

中等专业学校
教学用书

HONGDENG

ZHUANYE

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

塑性变形

与轧制原理

黄守汉 主编

冶金工业出版社

31
7

中等专业学校教学用书

塑性变形与轧制原理

上海冶金工业学校 黄守汉 主编

北京

冶金工业出版社

1997

图书在版编目(CIP)数据

塑性变形与轧制原理/黄守汉主编. —北京: 冶金工业出版社, 1991.11(1997重印)

中等专业学校教学用书

ISBN 7-5024-0894-0

I. 塑… II. 黄… III. ①金属-塑性变形-专业学校-教材②轧制理论-专业学校-教材 IV. TG331

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第01527号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)

怀柔东茶坞印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版; 各地新华书店发行

1991年11月第1版, 1997年5月第3次印刷

787mm×1092mm 1/16; 20印张; 482千字; 316页; 10101—13900册

23.00元

前 言

本书是根据1986年10月冶金中专轧钢专业协作会通过的“塑性变形与轧制原理”教学大纲编写的。该书的内容是依据中专的培养目标和“三基”要求编写的。本教材较系统地阐明了塑性变形的原理与规律，在此基础上重点分析轧制变形的特点、规律和力能参数。该书可作为中专学校轧钢专业或压力加工专业的教学用书，也可作为工程技术人员学习的参考用书。

本书在编写过程中，采取编写与试用相结合的方法，并先后进行过三次审稿。在审稿中，与会任课教师对试用讲义提出了宝贵意见。

编者对参加本书审议和曾提出过宝贵意见的同志表示衷心的感谢！

参加该书编写的有上海冶金工业学校黄守汉（绪论、第一、第二、第三、第四、第十三和第十四章）；鞍山钢铁学校张淑云（第五、第六、第七和第八章）；攀枝花冶金工业学校王甘勋（第九、第十、第十一和第十二章），由黄守汉任主编并负责全书的统稿。

由于编者的水平有限，书中的缺点和错误在所难免，衷心希望读者批评指正。

编 者

1989.12.

目 录

绪 论	1
第一章 塑性变形的力学基础	6
第一节 力和变形	6
第二节 应力状态	10
第三节 塑性变形中的力学图示	14
第四节 变形的表示方法	20
第五节 移位体积与变形速度	24
第二章 金属塑性变形机理	30
第一节 金属的结构	30
第二节 单晶体的塑性变形	32
第三节 位错的基本概念	35
第四节 金属的塑性变形	41
第三章 塑性变形对金属组织与性能的影响	45
第一节 冷热变形的概念	45
第二节 冷变形对组织结构与性能的影响	47
第三节 回复与再结晶	51
第四节 热变形对组织结构与性能的影响	60
第五节 组织与性能的控制	62
第四章 外摩擦	73
第一节 外摩擦的作用与特征	73
第二节 摩擦机构与摩擦定律	75
第三节 影响外摩擦的因素	78
第四节 轧制时的摩擦系数	83
第五章 塑性变形的基本规律	85
第一节 体积不变定律	85
第二节 最小阻力定律	86
第三节 不均匀变形	88
第四节 不均匀变形的原因	93
第五节 不均匀变形的后果	100
第六节 残余应力	103
第六章 金属的塑性	106
第一节 金属塑性的概念及测定方法	106
第二节 影响塑性的因素及提高塑性的途径	110
第三节 金属的超塑性	125
第七章 变形抗力与屈服条件	133

第一节	变形抗力的概念	133
第二节	开始塑性变形的条件	133
第三节	影响变形抗力的因素	141
第四节	降低变形抗力常用的工艺措施	151
第八章	塑性变形中的断裂	153
第一节	断裂的基本类型	153
第二节	裂缝理论及断裂过程	155
第三节	压力加工中金属的断裂	161
第九章	轧制过程的建立	172
第一节	简单轧制条件	172
第二节	变形区主要参数	173
第三节	咬入条件	174
第四节	平均工作辊径与平均压下量	179
第五节	最大压下量计算及改善咬入的措施	181
第六节	孔型对咬入的影响	183
第七节	三种典型轧制情况	185
第八节	轧制变形区的应力状态	189
第十章	轧制时的宽展	195
第一节	宽展的种类与组成	195
第二节	影响宽展的因素	199
第三节	宽展的计算公式	206
第四节	孔型中轧制的变形特点和宽展计算	208
第十一章	轧制时的前滑与后滑	213
第一节	前滑的产生及表示方法	213
第二节	前滑的计算公式	216
第三节	中性角的确定	218
第四节	前滑、后滑与纵横变形的关系	221
第五节	影响前滑的因素	226
第十二章	轧制压力	231
第一节	轧制压力的概念	231
第二节	接触面积的计算	233
第三节	卡尔曼单位压力微分方程	236
第四节	采利柯夫平均单位压力公式	238
第五节	奥洛万单位压力微分方程	247
第六节	西姆斯公式	249
第七节	艾克隆德公式	254
第八节	恰古诺夫公式	255
第九节	斯通公式	256
第十节	计算平均单位压力的其它公式	261

第十三章 轧制力矩与主电机容量校核	263
第一节 常见轧制过程的辊系受力分析与轧制力矩.....	263
第二节 轧机传动力矩的组成及计算.....	279
第三节 按能耗值确定轧制力矩.....	283
第四节 主电机容量校核.....	286
第十四章 轧制时的弹塑性曲线与张力方程	293
第一节 轧制时的弹塑性曲线.....	293
第二节 连轧基本理论.....	300
思考题及练习题.....	305
参考书目.....	316

绪 论

《塑性变形与轧制原理》是金属压力加工或轧钢专业的主要专业基础课之一，也是专业课的“开路先锋”。因此该课程在本专业的学习中占有重要的地位。

金属压力加工是金属在受外力作用并不破坏自身完整性的条件下，稳定改变其几何形状与尺寸，从而获得所需要的几何形状与尺寸的加工方法。因为它利用了金属的塑性，因而这种加工过程也称为金属塑性加工。

我们的祖先在长期的生产和生活实践中，在自然科学方面，除四大发明外，其它领域也有很重大的贡献。从一系列的文献中可以证明，我国古代在金属压力加工方面也曾取得很大的发展。锻工工艺在我国起源最早，远在春秋战国时代，即2800年前，我们的祖先就开始了宝剑的制作。这充分体现了我国古代锻造技术的精良。

由于锻造技术的起源最早，因此在这方面的文献记载也较多，如南北朝的《御览》一书和宋朝的沈括所著的《梦溪笔谈》，都对锻造技术如何保证质量方面作了较详细的论述。明朝宋应星著《天工开物》，详细地记载了造针的过程，把锻造与拉伸过程有机地进行了组合，在保证质量上，合理地采用了热处理及其温度的控制。

虽然我国的金属压力加工事业（锻造和拉丝）在很早就获得了较高的水平，但是由于长期遭受封建制度的统治而阻碍了生产的发展，特别是鸦片战争以后，除受封建主义的统治压迫外，还受帝国主义和官僚资本主义的掠夺和摧残，使压力加工的技术水平一直不能得到发展。

新中国成立以后，在党的英明领导下，我国的冶金事业获得了很大的发展。近40年来，先后建立了近20多个大型钢铁企业和有色加工基地。特别是党的十一届三中全会以后，压力加工中的轧制生产象雨后春笋般地在农村和各行各业中得到了发展。

金属压力加工的种类很多，分类方法也不统一。本书按金属加工时工件的受力和变形方式进行分类。

靠压力作用使金属产生塑性变形的方式有锻造、轧制和挤压。

一、锻造

锻造是用锻锤的往复冲击力或用压力机的压力使金属改变成所需要形状和尺寸的一种加工方法。它分为自由锤锻和模锻两种。自由锻是在上下往复运动的平锤头或曲面锤头的冲击下，使金属产生塑性变形的，下锤头（铁砧）通常是固定的。模锻是将金属放在锻模中，使金属产生塑性变形而获得与模膛一样的形状。

锻造的几种主要生产过程如图1所示：有锻粗、延伸、穿孔、在垫环中及锻模中锻粗、在开式或角式锻模中锻造等。这些生产方式广泛应用于各工业部门，可以生产几克到200吨以上各种形状的锻件，如各种轴类、曲柄和连杆等。

二、轧制

轧制时金属在两个旋转的轧辊之间受到压缩而产生塑性变形，其结果是断面减小、形

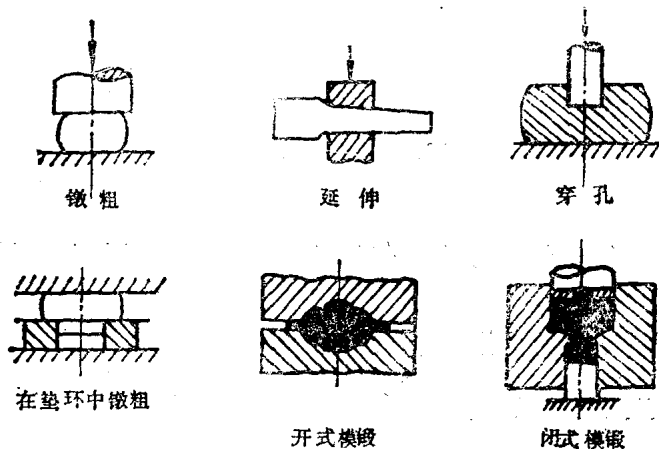


图 1 锻造的几种主要过程

状改变、长度增加。它可以分为纵轧、横轧和斜轧。

1. 纵轧

轧件在轴线相互平行、旋转方向相反的轧辊之间产生塑性变形，金属的运动方向与轧辊的轴线垂直，如图 2 所示。经轧制后的轧件断面尺寸减小，长度增加。不论金属是冷态还是热态均可进行这种轧制，它是轧制生产中应用得最广泛的一种轧制方法，如各种型材和板材，都属纵轧的产品范围。

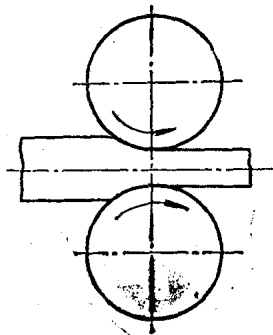


图 2 纵轧简图

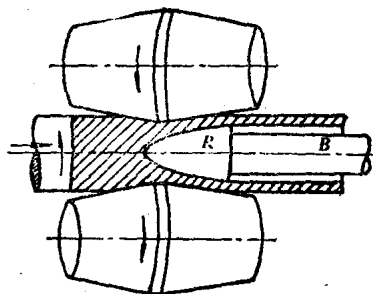


图 3 斜轧简图

2. 斜轧

轧件在两个轴线相互成一定角度且旋转方向相同的轧辊之间产生塑性变形，轧件沿轧辊交角的中心水平线方向进入轧辊，并在变形时产生螺旋运动（既有旋转，又有前进）。这种广泛应用于生产管材和变断面型材的轧制叫斜轧。斜轧的变形过程如图 3 所示。

3. 横轧

轧件在两个旋转方向相同的轧辊之间产生塑性变形，如图 4 所示。这种轧制，轧件只作旋转运动且与轧辊的旋转方向相反，故轧件与轧辊的轴线相互平行，因此这种轧制方式可以用来生产回转体（如变断面轴、齿轮等）。

三、挤压

将金属放在挤压筒内，一端施以压力（借助于水压机的挤压轴）使金属从规定的模孔中挤出而得到不同形状的成品，如棒材、型材、管材和线材等。挤压分正挤压和反挤压。

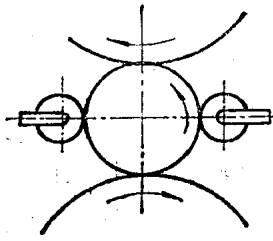


图 4 模轧简图

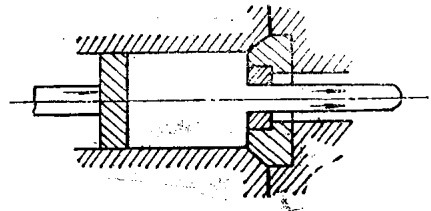


图 5 挤压简图

正挤压时，挤压轴的运动方向和从模孔中挤出的金属前进方向一致；而反挤压时，挤压轴的运动方向和从模孔中挤出的金属前进方向相反。图 5 为正挤压简图。

靠拉力作用使金属产生塑性变形的有拉拔、冲压等。

四、拉拔

用拉拔机的钳子把金属从具有一定形状和尺寸的模孔中拉出，使金属的断面缩小并使长度增加的加工方法。它可以生产各种实心断面的型材、线材和各种空心断面的型材与管材。对空心断面的管材，既可以用芯棒或不用芯棒，以达到使管径减小、管壁变薄（或加厚）的目的。图 6 为拉丝和拔管的简图。

拉拔一般在冷状态下进行，产品的断面尺寸比较小，如直径为 0.015mm 的金属丝和直径为 0.3mm 的金属管。因此该产品不仅具有较高的强度与硬度，而且表面很光洁，尺寸也比较精确。

五、冲压（拉延）

冲压是靠压力机的冲头把厚度较小的板带顶入凹模中，冲压成需要的形状。用这种方法可以生产有底薄壁的空心制品，其主要的几种生产方法如图 7 所示，它包括厚度不变的冲压延伸、变薄的冲压延伸、弯曲和动力冲挤等。

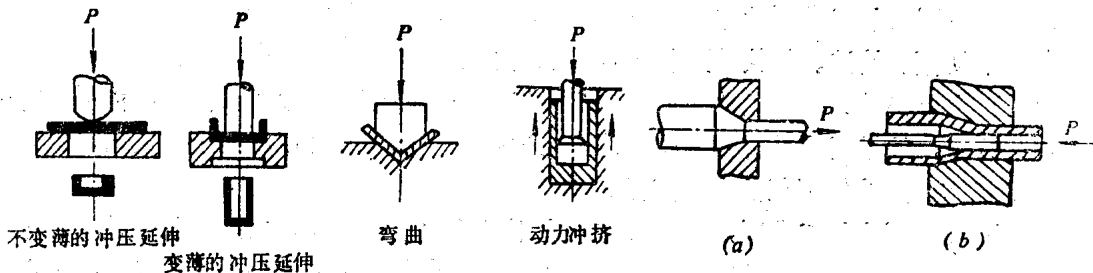


图 6 拉拔简图

a—拉丝简图；b—拔管简图

图 7 冷冲压的几种主要过程

薄板冲压的产品有飞机零件、弹壳、汽车外壳、零件以及各种仪器的零件及日常生活用品，如碗、盆等。

目前，除了上述几种应用较广的压力加工方法外，由于国民经济的发展需要和科学技术的不断进步，又出现了各种新型的压力加工方法，如粉末金属压力加工、爆破加工成型、振动加工以及各种压力加工方法的联合加工过程。就轧制来说，有轧挤过程（挤压和轧制的组合），它扩大了对坯料的适应性，降低了产品的缺陷；拔轧过程（拉拔和轧制的

组合)，它能生产各种断面的产品，减少轧制力；辊弯过程（轧制弯曲的组合），它可以生产各种断面的冷弯型材和管材；搓轧过程（轧制和剪切的组合），或者叫异步轧制，这种轧制可显著降低轧制力。上述各种组合轧制如图 8 所示。

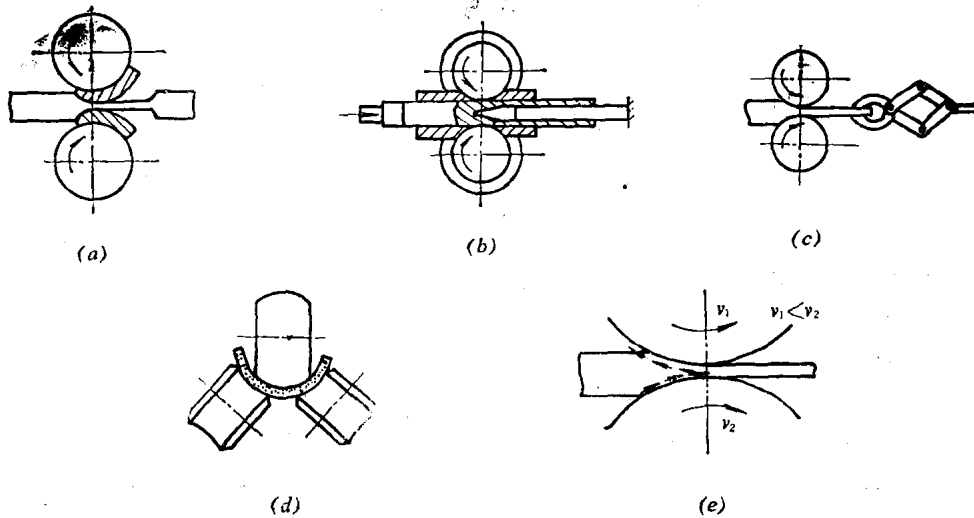


图 8 组合加工变形方式

a—锻轧；b—轧挤；c—拔轧；d—辊弯；e—搓轧

钢铁的用途十分广泛，在国民经济中起着极为重要的作用。可以说钢铁生产的水平，是衡量一个国家工业、农业、国防和科学技术四个现代化水平的重要标志。然而直接和国民经济各工业部门相关联的，则是钢材。通常在钢的总产量中，除少量采用铸造和锻压等加工方法外，约90%以上的钢都要经过轧制成材，供给国民经济中各部门的需要。当然各工业部门还需通过各种后续的加工方式进一步加工成所需要的零件。

由于金属压力加工成型的方法在技术上和经济上有独特之处，因此，与其它的金属成型方法（如切削、铸造、焊接等）相比较，它具有下述几方面的主要优点：

(1) 金属经过相应的塑性变形后，其组织、性能都得到了改善和提高，特别是对铸造组织的改善，效果更为显著。例如，铸锭通过锻造、轧制或挤压，使结构致密，组织改善，性能提高，成为较理想的金属产品。

(2) 金属压力加工成型，是金属在固态下的体积转移过程。因此在加工过程中除工艺原因外，加工过程的本身是不会造成废料的，这是和切削加工成型的本质区别，所以压力加工成型是一种无屑加工，它可以获得较高的成材率。

(3) 金属压力加工成型的方法有很高的生产率。这一点对于金属的轧制、拉丝、挤压等工艺来说，是非常明显的。

(4) 随着科学技术的发展，近年来，在锻造方面采用先进技术和设备，已使不少的加工产品达到少切削或无切削的要求，而且具有较高的精度。例如，精密锻造的伞齿轮，其齿形部分的精度可达到 8 级，光洁度达 $\nabla 6 \sim \nabla 7$ ，可以不经切削加工而直接使用。

(5) 先进的科学与技术的应用和新的加工变形过程的出现，为国民经济的各个部门和四化建设的需要提供了越来越多的产品规格。

由此可见，金属压力加工在整个国民经济中占有十分重要的地位。

金属压力加工的成型方法很多，虽然它们都有各自的成型特点，但在塑性变形的物理方面和力学方面却有着共同的基础。例如，加工成型都是以金属具有塑性为前提，都需要外力的作用，成型时都不可避免地存在外摩擦的影响，都遵循着共同的金属学和力学基础等。

金属压力加工原理是研究和探讨在塑性加工过程中的共同规律和其个别的特点，以便在生产实践中合理地利用这些规律，有效地指导生产实践并提高生产率。

具体来讲，学习这门学科可以通过对各种加工过程及其变形条件的分析，达到以下目标：

(1) 掌握各种因素在加工过程中对金属塑性的影响，进而充分利用有利的因素与条件，降低生产中的能耗，提高生产率。

(2) 掌握在各种加工条件下，对金属组织和性能的影响规律，以便有效地控制加工条件，获得所需要的产品组织与性能，提高产品的质量。

(3) 掌握在轧制过程和其它加工过程中，塑性变形的现象与变形规律的内在联系同力能参数的关系及其必要的工程计算，为轧钢工艺和孔型设计及其它加工形式，提供必要的理论依据而创造新的生产工艺，并在此基础上，掌握由塑性变形提供的力能参数，做到合理选择与充分利用设备的能力。

第一章 塑性变形的力学基础

各种金属压力加工的成型过程都是在一定的变形力学状态以及一定的变形温度、变形速度和变形程度下进行的。实践证明，各种条件或因素的不同，加工过程中的变形力学条件及金属某些特征等也随之发生变化。由于力是金属加工成型中的必要条件和基础，因此对力的基本概念的讨论具有重要的意义。

第一节 力和变形

金属的塑性变形是在外力的作用下产生的。作用在变形物体上的外力有两种：表面力和体积力（或称质量力）。

表面力是作用在变形物体表面上的力，有时也叫接触力。在金属压力加工中，表面力是由变形工具对变形物体的作用而产生的。它可以是集中力，但在通常情况下是分布力。金属的塑性变形通常也是由这种表面力所引起的。

体积力是作用于变形物体上每个质点的力，如重力、惯性力等。惯性力产生于变形过程中质点流动速度发生变化的缘故。在金属压力加工中，体积力相对表面力的作用是很小的，可以忽略不计。因此，在压力加工中通常讲的外力，就是指表面力。

一、外力

在压力加工过程中，变形物体所承受的外力，主要有作用力和约束反力。

作用力是指压力加工设备的可动部分对变形体所作用的力，又叫主动力。如锻压时，锻锤的机械动作对变形体所施加的压力 P ，见图1-1；拉拔时，拉丝钳对变形体作用的拉力 P ，如图1-2所示；挤压时，活塞顶头对变形体的推挤压力 P ，如图1-3所示等。

作用力的大小由物体变形时所需的能量多少来决定，即取决于变形时所需要的变形功。在压力加工中的作用力，可以用仪器进行实测，也可以用理论和经验方法计算出来。用实测计算的结果来验算设备的强度和动力设备的功率。

约束反力即变形体在主动力的作用下，其运动受到工具另外组成部分反作用于变形物体上的力，它与主动力相互约束，以保证金属的变形。除此之外，金属变形时，质点的流动又会受工具表面上摩擦力的制约。这些力都称为约束反力。因此，在压力加工过程中，变形体与工具在接触表面上的约束反力有正压力和摩擦力。

正压力——沿工具与变形体接触面的法线方向阻碍金属整体移动或金属流动的力，并且指向变形体，如图1-1中之 N 和图1-2中的 P_1 。

摩擦力——沿工具与变形接触面的切线方向阻碍金属流动的力，其方向与金属质点流动方向或变形趋势相反，如图1-1中的 T 和图1-2中的 T 。

二、内力与应力

当物体在外力作用下，并且物体的运动受到阻碍时，为了平衡外力而在物体内部产生的力叫做内力。

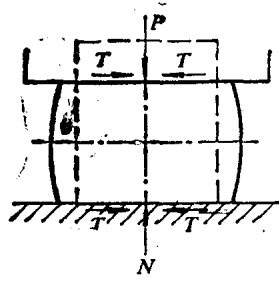


图 1-1 自由锻造

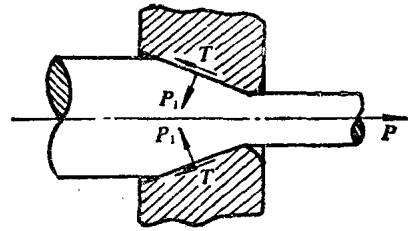


图 1-2 拉拔

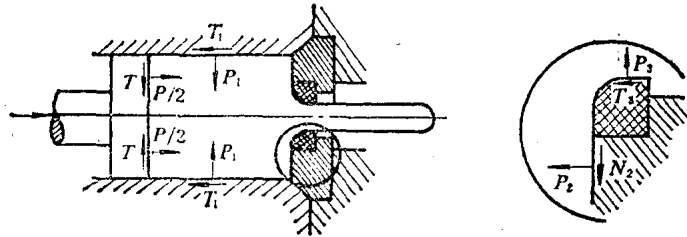


图 1-3 挤压

物体不受外力作用时，内部各原子间的吸引力与排斥力的代数和为零，各原子都处于稳定的平衡状态，此时既无外力也无内力。当物体受外力作用时，其平衡将遭破坏。例如，当物体受压时，原子间距将减小而产生了排斥力；当受拉时，原子间距将增大而产生了吸引力。排斥力和吸引力的产生，就是为了平衡外部的机械作用，力求保持原子间的稳定平衡状态而产生在物体内部的力。从这一点上来说，内力就是对变形的抗力，是用来平衡外力的，其本质就是原子间的相互作用。

另外，变形物体的整体性使各部分的变形产生相互制约，这样也将在变形体内部发生自相平衡的内力。例如某一金属块受到不均匀的加热，如图1-4所示，右边温度高，左边温度低。这样就造成了温度高的一侧膨胀伸长程度较大，而温度低的一侧膨胀伸长程度较小。但由于金属是一个整体，因此，温度高的一侧将受温度低的一侧限制，不能达到应有的膨胀伸长量而受到压缩；同样温度较低一侧将受到温度较高一侧的影响而被拉长。这种产生在金属体内互相平衡的拉、压力，也是一种内力。因此，内力就是由于各种物理及物理化学变化使物体产生不均匀变形，物体内部在平衡这种不均匀变形时产生的相互作用内力。

不均匀冷却、不均匀再结晶等等都将使变形体内产生内力。

所有的力，无论外力或内力之值都是以单位面积上所作用力来表示的。

内力的强度称为应力，或者说内力的大小是以应力来度量的。一般所说的应力，应该理解为一极小面积 ΔF 上的总内力 ΔP 与其面积 ΔF 的比值极限，其数学表达式为：

$$\sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (1-1)$$

只有当内力是均匀的作用于被研究的截面时，才可以用一点的应力大小来表示该截面

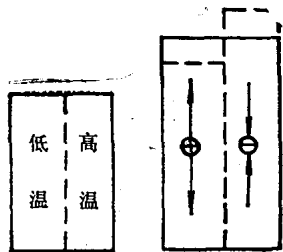


图 1-4 左右温度不均匀引起的自相平衡内力

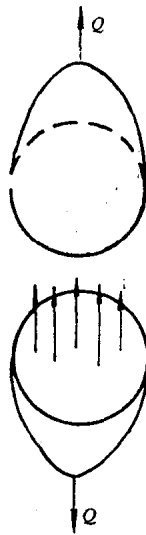


图 1-5 截面上的内力

上的应力。如果内力的分布不均匀，则不能用某点的应力表示所研究的截面上的应力，而只能用内力与该截面的比值来表示。此值被称为平均应力，即

$$\sigma_{\text{平均}} = \frac{P}{F} \quad (1-2)$$

式中 $\sigma_{\text{平均}}$ ——平均应力；

P ——总内力；

F ——内力作用的面积。

应该注意，只有当内力产生是由于平衡外力的作用时，用截面法求得的内力值才与外力是等效的。如图1-5所示，当物体被切开而移去上部时，这时下半部的截面处，可以看成外表面，因此作用在该截面处的内力，应该与下半部的外力 Q 保持平衡。这样，内力 P 就可以当成外力 Q 来处理，但绝不可以由此而混淆它们的概念。

三、变形

金属在受力状态下，若其运动受到阻碍或限制时，在金属体内产生内力的同时，其形状和尺寸也发生改变，这种尺寸的改变就称为变形。

如前所述，金属是通过原子间的作用力（吸引力和排斥力），把原子紧密结合在一起的。若使金属变形，所施加的外力必须克服其原子间的相互作用力和能。两原子间的相互作用力和能同原子距离的关系如图1-6所示。由图可知，当两个原子相距无限远时，它们相互作用的引力和斥力均为零。当把它们从无限远处移近时，在没有达到相当于几个原子大小的距离以前，引力和斥力的变化都很小；继续移近时，斥力的变化仍然很小，但引力增加较快；当更进一步靠近时，斥力就迅速增加。原子间距 $r=r_0$ 处时，引力和斥力相等，即原子间相互作用的合力为零。因为此时原子间的位能为零。由此可见，当 $r=r_0$ 时，原子间的位能最低。因此，原子间距为 r_0 的位置，是原子最稳定的位置，也称平衡位置。在理想的晶体中，原子的排列和位能曲线如图1-7所示。在 AB 线上，原子处于 A_0 、 A_1 、 A_2 等位置时最为稳定。如果 A_0 处的原子要移到 A_1 位置上去，就必须越过高度为 h 的“势垒”

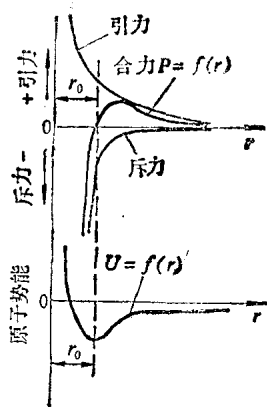


图 1-6 原子间的作用力和能同原子间距 (r) 的关系

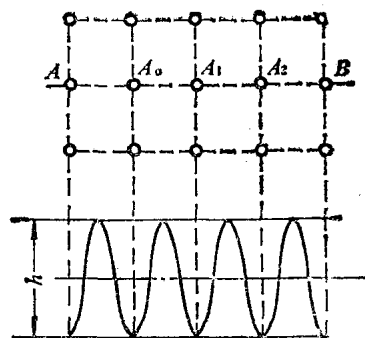


图 1-7 理想晶体中的原子排列及其位能曲线

才有可能。

由上述分析可知，只要原子离开了平衡位置处于不稳定的状态时，原子间距 $r \neq r_0$ ，即发生了几何形状的改变而具有了一定的位能。原子间距改变而导致的变形有两种情况，即弹性变形和塑性变形。

在外力的作用下，原子就要离开原来的平衡位置而处于不稳定的状态。此时，由于原子间距的改变，造成了原子间出现了相互作用的吸引力和排斥力。使偏离的原子趋向于恢复到原来的平衡位置，一旦外力去除，原子间的相互作用力又使原子恢复到原来的平衡位置，这时金属体的外形也恢复到原来的形状和尺寸，这就是弹性变形发生和消失过程。由此可知，产生弹性变形的实质，就是所施加的外力或能量还不足以使原子越过势垒。

当弹性变形继续增加，原子偏离原始的平衡位置越来越远，且偏离平衡位置的原子也越来越多，当有大量的原子多次而定向的转移到一个新的平衡位置，这时即使外力去除，原子也不能恢复到原始的位置了，这就是塑性变形。所以塑性变形的实质是外力或能量足以使原子越过势垒，或者说使金属内的一部分原子和另一部分原子产生相对移动，即从一个平衡位置转移到另一个新的平衡位置的过程。

综上所述可知，金属在发生塑性变形以前，必须先发生弹性变形，即由弹性变形过渡到塑性变形。在塑性变形过程中，必定伴随着弹性变形的存在，这就是所谓的弹-塑性共存定律。这一定律可以通过拉伸实验的曲线变化得到证实（图1-8）。当应力小于屈服极限时，为弹性变形的范围，在曲线上表现为OA段；随着应力的增加，当应力超过屈服极限就会发生塑性变形，在曲线上表现为ABC段；在曲线C点，表明塑性变形的终结，即发生断裂。当加载到B点时，则变形为OE段（OD+DE），如果此时加载停止并开始卸载，保留下来的变形是OD而不是OE，即DE随载荷的消失而消失。这种消失是变形物体的几何尺寸得到了一小部分的恢复，它会造成加工产品的几何尺寸精度超过设计要求。对于弹性变形的消失可以这样认为：金属是由多晶体组成的，其内部的原子排列方位各不相同，在外力的作用下，有的处于有利的变形方位，有的处于不利或不完全有利的方位，这样就使有的原子能够移动到新的平衡位置，有的达不到 $\frac{1}{2}$ 的原子距离，因此，在宏观变形

的某一变形瞬间，必然会有部分原子处于由一个稳定位置向另一个稳定位置过渡的不稳定状态。一旦卸载，这些处于不稳定状态的原子就会回到原来的稳定位置而表现出有小部分的弹性恢复。

在压力加工中，虽然卸载后的弹性变形恢复较塑性变形小得多，在工程计算中可忽略不计，但弹-塑共存的现象在压力加工中，则是普遍存在的。例如，拉拔和挤压后的型棒断面面积较模孔的断面大。即从模孔中出来的产品，不可能再顺利地通过该模孔；锻压后的高度较理想状态要略高。轧制过程也是如此，图1-9为轧制板材时的弹-塑共存现象。当轧制要求的厚度为 h 时，如果由此设定辊缝值，则在轧制时由于存在着工具的弹性变形 ε_1 ，板材轧后的弹性恢复 ε_2 ，这时轧出的板材厚度为 h_1 ，而不是 h ，显然 $h_1 > h$ ，并且

$$h_1 = h + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (1-3)$$

弹-塑共存规律的重要意义，就在于指导生产实践中如何减小变形时的各种弹性变形恢复，特别是对于尺寸精度要求高的产品，就更为重要。

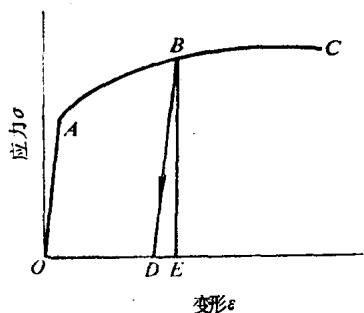


图 1-8 拉伸应力-应变曲线

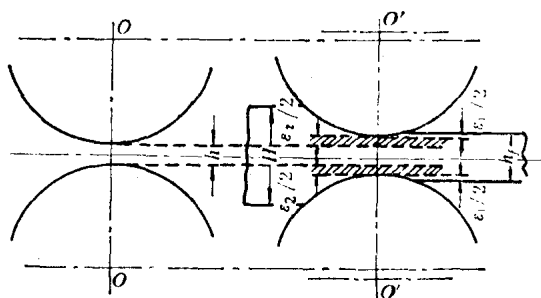


图 1-9 轧辊与轧件的弹性变形

第二节 应力状态

一、一般概念

外力的作用破坏了物体内部各原子间的稳定平衡状态，因而产生了内力和应力。所谓物体处于应力状态，就是物体内的原子被迫偏离其平衡位置的状态。

金属内部的应力状态，决定了金属内部各质点所处的状态是弹性状态、塑性状态、还是断裂状态。而一切压力加工的目的均在外力的作用下，使金属产生塑性变形，获得所需要的各种形状和尺寸的产品。因此，了解各种压力加工中金属内部的应力状态特点，对于确定物体开始产生塑性变形所需的外力，以及采用什么样的工具与加工制度，使力能的消耗最小等方面都具有重要的实际意义。

在金属压力加工的塑性变形过程中，力是从不同的方向作用于金属的，因而在金属体内部相应地产生复杂的应力状态，这就使研究和讨论的问题复杂化了。但处于应力状态的物体，其内部任何一点都处于周围其它各质点的作用之下。因此，要研究物体变形时的应力状态，就必须首先了解物体内部任意一点的应力状态，由此推断出整个变形物体的应力状态。为此可在变形物体内部某点附近取一无限小的单元六面体（可视为一点），在每个面上都作用着一个全应力，如图1-10a所示。将全应力按取定的坐标轴 \vec{x} 向进行分解，每个全应力均能分解为一个法线应力（正应力）和两个切线应力，如图1-10b所示。