

金属压力加工

(内部教材)

占 琴 编

北 京 航 空 学 院

1964, 8

目 录

緒論	1
第一章 应力与变形的基本概念	6
§ 1, 力和应力	6
§ 2, 变形	12
§ 3, 变形的不均匀分布	19
§ 4, 最小阻力定律	23
§ 5, 付应力与残余应力	27
§ 6, 研究应力及变形分布的主要方法	33
第二章 变形力与变形抗力	36
§ 1 主切应力与八面体面上的切应力	36
§ 2 塑性条件	42
§ 3 平衡方程式	46
§ 4 变形力的确定	51
§ 5 变形功的确定	59
§ 6 变形抗力及其影响因素	60
第三章 塑性及其影响因素	69
§ 1 塑性的概念及其表示方法	69
§ 2 影响塑性的因素	74
§ 3 塑性图	88
第四章 确定变形规范的一般原则	92
§ 1 变形温度速度条件的确定	92
§ 2 变形程度的确定	101
第五章 轧制生产	110
§ 1 概述	110
§ 2 轧制过程的建立	116
§ 3 轧制时金属流动及应力状态	121
§ 4 前滑及宽展	133
§ 5 轧制选择及准备	141
§ 6 热轧	148
§ 7 冷轧	162
§ 8 热处理及校正工序	169
§ 9 铝合金板材生产举例	174

§ 10 镁合金板材生产举例	179
第六章 挤压生产	183
§ 1 概述	183
§ 2 挤压时金属流动特点	191
§ 3 挤压产品组织和性能	204
§ 4 挤压工艺	207
第七章 自由锻造	222
§ 1 概述	222
§ 2 自由锻设备	222
§ 3 自由锻基本工序	226
§ 4 编制锻造工艺规程要点	244
第八章 模锻生产	247
§ 1 概述	247
§ 2 模锻设备	247
§ 3 锤锻模	251
§ 4 开式模锻与闭式模锻	253
§ 5 锻件图设计	257
§ 6 锤锻模膛的种类及其作用	262
§ 7 锤锻模膛的选用及毛坯尺寸的決定	272
§ 8 锻锤吨位的決定	280
§ 9 曲轴压力机模锻特点	282
§ 10 臥式锻机模锻特点	285
§ 11 精正工序及檢驗	290
第九章 板材冲压	299
§ 1 概述	299
§ 2 剪裁	300
§ 3 冲裁	304
§ 4 弯曲	307
§ 5 压延	319
§ 6 爆炸	334
参考文献	336

緒 論

§ 1 金屬壓力加工的主要方法

金屬壓力加工的主要方法有軋制、擠壓、拉拔（拉絲、拉伸）、鍛壓、沖壓等五種。

軋制。

軋制系使金屬在旋轉的軋輥之間進行塑性變形的過程。經過軋制，金屬毛坯的形狀和尺寸發生改變，一般是斷面減小而長度增加。

軋制的方式大致可分為三種，即縱軋、斜軋和橫軋。

1 縱軋：就是軋件在相互平行並且旋轉方向相反的軋輥之間進行塑性變形，而金屬的行進方向與軋輥的軸線垂直，如圖 1 所示。軋制後一般軋件

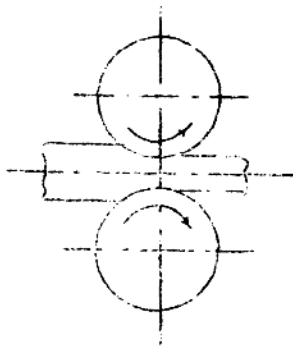


圖 1 縱軋簡圖

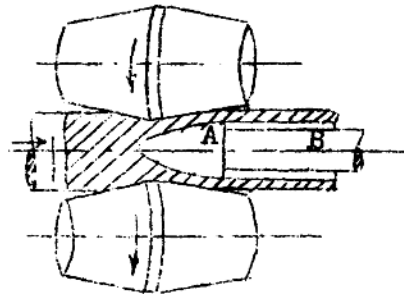


圖 2 斜軋簡圖

的厚度減小，長度和寬度增加，而其中以長度增加為主。這種方法應用最為廣泛，可用以生產各種型材、鋁材、帶材等。

2 斜軋：即軋件在兩個中心線互相成一定角度並且旋轉方向相同的軋輥之間進行塑性變形，如圖 2 所示。軋件沿軋輥交角的中心線方向進入軋輥，軋件在變形中除了繞其軸線旋轉的運動外，還有前進的運動。斜軋應用很廣，常用以軋制管材及變剖面型材。

3 橫軋：軋件在向同一方向旋轉的軋輥之間進行塑性變形，如圖 3 所示。在橫軋中，軋件只有繞其自身中心線旋轉的運動，因而僅在橫向受到加工。這種方法用於內輪及車輪等產品的生產。

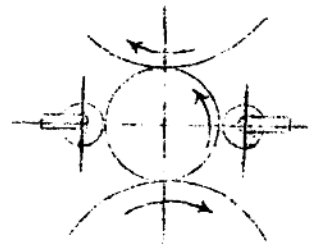


圖 3 橫軋簡圖

二、擠壓。

挤压是将金属放在密闭的圆筒（挤压筒）内，一端施以压力，使金属从规定的模孔中挤出而得到断面与模孔轮廓相同的制品的过程，如图4所示。

挤压生产多应用于有色金属的加工，用以生产各种型材和管材；近年来亦用以加工黑色金属，特别是耐热合金及低塑性材料。

三. 拉拔。

拉拔包括拉丝及拔管。拉丝是使外力作用于变形金属的前端，使其通过一定的模孔，而使金属断面缩小及长度增加的过程，如图5a所示。拔管是将中空管坯通过模孔，使管径减小的过程，如图5b所示。

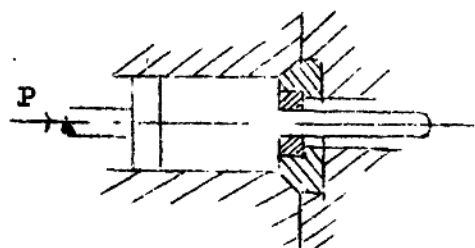


图4 挤压简图

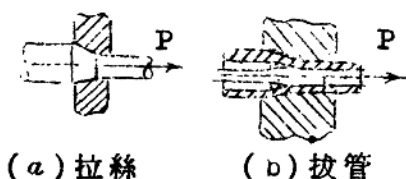


图5 拉拔简图

拉拔一般在冷态下进行，可以拉制断面尺寸甚小的产品（如直径为0.015毫米的金属丝，直径为0.3毫米的金属管），且产品的表面很光洁，尺寸很精确。拉拔时由于产生加工硬化，金属的强度及硬度均有所增高。

拉拔的产品种类很多，如丝材、管材，异型断面的产品等。

四. 锻压。

锻压是利用各种锻压设备加工金属的方法，可以分为自由锻和模锻两种。

自由锻是在上下往复运动的平面锤头或曲面锤头的作用下使金属产生塑性变形的过程。图6为最基本的自由锻造方法之一——粗的示意图，金属毛坯在受到锤头冲击或压缩时，沿着不受约束的方向自由流动，依靠工人的操作技巧，使毛坯获得一定的形状和尺寸。因此，这种方法具有很大的通用性。

图7为模锻过程的示意图。在模锻过程中，金属在外力作用下于一定的模膛内流动，最后获得和模膛形状及尺寸相同的锻件。

模锻经常用以生产机械性能要求比较高或批量比较大的机械零件或零件毛坯。

五. 冲压。

冲压是以钣金为毛料，在各种冲压设备上加工，从而得到各种形状和尺寸

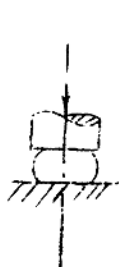


图6 粗简图



图7 模锻简图

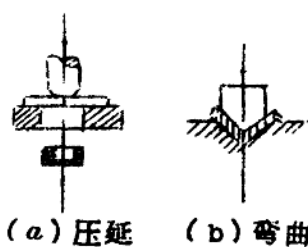


图8 压延与弯曲简图

寸的薄壁零件的过程。

冲压包括多种加工形式，如压延、弯曲、冲裁等。图8 a 为压延的示意图，冲头迫使毛料进入模孔，使平钣金料变成了空心零件。图8 b 为弯曲的示意图，用不同模具可以获得各种弯曲的零件。

冲压广泛地应用于航空、汽车、仪表及其他工业部门的生产。许多日常生活用品，如锅、盆、碗、勺等，也多为冲压制品。

§ 2 金属压力加工的特点

金属压力加工具有下列优点：

1. 在获得必要形状和尺寸的同时，金属组织可能发生显著变化；由不均匀、不緻密的铸态组织，变成比较均匀、比较緻密的变形组织，从而大大改善了金属的性能，特别是塑性。因此，一般用压力加工方法生产的产品比用其他方法（特别是铸造方法）生产的产品具有更好的力学性能。

2. 具有很高的生产率。锻压、冲压生产，往往只需一个机器行程即可将整个零件制成；新近发展起来的齿轮轧制、滚珠轧制，轴类零件的旋转锻造，比机械加工的生产率高出几倍甚至几十倍以上；普通轧制和挤压 also 具有很高的生产率。

3. 节省金属。压力加工属于无切屑加工的一种，可以无损耗地制成机械零件；经过锻压的毛坯，能大大减少切屑加工量。

4. 能够获得某些特殊形状和尺寸的零件，为其他加工方法所不能代替。例如许多薄壁件只能用冲压的方法生产，特薄的箔材只能用轧制的方法生产。

金属压力加工也存在一些不足，例如；所用设备比较庞大、复杂，消耗的动力较大；由于这些原因，多少限制了压力加工方法的发展。但随着机械、

电机工叶发展，出现了大型轧机、大型水压机及大型电动机等，就解决了上述困难；近年来，压力加工技术有了很大发展，有些原来需要强力设备的工艺，已经可以不需要强力设备了，例如爆炸成型工艺的出現，可以使某些大型零件的生产不用强力冲压设备；採用高速液气锤（迪那派克）之後，可以大大減輕鍛錘的重量；採用強力旋压，可以解决某些寬軋的生产問題。因此：压力加工方法在各工叶部門到了越来越广泛的应用。

§ 3 压力加工在航空材料生产中的作用

現代的航空材料，絕大多數为金属材料，就其生产过程来讲，这些金属材料可分为三种：第一种是燒結制品即用粉末冶金的办法直接制得零件。例如有的飞行器中以燒結鋁制成渦輪；这类零件为数不多。第二种是鑄件，即用鑄造的办法直接制得的零件，如发动机壳体、汽缸头，各种支座等；这类零件为数較多。第三种是压力加工制品，即以燒結材料或鑄錠为原材料，經过压力加工制得的零件，如渦輪盘、渦輪叶片、曲軸、联杆、起落架零件、蒙皮、桁条、隔框、管道、铆釘等；这类零件在飞行器上佔了大多数。

这些压力加工制品从純金属到用于飞行器，一般都要经历两个阶段，第一阶段是半成品生产，即从純金属到制成半成品，如軋材、带材、型材、管材、絲材等。第二阶段是零件生产，即从半成品到零件，如用棒材作成鍛件，用軋材作成冲压件等。在第一阶段中，压力加工是必需的工艺过程；在第二阶段中，凡是机械性能要求較高而形状又比較复杂的零件，也要求用压力加工方法制成，或者用压力加工方法制成毛坯後进一步机械加工。因此，可以说压力加工是許多金属材料的生产和加工所必不可少的手段。广而言之，不仅航空工叶如此，对其他机械制造、仪表制造等工叶也是如此。

航空材料发展的矛盾，主要是使用、加工和成本之間的矛盾。航空材料工作者的任务，就是不断地解决这种矛盾，使航空材料在充分滿足使用性能、能够加工制造出来的前提下，尽可能經濟。

使用性能上的要求，是推动航空材料发展的积极因素。随着飞行器的发展，向航空材料提出了越来越高的要求，也正是这样要求推动了航空材料的发展；从木質材料到金属材料，从低强度材料到高强度材料，从不耐高温材料到耐高温材料，都是为了滿足日益增长的使用性能上的要求。

但这种不断增长的要求，往往受到加工性和經濟性的限制，例如鎂合金、鋁合金、在使用性能上有許多优点，但由于其加工性能不太好，是使它們的

应用受到限制的原因之一：铝合金有許多适合于航空材料要求的优点，但由于稀缺，要获得广泛应用也是困难的。

由此可見，材料的加工性（对压力加工而言，其主要加工性是塑性）是影响材料发展的一个重要因素；因此，科学技术工作者越来越多地注意到材料加工方面的问题。现在，塑性变形理論已作为一門独立的科学发展起来了，許多新的压力加工方法出现了。由于压力加工理論和技术的发展，使得許多材料得到了实际应用；例如，採用挤压的方法，可以对低塑性的材料进行加工，镁合金的生产，一般就是先进行挤压，使塑性有了改进後，再进一步軋制或鍛压。再如由于爆炸成型的发展，許多原来难于成型的材料，如不銹鋼、鈦的金、鎢合金、鋁合金等，都能很好地成型，无疑地，这将促使这些材料得到更广泛的运用。

压力加工工艺在金属材料的发展中並不完全处于消极地位，不仅仅是限制材料使用的问题，而且是一个有助于提高材料使用性能的积极因素，因为它不仅可以改变金属毛坯的形状和尺寸，而且可以改善金属的組織和性能。因此，飞行器上的重要承力零件，一般都用压力加工件。

由此可見，对于一个金属材料工作者來說，了解压力加工工艺性能的实质，了解压力加工过程对金属組織性能的影响，以及掌握普通的压力加工試驗技术，就成为必然的任务了。只有这样，才能在金属材料发展的各个阶段中找出矛盾的焦点；只有这样，才能在金属材料的生产过程中全面地分析各个可能出现的问题；总之，只有这样，再加上其他方面的知識与技能，才能切切实实地解决金属材料问题，才能算是一个比較全面的金属材料工作者。

§ 4 課程任务及內容

金属压力加工是一門专业性課程，其主要任务是使同学：

1. 了解金属塑性变形发生的力学条件；
2. 了解金属塑性流动的特点，塑性的本質及其影响因素；
3. 了解制釘变形规范的一般原則；
4. 了解幾种主要压力加工方法的基本过程、特点和应用；
5. 初步掌握幾种主要的压力加工性能的考驗方法。

全課共分九章。前四章是具有一般性的原理，後五章是主要压力加工方法各論，其中包括：軋制、挤压、自由鍛造、模鍛和飯材冲压。配合有关章节，还将进行相应的实验和課外作业。

第一章 应力与变形的基本概念

§ 1 力和应力

一. 外力

綜合某些作者〔1〕〔2〕的分类方法，物体变形时的外力不外以下几种：

1. 作用力。作用力是由压力加工设备的动作而产生的，如鍛錘的打伤、軋軋的轉动等。作用力傳至金属上，使金属产生塑性变形。

应当注意，我們不能把剛体力学中所得到的公式和定律不加分析地用于塑性变形的情况。在剛体力学中，力的作用結果与力的作用点无关，而完全由力的大小及方向来决定，力偶的作用結果，則只由力偶向量的大小及方向来决定。而在塑性变形的情况下，力或力偶的作用点，也是作用力或力偶的重要特征。例如 粗，当力的作用点不同时，变形情况也不相同，如图 9 所示。

2. 約束反作用力。在金属变形过程中，模具的不动部分和錘头平面等

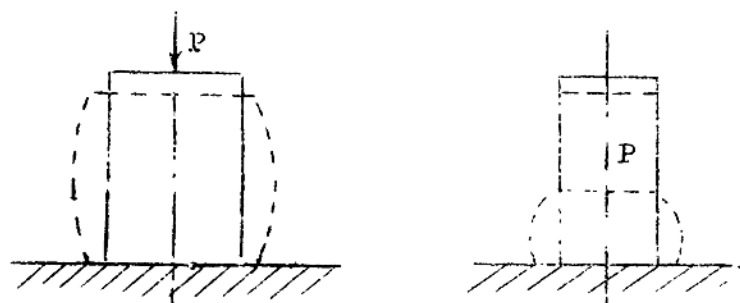


图 9 力的作用点对塑性变形的影响

的阻力也作用在金属上，它們都是限制变形体运动的約束。約束对变形体的作用，可以认为是某些力对变形体的作用，这些力叫作約束反作用力。如果变形体与限制变形体各点位移的某一平面接触，那么当无摩擦时，代表对物体起約束作用的反作用力的方向是沿着該表面的法綫而向着变形体。图 10 表示无摩擦时在封閉凹模中鍛压时作用力与約束反作用力的方向。图中 P 代表可动冲头作用在金属上的压力，因而是作用力； R_1 和 R_2 代表凹模內部底面和側壁对变形的作用力，也就是反作用力。可以看出。在有些情形下約束反作用力的方向不一定和作用力一致。

3. 摩擦力。幾乎在所有压力加工过程中，在工具与变形体接触面之間

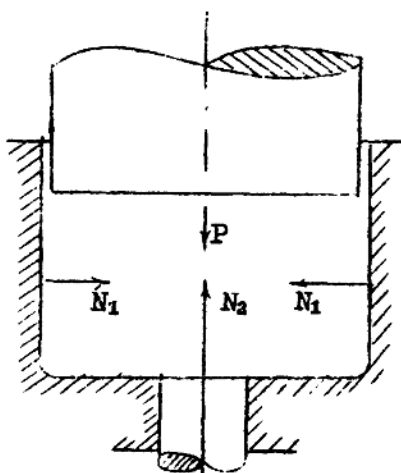


图 10 无摩擦时反力的方向

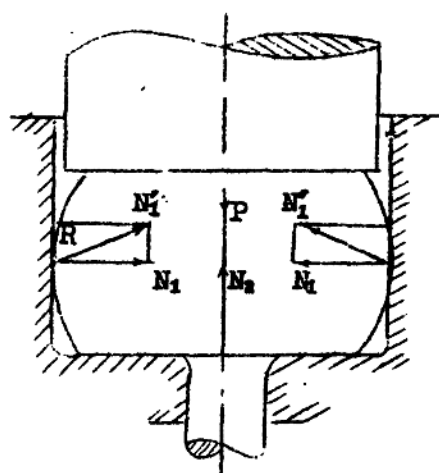


图 11 有摩擦时反力的方向

都有摩擦力存在。

摩擦力分布在变形体与工具接触点相切的平面内，其方向与运动方向相反。例如，在封闭凹模内锻压，如果考虑摩擦力的影响，则约束反作用力就离开了表面的法线方向而向与运动相反的方向偏斜。图 11 表示有摩擦力时约束反作用力方向的改变情况。

图中 N_1' 是垂直侧壁的反力 N_1 与平行于侧壁摩擦力 R 的合力；如果变形物体处于平衡状态中，那么，取力的垂直投影之和等于零，得到

$$P = N_2 + \sum R;$$

由此公式得出，在这种情况下，作用于变形体顶部的力 P 大于作用在变形体下部的力 N_2 ；当按图 11 的方式进行模锻时，毛坯的上部先开始变形，并且只有当上部的面积增加一些后，毛坯的下部才开始变形。

摩擦力可以是作用力，也可以是反作用力。在上列中摩擦力 R 即为反作用力；而在轧制工作中摩擦力则起了作用力的作用，它将轧辊的运动传给金属，并将轧件拽入两轧辊之间，帮助了变形过程。

塑性变形过程中的摩擦与机器零件中的摩擦有原则上的不同。机械零件在正常工作时，滑动表面只承受弹性变形；而在塑性变形时，在大多数情况下会有新的接触表面产生；此外，接触表面上的单压力很大，远远超过一般机械零件所承受的单位压力值。例如，在最重负荷的轴承中，其单位压力为 $2 \sim 4$ 公斤/毫米²；而在塑性变形时，放热态下单位压力可达 $40 \sim 50$

公斤/毫米²，于冷态下可达200~250公斤/毫米²或更高〔3〕。

极高的单位压力，使得金属表面产生柔压、硬化并使真正接触面积增加，因此，物理学中的库伦摩擦定律 $R = \mu N$ 从实质上讲是不适用于塑性变形的；但由于对塑性变形的摩擦规律还掌握的不够，因而在分析问题往往仍然采用这一定律，仅将摩擦系数根据具体条件用实验的方法确定。显然，塑性变形条件下的摩擦系数比一般机械零件滑动时的摩擦系数大得多。

4. 惯性力。塑性变形就其本质而言是一种运动状态。屈服现象代表连续介质的运动。在压力加工时金属质点的运动往往是不均匀的，所以必须考虑它的惯性力。惯性力的大小等于物体的质量乘加速度，其方向与加速度的方向相反。为了计算惯性力的大小，必须知道变形体中各点的加速度。由于对工艺过程中的变形还没有足够的研究，故在金属塑性变形理论中对惯性力一般不予计算，其影响则用实验系数修正。

二. 内力和应力

在外力或其他物理或物理化学过程的作用下，原子间力系的平衡关系遭到破坏时，原子点阵间的势能就要升高，即产生内力；同时原子间距发生改变，产生了变形。因而内力可由下述两方面的原因引起：

(2) 为了平衡外部机械作用所产生的内力。即当外力作用于金属使之发生塑性变形时产生与作用力、反作用力及摩擦力相互平衡的内力。

(2) 由于物理过程或物理—化学过程所产生的相互平衡的内力。即由于物理变化或物理化学变化，依各部分自然发展应有不同的变形，但由于变形体整体性的联系，就有阻止这种变形不一致性的内力发生。

例如金属坯料加热时，如果右半边的温度比左半边的高，则由于膨胀的结果，右半边应该变得比左半边长，如图12中虚线所示；但是由于坯料为一整体，它各部分长度的变化应该协调，因而坯料右半边的伸长受到限制，而承受压缩内力；左半边被迫延伸，而承受拉伸内力。拉伸力与压缩力在坯料内相互平衡。若将坯料从中间切开，则右半边将自由伸长，而左半边则自由缩短，此时互相平衡的内力亦即消失。

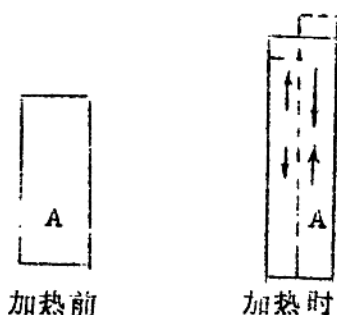


图12 不均匀加热时内力的产生

此外。如不均匀冷却，不均匀再结晶，不均匀相变等等，亦将引起相互平衡的内力。

内力的存在，是晶体点阵平衡状态被破坏的结果。组成晶体点阵的各原子间具有吸引力和排斥力，若无吸引力则晶体将被分离，若无排斥力则晶体点阵将会密集得没有一点空隙，而事实上金属是能够被拉伸和压缩的。金属在不受外力作用时，点阵的原子处于平衡位置，原子间的吸引力和排斥力相互平衡，而内部能量具有最小值。当受压缩时，原子间距离缩短，则排斥力增长以平衡这个压缩力；当成拉伸时，原子间距离增加，则吸引力增长以平衡这个拉伸力；当外力去除后，原子恢复到平衡位置，此时内力便消失了。

内力的强度称为应力。一般所说的应力，应理解为极小面积上的内力与该面积比值的极限，即

$$\sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{dP}{dF}$$

式中 ΔP 为极小面积 ΔF 上的总内力。

当剖面上的内力为均匀分布时，则应力为内力与剖面面积之比，即

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

式中 P 为剖面面积 F 上的总内力。

三. 主应力与主应力图

在金属压力加工过程中，力从不同的方向作用于金属，使受力金属处于应力状态。在金属内取任一点 A ，现研究这一点的应力状态如何表示。

通过所研究的点 A 作三个平行于坐标轴的平面，构成大面体中的三个面；大面体之棱长取为无限小，这三个面以 A 点为极限。 A 点的应力，可以看作是这三个面上的应力，如图 13a 所示。为了研究方便，可将每个面上的应力分解为平行于三个坐标轴的三个分量，即一个法向应力和两个切向应力，如图 13b 所示。在三个面上共有三个法向应力和六个切向应力。

法向应力用 σ 表示。为了区别不同方向的法向应力，在其右下角注上脚指数以表示其方向。例如 σ_x 表示与 x 轴平行的法向应力。拉伸时法向应力当作正值，而压缩应力为负值。

切应力用 τ 表示，并用两个字母作脚指数，第一个字母表示切应力的方向，第二个字母表示切应力所处平面的法线方向；例如 τ_{xy} 表示切应力的

方向与 x 轴平行，所处平面之法线方向与 y 轴平行。切应力的正负这样来规

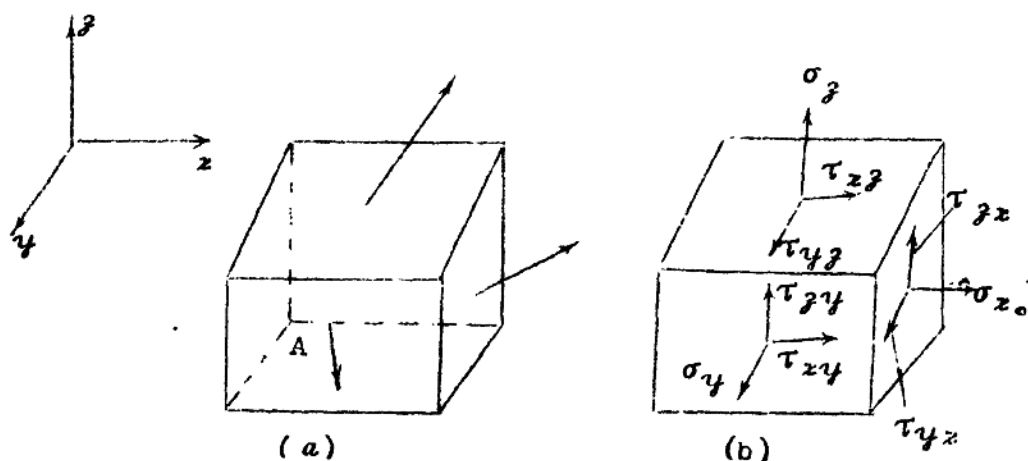


图 13 点的应力状态

定：若作用面的法线方向与坐标轴的正向相同时，则切应力的方向与坐标轴正向相同时为止；反之，若作用面的法线方向与坐标轴的正方相反，则切应力的方向与坐标轴的正向相反时为正。

以后（第二章，§ 3）将会证明，当物体处于平衡时，切应力之间存在下列关系：

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

即任意颠倒切应力的脚指数的次序后，其值不变。此即所谓切应力成对定理。

由于切应力两两相等，故六面体上的几个应力分量实际上只有六个不同的值。即三个法向应力 $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 和三个切应力 $(\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$ 。

上面所采用的坐标是任意的。就是说在任意坐标系中，点的应力状态可由三个法向应力和三个切应力完全确定下来。但是从解析几何可以证明：在一定的受力条件下，通过所研究的点，总有这样一组坐标存在，当采用这样一组坐标时，六面体面上的所有切应力为零。就是说在特定的坐标系中点的应力状态可由三个法向应力完全确定下来；这就使问题大为简化了。

在研究应力状态时，如果所取的坐标不是任意的而是符合于上述要求的。即在六面体平面上仅有法向应力而无切应力时，则此组坐标轴称为主轴，沿此

座标轴方向的应力（法向应力）称为主法向应力或简称主应力，主应力所作用的平面称为主平面。主应力的三个方向以 1、2、3 表示，相应方向的应力以 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示。

因此，任一点的应力状态可以由三个主应力完全确定下来。

在实际工作中，有时存在这样的情况：只需要知道应力状态的基本特征，即主应力的数目及其正负号，并不一定需要知道主应力的绝对值的大小。为了满足这种需要，故采用了主应力图。

所谓主应力图，就是表示点的三个方向的主应力是否存在（不必注明数值）及其正负号如何的示意图。如果物体内各点的应力状态相同，则点的主应力图就代表了整个物体的应力状态。

在各种受力情况下，可能的主应力图计有九种（图 14）：

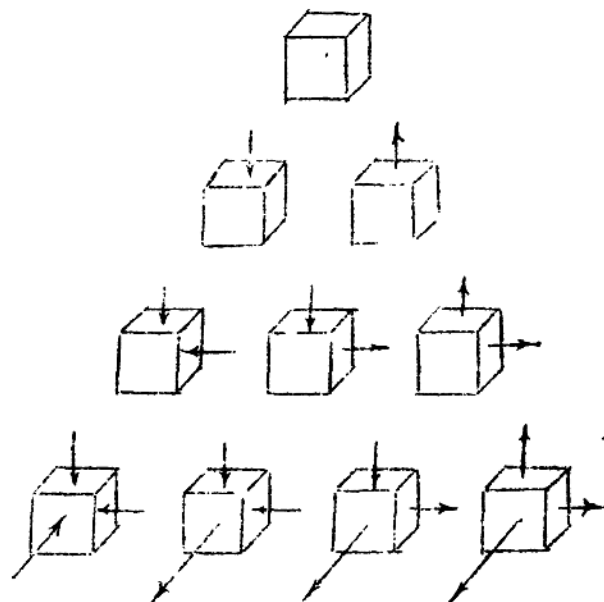


图 14 可能的主应力图

单向应力状态图有两种，即单向拉伸和单向压缩，其他两个主轴方向的应力为零。

平面应力状态图有三种。所谓平面应力状态，即在两个主轴方向有应力存在而在第三个主轴方向的应力为零。这三种应力状态为：两个同为拉应力，两个同为压应力，一个为拉应力而另一个为压应力。

立体应力状态图有四种。所谓立体应力状态，即在三个主軸方向都有应力存在。这四种应力状态图为：三个同为拉应力，三向同为压应力，两向为拉应力而第三向为压应力，两个为压应力而第三向为拉应力。

为了邏輯的完整，N. M. 巴甫洛夫认为应将所有应力为零的情况算作零应力状态。

§ 2 变形

一. 彈性变形与塑性变形

当物体受力的作用时，呈现应力状态，物体的內能升高，形状及尺寸发生变化，即产生了变形。

当应力未超过彈性极限时，各組原子群的变形尚未破坏其原有的静电联系，而只产生点陣的歪扭；当力的作用去除后，点陣仍恢复到原来的状态，这种变形称为彈性变形。

当应力超过物体的彈性极限后，点陣歪扭程度极大以致丧失了原有的静电联系而形成新的静电联系。在这种情况下，当取消力的作用之后，物体不能恢复原有的形状和尺寸，是为塑性变形。由此可以看出，物体的塑性变形，只有当物体有了足够的彈性变形时才能发生，也就是說在塑性变形的同时必然有彈性变形存在。

通常，在压力加工过程中的塑性变形值很大，以致可以将同时存在的彈性变形忽略不計。因此，除特別指明者外，在压力加工中所說的变形，一般系指塑性变形。

二. 体积不变条件。

在彈性变形过程中，物体要发生体积变化，当去除物体的載荷后，这种現象将随彈性变形的消失而消失。在塑性变形过程中，物体的体积也要发生变化。这一方面是因为在塑性变形过程中有彈性变形存在，使体积发生一些变化，另一方面是因为塑性变形时会引起金属密度的变化，自然也要伴随着体积的变化。

但是，由於彈性变形所引起的体积变化，对改变物体尺寸所起的作用非常有限（相对於塑性变形而言），而且在卸載时，即使有些变化也将随彈性变形的消失而消失。

許多实验証明，塑性变形时金属的密度变化很小。冷加工时，金属的密度稍有减小，这与加工硬化的性質及金属內部大量微細裂紋的形成有关。通

常，對於各種金屬及合金冷加工時，密度只減小 $0.1 \sim 0.2\%$ 。當退火時，由於再結晶的作用，密度又將增加而接近於原來的數值。因此，對於加工硬化與再結晶同時存在的熱加工來說，金屬的密度可以認為是不變的。

由以上的敘述可以看出，不論冷加工或熱加工時，變形金屬的密度和體積變化總是很小的，在實際計算中可以忽略不計。由此得出一個結論：在金屬壓力加工時（鑄造金屬壓力加工的最初階段除外），金屬變形前後的體積保持不變。是為壓力加工時的體積不變條件。

以後將要看到，體積不變條件在壓力加工的一切過程中廣泛地被應用着。

三。主變形與主變形狀圖

塑性變形理論已經證明：在變形中取一個無限小的六面體，其變形狀態也由九個變形分量所決定，其中包括三個軸向變形及六個切變形。按照與處理應力狀態相同的原理，使得可以用三個軸向變形把六面體的變形狀態完全確定下來；此時所有的切變形為零而軸向變形即為主變形。主變形的方向與主應力的方向一致。

主變形可用三種方式表示。為了便於分析，以在塑性變形前尺寸為 H 、 B 和 L 的大方體為例，設其在塑性變形後的尺寸為 h 、 b 和 ℓ （圖 15）。

在三個主軸方向的尺寸變化

為 $\Delta h = h - H$ ， $\Delta b = b - B$ 和 $\Delta \ell = \ell - L$ ，叫做絕對主變形。

表示物體變形程度更為正確的

是相對主變形，即絕對主變形

與其相應的物體尺寸之比。相

對主變形以後即稱為主變形。



圖 15 尺寸變化情況

主變形的第一種表示方式是絕對主變形與原來尺寸之比，即

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^I &= \frac{\Delta h}{H} \\ \varphi_2^I &= \frac{\Delta b}{B} \\ \varphi_3^I &= \frac{\Delta \ell}{L} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

主變形的第二種表示方式是絕對主變形與最後尺寸之比，即

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^{\text{II}} &= \frac{\Delta h}{h} \\ \varphi_2^{\text{II}} &= \frac{\Delta b}{b} \\ \varphi_3^{\text{II}} &= \frac{\Delta \ell}{\ell} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

主变形的第一种及第二种表示方式並不能准确地表示尺寸的变化程度；因为第一种方式系以绝对变形与原来尺寸之比表示，第二种方式系以绝对变形与最后尺寸之比表示，而实际上，在变形过程中，物体尺寸在每一瞬间都是不同的。故正确的相对变形，应以每一瞬间的无限小增量（例如 dh_x ）与该瞬间的尺寸（ h_x ）的比值的积分表示之。

故主变形的第三种表示方式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \int_H^h \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{h}{H} \\ \sigma_2 &= \int_B^b \frac{db_x}{b_x} = \ln \frac{b}{B} \\ \sigma_3 &= \int_L^{\ell} \frac{d\ell_x}{\ell_x} = \ln \frac{\ell}{L} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

因为第三种方式能更正确地表示变形程度，故叫做真实主变形，並以符号 σ 表示，以便与第一种及第二种近似的主变形 φ 区别。

在实际计算中究竟採用哪一种表示变形的方式，視计算的便利，所需要的精确度及计算的目的而定。

若将真实主变形的表达式作一简单的数学变化，即可得出

$$\sigma_1 = \ln \frac{h}{H} = \ln \left(\frac{H + \Delta h}{H} \right) = \ln (1 + \varphi_1^{\text{I}}),$$

$$\text{以及 } \sigma_1 = \ln \frac{h}{H} = \ln \left(\frac{H}{h} \right)^{-1} = \ln \left(\frac{h - \Delta h}{h} \right)^{-1} = \ln \left(\frac{1}{1 - \varphi_1^{\text{II}}} \right).$$

$$\text{因此 } \sigma = \ln (1 + \varphi^{\text{I}}) = \ln \left(\frac{1}{1 - \varphi^{\text{II}}} \right).$$

将上式微分，可得

$$d\sigma = \frac{d\varphi^{\text{I}}}{1 - \varphi^{\text{I}}} = \frac{d\varphi^{\text{II}}}{1 - \varphi^{\text{II}}}.$$

因此，当 φ^{I} 和 φ^{II} 与 1 相比可以忽略时，則得