

普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

模具设计与制造

张荣清 主编

侯维芝 王鑫 副主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材（高职高专教育），也是教育部高职高专规划教材。本书是为机械类专业学生学习模具设计与制造知识而编写的。主要内容包括冲压成形工艺及冲压模、塑料成形工艺及塑料模、模具制造工艺三篇。内容精炼，通俗实用。本书可作为高职、高专及成人院校机类、近机类专业教学用书，也可供有关的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

模具设计与制造/张荣清主编. —北京：高等教育出版社，2003.7
ISBN 7-04-012552-8

I. 模... II. 张... III. ①模具—设计—高等学校—教材②模具—制造—高等学校—教材 IV. TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 046753 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	10001	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷			
开 本	787×1092 1/16	版 次	年 月第 版
印 张	19.75	印 次	年 月第 次印刷
字 数	470 000	定 价	24.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究

策	划	赵	亮
责任编辑		胡	纯
封面设计		于	涛
责任绘图		朱	静
版式设计		胡志萍	
责任校对		尤	静
责任印制			

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作，2000 年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》（教高司〔2000〕19 号），提出了“力争经过 5 年的努力，编写、出版 500 本左右高职高专教育规划教材”的目标，并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施：先用 2 至 3 年时间，在继承原有教材建设成果的基础上，充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验，解决好高职高专教育教材的有无问题；然后，再用 2 至 3 年的时间，在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神，有关院校和出版社从 2000 年秋季开始，积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据 1999 年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》（草案）和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》（草案）编写的，随着这些教材的陆续出版，基本上解决了高职高专教材的有无问题，完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002 年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题，将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略，抓好重点规划”为指导方针，重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设，特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材；同时还要扩大教材品种，实现教材系列配套，并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系，在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材（高职高专教育）适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002 年 11 月 30 日

前 言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材（高职高专教育），也是教育部高职高专规划教材。

按照高职高专人才培养目标要求，优化知识结构，拓宽知识面，机械类专业学生需具备一定的模具设计和制造能力，本书就是根据这一目标编写的。全书共分三篇，第一篇为冲压成形工艺及冲压模篇，主要介绍塑性成形的基本理论、常用的冲压工艺及典型的模具结构、冲压工艺设计，同时还简要介绍了冲压常用设备、冲压常用材料等有关内容；第二篇为塑料成形工艺及塑料模篇，主要介绍了注射成形工艺及注射模设计的有关内容，简要介绍了其他的塑料成形工艺、塑料及注射机的基本知识；第三篇为模具制造工艺篇，主要介绍了模具特种加工及模具装配的有关知识，简要介绍了模具的机械加工、现代模具制造的一些基本知识；附录介绍了模具常用的材料及热处理要求。

模具技术是一门综合性很强的学科，也是近年来飞速发展的学科之一。本书编写过程中，力求体现新技术、新工艺，突出实用。考虑机械类专业学生的知识结构，在内容的安排上，力求知识结构完整统一，增加了一些模具设计之外所必需的有关知识，如成形设备、材料等，同时避免与机械类专业知识的重复。本书内容通俗易懂，模具结构实用，每章均附有思考题，以方便学生学习。

本书除绪论外，共计三篇 14 章，张荣清编写了绪论和第 1、4、6、7 章，张荣清，杨占尧编写第 8、9 章及附录，侯维芝编写了第 2、3 章，王鑫编写了第 5、10、14 章和附录以及第 13 章的 13.1、13.2、13.4 节，印书范编写了第 11 章及第 13 章的 13.3 节，段继承编写了第 12 章。全书由张荣清任主编并负责全书的统稿及修改，侯维芝、王鑫任副主编。全书由合肥工业大学刘全坤教授审阅。

本书在编写过程中得到了兄弟院校、有关企业专家的大力支持和帮助，苏州永儒塑胶有限公司的黄正儒先生提供了部分图稿，中德现代制造中心的杨清林先生对书稿提出了宝贵意见，于万红同志对书稿的录入、编辑做了大量的工作，在此一并感谢。

本书适用于各类高职高专、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校机械类专业学生使用，也可供从事模具设计与制造的工程技术人员参考。

由于编者水平有限，书中不当和错误之处在所难免，恳请使用本书的教师和广大读者批评指正。

编者

2003 年 1 月

目 录

绪论	1
----------	---

第 1 篇 冲压成形工艺及冲压模

第 1 章 冲压成形概述	7	3.7 弯曲模工作部分尺寸计算	74
1.1 冲压成形特点与分类	7	思考题	76
1.2 冲压成形的基本理论	9	第 4 章 拉深工艺与拉深模	78
1.3 冲压常用材料	15	4.1 拉深工艺及拉深件的工艺性	78
1.4 冲压设备	16	4.2 拉深变形过程分析	79
思考题	20	4.3 拉深工艺设计	85
第 2 章 冲裁工艺与冲裁模	21	4.4 拉深模具结构	91
2.1 冲裁工艺及冲裁件的工艺性	21	4.5 拉深模设计	95
2.2 冲裁变形过程分析	24	4.6 其他形状零件的拉深	106
2.3 排样设计	25	思考题	112
2.4 冲裁工艺计算	30	第 5 章 其他成形工艺与模具	114
2.5 冲裁模典型结构	36	5.1 胀形	114
2.6 冲裁模零部件结构设计	41	5.2 翻边	118
2.7 硬质合金模	52	5.3 冷挤压	123
思考题	54	5.4 覆盖件成形	130
第 3 章 弯曲工艺与弯曲模	56	思考题	138
3.1 弯曲工艺及弯曲件工艺性	56	第 6 章 冲压工艺设计	139
3.2 弯曲变形过程分析	59	6.1 冲压工艺设计过程	139
3.3 弯曲件展开长度	61	6.2 冲压工艺方案的拟订	140
3.4 弯曲力计算	63	6.3 模具设计	141
3.5 弯曲件的回弹	64	思考题	142
3.6 弯曲模结构	66		

第 2 篇 塑料成形工艺及塑料模

第 7 章 塑料成形概述	147	8.1 注射成形原理及工艺特点	166
7.1 塑料及塑料模的基本概念	147	8.2 注射模的分类及结构组成	170
7.2 塑件的结构工艺性	152	8.3 分型面	171
7.3 塑料成形设备	160	8.4 浇注系统	173
思考题	165	8.5 成形零件的设计	181
第 8 章 注射成形工艺及注射模	166	8.6 机构设计	186

8.7 注射模典型结构	197	9.2 压注成形工艺与压注模	207
思考题	199	9.3 挤出成形工艺与挤出模	212
第9章 其他塑料成形工艺与模具	200	思考题	221
9.1 压缩成形工艺与压缩模	200		

第3篇 模具制造工艺

第10章 模具制造概述	225	思考题	280
10.1 模具制造过程及生产特点	225	第13章 现代模具制造技术	282
10.2 模具制造工艺规程的编制	228	13.1 数控机床加工	282
10.3 模具零件毛坯选择	230	13.2 模具 CAD/CAM	286
10.4 试模鉴定	233	13.3 快速模具制造技术	288
思考题	234	13.4 逆向工程技术简介	291
第11章 模具成形表面的机械加工	235	思考题	293
11.1 车削加工	235	第14章 模具的装配过程	294
11.2 铣削加工	238	14.1 概述	294
11.3 磨削加工	245	14.2 模具零件的连接方法	294
11.4 其他加工	256	14.3 模具间隙的控制方法	296
思考题	258	14.4 冷冲压模具的装配	298
第12章 模具成形表面的特种加工	260	14.5 塑料模的装配	301
12.1 电火花成形加工	260	思考题	304
12.2 数控电火花线切割加工	270		

附录 模具常用材料及热处理要求	305
参考文献	309

绪 论

模具是工业产品生产用的重要工艺装备，它是以其自身的特殊形状通过一定的方式使原材料成形（成型）。现代产品生产中，模具由于其加工效率高、互换性好、节省原材料，所以得到广泛的应用。

按成形的对象和方式来分，模具大致可以分为三类：金属板料成形模具，如冷冲压模；金属体积成形模具，如锻造模、粉末冶金模、压铸模等；非金属材料成形模具，如塑料模、玻璃模、陶瓷模等。其中使用量最大的是冲压模和塑料模，约占模具总量的 80 纮左右。

模具技术已成为衡量一个国家产品制造水平的重要标志之一。模具技术能促进工业产品的发展和质量的提高，并能获得极大的经济效益，模具是“效益放大器”，用模具生产的产品的价值往往是模具价值的几十倍、上百倍。美国工业界认为“模具工业是美国工业的基石”，日本把模具誉为“进入富裕社会的原动力”。

模具工业在我国已经成为国民经济发展的一个重要基础工业之一。国民经济的支柱产业如机械、电子、汽车、石油化工和建筑业等都要求模具工业的发展与之相适应，都需要大量模具，特别是汽车、电机、电器、家电和通信等产品中 60 纮 ~ 80 纮的零部件都要依靠模具成形。我国石化工业一年生产 500 多万吨聚乙烯、聚丙烯和其他合成树脂，很大一部分需要塑料模具成形，做成制品，用于生产和生活的消费。生产建筑业用的地砖、墙砖和卫生洁具，需要大量的陶瓷模具，生产塑料管件和塑钢门窗，也需要大量的塑料模具成形。

正因为如此，我国非常重视模具工业的发展，重视模具技术的提高。早在 1984 年就成立了全国模具工业协会。1989 年在国务院颁布的《关于当前产业政策要点的决定》中，模具就被列为机械工业技术改造序列的首位。1997 年以来，又相继把模具及其加工技术和设备列入《当前国家重点鼓励发展的产业、产品和技术目录》和《鼓励外商投资产业目录》。所有这些政策的制定和贯彻，都极大地推动了我国模具工业的发展。

经过多年的建设与努力，我国的模具工业已初具规模，取得了相当的成就。到目前为止，我国已制定了模具技术国家标准 50 多项、近 300 多个标准号。许多研究机构和大专院校都已经开始进行模具技术的研究和开发，目前从事模具技术研究的机构和院校已达 30 余家，从事模具技术教育和培训的院校已超过 50 家，为我国的经济建设输送了大批人才，并同时取得了一大批科研成果。其中获得国家重点资助建设的有华中科技大学模具技术国家重点实验室、上海交通大学模具 CAD 国家工程研究中心、北京机电研究所精冲技术国家工程研究中心和郑州大学橡塑模具国家工程研究中心等，在模具 CAD/CAM/CAE 技术、模具的电加工和数控加工技术、快速成形与快速制模技术、新型模具材料等方面取得了显著进步；在提高模具质量和缩短模具设计制造周期等方面做出了贡献。

目前，国内已可制造具有自动冲切、叠压、铆合、计数、分组和安全保护等功能的铁芯精密自动叠片多功能模具，生产的电机定转子双回转叠片硬质合金级进模的步距精度可达 $2\text{ }\mu\text{m}$ ，

寿命达到 1 亿次以上；电视机、空调、洗衣机等家用电器所需的塑料模具基本上可立足于国内生产，重量达 10 ~ 20 t 的汽车保险杠和整体仪表板等塑料模具和多达 600 腔的塑封模具已可自行生产。在精度方面，塑件的尺寸精度可达 IT6、IT7 级，型面的表面粗糙度达到 $Ra\ 0.05 \sim 0.025\ \mu\text{m}$ ，模具使用寿命达 100 万次以上。

我国现已拥有模具企业 1.8 万家，仅浙江宁波和黄岩地区，从事模具制造的集体企业和私营企业就达数千家，成为国内知名的“模具之乡”和最具发展活力的地区之一。2001 年我国模具工业产值约为 300 多亿元人民币，折合 30 多亿美元，并出口 1.88 亿美元。

可以预言，随着工业生产的不断发展，模具工业在国民经济中的地位将日益提高，并在国民经济发展过程中发挥越来越重要的作用。

虽然中国模具工业在过去十多年中取得了令人瞩目的成就，但许多方面与工业发达国家相比仍有较大的差距。例如，精密加工设备在模具加工设备中的比重比较低；CAD/CAM/CAE 技术的普及率不高；许多先进的模具技术应用不够广泛等等，致使相当一部分大型、精密、复杂和长寿命模具依赖进口。我国未来模具技术发展趋势可以归纳为以下几点：

(1) 全面推广应用 CAD/CAM/CAE 技术 模具 CAD/CAM/CAE 技术是模具技术发展的一个重要里程碑。由于产品的更新换代日趋频繁，产品精度要求越来越高，形状越来越复杂，对模具的要求也越来越高。实践证明，模具 CAD/CAM/CAE 技术是模具设计制造的发展方向。随着计算机技术的发展和进步，已基本具备了普及 CAD/CAM/CAE 技术的条件。

(2) 不断提高模具标准化程度 为了适应模具生产的需要，缩短模具制造周期，降低制造成本，模具标准化工作十分重要。经过一段时期的建设，我国模具标准化程度正在不断提高，估计目前我国模具标准件使用覆盖率已达到 30 纮左右。国外发达国家一般为 80 纮左右。为了适应模具工业发展，模具标准化工作必将加强，模具标准化程度将进一步提高，模具标准件生产也必将得到发展。

(3) 优质材料及先进表面处理技术的应用 为了提高模具的使用寿命，提高产品的制造质量，优质材料及先进表面处理技术将进一步受到重视，国内外模具材料的研究工作者对模具的工作条件、失效形式和提高模具使用寿命的途径进行了大量的研究，并开发出了许多使用性能好、加工性好、热处理变形小的模具材料，如预硬钢、耐腐蚀钢等。

模具热处理和表面处理是能否充分发挥模具钢材料性能的关键环节。模具热处理的发展方向是采用真空热处理。模具表面处理除完善普及常用表面处理方法如：渗碳、渗氮、渗硼、渗铬、渗钒外，应发展设备昂贵、工艺先进的气相沉积、等离子喷涂等技术。

(4) 模具制造技术的高效、快速、精密化 随着模具制造技术的发展，许多新的加工技术、加工设备不断出现，模具制造手段越来越丰富，越来越先进。

快速原型制造 (RPM) 技术是美国首先推出的，被公认为是继 NC 技术之后的一次技术革命。它是伴随着计算机技术、激光成形技术和新材料技术的发展而产生的，是一种全新的制造技术，根据零件 CAD 模型，快速自动完成复杂的三维实体 (模型) 制造。采用这种方法制造模具，从模具的概念设计到制造完成，仅为传统加工方法所需时间的 $1/3$ 和成本的 $1/4$ 左右。

国外近年来发展的高速铣削加工，其主轴转速可达 $40\ 000 \sim 100\ 000\ \text{r/min}$ ，快速进给速度可达到 $30 \sim 40\ \text{m/min}$ ，加速度可达 $1\ g$ ，换刀时间可提高到 $1 \sim 2\ \text{s}$ ，加工模具的硬度可达 60 HRC，表面粗糙度可达 $Ra < 1\ \mu\text{m}$ 。高速切削加工与传统切削加工相比具有加工效率高、温升

低（加工工件只升高 3℃）、热变形小等优点。目前它已向更高的敏捷化、智能化、集成化方向发展。高速铣削加工促进了模具加工技术的发展，特别是对汽车、家电行业中大型型腔模具制造注入了新的活力。

电火花铣削加工技术是用高速旋转的简单的管状电极作三维或二维轮廓加工（像数控铣一样），因此不再需要制造复杂的成形电极，这显然是电火花成形加工领域的重大发展。国外已有使用这种技术的机床进行模具加工。

（5）逆向工程技术 采用逆向工程技术，可以快速、正确地把复杂的实物复制出来，同时也可通过实物制造模具进行复制。目前我国已有许多模具厂家拥有高速扫描机和模具扫描系统，该系统提供了从模型或实物扫描到加工出期望的模型所需的诸多功能，大大缩短了模具的研制制造周期。逆向工程将在今后的模具生产中发挥越来越重要的作用。

（6）模具研磨抛光的自动化、智能化 模具表面的精加工是模具加工中未能很好解决的难题之一。模具表面的质量对模具使用寿命、制件外观质量等方面均有较大的影响，目前我国仍以手工研磨抛光为主，不仅效率低（约占整个模具周期的 1/3），且工人劳动强度大，质量不稳定，制约了我国模具加工向更高层次发展。因此，研究抛光的自动化、智能化是重要的发展趋势。日本已研制了数控研磨机，可实现三维曲面模具的自动化研磨抛光。

第 1 篇

冲压成形工艺及冲压模

第 1 章 冲压成形概述

1.1 冲压成形特点与分类

1.1.1 冲压成形特点

冲压成形是指在压力机上通过模具对板料金属（或非金属）加压，使其产生分离或塑性变形，从而得到具有一定形状、尺寸和性能要求的零件的加工方法，它属于塑性成形的加工方法之一，见图 1.1。这种加工方法又称为冷冲压或板料冲压，所使用的成形工具称为冷冲压模具，简称冲模。冲模设计是实现冷冲压工艺的核心，一个冲压零件往往要用几副模具才能加工成形。

冲压成形是一种先进的金属加工方法，和其他的加工方法（如机械加工）相比具有以下一些特点：

（1）可以获得其他加工方法不能或难以加工的形状复杂的零件，如汽车覆盖件、车门等。

（2）由于尺寸精度主要由模具来保证，所以加工出的零件质量稳定，一致性好，具有“一模一样”的特征。

（3）材料利用率高，属于少、无切屑加工。

（4）可以利用金属材料的塑性变形提高工件的强度、刚度。

（5）生产率高、操作简便，易于实现自动化。

（6）模具使用寿命长，生产成本低。

由于以上特点，冲压生产被广泛用于汽车、拖拉机、电机、电器、仪器仪表以及飞机、国防、日用工业等部门。例如某联合收割机有 1 613 个零件，其中冲压件为 1 023 个，占 63.4 %；某冲锋枪 120 个零件中有 56 个冲压件，占 46.7 %。

1.1.2 冲压工序分类

冲压工序按变形性质可分为分离工序和成形工序两大类。

1. 分离工序

被加工材料在外力作用下因剪切而发生分离，从而形成具有一定形状和尺寸的零件，如剪

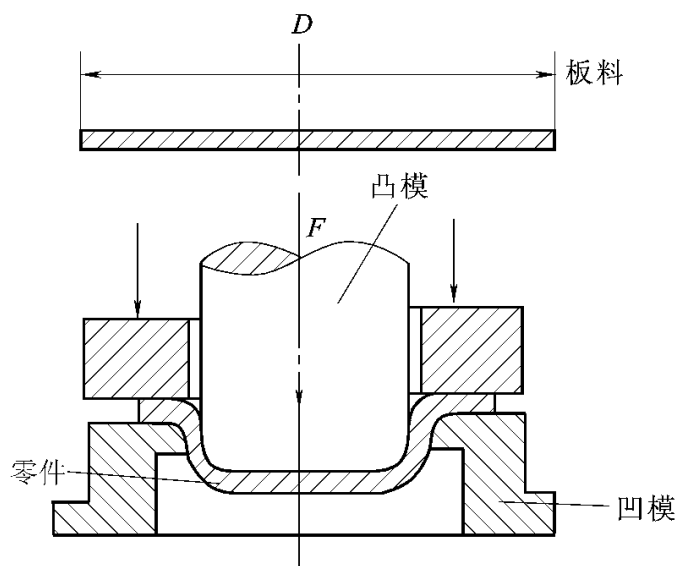


图 1.1 冲压过程简图

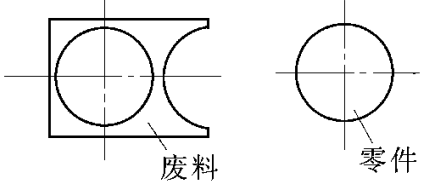
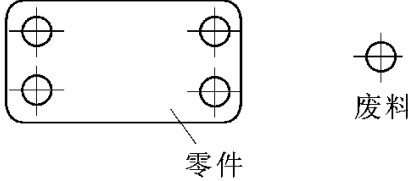
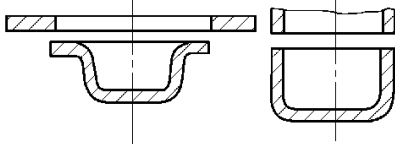
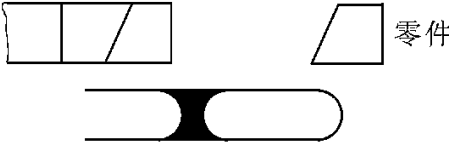
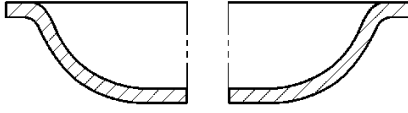
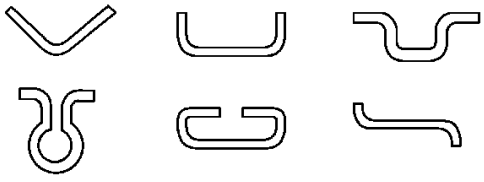
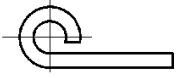
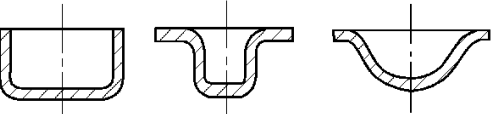
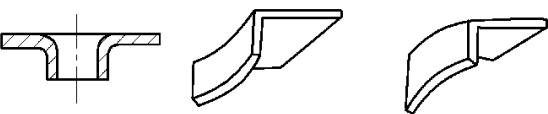
裁、冲孔、落料、切边等。

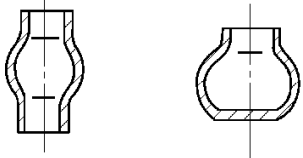
2. 成形工序

被加工材料在外力作用下，发生塑性变形，从而得到具有一定形状和尺寸的零件，如弯曲、拉深、翻边等。

常用的冲压工序见表 1.1。

表 1.1 常用的冲压工序

工序名称		简 图	特点及应用范围
分离 工 序	落料		用冲模沿封闭轮廓线冲切 ,冲下部分是零件 , 或为其他工序制造毛坯
	冲孔		用冲模沿封闭轮廓线冲切 ,冲下部分是废料
	切边		将成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状
	切断		用剪刀或冲模沿不封闭线切断 ,多用于加工 形状简单的平板零件
	剖切		将冲压加工成的半成品切开成为二个或多个 零件 ,多用于零件的成双或成组冲压成形之后
成 形 工 序	弯曲		将板材沿直线弯成各种形状 ,可以加工形状 复杂的零件
	卷圆		将板材端部卷成接近封闭的圆头 ,用于加工 类似铰链的零件
	拉深		将板材毛坯拉成各种空心零件 ,还可以加工 汽车覆盖件
	翻边		将零件的孔边缘或外边缘翻出竖立成一定角 度的直边

工序名称		简 图	特点及应用范围
成形 工序	胀形		在双向拉应力作用下的变形,可成形各种空间曲面形状的零件
	起伏		在板材毛坯或零件的表面上用局部成型的方法制成各种形状的凸起与凹陷

1.2 冲压成形的基本理论

1.2.1 塑性、塑性变形与塑性条件

1. 塑性

塑性是指固体材料在外力作用下发生永久变形而不破坏其完整性的能力。材料的塑性是塑性加工的依据，冲压成形时总希望被冲压的材料具有良好的塑性。

金属材料的塑性与柔软性概念不同，柔软性只是物质变形抗力的标志，它与金属材料塑性没有直接的联系，软的材料塑性不一定好；同样，塑性好的材料不一定是柔软的。例如奥氏体不锈钢在室温下具有良好的塑性，但其变形抗力却很大（即柔软性差）。

同一变形条件下不同的材料具有不同的塑性，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会像脆性材料一样被破坏，而不产生任何塑性变形；大理石在一般情况下，毫无塑性，但在三向压应力的作用下可以产生一定的塑性变形。此外，某些金属在一定的温度及低的变形速度下进行拉伸，可得到几倍、甚至几十倍的均匀拉伸变形，即达到金属的超塑性状态。

2. 影响塑性变形的因素

影响金属材料塑性变形的因素有两方面，一是金属材料本身，有晶格类型、化学成分和金相组织等；二是外部条件，有变形温度、变形速度和应力状态等。

（1）金属的成分和组织结构 金属的组织结构取决于它的化学成分。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，晶粒大小、方向及形状，都与化学成分有关。多晶体金属本身的塑性受下列因素影响：晶界强度、晶粒大小、化学成分、组织均匀性以及可能发生滑移系统的数量等。一般说来，组成金属的元素越少（如纯金属和固溶体），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，塑性越好。

（2）变形温度 金属材料的塑性与变形温度有着非常大的关系，不同的金属在不同的温度条件下所表现出的塑性状态也不一样。如软钢、铜等熔点较高的金属，其温度与塑性的关系如图 1.2 所示，随着变形温度的升高塑性会提高。

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为热加工，把稍高于常温而低于再结晶温度的加工称为温加工。对于锡和铅等低熔点金属材料，其再结晶温度接近室

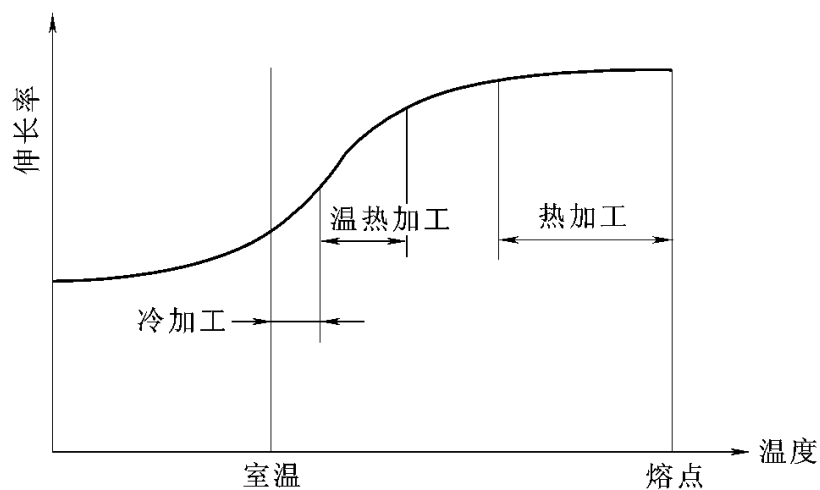


图 1.2 塑性与温度的关系

温，它们从室温到熔点都具有良好的塑性，因而在常温下加工可以看成为热加工；对于镁和钛等材料，它们在常温时塑性很差，很难进行塑性加工，但稍高于常温就能进行加工，因此这类金属的塑性加工常在温态下进行，即温态加工。

(3) 应力状态 金属在塑性变形时应力状态非常复杂，为了研究变形金属各部位的应力状态，在变形物体中取一个微小的单元六面体，在六面体上画出所受的应力和方向，这种图称为应力状态图。如果六面体上只有正应力而无切应力，则此应力状态图称为主应力图。根据主应力方向及组合不同，主应力图共有九种，如图 1.3 所示。

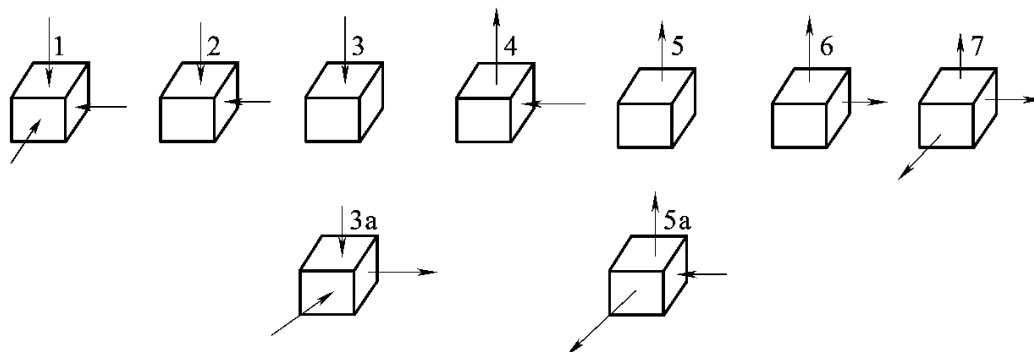


图 1.3 主应力图及对塑性的影响

应力状态对塑性的影响很大，主应力图中压应力个数越多、数值越大，则塑性越好。如图 1.3 所示的主应力图中第 1 种塑性最好，第 7 种塑性最差。大理石在几千大气压的侧压作用下进行压缩（图 1.4），可以获得 78 纡的变形量、进行拉伸可以得到 25 纡的伸长率，并出现缩颈；对填满混凝土的钢管进行压缩，直到钢管失稳，去除钢管外壳，发现混凝土并没有开裂，且形状变成与失稳钢管内形一样，说明由于钢管对混凝土的侧压力作用使处于三向压应力状态的混凝土产生了塑性变形。

当三个主应力的大小都相等，即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ，称为球应力状态。深水中的微小物体所处的就是这样一种应力状态，习惯上常将三向等压应力称为静水压力。在静水压作用下的金属，其塑性将提高，静水压越大，塑性提高越多，这种现象称为静水压效应。静水压效应对塑性加工很有利，应尽量利用它。

3. 塑性条件

当变形金属中某点处于单向应力状态时，只要该点的应力达到材料的屈服强度，该点就处于塑性状态，即开始产生塑性变形。但当变形金属处于两向或三向应力状态下，其三个主应力的符号又是任意的（有拉有压），数值上也是任意大小，这种情况下如何来确定金属是否已进入塑性状态呢？

1913 年，Von Mises 提出了屈服准则“当某点的等效应力达到某一临界值时，材料就开始屈服”。其数学表达式为：

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s \quad (1.1)$$

式中 σ_i —— 等效应力；

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 —— 三个主应力，拉应力取正，压应力取负，且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ；

σ_s —— 材料的屈服强度。

对式 (1.1)，我们进行讨论：

(1) 当 $\sigma_2 = \sigma_1$ 时，即中间主应力等于最大主应力时，式 (1.1) 为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

(2) 当 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时，即中间主应力等于最小主应力时，式 (1.1) 为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

(3) 当 $\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ 时，即中间主应力等于最大主应力与最小主应力的平均值时，式 (1.1) 为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 1.15\sigma_s$$

综合上述三种情况，可得到式 (1.1) 的简化式为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s \quad (1.2)$$

式中 β —— 中间主应力 σ_2 对 σ_s 的影响系数， $\beta = 1 \sim 1.15$ 。

由以上分析可以看出：材料产生塑性变形主要取决于最大主应力与最小主应力之差，中间主应力对塑性变形的影响不大（不超过 15% σ_s ）。在具体分析计算时，在应力分量未知的情况下， β 可取近似平均值 1.1。

1.2.2 真实应力—应变曲线

1. 加工硬化

金属变形过程中随着塑性变形程度的增加，其变形抗力（即每一瞬间的屈服强度 σ_s ）增加，硬度提高，而塑性和塑性指标（ δ 、 ψ ）降低，这种现象称为加工硬化。材料的加工硬化对塑性变形的影响很大，材料在发生加工硬化以后，不仅使所需的变形力增加，而且还限制了材料的进一步变形，甚至要在后续成形工序前增加退火工序。但加工硬化也有其有利的一面，例如汽车冲压件利用塑性变形来提高其强度和刚度，枪弹弹壳和火炮药筒利用冲压后材料强度提高这一特性使弹壳顺利抽出等。由此可见，在处理冲压生产实际问题时，必须研究和掌握材

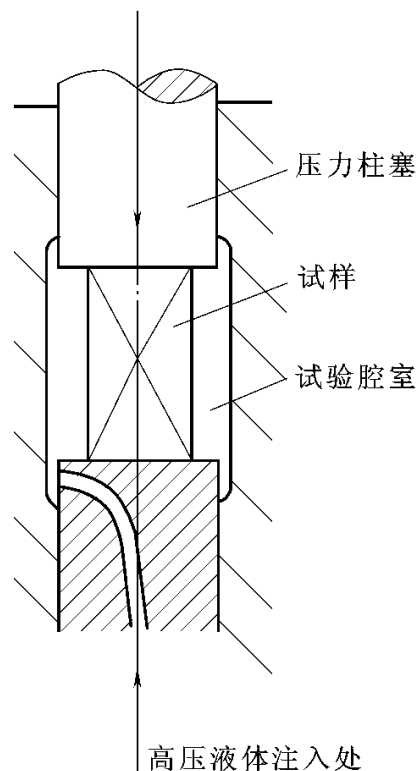


图 1.4 大理石压缩试验仪的工作部分

料硬化和硬化规律以及它们对冲压工艺的影响，具体问题具体分析。

2. 真实应力、真实应变的概念

在材料力学中应力 σ 是用载荷 F 与试棒初始截面积 A_0 的比值来表示的，即 $\sigma = F/A_0$ 。这种应力表示方法有其不合理性，因为拉伸试验中试棒的截面积在不断减小，真正的应力应该是该瞬间的载荷与该瞬间试棒的截面积之比，这个应力称为真实应力，而前者称为名义应力。在塑性加工中由于塑性变形量很大，都应用真实应力来表示，显然，同一载荷下材料的真实应力是大于名义应力的。

在材料力学中应变 $\epsilon_{\text{相}}$ 是用试棒的伸长量 Δl 与试棒的初始长度 l_0 之比来表示的，即 $\epsilon_{\text{相}} = \Delta l/l_0$ 。这种表示法在塑性变形量大时会产生问题，例如将长为 l_0 的试棒拉长一倍，则其相对应变量为：

$$\epsilon_{\text{相}1} = \frac{2l_0 - l_0}{l_0} \times 100\% = 100\%$$

现将长为 $2l_0$ 的试棒又压缩到 l_0 长，则其相对变形量为：

$$\epsilon_{\text{相}2} = \frac{l_0 - 2l_0}{2l_0} \times 100\% = -50\%$$

显然用相对应变法计算 $\epsilon_{\text{相}}$ 出现了矛盾的结果，其原因是：材料应变是一个逐渐累积过程，一个大应变是由许多小应变累积起来的，如果把 l_0 拉至 $2l_0$ 的过程分为 $1.01l_0$ 、 $1.02l_0$ 、...、 $1.99l_0$ 、 $2l_0$ 许多小变形阶段，分别计算各阶段的应变并累加起来，用这种方法来计算上述的伸长和压缩过程时总应变则不会出现矛盾。

设 dl 为每一瞬时的长度增量，则每一变形阶段应变的增量 $d\epsilon = dl/l$ ，由 l_0 伸长至 l 的总应变 ϵ 为：

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

这样表示的应变称为真实应变，将上式用级数展开：

$$\ln \frac{l}{l_0} = \left(\frac{l}{l_0} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{l_0} - 1 \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{l}{l_0} - 1 \right)^3 + \dots$$

当变形量很小时， $\ln \frac{l}{l_0} \approx \frac{l - l_0}{l_0}$ ，即真实应变与相对应变相等。

真实应变是可以简单相加的，而相对应变则不能。例如试棒由 l_0 拉至 l_1 （其真实应变为 ϵ_{01} ），再由 l_1 拉至 l_2 （其真实应变为 ϵ_{12} ），其两次变形的总量 ϵ_{02} 为：

$$\epsilon_{02} = \epsilon_{01} + \epsilon_{12} = \ln \frac{l_1}{l_0} + \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{l_2}{l_0}$$

现用真实应变来计算上例，则有：

$$\epsilon_1 = \ln \frac{2l_0}{l_0} = 0.69$$

$$\epsilon_2 = \ln \frac{l_0}{2l_0} = -0.69$$

由此可见，结果并不矛盾。

3. 真实应力 - 应变曲线