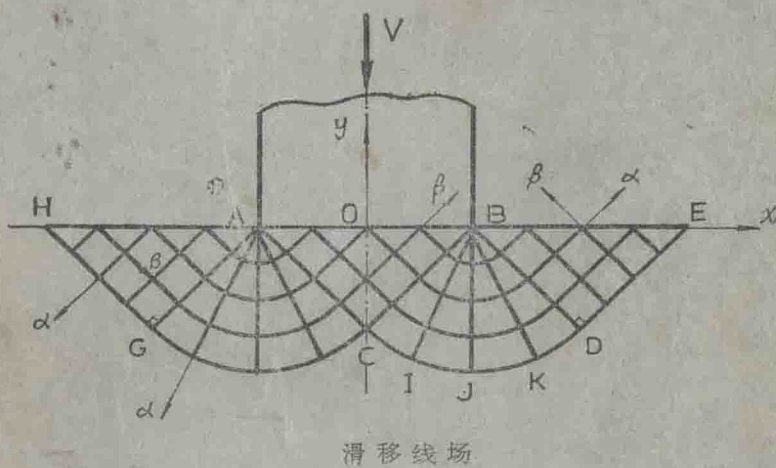


# 金属塑性成形原理

陈森灿 叶庆荣 编



清华大学机械工程系

1984年7月

## 前 言

《金属塑性成形原理》是锻压专业的一门专业理论课。本课程的任务是阐明塑性加工的力学基础和金属学基础，即阐明金属塑性变形的机理、变形条件和组织性能的变化。对变形过程进行应力应变分析及力能计算。探讨变形过程的金属流动。通过课程学习，要求学生初步掌握主应力解法（切块法）、滑移线法和上限法。

近几十年来由于世界各国科学技术与机械制造业的迅猛发展，使得锻压的生产工艺技术及理论体系均发生了一系列的重要飞跃，越来越多的科技人员运用塑性力学中滑移线场理论及上限定理（上限法）来解决工程问题。滑移线理论已是求解平面塑性应变问题的重要工具，滑移线法不仅可以计算变形体内任一点的应力分量与速度分量，还能求解其他方法不能求解的问题；与主应力法、工程算法相比，它是数学上比较严谨、理论上比较完整、计算精度比较高的一种方法。

《金属塑性成形原理》是锻压专业的学科理论，也是专业技术课程的理论基础。学生较好地掌握了专业理论，不仅在本专业领域内站得高，看得远，而且会增强将来工作时的适应能力，具有普遍和长远的意义。过去的专业理论课（如金属压力加工原理），内容陈旧，而且也很不完善。学生普遍反映学了用不上，对实际生产指导性不强。然而，近一、二十年来塑性成形理论有很大的发展；并且由于电子计算机的日益普及，许多关于塑性变形体中应力、应变的新的计算方法和测试技术（例如滑移线法、上限法、有限单元法、密栅云纹法、视塑性法等）已逐渐得到广泛应用，这些计算方法和测试技术，又需要比较完善的塑性成形理论作基础。显然，五六十年代仿照当时苏联的《金属压力加工原理》课的内容，已远不能满足这个要求。所以，我们认为专业理论课的内容应该更新、加强，要充分反映近代塑性成形理论的成就。

近几年来，我们按照上述指导思想对金属塑性成形原理课进行了改革的尝试，并编写了有关的教材：《塑性理论简明教程》（徐秉业、陈森灿），《应力与应变状态分析》（陈森灿），《金属塑性变形的物理基础》（叶庆棠），《塑性理论的应用》（陈森灿）。这些教材分别在本校近几届本科生，研究生和为校外办的培训班试用过程中均取得了良好的效果。为了进一步改进教学效果，在这几年教学的基础上，并参照 1983 年 11 月 29 日锻压专业教材分编审委员会第二次扩大会议通过的《金属塑性成形原理》课程教学大纲，编写了本教材。

本书的第一、三、四、七章由叶庆棠编写，第二、五、六、八、九、十、十一、十二、十三章由陈森灿编写。王祖唐教授对编写大纲方面提出了宝贵的意见，特此表示感谢！

由于作者水平和时间所限，书中一定还有许多错误和不妥之处，诚恳地欢迎读者批评指正。

编者

1984.7

# 目 录

第一章 金属的晶体结构和塑性变形	1
§ 1.1 金属的晶体结构	1
§ 1.2 三种常见的晶格	2
§ 1.3 晶面指数和晶向指数的表示方法	4
§ 1.4 实际金属的晶体结构	6
§ 1.5 弹性变形和塑性变形	9
§ 1.6 单晶体的塑性变形	10
§ 1.7 位错简述	14
§ 1.8 多晶体的塑性变形	19
§ 1.9 金属的断裂	22
§ 1.10 金属的加工硬化、回复和再结晶	27
§ 1.11 再结晶全图	30
§ 1.12 塑性成形时变形的分类	32
§ 1.13 附加应力和残余应力	32
第二章 应力与应变状态分析	34
§ 2.1 一般概念	34
§ 2.2 平衡方程与应力符号	35
§ 2.3 斜面上应力	37
§ 2.4 主应力与应力不变量	41
§ 2.5 球形应力张量和应力偏量	43
§ 2.6 八面体应力	49
§ 2.7 应力莫尔圆	51
§ 2.8 工程应变与对数应变	58
§ 2.9 几何方程	61
§ 2.10 工程应变的主应变及应变张量的分解	68
§ 2.11 位移速度及应变速度	70
§ 2.12 应变莫尔圆	74
习题与答案	77
第三章 真实应力——应变曲线	87
§ 3.1 拉伸图和条件应力——应变曲线	87
§ 3.2 拉伸真实应力——应变曲线	88
§ 3.3 压缩真实应力——应变曲线	92
§ 3.4 变形体的模型——应力——应变曲线的简化型式	94

§ 3.5 静水压力(各向均匀受压)的试验 .....	95
第四章 金属的塑性和变形抗力 .....	97
§ 4.1 塑性、塑性指标、塑性图和变形抗力的概念 .....	97
§ 4.2 金属的化学成分和组织状态对塑性和变形抗力的影响 .....	99
§ 4.3 变形温度、变形速度对塑性和变形抗力的影响 .....	102
§ 4.4 应力状态对塑性和变形抗力的影响 .....	107
§ 4.5 尺寸因素对塑性和变形抗力的影响 .....	111
§ 4.6 超塑性变形 .....	112
第五章 屈服条件(塑性条件) .....	118
§ 5.1 应力空间 .....	118
§ 5.2 屈服条件的概念 .....	121
§ 5.3 关于 Lode 参数 .....	122
§ 5.4 在等倾面上对应力状态的研究 .....	124
§ 5.5 Tresca 及 Mises 屈服条件 .....	130
§ 5.6 两种屈服条件的比较 .....	134
§ 5.7 屈服条件的实验校核 .....	140
习题与答案 .....	147
第六章 塑性本构关系(应力应变关系) .....	150
§ 6.1 广义虎克定律 .....	150
§ 6.2 形变理论与比例变形 .....	159
§ 6.3 形变理论的物理方程 .....	161
§ 6.4 卸载问题 .....	166
§ 6.5 简单加载定理 .....	168
§ 6.6 关于 Hencky 理论和 Nadai 理论 .....	177
§ 6.7 形变理论的小结 .....	182
§ 6.8 例题 .....	184
§ 6.9 增量理论的概述 .....	190
§ 6.10 Levy—Mises 理论 .....	193
§ 6.11 Prandtl—Reuss 理论 .....	196
§ 6.12 关于应变强化的模型 .....	198
§ 6.13 Drucker 假设 .....	201
§ 6.14 加载曲面的外凸性和应变增量的流动法则 .....	205
§ 6.15 塑性位势理论,理想塑性材料的本构关系——增量理论 .....	206
§ 6.16 关于增量理论的实验验证 .....	211
§ 6.17 塑性本构关系及其内在联系 .....	211
习题与答案 .....	219
第七章 金属塑性成形时的摩擦与润滑 .....	223

§ 7.1	金属塑性成形时的摩擦的特点	223
§ 7.2	塑性成形时摩擦的分类	224
§ 7.3	摩擦机理和摩擦力的确定	225
§ 7.4	影响外摩擦系数的主要因素	227
§ 7.5	测定摩擦系数的方法	228
§ 7.6	金属塑性成形时的润滑和润滑剂	231
§ 7.7	润滑方法的改进	235
第八章	塑性平面应变问题和滑移线场理论及其应用	237
§ 8.1	基本概念和基本假设	237
§ 8.2	塑性平面应变的基本方程	239
§ 8.3	滑移线的一般概念	245
§ 8.4	Hencky 应力方程	247
§ 8.5	滑移线的性质	253
§ 8.6	塑性区的边界条件	259
§ 8.7	常见的滑移线场	265
§ 8.8	滑移线场的近似作法	267
§ 8.9	厚壁圆管塑性变形时所需要内压力 $p$ 的确定	269
§ 8.10	用滑移线场理论求解塑性极限载荷的例题	274
§ 8.11	利用几何关系类推法求塑性极限载荷	281
§ 8.12	速度场问题	284
§ 8.13	应力间断线和速度间断线	292
§ 8.14	平冲头压入半无限高坯料	298
§ 8.15	通过矩形模、缩减比 $r = \frac{1}{2}$ 的挤压问题	308
§ 8.16	楔形模正挤板料	311
§ 8.17	镦粗的工步分析	320
	习题与答案	340
附录	用特征线理论推导 Hencky 应力方程	353
第九章	理想刚塑性体的极值定理及其应用	360
§ 9.1	基本概念	360
§ 9.2	虚功原理	361
§ 9.3	有间断场时的虚功原理	365
§ 9.4	下限定理	367
§ 9.5	上限定理	369
§ 9.6	理想刚塑性体解的唯一性定理	371
§ 9.7	上限定理在平面应变问题中的应用	373
§ 9.8	例题	375
§ 9.9	应变能	384

§ 9.10 圆盘的锻造 .....	387
§ 9.11 通过锥形模的挤压和拉丝 .....	395
§ 9.12 上限单元技术(上限元法) .....	403
§ 9.13 Kobayashi 关于轴对称变形的上限元法(曲面速度场) .....	408
§ 9.14 极值定理的小结 .....	413
习题与答案 .....	416
第十章 镦粗工序分析与主应力法 .....	424
§ 10.1 镦粗工序概述 .....	424
§ 10.2 用实验方法测定镦粗时接触面上的应力 .....	425
§ 10.3 圆柱形锻件的镦粗变形 .....	429
§ 10.4 圆柱体镦粗变形分析与镦粗力计算 .....	433
§ 10.5 主应力法 .....	439
§ 10.6 在平面变形条件下在平行板间镦粗金属 .....	457
第十一章 理想刚塑性平面应力问题及其应用 .....	462
§ 11.1 平面应力状态方程式 .....	462
§ 11.2 在 Mises 屈服条件下应力基本方程式 .....	465
§ 11.3 在 Tresca 屈服条件下应力基本方程式 .....	473
§ 11.4 在 Mises 屈服条件下速度基本方程式 .....	475
§ 11.5 塑性力学平面问题的小结 .....	475
§ 11.6 轴对称平面应变问题和平面应力问题 .....	477
§ 11.7 压延(拉深、拉延)工序的力学分析 .....	484
第十二章 内压力作用下金属管成形 .....	494
§ 12.1 圆柱坐标 .....	494
§ 12.2 轴对称条件下平衡微分方程式 .....	501
§ 12.3 轴对称条件下平面塑性应变 .....	504
§ 12.4 广义平面应变条件下完全塑性管 .....	511
§ 12.5 钢瓶气胀成形 .....	513
§ 12.6 护环液压胀形强化新工艺 .....	521
第十三章 塑性流动规律与自由变形理论 .....	538
§ 13.1 锻造变形时金属的塑性流动方向 .....	538
§ 13.2 自由形变理论 .....	541
参考文献与书目 .....	548

# 第一章 金属的晶体结构和塑性变形

## § 1.1 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弱，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1.1）。

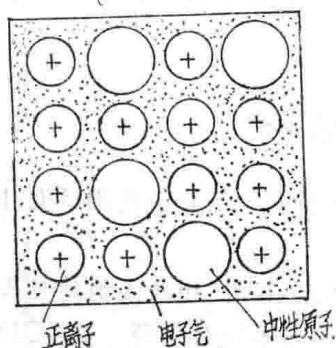


图 1.1 金属键的模型

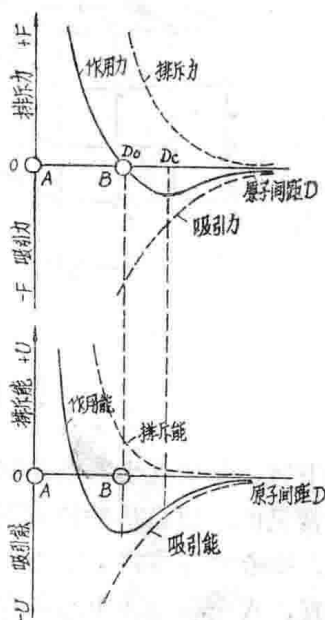
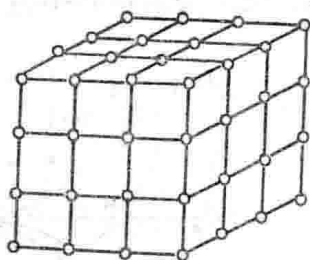


图 1.2 双原子作用模型

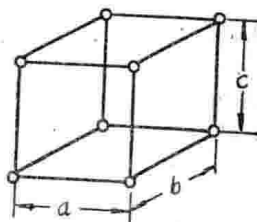
因此，金属内原子都处在异号电荷的吸引力和同号电荷的排斥力的作用下。以相邻两原子为例，它们之间便有两种相互作用：一种是相互吸引作用，它来自金属正离子与周围电子气之间的静电吸引力，它促使原子彼此接近；另一种是相互排斥作用，它来自正离子与正离子之间和电子与电子之间的静电排斥力，它促使原子彼此离开。图 1.2 是双原子作用模型，表示了  $A$  原子对  $B$  原子的作用力和作用能随原子间距离  $D$  的变化。由图可知，当原子间距离过大时，吸引力大于排斥力，原子互相吸引，自动靠近；当原子间距离过近时，排斥力大于吸引力，原子便互相排斥，自动离开。当原子间距离

为  $D_0$  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,结合能越大,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 1.3a 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 1.3b 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。



a—晶格;



b—晶胞

图 1.3

## § 1.2 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: $Cr$ 、 $W$ 、 $V$ 、 $Mo$ 、 $\alpha-Fe$ 、 $\beta-Ti$  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  $ABCABC\cdots$ 。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



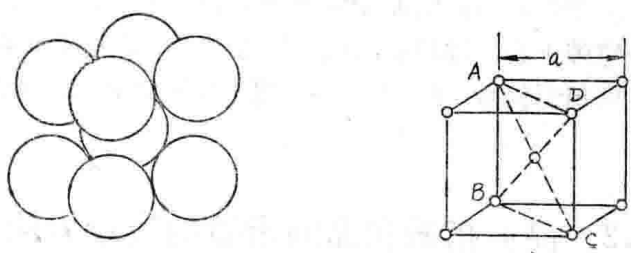


图 1.4 体心立方晶格

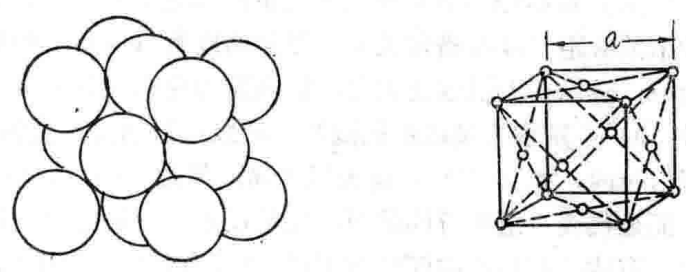


图 1.5 面心立方晶格

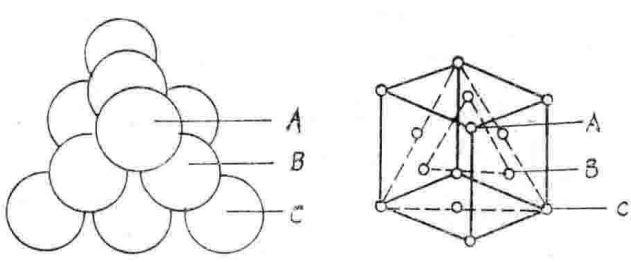


图 1.6 面心立方晶格原子的排列

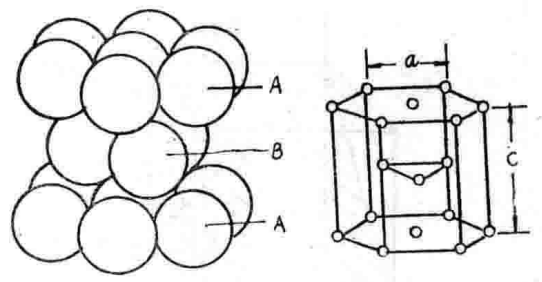


图 1.7 密排六方晶格

原子，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 1.7）。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，第三层原子中心又和第一层原子中心重合，因而其堆积方程是  $ABAB \dots$ 。属于密排六方晶格的金属有： $Zn$ 、 $Mg$ 、 $Be$ 、 $\alpha-Ti$  等。

### § 1.3 晶面指数和晶向指数的表示方法

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。由于晶体在于不同的晶面晶向上，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轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ，坐标原点应位于欲确定的晶面之外，避免出现零截距；2) 求出晶面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 1.8 a）。晶面指数并非仅表示某一晶面，而是代表一组平行的晶面。凡是互相平行的晶面，具有同一晶面指数。在同一晶胞中，有些晶面虽然空间位向不同，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  $\{107\}$  包括晶面  $(100)$ 、 $(010)$ 、 $(001)$ ；晶面族  $\{110\}$  包括晶面  $(110)$ 、 $(101)$ 、 $(011)$ ； $(\bar{1}10)$ 、 $(1\bar{1}0)$ 、 $(0\bar{1}1)$ 。

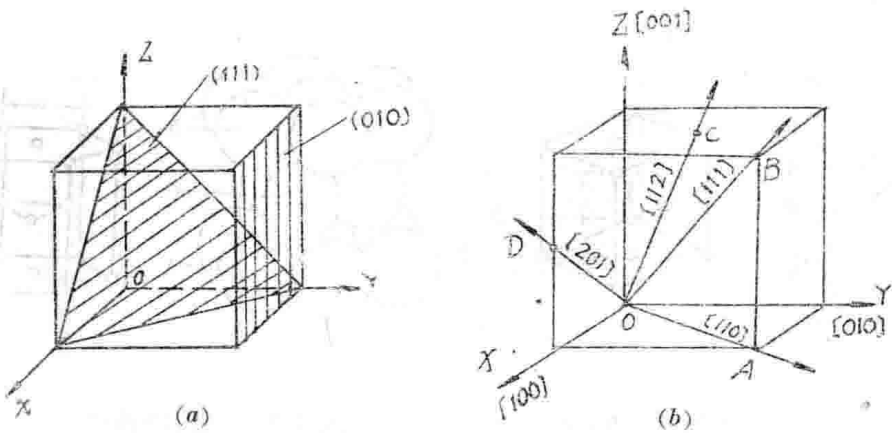


图 1. 立方晶格的晶面指数和晶向指数

## 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 1.8 b）。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  $[100]$ 、 $[10\bar{1}]$ 、 $[001]$ ；又如晶向族  $\langle 110 \rangle$  包括晶向  $[110]$ 、 $[10\bar{1}]$ 、 $[01\bar{1}]$ 、 $[\bar{1}10]$ 、 $[\bar{1}01]$ 、 $[0\bar{1}1]$ 。

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

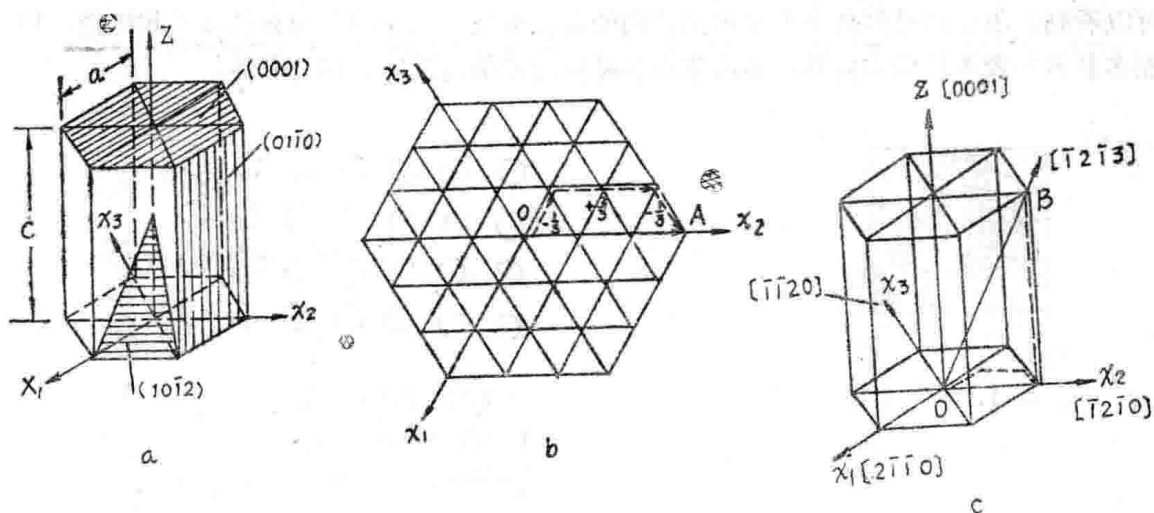


图 1.9 六方晶格的晶面指数、晶向指数

( $hkl$ ) 表示 (图 1.9 a)。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  $90^\circ$ , 所以不宜用上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 1.9 b 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  $[\bar{1}210]$ 。同理,  $OB$  晶向为沿四个坐标轴上分矢量之和 (图 1.9c 中虚线), 所以为  $[\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4} 1]$ , 化简后为  $[\bar{1}213]$ 。还应指出, 由于平面上一点有两个座标就能确定, 因此, 六方晶格的晶面指数 ( $hkl$ ) 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, 例如  $[0001] \perp (0001)$ ; 又如果  $hu + kv + it + lw = 0$ , 则  $[uvw] \parallel (hkl)$ 。

### § 1.4 实际金属的晶体结构

由位向相同的一群同类型晶胞聚合在一起, 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 1.10)。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。由于多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。

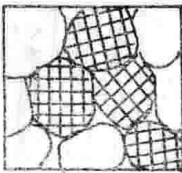


图 1.10 多晶体

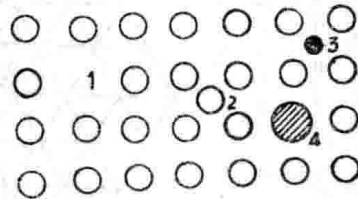


图 1.11 晶体中点缺陷

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, 原子并非固定不动, 而是以晶格结点——平衡位置为中心不停地作热振动; 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, 原子是

以平衡位置为中心振动的。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等；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，超过原子间的结合能，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 1.11）。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，如占据原来基体原子的平衡位置，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。间隙原子也可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晶体微观缺陷。位错最基本的形式有刃型位错和螺型位错。如图 1.12 所示，在一个晶

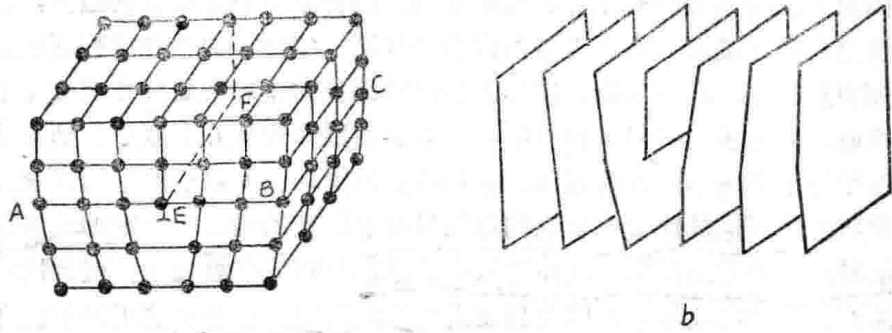


图 1.12 刃型位错示意图

体内，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负刃型位错用符号“ $\nabla$ ”表示。另一种原子错排的形式如图 1.13 所示，在晶体中 BC 线的右边，晶体

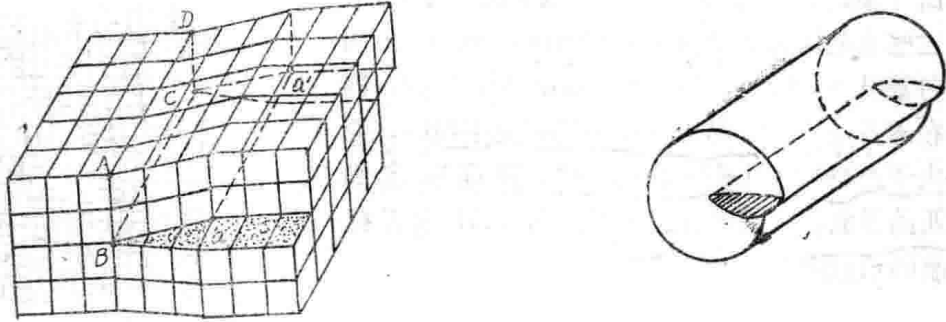


图 1.13 螺型位错示意图

图 1.14

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 1.14 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体平面变成了螺旋面，这就形象地说明了为什么称为螺型位错。图 1.13、1.14 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 1.13），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  $10^6 \sim 10^8$  1/厘米<sup>2</sup>，经过强烈冷变形后的金属中，位错密度可达  $10^{11} \sim 10^{12}$  1/厘米<sup>2</sup>。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。晶体外表面原子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介质中。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，它是两个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。由于晶界具有较高能量，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。

$\alpha$  射线及电子显微镜研究指出，一个晶粒内原子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，强化也愈显著。图 1.15 是晶粒内亚晶的示意图。

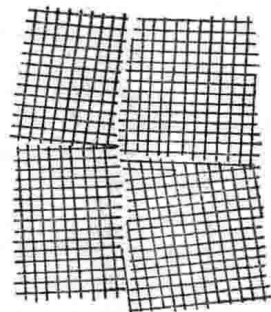


图 1.15 亚晶示意图

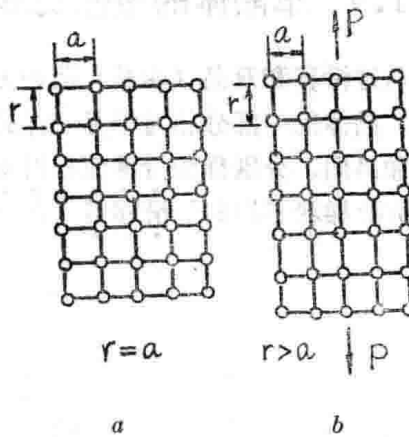
## § 1.5 弹性变形和塑性变形

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。

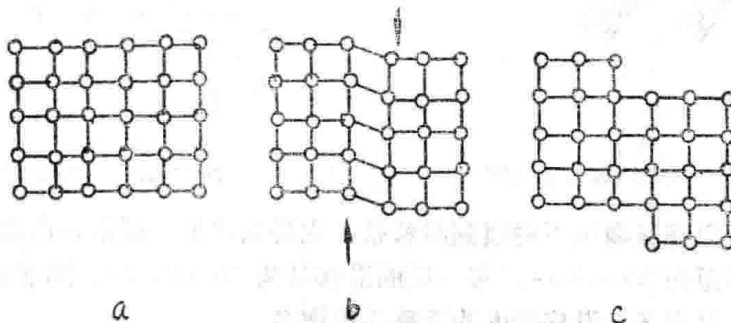
单晶体发生弹性变形的原因是，例如当晶体在拉应力的作用下，使原子离开了原来的平衡位置，原子间距离增大，产生了拉伸变形（图 1.16）。这时由于原子间距离增大，原子间的排斥力便减小，原子间的吸引力必将增大，超过排斥力的吸引力和拉应力平衡。外力除去，新的平衡消失，原子便回到原来的平衡位置，晶体恢复原状。同样，晶体在压应力的作用下，原子间距离缩短，排斥力大于吸引力，与压力建立新的平衡。外力除去，原子便回到原来的平衡位置，晶体恢复原状。

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



a—变形前；b—弹性变形

图 1.16 晶体的弹性变形



a—变形前；

b—弹性变形；

c—塑性变形

图 1.17 晶体的塑性变形

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）过渡到塑性变形（图 1.17）。由于这时原子移动了原子间距离的倍数，移到了新的平衡位置，原子又处于稳定状态，即使外力除去，也不可能使晶体恢复原状了。

工业用的金属和合金都是多晶体，多晶体的变形从实质上说，也是由于在外力的作用下原子离开平衡位置或原子移动到新的平衡位置而产生的结果。但是由于多晶体内每个晶粒的位向不同，原子移动的情况就很复杂。

由材料力学可知，金属材料在外力作用下，随着外力的不断增大，通常首先发生弹性变形，然后发生塑性变形，最后发生断裂。弹性变形时，材料的体积也发生变化。例如处于 100 公斤/毫米<sup>2</sup> 的流体压力下，钢体积减小约 0.6%，铜体积减小约 1.3%。塑性变形的同时，必然伴随有弹性变形，后者在卸载后自行消失，这个现象在锻压加工中必须加以考虑。

## § 1.6 单晶体的塑性变形

单晶体的塑性变形主要通过滑移和双晶（孪晶）两种方式进行。

一、滑移 如图 1.17c，晶体的一部分相对于另一部分沿着一定的晶面和晶向产生滑动，称为滑移。上述晶面和晶向，分别称为滑移面和滑移方向。滑移往往在许多晶面上同时发生，在晶体表面形成阶梯状不均匀的滑移带（图 1.18）。经抛光的金属试样

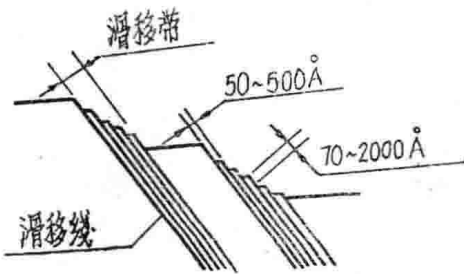


图 1.18 滑移线和滑移带示意图

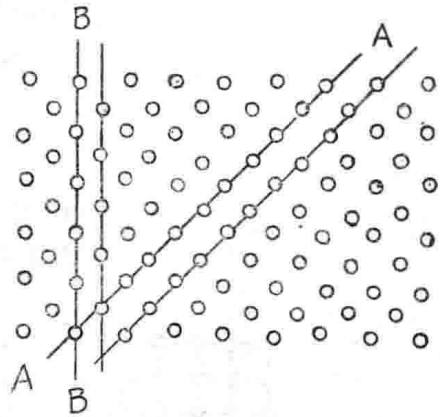


图 1.19 滑移面示意图

塑性变形后，可以在显微镜下观察到滑移带，它是晶体的一群滑移面和晶体表面相交而成。滑移层的间距约 50~500Å，每一层的滑移量为 70~2000Å。随着变形程度的增加，晶体的滑移带数目增多，滑移带内的滑移线也增多。

一般说来，滑移并非沿任意晶面和晶向发生，而总是沿着该晶体中原子排列到最密的晶面和晶向发生的。如图 1.19 的晶格，以  $AA$  面原子排列最密，原子间距最小，原子间的结合力最强，但面与面间的距离最大，因而结合力也最弱，故  $AA$  面最易成



为滑移面。其他晶面则都不是这样。例如  $BB$  面，面上原子间距大，结合力就弱，面与面间距离小，结合力就强，故难以滑移。与此同理，可以解释沿原子排列最密的晶向滑移阻力最小，容易成为滑移方向。

通常每一种晶格有几个可能产生滑移的晶面，即同时存在几个滑移面；而每一滑移面，又同时存在着几个可能的滑移方向。一个滑移面和其上一个滑移方向，构成一个滑移系。一种晶格上滑移系总数，是滑移面数和该滑移面上滑移方向数的乘积。三种常见金属晶格的主要滑移系如图 1.20 所示。由图可知，具有立方晶格的金属有 12 个滑移系，塑性变形的能力较优；具有密排六方晶格的金属只有 3 个滑移系，塑性变形的能力相对较差。从具有体心立方和面心立方的金属来看，它们同样有 12 个滑移系，似乎

晶格	体心立方晶格	面心立方晶格	密排六方晶格
滑移面	$(110) \times 6$	$(111) \times 4$	$(0001) \times 1$
滑移方向	$[11\bar{1}] \times 2$	$[\bar{1}10] \times 3$	$[2\bar{1}10] \times 3$
滑移系	$6 \times 2 = 12$	$4 \times 3 = 12$	$1 \times 3 = 3$
金属	$\alpha\text{-Fe, Cr, W}$	$Al, Cu, Ag, Ni$	$Mg, Zn, Cd, Ti$

图 1.20 滑移系

应具有同样的塑性，但事实是铜、铝等金属的塑性比  $\alpha\text{-Fe}$  高。经研究证明，对于金属的塑性变形能力，滑移方向的作用要比滑移面的作用大。面心立方晶格中每个滑移面上的滑移方向有三个，而体心立方晶格中每个滑移面上的滑移方向仅有两个，因此面心立方晶格的铜、铝等金属的塑性比体心立方晶格的铁好。

单晶体在外力作用下开始产生滑移，必须是滑移面上沿滑移方向的剪应力达到一定值。这个开始产生滑移的剪应力值，称为临界剪应力，以  $\tau_K$  表示。许多试验证明，不同取向金属单晶体，可以在不同的拉伸力下开始滑移；但此时这些力在滑移面和滑移方向上的应力分量，即临界剪应力，是完全相同的。因为当外界条件确定时，临界剪应力不管在什么位向，其大小主要由该晶体滑移面间的原子

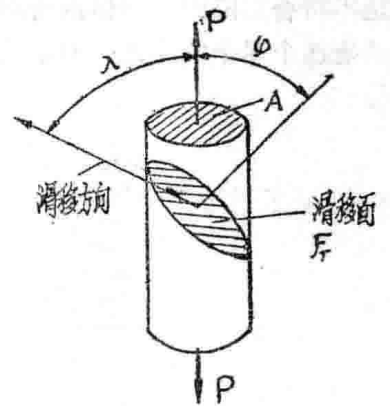


图 1.21