



全国中等职业技术学校冶金专业教材

QUANGUO ZHONGDENG ZHIYE JISHU XUEXIAO YEJIN ZHUANYE JIAOCAI

# 轧钢原理

Z H A G A N G Y U A N L I



ZHA GANG YUAN LI  
YEJIN ZHUANYE JIAOCAI



中国劳动社会保障出版社

全国中等职业技术学校冶金专业教材

# 轧 钢 原 理

中国劳动社会保障出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

轧钢原理/人力资源和社会保障部教材办公室组织编写. —北京:中国劳动社会保障出版社, 2010

ISBN 978-7-5045-8553-0

I. ①轧… II. ①人… III. ①轧钢学-专业学校-教材 IV. ①TG33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 189411 号

**中国劳动社会保障出版社出版发行**

(北京市惠新东街1号 邮政编码:100029)

出 版 人: 张梦欣

\*

新华书店经销

北京印刷集团有限责任公司印刷二厂印刷 北京密云青云装订厂装订

787毫米×1092毫米 16开本 11.25印张 265千字

2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷

定价: 19.00 元

读者服务部电话: 010-64929211/64921644/84643933

发行部电话: 010-64961894

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话: 010-64954652

如有印装差错, 请与本社联系调换: 010-80497374

# 前 言

冶金工业是国民经济发展的重要基础工业。随着我国国民经济的高速发展,我国钢铁产量逐年增加,冶金工业现代化水平也不断提高。冶金企业对技术工人的知识水平和技能水平以及相关的职业教育和职业培训提出了更高、更新的要求。为更好地适应行业发展、满足中等职业技术学校的教学需求,我们根据原劳动和社会保障部培训就业司颁发的《冶金专业教学计划与教学大纲(2008)》,组织全国有关学校的一线教师及行业专家,编写了这套冶金专业教材。

在教材开发工作中,我们力求突出以下几个方面的特色:

第一,根据中等职业技术学校冶金专业学生就业岗位的实际需求,合理安排知识点和技能点,以“够用”“实用”为标准,摒弃“繁难偏旧”的理论知识,同时,注重工作能力的培养,满足企业对技能型人才的需求。

第二,在内容安排上,尽可能多地引入新知识、新技术、新设备和新材料等方面的内容,淘汰陈旧过时的技术,反映行业发展趋势。同时,在教材编写过程中,严格执行国家相关技术标准的要求。

第三,在结构和表达方式方面,强调由浅入深、循序渐进,使用图片、实物照片、表格等多种表现形式,更加生动、直观地讲解相关知识和技能,提高学生的学习兴趣,力求使教材做到易教易学。

本次开发的教材涉及“炼铁”“炼钢”和“轧钢”三个专业方向,包括《冶金概论》《热工常识》《冶金仪表》《炼铁工艺》《炼铁设备》《炼钢原理》《转炉炼钢工艺及设备》《连铸设备及工艺》《轧钢原理》《轧钢机械设备》《型钢生产工艺》《热轧板带钢生产工艺》《冷轧板带钢生产工艺》。

本套教材可供中等职业技术学校冶金专业使用,也可作为职业培训教材。

本套教材的编写工作得到了辽宁、河北、江苏等省人力资源和社会保障(劳动保障)厅及有关学校的大力支持,在此,我们表示诚挚的谢意。

人力资源和社会保障部教材办公室

2009年6月

# 内 容 简 介

本教材介绍了金属压力加工、金属的塑性变形、轧制的基本问题、轧制过程的建立、影响轧制过程的因素、轧制过程中的宽展、轧制过程中的前滑和后滑、轧制压力、轧制力矩、轧制时的弹塑性曲线及连轧基本理论等方面的知识。

本教材针对中等职业技术学校学生的认知特点和职业需求，在内容设置上，充分考虑了知识层次的安排，通过小栏目的设置，对学生应掌握的教学内容和有必要了解的专业知识做了明确区分。

本教材由王大海主编、李怀成副主编，李晨琦、郭智勇、耿丽霞、何卫军参加编写，王洪书同志对本书进行了文献检索和信息资料搜集整理。

《轧钢原理》参考学时

| 教学内容                 | 学时 |
|----------------------|----|
| 第一章 金属压力加工概述         | 8  |
| 第二章 金属的塑性变形          | 10 |
| 第三章 轧制的基本问题          | 4  |
| 第四章 轧制过程的建立          | 4  |
| 第五章 影响轧制过程的因素        | 4  |
| 第六章 轧制过程中的宽展         | 4  |
| 第七章 轧制过程中的前滑和后滑      | 4  |
| 第八章 轧制压力             | 6  |
| 第九章 轧制力矩             | 6  |
| 第十章 轧制时的弹塑性曲线及连轧基本理论 | 6  |
| 总 计                  | 56 |

# 目 录

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| 第一章 金属压力加工概述 .....          | ( 1 )  |
| 第一节 金属压力加工过程的实质及主要方法 .....  | ( 1 )  |
| 第二节 金属压力加工的变形力学基础 .....     | ( 4 )  |
| 第三节 金属压力加工的金属学基础 .....      | ( 11 ) |
| 第四节 塑性变形的基本定律 .....         | ( 19 ) |
| 复习思考题 .....                 | ( 22 ) |
| 第二章 金属的塑性变形 .....           | ( 24 ) |
| 第一节 弹性变形和塑性变形 .....         | ( 24 ) |
| 第二节 金属塑性加工中的摩擦与润滑 .....     | ( 27 ) |
| 第三节 金属塑性变形时应力和变形的不均匀性 ..... | ( 36 ) |
| 复习思考题 .....                 | ( 48 ) |
| 第三章 轧制的基本问题 .....           | ( 50 ) |
| 第一节 简单轧制与非简单轧制 .....        | ( 50 ) |
| 第二节 轧制变形的表示方法 .....         | ( 51 ) |
| 第三节 变形区主要参数 .....           | ( 54 ) |
| 第四节 轧制过程的三个阶段 .....         | ( 56 ) |
| 第五节 平均工作辊径与平均压下量 .....      | ( 57 ) |
| 第六节 变形速度与轧制速度 .....         | ( 59 ) |
| 复习思考题 .....                 | ( 62 ) |
| 第四章 轧制过程的建立 .....           | ( 63 ) |
| 第一节 咬入条件 .....              | ( 63 ) |
| 第二节 剩余摩擦力的产生及稳定轧制条件 .....   | ( 67 ) |
| 第三节 最大压下量的计算 .....          | ( 69 ) |
| 第四节 影响咬入的因素及改善咬入的措施 .....   | ( 72 ) |
| 复习思考题 .....                 | ( 75 ) |
| 第五章 影响轧制过程的因素 .....         | ( 77 ) |
| 第一节 影响金属本身性质的因素 .....       | ( 77 ) |
| 第二节 变形区应力状态的影响 .....        | ( 79 ) |

|                                   |                |
|-----------------------------------|----------------|
| 第三节 三种典型轧制情况 .....                | ( 84 )         |
| 复习思考题 .....                       | ( 88 )         |
| <b>第六章 轧制过程中的宽展 .....</b>         | <b>( 90 )</b>  |
| 第一节 宽展的种类和组成 .....                | ( 90 )         |
| 第二节 影响宽展的因素 .....                 | ( 95 )         |
| 第三节 孔型中轧制时的变形特点 .....             | ( 99 )         |
| 第四节 宽展的计算公式 .....                 | ( 102 )        |
| 复习思考题 .....                       | ( 104 )        |
| <b>第七章 轧制过程中的前滑和后滑 .....</b>      | <b>( 105 )</b> |
| 第一节 轧制时的前滑和后滑 .....               | ( 105 )        |
| 第二节 中性角的确定 .....                  | ( 107 )        |
| 第三节 前滑的计算公式 .....                 | ( 109 )        |
| 第四节 前滑、后滑与纵变形和横变形的关系 .....        | ( 110 )        |
| 第五节 前滑的影响因素 .....                 | ( 115 )        |
| 复习思考题 .....                       | ( 119 )        |
| <b>第八章 轧制压力 .....</b>             | <b>( 120 )</b> |
| 第一节 轧制压力的概念 .....                 | ( 120 )        |
| 第二节 接触面积的计算 .....                 | ( 121 )        |
| 第三节 计算平均单位压力 .....                | ( 124 )        |
| 第四节 影响轧制压力的因素 .....               | ( 136 )        |
| 复习思考题 .....                       | ( 141 )        |
| <b>第九章 轧制力矩 .....</b>             | <b>( 142 )</b> |
| 第一节 辊系受力分析与轧制力矩 .....             | ( 142 )        |
| 第二节 轧机传动力矩的组成 .....               | ( 146 )        |
| 第三节 各种力矩的计算 .....                 | ( 148 )        |
| 第四节 主电动机容量校核 .....                | ( 153 )        |
| 复习思考题 .....                       | ( 158 )        |
| <b>第十章 轧制时的弹塑性曲线及连轧基本理论 .....</b> | <b>( 159 )</b> |
| 第一节 轧机的弹性曲线与轧件的塑性曲线 .....         | ( 159 )        |
| 第二节 轧制时的弹塑性曲线及实际意义 .....          | ( 163 )        |
| 第三节 连轧的基本理论 .....                 | ( 167 )        |
| 复习思考题 .....                       | ( 172 )        |

## 第一章

# 金属压力加工概述

## 第一节 金属压力加工过程的实质及主要方法

### 你知道吗?

金属压力加工产品在国民经济中应用极为广泛。常用的一般钢材、钢轨、钢梁、钢筋、滚珠轴承、汽车外壳、大炮炮筒等都必须用压力加工的方法来进行生产。通常冶炼出来的钢，除极少量用铸造方法制成零件外，绝大部分是经过压力加工制成产品的，而且90%以上都要经过轧制，以轧制钢材供给国民经济各个部门。

### 一、金属压力加工的概念

金属压力加工是指利用金属能够产生永久变形的能力，使其在外力作用下产生塑性变形，改变金属的形状、尺寸和性能而获得所要求的产品的一种金属加工技术。其实质是金属的塑性加工。

金属压力加工的优点如下：

1. 因无废屑，可以节约大量的金属，成材率较高。
2. 可改善金属的内部组织和与之相关联的性能。
3. 生产率高，能量消耗少，成本低，适用于大量生产。

### 二、金属压力加工的主要方法

金属压力加工的主要方法有轧制、锻造、冲压、拉拔和挤压等，其中轧制是金属压力加工中使用最广泛的方法。

轧制是指依靠旋转的轧辊与金属间的接触和摩擦，将金属咬入轧辊缝隙间，并在轧辊的压力作用下使坯料受到压缩，使其断面减小，形状改变，长度增加，而且也使金属获得一定组织和性能的加工方法。

轧制的方式目前大致分为纵轧、斜轧和横轧三种。各种轧制方式的比较见表1—1。

其他几种常见压力加工方式的特征和主要用途见表1—2。

表 1—1

轧制方式的比较

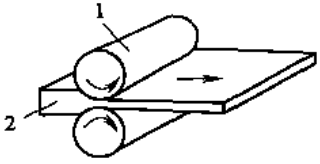
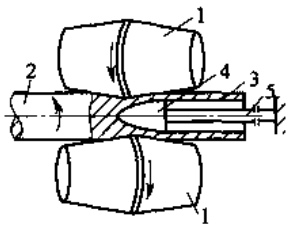
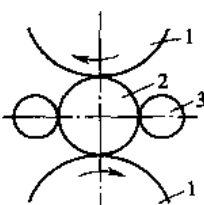
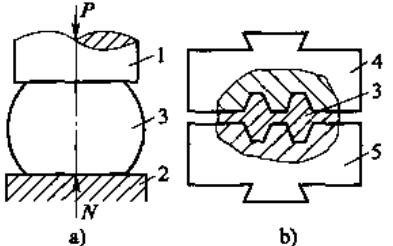
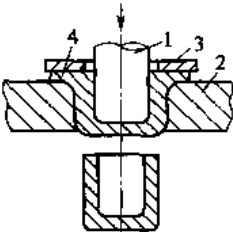
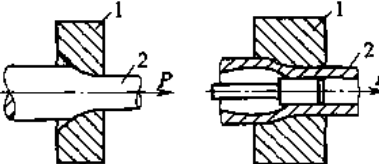
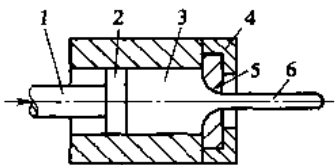
| 轧制方式 | 图例                                                                                                                               | 特征                                                                                               | 主要用途                    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 纵轧   |  <p>1—轧辊 2—轧件</p>                               | 金属在相互平行且旋转方向相反的轧辊缝隙间进行塑性变形, 而金属的行进方向与轧辊轴线垂直。使金属厚度减小, 而长度、宽度增大, 其中长度增大最为显著                        | 应用最为广泛, 如各种型材、板带材等都该法生产 |
| 斜轧   |  <p>二辊斜轧简图<br/>1—轧辊 2—坯料 3—毛管<br/>4—顶头 5—顶杆</p> | 金属在同向旋转且中心线相互成一定角度的轧辊缝隙间进行塑性变形。金属沿轧辊交角的中心线方向进入轧辊, 金属在变形过程中除了绕其轴线旋转外, 还有沿其轴线的前进运动。即轧件做既旋转又前进的螺旋运动 | 常用于无缝钢管的斜轧穿孔及变断面型材的轧制   |
| 横轧   |  <p>1—轧辊 2—轧件 3—支撑辊</p>                        | 金属在同向旋转且中心线相互平行的轧辊缝隙间进行塑性变形。在横轧中金属轴线与轧辊轴线平行, 金属只有绕其自身轴线旋转的运动, 故仅在横向受到加工                          | 用于齿轮、车轮和各种轴等回转体工件的轧制    |

表 1—2

其他常见压力加工方式的特征和主要用途

| 加工方式 | 图例                                                                                                                                          | 特征                                            | 主要用途                                 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 锻造   |  <p>a) 自由锻造 b) 模型锻造<br/>1—锤头 2—砧座 3—锻件<br/>4—上模 5—下模</p> | 用锻锤的往复冲击力或压力机的压力使金属进行塑性变形的过程。锻造可分为自由锻造和模型锻造两种 | 广泛用于各工业部门, 锻造成品包括各种各样的零件, 如曲轴、连杆、叶轮等 |

续表

| 加工方式 | 图例                                                                                                                             | 特征                                                     | 主要用途                               |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 冲压   |  <p>1—冲头 2—模具<br/>3—压边圈 4—工件</p>              | 一般用薄的板料冲压成所需形状的零件。用这种方法可以生产有底的薄壁空心制品                   | 用于生产子弹壳, 各种仪表器件, 器皿及日常生活用的锅、碗、盆、勺等 |
| 拉拔   |  <p>1—模具 2—工件</p>                             | 拉拔是指金属通过固定的、具有一定形状的模孔中拉拔出来, 从而使金属断面缩小、长度增加的一种加工方法      | 拉拔包括拉丝和将中空坯通过模孔拔管两种基本加工方式          |
| 挤压   |  <p>1—挤压棒 2—挤压垫 3—坯料<br/>4—模座 5—模具 6—工件</p> | 挤压的实质是将金属放入挤压机的挤压筒内, 一端施加压力迫使金属从模孔中挤出, 从而得到所需形状制品的加工方法 | 挤压多用于有色金属的加工, 近年也应用于钢及其合金(黑色金属)的加工 |

## ■ 你知道吗?

目前, 除了上述几种应用较广泛的压力加工方法外, 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、爆破加工成形、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, 目前已成功地研究出与其他基本变形方式的组合过程, 例如, 锻造和轧制组合的锻轧过程, 可生产各种变断面零件, 从而扩大轧制品种, 提高锻造加工效率; 挤压和轧制组合的挤轧过程, 它扩大了对坯料的适应性, 降低了产品的缺陷; 拉拔和轧制组合的拔轧过程, 它能生产各种断面的产品, 减小轧制压力; 轧制和弯曲组合的辊弯过程, 它可以生产各种断面的冷弯型材和管材; 轧制和剪切组合的搓轧过程, 或者叫异步轧制, 因上、下工作轧辊线速度不等而造成上、下辊面对轧件摩擦力方向相反的搓轧条件, 这种轧制可显著降低轧制压力。上述各种组合加工变形方式如图 1—1 所示。

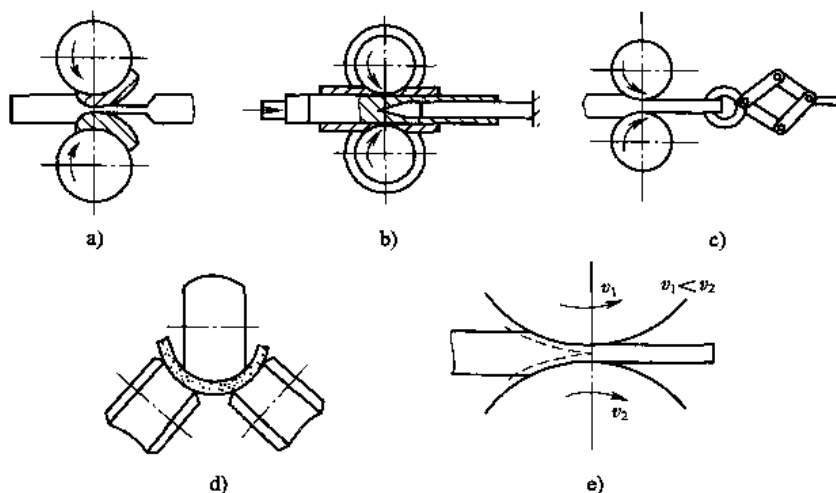


图 1—1 组合加工变形方式

a) 锻轧 b) 挤轧 c) 拔轧 d) 辊弯 e) 搓轧

## 第二节 金属压力加工的变形力学基础

### 一、塑性加工时所受的力

为了使金属产生塑性变形，必须施加一定的外力。如果在外力作用下物体的运动受到阻碍，则使物体内产生内力而发生变形。如前述锻造过程，锻锤给金属施加冲击力时，由于受到砧座的阻碍，在金属内产生内力而使金属产生塑性变形。

#### 1. 外力

在压力加工过程中，被加工物体（金属）所受到的表面外力（忽略重力和惯性力）有以下三种：

##### (1) 作用力

把塑性加工设备可动工具部分对变形金属所作用的力称为作用力或主动力。如图 1—2 所示为锻造简图，锻造时锤头下落作用于金属的力  $P$  称为作用力。

##### (2) 约束反力

约束反力是指沿工具和工件接触表面法线方向阻碍工件整体移动或金属流动的力，其方向总是垂直于工件表面而指向工件，如图 1—2 中的  $N$ 。

##### (3) 摩擦力

摩擦力是指沿工具和工件接触表面切线方向阻碍金属流动的力，其方向与接触表面平行，并与金属质点流动方向和流动趋势方向相反，如图 1—2 中的  $T$ 。

摩擦力对金属产生塑性变形既能起阻碍作用（如锻粗时的摩擦力），又能起有效作用，如轧制时金属靠摩擦力被咬入辊缝，如图 1—3 所示。

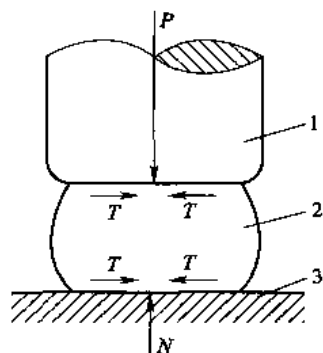


图 1—2 锻造简图

1—锤头 2—锻件 3—砧座

## 2. 内力和应力

### (1) 内力

物体内部的原子被迫离开平衡位置时,在物体内部将会产生与外力平衡的力,称为内力。使物体产生内力的原因有两个,一是为了平衡外部机械作用所产生的内力。当外力作用于金属并使金属产生变形时,则在金属内一定会产生与作用力、约束反力及摩擦力相互平衡的内力;二是由于物理或物理—化学过程所产生的相互平衡的内力。在生产加工(轧制)过程中,由于不均匀变形、不均匀加热或冷却(物理过程)以及金属内的相变(物理—化学过程)等都可以促使金属内部产生内力。例如,一块金属受到不均匀加热时,如图1—4所示,右边温度高,左边温度低,于是必然引起不均匀膨胀,即右边将变长。但是由于金属的整体性,这样右半部分的伸长将受到左半部分一定的限制,而左边也会受到右边的影响而伸长一些。因此右边受到一压缩内力的作用,而左边受到一拉伸内力的作用,这两部分内力在金属内部互相平衡。如图1—4所示为加热温度不均匀引起的自相平衡内力。

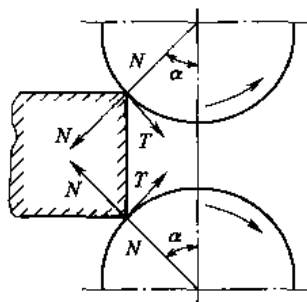


图1—3 轧件受摩擦力作用

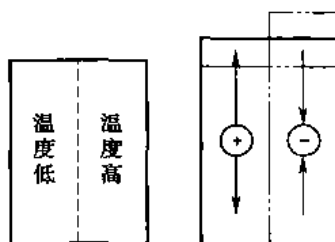


图1—4 加热温度不均匀引起的自相平衡内力

### (2) 应力

单位面积上产生的内力称为应力。即应力是内力大小的度量,当所研究的截面上应力均匀分布时,应力为内力与该截面积的比值,即:

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

式中  $F$ ——物体的截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$P$ ——作用于该截面的内力,  $\text{N}$ 。

注意当应力在截面上分布不均匀时,上式的计算结果为平均应力。

应力的单位一般用  $\text{MPa}$  ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) 表示,  $1 \text{ MPa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa}$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ )。

一般情况下,作用于任意截面的总应力  $S$  往往与该截面成任意角度,为便于分析和研究,通常可将其分解为垂直于截面  $F$  的法向应力  $\sigma_x$  以及平行于截面  $F$  的切向应力  $\tau_x$  和  $\tau_y$ ,如图1—5所示。

在压力加工原理中,为了便于使用,常常通过选取适当的坐标轴(见图1—6),使沿此轴方向所取的截面上只有法向应力,而没有切向应力作用。如此,只有法向应力而没有切向应力的截面( $F$ ,  $Q$ ,  $V$ )称为主平面,作用在主平面上的法向应力称为主应力,按代数值从大到小的顺序,依次用  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  表示。如图1—6所示为主应力状态。

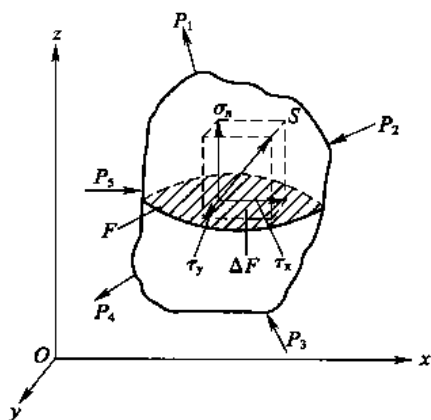


图 1—5 总应力矢量的分量

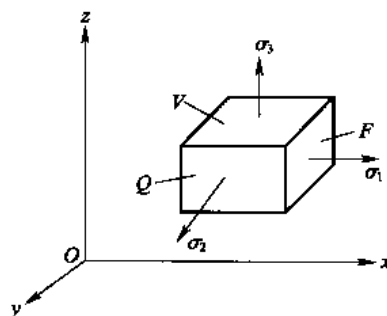


图 1—6 主应力状态

## 二、应力状态、主应力图示和主变形图示

### 1. 应力状态

物体内某一点各个方向上应力的集合称为点的应力状态。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。而压力加工的目的是在外力的作用下使金属产生塑性变形，从而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。

变形物体内一点的应力状态可用三个主应力来表示，即通过该点的三个主平面上的应力  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  能够决定此点的应力状态。一般规定拉应力为正，压应力为负。按代数值  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

### 2. 主应力状态

#### (1) 主应力图示

主应力图示是用来表示所研究物体的某点（部分）三个主应力是否存在，以及主应力方向如何的简明立方体图解，如图 1—7 所示。显然，如果变形物体各点的应力状态相同，则这时点的应力图示就可以表示整个变形物体的应力状态。这样的应力状态图示可以简单而清晰地描述物体变形时所承受的应力状态形式。主应力图示很重要，首先它能定性地反映出该压力加工过程所需单位变形力的大小；其次，也能定性地说明工件在破坏前所能产生的塑性变形程度，即塑性大小。

大量的实践证明，主应力图示中的压应力个数越多，变形抗力越大，但塑性越好；拉应力个数多，变形抗力也高，但金属的塑性最差，容易产生脆性断裂；拉应力和压应力同时存在的应力状态变形抗力较低，而塑性处于中等。例如，挤压时为显著的三向压应力状态；而拉拔时为一向拉应力状态，两向压应力状态，所以前者的塑性比后者高，但单位变形抗力比后者大得多。

#### (2) 主应力状态分类

压力加工中可能的九种应力状态如图 1—7 所示。

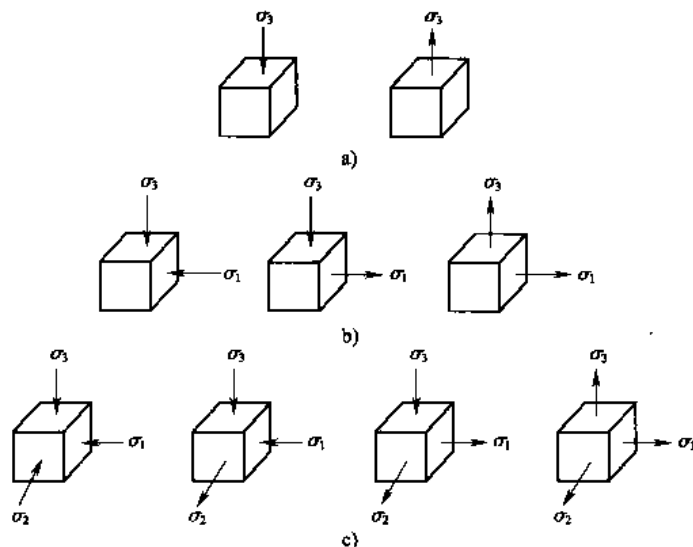


图 1—7 应力状态

a) 线应力状态 b) 面应力状态 c) 体应力状态

其中上面两种为线应力状态，即只有一个主应力不为零的应力状态。一种为压缩，一种为拉伸（如钢材拉伸矫直时的应力状态）。中间三种为面应力状态，即有两个主应力不为零的应力状态。其中第一种（两向压）最有利于塑性变形；第三种（两向拉）最不利于塑性变形；第二种居中。下面四种为体应力状态，即三个主应力均不为零的应力状态统称为体应力状态。金属压力加工中最常见的是体应力状态。

如图 1—8 所示的平锤头锻造、模孔挤压、拉拔、平辊轧制、带张力轧制带钢等都属于体应力状态。平辊轧制时是三向压应力状态， $\sigma_1$  主要由阻碍金属纵向流动的摩擦力引起， $\sigma_2$  主要由阻碍金属横向流动的摩擦力引起， $\sigma_3$  主要由轧制压力引起。张力轧制时，轧制方向（纵向）较大的张力克服了摩擦力的影响，使变形区内纵向主应力为拉应力  $\sigma_1$ 。体应力状态分析比较见表 1—3。

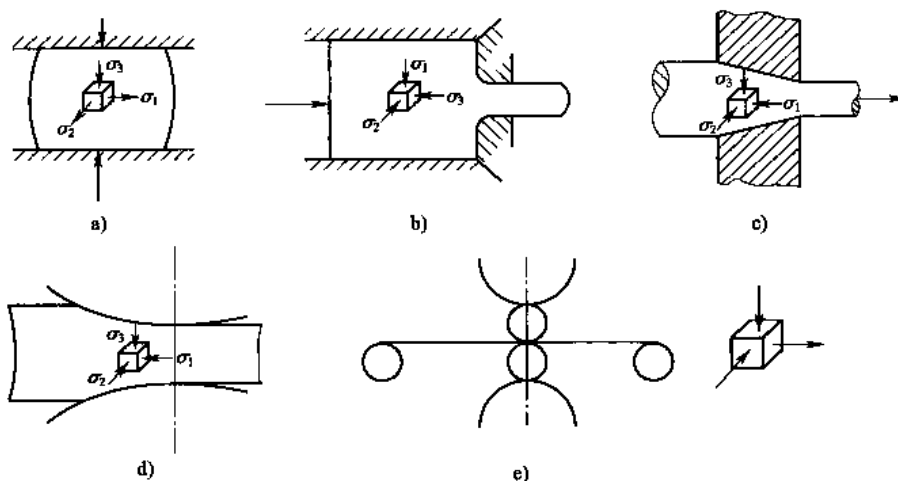
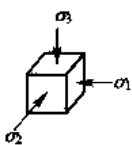
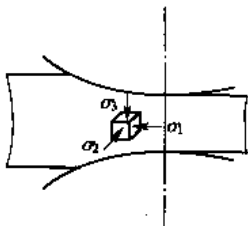
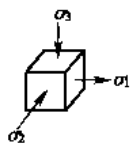
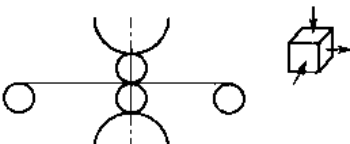
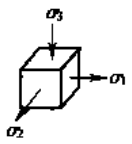
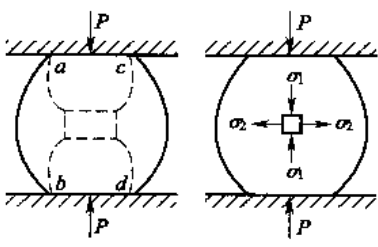
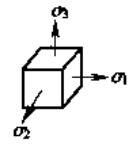
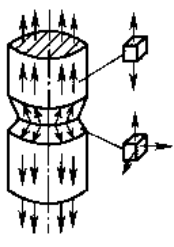


图 1—8 实际加工过程中的应力状态

a) 平锤头锻造 b) 模孔挤压 c) 拉拔 d) 平辊轧制 e) 带张力轧制带钢

表 1—3

体应力状态分析及比较

| 类别      | 主应力图示                                                                               | 重要应用图例                                                                              | 简要说明                                                                                           |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 三向压缩    |    |    | 平辊轧制时, 是三向压应力状态, $\sigma_3$ 主要由轧制压力引起 (代数值最小, 绝对值最大); $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 分别由纵向摩擦力和横向摩擦力引起 |
| 两向压、一向拉 |    |    | 张力轧制时, 轧制方向 (纵向) 较大的张力克服了摩擦力的影响, 使变形区内纵向主应力为拉应力 $\sigma_1$                                     |
| 两向拉、一向压 |   |   | 旋转锻压圆坯时, 如果坯料高度尺寸较大, 如图所示, 因表面变形, 而在中心部分引起沿径向的附加拉应力, 即中心部分为两向拉、一向压的主应力状态图示, 容易引起中心疏松或撕裂        |
| 三向拉伸    |  |  | 做拉伸试验时, 开始阶段是单向拉伸主应力图示, 当出现缩颈后, 由于不均匀变形, 在缩颈部分变为三向拉应力主应力图示                                     |

### (3) 影响应力状态、主应力图示的因素

1) 外摩擦的影响。众所周知, 理想的光滑、无摩擦的情况是不存在的。压力加工过程中, 工件和工具接触表面间产生摩擦力是不可忽略的。由于摩擦力的作用往往会改变金属内部的应力状态, 如镦粗时, 工件与工具接触表面在光滑、无摩擦的条件下, 其应力为单向压应力状态, 金属将均匀变形 (实际不可能)。事实上因摩擦力的存在, 金属内部应力状态为三向压应力状态。摩擦力的作用可由圆柱体镦粗后变为“单鼓形”得到证明。如图 1—9 所示为摩擦力对应力图示的影响。

2) 变形物体形状的影响。做拉伸试验时, 开始阶段是单向拉伸主应力图示, 当出现缩颈后, 在缩颈部分变为三向拉应力主应力图示, 如图 1—10 所示。

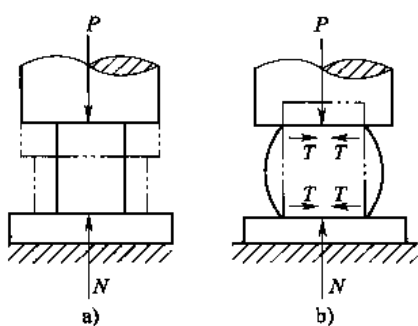


图 1—9 摩擦力对应力图示的影响

a) 无摩擦时 b) 有摩擦时

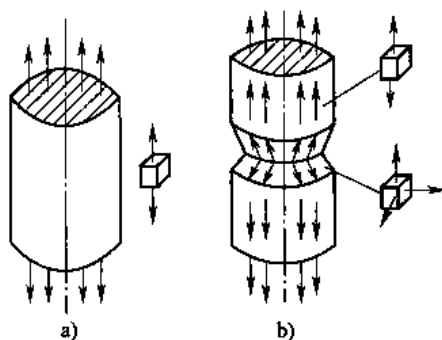


图 1—10 拉伸试验时应力状态

a) 出现缩颈前 b) 出现缩颈后

3) 工具形状的影响。当用凸形工具压缩金属时，由于作用力方向改变，所以主应力状态图示相应地也随之改变，如图 1—11 所示。当摩擦力的水平分力  $T_x$  大于作用力的水平分力  $P_x$  时，则为三向压应力状态；当  $T_x < P_x$  时，为两向压应力、一向拉应力状态；当  $T_x = P_x$  时，为两向压应力状态。

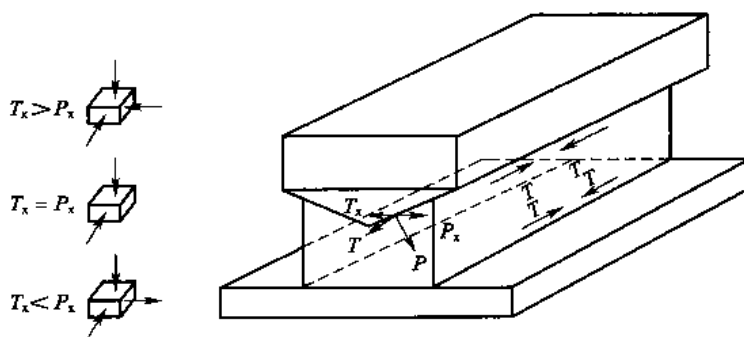


图 1—11 凸形工具对主应力图示的影响

4) 不均匀变形的影响。由于某种原因产生了不均匀变形时，也能引起主应力状态图示的变化，如图 1—12 所示。用凸形轧辊轧制板材时，由于中部变形大，两边缘变形小，金属为保证其完整性，在其内部产生了相互平衡的内力，此时中部为三向压应力状态，而两边可能为两向压应力、一向拉应力状态。

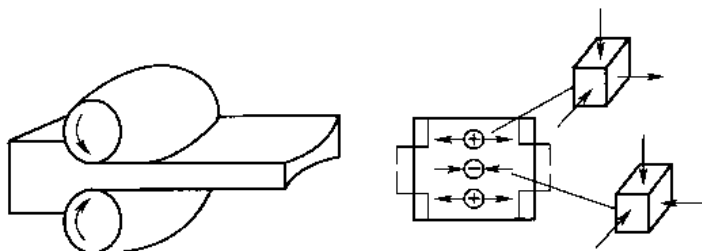


图 1—12 不均匀变形对主应力状态图示的影响

### 3. 主变形

#### (1) 主变形图示

主变形是指在主应力方向所产生的变形。

为了定性地说明金属在变形区内的变形情况，常采用主变形图示。所谓主变形图示，就是用来表示三个主变形是否存在，以及是拉伸还是压缩（拉伸时箭头向外指，压缩时箭头向里指）的简明立方体示意图，如图 1—13 所示。

## (2) 可能的变形图示

在金属的塑性变形过程中，由于受体积不变条件的限制，可能的主变形图示只有三种，可分别用符号  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  表示，如图 1—13 所示。 $D_1$  为物体尺寸沿一个轴向被压缩，其余两个轴向伸长，如有宽展情况的轧制。 $D_2$  为物体尺寸沿一个轴向缩短，另一个轴向伸长，而第三个方向保持不变，这种情况又称为平面变形图示，如宽度较大的板带轧制或轧件宽度与孔型宽度相等时的轧制等，轧制时的变形为轧件高度方向的压缩与长度方向的延伸，沿轧件宽度方向的变形几乎为零。 $D_3$  为物体尺寸沿两个轴向缩短，沿第三个轴向伸长，如挤压和拉拔等。

主变形图示是很重要的，它可以直接反映金属塑性的好坏和加工后金属内部组织结构的变化。最容易发挥金属塑性的是具有两个方向压缩变形的主变形图示  $D_3$ ，而最不利于发挥金属塑性的则是主变形图示  $D_1$ 。主变形图示不同，则加工后金属内部的组织结构也是不同的。如果在有两个主轴方向的压缩变形情况下，金属内所存在的各种弱点（如脆性杂质等）只有在一个延伸方向才能暴露，因而降低了弱点对塑性的危害程度；而对于有两个方向的延伸变形来说，就有两个方向暴露了其弱点，因而就增加了弱点对塑性变形的危害程度。主变形对夹杂物形状的影响如图 1—14 所示，若金属在加工前内部含有夹杂缺陷等，如果采用轧制或锻造压缩变形，主变形图示为  $D_1$ ，杂质在加工后的变形如图 1—14c 所示。如果采用挤压加工方法，主变形图示为  $D_3$ ，则加工后杂质的变形如图 1—14b 所示。显然，主变形图示为  $D_1$  的加工方法比主变形图示为  $D_3$  的加工方法对降低金属材料的强度和塑性的影响要大些。因此，在生产实践中，往往借助于主变形图示来判断金属的组织性能的变化情况。可能的主变形图示分析及比较见表 1—4。

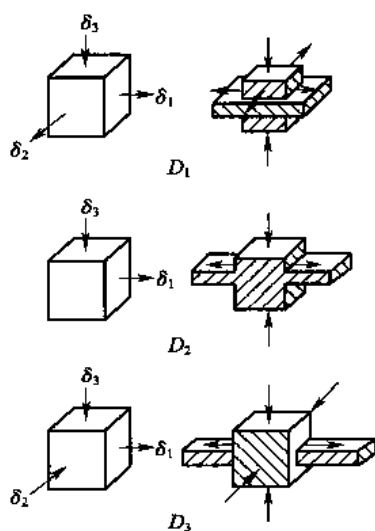


图 1—13 主变形图示

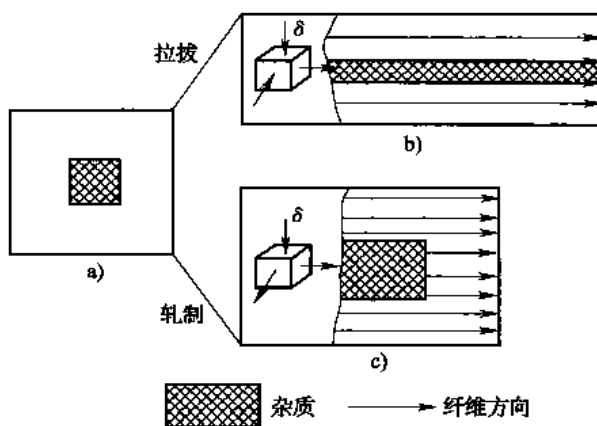


图 1—14 主变形对夹杂物形状的影响