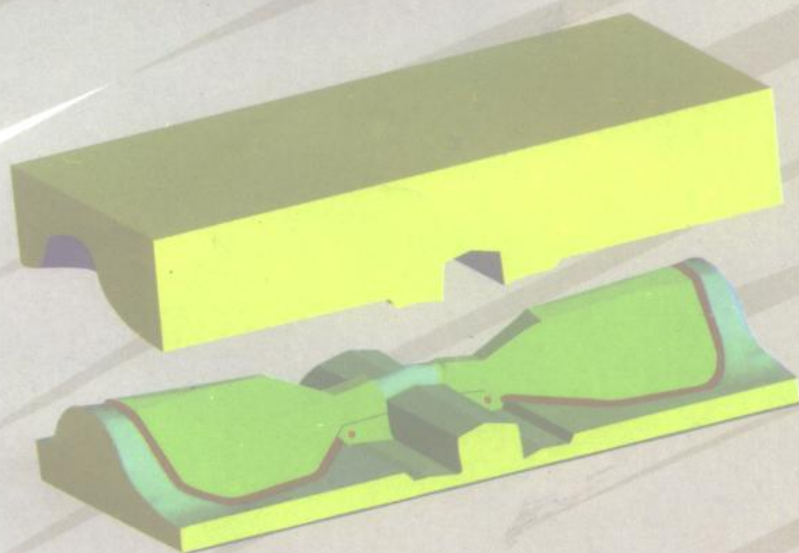


冲压模具 设计与制造技术

解汝昇 主编



中国标准出版社

冲压模具设计与制造技术

解汝昇 主编



中国标准出版社

内 容 简 介

本书主要讲述冲压模具设计与制造技术的基础理论,以及模具结构设计特点和方法等。内容包括:冲压成形基本理论、冲裁模设计、弯曲模设计、拉深模设计、覆盖模设计、模具主要零件机械加工、模具电火花加工、模具装配及其安全技术、模具材料及其选用、冲模计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)等共十章。

本书可供高等工科院校机械制造工艺与设备专业、冲压工艺专业及职工大学等同类专业师生在教学中使用,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冲压模具设计与制造技术/解汝昇主编. —北京:中国
标准出版社, 1997. 7
ISBN 7-5066-1407-3

I. 冲… II. 解… III. ①冲模-设计②冲模-制模工艺
IV. TG385.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 12032 号

中国标准出版社出版

北京复兴门外三里河北街 16 号

邮政编码:100045

电 话:68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

版权专有 不得翻印

*

开本 787×1092 1/16 印张 17½ 字数 418 千字

1997 年 8 月第一版 1997 年 8 月第一次印刷

*

印数 1—2 500 定价 38.00 元

前 言

本书是为了满足教学和生产发展需要,受中国船舶工业总公司教材编审室委托,组织部分高校有关专业教师编写的。

编写中,参考了已出版的同类教材,融入了编者多年的教学经验,突出体现了以下几点:

1. 内容完整、简明

编写时除了加强基础理论与实际联系外,还注重了全书的系统性和完整性。先简单阐述基本概念、原理,然后阐述设计方法及具体结构。培养学生理解概念,掌握设计计算能力,达到能初步设计模具的水平。

2. 具有一定的先进性

为了适应计算机技术的发展,本书结合国内外最新科研成果,增设了模具计算机辅助设计与制造系统(模具 CAD/CAM)一章,以具体实例阐明了计算机在模具设计与制造技术中的应用。

3. 适用于电化教学

为了利用先进的电化教学手段,本书的冲裁、弯曲、拉深、成形模具部分以工厂现有设备和实物为对象摄制了录像片。此部分既适用于课堂教学、又适用于电化教学。

4. 适用范围广

为了使读者增加实际知识,本书典型模具均从工厂中选择,与基础理论结合紧密。既适用于本科院校,又适用于大专院校;既适用于成人教育,又适用于职工大学,并可作为技术人员的参考书。

5. 各章均编入了思考题,既总结了本章重点,又便于读者掌握本章内容,有利于提高学习质量。

本书由解汝昇主编,傅大智为副主编。第一章由傅大智编写,第二章由解汝昇编写,第三章由王蕾编写,第四章由刘彦、田文彤编写,第五章由温锦海编写,第六章由袁凯锋编写,第七章由解汝昇编写,第八章、第九章由王寿钧、傅大智编写,第十章由祝海涛编写;全书由解汝昇统稿。

本书由中日韩三国科技人才被录者、美国摩擦与润滑工程学会高级会员庞志成教授和辽宁省模具协会理事葛云柏教授任主审。

本书编写过程中,参考了一些兄弟院校的教材和资料,并征求了一些兄弟院校的意见,在此谨表谢意。

限于编者水平,书中难免有缺点、错误,欢迎广大读者批评指正。

编 者

1996 年 11 月

目 录

第一章 金属塑性变形理论基础	(1)
§ 1-1 金属的塑性与塑性变形	(1)
§ 1-2 应力与应变的基本概念	(6)
第二章 冲裁及冲裁模设计	(11)
§ 2-1 冲裁变形过程分析及其断面特征	(11)
§ 2-2 冲裁件的工艺性	(13)
§ 2-3 冲裁间隙	(14)
§ 2-4 冲裁模刃口尺寸计算	(17)
§ 2-5 冲裁力和压力中心的确定	(21)
§ 2-6 排样	(24)
§ 2-7 冲裁模的设计程序	(29)
§ 2-8 模具结构类型选择	(30)
§ 2-9 冲裁模主要零部件的设计	(31)
§ 2-10 冲裁模的典型结构	(54)
§ 2-11 其他冲裁	(62)
第三章 弯曲及弯曲模设计	(74)
§ 3-1 基本概念	(74)
§ 3-2 弯曲件的回弹	(78)
§ 3-3 弯曲件毛坯尺寸计算	(87)
§ 3-4 弯曲模典型结构	(92)
§ 3-5 弯曲模设计的几个问题	(92)
§ 3-6 弯曲力的计算	(100)
第四章 拉深及拉深模设计	(104)
§ 4-1 拉深的基本原理	(104)
§ 4-2 拉深件的工艺性	(106)
§ 4-3 圆筒形件的工艺计算	(109)
§ 4-4 其他形状零件拉深	(135)
§ 4-5 拉深模主要工作零件设计	(152)
§ 4-6 拉深模结构示例	(164)
第五章 覆盖件模具设计	(167)
§ 5-1 覆盖件特点及要求	(167)
§ 5-2 拉延模应考虑的工艺因素	(169)
§ 5-3 拉延模设计	(180)
§ 5-4 其他覆盖模简介	(183)
第六章 模具的机械加工	(187)
§ 6-1 模具制造的技术要求	(187)

§ 6-2	模具工作型面的机械加工	(189)
§ 6-3	冷冲模主要零件机械加工的工艺过程	(197)
§ 6-4	模架的机械制造	(200)
第七章	模具零件电火花加工	(203)
§ 7-1	冲模电火花加工	(203)
§ 7-2	模具电火花线切割加工	(210)
第八章	模具的装配及安全技术	(216)
§ 8-1	冲模装配	(216)
§ 8-2	模具的安装	(219)
§ 8-3	模具安全技术	(222)
第九章	模具材料及选用	(224)
§ 9-1	模具材料选用原则	(224)
§ 9-2	常用模具材料选用	(225)
第十章	冲模计算机辅助设计与制造	(231)
§ 10-1	冲模计算机辅助设计与制造概述	(231)
§ 10-2	冲模 CAD 系统	(233)
§ 10-3	冲模零件的图形输入	(242)
§ 10-4	冲裁工艺设计	(247)
§ 10-5	冲裁结构设计	(267)
参考文献		(274)

第一章 金属塑性变形理论基础

金属塑性变形原理是分析和制定各种冲压工艺的理论基础。塑性变形理论是一门研究对象和任务极为广泛的学科。目前,对于塑性变形理论的研究包括以下三个方面:塑性变形理论的物理学方面、数学力学方面以及物理化学方面。本章仅就塑性变形的物理现象及塑性变形的力学概念作简单的介绍。

§ 1-1 金属的塑性与塑性变形

一、塑性及塑性变形的概念

在固体材料中,原子之间作用着相当大的力,足以抵抗重力的作用,所以在没有其他外力作用的条件下,物体具有自己的形状和尺寸。如对固体施加外力,引起固体的形状和尺寸的改变,这种改变伴随着质点间距离的变化,或微元体的形状和尺寸的变化。

若作用于物体的外力卸载后,由外力引起的变形随之消失,物体能完全恢复自己的原始形状和尺寸,则这样的变形称为弹性变形。

若作用于物体的外力卸载后,物体并不能完全恢复自己的原始形状和尺寸,这样的变形称为塑性变形(残余变形)。

所谓塑性,是指固体材料在外力作用下发生永久变形,但不破坏其完整性的能力。塑性不仅与材料本身的性质有关,也与变形条件有关。所以,不同的材料在同一变形条件下有不同的塑性;而同一种材料,在不同的变形条件下又会出现不同的塑性。例如金属铅在一般情况下变形时,具有极好的塑性,但在三向等拉应力的作用下,却象脆性材料一样地破坏,而不产生任何塑性变形;反之,大理石在一般情况下变形毫无塑性,但在三向压应力作用下可以产生一定的塑性变形。

塑性的大小可用“塑性指标”来评定。塑性指标是以材料临近开始破坏时的塑性变形量来表示的。塑性指标可用各种试验方法求得。

二、塑性变形的物理本质

金属及合金在固态下具有结晶结构。在理想的金属晶体中,原子是按严格确定的晶格排列的。设想用直线将这些原子连接起来,那么将会得到晶体点阵,点阵中的点表示原子的位置。完整的晶体点阵实质上是完全相同的单个晶格的多倍重复。晶体点阵单个晶格的几种不同变形是众所周知的(见图 1-1)。

晶体结构的三种类型在金属中最为常见的是:密排六方结构、面心立方结构及体心立方结构。

金属晶体点阵的类型是通过 X 射线检查确定的。真实的晶体没有一种理想的结构。它们往往以具有各种不同的局部缺陷为特征,且分为大小约为 10^{-4}cm 的晶粒,而晶格的大小约为 $(2.8\sim 6.0)\times 10^{-8}\text{cm}$ 的数量级。

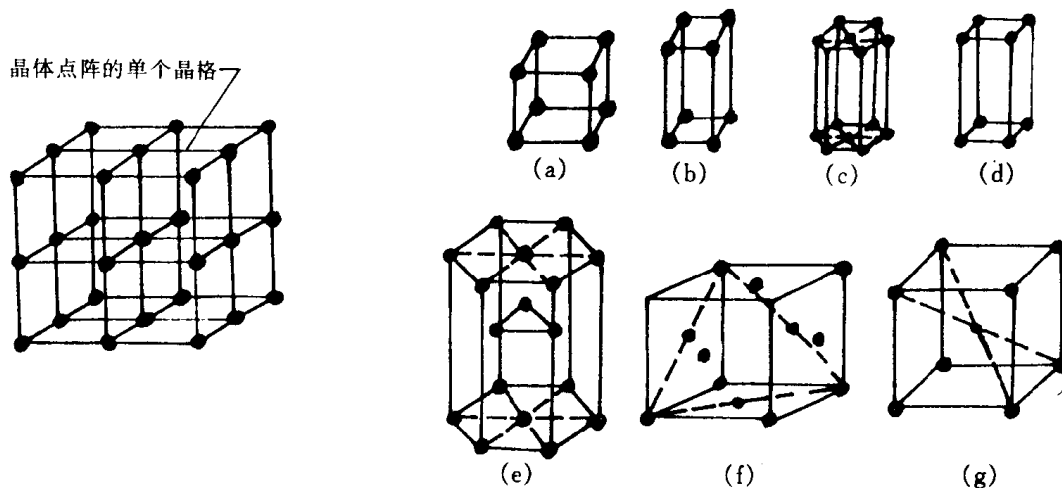


图 1-1 金属的晶体点阵及晶体点阵单个晶格的类型

(a)立方的;(b)四方的;(c)六方的;(d)斜方的;
(e)密排六方的;(f)面心立方的;(g)体心立方的

排列在晶体中的原子间的距离及密度在不同的方向及不同的平面中是不相同的。原子间的相互作用决定着晶体的机械、物理及化学的性能。由于原子的不同排列,晶体的性能在不同的方向上也不相同,这种取决于方向的性能上的差异称为各向异性。

弹性变形是原子间距离改变引起的。考虑这些原子的实际排列及它们之间的相互作用,就能得到有关的力学计算关系,而这些关系已被试验所证实。

一个晶体(单晶体)塑性变形的机理在于原子层在特殊的结晶平面上沿着确定的方向移动(滑动)[见图 1-2(a)]。这些平面和方向是原子密度最大的平面与方向。当剪应力在其中一个方向达到临界值时,该层面便滑动约 1000 个原子间的距离。

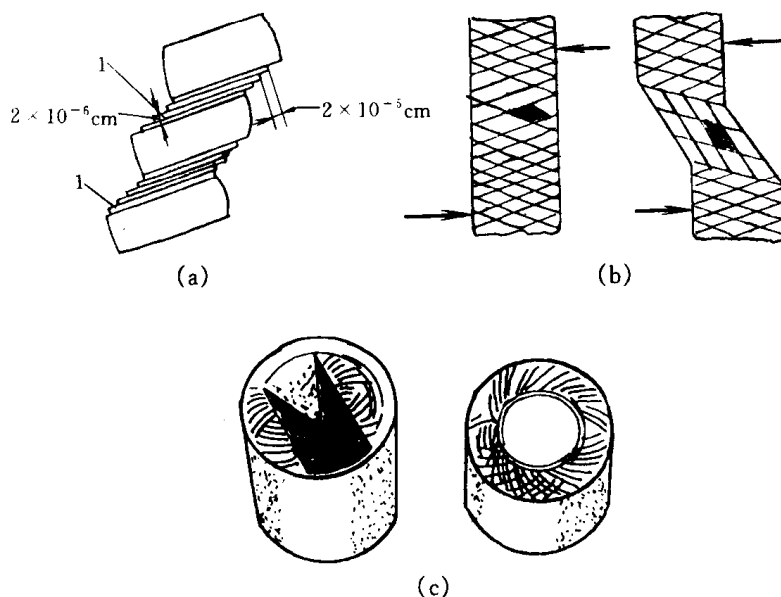


图 1-2 塑性变形图

(a)滑移;(b)双晶;(c)冲压件表面上的滑移线图案;1—滑移面

当剪切载荷增加时,滑移出现在邻近的滑移平面上,形成一组滑移平面 1〔见图 1-2(a)〕。这些滑移平面组的移动痕迹形成肉眼可见的滑移线〔见图 1-2(c)〕。象刚体一样运动的部位保持在滑移线之间。当变形扩展时,金属的流动变得混乱:滑移线数量增加,滑移面间的晶体部分被压碎成许多小块,这些小块又产生转动。

除了滑移之外,塑性变形还可能出现双晶〔见图 1-2(b)〕。双晶是指晶体的一部分相对于另一部分运动,结果第一部分成为第二部分的反射图像。

如果设定晶体点阵在几何图形上是很理想的,那么就能计算出克服原子间作用力所需的应力。该计算应力比试验测定的高数十倍甚至数百倍,这是因为各种各样的缺陷早在结晶过程中已经出现,而完美无缺的结晶结构实际上是不存在的,这些缺陷大大地削弱了晶体强度。

当将某一载荷施加到实际的晶体上时,剪切变形不会同时出现在全部滑移平面上。滑移往往在晶体内有缺陷的部位开始,而在应力比之整块原子点阵同时滑移所需应力低得多的情况下扩展开。

在晶体点阵中,有缺陷的部位称之为位错,位错在塑性变形机理中起着重要的作用。点阵中扭曲很大的点,称为位错中心。位错可能是由微小夹杂物质进入熔化了了的金属中引起的,也可能是某种应力等原因引起的。

位错移位的机理可以用覆盖在地板上的地毯的移位来比喻。地毯可作如下运动:先推移地毯的一端至一新的位置,于是地毯中出现隆起,然后使隆起部位向前移动,从而改变整个地毯的位置。这样操作所需要的力比同时改变整个地毯位置所需要的力要小得多。同样,位错使晶体产生塑性变形是靠原子团的个别移位而不是靠整个结晶面的移动。

多晶体的塑性变形机理十分复杂。塑性变形不仅来自晶粒内部,而且也来自晶粒之间。前者是单晶体的滑移或双晶,后者是一些晶粒相对于另一些晶粒的转动及移动。

三、金属塑性变形对组织和性能的影响

金属受外力产生塑性变形后,不仅其外观形状发生了变化,而且其内部组织、物理性能、机械性能也发生了变化,这些变化可以归纳为以下四个方面:

1. 晶粒形状和方位的改变

变形以后,晶粒拉长了,其晶轴有与整个晶体拉伸方向趋向一致的趋势(图 1-3),于是逐渐形成了金属的纤维组织。其结果使变形抗力增加,产生了明显的各向异性。

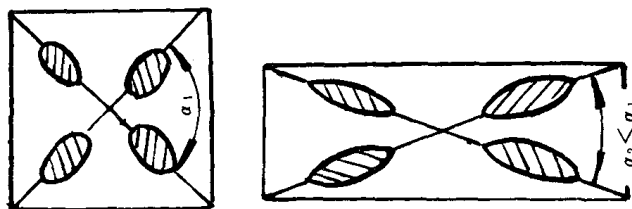


图 1-3 纤维方向的形成

2. 产生了内应力

由于变形过程中,各个晶粒都有不同程度的变形,为了保持金属晶体的整体性,必然会在不同变形程度的晶粒之间和每个晶粒内部造成一些自相平衡的内应力。变形终止后,内应力遗留在金属中变成残余应力。内应力的存在,将导致金属的开裂和变形抗力的增加。

3. 晶内和晶间的局部破坏

晶内破坏是滑移层的局部碎裂所造成的;晶间破坏则是由于晶粒介面面积的改变以及晶间变形,破坏了晶粒介面的完整性的缘故。随着变形程度的增加,晶内和晶间的破坏均不断扩展。因此多晶体的破坏正是由于晶内与晶间的局部破坏发展积累而成。晶内及晶间的局部破坏,在晶体中造成了许多微小的空隙,而金属的物理机械性能(例如密度、导电率、抗蚀性、可塑性、强度等)就会发生变化。

4. 产生了加工硬化

在冷塑性变形过程中,表现出的金属强度指标(HB 、 σ_s)的增加和塑性指标(δ 、 ψ)的降低以及继续变形的抗力增加的现象称为加工硬化。加工硬化对许多模具制造工艺都有较大影响;例如,由于塑性降低,限制了毛坯的进一步变形,往往导致在后续变形工序之前增加中间退火工序以消除硬化,但硬化也有有利的一面,如硬化可提高抗局部颈缩失稳能力,使拉伸变形趋向均匀,成形极限增大。

四、影响金属塑性变形的因素

影响金属塑性变形的因素很多,除金属的成分、组织结构等内在因素之外,其外部因素——变形方式、变形条件的影响也是很大的。从冲压工艺的角度出发,往往着重于外部条件的研究,以便创造条件,充分发挥材料的变形潜力,尽可能减少工序次数。

1. 金属的成分和组织结构

金属的组织结构决定于它的化学成分。组成金属的主要元素的晶格类别,杂质的性质、数量及分布情况,晶粒的大小、方向及形状,都与化学成分有关。对于多晶体金属本身的可塑性受下列因素影响:晶介强度,晶粒大小、化学成分、组织上的均匀性以及可能发生滑移系统的数量等。一般来说:组成金属的元素越少(如纯金属和固溶体),可塑性越好;滑移系统数量越多、机械性能越一致,晶介强度越大,可塑性越好。

2. 变形时应力状态

冲压各成形工序的受力和变形情况是复杂的,归纳起来,是在拉、压应力的综合作用下,产生一定的拉应变与压应变,达到预期的成形目的。关于应力、应变状态,我们将在下节讨论,这里仅就变形方式对金属塑性变形的影响作简要说明。

一般来说,变形方式对于金属的屈服与应变则影响太大,但对于金属的破坏,则有比较显著的影响。

金属的塑性变形主要是依靠晶面的滑移作用,滑移阻力主要取决于金属的性质与晶格构造,取决于金属原子间的物理化学力。而金属变形时的破坏,则是由于晶内滑移面上裂纹的扩展以及晶间变位时结合面的破坏造成的。压应力有利于封闭裂纹,阻止其继续扩展,有利于增加晶间结合力,抑制晶间变位,减少晶间破坏的倾向。所以金属变形时,压应力的成分愈多,金属愈不易破坏,可塑性也就愈好。与此相反,拉应力则易于扩展材料的裂纹与缺陷,拉应力的成分愈多,愈不利于金属可塑性的发挥。

3. 变形温度

在冲压工艺中,有时也采用加热成形的方法。加热的目的是:提高塑性,降低变形抗力,提高工件的成形准确性。温度增高能使金属软化的主要原因是:

1) 回复和再结晶

回复和再结晶能提高金属的可塑性,降低变形抗力。

2) 新的滑移体系的出现

当变形温度增加时,由于原子间距离的改变和原子热振荡的作用,金属晶格会出现新的滑移体系,使多晶体滑移系统增加,这样就大大提高了金属的可塑性。

3) 新的塑性变形方式——热塑性的产生

当温度增高时,原子的热振荡加剧,晶格中原子处于一种不稳定的状态,而当晶体受外力作用时,原子就在内力作用下,向着最有利的方向转移,使金属产生塑性变形,这种变形方式称为热塑性。热塑性不同于滑移与双晶,它是金属在高温下塑性变形时新增加的一种变形方式。热塑性的产生,使金属的可塑性增加,变形抗力降低。温度愈高,热塑性作用就愈大。温度低于回复温度,热塑性不显著。

一般来说,温度增加,金属软化。但在冲压工艺中,温度因素的应用,必须根据材料的温度——机械性能曲线以及加温可能对材料产生的不利影响(例如晶间腐蚀、氢脆、氧化、脱碳等),进行合理选用。

4. 变形速度

变形速度对于金属塑性变形的影响是相当复杂的。

一方面,速度增高(特别是高速冲压),金属变形时易产生双晶,滑移层变细,滑移线分布更密集,这就增加了滑移和双晶的临介剪应力以及晶内和晶间破坏的极限应力,使金属的变形抗力增加,并有可能出现晶间脆裂。这些现象与金属晶格类型、晶粒的成分和结构以及其他因素有关。

另一方面,由于热效应的原因,引起金属温度升高,金属的塑性又得到改善。

五、超塑性

前面分别叙述了原材料的化学成分及组织、变形方式、变形条件对金属塑性和变形抗力的影响,了解了单个因素所起的作用。如果使金属的组织结构(晶粒尺寸)和变形的温度、速度条件配合得很恰当,则可使金属变形抗力大为下降,有时低过2个数量级之多,使其拉伸试验时的延伸率显著增加(1~2个数量级)。金属即进入所谓超塑性状态。

实验结果证明,超塑性状态时,简单拉伸的延伸率可超过1000%并不引起显微组织的改变。这说明,超塑性与普通的塑性有明显的差别。超塑性的变形机理比常规塑性变形机理更为复杂,因为包括有晶界的滑移和转动、位错运动、扩散过程等,有时会产生明显的再结晶。现在,人们对超塑性变形的研究还处于初始阶段,对它的变形机理还有待进一步的探讨。

超塑性分为两类,一类是结构超塑性,另一类是动态超塑性。结构超塑性的特点是先使金属经过必要的组织结构准备,希望晶粒等轴,而其尺寸为1~2 μm 级别(一般被变形金属中的晶粒大小为10~100 μm 级别),然后给一定的变形温度和速度条件,即可得到超塑性,称为恒温超塑性或细晶粒超塑性。通常这种超塑性的变形温度在0.5 $T_{\text{再}}$ 附近,应变速率在 10^{-1} ~ $10^{-4}/\text{min}$ 范围内。试样拉伸时的延伸率可达200%~2000%。动态超塑性不要求金属有超细晶粒,但是要求金属具有相变或同素异构转变,在载荷作用下,使金属在相变附近反复加热冷却,经过一定次数的循环后,可以获得很大的延伸率,因而也称相变超塑性或环境超塑性。

§ 1-2 应力与应变的基本概念

冲压成形时,外力通过模具或其他工具作用在板料上,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各不相同,因而引起板料内各点的应力与变形也各不相同,因此必须研究变形物体内各点的应力状态、应变状态以及塑性变形时各应力之间的关系与应力、应变之间的关系。

一、变形物体的应力、应变状态

假设在变形物体内部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几个应力分量,其中包括三个正应力与六个剪力,如图 1-4(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 1-4(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,而三个正应力就称为主应力,一般按其代数值大小依次为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 , 即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。三个主应力的作用面称为主平面。

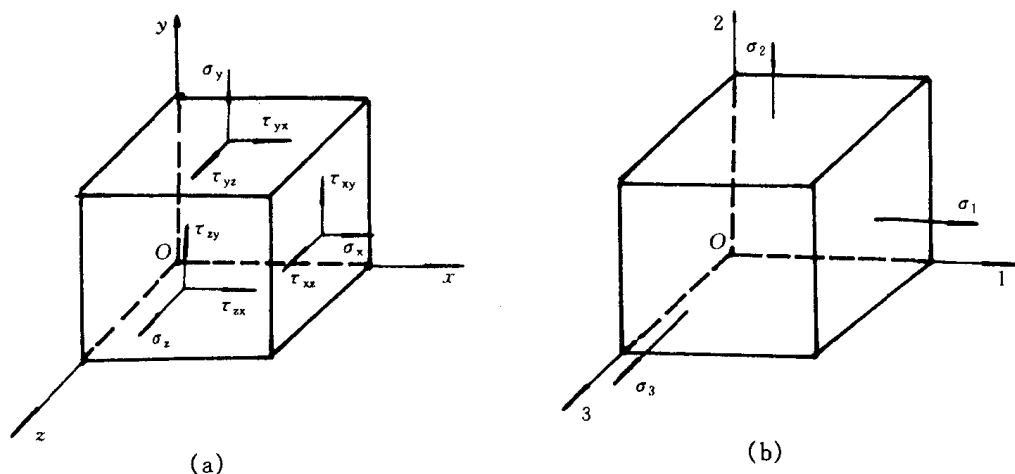


图 1-4 点的应力状态

(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应力存在,这种应力状态称为三向应力状态或称空间应力状态,如宽板弯曲变形。但板料的大多数成形工序,沿材料厚度方向的厚向应力 σ_1 与其他两个垂直方向的主应力(即径向应力 $\sigma_{\text{径}}$ 与切向应力 $\sigma_{\text{切}}$)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,这种应力状态称为平面应力或两向应力状态。三个主应力中有两个为零,只有一个方向有应力,称为单向应力状态,在板料的内孔边缘和外形边缘处常常是自由表面,故径向应力 $\sigma_{\text{径}} = 0$,而板料大多数成形工序的厚向应力 $\sigma_{\text{厚}} = 0$,故此处为单向应力状态。

如果三个主应力大小都相等,即 $\sigma_{\text{径}} = \sigma_{\text{切}} = \sigma_{\text{厚}}$,称为球应力状态,深水中物体就承受三向

等压应力称静水压力。冲裁工序中,静水压力的大小对极限塑性应变值和裂纹的产生都有很大影响。除主平面不存在剪应力外,单元体其他方向的截面上均存在剪应力,而在与主平面成 45° 的截面上的剪应力达到极值,称主剪应力。同样,主剪应力及其作用面共有三组,且互相垂直。可以证明,如果 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, 则最大剪应力 $\tau_{\max} = \pm(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 。最大剪应力与材料的塑性变形关系很大。还有一个与塑性变形密切有关的量称等效应力 σ_i (或称应力强度), 其表达式为:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1-1)$$

等效应力不是真正作用在单元体某截面上的实际应力,而是衡量该点应力状态受载程度的一个指标。对整个受力的变形物体而言,外力增加称为加载,外力减小称为卸载。但对物体中某点来说,就不能简单根据外载荷的变化来判断,因为随着外载荷的变化,物体发生变形,物体内部各点的应力状态也随之变化,而相互之间的关系是复杂的,这时就应根据该点等效应力 σ_i 的变化来确定是加载还是卸载。如果在某瞬间 σ_i 是增大的,则认为该点是加载。反之,如果 σ_i 是减小的,则该点就是卸载。如果在加载过程中所有的应力分量均按同一比例增加,这种状况称为简单加载。简单加载时,三个应力主轴的方向是不会改变的,而应力应变的关系也得到简化。

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,也可找到一组坐标轴,使单元体各表面上剪应变为零,这样的坐标轴称应变主轴,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 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 ,按代数值大小排列为 $\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$ 。

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:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (1-2)$$

这就是塑性变形体积不变定律,它反映了三个正应变之间的相互关系。根据体积不变定律可知:塑性变形时只可能有三向应变状态和平面应变状态,而不可能有单向应变状态,即上式中 $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$ 时, ϵ_1 必然为零。在平面应变状态时(若 $\epsilon_3 = 0$),则另外两个应变绝对值必然相等,而符号相反(即 $\epsilon_1 = -\epsilon_2$)。

二、塑性条件

当物体中某点处于单向应力状态时,只要该点的应力达到材料的屈服极限,该点就进入塑性状态。可是对复杂的三向应力状态,就不能仅根据某一个应力分量来判断该点是否已经屈服,而要同时考虑其他应力分量的作用。只有当各个应力分量之间符合一定的关系时,该点才开始屈服,这种关系就称为塑性条件,或称屈服准则。

1864年法国工程师屈雷斯加(H·Trenscá)认为:材料中最大剪应力达到一定值时就开始屈服,称为屈雷斯加屈服准则,这就是最大剪应力理论,其数学表达式为:

$$\tau_{\max} = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right| = \frac{\sigma_s}{2} \text{ 或 } |\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_s \quad (1-3)$$

最大剪应力理论,虽然形式与试验结果基本相符,用于分析板料成形问题也有足够精度,但只考虑最大剪应力的作用(也即在三个主应力中忽略了中间主应力 σ_2 的作用),理论上有些欠缺。

1913年德国学者米席斯(Von Mises)提出另一塑性条件对此加以修正,他认为:当某点的等效应力达到一定值时,材料就开始屈服。这个准则称为米席斯屈服准则,数学表达式为:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (1-4)$$

实际上,米席斯准则与屈雷斯加准则之间差别很小,如果将式(1-4)中消去 σ_2 ,可得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s \quad (1-5)$$

式中: β ——与中间应力 σ_2 有关的系数。

通过计算可求出:当单向拉伸($\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$)、单向压缩($\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$)、双向等拉($\sigma_1 = \sigma_2 > 0, \sigma_3 = 0$)、双向等压($\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_3 < 0$)时, $\beta = 1$ 。纯剪($\sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$)、平面应变($\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$)时, $\beta = 1.155$ 。可以证明 β 值的变化范围为 $1 \leq \beta \leq 1.155$ 。在应力分量未知情况下, β 可取平均值1.1。

这两个屈服准则是塑性力学和金属塑性成形原理的理论基础,对冲压变形理论亦有重要指导意义。

三、塑性应力应变关系

物体受力产生变形,所以应力与应变之间一定存在着某种关系,物体在弹性变形阶段,应力与应变之间的关系是线性的,可逆的,弹性变形是可以恢复的,应力和应变之间是单值关系,与加载时间无关,即一点的应变状态仅仅取决于该点的应力状态,而与已经经历的变形过程无关。而塑性变形时应力应变关系则是非线性的,不可逆的,应力应变不能简单叠加。如图1-5所示为材料单向拉伸应力应变曲线,材料屈服后,应力应变不再是线性关系,加载时,应力应变关系沿ABC曲线变化,而在C点卸载时,则应力应变沿CD线变化,卸载后再加载时,此时应力应变沿CD线上升,而与初始加载时所经历的OABC路线不同,变形过程是不可逆的。且在同一个应力 σ 时,因为加载时间不同,应变也不同,可能是 ϵ' ,也可能是 ϵ'' 。因此在塑性变形时,应变不仅与应力大小有关,而且与加载时间有密切的关系。一般来说,塑性变形时,应力与全量应变 ϵ 之间不存在对应关系。为了建立物体受力与变形之间的关系,只能撇开整个变形过程,而取加载过程中某个微量时间间隔 dt 来研究。因此出现了应力与应变增量之间的关系式,称增量理论,其表达式为:

$$\frac{d\epsilon_1 - d\epsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{d\epsilon_2 - d\epsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{d\epsilon_3 - d\epsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (1-6)$$

式中: $d\epsilon_1, d\epsilon_2, d\epsilon_3$ ——主应变增量。

增量理论在计算上引起的困难很大,尤其材料有冷作硬化时,计算就更复杂了。为了简化计算,在简单加载时,可得出全量理论,其表达式为:

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (1-7)$$

在板料成形中,要严格满足简单加载条件是不现实的。实践证明:工程问题的分析计算,只要近似满足简单加载条件,使用全量理论是容许的,这将大大简化分析计算的过程。

利用全量理论分析可得出:

1) 当 $\epsilon_2 = 0$ 时,称平面应变(或称平面变形),由式(1-7)可得出 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 。宽板弯曲属这种情况。

2) 当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 时,由式(1-7)和利用体积不变条件 $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$,可得 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$,也就是说,当材料上三个主应力相等,即三向等拉或三向等压时,材料不产生塑性变形,仅有

弹性变形。

3) 当 $\sigma_1 > 0$, 且 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 时, 材料受单向拉应力作用。利用式(1-7)可得 $\epsilon_1 > 0$, 且 $\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\frac{\epsilon_1}{2}$, 也就是说, 当单向拉伸时, 在拉应力作用方向上为伸长变形, 其余两方向上为压缩变形, 且为伸长变形之半, 翻孔变形材料边缘属此类。同理对单向压缩变形, 即 $\sigma_3 < 0$, 且 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, 可以得出 $\epsilon_3 < 0$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = -\frac{\epsilon_3}{2}$, 即压应力作用方向为压缩变形, 其余两个方向为伸长变形, 且为压缩变形之半, 缩口变形材料边缘属此类。

4) 当 $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$, 且 $\sigma_3 = 0$ 时, 由式(1-7)得 $\epsilon_1 = \epsilon_2 > 0$ 和 $\epsilon_3 = -2\epsilon_1 = -2\epsilon_2$, 即当材料受两向等拉时, 拉应力方向上为拉伸变形。而在材料厚度方向为压缩变形, 其值为伸长变形的 2 倍。平板材料胀形时的中心部分就是双向等拉应力状态。

5) 当 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ 时, 由式(1-7)分析可知, 最大拉应力 σ_1 方向上的变形一定是伸长变形。而在最小拉应力 σ_3 方向上的变形一定是压缩变形。在两向拉应力作用下的胀形变形, 拉应力方向上的变形是伸长变形, 而厚度方向是压缩变形, 使材料变薄。

6) 当 $0 > \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 时, 由式(1-7)分析可知, 在最小压应力 σ_3 (绝对值最大) 方向上的变形一定是压缩变形。而在最大压应力 σ_1 (绝对值最小) 方向上的变形一定是伸长变形。

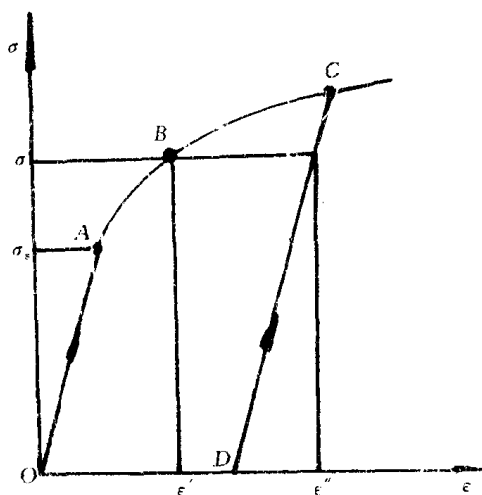


图 1-5 单向拉伸应力应变曲线

四、最小阻力定律

在塑性变形中, 破坏了金属的整体平衡而强制金属流动, 当变形的质点有可能沿不同方向移动时, 则每个质点沿最小阻力方向移动。这就是最小阻力定律。

从最小阻力定律可知, 金属在模具中进行变形时, 将沿最小阻力方向移动。如果受到模壁的阻止不能突破, 必然向模具的间隙处流动; 如果有向两个方向流动的可能时, 则首先充满阻力最小的部分, 然后再向阻力较大的方向流动。坯料在模具中变形, 其最大变形将沿最小阻力的方向。

最小阻力定律在冲压工艺中的灵活应用有实际意义。举例如下:

1) 压制环形零件(图 1-6), 如果采用单纯按零件尺寸展开的环形平板毛坯, 成形时由于外圈附近的材料拉入凹模的阻力要比内圈附近的材料拉入凹模的阻力大, 因此内圈材料容

易流入模腔,造成内圈边高不够的现象。设计工艺过程与毛坯时必须考虑这一因素。

2) 压制轮叉(图 1-7),如果按轮叉的实际形状展开毛坯〔图 1-7(b)所示的实线〕进行压制,则内外边材料变形的阻力大,成形时毛坯发生偏转,造成图 1-7(c)所示的结果。如果将毛坯修改为图 1-7(b)虚线所示的形状,并使毛坯内、外缘的弧长近似等于零件内、外缘的弧长,迎合材料的偏转倾向,使内外边阻力相当,就可得到边高相同的零件〔图 1-7(a)〕。

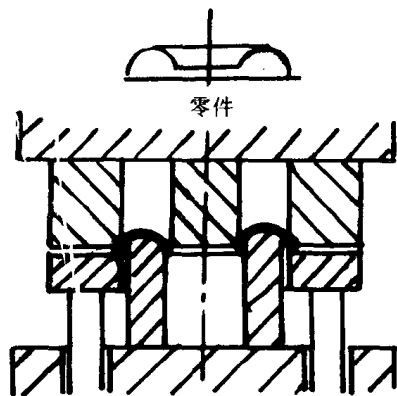


图 1-6 环形零件的引伸、翻边

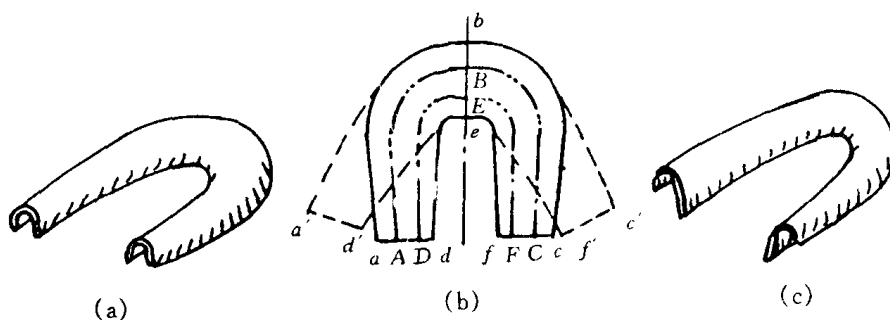


图 1-7 轮叉成形情况

思考题

1. 什么是塑性?
2. 塑性变形的物理本质是什么?
3. 金属塑性变形对组织和性能的影响是什么?
4. 利用全量理论分析可得出材料变形的哪几种情况?

第二章 冲裁及冲裁模设计

冲裁是利用安装在压力机上的模具,使材料产生分离的冲压工序。冲裁通常包括落料、冲孔、切边、切口、剖切、切断等多种工序。冲裁可以直接制成零件,也可以为弯曲、引伸、成形、冷挤压等工序准备毛坯。因此,冲裁的各工序在冲压生产中得到了广泛应用。

§ 2-1 冲裁变形过程分析及其断面特征

一、冲裁变形过程分析

冲裁时,板料在凸、凹模中间,由于压力的作用,凸模逐渐靠近凹模,使板料分离。分离过程是在瞬时完成的。冲裁变形过程如图 2-1 所示,一般经过如下三个阶段:

1) 弹性变形阶段。在凸模压力作用下,板料产生弹性压缩、弯曲变形等,并略微挤入凹模孔口,板料与凸、凹模接触处形成很小的圆角。凸模继续下压,板料的内应力达到弹性极限,此时凸模下的板料略有弯曲,凹模上板料则向上翘。材料愈硬,冲裁间隙越大,弯曲和上翘越严重。

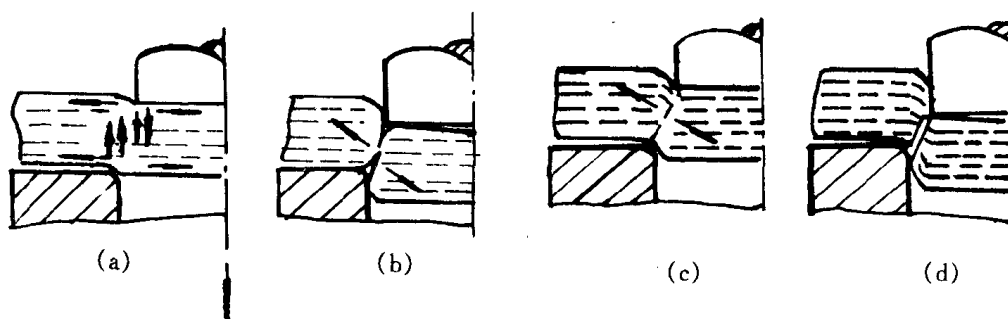


图 2-1 冲裁变形过程

2) 塑性变形阶段。在弹性变形阶段末期,凸模继续压入板料,材料内部的应力逐渐增加到材料的屈服极限时,板料进入塑性变形阶段,此时由于凸、凹模之间存在间隙,材料同时伴有弯曲和拉伸变形。随着变形程度的不断增大,凸模压入板料的深度增加,变形区内材料加工硬化也逐渐加剧,冲裁力相应增大,刃口处产生应力集中,直至凸模和凹模刃口处出现剪裂纹,冲裁力达到最大值时塑性变形阶段即告终止。由于凸模和凹模挤入金属板料产生塑性变形,因而分离后的断面是光亮的。塑性变形阶段剪裂纹的产生时间与材质、冲裁间隙有关。当冲裁间隙较小、材料塑性较高时,剪切裂纹的出现较迟。这是因为冲裁间隙小,变形区对拉应力的出现有抑制作用。相反,冲裁间隙较大,板料塑性较低,剪切裂纹的出现就会提前,光亮带也就变窄。

3) 断裂阶段。冲裁过程中,凸模压入金属板料进入塑性变形阶段后,应力达到剪切强度极限时,出现剪裂纹,而且剪裂纹不断向金属板料内部扩展。当凸模和凹模刃口处上、下剪裂