陷** 晶体的面缺陷包括晶体外表面和内表面的缺陷。晶体外表面原于所处的环境与晶体内部的原子不同，原子只有一侧被内层原子包围，另一侧则暴露在其他质中。因此，表面原子所受的作用力不是均匀对称的，它们就会偏离平衡位置，处于能量较高的畸变状态。这样，晶体外表面就出现额外的自由能，即表面能。表面能与晶体结构有关：表面原子排列得越紧密平整，表面能越低；表面曲率半径越小；表面能越高。这些特点对金属的结晶和固态相变有重要的作用。

晶体内表面的缺陷主要有晶界、亚晶界等。晶界就是相邻晶粒的边界，它是两各位向不同晶粒之间的过渡区，实际上是由许多个位错、空位、夹杂等堆积而成。因而此处原子的排列规则性差。晶界层的厚度与相邻晶粒的位向差和金属纯度有关。位向差与愈大，金属杂质含量愈多，晶界层便愈厚。一般晶界层厚度从几个原子层到几百个原子层。晶界由于原子排列不规则等原因，晶格畸变较大，因而原子的平均能量较高，原子处于不稳定状态。较高的能量有自发向低能量状态转变的趋势。晶粒的长大和晶界的平直化，都能减小晶界的总面积，从而降低晶界总能。在较高温度下，就会出现这一过程。由于晶界又有较高能量，所以金属中发生组织转变，首先从这里开始，即新相优先在晶界处形成；在晶界上原子的扩散也比晶内快。晶界对金属的塑性变形起阻碍作用，所以晶粒细化，晶界面总面积大，能提高金属的(室温)机械性能。在腐蚀环境中，晶界也易被腐蚀。总之，晶界对金属的机械、物理及化学性能以及晶体内部的转变都有重要的影响。

x 射线及电子显微镜研究指出，一个晶粒内原于排列也不是完全理想的规则排列，而是由许多边长仅为  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  厘米的小晶块组成。这些小晶块称为亚晶粒或嵌镶块。它们之间的位向差很小，约为  $10 \sim 20'$ 。在亚晶粒之间，同样存在着亚晶界。亚晶界的原子排列也不规则，亚晶界由于晶格畸变也引起金属强化。亚晶粒愈细化，亚晶界愈多，强化也愈显图 2.15 是晶粒内亚晶示意图。

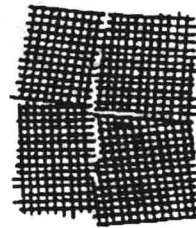


图 2.15 亚晶示意图



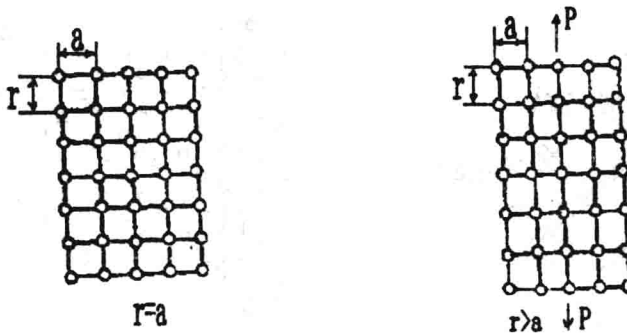
## § 2.5 弹性变形和塑性变形

物体在外力的作用下，会发生形状和尺寸的改变，称为变形。外力除去后能恢复原状的变形，称为弹性变形；外力除去后不能恢复原状的变形，称为塑性变形。

金属和合金在外力的作用下既能产生弹性变形，也能产生塑性变形，所以是一种弹塑性物质。

单晶体发生弹性变形的原因是，例如当晶体在拉应力的作用下，使原子离开了原来的平衡位置，原子间距离增大，产生了拉伸变形(图 2.16)。这时由于原子间距离增大，原子间的排斥力便减小，原子间的吸引力必将增大，超过排斥力的吸引力和拉应力平衡。外力除去，新的平衡消失，原子便回到原来的平衡位置，晶体恢复原状。同样：晶体在压应力的作用下，原子间距离缩短，排斥力大于吸引力，与压力建立新的平衡。外力除去，原子便回到原来的平衡位置，晶体恢复原状。

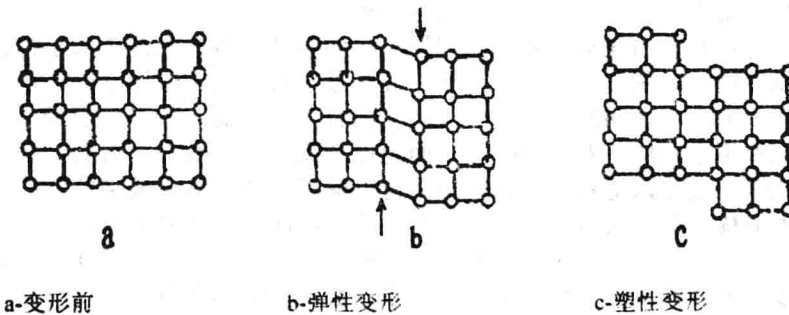
单晶体晶格在受到正应力时是不会发生塑性变形的，而是由弹性变形直接过渡到脆性断裂。塑性变形只有在受到剪应力时才会发生，单晶体发生塑性变形的原因是，当晶体在剪应力作用下，剪应力达到一定值时，晶体便由弹性变形(剪切变形)过渡到塑性



a- 变形前:

b- 变形后

图 2.16 晶体的弹性变形



a- 变形前

b- 弹性变形

c- 塑性变形

图 2.17 晶体的塑性变形