

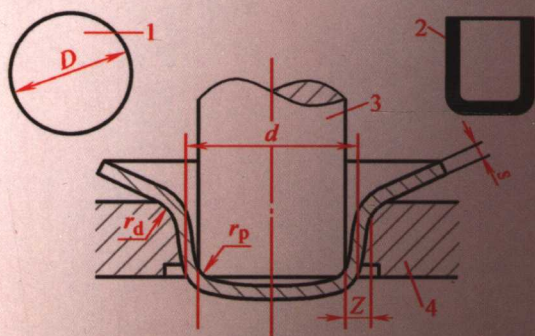
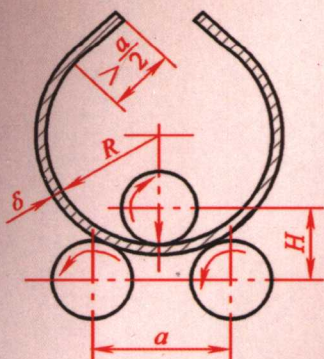
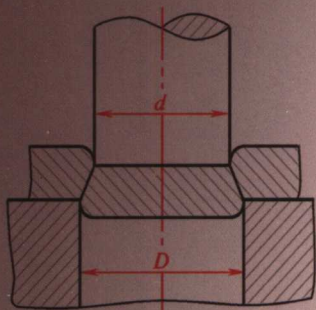


钣金职业技能培训系列教程

钣金加工技术

BAN JIN JIA GONG JI SHU

王爱珍◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TG38
129
12

钣金职业技能培训系列教程

钣金加工技术

王爱珍 编著



机械工业出版社

本书是依据劳动和社会保障部新颁布的《国家职业标准》及职业技能鉴定规范的要求而编写的厚知识、宽口径的“钣金技术职业技能培训系列教程”之一。主要内容为加工基础、切割下料、弯曲加工、压延加工、局部加工、加工设备与新技术等。

本书从加工基本原理、工艺流程、使用材料开始,经过冲切、冲裁及熔切、拉弯、辊弯及压弯、压延旋压及胀形等工艺,直至各种加工设备与新技术,均由生产中的实际零件、典型构件和常用设备为例逐步说明。本书还配有电子教案,同时章前设有导读、章后设有思考练习题。

钣金加工技术是钣金技术人员需要掌握的关键技术,也是钣金制品成形的重要工序:它既包括传统的切割下料、冲裁加工、弯压成形等方法及工艺参数,又包括各种冷冲压模具结构及工艺参数、各种设备工作原理及操作方法,还包括新冲压技术及新工艺。

本书既可作为机械、化工、汽车、航天、电器仪表等行业钣金技术人员的中、高级技能培训教材,又可作为机械类工程技术人员再修、高职及中专院校的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

钣金加工技术/王爱珍编著. —北京:机械工业出版社, 2007.10

(钣金职业技能培训系列教程)

ISBN 978-7-111-22439-6

I. 钣… II. 王… III. 钣金工—技术培训—教材 IV. TG38

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第150475号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:徐彤 责任编辑:郁雷 版式设计:张世琴

责任校对:陈延翔 封面设计:王伟光 责任印制:李妍

北京汇林印务有限公司印刷

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18印张·443千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-22439-6

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379083

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着我国经济与科技的快速发展,各行业对高技能人才提出了数量、质量和结构的要求,快速培养掌握钣金技术的高级技工和技师已成为当务之急。针对这一需要,配合“国家高技能人才培养工程”,依据劳动和社会保障部新颁布的《国家职业标准》及职业技能鉴定规范的要求,特编写了该套厚知识、宽口径、高技能的钣金职业技能培训系列教程。

本系列教程按钣金成形顺序编排,分为《钣金放样技术》、《钣金加工技术》、《钣金连接技术》和《钣金表面技术》四本,系统地论述了钣金传统技术和新技术,又介绍了相关设备的工艺原理和操作方法,涵盖了全部钣金技术和技能鉴定要点。同时还贯穿“绘图、放样、备料、成形、拼装、装饰”这条主线,使各本书间紧密衔接、前呼后应,保持套书的整体性。

本系列教程的培训模式是使读者通过对每本书中应用实例的学习,不仅可学会多种典型钣金结构件的放样号料、加工成形、装配连接和表面处理的各种方法及其所应遵循的工艺原理和步骤,同时还可学会各种工艺的拟定及工装设计方法和各种设备的操作方法,为以后的职业等级资格取证和专业技术职务任职资格奠定良好的基础。

本系列教程不仅汇集了钣金成形过程所需的全部技术及设备,考虑到教学方便,还提供了生产实践中的案例,同时章前设有导读、章后设有思考练习题,并配有多媒体课件。

本系列教程由郑州轻工业学院王爱珍教授编著,在编写过程中参考了许多相关教材、同类培训读本和手册,由李烁、王世军、郑冰岩、郭霄、王世杰、李维海、符绍先、荆利杰、余显芳等帮助整理资料、绘集图表等。同时得到了有关企业技术和人力资源部门的支持,并采用了他们提供的各种典型实例,在此一并致以衷心的感谢。

本系列教程既可作为机械、化工、汽车、航天、电器仪表等行业钣金技术人员的中、高级技能培训教材,又可作为机械类工程技术人员再修、高职及中专院校的专业教材。

《钣金加工技术》是系列教材之二,主要内容为钣金加工基础、切割下料、弯曲加工、压延加工、局部加工、加工设备与新技术等。本书从加工基本原理、工艺流程、使用材料开始,经过冲切冲裁及熔切、拉弯辊弯及压弯、压延旋压及胀形等工艺,直至各种加工设备与新技术,均由生产中的实际零件、典型构件和常用设备为例逐步说明。

钣金加工技术是钣金技术人员需要掌握的关键技术,也是钣金制品成形的重要工序,既包括传统的切割下料、冲裁加工、弯压成形等方法及工艺参数,又包括各种冷冲压模具结构及工艺参数、各种设备工作原理及操作方法,还包括新冲压技术及新工艺。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有不妥之处,敬请广大读者和专家批评指教,不胜感激。

作者 王爱珍

2007年6月

目 录

前言	
第1章 加工基础	1
1.1 基本理论知识	1
1.1.1 塑性变形与控制	1
1.1.2 变形抗力与硬化	7
1.1.3 加工工艺性能	10
1.2 加工工艺流程	13
1.2.1 加工图样准备	13
1.2.2 加工方法选择	19
1.2.3 加工工艺拟定	25
1.3 加工使用材料	29
1.3.1 结构用钢	29
1.3.2 非铁金属材料	38
1.3.3 非金属材料	44
思考练习题	45
第2章 切割下料	46
2.1 冲切下料	46
2.1.1 板材剪切	46
2.1.2 管材冲切	58
2.1.3 型材锯切	61
2.2 熔切下料	63
2.2.1 可燃气体切割	63
2.2.2 等离子气切割	71
2.2.3 激光吹气切割	76
2.3 冲裁下料	79
2.3.1 冲裁下料方法	79
2.3.2 冲裁下料工艺	84
2.3.3 典型冲裁模结构	90
思考练习题	99
第3章 弯曲加工	101
3.1 拉弯加工	101
3.1.1 拉弯加工方法	101
3.1.2 拉弯加工工艺	106
3.1.3 拉弯模典型结构	109
3.2 辊弯加工	111
3.2.1 辊弯加工方法	111
3.2.2 辊弯加工工艺	114
3.2.3 辊弯加工设备	120
3.3 压弯加工	123
3.3.1 压弯加工方法	123
3.3.2 压弯加工工艺	135
3.3.3 压弯模结构设计	144
思考练习题	155
第4章 压延加工	157
4.1 压延加工方法	157
4.1.1 圆筒形件压延	157
4.1.2 非圆筒形件压延	166
4.1.3 矩形盒件压延	172
4.2 压延加工工艺	176
4.2.1 压延工艺程序	176
4.2.2 压延件毛坯尺寸	182
4.2.3 压延力与压延功	187
4.3 压延模结构设计	192
4.3.1 压延模工艺参数	192
4.3.2 压延模典型结构	196
思考练习题	200
第5章 局部加工	202
5.1 局部翻边	202
5.1.1 内孔翻边	202
5.1.2 外缘翻边	209
5.1.3 翻边模结构	211
5.2 局部胀形	213
5.2.1 平板起伏	214
5.2.2 空心凸肚	217
5.3 旋形与旋口	222
5.3.1 普通旋形	223
5.3.2 变薄旋形	228
5.3.3 旋压成口	233
思考练习题	239
第6章 加工设备	240
6.1 通用设备	240
6.1.1 机械切割设备	240

6.1.2 机械冲压设备.....	252	6.2.2 冲压加工 FMS	266
6.1.3 普通折弯设备.....	256	6.2.3 冲压 CAE 设计	274
6.2 自动生产线	262	思考练习题	280
6.2.1 自动化冲压线.....	262	参考文献	281

第1章 加工基础

导读 本章主要介绍钣金件加工成形基础理论、基本工艺性能试验方法、加工图样准备、加工方式选择、加工工艺拟定以及加工使用材料的种类及选用等内容。

本章重点是合理选择钣金件应用材料，并正确制定钣金件加工工艺流程，难点是钣金件构形设计及加工工艺性分析，要点是能根据零件图技术要求并依据放样展开图，合理选择切割下料、加工成形及拼接等方法。

1.1 基本理论知识

钣金加工包括切割分离和成形两种方式，切割是利用剪切、冲切或气割等而获得工件毛坯的分离工序，而成形则是利用塑性变形，将金属板料或毛坯冲压成为所需形状零件的变形工序，并且是在冷态下借助冲压力，使金属产生塑性变形而获得零件的变形过程。

1.1.1 塑性变形与控制

1.1.1.1 变形状态及类型

金属材料在变形过程中，随加工应力和变形状态不同，变形类型及形式也不同，但其变形过程的基本特点均相同，均是在外力作用下，使金属发生不能自行恢复其原形和尺寸的塑性变形。

(1) 单工序变形状态 金属材料在冲压成形时，材料内各处的应力应变状态均不同，当应力状态超过材料局部区域的屈服强度时，将产生塑性变形，称为塑性变形区。并且不同的冲压工序及毛坯、不同的外力作用方式及模具形状，变形区所处的部位也不同，如图 1-1a 所示。

当应力值小于材料局部区域的屈服强度时，将不产生塑性变形，称为非变形区。并且随变形情况的发展，非变形区又可进一步转变为已变形区、待变形区和不变形区。

已变形区是已经历过塑性变形的部分，而待变形区是在以后的变形过程中将要参与塑性变形的部分，不变形区则是在变形过程中始终不参与变形的部分。

(2) 多工序变形特征 采用多工序冲压成形时受力状态比较复杂，变形区的应力状态既有经、纬两向受拉伸或受压缩，又有经向受拉伸和纬向受压缩，还有经向受压缩和纬向受拉伸（图 1-1b），并且在同一变形区内还会存在伸长类和压缩类两种状态及特征。

根据应力应变状态及特征不同，可以归纳为表 1-1 中六种具有单一性质的基本变形形式。

在伸长类变形时变形区的平均应力为正值，与之相对应的变形为伸长变形，而压缩类变形与之相反。伸长类变形时变形区厚度减薄，称之为减薄型变形，而压缩类变形时变形区厚度增厚，则称之为增厚型变形。

伸长类变形时变形区表面积增大，出现新生表面，而压缩类变形时变形区有材料转移，

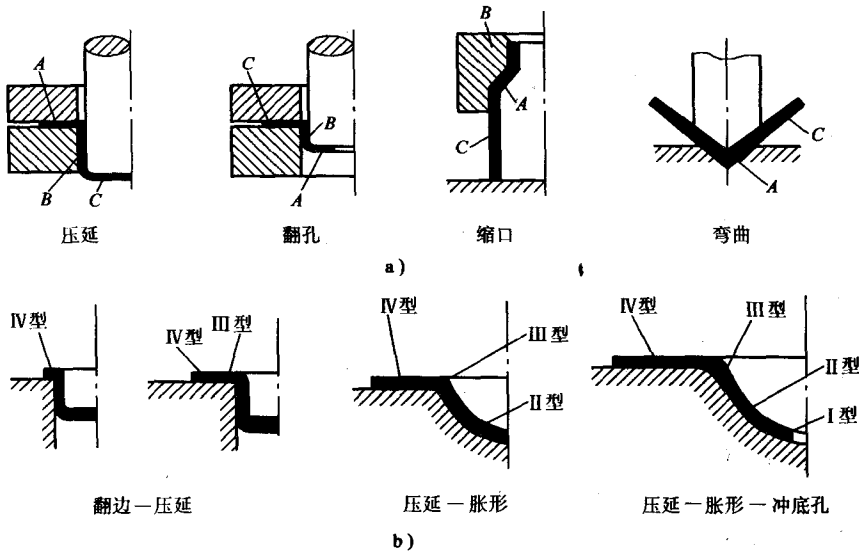


图 1-1 各种工序冲压时毛坯各区状态及形式

a) 单工序变形时毛坯各区状态

A—变形区 B—已变形区 C—不变形区，其上部为待变形区，下部为不变形区

b) 基本变形组合时各区特征

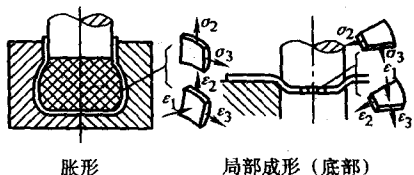
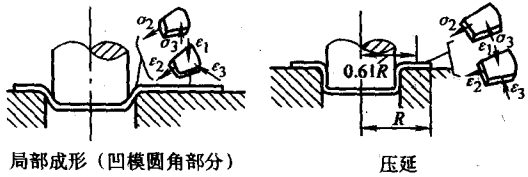
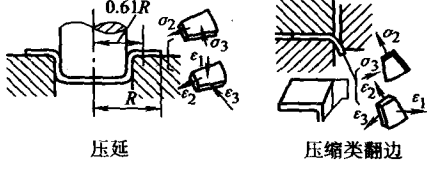
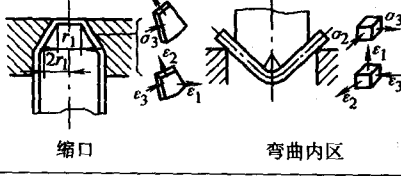
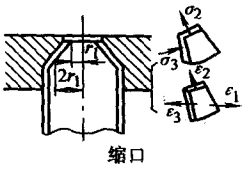
I型—两向受拉区 II型—两向受压区 III型—经拉伸压区 IV型—经拉伸拉区

使表面积减少。伸长类变形的失稳形式主要是缩颈断裂，而压缩类变形则主要是变形区的起皱和强度限制等。

表 1-1 板料冲压成形的基本变形形式

基本变形类别	应变状态		应力状态	受力图解
	厚向	经向及纬向	$\sigma_1 = 0$	
I、VI	厚度减薄 $\epsilon_1 < 0$	纬向伸长 $\epsilon_3 > 0$ 经向收缩 $\epsilon_2 < 0$	经拉伸拉	<p>扩口</p>
			两向受拉	<p>翻孔 弯曲外区</p>

(续)

基本变形类别	应变状态		应力状态	受力图解
	厚向	经向及纬向	$\sigma_1 = 0$	
II	厚度减薄 $\epsilon_1 < 0$	纬向伸长 $\epsilon_3 > 0$ 经向收缩 $\epsilon_2 > 0$	两向受拉	 <p>胀形 局部成形(底部)</p>
III		纬向收缩 $\epsilon_3 < 0$ 经向伸长 $\epsilon_2 > 0$	两向受拉 经拉纬压	 <p>局部成形(凹模圆角部分) 压延</p>
IV	厚度增厚 $\epsilon_1 > 0$	纬向收缩 $\epsilon_3 < 0$ 经向伸长 $\epsilon_2 > 0$	经拉纬压	 <p>压延 压缩类翻边</p>
			两向受压	 <p>缩口 弯曲内区</p>
V		纬向收缩 $\epsilon_3 < 0$ 经向收缩 $\epsilon_2 < 0$	两向受压	 <p>缩口</p>

注： σ_1 和 ϵ_1 分别为板厚度方向应力和应变； σ_2 和 ϵ_2 分别为经向应力和应变； σ_3 和 ϵ_3 分别为纬向应力和应变。

(3) 变形类型及问题 图 1-1b 中将毛坯分为四种基本变形形式，并将 I、II、III 型属于厚度减薄、表面积增加、有新生表面出现等的伸长类变形，IV、V、VI 则归属于厚度增加、表面积减小、容易发生皱折等的收缩类变形。

对于变形区伸长类变形时，由于拉应力过大，材料过度变薄，局部失稳而产生缩颈断裂等，例如胀形、翻孔、扩口和弯曲外层的拉裂。

对于变形区收缩类变形时，则由于压应力过大，超过了板材的临界应力，致使板材丧失稳定性而产生压屈起皱，例如缩口和无压边圈压延时的起皱等。

然而，非变形区的变形比较复杂，对于传力区若变形力超过了该区的承载能力，在压延

时将在该区发生撕裂或局部严重变薄而使工件报废，在扩口和缩口时将使工件待变形区失稳压屈而起皱。

对于非传力区也同样，若在变形过程中金属流动不均匀时，即使非变形区也可能产生过大内应力，而导致材料产生破坏现象。例如盒形件，在后续压延过程中，待变形区金属流入变形区的速度不一致，靠直边部分流入速度快，角部金属流入速度慢，致使直边部分容易发生撕裂，而角部容易沿高度方向压屈起皱。

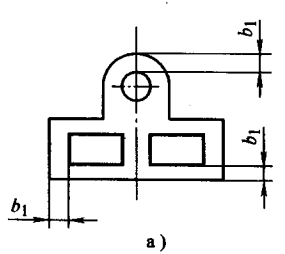
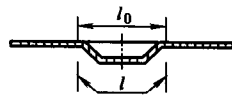
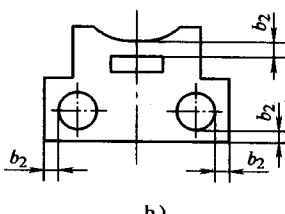
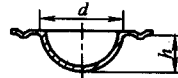
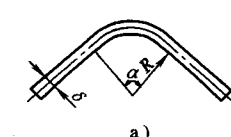
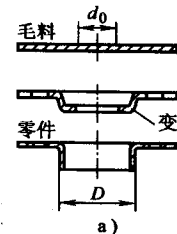
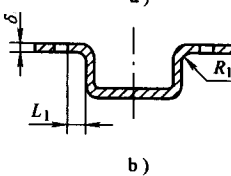
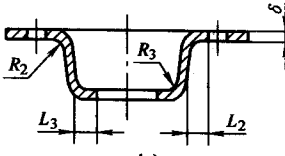
总之，冲压工序性质不同，变形失稳形式也不同，从而对材料成形性能的要求不同，采取控制变形趋向的措施也应不同。

1.1.1.2 变形极限与控制

(1) 变形极限参数 在冲压加工过程中，材料的最大变形限度称为成形极限，对于不同的加工工序，加工极限应采用不同的极限变形系数来表示。例如，冲裁工序的最小冲孔尺寸、最小冲裁窄槽宽、最小孔边距和最小孔间距，弯曲工序的最小弯曲系数（相对弯曲半径），压延工序的极限压延系数以及翻边工序的极限翻边系数等。

通常利用极限变形系数值，可确定冲压成形极限尺寸，见表 1-2。

表 1-2 板料冲压加工时的变形极限参数

变形方式	简图	变形极限	变形方式	简图	变形极限
冲裁	 <p>a)</p>	冲裁极限尺寸 $孔_{min} \geq (0.4 \sim 1.5) \delta$ 孔边距 $b_{1min} \geq 1.5\delta$ $b_{2min} \geq \delta$	局部成形		平均伸长率 $\delta = \frac{l - l_0}{l_0}$ 相对高度 $\frac{h}{d}$
	 <p>b)</p>				
弯曲	 <p>a)</p>	相对弯曲半径 $r_{min} = \frac{R}{\delta}$ $L_1 \geq R_1 + 0.5\delta$	翻边	 <p>a)</p>	翻边系数 $K_{min} = \frac{d_0}{D}$ $L_2 \geq R_2 + 0.5\delta$ $L_3 \geq R_3 + 0.5\delta$
	 <p>b)</p>			 <p>b)</p>	

(续)

变形方式	简图	变形极限	变形方式	简图	变形极限
压延		压延系数 $m = \frac{d}{D_0}$	胀形		胀形系数 $K_x = \frac{D_{max}}{D_0}$

注：表中 δ 为板厚。

在确定极限变形系数时，需考虑其选择不当时影响后果。对于胀形、翻孔、扩孔和弯曲外层等伸长类变形，由于拉应力过大，材料过度减薄、局部失稳而易产生缩颈断裂，因此应选择最小胀形系数、最小翻孔系数和最小相对弯曲半径。

同时对于缩口和无压边圈压延的压缩类变形，由于压应力过大，超过了板材的临界应力，使板材丧失稳定性而产生压屈起皱，因此应尽量选择最小压延系数等。

(2) 伸长类变形极限及控制 根据试验证实，胀形、翻孔及弯曲外侧变形等伸长类成形极限，均取决于材料的塑性，而且平板毛坯的局部胀形深度、圆柱形空心毛坯的胀形系数、圆孔翻边系数、最小弯曲半径等均与伸长率 δ 成正比关系。

这类成形工艺要求板料具有较高的塑性变形稳定性，即有较大的均匀伸长率和较大的硬化指数，因此其提高成形极限的措施如下：

1) 提高材料的塑性。由于冷作硬化会使材料的硬度 HBW、屈服点 σ_s ，抗拉强度 σ_b 等强度指标增大，而伸长率 δ 、断面收缩率 ψ 和冲击韧性 a_k 等塑性指标降低，故可采用退火处理消除前道工序所形成的硬化现象，恢复材料的塑性。

2) 增加变形的均匀性。由于变形区的局部集中变形可使该部分首先产生破坏，因此，必须使总的成形极限减小，增加变形的均匀性。例如胀形等工序中，为减小摩擦阻力采用均匀有效的润滑、为减小集中的局部变形采用提高变形区的硬化程度等，均可使变形趋向均匀，增大成形极限。

3) 消除应力集中的因素。在伸长类成形中，由于毛坯本身的缺陷引起的应力集中，极易产生开裂现象。例如，弯曲时因毛刺引起的应力集中而使工件开裂，应将带毛刺的表面放在内侧。在翻边时因转角半径过小，造成的应力集中而使工件开裂，应检验修整凹模上口圆角半径的尺寸，并对工件穿插工序间退火处理。

(3) 压缩类成形极限及控制 常用的压延、缩口等压缩类成形的极限，与材料的塑性指标无关，主要受到变形区的失稳和传力区强度限制，所以板料的相对厚度是衡量压缩类变形工艺难易程度的重要因素。

这类成形工艺要求板料具有较低的屈服点 σ_s 和较高的抗拉强度 σ_b ，并为提高其成形极限，而一般需采取的措施如下：

1) 防止毛坯变形区的失稳起皱。失稳起皱对冲压件是不允许的，必须采取措施消除。如压延毛坯变形区的起皱缺陷，可在压延模上设置有效的压边圈予以防止。

2) 提高传力区的承载能力。在压延过程中, 由于设置压边圈使摩擦阻力增大, 也使侧壁传力区的拉应力增大, 造成传力区的承载能力不够而限制成形极限, 使该处易被拉断, 所以必须采取提高传力区的强度和降低拉应力的措施, 才有助于提高成形极限。

1.1.1.3 成形质量与控制

冲压零件不仅要求具有所需形状, 还必须保证产品质量。冲压件的质量指标主要有厚度变薄率、尺寸精度、表面质量及性能等。这些指标主要取决于材料的力学性能及工艺性能以及产生回弹、翘曲、歪扭、松弛等弊病的可能性。

(1) 成形质量影响因素

1) 回弹现象及影响。由于金属塑性变形的同时总伴随着弹性变形, 所以即使加压时完全紧贴模具的零件, 在压力卸除后也会弹离模具表面, 即出现回弹现象。同时回弹的方向总是与毛坯变形的方向相反, 以影响冲压零件的尺寸和形状精度。

例如, 圆筒形压延件的直径会因回弹略大于凹模直径, 翻孔后工件的孔径会因回弹而略小于凸模直径, 局部成形件的深度也会因回弹略浅于成形时的深度。并且弯曲件的回弹也会引起弯角和曲率半径变化而影响零件。因此, 必须采取相应的工艺措施消除回弹现象。

2) 厚度变化与畸变。金属材料在塑性变形过程中, 根据体积不变定律, 在伸长类变形时, 由于板厚随着受力加大、延伸尺寸增加而逐渐变薄, 将会直接影响到冲压件的强度, 因此对于强度有要求的零件, 必须限制其最大变薄率。

同时在对变形控制不当时, 毛坯不许变形的方向则发生变形, 从而引起零件形状的畸变。因此需在不希望产生变形的方向增大阻力而减少畸变。例如弯曲管材时, 在管内加活动芯棒或填砂, 就是为了防止其纵向翘曲、管壁起皱和截面畸变等缺陷。

3) 表面粘附与擦伤。零件的表面质量主要是指在加工成形过程中的成形质量, 除了由于冲模间隙不均匀、模具表面粗糙易引起零件表面擦伤以外, 往往还由于零件材料的性质易粘附模具等因素, 也将会使冲压零件表面极易擦伤。

例如, 在普通低碳钢压延件的侧表面, 将会由于摩擦所产生的高温粘接而引起表面擦伤。在弯曲铜合金和铝合金等软材料时, 也会将金属微粒粘附在模具工作部分的表面, 从而引起弯曲件表面的擦伤。

(2) 成形过程合理控制 在冲压过程中, 变形区和传力区在一定条件下可以互相转化, 若改变下述某些条件就可以实现对变形趋向性的控制, 实现所要求的变形。

1) 确定合理毛坯和半成品尺寸。如图 1-2a 所示的毛坯, 由于尺寸 D_0 、 d_0 、 d_p 的相对关系不同, 具有压延、翻边、胀形三种可能的变形趋向, 其关系见表 1-3。

表 1-3 平板环形毛坯的变形趋向

尺寸关系	成形方式 (变形趋向)	备注
$D_0/d_p < 1.5 \sim 2$ $d_0/d_p < 0.15$	压延	当 D_0/d_p 与 d_0/d_p 都较小时, 宽度为 $D_0 - d_0$ 的压延件的环形部分是弱区, 可得到图 1-2b
$D_0/d_p > 2.5$ $d_0/d_p > 0.2 \sim 0.3$	翻边	要得到图 1-2c 所示的工件, d_0/d_p 的值必须加大, 否则内孔会开裂
$D_0/d_p > 2.5$ $d_0/d_p < 0.15$	胀形	当 $d_0/d_p = 0$ 时, 是完全胀形

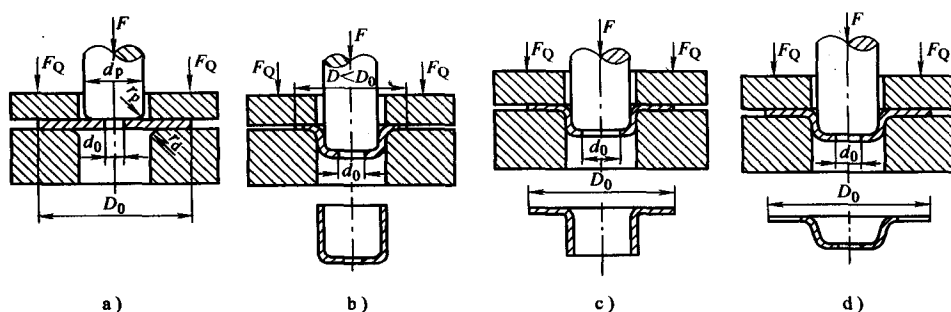


图 1-2 环形毛坯的变形趋向

a) 准备变形 b) 压延 c) 翻边 d) 胀形

生产中必须根据冲压件的形状，合理确定毛坯的尺寸，才能控制变形趋向，实现所要求的变形形状。

2) 改变模具工作部分形状和尺寸。通过适当改变模具工作部分几何形状和尺寸，能对毛坯的变形趋向起控制作用。如增大凸模的圆角半径 R_p ，减小凹模的圆角半径 R_d ，可以使压延变形的阻力增大，也可以使翻边变形的阻力减小，有利于翻边变形的实现。

反之，减小凸模圆角半径 R_p 和增大凹模圆角半径 R_d ，则有利于压延变形的实现而不利于实现翻边变形。如在新模具试冲调整时，时常要经过反复修磨圆角才能冲制出合格零件。

3) 改变毛坯与模具接触面间隙。通过改变毛坯与模具接触面之间的摩擦阻力，可以控制毛坯的变形趋向。如图 1-2 中若减小压边力，改善凹模面与毛坯间的润滑，并减小压边圈和凹模面与毛坯间的摩擦阻力，则有利于压延变形的实现。反之，则有利于翻边和胀形的实现。因此，选择合适的润滑剂和润滑部位是控制毛坯变形趋向的有力措施。

4) 降低变形区抗力或提高受力区强度。生产中采取局部加热或局部深冷法，可以降低变形区的变形抗力或提高受力区的强度，以达到控制变形趋向的目的，可使一次成形的成形极限增大。例如压延或缩口时对变形区局部加热，不锈钢毛坯压延时对受力区局部深冷等，均能增大一次成形的成形极限。

(3) 适当放宽零件质量标准 根据金属塑性变形的基本规律，回弹与体积不变是必然产生的现象，应该考虑到回弹造成零件成形后外形准确度超差，应在满足零件使用要求前提下，适当放宽质量标准，便于提高生产效率。

1.1.2 变形抗力与硬化

1.1.2.1 冷变形抗力

(1) 冷塑性与成形性能 冷塑性是指金属材料在外力作用下，产生塑性变形却不发生破坏的能力，金属的塑性越高，变形抗力越小，则越有利于冲压成形，即金属的可冷成形性越好。

金属冷塑性的好坏，主要取决于其化学成分、组织结构与变形条件等因素，一般纯金属和低碳钢的冷塑性较好，具有良好的冲压成形性能，而合金钢和中碳钢则随着合金元素或碳的质量分数增大，强度提高，塑性下降，变形抗力增加，冲压性能变坏。

金属冷塑性的衡量指标, 可用允许最大变形程度、伸长率、断面收缩率、冲击韧度等指标直接或间接表示 (见表 1-4)。

表 1-4 冷变形时的力学性能

性能	指标	符号	单位	含义说明	应用特点
弹性和刚度	弹性极限	σ_e	MPa	试样受拉后能恢复到原来尺寸, 不产生永久变形时所能承受的最大应力	E 是衡量材料抵抗弹性变形能力的指标, 工程上称为刚度, 取决于材料性质及尺寸大小, E 越大, 材料的刚度越大
	弹性模量	E	MPa	在弹性变形范围内, 应力与应变成正比 $\sigma = E\epsilon$, 即 $E = \sigma/\epsilon$, 比例常数 E 称为弹性模量	
塑性	伸长率	δ	%	试样拉断后, 标距伸长量与原标距的百分比, $\delta = (L_1 - L_0)/L_0$, L_0 , L_1 分别为原标距和伸长后长度	塑性是衡量材料变形而不破坏的指标, δ 和 ψ 值越大, 塑性越好, 越有利于压力加工 $\delta \geq 5\%$ 的材料为塑性材料; $\delta < 5\%$ 则为脆性材料
	断面收缩率	ψ	%	试样拉断后, 缩颈处截面积的最大缩量与原横截面积的百分比	
强度	屈服点	σ_s	MPa	试样在拉伸过程中, 载荷不增加而变形继续增加, 则出现屈服现象时的最小应力	强度是指金属材料抵抗塑性变形和断裂的能力, 强度越高, 说明该材料能承受的外力越大 σ_s/σ_b 的比值称为屈强比, 其比值越大, 越能发挥材料的潜力, 并可减小结构自重, 一般在 0.65 ~ 0.75 之间较适宜
	屈服强度	$\sigma_{0.2}$	MPa	对于无明显屈服点的高碳钢、合金钢及有色金属, 将其试样标距长度产生 0.2% 的塑性变形时的应力值作为其屈服强度	
	抗拉强度	σ_b	MPa	试样在拉断前所能承受的最大应力, 其值为所能承受最大载荷与原横截面积的比值	
冲击韧度		a_K	J/cm ²	试样冲断后, 缺口处横截面积上所消耗的冲击功 A_K 即为 a_K	冲击韧度值越大, 韧性越好

(2) 冷抗力与冲压难度 冷抗力是指金属对于促使产生塑性变形外力的抵抗能力, 通常是指其屈服点 σ_s , 可由试验测定。材料的屈服点表示材料产生屈服时的最小应力, 即当金属内部所受的应力超过该值时, 便开始产生塑性变形。

金属材料的屈服点越大, 使其开始产生塑性变形所需要的作用力也越大, 冲压变形难度越大, 各种金属材料的屈服点值可查阅本章 1.3 中有关表格。常用各种金属材料的冲压变形难易程度排序见表 1-5, 通常可根据使用要求择优选用。

在分析钣金件的冲压成形性时, 应根据钣金件的结构形状、展开放样图的尺寸大小、精度要求、材料工艺性能等综合考虑。既要分析钣金件冲压加工的难易程度, 又要审查钣金图的冲压工艺性, 并找出难成形和可冲压成形部位的形状及尺寸, 从而达到明确该零件是否适合冲压加工的工艺特点、经济合理性及技术难题。同时, 还要考虑尽量减少材料的消耗和工序数目, 提高生产效率和冲压质量以及冲压后机加工部位的形状、尺寸及加工工序等。

表 1-5 常用金属材料冲压难度的顺序排列 (从小到大)

序号	材 料	序号	材 料	序号	材 料	序号	材 料
1	纯铝	4	镁合金	7	低碳和低合金钢	10	镍合金
2	铝合金	5	磷青铜	8	马氏体不锈钢	11	半奥氏体沉淀硬化不锈钢
3	纯铜	6	黄铜	9	奥氏体不锈钢	12	钛合金

1.1.2.2 加工硬化

实际材料在塑性成形过程中,随着变形程度的增加,形变越大,碎晶程度便越大,位错密度也越大,从而使其变形抗力(即屈服点 σ_s)不断增高,则强度、硬度也将提高,而塑性和韧性下降的现象即为加工硬化。

(1) 加工硬化的机理 由于金属的塑性变形是由位错移动来实现的,故在变形量不大时,晶界附近会出现位错堆积和缠结。随着变形量的增加,位错堆积缠结现象趋于严重,便会使各晶粒破碎成为细碎的亚晶粒,晶格产生严重畸变。

变形加工过程中,随着变形程度的增加,形变越大,碎晶程度便越大,位错密度也越大,从而使金属塑性变形的抗力(即屈服点 σ_s)在不断地增大。

因此,金属这种微观上的变化会增加晶格进一步滑移的阻力,宏观上又反映为材料的强度、硬度和耐磨性的提高,这一现象称为加工硬化或冷作硬化,如图 1-3 所示。

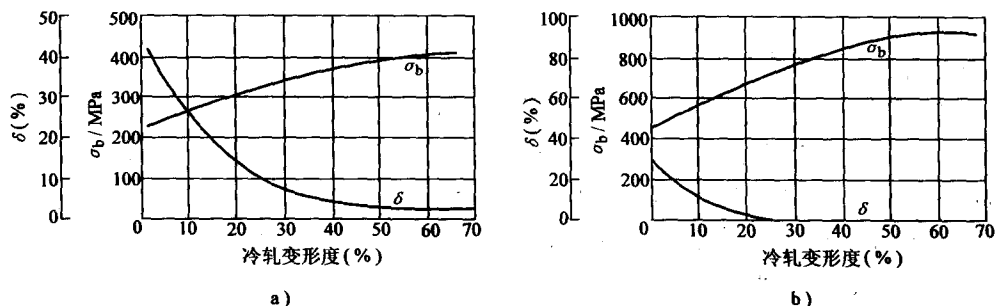


图 1-3 金属加工硬化现象

a) 纯铜 b) 低碳钢

(2) 加工硬化的影响 加工硬化对塑性变形的影响很大,且材料性质不同,变形温度及速度不同,其加工硬化的程度也不同。加工硬化不仅使金属的塑性和韧性明显下降,所需的变形力增加,还限制了材料进一步变形而降低了极限变形程度。因此,需要在后续变形工序前增加中间退火工序,以消除硬化现象,提高后续变形工序的成形极限。

然而,硬化有时对变形是有利的,如板料硬化能减小厚度的局部变薄,使变形趋于均匀,增大极限变形程度,同时也提高了材料的强度。

(3) 加工硬化性能参数 由上可见,在处理冲压生产中许多实际问题时,必须熟悉和掌握材料的硬化性能及规律以及它们对冲压工艺带来的影响,才有利于控制好材料的变形

程度。

板料成形中经常采用指数曲线的经验公式表示, 即

$$\sigma = C\epsilon^n$$

式中 C ——与材料有关的塑性系数 (MPa);

ϵ ——应变量 (%);

n ——硬化系数 (或硬化指数)。

C 和 n 值取决于材料的种类和性能, 硬化指数 n 值是表示材料冷变形时硬化性能的重要参数。 n 值大时, 表示材料变形抗力随变形的进展而迅速增加, 硬化强度增大, 加工时硬化显著, 对后续变形工序不利。

但是不易出现局部集中变形与破坏, 变形后工件壁厚均匀、刚性大、精度高, 在同样应力状态下所能给出的极限变形程度也高, 常用材料的 n 和 C 值见表 1-6。

表 1-6 常用材料的硬化系数与塑性系数

材 料	n	C/MPa	材 料	n	C/MPa
低碳钢	0.19~0.22	7~7.4	磷青铜 (低温退火)	0.52	8.9
不锈钢	0.5	—	纯铜	0.27~0.34	4.2~4.6
黄铜 (H62)	0.46	9.9	硬铝	0.12~0.13	3.2~3.8
黄铜 (H68)	0.39~0.44	7.6~8.2	纯铝	0.25~0.27	1.6~2.1
磷青铜	0.22	10.7	纯银	0.31	4.7

(4) 消除加工硬化的措施

1) 低温回复处理。在工业上常利用回复现象将变形金属进行去应力处理, 降低其内应力, 保留金属的加工硬化性能, 改善某些理化性能。例如, 冷卷弹簧在卷制之后都要进行一次 250~300℃ 的去应力处理, 以消除内应力使其定型。

又如冷轧金属板材由于是在再结晶温度以下进行的冷变形, 轧制中金属产生形变强化, 变形抗力增大, 塑性降低, 若继续变形会使金属具有很大的内应力, 以致断裂, 因而常需要穿插回复处理消除应力等中间工序。

2) 再结晶退火处理。当变形金属加热到较高温度时, 原子具有更大的扩散能力, 这时组织中破碎拉长的晶粒会通过形核与长大的方式形成新的等轴晶粒, 这些等轴晶粒完全代替碎晶后, 即完成了再结晶。新旧晶粒的外形不同, 但晶格类型完全相同。

通过再结晶, 变形金属的显微组织将发生彻底变化, 使金属的强度、硬度显著下降, 内应力基本消除, 而塑性、韧性明显提高, 即加工硬化现象消除。

当变形到一定程度 (70%~80%) 之后, 金属的再结晶温度将趋近于某一最低极限值, 称为最低再结晶温度。纯金属的最低再结晶温度与熔点的关系为 $T_{再} \approx 0.4 T_{熔}$ 。

1.1.3 加工工艺性能

冲压件的成形质量主要取决于板料的冲压工艺性能, 而冲压工艺性是借助特定的“反复弯曲试验”、“压延试验”、“杯突试验”等, 分别用来鉴定毛坯的弯曲性能、压延性能和胀形

性能等。

这些试验均模拟了实际工序中材料受力情况和变形特点，因此对于特定工艺下的试验结果比较准确。

1.1.3.1 工艺性能试验

(1) 弯曲和压延试验 弯曲和压延试验是实际生产中常用于评价板材局部弯曲伸长性能的试验，图 1-4a 所示为薄壁件弯曲试验装置及过程，当凸模弯曲直径 d 越小时，所弯角度 α 越大，板料的弯曲成形性能越好，该试验可用于鉴定厚度在 4mm 以下的板料。

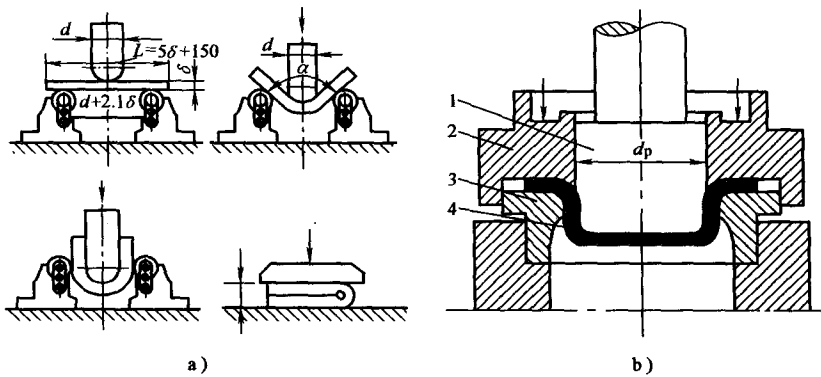


图 1-4 弯曲和压延试验

a) 弯曲试验 b) 压延试验

1—凸模 2—压边圈 3—凹模 4—毛坯

图 1-4b 为 Swift 杯形件压延试验，是以求极限压延比 $LDR (D_{max}/d_p)$ 作为评定板材压延性能的试验方法，其凸模直径 d_p 为 32 ~ 50mm、圆角半径为 4.5 ~ 5.5mm，适用板厚范围相应为 0.32 ~ 1.3mm 或者 0.45 ~ 1.86mm。

用不同直径的平板毛坯压延时，通常以压延比 0.025 为单位改变毛坯直径，并以不发生破裂所能压延成杯形件的最大毛坯直径 D_{max} 与凸模直径 d_p 之比作为极限压延比 LDR。同时，还要探索合适的压边力范围，以便减小其对 LDR 值的影响。

(2) 胀形试验 艾利克森杯突试验和液压胀形试验均是评价各种板材胀形性能的试验。图 1-5a 所示为艾利克森杯突试验装置以及试验标准极限杯突值 (图 1-5b)，这是一种国际上广泛采用的试验方法。

国际标准 ISO R149 规定，球形凸模半径 $\phi 20\text{mm}$ ，凹模内径 $\phi 27\text{mm}$ 、外径 $\phi 55\text{mm}$ ，凸、凹模圆角半径均为 0.75mm，压边圈厚度 $> 20\text{mm}$ 、外径 55mm。且试验适用于 0.5 ~ 2.0mm 的板厚，且试样凹坑至边缘最短 45mm 以上。

国家标准 GB/T 4156—1984 规定，球形凸模半径 $R 10\text{mm}$ ，压边圈尺寸未作规定，试件规格为 70mm × 80mm，其他参数与国际标准相同。试验适用于一般板厚 $\leq 2\text{mm}$ 、必要时 2 ~ 4mm 的板料，且试验速度 5 ~ 20mm/min。

图 1-5c 为液压胀形示意图，顶部板厚为 δ ，曲率半径为 ρ ，测定液体压力 p ，然后既可测定板材在等双拉状态下的应力—应变关系，即 $\sigma = p\rho / (2\delta)$ ， $\epsilon = \ln (\delta_0 / \delta)$ (δ_0 和 δ 分