

冷 冲 压

锻 压 系 编

哈 尔 滨 工 业 大 学

1977年2月

前 言

冷冲压是锻压专业学生在学习期间必需掌握的主要专业内容之一。经过近几年来教育革命的实践,我们认识到原有教材在贯彻党的教育方针方面存在着许多比较严重的问题。首先,在体系的编排上不够科学,不符合辩证唯物主义的观点,也不能从本质上反映出冲压本身的规律性。其次是内容繁琐而庞杂,理论实际脱节,而且有些解决实际问题的观点和方法也是形而上学的,不能满足实用上的要求。因此,旧教材不仅不便于学习,而且在有些方面反而可能造成概念上的混乱,甚至束缚了学生学习主动性的发挥。我们在这次编写冷冲压教材过程中,反复地学习、讨论和体会党的教育革命思想和要求,认识到编写教材一定要从教材内容所涉及到的客观事物本身的规律出发,合理地编排课程的体系和主要内容,并在此基础上力求做到删繁就简、从便于分析和实际问题出发编写理论方面的内容,同时也注意满足启发式教学的需要。虽然我们在这份教材的体系和主要内容上都做了许多带有根本性的改革,但是由于这个工作本身也只是一个如何在辩证唯物主义观点指导下写好教材的试验,当然还是不够成熟的。归纳起来,在这次教材的编写过程中主要考虑了以下六个问题。

一 抓住主要矛盾,建立新体系

过去的旧教材把冷冲压的内容划分为四个方面的内容,即冲裁、弯曲、拉深、成形。这样的章节安排不能真正反映出各种冲压方法在变形上的特点,结果是把许多在变形的本质上根本不同的冲压方法放到一起去分析。而另一方面,却又把在变形上具有共同特点的工艺方法分割地划到不同的章节里去。这样的章节编排不便于揭露各种冲压方法的变形本质,容易使学习的人在概念上造成混乱,当然也不便于对所学的内容从本质上进行深入的分析 and 认识。例如,旧教材把各种零件的拉深方法都放到一起,成为一章。这种不顾各种不同形状的拉深件在变形上的严重差别,硬把它们放到一起来讨论分析的做法,很容易使人忽略各种类型零件的拉深在变形上的本质差别,并且形成所有拉深件在变形特点上都是一样的错误概念。甚至使人在学习过之后,对于各种不同几何形状的拉深件,在生产中出现的工艺上与模具上的问题,都企图用相同的观点和方法去分析和处理。当然这种做法在实践上是行不通的。事实上虽然在名义上人们都习惯地把它们叫做拉深件,但是,由于它们形状的不同,在变形特点上也有本质的差别,所以在生产中出现的质量问题、各种工艺参数的确定原则与方法、工艺设计与模具设计中需要解决的问题等,也都是根本不同的。旧教材没有从变形本质上抓住主要矛盾以求明确地反映出这样的客观现实,其结果不仅使学习的人对拉深变形不易建立起清晰的概念,而且在理解和处理各种实际问题时,也会遇到由此而引起的一些困难。

又如成形部分也是这样。旧教材把不能放到冲裁、弯曲和拉深部分的冲压工艺都杂乱地凑在一起,成为成形一章。这样的做法,也存在着与上述相类似的问题,因为这一

章里的各种冲压工艺方法在变形上的差别是很大的。

在这次编写冷冲压教材时，我们决定首先要在揭露各种冲压工序变形力学特点的基础上，按变形性质把它们分为分离工序与成形工序。然后再进一步把分离工序划分为以破坏形式实现分离的普通冲裁和以变形形式实现分离的精密冲裁；把成形工序划分成伸长类成形与压缩类成形两大类。

破坏形式的分离工序和在不产生破坏的条件下实现的变形分离工序之间存在着本质上的差别。

伸长类成形和压缩类成形具有完全不同的变形特点，所以它们在生产中出现的问题性质和解决的方法也完全不同。伸长类成形的极限变形参数决定于材料的塑性，生产中出现的质量问题主要是变形区的破裂，而板料的相对厚度对成形的难易程度没有什么直接的影响。提高伸长类成形的极限变形参数的措施主要是用热处理的方法提高材料的塑性或者采用提高变形区内变形程度较大的边缘部位上板材的断面质量的方法等。而压缩类成形的极限变形参数与材料的塑性没有直接的关系，通常塑性的影响不是主要的。压缩类成形中出现的质量问题主要是变形区的失稳起皱，所以板料的相对厚度是决定成形难易的重要因素。提高压缩类成形的极限变形参数的主要措施，是防止毛坯变形区的起皱和在提高毛坯传力区的承载能力的同时尽量设法降低变形区的阻力。例如工序间毛坯的热处理、有效的润滑等都是从这样的角度出发的。

从这些对比可以明显地看出，伸长类成形与压缩类成形之间在变形力学上的差别是十分显著的，而且在一系列冲压工艺方面和冲模设计方面需要解决的问题内容和必须采取的措施也是截然不同的

上述这种按变形性质进行分类的方法提供出一个十分重要的条件，使我们有可能做到按客观的规律合理地划分课程内容，使每一章（或每一节）的内容都具有共同的变形特点，可以用统一的观点和共同的方法进行比较深入的分析 and 研究。在阅读时，对于每一部分都容易建立起一个在变形特点方面极为明确的概念，对于进一步研究和解决一些实际问题也是有利的。

例如，我们把过去笼统地称为拉深的内容，按变形性质上的差别划分成为三个部分，每个部分都有自己的独特任务，集中地分析一种类型变形中的各种问题。这三部分是：第五章，它主要研究直壁类零件拉深时的变形问题。第七章，它主要研究拉深变形与胀形结合在一起的曲面形状零件的冲压成形问题；第八章，它主要研究以非轴对称的不均匀变形为特点的复杂形状零件的拉深成形问题。这样可以做到，三章内容各有分工，由浅入深，由简单到复杂地逐步深入。另外，这样的体系编排很容易使人建立起这样的正确概念，即被人们统统称做拉深的零件，由于它们在变形性质上存在着本质上的差别，各种工艺参数的确定原则和模具设计所要解决的问题也都是不同的。

对于旧教材中的成形部分里的内容，我们也是按照每一种冲压方法在变形力学上的特点，把它们分别地划分到不同的章节里去（参阅目录）。

二 既要分清各种冲压工序中变形的特殊性，也要看到它们的共性

过去的旧教材，不仅象前边讲过的那样没有严格地按变形特点去区分各种冲压工艺

方法,而且也没有重视它们之间的内在联系。所以在各个章节里只是对各种冲压工序做单独分析和讲解,使学习的人不容易看到它们中间的联系,只是建立起各自孤立的概念,因而影响了认识向深度和广度的发展。另外,由于过去旧教材只是对各种冲压工序做单独的分析,不涉及到在冲压生产中如何综合地运用各种冲压成形方法合理地加工出成品零件的问题,使学习的人在处理需要多道工序加工的复杂形状零件的冲压工艺过程设计问题时,感到十分困难。为了解决这些问题,我们在编写过程中做了下边一些努力。

只有在强调各种冲压工序变形上的差别的同时,又指出存在于它们中间的内在联系,才能避免认识上的片面性,把认识过程进一步引向深入。例如,在第二章里我们从变形的本质出发,把冲裁分成为破坏分离与变形分离两大部分,分别地讲清它们的分离过程与一些重要的实际问题的解决方法。但是,另一方面,也着重指出各种不同形式的分离工序,尽管其名称叫法和完成分离的方法不同,而究其本质都是改变各种冲裁的条件(间隙、刃口的形式、压边的作用等)对冲裁时板材是否发生破坏和如何实现分离的影响的基础上形成的。因此,改变冲裁条件对板材破坏的抑制作用,就可以得到不同的冲裁方法。从这一点来看,各种冲裁方法是紧密相关的,在其间也存在着很明显的共性。指明这个从量变到质变的规律,可以使人学得深,学得灵活。

另外,为了解决综合地运用各章节中的内容去处理复杂冲压件的工艺过程设计问题,我们在全书的最后编写了第十二章——冲压工艺过程设计。其中重点内容是从冲压变形的基本规律出发,考虑到冲压件的生产批量、精度要求、操作方便以及模具结构等方面的因素,在前边十一章内容的基础上,综合地分析了复杂冲压件的工艺过程设计问题。

三 根据“分析问题和解决问题”的需要改革教材的内容

在旧教材的某些部分里,常把一些带有局限性的不够成熟的经验概括成为普遍的规律,用条文的形式把它肯定下来。从形式上看,这些条文很完整,使用上也比较方便。但是,由于这样的做法没有讲清楚各种冲压方法的变形规律和问题的本质,而条文又规定的过于死板,不但不利于从根本上深入地认识冲压成形中的变形规律,而且也容易受到死框框的限制,不利于培养根据生产中千变万化的条件灵活地处理各种实际问题的能力。譬如按毛坯的相对厚度的大小把球面形状零件分为三种情况,用以做为确定冲压方案和模具结构的依据;按相对厚度把高盒形件分成三种情况,然后给出三套计算半成品的过渡形状与尺寸的方法、公式和数据等做法,都是这种只讲条文不讲道理的形而上学的编写方法实例。

为了克服这些缺点,我们在教材里采用了另一种写法。在每个部分里,用一定的篇幅,首先讲清所要分析的成形方法的变形基本规律,然后再在这个基础上去讲具体的实际问题的处理原则和方法。这样做,便于把问题讲深讲透,不但不必死抠条文,反而可以把条文和道理结合起来,把条文讲活,有利于灵活运用。例如,第六章胀形、第七章曲面形状零件的拉深和第八章盒形件的拉深部分等,都是按这样的指导思想编写的。在第七章第一节里首先讲曲面形状零件的变形特点,生产中出现的质量问题和常用的各种措施对毛坯的变形性质与应力分布的影响等基本规律。然后在以后几节里再讲各种类型的

曲面零件拉深时的具体做法和模具结构等。这样的内容和编写方法，既能使学习的人学到分析问题和解决问题所必备的基础理论知识，同时也使他们知道如何运用这些知识去解决各种实际问题。

四 正确处理理论与实际的关系

过去的冷冲压教材，只是在讲解每一种成形方法之前讲一点基本理论，对毛坯的变形性质与应力的作用情况做个简单的分析与介绍，而关于各种冲压成形都必须遵循的普遍规律，即冲压的基础理论方面的内容，则是十分不足的。虽然可以把金属压力加工原理当做冷冲压的理论基础，可是现有的压力加工原理的内容与实用之间还有相当大的距离，而且其中有相当多的内容在理解上和掌握上都比较费力，所以许多从事冲压生产实际工作的人常常对它采取敬而远之的态度。

为了试图解决好这个问题，我们在这本教材的开头部分加了一章，即第一章冷冲压变形基础。这部分有两个内容。一个内容是把塑性力学中与冷冲压变形的分析有直接关系的部分做个简要的介绍之后，着重地把如何运用这些理论知识去分析和研究各种冲压工艺中毛坯的受力与变形的的方法，做了系统的概括，使力学理论和冲压变形问题紧密地结合起来。另一方面的内容，是把各种冲压过程里毛坯的变形所必须遵循的普遍规律提炼出来，概括成为分析和解决冷冲压中各种实际问题的共同方法。例如冲压变形的趋向性及其控制、冲压不均匀变形、冲压极限变形程度的分析等都是这种性质的内容，它们都为以后各章节内容的深入剖析提供了一个有力的理论工具。其中冷变形的趋向性及其控制部分的内容是我们根据冲压生产中出现的各种现象的分析结果，概括出来的一个带有普遍意义的变形规律。不仅在各种冲压工序的变形分析和工艺参数的确定时要用到这个概念，而且它也是第十二章冲压工艺过程设计中按变形规律确定工序顺序与数目、确定半成品的形状与尺寸等问题的基础。

五 克服陈腐，注意更新

为了使新编写的教材内容适应国家工业和科学技术飞跃发展的形势和需要，我们在编写时力求做到，把已经过时和落后的内容以及在理论上和实用上都有严重缺陷的部分做必要的更新。例如，在曲面形状零件的拉深、冲裁、拉深等方面的内容，都根据我国一些生产部门的实践经验和我们自己的实验结果做了较大的补充和更新。有的内容（如盒形件的拉深方法等），则从根本上做了全面的更新。

此外，过去旧教材受苏修的影响较深，这次新编教材则注意去其形而上学的糟粕，留其有用的正确经验。同时，除了大量增加我国自己材料，体现自力更生为主的原则外，也本着洋为中用的精神吸收了其它国家的先进经验，力求较全面的反映现代的冲压生产水平，避免取材的片面性与局限性。

六 根据生产的发展和需要，对旧教材缺少的内容做必要的增补

在冲压生产中有许多复杂形状零件，在冲压加工时的变形问题还不清楚，而这方面的内容在旧教材里也是个空白。在生产中遇到这样的问题时，大家都感到困难。我们认

为这既是生产中存在的问题，又是生产中需要解决的内容，也就尽力地根据现有的条件和我们学校里在这方面所做的实验研究结果，在教材里补充编写了曲面翻边、空间零件的校形、胀形原理、冲压工序的数目与顺序的确定、半成品尺寸的确定等内容。当然，这个工作是非常初步的，还需要在以后继续进行这方面工作的基础上予以补充。

前边所提到的六个方面的内容，都是我们在冷冲压课的教学改革上的一个初步试验。我们在教学改革方面的工作做的不多，经验也很不足，目前也还没有十足的把握来判断这样的编写方法是否正确。因此，我们打算在以后的教学实践中认真地总结这方面的经验与教训，把冷冲压教材改编工作做好。另外，对于在这次编写的教材里出现的一些新内容，希望各兄弟单位的同志们根据自己的经验和体会，对其中提出的观点、方法、数据等提出批评和修改的意见，以便于今后做好进一步的修改工作。

这份教材是由哈尔滨工业大学锻压系冷冲压小组编写的。许多单位（哈尔滨电表仪器厂、哈尔滨电气器材厂、长春汽车厂、天津汽车灯厂、北京汽车厂第一附件厂、蚌埠拖拉机附件厂、西安仪表厂、沈阳低压开关厂、哈尔滨炬光灯厂、哈尔滨金城五金厂等）对我们的编写工作给予了极大地支持与协助，提供了很多生产中的宝贵经验与技术资料，有的单位还协助我们做了一些实验工作，对这些支援我们表示衷心的感谢！

哈尔滨工业大学锻压系冷冲压小组

目 录

前 言	
概 述	1
第一章 冲压变形基础	
1—1、应力与应变	2
1—2、硬化与硬化曲线	6
1—3、各种冲压成形方法的力学特点与分类	8
1—4、冲压成形中的变形趋向性及其控制	14
1—5、冲压成形中的不均匀变形	19
1—6、板料的冲压性能及试验方法	22
第二章 冲 裁	
2—1、冲裁时板料分离的过程及分析	28
2—2、冲裁模间隙	30
2—3、凸模与凹模刃口尺寸的确定	33
2—4、冲裁力和冲裁功	35
2—5、卸料力与推件力的计算	36
2—6、排样	37
2—7、精密冲裁与整修	38
第三章 冲 裁 模	
3—1、概述	44
3—2、几种常见类型冲裁模的特点	44
3—3、冲模设计	51
第四章 弯 曲	
4—1、弯曲时的应力与应变	69
4—2、最小弯曲半径	71
4—3、毛坯尺寸的确定	73
4—4、弯曲力的计算	75
4—5、弯曲件的精度	77
4—6、弯曲模设计	83
4—7、其他弯曲方法简介	87
第五章 圆筒形零件的拉深	
5—1、圆筒形零件拉深时的变形特点	91
5—2、圆筒形零件的拉深系数与拉深次数	98
5—3、圆筒形零件拉深时的起皱及其防止措施	100

5—4、圆筒形零件用拉深模工作部分尺寸的确定	105
5—5、拉深件毛坯尺寸的确定	108
5—6、反拉深	109
5—7、带法兰边零件的拉深方法	110
5—8、阶梯形零件的拉深方法	114
第六章 胀形工艺	
6—1、胀形工艺的特点	116
6—2、平板毛坯的局部胀形	116
6—3、圆柱形空心毛坯的胀形	118
第七章 曲面形状零件的拉深	
7—1、曲面形状零件的拉深特点	121
7—2、球面形状零件的拉深方法	125
7—3、锥形零件的拉深方法	128
第八章 非旋转体零件的拉深方法	
8—1、盒形零件的拉深方法	133
8—2、其他非旋转体零件的拉深方法	142
8—3、非旋转体曲面形状零件的拉深特点	144
第九章 翻 边	
9—1、伸长类翻边	148
9—2、压缩类翻边	156
第十章 校形工艺	
10—1、平板零件的校平	158
10—2、空间形状零件的校形	160
第十一章 其他冲压方法	
11—1、软模成形	163
11—2、差温拉深法	165
11—3、加径向压力的拉深法	166
11—4、爆炸成形	166
11—5、电水成形	173
11—6 电磁成形	176
11—7 带料连续冲压	178
11—8 变薄拉深	179
11—9 冷挤压	180
第十二章 冲压工艺过程设计	
12—1 冲压件的工艺性	184
12—2 确定冲压加工方案、工序数目与顺序的几项原则	186
12—3 冲压工序间半成品的形状与尺寸的确定原则	194
12—4 冲压设备的选择	196

概 述

冷冲压是金属压力加工的基本方法之一，它主要用于加工板料零件，所以有时也叫板料冲压。冷冲压具有生产率高，易于实现机械化和自动化，产品的尺寸精度较好（不需再经切削加工即可使用），重量轻和成本低廉等特点，在现代汽车、拖拉机、电机、电器、仪表以及日常生活用品的生产方面占据十分重要的地位。另一方面，在国防工业生产当中冷冲压也是一个重要的加工方法，如在飞机、导弹和各种枪、炮弹的生产中冷冲压加工量的比例也是相当大的。

由于冷冲压加工的零件形状、尺寸、精度要求、批量大小、原材料性能等的不同，当前在生产中所采用的冷冲压工艺方法也是多种多样的。但是，概括起来可以分为分离工序与成形工序两大类。分离工序的目的是在冲压过程中使冲压件与板料沿一定的轮廓线相互分离。同时，冲压件分离断面的质量，也要满足一定的要求。成形工序的目的，是使冲压毛坯在不破坏的条件下发生塑性变形，并转化成为要求的成品形状，同时也应满足尺寸精度方面的要求。

分离工序可以分为以破坏分离为特点的一般冲裁和以变形分离为特点的精密冲裁。精密冲裁是在不破坏的条件下以原材料的塑性变形方式实现分离的一种冲压方法。

成形工序的形式很多，但是，按毛坯的变形特点可以分为伸长类成形与压缩类成形两大类。伸长类成形包括有：胀形、孔的翻边、扩孔、弯曲（指中性层以外部分）、拉弯、曲面形状零件的拉深（指毛坯的中间部分）、拉形等。压缩类成形包括有：直壁零件的拉深、缩口、弯曲（指中性层以内部分）等。

第一章 冲压变形基础

1—1 应力与应变

在各种冲压过程中板料毛坯的塑性变形，都是模具对毛坯施加的外力所引起的内力或由内力直接作用的结果。一定的力的作用方式和力的大小都对应着一定的变形。因此，为了研究和分析金属的塑性变形过程，首先必须了解毛坯内的作用力与塑性变形之间的关系。

在一般的情况下，变形毛坯内各点的变形和受力情况都是不同的。毛坯内每一点上的受力情况，通常称为点的应力状态，要用九个应力分量，即三个正应力和六个剪应力来确定（图1—1—1a）。但是，由于其中三对剪应力是相等的（ $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ； $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ； $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ），实际上只需要六个应力分量，即三个正应力和三个剪应力，就可以确定该点的应力状态。换言之，只要上述六个应力分量是已知的，就可以计算出与座标轴 x' 、 y' 、 z' 成任意角度的平面上的正应力与剪应力。可以证明，存在有这样三个相互垂直的平面，在其上只作用有正应力，而没有剪应力。我们称这种情况下的正应力为主应力，并用 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 表示（图1—1—1b）。习惯上取 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，同样道理，只要三个主应力是已知的，就可以计算出任意平面上作用的正应力与剪应力，所以也就可以认为该点的应力状态是已知的。

在力学中习惯地认为带正号的正应力或主应力表示拉应力，而带负号的正应力或主应力表示压应力。

通常，称主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 的作用方向为主轴。主轴的方向仅仅决定于该点的受力情况，而与座标轴的选取无关。利用主应力来研究冲压过程中毛坯内应力的作用特点及其分布规律有很多方便，所以，常常近似地把变形毛坯的几何对称轴当作主轴，例如在图1—1—2中所示的拉深过程的应力分析时，在忽略数值较小的表面摩擦力之后，可以近似的取图中所示的三个主轴方向。这样做的结果可以使拉深毛坯变形区的应力分析及对拉深变形中许多问题的研究都得到很大程度的简化。

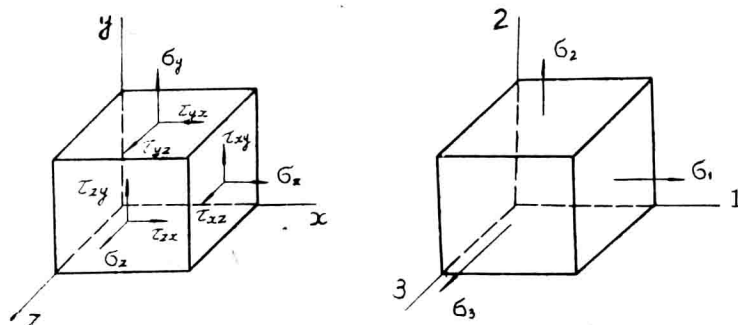


图 1—1—1 点的应力状态
a —任意座标系统； b 主轴座标系统

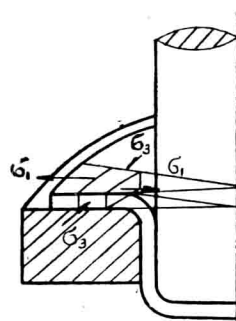


图 1—1—2 拉深时毛坯变形区内主应力方向

在冲压过程中毛坯的形状和尺寸都要发生变化，而变化的数量大小用变形程度或应变表示。图1—1—3表示某一个物体在变形前后尺寸的变化。变形前的尺寸为 L_1, L_2, L_3 ；变形后的尺寸相应地成为 L_1', L_2' 及 L_3' 。用变形物体长度尺寸的相对变化——相对应变来表示的变形程度为：

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \frac{L_1' - L_1}{L_1} \\ \delta_2 &= \frac{L_2' - L_2}{L_2} \\ \delta_3 &= \frac{L_3' - L_3}{L_3}\end{aligned}\quad (1-1-1)$$

变形程度的另一种表示方法是对数应变，其数值为：

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \int_{L_1}^{L_1'} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1'}{L_1} \\ \epsilon_2 &= \ln \frac{L_2'}{L_2} \\ \epsilon_3 &= \ln \frac{L_3'}{L_3}\end{aligned}\quad (1-1-2)$$

由前述的变形程度表示方法可见，正应变表示伸长变形，而负应变表示压缩变形。

对数应变能够更为确切地反映变形程度，但是当变形程度不大时，对数应变和相对应变的差别不大，可以用相对应变代替对数应变。对数应变和相对应变的关系，可用下式表示

$$\epsilon_1 = \ln \frac{L_1'}{L_1} = \ln \frac{(1 + \delta_1)L_1}{L_1} = \ln(1 + \delta_1) \quad (1-1-3)$$

在某些变形过程（如挤压等）的分析时，也用断面收缩率来表示变形程度。断面收缩率是变形前后毛坯横截面积的相对变化，其值为

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \quad (1-1-4)$$

上式中 F_0 及 F 分别为变形前后的横截面积。

在塑性变形过程中，可以认为变形前后毛坯的体积不发生变化，即

$$\frac{L_1' \times L_2' \times L_3'}{L_1 \times L_2 \times L_3} = 1 \quad (1-1-5)$$

两端均取对数得：

$$\ln \frac{L_1' \times L_2' \times L_3'}{L_1 \times L_2 \times L_3} = \ln \frac{L_1'}{L_1} + \ln \frac{L_2'}{L_2} + \ln \frac{L_3'}{L_3} = 0$$

或者

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (1-1-6)$$

由上式可知，塑性变形时的体积不变条件可以归结为另一个非常有用的结论：塑性变形时的三个对数应变之和一定是零。

用相对应变表示的体积不变条件为:

$$(1 + \delta_1)(1 + \delta_2)(1 + \delta_3) = 1 \quad (1-1-7)$$

绝大多数冲压成形过程中毛坯的塑性变形区都不是处于单向受压或单向受拉的应力状态,而相反地是受到二向或三向的应力作用。在单向受拉或单向受压时的应力与应变关系可以用硬化曲线或用硬化曲线的数学表达式来表示。但是,在受到二向以上的应力作用时的复杂应力状态下,处于塑性变形状态的毛坯变形区内应力与应变关系是相当复杂的。目前常用的有全应变理论和增量理论两种应力与应变关系。

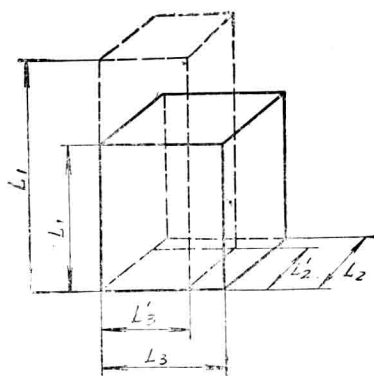


图 1-1-3 变形前后尺寸的变化

全应变理论的应力与应变关系表达式为:

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (1-1-8)$$

上式也可以改写成另一形式:

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\epsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\epsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数} \quad (1-1-9)$$

上式中的 $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ 是平均应力,其数值表示应力状态中三向均匀受拉或三

向均匀受压成分的大小。当 $\sigma_m = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$, 并且其数值——绝对值较大时,说

明对变形毛坯的作用力的静水压力的成分大,而且其作用效果可以抑制材料发生脆性破坏,因而能使在一道工序中可能达到的极限变形程度得到提高。例如,在冷挤压时可能达到极高的极限变形程度的原因,就是三向受压的应力状态中的静水压力的作用。又如在剪切棒料时加轴向压力或在冲裁时加强力压边圈、用圆角或倒角代替锋利的模具刃口等等都是为了加强静水压力的作用,使剪裂破坏推迟或受到抑制,从而达到提高剪切断面质量和提高零件尺寸精度的目的。而正的平均应力 $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ 能够引起材

料过早的破坏,对塑性变形工序不利,应尽量避免。

增量理论的应力与应变关系表达式为:

$$\frac{d\epsilon_1 - d\epsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{d\epsilon_2 - d\epsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{d\epsilon_3 - d\epsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (1-1-10)$$

上式也可以改写成另一种形式

$$\frac{d\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{d\epsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{d\epsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数} \quad (1-1-11)$$

全应变理论仅仅表示塑性变形终了时的应变与主应力之间的关系,它不能反映出变形过程中应力与应变的变化所产生的影响。增量理论表示在塑性变形的某一个瞬间应变增量与主应力之间的关系,经过积分便可以把变形过程的特点反映出来,所以它更接近

于实际的情况。假如塑性变形过程中的主应力方向不变，而且各应力间的比例也保持不变，全应变理论和增量理论的计算结果是一致的，所以在这种情况下完全可以应用全应变理论。此外，在单调的塑性变形过程中也可以应用全应变理论。增量理论在计算上引起的困难很大，尤其在冷变形硬化时，计算就更复杂了，所以目前在工程中主要应用全应变理论。

应力与应变关系的表达式 (1—1—8)，(1—1—9)，(1—1—10) 和 (1—1—11) 是对压力加工中各种工艺参数进行计算的基础，另一方面，也可以在不进行详细的理论分析与计算的条件下，利用它们对某些冲压成形过程中毛坯的变形和应力的性质作出大致的分析和判断。例如从对式 (1—1—9) 的分析中可以得知：

1. 当 $\sigma_1 - \sigma_m = 0$ 时，必定有 $\epsilon_1 = 0$ 及 $\epsilon_2 = \epsilon_3$ ，即在主应力与平均应力相等的方向上不产生塑性变形，而另外两个方向上的塑性变形在数量上相等，在方向上相反。通常称这种变形为平面变形。由此可得出一个在实践中常常用到的重要结论：在平面变形时必定有 $\sigma_1 = \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ （此式的另一种形式是 $\sigma_1 = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$ ）。宽板弯曲时，在宽度方向的变形为零，即属于这种情况（见表1—3—1）。

2. 当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_m$ 时，由式 (1—1—9) 得 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$ ，也就是说，当三个主应力相等时，毛坯受三向等拉或三向等压的应力状态作用。此时毛坯不产生任何塑性变形，仅有弹性变形存在。

3. 当 $\sigma_1 > 0$ 而且 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 时，毛坯受到单向拉应力作用。因为 $\sigma_1 - \sigma_m = \sigma_1 - \frac{\sigma_1}{3} > 0$ ，故 $\epsilon_1 > 0$ ，而由式 (1—1—9) 又可得 $\epsilon_1 = -2\epsilon_2 = -2\epsilon_3$ ；也就是说，在单向受拉时，在拉应力作用方向上为伸长变形。在其余二个方向上产生数量相同的压缩变形，而且伸长变形为每一个压缩变形的二倍；当 $\sigma_3 < 0$ 而且 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 时，毛坯受到单向压应力的作用。因为 $\sigma_3 - \sigma_m = \sigma_3 - \frac{\sigma_3}{3} < 0$ ，故 $\epsilon_3 < 0$ ，利用式 (1—1—9) 又可得 $-\epsilon_3 = 2\epsilon_2 = 2\epsilon_1$ ，毛坯在单向压应力作用时，在压应力作用方向上为压缩变形。其值为另二个方向上伸长变形的二倍。表 1—3—1 中所示的翻边、缩口等过程中毛坯边缘的变形就属于上述两种情况。

4. 当 $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ 而且 $\sigma_3 = 0$ 时，由式 (1—1—9) 得 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = -\frac{1}{2}\epsilon_3$ ，也就是说，当毛坯受二向等拉时，在拉应力作用方向上为伸长变形，而在另一个没有主应力作用的方向上为压缩变形，其值为每个伸长变形的二倍。由表 1—3—1 可见，平板毛坯胀形时的中心部位就属于这种变形情况。

5. 当 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 时，由式 (1—1—9) 可知，无论 σ_1 ， σ_2 或 σ_3 为拉应力或压应力，在 σ_1 的方向上，即在最大拉应力或最小压应力（当 σ_1 ， σ_2 及 σ_3 均为压应力时）的方向上的塑性变形必定为最大的伸长变形；而在最大压应力或最小拉应力（当 σ_1 ， σ_2 及 σ_3 均为拉应力时）的方向上的塑性变形一定是最大的压缩变形。

上述这几个由应力应变关系公式得出的推论，可以帮助我们对冲压变形中毛坯上某些特定的有代表性的位置上金属的变形性质和应力状态做出定性的分析，这在实际上是很有用的。譬如在 1—3 节中这些推论成为对各种冲压成形方法分析的主要手段。

在单向拉应力或单向压应力作用下，金属由弹性变形转变为塑性变形的条件是拉应力或压应力达到材料的屈服极限。但是，当毛坯处于多向应力的作用下，即处于复杂应力状态时，由弹性变形转变为塑性变形的条件是各方向上作用的应力应该组合成为一定的关系——塑性条件。在压力加工中常用的，也是经过实验验证公认可用的塑性条件是最大剪应力条件和能量条件。

最大剪应力条件认为金属产生塑性变形时最大主应力和最小主应力之差为一定数值，而与中间主应力数值无关，并可写成下式：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (1-1-12)$$

能量条件认为金属产生塑性变形时，于其单位体积内所积蓄的弹性的形状变化的势能为一定数值。能量条件的数学式为：

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s \quad (1-1-13)$$

式 (1-1-13) 在实际运算上有很大困难，故在压力加工中常用能量条件的简化形式，即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s \quad (1-1-14)$$

上式中的 β 是考虑中间主应力 σ_2 影响的系数，其值决定于 σ_2 ，并介于 1~1.15 之间。当 $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ 时，即平面变形时， $\beta = 1.15$ ；当 $\sigma_2 = \sigma_1$ 或 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时， $\beta = 1$ 。

式 (1-1-13) 及 (1-1-14) 中的 σ_s 是用真实应力表示的金属变形抗力，其值不仅决定于材料的种类、变形温度、变形速度等等，而且在冷变形时，即在绝大部分冲压变形中随着塑性变形的进行而增大。在运算中 σ_s 之值可以利用单向拉伸时的硬化曲线根据毛坯已经完成的塑性变形程度确定。

1-2 硬化与硬化曲线

在冲压生产中，毛坯形状的变化与零件的形状形成过程——即材料的塑性变形过程都是在常温下进行的。对于常用的金属材料，在常温下的塑性变形过程当中，由于冷变形的硬化效应引起的材料机械性能的变化，结果使其强度指标（屈服极限 σ_s 与强度极限 σ_b ）随变形程度的加大而增加，并且同时使其塑性指标（延伸率 δ 与断面收缩率 ψ ）降低。因此，在进行变形毛坯内各部分的应力分析和各种工艺参数的确定时，必须考虑到材料在冷变形硬化中的屈服强度（或称变形抗力）的变化。另外，板料的冷变形硬化性能对许多冲压工艺都有较大的影响：有时是有利的；有时是不利的。例如在胀形类的冲压成形工艺中，板材的硬化能够减少过大的局部变形（减小厚度的局部变薄量），使变形趋向均匀；又如在翻边时孔边缘部分材料的硬化容易引起开裂，降低了极限翻边系数。由此可见，在处理冲压生产上许多实际问题时，必须掌握和研究材料的硬化和硬化规律及它们对冲压工艺的影响。

在冷变形中材料的变形抗力随变形程度的变化，用硬化曲线来表示。图 1-2-1 即为几种材料的硬化曲线举例。材料的硬化曲线可在普通的拉伸变形时用实验方法求得，但是，当超越材料的稳定变形区，一旦产生局部变形——细颈之后，应力状态也随着

发生变化，这是拉伸实验的缺点。做材料的镦粗实验，也能得到硬化曲线。虽然镦粗时没有拉伸时产生局部细颈的问题，可是当变形程度较大时，试件断面形状发生的畸变也会引起实验上的误差。实验证明，拉伸实验和镦粗实验得到的硬化曲线基本上是一致的。对于板料，有时也用平板毛坯的液压胀形实验并经过一些换算后求得硬化曲线。这时毛坯中心点受双向等拉应力的作用，变形稳定性比单向拉伸时大的多，这是本方法的一个主要优点。图 1—2—1 是用镦粗方法得到的硬化曲线，变形程度用试件高度的相对变化表示。

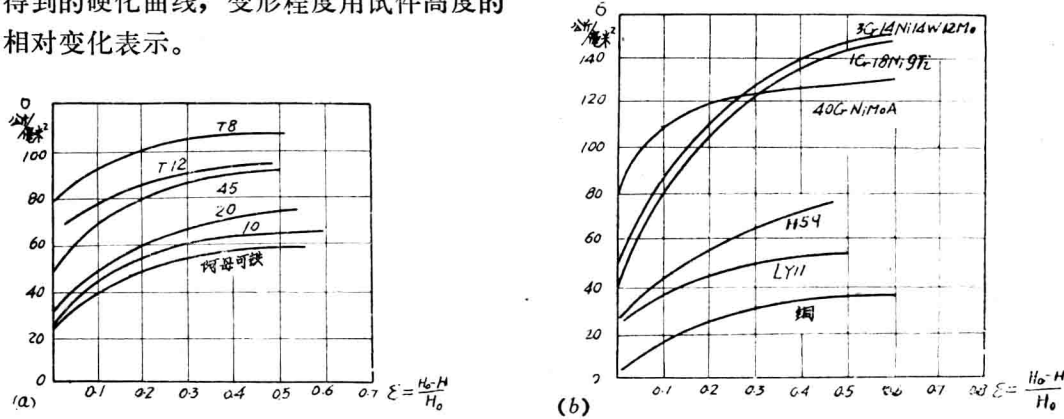


图 1—2—1 各种材料的硬化曲线举例

由图 1—2—1 可见，几乎所有的硬化曲线都具有一个共同的特点，就是随变形程度的增大，材料的硬化强度 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ （或称硬化模数）逐渐降低，也就是使材料的硬化趋向饱和。

为了实用上的需要，必须把硬化曲线用数学式表示出来。但是，由于各种材料的硬化曲线都具有不同的特点，那么用同一个数学式精确地把它们表示出来也是不可能的。实际上，常用的几种硬化曲线的数学表达式都是近似的，由于材料种类和性能的不同，其误差大小也不尽然相同。现在常用两种硬化曲线的表达式：用直线表示硬化曲线或用指数曲线表示硬化曲线。

用直线代替硬化曲线时有：

$$\sigma = \sigma_0 + D\varepsilon \tag{1-2-1}$$

上式中 σ_0 是近似的屈服极限，也是硬化直线在纵坐标轴上的截距。 D 是硬化直线的斜率，称为硬化模数，它表示材料硬化强度的大小。由图 1—2—2 可见，由于存在有材料硬化的饱和现象，用直线代替硬化曲线是非常近似的，而且仅在切点上它们的数值是一致的，在其他各点两者都有差别，尤其在变形程度很大时，差别是很显著的。

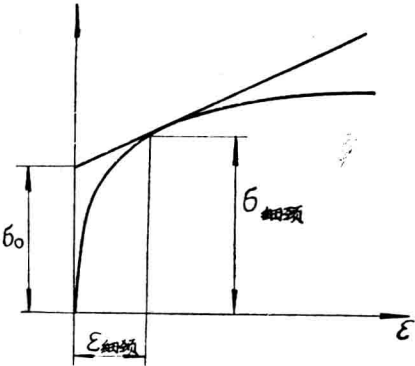


图 1—2—2 硬化直线

式 1—1—2 中的变形程度 ε 的表示方法不同，硬化直线的表达式也不一样。当用拉

伸实验中的延伸率时, 式 1—2—1 具有如下形式:

$$\sigma = \sigma_0(1 + \delta) \quad (1-2-2)$$

上式中 σ_0 是材料的强度极限, 而 δ 是延伸率。

当用断面收缩率表示拉伸实验的变形程度时, 式 (1—2—1) 具有下边的形式:

$$\sigma = \sigma_0 + D\psi \quad (1-2-3)$$

上式中

$$\sigma_0 = \sigma_0 \frac{1 - 2\psi_{\text{细颈}}}{(1 - \psi_{\text{细颈}})^2}$$

$$D = \frac{\sigma_0}{(1 - \psi_{\text{细颈}})^2}$$

其中 $\psi_{\text{细颈}}$ 是在拉伸试验中开始产生局部变形时的断面收缩率。

用指数曲线表示硬化曲线时有:

$$\sigma = C\varepsilon^n \quad (1-2-4)$$

上式中 C 为系数, 而 n 称为硬化指数, C 与 n 之值均决定于材料的种类和性能, 其值列于表 1—2—1 中。 n 是表明材料的硬化性能的重要参数, 有时也叫做 n 值, 对板材在各种冲压成形工艺中的冲压性能以及冲压件的质量都有较为重要的影响。

各种材料的 C 与 n 值*

表 1—2—1

材 料	$C \quad \text{kg/mm}^2$	n
软 钢	71—75	0.19—0.22
黄 铜 (60/40)	99	0.46
黄 铜 (65/35)	76—82	0.39—0.44
磷 青 铜	110	0.22
磷青铜 (低温退火)	89	0.52
银	47	0.31
铜	42—46	0.27—0.34
硬 铝	32—38	0.12—0.13
铝	16—21	0.25—0.27

* 表中数据是指退火材料在室温和低变形速度下试验求得的。

1—3 各种冲压成形方法的力学特点与分类

正确的板料冲压成形工艺的分类方法, 应该能够明确地反映出每一种类型成形工艺的共性, 并在此基础上提供可能用共同的观点和方法去分析、研究和解决每一类成形工艺中的各种实际问题的条件。在各种冲压成形工艺中毛坯变形区的应力状态和变形特点

是制订工艺过程、设计模具和确定极限变形参数的主要依据，所以只有能够充分地反映出变形毛坯的受力与变形特点的分类方法，才可能真正具有实用的意义。

在绝大多数的冲压成形时，毛坯都是受单向应力状态或平面应力状态的作用，而产生的变形则是在三个方向上都存在的。同时，在板厚方向上的应力与变形的分布都是均匀的或者是按已知的规律变化的（如弯曲）。这就为我们提供了一个极为方便的条件，那就是可以用表示毛坯变形区的受力情况与变形特点的主应力图和主应变图做为分析和研究各种冲压成形过程的有效工具，并且在此基础上按毛坯变形区的力学特点进行较为正确的分类。

对冲压过程中毛坯变形区的应力与应变分布情况的细致了解和确切的描绘，只能借助于塑性力学的理论分析方法，利用平衡条件、塑性条件、应力与应变关系和硬化曲线，并经过相当繁杂的计算才能完成。因此，在生产实践中这种理论分析方法的运用，受到很大的限制。可是，在处理生产中出现的许多实际问题时，常常需要对冲压成形工艺中毛坯的受力情况和变形特点做初步的和概略的定性分析，并在此基础上进一步分析、研究各种工艺问题、模具问题和产品质量问题。这时可以利用能够方便而形象地表示出毛坯变形区内各点的受力与变形情况的主应力图和主应变图的方法，说明变形区内存在的三个主应力的特点和主应力引起的变形的性质以及它们对前述几个实际问题的影响，从而找出解决问题的途径。但是，主应力图和主应变图只能表示主应力和主应变的有无和性质（正或负），不能反映主应力和主应变的数值大小，更不能反映出它们的分布规律。

为了画出主应力图和主应变图，要在毛坯的变形区内所研究的质点位置上取出一个假想的微元正六面体，并用箭头表示作用于其三个相互垂直的平面上的主应力和主应变。一般习惯地认为：用指向六面体的箭头表示压应力和压缩变形；用背离六面体的箭头表示拉应力和伸长变形。有时也用 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的顺序表示主应力的最大、中间和最小，即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，表 1—3—1 中列出了常用的一些冲压成形工艺中毛坯变形区的主应力图和主应变图。成形方法简图中虚线表示成形前毛坯的原始形状。

在确定某个冲压工序的主应力图和主应变图时，应以成形毛坯与模具之间的相互作用的分析为基础，并着重从下述几个方面着手考虑，按下面叙述的顺序逐步地确定各个方向上的主应力和主应变。

1. 首先，根据模具的几何形状对毛坯的作用，可以确定毛坯变形区产生的强制尺寸变化，即所谓主导的强制变形的性质，并且可以根据应力与应变关系的推论（见 1—2 部分）进一步确定这个方向上的主应力的方向：当主导的强制变形为伸长变形时，该方向上的主应力一定是拉应力，而且是最大主应力；当主导的强制变形为压缩变形时，该方向上的主应力一定是压应力，而且是最小主应力。例如，在翻边与扩口时，由模具几何形状所决定的主导的强制变形为切向的伸长变形 ε_1 ，故在切向上的主应力是最大拉应力 σ_1 。又如在缩口时，由模具的几何形状决定的主导的强制变形为切向的压缩变形 ε_3 ，所以在切向上的主应力必定是最小压应力 σ_3 （指代数值）。利用上述的分析方法，总是能够先确定出一个方向上的主应力和主应变。

2. 其他两个方向的主应力可按下列几个条件确定。