



人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐  
有色金属行业职业教育培训规划教材

# 有色金属塑性加工原理

YOUSE JINSHU SUXING JIAGONG YUANLI

申智华 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐  
有色金属行业职业教育培训规划教材

# 有色金属塑性加工原理

申智华 编著

北京  
冶金工业出版社  
2009

## 内 容 简 介

本书是有色金属行业职业教育培训规划教材之一,是根据有色金属企业生产实际、岗位技能要求以及职业学校教学需要编写的,并经人力资源和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过。

本书详细介绍了金属塑性加工的基本原理,全书共分7章,包括绪论、应力与变形、金属塑性变形的物理本质、塑性变形对金属组织性能的影响、压力加工中的摩擦与润滑、不均匀变形、金属的塑性、金属的变形抗力等。在内容组织和结构安排上,力求简明扼要,通俗易懂,理论联系实际,切合生产实际需要,突出行业特点。为便于读者自学,加深理解和学用结合,各章均附复习思考题。

本书可作为有色金属企业岗位操作人员的培训教材,也可作为职业学校(院)相关专业的教材,同时也可供有关的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

有色金属塑性加工原理/申智华编著. —北京:冶金工业出版社, 2009.7

有色金属行业职业教育培训规划教材

ISBN 978-7-5024-4645-1

I. 有… II. 申… III. 有色金属—金属压力加工—塑性变形—技术培训—教材 IV. TG301

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第149737号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张登科 李 雪 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-4645-1

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009年7月第1版, 2009年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 6.5印张; 163千字; 88页; 1-3000册

18.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 有色金属行业职业教育培训规划教材

## 编辑委员会

- 主 任** 丁学全 中国有色金属工业协会党委副书记、中国职工教育和职业培训协会有色金属分会理事长
- 曹胜利 冶金工业出版社社长
- 副 主 任** 赵东海 洛阳铜加工集团有限责任公司董事长、中铝洛阳铜业有限公司党委书记、副董事长
- 鲁启峰 中国职工教育和职业培训协会冶金分会秘书长
- 谭学余 冶金工业出版社总编辑
- 杨焕文 中国有色金属学会副秘书长
- 纪 庆 中铝湖北大冶有限公司副总经理
- 李宏磊 中铝洛阳铜业有限公司副总经理
- 唐福康 洛阳铜加工集团有限责任公司副总经理
- 姚立宁 广东工贸职业技术学院院长
- 秘 书 长** 杨伟宏 洛阳有色金属工业学校校长(0379-64949030, yangwh0139@126.com)
- 副秘书长** 张登科 冶金工业出版社副编审(010-64062877, zhdengke@sina.com)
- 委 员** (按姓氏笔画排序)
- 牛立业 中铝洛阳铜业有限公司
- 王 洪 黑龙江佳泰钛业有限公司
- 王 辉 株州冶炼集团股份有限公司
- 卢宇飞 昆明冶金高等专科学校
- 李巧云 洛阳有色金属工业学校
- 李 贵 河南豫光金铅股份有限公司
- 刘静安 中铝西南铝业(集团)有限责任公司
- 邹广亚 中铝河南铝业有限公司
- 张鸿烈 白银有色金属公司西北铅锌厂
- 但渭林 江西理工大学南昌分院
- 武红林 中铝东北轻合金有限责任公司
- 林 群 江西铜业集团公司铜板带有限公司
- 郭天立 中冶葫芦岛有色金属集团公司
- 党建锋 中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司
- 顾炳根 桂林理工大学南宁分院
- 董运华 洛阳有色金属加工设计研究院
- 雷 霆 云南冶金集团股份有限公司

# 序

---

有色金属是重要的基础原材料，产品种类多，关联度广，是现代高新技术产业发展的关键支撑材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济和社会发展等方面发挥着重要作用。

改革开放以来，我国有色金属工业持续快速发展，十种常用有色金属总产量已连续7年居世界第一，产业结构调整和技术进步加快，在国际同行业中的地位明显提高，市场竞争力显著增强。我国有色金属工业的发展已经站在一个新的历史起点上，成为拉动世界有色金属工业增长的主导因素，成为推进世界有色金属科技进步的重要力量，将对世界有色金属工业的发展发挥越来越重要的作用。

当前，我国有色金属工业正处在调整产业结构，转变发展方式，依靠科技进步推动行业发展的关键时期。随着我国城镇化、工业化、信息化进程加快，对有色金属的需求潜力巨大，产业发展具有良好的前景。今后一个时期，我国有色金属工业发展的指导思想是：以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导，深入落实科学发展观，按照保增长、扩内需、调结构的总体要求，以控制总量、淘汰落后、加快技术改造、推进企业重组为重点，推动产业结构调整和优化升级；充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力，建设资源节约型、环境友好型和科技创新型产业，促进我国有色金属工业可持续发展。

为了实现我国有色金属工业强国的宏伟目标，关键在人才，需

要培养造就一大批高素质的职工队伍，既要有高级经营管理者、各类工程技术人才，更要有高素质、高技能、创新型的生产一线人才。因此，大力发展职业教育和职工培训是实施技能型人才培养的主要途径，是提高企业整体素质，增强企业核心竞争力的重要举措，是实现有色金属工业科学发展的迫切需要。

冶金工业出版社和洛阳有色金属工业学校为了适应有色金属工业中等职业学校教学和企业生产的实际需求，组织编写了这套培训教材。教材既有系统的理论知识，又有生产现场的实际经验，同时还吸纳了一些国内外的先进生产工艺技术，是一套行业教学和职工培训较为实用的中级教材。

加强中等职业教育和职工培训教材的建设，是增强职业教育和培训工作实效的重要途径。要坚持少而精、管用的原则，精心组织、精心编写，使教材做到理论与实际相结合，体现创新理念、时代特色，在建设高素质、高技能的有色金属工业职工队伍中发挥积极作用。

中国有色金属工业协会会长



2009年6月

# 前 言

---

本书是按照人力资源和社会保障部的规划,参照行业职业技能标准和职业技能鉴定规范,根据有色金属企业生产实际、岗位技能要求以及职业学校教学需要编写的。书稿经人力资源和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过,由人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐作为有色金属行业职业教育培训规划教材。

本书详细介绍了金属塑性加工基本原理。全书共分7章,包括绪论、应力与变形、金属塑性变形的物理本质、塑性变形对金属组织性能的影响、压力加工中的摩擦与润滑、不均匀变形、金属的塑性、金属的变形抗力等。在内容组织和结构安排上,本书力求简明扼要,通俗易懂,理论联系实际,切合生产实际需要,突出行业特点。为便于读者自学,加深理解和学用结合,各章均附复习思考题。

本书可作为有色金属企业岗位操作人员的培训教材,也可作为职业学校(院)相关专业的教材,同时也可供有关的工程技术人员参考。

本书由申智华编写,马可定审稿。在编写过程中,得到了杨伟宏、李巧云、姚晓燕、白素琴以及申庆林、蔡纯英等的大力支持和热忱帮助,并参考了一些相关著作和文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,编写经验不足,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2009年5月

# 目 录

0 绪论 .....	1
1 应力与变形 .....	4
1.1 力和应力 .....	4
1.1.1 外力 .....	4
1.1.2 内力 .....	5
1.1.3 应力 .....	6
1.1.4 变形区和刚端 .....	7
1.2 点应力状态的描述 .....	7
1.2.1 点应力状态的描述 .....	7
1.2.2 主应力、主切应力 .....	9
1.2.3 主应力状态图 .....	9
1.3 变形状态和变形力学简图 .....	11
1.3.1 塑性变形过程 .....	11
1.3.2 金属的断裂 .....	12
1.3.3 金属变形状态 .....	13
1.3.4 变形力学图示 .....	14
1.4 变形程度计算 .....	14
1.4.1 绝对变形量 .....	15
1.4.2 相对变形量 .....	15
1.4.3 实际生产中变形程度的计算 .....	16
1.5 金属塑性变形的基本理论 .....	17
1.5.1 弹塑性共存定律 .....	17
1.5.2 体积不变定律 .....	18
1.5.3 最小阻力定律 .....	18
1.6 金属的塑性变形条件 .....	20
1.6.1 最大切应力不变塑性条件 .....	20
1.6.2 变形能不变塑性条件 .....	20
复习思考题 .....	21
2 金属的塑性变形机构 .....	22
2.1 单晶体的塑性变形机构 .....	22
2.1.1 滑移 .....	22
2.1.2 孪晶 .....	25
2.1.3 其他塑性变形机构 .....	26



2.2 晶体滑移过程的实质 .....	27
2.2.1 位错 .....	27
2.2.2 位错的运动 .....	27
2.3 多晶体的塑性变形特点 .....	29
2.3.1 多晶体组织结构特点 .....	29
2.3.2 多晶体的塑性变形特点 .....	29
2.4 多晶体的塑性变形机构 .....	31
2.4.1 晶内变形机构 .....	31
2.4.2 晶间变形机构 .....	32
复习思考题 .....	33
<b>3 塑性变形对金属组织性能的影响 .....</b>	<b>34</b>
3.1 热变形、冷变形和温变形的概念 .....	34
3.1.1 热变形 .....	34
3.1.2 冷变形 .....	35
3.1.3 温变形 .....	35
3.2 冷变形时金属组织性能的变化 .....	36
3.2.1 冷变形时金属组织的变化 .....	36
3.2.2 冷变形时金属性能的变化 .....	38
3.3 热变形时金属组织性能的变化 .....	40
3.3.1 热变形时金属组织性能的变化 .....	40
3.3.2 热变形制品的组织强化效应 .....	41
3.3.3 热变形过程中的回复和再结晶 .....	42
复习思考题 .....	43
<b>4 压力加工中的外摩擦与润滑 .....</b>	<b>44</b>
4.1 外摩擦产生的原因及作用 .....	44
4.1.1 摩擦产生的原因 .....	44
4.1.2 压力加工中的摩擦特点 .....	44
4.1.3 外摩擦对压力加工过程的影响 .....	45
4.2 摩擦定理及摩擦系数 .....	46
4.2.1 摩擦种类 .....	46
4.2.2 摩擦定理 .....	46
4.2.3 影响摩擦系数的因素 .....	47
4.3 润滑的作用及常用润滑剂 .....	48
4.3.1 润滑的作用 .....	48
4.3.2 压力加工生产对润滑剂的要求 .....	48
4.3.3 常用润滑剂 .....	49
复习思考题 .....	52

<b>5 不均匀变形</b> .....	53
<b>5.1 基本概念</b> .....	53
5.1.1 均匀变形与不均匀变形 .....	53
5.1.2 基本应力与副应力 .....	53
5.1.3 研究不均匀变形分布的方法 .....	54
<b>5.2 不均匀变形的典型现象</b> .....	55
5.2.1 单鼓的形成 .....	55
5.2.2 双鼓的形成 .....	56
5.2.3 侧面翻平 .....	56
5.2.4 黏着现象及难变形区 .....	56
<b>5.3 不均匀变形产生的原因</b> .....	57
5.3.1 变形金属内部组织结构不均匀 .....	57
5.3.2 变形金属内部温度分布不均匀 .....	57
5.3.3 接触表面的外摩擦 .....	57
5.3.4 变形区的几何因素 .....	58
5.3.5 工具和变形金属的轮廓形状 .....	58
5.3.6 刚端的作用 .....	59
<b>5.4 不均匀变形造成的后果</b> .....	60
5.4.1 不均匀变形造成的后果 .....	60
5.4.2 减轻变形不均匀的措施 .....	61
<b>5.5 残余应力</b> .....	62
5.5.1 残余应力的种类和来源 .....	63
5.5.2 残余应力引起的后果 .....	63
5.5.3 预防和消除残余应力的措施 .....	64
<b>复习思考题</b> .....	65
<b>6 金属的塑性</b> .....	66
<b>6.1 金属的塑性及测定方法</b> .....	66
6.1.1 金属塑性的基本概念 .....	66
6.1.2 金属塑性的测定方法 .....	66
6.1.3 塑性图 .....	68
<b>6.2 影响塑性的因素</b> .....	70
6.2.1 影响塑性的内部因素 .....	70
6.2.2 影响塑性的外部因素 .....	73
6.2.3 提高低塑性合金塑性的途径 .....	78
6.2.4 超塑性简介 .....	80
<b>复习思考题</b> .....	80
<b>7 金属的变形抗力</b> .....	81

---

7.1 影响变形抗力的内部因素 .....	81
7.1.1 化学成分对变形抗力的影响 .....	81
7.1.2 组织结构对变形抗力的影响 .....	82
7.2 影响变形抗力的外部因素 .....	83
7.2.1 变形温度 .....	83
7.2.2 变形速度 .....	84
7.2.3 变形程度 .....	86
7.2.4 应力状态 .....	86
复习思考题 .....	87
<b>参考文献</b> .....	<b>88</b>

# 0 绪 论

金属塑性加工,也称为金属压力加工,就是利用金属的塑性,通过外力的作用,使金属产生塑性变形,从而获得各种形状、尺寸和性能的产品的加工方法。

在国民经济各部门中,所需要的有色金属材料大多是以管、棒、线、型、板、带、箔等产品来供应,而这些有色金属材料大多是通过压力加工方法生产出来的。

金属成形方法除金属压力加工外还有许多,如铸造、焊接、铆接以及切削加工的车、铣、刨、磨、钻等,金属压力加工同它们相比有以下优点:其一,金属经过塑性加工后,通过对铸造组织的改造,其组织和性能都得到改善和提高;其二,金属压力加工时,如不计切头切尾、氧化等,可认为变形前后质量相等,故压力加工又称为无屑加工;其三,用压力加工生产出的产品有较高的精度;其四,压力加工方法自动化程度高,现在多采用计算机控制,生产效率高,适合大规模生产。

金属压力加工的种类很多,按加工时工件的受力和变形方式可分为锻造、轧制、挤压、拉伸、冲压、液态铸轧等。

(1) 锻造。是通过锻锤锤头的往复运动或压力机压头对工件施加压力,使金属产生塑性变形的过程。锻造又分为自由锻和模锻两种。自由锻是将工件放在平板锤头间进行锻造;模锻是将工件放在一定形状的模具内,然后对模具施加压力进行锻造。如图 0-1 所示。

(2) 轧制。它是坯料通过转动的一对轧辊受到压缩,使其横断面减小,形状改变,长度增加的塑性变形过程。轧制又分纵轧、横轧和斜轧。纵轧时,工作轧辊的转动方向相反,轧件的纵轴线与轧辊的轴线相互垂直,如板带材的生产;横轧时,工作轧辊的转动方向相同,轧件的纵轴线与轧辊的轴线相互平行,它可生产变断面轴、齿轮、周期断面型材以及钢球等;斜轧时,工作轧辊的转动方向相同,轧件的纵轴线与轧辊轴线成一定的倾斜角,如钢铁生产中的斜轧穿孔。如图 0-2 所示。

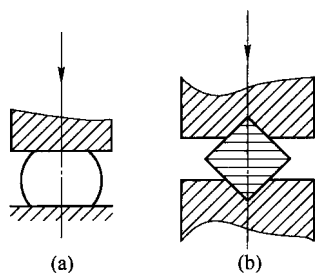


图 0-1 锻造  
(a) 自由锻造; (b) 模锻

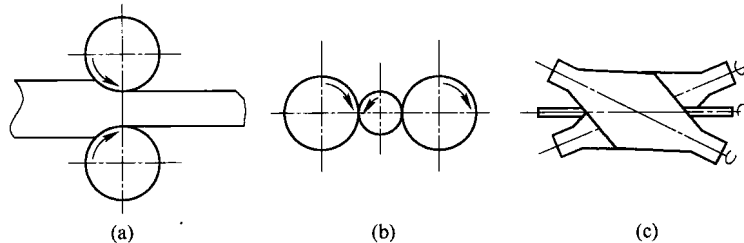


图 0-2 轧制  
(a) 纵轧; (b) 横轧; (c) 斜轧

(3) 挤压。它是把坯料放入挤压筒,靠挤压机的挤压轴对金属施加压力,使其从一定形状和尺寸的模孔中挤出而产生塑性变形的过程。按挤压时金属流动的方向不同,挤压又分为正挤压和反挤压两种。正挤压时,挤压轴的运动方向和从模孔中挤出的金属流动方向一致;反挤压时,挤压轴的运动方向和从模孔中挤出的金属流动方向相反。如图 0-3 所示。

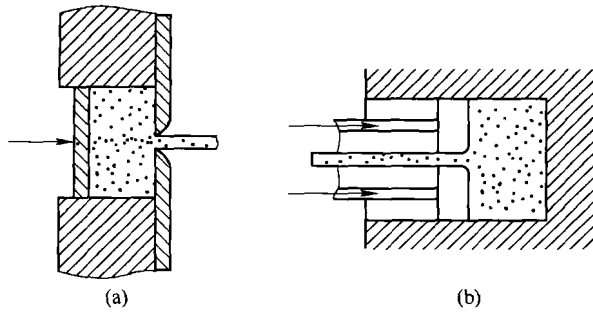


图 0-3 挤压  
(a) 正挤压; (b) 反挤压

(4) 拉伸。它是用拉伸机的钳子把金属从一定形状和尺寸的模孔中拉出来,使其产生塑性变形的过程。拉伸有棒材拉伸或型材和管材拉伸,管材拉伸时又分为带芯头拉伸和空心拉伸。如图 0-4 所示。

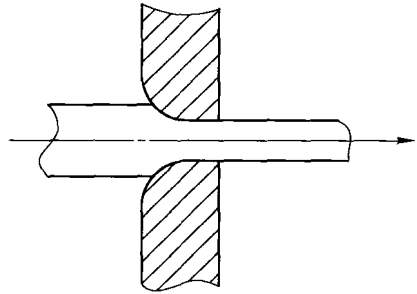


图 0-4 拉伸

由于生产发展的需要,也为了扩大品种和提高成形效率,常常把上述基本加工方式组合起来,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。这样可达到节能节材、高产优质及获得特殊用途材料的目的。

此外,铸造和轧制组合的液态铸轧,在铝板带生产中得到了越来越广泛的应用。如图 0-5 所示。

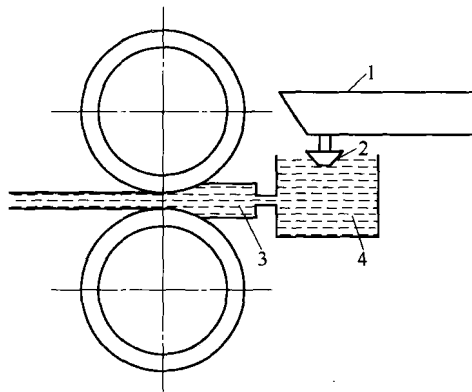


图 0-5 液态铸轧

1—流槽; 2—浮漂; 3—供料嘴; 4—前箱

压力加工时若按工件的温度特征分类,可分为热加工、冷加工和温加工。

(1)热加工。它是指金属在再结晶温度以上进行的压力加工过程。热加工,金属变形时,能同时产生硬化与软化两过程,且软化进行得很完善,变形后的产品无硬化的痕迹。

(2)冷加工。它是指金属在再结晶温度以下进行的压力加工过程。冷加工时由于加工温度在再结晶温度以下,发生回复很少,硬化在整个塑性变形过程中起主导作用,因而随变形程度的增加,金属的变形抗力不断增加,塑性指标逐渐下降。

(3)温加工。它是将金属加热到室温以上至再结晶温度以下的压力加工过程。某些金属在室温下很脆,较难承受塑性加工,若变形前将其加热到相对高一些的变形温度,即可很好地承受加工。这时金属变形时除产生硬化外,还可产生部分回复,明显减小变形抗力,并提高塑性,温加工多是为了降低金属的变形抗力和改善金属的塑性所采用的加工方式。

随着科学技术的进步,有色金属的压力加工得到了迅速的发展。当前在国防、机械、能源交通、化工、轻纺、电子等行业中,有色金属加工材的需要量日益增长,新的加工方法不断出现,产品质量不断得到提高。为了适应压力加工技术发展的需要,每个从事这方面工作的人员,除了应具备有关的基础文化知识和实际操作技能外,还必须掌握金属压力加工的专业理论基础。有色金属压力加工过程都是在一定的变形力学条件(应力状态和变形状态)和工艺条件(变形温度、变形速度、变形程度)下进行的。随着这些条件的不同,金属加工材的组织性能等也各不相同。所以说,有色金属压力加工原理是每一个从事有色金属压力加工的人员必须掌握的专业理论知识。

通过本课程的学习,要求每个人都能掌握有色金属在压力加工时的基础理论和基本规律,应用这些理论和规律分析生产中所出现的各种现象和问题,积极采取措施,达到用最少的消耗生产出最优质的产品。

# 1 应力与变形

金属塑性变形都是在一定的变形力学条件下和一定的变形工艺条件下进行的,即金属的塑性变形是在一定的应力状态、变形状态和一定的变形温度、变形速度、变形程度等条件下完成的。为了使金属产生塑性变形,首先必须对其施加一定的外力,在外力的作用下,原来处于稳定、平衡状态的金属原子,被迫偏离其稳定平衡位置,于是原子间距发生了变化,引起了金属宏观尺寸的变化。原子被迫偏离平衡位置的状态,我们就称为金属处于应力状态。处于应力状态下的金属,首先产生弹性变形,当外力继续增加,达到一定值时,使大量的原子多次地从一个平衡位置转移到另一个平衡位置,这时在宏观上就产生了永久变形,也就是塑性变形。

## 1.1 力和应力

### 1.1.1 外力

在压力加工过程中,作用在金属表面上的力,叫做外力。

根据分析归纳可知,金属在压力加工时的外力有:

(1)作用力或称主动力:它是使金属产生塑性变形的主动力。一般情况下,作用力是由机械作用产生的。如在锻造时,锤头下落打在金属试件上的力;轧制时,旋转的轧辊作用在金属工件上的力;挤压轴施加给金属工件的压力;拉伸时,钳口给金属工件的拉力等。

(2)反作用力:它是工具阻碍变形金属在某个方向上运动而产生的力。反作用力方向总是垂直于工具的工作表面,作用在金属工件上。

(3)摩擦力:在压力加工过程中,变形金属与工具接触的表面之间阻碍变形金属质点流动的力称为摩擦力。摩擦力总是阻碍金属与工具的相对运动,方向沿工具与金属接触表面的切线方向,而与金属流动的方向相反。摩擦力一方面有着增加变形能耗及工具磨损的作用,并使金属变形不均匀;同时另一方面也有促使变形过程建立并使之稳定的作用。例如在锻造时,摩擦力明显地阻碍金属工件与锤头和平台接触表面金属质点的移动,使得金属工件整体变形不均匀,若摩擦力过大,还会出现单鼓形或双鼓形。但在轧制时,必须依靠轧辊与轧件相互接触表面之间的摩擦力使轧件顺利地咬入,从而建立起稳定的轧制过程。

下面分析一下常用压力加工方法的受力,这里指出,在压力加工过程中金属所受的力,除外力,还有作用在整个工件体积上的体积力,如重力、惯性力等,由于重力、惯性力比外力小得多,在实际工程计算中,通常可以忽略。

在锻粗试件时,若将圆柱体试件放在一个坚实的平台上,通过平板锤头对圆柱体试件施加一个主动力 $P$ ,这时平台就会产生一个大小与主动力 $P$ 相等,方向与 $P$ 相反的力 $N$ 。此外,在锤头的作用下,圆柱体试件与工具相互接触的上、下表面的金属质点产生横向移动时,就受到了工具表面的阻碍作用,产生摩擦力 $T$ ,它的方向和接触表面平行,与金属质点方向相反。如图1-1所示。

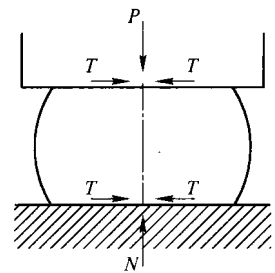


图1-1 锻粗时的受力图

金属工件的自重忽略不计,这时存在:

$$N = P$$

力  $N$  作用在圆柱试件的下表面,起阻碍试件整体向下移动的作用,它的作用方向是沿工具和工作接触面法线方向,指向试件。力  $N$  被称做反作用力或约束反力。

当主动力  $P$  达到一定值后,圆柱体试件高度减小、横截面积增大。这时,圆柱体试件与工具相互接触的上、下表面的金属质点产生横向移动时,就受到了工具表面的阻碍作用。试件与工具接触表面产生相对滑动时,可认为遵循库仑摩擦定律,即

$$T = \mu N$$

式中  $T$ ——摩擦力;

$\mu$ ——摩擦系数;

$N$ ——正压力。

图 1-2 表示了金属在挤压变形时的受力情况。 $P$  是挤压轴对金属施加的变形力, $T$  是与工具相互接触的金属质点流动时产生的摩擦力, $N$  是反作用力。图 1-3 表示了金属在轧制变形时的受力情况,其中  $P$  是轧辊给的正压力, $T$  为摩擦力。图 1-4 表示了金属在拉伸变形时的受力情况,其中  $P$  是拉伸机钳口给工件的拉力, $N$  是反作用力, $T$  为摩擦力。

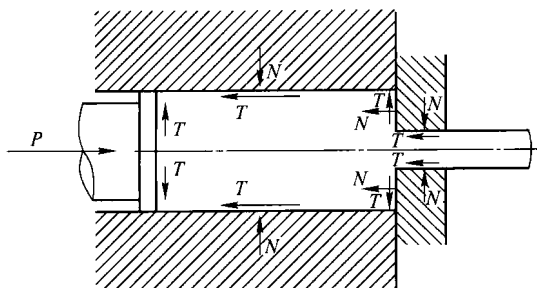


图 1-2 金属在挤压时的受力图

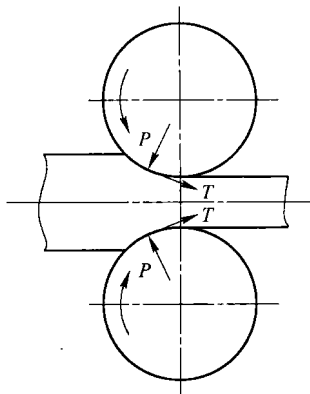


图 1-3 金属在轧制时的受力图

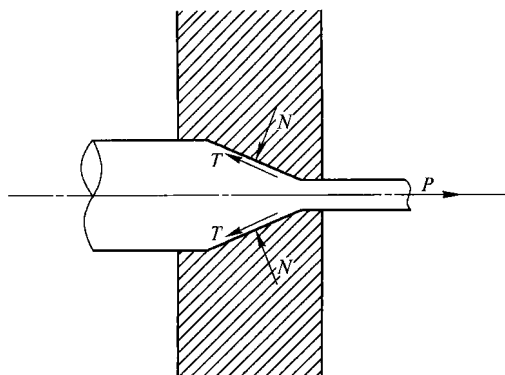


图 1-4 金属在拉伸时的受力图

### 1.1.2 内力

在外力的作用下,在变形体内原子原有的平衡关系发生破坏,产生内力,在内力出现的同时,原子间距发生了改变,而产生变形。为了平衡外力的作用,在变形金属的内部产生的与外力相平衡的力,叫做内力。内力的产生可由下面两个方面引起:

一是为平衡外力的机械作用将产生内力,这是第一种内力。金属试件在没有受到外力作用时,其原子间距为平衡间距  $r_0$ ,原子处于能量最低的稳定平衡位置,其内力为零。当所加的外力使原子间距偏离平衡位置,小于或大于  $r_0$  时,原子间就产生排斥的内力或吸引的内力与外力平



衡。在哪个方向有外力存在,在哪个方向就有与其相平衡的内力产生。

二是由于金属工件各部分变形的大小不同,而金属的完整性使金属内部产生阻碍这种不均匀变形的相互平衡的内力,称为第二种内力。如一块金属在不均匀的加热时,右边加热温度比左半边的升高得快,则由于热膨胀的结果右边板坯的长度将比左半边的增加得快,但金属是一个整体,右边的延伸就要受到左边的限制,承受到了来自左边的压缩内力。同样,左边被迫延伸,而承受拉伸内力。这两个内力自相平衡的存在于这块金属整体内。同理,在轧制板材时,如果一部分的延伸比另一部分变形大,也将在板材内部出现两部分自相平衡的内力。可见,由于不均匀的冷却、不均匀再结晶以及由其他任何原因产生的不均匀变形等,都将引起自相平衡的内力。

总之,无论是外力的机械作用,还是因为物体的整体性使物体不均匀变形受到限制时,都会使金属原子偏离其平衡位置,所以内力产生的实质就是由于原子被迫偏离其平衡位置,原子间距改变的结果。

### 1.1.3 应力

在物体内部,单位面积上的内力就叫做应力,即应力是内力的强度。在数值上等于一个无限小的面积上内力与该面积比值的极限,即

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

式中  $\Delta P$  ——在该微小面积上内力总和, N;

$\Delta S$  ——微小的面积,  $m^2$ 。

实际上,大多数情况下金属在塑性变形时内力的分布是不均匀的。因此,通常用平均应力来表示变形区内金属的应力值,平均应力等于在某个截面积上的内力和该面积的比值,即

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (1-2)$$

式中  $P$  ——内力总和, N;

$S$  ——内力作用的总面积,  $m^2$ 。

前面已经讲过了内力有平衡外力的第一种内力和在金属内部自相平衡的第二种内力,所以应力相对应也有两种。

在变形过程中,由外力引起的与外力相平衡的应力,叫做基本应力。基本应力的作用是使金属物体处于应力状态并使金属产生塑性变形。其特点是当外力除去后,基本应力也随之消失。

在变形过程中,由于变形发展的不均匀,而金属的整体性又限制了这种不均匀变形的自由发展,从而在物体内部产生的自相平衡的应力,叫做副应力。

副应力有三种,由于变形发展的不均匀,而物体的整体性又限制这种不均匀变形的自由发展,发生在物体内部大部分体积之间相互平衡起来的副应力,称为第一类副应力;由于物体内部性能不均匀,在物体内部一群晶粒与另一群晶粒之间,这个相与另一相之间出现的副应力,称为第二类副应力;在一个晶粒内部,由于周围晶粒的影响,出现变形不均匀的情况,这时出现了在晶粒内部彼此平衡起来的副应力,称为第三类副应力。

因为副应力是由于变形不均匀所形成的,所以副应力有以下特点:

- (1) 由变形不均匀所引起并有限制不均匀变形自由发展的作用。
- (2) 在变形物体内部自相平衡起来,只要变形的不均匀状态存在,它就始终存在。变形过程完成后或除去引起变形的的外力后,它不会消失仍然残留在变形物体内部,形成残余应力。
- (3) 因为是彼此平衡的,所以其分布状态必然是有一拉就有一压,两者在量上是相等的。