

高等学校教材

金属塑性成形原理

西安交通大学 汪大年 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

250919

高等学校教材

金属塑性成形原理

(修订本)

西安交通大学 汪大年 主编



机械工业出版社

本书共分十二章，主要包括金属的结构和塑性变形、金属的塑性；应力分析、应变分析、屈服准则、应力应变关系、真实应力-应变曲线；塑性成形中的摩擦与润滑；塑性成形问题的主应力解法、滑移线解法和上限法等。每章后附有习题或思考题，便于学生复习和自我检查之用。本书除作锻压专业教材之用外，也可供从事金属塑性加工的科技人员参考。

金属塑性成形原理

(修订本)

西安交通大学 汪大年 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $15^{\frac{3}{4}}$ · 字数 382 千字

1982 年 6 月北京第一版

1986 年 11 月北京第二版·1986 年 11 月北京第五次印刷

印数 19,701—25,280 · 定价 2.65 元

*

统一书号: 15033 · 5126

修 订 再 版 前 言

本书是在1982年出版的高等学校试用教材《金属塑性成形原理》基础上，根据1983年11月高等学校锻压专业教材分编委员会制订的新教学计划和教学大纲以及1984年审定的修改大纲修订的。本书可作为锻造冲压工艺及设备专业的教材，也可供有关科技人员参考。

本书共十二章，金属的结构和塑性变形以及金属的塑性是金属塑性成形的物理基础，列为本书的第二、第三章。其后各章主要是讨论金属塑性成形的力学问题。其中第四至第七章（应力分析、应变分析、屈服准则和应力应变关系）是塑性力学的基础，第十至第十二章是塑性成形问题的几种主要解法（主应力法、滑移线法、上限法和变形功法等）。第八章真实应力-应变曲线和第九章塑性成形中的摩擦与润滑，这两个问题对金属的塑性成形及其力学问题都是不可忽视的，应看成是塑性成形力学的有机组成部分。为使学生深入理解和掌握所学内容，本书每章之后均附有习题或思考题，以供学者自我检查和练习之用。第十章§10-2中加“*”号部分系非基本内容，但有参考价值，若学时不够，可不讲授。

参加本书修订工作的有西安交通大学汪大年（第一、八、十二章、第九章部分）；陈金德（第三、十、十一章）；张子公（第四、五、六、七章）；上海交通大学肖文斌（第二章）和机械工业部机械科学研究院张祖荫同志（第九章部分）。全书由汪大年主编。

本书由华中工学院肖景容同志主审，在审阅中，对书稿提出了不少宝贵意见；兄弟院校的同志们对修订工作给予了关心和支持，并提出了不少中肯的建议，对此，谨向同志们表示深切的谢意。

本书虽然按教学大纲并参照过去的教学经验进行了修订，但毕竟还没有经过广泛的教学实践检验，不当之处，请同志们批评指正。

编者

1985.6

目 录

第一章 绪论	1	习题	89
§ 1-1 金属塑性成形在国民经济中的作用	1	第六章 屈服准则	91
§ 1-2 金属塑性成形方法的分类	1	§ 6-1 有关材料性质的一些基本概念	91
§ 1-3 金属塑性成形原理课程的目的和任务	3	§ 6-2 屈雷斯加屈服准则(最大剪应力不变条件)	92
§ 1-4 金属塑性成形理论的发展概述	4	§ 6-3 密席斯屈服准则(弹性形变能不变条件)	93
思考题	5	§ 6-4 屈服准则的几何表达——屈服轨迹和屈服表面	94
第二章 金属的结构和塑性变形	6	§ 6-5 中间主应力的影响	96
§ 2-1 金属的晶体结构	6	§ 6-6 平面问题和轴对称问题中屈服准则的简化	98
§ 2-2 单晶体的塑性变形	10	§ 6-7 屈服准则的实验验证	98
§ 2-3 位错理论的基本概念	14	§ 6-8 应变硬化材料的屈服准则	99
§ 2-4 多晶体的塑性变形	19	习题	100
§ 2-5 加工硬化	20	第七章 塑性应力应变关系(本构方程)	102
§ 2-6 回复和再结晶	22	§ 7-1 弹性应力应变关系	102
§ 2-7 冷变形、热变形和温变形	26	§ 7-2 塑性变形时应力应变关系的特点	104
习题	26	§ 7-3 塑性变形的增量理论(流动理论)	106
第三章 金属的塑性	27	§ 7-4 塑性变形的全量理论(形变理论)	109
§ 3-1 塑性和塑性指标	27	§ 7-5 塑性应力应变关系的实验验证	111
§ 3-2 金属的化学成分和组织对塑性的影响	28	§ 7-6 最大散逸功原理	111
§ 3-3 变形温度、变形速度对塑性的影响	32	习题	113
§ 3-4 应力状态对塑性的影响	38	第八章 真实应力-应变曲线	115
§ 3-5 提高金属塑性的主要途径	42	§ 8-1 拉伸试验曲线	115
§ 3-6 金属的超塑性	43	§ 8-2 压缩试验曲线	122
§ 3-7 金属的断裂	48	§ 8-3 变形温度、速度对真实应力-应变曲线的影响	125
思考题	50	习题	128
第四章 应力分析	51	第九章 金属塑性成形中的摩擦和润滑	129
§ 4-1 外力和应力	51	§ 9-1 金属塑性成形时摩擦的特点	129
§ 4-2 直角坐标系中一点的应力状态	52	§ 9-2 塑性成形中摩擦的分类及机理	129
§ 4-3 平衡微分方程	65	§ 9-3 摩擦系数及其影响因素	131
§ 4-4 平面应力状态和轴对称应力状态	66	§ 9-4 摩擦系数的测定方法	134
习题	69	§ 9-5 金属塑性成形用的润滑剂	135
第五章 应变分析	71	§ 9-6 润滑方法	138
§ 5-1 有关变形的一些基本概念	71	§ 9-7 不同塑性加工条件下的摩擦系数	139
§ 5-2 小变形分析	72		
§ 5-3 应变增量和应变速率张量	84		
§ 5-4 平面变形问题和轴对称问题	87		

思考题	140	§ 11-6 滑移线场的建立	188
第十章 塑性成形问题的主应力解法 (切块法)	141	§ 11-7 格林盖尔 (H. Geiringer) 速度 方程	193
§ 10-1 平衡微分方程和塑性条件联立 求解的数学解析法	141	§ 11-8 关于速度间断的概念	195
§ 10-2 主应力法 (切块法)	145	§ 11-9 速度矢端图 (速端图)	196
§ 10-3 镦粗的变形特点和力能计算	153	§ 11-10 滑移线理论在塑性加工中的应用	199
§ 10-4 受内压厚壁筒进入塑性状态时 的极限应力	166	习题	220
§ 10-5 模锻	167	第十二章 塑性成形问题的上限法及其 他方法	222
§ 10-6 拉延	173	§ 12-1 虚功原理和虚功方程	222
习题	176	§ 12-2 应力间断和速度间断	223
第十一章 塑性成形问题的滑移线解法	178	§ 12-3 上限法原理	224
§ 11-1 滑移线的基本概念	178	§ 12-4 上限法的应用	225
§ 11-2 汉基 (Hencky) 应力方程	180	§ 12-5 功平衡法	231
§ 11-3 滑移线的几何性质	181	§ 12-6 视塑性法简介	236
§ 11-4 塑性区的应力边界条件	184	习题	237
§ 11-5 常见滑移线场的类型	186	附录	239
		I 角标符号及求和约定	239
		II 张量简介	240

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轧材来制造机器零件的加工方法，属于机械制造业领域。

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 $12000 \times 10 \text{kN}$ 机械压力机上锻造汽车用的六拐曲轴仅需40 s；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1-1 a）。这是由大截面材料变为小截面材料的常用加工过程。利用轧制方法可生产出型材、板材和管材。

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

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

挤压是将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，以获得符合模孔截面形状的小截面坯料的塑性成形方法（表 1-1 c、d）。因为挤压是在三向受较大的压应

表 1-1 塑性成形方法的分类

序号	成形方法名称	工序简图	变形区域 (阴影区)	变形区 主应力图	变形区 主变形图	变形区变形 流动性质
a	轧制 (纵轧)		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			变形区变化 非稳定流动
e	锻粗		全部体积			变形区变化 非稳定流动
f	开式模锻		全部体积			变形区变化 非稳定流动
g	闭式模锻		全部体积			变形区变化 非稳定流动
h	拉延		压边圈下板料			变形区变化 非稳定流动

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。

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——平砧下锻粗即为一例。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 1-1 f、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 1-1 h）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质等方面也各有特点，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，为学习后续的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基础知识,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^[14]。

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年卡耳曼(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的应力应变关系式。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耳曼。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,并对锻造时接触表面上的摩擦力分析提出了新见解。

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。

本章参考文献：〔8〕〔37〕〔38〕〔58〕

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 金属的结构和塑性变形

金属的塑性变形机理和在各种状态下的变形行为，是研究塑性成形所必须掌握的基础。本章从微观角度来叙述金属的结构；单晶体和多晶体的塑性变形；介绍位错理论的基本概念，并用它来解释金属塑性变形时的加工硬化等现象；最后讨论动态软化过程。

§ 2-1 金属的晶体结构

所有的固态金属都是晶体。原子在晶体所占的空间内按照一定的几何规律作周期性的排列，称为空间点阵。为了便于理解和描述晶体中原子的排列情况，常以一些直线将晶体中各原子的中心连接起来使之构成一空间格子，这种空间格子简称晶格。通常从晶格中选取一个能反映晶格特征的最小几何单元来分析晶体中的原子排列规律，这个最小几何单元称为晶胞。点阵是由大小、形状和位向相同的晶胞重复堆积而成的。晶胞的棱边长度称为晶格常数（或点阵常数），其度量单位为 \AA ($1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{m}$)。

一、三种典型的晶胞结构

各种固态金属的晶体结构并不完全相同。工业上使用的几十种金属中，除少数具有复杂的晶体结构外，最常见的金属晶体结构有三种类型，即面心立方结构、体心立方结构和密排六方结构。

(一) 面心立方晶胞

面心立方结构的晶胞模型如图 2-1 所示。晶胞中每个角上都有一个原子，每个面的中心也都有一原子。

面心立方晶胞的棱边长度相等，三个轴互相垂直。属于面心立方晶格的金属有 Al、Ni、Cu、 γ -Fe 等。

(二) 体心立方晶胞

体心立方晶胞如图 2-2 所示。晶胞中每个角上有一个原子，在立方晶胞的中心有一个原子。体心立方晶胞的棱边长度彼此相等，晶轴互相垂直。属于体心立方晶格的金属有 Cr、V、Mo、W、 α -Fe、 β -Ti 等。

(三) 密排六方晶胞

如图 2-3 所示，密排六方晶胞象一个六方柱体，在六方柱体的十二个角上各有一个原子，上、下面的中心各有一个原子，在晶胞中间还有三个原子。密排六方晶胞有两个晶格常数：六方底面的边长 a 和二底面间的距离 c 。

一般六方结构金属 $c/a = 1.57 \sim 1.64$ 。属于密排六方晶格的金属有 Zn、Mg、Be、 α -Ti、

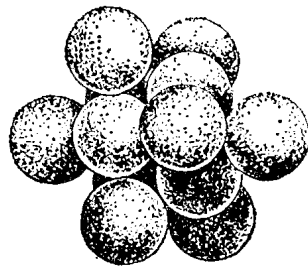


图2-1 面心立方晶胞

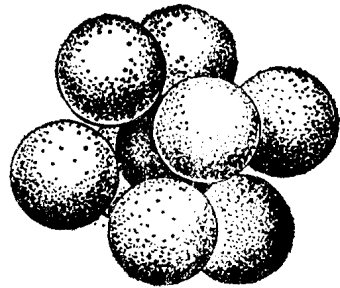


图2-2 体心立方晶胞

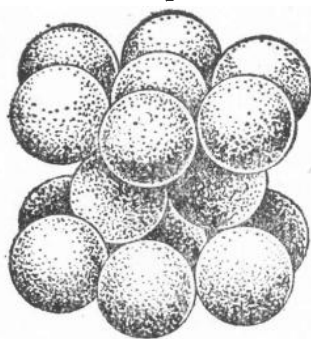


图2-3 密排六方晶胞

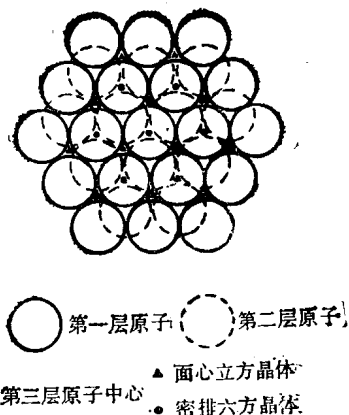


图2-4 密排六方结构和面心立方结构内原子堆积方式

α -C₆₀等。

密排六方点阵和面心立方点阵都属于最紧密结构，但是二者的原子堆排方式不同，如图2-4所示。对密排六方点阵而言，原子排列最紧密的面（密排面）是其底面。以底面作为第一层(A)，在第一层的原子空隙中心，堆上第二层原子(B)，第三层原子中心又和第一层原子的中心重合，因而其堆积方式是 $ABAB\cdots$ 。而面心立方结构的密排面是垂直于立方体空间对角线的对角面(见图2-5)，在密排面(C)的原子空隙中心堆积第二层原子(B)，第一层(A)的原子中心不和第三层(C)重复，而位于第二层(B)的原子空隙中心，同时又是(C)层的原子空隙中心。以后的原子堆积又重复上述第一、二、三层的堆积方式，因而它的堆积方式为 $ABCABC\cdots$ 。

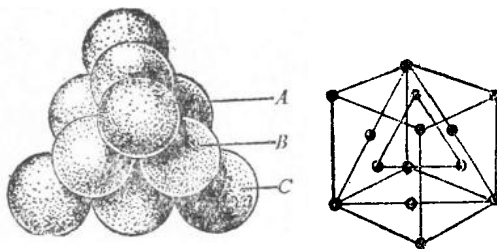


图2-5 面心立方结构原子堆积模型

二、实际多晶体金属的晶体结构

位向相同的一群晶胞聚合在一起，组成金属单晶体。由于单晶体在各方向上的原子密度不同，因此各方向上所呈现的物理、化学和力学性能也各不相同，称为晶体的方向性。

在显微镜下观察实际使用的金属，发现它们都是由很多晶粒所组成的，且每一个晶粒都是有一定位向的单晶体，晶粒和晶粒之间存在着位向差别。多晶体是由很多不同位向的晶粒组成，晶粒的方向性互相抵消，因而在一般情况下，多晶体不显示出方向性。实际金属由于种种原因，每一晶体内部原子的有规律排列受到干扰，不象理想晶体那样完整，存在着一系列缺陷。晶体中的缺陷可分为点缺陷、线缺陷、面缺陷三类。

(一) 点缺陷

晶体中的点缺陷包括空位、间隙原子和异质原子。

在晶体中，原子以其平衡位置为中心发生振动。其振动能量与晶体的温度有关，温度愈高，能量愈大。温度一定时，原子振动能量的平均值也一定，但是各个原子的能量并不完全相等。某一瞬时，某些原子的振动能量可能高于或低于平均能量，呈现能量起伏现象。能量

高的原子可能跳离原来的平衡位置，而使原来的位置形成空位。离开平衡位置的原子，可能跳到晶体的表面上，也可能跳到晶体中原子间的空隙位置上，后一种情况在产生空位的同时也形成一个间隙原子。当空位周围的原子由于热振动而获得足够的能量时，有可能跳入空位，这就使空位产生移动。当空位移向表面晶界时，随即消失。空位还往往移向其他缺陷（如位错）。间隙原子也可能由一个间隙位置移到另一个间隙位置，当与空位相遇时，二者便同时消失。图 2-6 是这一类点缺陷的示意图。在一定温度下，晶体内的空位浓度保持一定的平衡值，即原子离位使空位增加，空位移向表面或其他缺陷而消失，因而这种缺陷又称热缺陷。在一定的条件下，空位可联结成空位对或空位群，也可以集合起来形成其他缺陷（位错）。

空位和间隙原子的迁移运动，构成金属晶体中原子的扩散，它直接影响金属的性能和在金属中发生的某些物理化学过程。例如金属的热处理、化学处理、蠕变和高温变形等都和原子的扩散有关。

(二) 位错

晶体中的线缺陷形成各种类型的位错，最简单的位错是刃型位错和螺型位错。

如图 2-7 所示，有一原子平面中断在晶体内部，这个半原子平面象刀刃一样，使位于 ABC 面上下两部分的晶体产生错排现象，故称为刃型位错。 EF 线就是位错线。中断的半原子平面在上部称正刃型位错，用“ \perp ”表示，半原子平面在下部称负刃型位错，以“ ∇ ”表示。

另一种原子错排的形式如图 2-8 所示。在晶体中 BC 线的右边，晶体的上下两部分原子排列发生了错动，上部相对于下部错动了一个原子间距，结果在 BC 和 aa' 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 为螺型位错线。由图 2-8 可见，螺型位错线附近的晶格发生畸变。图示的螺型位错是右旋螺型位错，如果错排区发生在 BC 线的左边，则形成左旋螺型位错。

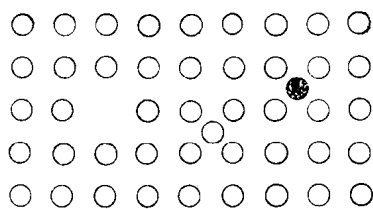


图 2-6 晶体中的点缺陷（空位、间隙原子、异质原子）

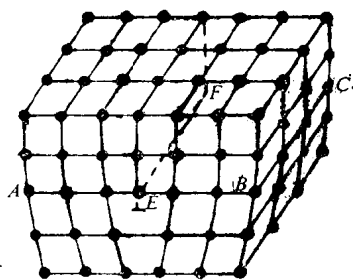


图 2-7 刃型位错示意图

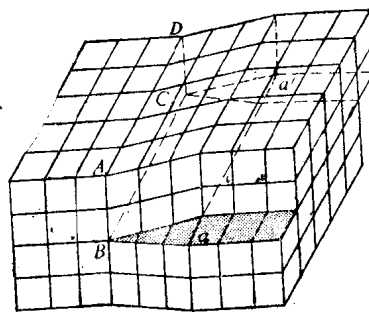


图 2-8 螺型位错示意图

单位体积中所包含位错线的总长度称为位错密度 ρ 。用公式表示如下：

$$\rho = \frac{S}{V}$$

式中 V —— 体积；

S —— 该体积中的位错线总长度。

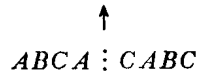
一般退火的多晶体中，位错密度为 $10^6 \sim 10^8 \text{cm}^{-2}$ 。经过良好控制制出的超纯单晶体金属，其位错密度很低，可小于 10^3cm^{-2} 。经过强烈冷变形的金属，位错密度可增至 $10^{11} \sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 。

位错的存在，对金属的强度和变形都有重要的影响。如果金属中有很高的位错密度，金属就难于变形，金属的强度也就提高。

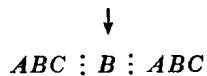
(三) 面缺陷

面缺陷有以下几种：

1. 堆垛层错 (stacking fault) 简称层错，是在原子的堆积次序中出现了错排。以面心立方晶格为例，有两种基本类型的堆垛层错：(1) 相当于从正常层序中抽走一层，称抽出型层错，或称内禀 (intrinsic) 层错，表达为



(2) 相当于在正常次序中插入一层，称为插入型层错，或称外禀层错 (extrinsic)，表达为



堆垛层错在其它晶体结构中也会产生，如在密排六方结构的Co和体心立方结构的 α -Fe、Ta等中都观察到层错的存在。用电子显微镜薄片衍射法，可以观察到由于层错产生的干涉条纹，图2-9是在变形不锈钢中观察到的层错干涉条纹。

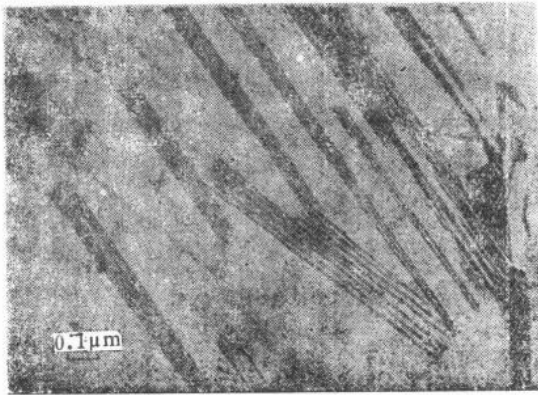


图2-9 不锈钢中的层错

表2-1 一些面心立方金属的层错能

金属	层错能 (mJ/m^2)
黄铜	<10
不锈钢	<10
银	~20
金	~75
铜	~90
镍	~200
铝	~250

层错在有些金属中容易产生，而在另一些金属中则较难产生。这是由于一些金属产生层错需要较多的能量，因此，产生层错的机率就少，如Al、Ni等，称为高层错能金属；有些金属产生层错所需要的能量少，则容易产生层错，称为低层错能金属，如 α 黄铜、不锈钢等。

一些面心立方金属的层错能见表2-1。金属层错能的高低对金属塑性变形后的组织结构、位错分布和回复、再结晶等都有很大的影响 (见§2-5、§2-6节)。

2. 晶界 多晶体中，晶粒和晶粒之间由于彼此的位向不同而出现晶界，这是晶体中重要的面缺陷。在晶界处，原子的排列从一种位向过渡到另一种位向，原来排列的规律性得不到统一，形成不完整结构。一般认为，晶界层的厚度可从几个原子到几百个原子。晶界层的厚度取决于晶粒间的位向差和金属的纯度，位向差愈小，晶界层愈薄。若金属中含有杂质，由于杂质常富集于晶界处，此时晶界层将加厚。

相邻晶粒间的位向差比较小(小于 10°)的晶界称为小角度晶界。实验证明小角度晶界是由许多位错所组成的。图2-10所示是一种小角度晶界的模型。实际金属材料中,相邻两晶粒的位向差一般都大于 $10^\circ\sim 15^\circ$,称为大角度晶界。由于大角度晶界构造比较复杂,目前有关大角度晶界的结构理论还不够成熟,虽提出了一些模型,但还有待进一步发展。

由于晶界处的原子排列不规则,偏离平衡位置,晶格畸变较大,因此晶界上原子的平均能量高于晶粒内部原子的平均能量,高出的能量称为晶界能。较高的晶界能有自发地向低能状态转化的趋势。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,但是只有原子具备一定的动能时才会出现这一过程。温度愈高,原子动能愈大,故愈有利于晶粒长大和晶界的平直化。

由于晶界的能量较高,原子处于不稳定状态,在腐蚀环境中,晶界首先被腐蚀。

晶界能的存在还会影响异类原子的分布,金属中的杂质和合金元素,往往是不均匀地分布在晶体中,某些能降低晶界能的元素,将优先富集于晶界层,这种现象称为内吸附。内吸附对金属的某些性能会产生很大的影响。

3. 亚组织和亚晶界 在实际晶体内,每个晶粒内的晶格位向并不完全一致,而是存在着尺寸很小、位向差也很小的晶块,这些小晶块称为亚组织或亚晶粒。亚晶粒的边界称为亚晶界,它们实际上是一系列位错所组成的小角度晶界。因此,亚晶界附近的原子排列也不规则,也是面型不完整结构。由液体金属结晶而得到的固体金属中,其亚组织常称镶嵌块组织。

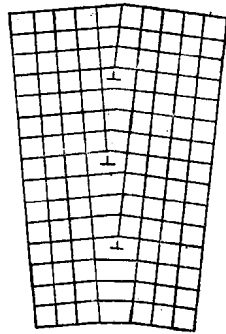


图2-10 小角度晶界模型

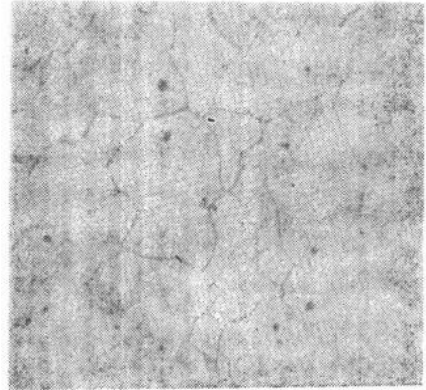


图2-11 纯铁中的亚组织

铸态金属中,其亚组织较大,边长一般为 10^{-2}cm ,经过加工变形或热处理后,亚组织细化至 $10^{-4}\sim 10^{-6}\text{cm}$ 。亚组织的细化,可使金属强度提高。图2-11是纯铁中的亚组织。

§ 2-2 单晶体的塑性变形

单晶体的塑性变形主要通过滑移和孪生两种方式进行。

一、滑移

金属塑性变形最常见的方式为滑移,即晶体一部分沿一定的晶面和晶向相对于另一部分产生滑移。这一晶面和晶向称为滑移面和滑移方向。

(一) 滑移面和滑移方向

研究表明,晶体的滑移是沿着一定晶面和一定晶向进行的。一种滑移面及其面上的一个滑移方向组成一个滑移系。每一个滑移系表示晶体在产生滑移时可能采取的空间位向。当其他条件相同时,金属晶体的滑移系愈多,则滑移时可能出现的滑移位向愈多,金属的塑性就愈好。

一般说来，滑移面总是原子排列最密的面，滑移方向总是原子排列最密的方向。这是因为原子排列最密的面上原子的结合力最强，而这样的相邻面之间的间距大，结合力弱，因此成为容易滑移的面。同样，沿原子最密的方向，滑移阻力最小。

面心立方金属的滑移面是 $\{111\}$ ，共有四组，每组有三个滑移方向 $\langle 110 \rangle$ ，因此有12个滑移系。密排六方晶体的滑移面一般是 $\{0001\}$ 面，这个面包含有三个滑移方向，即 $\langle 1120 \rangle$ ，所以只有三个滑移系。体心立方晶体可以在 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ 三组面上滑移，滑移方向为 $\langle 111 \rangle$ ，故有48个滑移系。

一般说来，面心立方和体心立方金属的滑移系较多，因此比密排六方金属的塑性好。但金属塑性的好坏，不仅取决于滑移系的多少，还与滑移面上原子密排程度和滑移方向的数目等有关。如 $\alpha\text{-Fe}$ 虽有48个滑移系，但滑移方向没有面心立方晶体多，原子密排的程度也较面心立方晶体低，所以其塑性比面心立方金属的Cu、Al、Ag等低。

(二) 滑移时的位错运动

晶体的滑移，是在剪应力作用下通过滑移面上的位错运动进行的。一个位错移到晶体表面时，便形成了一个原子间距的滑移量。同一滑移面上有大量的位错移到晶体表面时，则形成一条滑移线。图2-12是刃型位错移动时造成滑移的示意图。图2-13是螺型位错运动时造成滑移的示意图。

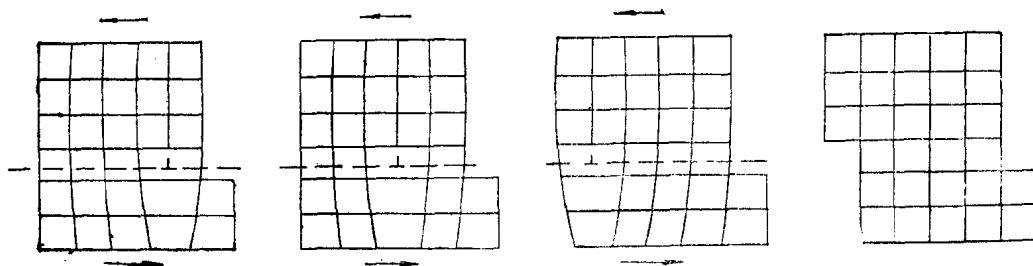


图2-12 刃型位错运动造成滑移的示意图

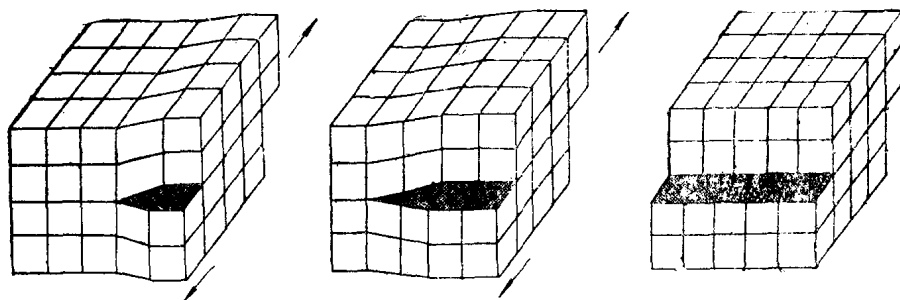


图2-13 螺型位错运动造成滑移的示意图

由图可见，晶体产生滑移时，实际上不是滑移面上的全部原子同时移动，而只是在位错中心附近的少数原子发生移动，而且移动距离很小，小于一个原子间距。使位错在点阵中移动的剪切力 τ_p ，称为派-纳力 (Peierls-Nabarro force)，由下式计算

$$\tau_p = \frac{2G}{1-\nu} e^{-2\pi a/b(1-\nu)}$$