

金
属
压
力
加
工
概
论

高等学校教学用书

金属压力加工概论

冶金工业出版社

1980

高等学校教学用书

金属压力加工概论

东北工学院 李生智 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属压力加工概论

东北工学院 李生智 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京市灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 $11\frac{1}{2}$ 字数 269千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷

印数00,001~7,000册

统一书号: 15062·4202 定价1.25元

前 言

《金属压力加工概论》一书是1982年冶金部教材工作会议上确定编写的。其内容以钢铁压力加工为主，书中着重阐述金属压力加工的基本原理(突出轧制原理)，轧钢生产工艺(重点是型钢、板带钢及钢管生产工艺)；简要地介绍金属压力加工的其它方法，以及产品标准和技术经济指标等。本书为高等学校非金属压力加工专业学习金属压力加工课的教学用书，适用于冶金企业管理、热能、钢铁冶金、金属材料、机械制造等专业师生阅读，也可供有关科技人员和管理干部参考。

本书由东北工学院李生智同志任主编。参加编写的有东北工学院解春蓉(第二、三、四章)、成友义(第六、八章)、李生智(第一、五、七、九、十章)等同志。全书由北京钢铁学院程榕南同志审校。

由于编者水平有限和时间仓促，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

一九八三年五月

目 录

第一章	金属的成型及金属压力加工基本知识	1
第一节	金属和金属的成型方法	1
第二节	金属压力加工过程的实质及主要方法	2
第三节	金属压力加工在国民经济中的作用及其发展	4
第二章	金属压力加工的变形力学基础	7
第一节	外力、内力和应力	7
第二节	应力状态和主应力图示	8
第三节	主变形和主变形图示	10
第四节	弹性变形和塑性变形	13
第五节	塑性变形的不均匀性	14
第三章	金属压力加工的金属学基础	20
第一节	金属的塑性变形机构	20
第二节	加工过程中的硬化和软化	23
第三节	金属的冷变形和热变形	26
第四节	金属的塑性	27
第四章	轧制理论基础	31
第一节	纵轧时变形区和变形的表示方法	31
第二节	纵轧时轧辊咬入轧件的条件	34
第三节	纵轧时的轧制压力和传动力矩	42
第四节	斜轧时的孔腔形成	48
第五节	斜轧穿孔过程轧件运动学特点	50
第五章	轧钢生产工艺的基本问题	52
第一节	轧制钢材的品种、用途和产量	52
第二节	轧钢机	55
第三节	轧钢生产系统及工艺流程	60
第四节	原料准备及加热	64
第五节	轧制制度的确定	67
第六章	钢坯和型、线材生产	69
第一节	钢坯生产	69
第二节	型钢生产	77
第三节	线材生产	88
第七章	板带钢生产	93
第一节	板带钢生产的一般概念	93
第二节	热轧厚板带钢(中厚板)生产	96
第三节	热轧薄板带钢生产	103
第四节	冷轧板带钢生产	110
第八章	钢管生产	120
第一节	钢管生产的一般概念	120
第二节	自动轧管机组的工艺及设备	124

第三节	热轧无缝钢管的其它生产方法	136
第四节	冷轧无缝钢管生产简介	141
第五节	焊接钢管生产	143
第九章	金属压力加工的其它方法	148
第一节	锻造生产的应用范围、特点及其基本方法	148
第二节	冲压生产的应用范围、特点及其基本方法	149
第三节	拉拔生产的应用范围、特点及其基本方法	152
第四节	挤压生产的应用范围、特点及其基本方法	153
第十章	金属压力加工产品标准和技术经济指标	155
第一节	金属压力加工产品标准和技术要求	155
第二节	各项技术经济指标	161
第三节	提高轧机产量、改善产品质量和降低产品成本	168
附 录		171
一、	金属元素分类	171
二、	钢铁产品名称及符号	172
三、	铁、铸钢产品牌号表示方法举例	173
四、	有色金属与合金名称及其汉语拼音字母的代号	174
五、	有色金属与合金产品状态、表面特性及其汉语拼音字母的代号	174
六、	有色金属及合金加工、铸造产品牌号表示方法举例	175

第一章 金属的成型及金属压力加工基本知识

第一节 金属和金属的成型方法

在自然界，金属一般是以氧化物、硫化物、碳酸盐等化合物的形式出现，也有以金属状态出现的，如金、铂等贵金属和铜，但数量极少。人们将矿石开采出来，通过冶金提取金属，再行加工使用。

众所周知，金属在常温下是固态结晶体(但也有例外，如水银)，它除具有一定的形状外，还有坚硬性、延展性和特殊的光泽，是热、电的良导体。人们正是利用金属加工后的各种形状和各种性能，来满足国民经济各个部门的需要。

把钢锭或连铸坯加工成各种形状的钢材，则需经过成型的过程。要得到所需的零部件或实用的制品，还要经过再成型的过程。

金属成型方法归纳起来有以下几种：

1. 减少质量的成型方法

即由大质量的金属上面去除一部分质量而获得一定形状及尺寸的工件。属于这种方法的有：车、刨、铣、磨、钻等金属切削加工；把金属局部去掉的冲裁与剪切、气割与电切；把金属制品放在酸或碱的溶液中蚀刻成花纹等蚀刻加工。

其优点是能得到尺寸精确，表面光洁，形状复杂的产品；缺点是原料消耗多，能量消耗大，成本高、生产率较低，对金属结构和性质没有改善。

2. 增加质量的成型方法

即由小质量的金属逐渐积累成大质量的产品。属于这种方法的有铸造，电解沉积，焊接与铆接，烧结与胶结等。

其优点在于能获得形状更为复杂的产品，成型过程中除技术因素外没有产生废品的条件，原料消耗少，故较为经济；缺点是机械性能较低，且存在难以消除的缺陷，如铸件中存在组织及化学成分不均匀，有缩孔、砂眼、偏析及柱状结晶等缺陷。沉积法没有铸造缺陷，但沉积合金还不能广泛应用。

3. 质量保持不变的成型方法

即金属本身不分离出多余质量，也不积累增加质量的成型方法。这种方法是利用金属的塑性，对金属施加一定的外力作用使金属产生塑性变形，改变其形状和性能而获得所要求的产品。这就是所谓轧制、锻造、冲压、拉拔、挤压等金属压力加工的方法，其中轧制是金属压力加工中使用最广泛的方法。

这种方法的优点是：

1) 因为是无屑加工，故可节省金属。除工艺原因所造成的废料以外（如切头尾、氧化铁皮等），加工过程本身是不会造成废料的。

2) 金属塑性变形过程中使其内部组织以及与之相关联的物理、机械等性能得到改善。

3) 产量高，能量消耗少，成本低，适于大量生产。

该法的不足之处有：

1) 对要求形状复杂, 尺寸精确, 表面十分光洁的加工产品尚不及金属切削加工方法。但由于压力加工方法的产量高、性能好、成本低, 故对一些要求不特别高的工件有取而代之的趋势, 如齿轮和简单周期断面工件的轧制、冲压和挤压等。

2) 该法仅能用于生产具有塑性的金属, 在成本上和形状复杂程度方面远不如铸造方法。大多数压力加工方法的设备庞大, 加工薄而细和批量少的产品, 成本也较高。

4. 组合的成型方法

即上述几种成型方法的联合使用。如无铰轧制亦称液态铸轧方法, 是铸造与轧制方法的联合; 辊锻加工是轧制和锻造方法的联合。

第二节 金属压力加工过程的实质及主要方法

金属压力加工过程的实质, 在于利用金属的塑性。所谓金属压力加工, 乃是对具有塑性的金属施加外力作用使其产生塑性变形, 改变金属的形状、尺寸和性能而获得所要求的产品的一种加工方法。

金属压力加工的主要方法有: 轧制、锻造、冲压、拉拔和挤压等。

1. 轧制

轧制是金属压力加工中使用最广泛的方法。它借助于旋转的轧辊与金属接触摩擦, 将金属咬入轧辊缝隙间, 再在轧辊的压力作用下, 使金属在长、高、宽三个方向上完成塑性变形过程。简而言之, 是指金属通过旋转的轧辊缝隙进行塑性变形过程。

轧制的方式目前大致分为三种: 即纵轧、斜轧和横轧。

(1) 纵轧 即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 (图1-1)。结果使金属厚度减小, 而长度、宽度增大, 其中长度增大最为显著。

金属无论在冷状态之下还是热状态之下皆可进行轧制, 这种方法在钢材的生产中应用的最为广泛, 如各种型材、板带材都用该法生产。

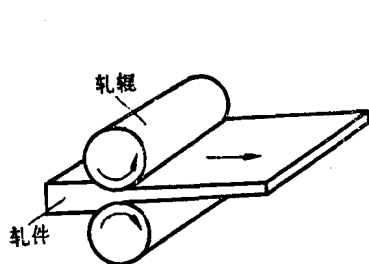


图 1-1 纵轧示意图

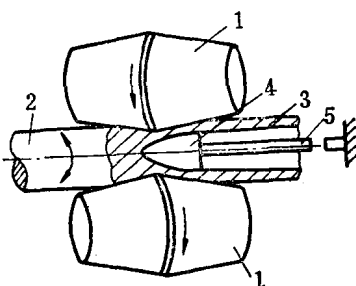


图 1-2 二辊斜轧简图
1—轧辊; 2—坯料; 3—毛管; 4—顶头; 5—顶杆

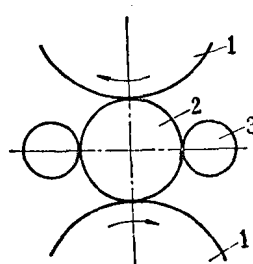


图 1-3 横轧简图
1—轧辊; 2—轧件;
3—支撑辊

(2) 斜轧 指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 (图1-2)。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运动外, 还有沿其轴线的前进运动。亦即既旋转又前进的螺旋运动。

此法常用以轧制管材及变断面型材。

(3) 横轧 指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 (图1-

3)。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。

这种方法用于生产齿轮、车轮和各种轴等回转体件。

2. 锻造

即指一般所说的“打铁”，它是一种古老的金属压力加工方法。是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（图1-4(a)）和模型锻造（图1-4(b)）两种：

所谓自由锻造，是指金属在锻造过程的流动受工具限制不严格的一种工艺方法。它是在上下往复运动的平锤头冲击下使金属产生塑性变形，而下锤头（砧座）通常是固定不动的。其特点是当金属受压缩时，造成金属向四周自由流动。自由锻造亦称无型锻造。

模型锻造，是指锻造过程中的金属流动受模具内腔轮廓或模具内壁的严格限制的一种工艺方法。

锻造加工广泛的应用在各工业部门，尤其是在造船工业、发动机制造业、机床制造业、国防及农业机械工业中均占有很重要的地位。锻造所用的原料可为金属锭或轧制坯，目前用最大钢锭重达350吨。合金钢厂一般都设置锻造车间，以提供后面加工车间的合金钢坯。锻造成品包括各种各样的零件，诸如曲轴、连杆、飞机和轮船的螺旋桨、高压锅炉的圆筒、枪身、炮管、涡轮机的叶轮等等。

3. 冲压

一般用薄的板料冲压成我们所需形状的零件（图1-5）。用这种方法可以生产有底的薄壁空心制品，其产品如子弹壳、各种仪表器件、器皿及日常生活用的锅碗盆勺等。

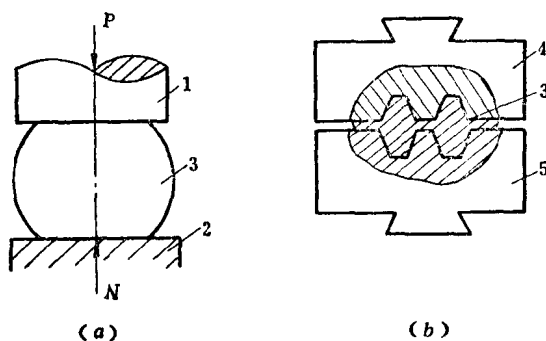


图 1-4 自由锻造 (a) 和模型锻造 (b) 简图

1—锤头；2—砧座；3—锻件；4—上模；5—下模

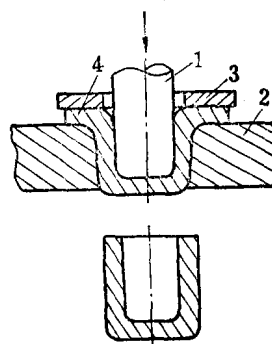


图 1-5 冲压简图

1—冲头；2—模子；3—压圈；4—产品

4. 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，而使金属断面缩小、长度增加的一种加工方法（图1-6）。

拉拔包括拉丝和拔管过程。拉丝过程是使外力作用于被加工金属的前端，金属通过一定的模孔，其断面缩小、长度增加的过程。拔管过程是将中空坯通过模孔（用芯棒或不用芯棒）在其前端施加拉力，使管径减小、管壁变薄（或加厚）的过程。

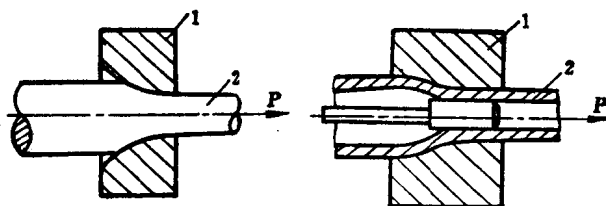


图 1-6 拉拔简图

1—模子，2—制品

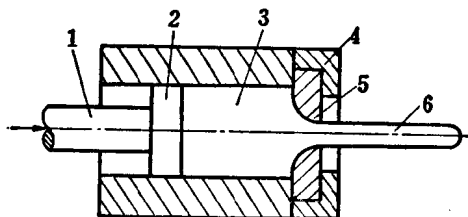


图 1-7 挤压简图

1—挤压棒；2—挤压垫；3—坯料；4—模座；5—模子；6—制品

5. 挤压

挤压的实质是将金属放入挤压机的挤压筒内，以一端施加压力迫使金属从模孔中挤出，而得到所需形状的制品的加工方法（图1-7）。

挤压多用于有色金属的加工，近年亦应用于钢及其合金（黑色金属）的加工，特别是耐热合金及低塑性金属的加工方面。其产品多为型材、管材等。

第三节 金属压力加工在国民经济中的作用及其发展

金属压力加工的产品在国民经济中应用极为广泛。根据统计，在铁路运输工具中所用金属压力加工产品占其金属制品的96%，在汽车和拖拉机制造工业中约占95%，在农业机械工业中占80%，在航空和航天工业中占90%，在机械制造工业中占70%，基本建设约占100%。特别是由于现代科学技术的新发展，则在金属产品的种类和质量上，将提出新的更高的要求。

我们常用的一般钢材、钢轨、钢梁、钢筋、滚珠轴承、飞机机翼外壳、大炮炮筒等，都必须用压力加工的方法来进行优质、大量的生产。

工业、农业、交通运输等国民经济各个部门和国防建设，都需要钢材。建设一个较大的重工业工厂就需要多种多量的钢材，如钢筋、钢梁以及屋面板等就要用几千吨甚至上万吨。铺设一公里铁路，仅钢轨一项就要用100吨之重。制造一辆汽车，就需要三千多种不同规格的钢材。一艘万吨轮船，要用近6000吨钢材。制造一门炮和一杆枪，就需要一百多钢种和一千多形状不同、尺寸不等的钢材。

通常冶炼出来的钢，除为量很少的钢是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，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。某些个别钢材虽非直接由轧钢车间生产，但基本上都要由轧钢车间供料。由此可见，在现代钢铁企业中，作为使钢成材的最后一个生产环节的轧钢生产，在整个国民经济中占据着异常重

要的地位，对促进整个生产的发展起着十分重大的作用。

金属压力加工工业的发展是很快的。目前除了轧制、锻造、冲压、拉拔、挤压等几种普遍应用的压力加工方法外，由于国民经济一日千里的发展和科学技术日新月异的进步，则不断涌现出各种新的压力加工方法，如爆炸成型、液态铸轧、粉末加工、液态冲压及引拔、振动加工，以及各种加工方法的联合等。

金属压力加工产品在各行各业中应用，面面俱到，无所不包。某些重要工业部门中金属压力加工产品比重更大，有的达到占整个金属制品的95%。

总的看来，当前金属压力加工生产是规模更加庞大、产量更加增多、种类更加齐全、控制更加精确，人们正围绕着优质、高产、低消耗的生产工艺，不断完善、不断更新，进而实现综合技术的改革和创造。

随着金属冶炼技术的发展和机电工业的进步，随着自动控制、电子计算机技术的广泛应用和整个科学技术水平的提高，金属压力加工技术也在飞跃发展。以有代表性的轧钢生产技术发展来看，其发展的主要趋势是：

1. 生产过程日趋连续化

近二十年来带钢和线材生产过程连续化更加完善，出现了连续型钢轧机和连续钢管轧机。像无头轧制这样的完全连续式作业线，已由线材生产推广应用于冷轧带钢及连续焊管生产。

2. 轧制速度不断提高

生产过程的连续化为提高作业速度创造了条件。近二十年来，各种轧机的轧制速度不断提高。目前线材轧制速度已达100米/秒，带钢冷轧速度达41.7米/秒，钢管张力减径速度达20米/秒。

3. 生产自动化日益完善

生产自动化不仅是提高轧机生产能力的重要条件，而且是提高产品质量、增加生产效率、降低消耗指标的重要前提。六十年代以后发展起来的电子计算机技术在轧钢生产中已得到日益普遍的应用，尤其在带钢连轧机上应用得最为全面。目前采用的多层计算机控制系统，不仅实现了过程控制和数字直接控制，而且使计算机技术在企业管理上也得到了应用。

4. 生产规模进入大型化

炼铁、炼钢生产能力的大幅度提高，必然促使轧钢生产规模的扩大。将六十年代和七十年代加以比较，板坯初轧机最高年产能从350万吨增至600万吨，带钢热连轧机从300万吨增至600万吨。初轧钢锭重达60~70吨，热轧板坯重达45吨，冷轧板卷重达60吨。初轧机主电机容量达 2×6700 千瓦，厚板轧机主电机容量达 2×8000 千瓦。最大轧辊重量达240吨，牌坊重达450吨，轧制压力超过万吨。厚板、薄板、大型H型钢、巨型管材等生产设备都在日趋重型化，生产规模愈来愈大。

5. 生产系统实现专业化

为了满足产量和质量的要求，往往把轧机分为大批量专业化轧机和小批量多品种轧机两类。前者为主要生产力量，采用专用设备及专用加工线进行生产，以利于提高产量、质量和降低成本。

6. 采用自动控制不断提高产品精度

计算机自动控制，大大提高了对钢材尺寸、形状和表面质量的控制精度。例如，能使厚5毫米以下的热轧宽带钢的厚度精度控制到 ± 0.025 毫米，冷轧带钢厚度精度控制到 ± 0.004 毫米，使带钢宽度公差控制到5毫米；能使盘重4.4吨的线材直径精度控制在0.1毫米以内；冷加工钢管外径偏差达 ± 0.05 毫米，壁厚偏差 ± 0.01 毫米，表面光洁度达 $\nabla 9 \sim \nabla 10$ 。

7. 发展合金钢种与控制轧制工艺以提高钢材性能

利用锰、硅、铌、钛、钒等微量合金元素生产低合金钢种，配合控制轧制或形变热处理工艺，可以显著提高钢材性能，延长使用寿命。近年来，由于工业发展的需要，对石油钻采用管、造船钢板、深冲钢板和硅钢片等生产技术的提高特别注意，所以，在这方面取得的进步也特别显著。

8. 不断扩大钢材品种规格及增加板带钢和钢管的产品比重

钢材品种规格已达数万种以上。现已能生产 1200×530 H型钢、78公斤/米重轨、直径1.6米以上的管材、宽达5米以上的钢板、薄至0.1毫米以下的镀锡板等。各种特殊断面及变断面钢材、各种镀层、复层及涂层钢材都有很大的发展。在钢材总产量中，板带钢和钢管产量所占比重不断增大，尤其是板带钢更为突出。在工业发达的国家里板带钢占钢材产量的50~65%，美国则达66%以上。

9. 连铸钢坯取代初轧钢坯

采用连铸钢坯可有提高成材率、简化工艺过程、降低生产成本等许多优点，故近年来得到较迅速的发展。一些工业发达的国家，如日本1978年连铸钢坯约占钢坯总量的46%，近年来仍在不断发展。各国对于直接采用连铸钢坯轧管及连铸钢坯穿孔的新工艺也极为重视。压力铸坯在不少中、小型企业已开始得到应用和发展。

10. 大力发展新工艺、新技术，节省能源和金属消耗，降低生产成本

近年来很多新工艺、新技术，例如钢锭的“液芯加热和轧制”、初轧坯不经再加热的“直接轧制”、薄板的“不对称轧制”及其它高效钢材轧制等，正在得到积极试验和推广。有的工厂还开始进行连铸连轧、液态铸轧，甚至进行钢锭直接轧制成品的试验。这些都可大大节省能源消耗、提高成材率。

第二章 金属压力加工的变形力学基础

第一节 外力、内力和应力

为了使金属产生塑性变形，必须施加一定的外力。如果在该力作用下物体的运动受到阻碍，则在物体内部将产生内力。

1. 外力

在压力加工过程中，被加工的物体所受到的表面外力（忽略工件重量和惯性力）有如下三种：

(1) 作用力 作用力一般是由机械运动部分作用而产生的，例如在锻造时锤头的下落部分作用于金属的力，如图2-1所示之 P 。

(2) 反作用力这是由于工具阻碍金属向某个方向运动而产生的，如图2-1中所示的 N 力。反作用力的方向总是垂直于工具表面指向物体，而不一定和作用力在同一条直线上（塑性变形体受力产生摩擦反力所致）。

(3) 摩擦力 在任何压力加工过程中，变形金属和工具之间，都存在着摩擦力，如图2-1所示的力 T 。工具对工件作用的摩擦力的方向是阻碍工件质点沿工具表面运动的方向。摩擦力对金属的塑性变形既能起阻碍作用（如上述镦粗情况），又能起有效作用（如轧制时金属靠摩擦力被咬入辊缝）。

2. 内力

由于某种原因，当物体内部的原子被迫离开平衡位置时，则在物体内部产生了与外力平衡的力，即谓之内力。当迫使原子离开平衡位置的因素（如外力）消除后，原子回到平衡位置，则内力消失。使物体产生内力的原因有二：其一是由于平衡外力而产生的，在外力作用下使物体产生变形时，则物体内部便产生了与外力平衡的内力；其二是由于物理过程及物理—化学过程的作用（如不均匀变形，不均匀加热及冷却，不均匀相变等），在物体内部产生相互平衡的内力。如金属板材不均匀加热时（图2-2）的膨胀结果，板材右半部受到左半部的压缩作用，而左半部则受到拉伸作用，拉应力与压应力在物体内部相互平衡。

3. 应力

单位面积上产生的内力称为应力。在一般情况下，当断面上的内力分布均匀时，真实的应力将为一个在数值无限小的截面积上作用的内力 ΔP 与该微小的截面积 ΔF 比值的极限，

$$\text{即} \quad \sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (2-1)$$

当应力分布均匀时，或者应力虽不均匀分布，但为了计算简便取平均值时

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (2-2)$$

式中 F ——物体的截面积；

P ——作用于该截面积的内力。

一般情况下（图2-3）作用于任意截面上的应力，往往与该截面成任意角度，可以分解

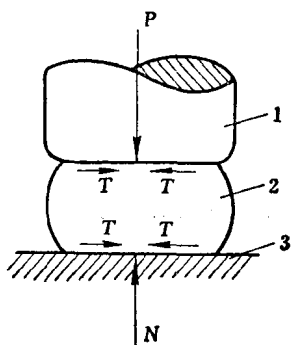


图 2-1 锻粗时金属受的外力
1—锤头；2—金属体；3—砧子

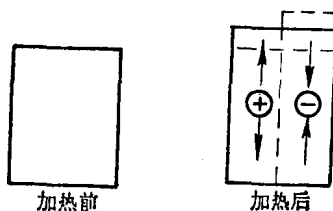


图 2-2 加热不均引起的内力

为垂直于截面 F 的法线应力 σ_n 和作用于截面 F 的切线应力 τ_x 、 τ_y 。

在压力加工原理中，为了使用方便，常常取适当的坐标轴（图2-4），使之按此轴方向所取的截面上只有法线应力作用，而没有切线应力作用（ $\tau_x = \tau_y = \tau_z = 0$ ）。通常把如此所取的坐标轴（ x 、 y 、 z ）叫做主轴，所截取的截面（ F 、 Q 、 V ）叫做主平面，作用在主平面上的法线应力（ σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ）叫做主应力。

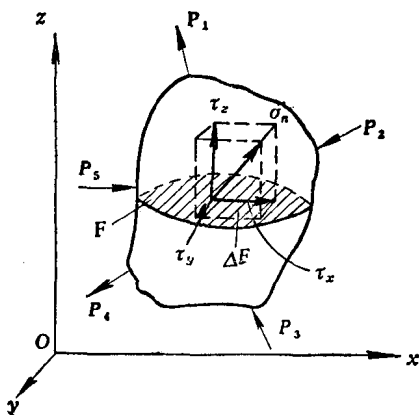


图 2-3 总应力矢量的分量

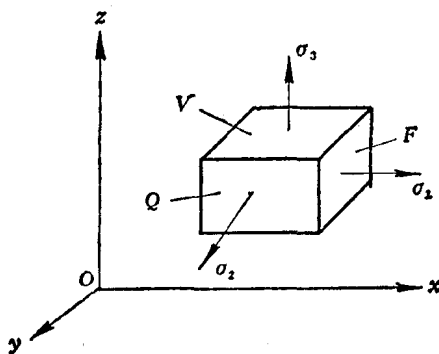


图 2-4 主应力状态

第二节 应力状态和主应力图示

1. 应力状态

当金属受外力或由于物理过程、物理—化学过程的作用而在物体内产生内力时，称金属处于应力状态。由弹性力学可知，变形物体任一点的主应力状态，可用三个主应力来表示，也就是说，由通过该点的三个主平面上的应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 能够决定此点的应力状态（图2-4）。一般规定拉应力为正，压应力为负，按代数顺序 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

2. 主应力图示

在压力加工原理中，为了定性说明变形金属内某点的应力状态，常采用只注明作用于

该点的三个主应力是否存在及其正、负号，而不注明应力数值的简明立方体图解，把该图解称作主应力状态图示或简称主应力图示。

可能的主应力状态图示共九种，如图2-5所示。

金属压力加工过程中，金属内各点的主应力图示往往是不一样的。如果变形区中绝大多数金属质点都是同样的主应力图示，则该种主应力图示就表示这种压力加工过程的主应力图示。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可能产生的塑性变形程度，即塑性大小。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二向压应力状态，所以前者的塑性比后者高，但单位变形力却比后者大得多。

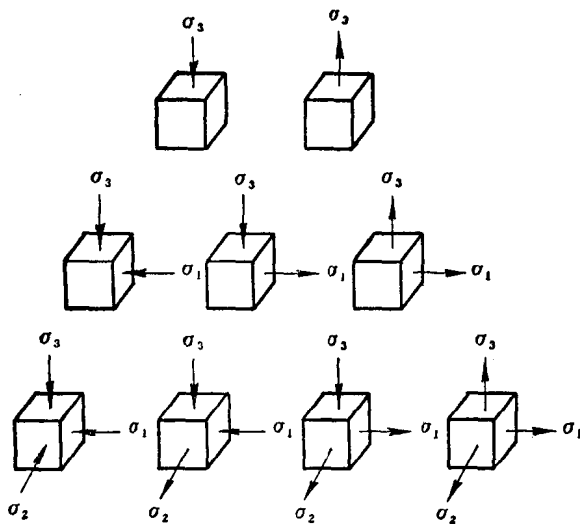


图 2-5 应力状态图示

3. 影响主应力状态、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。特别是压力加工过程中，工件在外力作用下，工件和工具接触表面间产生摩擦力更是不可忽略的。由于该摩擦力的作用往往会改变金属内部的应力状态，例如镦粗时，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（图2-6(a)），金属将均匀变形（实际上这种情况是不存在的）。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”而得到证明（图2-6(b)）。

(2) 变形物体形状的影响 做拉伸试验时，开始阶段是一向拉伸主应力图示（图2-7(a)），当出现细颈以后在细颈部分变成三向拉应力主应力图示（图2-7(b)）。

(3) 工具形状的影响 如当用凸形工具压缩金属时（图2-8），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。由图2-8知，当摩擦力的水平分力 $T_x > P_x$ 时，则为三向压应力状态，当 $T_x < P_x$ 时为二向压一向拉应力状态，当 $T_x = P_x$ 时为二向压应力状态。

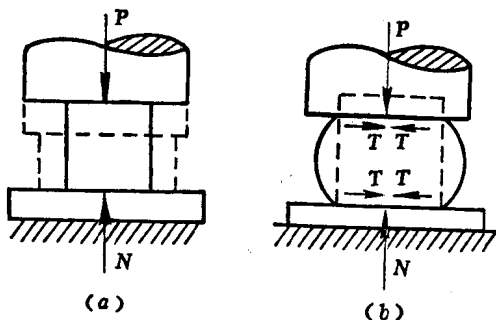


图 2-6 摩擦力对应力图示的影响
(a) 无摩擦时; (b) 有摩擦时

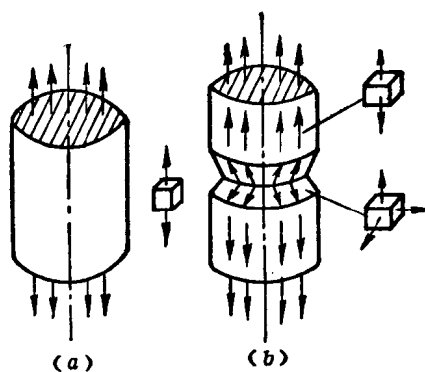


图 2-7 拉伸实验时出细颈前后的应力状态图示
(a) 出细颈前; (b) 出细颈后

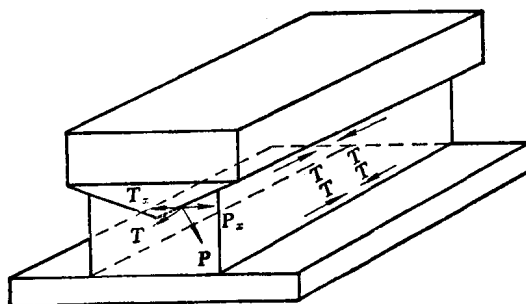
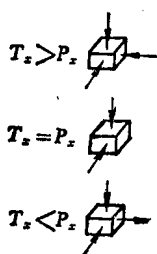


图 2-8 凸形工具对主应力状态图示影响

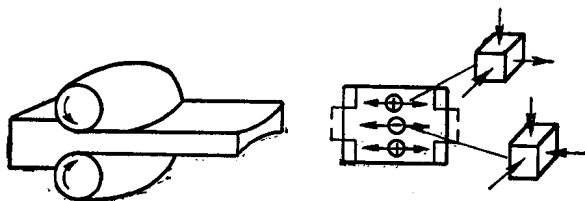


图 2-9 不均匀变形对应力状态图示的影响

(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2-9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, 金属内部产生了相互平衡的内力, 此时中部为三向压应力状态, 而二边可能为二向压应力一向拉应力状态。

金属压力加工中, 最常见的是三向压应力主应力图示 (如轧制、锻造和挤压) 和一向拉伸二向压缩主应力图示 (如拉拔)。

第三节 主变形和主变形图示

1. 主变形

在压力加工原理中, 为研究问题方便引入主变形概念。所谓主变形是指在主轴方向

(或主应力方向)所产生的变形。表示主变形的有三种,即绝对主变形、相对主变形和真实相对主变形。现以图2-10所示矩形坯料变形前、后尺寸变化为例说明之。

(1) 绝对主变形 所谓绝对主变形,就是指在主轴方向上(或主应力方向上)物体

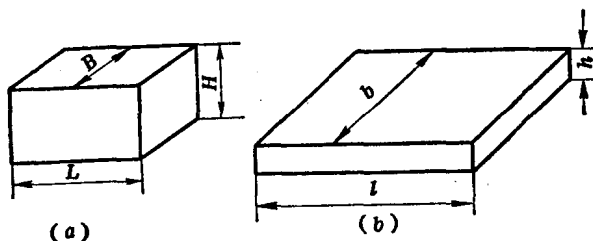


图 2-10 矩形坯变形前、后的尺寸变化

(a) 变形前; (b) 变形后

变形前和变形后的尺寸差。设物体变形前、后的高、宽、长三个方向上的尺寸分别以 H 、 B 、 L 和 h 、 b 、 l 表示,物体在这三个方向上的绝对主变形依次称为压下量 Δh ,宽展量 Δb 和延伸量 Δl ,因此绝对主变形以下式表示之,即

$$\begin{aligned}\Delta h &= H - h \\ \Delta b &= b - B \\ \Delta l &= l - L\end{aligned}\quad (2-3)$$

(2) 相对主变形 因为绝对主变形没有相对比较的意义,所以在大多数情况下采用相对主变形,即用绝对主变形与变形前尺寸之比来表示,即

$$\begin{aligned}\text{相对压下量} & \quad \Delta h / H \times 100\% \\ \text{相对宽展量} & \quad \Delta b / B \times 100\% \\ \text{相对延伸量} & \quad \Delta l / L \times 100\%\end{aligned}\quad (2-4)$$

(3) 真实相对主变形 因为相对主变形并不能准确地表示出变形金属的真实变化程度,因此引入了真实相对主变形的概念。真实相对主变形是用某一瞬间变形尺寸的无限小的增量 dh_x , db_x , dl_x 与该瞬间尺寸 h_x , b_x , l_x 的比值之积分来表示(图2-11),即

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \int_H^h \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{h}{H} \\ \delta_2 &= \int_B^b \frac{db_x}{b_x} = \ln \frac{b}{B} \\ \delta_3 &= \int_L^l \frac{dl_x}{l_x} = \ln \frac{l}{L}\end{aligned}\quad (2-5)$$

上述三种表示变形程度的方法中,以相对主变形最为常用。

为了表示塑性变形的激烈程度,还常常引用变形速度的概念。所谓变形速度就是变形程度对时间的变化率 $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)$ 。为了研究变形速度对金属性能的影响而常用平均变形速度

($\bar{u}$),它在数值上等于变形程度除以所经过的时间,单位是 秒^{-1} 。

根据塑性变形时,变形前、后体积不变的条件,可以求出三个主变形间的关系。参看