
板材与型材弯曲 回弹控制原理 与方法

陈毓勋 著

13.25

国防工业出版社

板 材 与 型 材

弯曲回弹控制原理与方法

陈毓勋 著

國防工業出版社

前 言

本书的主要目的是研究板料压弯、滚弯、闸压与型材滚弯、绕弯、压弯、拉弯等飞机钣金零件工艺方法中控制回弹量的基本原理与具有一定准确度的工程计算方法,以促进飞机钣金零件与冲压件制造的机械化。

全书共分九章。书中对上述各种工艺方法进行必要的理论分析与试验研究。各章的主要内容简述如下:

第一章——实际应力曲线。正确地选择与合理地简化实际应力曲线,对于简化工程计算且保证工程计算结果具有必要的准确度,从而使理论公式应用于生产实践提供可能性起着重要的作用。本章从板料压弯、滚弯、闸压与型材滚弯、绕弯、压弯、拉弯的工程计算需要出发,介绍三种近似实际应力曲线,并从生产实践的实际情况出发,对于飞机钣金零件中常用的国产硬铝(LY12)与结构合金钢(30CrMnSiA)的板料与挤压型材,在各种供应状态下进行拉伸实验。在实验实际应力曲线的基础上研究各种近似实际应力曲线的特征与表达式,并为上述工艺方法的工程计算提供必要的机械性能数据。

第二章——塑性弯曲回弹原理。首先分析了弹性弯曲、弹塑性弯曲以及立体纯塑性弯曲等三个变形阶段的应力与应变状态,从而说明由线性应力状态所推导而得的回弹半径与回弹角表达式在定性分析与定量分析方面的应用范围。在应力与应变分析的基础上介绍目前常见的回弹半径与回弹角表达式。最后通过相对弯曲半径较小的塑性弯曲回弹实验研究,说明影响回弹半径与回弹角的主要因素。

第三章——板料压弯成形回弹量的控制。首先建立相对弯曲半径较大的板料压弯零件回弹半径的一般表达式。通过对该类大型钣金零件进行控制回弹量的试验证实,计算值与试验值相近。因此,采用初步估算与试验相结合的试模方法可以显著减少模具返修与试模次数。以下各章进一步证实,本章所建立的回弹半径表达式的适用范围较广,它尚可引用于板料滚弯、闸压与型材滚弯、绕弯、压弯等工艺过程。此外,可以进一步根据各种工艺方法所成形零件的特点将此一般表达式简化为各种简易计算式。本章还从模具结构、模具材料、几何参数、工艺方法以及改进弯曲零件构造工艺性等方面,介绍各类弯曲件回弹量的各种方法,并阐明各种方法减小回弹量的原理。

第四章——板料滚弯成形回弹量的控制。首先从力学上探索板料滚弯回弹的规律性,而后从数学上建立滚弯圆筒形零件时上、下滚轴中心距的一般性计算式。利用此工程计算结果控制圆筒形板料滚弯零件的回弹量。在此基础上,进一步研究并建立滚弯圆锥形零件时上、下滚轴中心距的一般计算式,并阐明了保证弯曲线与直母线重合以消除扭曲变形的分段-重叠滚弯方法。利用上述工程计算方法与滚弯方法控制圆锥形零件的回弹量。最后介绍切向变曲率蒙皮零件在板料靠模滚弯机上进行靠模滚弯的方法。其中阐明了靠模两种设计方法的基本原理与主要设计依据,并提出国产硬铝(LY12CZ)在板料靠模滚弯机上通过大量工艺试验所获得的横梁下降值-零件曲率半径回弹曲线族。试验研究

与生产实践证明,利用上述各种方法控制板料滚弯的回弹量可以显著减少滚弯的次数,在成批生产中可以显著减少手工校形工作。

第五章——板料闸压成形回弹量的控制。本章引用第四章所建立的板料滚弯回弹半径简易且具有一定准确度的计算公式于板料闸压过程。当采用钢制凸模-橡皮通用凹模进行闸压机翼与舵面的前缘蒙皮时,可以采用此计算公式初步估算闸压凸模两端的半径值(考虑回弹量的),加以两端增加补偿段,可以较快地确定闸压凸模的尺寸与零件在闸压模下的闸压位置。这种方法可以在试模时显著减少钢制闸压凸模的返修与试模次数,并提高零件闸压质量。本章提供了国产硬铝(LY12)在淬火与退火状态下的闸压回弹曲线族。最后研究一种机械化程度较高的前缘蒙皮闸压方法——三次闸压法。

第六章——型材滚弯成形回弹量的控制。首先对型材滚弯过程进行受力分析。在此基础上建立具有一定准确度的型材弯曲力计算式与控制型材滚弯回弹量的简易计算式。此外,对当前型材滚弯过程所存在的主要问题之一——斜弯曲-扭转变形进行力学分析,并提供消除斜弯曲-扭转变形的措施。与此同时,分析了型材滚弯过程所出现的一般性问题,并提出处理问题的方法。试验研究与生产实践证实,利用上述回弹量简易计算式控制型材滚弯回弹量是行之有效的方法。最后详细地介绍了一种机械化程度较高的板弯型材成形方法——靠模滚弯。

第七章——型材绕弯成形回弹量的控制。本章引用第六章所建立的型材滚弯回弹半径简易计算式于型材绕弯过程。采用此计算式初步估算绕弯模的半径值(考虑回弹量的),可以显著减少绕弯模的返修与试模次数。

第八章——型材压弯成形回弹量的控制。本章引用第六章所建立的型材滚弯回弹半径简易计算式于型材压弯过程。采用此计算式初步估算压弯模半径值(考虑回弹量的),可以显著减少压弯模返修与试模次数。

第九章——型材拉弯成形回弹量的控制。本章首先归纳并分析了近二十多年来国内、外有关拉弯方面在理论研究与试验研究方面的概况,并从中整理出先后出现的十种拉弯方法的加载过程及有参考价值的结论。本章研究轴向拉力采用工程计算与拉弯模修正回弹量相结合的一次拉弯方法控制回弹量,使型材回弹后具有手工校形所要求的合理校形余量。在此项研究工作中,以生产中常见的变曲率收边、放边以及横向拉弯的角材与丁字形型材作为主要的对象。着重研究型材在新淬火状态下,先拉伸后弯曲再拉伸过程中定量控制回弹量的一般性方法。本章尚研究了在拉弯模不修正回弹量情况下采用二次拉弯方法的轴向拉力工程计算方法。

本书承梁炳文、程宝堃、李寿萱三位教授的指正以及李金荣、张顺富、王根宝、沈耀华、万明洁、吴元江等同志的热情帮助,在此表示感谢。

陈毓勋于南京航空学院

1988.1.

目 录

符号	1
----------	---

第一章 实际应力曲线

§ 1-1 概述	3
§ 1-2 实验实际应力曲线	8
§ 1-3 折线型近似实际应力曲线	11
§ 1-4 线性近似实际应力曲线	13
§ 1-5 幂函数型近似实际应力曲线	13
§ 1-6 实际应力曲线的选择	16

第二章 塑性弯曲回弹原理

§ 2-1 典型弯曲零件分类	17
§ 2-2 塑性弯曲变形过程的应力应变分析	17
§ 2-3 回弹半径与回弹角的一般表达式	23
§ 2-4 试验研究	27

第三章 板料压弯成形回弹量的控制

§ 3-1 典型压弯零件分类	30
§ 3-2 控制大曲率半径压弯零件回弹半径的方法	30
§ 3-3 控制小曲率半径压弯零件回弹半径的方法	32
§ 3-4 聚氨酯橡胶模控制压弯零件回弹量的方法	41
§ 3-5 试验研究	55

第四章 板料滚弯成形回弹量的控制

§ 4-1 典型板料滚弯零件分类	58
§ 4-2 板料滚弯的基本原理 (控制圆筒形零件回弹量的方法)	59
§ 4-3 控制圆锥形零件回弹量的方法	68
§ 4-4 控制切向变曲率零件回弹量的方法之一——手工操纵滚弯	73
§ 4-5 控制切向变曲率零件回弹量的方法之二——靠模滚弯	75
§ 4-6 控制纵向变厚度-切向变曲率零件回弹量的方法	94
§ 4-7 试验研究	95

第五章 板料闸压成形回弹量的控制

§ 5-1 典型板料闸压零件分类	100
------------------------	-----

§ 5-2	控制等曲率前缘蒙皮回弹量的方法	101
§ 5-3	控制变曲率前缘蒙皮回弹量的方法之一——滚弯-闸压法	102
§ 5-4	控制变曲率前缘蒙皮回弹量的方法之二——三次闸压法	104
§ 5-5	试验研究	110

第六章 型材滚弯成形回弹量的控制

§ 6-1	典型型材滚弯零件分类	116
§ 6-2	型材滚弯的基本原理 (控制等曲率型材零件回弹量的方法)	117
§ 6-3	型材滚弯过程的一般性问题	124
§ 6-4	板弯型材靠模滚弯	129
§ 6-5	试验研究	138

第七章 型材绕弯成形回弹量的控制

§ 7-1	典型型材绕弯零件	146
§ 7-2	控制板弯型材绕弯回弹量的方法	147
§ 7-3	控制挤压型材绕弯回弹量的方法	148

第八章 型材压弯成形回弹量的控制

§ 8-1	典型型材压弯零件	150
§ 8-2	控制型材压弯回弹量的方法	150
§ 8-3	试验研究	152

第九章 型材拉弯成形回弹量的控制

§ 9-1	典型型材拉弯零件分类	155
§ 9-2	目前研究概况的分析	156
§ 9-3	各种拉弯方法的加载过程	160
§ 9-4	型材拉弯的基本原理 (控制等曲率型材零件回弹量的方法)	162
§ 9-5	控制变曲率型材拉弯回弹量的方法之一——一次拉弯法	167
§ 9-6	控制变曲率型材拉弯回弹量的方法之二——二次拉弯法	171
§ 9-7	试验研究	175

附录	型材拉弯载荷系数 A_x 与 B_y 数据表	190
主要参考文献		201

符 号

σ —— 实际应力	p_y —— 轴向预拉力的表压力(kgf/cm ²)
$\sigma_{0.2}$ —— 屈服极限	p_z —— 轴向总拉力的表压力(kgf/cm ²)
σ_s —— 屈服极限	P_1 —— 上导轮对型材的压弯力
σ_b —— 强度极限	P_2 —— 下导轮对型材的夹紧力
σ_j —— 细颈应力	P_y —— 轴向预拉力
σ_k —— 破坏应力	P_z —— 轴向总拉力
$\sigma_{5\%}$ 与 $\sigma_{9\%}$ —— 实际应变 $\delta = 5\%$ 与 9% 所对应的应力	M —— 弯矩
σ_w —— 板料或型材外层材料的应力	R —— 零件的曲率半径
σ_n —— 板料或型材内层材料的应力	R_{wq} —— 板料或型材外层材料回弹前的曲率半径
δ —— 实际应变	R_{wq} —— 板料或型材内层材料回弹前的曲率半径
ε —— 假象应变	R_{wh} —— 板料或型材外层材料回弹后的曲率半径
$\delta_{0.2}$ —— $\sigma_{0.2}$ 所对应的应变	R_{nh} —— 板料或型材内层材料回弹后的曲率半径
δ_b —— σ_b 所对应的应变	R_m —— 模具的曲率半径
δ_j —— σ_j 所对应的应变	ΔR —— 回弹半径
δ_k —— σ_k 所对应的应变	ρ —— 应力中性层的曲率半径
$\delta_{5\%}$ 与 $\delta_{9\%}$ —— 5% 与 9% 的应变	α —— 弯角
δ_w —— 板料或型材外层材料的应变	α_q —— 回弹前的弯角
δ_n —— 板料或型材内层材料的应变	α_h —— 回弹后的弯角
E —— 弹性模量	$\Delta\alpha$ —— 回弹角
D —— 应变刚模量	t —— 板料厚度
$D_{5\%}^{\#}$ 与 $D_{9\%}^{\#}$ —— $\delta = 5\%$ 为特定点的折线型与线性近似实际应力曲线的应变刚模量	b —— 板料宽度
$D_{9\%}^{\#}$ 与 $D_{5\%}^{\#}$ —— $\delta = 9\%$ 为特定点的折线型与线性近似实际应力曲线的应变刚模量	H —— 挤压型材的剖面高度
p —— 上滚轴对板料的压弯力	h —— 板弯型材的剖面高度
p' —— 下滚轴对板料的作用力	B —— 型材的剖面宽度
	S_1 —— 型材的腹板厚度
	S —— 型材的缘板厚度
	Y_1 —— 型材的形心至弯曲零件外

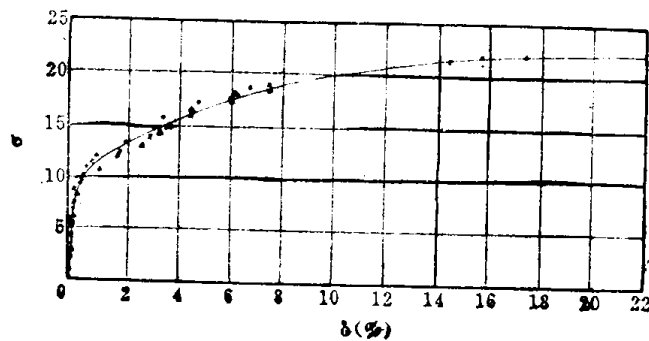
层材料的距离		大半径	
Y_2	——型材的形心至弯曲零件内层材料的距离	r_1	——上导轮最小半径
F	——板料或型材的横剖面面积;	r_2	——弯曲滚轮最小半径
W	——断面系数	R_m	——绕弯模或压弯模半径
A_x 与 B_y	——拉弯载荷系数	$2a$	——两根下滚轴水平中心距
Y	——上滚轴与下滚轴的垂直中心距或上导轮与弯曲滚轮的垂直中心距	$2x$	——两个弯曲滚轮水平中心距
H	——横梁(上滚轴)下降值或弯曲滚轮上升值	Y_a 与 Y_b	——零件两端处上、下滚轴的垂直中心距
R_1	——上滚轴半径或上导轮最大半径	Y_A 与 Y_B	——滚轴两端的垂直中心距
R_2	——下滚轴半径或弯曲滚轮最	Y_0	——上导轮与弯曲滚轮的起始垂直中心距
		A	——拉弯机拉伸作动筒的工作面积(厘米 ²)
		μ	——摩擦系数

第一章 实际应力曲线

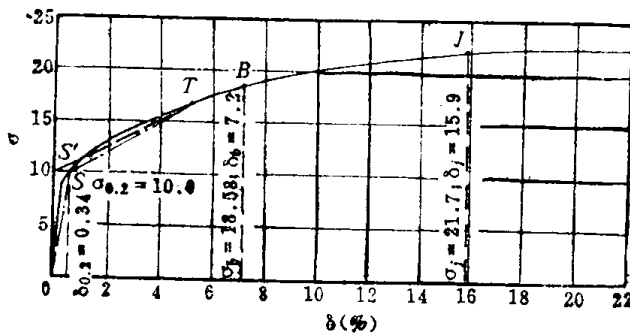
§ 1-1 概 述

实际应力曲线的正确选择与合理简化，对于简化工程计算与保证工程计算结果具有必要的准确度起着重要的作用。对于板料压弯、板料滚弯、型材滚弯以及型材拉弯等工艺方法，在理论分析与工程计算方面所采用的实际应力曲线可归纳为下列四种类型：

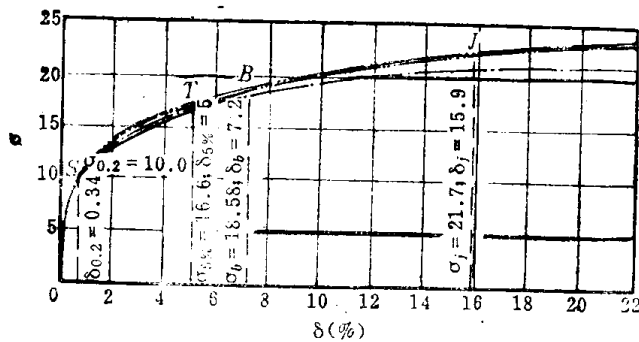
1. 实验实际应力曲线；2. 折线型近似实际应力曲线；3. 线性近似实际应力曲线；4. 幂函数型近似实际应力曲线。



(a)



(b)



(c)

图1-1 硬铝 (LY12) 板料在退火状态下的实际应力曲线

(a) 实验实际应力曲线；(b) 折线型与线性近似实际应力曲线；(c) 幂函数型近似实际应力曲线。

实验实际应力曲线是由板料与挤压型材进行拉伸实验而得。其它三种近似实际应力曲线是实验实际应力曲线的简化形式。

图 1-1~图 1-6 所示是按国家标准 (GB-228-63) 对国产硬铝 (LY12) 的板料与挤压型材以及结构合金钢 (30CrMnSiA) 的板料, 在各种供应状态 (退火、不完全退火、淬火及新淬火) 下进行拉伸实验所获得的上述四种类型的实际应力曲线。

以下分别讨论各种实际应力曲线的特征、表达式及与工程计算有关的机械性能数据。

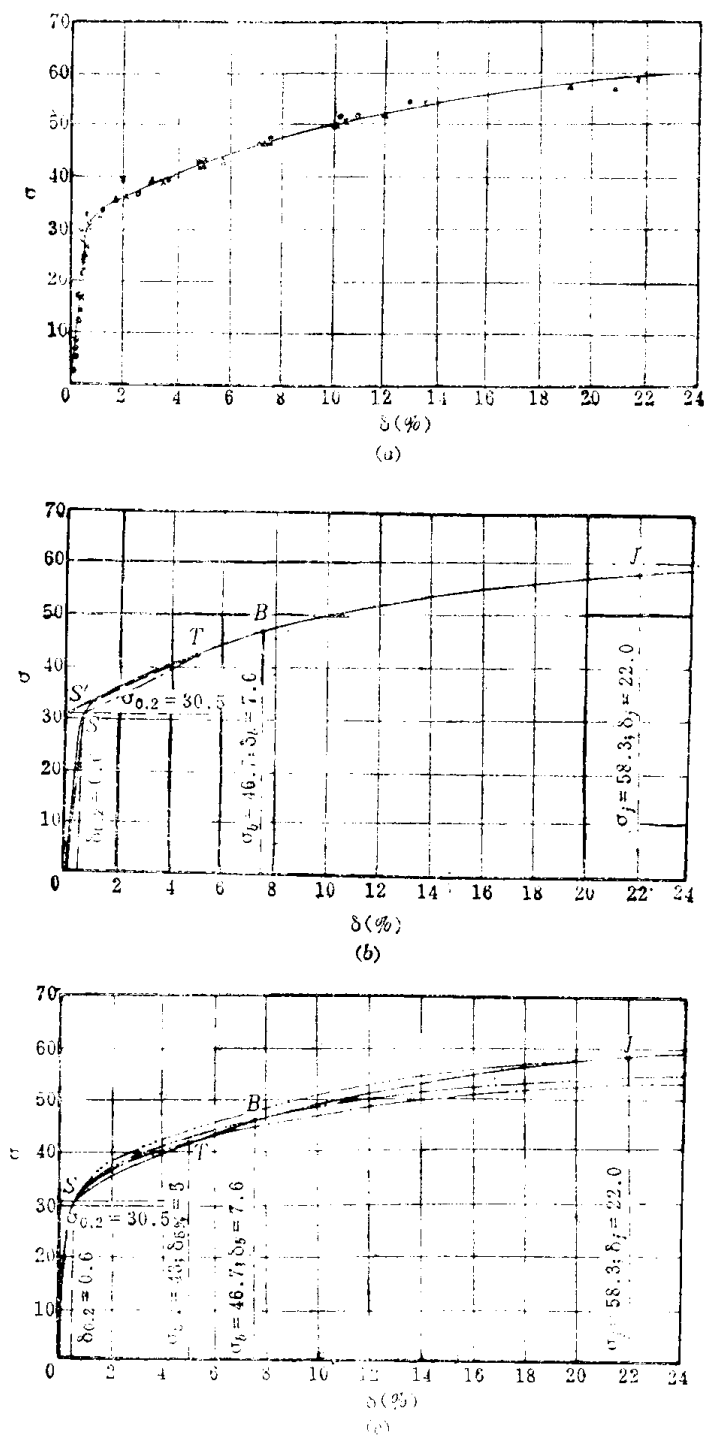


图1-2 硬铝 (LY12) 板料在淬火状态下的实际应力曲线

(a) 实验实际应力曲线; (b) 折线型与线性近似实际应力曲线; (c) 幂函数型近似实际应力曲线。

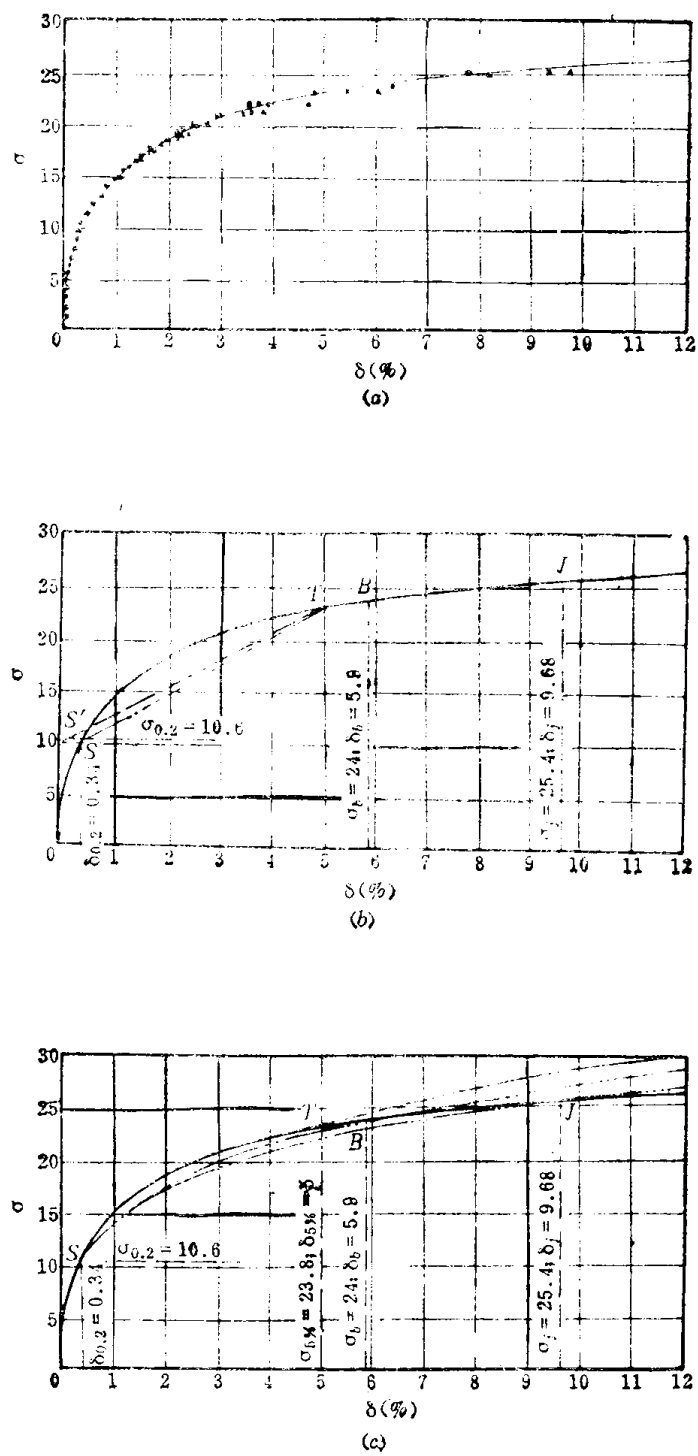


图1-3 硬铝 (LY12) 挤压型材在退火状态下的实际应力曲线
(a) 实验实际应力曲线; (b) 折线型与线性近似实际应力曲线; (c) 幂函数型近似实际应力曲线。

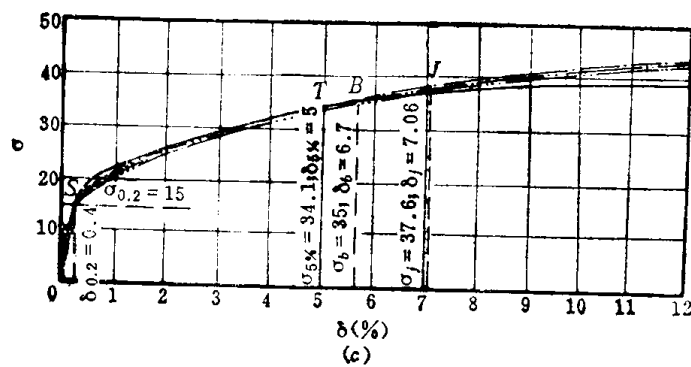
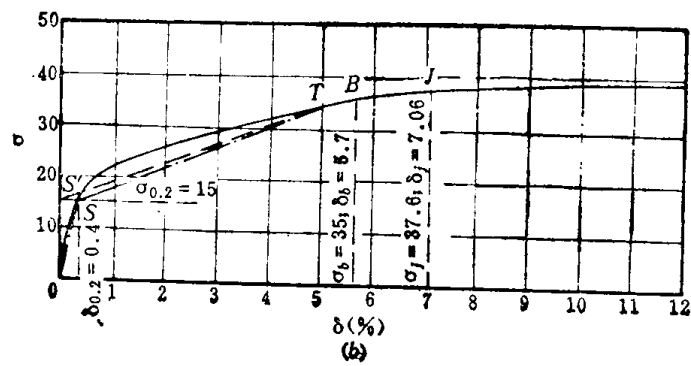
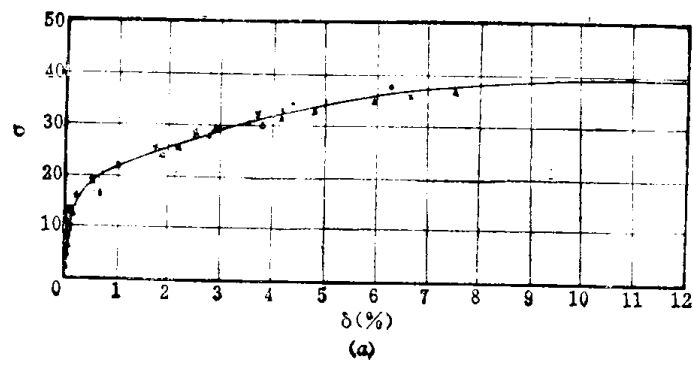


图1-4 硬铝 (LY12) 挤压型材在不完全退火状态下的实际应力曲线
 (a) 实验实际应力曲线; (b) 折线型与线性近似实际应力曲线; (c) 幂函数型近似实际应力曲线。

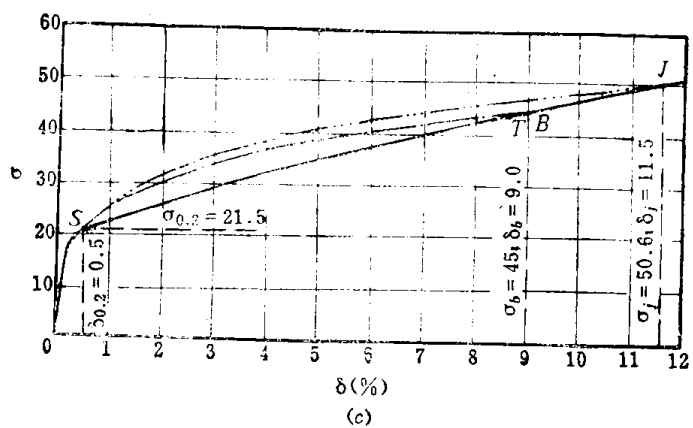
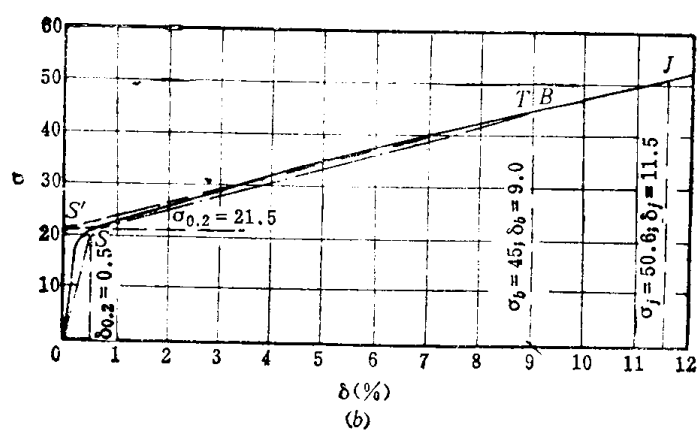
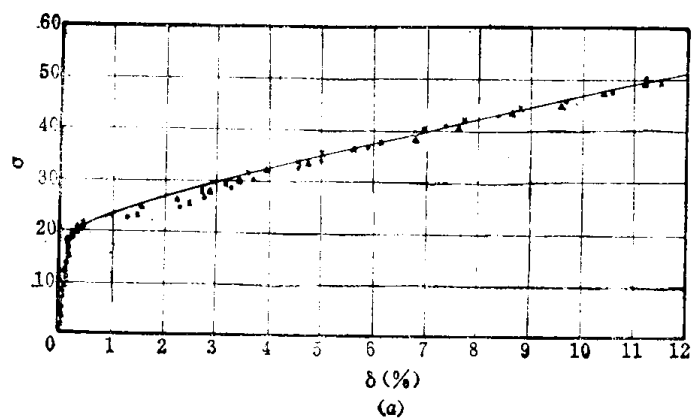


图1-5 硬铝 (LY12) 挤压型材在新淬火状态下的实际应力曲线
 (a) 实验实际应力曲线; (b) 折线型与线性近似实际应力曲线; (c) 幂函数型近似实际应力曲线。

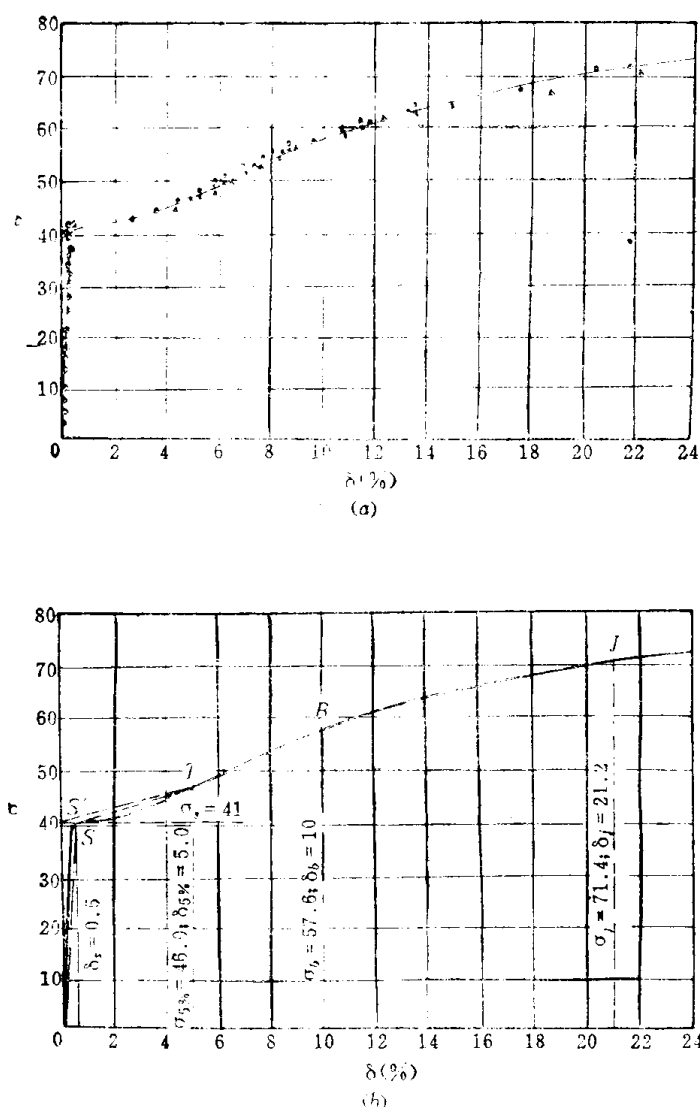


图1-6 结构合金钢 (30CrMnSiA) 板料在退火状态下的实际应力曲线
(a) 实验实际应力曲线; (b) 折线型与线性近似实际应力曲线。

§ 1-2 实验实际应力曲线

一般的铝合金实验实际应力曲线均趋近于光滑曲线, 没有屈服平台出现。硬铝 (LY12) 板料在退火与淬火状态下以及硬铝挤压型材在退火与不完全退火状态下进行拉伸实验所获得的实验实际应力曲线具有这一特征, 如图 1-1 至图 1-4 中所有 (a) 图所示。

硬铝 (LY12) 挤压型材在新淬火状态下进行拉伸实验所获得的实验实际应力曲线在材料屈服之后, 实际应力与实际应变趋近于线性关系, 但仍无屈服平台出现, 如图 1-5 (a) 所示。

常用的结构合金钢 (30CrMnSiA) 板料在退火状态下进行拉伸实验所获得的实验实际应力曲线具有明显的屈服平台, 如图 1-6 (a) 所示。

一般铝合金的实际应力曲线可以近似地分为三个阶段。第 I 阶段可近似地视为弹性变形阶段, 载荷卸掉之后, 试件恢复原来的尺寸。此阶段在比例极限之前实际应力与实

实际应变成线性关系（图 1-7）：

$$-\frac{\sigma}{\delta} = \text{tg } \theta = E$$

(1-1)

式中 E ——弹性模量。

对于钢与合金钢，弹性模量 $E \approx 1.96 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ；对于铝合金， $E \approx 6.86 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ，约为钢的三分之一。以上两个数据对于各种同类的合金均趋于常量。由于这一变形阶段的实际应力曲线斜率（图中的 $\text{tg } \theta$ ）很大，故确定弹性模量的数据可以采用放大横坐标（ $\delta \%$ ）的方法。第Ⅱ阶段是均匀塑性变形阶段。此阶段塑性变形沿试件长度均匀分布，从材料屈服开始，直至载荷达到最大值 $P_{\max}$ （即细颈刚出现时）为止。对于一般的铝合金，材料屈服在实际应力曲线中没有屈服平台出现。在这种情况下，取相应于卸载后具有 0.2% 的残余应变所对应的应力作为屈服极限（ $\sigma_{0.2}$ ）。因此，弹性模量亦可采用下式计算

$$E = \frac{\sigma_{0.2}}{\delta_{0.2} - 0.002}$$

(1-2)

对于结构合金钢，材料屈服时在实际应力曲线中所出现的屈服平台可以从材料试验机自动记录仪的拉伸图中明显地显示出来，如图 1-8 所示。第Ⅲ阶段是局部变形阶段。此阶段塑性变形是不均匀的。当载荷达到最大值（ $P = P_{\max}$ ）之后，变形集中于细颈部分，其余均匀变形部分可以近似认为没有继续发展，最后以细颈处断裂而告终，如图 1-9 所示。对应于载荷达最大值时的实际应力为细颈应力 $\sigma_j = P_{\max}/f_j$ 。由图 1-9 中可见，细颈面积 f_j 应当在离断裂剖面约为试件宽度三倍以外的范围测得。由此可见，细颈应力是均匀变形阶段与局部变形阶段的转折点（细颈点）。

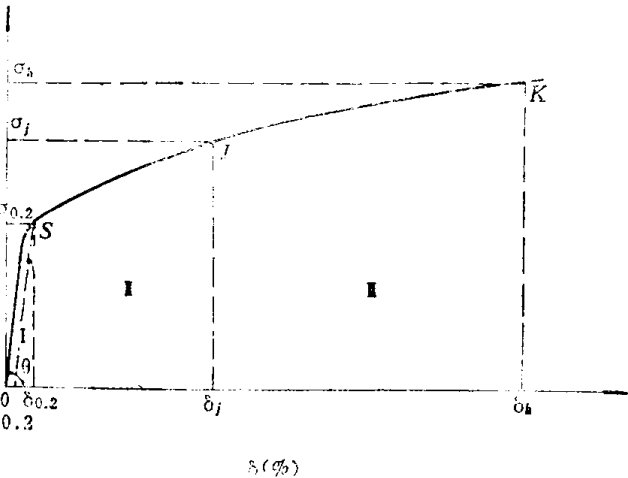


图1-7 拉伸过程的三个阶段

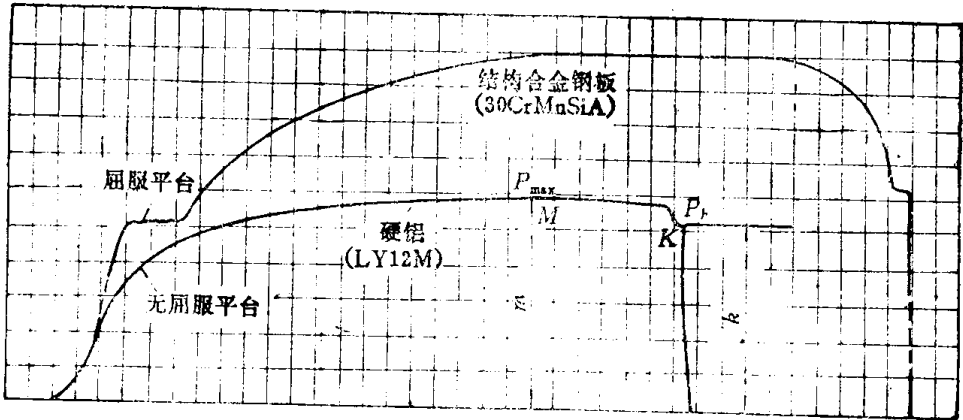


图1-8 材料试验机自动记录的拉伸图

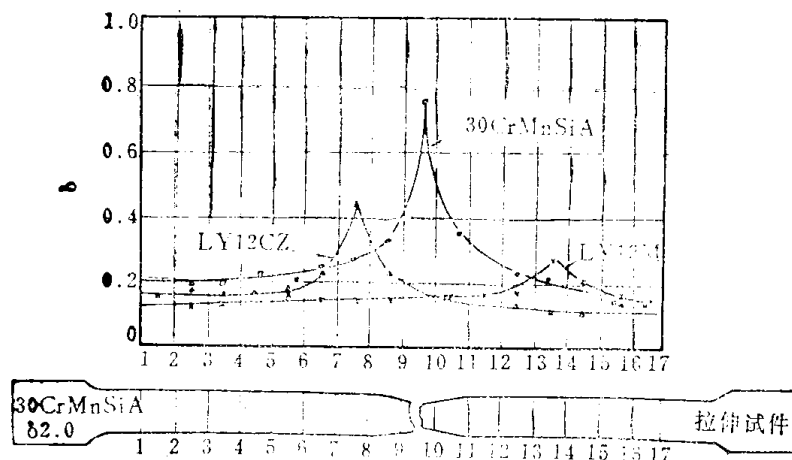


图1-9 拉伸试件均匀变形与局部变形分布曲线

对于板金零件的压力加工而言，希望材料的变形程度处于均匀塑性变形阶段，这是由于材料进入局部变形阶段后，容易由于局部变形而在该处迅速引起破裂。

破坏应力 σ_k 可由材料拉伸试验机上自动记录仪所记录的拉伸图（图 1-8）上，曲线顶点M与端点K等两点纵坐标值的比值 k/m 以及示力器上所指示的最大载荷 $P_{\max}$ 计算而得：

$$P_k = \frac{k}{m} P_{\max}$$

$$\sigma_k = \frac{P_k}{f_k} \quad (1-3)$$

式中 P_k ——破坏载荷；

f_k ——断裂剖面的面积。

上式中的断裂剖面上的面积 f_k 可将试件的断裂剖面（图 1-10 中的 f_k 所示）处涂以颜料，在量度显微镜内测得该面积的最大宽度 b_k （图 1-11）、两端的最大厚度 S_1 与

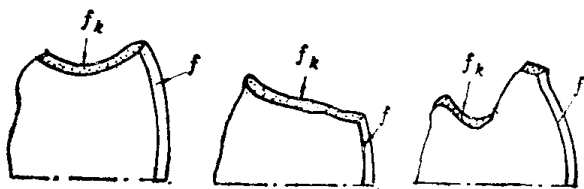


图1-10 拉伸试件的断裂剖面

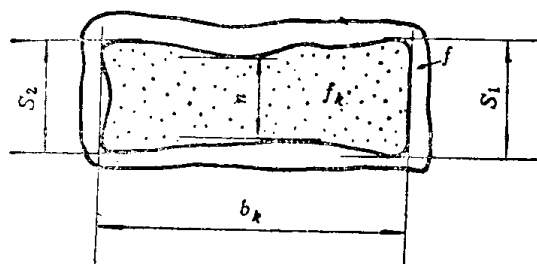


图1-11 断面剖面俯视图

S_2 以及中央部分的最小厚度 n ，而后按下式^[1]计算而得：

$$f_k = b_k \frac{S_1 + S_2 + 4n}{6} \quad (1-4)$$

必须注意的是硬铝（LY12）在新淬火状态下，为了在时效之前留有足够的时间进行零件成形后的校形工作，在新淬火后约 30min 内成形完毕最宜。因此，作为工程计算依据（例如屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 、应变刚模量 D 等等）的实验实际应力曲线的拉伸实验过程，也应当在同样的时间条件内进行完毕。为了保证所获得的实验实际应力曲线前一部

分 ($\delta \leq 0.5\%$) 较为准确, 必须测量迅速。建议采用图 1-12 量程较大的杠杆引伸仪测量这一部分的试件伸长量, 而曲线的后一部分 ($\delta > 0.5\%$) 则采用螺旋测微器测量试件的横剖面面积。实践证实, 这种量程较大的引伸仪与螺旋测微器结合使用的测量方法只需 15min 左右即可完成一根试件的整个拉伸实验过程。此外, 这种引伸仪还保证了测量数据必要的准确度。

设试件的原始测量标距为 l_0 , 支臂的杠杆比为 b/a 。原始标距 l_0 在任一瞬间的伸长量反映在百分表上的读数 A , 故得绝对伸长 Δl 为:

$$\Delta l = \frac{A}{100 \frac{b}{a}}$$

实际应变 δ 为:

$$\delta = \ln \left(1 + \frac{A}{100 \frac{b}{a} l_0} \right)$$

为了简化实验数据的处理工作, 在小变形阶段 ($\delta \leq 0.5\%$) 内可用单位伸长 ε 近似代替实际应变 δ , 故

$$\delta \sim \varepsilon = \frac{A}{100 \frac{b}{a} l_0}$$

所引起的误差约在 0.25% 的范围内, 故可保证必要的准确度。

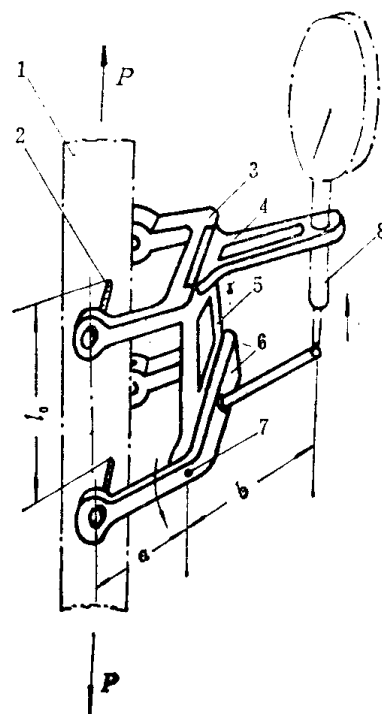


图1-12 杠杆引伸仪

1—拉伸试件; 2—标距螺钉; 3—固定支臂;
4—百分表支臂; 5—支架; 6—活动支臂;
7—转轴; 8—百分表。

§ 1-3 折线型近似实际应力曲线

折线型近似实际应力曲线由实验实际应力曲线简化而得。是由实验实际应力曲线的坐标原点 O 、对应于屈服极限 ($\sigma_{0.2}$) 的点 S 以及对应于某一特定的实际应变 (或强度极限 σ_b) 的特定点 T 等三点所联成的折线, 如图 1-1 至 1-6 中所有 (b) 图的点划线所示。

特定点 T 的确定应满足下列两个条件: 一方面能使折线型近似实际应力曲线趋近于实验实际应力曲线以提高工程计算的准确度; 另一方面保证零件成形的质量。对于板料的压弯、滚弯、闸压与型材的滚弯、绕弯、压弯以及退火状态的型材拉弯等工艺方法的工程计算中, 特定点 T 取在实际应变为 5% 所对应的位置; 而对于新淬火状态下的型材拉弯进行工程计算时, 特定点 T 取在实际应变为 9% 所对应的位置是符合上述条件的。

在塑性弯曲的研究工作中, 也有将特定点 T 取在细颈应变 (δ_f) 或强度极限 (σ_b) 所对应的位置, 但这种取法所获得的近似实际应力曲线与实验实际应力曲线相差较大。

折线型近似实际应力曲线的前段直线部分可以近似地视为弹性变形区, 后段直线部分为塑性变形区。后者的斜率称为应变刚模量 (D)。应变刚模量象征着金属在压力加工过程中的冷作硬化程度。应变刚模量愈大, 说明该金属在压力加工过程中的冷作硬化现