

高等学校教材

# 金属塑性 成形原理

万胜狄 主编

机械工业出版社

高等学校教材

# 金属塑性成形原理

主 编 万胜狄  
副主编 李 尧  
参 编 陈拂晓 李纬民 肖小亭  
主 审 曹诗倬



机械工业出版社

本书对金属塑性成形理论的基本问题作了系统论述。全书共六章，主要内容包括金属塑性变形的物理基础和力学基础；塑性成形时金属的流动和成形规律；塑性成形基本工序的力学分析及求解的主应力法和滑移线法；对上限法、变形功法和塑性材料力学法也作了简要介绍。为便于学生复习和自学，每章末附有思考题和习题，并给出了习题答案。

本书可作为高等学校模具专业和锻压专业本科、专科教材，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

主 编 万胜狄

副主编 李 尧

参 编 陈拂晓 李纬民 肖小亭

\*

责任编辑：杨 燕 版式设计：王 颖

封面设计：郭景云 责任校对：姚培新

责任印制：王国光

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787 × 1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张13.75 字数334千字

1995年10月第1版第1次印刷

印数 0 001—5000 定价：12.00元

\*

ISBN 7-111-04692-7/TG·978(课)

TG11  
1075

## 前 言

本书是根据1993年12月第三次全国高等学校锻压专业教学指导委员会模具专门化协作组召开的教材编写研讨会所拟订的编写大纲,并参照1983年11月高等学校原锻压专业(现改名为塑性成形工艺及设备专业)教材分编委员会制订的“金属塑性成形原理”教学大纲编写的。本书可作为模具设计与制造专业和塑性成形工艺与设备专业的本科、专科教材,也可供有关科技人员参考。

全书共分六章:第一章阐述塑性变形的物理基础,包括金属的微观结构、变形机理、塑性变形时金属的强化和软化过程、金属的塑性和变形抗力及其影响因素等;第二章阐述塑性变形的力学基础,对金属塑性变形时的应力状态、应变状态、屈服准则、应力应变关系及应力-应变实验曲线作了系统的、深入浅出的介绍,在相应的部分附有例题;第三章讨论塑性成形时金属的变形和流动规律,包括最小阻力定律、变形不均匀性及影响因素、附加应力、残余应力、金属的断裂及塑性成形中的摩擦与润滑;第四章对塑性成形基本工序进行力学分析,并利用主应力法进行求解;第五章论述滑移线法,对滑移线的基本概念、特性、滑移线场建立方法及其在锻造、挤压、冲压中的应用作了详细讨论;第六章简要介绍了变形功法、上限法和在板料成形中应用较多的塑性变形材料力学法。在各章的后面均附有思考题和一定数量的习题,供读者深入理解和掌握所学内容,并给出了习题答案。标有“\*”的章节在专科教学中可以不讲。此外,各院校在使用本教材时可根据各自的特点,进行适当的补充和删减。

“金属塑性成形原理”是一门专业理论课,它为后续的工艺课提供理论基础。因此,本课程有一定的深度、难度和广度。为此,本书在编写时遵循由浅入深、循序渐进的原则,力求把概念阐述清楚。对教材中的数学力学问题在考虑其严谨性的同时,结合塑性变形过程尽量阐明其物理意义。对塑性成形理论中较高深的内容注意介绍到适当的深度,必要时作简化处理。教材注意理论联系实际,以提高学生运用基本理论知识分析和解决实际问题的能力。

本书由广东工业大学万胜狄主编,湖北工学院李尧副主编,合肥工业大学曹诗倬主审。编写分工如下:万胜狄编写绪论、第二章、第三章第一~四节;洛阳工学院陈拂晓编写第一章;广东工业大学肖小亭编写第二章第三~六节的初稿;燕山大学李纬民编写第三章第五节和第四章;李尧编写第五章和第六章。

本书在编写过程中得到了兄弟院校的支持和帮助,主审曹诗倬同志对书稿进行了全面、认真的审查,并提出了许多宝贵意见,在此谨表示深切的谢意。

由于编者水平所限,书中缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

1994年9月

EAC57/12

# 目 录

## 前言

绪论 ..... 1

- 一、金属塑性成形的优点及分类 ..... 1
- 二、金属塑性成形理论的发展概况 ..... 4
- 三、本课程的任务 ..... 4

## 第一章 金属塑性变形的物理基础 ..... 5

### 第一节 单晶体塑性变形机构 ..... 5

- 一、金属的晶体结构 ..... 5
- 二、滑移 ..... 10
- 三、孪生 ..... 12

### 第二节 位错理论的基本概念 ..... 13

- 一、理想晶体的切变强度——位错概念的提出 ..... 13
- 二、位错的两种基本模型 ..... 15
- 三、柏氏矢量 ..... 15
- 四、位错的运动 ..... 16
- 五、位错的增殖 ..... 18

### 第三节 多晶体的冷塑性变形 ..... 19

- 一、多晶体冷塑性变形的特点 ..... 19
- 二、多晶体冷塑性变形机制 ..... 20
- 三、多晶体冷塑性变形后的组织和性能 ..... 20

### 第四节 加工硬化 ..... 21

- 一、加工硬化的现象和机理 ..... 21
- 二、加工硬化的后果和应用 ..... 22

### 第五节 冷塑性变形金属在加热时的变化——回复和再结晶 ..... 23

- 一、软化过程的动力 ..... 23
- 二、回复 ..... 23
- 三、再结晶 ..... 24
- 四、再结晶图 ..... 26

### 第六节 金属的热塑性变形 ..... 26

- 一、热塑性变形的机理和热塑性变形后金属组织性能的变化 ..... 26
- 二、动态回复和动态再结晶 ..... 27

### 第七节 金属的塑性和影响因素 ..... 28

- 一、塑性、塑性指标和塑性图 ..... 28

## 二、化学成分和组织结构对

塑性的影响 ..... 29

## 三、变形温度对塑性的影响 ..... 31

四、变形速度对塑性的影响 ..... 31

五、应力状态对塑性的影响 ..... 33

六、其他因素对塑性的影响 ..... 34

七、提高金属塑性的途径 ..... 35

## 第八节 变形抗力和影响因素 ..... 36

一、变形抗力的概念和指标 ..... 36

二、影响变形抗力的因素 ..... 36

## \* 第九节 金属的超塑性 ..... 40

一、超塑性概述 ..... 40

二、超塑性的力学特性 ..... 41

三、影响超塑性的因素 ..... 42

四、超塑性的变形机制 ..... 42

五、超塑性的应用 ..... 43

思考题 ..... 45

## 第二章 金属塑性变形的力学基础 ..... 46

### 第一节 金属塑性成形过程的受力分析 ..... 46

### 第二节 变形体内一点的应力状态分析 ..... 47

一、应力分析的截面法 ..... 47

二、三维坐标系中的应力分量和应力张量 ..... 48

三、任意斜面上的应力 ..... 50

四、主应力和应力不变量 ..... 51

五、主切应力和最大切应力 ..... 54

六、应力球张量和应力偏张量 ..... 55

七、八面体应力和等效应力 ..... 59

八、应力平衡微分方程 ..... 60

九、平面问题的应力状态和轴对称应力状态 ..... 61

十、应力莫尔圆 ..... 63

### 第三节 变形体内质点的应变状态分析 ..... 66

一、质点的应变状态 ..... 66

二、位移分量和应变分量的关系——小变形几何方程 ..... 71

三、应变连续方程 ..... 74

四、应变增量和应变速率	75	二、塑性加工中金属的断裂	118
五、塑性变形程度的表达式	77	第五节 金属塑性成形中的摩擦和润滑	119
六、塑性变形体积不变条件	78	一、塑性成形时摩擦的特点及其影响	119
七、平面变形和轴对称变形	80	二、塑性成形时摩擦的分类和机理	120
第四节 屈服准则	81	三、塑性成形时接触表面摩擦力的计算	121
一、屈雷斯加屈服准则	81	四、影响摩擦系数的因素	122
二、密席斯屈服准则	81	五、塑性加工中摩擦系数的测定方法	124
三、屈服准则的几何表达——屈服表面和屈服轨迹	82	六、塑性成形时的润滑	126
四、中间主应力的影响——屈服准则的简化表达式	86	七、不同塑性加工条件下的摩擦系数	129
五、硬化材料的屈服准则简介	87	思考题	130
第五节 塑性应力应变关系	89	<b>第四章 金属塑性成形基本工序的力学分析及主应力法</b>	131
一、弹性应力应变关系	89	第一节 主应力法的基本原理	131
二、塑性应力应变关系的特点	91	第二节 墩粗变形特点及变形力计算	131
三、塑性变形的增量理论	92	一、墩粗变形的特点	132
四、塑性变形的全量理论	94	二、圆柱体墩粗变形力计算	133
第六节 真实应力-应变曲线	95	三、墩粗变形功	138
一、拉伸试验曲线	96	第三节 开式模锻变形特点及变形力计算	140
二、压缩试验曲线	99	一、开式模锻的变形特点	140
三、真实应力-应变曲线的简化形式	100	二、开式模锻变形力的计算	141
四、包申格效应	102	第四节 板料弯曲工序分析及变形区的应力应变分布	145
思考题及习题	102	一、线性弹塑性弯曲	145
<b>第三章 塑性成形中金属变形与流动的有关问题</b>	107	二、三维塑性弯曲时的应力应变状态	146
第一节 最小阻力定律	107	三、宽板弯曲时的应力分布	147
第二节 影响金属塑性变形和流动的因素	108	四、板料塑性弯曲时中性层的内移	150
一、摩擦对金属塑性变形和流动的影响	108	五、弯曲力矩的计算	151
二、工具形状对金属塑性变形和流动的影响	109	第五节 圆筒件拉深分析和变形区的应力应变分布	152
三、金属各部分之间的关系对塑性变形和流动的影响	109	一、拉深变形过程和变形特点	152
四、金属本身性质不均匀对塑性变形和流动的影响	110	二、拉深过程的应力应变状态	152
第三节 不均匀变形、附加应力和残余应力	111	三、凸缘变形区的应力应变分布	153
一、均匀变形与不均匀变形	111	四、拉深力的计算	156
二、附加应力	112	五、拉深时的起皱与开裂	157
三、残余应力	114	第六节 挤压变形分析及单位挤压力的计算	157
第四节 金属的断裂	115	一、挤压时金属的变形特点	157
一、断裂的物理本质	115	二、挤压变形力的计算	158
		思考题及习题	162
		<b>*第五章 塑性成形问题的滑移线法</b>	164

## VI

第一节 滑移线的基本概念 .....	164
一、平面变形应力状态的特点 .....	164
二、最大切应力迹线——滑移线的形成 .....	165
三、关于 $\alpha$ 、 $\beta$ 滑移线和 $\omega$ 角的规定 .....	165
四、滑移线的微分方程 .....	166
第二节 滑移线场的应力方程(汉基应力方程) .....	166
第三节 滑移线的基本特性 .....	167
一、沿线特性 .....	167
二、跨线特性(汉基第一定理) .....	168
第四节 应力边界条件 .....	169
第五节 滑移线场的建立方法 .....	172
一、常见的滑移线场 .....	172
二、数值积分法 .....	173
三、近似图解法 .....	178
第六节 用滑移线法求解塑性成形问题 .....	179
一、冲头压入半无限体 .....	179
二、平砧压缩高坯料 .....	184

三、粗糙平板间压缩长坯料 .....	188
四、平面变形挤压 .....	190
五、圆筒件拉深 .....	194
六、盒形件合理坯料的确定 .....	195
思考题及习题 .....	196
第六章 塑性成形问题的其他方法 .....	199
第一节 变形功法 .....	199
一、变形功法的基本原理 .....	199
二、计算举例 .....	200
* 第二节 上限法 .....	201
一、上限法的基本概念 .....	201
二、平面变形问题的上限原理 .....	202
三、上限法在平面变形问题中的应用 .....	203
第三节 塑性材料力学法 .....	209
一、求解原理 .....	209
二、计算举例 .....	210
思考题及习题 .....	212
参考文献 .....	214

## 绪 论

金属塑性成形是金属加工的方法之一。它是在外力（通常是压力）作用下，使金属产生塑性变形，从而加工成所需形状和尺寸的工件的加工方法。所以也把塑性成形称为塑性加工或压力加工。

### 一、金属塑性成形的优点及分类

与金属切削加工、铸造、焊接等加工方法相比，金属塑性加工主要有以下优点：

1) 金属材料经过相应的塑性加工后，其组织、性能得到改善和提高。例如炼钢铸出的钢锭，其内部组织疏松多孔、晶粒粗大且不均匀，偏析也比较严重，必须经过锻造、轧制或挤压等塑性加工，才能使其结构致密、组织改善、性能提高。因此，90%以上的铸钢都要经过塑性加工成钢坯或钢材。此外，经过塑性成形后，金属的流线分布合理，从而也改善了制品的性能。

2) 金属塑性成形主要是靠金属在塑性状态下的体积转移来实现，不产生切屑，因而材料利用率高，可以节约大量的金属材料。

3) 金属塑性成形方法具有很高的生产率，适于大量生产。这一点在金属的轧制、拉丝和挤压等工艺中尤为明显。在锻压工艺中，随着生产机械化与自动化程度的提高，生产率也相应得到提高。例如，高速冲床的行程次数已达1500~1800次/min；在双动拉深压力机上成形一个汽车覆盖件仅需几秒钟；在12000×10kN热模锻压力机上锻造汽车发动机的六拐曲轴仅需40s；在弧形板行星搓丝机上加工M5mm螺钉，生产率高达12000件/min。

4) 用塑性成形方法得到的工件可以达到较高的精度，不少成形方法已达到少、无切削的要求。例如，精密模锻的伞齿轮，其齿形部分可不经切削加工而直接使用；精锻叶片的复杂曲面可达到只需磨削的精度；旋压液压缸的表面粗糙度达 $R_a0.40\sim0.20\mu\text{m}$ ，可以直接使用。

由于金属塑性加工具有上述优点，因而在冶金、有色金属加工、汽车、拖拉机、宇航、船舶、军工、仪器仪表、电器和日用五金等工业部门中得到广泛应用，在国民经济中也占有重要的地位。

金属塑性成形的种类很多，分类方法目前还不统一。按照成形的特点，一般把塑性加工分为轧制、拉拔、挤压、锻造和冲压五大类。每类又包括多种加工方法，形成各自的工艺领域。在轧制、拉拔和挤压的成形过程中，变形区是不变的，属稳定的塑性流动过程，适于连续的大量生产，提供型材、板材、管材和线材等金属原材料，属于冶金工业领域；而锻造和冲压成形的变形区随变形过程而变化，属非稳定的塑性流动过程，适于间歇生产，用于提供机器零件或坯料，属于机械制造工业领域。锻造属体积成形，而冲压属于板料成形，故也称板料冲压。

按照成形时工件的受力和变形方式进行分类见表1。这种分类方法把金属塑性成形分为基本加工变形方式和组合加工变形方式。

靠压力作用使金属产生变形的方式有锻造、轧制和挤压。



表1 金属塑性加工工件的受力和变形方式分类

基本受力方式 分类与名称	压		拉		力		力		力		力		
	锻		拔		造		横		纵		轧		
	自	生	锻	拔	造	横	纵	轧	横	轧	斜	轧	
图例													
基本受力方式 分类与名称	压 挤	压 反	拉 拔	拉 拔	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压
图例													
组合方式 名称	锻 造	锻 造	拉 拔	拉 拔	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压	力 压
图例													

**锻造** 锻造通常分为自由锻造和模锻。自由锻一般是在锻锤或水压机上，利用简单的工具将金属锭或块料锻成所需形状和尺寸的加工方法。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，主要用于单件、小批量生产、大锻件生产或冶金厂的开坯。模锻是在模锻锤或热模锻压力机上利用模具来成形。由于金属的成形受模具控制，因此模锻件有相当精确的外形和尺寸，也有相当高的生产率，适合于大批量生产。

**轧制** 轧制是坯料通过旋转的轧辊受到压缩，使其横截面减小，形状改变，长度增加。轧制可分为纵轧、横轧和斜轧。纵轧时，两工作轧辊旋转方向相反，轧件的纵轴线与轧辊轴线垂直；横轧时，两工作轧辊旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线平行；斜轧时，两工作轧辊旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线成一定的倾斜角。用轧制方法可生产板带材、型材、管材以及周期断面型材、变断面轴及钢球等。

**挤压** 挤压是把坯料放在挤压机的挤压筒中，在挤压杆的压力作用下，使金属从一定形状和尺寸的模孔中流出。一般可分为正挤压和反挤压，正挤压时挤压杆的运动方向与从模孔挤出的金属的流动方向一致；反挤压时挤压杆的运动方向与从模孔中挤出的金属的流动方向相反。用挤压法可生产各种断面的型材、管材以及机器零件。因为挤压是在很强的三向压应力状态下的成形过程，因而允许采用很大的变形量，更适于低塑性材料成形。

主要靠拉力作用使金属产生变形的方式有拉拔、冲压（拉深等成形工序）和拉形。

**拉拔** 拉拔是用拉拔机的夹钳把金属坯料从一定形状和尺寸的模孔中拉出，从而获得各种断面的型材、线材和管材。

**冲压（拉深等）** 拉深等成形工序是在曲柄压力机或油压机上用凸模把板料拉进凹模中成形，用以生产各种薄壁空心零件，如各种空间曲面零件及覆盖件等。

**拉形** 拉形是板料两端在拉力作用下沿一定形状的凸模贴模成形，如飞机蒙皮等大型曲面零件。带材的拉力矫直也属于这种方式。

主要靠弯矩和剪力作用使金属产生变形的方式有弯曲和剪切。

**弯曲** 弯曲是坯料在弯矩的作用下成形，如板料在模具中的弯曲成形、板带材的折弯成形、钢材的矫直等。

**剪切** 坯料在剪力作用下进行剪切变形，如板料在模具中的冲孔、落料、切边、板材和钢材的剪切等。

随着生产技术的发展，上述基本加工变形方式互相渗透，而产生新的组合加工变形方式。如锻造和纵轧组合的辊锻工艺，可生产各种变断面零件（如连杆等）；锻造和横轧组合的楔横轧工艺，可生产各种阶梯轴和锥形轴；锻造扩孔和横轧组合的辗环工艺，可生产各种环零件（如轴承环、火车轮箍、齿轮坯等）；冲压和轧制组合的旋压工艺，可生产各种薄壁空心回转体零件；弯曲和轧制组合的辊弯工艺，可生产各种断面的冷弯型材及焊管等。

以上说明，各种加工变形方式的互相渗透和适当组合，可开发出高效率的新的塑性成形工艺方法。此外，随着技术的发展，也不断形成新的塑性加工方法，例如连铸连轧、液态模锻、等温锻造和超塑性成形等。所有这些都进一步扩大了塑性成形的应用范围。

塑性加工按成形时工件的温度还可以分为热成形、冷成形和温成形三类。热成形是在充分进行再结晶的温度以上所完成的加工，如热轧、热锻、热挤压等；冷成形是在不产生回复和再结晶的温度以下进行的加工，如冷轧、冷冲压、冷挤压、冷锻等；温成形是在介于冷热成形之间的温度下进行的加工，如温锻、温挤压等。

## 二、金属塑性成形理论的发展概况

金属塑性加工是具有悠久历史的加工方法，早在两千多年前的青铜器时期，我国劳动人民就已经发现铜具有塑性变形的性能，并掌握了锤击金属以制造兵器和工具的技术。随着近代科学技术的发展，已经赋予塑性加工技术以崭新的内容和涵义。但是，作为这门技术的理论基础——金属塑性成形原理则发展得较晚，直到本世纪40年代才逐步形成独立的学科。

金属塑性成形理论是在塑性变形的物理、物理-化学和力学基础上发展起来的一门工程应用技术理论。金属塑性变形的物理和物理化学基础属于金属学范畴。自从本世纪30年代位错概念提出以来，人们对塑性变形的微观机理有了科学的解释。对于金属的塑性——金属产生塑性变形而不破坏其完整性的能力，人们也有了更深刻的认识。塑性，作为金属的状态属性，不仅取决于金属材料本身（如晶格类型、化学成分和组织结构等），还取决于变形的外部条件，合适的温度、速度条件和力学状态，可以获得很高的塑性。

金属塑性成形原理的另一重要方面是塑性成形力学，它是在塑性理论（或称塑性力学）的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，由法国工程师屈雷斯加（H. Tresca）首次提出最大切应力屈服准则，距今已有一百多年的历史。最早将塑性理论用于金属塑性加工的是德国学者卡尔曼（Von Karman），他在1925年用初等方法建立了轧制时的应力分布规律。此后不久，萨克斯（G. Sachs）和齐别尔（E. Siebel）在研究拉拔时提出了相似的求解方法——切块法，即后来所称的主应力法。此后，人们对塑性成形过程的应力、应变和变形力的求解逐步建立了许多理论求解方法：如滑移线法、工程计算法、变分法和变形功法、上限法、有限元法等。同时，还建立了理论解析与实验相结合的方法：如塑性变形材料力学法和直观塑性法（又称视塑性法）。

金属塑性成形理论是一门年青的学科，生产中存在的大量问题还有待于进一步认识、研究、总结，新的成形方法也有待于进一步开发。作为塑性成形理论本身也需要进一步发展和完善。例如，微观塑性理论和宏观塑性理论至今还没有很好地结合和统一起来；塑性变形的基本方程——本构方程（即塑性应力应变方程）也需要进一步完善。

## 三、本课程的任务

金属塑性成形方法多种多样，具有各自的特点，但它们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) 掌握金属塑性变形的金属学基础，了解金属的塑性变形行为以及变形条件对其塑性和变形抗力的影响，以便使工件在成形时获得最佳的塑性状态、最高的变形效率和优质的性能。
- 2) 掌握应力、应变、应力应变关系和屈服准则等塑性理论基础知识，以便对变形过程进行应力应变分析、并寻找塑性变形物体的应力应变分布规律。
- 3) 掌握塑性成形时的金属流动规律和变形特点，分析影响金属塑性流动的各种因素，以便合理地确定坯料尺寸和成形工序，使工件顺利成形。
- 4) 掌握塑性成形力学问题的各种解法及其在具体工艺中的应用，以便确定变形体中的应力应变分布规律和所需的变形力和功，为选择成形设备和设计模具提供依据。

金属塑性成形原理是一门专业理论课，在学习本课程时，要建立起准确的物理概念，掌握塑性变形的基本规律，注意理论联系实际，提高分析和解决塑性成形实际问题的能力。

# 第一章 金属塑性变形的物理基础

研究金属的变形机理及在各种状态下的变形行为，是分析金属塑性成形的重要基础。本章从微观角度出发介绍单晶体和多晶体的塑性变形机理；位错理论的基本概念；分析冷塑性变形的金属在加热时的软化过程——回复和再结晶及其影响因素；此外，还对金属的塑性和变形抗力、提高金属塑性的途径进行讨论；最后介绍金属超塑性的概念及其应用情况。

## 第一节 单晶体塑性变形机构

### 一、金属的晶体结构

固体物质中的原子排列有两种情况：一是原子呈周期性有规则的排列，这种物质称为晶体；二是原子呈不规则排列，称为非晶体。固体金属一般都是晶体。晶体中的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，构成空间点阵。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，这一最小的几何单元称为晶胞。晶胞的棱边长度称为晶格常数（或点阵常数），习惯以 $10^{-10}\text{m}$ 为单位进行量度。

#### 1. 常见的晶胞结构

工业上应用的金属种类很多，其晶体结构也不完全相同，通常用晶胞来描述晶体结构。最常见的晶体结构有面心立方结构、体心立方结构和密排六方结构，如图1-1~1-3所示。

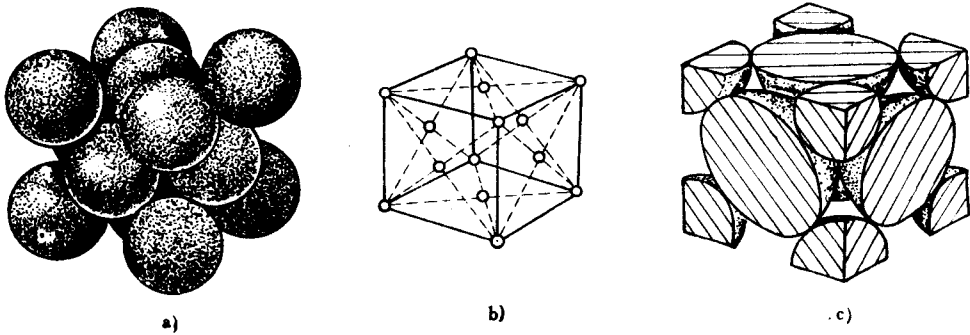


图1-1 面心立方结构

a) 刚球模型 b) 质点模型 c) 晶胞原子数(示意图)

面心立方晶胞的每个角点上都有一个原子，每个面的中心也有一个原子，晶胞中的原子数为4，具有面心立方结构的金属有Ag、Al、Au、Ni、Cu、Pb、 $\gamma$ -Fe等。

体心立方晶胞的每个角点上各有一个原子，在晶胞的中心还有一个原子，晶胞中的原子数为2，具有体心立方结构的金属有Cr、V、Nb、Ta、Mo、W、 $\alpha$ -Fe、 $\beta$ -Ti等。

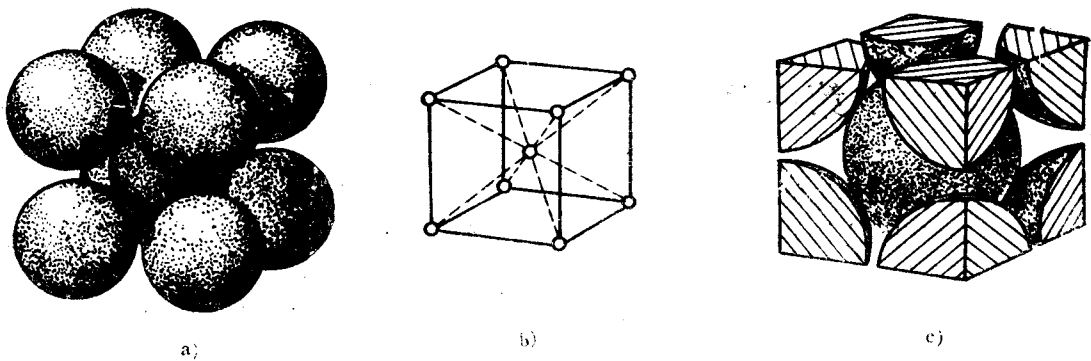


图1-2 体心立方结构

a) 刚球模型 b) 质点模型 c) 晶胞原子数(示意图)

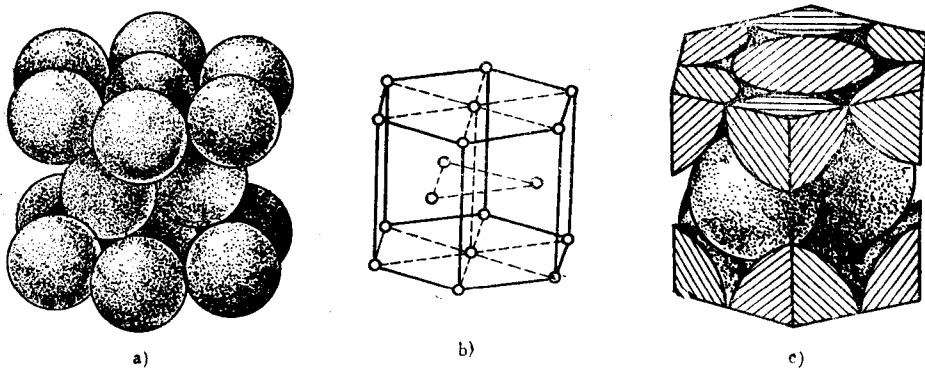


图1-3 密排六方结构

a) 刚球模型 b) 质点模型 c) 晶胞原子数(示意图)

密排六方晶胞象是一个六棱柱体，晶胞中上、下面的六个角点和中心各有一个原子，上、下面之间的空隙处还有三个原子，晶胞中的原子数为6。密排六方晶胞的晶格常数有两个：六棱柱底面的边长 $a$ 和上、下面之间的距离 $c$ ，一般六方结构金属的 $c/a=1.57\sim 1.64$ 。具有密排六方结构的金属有Zn、Mg、Cd、 $\alpha$ -Be、 $\alpha$ -Ti、 $\alpha$ -Co等。

密排六方结构和面心立方结构都是纯金属中最密集的结构，都有一个原子密排程度最高的面，这就是密排六方结构的底面和面心立方结构中由三个角点引出，并穿过立方体中心的对角面。这两个面上原子排列的情况是完全一样的，如图1-4所示。

密排六方结构和面心立方结构密排面上的原子排列情况虽然完全一样，但是二者的原子堆积方式却不相同，如图1-5所示。对密排六方结构而言，以底面作为第一层(A)、在第一层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，因而构成ABAB……的堆积方式。对面心立方结构而言，如图1-6所示，以密排面(C)为第一层原子，第二层原子(B)堆积在第一层原子的空隙中心，第三层原子(A)堆积在第二层原子的空隙中心，同时又是第一层原子的空隙中心，因而它的堆积方式是ABCABC……。

## 2. 实际金属的晶体结构

晶胞的重复堆砌构成晶体，同一种位向的晶胞堆积在一起，就构成金属单晶体。单晶体

由于原子在各个方向上排列的密集程度有差别，因此，在各个方向上的性能不同，称为各向异性。

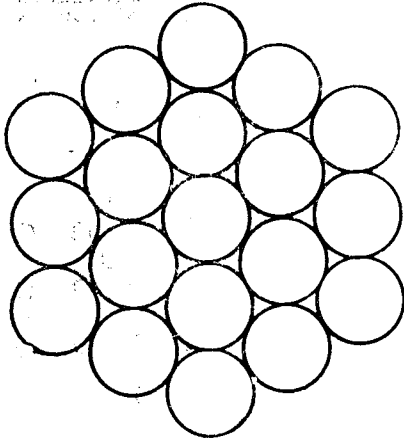


图1-4 密排面上原子排列示意图

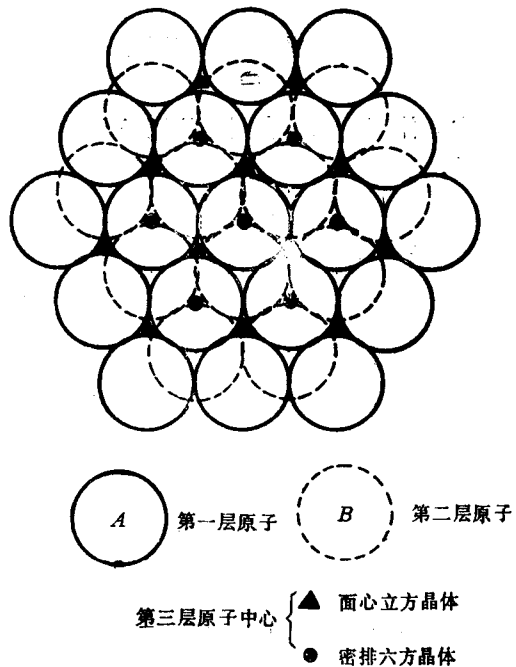


图1-5 密排六方结构和面心立方结构内原子堆垛方式

实际使用的金属是多晶体，由许多晶粒组成，每一个晶粒都是有一定取向的单晶体，由于晶粒间取向不一致，方向性互相抵消，因而在一般情况下，实际金属不显示出方向性。在实际金属中，由于晶体的形成

条件、加工过程、原子的热运动以及其他因素（如辐射、氧化等）的影响，原子的排列不可能象理想晶体那样规则和完整，而是或多或少地存在着偏离理想结构的区域，出现了不完整性，通常把这种偏离完整性的区域称为晶体缺陷。晶体缺陷通常分为下列三大类：

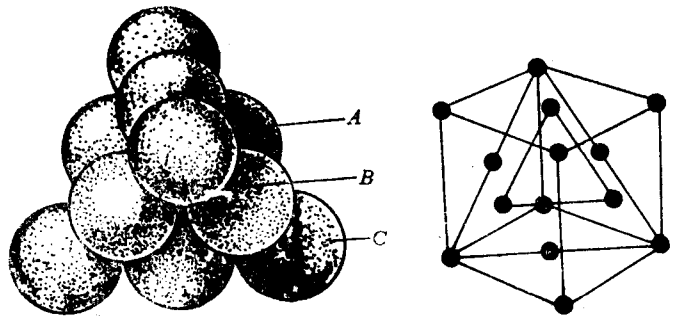


图1-6 面心立方结构原子堆垛模型

(1) 点缺陷 其特点是X、Y、Z三个方向上的尺寸都很小（相当于原子的尺寸）。晶体中的点缺陷主要包括空位、间隙原子、杂质或溶质原子，以及由它们组合而成的复杂缺陷（如空位对或空位片）。

在晶体中，处于平衡位置的原子不是固定不动的，而是以各自的平衡位置为中心不停地作热振动。随着温度的升高，热振动的振幅和频率都加大。由于晶体内原子的相互作用，它们将彼此相互影响、相互制约，从而使热振动能量产生起伏。当某些原子振动的能量高到足以克服周围原子的束缚时，它们便有可能脱离原来的平衡位置，迁移到一个新的位置上，与

此同时在原来的平衡位置上留下点阵空位。离位原子的去处大致有三：一是迁移到晶体表面或晶界上的正常阵点位置，使晶体内部留下空位，如图1-7a所示。二是挤入点阵的间隙位置，在晶体中同时形成数目相等的空位和间隙原子，如图1-7b所示。在一定温度下，空位与间隙原子的产生和复合过程相平衡。其三是迁移到其他空位中，使空位移位，但不增加空位的数目。

在一定条件下，晶体表面上的原子也可能迁移到晶体内的间隙位置，成为间隙原子，如图1-7c所示。

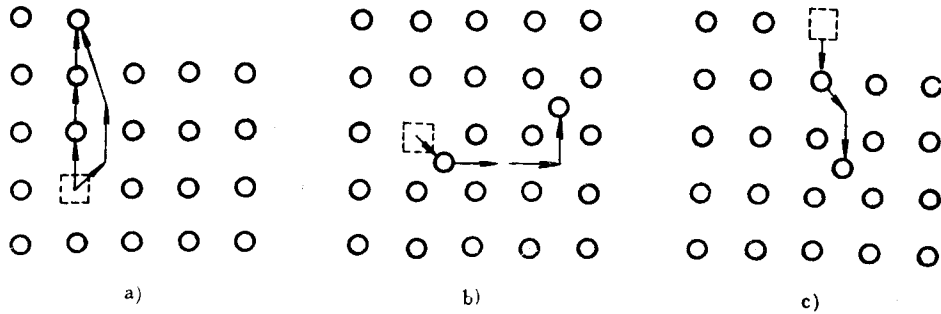


图1-7 晶体中的点缺陷

a) 肖脱基空位 b) 弗伦克尔空位 c) 间隙原子

空位和间隙原子的形成与温度有密切关系，随着温度的升高，空位和间隙原子的数目增多。因此，点缺陷又称为热缺陷。但是，晶体中的点缺陷并非都是通过原子的热振动产生的，高温淬火、冷变形加工、高能粒子（例如 $\alpha$ 粒子、高速电子、中子）轰击（辐照）以及氧化等也可能造成点缺陷。在一定条件下，空位可联结成空位对和空位群，也可集合起来形成复杂缺陷（如位错）。

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。

(2) 位错 位错是因原子错排在晶体中形成的一种线缺陷，通常可分为刃型位错和螺型位错，如图1-8和1-9所示。

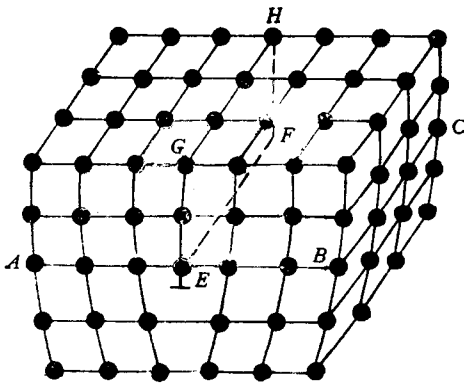


图1-8 刃型位错示意图

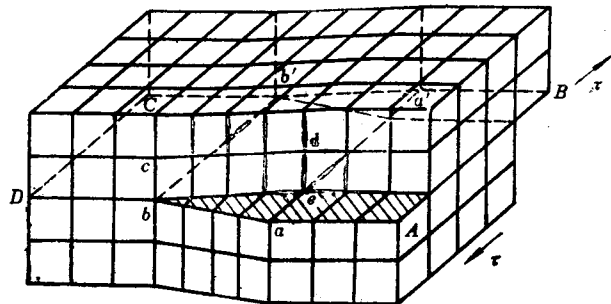


图1-9 螺型位错示意图

由图1-8可知, 在晶体的某一水平面(ABC)以上, 多出了一个垂直方向的原子面EFHG, 它中断于ABC面上的EF处, 犹如插入的刀刃一样, 使ABC面以上与以下的两部分晶体之间产生了原子错排, 因而称为刃型位错, EF线称为刃型位错线。

通常把在晶体上半部多出原子面的位错称为正刃型位错, 用符号“ $\perp$ ”表示; 在晶体下半部多出原子面的位错称为负刃型位错, 用符号“ $\neg$ ”表示。应该指出, 刃型位错的正或负是相对的。

图1-9所示的是晶体在切应力 $\tau$ 的作用下, 其右边上下两部分原子沿滑移面ABCD错动了一个原子间距, 结果在 $aa'$ 和 $bb'$ 之间出现了一个过渡区, 在这个过渡区中, 原子的正常排列遭到破坏。此过渡区即为螺型位错,  $bb'$ 为螺型位错线。

螺型位错分为左旋螺型位错和右旋螺型位错两种。通常用拇指代表螺旋的前进方向, 其余四指代表螺旋的旋转方向。凡符合右手法则的均称为右旋螺型位错, 而符合左手法则的称为左旋螺型位错, 图1-9所示的为右旋螺型位错。

(3) 面缺陷 这里主要介绍三种面缺陷。

1) 堆垛层错: 是指原子面的堆垛顺序出现差错。如面心立方结构正常的堆垛顺序为ABCABC……。可能出现两种错排现象: 一种是 $ABC \uparrow BC ABC \dots$ , 这种错排现象相当于在正常的排序中抽去一层, 因此称为抽出型层错; 另一种错排现象是 $ABC \downarrow B : ABC \dots$ , 相当于在正常排序中插入了一层, 因此称为插入型层错。

堆垛层错在不同的金属中都会产生, 但产生的难易程度有差别。这是由于一些金属产生层错所需的能量较高, 因此, 产生层错的概率就小; 有些金属产生层错所需要的能量较低, 则产生层错的概率就大。表1-1是一些面心立方金属的层错能。

表1-1 一些面心立方金属的层错能

金属晶体	Ag	Au	Cu	Ni	Al	奥氏体不锈钢
层错能( $10^{-7} \text{J/cm}^2$ )	25	30	40	80	200	13

2) 晶界: 金属材料一般都是多晶体, 由许多晶粒组成, 位向不相同的晶粒之间的界面称为晶界。相邻晶粒间的位向差小于 $10^\circ$ 的晶界称为小角度晶界, 位向差大于 $10^\circ$ 的晶界称为大角度晶界。

晶界是多晶体的重要面缺陷, 对晶体性能有重要影响。

晶界处点阵畸变大, 存在着晶界能。较高的晶界能表明它有自发地向低能状态转变的趋势。晶粒长大和晶界的平直化都能减小晶界的总面积, 从而降低晶界的总能量。温度越高原子的动能越大, 故越有利于晶粒长大和晶界平直化。

晶界处的原子排列的不规则性, 使它在常温下对金属材料的塑性变形会起阻碍作用, 在宏观上表现为晶界较晶粒内部具有较高的强度和硬度。显然, 晶粒越细, 金属材料的强度、硬度也越高。

晶界处的原子偏离其平衡位置, 具有较高的动能, 并存在较多的空位、位错等缺陷, 故原子的扩散速度比在晶粒内部快得多。而且, 晶界处富集杂质原子, 因而其熔点较低。

由于晶界的能量较高, 原子处于不稳定状态, 当晶体在腐蚀性介质中时, 晶界的腐蚀速度一般都比晶粒内部要快。

3) 亚晶粒及亚晶界: 多晶体内的每个晶粒并不都是理想的单晶体, 除含有空位、位错



之外，每个晶粒又可分为若干个位向差更小的晶块，称为亚晶粒。晶粒的平均直径通常在 $0.015\sim 0.024\text{mm}$ 的范围内，而亚晶粒的平均直径则通常为 $0.001\text{mm}$ 的数量级。亚晶粒比较接近于理想的单晶体，相邻亚晶粒间的界面叫亚晶界。

## 二、滑移

晶体的塑性变形并非均匀地发生于整个晶体中，当应力超过其弹性极限后，晶体的层片之间沿一定的晶面和晶向产生相对位移，即滑移。这种位移在应力去除后是不能恢复的，大量滑移的积累就构成了宏观的塑性变形。

晶体的滑移有两个重要的特征：一是晶体滑移的距离是滑移方向原子间距的整数倍；二是滑移后并不破坏晶体排列的完整性。

### 1. 滑移系

实验表明，晶体的滑移通常是沿着一定的晶面和晶向进行的，这些晶面和晶向称为滑移面和滑移方向。滑移面一般是原子密排面，密排面间距比较大，沿这些面滑移比较容易。滑移方向都是原子密排方向。晶体的密排方向一般比较稳定，在某些条件下即使改变了滑移面，滑移方向也保持不变。

每一个滑移面和该面上的一个滑移方向合起来构成一个滑移系。每一个滑移系表示金属晶体在进行滑移时可能采取的一个空间取向。在其他条件相同时，滑移系愈多，金属的塑性愈好。这是因为滑移系愈多，滑移过程可能采取的空间取向便愈多，滑移容易进行，因此这种金属的塑性愈好。

面心立方晶体的滑移面为 $\{111\}$ ，共有四组；滑移方向为 $\{110\}$ ，每组滑移面上有三个滑移方向，因而面心立方晶体共有12个滑移系。密排六方晶体的滑移面为 $(0001)$ 面，沿此面有三个 $\{11\bar{2}0\}$ 晶向为滑移方向，因此共有三个滑移系。体心立方晶体的原子密集程度不如面心立方或密排六方晶体，它不具有突出的最密集面，一般可在几个较密排的面上滑移，这些面是 $\{110\}$ ， $\{112\}$ ， $\{123\}$ ，体心立方晶体的滑移方向总是 $\{111\}$ 。因此，体心立方晶体的滑移系较多。如 $\alpha\text{-Fe}$ ，滑移常可在 $\{110\}$ ， $\{112\}$ ， $\{123\}$ 三族滑移面上沿 $\{111\}$ 晶向发生，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晶体的金属的Cu、Al、Ag等低。

### 2. 滑移的临界切应力

滑移是在切应力作用下进行的。当晶体受力时，晶体的某个滑移系是否发生滑移，决定于沿此滑移系的切应力的。图1-10是单晶体拉伸时的应力分析图。 $F$ 为沿着拉伸轴线方向的拉力， $A$ 为单晶体的横截面积， $\phi$ 为滑移面与横截面之间的夹角， $\lambda$ 为滑移方向与拉伸轴的夹角。 $\phi$ 、 $\lambda$ 共面时，沿滑移方向的切应力为

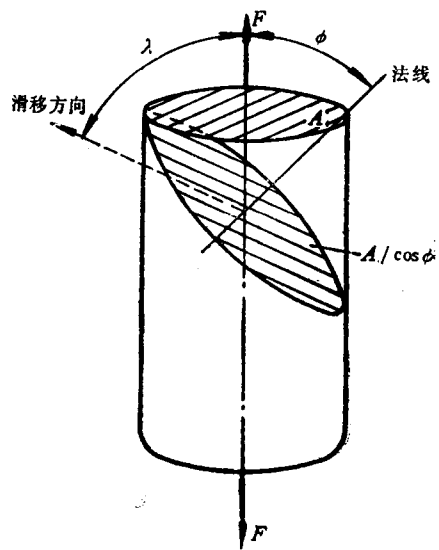


图1-10 单晶体拉伸时的应力分析