

高等学校教材

冷 温 挤 压

吴诗惇 主编

西北工业大学出版社

高等学校教材

冷 温 挤 压

吴诗惇 主编
尚保忠 唐才荣 编

西北工业大学出版社
1991年5月 西安

内 容 简 介

本书是根据1987年11月航空工业高等院校锻压专业教材小组所拟定的冷温挤压课程教学基本要求编写的。它主要介绍冷温挤压的基本理论、工艺特点、工艺计算、模具结构和模具设计。

本书共分十章。前八章为本书的主要部分。通过这八章的学习,就可以掌握并合理制订冷温挤压工艺及进行相应的模具设计。后两章是为了增加学生对有关问题的了解或扩充视野而编写的。

本书是航空工业高等院校锻压专业冷温挤压课程的教材,同时经全国高等学校《锻压工艺及设备》专业教学指导委员会同意,作为全国高等工科院校锻压专业推荐教材。此外,还可供有关工程技术人员和科学研究人员参考。

高等学校教材

冷 温 挤 压

主 编 吴诗惇

责任编辑 刘 红

责任校对 樊 力

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路127号)

陕西省新华书店发行

陕西省富平县印刷厂印装

ISBN 7-5612-0148-6/TB·3(课)

*

开本 787×1092 毫米 1/16 11.75 印张 284 千字

1991年5月第1版

1991年5月第1次印刷

印数: 1—1600册

定价: 3.10 元

601/09/22
19

前言

冷温挤压是一种少切削、无切削的先进工艺。从 60 年代以来在国内外发展非常迅速。

冷挤压的历史较长。自从 18 世纪末法国人把铅从小孔中挤出制成枪弹以来，已具有二百多年历史。1830 年在法国已经有人开始利用机械压力机，采用挤压方法制造铅管和锡管。1906 年在美国采用挤压方法来生产的黄铜西服袖扣。第一次世界大战中，曾用冲挤法来制造黄铜弹壳。至于钢的冷挤压，很久以来一直被认为是十分困难的，甚至认为是不可能的。这是因为钢在挤压时需要很大的挤压力，而在当时的条件下，还不可能解决大压力下的许多具体问题，特别是润滑问题。

对钢零件的冷挤压尝试，最早是在德国进行的。但因热粘模严重，没有获得成功。一直到 1930 年德国人发现可以采用磷酸盐对钢进行表面处理，解决钢的冷挤压润滑以后，钢的冷挤压才变为现实。第二次世界大战中，德国利用冷挤压方法来制造钢弹壳，使钢的冷挤压投入实用。第二次世界大战后，钢的冷挤压技术传到了美国，并得到较快的发展。但是直到 50 年代初期，冷挤压还只限于简单零件的生产。到 60 年代，形状比较复杂的汽车零件等才可以进行批量生产，从而扩大了钢冷挤压的使用范围。温热挤压是 70 年代才开始在生产中应用的。

在我国河北省怀来县出土的文物中，就有“红铜鎚胎薄细缶”的记载，这说明早在公元前 475 年到公元前 221 年我国已经出现了冷锻工艺。但由于长期的封建统治，使这种工艺没有得到发展。直到解放前夕我国的冷挤压技术还是极端落后，只有极少数工厂用铅、锡等软金属材料来挤牙膏管、线材或管材一类产品。

新中国成立后，冷挤压技术得到了较快发展。50 年代开始了铝、铜及其合金的冷挤压生产；60 年代初期发展了黑色金属的冷挤压生产。而且不少工厂还组织了专门化的生产。零件种类已发展到数百种，研究工作也十分广泛地开展起来。在温热挤压方面，也作出了可喜的成绩。

近年来，在现代化机械制造业中，采用冷温挤压生产方法越来越多，这是因为这种工艺具有节约原材料、能够得到强度高而刚性好的制件，且劳动生产率高、操作简单、可以加工形状较为复杂的零件等优点。此外，零件的表面粗糙度可达 $Ra = 0.8 \sim 0.4 \mu m$ ，公差等级在 IT7~IT8 级左右。

但是，冷挤压是在金属冷态下的变形，变形抗力较大，从而导致以下的缺点。即模具寿命较低、对设备要求较高。这就限制了尺寸大的零件或强度高的材料采用冷挤压工艺，也限制了冷挤压变形程度的提高。

热挤压工艺虽然可以使材料变形抗力小，但由于加热，产生氧化、脱碳及热膨胀等问题，使产品的质量不高。

70 年代初期发展起来的温热挤压工艺，一般是将毛坯加热到金属再结晶温度以下进行的挤压。毛坯的变形抗力减少，成形容易，设备的吨位降低，模具寿命得以提高，而且在低温范围内加热，氧化和脱碳的可能性小，产品的质量和冷挤产品相当。

冷温挤压具有原材料消耗低、产品机械性能高、生产率高、产品公差等级高以及表面粗糙度低等优点，在机械制造、汽车、电器、仪表、日用品以及航空工业中日益得到广泛的使用，因此在高等工科院校锻压专业教学中增加或选修冷温挤压课程是很必要的。

本书是根据 1987 年 11 月航空工业高等院校锻压专业教材小组所拟定的冷温挤压教学基本要求编写的。同时经全国高等工业学校《锻压工艺及设备》专业教学指导委员会同意，作为全国高等工科院校锻压专业推荐教材。

本书共十章。第一章主要介绍冷温挤压的基本概念、应力状态及其对挤压工艺的影响、挤压时金属的流动、附加应力与残余应力和挤压时的外摩擦；第二章主要介绍冷挤压的变形力、变形程度的表示方法以及影响变形力的主要因素；第三章主要介绍冷挤压常用材料、毛坯的制备、冷挤压毛坯的软化热处理和表面处理；第四章主要介绍冷挤压变形工序的制订；第五章主要介绍模具结构、模具零部件的设计、模具材料以及模具的失效及解决它的对策；第六章介绍组合凹模的设计、组合凹模的内径收缩量、组合凹模的半径比及过盈量的选择、组合凹模的组装工艺；第七章介绍各种冷挤压实例；第八章介绍温热挤压的特点、温度选择、毛坯加热、润滑、变形力、模具以及温挤零件的质量和实例；第九章介绍挤压工艺对设备的要求、挤压压力机的选择；第十章介绍静液挤压、等温挤压和高速挤压。本书最后还附有复习思考题和作业题。

本书由吴诗惇、尚保忠和唐才荣负责编写。具体分工如下：唐才荣（西北工业大学）负责编写绪论、第一章至第四章、第九章至第十章；尚保忠（南昌航空工业学院）负责编写第五章至第八章；全书由吴诗惇（西北工业大学）担任主编。

本书由西安交通大学模具研究室张子公审稿，并提出许多宝贵意见，我们在此深表感谢。

编 者

1990 年 10 月

目 录

第一章 冷温挤压的理论基础.....	1
§ 1-1 冷温挤压的基本概念	1
§ 1-2 主应力状态对挤压工艺的影响	2
§ 1-3 挤压时金属的流动	4
§ 1-4 附加应力与残余应力	12
§ 1-5 挤压时的外摩擦	14
§ 1-6 冷挤压对金属机械性能的影响	14
第二章 冷挤压的变形力.....	17
§ 2-1 影响冷挤压变形力的主要因素	17
§ 2-2 挤压变形程度的表示方法	20
§ 2-3 冷挤压的变形力	22
第三章 冷挤压材料及毛坯的制备.....	32
§ 3-1 适用于冷挤压的材料	32
§ 3-2 挤压常用材料	33
§ 3-3 挤压毛坯的制备	37
§ 3-4 挤压毛坯的软化热处理	42
§ 3-5 冷挤压毛坯的表面处理	44
第四章 冷挤压的变形工序.....	53
§ 4-1 冷挤压的许用变形程度	53
§ 4-2 冷挤压变形工序的制订	56
第五章 模具设计.....	62
§ 5-1 设计要素	62
§ 5-2 常用的几种模具结构	62
§ 5-3 模具的导向装置	67
§ 5-4 模具的卸件与顶出装置	69
§ 5-5 凸模的设计	71
§ 5-6 凹模的设计	73
§ 5-7 冷挤压模具材料	76
§ 5-8 常见的模具失效形式及对策	83
第六章 组合凹模的设计.....	89

§ 6-1 厚壁圆筒各点的应力与应变	89
§ 6-2 组合凹模的设计	92
§ 6-3 组合凹模内径的收缩量	110
§ 6-4 组合凹模合理半径比和压合过盈量的选择	112
§ 6-5 组合凹模设计需注意的事项	123
§ 6-6 组合凹模的组装工艺	124
第七章 冷挤压零件实例	125
§ 7-1 杆类零件的冷挤	125
§ 7-2 有台阶的空心件冷挤	128
§ 7-3 深孔薄壁件的冷挤	132
§ 7-4 锥形零件的冷挤	135
§ 7-5 带隔层的矩形薄壁件的冷挤	140
第八章 温热挤压	143
§ 8-1 温热挤压的技术特点	143
§ 8-2 温挤温度范围的选择	144
§ 8-3 温挤毛坯的加热	148
§ 8-4 温挤时的润滑	150
§ 8-5 温挤力的确定	151
§ 8-6 温挤模具	155
§ 8-7 温挤件的尺寸精度与机械性能	158
§ 8-8 温挤工艺实例	161
第九章 挤压压力机	169
§ 9-1 挤压工艺对压力机的基本要求	169
§ 9-2 压力机的选择	169
第十章 特种挤压工艺	172
§ 10-1 静液挤压	172
§ 10-2 等温挤压	173
§ 10-3 高速挤压	175
附录 复习思考题与练习题	177
参考文献	179

第一章 冷温挤压的理论基础

§ 1-1 冷温挤压的基本概念

冷温挤压是将挤压模具装在压力机上，利用压力机的往复运动，使金属在挤压模的型腔内发生塑性变形，从而获得所需的形状、尺寸和一定性能的零件的挤压方法。在一般情况下，毛坯并不加热，所以叫做冷挤压。近年来，对一些高强度难变形材料，例如不锈钢、高碳钢、耐热钢、钛合金以及镁合金等，采用把毛坯加热到再结晶温度以下挤压的方法。这种挤压仍具有少、无切削的优点，称做温热挤压，或者简称温挤。

挤压按照金属流动方向可分成三类：

正挤压：挤压时金属的流动方向与凸模的运动方向相同。正挤实心件如图 1-1 所示，其加工过程是：先将毛坯放在凹模内，凹模底部有一个与所制零件杆部形状尺寸相当的孔，然后用凸模去挤压毛坯。由于凸模压力作用，金属进入塑性状态，并强迫金属从凹模孔中流出，从而制成所需的零件。用此方法可以制造实心零件（采用实心毛坯），也可以制造空心零件（采用空心毛坯，如图 1-2 所示）。零件的断面形状可以是圆形、椭圆形、圆扇形、矩形或棱柱形，也可以制造等断面的不对称零件。

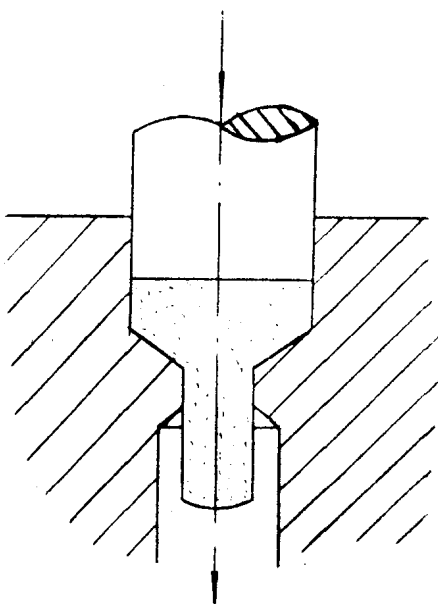


图 1-1 正挤压实心件

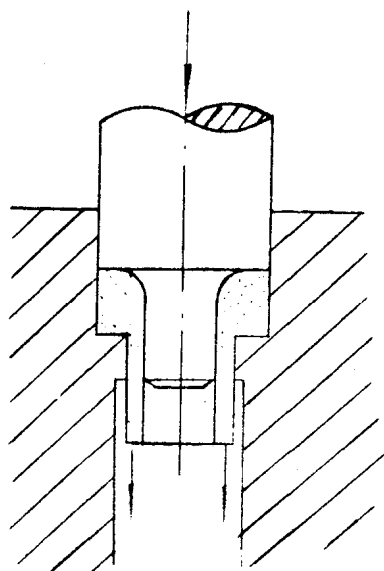


图 1-2 正挤压空心件

反挤压：挤压时金属的流动方向与凸模的运动方向相反。图 1-3 为反挤压杯形零件的情形。其加工过程是：把毛坯放在凹模底部，当凸模向毛坯加压时，金属便沿着凸模与凹模之间的间隙向上流动，从而制成所需的杯形零件。这种挤压方式可用于制造横断面是圆形、

方形、长方形、多层圆形、多格盒形的空心零件。

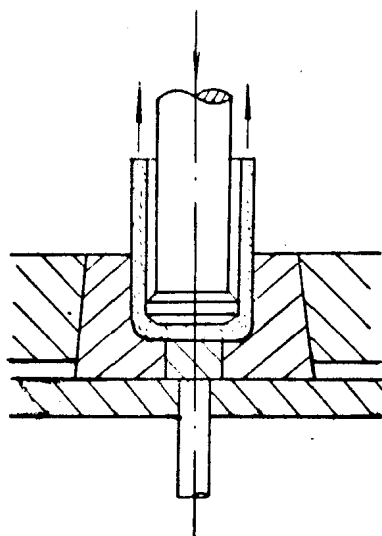


图 1-3 反挤压

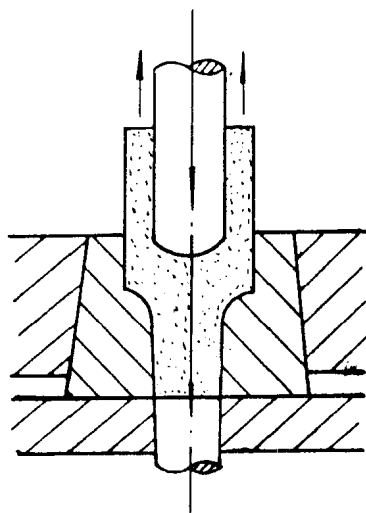


图 1-4 复合挤压

复合挤压：金属沿着凸模运动方向和相反方向同时流动的挤压叫做复合挤压（图 1-4）。这种挤压方式可用于制造横断面是圆形、方形、六角形、齿形等零件。

以上是挤压中应用最广的几种方法。它们的共同特点是金属流动方向都与凸模轴线平行，因此又统称为轴向挤压法。

此外还有径向挤压。这种挤压的特点是，挤压时，金属的流动方向与凸模的运动方向相垂直，如图 1-5 所示。径向挤压又分为离心和向心挤压两种，主要用于带凸肩的齿轮坯以及十字轴类零件。

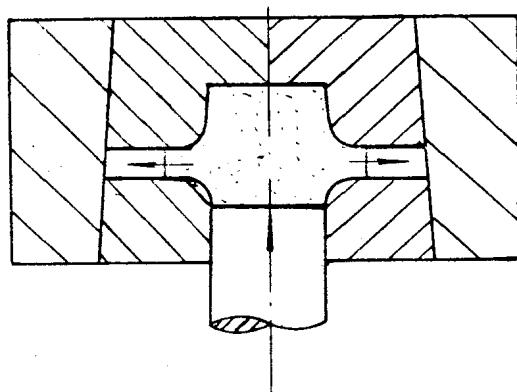


图 1-5 径向挤压

§ 1-2 主应力状态对挤压工艺的影响

冷挤压和其它压力加工方法一样，都是以金属的塑性变形为基础的加工工艺。所谓塑性就是指金属在外力的作用下，发生永久变形而又不破坏其完整性的能力。如果一种金属能够承受很大的塑性变形而不被破坏，就说明这种金属塑性很好；反之，就说明这种金属的塑性差。常用材料的延伸率和断面收缩率作为衡量塑性大小的指标。延伸率和断面收缩率越大，说明金属材料的塑性越好。

金属材料的塑性除了取决于材料本身的化学成分和组织状态（内因）以外，外界条件的影响也是很重要的，而应力状态就是影响金属塑性的最重要的外界因素。拉应力会降低材料

塑性，而压应力则会提高材料塑性。

压应力状态为什么可以提高金属塑性呢？其原因可以归纳如下：

(1) 压应力状态能遏止晶间相对移动，使晶间变形更加困难。这是因为晶间变形在没有任何再结晶和溶解沉积等修复机构时，会引起晶间破坏的积累，从而引起多晶体的迅速断裂。

(2) 压应力状态能促使破坏了的晶内和晶间联系得到恢复，能使微裂纹，甚至宏观组织缺陷得到修复（“焊合”）。

(3) 压应力状态能使金属内某些夹杂物的危害程度大为减少。金属内部夹杂物的存在，正如内部空洞一样，往往会形成应力集中。在压应力作用下，这种危害性大大减少。

(4) 压应力状态可以抵消或减小由于不均匀变形而引起的附加拉应力，因而减轻了附加拉应力所造成的破坏作用。

在主应力图中，压应力的作用越大（数目越多，数值越大），则塑性越好。根据塑性的大小，可将各种主应力图依次排列如图 1-6 所示。图中由序号 1 至序号 7 塑性逐渐降低。序号 3a 的塑性介于序号 3 和序号 4 之间，序号 5a 的塑性介于序号 4 与序号 5 之间。

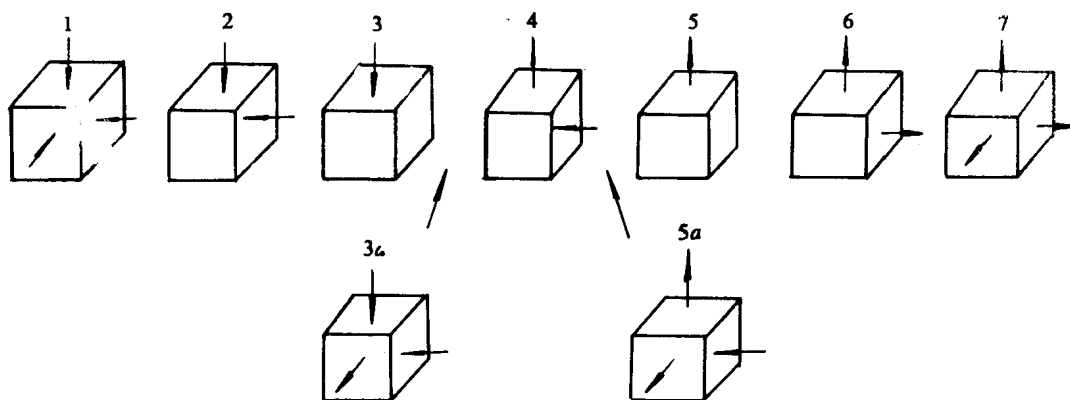


图 1-6 主应力对塑性的影响

(由序号 1 至序号 7 塑性逐渐降低)

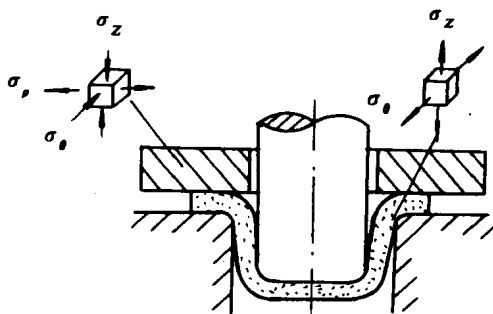


图 1-7 拉伸过程的应力状态

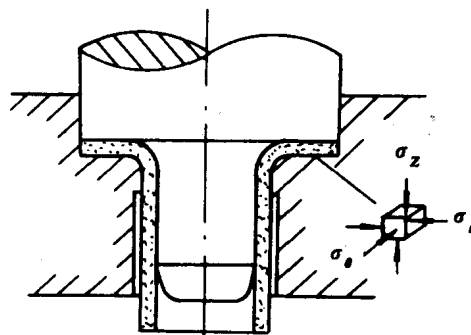


图 1-8 冷挤压的应力状态

在板料拉伸过程中（图 1-7），凸缘处的应力状态是两向压应力和一向拉应力，在拉伸件的壁部是双向拉应力。而挤压过程中（图 1-8），其基本应力状态是三向压应力状态，大

大提高了金属的塑性。因此如图 1-9 的纯铝零件，就可以用一道挤压工序来代替五道拉延工序。

还可以利用主应力状态对塑性的影响来解决冷挤压生产中的实际问题。图 1-10 是一个锡磷青铜的空心套管零件，在挤压过程中内孔产生了环状裂纹（图 1-11）。后用减小毛坯内孔尺寸的方法来获得强烈的径向压应力，这样既解决了内孔裂纹问题，又使内孔表面光洁。

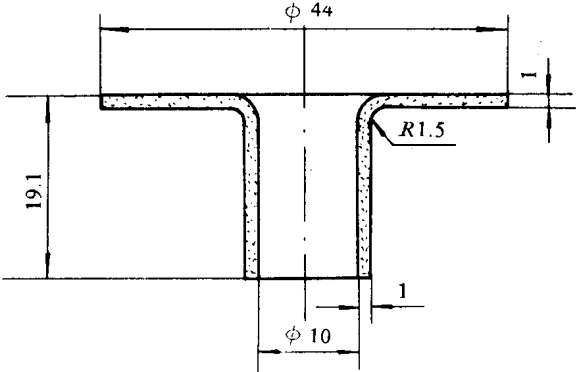


图 1-9 纯铝零件

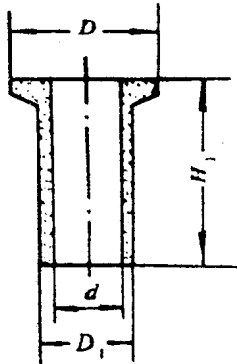
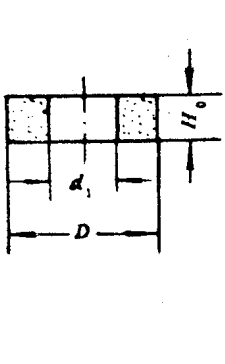


图 1-10 锡磷青铜冷挤压零件
左—毛坯 右—挤压件

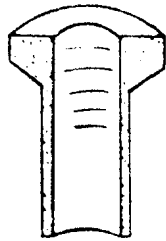


图 1-11 空心正挤压件的
内孔环状裂纹

§ 1-3 挤压时金属的流动

挤压过程中，金属的流动是不均匀的，外部摩擦、模具结构、零件的几何形状、材料的性能等，均会影响挤压时金属的流动。对于这个问题的深入研究，是正确制订挤压成形的工艺方案和模具设计的基础，也有助于保证挤压件的质量。

广泛用来研究金属流动的方法，主要有以下几种：坐标网格法、硬度法和低倍组织实验法，此外还有云纹法。其中坐标网格法是一种常用的简便方法。它是把圆形毛坯沿子午线剖切成两块半圆柱体，其中一块刻有深为 0.2~

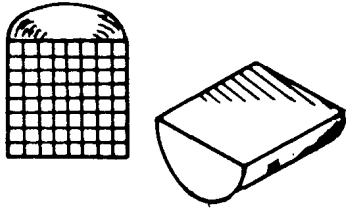


图 1-12 毛坯上的坐标网格

1.0mm, 面积为 $3 \times 3\text{mm}^2$ 的坐标网格, 如图 1-12 所示。坐标网格也可根据坯料的尺寸及变形程度的不同, 划成尺寸约在 5~20mm 的范围内的正方形或矩形。为了便于挤压后分开, 拼合面上涂有润滑油。某些对表面破坏有敏感反应的材料, 因划痕将破坏表面的塑性, 所以最好的方法是把试样表面抛光, 再涂上感光膜, 然后复上精确的坐标网格底片, 经过感光、冲洗后, 即得到精细的坐标网格。用坐标网格的方法可以将变形大的区域、变形流动困难的区域以及不均匀变形的状态明显地表示出来。

一、正挤压实心零件时金属的流动

首先, 应当分析一下正挤压时金属所受的作用力及应力状态。正挤压实心零件时, 金属的受力如图 1-13 所示。作用的外力是凸模对金属的正压力及凹模壁对金属的正压力, 此外还有金属和凹模、凸模间的摩擦力。

挤压时的应力状态是三向受压。正挤压时变形是两向压缩变形一向拉伸变形。

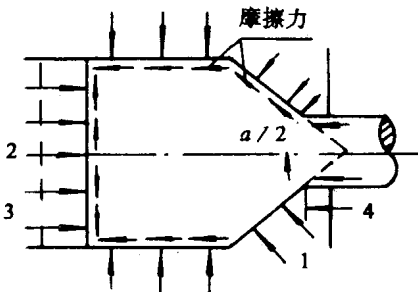


图 1-13 正挤压时的作用力

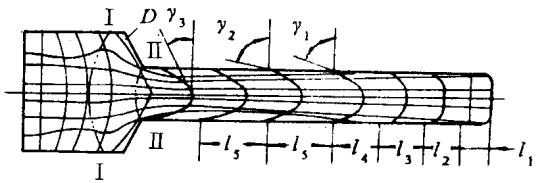


图 1-14 正挤压实心件时坐标网格的变化

1—凹模 2—凸模 3—凸模原始位置 4—工作带

图 1-14 是正挤压实心零件时坐标网格的变化情况。根据图上坐标网格的变化, 可以对金属的流动作如下分析:

(1) 横向坐标线在出口处发生了较大的弯曲, 且中心部分弯曲更剧烈, 这是由于凹模与被挤压金属表面之间存在着摩擦力和模具形状的影响, 使金属在流动时外层滞后于中心层的缘故。被挤压毛坯的端部横向坐标线弯曲不大, 这是由于该部分金属原来就处在凹模出口附近, 挤压时迅速向外挤出, 受影响较小的缘故。横向坐标线的间距从挤出部分的端部开始是逐渐增加的, 即 $l_3 > l_2 > l_1$, 这说明挤出金属的纵向拉伸变形愈来愈大; 当达到某定值 l_5 时, 间距 l_5 不再变化, 说明此时的变形已处于稳定状态。

(2) 纵向坐标网线在 I—I 断面处向中心线倾斜, 在 II—II 断面处又向反方向倾斜。I—I 线与 II—II 线之间所构成的区域为剧烈变形区。

(3) 在凹模出口转角 D 处, 在挤压过程中不参与流动, 称为金属“死区”。死区的大小受摩擦、凹模形状等因素的影响。摩擦越大、凹模锥角越大, 则“死区”也越大。

(4) 正方形坐标网格经过凹模出口后, 变成了平行四边形, 这说明金属除发生拉伸变形以外, 还有剪切变形。越接近外层剪切角 γ 值越大。这是由于外层金属受到摩擦阻力和凹模形状的影响较大, 使得内外层金属的流动存在着差异的缘故。另一方面, 挤出金属的端部 γ 角较小, 以后逐渐增大 ($\gamma_2 > \gamma_1$)。

二、正挤压空心零件的金属流动情况

空心件正挤压过程中,如图 1-15 所示,被挤金属除了受凹模工作表面的摩擦影响以外,还受到芯棒表面摩擦的影响,因而毛坯上的坐标横向线变为向下弯曲的曲线,不再有产生剧烈流动的中心区域,这说明正挤压空心件的金属流动比正挤压实心件均匀。在坯料较长时,变形区集中在凹模锥孔附近不大的高度上,金属在进入变形区以前或离开变形区以后,不发生塑性变形,仅作刚性的平移。

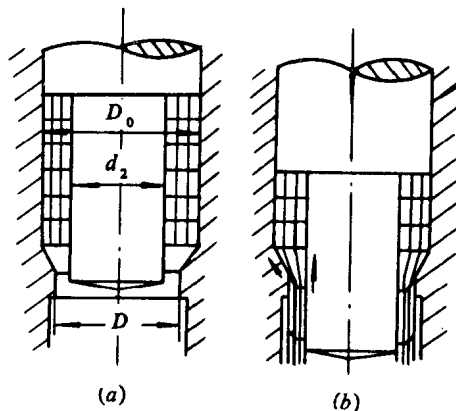


图 1-15 正挤压空心件的流动

三、反挤压时金属的流动

用实心毛坯反挤压杯形零件时,各阶段的金属流动情况,如图 1-16 所示。图中 (b) 表示高度大于直径的毛坯进入稳定变形状态时的金属流动情况。此时可将毛坯内部的变形情况分为三个区域: I 区为粘滞区,它紧贴着凸模端面,其变形极少,呈倒锥形。它的大小是根据挤压条件而变化的。影响粘滞区轴向尺寸的大小的基本因素是凸模端面和毛坯间的摩擦力。摩擦力大时,则不仅有明显的粘滞区,而且将产生强烈的变形不均匀情况。II 区为剧烈变形区,其厚度大约为 $0.7\sqrt{R-1}d_1$ ($R=D/d_1$, d_1 、 D 分别为杯形件的内、外径)。II 区以下部分则是不变形区。随着凸模不断向下运动,这部分金属逐步地被扩展进入变形区。当凸模下行到毛坯底部高度大于此界限尺寸时,尽管变形区内的金属产生了强烈的流动,但底部的一部分金属仍然保持原状,此时挤压过程是稳定变形的。但当凸模继续向下运动,毛坯余厚小于上述尺寸界限时,稳定变形遭到破坏,凸模下部的金属将全部参与变形,就出现图 1-16 (c) 所示的非稳定变形状态。III 区为刚性平移区。主要变形区的金属流动至形成杯壁后,就不再参与变形了,只是向上作刚性平移。

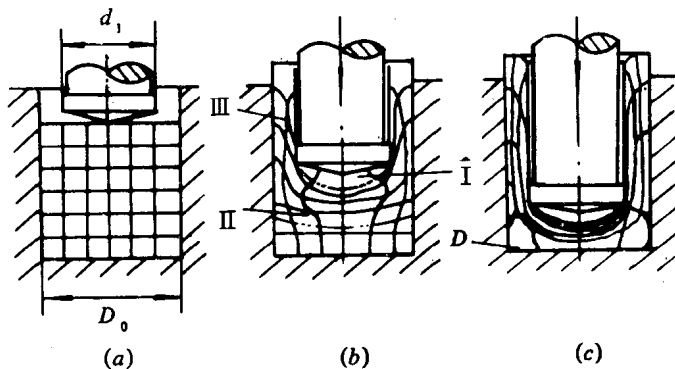


图 1-16 杯形件反挤压的流动情况

四、复合挤压时金属的流动

复合挤压时,坐标网格的变化情况如图 1-17 所示。其金属的流动情况比较复杂,对于杯-杆形件,它类似于反挤压杯形件与正挤压杆形件的结合,因此,上部金属材料流动情况

与杯形件反挤压相似，下部与正挤压实心件相似，但存在上、下流动的分流层（面）。对于杆-杆形和杯-杯形零件挤压时金属的流动，在主要变形区也存在分流面。由于模具结构、零件形状及外摩擦等因素的影响，分流面的位置不能用简单的方法来决定。

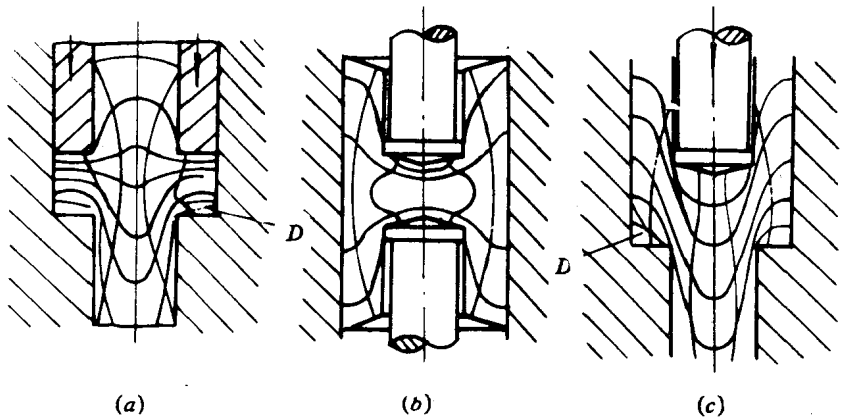


图 1-17 复合挤压时金属的流动情况

五、影响挤压时金属流动的主要因素

以下以正挤压为例，说明影响挤压时金属流动的主要因素。

1. 摩擦力的影响

摩擦对金属流动有很大的影响，以正挤压实心件为例，可以分为三种情况（图 1-18）：

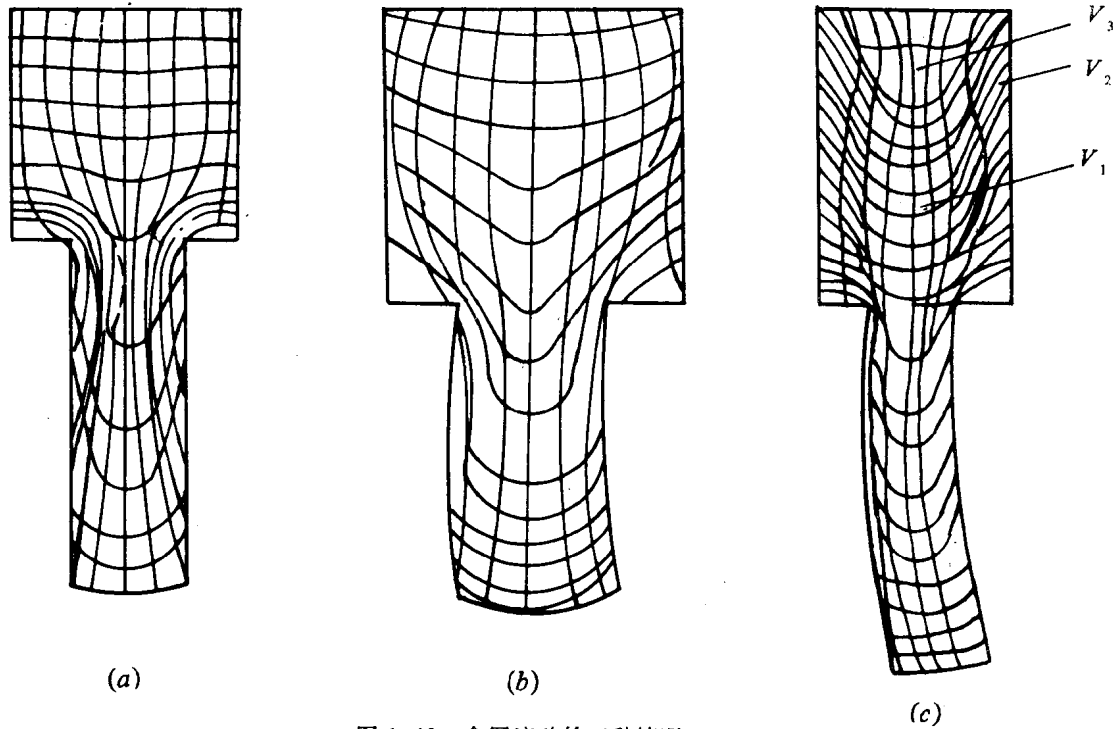


图 1-18 金属流动的三种情况

第一种如图 1-18 (a) 所示, 金属与凹模间的润滑良好, 这时摩擦力很小, 变形区集中在凹模出口附近, 金属流动比较均匀, 死角区也较小。第二种如图 1-18 (b) 所示, 润滑情况较差, 摩擦系数较大, 变形区扩大到整个体积, 内层金属有前滑的现象。这样金属流动形成内外两区 (图 1-18b), 外区受摩擦力的影响, (当然还有模具形状的影响), 使其流动速度比内区要慢。横向坐标线在整个凹模中都发生弯曲, 死角区也有所增加。第三种如图 1-18(c) 所示, 摩擦系数很大, 这时金属的流动很不均匀, 坐标网格有强烈的扭曲, 死角区很大。这时形成三个变形区 (图 1-18c)。 V_1 为中部的材料, V_2 为外层材料, V_3 为接近凸模部分的材料。在挤压过程中, V_1 部分的材料向外流出, V_2 区域内的材料流动方向与 V_1 相反, 一部分 V_2 内的金属流入 V_1 区域内, 另一部分则流入 V_3 区域内。

这三种挤压情况中, 以第一种最为理想, 因此, 希望模具的工作部分光洁度应尽量高, 并必须使用良好的润滑剂, 保证在挤压过程中摩擦系数减小, 使金属流动较为均匀。

2. 模具形状的影响

实践证明, 模具形状决定变形区的大小和形式, 直接影响挤压时金属的流动。正挤压凹模一般都具有中心锥角, 其大小直接影响金属流动的均匀性。中心锥角比较小时 (但不是很小), 金属流动也就比较均匀, 此时主要变形区集中在模口附近, 变形的死角区也较小。随着中心锥角的增大, 主要变形区的范围扩大, 金属内外层流动的不均匀性增加, 死角区也相应增加。当中心锥角较大时, 如果变形程度较大, 而润滑条件又不够理想, 这时中心层的金属流动很快, 使外层金属的流动远远落后于中心层。如果剩余坯料高度较小, 金属全部成为变形区, 则在摩擦力作用下, 外层金属可能非但不向下流动, 反而向上流动, 中心层金属则很快向下流动, 便形成反向涡流运动, 结果就产生了严重的缩孔缺陷 (图 1-19), 影响了产品的质量 (图 1-20)。应当指出: 如果增加凸模端面和金属间的摩擦, 可以减少金属在凹模内的涡流发生, 因而可能消除缩孔缺陷。从这一点来说, 摩擦力对于挤压工作并不完全都是有害的。

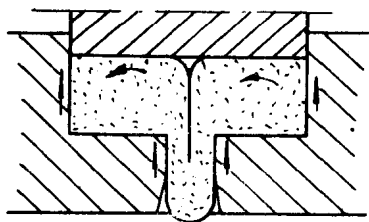


图 1-19 正挤压缩孔缺陷的产生

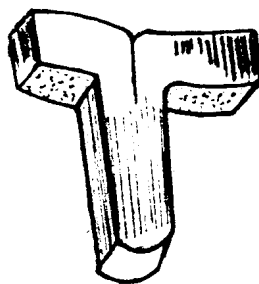


图 1-20 不锈钢零件的缩孔裂纹

3. 变形程度的影响

当其它条件相同时, 随着变形程度的增加, 其变形的不均匀性增加。

4. 毛坯尺寸和形状的影响

当毛坯的长度 H_0 与其直径 D_0 之比在 1~1.5 倍时, 变形的不均匀程度随长度的增加而增加; 但当超过 1.5 倍以后, 变形的不均匀程度不再增加。若毛坯横断面形状接近于凹模

孔的形状时, 其变形的不均匀程度将有所改善; 反之, 则会增加变形的不均匀程度。

综上所述, 金属在挤压时流动是不均匀的, 且影响其流动的因素也是多方面的, 因而各个部位变形也不均匀。通常在开始阶段, 由凹模内挤出的金属实际变形程度较小, 以后逐渐增大。此外, 沿断面各点实际变形程度也是不均匀的。这一点很容易从冷挤压零件的纵剖面的硬度分布清楚地得到证明。

六、中心缩孔缺陷的预测方法①

近年来, 在使用上限分析法和刚塑性有限元法预测挤压成形缺陷方面, 已经获得不少新进展。但是这些方法, 常常计算复杂、耗费计算机机时很多。下面使用的近似主应力法则便于工程技术人员使用。

主应力法是将处于某一挤压变形阶段的金属变形体分为几个单元, 并假设变形体内已形成一缺陷尺度为 R_c 的中心缩孔 (如图 1-21 所示)。根据不同单元的特点, 可分为不变形的刚性单元和变形单元两类。

对于刚性单元, 只存在静力平衡, 即

$$\sum F_z = 0 \quad (1-1)$$

式中 F_z ——轴向静力分量。

对于变形单元, 运用主应力法应满足静力平衡和塑性条件:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_R &= 0 \\ f(\sigma_{ij}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 F_R ——径向静力分量;

σ_{ij} ——应力张量分量。

联解方程组(1-2), 并引入边界条件, 可得作用于挤压凸模与变形金属接触面上的正应力分布:

$$\sigma_z = f_1(X', R_c)$$

式中 X' 是除 R_c 外的其它给定工艺参数, σ_z 、 R_c 可参见图 1-21、图 1-23。因此, 作用于挤压凸模上的挤压力 P 为

$$P = \int \sigma_z \cdot 2\pi r \cdot dr$$

根据最小能量原理和极值原理, 可得中心缩孔缺陷形成的必要条件是

$$\left. \frac{\partial P}{\partial R_c} \right|_{R_c \rightarrow 0^+} \leq 0$$

即

$$f_3(X', R_c) \leq 0 \quad (1-3)$$

求解式(1-3)可得缺陷形成时的临界坯料相对余厚 T_{cri}/R_0 值, 且 T_{cri}/R_0 应满足约束

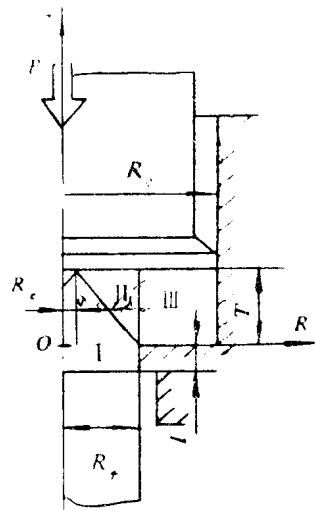


图 1-21 轴对称正挤压时单元的划分

①本节是编者请西北工业大学李森泉同志根据文献[30]改写的。

条件, 即式 (1-4a)、(1-4b)

$$0 \leq T_{cri} / R_0 \leq 1.0 \quad (T / R_0 \geq 1.0) \quad (1-4a)$$

$$0 \leq T_{cri} / R_0 \leq T / R_0 \quad (T / R_0 < 1.0) \quad (1-4b)$$

中心缩孔一般发生在变形的较晚阶段。因此, 按图 1-21 所示划分轴对称正挤压形成中心缩孔时的单元。单元 I 是刚性单元, 不发生塑性变形 (如图 1-22 所示)。根据静力平衡方程可得 σ_n 为

$$\sigma_n = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left[\frac{2mR_f l}{R_f^2 - R_c^2} + \frac{T}{R_f - R_c} \right] \quad (1-5)$$

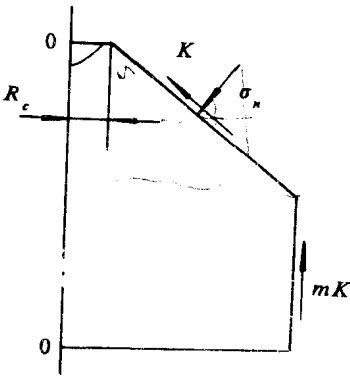


图 1-22 刚性单元 I

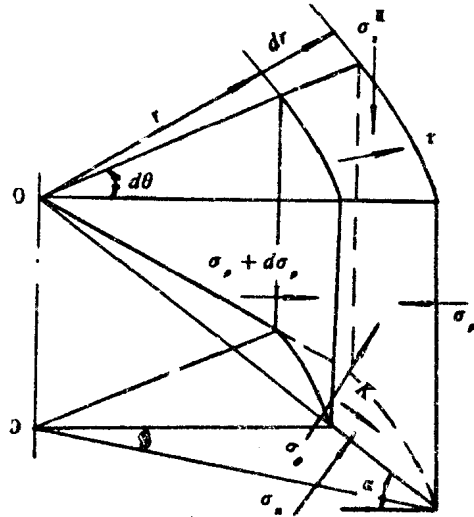


图 1-23 变形单元 II 之微元体

单元 II 是变形单元, 取其微元体如图 1-23 所示。采用圆柱坐标系, 可得静力平衡方程

$$\begin{aligned} & (\sigma_r + d\sigma_r) r \cdot \frac{T}{R_f - R_c} \cdot r d\theta + 2\sigma_\theta \frac{2r + dr}{2} \cdot \frac{T}{R_f - R_c} dr \cdot \sin \frac{d\theta}{2} \\ & + \sigma_n \cdot r dr \cdot d\theta \cdot \frac{T}{R_f - R_c} + K \cdot r \cdot dr \cdot d\theta + \tau \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \\ & - \sigma_r (r + dr)^2 \cdot \frac{T}{R_f - R_c} \cdot d\theta = 0 \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 $\tau = mk$, k 为材料的剪切强度, σ_r 如图 1-23 中所示, 且应满足塑性条件

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \bar{\sigma} \quad (1-7)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 为材料的瞬时平均流动应力。

整理式 (1-6), 略去高阶无穷小量, 并代入式 (1-7) 可得