

· 高等专科学学校教学用书 ·

金属塑性 变形原理

GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

TG111.7
7.5



金属塑性变形原理

冶金工业出版社

ISBN 7-5024-1689-7



9 787502 416898 >

ISBN 7-5024-1689-7
TG·201(课) 定价12.80元

高等专科学校教学用书

金属塑性变形原理

重庆钢铁高等专科学校 苏玉芹 主编

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据
金属塑性变形原理/苏玉芬主编. —北京:冶金工业出版社,
1995高等专科学校教学用书
ISBN 7-5024-1689-7

I. 金… I. 苏… II. 金属-塑性变形-高等学校-教材
参考资料 N. TG111.7

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第03831号

出版人 魏启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)
有色曙光印刷厂印刷, 冶金工业出版社出版, 各地新华书店发行
1995年11月第1版, 1995年11月第1次印刷
787mm×1092mm 1/16, 16印张, 377千字, 247页, 1-2000册
12.80元

前 言

《金属塑性变形原理》是根据冶金工业部“八五”高等专科教材出版规划和金属压力加工专业教学计划、教学大纲的要求编写的。《金属塑性变形原理》是金属压力加工专业的专业基础理论课，通过本门课程的学习可为进一步学习专业课打下理论基础。本书可供冶金高等专科学校作为教学用书，也可供科技人员参考。

本书系统地阐述了金属塑性变形的力学方程、物理本质和基本规律；着重于物理概念的表述，简化了公式的繁琐推导，力求理论联系实际，以加强理论的针对性和实用性。

本书第二、三、八和九章由上海冶金高等专科学校方原栋编写，第一章由上海冶金职工大学黄国钰编写，第四、五、六、七章和绪论由重庆钢铁高等专科学校苏玉芹编写。全书由苏玉芹任主编。在编写过程中，曾得到沈阳黄金学院刘鹤德、上海冶金高等专科学校陆济民、重庆冶金职工大学刘子敬和重庆钢铁高等专科学校肖大志等同志的大力支持并审稿，为此谨向以上同志表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，不妥之处和错漏在所难免，恳请广大读者指正。

编 者

1993.6

AAR 23/10 05

目 录

绪论	1
1 塑性变形力学方程	9
1.1 外力、内力、应力及变形概念	9
1.2 应力状态及主应力图示	14
1.3 应力微分平衡方程	27
1.4 变形程度及主变形图示	29
1.5 变形速度	35
1.6 变形与位移关系方程、变形速度与位移速度关系方程	40
1.7 变形与应力的关系方程	44
1.8 屈服条件	50
1.9 平面变形和轴对称问题的变形力学方程	64
2 主应力法及其应用	71
2.1 主应力法	71
2.2 墩粗	75
2.3 拉拔	88
2.4 挤压	92
3 塑性成形问题的其它解法	98
3.1 上界分析	98
3.2 滑移线场理论及其应用	107
4 金属塑性变形的物理本质	121
4.1 单晶体的塑性变形	121
4.2 晶体滑移过程的实质	126
4.3 多晶体塑性变形的特点	135
4.4 多晶体塑性变形机构	138
4.5 屈服效应与吕德斯带	139
4.6 金属的加工硬化及其影响因素	141
4.7 包辛格效应与形变时效	147
5 塑性变形对金属组织性能的影响	149
5.1 热变形、冷变形和温变形的概念	149
5.2 冷变形时金属组织性能的变化	151
5.3 回复和再结晶	154
5.4 热变形时金属组织性能的变化	160
5.5 热变形过程中的回复和再结晶	162
5.6 温加工变形中组织性能的变化	169
6 压力加工时的外摩擦	172
6.1 压力加工外摩擦的特点及其影响	172
6.2 外摩擦机理及种类	173

6.3 摩擦的种类	174
6.4 影响外摩擦系数的主要因素	176
6.5 轧件与轧辊间摩擦系数的确定	178
6.6 摩擦系数的测定	180
7 不均匀变形	182
7.1 基本概念	182
7.2 变形及应力不均匀分布的原因	188
7.3 变形及应力不均匀分布所引起的后果	195
7.4 残余应力	197
8 金属在压力加工变形中的断裂	201
8.1 断裂的基本类型	201
8.2 裂纹的生成和发展	202
8.3 影响断裂类型的因素	209
8.4 压力加工中金属的断裂	212
9 金属的塑性和超塑性	222
9.1 金属塑性的基本概念及测定方法	222
9.2 影响塑性的因素	226
9.3 超塑性	237
参考文献	247

绪 论

(1) 金属塑性加工在国民经济中的地位

利用金属的塑性,使金属在外力作用下成型的加工方法,称为金属塑性加工。而金属的压力加工过程就是使金属产生塑性变形的过程,所以金属压力加工也叫做金属塑性加工。

金属成型方法有许多种,根据成型金属的质量变化情况,可以把金属成型方法分为:减少质量法、增加质量法和质量保持不变法等。

1) 减少质量法,即用减少物体质量,获得一定形状和尺寸产品的方法。属于这类方法的有金属切削加工的车、刨、铣、钻、磨以及冲裁和蚀刻等。

这类方法的特点主要是改变金属的几何形状及尺寸,而金属的机械性能、物理化学性能和内部组织等几乎不变,或对金属性质及组织虽有影响,也仅限于表面层,例如火焰切割的表面等。

减少质量成型法的优点是产品尺寸精确,表面光洁,其缺点是原料及能量消耗大,成本高,生产率低。

2) 增加质量法,即由小质量的金属积累成大质量产品的方法。属于这类方法的有铸造,焊接和铆接等。

这类方法的优点是可以获得形状复杂的产品,金属消耗少,较经济;其缺点是产品质量不高,如铸件中有组织及化学成分的不均匀,有如缩孔、砂眼、偏析及柱状结晶等的缺陷。若能恰当地选择原材料及工艺规程,则可减少此类方法的缺点,获得较为优良的产品。

3) 质量保持不变法,即通过机械外力的作用,使金属产生塑性变形而获得所需要的形状和尺寸的产品的方法。属于这类方法的加工有金属压力加工的各种方法:锻造、轧制、挤压和拉拔等。在进行金属压力加工时,如果不计切头、切尾、切边和氧化等损失,可以认为变形前后的质量相等。如把铸锭开始几道变形除外,忽略变形中金属的密度变化,也可以认为变形前后金属的体积不变。随着科学技术的发展,无头轧制、连续浇注等新技术的采用,由工艺原因所造成的废料可以极大地减少,所以压力加工又叫做无屑加工。

金属压力加工和金属切削加工、铸造及焊接等过程相比,主要有以下优点:

①金属经过塑性加工后,其组织和性能都得到改善和提高,尤其是对于铸造组织的改善更为显著。因此,一般说来,受交变载荷、服役条件比较繁重的零件,用塑性加工成型的制造方法比较可靠。

②金属塑性加工是金属在固体状态下体积转移的过程,由于无废屑产生,因而可以获得合理的流线分布和较高的材料利用率。

③用塑性加工方法得到的工件,可以达到较高的精度。最近,由于先进设备和技术的应用,一些零件已达到少或无切削的要求。例如精密锻造的伞齿轮,其齿形部分的精度可

达到8级，光洁度已达 $\nabla 6 \sim \nabla 7$ ，可以不经车削加工而直接使用。

④塑性加工方法成型有很高的生产率，适于大量生产。例如在12000t锻压机上锻造汽车用六拐曲轴仅需40s；用轧制方法生产的齿轮比车削加工的齿轮，生产率提高10倍。

由于金属压力加工成型方法具有以上优点，因而在钢的生产总量中，除少部分采用铸造方法直接制成器件以外，占90%以上的钢，都要经过压力加工，以满足汽车、船舶、宇航、军工和机械制造以及国民经济其他部门的需要。也可以这样说，任何行业均直接或间接与压力加工有关。由此可以看出，金属压力加工在国民经济中具有十分重要的地位。

(2) 金属塑性加工方法的分类

金属塑性加工的种类很多，分类方法也不统一。下面主要介绍按加工时工件受力和变形方式和按加工时工件的温度特征等两方面进行的分类。

1) 根据加工时工件受力和变形方式分类

①靠压力作用产生变形的的方式

靠压力作用产生变形的的方式有锻造、轧制和挤压。

A. 锻造 靠锻锤运动锤击工件(图1)。锻造分自由锻(如墩粗和延伸)和模锻两种基本形式。进行自由锻时不使用专用模具，因而锻件尺寸精度低，生产率也不高，所以自由锻主要用于单件、小批量或大锻件的生产。模锻是适于大批量生产的锻造方法，锻件成型要使用适合于每个锻件的模具来控制，因此锻件的外形和尺寸相当精确，生产率也高，这是自由锻无法比拟的。近年来，随着科学技术的发展以及锻压设备的刚度和强度的提高以及新模具材料的应用，对某些中小型锻件采用不加温或少加温的锻造方法，即所谓冷锻、温锻，这既可节约能源，又可免除加热的不良后果(如氧化、脱碳)，为提高锻件的精度创造了条件，是实现少切削或无切削的重要途径。

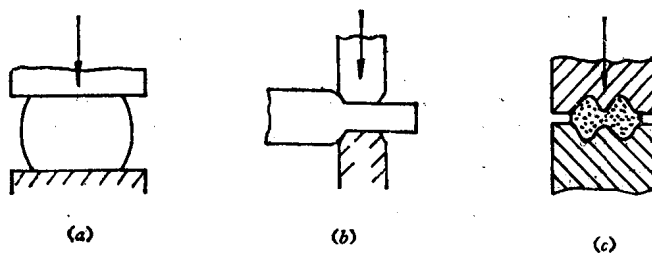


图1 锻造简图

(a) 墩粗；(b) 延伸；(c) 模锻

锻造可生产几克重到200t以上的各种形状的锻件，其产品如曲轴、连杆、飞机的螺旋桨、枪身、炮筒以及高压锅炉的圆筒等。

B. 轧制 坯料通过两个转动的轧辊受到压缩，使其横断面变小，形状改变，长度增加。根据轧辊与轧件运动关系可将轧制分为纵轧、横轧和斜轧三种基本形式。

纵轧如图2(a)所示，两工作轧辊转动方向相反，轧件的纵轴线与轧辊轴线垂直，轧件纵轴获得前进运动。金属不论在热状态和冷状态都可以进行纵轧。它有很高的生产率，能加工长度很大和质量较高的产品。它是轧制生产中最常见的一种方法，能生产各种简单断面、复杂断面的型材，板带材等。

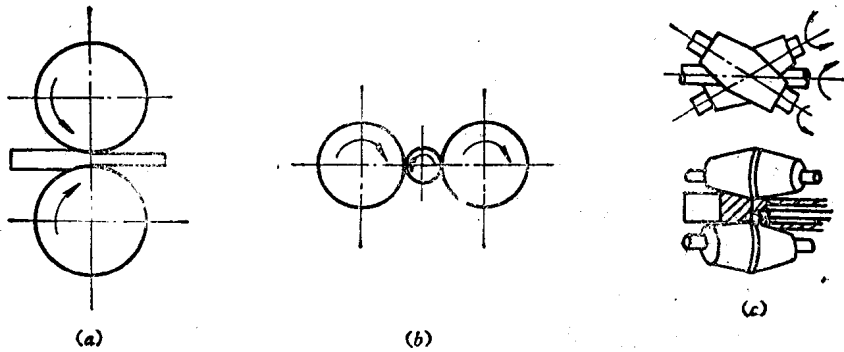


图2 轧制简图

(a) 纵轧; (b) 横轧; (c) 斜轧

横轧如图2(b)所示,工作辊旋转方向相同,轧件的纵轴线与轧辊轴线平行,轧件获得绕纵轴旋转运动。它可生产变断面轴、齿轮、丝杠、周期断面型材以及钢球等。

斜轧如图2(c)所示,两工作辊旋转方向相同,轧件纵轴线与轧辊轴线成一定倾斜角度,轧件在变形过程中除有绕其轴线的旋转运动外,还有前进运动。它可生产无缝管材。

轧制是金属压力加工中规模最大的一种形式。冶金工厂全部钢产量的85%~90%要经过轧制,轧制品种达数万种,有厚达几百毫米的装甲和造船钢板,也有薄到0.001mm的钢带,有直径达到400mm的无缝管,也有直径小到0.25mm的毛细管,还有各种形状和周期断面的型材,而且目前机械制造部门也广泛地采用轧制方法生产零件,所以轧制生产日益得到发展,成为国民经济建设中的一个重要环节。

C. 挤压 坯料在挤压筒中靠挤压机的挤压轴,使坯料从一定形状和尺寸的模孔中挤出。挤压分正挤压和反挤压两种基本形式。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3)。由于有色金属的加工具有温度低、变形抗力小以及多规格、小批量生产的特点,所以挤压多应用在有色金属的加工,近年来也应用于黑色金属的加工,特别是对于耐热合金及低塑性金属的加工。挤压法可生产各种断面的型材和管材。

②靠拉力作用产生变形的的方式

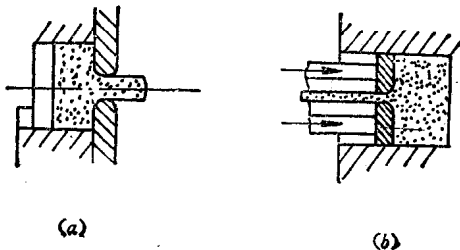


图3 挤压简图

(a)正挤压; (b)反挤压

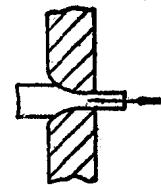


图4 拉拔简图

靠拉力作用产生变形的方式有拉拔、冲压和拉伸成型。

A. 拉拔 用拉拔机的钳子夹住金属,使金属从一定形状和尺寸的模孔中拉出(图4)。拉拔一般是在冷状态下进行,可拔制断面尺寸很小的产品,如直径为0.015mm的金属丝,直径为0.25mm的金属管;产品表面光洁度、尺寸精确度及金属的强度(由于加工硬化),均有所增加。拉拔产品种类很多,可生产各种断面的型材、线材和管材,被广泛地应用在电线、电缆线、金属网以及各种仪器制造业中。

B. 冲压 冲压(图5)属于板料成型,是用冲头将金属板顶入凹模,冲压成所需要形状和尺寸的产品。冲压一般都在室温下进行,故通常称为冷冲压。薄板的冲压生产,应用在各种不同的企业中,其产品有飞机零部件,子弹壳、汽车零件、仪表零件以及日常生活用品如锅、碗、勺、盆等。

C. 拉伸 板料在外力作用下,沿一定形状的模具包制成型(如图6)。如带材的拉力矫直等。

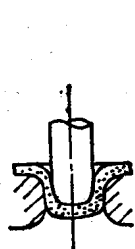


图 5 冲压简图



图 6 拉伸简图

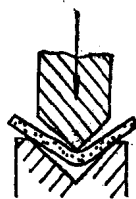


图 7 弯曲简图

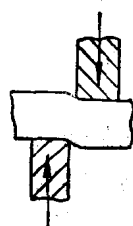


图 8 剪切简图

③弯矩和剪力作用使金属产生变形的方式

A. 弯曲 在弯矩作用下成型(图7)。如板带弯曲成型和型材的矫直。

B. 剪切 坯料在剪力作用下进行剪切变形(图8)。如板料的冲剪和型材的剪切。

④组合加工变形方式

由于生产发展的需要,也为了扩大品种和提高加工成型效率,常常把上述基本加工变形方式组合起来,形成新的组合加工变形过程。例如轧制,目前已成功地研究出轧制和其他基本加工变形方式的组合加工方法,即轧制与锻压、挤压、拉拔、弯曲和剪切的复合加工(金属塑性加工各基本方法的复合)。一个复合加工过程可达到其中一两个目的或同时达到几个目的,最终达到节能、节材、高产优质、多品种以及获得特殊用途材料的目的。

A. 锻造和轧制组合的锻轧过程

锻轧是坯料被镶有锻模的一对反向转动的轧辊咬入后产生局部塑性变形,从而得到各种制坯和成品锻件的加工方式(图9)。它与锻压相比,设备吨位小,生产率高,材料消耗少,模具寿命长,易于实现机械化和自动化,公害小,劳动条件好,可生产各种变断面零件,如汽车用经济变断面弹簧,用锻轧法生产就很经济。

B. 轧制和挤压组合的轧挤过程

轧挤过程(图10)如纵轧压力穿孔,可以对斜轧法难以穿孔的连铸坯(易开裂和折叠)进行穿孔,并能使用方坯代替圆坯。轧挤可提高生产率和成品率,且投资少,耗能低。

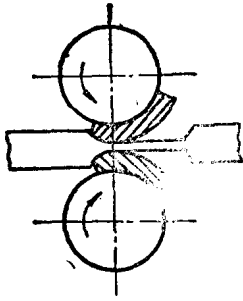


图 9 锻轧简图

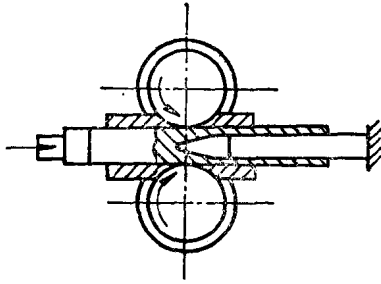


图 10 轧挤简图

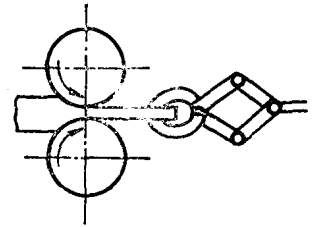


图 11 拔轧简图

C. 拉拔和轧制组合的拔轧过程

拔轧(图11)是工件前端在外拉力作用下,使之通过由游动辊组成的孔型,从而拔制出各种断面形状的实心 and 空心制品。轧辊装于滚动轴承上,可不用电动机驱动而靠拉拔的轧件带动。拔轧的主要优点是拉拔力低,可增加道次和总变形,从而减少退火次数,且工具费用低,对润滑剂要求不高,比常规轧制的宽展小,工件形状易于控制,适用于拉拔异形件;此外由于拔轧机结构简单,动力小,投资省,所以拔轧是盘条、棒材、管材深加工的高效生产方法,应大力发展。

D. 轧制和弯曲组合的辊弯过程

辊弯过程是在辊弯轧机上,通过一系列轧辊孔型,将热轧带材或退火后的冷轧带材逐渐弯曲成要求外廓形状的型材(图12)。辊弯成型不仅可以得到外形复杂的开口或闭口型材,还可生产各种断面的冷弯型材和特殊型材。

辊弯法的优点是,与热轧型材相比可节约金属25%~35%,产品精度高,生产连续化,设备投资少,制造机构装配容易,节约劳动力。因此辊弯型材生产有着显著的经济效益和社会效益,是我国今后应大力发展的加工方式。

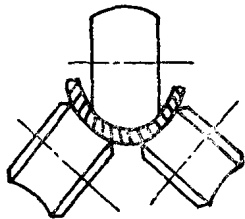


图 12 辊弯简图

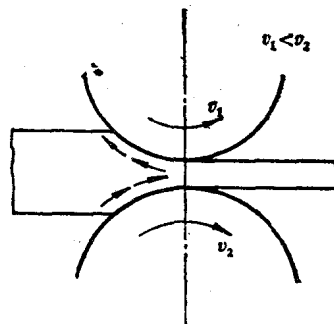


图 13 搓轧简图

E. 轧制和剪切组合的搓轧过程(异步轧制)

异步轧制是利用上下工作辊的线速度不相等,造成上下辊辊面对轧件摩擦力方向相反的搓轧条件的轧制过程(图13)。它与常规轧制比较有如下优点:能显著减少轧制道次和中间退火次数,尤其是对轧制薄而硬的带材;异步轧制可大幅度降低轧制压力,进行良好的板型控制,从而提高轧制精度。

近年来连铸连轧方法日益得到广泛的应用。连铸连轧是指高温铸坯出连铸机后，不经连续加热炉，只经边角补偿均热，即直接进行轧制并与连铸基本上同步。因此，可节省铸锭、脱模、均热、初轧、钢坯连轧等工序，提高金属收得率且产量增加质量良好，很适合我国小钢铁联合企业，满足投资少、品种多、见效快，易于自动化的要求。

2) 根据加工时工件的温度特征分类

按加工时工件的温度特征可分为热加工、冷加工和温加工。

①热加工：即充分再结晶温度以上进行的加工。近年来为了提高钢材的强韧性能，或为获得某些特殊性能，如电磁、冲压及热强等性能，在热加工中常采用控制轧制，即在轧制过程中控制加热温度、变形终了温度、变形程度以及加工后的冷却速度等。

②冷加工：即在不产生回复和再结晶的温度以下进行的加工。金属由于冷加工产生加工硬化和塑性降低，故为了能继续加工，需经退火工序以获得最终产品。冷加工过程的实质就是冷加工-退火-冷加工，直到成品退火的反复循环过程。通过冷加工，可得到表面光洁、尺寸精确、组织性能良好的产品。

③温加工：在产生回复的温度下进行的加工。温加工的目的根据加工产品的不同而有差异。如奥氏体不锈钢的温轧，主要是为了降低变形抗力以便于加工；而高速钢的温拔、温轧，则是为了改善钢的塑性，提高产品合格率。

温加工在板料成型和线材拉拔中具有很多优点，因为在温加工条件下屈服应力降低，塑性提高，同时也没有高温加热的费用以及由此引起的其他问题，其产品表面质量好，工具的磨损和变形都比较小。

(3) 金属塑性变形理论的发展概况

金属塑性变形原理是一门新兴的应用学科。它是在塑性变形的物理、物理化学以及塑性力学基础上形成的一门学科。金属塑性变形的物理、物理化学方面所研究的内容，主要属于金属学和金属物理范畴。金属塑性变形原理从中汲取了有关金属塑性变形的理论，并按本学科的要求加以应用和发展。从某种意义上说，金属学及金属物理的发展水平对金属塑性变形理论的发展有很大的影响。

金属塑性变形物理方面的突出成就，是本世纪30年代位错理论的提出。位错是晶体中存在的一种线性缺陷，因此，在剪应力作用下，晶体容易滑动，并由此引起金属塑性变形。位错理论可以用来解释金属塑性变形中的各种现象，如滑移、孪晶、硬化、回复、再结晶等，从而使人们对金属塑性变形机理获得科学的认识。此外，在塑性变形理论中物理方面的主要内容，是从宏观角度研究金属的塑性及变形抗力、塑性变形和金属材料的组织结构与性能变化的关系，为改善金属材料的加工性能，合理地选择加工条件，以保证塑性变形的顺利进行并通过塑性变形的手段来改善组织结构，从而为获得所需使用性能的金属材料提供理论依据，为改进和开发新的塑性加工工艺明确方向，开拓新路。

近十年来，人们发现了提高塑性，降低变形抗力的另一途径，即利用金属的超塑性来进行塑性加工。金属在超塑性状态下，其延伸率可达到百分之一千到二千。现在已成功地用来制造一些形状特别复杂的零件，如喷气式发动机涡轮轮盘和叶片等。

塑性变形的物理化学方面的研究是金属组成、相态与塑性变形之间的关系，也研究变形金属与模具的表面状态、接触面之间的摩擦和摩擦机理及其对塑性变形过程的影响等问题，从而使我们有可能会深入理解各种工艺因素，如工具形状、变形速度、变形程度以及

润滑等对能量消耗、热效应、金属的流动及其最终性能等所产生的影响。

大多数金属塑性加工理论最终都涉及到预测金属变形时的应力以及应施加的作用力等问题。因此,随着塑性加工生产的不断发展,塑性力学作为塑性变形理论发展的一个分支也相继得到发展。塑性力学是研究材料在外力作用下发生塑性变形时的应力应变关系(本构关系)及所形成的力学问题的科学。40年代以后,塑性力学理论在很多国家都有所发展,应用滑移线理论来解释金属成形问题的情况逐渐增多,滑移线方法除应用于解各向同性无硬化材料的塑性平面应变问题外,也应用于求解平面应力问题及各向异性材料的问题。50年代,根据极值原理提出了求极限载荷的上限法。这一方法的提出不仅简化了(与滑移线法相比)求极限载荷的计算,而且计算塑性成型时的载荷比真实载荷高,因此称为上限法。这种方法应用比较简单,在工程上较安全。

近年来,计算机技术已应用到塑性成型问题的解题上,用以确定变形体内各点的应力、应变、位移速度等,并已开始用有限元法来分析金属塑性成型方面的问题,使求解简化而迅速、准确。

我国是具有五千年文化的古国,在长期的生产和实践中,自然科学和社会科学方面都做出了很多重大贡献。从一系列文献中,完全可以证明,我们祖先在金属压力加工方面很早以前就已经取得巨大成就。锻工工艺在我国起源极早,远在春秋战国时代(2800年前)楚国干将、莫邪曾为楚王制作两把宝剑,就有表明其削铁如泥般质量良好的记载。南北朝时,诗人刘焜曾以诗歌赞颂锻造:“何意百炼钢,化为绕指柔”。由此可知当时的冶金事业得到了发展,炼钢过程和金属压力加工过程已经联系起来,并且压力加工可以改善金属的质量,也反映了当时锻工技巧的熟练和成品质量的优良。宋时沈括在《梦溪笔谈》中曾记有“青堂羌善锻甲,铁色青黑,莹彻可鉴毛发,以麋皮为酒旅之,柔软而韧……。凡锻甲之法,其始甚厚,不用火,冷锻之比元厚三分减二乃成……。隐然如瘃子,……谓之瘃子甲……”。记载表明,我国羌族人民冶锻的瘃子甲,质量良好,柔韧而坚固;同时在锻造时所采用的66%的压下比,与现代科学观点为了保证成品质量,压下量应取为70~90%的数值是十分接近的。

明代宋应星所著《天工开物》是我国古代科学技术的百科全书,内容丰富,图文并茂,有很高的学术价值,书中专门记述了冶铁,斤斧、造针等的锻造方法。如在描述造针时写道“凡针,先锤铁为细条,用铁尺一根,锥成线眼,拙过铁条成线,逐寸剪断为针,先锉其未成颖,用以槌搞扁本,钢锥穿鼻,复锉其外,然后入釜,慢火炒熬,炒后以土末入松末,火炙,豆豉三物掩盖,下用火蒸,留针二三口插于其外,以试火候……。然后开封,入水健之,凡引线成衣与刺繡者,其质皆刚……”。从这段记载中,说明我国劳动人民在300多年前已经发明了冷拉丝的技术,而且知道金属压力加工与热处理的结合应用,明确加热温度与加热时间对成品质量的影响,还掌握了封门加热、渗碳及淬火等重要热处理技术。

1949年新中国成立后,随着劳动人民的翻身解放,生产力的发展,推动科学技术不断进步。我国冶金、压力加工作为国民经济的基础工业,获得了突飞猛进的发展。特别是在中国共产党十一届三中全会以后,在以经济建设为中心,坚持四项基本原则,坚持改革开放的基本路线指引下,结束了十年钢铁生产徘徊不前的局面,先后建成鞍山、包头、武汉、首都、攀枝花、上海宝山……等十大钢铁基地。在金属压力加工领域中,轧钢技术的发展最

为迅速，特别是近数年由于电子计算机自动控制的推广应用，各种轧制新工艺、新技术（如不对称轧制、控制冷却控制轧制、切分轧制等）的不断出现，新研究方法（如有限元法、极限分析法等）的开拓，也促使金属塑性变形原理不断地得到丰富。1987年我国超塑性技术专家海锦涛成功地将坚韧的钛合金管，吹出高压球形气瓶，从而使中国超塑性研究和利用进入一个新阶段，达到了世界的领先地位，对塑性变形原理的充实与进步作出了极大的贡献。

（4）本课程的性质和任务

本课程是金属压力加工专业的专业基础理论课，其基本任务是进一步学习金属发生塑性变形的变形力学与金属塑性加工物理学的基本规律和基本理论，以便利用这些规律指导生产。通过金属塑性变形原理课程的学习，达到以下目的：

- 1) 了解金属塑性变形力学的基本原理和方法，以便确定变形力及变形功。
- 2) 掌握金属塑性变形的物理本质以及塑性加工与金属组织性能的关系，为拟定塑性加工变形制度提供理论依据。
- 3) 掌握金属塑性变形所遵循的基本规律以及影响金属塑性和变形抗力的因素，和提高金属塑性降低变形抗力的措施。

1 塑性变形力学方程

金属塑性变形原理的一个重要内容，就是用数学力学方法去研究固体金属的塑性变形规律，即研究金属在外力作用下应力及应变的分布，从而进行压力加工力能参数的计算。这方面的内容称为塑性变形力学（或塑性力学或弹塑性力学）。塑性力学的基础就是塑性变形力学方程。这是为求应力-变形分布及其力能参数所建立的一系列方程。归纳起来，塑性变形力学方程有：静力学方程，包括力平衡(微分)方程和应力边界条件(方程)；运动学方程，包括变形与位移关系方程和变形速度与位移速度关系方程；物理方程，包括变形与应力关系方程和塑性方程。

金属塑性变形总是在一定的变形力学条件和热力学条件（物理状态）下进行的。变形力学条件指应力状态及变形状态；变形热力学条件指变形温度、变形速度及（预先）变形程度。在介绍变形力学方程中，将对这些条件作相应的介绍。

1.1 外力、内力、应力及变形概念

1.1.1 外力

外力指工具对金属工件施加的力（或称机械外力）。按力的方向来分，外力可分为垂直于接触表面的法向力（又称正压力）和沿接触表面的切向摩擦力（简称摩擦力）。按工具的主动与被动来分，外力又分为主动工具施加的力称做作用力和被动工具施加的力称做约束反力。如图(1-1)所示。

一般讲，无论是主动工具施加的作用力还是被动工具施加的约束反力，都有法向的正压力和切向的摩擦力。在压力加工中，有的加工方法能分清主动工具与被动工具，如图1-1(a) 镦粗；(b) 挤压；(c) 拉拔等。有的加工方法如图1-1(d) 所示简单轧制，上下轧辊同时转动，无法分清主动与被动工具。

工具对工件的摩擦力总是阻碍金属工件与工具的相对运动。摩擦力在压力加工中具有双重价值。摩擦增加变形阻力，增加变形能量消耗及磨损，这是不利的，如在冷轧中力求降低摩擦系数（加润滑油），以降低能耗和磨损；但轧制又是靠轧辊对轧件的摩擦力把轧件拖入变形区（称咬入）才得以进行的，所以增加摩擦系数可以提高咬入能力，保证轧制顺利进行，这是有利的，如初轧的咬入是限制压下量大小的重要因素，因此为了提高咬入能力，需要增加摩擦系数，以保证顺利轧制。

在进行受力分析时，一定要注意分析的对象。如果是分析工件受力，就应该画出工具对工件所施加的力，如图1-1及1-2所示。如果是分析工具受力，就应该画出工件对工具施加的力，如图1-3所示。

最后指出，在压力加工中工件所受的力，除了工具通过接触表面作用的外力（这些力也叫表面力），还有作用在整个工件体积上的体积力，如重力（整个工件质点都受重力）和由于工件质点加、减速而引起的惯性力，由于重力和惯性力比机械外力小很多，在实际工程计算中，通常可以忽略。

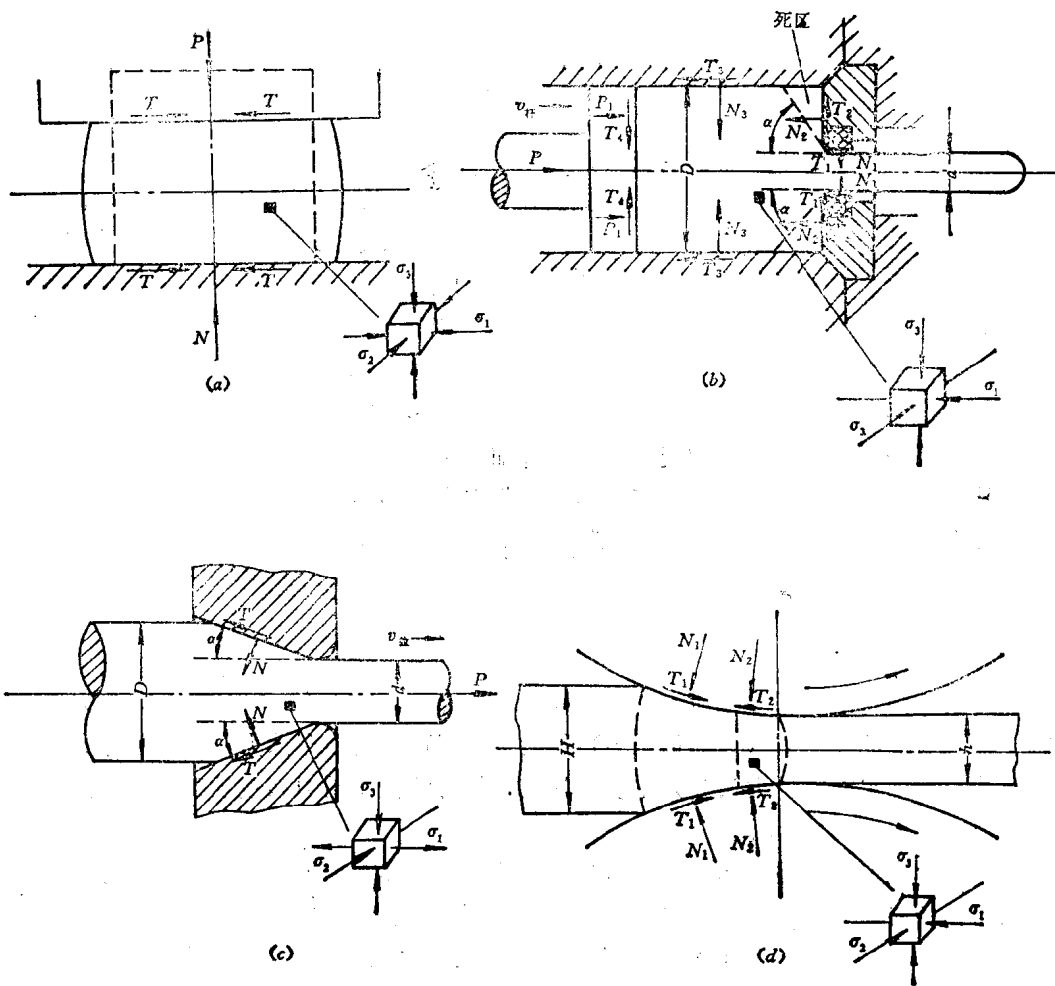


图 1-1 基本压力加工过程的受力图和应力状态图
(a) 锻粗; (b) 挤压; (c) 拉拔; (d) 轧制

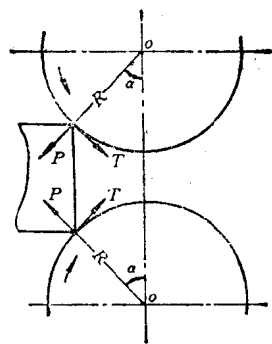


图 1-2 咬入时轧件受力分析

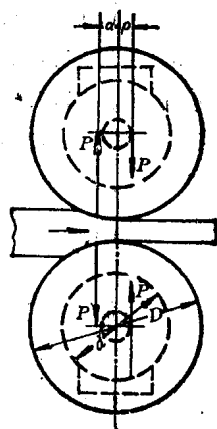


图 1-3 考虑轴承摩擦影响时作用于轧辊上的合力方向