

冷冲压成形工艺与模具设计制造

付宏生 主编



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

冷冲压成形工艺与模具设计制造/付宏生主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 3

ISBN 7-5025-6683-X

. 冷... . 付... . 冷冲压-工艺 冷冲模-设计 冷冲模-制模工艺 . TG38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 012270 号

冷冲压成形工艺与模具设计制造

付宏生 主编

责任编辑: 王苏平

文字编辑: 余德华

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm × 1092mm 1/16 印张 20 字数 517 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6683-X/ TH · 298

定 价: 42.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

冲压技术广泛用于航空、汽车、电机、家电和通信等行业零部件的成形。近几年来，我国模具技术有了很大发展，模具设计与制造水平有了较大提高，大型、精密、复杂、高效和长寿命模具的需求量大幅度增加，模具质量、模具寿命明显提高，模具交货期较前缩短，模具 CAD CAM 技术也得到了相当广泛的应用。由于冲压工艺具有生产率高、生产成本低、材料利用率高、能成形复杂零件、适合大批量生产等优点，在某些领域已取代机械加工，并正逐步扩大其应用范围。据国际生产技术协会预测，到本世纪中，机械零部件中 60% 的粗加工、80% 的精加工要由模具来完成。因此，冲压技术对发展生产、增加效益、更新产品等方面具有重要作用。

经调查，全国模具行业从业人员的岗位分布情况大致如下：从事模具设计、模具工艺过程实施、产品质量检验和监督工作的人员占总数的 42%；其次是具体生产设备的操作、模具的制作、调试和维修，从事这类工作的是智能型操作人员，占总数的 26%；三是从事生产组织、技术指导和技術管理工作的人员，占总数的 14%；四是从事模具营销工作和售后服务的人员，占总数的 9%；五是个体、行政管理人员，占总数的 9%。

目前国内模具技术人员短缺，甚至出现月薪 6 千元找不到模具高级工的现象。要解决这一问题，关键在于职业培训。本书是培养掌握冲压技术的技能型紧缺人才的综合性教材，编写内容本着以综合素质为基础，以能力为本，以企业需求为基本依据，以就业为导向，适应企业技术发展，体现先进性和前瞻性，涉及知识包括冲压成形基本原理、冲压工艺方案的确定、冲压工艺规程编制、模具结构设计、模具材料的选择、压力机的选择、模具制造方法、模具制造实训以及模具 CAD CAM 的初步知识等方面。希望通过这些知识的介绍，能使读者掌握模具加工的核心技术，了解周边技术和跟踪前沿技术，为模具行业培养复合型、复合型人才做出微薄贡献。

本书第一章、十章、附录由北京二轻工业学校孟献军编写，第二、四章由北京二轻工业学校刘华刚编写，第五、六章由北京塑料工业学校张景黎编写，第三、七、八、九章由北京二轻工业学校付宏生编写，并由付宏生担任本书主编。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，敬请读者批评指正。

编 者
2004 年 9 月

目 录

第一章 冲压成形基本理论	1
第一节 塑性、变形抗力及其影响因素	1
一、塑性变形、塑性、变形抗力的概念	1
二、影响金属塑性的因素	1
三、影响金属变形抗力的因素	4
第二节 冲压成形的应力和应变	5
一、应力状态	5
二、应变状态	8
三、塑性条件（屈服条件）	10
四、塑性变形时应力与应变的关系	12
第三节 冷冲压成形中的硬化现象	14
一、冷变形时的硬化现象	14
二、硬化曲线	14
三、拉伸实验的卸载规律和反加载软化现象	16
第二章 冷冲压成形工艺	17
第一节 冷冲压工艺概述	17
一、冷冲压的基本概念	17
二、冷冲压工序分类	17
第二节 冷冲压成形模具	19
一、冷冲压成形模具分类	19
二、冷冲压成形模具结构	20
第三节 冷冲压成形材料	24
一、冷冲压成形常用材料及其要求	24
二、常用金属冲压材料的规格	25
三、新型冲压材料展望	27
四、冷冲压成形模具常用材料	29
第三章 冷冲压成形设备	31
第一节 曲柄压力机	31
第二节 冲压设备的选用	33
一、冲压设备类型的选择	33
二、冲压设备规格的选择	33

第三节	其他类型的冲压设备	37
一、	摩擦压力机	37
二、	双动拉深压力机	38
三、	精冲压力机	39
四、	高速压力机	41
五、	数控冲模回转头压力机	46
第四章	冲裁	49
第一节	冲压基本概念	49
一、	冲压变形过程	49
二、	冲裁断面特征	50
三、	冲裁间隙与冲裁断面质量	52
四、	合理间隙值的确定	53
第二节	冲裁模设计与有关工艺计算	57
一、	冲裁件的工艺性分析	57
二、	凸、凹模刃口尺寸计算	60
三、	冲裁排样与定位	66
四、	冲压力	74
五、	模具压力中心的计算	79
第三节	模具零部件的结构设计	81
一、	凸模的结构设计与标准化	82
二、	凹模的结构设计与标准化	89
三、	凸凹模的最小壁厚	93
四、	凸、凹模的镶拼结构	93
五、	其他零部件的设计	95
第四节	冲裁模具结构与设计	114
一、	单工序冲裁模的典型结构	114
二、	提高冲裁件断面质量和精度的主要工艺方法	125
第五节	冲裁模具设计要点及实例	128
一、	冲裁模具设计要点	128
二、	冲裁模具设计实例	133
第五章	弯曲	139
第一节	弯曲模基础	139
一、	弯曲的类型	139
二、	弯曲变形过程分析	139
三、	弯曲件回弹	141
四、	弯曲件的工艺性	143
五、	提高弯曲件质量的措施	144
六、	保证弯曲件质量的基本原则	146
第二节	弯曲模设计与有关工艺计算	147

一、回弹量的计算.....	147
二、弯曲件展开尺寸计算.....	149
三、弯曲力的计算.....	151
四、弯曲模工作部分尺寸计算.....	152
五、弯曲件的工序安排.....	154
第三节 弯曲模结构设计.....	156
一、弯曲模的设计要点.....	156
二、常用的弯曲模结构.....	157
第六章 拉深	161
第一节 拉深工艺尺寸概述.....	161
一、拉深工艺性及其分类.....	161
二、拉深变形过程分析.....	161
三、拉深变形时的应力、应变分析.....	162
四、拉深变形工序的主要工艺问题.....	163
第二节 圆筒形拉深件的拉深工艺.....	165
一、拉深件工艺性.....	165
二、圆筒形拉深件毛坯尺寸的计算.....	167
三、圆筒形拉深件的拉深系数和拉深工序尺寸计算.....	172
四、拉深力的计算.....	175
五、带料级进拉深.....	177
第三节 拉深模典型结构.....	178
一、首次拉深模.....	178
二、再次拉深模.....	180
三、复合拉深模.....	181
第四节 拉深模工作部分结构与尺寸计算.....	182
一、拉深模工作部分结构.....	182
二、拉深模工作部分尺寸计算.....	184
三、压边装置.....	186
第五节 拉深模结构设计要求.....	188
一、拉深模设计要求.....	188
二、拉深模设计特点.....	188
三、拉深模设计计算实例.....	188
第七章 其他冷冲压成形工艺及模具设计	192
第一节 成形工艺与模具设计.....	192
一、校平与整形.....	192
二、翻孔与翻边.....	193
三、缩口.....	197
四、胀形.....	200
五、起伏成形.....	202

第二节	冷挤压	204
一、	冷挤压方法	204
二、	冷挤压的特点及应用	206
三、	采用冷挤压必须解决的主要问题	207
四、	冷挤压设计实例	207
五、	冷挤压力的计算	209
六、	冷挤压模具	211
第三节	精冲	215
一、	精冲方法及过程	216
二、	适宜精冲的材料	217
三、	精冲工艺特点	217
四、	精冲模具	217
五、	提高精冲件质量的方法	219
第四节	简易模具	221
一、	锌基合金冲模	221
二、	聚氨酯橡胶模	222
三、	低熔点合金模	224
四、	组合冲模	225
第八章	冲压工艺规程的编制	228
第一节	冲压工艺规程的制定	228
一、	原始资料和准备工作	228
二、	设计的主要内容及步骤	228
三、	编制工艺文件及设计计算说明书	229
四、	冲压工艺方案的拟定	231
第二节	冲压工艺规程编制实例	231
第九章	冷冲压模具的制造	238
第一节	冲压模架的制造	238
一、	导柱和导套的加工	239
二、	上、下模座的加工	242
三、	模架的技术要求及装配	242
第二节	冲模工作零件的加工	244
一、	冲模工作零件的技术要求	245
二、	冲模工作零件机械加工工艺过程	245
三、	模具成形零件的加工方法	246
四、	凸、凹模压印修锉加工	253
第三节	冲模零件的电火花加工	253
一、	保证凸、凹模配合间隙的方法	253
二、	电极的设计	254
三、	电规准的选择与转换	257
四、	冲模加工实例	258

第四节	电火花线切割加工.....	259
一、	电火花线切割加工与机床原理.....	259
二、	线切割加工的特点与应用场合.....	260
三、	线切割加工工艺.....	260
四、	凸、凹模线切割加工编程.....	262
第五节	冲压模表面技术.....	269
一、	光整加工技术.....	269
二、	表面强化技术.....	270
三、	表面纹饰加工.....	272
第六节	冲压模弹簧和橡胶的选用.....	272
一、	弹簧的选用.....	272
二、	橡胶的选用.....	274
第七节	冲压模具的装配与试模.....	276
一、	冲裁模装配的技术要求.....	276
二、	冲裁模的装配.....	277
三、	冲压模的试模.....	280
四、	弯曲模的装配与试模.....	280
五、	拉深模的装配与试模.....	280
第十章	冷冲压成形模具 CAD/ CAM	284
第一节	CAD/ CAM 概述	284
一、	计算机辅助设计 (CAD) 技术	284
二、	计算机辅助制造 (CAM) 技术	284
三、	计算机辅助工艺过程设计 (CAPP) 技术	287
四、	CAD/ CAM 技术	287
五、	CAD/ CAM 技术的发展趋势	287
第二节	冷冲模 CAD/ CAM 系统设计	289
一、	CAXA-CPD 系统分析	289
二、	基本设计流程.....	290
三、	冲件图的准备.....	290
四、	工艺准备和结构设计.....	294
五、	模具图生成设置.....	298
六、	模具图的编辑.....	299
七、	数控自动编程.....	301
附录	冷冲压成形模具制造实训.....	306
附录 A	电火花成形加工实训	306
附录 B	电火花线切割加工实训	309
附录 C	冲模拆装实训	311
附录 D	典型冷冲压成形模具的设计与制造.....	313
参考文献	315

第一章 冲压成形基本理论

第一节 塑性、变形抗力及其影响因素

金属是现代工业中最重要的材料，广泛应用于工农业和国防工业等部门。由于绝大多数的机械设备选用材料时，是以力学性能指标作为主要依据，因此必须首先了解金属的力学性能。本节将对金属的塑性、变形抗力及其影响因素进行讨论。

一、塑性变形、塑性、变形抗力的概念

塑性变形、塑性、变形抗力、柔软性等术语，在冲压技术中经常出现，它们的含义分别是：物体在外力作用下会产生变形，如果外力被取消后，物体不能恢复到原始的形状和尺寸，这样的变形称为塑性变形；物体在载荷（外力）作用下，产生塑性变形而不发生破坏的能力称为塑性；在一定的加载条件和一定的变形温度、速度条件下，引起塑性变形的单位变形力称为变形抗力；柔软性应理解为金属对变形的抵抗能力，变形抗力越小，柔软性就越好。

塑性和柔软性是有严格区别的两个概念，变形抗力小的软金属可能塑性不好，而柔软性不好的硬金属可能有很好的塑性。例如，奥氏体不锈钢的塑性好而柔软性却差。

塑性不仅仅决定于变形物体的种类，并且与变形方式（应力应变状态）以及变形条件（变形温度和变形速度）有关。例如，铅通常具有很好的塑性，但在三向等拉应力作用下，却像脆性材料一样发生断裂，没有塑性变形。又如，极脆的大理石，在三向压应力作用下却能产生较大的塑性变形。这两个例子充分证明：材料的塑性，并非某种物质不变的性质，而是与物质种类、变形方式以及变形条件有关。

材料的塑性，也是通过对试样进行拉伸试验来测定的。塑性一般用延伸率和断面收缩率来表示。

塑性是金属材料的重要指标。一般来说，金属材料的延伸率与断面收缩率越大，其塑性越好。塑性材料的延伸率和断面收缩率都较大，而脆性材料的延伸率和断面收缩率都较小。例如：纯铁的延伸率可达 50%，而普通生铁的延伸率 $< 1\%$ 。因此，纯铁的塑性比普通生铁好得多。

金属材料塑性的好坏，对零件的加工和使用都具有十分重要的意义。例如：塑性好的金属材料容易进行冲压，且工艺过程简单，质量容易保证。

如何利用金属的塑性并在最小变形抗力的情况下获得所需的工件，是冲压生产中的一个极为重要的问题。影响金属的塑性和变形抗力的因素很多，这里只讨论物理方面的因素。关于应力应变状态对塑性和变形抗力的影响将在下一节中介绍。

二、影响金属塑性的因素

（一）化学成分

金属塑性受化学成分的影响很复杂。工业用的金属除基本元素之外大都含有一定的杂

质，有时为了改善金属的使用性能还要加入一些其他元素。这些杂质和加入的合金元素，对金属的塑性均有很大的影响。

金属和合金中的杂质，有金属、非金属、气体等，它们所起的作用各不相同。一般而言，金属的塑性是随纯度的提高而增加的。例如纯度为 99.96% 的铝，延伸率为 45%，而纯度为 98% 的铝，其延伸率只有 30% 左右。应该特别注意那些使金属和合金产生脆化现象的杂质，因为由于杂质的混入或它们的含量达到一定值后，可使冷热变形都变得非常困难，甚至无法进行。例如钨中含有极少量（百万分之一）的镍时，就会大大降低钨的塑性。因此，在退火时应避免钨丝与镍合金接触。又如纯铜中的铋和铅都为有害杂质，含十万分之几的铋，就会使热变形困难，当铋含量增加到万分之几时冷热变形难于进行；铅含量超过 0.03% ~ 0.05% 时将引起热脆现象。

杂质对金属塑性的影响，不仅与杂质的性质及数量有关，还与其存在状态、杂质在金属基体中的分布情况和形状有关。例如铅在纯铜及低锌黄铜中的有害作用，主要是由于铅在晶界形成低熔点物质，破坏热变形时晶间的结合力，产生热脆性。但在 $\alpha + \beta$ 两相黄铜中则不同，分散于晶界上的铅由于 β 的相转变而进入晶内，对热变形无影响，此时的铅无害，而是作为改善制品性能的少量添加元素。

合金元素的加入对金属的塑性也会产生一定的影响，在本质上与前述杂质的作用相同，不过合金元素的加入，多数是为了提高合金的某种性能（如强度、热稳定性、在某种介质中的耐蚀性等）而人为加入的合金元素对金属材料塑性的影响，取决于加入元素的特性、加入数量、元素之间的相互作用。

（二）组织结构

金属的组织结构对金属的塑性也会产生很大的影响，这主要针对组元的晶格、晶粒的取向及晶界的特征而言。面心晶格的塑性最好（如 Al、Ni、Pb、Au、Ag 等），体心晶格次之（如 Fe、Cr、W、Mo 等），六方晶格的塑性较差（如 Zr、Hf、Ti 等）。

大部分金属单晶体在室温下都有较高的塑性，然而多晶体的塑性则较低。这是由于一般情况下多晶体晶粒的大小不均匀、晶粒方位不同、晶粒边界的强度不足等原因所造成的。如果晶粒细小，则标志着晶界面积大，晶界强度提高，变形多集中在晶内，故表现出较高的塑性。超细晶粒，因其近于球形，在低变形速度下还伴随着晶界的滑移，故呈现出更高的塑性。而粗大的晶粒，由于大小不容易均匀，且晶界强度低，容易在晶界处造成应力集中，出现裂纹，故塑性较低。

（三）变形温度

塑性随温度的升高而有所改善。因为随着温度的升高，原子热运动的能量增加，那些具有明显扩散特性的塑性变形机构（晶间滑移机构、非晶机构、溶解沉淀机构）都发挥了作用。同时随着温度的升高，在变形过程中发生了消除硬化的再结晶软化过程，从而使那些由于塑性变形所造成的破坏和显微缺陷得到修复的可能性增加；随着温度的升高，还可能出现新的滑移系。滑移系的增加，意味着塑性变形能力的提高。如铝的多晶体，其最大塑性出现在 450 ~ 550 的温度范围内，此时不仅可沿着 (1 1 1) 面滑移，而且还可以沿着 (0 0 1) 面及其他方向进行滑移。

事实上，塑性随着温度升高而改善的规律并不是呈直线变化的，因为相态和晶粒边界随温度的波动而产生的变化也对塑性有显著的影响。在一般情况下，温度由绝对零度上升到熔点时，可能出现三个脆性区：低温脆性区、中温脆性区和高温脆性区。

低温脆性区主要指具有六方晶格的金属在低温时易产生脆性断裂的现象。如镁合金的冷

加工性能就不好。镁是六方晶格，在低温时只有一个滑移面。而在 300 以上时，由于镁合金晶体中产生了附加滑移面，因而塑性提高了。故一般镁合金在 350 ~ 450 的温度范围内可进行各种压力加工。

低温脆性区的出现是由于沿晶粒边界的某些组织组成物随温度的降低而脆化了。某些金属间的化合物就具有这种行为。如 Mg-Zn 系中 MgZn、MgZn₂ 是低温脆性化合物，它们随着温度的降低而沿晶界析出，使低温塑性降低。

中温脆性区的出现是由于在一定的温度-速度条件下，塑性变形可使脆性相从过饱和固溶体中沉淀出来，引起脆化；晶间物质中个别的低熔点组成物因软化而强度显著降低，削弱了晶粒之间的联系，导致热脆；在一定温度与应力状态下，产生固溶体的分解，此时可能出现新的脆性相。

高温脆性区则可能是由于在高温下周围气氛和介质的影响结果引起脆化、过热或过烧，如镍在含硫的气氛中加热、钛的吸氢。晶粒长大过快，或因晶间物质熔化等，也显著降低塑性。

上述三个典型的脆性区，是指一般而言，对于具体的金属与合金，可能只有一个或两个脆性区。总之，出现几个脆性区及塑性较好的区域，要视温度的变化、金属及合金内部结构和组织的改变而定。

(四) 变形速度

变形速度对塑性的影响比较复杂。当变形速度不大时，随变形速度的提高，塑性是降低的；而当变形速度较大时，塑性随变形程度的提高反而变好。这种影响还没有找到确切的定量关系，一般可用图 1-1 所示的曲线概括。

塑性随变形速度的升高而降低（Ⅰ区），可能是由于加工硬化及位错受阻而形成显微裂口所致；塑性随速度的升高而增长（Ⅱ区）可能是由于热效应使变形金属的温度升高，硬化得到消除和变形的扩散过程参与作用，也可能是位错借攀移而重新启动的缘故。

一般压力加工的变形速度为 $0.8 \sim 300\text{s}^{-1}$ ，而爆炸成形的变形速度比目前的压力加工速度高约 1000 倍之多，在这样的变形速度下，连难加工的金属铁和耐热合金可以很好地成形。这说明爆炸成形可使金属与合金的塑性大大提高，从而也节省了能量。

关于高速变形能够节省能量，并且不会导致金属在变形中破裂的原因，罗伯特做过这样的假设：假定形变硬化与时间因素也有关系，对于一种金属或合金在一定温度下存在一特殊的限定时间-形变硬化的“停留时间”，总可以找到一个尽量短的时间，使塑性变形在此时间内完成，这样就可以使变形的能量消耗降为最低限度，并且可以保证变形过程在裂纹来不及传播的情况下进行。可以用此假设来解释爆炸成形及高速锤锻工作效果好的原因。

变形速度对金属塑性变形的影响比较复杂，不同学者的研究结果出入很大，难以提供确切的资料。一般凭以下生产经验而定。

在加热成形工序中，为了减小温度对材料硬度的影响，应使材料中的危险断面能及时冷却强化，宜用低速。

对于那些对变形速度比较敏感的材料，如不锈钢、耐热合金、钛合金等，加载速度

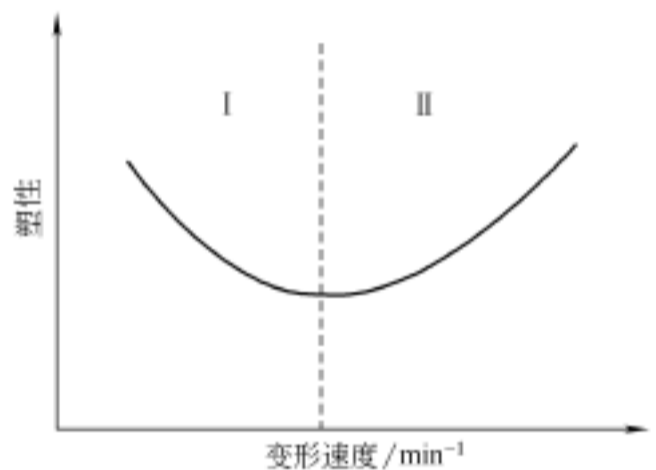


图 1-1 变形速度与塑性的关系

不宜超过 0.25m/s。

小型零件在冲压过程中，一般可以不考虑速度因素，只需考虑设备的构造、公称压力、功率等。

大型复杂零件的成形，宜用低速。因为大尺寸复杂零件成形时，坯料各部分的变形极不均匀，易于产生局部拉裂或起皱。为了便于控制金属的流动情况，以采用低速压力机或液压机为宜。

（五）变形程度

变形程度对塑性的影响，是同加工硬化及加工过程中伴随着塑性变形的发展而产生的裂纹倾向联系在一起。

对于冷变形而言，由于没有上述的修复过程，一般都是随着变形程度的增加而降低塑性。至于从塑性加工的角度来看，冷变形时两次退火之间的变形程度究竟多大最为合适，尚无明确结论，还需进一步研究。但可以认为这种变形程度是与金属的性质密切相关的。对硬化强度大的金属与合金，应给予较小的变形程度即进行下一次中间退火，以恢复其塑性；对于硬化强度小的金属与合金，则在两次中间退火之间可给予较大的变形程度。

（六）尺寸因素

尺寸因素对加工件塑性的基本影响规律是随着加工件体积的增大而塑性有所降低。实际金属的单位体积中平均有大量的组织缺陷，体积越大，不均匀变形越强烈，在组织缺陷处容易引起应力集中，造成裂纹源，因而引起塑性的降低。

三、影响金属变形抗力的因素

（一）化学成分

变形抗力受化学成分的影响非常复杂。对于各种纯金属，因原子间相互作用不同，变形抗力也不同。同一种金属，纯度越高，变形抗力越小。组织状态不同，抗力值也有差异，如退火态与加工态，抗力明显不同。

变形抗力受合金元素的影响，主要在于合金元素的原子与基体原子间相互作用特性、原子体积的大小以及合金原子在基体中的分布情况。合金元素在金属中引起基体点阵畸变程度越大，变形抗力也越大。

变形抗力还受杂质的性质与分布的影响。杂质原子与基体组元组成固溶体时，会引起基本组元点阵畸变，从而提高变形抗力。杂质元素在周期表中离基体越远，则杂质的硬化作用越强烈，因而变形抗力提高越显著。若杂质以单独夹杂物的形式弥散分布在晶粒内或晶粒之间，则对变形抗力的影响较小。若杂质元素形成脆性的网状夹杂物，则使变形抗力下降。

（二）变形温度

随着温度升高，金属原子间的结合力降低了，金属滑移的临界切应力降低，几乎所有金属与合金的变形抗力都随温度升高而降低。但是对于那些随着温度变化产生物理-化学变化和相变的金属与合金，则存在例外。

（三）变形速度

当变形速度提高时，单位时间内的发热率增加，有利于软化的产生，使变形抗力降低。另一方面，提高变形速度缩短了变形时间，当塑性变形时位错运动的发生与发展不足，使变形抗力增加。一般情况下，随着变形速度的增大，金属与合金的抗力提高，但提高的程度与变形温度密切相关。冷变形时，变形速度的提高，使抗力有所增加，或者说抗力对速度不是非常敏感。而在热变形时，变形速度的提高，会引起抗力明显增大。

(四) 变形程度

不论温度的变化情况如何，只要回复和再结晶过程来不及进行，则随着变形程度的增加必然产生加工硬化，使变形抗力增大。通常变形程度低于 30% 时，变形抗力增加显著。当变形程度较大时，变形抗力增加变缓，这是因为变形程度的进一步增加，晶格畸变能增加，促进了回复与再结晶过程的发生与发展，也使变形热效应增加。

第二节 冲压成形的应力和应变

在各种冲压成形中，模具对板料毛坯施加的外力使之产生相应的塑性变形。毛坯受外力后，通常只有一部分产生塑性变形，形成变形区。变形区的内力和变形的分布是不均匀的，为了分析和研究变形区的塑性变形过程，首先必须了解坯料内各点的应力状态和应变状态，以及它们之间的关系。

一、应力状态

(一) 任意坐标系下的应力状态分析

变形区内每一点上的受力情况，通常称为点的应力状态。为研究变形体内各点的应力状态，将材料看成是均匀的、各向同性的，假设从变形体内任意一点取出一个无穷小的六面体体素，体素的各个面与坐标平面平行。显然，在所取体素的六个面上，有着大小不同、方向不同的应力，设为 S_x 、 S_y 、 S_z [见图 1-2 (a)]。其中每一个应力又可分解为平行于坐标轴的三个分量，即一个正应力和两个切应力 [见图 1-2 (b)]。图中标示了三个面素上的各个应力分量，由于取出的体素为一无限小的六面体，那么在每一对互相平行的面素上，应力的各个分量之间只差一个无限小量，可以近似地认为它们彼此互等，因此其余三个面素上的应力分量也可同样地标示出来。由此可见，无论变形物体的受力状态如何，为了确定物体内部任意点的应力状态，只需知道九个应力分量（三个正应力，六个切应力）即可。又由于所取体素处于平衡状态，绕体素各轴的力矩必定相等，因此切应力互等，即

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

于是，要充分确定变形体内任意一点的应力状态，实际上只需知道六个分量，即三个正应力和三个切应力即可。

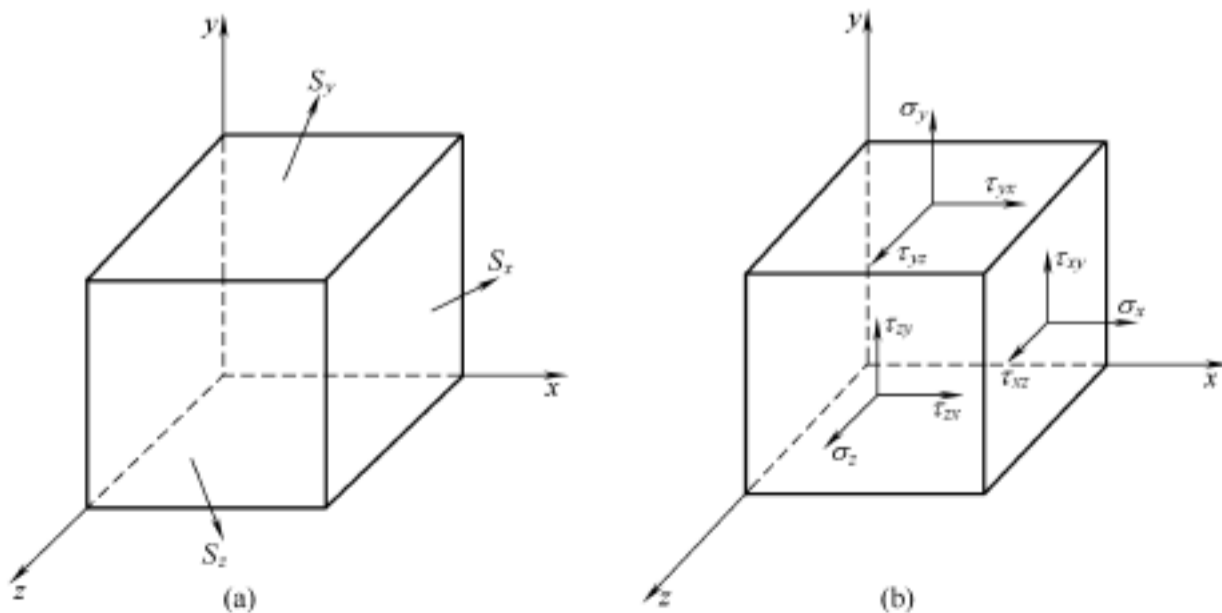


图 1-2 任意坐标系下点的应力状态

应力分量的符号按下述原则确定：正应力以拉应力为正，压应力为负；切应力的符号取决于作用在单元体表面上的正应力符号。当作用在单元体表面上的拉应力与坐标轴的正方向相同时（或压应力的方向与坐标轴的负方向相同时），则切应力的方向与坐标轴正方向相同者为正。如果正应力的方向与前述相反，则切应力的方向与坐标轴的负方向相同者为正。

必须指出，如果坐标系选取的方向不同，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各个应力分量就会与原来的数值不同。不过，这些属于不同坐标系的应力分量之间是可以相互换算的。

(二) 主轴坐标系下的应力状态分析

当采用任意坐标系进行应力状态分析时，要求解出六个应力分量，使问题变得复杂。对

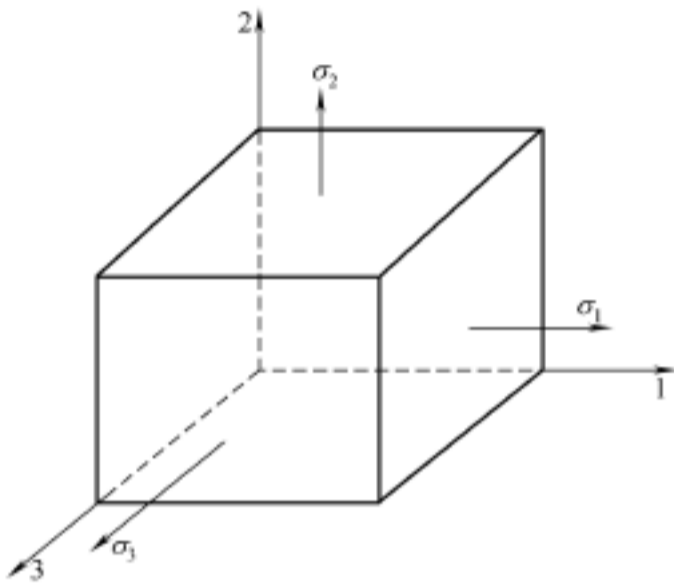


图 1-3 主轴坐标系下点的应力状态

任何一种应力状态，总存在这样一组坐标系，使得单元体各表面上只出现正应力而无切应力，如图 1-3 所示。三个坐标轴的方向称为主方向；三个坐标轴就称为主轴；三个主应力的作用面称为主平面；三个正应力称为主应力，主应力一般按其代数值大小依次用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示，即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。带正号的正应力或主应力表示拉应力，带负号的正应力或主应力表示压应力。以主应力表示点的应力状态，大大简化了分析、运算工作。

对于变形区内任意一点的应力状态来说，三个主应力的大小和三个主方向仅取决于该点的受力情况，与坐标轴的选择无关。换句话说，

一个应力状态，只有一组主应力与之相对应。但坐标系选择不同，就会使应力状态的分析计算过程复杂化。而主轴位置的确定可通过对变形过程的分析近似确定或试验确定。变形区的应力状态是很复杂的，各点处的主应力大小排列次序不是固定不变的，应视其代数值大小确定三个主应力。

(三) 应力状态的类型

应力状态主要分为以下三种类型。

1. 单向应力状态

如果三个主应力中有两个为零，就称为单向应力状态或直线应力状态。单向应力状态的变形仅为简单的拉伸或压缩。冲压成形时，毛坯的内孔和外边缘处通常是自由表面，即是仅有切向应力的单向应力状态。

2. 平面应力状态

如果三个主应力中有一个等于零，则三向应力状态变为平面应力状态。在冲压成形中，变形区厚度方向的应力 σ_3 与其他两个方向的应力比较往往可以忽略不计，看作 $\sigma_3 = 0$ ，可以将其作为平面应力状态来分析计算。

特殊情况下，如果三个主应力中有两个相等，则称为圆柱应力状态或轴对称应力状态。这种应力状态的特点是：与对称轴线垂直的横截面上，任何一个方向都是主方向，在这些方向上的主应力都相等。如胀形工件的中心顶点处即属这种应力状态。

3. 三向应力状态

单元体的三个主方向都有应力的状态称为三向应力状态或立体应力状态。多数冲压塑性

变形区都是三向应力状态。

特殊情况下，如果三个主应力都相等，则任何三个互相垂直的方向都是主方向，而且所有方向的主应力都相等，即为球应力状态。由于球应力状态所决定的是各向等压或各向等拉，所以这种应力状态不能引起物体形状的变化，只能引起体积的变化和破坏。力学上常将三向等压应力称为静水压力。

以上三种应力状态是最常见的，接下来将引入平均应力的概念：单元体上三个正应力的平均值称为平均应力，用 σ_m 表示。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。平均应力 σ_m 的数值只与该点的受力状态有关，而与坐标系的选取无关，即

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1-1)$$

表示某点六面体各面上各主应力有无及其方向的图称为主应力状态简图（简称主应力图）。主应力图具有九种可能出现的组合（见图 1-4），其中四个为三向主应力图，三个为平面主应力图，两个为单向主应力图。以主应力表示的应力状态称为主应力状态。

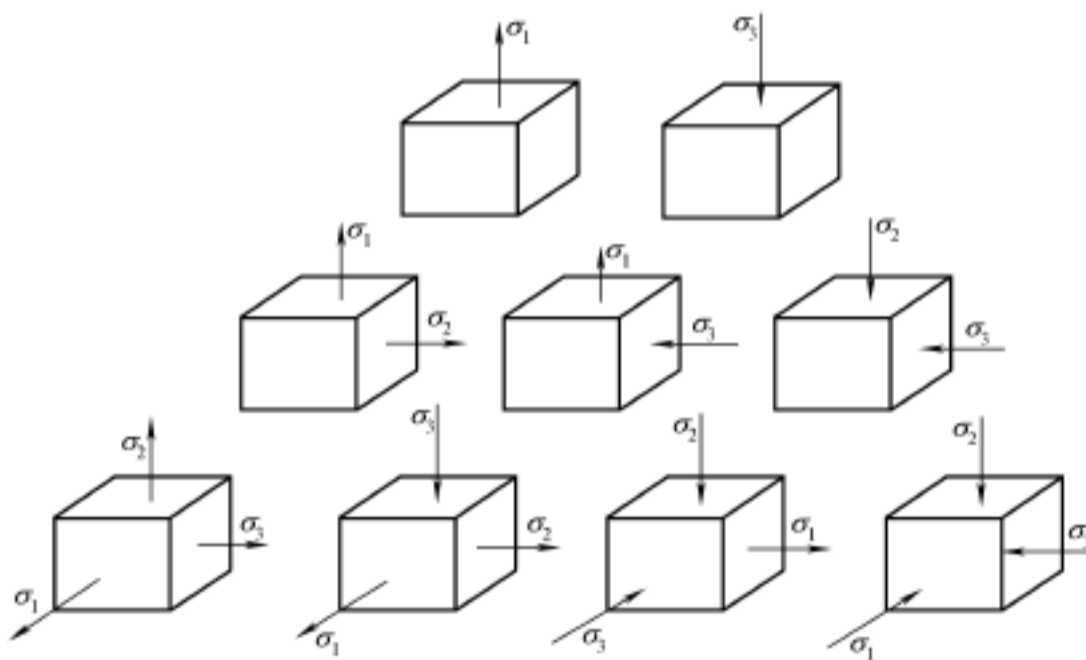


图 1-4 主应力图

在大多数板料成形中，其厚度方向的应力与其他两个方向的应力比较，往往可以忽略不计，近似看作平面应力状态，其误差不大。平面应力问题的分析计算过程比三向应力问题简单，为研究冲压成形的力学问题提供了方便。

在进行应力状态分析时，也可以将其分解为两部分，如图 1-5 所示。第一部分是平均应力 σ_m 为各向应力值的三向等应力状态，第二部分是各向主应力与 σ_m 的差值为应力值构成的应力状态。第一部分只能改变物体的体积，不能改变物体的形状；第二部分只能改变物体的形状，不能改变物体的体积。

应力状态影响金属塑性的规律是压应力的数目及数值越大和拉应力数目及数值越小，金

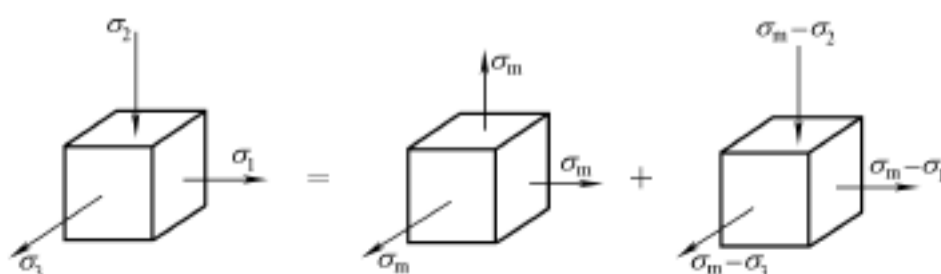


图 1-5 应力状态的分解

属的塑性越好。而且，主应力图对金属的变形抗力也是有影响的，在同号主应力图下引起变形时所需的变形抗力之值较大，在异号主应力图下引起变形所需的变形抗力之值就比较小。

(四) 主切应力

除主平面不存在切应力外，单元体在其他方向的平面上都有切应力。切应力的极大值作用在与主平面成 45° 的平面上，称为主切应力。所以主切应力作用的平面与一个主平面垂直，与另两个主平面成 45° 夹角。主切应力及其作用平面共有三对，该平面称为主切应力面，如图 1-6 所示，主切应力面上的切应力绝对值最大。

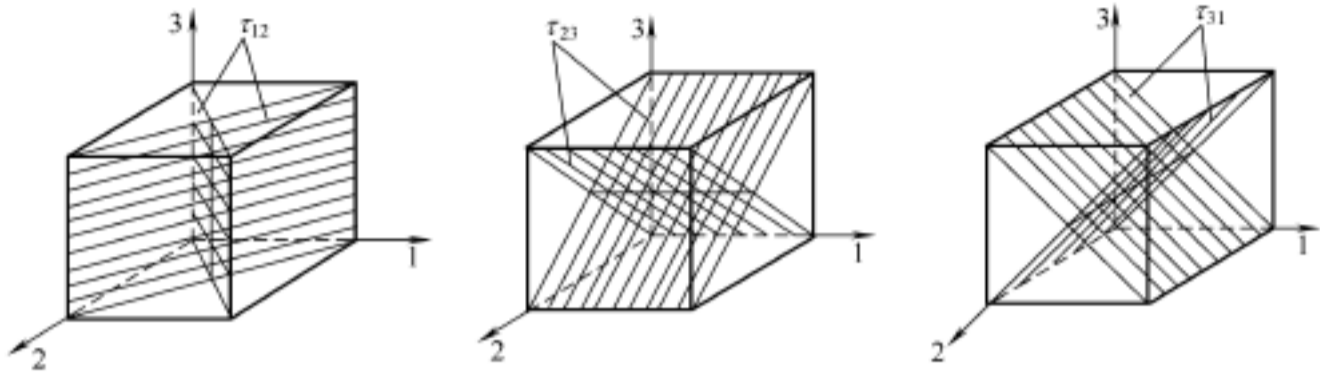


图 1-6 主切应力面及主切应力方向

$$\begin{aligned} \tau_{12} &= \pm \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \\ \tau_{23} &= \pm \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3) \\ \tau_{31} &= \pm \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1) \end{aligned} \quad (1-2)$$

分析式 (1-2) 可以得出，当主应力增加或减少的数值相等时，主切应力数值不变。也就是说，在单元体上附加一个三向等拉或三向等压应力状态（即球应力状态），并不改变主切应力的大小。最大切应力的数值对于判断变形区的塑性变形是否进入塑性状态有着十分重要的关系。

从式 (1-2) 可以直接看出，主切应力在数值上等于相对应的主应力之差的一半。其中绝对值最大的主切应力称为该点的最大切应力。按前述规定 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ，则最大切应力 τ_{max} 可表示为若三个主应力互等，则其差值为零，即不存在主切应力。前面分析的球应力状态中就不存在切应力，所以三个主切应力之和等于零。

$$\tau_{max} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1-3)$$

$$\tau_{12} + \tau_{23} + \tau_{31} = 0 \quad (1-4)$$

最大切应力应与另两个主切应力的符号相反。在对具体问题进行分析需确定主切应力符号时，应遵守此条件。

二、应变状态

点的应变状态分析也可参照应力状态分析的过程，通过在变形区某点处取单元体，然后研究该单元体的变形。设想从物体变形区某点处取一单元体，在变形过程中，其各质点都离开初始位置产生位移。一点的应变态度也是通过微元体的变形来表示的。与应力状态一样，当采用主轴坐标系时，微元体就只有三个主应变分量 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 ，而没有切应变分量（见图 1-7）。一种应变状态只有一组主应变。

一点的应变状态也可分解成两部分，如图 1-8 所示。第一部分是平均应变 ϵ_m 为各向应变的三向等应变状态 [$\epsilon_m = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) / 3$]，表示了微元体体积的变化；第二部分是各向主应变与 ϵ_m 的差值为应变值构成的应变状态，表示了微元体形状的变化。

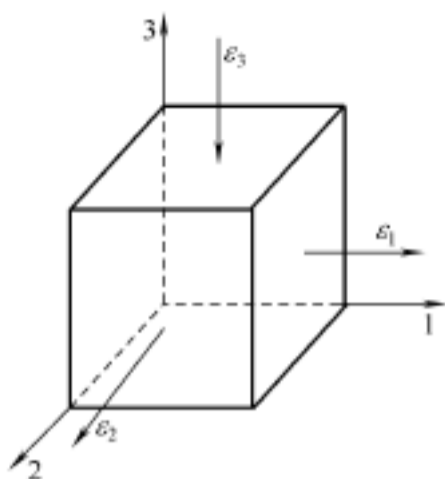


图 1-7 点的应变状态

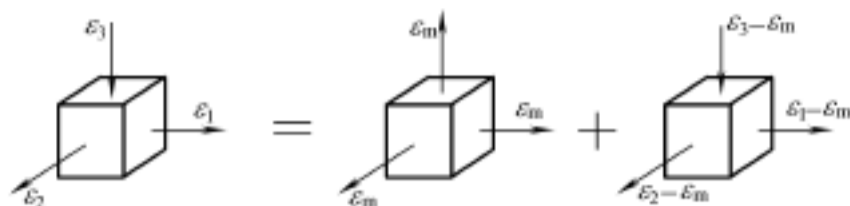


图 1-8 应变状态的分解

(一) 线应变与切应变

微元体发生变形时，有两种应变形式产生，一种是线应变，另一种是切应变。

(1) 线应变 表示单位长度的变化量。如图 1-9 所示，单元体 $PABC$ 中原长为 x_0 的 PA 边，变形后增加了 Δx ，则沿 x 轴方向的伸长应变可以表示为：

$$\epsilon_x = \Delta x / x_0 \quad (1-5)$$

原长为 y_0 的 PC 边变形后缩短了 Δy ，则沿 y 轴方向的缩短应变为 $\epsilon_y = -\Delta y / y_0$ 。线应变为一无量纲的量，规定伸长时为正值，缩短时为负值。

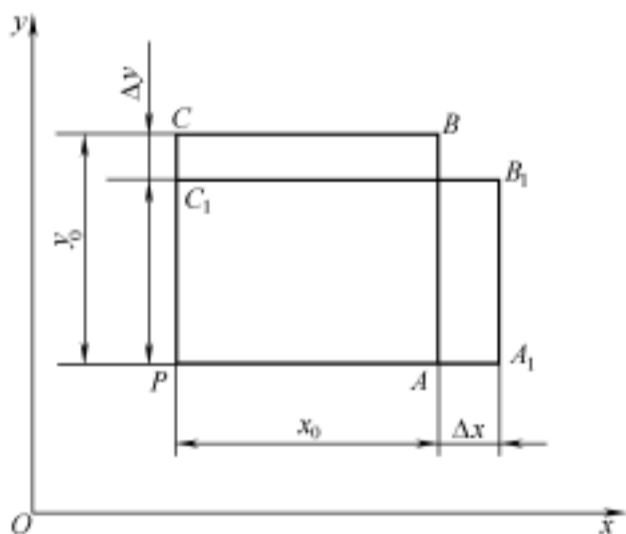


图 1-9 单元体在 xOy 坐标平面内的线应变

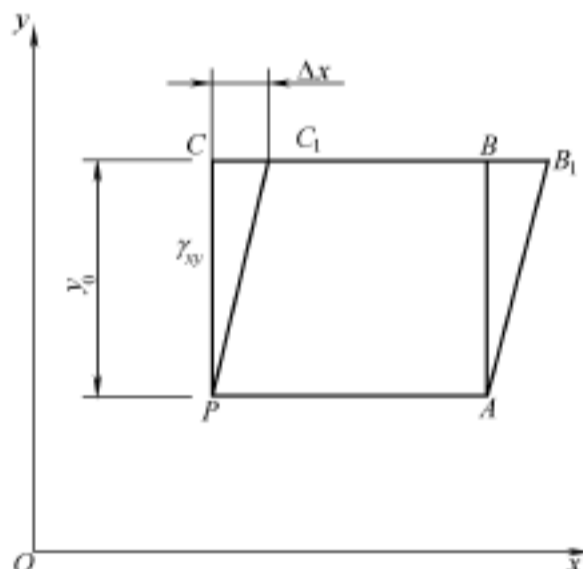


图 1-10 单元体在 xOy 坐标平面内的切应变

(2) 切应变 反映单元体各平面的角度变形。如图 1-10 所示， PA 与 PC 两平面原来互相垂直，产生角变形后 PC 面转至 PC_1 位置，与 PA 的夹角减小了 γ_{xy} 。在小变形条件下，角度变形较小，则在 xOy 平面内单元体的切应变可以表示为：

$$\gamma_{xy} = \Delta x / y_0 \quad (1-6)$$

切应变亦为一无量纲的量。如果切应变使相应的夹角减小，则规定其为正值；如果切应变使相应的夹角增大，则规定其为负值。在 yOz 平面和 zOx 平面内，单元体的应变也与 xOy 平面相类似。因此，产生变形的单元体可有 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 、 γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{zx} 六个应变分量，若已知这六个应变分量，就完全可以确定一点的应变状态。