



# 汽车车身 制造工艺学



邓仕珍 编著  
范淼海

3.82

北京理工大学出版社

# 汽车车身制造工艺学

邓仕珍 范淼海 编著

北京理工大学出版社

## 内 容 提 要

本书对现代汽车生产的车身制造工艺作了较全面的叙述,全书共分三篇十四章。第一篇车身冲压工艺,内容包括:冲压的基本理论和冲裁、弯曲、拉深、胀形、翻边以及车身覆盖件拉深工艺,并简介了冲模设计及冲压设备。第二篇车身装焊工艺,内容包括:电阻焊和CO<sub>2</sub>气体保护焊及其设备、车身装焊夹具、装焊生产线及装焊工艺性。第三篇车身涂饰工艺,简介了车身涂料、漆前处理和涂饰工艺及设备。

本书可作为高等院校汽车专业的教材,也可作为专科学校相关专业的教材及培训教材。亦可供有关行业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

汽车车身制造工艺学/邓仕珍,范森海编著,一北京:北京理工大学出版社,1997.9  
ISBN 7-81045-311-4

I. 汽… I. ①邓… ②范… III. 汽车-车体-制造-工艺学 IV. U463.82

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第14826号

北京理工大学出版社出版发行  
(北京市海淀区白石桥路7号)  
邮政编码 100081 电话 (010)68912824  
各地新华书店经售  
北京房山先锋印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 13印张 310千字  
1997年9月第一版 1997年9月第一次印刷  
印数:1—2000册 定价:16.00元

---

※图书印装有误,可随时与我社退换※

# 出版说明

为贯彻汽车工业产业政策，推动和加强汽车工程图书的出版工作，中国汽车工程学会成立了“汽车工程图书出版专家委员会”。委员会由有关领导机关、企事业单位、大中专院校的专家和学者组成，其中心任务是策划、推荐、评审各类汽车图书选题。图书选题的范围包括：学术水平高、内容有创见、在工程技术理论方面有突破的应用科学专著和教材；学术思想新颖、内容具体、实用，对汽车工程技术有较大推动作用，密切结合汽车工业技术现代化，有高新技术内容的工程技术类图书；有重要发展前景，有重大使用价值，密切结合汽车工程技术现代化需要的新工艺、新材料图书；反映国外汽车工程先进技术的译著；使用维修、普及类汽车图书。

出版专家委员会是在深化改革中，实行专业学会、企业、学校、研究所等相互结合，专家学者直接参与并推动专业图书向高水平、高质量、有序发展的新尝试。它必将对活跃、繁荣专业著作的出版事业起到很好的推动作用。希望各位同仁、专家积极参与、关心、监督我们的工作。限于水平和经验，委员会推荐出版的图书难免存在不足之处，敬请广大同行和读者批评指正。

本书由邓仕珍、范淼海编著，秦德申主审，经专家委员会评审通过、推荐出版。

**汽车工程图书出版专家委员会**

# 前 言

长期以来,在我国汽车工业中,作为汽车三大部分之一的车身未能被放到应有的重要地位,与汽车上另两大部分相比,车身技术更显落后,技术人才更显匮乏。进入80年代,中国开始成为激烈竞争的世界汽车市场的一部分。形势迫使我们不得不大力发展我国的汽车工业,特别是车身制造技术。

为了适应这种需要,我们在1988年编写了“汽车车身制造工艺”一书作为校内教材。经过近十年的时间,我国汽车工业已发生了巨大变化,车身制造技术也取得了较大进展。

本书是在原教材的基础上修订和重写的。内容包括汽车车身冲压、装焊和涂饰三个部分。对车身装饰和车身附件,这次编写尚未列入。

本书编写时力求兼顾理论与实践,较系统地介绍汽车车身制造所需的工艺基本理论知识和现代车身工程的一些先进技术。主要可作为高等院校汽车专业的教材。也可供有关行业的工程技术人员参考。

本书由湖南大学邓仕珍主编,并编写绪论、第二篇和第三篇,范森海编写第一篇。全书由湖南大学秦德申教授主审。

由于汽车车身制造工艺学是一门综合性学科,内容涉及众多专业的高技术领域。而目前国内这方面的书籍及参考资料又甚少,再加之我们水平有限,错误和疏漏之处在所难免。恳请读者批评指正。

编 著 者

1997年元月

# 目 录

绪 论 .....	( 1 )
-----------	-------

## 第一篇 汽车车身冲压工艺

<b>第一章 冲压工艺概论 .....</b>	<b>( 5 )</b>
§ 1-1 冲压工艺的特点及冲压工序的分类 .....	( 5 )
§ 1-2 金属塑性变形的力学规律 .....	( 9 )
§ 1-3 板料的冲压成形性能 .....	( 12 )
§ 1-4 成形极限图 .....	( 13 )
§ 1-5 车身冲压用材料 .....	( 15 )
<b>第二章 冲裁工艺 .....</b>	<b>( 20 )</b>
§ 2-1 冲裁的变形过程 .....	( 20 )
§ 2-2 冲裁间隙 .....	( 21 )
§ 2-3 冲裁模刃口尺寸 .....	( 24 )
§ 2-4 冲压力和冲模压力中心 .....	( 25 )
§ 2-5 冲模及冲裁模 .....	( 28 )
§ 2-6 冲裁件缺陷原因及分析 .....	( 33 )
<b>第三章 弯曲工艺 .....</b>	<b>( 34 )</b>
§ 3-1 弯曲变形分析 .....	( 34 )
§ 3-2 弯曲工艺计算 .....	( 37 )
§ 3-3 弯曲件质量分析和控制 .....	( 39 )
§ 3-4 弯曲模 .....	( 45 )
<b>第四章 拉深工艺 .....</b>	<b>( 49 )</b>
§ 4-1 拉深件的类型及特点 .....	( 49 )
§ 4-2 圆筒形零件的拉深 .....	( 50 )
§ 4-3 盒形零件的拉深 .....	( 59 )
§ 4-4 非直壁旋转件的拉深 .....	( 60 )
§ 4-5 拉深模 .....	( 63 )
<b>第五章 局部成形工艺 .....</b>	<b>( 65 )</b>
§ 5-1 胀形工艺 .....	( 65 )
§ 5-2 翻边工艺 .....	( 68 )
§ 5-3 校平和整形 .....	( 72 )
<b>第六章 汽车覆盖件拉深工艺 .....</b>	<b>( 74 )</b>
§ 6-1 汽车覆盖件的冲压和拉深特点 .....	( 74 )
§ 6-2 汽车覆盖件拉深工艺设计 .....	( 76 )
§ 6-3 汽车覆盖件拉深模 .....	( 87 )
<b>第七章 冲压设备和冲压生产的机械化、自动化 .....</b>	<b>( 94 )</b>

§ 7-1 冲压设备的类型 .....	( 94 )
§ 7-2 压力机的技术参数 .....	( 96 )
§ 7-3 冲压生产的机械化和自动化 .....	( 98 )

## 第二篇 汽车车身装焊工艺

<b>第八章 车身焊接工艺</b> .....	(105)
§ 8-1 车身装焊工艺的特点 .....	(105)
§ 8-2 电阻焊 .....	(107)
§ 8-3 点焊 .....	(109)
§ 8-4 缝焊和凸焊 .....	(124)
§ 8-5 二氧化碳气体保护焊 .....	(128)
<b>第九章 车身装焊夹具</b> .....	(138)
§ 9-1 概述 .....	(138)
§ 9-2 装焊件在夹具上的定位与夹紧 .....	(139)
§ 9-3 几种车身装焊夹具 .....	(144)
<b>第十章 车身装配焊接生产线</b> .....	(147)
§ 10-1 贯通式装焊生产线 .....	(147)
§ 10-2 其它型式的装焊生产线 .....	(150)
§ 10-3 车身装焊生产线的发展趋势 .....	(153)
<b>第十一章 装焊工艺性</b> .....	(157)
§ 11-1 车身制件分块 .....	(157)
§ 11-2 焊接结构 .....	(158)
§ 11-3 焊点布置 .....	(160)
§ 11-4 其它装焊工艺性问题 .....	(162)

## 第三篇 汽车车身涂饰工艺

<b>第十二章 汽车车身用涂料</b> .....	(164)
§ 12-1 概述 .....	(164)
§ 12-2 车身用底漆 .....	(170)
§ 12-3 车身用中间层涂料 .....	(171)
§ 12-4 汽车车身用面漆 .....	(172)
§ 12-5 车身涂料的发展趋势 .....	(175)
<b>第十三章 漆前表面处理</b> .....	(177)
§ 13-1 漆前表面处理的目 的及内容 .....	(177)
§ 13-2 金属表面的脱脂 .....	(177)
§ 13-3 金属表面的磷化处理 .....	(181)
<b>第十四章 汽车车身涂饰工艺及设备</b> .....	(185)
§ 14-1 汽车车身涂饰的典型工艺 .....	(185)
§ 14-2 涂漆方法及设备 .....	(187)
§ 14-3 涂膜干燥 .....	(194)
<b>主要参考文献</b> .....	(197)

# 绪 论

—

汽车问世才 100 多年，可它给世界带来了巨大的变化。当今的汽车，已与人们的生产和生活息息相关。当今的汽车工业，已成为全球性的支柱产业。

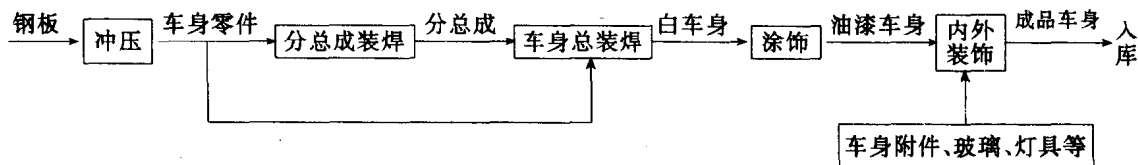
作为汽车上三大部件之一的车身，已越来越受到重视。这不仅因为从质量上，轿车的车身已占整车的(40~60)%，货车车身也达(20~30)%，从制造成本上，车身占整车的百分比还要超过这些数值的上限值，而且随着科学技术的发展和物质生活水平的提高，人们追求汽车的安全、舒适、新颖和豪华等特色大多要通过汽车车身来体现。所以，近年来，车身技术发展迅猛，已成为世界汽车工业激烈竞争的主战场。

汽车车身不同于一般的机械产品。车身设计与制造需要综合运用造型艺术、人一机工程、材料学、冲压、焊接、涂漆、装饰、防振隔音、采暖通风等各方面的知识。因此，车身技术的发展状况足以反映出一个国家的工业水平。虽然，我国对汽车车身的重要性的认识晚了一些，但也已深深地感到，要使我国的汽车工业赶超世界先进水平，关键是提高车身制造技术。

二

汽车车身是一个形状复杂的空间薄壁壳体。其主要零部件均由钢板冲压焊接而成。为增加美观和防蚀性，车身表面还涂有漆膜。此外，还有各种金属的和非金属的装饰件。因此，冲压、装焊和涂饰是车身制造的主要工序，也是本书的主要内容。

从结构上看，车身大致可以分为无骨架车身和有骨架车身两大类。无骨架车身的生产工艺流程大致如下：



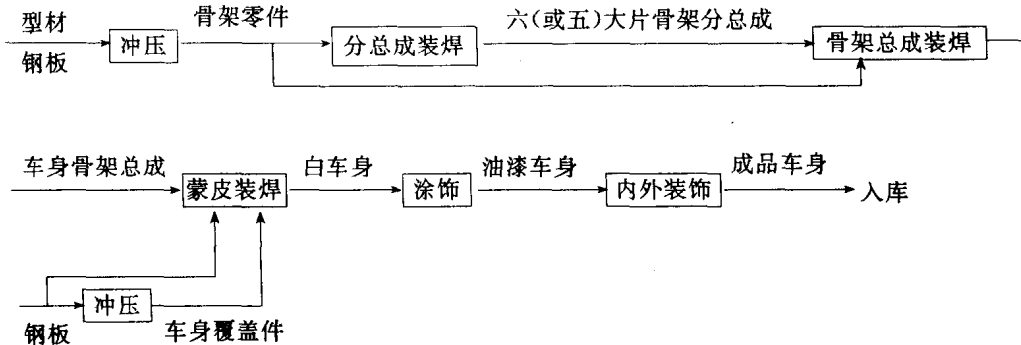
微型车、轿车和各种小型客车以及载货汽车的驾驶室等都属于无骨架车身。无骨架车身并不是因为没有骨架而不能承载，有些无骨架车身(例如很多轿车)还属于承载式车身。即使属于非承载式车身的货车驾驶室等也要具有一定的刚度以抵抗受力变形。所以无骨架车身是以车身板制件冲压成某种形状或者是几个车身零件焊合后形成具有某种截面型式的“梁”，以增加其刚性或承受较大载荷，只不过是没专门的骨架零件而已。由此可见，无骨架车身的零件一般比较复杂。

其次，由于没有骨架，车身的表面形状完全由覆盖件形成。所以车身覆盖件必须具有要求的形状和能保持这种形状的刚性。增加车身零件刚性有的是通过结构实现的，例如车身顶盖一般都冲有加强筋；有的则是通过工艺实现的，例如某些形状变化不大而较平坦的零件，在拉深成形时可通过增加拉深阻力使其增加胀形成分而变形更加充分些。



另外，无骨架车身的覆盖件的表面质量要求较高，特别是轿车。这是车身制造的难点所在。

有骨架车身的生产工艺流程大致如下：



从工艺流程图中可以看出，这类车身的制造工艺基本上分两个阶段，即先制成车身骨架，再在骨架上蒙上蒙皮。相对无骨架车身来说，由于有骨架支撑，蒙皮的形状较简单，要求也较低。再加之中、大型客车的产量不很大，所以工艺水平也较低。

汽车车身的制造虽然主要程序大致相同，但由于年产纲领不同，生产方式也不同，使用的设备及工艺装备不同，生产过程的机械化自动化程度也不同，因此其工艺特征有很大区别。

在单件少量生产中，车身覆盖件的成形大都以钣金为主，配以少量的胎具和工具。只有少数对外观质量影响大的覆盖件才用模具成形；车身的总装也是使用简易夹具和样架结合找正来定位的，其焊接虽然部分已采用点焊，但还大量使用了二氧化碳气体保护焊和气焊，甚至手工电弧焊。为获得平整的车身表面，往往刮腻子、打磨数次。涂饰则常用手工喷涂和自然干燥。

在小批量生产中，主要覆盖件往往采用简易模具（钢板拼焊模、铸造模或低熔点合金模等）在液压式压力机上成形，至于切边、翻边或冲孔等工序还需手工配合一些机具来完成。装配一般在固定式装配台上进行，使用较简单的夹具来确定零件的相互位置，互换性差。焊接主要是点焊和二氧化碳气体保护焊，虽有简易喷漆室和烘干室，但操作仍多为手工，工序间的运输主要靠行车或地面轻便小车来完成。

中批和大批量生产基本上属于流水线形式。覆盖件在冲压线上全模具成形，然后被送到有快速定位夹紧的固定式或随行式夹具的装配线上，按工位完成合件、分总成和车身总装。焊接则大量采用悬挂式点焊机配以各种专用焊钳和焊枪，有的还有少量多点焊机。车身的表面处理则在有脱脂、磷化、电泳底漆、喷漆室和烘干室等先进设施的涂饰生产线上完成。工序间的运输也因使用滑道、输送带和悬链等而实现了机械化或半自动化。

大量生产的机械化、自动化程度更高。车身覆盖件的冲压大都在半自动或自动冲压生产线上完成。装焊和涂饰分别在实现了自动控制的专用生产线上进行。这些自动线还大量装备了机器人和电子计算机等现代高科技产品。

不管是哪一种生产方式，与一般机械产品相比，车身生产具有较明显的特点：

(1) 冲压件质量要求高，制造难度大。车身，特别是轿车车身，除了它的使用价值外，还要体现它的艺术价值。所以它的覆盖件多为空间曲面、形状复杂、尺寸大，特别是表面质量要求很高，表面必须光滑，不允许有任何皱裂和拉痕等缺陷。这给覆盖件成形的关键工序——

拉深工序提出了很高的要求。而能否达到这些要求，关键又在于拉深模。所以冲模是车身制造技术的难点和关键所在。

(2) 车身的表面处理要求高。由于汽车行驶在野外的各种路况和气候中，故要求车身表面有很好的抗蚀性和涂膜耐候性。再加之汽车车身本身还要体现一定的艺术效果。所以对车身表面的漆前处理和涂饰工艺要求很高。往往需要很复杂的设备和先进的技术才能实现。

(3) 车身制造投资大、周期长。由于汽车生产是大量生产，必须达到一定的经济规模才能产生较好的经济效益。为了实现优质高产的目标，车身制造需要大吨位压力机和大型冲模以及先进的冲压生产线、装焊线、漆前处理线及涂漆线等主要生产设施及其配套工程。故所需投资巨大，一般都需数亿或数十亿元。同时建厂周期长，投资回收慢。

### 三

近年来，由于汽车产量的激增和科学技术的飞速发展，针对汽车车身的制造特点，各国都非常重视汽车车身制造技术的研究和改进工作，并且已经取得了一些可喜的成果。

在车身冲压方面，实现了大型覆盖件的冲压生产机械化或自动化、坯料准备即卷料的开卷、校平、剪切和落料等的自动化以及冲压废料处理的自动化。现在正向着CAD/CAM（车身设计、冲模设计、冲模制造和车身制造）一体化系统的方向发展。

在车身装焊方面，从现在大量使用悬挂式点焊钳的装焊生产线向以多点焊机为主的自动生产线过渡，并向着机器人自动化装焊生产线的方向发展(如图1所示)。

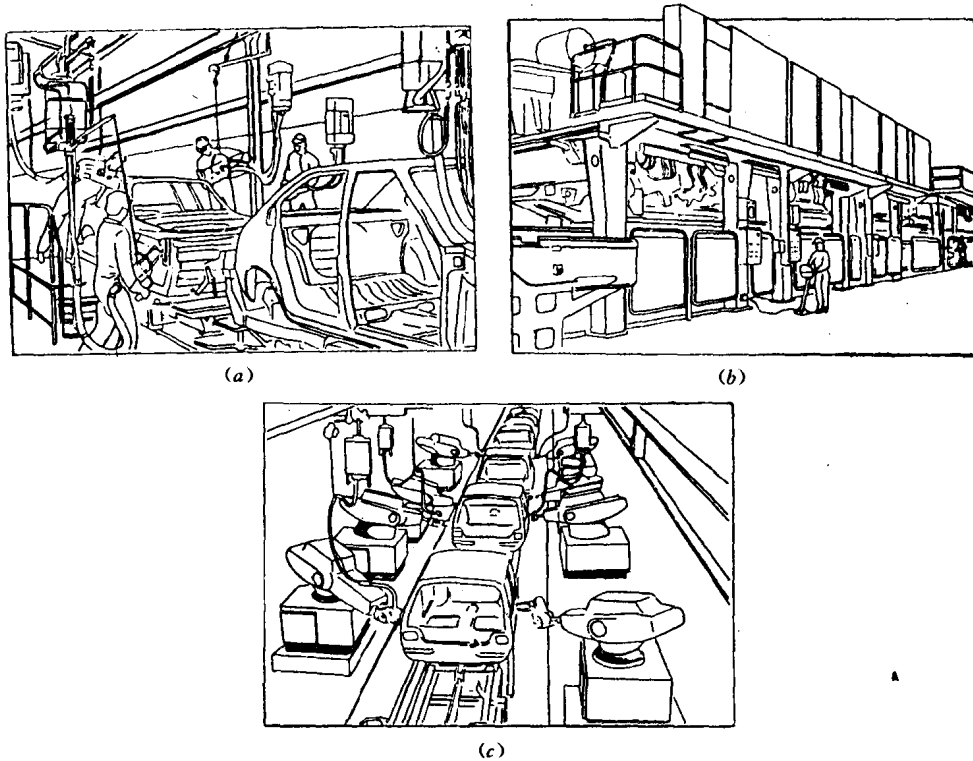


图1 汽车车身制造生产发展过程

(a) 手工操作为主的焊接生产；(b) 多点焊机为主的焊接生产；(c) 机器人自动化焊接生产

在车身涂饰方面，一方面通过开发低污染涂料——粉基底漆及洁净面漆来降低车身生产对环境的污染；另一方面，从漆前处理和涂漆自动生产线向着通过应用机器人、传感器和微电子技术而实现整个涂饰车间自动化的方向发展。

# 第一篇 汽车车身冲压工艺

## 第一章 冲压工艺概论

冲压成形工艺是一种先进的金属加工工艺方法，应用范围非常广泛，在工业生产的各个部门中，几乎都有冲压加工产品，如在汽车、电机、电器、仪表、化工、纺织、轻工及航空航天产品中占有相当大的比重。冲压成形工艺设计质量的优劣，不仅直接影响冲压产品的质量、成本和生产效率，而且还影响冲压生产的组织和管理。因此冲压工艺设计不仅要求设计人员具有较好的理论基础、丰富的实践经验、熟练的设计技能和认真负责的工作态度，而且要求设计人员在不断积累总结设计经验的基础上，及时获取最新科学技术知识，尽快掌握现代化的设计计算手段。只有这样，冲压工艺设计才能适应工业生产迅速发展的需要。

### § 1-1 冲压工艺的特点及冲压工序的分类

#### 一、冲压工艺的特点

冲压是一种金属加工方法，它是建立在金属塑性变形的基础上，利用模具和冲压设备对板料施加压力，使板料产生塑性变形或分离，从而获得具有一定形状、尺寸和性能的零件(冲压件)。

冲压加工方法与其它金属加工方法相比，具有下述优点：

(1) 冲压是一种高生产效率、低材料消耗的加工方法。冲压工艺适用于较大批量零件制品的生产，便于实现机械化与自动化，有较高的生产效率，同时，冲压生产不仅能努力做到少废料和无废料生产，而且即使在某些情况下有边角余料，也可以充分利用。

(2) 操作工艺方便，不需要操作者有较高水平的技艺。

(3) 冲压出的零件一般不需要再进行机械加工，具有较高的尺寸精度。

(4) 冲压件有较好的互换性。冲压加工稳定性较好，同一批冲压件，可相互交换使用，不影响装配和产品性能。

(5) 由于冲压件用板材作材料，它的表面质量较好，为后续表面处理工序(如电镀、喷漆)提供了方便条件。

(6) 冲压加工能获得强度高、刚度大而重量轻的零件。

(7) 用模具批量生产的冲压件成本低廉。

(8) 冲压能制造出其它金属加工方法难加工出的形状复杂的零件。

冲压生产是一种优质、高产、低消耗和低成本的加工方法，但冲压生产也有一定的局限性。由于模具多为单件生产，精度要求高，制造难度大，制造周期长，因此模具制造费用高，不宜用于单件和批量小的零件生产。

板料、模具和冲压设备是冲压生产的三大要素。为了获得质优价廉的冲压零件，必须提供优质的板料、先进的模具和性能优良的冲压设备；还应该掌握板料的成形性能和变形规律，必须设计并制造出各种精密的复杂模具，必须生产出各种满足工艺要求的通用和专用设备。目前世界各国不断研制出冲压性能良好的板料，研究板料的冲压成形性能，不断改善模具加工设备，生产出了对冲压生产具有关键作用的高效率、高精度和高寿命的大型复杂模具，从而使冲压生产与模具工业进入了一个崭新的阶段。

冲压成形工艺在汽车车身制造工艺中占有重要的地位，特别是汽车车身的大型覆盖件，因大多形状复杂，结构尺寸大，有的还是空间曲面，并且表面质量要求高，所以用冲压加工方法来制作这些零件是用其它加工方法所不能比拟的。载重货车的驾驶室、车前钣金件、货厢板以及轿车的各种车身覆盖件和客车的各种骨架等，几乎全都是用冲压加工方法制作的。

## 二、冲压工序分类

由于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，其冲压方法多种多样，但冲压工序按加工性质的不同，可以分为两大类型：分离工序和成形工序。分离工序是将冲压件或毛坯在冲压过程中沿一定的轮廓线相互分离，同时冲压零件的分离断面要满足一定的断面质量要求；成形工序是板料在不产生破坏的前提下使毛坯发生塑性变形，获得所需求的形状及尺寸的零件。

冲压工序可分为四个基本工序：

### (一) 冲裁

使板料实现分离的冲压工序(包括冲孔、落料、修边、剖切等)。

### (二) 弯曲

将板料沿弯曲线弯成一定的角度和形状的冲压工序。

### (三) 拉深

将平板料变成各种开口空心零件，或把空心件的形状、尺寸作进一步改变的冲压工序。

### (四) 局部成形

用各种不同性质的局部变形来改变毛坯或冲压件形状的冲压工序(包括翻边、胀形、校平和整形工序等)。

车身制造中常用的分离工序见表 1-1，成形工序见表 1-2。

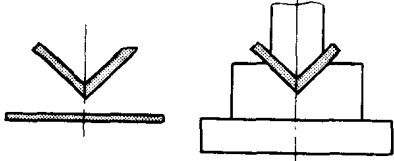
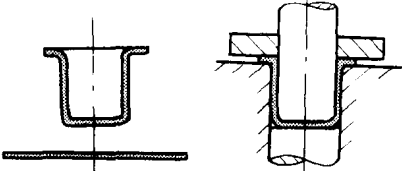
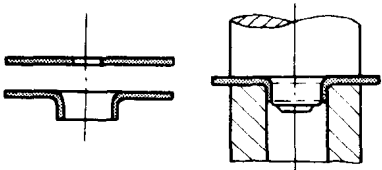
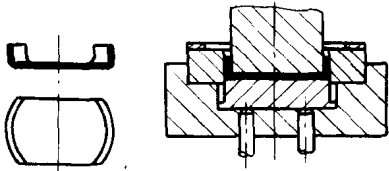
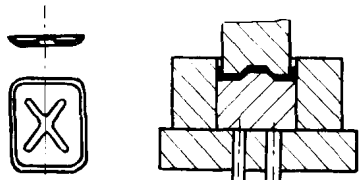
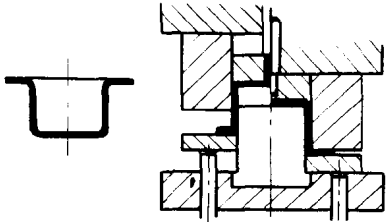
拉深、翻边、弯曲和胀形是常见的、典型的冲压成形工序(图 1-1)。复杂冲压件的成形，其板料变形区往往是几种基本成形工序的复杂组合。图 1-2 所示的框板，外缘相当于拉深，内缘相当于翻边，而腹板上兼有翻孔和胀形性质，因此在分析一个具体的冲压件时，一方面必须将不同的变形性质部分加以明确区分，利用翻边、弯曲、拉深和胀形等基本工序，作为分析零件变形特点的主要依据；另一方面，还必须注意它们之间的相互联系，不能将不同变形性质的部分，作为一个个单纯的基本成形工序孤立地看待。

冲压件的冲压成形工序虽然很多，但从板料的变形性质看，可以概括为两种基本类型：伸长类变形和压缩类变形。

表 1-1 车身制造工艺中常用的分离工序

工序	图 例	工序性质
落料		<p>用落料模沿封闭轮廓曲线冲切, 冲下部分是零件</p>
冲孔		<p>用冲孔模沿封闭轮廓曲线冲切, 冲下部分是废料</p>
剪切		<p>用剪刀或模具切断板材, 切断线不封闭</p>
切口		<p>在坯料上将板材部分切开, 切口部分发生弯曲</p>
切边		<p>将拉深或成形后的半成品边缘部分的多余材料切掉</p>
剖切		<p>将半成品切开成两个或几个工件, 常用于成双冲压</p>

表 1-2 车身制造工艺中常用的成形工序

工序	图 例	工序性质
弯曲		把板料沿直线弯成各种形状
拉深		将板料压制成为开口空心零件
内孔翻边		将板料上的孔的边缘翻成竖立边缘
外缘翻边		将工件的外缘翻成圆弧或曲线状的竖立边缘。
胀形		在板料或工件上压出筋条、花纹或文字
整形		把形状不太准确的工件校正成形

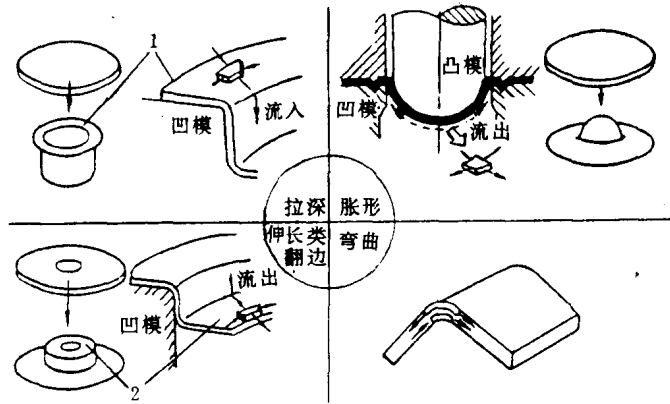


图 1-1 典型的冲压成形工序  
1. 拉深件; 2. 翻边件

当作用在板料变形区的拉应变的绝对值最大时,在这个方向上的变形一定是伸长变形,板料的成形主要靠材料的伸长变形和厚度的减薄实现。拉应力成分愈多,数值愈大,材料的伸长和减薄也愈严重,这类变形称为伸长类变形;同理,当作用在板料变形区的压应力的绝对值最大时,在这个方向上的变形一定是压缩变形,板料的成形主要是靠压缩变形和厚度增厚实现的。压应力成分愈多,数值愈大,板料的缩短与厚度的增加越严重,这类变形称为压缩变形。例如,拉深、外凸外缘翻边为压缩类变形,翻孔、胀形、内凹外缘翻边为伸长类变形。

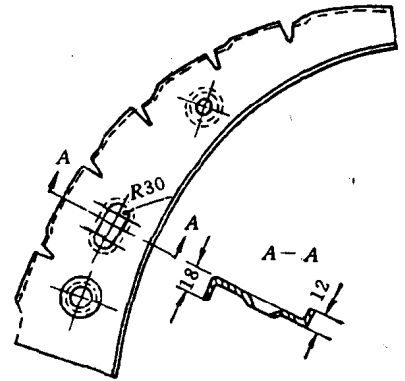


图 1-2 框板

伸长类变形的阻碍是材料在拉应力作用下失稳破裂;而压缩类变形的阻碍是材料在压应力作用下失稳起皱。

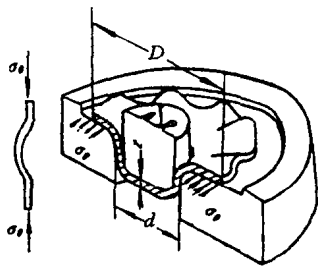


图 1-3 拉深时凸缘起皱

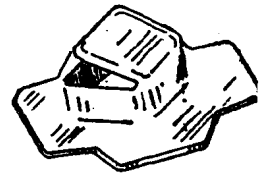
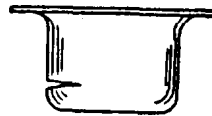


图 1-4 拉深时筒壁破裂

## § 1-2 金属塑性变形的力学规律

冲压成形时,外力通过模具或其它工具作用在板料上,使板料内部产生应力,由于外力



的作用状况、板料的形状和模具的尺寸千差万别，因而引起板料内各点的应力与应变也各不相同，因此必须研究变形物体各点的应力状态、应变状态以及产生塑性变形时各应力之间及应力应变之间的关系。

### 一、变形物体的应力应变状态

假设在变形物体任意点取一个六面单元体，该单元体上应力状态可取其互相垂直表面上的应力来表示，沿坐标方向可将这些应力分解为九个应力分量，其中包括三个正应力和六个剪应力，如图 1-5(a) 所示。由于单元体处于静力平衡状态，故单元体各轴的合力矩为零，可得出互相垂直平面上的剪应力互等， $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ， $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ， $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ，因此已知三个正应力和三个剪应力，那么该点的应力状态就可以确定了。由于坐标轴所取的方位不同，这六个应力分量的大小也不一样，可以证明，对任何一种应力状态，总存在这样一组坐标系，使得单元体各表面上只有正应力而无剪应力，如图 1-5(b) 所示。这时，三个坐标轴就称为主轴，三个坐标轴的方向就称为主方向，而三个正应力就叫做主应力，一般按其代数值大小依次为  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$ ，即  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。

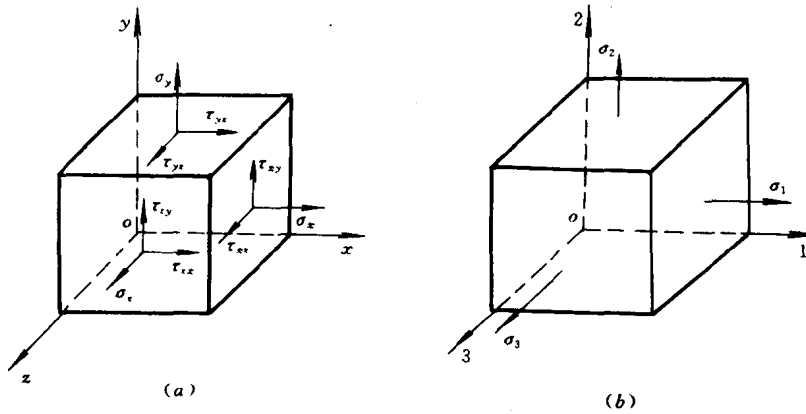


图 1-5 点的应力状态  
(a) 任意坐标系； (b) 主轴坐标系

一般情况下，单元体的三个主方向都有主应力存在，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。但板料的大多数成形工序，沿板料厚度方向的厚向应力  $\sigma_t$  与其它两个垂直方向的主应力（即径向应力  $\sigma_r$  与切向应力  $\sigma_\theta$ ）比较，相对来说往往很小，可以忽略不计，如拉深、翻孔和胀形变形，这种应力状态称平面应力状态或两向应力状态。三个主应力中有两个为零，只在一个方向有应力，称为单向应力状态。在板料的内孔边缘和外形边缘常常是自由表面，故径向应力  $\sigma_r$  为零，而板料大多数成形的厚向应力  $\sigma_t$  也为零，故此处为单向应力状态。

应力产生应变，应变也具有与应力相同的表现形式，单元体上的应变也有正应变与剪应变，也可以找到一组坐标轴，使单元体各表面上剪应力为零，这样坐标轴称应变主轴，沿应变主轴方向上的正应变称主应变，主应变也有三个，分别为  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  和  $\epsilon_3$ ，按代数值排列  $\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$ 。

实践证明，塑性变形时物体主要发生形状的改变，而体积的变化很小，可以忽略不计，即