

汽车

覆盖件冲压成形技术

周天瑞 主编

820.6



机械工业出版社
China Machine Press



汽车覆盖件冲压成形技术

主 编	周天瑞	
副主编	阙忠民	
参 编	何成宏	周亚倬
	李印生	张如华
主 审	孙惠学	

机 械 工 业 出 版 社

本书以金属塑性成形的基础理论为主线,在分析板料冲压基本工序的基础上,对汽车覆盖件冲压成形技术做了较全面的叙述。全书共分七章,前三章内容包括金属塑性成形和冲压工艺基本理论以及冲裁、弯曲、拉深、胀形、翻边等冲压基本工序的分析。第四、五、六章主要介绍汽车覆盖件的冲压成形理论、工艺方法和模具设计、制造等技术问题。第七章介绍了几个典型汽车覆盖件的冲压工艺过程和模具基本结构。附录则简单地例举了第三角投影法与第一角投影法的特点和国内外图样表达的主要区别。

本书可供锻压、汽车及相关行业的工程技术人员使用,也可作为大专院校有关专业和模具技术培训班的教材。

图书在版编目(CIP)数据

汽车覆盖件冲压成形技术/周天瑞主编. —北京:机械工业出版社, 2000. 6

ISBN 7-111-08032-7

I. 汽… II. 周… III. 汽车-车体覆盖件-冲压-成型技术 IV. U463.820.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 07258 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:张淑杰 封面设计:王晓青 高长刚

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000年6月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·12.5印张·388千字

0 001-200册

定价:22.8元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

汽车覆盖件是用冲压方法制造的薄板零件。由于汽车覆盖件尺寸大、材料薄且多为表面质量要求高的复杂空间曲面，所以汽车覆盖件除遵循一般板料的冲压成形规律外，在冲压工艺及模具技术方面又存在着许多与一般板料冲压不同的特点，因而常作为单独一类问题来研究。

汽车覆盖件的冲压成形技术是汽车行业的关键技术之一。它直接关系到汽车产品的质量、外观和生产成本，并对加快汽车产品的更新换代、缩短开发周期有重要作用。因而受到普遍的重视。

本书是以冲压成形基本理论为基础，结合现有资料和厂校挂钩，就从国外引进的模具技术进行消化吸收的体会编写而成。全书共分七章。第一章概述金属塑性成形的力学和物理基础；第二章简要叙述了板料冲压的力学特点和基本分析方法，是以下各章的理论基础；第三章介绍板料冲压的基本工序，为汽车覆盖件冲压成形工艺分析和模具设计奠定了基础；第四章主要讨论汽车覆盖件冲压成形工艺设计的基本理论；第五章研究覆盖件冲压模具设计的基本原则；第六章介绍汽车覆盖件冲压模具的制造和调整技术。第七章对从国外引进的几个典型汽车覆盖件的冲压成形工艺和模具结构进行了分析介绍。

本书主编周天瑞，副主编阙忠民，编委：何成宏、周亚倬、李印生、张如华。其中第一、二、三、四章及附录由周天瑞执笔，第五、六章由张如华执笔，第七章由阙忠民执笔。书中有关插图得到万春泉、廖学勇、张子莹等同志审改，在此表示感谢。

由于编者水平所限，书中内容虽经编委讨论修改，但缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

1999.3

6A116

目 录

第一章 金属塑性成形理论基础	1	三、盒形零件的拉深	61
第一节 金属塑性变形的力学基础	1	四、球形零件的拉深	62
一、拉伸试验曲线	1	五、拉深时的主要缺陷及防止方法	63
二、应力应变分析基础	8	六、拉深模	66
三、屈服准则	10	第五节 胀形	67
四、应力应变关系	12	一、胀形形成的特点	68
第二节 金属塑性变形的物理基础	15	二、平板毛坯的胀形	68
一、单晶体的塑性变形	15	三、圆柱形空心毛坯的胀形	69
二、位错理论简述	17	第六节 翻边	71
三、多晶体的塑性变形	21	一、圆孔翻边	71
四、影响金属塑性的主要因素	22	二、外缘翻边	73
第二章 板料冲压工艺基础	26	第四章 汽车覆盖件及其冲压成形	
第一节 板料冲压成形的力学特点和分类	26	工艺	75
一、冲压变形区的主应力图和主应变图	26	第一节 覆盖件定义及其表示方法	75
二、冲压成形的分类	27	一、覆盖件的定义	75
第二节 板料冲压成形性能与成形		二、覆盖件的表示方法	75
极限	29	三、对覆盖件的要求	76
一、板料冲压成形性能与试验方法	29	第二节 汽车覆盖件的冲压工艺设计	77
二、板料的成形极限	31	一、工艺设计基础	80
第三章 板料冲压成形基本工序	40	二、成形性讨论	81
第一节 冲压工序分类	40	三、加工工艺和工序设计的基本	
第二节 冲裁	42	原则	82
一、冲裁的变形过程	42	第三节 覆盖件拉深工艺设计	82
二、影响冲裁质量的主要因素	42	一、汽车覆盖件拉深工艺特点	82
三、冲裁模刃口尺寸	43	二、拉深方向	83
四、冲裁力与降低冲裁力的方法	45	三、工艺补充面	84
五、材料的经济利用	48	四、工艺切口(孔)	87
第三节 弯曲	48	五、压边面形状	88
一、弯曲变形过程	48	六、拉深筋(槛)	90
二、弯曲件的工艺性	48	七、后续工序的定位	95
三、弯曲件的回弹	51	第四节 修边及冲孔工艺设计	95
四、弯曲件毛坯尺寸的计算	51	一、修边方向	95
五、弯曲力的计算	52	二、修边形式	96
六、弯曲模凸凹模之间的间隙	53	三、合理的板料冲裁条件	96
七、弯曲模	54	四、修边废料的处理	97
八、提高弯曲件质量的措施	54	五、冲孔工艺设计应注意的问题	97
第四节 拉深	57	第五节 翻边工艺设计	98
一、拉深变形过程	57	一、覆盖件的翻边形式	98
二、圆筒形零件的拉深	58	二、冲压方向	99

第六节 压力机的选择	100	第四节 拉深模的制造	134
第七节 提高汽车覆盖件材料利用率的路径	102	一、拉深模的质量要求	134
第五章 汽车覆盖件冲压模具设计	103	二、拉深模的制造过程	134
第一节 模具设计的一般原则	103	三、刻模	136
第二节 斜楔机构	104	四、用研修模型研修	136
一、斜楔的基本结构	104	五、打磨抛光	136
二、斜楔机构上的作用力	104	六、装拉深筋	137
三、斜楔机构的结构尺寸	104	七、坐标孔的加工	137
四、斜楔机构中的复位机构	107	第五节 修边（冲孔）模的制造	138
第三节 拉深模设计	110	一、修边（冲孔）模的质量要求	138
一、拉深模的设计要点	110	二、修边模制造的生产技术准备	138
二、拉深模的典型结构	111	三、修边模制造要点	138
三、拉深模的结构尺寸	112	第六节 翻边模的制造	140
四、拉深模的导向	113	一、翻边模的质量要求	140
五、通气孔	115	二、翻边模的制造工艺要点	141
第四节 修边冲孔模设计	115	第七节 汽车覆盖件冲压模具的调整	141
一、修边冲孔模设计要点	115	一、调整的准备	142
二、修边模刃口结构	117	二、冲模的安装	143
三、修边时的冲孔	119	三、坐标孔的应用	144
四、废料处理与余料回收	119	四、拉深模的调整	145
五、修边冲孔模的结构	120	五、翻边模的调整	148
第五节 翻边模设计	120	六、落料模、修边（冲孔）模的调整	149
一、翻边凸模（凹模）的扩张机构	121	七、试验决定坯料尺寸	150
二、翻边凹模的交接	121	八、调整过程的其他工作及总结	150
第六节 模具的安全性设计	122	第七章 汽车覆盖件冲压成形应用实例	152
一、安全设计的原则	122	第一节 “前门框”的冲压工艺及模具	152
二、模具的安全性结构	122	一、“前门框”冲压工艺	152
三、模具的涂漆颜色标记	123	二、“前门框”各工序的冲压模具	155
第六章 覆盖件冲压模具的制造与调整	124	第二节 “前围边板”的冲压工艺及模具	162
第一节 汽车覆盖件冲压模具的制造特点	124	一、工艺分析	162
第二节 模具制造设备	124	二、各工序的模具分析	165
一、基准面加工设备	124	第三节 “中立柱外板（下）”的冲压工艺及模具	169
二、型面加工设备	125	一、工艺特点和工序安排	169
三、研配设备	125	二、各工序的模具分析	172
四、打磨工具	125	第四节 “前门内板”的冲压工艺及模具	178
五、测量设备	125	一、“前门内板”的工艺分析	178
六、调试设备	126	二、“前门内板”各工序的冲压模具	183
七、激光切割设备	126	附录	191
第三节 生产技术准备	126	一、第一角投影和第三角投影	191
一、铸件的准备	126	二、国内外常用钢铁材料牌号对照	192
二、模型和样板的制造	128	主要参考文献	194

第一章 金属塑性成形理论基础

覆盖件是由金属板料用冲压加工的方法来制取的，成形过程中发生了复杂的塑性变形。为了便于对覆盖件的冲压工艺进行分析，先简单介绍金属塑性成形的有关理论基础。

第一节 金属塑性变形的力学基础

一、拉伸试验曲线

研究金属材料变形过程中力学特性的最基本方法是进行拉伸试验。

(一) 拉伸图和条件应力—应变曲线

室温下的静力拉伸试验一般是在万能材料试验机上进行的。通过记录仪可以记录下外载荷 F 与试件绝对伸长 Δl 的关系曲线如图 1-1 所示。图的纵坐标表示载荷 F ，横坐标表示标距的伸长 Δl 。若将拉伸图的纵坐标 F 除以试样的原始截面积 A_0 ，即得到条件应力（亦称名义应力）

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad (1-1)$$

若将拉伸图的横坐标 Δl 除以试件原始标距长 l_0 ，即得到相对伸长

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-2)$$

根据式 (1-1)、(1-2) 即可由拉伸图作出条件应力—应变曲线。这是由于 A_0 与 l_0 都为定值，只要所取比例适当，则条件应力—应变曲线和原来的拉伸图完全一致，所以图 1-1 既是拉伸图，又是条件应力—应变曲线，只是坐标不同而已。

根据图 1-1 所示曲线，可以将试件从开始加载到断裂的过程分四个阶段来分析。

第一阶段为弹性变形阶段，即从曲线的 O 点到 e 点。图中的 p 点称比例极限点，是直线部分的顶点。弹性极限点 e ，已偏离了直线，但 e 、 p 这两点是非常靠近的，当材料的应力小于弹性极限（ σ_e ）时，可认为材料处于完全弹性状态，但超过 σ_e 就有塑性变形产生。

第二阶段为屈服阶段，即曲线 ec 段。金属材料拉伸试验时，从弹性变形过渡到塑性变形的性质来看，基本上可分为两类。一类如图 1-1 所示具有明显的屈服点，即它们由弹性变形向塑性变形的过渡是跳跃式进行的，因此曲线的第二阶段呈现一种齿状，称为屈服平台， σ_s 称为屈服极限，应力达到这一点就意味着大塑性变形的开始。另一类是没有明显屈服点的金属，它们由弹性变形向塑性变形的过渡是渐进的，其典型

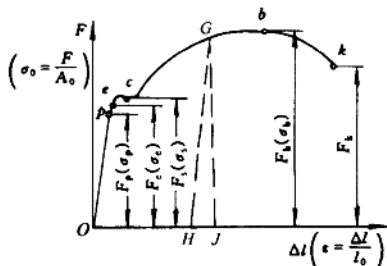


图 1-1 低碳钢的拉伸图或条件应力—应变曲线

的条件应力—应变曲线如图 1-2 所示, 曲线的第二阶段仍保持光滑连续性, 而一般将卸载后试件保留 0.2% 的残余变形时的应力称为这类材料的屈服点 ($\sigma_{0.2}$), 参见图 1-2。

第三阶段, 曲线的 cb 段。塑性变形在试件整个标距内均匀分布, 随着应变的增加, 应力也增加, 沿着曲线 cb 达到最高点 b , 这时的应力称为强度极限 σ_b , 这时载荷达到最大值 F_b 。

第四阶段出现在 b 点以后, 此时试件出现局部收缩现象——缩颈, 这时变形集中在缩颈部分, 出现了单向拉伸的塑性失稳现象。继续拉伸, 缩颈部分的断面逐渐缩小, 致使载荷减小, 曲线下降, 直到拉断点 k 为止。

由此可见, 在试件拉伸的全过程中, 变形沿试件标距长度的分布是不均匀的, 在缩颈部位 Δl 最大, 而随着离缩颈(断裂)点渐远慢慢趋向均匀伸长, 这种不均匀分布的情况如图 1-3 所示。

除了以相对伸长 ϵ 来表示变形外, 还可以用试件相对断面收缩率 $\psi_r = (A_0 - A) / A_0$ 来表示应变, 同样因 A_0 为定值, $\sigma_0 - \psi_r$ 曲线的形式与 $F - \Delta l$ 曲线是一致的。

在拉伸过程中, 除了试件轴向伸长以外, 还伴随着试件横断面的收缩, 因此 $\sigma_0 = F/A_0$ 并不能反映试件在各变形瞬间的真实应力, 同样相对伸长 $\epsilon = \Delta l / l_0$ 亦没有考虑 l_0 的变化。所以, 以上曲线为条件应力—应变曲线 (或名义应力—应变曲线)。通常可用条件应力—应变曲线得到的屈服极限、强度极限、最大伸长率和最大断面收缩率等数值来近似地判断材料的塑性变形性能。

(二) 拉伸时的真实应力—应变曲线

条件应力—应变曲线不能反映真实的应力与应变之间的关系。为了分析板料冲压成形等塑性加工问题, 提高求解和模拟的准确性, 必须采用一种能够反映真实应力与实际应变关系的曲线。

真实应力是以各加载瞬间的载荷 F 与该瞬间试件的横断面积 A 之比来表示的, 即

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1-3)$$

用真实应力表示的应力—应变曲线, 随表示应变的三种不同方式, 也有三种形式。即真实应力和相对伸长组成的曲线、真实应力和相对断面收缩率组成的曲线以及真实应力和真实应变 (对数应变) 组成的曲线。

由式 (1-2) 可知, 相对伸长

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (1-4)$$

式中 l_0 ——试件原始标距长度 (mm);

l_1 ——拉伸后标距的长度 (mm)。

而正如前述, 相对断面收缩率

$$\psi_r = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (1-5)$$

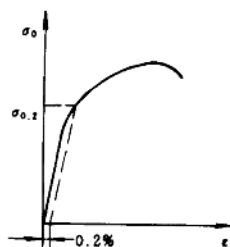


图 1-2 没有明显屈服点的塑性材料的条件应力—应变曲线

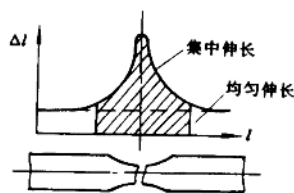


图 1-3 试件的绝对伸长量沿试件长度的分布

式中 A_0 ——试件原始横断面面积 (mm^2);

A_1 ——拉伸后试件的横断面面积 (mm^2)。

真实应变 (对数应变) ϵ 定义为

$$d\epsilon = \frac{dl}{l} \quad (1-6)$$

式中 dl ——瞬时长度上的长度改变量 (mm);

l ——试件的瞬时长度 (mm)。

当试件从 l_0 拉伸至 l_1 时, 总的真实应变

$$\epsilon = \int_{l_0}^{l_1} d\epsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (1-7)$$

真实应变与相对应变之间有下列换算关系, 即

$$\epsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right) = \ln(1 + \epsilon) \quad (1-8)$$

将式 (1-8) 右边展开可得

$$\epsilon = \epsilon - \frac{\epsilon^2}{2} + \frac{\epsilon^3}{3} - \dots$$

由此可知, 真实应变总是小于相对应变。这是因为相对应变 (相对伸长) 没有考虑实际拉伸过程中基准长度不断变化的情况, 而认为基长 l_0 是固定的, 这就不能正确反映变形过程中的实际情况, 例如将一个标距长度为 100mm 的试件, 在试验机上一次连续拉伸至 130mm, 这样 $l_0 = 100\text{mm}$, $l_1 = 130\text{mm}$ 。代入式 (1-4) 计算其相对伸长 $\epsilon = (130 - 100) / 100 = 0.3$ 。如果是采取两次拉伸, 第一次先拉伸至 115mm, 第二次再从 115mm 拉伸至 130mm, 我们分别计算这两次拉伸的相对伸长, 第一次拉伸时, 试件原始长度为 100mm, 拉伸后试件长度为 115mm, 由式 (1-4) 算得其 $\epsilon_1 = 0.15$; 而第二次拉伸时试件的原始长度是 115mm, 拉伸后试件长度为 130mm, 此时按式 (1-4) 计算所得的相对伸长 $\epsilon_2 = (130 - 115) / 115 = 0.13$ 。这样两次拉伸的总相对伸长 $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 = 0.28$, 它与一次连续拉伸至 130mm 时相对伸长不等, 它们的变形结果都是拉伸至 130mm, 为什么计算结果会不同呢? 这就是因为相对伸长 (应变) 没有考虑原始基准长度变化的原因所致。而真实应变 (对数应变) 是按试件的瞬时长度和瞬时长度上的长度改变量来考虑的, 就克服了以上问题, 具有可加性, 即当连续分阶段变形时, 总的应变就是各阶段应变之和。例如试样长度由 l_0 拉至 l_1 再拉至 l_2 , 则真实应变为

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

只有在小变形时, 例如 $\epsilon < 0.1$ 时可以近似地认为 $\epsilon \approx \epsilon$, 因为这时两者的差别小于 5%。

在出现缩颈前, 试件处于均匀拉伸变形状态, 由塑性变形时变形体体积不变条件, 可以得出三种应变表示方法之间的数值换算关系。

由式 (1-4) 有

$$\epsilon = \frac{l}{l_0} - 1$$

故

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \epsilon \quad (1-9)$$

由式 (1-5) 并考虑式 (1-9) 得

$$\psi_r = \frac{A_0 - A}{A_0} = 1 - \frac{A}{A_0} = 1 - \frac{l_0}{l} = 1 - \frac{1}{1 + \epsilon} = \frac{\epsilon}{1 + \epsilon} \quad (1-10)$$

或

$$\epsilon = \frac{\psi_r}{1 - \psi_r} \quad (1-11)$$

由式 (1-8) 可得

$$\epsilon = e^{\epsilon} - 1 \quad (1-12)$$

下面讨论如何绘制真实应力—应变曲线。首先根据真实应力的定义, 推导出在均匀拉伸阶段真实应力 σ 与条件应力 σ_0 的关系:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0}(1 + \epsilon) = \sigma_0(1 + \epsilon) \quad (1-13)$$

在失稳点 b , 有 $\sigma_b = \sigma_0(1 + \epsilon_b)$, 所以在 b 点之前, 可根据条件应力—应变曲线逐点作出真实应力—应变曲线, 如图 1-4 所示。在 b 点以后由于出现缩颈, 不再是均匀变形, 上述换算公式不再成立。为了求得 b 点以后的真实应变, 必须记录下每一瞬间细颈处的断面积 A , 才能求得真实应力, 然后再根据关系式 $\epsilon = \ln A_0/A$ 求出该瞬间的真实应变。这样就可逐点画出曲线的 $b'k'$ 段。但是, 测量断面的瞬时值较困难, 所以一般根据 b' 、 k' 两点处的数据近似作出该两点间的曲线。 k' 点可根据试件断裂后的断口面积和试件断裂时的载荷来确定。但是缩颈部位已不再是单向拉伸应力状态, 而是处于不均匀的三向拉应力状态, 如图 1-5 所示, 此时产生了“形状硬化”, 使应力升高。为此, 必须加以修正。

齐别尔 (Siebel) 等人提出用下式对曲线的 $b'k'$ 段进行修正, 即

$$\sigma_k = \frac{\sigma'_k}{1 + \frac{d}{8\rho}}$$

式中 σ_k ——去除形状硬化后的真实应力 (MPa);

σ'_k ——包含形状硬化在内的真实应力 (MPa);

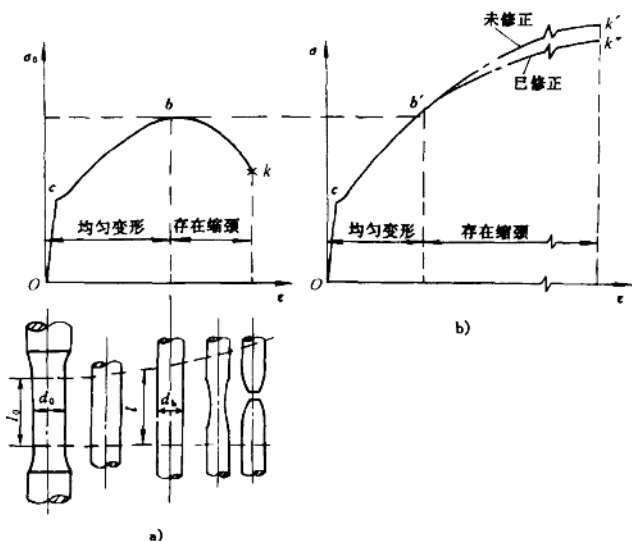


图 1-4 条件应力—应变曲线与真实应力—应变曲线

a) 条件应力—应变曲线 b) 真实应力—应变曲线

d ——缩颈处直径 (mm);

ρ ——缩颈处试件外形的曲率半径 (mm)。

曲线 $b'k'$ 修正后成为 $b'k''$, 于是 $Ocb'k''$ 即为所求的真实应力—应变曲线。

从图 1-4 可以看出, 和条件应力—应变曲线不同, 真实应力—应变曲线在塑性失稳点 b' 处没有极大值, b' 点后曲线仍是上升的。这说明材料抗塑性变形的能力随应变的增加而增加, 也就是不断地产生硬化, 所以真实应力—应变曲线也称为硬化曲线。

真实应力—应变曲线除了可用拉伸试验测定, 也可用压缩试验测定。根据定义, 用真实应变 (对数应变) 表示的拉伸真实应力—应变曲线和压缩真实应力—应变曲线在理论上是完全重合的, 只是应力有拉、压之分, 两者可以互相替代。但实验方法各有特点, 因我们以后要讨论的覆盖件所用金属板料的有关性能主要是通过拉伸试验来测定, 所以, 关于压缩试验曲线这里不再叙述, 许多金属塑性成形书籍中都有详尽的论述。

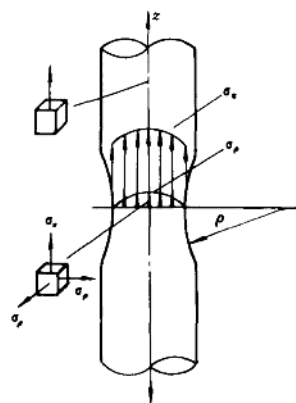


图 1-5 缩颈处的应力分布

(三) 拉伸真实应力—应变曲线在塑性失稳点的特性

如果拉伸试验在塑性失稳之前某一瞬间的轴向载荷为 F , 试样的横断面面积为 A , 真实应力为 σ , 则有

$$F = \sigma A$$

因为

$$\epsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A}$$

可得

$$A = \frac{A_0}{e^\epsilon}$$

故有

$$F = \sigma \frac{A_0}{e^\epsilon} \quad (1-14)$$

在塑性失稳点处, F 有极大值, 所以 $dF = 0$

即

$$dF = A_0(e^{-\epsilon} d\sigma - \sigma e^{-\epsilon} d\epsilon) = 0$$

化简后得

$$d\sigma - \sigma d\epsilon = 0$$

因为在塑性失稳点, 故有 $\sigma = \sigma_b$, $\epsilon = \epsilon_b$

代入上式得

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon} \right)_b = \sigma_b \quad (1-15)$$

式 (1-15) 表示在 σ — ϵ 曲线失稳点所作切线的斜率为 σ_b , 该切线与坐标的交点到失稳点横坐标的距离 $\epsilon = 1$ (见图 1-6)。这就是真实应力—应变曲线在塑性失稳点上所作切线的特性。

(四) 拉伸试验的卸载规律与反载软化现象

我们来看看拉伸试验时, 加载到一定程度后卸载, 应力和应变之间的变化规律如何?

拉伸变形在弹性范围内, 应力与应变成线性关系, 在弹性变形范围内卸载, 应力、应变仍然沿同一

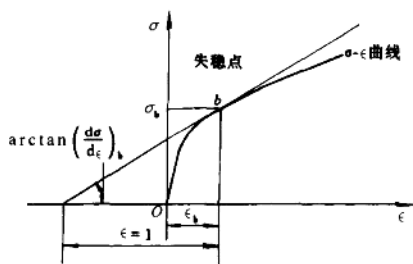


图 1-6 σ — ϵ 曲线在失稳点的特性

直线回到原点。此时，变形完全消失，试件完全恢复原状，没有残留的永久变形。以下我们再来观察一下试件在屈服点以后卸载时的情况，见图 1-1。如果将试件加载到图中 G 点然后卸载，这时，已有伸长量 OJ 的试件将沿着与 O_p 线平行的 GH 线弹性回复一段距离 HJ ，剩下永久变形量 OH 。这就说明加载时的总伸长量包括弹性伸长和塑性伸长两部分。弹性回复的概念在有关板料的成形过程中必须考虑。

卸载后如将此试样重新加载，几乎沿着 HC 线回升，在未达到 G 点以前，虽然应力已超过了 σ_s ，但试件不发生屈服。只有当应力达到 G 点以后，塑性变形才又开始，应力应变关系仍循着 Gbk 的路线发展下去。 G 点处的应力就是试件重新加载时的屈服应力。这正体现了材料的变形硬化现象。

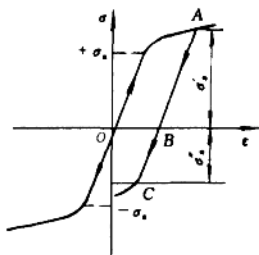


图 1-7 包申格效应

如果卸载后反向加载，将会出现所谓的反向加载软化现象——包申格效应。试验研究表明，金属材料单向拉伸试验的初始屈服应力力和单向压缩试验的初始屈服应力绝对值相等，如图 1-7 中均为 σ_s 。但当试件拉伸超过屈服点到达 A 点后，卸载到零 (B 点)，然后反方向加载 (即压缩)，则材料的屈服应力较拉伸时有所降低，即反向加载时屈服点 C 的应力 σ'_s 不仅比 A 点的 σ_s 小，而且还小于初始的屈服应力 σ_s 。这种随加载路线和方向不同而屈服应力降低的现象称包申格效应。反向加载屈服应力的降低量，与材料性质和正向加载的变形程度有关，考虑这一效应，会给处理塑性理论问题带来很大困难，所以一般塑性理论中不考虑这一效应。不过对重要的承力零件，可通过成形之后的缓慢退火来消除这种反载软化现象，并且包申格效应还会使材料产生各向异性，在交变加载的过程中应予以注意。

(五) 真实应力—应变曲线的简化形式

试验所得的真实应力—应变曲线一般都不是简单的函数关系。为了解塑性成形问题的实际应用，常采用一些简化模型，并表达为某一函数形式。可将它归纳为 6 种类型，如图 1-8 所示。

1. 幂次式硬化曲线 (见图 1-8a) 很多金属在室温下有变形硬化现象，其真实应力—应变曲线可以用以下指数方程式精确地表示

$$\sigma = B\epsilon^n \quad (1-16)$$

式中 B ——与材料有关的常数；

n ——硬化指数或应变刚指数。

B 和 n 的值可以这样来确定，当塑性失稳点 b 也满足方程式 (1-16) 则有

$$\sigma_b = B\epsilon_b^n \quad (1-17)$$

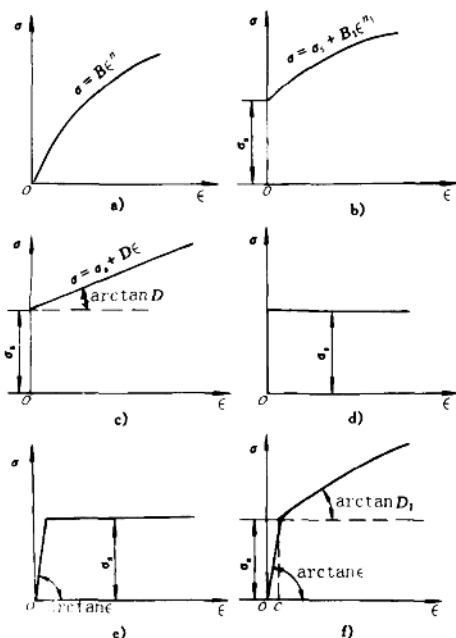


图 1-8 真实应力应变简化形式

- a) 幂次式 b) 刚塑性硬化曲线
c) 刚塑性硬化直线 d) 理想刚塑性
e) 理想弹性性 f) 弹性性线性硬化

对式 (1-16) 求导, 并根据塑性失稳点上所作切线的性质, 式 (1-15) 可有

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon} \right)_b = nB \epsilon_b^{n-1} = \sigma_b \quad (1-18)$$

联立求解式 (1-17) 和 (1-18) 可得

$$n = \epsilon_b \quad (1-19)$$

$$B = \frac{\sigma_b}{\epsilon_b^n} \quad (1-20)$$

由式 (1-19) 可以看到, 硬化指数 n 就是失稳点的真实应变 ϵ_b , 它是表明材料加工硬化特性的一个重要参数, n 值愈大就表明材料应变强化的效应愈强。一些钢材在 20℃ 时, B 和 n 的值如表 1-1 所示。

表 1-1 一些钢材在 20℃ 时的 B 和 n 值

钢材牌号	应变速率 / (s ⁻¹)	B /MPa	n	钢材牌号	应变速率 / (s ⁻¹)	B /MPa	n
08	慢	656.6	0.24	60	1.5	1087.2	.12
15	1.6	784.0	0.10	15Cr	慢	793.7	0.18
20	慢	744.8	0.20	40Cr	慢	861.9	0.15
35	慢	901.2	0.17	5CrNiMo	慢	1172.7	0.128
45	1.5	950.0	0.14	1Cr18Ni9	慢	1450.0	0.6

2. 刚塑性硬化曲线 (见图 1-8b) 对于有初始屈服应力 σ_s 的冷变形金属材料, 可较好地表达为

$$\sigma = \sigma_s + B_1 \epsilon^{n_1} \quad (1-21)$$

B_1 、 n_1 同样是表示材料性质的两个数值, 但其数值与式 (1-16) 中的有关值无关。由图可以看出, 这里略去了弹性变形阶段, 因为与塑性变形相比, 弹性变形很小, 可以忽略。即认为由刚体直接过渡到塑性变形阶段, 所以该形式作为刚塑性硬化曲线。

3. 刚塑性硬化直线 (见图 1-8c) 有时为简化起见, 可将图 1-8b 中的曲线视为直线, 这就是线性硬化形式, 称为刚塑性硬化直线, 其表达式为

$$\sigma = \sigma_s + D \epsilon \quad (1-22)$$

它通常可用纵坐标轴上的 σ_s 点和失稳点的连线来表示。

4. 没有应变硬化的简化形式 (见图 1-8d、e) 对于几乎不产生应变硬化的材料, 即 $n = 0$, 可认为真实应力—应变曲线是一水平线, 如图 1-8d 所示, 它表明材料在塑性屈服前不发生弹性变形, 而屈服后在塑性变形阶段没有应变硬化发生, 即

$$\sigma = \sigma_s \quad (1-23)$$

这就是理想刚塑性模型, 一般在室温下, 只有纯度极高的铅可采用这种模型, 在高温低速变形时钢铁材料也可采用这种刚塑性模型。

如果要考虑弹性变形, 则为理想弹塑性模型, 如图 1-8e 所示。

5. 弹塑性线性硬化形式 (见图 1-8f) 如果线性硬化材料的弹性变形不可忽略, 则属于这种形式, 如室温下的小塑性变形。对于这两段直线可分别表达为:

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } \epsilon \leq \epsilon_e \quad \sigma &= E\epsilon \\ \text{当 } \epsilon \geq \epsilon_e \quad \sigma &= \sigma_s + D_1 (\epsilon - \epsilon_e) \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

二、应力应变分析基础

(一) 应力及主应力图

在外力作用下，物体内各质点之间产生的相互作用力叫做内力，而单位面积上的内力就称为应力。

根据应力状态理论可知，一点的应力状态可以用该点处的三个互相垂直的微分坐标面上的 9 个应力分量来完整的描述，这 9 个应力分量是三个正应力分量 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 和 6 个切应力分量 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yz} 、 τ_{zy} 、 τ_{zx} 及 τ_{xz} （见图 1-9）。根据切应力互等定理有： $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ 、 $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ 、 $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ，所以实际上只需 6 个应力分量来描述一点的应力状态。显然这些应力分量会随着选取的坐标系方向的变化而变化，而这时对于同一点处的应力状态并没有变化，所以表明该点应力状态的各应力分量的变化必须遵循一定的规律。这些规律正好表明点的应力状态是一个二阶张量，叫做应力张量。可用符号 σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) 表示。也可写成如下形式

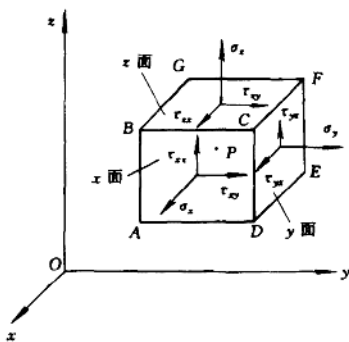


图 1-9 单元体坐标微分面上的应力分量

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1-25)$$

由于切应力互等，这实际是一个对称张量。

根据应力状态理论知道，随着坐标系方向的变化，总可以找到三个互相垂直的方向上只作用着正应力而无切应力，这三个方向称为主方向，其上的正应力就称为主应力，以 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 来表示。这样，在主轴系统中应力张量的表达式就更为简单，即

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (1-26)$$

同时应力张量还存在着三个不变量。

应力张量的第一不变量 J_1 ——线性不变量

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (1-27)$$

应力张量的第二不变量 J_2 ——平方不变量

$$\begin{aligned} J_2 = & -(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 = \\ & -(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1) \end{aligned} \quad (1-28)$$

应力张量的第三不变量 J_3 ——立方不变量

$$\begin{aligned} J_3 = & \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - (\sigma_x \tau_{yz}^2 + \sigma_y \tau_{zx}^2 + \sigma_z \tau_{xy}^2) = \\ & \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \end{aligned} \quad (1-29)$$

这些不变量表明了应力状态与坐标系的选择无关。这就是同一点的各应力分量随坐标系改变而变化时必须遵循的规律。可以用这三个不变量来判断是几个张量反映不同的应力状态，还是同一应力状态仅是坐标系选择不同而已。

由以上分析可知，一点的应力状态可用三个主应力分量 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 来表示，通常这三个主应力的大小次序按代数数值取为 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。

为了简明地、定性描述某点的应力状态，在板料成形等塑性加工工艺分析中，常采用主应力图。主应力图就是在变形体内某点处截取一个微小单元体，在其三个互相垂直的面上用箭头定性表示主应力的有无及方向（拉应力箭头向外、压应力箭头指向内）的示意图。主应力图只表示出主应力的个数和方向，并不表明应力的数值大小。可能的主应力图共有 9 种（见图 1-10）。其中单向应力状态两种，即一个为单向拉应力，另一个为单向压应力；平面应力状态有三种，即一为两向拉应力，一为两向压应力，还有一个为一向拉应力一向压应力；三向应力状态有四种，即一个为三向拉应力，一个为两向拉应力一向压应力，一个为一向拉应力两向压应力，另一个则为三向压应力。

在塑性成形中应根据加工方法和所考虑点的位置来确定主应力，同时在变形过程中，有时主应力图也会随着变形过程的进行而发生变化。

(二) 应变及主应变图

一点的应变状态也可表示成二阶对称张量，它有很多类似于应力张量的性质，通过变形体的某一质点，总存在着三个互相垂直的应变主方向，且在主方向上的线元没有角度的偏转，只有线应变，这些线应变就称为主应变，一般用 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 来表示，通常也按代数数值的大小次序取为 $\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$ 。塑性变形时由于体积不变，所以 $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$ ，因而应变张量就是应变偏张量，而应变球张量等于零。

为了简明地说明变形区的变形情况，常常采用主应变图来定性表示。所谓主应变图就是在微分单元体上用箭头表示三个主应变的有无和尺寸变化趋势的简图（变化趋势指伸长时箭头外指，缩短时箭头内指）。

它不表示变形量的数值大小，仅定性地说明确变形趋势。由于受塑性变形时体积不变的限止，主应变图仅可能有三种（如图 1-11 所示）。

图 1-11a 所示为一向压缩、两向伸长的主应变图，称压缩类应变主应变图。

图 1-11b 所示为一向伸长、一向压缩的主应变图，称平面应变主应变图。

图 1-11c 所示为两向压缩、一向伸长的主应变图，称伸长类应变主应变图。

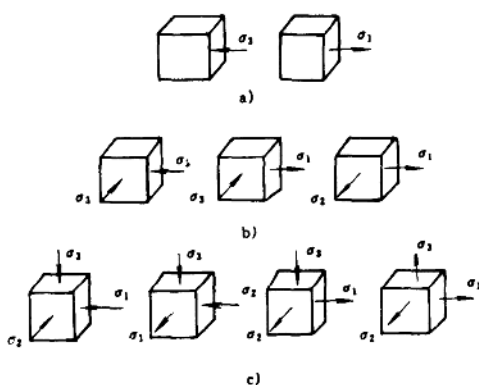


图 1-10 主应力图

a) 单向应力状态 b) 平面应力状态
c) 三向应力状态

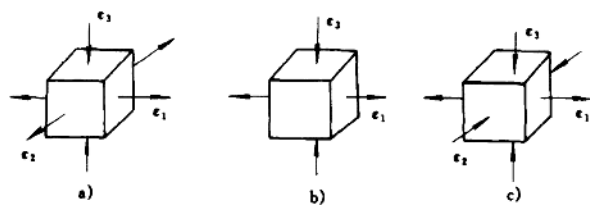


图 1-11 主应变图

应变的类型取决于应力情况,一般可以用中间主应力 σ_2 来判断应变的类型,当

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2 &> \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时属压缩类应变} \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时属平面应变} \\ \sigma_2 &< \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时属伸长类应变} \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

主应力图和主应变图统称为变形力学简图,在塑性加工中常用来定性分析应力和变形的概况。

(三) 等效应力和等效应变

本节第一个问题就已经阐明,我们常常是通过单向拉伸试验来研究应力应变之间的关系和材料的许多力学特性。但汽车覆盖件冲压成形等许多塑性加工工序都是在复杂应力状态下发生变形来实现的,为了使复杂应力状态与单向拉伸这种简单的应力状态等效,引入了等效应力(应力强度) σ_i 和等效应变(应变强度) ϵ_i 的概念。

在各向同性材料的塑性理论中,等效应力和等效应变分别定义为:

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \end{aligned} \quad (1-31)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + 6(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \end{aligned} \quad (1-32)$$

为什么定义成这种形式,而等效应力和等效应变根号前的系数又不同呢?这就是为了与单向拉伸等效所至,如单向拉伸时的拉应力为 σ , 拉应变为 ϵ , 则 $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$; $\epsilon_1 = \epsilon$, $\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\epsilon/2$, 将它们分别代入式 (1-31)、(1-32) 就可得到 $\sigma_i = \sigma$, $\epsilon_i = \epsilon$ 。等效应力 σ_i 和等效应变 ϵ_i 是三个互相垂直方向上的应力和应变作用效果的集中体现,对于稳定的加载过程,它们之间存在着统一的单值关系,即等效应力与等效应变一一对应,通常这种关系表示为幂次式函数,即

$$\sigma_i = B\epsilon_i^n \quad (1-33)$$

这与单向拉伸时真实应力—应变曲线的幂次式硬化曲线形式一致,这说明在稳定加载条件下,单向拉伸试验结果可推广应用于各种不同的变形方式。

三、屈服准则

(一) 各向同性理想塑性材料的屈服准则

1. 屈雷斯加 (H·Tresca) 屈服准则 屈雷斯加屈服准则亦称为最大剪应力不变条件。该准则认为当材料(质点)中的最大剪应力达到某一定值时,材料就屈服。或者说,材料处于塑性状态时,其最大剪应力为一不变的定值,该定值只取决于材料在变形条件下的性质,而与应力状态无关。

如果已知主应力的大小顺序是 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, 则最大剪应力 $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, 所以屈雷斯加屈服准则可表示为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (1-34)$$

当三个主应力的大小顺序不能确定时, 则屈雷斯加准则的普遍表达式为

$$\left. \begin{aligned} |\sigma_1 - \sigma_2| &\leq \sigma_s \\ |\sigma_2 - \sigma_3| &\leq \sigma_s \\ |\sigma_3 - \sigma_1| &\leq \sigma_s \end{aligned} \right\} \quad (1-35)$$

2. 米塞斯 (R·Mises) 屈服准则 米塞斯屈服准则亦称为弹性形变能不变条件。该准则认为在任意应力状态下, 只要该点应力状态的等效应力达到某一与应力状态无关的临界值时材料就会屈服。它常用的数学表达式为

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s \quad (1-36)$$

米塞斯屈服准则不仅仅考虑最大剪应力对材料屈服的影响, 而且综合考虑了三个主剪应力的影响, 即它也可表述为三个主剪应力的均方根值达到某一临界值时材料就屈服, 开始塑性变形。亦就是说米塞斯屈服准则考虑了中间主应力对材料屈服的影响, 在多数情况下有更的准确性。

(二) 各向同性硬化屈服准则

对于有硬化的材料, 可以认为其初始屈服仍然服从上述两个各向同性理想塑性材料的屈服准则。屈服后材料发生硬化, 所以其屈服准则也将发生变化, 而且这种变化是复杂的, 至今为止所建立的各种假说都还是近似的, 尚不能得到普遍的试验证明。目前比较常用的一种假说是“各向同性硬化假说”, 其主要特点是: (1) 材料在硬化后仍然保持各向同性。(2) 硬化后屈服轨迹的中心位置和形状都不变, 只是随变形的进行而均匀扩大。

可以把以上屈服准则统一写成 $f(\sigma_{ij}) = C$ 的形式, 则屈服轨迹 (或表面) 的形状和中心位置由函数 $f(\sigma_{ij})$ 决定, 而常数 C 则决定轨迹的大小, 即表明屈服应力的值。因此, 各向同性硬化屈服准则可以用同样的函数 $f(\sigma_{ij})$ 表达, 只是等号右边的常数 C 改成随变形而变的变量就行了。假设这一变量用 Y 表示, 于是各向同性硬化屈服准则就表达成

$$\sigma_1 - \sigma_3 = Y \quad (1-37)$$

$$\text{或} \quad \sigma_i = Y \quad (1-38)$$

关于 Y 的变化规律, 一般有两种假设。第一种叫单一曲线假设, 该假设认为 Y 只是等效应变 ϵ_i 的函数, 这一函数只取决于材料的性质而与应力状态无关, 因此可用单向拉伸等比较简单的试验来确定。这种假设在简单加载和某些非简单加载条件下得到验证。第二种假设是“能量条件”, 它认为材料的硬化程度只取决于变形过程中的塑性变形功, 而与应力状态及加载路线无关, 即 Y 是塑性功的函数。该假设在更广泛的情况下得到实验验证, 具有更一般的性质, 虽然比较复杂, 但使用计算机辅助计算, 也就不困难了。

(三) 各向异性材料的屈服准则

因覆盖件都是用薄板材料制造, 金属薄板轧制生产时, 由于晶粒择优取向结构和晶粒沿同一方向拉长形成的纤维组织都导致明显的各向异性性质, 所以在分析薄板成形时, 应该考虑各向异性的影响。

希尔 (R·Hill) 把米塞斯屈服准则看成是各向异性材料在各向异性程度趋近于零时的特例而提出了各向异性材料的屈服准则。当假设只考虑每一点上具有三个互相垂直的对称平面