

LENGCHONGYA GONGYI JI MUJU SHEJI

lengchongya gongyi ji muju sheji

高等学校试用教材 (中等专业学校适用)

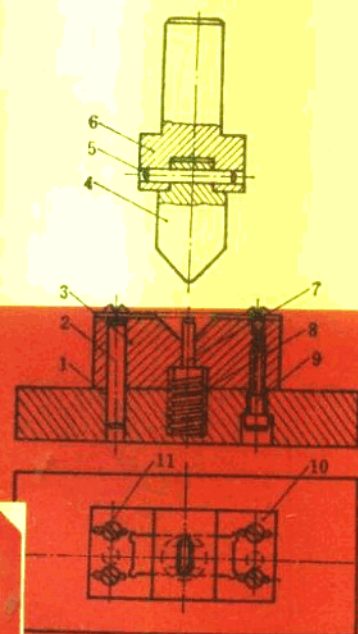
冷冲压工艺及模具设计

● 杜东福主编

湖南科学技术出版社

lengchongya gongyi ji muju sheji

LENGCHONGYA GONGYI JI MUJU SHEJI
LENGCHONGYA GONGYI JI MUJU SHEJI



冷冲压工艺及模具设计

● 杜东福主编

● 杜东福 / 苟文熙 / 徐家祥编

湖南科学技术出版社

内 容 简 介

本书对中小型零件的冷冲压工艺及模具设计作了系统叙述。全书共 10 章, 包括金属冲压成形的基本理论、冲裁、弯曲、拉深、成形、冷挤等工艺及模具设计; 还有精密级进模设计、冲模安全技术 with 自动送料装置、冲模材料与寿命、冲压工艺规程的编制等; 对简易模具和大型覆盖的成形工艺及模具也作了简介。

本书取材于生产和教学实践, 内容深入浅出, 理论联系实际。既可作高等专科学校模具专业教材, 也适宜选作其他专业和中等专业学校教材。本教材还可供从事模具设计和制造专业的技术人员参考。

冷冲压工艺及模具设计 (修订本)

主 编: 杜东福

责任编辑: 何信媛 余牧 杨林

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市展览馆路 3 号

印 刷: 湖南省新华印刷三厂

厂 址: 长沙市韶山路 158 号

邮 编: 410004

(印装质量问题请直接与本厂联系)

经 销: 湖南省新华书店

出版日期: 1996 年 5 月第 2 版第 11 次

开 本: 787×1092 毫米 1/16

印 张: 23

字 数: 570,000

印 数: 1-5100

征订期号: 96 中专技工 9377-5

ISBN 7-5357-0285-6 / TH · 14

定 价: 19.50 元

60H09/27
14
出版说明

近年来,我国经济建设的迅速发展,带动了高等院校及中等专业学校专业设置的变化,有条件的院校均围绕经济建设所需专业人才新增若干专业,同时,在已有专业的教学内容中,进行结构调整并充实新的内容,使这些教材更突出理论联系实际的特点,以利于培养应用型的建设人才。

本书是在由我社 1985 年出版的《冷冲压模具设计》(杜东福、苟文熙编)的基础上,重新精选、充实内容编写的。本书以冷冲压模具与冷冲压工艺不可分割的工艺关系为体系,详细地介绍了各种冷冲压工艺及冲模设计。

原书《冷冲压模具设计》在封面上虽标明“中等专业学校教材”,但有很多高等院校用它作专业课的教材。因此,作者在本次编写时,从内容的选取、结构的调整、授课学时的安排等,进一步研究了大专院校及中等专业学校教学的共同特点和需要,使本书既能满足大专院校教学的要求,又能满足中等专业学校的需要。

基于上述情况,本书有两种封面。一种封面仍然标明“中等专业学校教材”,这是为了多年使用原书《冷冲压模具设计》的师生,对本书不至于感到陌生,便于他们继续选用;另一种封面则标明“高等学校试用教材”,以利于高等院校的师生选用。本书再版时,将保留“高等学校试用教材”这一封面,取消“中等专业学校教材”封面。在此,特加以说明。

湖南科学技术出版社

1996 年 3 月

前 言

为了使模具专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,以培养高级应用性专业技术人才为指导思想,特编写了高等学校试用教材《冷冲压工艺及模具设计》。

本书是以冷冲压工艺及冷冲模不可分割的工艺工装关系为特征而建立的体系。其主要内容都是通过教学实践、师生反映较好的部分内容,适合教学使用。

本书由成都电子机械高等专科学校杜东福主编,丁振明主审,在审校中焦根昌也作了大量工作。

本课程的参考学时为 100 学时。其主要内容为金属冲压成形的基本理论和冲裁、弯曲、拉深、成形、冷挤等工艺及模具设计。并对精密、高效和高寿命的现代级进模具技术作了较为系统的介绍。对简易模(经济模具)、冲模材料与寿命、自动送料装置和冲压工艺规程的编制等,均作了介绍。该教材在讲述冲压成形基本理论的基础上,较为详细的提供了冲压工艺及冲模设计计算的基本方法和实例。同时,选编了多种典型冲模结构和必要的技术表格,以供读者设计时参考。

使用本教材时应注意:(1) 冲压成形的基本理论一章,概括性较强,以定性分析为主,适当考虑理论推导,力求实用。在讲解后续章节各种变形机理时,要与冲压变形基本理论紧密结合,加深理解、应用。(2) 冲裁工艺及冲裁模一章是基本内容,应加强设计练习。(3) 按照培养高级应用性专业技术人材的需要,在讲授冲裁、弯曲、拉深、成形、冷挤等工艺及模具设计的基本内容前提下,对其他内容,各校可根据具体情况和要求,作必要的取舍与补充。

本书由杜东福编写第一、二、七、八、九、十章,苟文熙编写第四、五章,徐家祥编写第三章,全书由杜东福统稿。在编写过程中,得到兄弟院校有关老师、电子行业有关工厂技术人员的大力支持和帮助,我们在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,不当之处在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1996 年元月

绪 论

冷冲压是金属压力加工方法之一，它是建立在金属塑性变形的基础上，在常温下利用冲模和冲压设备对材料施加压力，使其产生塑性变形或分离，从而获得一定形状、尺寸和性能的工件。冷冲模，是冲压加工中将材料（金属或非金属）加工成工件或半成品的一种工艺装备。

1. 冲压加工的特点

冷冲压加工与其他加工方法相比，无论在技术方面，还是在经济方面，都具有许多独特的优点。如：

(1) 冷冲压是少、无切屑加工方法之一，是一种省能、低耗、高效的加工方法，因而制品的成本较低。

(2) 冷冲压件的尺寸公差由模具保证，具有“一模一样”的特征，所以产品质量稳定。

(3) 冷冲压可以加工壁薄、重量轻、形状复杂、表面质量好、刚性好的工件。

(4) 冷冲压生产靠压力机和模具完成加工过程，其生产率高、操作简便，易于机械化与自动化。用普通压力机进行冲压加工，每分钟可达几十件；用高速压力机生产，每分钟可达数百件或千件以上。

2. 冲压加工和冲模在生产中的地位

由于冷冲压加工具有上述突出的优点，因此在批量生产中得到了广泛的应用，在汽车、拖拉机、电机、电器、仪表和日用品的生产中，已占据十分重要的地位。特别是在电子工业产品生产中，已成为不可缺少的、主要加工方法之一。据概略统计，在电子产品中，冷冲压件（包括板金件）的数量约占工件总数的85%以上。在飞机、导弹、各种枪弹与炮弹的生产中，冷冲压件所占比例也是相当大的。

冷冲模在实现冷冲压加工中是必不可少的工艺设备，没有先进的模具技术，先进的冲压工艺就无法实现。众所周知，产品要具有竞争能力，除了应具有先进技术水平、稳定的使用性能、结构新颖、更新换代快等特点外，还必须具有价格竞争优势。这就需要采用先进、高效的生产手段，不断降低成本。要达到上述目的，途径是多方面的，模具就是其中的重要因素之一，它的重要性早已为国内外所重视，并为工业发达国家的发展过程所证实，在美、日等工业发达国家，模具工业年产值，早已超过机床工业。在模具工业中冲模占的比例很大，由此可以看出冷冲压与冲模在国内外生产中的重要地位。

3. 冲压技术和冲模的发展

随着科学技术的不断进步和工业生产的迅速发展，冲压及模具技术也在不断革新与发展，主要表现在以下几个方面：

(1) 工艺分析计算方法现代化。近几年来，国外开始采用有限变形的弹塑性有限元法，对复杂成形件（如汽车覆盖件）的成形过程进行应力应变分析和计算机模拟，以预测某一工艺方案对零件成形的可能性和会发生的问题，将结果显示在图形终端上，供设计人员进行修

改和选择。这样，不但可节省模具试制费用，缩短新产品的试制周期，而且可以逐步建立一套能结合生产实际的先进设计方法，既促进了冲压工艺的发展，也将使塑性成形理论逐步达到对生产实际的指导作用。这一工作国内也已开始研究、应用。

(2) 模具设计制造技术现代化。为了加快产品的更新换代，缩短模具设计、制造周期，工业先进国家正在大力开展模具计算机辅助设计和制造 (CAD/CAM) 的研究，并在生产中应用。采用这一技术，一般可提高模具设计制造效率 2~3 倍。发展这一技术，最终是实现模具 CAD/CAM 一体化。当前国内部分企业对引进的软件经过二次开发，已逐步应用到模具生产中。应用这一技术，不仅可以缩短模具制造周期，还可提高模具质量，减少设计和制造人员的重复劳动，使设计者有可能把精力用在创新开发上。

(3) 冲压生产机械化和自动化。为了满足大量生产的需要，冲压设备由低速压力机发展到高速自动压力机。国外还加强了由计算机控制的现代化全自动冲压加工系统的研究与应用，使冲压生产达到高度自动化，从而减轻劳动强度和提高生产效率。

(4) 为了满足产品更新换代快和小批量生产的需要，发展了一些新的成形工艺 (如高能成形等)、简易模具 (如软模和低熔点合金模等)、数控冲压设备和冲压柔性制造技术 (FMS 等)。这样，就使冲压生产既适合大量生产，也适合小批生产。

(5) 不断改进板料的冲压性能。目前世界各先进工业国不断研制出冲压性能良好的板料，以提高冲压成形能力和使用效果。

《冷冲压工艺及模具设计》是模具专业的主干课之一。是一门实用性很强的课程。要求学生把已学的基础知识和实习中获得的感性认识具体应用到本课程的学习中去。通过本课程的学习和设计练习，能掌握分析、制订冲压工艺方案和设计冲模的方法，具有设计较为复杂的冲压工艺及模具的能力。

目 录

绪论	(1)
第一章 冲压成形的基本理论	(1)
§ 1-1 冲压工序分类	(1)
§ 1-2 金属塑性变形的基本概念	(4)
§ 1-3 金属塑性变形的力学规律	(6)
§ 1-4 硬化及硬化曲线	(11)
§ 1-5 冲压成形的力学特点与分类	(14)
§ 1-6 板料的冲压成形性能及试验方法	(17)
§ 1-7 成形极限图及其应用	(27)
第二章 冲裁工艺及冲裁模设计	(30)
§ 2-1 概述	(30)
§ 2-2 冲裁变形过程分析	(31)
§ 2-3 冲裁间隙	(33)
§ 2-4 凸、凹模刃口尺寸的计算	(37)
§ 2-5 排样设计	(42)
§ 2-6 冲裁力和压力中心的确定	(47)
§ 2-7 凸、凹模的结构设计	(51)
§ 2-8 冲裁模的结构及定位零件的设计	(61)
§ 2-9 其他冲裁模	(74)
§ 2-10 提高冲裁件断面质量和精度的措施	(83)
§ 2-11 非金属材料冲裁	(93)
§ 2-12 冲模的卸料、压料装置及选择	(95)
§ 2-13 冲裁模设计步骤及实例	(99)
第三章 弯曲工艺及弯曲模设计	(108)
§ 3-1 弯曲变形过程分析	(108)
§ 3-2 应变中性层的位置及最小弯曲半径的确定	(114)
§ 3-3 弯曲件的工艺性	(119)
§ 3-4 弯曲力的计算	(121)
§ 3-5 弯曲件的回弹	(123)
§ 3-6 弯曲件毛坯长度的计算	(132)
§ 3-7 弯曲件的工序安排	(134)
§ 3-8 弯曲模工作部分尺寸的设计	(137)
§ 3-9 弯曲模的结构设计	(140)

第四章 拉深工艺及拉深模设计	(148)
§ 4-1 拉深变形过程分析	(148)
§ 4-2 旋转体拉深件毛坯尺寸计算	(154)
§ 4-3 圆筒形件的拉深系数和工序尺寸计算	(159)
§ 4-4 带料级进拉深	(168)
§ 4-5 其他旋转体件的拉深	(171)
§ 4-6 盒形件拉深	(177)
§ 4-7 覆盖件拉深成形工艺及模具	(183)
§ 4-8 其他拉深方法及模具	(191)
§ 4-9 压边力、压边装置及拉深力的确定	(196)
§ 4-10 拉深模工作部分的尺寸设计	(200)
§ 4-11 拉深模结构与设计	(202)
§ 4-12 拉深工艺中的辅助工序	(206)
第五章 成形工艺及模具	(208)
§ 5-1 胀形	(208)
§ 5-2 翻边	(213)
§ 5-3 缩口	(218)
§ 5-4 校平与整形	(222)
第六章 冷挤压工艺及冷挤压模设计	(225)
§ 6-1 冷挤压概述	(225)
§ 6-2 冷挤压金属流动分析	(227)
§ 6-3 冷挤压件的工艺性	(230)
§ 6-4 冷挤压用毛坯	(232)
§ 6-5 冷挤压的变形程度	(234)
§ 6-6 冷挤压力的确定	(237)
§ 6-7 冷挤压模具的结构	(242)
§ 6-8 冷挤压凸、凹模的设计	(245)
§ 6-9 预应力组合凹模的设计	(250)
§ 6-10 温热挤压和静液挤压	(255)
第七章 多工位精密级进模设计	(257)
§ 7-1 概述	(257)
§ 7-2 级进模的排样设计	(260)
§ 7-3 级进模零部件的设计	(267)
§ 7-4 防止制件或废料回升和堵塞的措施	(280)
§ 7-5 模面制件和废料的清理	(283)
§ 7-6 模具的安全检测装置	(284)
§ 7-7 多工位级进模总体结构设计	(287)
§ 7-8 模具设计图纸尺寸的标注	(307)
第八章 冲模材料与寿命	(310)
§ 8-1 冲模材料	(310)

§ 8-2 冲模寿命	(313)
第九章 冲模的安全技术及自动送料装置	(319)
§ 9-1 冲模的安全技术	(319)
§ 9-2 自动送料装置及自动送料模	(321)
第十章 冷冲压工艺规程的编制	(337)
§ 10-1 编制冷冲压工艺规程的一般步骤	(337)
§ 10-2 编制冷冲压工艺规程的实例	(341)
附录	(349)
附表 1 常用金属材料的力学性能	(349)
附表 2 非金属材料的抗剪强度	(352)
附表 3 几种压力机的主要技术参数	(352)
附表 4 SP 系列小型高速压力机的技术参数	(353)
附表 5 中外主要模具钢号对照表	(354)
附表 6 中外常用硬质合金牌号对照	(355)
参考文献	(355)

第一章 冲压成型的基本理论

§ 1-1 冲压工序分类

一个冲压件往往需要经过多道冲压工序才能完成。由于冲压件的形状、尺寸、精度、批量、原材料等的不同，其冲压工序也是多样的，但大致可分为分离工序和成形工序两大类。

1. 断裂分离工序

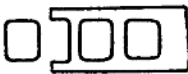
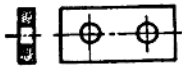
分离工序是在冲压过程中使冲压零件与板料沿一定轮廓线相互分离的工序，如切断、冲孔、落料等。

2. 塑性成形工序

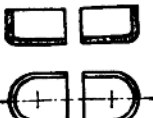
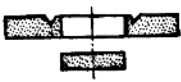
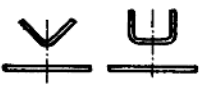
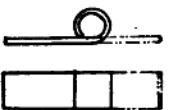
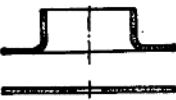
塑性成形工序是材料在不破裂的条件下产生塑性变形，从而获得一定形状、尺寸和精度要求的零件，如弯曲、拉深、胀形、翻边、缩口等。

常用冲压工序名称及特征见表 1-1。

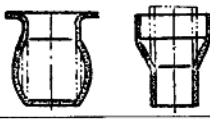
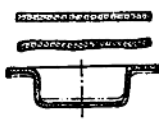
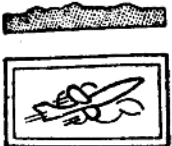
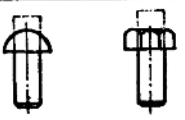
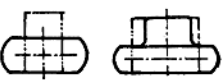
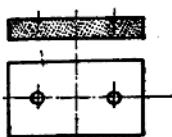
表 1-1 常用冲压工序名称和特征

类别	组别	工序名称	工 序 简 图	工 序 特 征
材 料 的 断 裂 分 离	冲	切 断		用剪刀或模具切断板料或条料的部分周边
		落 料		用落料模沿封闭线冲裁板料或条料，冲掉部分是制件
		冲 孔		用冲孔模沿封闭线冲掉工件或毛坯上部分材料，冲掉部分是废料
	裁	切 口		用切口模将部分材料切开，但并不使它完全分离，切开部分材料发生弯曲
		切 边		用切边模将坯件边缘的多余材料冲切下来

续表

类别	组别	工序名称	工 序 简 图	工 序 特 征
材 料 的 断 裂 分 离	冲 裁	剖 切		用剖切模将弯曲件或拉深件剖成两部分或几部分
		整 修		用整修模切掉坯件的外缘或内孔的余量,以得到光滑的断面和精确的尺寸
		精 冲		用精冲模从板料中冲裁出尺寸精确、断面光滑而垂直的制件
材 料 的 塑 性 成 形	弯 曲	压 弯		用弯曲模将平板毛坯(或丝料、杆件毛坯)压弯成一定角度,或将已弯件作进一步弯曲
		卷 边		用卷边模将条料端部按一定半径卷成圆形
		扭 曲		用扭曲模将平板毛坯的一部分相对另一部分扭转到一定的角度
	拉 深	拉 深 (不变薄)		用拉深模将平板毛坯压延成空心件,或使空心毛坯作进一步变形
		变薄拉深		用变薄拉深模减小空心毛坯的直径与壁厚,以得到底厚大于壁厚的空心制件
	成 形	起伏成形		用成形模使平板毛坯或制件产生局部拉深,以得到起伏不平的制件
		翻 边		用翻边模在有孔或无孔的板件或空心件上,翻出直径更大而成一定角度的直壁

续表

类别	组别	工序名称	工 序 简 图	工 序 特 征
材 料 的 塑 性 成 形	成 形	卷 缘		用卷缘模使空心件的边缘向外卷成圆弧边缘
		胀 形		从空心件内部施加径向压力使局部直径胀大
		缩 径		在空心件外部施加压力,使局部直径缩小
		整 形 (平面的或立体的)		1. 用校平模将有拱弯、翘曲的平板制件压平; 2. 用整形模将弯件或拉深件不准确的地方压成准确形状
	立 体 压 制	压 印		用压印模使材料局部转移,以得到凸凹不平的浮雕花纹或标记
		冷挤压		用冷挤压模使金属沿凸、凹模间隙流动,从而使厚毛坯转变为薄壁空心件或横断面小的半成品
		顶 墩		用顶墩模使金属体积重新分布及转移,以得到头部比杆部粗大的制件
		墩 粗		用墩粗模使金属重新分布,使金属向周围自由流动,以减小毛坯高度,增大直径
		冷 墩		用冷墩模使金属体积重新分布,使其充满模腔的空隙,以得到立体实心件
		冲 眼		用锥形凸模在零件表面上冲出中心眼(不冲穿),为以后钻孔定心用

§ 1-2 金属塑性变形的基本概念

1. 塑性及塑性变形

在固体材料中，原子之间作用着相当大的力，足以抵抗重力的作用，所以在没有其他外力作用的条件下，物体具有自己的形状和尺寸。固体是由质点或微元体所组成的，对固体施加外力，引起固体的形状和尺寸的改变，这种改变伴随着质点间距离的变化，或微元体的形状和尺寸的变化。

假如作用于物体的外力卸载后，由外力引起的变形随之消失，物体能完全恢复自己的原始形状和尺寸，这样的变形称为弹性变形；假如作用于物体的外力卸载后，物体并不能完全恢复自己的原始形状和尺寸，这样的变形称为塑性变形（残余变形）。

塑性变形也和弹性变形一样，它们都是在变形体不破坏的条件下进行的，或在变形体中局部区域的不破坏条件进行的。

所谓塑性，是指固体材料在外力作用下发生永久变形，但不破坏其完整性的能力。塑性不仅与材料本身的性质有关，也与变形条件有关。所以，不同的材料在同一变形条件下有不同的塑性；而同一种材料，在不同的变形条件下又会出现不同的塑性。例如金属铅在一般情况下变形时，具有极好的塑性，但在三向等拉应力的作用下，却像脆性材料一样地破坏，而不产生任何塑性变形；反之大理石在一般情况下变形毫无塑性，但在三向压应力作用下可以产生一定的塑性变形。

塑性的大小可用“塑性指标”来评定。塑性指标是以材料临近开始破坏时的塑性变形量来表示的。塑性指标可用各种试验方法求得。

2. 影响金属塑性变形的的主要因素

影响金属塑性变形的因素很多，除金属的成分、组织结构等内在因素之外，其外部因素—变形方式、变形条件的影响也是很大的。从冲压工艺的角度出发，往往着重于外部条件的研究，以便创造条件，充分发挥材料的变形潜力，尽可能减少工序次数。

(1) 金属的成分和组织结构

金属的组织结构决定于它的化学成分。组成金属主要元素的晶格类别，杂质的性质、数量及分布情况，晶粒的大小、方向及形状，都与化学成分有关。对于多晶体金属本身的可塑性受下列因素影响：晶界强度、晶粒大小、化学成分、组织上的均匀性以及可能发生滑移系统的数量等。一般来说：组成金属的元素越少（如纯金属和固溶体），可塑性越好；滑移系统数量越多、力学性能越一致、晶界强度越大，可塑性越好。

(2) 变形温度

对于冲压加工中应用最广泛的材料，如：软钢、铜、铝等熔点较高的金属，其温度与塑性的关系如图 1-1 所示。由图可知，塑性随变形温度的升高而增加。通常把在室温附近的加工称为冷加工，把再结晶温度以上的加工称热加工，把稍高于常温而低于再结晶温度的加工称温态加工。

金属热态时 σ_s 降低， δ 增加，对塑性变形有利，但应避免蓝脆区、红脆区及高温脆性区的塑性加工。由图 1-2 可知，碳钢的蓝脆区在 200~300℃ 之间，红脆区在 950℃ 左右，高温脆性区在 1100℃ 左右。

对于锡、铅等低熔点金属材料，其再结晶温度接近室温，它们从室温到接近熔点都具有

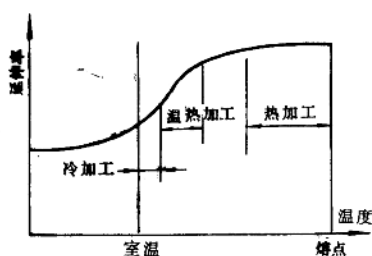


图 1-1 温度与塑性的关系模式

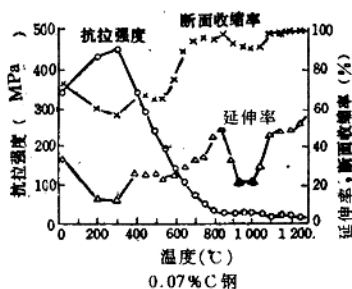


图 1-2 碳钢拉伸特性随温度的变化

良好的塑性，因而在常温加工都可以看成是热加工。

对于镁和钛合金等材料，它们在常温时塑性很小。很难进行塑性加工，但稍高于常温就能进行塑性加工。因此这类金属的塑性加工常在温态下进行，即温态加工。表 1-2 即为此类金属及合金的温态加工实例。

表 1-2 温态易于冲压成形的金属、合金实例

材 料	变形温度范围	加工实例
锌	25~50°C	拉 深
钼	500~600° F	拉深, 旋压
镁	350° F	弯曲加工
镁	300~600° F	拉深
镁合金	600~650° F	拉深
MgMn 合金	320~350° F	拉深
MgAl7 合金	300~350° F	拉深
钛	1000° F	张拉成形
钛	950° F	内外缘翻边
钛合金	950~1050° F	内外缘翻边的蠕变成形法校正
钛合金(6Al-4V)	1150~1200° F	内外缘翻边的蠕变成形法校正
奥氏体不锈钢(302)	650° F	拉深
铁素体不锈钢	200~300° F	拉深, V 形弯曲, 管子弯曲等
马氏体不锈钢	(浸在沸水中)	

(3) 变形速度

变形速度对于金属塑性变形的影响是相当复杂的。

一方面，速度增高（特别是高速冲压），金属变形时易产生孪动，滑移层变细，滑移线分布更密集，这就增加了滑移和孪动的临界剪应力以及晶内和晶间破坏的极限应力，使金属的变形抵抗力增加，并有可能出现晶间脆裂。这些现象与金属晶格类型、晶粒的成分和结构以及其他因素有关。另一方面，由于热效应的原因，引起金属温度升高，金属的塑性又得到改善。

(4) 应力状态

应力状态中的压应力个数多、数值大，则塑性好；反之，塑性差，其原因将在§ 1-3 中分析。

§ 1-3 金属塑性变形的力学规律

一、变形物体的应力应变状态

冲压成形时，外力通过模具作用于板料毛坯，使之产生塑性变形，同时在毛坯内部引起反抗变形的内力。在一般情况下，毛坯变形区内各处的应力和应变都不尽相同。为了了解毛坯的变形规律，就必须研究点的应力状态和应变状态。

1. 点的应力状态

一点的应力状态是通过在该点周围截取的微小六面体——单元体上各个互相垂直面上的应力来表示的，一般可沿坐标方向将这些应力分解成九个应力分量，即三个正应力和六个剪应力，如图 1-3 (a) 所示。但是，由于其中三对剪应力是相等的 ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$)，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。

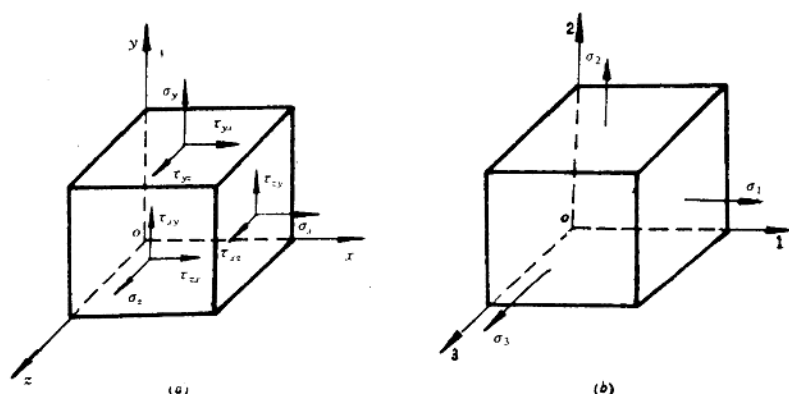


图 1-3 点的应力状态
(a) 任意坐标系；(b) 主轴坐标系

必须指出，图 1-3 (a) 中的坐标系 X 、 Y 、 Z 的方向是任意的，如果坐标系选取的方向不同，那么，虽然该点的应力状态并没有改变，但是用来表示该点应力状态的九个应力分量就会与原来的数值不同。不过，对任何一种应力状态来说，总存在这样一组坐标系，使得单元体表面上只出现正应力，而没有剪应力时，如图 (b) 所示。这时，三个坐标轴称为主轴，三个坐标轴的方向就叫主方向，三个正应力叫做主应力，一般按其代数值大小依次用 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 表示，即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 三个主应力的作用面称为主平面。

在一般情况下，单元体的三个主方向都有应力，这种应力状态称为三向应力状态，或称空间（立体）应力状态，如宽板弯曲变形。通常可能出现的三向应力状态有四种，即三压、两压一拉、一压两拉、三拉。但在大多数的板料成形工序中，厚度方向的应力与其他两个垂

直方向的主应力相比，往往很小，可忽略不计，这种应力状态称平面应力状态，如拉深、翻边和胀形。可能出现的平面应力状态有三种，即两压、一拉一压、两拉。当三个主应力中有两个为零，只在一个方向有应力时，称此为单向应力状态，或称线应力状态，如翻边时孔或外形的边缘处，即为单向应力状态。可能出现的单向应力状态只有两种，即一压和一拉。因此可能出现的应力状态图就有九种，如图 1-4 所示。

如果三个主应力大小都相等，即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ，则称为球应力状态。这种应力状态不可能产生剪应力，故所有方向都可看作是主方向，而且所有方向的主应力都相等。深水中的微小物体所处的就是这样一种应力状态（三向等压），所以，习惯上常将三向等压应力称为（正）静水压力。在冲裁工序中，静水压力的大小对极限塑性应变值和裂纹的产生都有很大的影响。

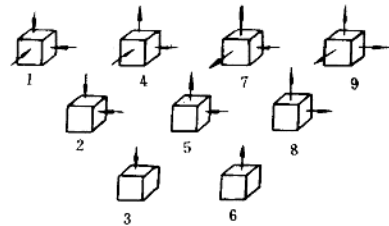


图 1-4 主应力状态图

应力状态对塑性变形有很大的影响。由实践可知单向压缩达到的变形程度比单向拉伸大得多；三向压应力状态的挤压比二向压缩一向拉伸的拉拔能发挥更大的塑性。德国学者卡尔曼对通常认为是脆性材料的大理石和红砂石进行了试验，试验结果是：大理石在单向压缩时缩短率不到 1% 就会破坏，但在 7650 个大气压力的静水压力下压缩时，缩短率可达 9% 左右才破坏。

上述结果表明，强化三向压应力状态，能充分发挥材料的塑性，这实质上是应力状态中的静水压力分量在起作用。应力状态中的压应力个数多，数值大，静水压力也大，则塑性好；反之，压应力个数少或数值小，或甚至存在拉应力，则静水压力减小，塑性就差。

为什么静水压力越大，金属的塑性会越好，这可由下列理由来解释：

(1) 拉应力会促进晶间变形，加速晶界的破坏；而压应力能阻止或减少晶间变形，随着三向压应力作用的增强，晶间变形愈加困难，因而提高了金属的塑性。

(2) 三向压应力有利于消除由于塑性变形所引起的各种破坏；而拉应力则相反，它促使各种破坏的发展。例如，在某晶粒的滑移面上，由于滑移变形而产生一显微缺陷，若此时滑移面上作用着拉应力，则会促使原子层彼此分离，加速晶粒的破坏。反之，若作用着压应力，则有利用该缺陷的封闭和消除（图 1-5）。

(3) 当变形体内原来存在着少量对塑性不利的杂质或组织缺陷时，三向压缩作用能抑制这些缺陷，全部或部分地消除其危害。反之，在拉应力作用下，将在这些地方造成应力集中，导致金属的破坏。

(4) 三向压缩作用还能抵消由于不均匀变形所引起的附加拉应力，防止表面裂纹的产生。

用主应力图可以帮助我们定性分析各种应力状态下塑性的高低，图 1-4 所示的主应力图有九种，即三向应力状态的四种，二向应力

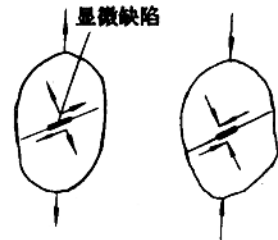


图 1-5 滑移面上的显微缺陷受拉应力和压应力作用的示意图