

中等专业学校交流讲义

自由锻造工艺学

南昌航空专科学校

太原重型机械学院 太原机械学院

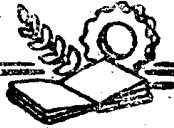
合 编

只限学校内部使用



中国工业出版社

中等专业学校交流讲义



自由锻造工艺学

南昌航空专科学校

太原重型机械学院 太原机械学院

合 编

中国工业出版社

本书内容包括：金屬塑性理論基础；鍛造用原材料及其加热；自由鍛造的基本工序及在錘上、水压机上自由鍛造和胎模鍛造；鍛件的冷却、热处理与质量檢驗；工艺規程的編制及合金鋼与有色合金的鍛造特点等内容。

本书是中专鍛冲专业交流讲义，并可供鍛冲方面中等技术人員参考之用。

自由鍛造工艺学

南昌航空专科学校

太原重型机械学院 太原机械学院

合 編

*

中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行，各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印張 $20 \frac{1}{8}$ · 字数 459,000

1961年9月北京第一版 · 1961年9月北京第一次印刷

印数 00,001—02,237 · 定价 (9-4) 1.90 元

統一书号: 15165 · 896 (一机-204)

前 言

本书内容包括：金屬塑性变形理論基础；鍛造用原材料及其加热；自由鍛造的基本工序及在錘上、水压机上自由鍛造、胎模鍛造；鍛件冷却、热处理与质量檢驗；自由鍛造工艺規程的編制；合金鋼与有色合金的鍛造特点等内容。本书中列举的实例，是取自現場因時間仓促未能很好的提炼，难免有錯誤不当之处，恳切希望兄弟学校教研組及讀者批評指正，以便修改（意見請寄南昌航空专科学校十一科）。

本书是由南昌航空专科学校：肖可为；太原机械学院：罗淑珍；太原重型机械学院：郭会光等同志編写的。

本书可作为中等专业学校鍛冲专业的交流讲义，亦可供鍛冲方面中等技术人員参考。

編 者

1961, 6.

目 录

前言	3	三、自由鍛造常用有色金屬及其合金	86
緒論	7	§ 18 原材料的驗收与保管	87
第一章 金屬塑性变形的理論基础	11	一、原材料的驗收	87
§ 1 概述	11	二、材料的保管	88
§ 2 金屬塑性变形的物理特性	18	§ 19 下料工艺及其設備	89
一、单晶体变形的物理特性	18	一、鋸切下料	90
二、多晶体变形的物理特性	25	二、剪切下料	90
§ 3 剪应力定律	30	三、压力机下料	93
§ 4 在塑性变形时存在有彈性变形的定律	30	四、冷折下料	93
§ 5 金屬加工硬化后的軟化过程	31	五、气割	93
§ 6 按硬化-軟化过程, 金屬加工变形的分类	34	六、阳极机械切割	93
§ 7 影响金屬的塑性和变形抗力的因素	34	七、节约原材料的途径	94
一、主应力图对金屬的塑性和变形抗力的影响	34	第三章 鍛造前金屬的加热	95
二、附加应力对金屬的塑性和变形抗力的影响	40	§ 20 概述	95
三、金屬組織和化学成分对金屬的塑性和变形抗力的影响	43	一、火焰加热	95
四、变形温度对金屬的塑性和变形抗力的影响	44	二、电加热	97
五、变形速度对金屬的塑性和变形抗力的影响	46	§ 21 加热对金屬性质与結構的影响	97
六、摩擦对金屬塑性变形过程的影响	49	一、对金屬机械性质的影响	97
§ 8 附加应力定律	51	二、对物理性质的影响	99
§ 9 体积不变的假設	51	三、对金屬組織的影响	100
§ 10 主应变状态及其对金屬变形过程的影响	52	§ 22 加热产生的缺陷	101
§ 11 金屬体的变形位能与其变形状态图无关定律	57	一、裂纹	101
§ 12 最小阻力定律	58	二、氧化皮	102
§ 13 单位压力、变形力与变形功	61	三、表面脫碳	103
§ 14 相似定律	64	四、过热	103
§ 15 热加工变形对金屬組織的影响	65	五、过燒	104
§ 16 热变形和变形程度对金屬机械性质的影响	72	§ 23 鍛造的温度规范	104
第二章 鍛造用原材料及其准备工作	75	一、金屬鍛造的温度范围	104
§ 17 鍛造用原材料	75	二、始鍛温度与終鍛温度的决定	108
一、鍛造用鋼的分类、性能及其应用	75	§ 24 加热速度的概念	109
二、自由鍛造用鋼料	80	一、金屬的加热过程和截面上温度的分布	109
		二、允許加热速度	111
		三、技术上可能达到的加热速度	112
		§ 25 金屬鍛造的加热工艺和加热時間	113
		一、鋼錠的加热工艺和加热時間	113
		二、鋼坯及型鋼的加热工艺和加热時間	119
		三、有色金屬合金的加热工艺和加热時間	120
		第四章 自由鍛造的基本工序	122
		§ 26 鍛粗	122

一、鍛粗的实质及其应用	122	二、原毛坯重量和尺寸的計算	179
二、鍛粗时金屬受力和变形情况	122	三、工序选择	183
三、鍛粗时的缺陷	125	四、鍛錘吨位計算及选择	183
四、鍛粗的基本方法	126	五、錘上自由鍛工艺过程举例	185
§ 27 延伸	128	§ 37 胎模鍛造	191
一、延伸的实质及其应用	128	一、引言	191
二、延伸时金屬的变形情况	128	二、胎模的类型及其結構的特点	192
三、砧块面积形状以及錘击力对延伸变形的影响	128	三、胎模設計	195
四、延伸的主要参数	130	四、胎模鍛造工艺举例	201
五、延伸規則及参数确定	131	第六章 水压机自由鍛造	207
六、变态的延伸工序	132	§ 38 鍛造用水压机的簡述	207
七、延伸的輔助工序及精整工序	134	一、水压机的工作原理	207
§ 28 錯开	135	二、水压机的一般构造	208
一、錯开的方法	135	三、水压机的操作	208
二、錯开时缺口寬度計算	135	四、水压机的分类和鍛造水压机的技术性 能	209
三、錯开技术	135	§ 39 水压机鍛造用工具	210
§ 29 冲孔	136	一、上砧与下砧	210
一、冲孔的变形情况	136	二、压板、漏盘和鍛粗台	211
二、冲孔方法	136	三、冲子	213
三、冲孔的輔助工序及精整工序	137	四、刺刀	213
§ 30 扭轉	137	五、压棒	214
一、扭轉的变形	137	六、心軸(心棒)和馬架	216
二、扭轉方法	138	七、压弯工具	217
§ 31 切割	138	八、扭轉工具	218
一、切割的实质及其应用	138	九、鑄造套筒(平衡夹鉗)	218
二、切割的方法	139	十、吊鉗	219
§ 32 弯曲	140	十一、度量工具	220
§ 33 鍛焊	140	十二、鍛造机械化工具	220
第五章 錘上自由鍛造	142	§ 40 水压机鍛造工艺特点	225
§ 34 鍛錘的簡述	142	一、制訂鍛件图和拟定技术条件	225
一、蒸汽-空气錘的构造和动作原理	142	二、計算金屬材料的重量和选择鋼錠的規 格	235
二、蒸汽-空气錘的种类	142	三、各类鍛件变形过程分析	240
三、空气錘的构造和动作原理	144	§ 41 选择鍛压水压机	264
四、板簧錘的构造和动作原理	145	一、用 C. M. 古布金的系数計算法求变形 力	264
五、其他設備	145	二、用較精确的公式計算鍛粗时的变形 力	267
§ 35 錘上自由鍛造的基本工具、輔助工具 及机械化工具	147	三、概括計算时所用經驗公式	268
一、基本工具	148	四、表格法和曲綫法	268
二、輔助工卡具	151	第七章 鍛件的冷却热处理和质量檢 驗	270
三、机械化工卡具	152		
§ 36 錘上自由鍛工艺	153		
一、鍛件图的制訂	159		

§ 42 鍛件的冷却..... 270

§ 43 鍛件的热处理..... 272

§ 44 鍛件的修正和清理..... 283

§ 45 鍛件的缺陷、廢品和质量的檢驗..... 286

一、鍛件的缺陷和廢品产生的原因及預防的措施..... 286

二、鍛件的质量檢驗..... 290

第八章 自由鍛造工艺規程的編制..... 297

§ 46 編制工艺規程指导資料..... 297

§ 47 編制工艺規程步驟..... 298

§ 48 工艺卡片..... 299

§ 49 典型工艺規程举例..... 307

一、在三吨汽錘上鍛造单拐曲軸的工艺規

程..... 307

二、在水压机上鍛造汽輪机叶輪工艺規程..... 309

第九章 合金鋼与有色合金的鍛造特点..... 315

§ 50 合金鋼的鍛造..... 315

一、耐热鋼、不銹鋼的鍛造特点..... 315

二、高速鋼的改鍛..... 317

三、現厂合金鋼鍛造加热的經驗..... 318

§ 51 有色金屬合金的鍛造特点..... 320

一、鋁合金的鍛造特点..... 320

二、镁合金的鍛造特点..... 321

三、銅合金的鍛造特点..... 321

緒 論

一、鍛造生产在現代机器制造业中的作用

金屬压力加工方法，是各种工业部門各种加工方法中的一个重要的环节。

所謂压力加工方法，是指利用金屬的塑性，借助于外力的作用，改变金屬的形状，从而制造出所需产品的一种生产方法。压力加工包括很多种工作，其中最主要的是：輾压、拉絲、挤压、鍛造和冷冲压。

对于“鍛造与冲压专业”的学生，主要是学习金屬压力加工的鍛造和冷冲压部分。

对冷的金屬薄板加以冲击力或靜压力，使它改变成所需要产品的形状，这样的加工方法称为冷冲压。

对加热的金屬块加以冲击力或靜压力，使它改变成所需要产品的形状，这样的加工方法称为鍛造。

本課程的主要任务，就是論述有关鍛造方面的加工方法及其工具和装备的一些基本知识。

鍛造是机械零件和其他一些金屬零件的主要加工方法之一。机械零件的制造过程，常用的加工方法是鑄造、鍛造、切削加工和焊接。切削加工可以使零件得到精确的形状、尺寸和光洁的表面，因此，鍛造和鑄造出来的半成品，一般都要經過切削加工；通常，往往把鍛造和鑄造作为一种毛坯工序。鑄造是将金屬熔化后澆鑄到特定的鑄模內而获得所需成品的加工方法，其成品形状的复杂程度可以很高。鍛造則是用鑄錠（曾經預压加工过的毛坯）作为原材料，經過加热、鍛压（在普通工具或特定模具上）而获得所需成品的加工方法；鍛造的目的，实质上不但是为了使金屬获得所需要的形状和尺寸，并且还在于通过压力加工过程来改善金屬的結構和提高机械性质。焊接是一种拼合的生产方法，可以使材料直接拼合，也可以与鑄造、鍛造組成复合工艺；采用复合工艺，特别是电渣焊方法的出現，大大地簡化了零件的生产过程，尤其是对于重型零件的生产，复合工艺往往是最合理的方法，甚至是唯一可能的方法。

使鍛造加工在現代机器制造业中發揮重大作用的基本原因在于：

1. 鍛造加工具有高度的劳动生产率

鍛造（尤其是其中的胎模自由鍛造、热模鍛、热轧、挤压等）是一种高生产率的加工方法。例如在曲軸压力机上模鍛差动齿輪（ $m=6$ ， $z=8$ ），制成的零件可以不需再切削加工，这样两台曲軸压力机的机組每小时生产齿輪可达400件。

在制造滾柱軸承的滾柱时，一部冷鍛自动机可代替6台自动車床。制造止推軸承套时，两部模鍛压力机甚至可以代替30台自动車床的工作。

而在生产供給切削加工使用的鍛造毛坯时，一台鍛造机器通常可以供应几台以至几十台切削机床不等。

2. 节约金屬材料的消耗

鍛造加工过程的本质是不产生工艺廢料的，因此直接用鍛造方法生产零件，金属材料消耗的极端节省是切削加工所不能相比的。

在切削加工制造零件时，使用鍛造毛坯也大大地节约金属材料的消耗。以曲轴加工为例：重 17 公斤的曲轴，如果采用型钢直接切削加工，则金属切屑达 30 公斤，即占曲轴净重的 185%；而采用自由鍛造毛坯加工，则金属切屑所占的相应比重减少至 80%，若采用模鍛毛坯，则更减少至 30%。

由于鍛造毛坯更接近于零件的尺寸形状，因此在切削加工时候不但大大地减少金属的消耗，同时也显著地减少切削加工的工时。这一点，在我国工业迅速发展下、减轻钢材供不应求、机械加工力量的负荷，显然具有很大的意义。

3. 成批鍛件的性质具有高度的一致性

节约金属，生产率高的优点，这对于其他加工方法，例如鑄造也是同样具备的。但是鑄造加工，由于会产生一系列的缺陷（例如收缩孔、疏松、砂眼、气孔等的影响，在一批鑄件中，性质是难以一致的。如果为了消除这些因素的影响而采取专门的措施，则由于制造鑄件的成本急剧的提高，往往在经济上不能容许。但是，在一般的条件下进行鍛造，就能保证成批的鍛件性质一致，不需要特别的措施。

4. 鍛造能改善金属的组织，提高金属的机械性质

鑄件或鑄錠中通常都具有不良的疏松鑄造组织，使金属具有较低的机械性质。鍛造过程能改善鑄造组织成紧密的纤维组织，使粗大的晶粒变细小，因而大大地改善金属的机械性质。如果控制金属的变形过程，使金属最好的机械性质指标出现在零件所要求的方向上，就可以使零件具有合理的优良的机械性质，从而最大限度地利用了金属所具有的程度。

因此，凡是要求高质量，高强度、高温、高压等的重要机械零件不但无例外地需要用鍛造方法制造，并且由于能够最大限度地利用金属所具有的程度，就有可能大大地减小零件及整个机器的重量，从而还节省许多贵重金属的消耗。

所以鍛造加工广泛应用于各种冶金工厂、金属加工工厂及机器制造厂。据统计，每年炼出的钢中，约有三分之一要在鍛造车间进行再加工。

鍛造加工在机器制造业中所占的重要地位从下列数字中就可以看出来：

1. 国防工业：飞机上的鍛压件重量占 85%（有时称星型发动机飞机为“飞行的鍛件”不是没有理由的）；坦克上的鍛压件占 70%；枪炮子弹大部分零件皆鍛制品。
2. 机床制造：各种机床上的主要零件的主轴、传动轴、齿轴、刀具等都是鍛成的。
3. 电力工业：发电设备的主要零件如透平叶轮、转子护环等都是鍛成的。
4. 交通运输工业：就重量而言机车上鍛压零件占 60%；汽车上鍛压件占 80%；輪船上主要零件都是鍛成的。

鍛造加工的自由鍛造在重型机器制造工业，矿山机器制造工业，铁路机车制造工业，国防工业等部门中，尤其占着重要的地位。很多重要的零件只有用自由鍛造方法制造，才能满足技术要求。例如水压机的立柱、工作缸，汽锤的锤杆，曲轴压力机的曲轴，辗压机的压力螺杆，軋钢机的軋輥，起重机的吊钩，水轮机的大轴，輪船的大型曲轴和舵杆，发电机的护环，高压锅炉体，飞机试制阶段大部分重要零件（如曲轴连杆、螺旋桨、起落架、

主軸等)等等,是不胜枚举的。此外鍛模模块,各种模具,切削刀具,日用工具等更是常見的自由鍛造成品。自由鍛造可以制造各种形状和重量的鍛件,从重量不到一公斤的螺釘到重达数十吨的柴油机曲軸,一百多吨的七万五千瓩水輪机大軸(苏联新克拉瑪托尔斯基工厂),还有些鍛件甚至重达350吨的。

二、鍛造加工方法的分类

鍛造加工方法根据动力的不同,分为手工鍛造和机器鍛造。手工鍛造是利用人力在鉄砧上进行的,随着技术革新、技术革命运动的发展,已經逐渐淘汰。机器鍛造是用鍛錘或压力机进行的。

根据所用工具的不同,鍛造加工方法又可以分为自由鍛造(无型鍛造)和模型鍛造两类。

自由鍛造是把金屬毛坯放在平砧之間,或简单的工具之間进行鍛压,以改变毛坯的形状,其示意图如图1(a)所示。自由鍛造时,金屬的流动变形,是由鍛工来加以操纵控制的。

模型鍛造时毛坯放在特定的鍛模内进行鍛压,鍛模具有和完工鍛件形状尺寸完全相同的模槽。此时,金屬的流动变形,受着模槽內壁的限制,在冲击力或静压力的作用下逐渐充滿模槽而形成一定形状尺寸的鍛件。其示意图如图1(b)所示。

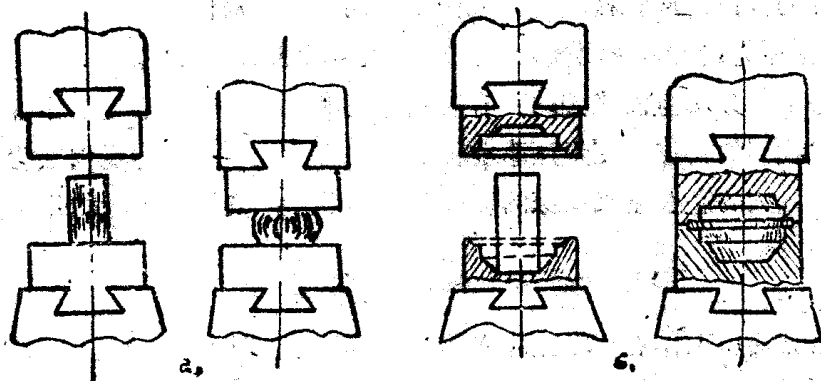


图 1

自由鍛造和模型鍛造所使用的設備,在技术要求、結構上都是不同的。自由鍛造又分鍛錘自由鍛和水压机自由鍛两种;模型鍛造的設備类型則非常多。

經常在自由鍛造設備上进行模型鍛造形式的工作,所使用的鍛模,技术要求和結構上都較简单,这种鍛造方式,称为胎模鍛造。胎模鍛造是自由鍛造与模型鍛造的过渡方式。

也有在曲軸压力机或夹板錘等模鍛設備上进行自由鍛造的工作,或自由鍛造与模型鍛造的联合工作,有时会收到良好的效果。

自由鍛造主要用于单件生产和小批生产的鍛工車間,鍛造修理厂制造配件,或鍛造大型鍛件;对于重型鍛件的鍛制,自由鍛造是唯一可能的方法。

模型鍛造生产率高,并且鍛件尺寸精确,但是因为受机械設備能力的限制,模具价值昂贵,所以只适宜于中小型鍛件(一吨以下)的大量生产。

在航空工厂中,自由鍛造和模型鍛造各占有其一定的意义。当一种新式飞机設計成功

后，必須先經過試制的阶段，以核定飞机的設計质量和試驗飞机的性能，这时就采用自由鍛造的方法来鍛制試制飞机的各个鍛件；待正式投入生产后，各种鍛件再采用模鍛方法来生产。此外当飞机要进行修理工作时也是用鍛造方法来鍛制修配的零件的。同时自由鍛造还用于制造各种工具、夹具，鍛模模坯，修理配件等以供应航空工厂其他車間所需用。

在重型机器厂中，自由鍛造則是主要的鍛造方法。水压机自由鍛造在重型机器制造业中有重要的意义。

在一般工厂中，自由鍛造与模型鍛造的比重視产品性质及生产类型决定。

三、鍛压生产的发展方向及自由鍛造当前的任务

我們认为鍛压生产发展方向是：在提高劳动生产率，降低产品成本和改善工人劳动条件的前提下，广泛地采用自动化、机械化和先进工艺过程，使鍛件在形状上、尺寸上及表面质量上最大限度地与产品零件相接近，逐步地以压力加工来代替切削加工。

在自由鍛造方面当前的任务是：

1. 大力推广胎模鍛造，这是在我国目前設備条件下自由鍛造发展的重要方向。在此基础上才有可能逐步的以模鍛代替自由鍛造。
2. 大力推行快速加热，以解决加热能力赶不上鍛造生产率迅速提高的矛盾。
3. 全面推行机械化、半机械化等装备来減輕笨重的体力劳动，以提高生产率。而在大批大量生产鍛件的部門，应积极地逐步地向半自动化、自动化方向发展。
4. 在采用各种先进工艺及新技术的同时，大力改善劳动条件。

以上的任务是十分艰巨而光荣的！有着党的正确领导，广大鍛压工作者的努力，一定能够更早的实现我们的目标，使鍛压事业在为把我国建成一个具有现代工业、现代农业、现代科学文化的强大的社会主义国家的豪迈壮丽事业中，发挥它最大的作用。

四、本課程的学习目的与要求

本課程是培养鍛压工作者的专业課程之一，学习的目的是：

1. 学习鍛造的基本知識——包括：金屬塑性变形的理論基础；鍛造前原材料的准备，金屬的加热，鍛造工序的基本知識，鍛錘上和水压机上鍛造的工艺，鍛件的鍛后处理及质量檢驗等。
2. 掌握自由鍛造工艺規程的編制和工具設計的方法；并培养其独立工作的能力。
3. 研究并了解我国鍛压工作者和生产革新者对鍛压工艺理論和实践的发展所起的作用。掌握新的工艺，并培养創造新工艺的能力。

在学习本課程时，必須紧密結合生产实际，密切注意实际生产发展的状况。

本課程采用生产劳动教学、課堂讲授、科学研究、实验、作业等方式进行。

本課程与其他普通課程和基础技术課程有密切关系，例如金屬学与热处理、制图、金屬工艺学，材料力学等，学习过程中要经常联系这些課程。

第一章 金屬塑性變形的理論基礎

鍛造、沖壓以及其他壓力加工生產的基本任務，都是利用金屬的塑性變形，來製造所需要形狀的產品。因此，研究和掌握了金屬塑性變形的理論，才能科學地制訂出鍛壓工藝過程。

金屬塑性變形的過程是怎樣的，在塑性變形過程中金屬內部的結構發生什麼變化，這是掌握金屬塑性變形的規律的先決問題。因此，研究金屬變形的本質，研究金屬變形的物理特性，是金屬塑性變形理論的第一個基本任務。金屬的塑性和變形抗力是鍛壓生產所密切關注的問題。金屬的塑性和變形抗力不僅決定於金屬的種類和結構，還決定於金屬的變形條件。因此，研究金屬最適當的變形條件是金屬塑性變形理論的第二個基本任務。金屬塑性變形理論的第三個基本任務是研究金屬塑性變形所需要外力的大小和變形功的消耗量，從而正確地選擇鍛壓設備。最後，研究塑性變形對於金屬組織和機械性質的影響，從而保證金屬經過鍛壓加工後，性質得到改善，是金屬塑性變形理論的第四個基本任務。

金屬塑性變形理論是一門比較年輕但迅速發展的科學。其特點在於它是面向生產的，積極的，永遠為在科學面前開創新道路的實驗所推動的。尤其是，整個塑性變形理論的發展是遵循着唯物辯證的觀點進行的。

在蘇聯，由於И. М. 巴甫洛夫、С. И. 古布金、А. Ф. 高洛文、А. И. 采里柯夫、А. П. 切克馬廖夫、Е. П. 溫克索夫等人的工作，金屬塑性變形理論得到了很大的成就；而А. А. 伊利尤申、В. В. 索科洛夫斯基、Н. Н. 舍夫欽科等人及其他科學工作者及生產者在金屬塑性變形理論上的應用，更使金屬塑性變形理論有了繼續發展的廣闊天地。

在我國，自從解放以來，在黨和政府的關懷下，在許多科學研究部門、工廠和學校，都建立起了相應的研究室和中央實驗室，進行着大量的生產實驗和理論的研究工作，尤其是大躍進以來，在總路線的光輝照耀下，在毛主席思想的指導下，我國塑性變形理論的科學水平正一日千里地向前躍進，並對鍛壓生產起着一定的指導作用。

金屬塑性變形理論與彈性力學，金屬學等有密切的聯繫。本章僅就金屬塑性變形理論的基礎的知識，作簡單扼要的說明。

§1 概 述

一、金屬的構造

金屬的原子具有一定的能量並永遠處於熱運動的狀態中。這種運動的速度及特點即決定金屬組成的狀態。在氣體狀態中，金屬原子以高速度運動，因而原子的分布亂無秩序；原子間相互撞擊，排斥力占優勢。在一定的溫度和壓力的條件下，原子的運動速度降低，彼此相互排斥力漸趨減少，即產生了液體狀態。當溫度及壓力繼續變化，到達另一限度時，即產生了固體狀態；此時金屬的原子的運動速度更加緩慢，相互排斥力和吸引力達到平衡，因而金屬的原子在空間形成有規律、有秩序的一定排列狀態。這種原子有規律、有秩序的一定排列狀態的固體，稱為結晶體。結晶狀態的固體是一切金屬的共同特性。

事实上，在金属晶格的交叉点上，并不是中性原子孤立地存在着的，而是以带正电荷的离子存在着。在金属晶格中所有的价电子组合在一起形成统一的电子系统。在任何条件下，电子的强烈运动及同时产生的压力（正压或负压）平衡了电子及离子间的吸引力或排斥力，因此，即构成整个晶格（即带电的离子系统及电子系统）的稳定。

只有多晶格中原子（正离子）之间的距离为一定数值时，晶格才呈现稳定状态。因为在这距离的情况下原子之间相互作用的吸引力等于排斥力，互相平衡；亦即原子之间互相作用的能量为最小。

晶格的位能可用两项的方程式表示，第一项代表吸引，第二项代表排斥。

$$U = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n} \quad (1)$$

式中 U ——代表晶格的位能；

A 及 B ——两个常数，与物质的构成有关；

r ——原子间的距离；

m 及 n ——两个常数，与晶格的形式有关；对于金属晶格， $m = 1$ ， $n = 8$ 。

u 对 r 的一次导数 $\frac{du}{dr}$ 在力学上的意义，代表内力的数值，即吸引力和排斥力的合力：

$$f = \frac{du}{dr} = \frac{A \cdot m}{r^{m+1}} - \frac{B \cdot n}{r^{n+1}} \quad (2)$$

式中 f ——代表原子间相互作用的合力；

$\frac{A \cdot m}{r^{m+1}}$ 代表吸引力；

$\frac{B \cdot n}{r^{n+1}}$ 代表排斥力。

上列两式的曲线可以图 2 及图 3 表示之：

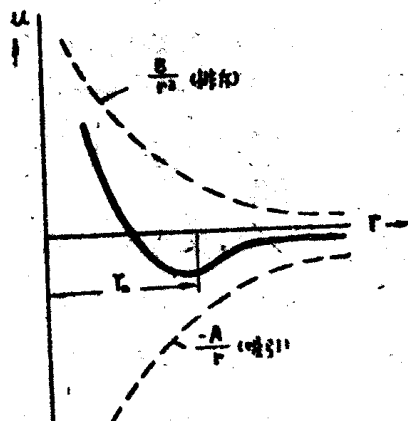


图 2 金属晶格的位能与原子间距离的关系。

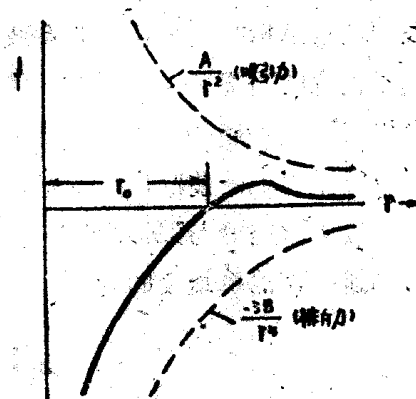


图 3 金属晶格的内力与原子间距离的关系

由图中可见，当某一金属晶格中原子间距离为一定数值 r_0 时，内力等于 0，晶格处于稳定状态。此时，吸引力等于排斥力：

$$\frac{A}{r_0^m} = \frac{3B}{r_0^n}$$

而原子间互相作用的能量为最小：

$$U_{\min} = -\frac{A}{r_0} + \frac{B}{r_0^8}$$

晶格之间的距离称晶格常数，其单位以 \AA 表示之。 $1 \text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米。

晶格常数是一个异常重要的特性指标，它决定了金属的性能。如上所述，当某一金属晶格中原子间距离保持一定的晶格常数时，晶格才处于稳定状态。

金属的晶格有以下几种主要型式：(a) 面心立方体晶格，如 γ 铁，铝等；(b) 体心立方晶格，如 α 铁， β 铁等；(c) 六方晶格，如镁等。

通常的金属块均系由大量的晶体所构成的，这种结构称为多晶体结构。多晶体内的具有不规则外形的晶体称为晶粒。晶粒内的原子，则按上述的一定型式的晶格有秩序，有规律地排列着。

为了研究的需要，用特别的条件来获得的由一个晶体构成的金属块，称为单晶体。

二、外力与内力

1. 锻压时所作用的外力。

使物体产生变形的力可以分为三类：(a) 主作用力；(b) 反作用力；(c) 惯性力。

(一) 主作用力。

在锻压生产中，主作用力是由于锻压设备的作用而产生的，通过锤头及锻模等工具传给金属，使它产生变形。

应该注意，在刚体力学中所应用的力和力偶矩的合成定律，不能无条件的应用于塑性变形的情况。因为在刚体力学中，作用力的结果与力的作用点无关，完全决定于力的作用线；至于力偶作用的结果，则只由力矩向量的方向和大小来决定。而在塑性变形时，改变力或力矩的作用点，则所得的结果也将改变。现举两例说明如下。

图4a表示两种压缩情况，从刚体力学的观点来看，两种压缩的结果是一样的；但从塑性变形的观点来看，结果就不一样了。当力作用于顶端时，整个物体发生变形，而力作用于物体中部时，则仅是物体的下部分发生变形。

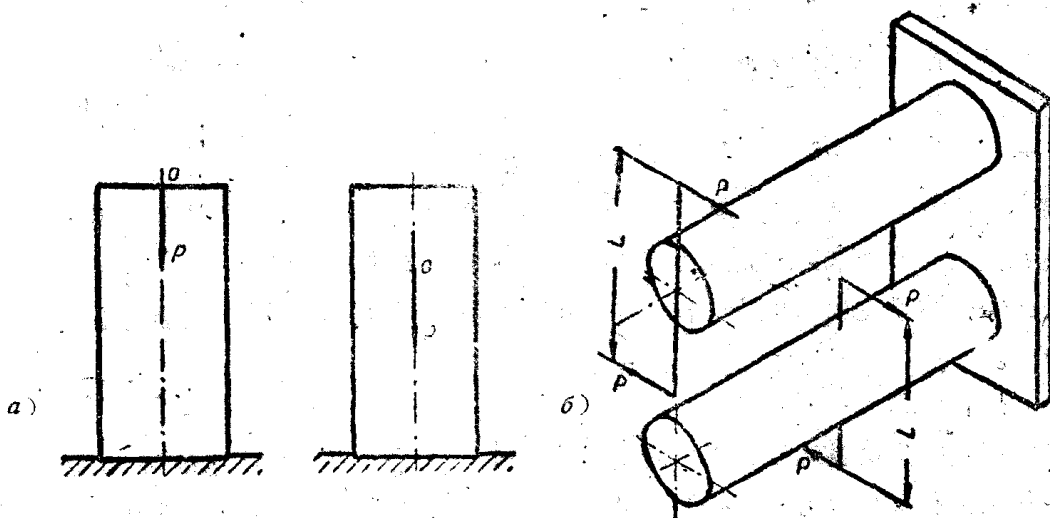


图4 作用点不同的两种变形情况

a) 作用点不同的两种压缩情况；b) 作用点不同的两种扭转情况。

图4b表示两种扭转情况，从刚体力学的观点来看，结果相同；但塑性变形时，扭转后两种变形情况就完全不同了。

(二) 反作用力。

在变形过程中，作用于金属上的不仅有主作用力，还有不动部分(锤砧，锻模等工具)的反作用力。这些反作用力限制了金属的运动或变形。当没有摩擦力时，反作用力永远垂直于工具的工作表面而作用于金属。

在实际工作中，反作用力包括工具工作表面与变形金属间接触面上产生的摩擦力在内。摩擦力作用于接触面的切线方向，并且其方向与金属流动方向相反。摩擦力对于变形过程的影响很大，它能改变反作用力的方向，并且使变形抗力增高。

图5表示在封闭阴模内毛坯的锻粗。如果变形物体处于平衡状态，则全部作用力的垂直分力的总和等于零，此时，摩擦力 R 的方向与 P 相反：

$$P = N_2 + \Sigma R。$$

由此式可以看出，在这种情况下作用在变形金属顶端的主作用 P 大于作用在金属底部的反作用力 N_2 。因此，采用这种模锻方法时，毛坯的顶端首先开始变形，只有在顶端面积适当增加后，底部才开始变形。金属充满封闭阴模的上部时比底部快，而且充填结果较好。

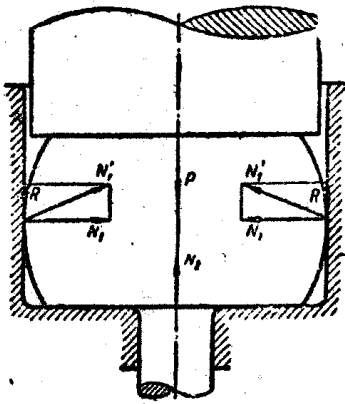


图5 在封闭阴模中毛坯的锻粗，摩擦力向上

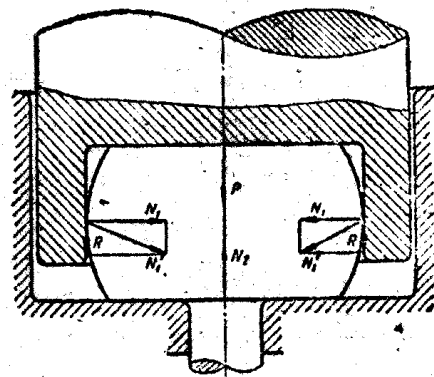


图6 在封闭冲头中毛坯的锻粗，摩擦力向下

若采用图6所示的在封闭冲头中锻粗，则在金属处于平衡状态时，由于摩擦力 R 的方向与 P 相同，所以：

$$P = N_2 - \Sigma R。$$

也就是说，在这种情况下，作用于物体顶端的主作用力 P 小于底部的反作用力 N_2 。因而，金属在封闭冲头内底部充满比上部快，而且充填结果较好。

上述的摩擦力都是反作用的。也有主作用的摩擦力，例如辗压时，使金属进入轧辊的摩擦力就是。

(三) 惯性力。

金属的塑性变形就其本质来看，就是一种运动状态。在塑性变形运动不均匀的情况下，除主作用力和反作用力外，按照惯性原理，在力的平衡方程式中，还须要加上惯性力。惯性力的大小等于金属的质量乘加速度；其方向则与加速度的方向相反。

在锻压过程中，金属的塑性变形运动往往都是不均匀的，因此在计算传给金属的作用力和金属对工具的压力而须要加上惯性力时，为了计算惯性力的大小，就必须知道金属内部每一点的加速度。由于对这方面还没有足够的研究，所以在金属塑性变形理论中对惯性

力一般不予計算，而用經驗系数来表示其影响。

此外，与慣性力相似的，还有变形金屬本身的重力，但由于它对变形的影响相当小，故可忽略不計。

2. 內力。

如果对金屬加以外力，并且使金屬在外力作用下不发生位移，則金屬将产生变形，而金屬内部則产生內力。

內力产生的原因，是金屬内部原子間距离的改变。按公式(2)，可知当金屬在外力的作用下，原子間距离发生变化时，金屬内部便有內力产生，用以平衡外力，而金屬的形状也改变。

有了各种方向的主作用力和反作用力，相伴的亦必有各种方向的內力。

內力的产生不仅是因为力学上的平衡关系，在其他的情况下，例如在物理变化及物理化学变化中，如果引起了金屬各部分不一致的形状改变，也会产生內力。这种內力是由于金屬的完整性对各部分变形的不一致产生阻碍而引起的。例如金屬棒A受到了不均匀加热时(图7)，右半部温度高，其自由状态下的伸长应比左半部温度低的大，如虛綫所示。但由于金屬棒是一整体，妨碍了左右两部分的自由伸长，左右两部的伸长量必須相等(近似而言)。为了迫使两部分的长度相等，右边便产生了压缩內力，左边产生了拉伸內力，并且二者相互平衡。因为內力是由于金屬棒的完整性而引起的，所以若把金屬棒分割为两块，則在每一部分中的內力都将消失。

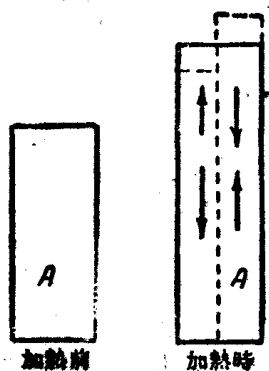


图7 金屬棒不均匀加热所产生的內力

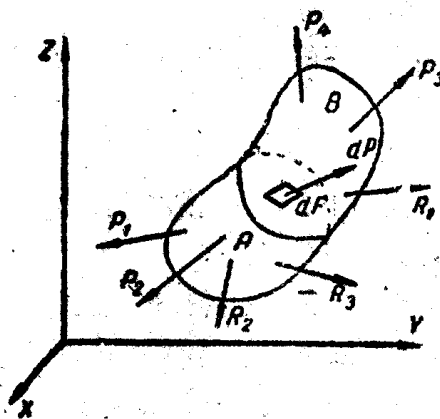


图8 在已知点上应力的定义

三、应力、基本应力、附加应力与有效应力

应力可分为外部的和内部的。

外部的应力、指作用負荷的大小，常称单位压力。

内部的应力、即內力的强度，指单位截面上內力的大小。一般所說的应力，应理解为一个极小面积上的內力与該面积的比值的极限，即

$$\sigma = \frac{dP}{dF}$$

式中 dP 乃在极小面积 dF 上所发生的总的內力。如图8所示，应用材料力学典型的办法——截断面的办法，去掉物体B部分来研究剩下的A部分的平衡，即可得出。

应力是一个向量，其方向和大小决定于所选取小面积 dF 的方向和位置。

当内力是均匀分布在截断面上时，在 dF 面积上的应力为

$$\sigma = \frac{dP}{dF} = \frac{P}{F_0}$$

式中 P 为被去掉的 B 部分的作用合力， F_0 为物体的断面原面积。如果内力非均匀分布，则该比值称为平均应力。

假如截断面的面积发生了变化，则上述平均应力称假象应力，而真正的应力为

$$S = \frac{P}{F_x}$$

式中 F_x ——当时的断面面积。

在一般情况下，内力的合力并不一定与所取截面相垂直，因此研究应力与金属变形的关系，必须将该应力分解为法线应力 (σ) 与剪切应力 (τ)。法应力与剪应力对于金属的变形有着完全不同的作用，在以后各节中将论及这一点。

在法线应力中，一般规定，正值表示拉伸，负值表示压缩。

直接由于外力而引起的应力，称为基本应力，其求法已如上所述。

在金属塑性变形状态中，由于各种原因而使金属变形不均匀时，则由于金属保持其整体性的原故，便在变形不均匀的各部分间产生相互平衡的内力。这种内力的强度称为附加应力。当外力消除后，仍存在于金属体内的附加应力，称残余应力。

附加应力与基本应力的代数和称为有效应力。有效应力乃变形金属由于整体性的原故，各部分所实际发生的应力。

在研究金属的塑性变形时，必须区分这几种应力的不同作用。

四、变形与应变

加于金属上之外力引起金属变形，即金属内点与点之间的相互位置发生改变。此种变形一般可分为三种形式：

- 1) 弹性变形：这种变形在载荷卸除后便完全消失。
- 2) 塑性变形：载荷卸除后仍残留的变形。
- 3) 破裂：金属被破坏其整体性时的残留变形（如形成裂纹，或金属被分裂成两部）。

每种变形的物理特性是不同的，在下一节中将详加论述。

变形的大小可用实际变形量来表示，称为绝对变形。如图9所示，当立方体被压缩变形后，其绝对变形在三个相垂直的方向为

$$\Delta l = l - L,$$

$$\Delta h = h - H,$$

$$\Delta b = b - B.$$

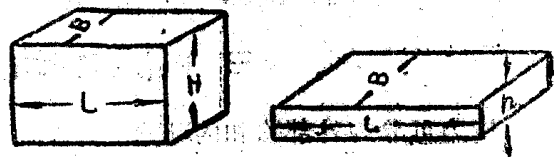


图9 立方体的变形

变形的单位度量，称为应变或相对变形，其大小表示金属的变形程度。

应变的表示方式有三种。

第一种方式是以变形量与原来尺寸的比值表示，即