

航空技工院校教材



Feiji Banjin Gongyixue

飞机钣金工艺学

王海宇 主 编

西北工业大学出版社

【内容提要】 本书主要包括飞机钣金工艺基本概念和特点,金属变形基本理论,模线样板,飞机钣金工艺各种成形方法,飞机钣金零件的协调、工艺规程编制与模具设计的基本知识等。

本书可作为航空技工院校教材,也可供从事钣金加工的工人、技术人员以及大、中专和技工院校的钣金加工专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞机钣金工艺学/王海宇主编. —西安:西北工业大学出版社,2011.2
ISBN 978-7-5612-3009-1

I. ①飞… II. ①王… III. ①飞机—钣金工—工艺 IV. ①V261.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 018435 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:20.625

字 数:501 千字

版 次:2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

定 价:43.00 元

前 言

编者多年来一直在航空技工院校从事飞机钣金工艺学课程的教学工作。根据现今飞机钣金制造技术的发展和技工院校学生对知识技能的实际需求结合教学实践我们体会到,编写一本适合于技工院校航空类专业教学的《飞机钣金工艺学》教材是十分必要的。本书是基于这个思想并汲取了国内外一些教材、文献资料的优点编写而成的。

本书主要包括:绪论部分介绍了飞机钣金工艺的基本概念、特点和飞机钣金零件的材料、分类、加工路线的基本环节、变形特点等,让读者初步了解和认识飞机钣金工艺技术的基本知识;第1章介绍了金属变形基本理论,即金属变形机理、应力-应变曲线、应力状态图和应变状态图、影响金属塑性变形的主要因素;第2章在介绍模线样板基本概念、分类及用途的基础上,对样板的标记符号进行了详细分析;第3章~第11章全面阐述了钣金工艺的各种成形方法;第12章简单介绍了飞机钣金零件的协调、工艺规程编制与模具设计的基本知识。

在编写本书的过程中,编者遵从技工院校学生的认知规律,坚持够用、实用的原则,力求使内容简明易懂。同时,为了增强内容的前瞻性,体现飞机钣金制造技术的最新发展成果,本书涉及了中航工业西飞公司的一些新技术、新工艺和新设备。

本书由王海宇任主编,汉锦丽任副主编,曹峰、白颖、李世峰参加编写。全书由汉锦丽统稿。

西飞技术学院教务处对本书的编写进行了精心组织筹划和大量的协调工作;中航工业西飞国际钣金总厂技术副厂长李善良(主审)仔细阅读了原稿,并提出了许多具体的修改意见。参加审稿的人员还包括:中航工业西飞国际钣金总厂厂长王平新、中航工业西飞国际钣金总厂24分厂厂长宣娟娟、西飞技术学院教务处主任司智渊。并张琦同志承担了本书部分内容的文字录入工作,编者在此一并表示衷心的感谢。

在编写本书过程中,编者参考了部分国内外文献资料和高等院校的有关教材,在此谨对原作者深表感谢。

由于编者水平有限,书中不妥和疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教。

编 者

2010年8月

目 录

绪 论	1
思考题	5
第 1 章 金属变形基本理论	6
1.1 金属变形机理	6
1.2 应力-应变曲线	9
1.3 应力状态图和应变状态图	13
1.4 影响金属塑性变形的因素	16
思考题	19
第 2 章 模线样板	20
2.1 概述	20
2.2 样板的分类、用途及工艺孔	23
2.3 样板的标记符号	29
思考题	49
第 3 章 钣金分离工艺	50
3.1 剪切	50
3.2 冲裁	61
3.3 其他分离工艺	70
3.4 排样与搭边	79
思考题	83
第 4 章 手工成形	85
4.1 手工划线	85
4.2 手工弯曲	86
4.3 放边	98
4.4 收边	103
4.5 拔缘	110
4.6 拱曲	116
4.7 卷边	121

4.8 咬缝	123
4.9 校正	126
思考题	134
第5章 弯曲	135
5.1 压弯	135
5.2 滚弯	149
5.3 拉弯	159
5.4 管子弯曲	166
思考题	177
第6章 拉深成形	178
6.1 拉深成形的基本原理及变形过程分析	178
6.2 拉深工艺	186
6.3 拉深模	194
6.4 特殊拉深方法与变薄拉深方法	198
思考题	201
第7章 橡皮成形	202
7.1 橡皮成形的基本原理及成形过程分析	202
7.2 橡皮成形设备与模具	204
7.3 橡皮成形工艺	209
思考题	217
第8章 拉形成形	218
8.1 拉形成形的应用与基本原理	218
8.2 拉形设备与拉形模	220
8.3 拉形工艺	225
思考题	234
第9章 旋压成形	235
9.1 旋压成形的基本原理	235
9.2 旋压工具、模具与旋压床	236
9.3 普通旋压	241
9.4 变薄旋压	244
9.5 旋压成型的主要工艺参数	246
思考题	249

第 10 章 落压成形	250
10.1 概述	250
10.2 落压设备与落压模	252
10.3 落压工艺	256
思考题	264
第 11 章 其他钣金成形工艺方法	265
11.1 喷丸成形	265
11.2 加热成形	269
11.3 蠕变成形和应力松弛成(校)形	275
11.4 冷冲挤和胀形	277
11.5 高能成形	282
11.6 超塑性成形	289
11.7 板料的柔性成形技术	293
思考题	303
第 12 章 飞机钣金零件的协调、工艺规程编制与模具设计的基本知识	304
12.1 飞机钣金零件协调的基本知识	304
12.2 钣金零件工艺规程编制的基本知识	307
12.3 钣金零件模具设计的基本知识	312
思考题	320
参考文献	321

绪 论

钣金工艺就是把板材、型材、管材等毛料,利用材料的塑性,主要用冷压的方法成形各种零件,另外还包括下料和校修。

飞机钣金制造技术是航空航天制造工程的一个重要组成部分,是实现飞机结构特性的重要制造技术之一。现代飞机的壳体主要是钣金铆接结构,统计资料表明,钣金零件约占飞机零件数量的 50%,钣金工艺装备占全机制造工艺装备的 65%,其制造工作量占全机工作量的 20%。鉴于飞机的结构特点和独特的生产方式决定了飞机钣金制造技术不同于一般机械制造技术。

一、飞机钣金工艺的特点

(1)钣金零件构成飞机机体和气动外形。钣金零件构成飞机机体的框架和气动外形,零件尺寸大小不一,形状复杂,选材各异,产量不等,品种繁多。目前,国产小型飞机钣金件大约有 6 000 项,大型飞机钣金件大约有 20 000 项。钣金零件形状复杂,质量控制严格,有一定的使用寿命要求,对成形后的零件有明确的力学性能和物理性能的要求,与其他行业的钣金零件相比技术要求高,加工难度大。

(2)钣金零件的制造是以专用设备为主,配合手工技艺和经验操作来实现的。钣金专用设备是飞机钣金工艺技术发展的标志和工艺技术预研成果的载体,对零件成形质量有着决定性作用。这些设备的研制周期长,技术含量高,投资巨大,社会需求量小,设备利用率不高,设备的更新较慢,这就要求技术工人必须具有良好的手工技艺。

(3)飞机钣金零件使用的工艺装备数量很大。由于钣金零件加工过程变形大,只有使用足够数量的工艺装备才能满足设计技术要求,因此生产准备工作繁重。

(4)广泛采用样板、模胎和检验型板等刚性量具进行检验工作。

二、飞机钣金零件的分类

1. 按飞机钣金零件结构特征分类

飞机钣金零件有蒙皮、隔框、壁板、翼肋、导管等。

2. 按飞机钣金零件材料品种分类

飞机钣金零件基本上可分为型材零件、板材零件和管材零件三大类,每类材料零件又可进一步细分(见图 0.1)。

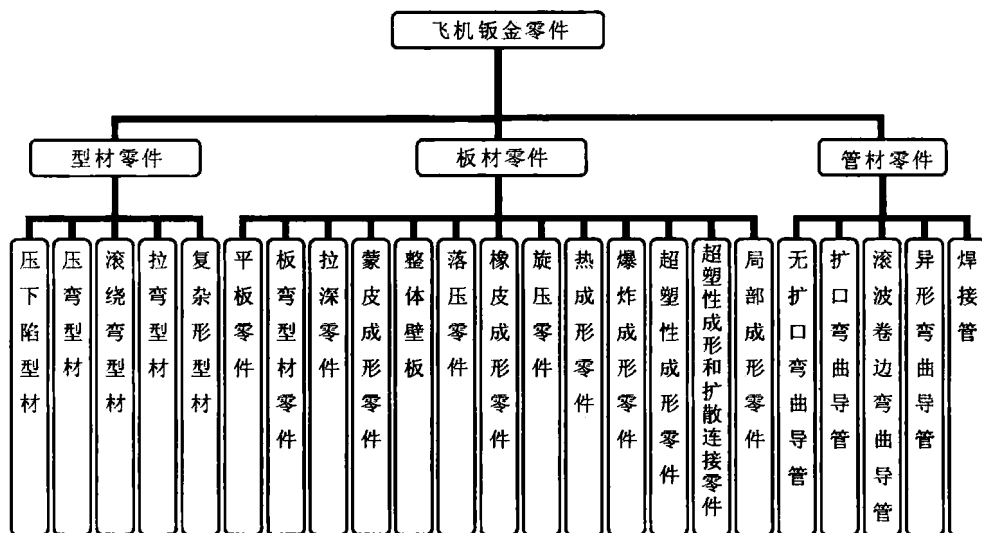


图 0.1 飞机钣金零件分类

三、钣金零件加工路线的基本环节

成千上万的钣金零件,制造方法多种多样,但它们的加工路线基本相同,一般都要经过以下几个环节:下料→成形→热处理→校修→表面保护。以整流罩为例(见图 0.2),它的制造过程大致如下:首先用剪床裁出一个梯形的平板毛料(见图 0.2(a)),再用模具压制成形,得出如图 0.2(b)所示的半成品。其次,根据材料性质和零件的技术要求进行热处理。热处理后往往产生翘曲变形,必须加以校正、整修,然后切割边沿、钻孔。最后进行表面抗蚀处理(例如阳极化)。从整流罩零件的制造过程可以看出,把平板毛料用模具压制成形得到如图 0.2(b)所示的半成品,乃是整个制造过程中的中心环节,它在制造过程中起决定性的作用。因此,当研究钣金零件的制造工艺时,应着重研究不同零件的成形方法。

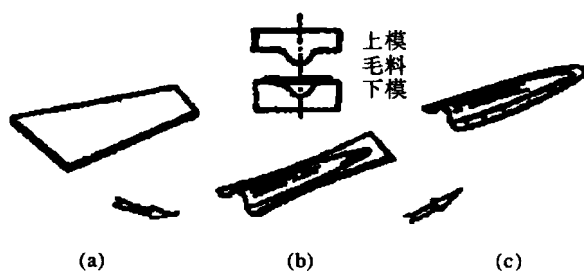


图 0.2 整流罩的制造过程

四、钣金零件变形的特点

钣金零件的种类繁多,形式各异,成形方法多种多样,但最基本的变形方式(见表 0.1)不外乎是弯曲、翻边、拉深、局部成形(或胀形)。板料成形时,材料的变形区往往是以上几种基本

变形方式的复杂组合。如图 0.3 所示的框板,外缘相当于拉深,内缘相当于翻边,而腹板上兼有翻边与局部成形。因此,当分析一个具体的钣金零件时,一方面必须将不同变形性质的部分加以明确区分,利用弯曲、翻边、拉深、局部成形等基本变形方式,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变形方式孤立地看待。

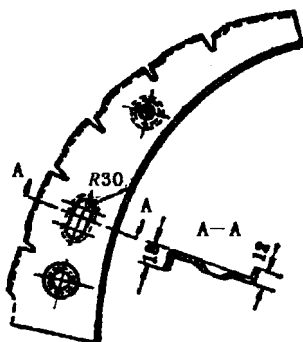


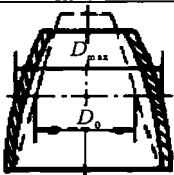
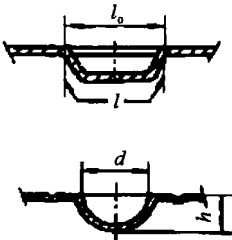
图 0.3 框板

钣金零件的成形方法虽然很多,但从板料的变形性质来看,无非是“收”和“放”两种。所谓“收”就是依靠板料的收缩变形来成形零件,收的特点表现为板料纤维缩短,厚度增加。“收”的主要障碍是起皱。所谓“放”就是依靠板料的拉伸变形来成形零件,放的特点表现为板料纤维伸长,厚度减薄。“放”的主要障碍是拉裂。例如,外拔缘为“收”,翻边、局部成形为“放”,弯曲中性层以内为“收”,弯曲中性层以外为“放”。

表 0.1 钣金零件的基本变形方式

变形方式	图 例	变形程度
弯 曲		相对弯曲半径 $\frac{R}{t}$
翻 边		翻边系数 $K_f = \frac{d_0}{D}$
拉 深		拉深系数 $m = \frac{d}{D_0}$

续表

变形方式	图 例	变形程度
胀 形		胀形系数 $K_z = \frac{D_{\max}}{D_0}$
局部成形		平均断后伸长率 $A = \frac{l - l_0}{l_0}$ 相对高度 $\frac{h}{d}$

五、飞机钣金零件常用材料

飞机钣金零件常用材料种类很多,一般可分为铝及铝合金、镁合金、钛及钛合金、碳素钢、铜合金、合金钢及不锈钢等。其品种有各种规格尺寸的板材、型材、管材等。常用金属材料的种类和力学性能如表 0.2 所示。

表 0.2 常用金属材料的种类和力学性能

金属种类	材料牌号 (旧牌号)	状态	抗拉强度 N/mm ²	屈服强度 N/mm ²	断后 伸长率/(%)	断面 收缩率/(%)	热处理
防锈铝	3A21(LF21)	M	100~150		22~20		淬火不能强化
		Y	190		1~4		
	5A02(LF2)	M	167~225	98	16~18		
	5A03(LF3)	M	200	100	15		
		Y2	230	200	8		
	5A06(LF6)	M	320	160	15		
硬铝	2A12(LY12)	M	≤215		14		可以淬火强化
		CZ	407	270	13		
	2A16(LY16)	M	≤235		15		
超硬铝	7A04(LC4)	M	≤245		10	50	可以淬火强化
		CS	480	402	7		
铜合金	H62	M	295	108	40	66	淬火不能强化
	H68	M	295	88	40	70	
镁合金	MB8	M	225	120	12	30	淬火不能强化
		YZ	245	155	10	25	

续表

金属种类	材料牌号 (旧牌号)	状态	抗拉强度 N/mm ²	屈服强度 N/mm ²	断后 伸长率/(%)	断面 收缩率/(%)	热处理
钛合金	TC1	M	600~750		25~20		淬火不能强化
	TC4	M	900~920		12~10		
碳素钢	45	M	539~686		16		淬火不能强化
不锈钢	1Cr18Ni9Ti	软化	≥530		≥10		
合金钢	30CrMnSi		539~736		16		

材料的供应状态用一定的符号表示,例如:M表示材料处于退火状态;CZ表示淬火后自然时效;CS表示淬火后人工时效;MO表示优质表面退火;Y表示冷作硬化;CO表示优质表面淬火自然时效;Y₂表示半冷作硬化;XC表示型材;G表示管料。

状态符号置于材料牌号的后面,如:

3A21—MO— $t_{1.5}$:表示表面优质退火状态的21号防锈铝板材,板厚为1.5 mm。

7A04—CS— $t_{1.2}$:表示淬火后人工时效状态的4号超硬铝板材,板厚为1.2 mm。

思 考 题

1. 钣金工艺的含义是什么? 具有哪些特点?
2. 钣金零件的加工路线一般都要经过哪几个环节?
3. 钣金零件最基本的变形方式有哪些?
4. 当钣金零件成形时,从板料的变形性质来看可分为哪两种? 说明其含义并举例。
5. 钣金零件常用的金属材料有哪些?

第 1 章 金属变形基本理论

1.1 金属变形机理

钣金工作就是使金属材料在常温下(或加热时)变形,从而得到所需零件形状的工作。钣金工作最大的特点是使金属材料变形,而变形必然引起金属内部结构变化。要做好钣金工作,必须了解变形对结构的影响,以便有效地利用它。

一、外力和应力

在钣金成形过程中为使板料变成所需形状,就要采用各种工艺方法(如弯曲、拉深等)对板料施加一定的力,这种在加工过程中对材料施加的力称为外力。

板料在外力作用下会发生变形,其内部各质点间的相对位置将会发生变化,各质点必然相互作用阻止其变化。这种原子间相互作用阻止材料变形的力称为内力,其数值大小和外力相等。

在钣金工艺中,应力是指作用在材料单位横截面积上的内力,用 R 表示,

$$R = \frac{F}{S}$$

式中: R ——应力, Pa;

F ——外力, N;

S ——横截面积, m^2 。

二、金属的晶体结构

固体金属都是晶体结构,金属的晶体结构是指晶体原子的排列方式。晶格是描述原子排列规律的空间格架。能够完整地反映晶体晶格特征的最小几何单元称为晶胞。金属的种类很多,但常见的晶格类型只有三种。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个立方体,原子位于立方体的八个顶点和立方体的中心(见图 1.1)。其典型金属有钨、钼、钒、铌、钽及 $\alpha\text{-Fe}$ 等。体心立方晶格有六个滑移面和两个滑移方向,原子密度最大的平面叫滑移面,滑移面上原子密度最大的方向叫滑移方向(见图 1.2)。滑移面和滑移方向数值的乘积称为滑移系,体心立方晶格的滑移系为 $6 \times 2 = 12$ 个。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞是一个立方体,原子位于立方体的八个顶点和立方体六个面的中心。其典型金属有金、银、铜、铝、铅、镍及 $\gamma\text{-Fe}$ 等。面心立方晶格有四个滑移面和三个滑移方向,其滑移系为 $4 \times 3 = 12$ 个(见图 1.3)。

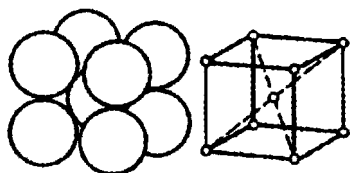


图 1.1 体心立方晶格

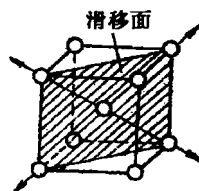


图 1.2 体心立方晶格的滑移面和滑移方向

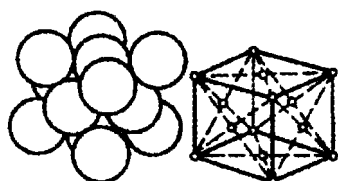
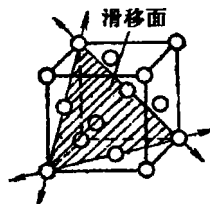


图 1.3 面心立方晶格



3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个正六棱柱，原子除排列于柱体的每个顶点和上、下两个底面的中心外，正六棱柱的中心还有三个原子。其典型金属有镁、铍、镉、锌等。密排六方晶格有一个滑移面和三个滑移方向，其滑移系为 $1 \times 3 = 3$ 个(见图 1.4)。

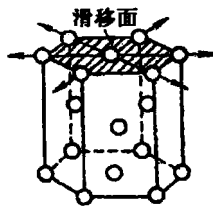
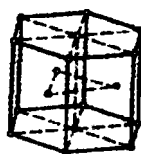
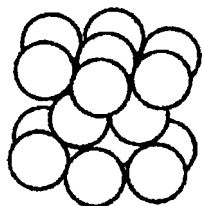


图 1.4 密排六方晶格

当在其他条件相同时，金属晶体的滑移系越多，金属的塑性就越好。

三、金属的变形

金属在外力的作用下发生形状的改变，这种性质叫做变形。变形一般包括弹性变形和塑性变形两个发展阶段。弹性变形是组成晶格的原子在外力作用下被迫离开原来的平衡位置，在外力消失后，原子又能恢复到原来的平衡位置。这种外力去除后能消失的变形称为弹性变形。塑性变形则是原子被迫离开原来的平衡位置后，达到一个新的平衡位置，在外力消除后，原子不能回到原来的平衡位置。这种当外力去除后不能消失而残留下来的永久变形称为塑性变形，它是冷加工所需要的。金属的塑性变形主要是通过滑移和孪动两种方式进行的。

1. 滑移

晶内滑移简称滑移，是指在外力作用下，晶体的一部分沿着一定的滑移面和这个晶面上的一定的滑移方向，相对其另一部分产生有规律的相对移动。

滑移的结果是使原子逐步地从一个稳定位置移动到另一个稳定位置，晶体产生宏观的塑性变形。滑移时原子移动的距离是原子间距的整数倍，滑移后晶体各部分的位向仍然一致，如

图 1.5 所示。

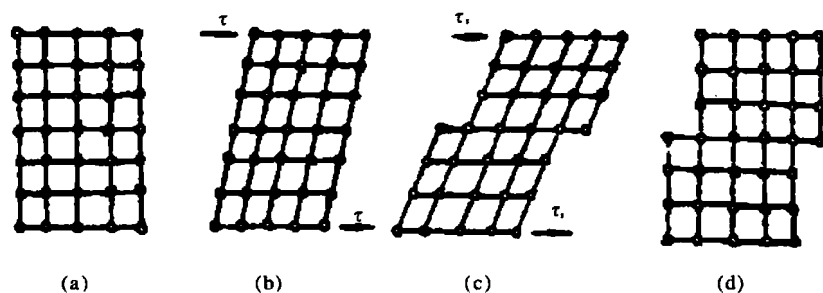


图 1.5 晶体在切应力作用下的变形

滑移后,在金属的内部和表面会出现许多纹路,这些纹路称为滑移线。滑移线实际上是滑移后在晶体表面留下的小台阶。相互靠近的一组小台阶宏观上反映出一个大台阶,这个大台阶称为滑移带,如图 1.6 所示。

一般说来,面心立方和体心立方金属的滑移系较多,因此,比密排六方金属的塑性好,但金属塑性的好坏,不仅仅取决于滑移系的多少,还与其他因素有关。

2. 孪动

晶体的另一种塑性变形方式是孪生,又称孪动或孪晶。它不是塑性变形的主要方式,但它却能造成破坏。孪动是金属在一定的外力作用下,晶体的一部分相对于另一部分沿着一定的晶面和方向发生转动,其结果使晶体的一部分与原晶体处于对称位置。

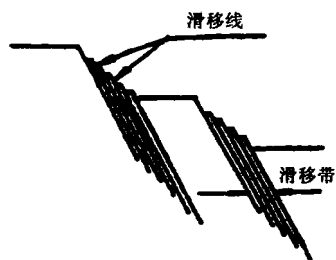


图 1.6 滑移带和滑移线

孪动与滑移的主要区别如下:

(1)滑移过程是渐进的,而孪动过程是突然发生的。例如,金属锡在孪动过程中,能听到一种清脆的声音,称为“锡鸣”。

(2)在微观方面,滑移时晶格两部分相对于滑移面的切变量是原子间距的整数倍,滑移不会引起晶格取向的变化;而孪动时切变量则是原子间距的分数倍,并且各晶面相对于孪生面的切变量和它与孪生面的距离成正比,也正是由于这个原因,孪动才会引起晶格取向的变化,如图 1.7 所示。

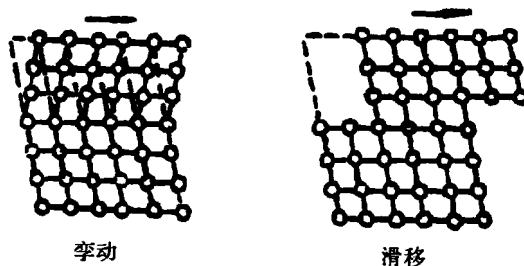


图 1.7 滑移与孪动的区别

四、加工硬化

金属经塑性变形后,其力学性能、物理性能和化学性能都要发生变化,而力学性能的变化是最值得注意的。

力学性能的变化表现在随着变形程度的增加,金属的强度和硬度逐渐升高,而塑性和韧性则逐渐降低,这种现象称为加工硬化或冷作硬化。产生加工硬化的原因是晶体塑性变形时,晶粒内部的晶格发生歪扭,使滑移面凹凸不平,造成滑移困难,变形抗力增大,故强度和硬度增加;又因为晶格的畸变,使晶界受损塑性降低。

金属的加工硬化现象在生产中有着非常重要的意义。首先,它是强化金属材料的一种主要的工艺方法,也是零件能够成形的重要因素。如图 1.8 所示冷冲压过程中,由于 r 处变形最大,金属在 r 处变形到一定程度后,首先产生加工硬化,使随后的变形转移到其他部分,这样便可得到壁厚均匀的冲压件。加工硬化还能保证零件在服役时的安全性,由于零件的形状或服役时承受载荷的变化,在零件某些部位会出现应力集中或零件暂时出现过载现象。这些部位会发生微量的塑性变形,便产生了加工硬化效应,进而强度得到提高,变形就自行终止,从而保证了零件服役时的安全性。但加工硬化也有它不利的一面,当冷变形时,随着变形程度的增加,材料的强度增加,而塑性降低到不能再继续变形,若再继续加工就会使零件开裂。手工成形零件对此体会最深,板料越敲越硬,猛敲时板料甚至开裂。消除加工硬化的方法是材料加热,然后随炉冷却(即常说的退火),使晶体内部晶格的畸变恢复,然后再继续加工。要消除加工硬化,必须对半成品进行中间退火,这样就增加了生产成本,降低了生产率。

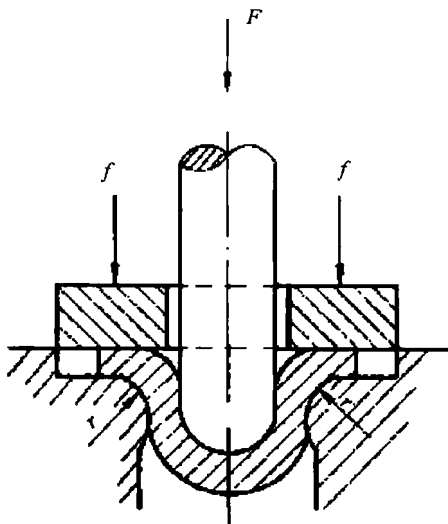


图 1.8 冲压示意图

1.2 应力-应变曲线

力学性能(又称机械性能)是指金属材料在外力作用下所反映出来的性能,它是保证零件

和构件正常工作应具备的主要性能,主要包括强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

强度和塑性指标是通过拉伸试验测定的。板料的拉伸试验是确定板料力学性能的最简单、最普通的方法。根据拉伸试验所提供的力学性能指标,可以定性估计材料的压制成形性能。

一、应力-应变曲线

以退火的低碳钢为例,其试验曲线如图 1.9 所示,曲线的纵坐标为外载 F (材料试验机加给试件的力)与试件原始横截面面积 S_0 的比值,此比值称为应力,用 R 表示;横坐标取试件的断后伸长率 A ,它是指试件单位长度的变形量,又称为应变,也可用 ϵ 表示。因此有

$$R = \frac{F}{S_0}$$

$$\epsilon = A = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中: R —— 应力, MPa;

F —— 材料试验机加给试件的力, N;

S_0 —— 试件原始横截面面积, mm^2 ;

l —— 试件断裂时的总标距长度, mm;

l_0 —— 试件原始的总标距长度, mm。

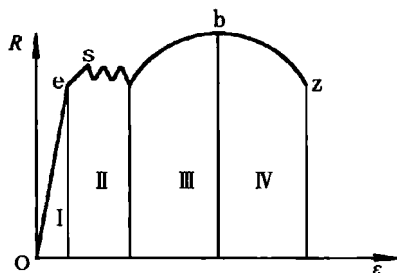


图 1.9 低碳钢应力-应变曲线

应力-应变曲线上共有四个特征点:第一个是弹性极限点 e 。第二个是屈服极限点 s ,它是弹性变形与均匀塑性变形的分界点。第三个特征点是曲线的最高点 b ,它是均匀塑性变形和不均匀塑性变形阶段的分界点。第四个是破坏点 z ,它是塑性变形的终止点。这四个特征点将金属变形过程分为四个阶段:

(1)第 I 阶段——弹性变形阶段。在这个阶段中,应力基本上随应变线性变化。

(2)第 II 阶段——屈服变形阶段。此阶段,按其由弹性变形过渡到塑性变形阶段的特点来说,可将材料分为两类:第一类为有明显屈服点的金属,如低碳钢、合金钢、黄铜等,如图 1.9 所示即为低碳钢的应力-应变曲线。这些材料在屈服阶段曲线呈锯齿形,习惯上称屈服平台,通常取最低点为屈服应力 R_{eL} 。第二类为没有明显屈服点的金属,如铝、钛等绝大多数有色金属及其合金都是如此。它们的屈服是渐进的,如图 1.10 所示。这时,通常取卸载后有 0.2% 的残余应变所对应的应力作为屈服应力,用 $R_{p0.2}$ 表示。上述第一类材料是塑性材料,这类材料在破断之前有明显的塑性变形,这种破断称为韧性破断。第二类材料是脆性材料,如灰口铸

铁,在破断之前无明显的塑性变形,这种破断称为脆性破断,这种材料一般很少被用于压力加工。

(3)第Ⅲ阶段——均匀塑性变形阶段。在这个阶段中,塑性变形在试件上是均匀分布的,其过程一直持续到应力达到最大值,即达到强度极限 R_m 为止。

(4)第Ⅳ阶段——不均匀塑性变形阶段。在这个阶段中,塑性变形在试件上不再均匀发展,出现颈缩现象,直到拉断为止。这阶段的应力随应变的增加而逐渐减小。但由于试件在变形过程中的实际横截面是随变形的发展而缩小的,因此,出现颈缩以后材料所承受的真正应力比实验应力要大得多。

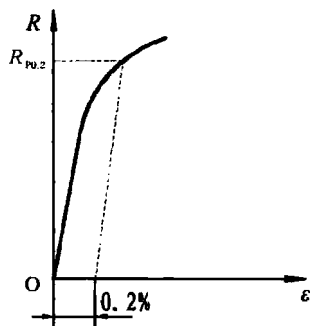


图 1.10 $R_{0.2}$ 的意义

二、卸荷定律

拉伸变形在弹性范围内,应力与应变是线性关系,其在应力-应变图中表现为一直线。如果在弹性变形阶段将载荷卸去,应力-应变仍然按照同一直线回到原点,即变形完全消失了,没有残余的永久变形。如果将试件拉伸超过屈服点 s ,达到某点 $B(\epsilon, R)$ 以后,再逐渐减少拉力,应力-应变关系就按另一直线逐渐降低,不再重复加载时所画的曲线了,卸荷直线正好与加载时弹性变形的直线段平行,直至载荷为零,如图 1.11 所示。

从图中可以看出,加载时的总应变为 ϵ ,它是由两部分组成的,一部分(ϵ_e)因弹性恢复而消失,这种当外力消除后弹性变形立即消失的现象称为回弹;另一部分(ϵ_p)仍然保留下来。由上述可以看出:

(1)材料在未卸荷之前的总塑性变形中包含一部分弹性变形。

(2)卸荷后试件再重新加载,其屈服强度提高了。

在实际工作中,回弹对钣金零件的成形很不利。回弹会使零件成形的准确性降低,并增加了手工修整量。因此,当产量大时,有的模具不按零件的理论尺寸加工而是考虑一定的回弹量,或者在零件成形过程中,改进其工艺方法以减少回弹。

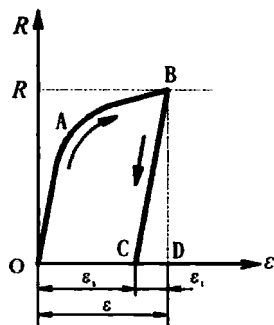


图 1.11 卸荷曲线

三、弹性

具有弹性变形特性的材料能够产生弹性变形而不发生永久变形的能力,称为弹性。在弹性变形区域内,如图 1.9 中的 Oe 段,应力和应变成正比,即

$$R = E\epsilon$$

式中的 E 为弹性模量,它表示引起单位应变所需的应力的,即当 $\epsilon=1$ 时, $E=R$ 。 E 值与材料原子之间作用力的强弱有关。工程上常用弹性模量作为衡量材料刚度的指标, E 越大,刚度越好。刚度是材料抵抗弹性变形的能力。材料在一定的的外力作用下,弹性变形越大,说明其刚度越小,反之,其刚度则大。

弹性极限(R_e)是试件在最大弹性变形时材料所承受的应力。有

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

式中: R_e ——当试件在最大弹性变形时材料所承受的应力,MPa;