

ZG 冶金职业技术教育丛书

YEJIN ZHIYE JISHU JIAOYU CONGSHU

轧钢原理

ZHAGANG YUANLI

冶金工业职业技能鉴定指导中心

王甘勋 / 主编

 中国工人出版社

冶金职业技术教育丛书

轧钢原理

王甘勋 主编

中国工人出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

轧钢原理 / 王甘勋主编. —北京: 中国工人出版社, 2005. 7

(冶金职业技术教育丛书)

ISBN 978 - 7 - 5008 - 3550 - 9

I. 轧... II. 王... III. 轧钢学—技术培训—教材 IV. TG33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 090544 号

出版发行: 中国工人出版社

地 址: 北京鼓楼外大街 45 号

邮 编: 100011

电 话: (010) 62350006 (总编室)

(010) 82075935 (编辑室)

发行热线: (010) 62045450 62005042 (传真)

网 址: <http://www.wp-china.com>

经 销: 新华书店

印 刷: 三河市燕郊汇源印刷有限公司

版 次: 2005 年 9 月第 1 版 2008 年 5 月第 2 次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

字 数: 1450 千字

印 张: 69.25

全套定价: 117.80 元

版权所有 侵权必究

印装错误可随时退换

前 言

1996年,在原冶金工业部统一部署、安排下,我们组织全国50多所冶金技工学校的优秀教师和生产第一线的工程技术人员编写了冶金技工学校教学用书。这套教材按照原冶金工业部颁布的教学计划和教学大纲编写,汇集了国内外冶金工业的新技术和新成果,具有很强的实用性和可操作性,同时也满足了冶金技工学校的教学和冶金企业职工岗位培训的需要。教材发行九年来,在冶金职业技术学校 and 职工岗位培训的使用过程中,得到教师和学校的好评。

进入新世纪以来,冶金工业迅速发展,更先进的技术和设备进入冶金厂矿。我们也陆续收到用户反馈的意见和修订建议。经过对反馈的意见、建议的总结归纳和酝酿筹备,从2004年5月开始,我们分期分批对教材进行修订,并命名为《冶金职业技术教育丛书》。新丛书在原教材的基础上,进行了大量的增补和删减工作,力求保持内容新颖,强调理论联系实际,使之更符合冶金职业技术教学与实践工作的需要。

为进一步提高质量,缩短出版周期,我们委托原书的主编承担修订任务,以满足用户的需求,敬请广大读者在使用过程中,把意见和建议反馈给我们。

冶金工业职业技能鉴定指导中心

2005年8月

目 录

绪 论	(1)
-----------	-----

第一篇 金属塑性变形原理

第一章 应力和变形	(4)
第一节 力和应力	(4)
第二节 变形	(6)
第三节 应力状态及其图示	(6)
第四节 变形图示和变形力学图示	(9)
思考题	(11)
第二章 塑性变形的基本定律	(12)
第一节 体积不变定律	(12)
第二节 最小阻力定律	(13)
第三节 弹—塑性变形共存定律	(14)
思考题	(15)
第三章 金属压力加工中的外摩擦	(16)
第一节 外摩擦的概念及其作用	(16)
第二节 摩擦定律及摩擦系数确定	(18)
第三节 影响外摩擦的因素	(20)
第四节 轧制工艺润滑	(22)
思考题	(23)
第四章 金属的塑性及变形抗力	(24)
第一节 塑性的概念	(24)
第二节 塑性指标及塑性图	(24)
第三节 影响塑性的主要因素及提高塑性的主要途径	(26)
第四节 金属的变形抗力	(30)
思考题	(33)

第五章 金属塑性变形时应力和变形的不均匀分布	(34)
第一节 应力和变形的不均匀现象	(34)
第二节 基本应力、附加应力和残余应力	(36)
第三节 产生不均匀变形的原因	(37)
第四节 不均匀变形引起的后果及预防措施	(42)
思考题	(43)

第二篇 轧制原理

第六章 轧制的基本问题	(44)
第一节 简单轧制条件	(44)
第二节 变形区主要参数	(45)
第三节 轧制变形量的表示方法	(46)
第四节 轧制速度与变形速度	(48)
思考题	(50)
第七章 实现轧制过程的条件	(52)
第一节 咬入条件	(52)
第二节 稳定轧制条件	(54)
第三节 压下量、轧辊直径和咬入角之间的关系	(56)
第四节 最大压下量计算及改善咬入的措施	(57)
思考题	(60)
第八章 轧制时金属的宽展	(61)
第一节 宽展的概念及其种类	(61)
第二节 影响宽展的因素	(62)
第三节 计算宽展的公式	(66)
思考题	(68)
第九章 轧制过程中的前滑与后滑	(69)
第一节 轧制时的前滑和后滑	(69)
第二节 计算前滑值的公式	(72)
第三节 中性角	(73)
第四节 影响前滑的因素	(75)
第五节 连轧常数与前滑的关系	(78)
思考题	(78)
第十章 轧制压力	(80)
第一节 轧制压力的概念	(80)
第二节 接触面积的计算	(81)

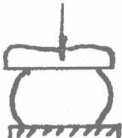
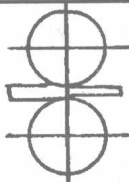
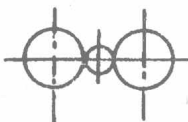
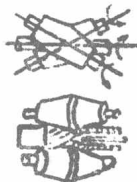
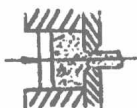
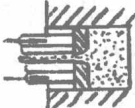
第三节	影响单位压力的因素	(83)
第四节	计算平均单位压力的公式	(85)
思考题		(94)
第十一章	轧制力矩及轧制功率	(95)
第一节	主电动机传动轧辊所需力矩	(95)
第二节	各种力矩的计算	(95)
第三节	按能耗计算轧制力矩	(98)
第四节	主电机容量校核	(100)
思考题		(102)

绪 论

炼钢车间铸出的钢锭，其内部组织较疏松，晶粒粗大而且不均匀，偏析比较严重，因此钢锭都要经过压力加工使其变成钢材才能为用户所使用。连铸坯的质量较模铸锭有一定提高，但也不能被用户直接使用。金属压力加工是金属在外力作用并且不破坏自身完整性的条件下，稳定改变其形状与尺寸，而且也改善其组织和性能的加工方法。这种加工过程可以说是使金属产生塑性变形的过程，因而也叫做金属塑性加工。

压力加工的种类按工件的受力与变形特征可分为五种（如表 1 所示）。

表 1 金属压力加工的分类

锻 造			
自 由 锻		模 锻	
锻 粗	延 伸		
			
轧 制			
纵 轧	横 轧	斜 轧	
			
挤 压		拉 拔	冲压（拉延）
正挤压	反挤压		
			

一、锻造

锻造是用锻锤的冲击力或压力机的压力使金属改变成所需形状和尺寸的一种加工方法。它分为自由锻和模锻两种。可生产几克到 200 吨以上的各种形状的锻件，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，使其横断面缩小、形状改变、长度增加。轧制可分为纵轧、横轧和斜轧。纵轧时两轧辊旋转方向相反，轧件的运动方向与轧辊轴线垂直。横轧时两轧辊旋转方向相同，轧件作旋转运动且与轧辊转动方向相反，轧件纵轴与轧辊轴线平行。斜轧时轧辊的转动方向相同，轧件纵轴与轧辊轴线成一定倾斜角，轧件变形时产生螺旋运动。用轧制方法可生产板带材、各种断面的型材、管材、变断面轴、齿轮、周期断面型材、丝杠、钢球等。

三、挤压

把坯料放进挤压缸中靠水压机的推头，使其从一定形状和尺寸的模孔中挤出。用挤压方法可生产各种型材和管材。

四、拉拔

拉拔是用拉拔机的钳子把金属从一定形状和尺寸的模孔中拉出，使金属工件横断面缩小、长度增加的方法。可生产出各种断面的型材、线材和管材。

五、冲压

靠压力机的冲头把厚度较小的板带顶入凹模中进行拉延的方法称冲压，可生产出各种杯件和壳体（如汽车外壳等）。

金属压力加工方法与其他加工方法（如切削、铸造、焊接等）相比，它具有下述主要优点：

1. 金属在产生塑性变形后，其组织、性能都得到改善。
2. 金属压力加工过程中，除烧损、切头切尾外，不产生切削等废料，因而成材率高。
3. 金属压力加工有很高的生产率。
4. 随科学技术的发展，用压力加工方法也可得到较高精度的少切削或无切削产品。

由于这些优点，在钢的总产量中，除少数铸件外，90% 以上的钢都经过压力加工成材，而且由于各种加工方法出现，压力加工的产品越来越多。

在压力加工领域内，轧制尤其占有突出的地位，其发展速度也很快。在钢铁企业中，除极少数特殊钢材外，绝大部分都以轧制方式加工成各种钢材。轧钢已在大型化、连续化、自动化和高速化方面发展到很高水平。

本课程是轧钢工种的专业基础理论课。在本课程中，我们将学到金属塑性变形和

轧制过程中有关金属变形和力学方面的基础理论知识，为进一步学好其他专业课打下基础。

金属压力加工的各种方法虽然都有各自的成型特点，但在变形和力学方面都有共同的基础。如加工成型都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，金属质点的流动都遵循共同的规律。我们在本课程中就是要讨论这些共同的规律和其中个别的特点，以便在生产中合理利用这些规律，有效地指导生产实践，以提高产品的产量和质量，降低能耗和原材料消耗，充分发挥设备的潜力。

第一篇 金属塑性变形原理

第一章 应力和变形

第一节 力和应力

一、外力

金属在外力作用下产生塑性变形。作用在变形体上的外力有作用力和约束反力。

(一) 作用力

压力加工设备的可动工具部分对工件所作用的力叫作用力，又叫主动力。如锻压时，锤头的机械运动对工件施加的压力 P (见图 1-1)；拉拔时，拉丝钳对变形体所作用的拉力 P (见图 1-2)；挤压时，活塞的顶头对工件作用的推挤压力 P (见图 1-3)。

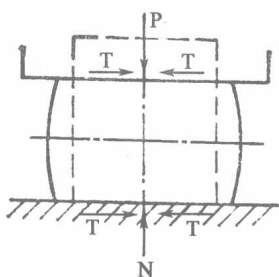


图 1-1 自由锻造

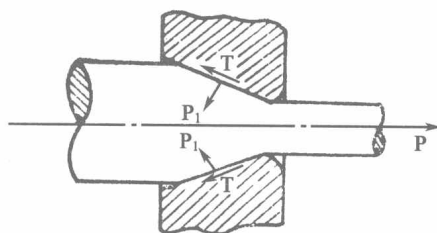


图 1-2 拉拔

压力加工中作用力的大小由物体变形时所需要的能量来决定，可以用仪器实测，也可以用理论和经验的方法计算出来。

(二) 约束反力

工件在主动力的作用下，其运动受到工具的阻碍而产生变形。变形物体的整体运动和质点流动受到工具另外组成部分的约束，及工件与工具接触面上摩擦力的制约。工件在这些力的作用下产生变形，这些力叫约束反力。变形工件与工具的接触面上的

约束反力有正压力和摩擦力两种。

1. 正压力

沿工具和工件接触面的法线方向阻碍工件整体移动或金属流动的力，它指向变形物体，并和接触面垂直，如图 1-1 中的 N 和图 1-2 中的 P_1 。

2. 摩擦力

沿工具和工件接触面切线方向阻碍金属流动的力，其方向和金属质点流动方向或变形趋势相反，如图 1-1、图 1-2、图 1-3 中的 T 。

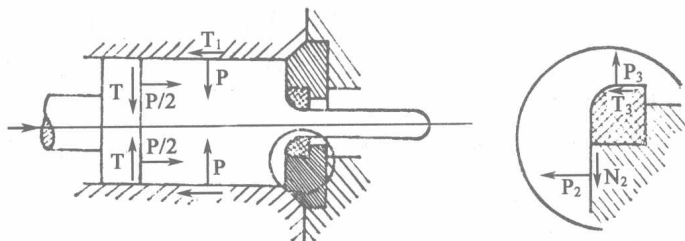


图 1-3 挤压

约束反力与反作用力是根本不同的。约束反力是作用在工件上的力，而反作用力是作用在工具上的力。

二、内力和应力

当物体在外力作用下，并且物体的运动受到阻碍时，或者由于物理或物理化学等作用而引起物体内原子之间距离发生改变，在物体内部产生的一种力，叫做内力。

内力可由以下两种原因引起：

(一) 为平衡外部的机械作用，在金属体内部产生与外力相平衡的内力。

(二) 由于物理或物理化学作用而引起内力。不均匀变形、不均匀加热或不均匀冷却（物理过程）及金属的相变（物理化学过程）等，也可以促使金属内部产生内力。图 1-4 所示金属块由于温度不均匀，右边温度高，左边的温度低，引起右边的热膨胀大于左边，然而金属是一个整体，因此温度高的一侧将受到温度低的一侧的限制，不能达到应有的膨胀伸长而产生压缩内力的作用；同样，温度较低的一侧受到温度较高一侧的影响而受拉伸内力作用。这个金属块内，拉力和压力是互相平衡的。

轧件轧制后空冷，除了冷却不均匀引起温度差产生内力外，金属各部分先后进行的相变也会在金属体内产生内力。

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。单位面积上作用的内力称为应力。一般所说的应力，应理解为一极小的面积 ΔF 上的总内力 ΔP 与其面积 ΔF 的比值的极限。其数学表达式为

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

第二节 变 形

金属在受力状态下产生内力的同时,其形状和尺寸也产生变化,这种现象称为变形。

金属是通过原子间的作用力(吸引力和排斥力),把原子紧密地结合在一起的。为使金属产生变形,所施加的外力必须克服其原子间的相互作用的力和能。图1-5为一理想晶体中的原子点阵及其势能曲线示意图。当原子处于彼此平衡的间距时,原子间的吸引力与排斥力相等,各原子均处于最稳定的位置上,其间的位能最低,即内力为零。显然,在AB一线上的原子处于 A_0 、 A_1 、 A_2 等位置上的时候最为稳定。如果 A_0 处的原子要移到 A_1 位置上,就必须越过高为 h 的“势垒”才有可能。

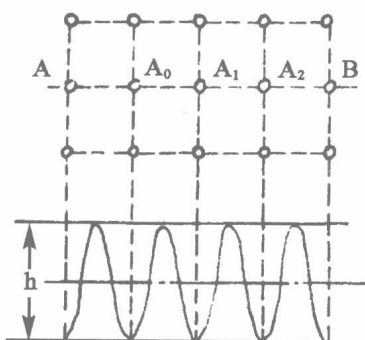


图1-5 理想晶体中的原子排列
及其位能曲线

当所施加的外力或能不足以克服上述势垒时,仅能迫使原子离开其稳定平衡位置而处于不稳定状态,即原子间距有所改变,表现为物体产生一定变形,一旦外力去除,原子仍要回到原来的平衡位置上去,结果使变形消失。这就是所谓的弹性变形。弹性变形的实质,就是所施加的外力或能不足以使原子越过势垒。

如果能越过上述势垒而使大量原子定向地从原有的平衡位置转移到另一平衡位置,这时即使外力去除,原子也不能恢复到原始位置上去,这就表现为塑性变形。

从宏观来看,金属在外力作用下产生变形,外力去除后,又恢复到原来的形状和尺寸,这种变形称为弹性变形,如果外力去除后,变形金属的形状和尺寸能保留下来,不会恢复到变形前的状态,这种变形称为塑性变形。由于塑性变形后原子间距和原来一样,所以塑性变形时虽然物体的形状和尺寸改变了,但体积不变。塑性变形中所加的能不断转变成热,这些热除向周围空间散失外,还可使变形体温度升高。

实际上原子不断以平衡位置为中心作热振动,随温度升高其振幅增大,振动动能增加,有助于使原子越过势垒到达新的平衡位置,由这点看,随温度升高,塑性变形越容易。

第三节 应力状态及其图示

一、应力状态

在金属压力加工过程中,外力是从不同的方向作用于工件上的,因而在金属内相

应产生复杂的应力状态。为了研究变形体内变形时的应力状态，可在变形体内取一无限小的正六面体（可看成是一个点），这样可以认为该六面体各个面上的应力分布是均匀的，而且只要在主坐标系的条件下，作用在该六面体各个面上的应力只有正应力，而切应力为零。这种只有正应力而切应力为零的平面称为主平面。主平面上的正应力称为主应力。

力学上可以证明，只要知道作用于微小单元体上的三个主应力，该点的应力状态即可确定，因为通过该点任何方向的应力都可以用数学方法计算出来。这里对其道理和计算方法都不加讨论。

二、应力状态图示

应力状态图示是用来表示所研究的某一点（或所研究物体的某部分）在三个互相垂直的主轴方向上，有无主应力存在或主应力方向如何的定性示意图。从一个轴向来看，所能产生的主应力，不外乎只有拉应力（箭头向外指）和压应力（箭头向内指）两种。

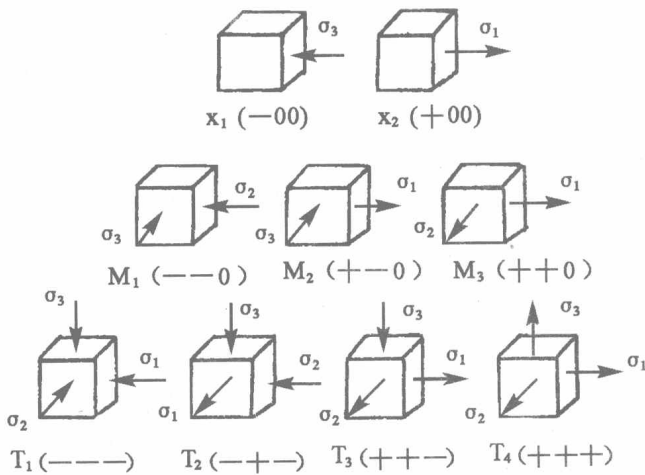


图 1-6 可能的应力状态图示

a—线应力状态；b—面应力状态；c—体应力状态

为了简化和定性说明变形物体受力后引起的某些后果，常把压力加工过程中的长、宽、高方向近似地认为和主轴方向一致，与长、宽、高垂直的截面看成是主平面，在该平面上只作用有正应力，即主应力。按主应力的存在情况和主应力的方向，应力状态图示共有九种可能的形式，其中线应力状态两种，平面应力状态三种，体应力状态四种，如图 1-6 所示。

在力学中，常规定正应力的符号是拉应力为正、压应力为负。主应力按其代数值的大小排列其顺序，即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，规定 σ_1 是最大主应力， σ_3 是最小主应力， σ_2 是中间主应力。

图 1-7 举出了各种压力加工方法应力状态图示的例子。镦粗、挤压、轧制均属三

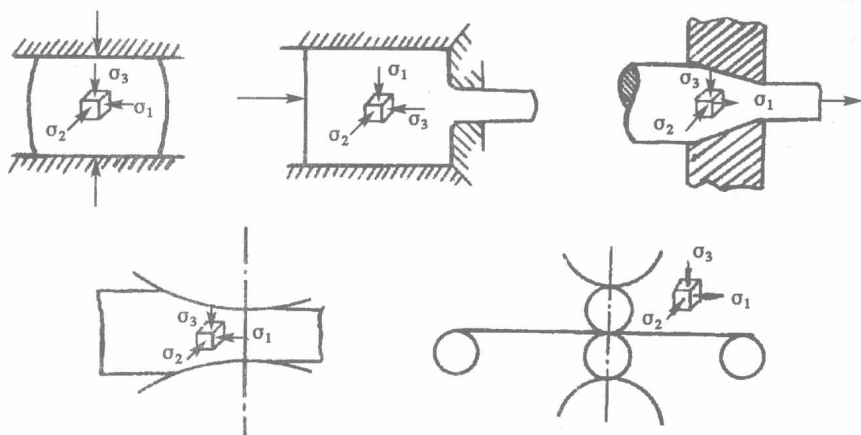


图 1-7 不同加工条件下的应力状态图示

向压应力状态。镦粗时， σ_1 、 σ_2 主要由摩擦力的作用引起， σ_3 主要由主动力和正压力作用引起。 σ_3 是绝对值最大的压应力，其代数值最小。

结合图 1-3 可以看出，挤压时主动力、正压力、摩擦力都会引起压应力，因此，挤压时的三个主应力都是绝对值相当大的三向压应力状态，也叫做三向压应力状态很强烈。

平辊轧制时也是三向压应力状态。 σ_1 主要由阻碍金属纵向流动的摩擦力引起， σ_2 主要由阻碍金属横向流动的摩擦力引起， σ_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变为拉应力 σ_1 。

在不同的压力加工过程中，金属反映出有不同的加工性能。大量实践表明，塑性变形中拉应力最容易导致金属破坏，因为它使金属内细小的疏松、空隙、裂纹等缺陷扩大。压应力有利于减小或抑制缺陷的发生与发展。实验已经证明，在强烈的三向压应力状态下，甚至可能使脆性材料砂石或大理石也能产生一定程度的塑性变形。相反，在三向拉应力状态下，即使是一般公认的高塑性金属材料铅，也会很快地失去塑性而产生断裂。因此，对某些低塑性金属，可以采取挤压的方式进行加工。而张力轧制的特点之一是可以相应地减少轧制压力，使金属带材能更容易地轧得更薄。应该指出，变形体内的应力状态，不是孤立静止的，可以互相转化。例如，将一金属圆棒沿纵轴方向拉伸，显然应力状态应为 $X_2 (+\infty)$ ，但随着变形增加，出现细颈时，如图 (1-8) 所示，由于应力线在细颈处的弯曲，使该处的应力状态转化为三向拉应力状态 $T_4 (+ + +)$ 。因此，在拉伸试验中，当试件出现细颈时，很快就会有在细颈处产生断裂。

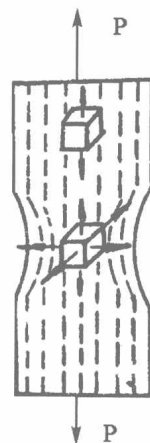


图 1-8 拉伸时细颈处的应力图示

第四节 变形图示和变形力学图示

一、变形图示

金属产生塑性变形时，在主应力方向上的变形称为主变形。为了定性地说明变形区中某一部分或整个变形区的变形情况，常常采用主变形状态图示（简称变形图示）。所谓变形图示就是在一微小立方体上用箭头表示三个主变形是否存在及变形的方式。如果没有变形就不画箭头，伸长变形箭头外指，缩短时箭头向里指，如图 1-9 所示。但应注意，箭头的指向不能表示变形的大小。

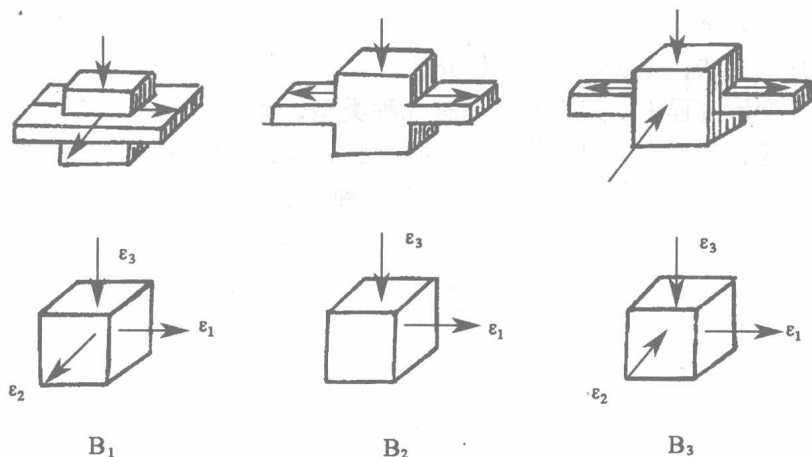


图 1-9 三种可能的变形图示

(a) 变形方式；(b) 变形图示

由于受体积不变条件的限制，虽然压力加工的方式很多，但只存在三种可能的变形图示：

1. B_1 变形图示，表示一向缩短、两向伸长，如平砧上镦粗或平辊上轧制较厚而较窄的轧件，有宽展时的情况，均属这种变形图示。

2. B_2 变形图示，表示一向缩短、一向伸长，第三个主轴方向变形为零。如轧制宽而薄板带时，由于横向阻力很大，宽展可以忽略时，属这种变形图示。这种变形又称平面变形，因为变形时被压缩的金属质点，只在同一垂直纵平面内，沿纵向流动，不能横向流动。

3. B_3 变形图示，表示两向缩短、一向伸长。挤压和拉拔时，均属这种变形图示。

二、变形力学图示

为了全面了解压力加工过程的特点，应该把变形过程中的主应力图和主变形图结合

起来进行分析,才能全面了解加工过程的特点。如轧制过程,在变形区内任一点,应力状态图示为 $T_1(- - -)$, 变形图示为 $B_1(- + +)$ 。这种组合称为变形力学图示。

变形力学图示在压力加工中的重要性,可通过下面例子来说明。例如将短而粗的圆断面坯料,加工成为细长的圆断面棒材,它可以由 B_3 变形图示得到。但确定压力加工方法并不是简单的事。因为同一种产品可以用不同的压力加工方法得到,而不同的压力加工方法有不同的应力状态,加工的难易程度、生产效率也不一样。上述例子至少可以有以下四种方法来完成这种产品的加工:

- (1) 用简单拉伸方法,其应力状态图示为 $X_2(+ 00)$;
- (2) 在挤压机上进行挤压,其应力状态图示为 $T_1(- - -)$;
- (3) 在孔型中进行轧制,其应力状态图示为 $T_1(- - -)$;
- (4) 在拉拔机上经模孔拉拔,其应力状态图示为 $T_2(+ - -)$ 。

不同的变形力学图示影响着变形金属的塑性和产品的质量。根据变形力学图示来选择合理的加工方法,是必须重视和研究的。

金属塑性变形过程中,其应力状态有九种类型,而其变形图示有三种方式。从数学的角度来考虑,变形力学图示的组合可能有 $3 \times 9 = 27$ 种。但数学上的组合并非都有存在的可能。实际可能的变形力学图示只有 23 种,另外四个组合没有物理意义。因为应力状态为 $X_1(- 00)$,其变形图示只可能是 $B_1(- + +)$,而不可能存在 B_2 和 B_3 这两种变形图示;同样,在应力状态 $X_2(+ 00)$ 下,只可能是 $B_3(- - +)$,不可能存在 B_1 、 B_2 变形图示。

以上只是定性地分析了应力状态图示和变形图示之间可能的组合。实际上,从理论上可以证明,当三个主应力的符号已经确定时,相应的变形图示是惟一的,它们之间有确定的对应关系。这种关系是,在三个主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 中都减去平均应力 σ_m ,余下的应力分量 $(\sigma_1 - \sigma_m)$ 、 $(\sigma_2 - \sigma_m)$ 、 $(\sigma_3 - \sigma_m)$ 和符号就和变形图示一致。平均应力为

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (1-2)$$

例如,若变形体内三个主应力分别为 $\sigma_1 = 50 \text{ N/mm}^2$ 、 $\sigma_2 = -50 \text{ N/mm}^2$ 、 $\sigma_3 = -210 \text{ N/mm}^2$,此时

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{50 + (-50) + (-210)}{3} = -70 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_1 - \sigma_m = 50 - (-70) = 120 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_2 - \sigma_m = -50 - (-70) = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_3 - \sigma_m = -210 - (-70) = -140 \text{ N/mm}^2,$$

可以看出,和这三个应力分量相对应的变形图示为: ϵ_1 和 ϵ_2 是伸长,而 ϵ_3 是缩短。

又如,轧制薄带材时宽展为零,即 $\epsilon_2 = 0$,与之对应的 $\sigma_2 - \sigma_m = 0$,即

$$\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = 0$$