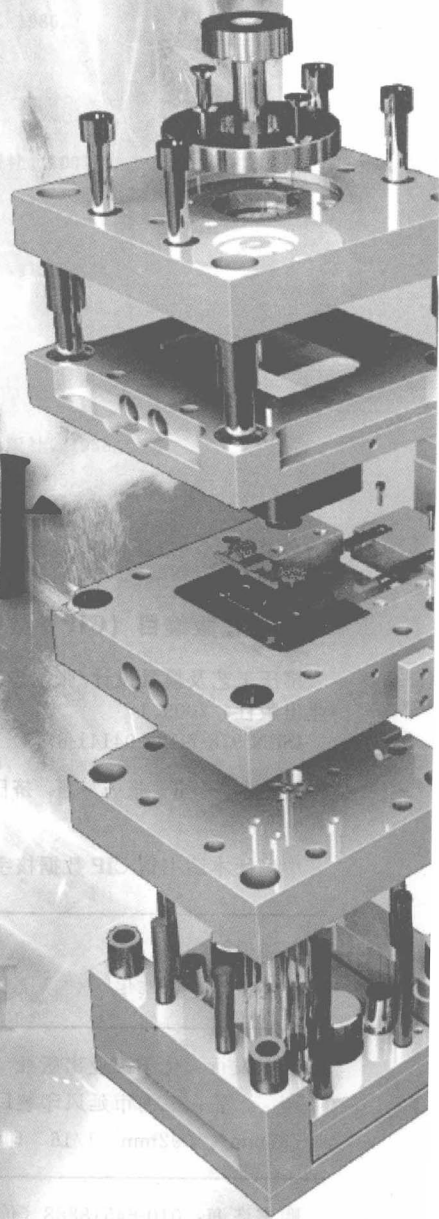


上海市重点学科建设项目资助

上海工程技术大学重点学科资助

挤压工艺 及模具设计

张水忠 编著



化学工业出版社

·北京·

元 00.28 册 3

前 言

挤压工艺是一种优质、高效、低消耗的少无切屑加工工艺，在汽车、机械、轻工、航空航天、军工、电器等制造领域得到越来越广泛的应用。挤压技术，作为一种先进的制造技术，在目前原材料价格不断上涨、市场竞争日趋剧烈的情况下，开拓了进一步研究和推广应用的广阔前景。从某种意义上说，挤压技术的发展程度是衡量一个国家制造业，甚至工业现代化水平高低的一个重要标志。

挤压工艺与模具设计方面的内容非常丰富，牵涉的知识面很广，只有较全面透彻地掌握这方面的知识，才能有效地胜任挤压工艺和模具设计的工作。编者长期从事挤压工艺与模具设计的教学和科研工作，为了满足教学上的进一步要求以及适合工业发展新形势的需要，总结了近年来挤压工作实践中的经验及科研成果，编写了本书。

本书在编写过程中，注意到挤压技术具有理论性强、技术含量高的特点，对塑性成形及模具设计的一些基本概念和理论进行了必要的叙述与推导，同时又注意到内容的精练，便于读者理解与掌握。本书注重应用性与实用性，较详细地介绍挤压工艺与模具设计的方法及设计实例，书中提供了较多的图表和设计资料，以供读者学习后能熟悉编制挤压工艺规程和设计挤压模具，获得初步解决挤压实际问题的能力。在内容编写上，主要以叙述冷挤压工艺及模具设计为主，同时兼顾到温挤压知识的介绍；在挤压零件的材质上，以叙述钢的挤压为主，同时也介绍了有色金属的挤压。考虑到挤压技术的迅猛发展，对挤压模具材料、挤压设备、挤压的新技术和新工艺也进行了必要的介绍。

本书编写过程中得到上海市重点学科建设项目资助（项目编号：J51402）和上海工程技术大学重点学科资助（项目编号：No. xk0705），在此一并致谢。

由于编者水平和经验有限，书中不足之处，请广大读者予以批评指正。

张水忠

2008年10月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 挤压的基本类型	1
第二节 挤压工艺的特点	3
一、降低原材料的消耗	3
二、提高生产效率	3
三、可获得较高尺寸精度及较小表面粗糙度值的零件	4
四、可加工复杂形状零件	4
五、提高挤压零件材料的力学性能	4
六、扩大了材料塑性加工成形范围	5
第三节 挤压技术的发展历史及展望	5
第二章 挤压的基本原理	8
第一节 挤压时的金属流动规律	8
一、正挤压实心件的金属流动	8
二、正挤压空心件的金属流动	9
三、反挤压杯形件的金属流动	9
四、复合挤压件的金属流动	10
第二节 挤压变形的应力应变	11
一、挤压变形时应力应变状态的分析	11
二、挤压变形程度的表示方法	12
第三节 挤压变形的附加应力与残余应力	14
一、附加应力	14
二、附加应力产生的原因	14
三、残余应力	15
四、附加应力和残余应力的危害	15
五、防止和消除附加应力和残余应力的方法	15
第四节 挤压对金属组织和性能的影响	16
一、对金属组织的影响	16
二、对力学性能的影响	17
第三章 挤压坯料的制备	20
第一节 挤压常用材料	20
一、对冷挤压原材料的要求	20
二、冷挤压常用材料	22
三、冷挤压常用原材料的形态	22
第二节 挤压坯料的制备方法	23
一、坯料形状和尺寸	23

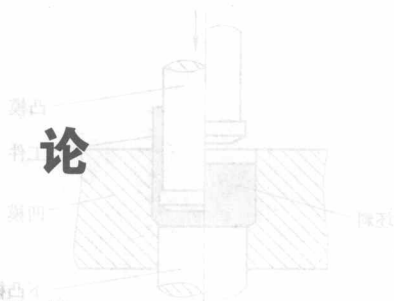
二、坯料制备方法	26
第三节 冷挤压坯料的软化处理	28
第四节 冷挤压坯料的表面及润滑处理	30
一、坯料表面处理	30
二、坯料润滑处理	32
第四章 冷挤压压力的计算	35
第一节 冷挤压时挤压力的变化规律	35
第二节 影响单位挤压力的因素	36
一、挤压材料的化学成分及力学性能的影响	36
二、变形方式的影响	38
三、变形程度的影响	38
四、挤压速度的影响	40
五、模具几何形状的影响	40
六、坯料相对高度的影响	41
七、坯料润滑状态的影响	42
第三节 冷挤压压力的计算	43
一、冷挤压力的计算公式	43
二、单位挤压力的理论计算法	43
三、单位挤压力的经验公式计算法	47
四、单位挤压力的图算法	49
第五章 冷挤压变形工序设计	57
第一节 冷挤压零件的分类	57
第二节 冷挤压零件图设计	60
第三节 冷挤压的许用变形程度	63
一、影响许用变形程度的因素	63
二、不同材料的许用变形程度	63
第四节 冷挤压件的精度	67
一、挤压件的尺寸精度	67
二、冷挤压件的形状精度	69
三、冷挤压件的表面粗糙度	71
第五节 冷挤压变形工序设计	72
一、制定冷挤压变形工序的原则	72
二、挤压工序数目的确定	72
三、工序的选择及排列次序的确定	73
四、中间预成形工序设计	74
五、挤压工序设计	79
六、辅助工序设计	80
第六节 冷挤压零件变形工序设计实例	80
一、轴类零件	80
二、中空零件	81

三、凸缘类零件	82
四、齿形类零件	85
五、锥形件	90
第六章 冷挤压模具设计	95
第一节 冷挤压模具结构分析	95
一、冷挤压模具的特点	95
二、冷挤压模具分类	95
第二节 模具工作部分零件设计	101
一、正挤压模具工作部分零件设计	101
二、反挤压模具工作部分零件设计	104
三、反挤凸模与凹模制造尺寸与公差	108
第三节 卸料和顶出装置设计	109
一、卸料装置	109
二、顶出装置	109
第四节 压力垫板设计	112
一、压力垫板的作用	112
二、压力垫板的设计计算	112
第五节 导向装置设计	113
一、导向方法	113
二、导柱导套导向装置	114
第六节 凸模与凹模的紧固方法	115
一、凸模的紧固方法	116
二、组合凹模紧固方法	116
第七章 预应力组合凹模设计	117
第一节 预应力组合凹模的优越性	118
一、整体式凹模受力分析	118
二、预应力组合凹模受力分析	120
第二节 组合凹模优化设计的理论计算	123
一、两层组合凹模	123
二、多层组合凹模	128
三、三层钢制组合凹模优化设计的理论计算公式	132
第三节 组合凹模优化设计的图算法	133
一、两层组合凹模	133
二、三层组合凹模	134
第四节 组合凹模尺寸的简便算法	137
一、凹模形式的确定	137
二、组合凹模各圈尺寸确定	137
三、组合凹模径向过盈量 μ 与轴向压合量 C 的确定	137
第五节 组合凹模的压合工艺	139
第八章 冷挤压模具材料	141

第一节	冷挤压对模具材料的要求	141
第二节	常用模具材料	142
一、	冷挤压模具工作零件常用材料	142
二、	冷挤压模具钢的锻造与热处理工艺	147
三、	冷挤压模具其他零件材料的选用	156
第九章	冷挤压设备的选择	157
第一节	冷挤压工艺对挤压设备的要求	157
一、	冷挤压变形力-行程曲线图	157
二、	冷挤压工艺对挤压设备的要求	158
第二节	冷挤压设备的选用	159
一、	两种冷挤压设备的比较	159
二、	设备的主要技术参数	160
三、	压力机吨位的选择	161
第三节	主要冷挤压设备介绍	162
一、	专用冷挤压设备	163
二、	非专用冷挤压设备	168
第十章	温挤压技术	171
第一节	温挤压概述	171
第二节	温挤压温度的确定	172
一、	温度对材料变形抗力的影响	172
二、	温度对金属塑性及组织的影响	175
三、	温度对金属氧化的影响	176
四、	温度对产品性能的影响	177
五、	温度对模具强度的影响	177
第三节	温挤压坯料的加热和模具的预热	178
一、	坯料的体积与尺寸	178
二、	坯料加热方法	178
三、	模具的预热和冷却	180
第四节	温挤压的挤压力计算	180
一、	影响温挤压力的因素	180
二、	温挤压压力计算	182
第五节	温挤压的润滑	185
一、	对温挤压润滑剂的要求	185
二、	适宜于温挤压润滑剂的基本材料	186
三、	温挤压润滑剂的选用	187
第六节	温挤压模具	188
一、	温挤压模具的结构特点	188
二、	温挤压模具材料	190
三、	凸、凹模设计	191
第七节	温挤压工艺实例	192

10.1.1	一、45# 钢杯套	192
10.1.2	二、奥氏体不锈钢壳体	193
10.1.3	三、定位偏心轮轴	195
11	第十一章 挤压工艺规程编制	197
11.1	第一节 挤压工艺规程编制的内容	197
11.2	第二节 典型零件的挤压工艺规程的编制	199
11.2.1	一、汽车发动机活塞销	199
11.2.2	二、轴承钢花键轴套	200
12	第十二章 挤压新技术新工艺	203
12.1	第一节 静液挤压	203
12.1.1	一、概述	203
12.1.2	二、静液挤压的方法及应用	204
12.1.3	三、静液挤压工艺参数	205
12.1.4	四、静液挤压模具	206
12.2	第二节 等温挤压	207
12.2.1	一、坯料梯温加热等温挤压	207
12.2.2	二、控制挤压速度等温挤压	208
12.3	第三节 其他挤压工艺	208
12.3.1	一、连续挤压	208
12.3.2	二、复合材料挤压	211
12.3.3	三、多坯料挤压	214
	参考文献	215

第一章 绪 论



第一节 挤压的基本类型

挤压就是通过固定在压力机上的凸模，对模具模腔中的金属坯料施加压力，使之产生塑性变形，以获得所需形状、尺寸以及具有一定力学性能的零件的一种加工方法。显然，挤压是靠模具来控制金属材料的流动，以金属体积的大量转移来成形零件的一种塑性加工工艺。

挤压成形的速度范围较广，既可以在专用的挤压机上进行，也可以在一般的机械压力机、液压机、摩擦压力机甚至高速锤上进行。

根据变形前坯料所处的温度状态，挤压可分为冷挤压、温挤压和热挤压三种。

冷挤压是在金属材料处于回复温度下所进行的挤压，一般金属材料的冷挤压指的是室温状态下所进行的挤压。

温挤压是在金属材料处于再结晶温度以下，回复温度以上的某个适当温度范围内所进行的挤压。对于黑色金属而言，可以 600°C 为界，划分为低温温挤压和高温温挤压。

热挤压是在金属材料加热到再结晶温度以上某个温度范围内所进行的挤压。黑色金属的热挤压温度一般在 1100°C 左右。

冷挤压是在金属材料处于室温状态下所进行的挤压，由于具有一系列的优点，在生产各个领域内得到广泛的应用。

根据挤压过程中金属流动方向与凸模运动方向之间的关系，可将挤压分为以下几种类型。

(1) 正挤压 挤压时金属材料的挤出方向与凸模运动方向相同。正挤压可分为实心件正挤压 [图 1-1 (a)] 和空心件正挤压 [图 1-1 (b)]。挤压件断面的形状可以为圆形，也可以

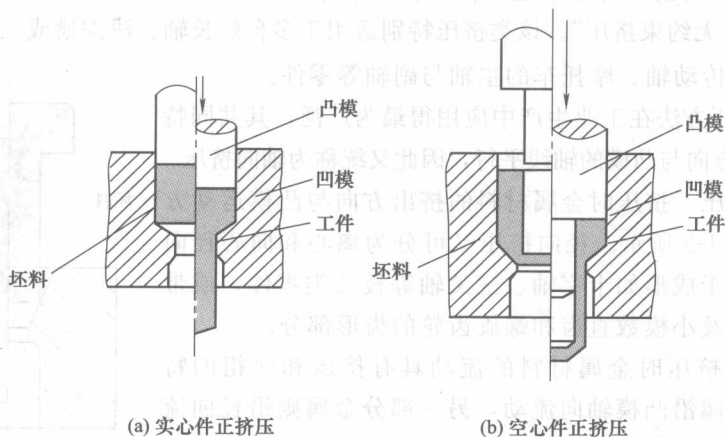


图 1-1 正挤压

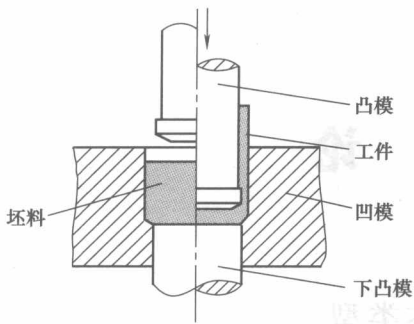


图 1-2 反挤压

为非圆形。正挤压可以制造螺钉、芯轴、双水内冷发电机水冷接头、管子等零件。

(2) 反挤压 挤压时金属材料的挤出方向与凸模运动方向相反，如图 1-2 所示。反挤压适合于成形断面为圆形、矩形、“山”字形、多层圆形、多格盒形等空心件。仪表罩壳、万向节轴承套、连杆衬套、缝纫机梭心、微电机机壳等零件均可采用反挤压来成形。

(3) 复合挤压 挤压时一部分金属材料的挤出方向与凸模运动方向相同，另一部分金属材料的挤出方向则与凸模运动方向相反，是正挤压和反挤压的复合，如图 1-3 所示。复合挤压适合于成形断面为圆形、方形、六角形、齿形等的双杯类、杯-杆类、杆-杆类挤压件。汽车活塞销、启动齿轮、缝纫机梭壳、铝牙膏壳等零件适用于复合挤压来成形。

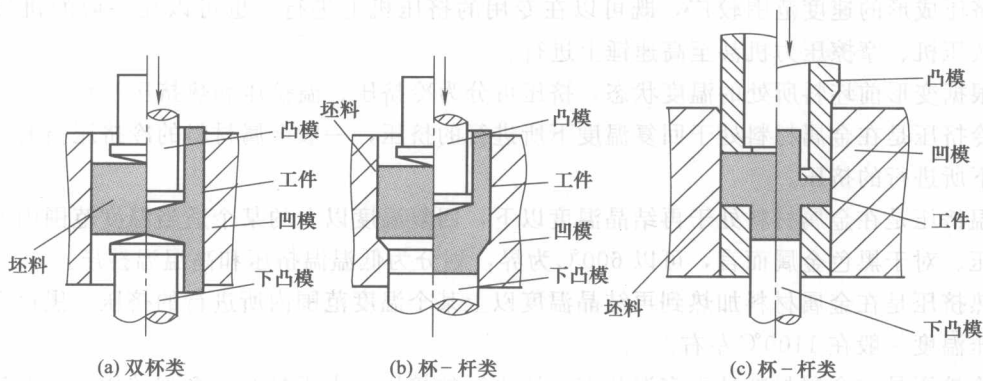


图 1-3 复合挤压

(4) 减径挤压 它是一种变形程度较小的变态正挤压，坯料断面仅作轻度缩减，如图 1-4 所示。减径挤压主要用于制造直径差不大的阶梯轴类挤压件，还可用于深孔薄壁杯形件的修整。由于减径挤压的挤压力小于坯料传力杆部的屈服力，因此模具可以为开放式，也可称为“开式挤压”或“无约束挤压”。该类挤压特别适用于多台阶长轴、浅沟槽或三角形齿花键轴的成形，如汽车的传动轴、摩托车的主轴与副轴等零件。

上述四种挤压方法在工业生产中应用得最为广泛，其共同特点就是金属挤出方向与凸模的轴线平行，因此又统称为轴向挤压。

(5) 径向挤压 挤压时金属材料的挤出方向与凸模运动方向相垂直，如图 1-5 所示。径向挤压又可分为离心和向心径向挤压两种，可用于成形如十字轴、三叉轴等枝叉类零件，或带凸肩的齿轮坯以及小模数直齿和螺旋齿轮的齿形部分。

(6) 镦挤 挤压时金属材料的流动具有挤压和镦粗的特点，即一部分金属沿凸模轴向流动，另一部分金属则沿径向流动，如图 1-6 所示。该方法主要用于制造带凸缘和粗腰形的杆类挤压件。

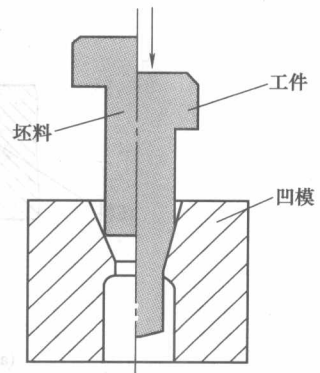


图 1-4 减径挤压

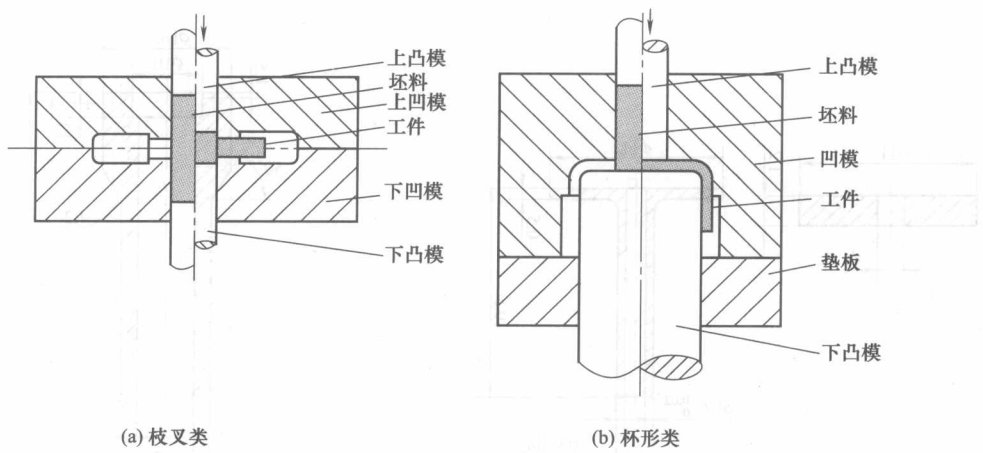


图 1-5 径向挤压

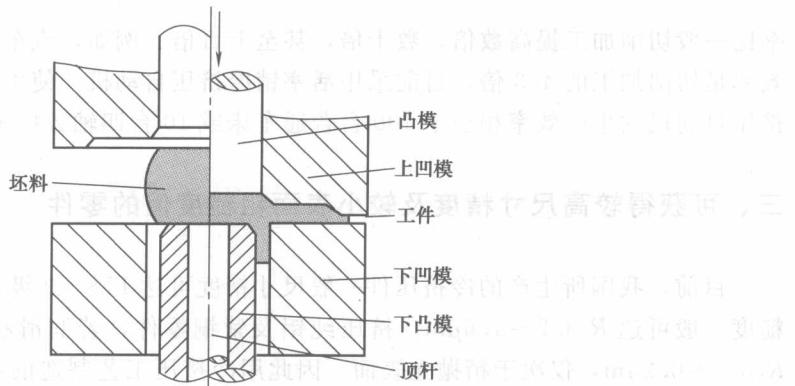


图 1-6 镦挤

第二节 挤压工艺的特点

一、降低原材料的消耗

挤压是在不破坏金属的前提下，靠金属材料的塑性转移来成形所需形状及尺寸的零件。这样就避免了切削加工所产生的大量金属切屑，大大地节省了金属原材料。如图 1-7 所示是通讯器材中纯铁底座，采用冷挤压工艺来替代车削工艺，原材料可节省 90%。如图 1-8 所示为双水内冷汽轮机发电机水冷接头零件，材料为 1Cr18Ni9Ti，采用冷挤压工艺，材料消耗为原来切削加工工艺的 1/2。

二、提高生产效率

采用挤压工艺来生产零件的效率是非常高的，特别是对于大批量生产的零件，其生产效

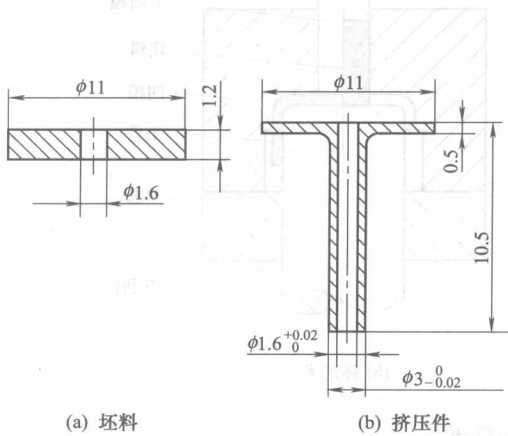


图 1-7 纯铁底座

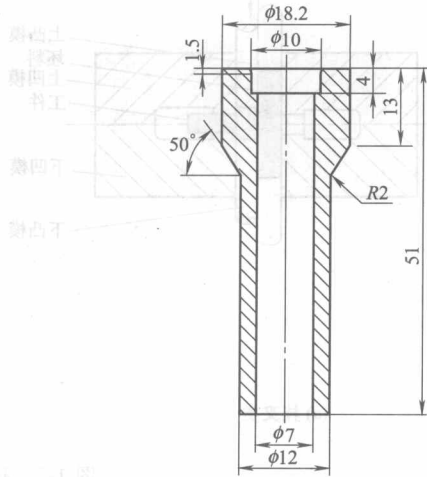


图 1-8 水接头

率比一般切削加工提高数倍，数十倍，甚至上百倍。例如，汽车活塞销用冷挤压方法生产的效率是切削加工的 4.3 倍，目前采用活塞销冷挤压自动机，使生产效率进一步提高。一台冷挤压自动机的生产效率相当于 100 台普通车床或 10 台四轴数控车床的生产效率。

三、可获得较高尺寸精度及较小表面粗糙度值的零件

目前，我国所生产的冷挤压件一般尺寸精度可达 IT8~9 级，最高可达 IT7 级，表面粗糙度一般可达 $R_a 3.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。挤压纯铝及紫铜零件，若润滑状态理想，表面粗糙度可达 $R_a 0.4 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ，仅次于精抛光表面。因此用冷挤压工艺制造的零件，表面有时不需要再加工，或仅仅只需磨削加工。

四、可加工复杂形状零件

有些复杂形状的零件，采用机加工方法来成形既费时又费料，甚至无法加工成形，如异形截面、内齿、花键轴、异形通孔及盲孔等，而采用冷挤压加工却很方便。

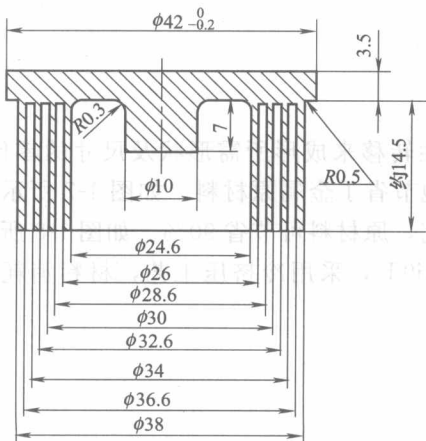


图 1-9 纯铝电容器

如图 1-9 所示的纯铝电容器，外形复杂、尺寸小、要求高，用切削加工非常麻烦，尺寸精度要求不易保证，且费时费料，采用冷挤压工艺则可一次挤出符合要求的零件。

五、提高挤压零件材料的力学性能

零件采用切削加工成形，其内部的纤维往往被切断，从而降低零件的使用寿命。在冷挤压过程中，金属材料在三向压应力状态下进行塑性成

形，成形后材料组织致密，纤维流向连续。同时，由于冷挤压后材料产生了冷作硬化，使挤压件的强度大为提高，从而提供了用低强度钢来替代高强度钢的可能性。例如，我国以前采用 20Cr 材料，用切削加工方法生产活塞销，而改用冷挤压方法来生产，则需用 20 钢就可以满足零件的使用要求。经测试，其各项力学性能指标，冷挤压方法生产的产品均优于切削加工的。

六、扩大了材料塑性加工成形范围

由于挤压时，材料处于三向压应力状态，其塑性可得到较大的提高，因此由材料塑性所决定的变形程度亦可大为提高。如 20 钢的正挤压变形程度可达 86%；反挤压可达 74.5%；铝及铝合金则可达 95% 以上，这是其他塑性成形方法无法达到的。因此，一次挤压成形往往能代替数道拉深、冷镦或模锻等复杂工艺过程。这样便可简化生产，缩短加工流程，并且一些难以成形的脆性材料如钛合金、铸造铜合金等都能采用挤压方法来成形较复杂形状的零件。

从以上诸多特点可以看出，挤压技术与目前各种加工方法相比较，具有诸多突出的优越性。因此挤压技术，尤其是冷挤压技术在各个生产领域代替切削加工、锻造、铸造和拉深工艺，得到越来越广泛的应用。

第三节 挤压技术的发展历史及展望

挤压技术早期的发展非常缓慢。早在 18 世纪末，法国人首先成功地冷挤压出铅棒，后来又冷挤出铅、锡等几种软金属管，但未进行工业化生产。直到 19 世纪中期，才开始采用冷挤压工艺来制造锡制牙膏壳。

英国从 1886 年开始采用冷挤压技术加工软金属，后来逐步实现对比较坚硬的有色金属，如锌、铝、铜及铜合金进行冷挤压。

美国于 1903 年采用冷挤压制成薄壁黄铜管，然后又采用预先制成的杯形坯料，再正挤出黄铜深孔杯形件。第一次世界大战期间，美国采用这种挤压方法大批量生产黄铜弹壳，并试图生产钢质弹壳，但未获成功。其原因是当时不可能用工具钢作模具材料，并且还未找到良好的润滑方法来解决挤压时钢材与模具壁之间严重的摩擦问题。

第一次世界大战后，德国人用冷挤压工艺生产铝质及锌质电容器壳体等各种有色金属器件，并于 1921 年制造出冷挤钢管的专用压力机，经过十年的艰苦试验，终于在 1931 年成功试挤出钢管。由于钢冷挤压时变形抗力大，当时找不到合适的模具材料及润滑剂，该技术没有正式投入生产。

对于钢的冷挤压，人们当时普遍认为寻找一种合适的润滑剂比研究冷挤压工艺本身来说更为重要。1906 年英国人科斯利特 (T. W. Coslett) 发现采用磷酸盐对钢铁制品进行表面处理是一种理想的防锈方法，但这种方法费时太长，经济效益不显著，故未被广泛应用。不过，这种防锈方法的出现却开拓了人们去开发更有效、实用的其他防锈方法的思路。后来，在自动连续装置中所进行的防锈处理只需 2min 的时间，这种方法就是在科斯利特处理法的基础上发展起来的。采用磷酸锌处理过的钢毛坯表面可附有脂肪润滑剂或钠皂薄膜，人们发

现该薄膜不易去除，且润滑性能极佳，挤压时挤压力又小，因此诞生了一种理想的钢坯料表面处理法——磷化皂化法，而且该方法至今一直被广泛采用。

磷化皂化处理钢坯料表面的方法的出现使钢的冷挤压成为可能。1934年，德国人采用磷化皂化法成功地冷拉出钢管。第二次世界大战前夕，德国对弹壳的需求量猛增，当时用黄铜材料制造弹壳，因原料来源不足，满足不了需要。为了扩大弹壳的生产量，德国秘密地试验用冷挤压生产钢弹壳。在1937年，德国人采用表面磷化皂化处理法，并用合金工具钢作为模具材料，成功地用冷挤压大批量生产钢弹壳。

第二次世界大战一结束，美国获取了德国关于钢冷挤压的全部资料，开始在美国用冷挤压法秘密制造钢弹壳和弹体。后来，又聘用德国专家，继续对钢的冷挤压进行研究，不久便成功地用冷挤压法制成105mm钢弹体，并大规模地开办了用冷挤压法生产弹壳和弹体的军工厂。

第二次世界大战以后，世界局势较为稳定，出现了较长的和平时期，对武器的需求量相应减少，许多军工企业转为民用，冷挤压技术的应用也从军事工业向民用工业转化。

钢的冷挤压正式用于民用工业始于1947年。美国于1949年发表了各种钢材冷挤压后力学性能的实验数据。德国于1950年、1953年先后公布了钢冷挤压的基本技术数据和冷挤压力及挤压功的实验结果。

1957年，日本引进了专用冷挤压压力机，首先在钟表等精密仪器工业中采用冷挤压技术。由于这种技术的经济效益极其显著，很快在汽车、电器等工业部门得到广泛的应用，目前已作为一种极其重要的加工手段应用于各个工业部门。

在我国，解放前的冷挤压加工是非常落后的，只有极少数工厂用铅、锡等有色金属挤压牙膏、线材和管材等。解放后，冷挤压技术得到了发展。20世纪50年代开始了铝、铜及其合金的冷挤压；20世纪60年代黑色金属的冷挤压已应用于生产；20世纪70年代末，国内不少高校、研究所和有关工厂企业开展了冷挤压原理及工艺的研究，发表了大量有价值的论文，初步形成了一支研究和应用冷挤压技术的队伍。近年来，随着我国工业生产和科学技术的蓬勃发展，冷挤压技术更得到迅猛的发展，这种先进的压力加工工艺在我国的现代化建设中发挥出越来越大的作用。

目前，我国已能对铅、锡、银、紫铜、无氧铜、黄铜、锡青铜、锌及其合金、纯铝、防锈铝、硬铝、锻铝、镍、可伐合金、泊莫合金、纯铁、低碳钢、中碳钢、低合金结构钢、碳素工具钢、轴承钢及不锈钢等金属材料进行冷挤压生产，甚至对高速钢也可以进行一定变形量的冷挤压加工。目前所生产的冷挤压零件的品种包括各种台阶轴类件、空心轴类件、花键或齿形轴类件、杯形件、双杯形件、杯杆形件、锥形及锥齿件、扁平类件、直齿及螺旋齿件等。

在模具材料的使用上，除了采用高碳高铬合金工具钢、轴承钢、高速钢以外，还采用了不少新型模具钢，如CG2、65Nb、LD等，以及硬质合金、基体钢、钢结硬质合金等材料。在挤压工艺参数的选择和模具结构设计方面，采用了优化设计及模具CAD/CAM/CAE技术，在保证强度、刚度和可靠性的前提下，充分发挥模具材料的潜力，使模具结构更为合理，挤压工艺参数更接近实际。在冷挤压技术的理论研究领域，国内不少高校及研究单位采用有限元等计算方法，对冷挤压成形全过程进行数值模拟，以揭示冷挤压时的金属流动及应力应变分布规律，所有这些对冷挤压技术的发展起到更大的促进作用。在挤压设备方面，我国已具备了独立设计和制造各级吨位挤压压力机的能力，除了采用通用机械压力机、液压

机、冷挤压机以外，还成功地采用摩擦压力机与高速高能锤进行冷挤压生产。

温挤压是在冷挤压基础上发展起来的一种新的挤压工艺。20世纪60年代初，国外开始用于工业生产。我国从20世纪70年代初开始对温挤压技术进行了研究，并很快地将该技术用于生产实际。温挤压件的原材料不但有碳素钢、合金结构钢、不锈钢、耐热钢、轴承钢，还有合金工具钢和高速钢等高强度材料，所挤压的零件形状也各种各样。与冷挤压相比，由于温挤压时材料塑性提高、变形抗力下降，其挤压的适用范围得到明显的扩大。冷温挤压复合技术的应用，对温挤压技术的发展起到了有力的推进作用。

挤压技术经过200多年的漫长发展历程，在工业生产的各个部门发挥出越来越重要的作用，同时科学技术与经济建设的高速发展，为挤压技术拓展了更广阔的发展空间。挤压技术可在以下几个方面得到进一步的发展。

- ① 进一步提高挤压件的尺寸精度和表面质量，生产出几何形状更为复杂的挤压件。
- ② 研究挤压新工艺，如温挤压、闭塞冷锻、冷温复合挤压、热冷复合挤压等工艺。
- ③ 进一步扩大挤压技术的应用，在一定范围内逐步代替铸造、锻造、拉深、旋压、摆辗及切削加工。
- ④ 扩大挤压原材料的种类，尤其要开发适用于冷挤压用的新钢种。
- ⑤ 研究出更为理想的表面处理与润滑方法。
- ⑥ 进一步使用模具CAD/CAM/CAE和优化设计方法，改进模具设计与制造手段，提高模具制造精度和使用寿命，降低模具生产成本。
- ⑦ 寻找更适合于挤压用的模具材料及热处理方法，提高模具使用寿命。
- ⑧ 开发适用于挤压工艺的挤压压力机以及坯料与制件的自动传送设备。该类压力机应具有：工作行程较长；设备刚性好；滑块运动精度高；滑块行程速度合理，即在工作行程范围内速度低，在非工作行程范围内速度高；压力机滑块带有温度补偿装置等特点。

第二章 挤压的基本原理

第一节 挤压时的金属流动规律

挤压过程中，金属流动的情况具有极大的不均匀性，加之如摩擦条件、模具结构、挤压零件的复杂几何形状、材料加工硬化现象等各种因素的影响，使金属流动的规律更为复杂。因此有必要对金属流动规律进行较深入的研究，以便正确制订冷挤压工艺方案和设计模具，确保挤压件的质量。

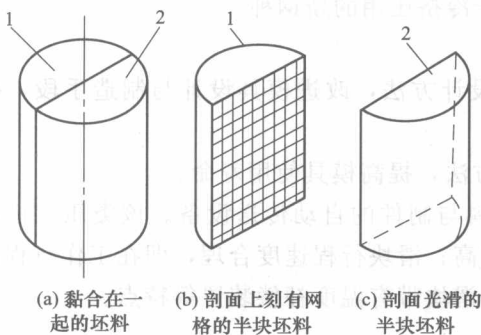


图 2-1 坯料上刻的坐标网格

1—剖面刻有网格的半块坯料；
2—剖面光滑的半块坯料

研究挤压时金属流动的方法很多，目前应用的方法有坐标网格法、视塑性法、光塑性法、密栅云纹法等。以下采用直观、简便的坐标网格法来分析几种基本挤压类型的金属流动情况。

首先把坯料剖成两块半圆柱体，如图 2-1 所示，其中一块刻有坐标网格 [图 2-1 (b)]，网格尺寸为 $(1.5 \times 1.5) \sim (3 \times 3) \text{mm}^2$ ，另一块表面光滑平整 [图 2-1 (c)]。为了便于挤压后分开拼合面，可在拼合面上涂上润滑剂。然后把两个半圆柱体 [图 2-1 (a)] 放入凹模中挤压，从挤压后刻有坐标网格的半块金属上，可以观察到变形大的区域、变形流动困难的区域以及

变形不均匀的状态。

一、正挤压实心件的金属流动

正挤压实心件时，坐标网格的变化如图 2-2 所示。

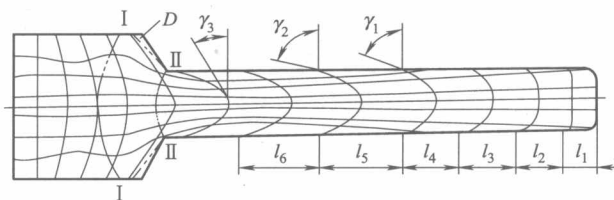


图 2-2 正挤压实心件网格的变化

(1) 挤出部分的横向坐标线在出口处发生了较大的弯曲，且中间部分弯曲更剧烈，这是由于凹模与挤压金属表面之间存在着摩擦力，使外层金属在流动时明显滞后于中层的金属。

挤出部分端部横向坐标线弯曲不大，这是由于该部分金属原来就处于凹模出口附近，挤压时迅速向外挤出，受摩擦等因素影响较小的缘故。横向坐标线的间距从挤出部分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越来越大，当间距达到某一值如 l_5 时就基本上不再变化，说明此时的变形已处于稳定状态。

(2) 纵向坐标线挤压后也发生较大的弯曲。如把开始向中心倾斜的点连成 I—I 线，把开始向外倾斜的点连成 II—II 线。I—I 线与 II—II 线之间的区域为剧烈变形区。I—I 线以上或 II—II 线以下的坐标线不再变化，说明这些区域的金属不再变形，仅作刚性平移。

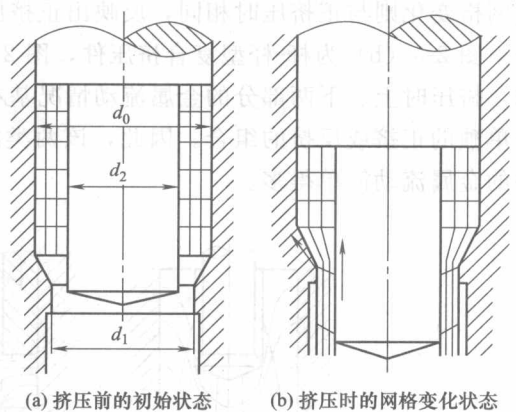
(3) 正方形网格经过出口处以后，变成了平行四边形，这说明金属除了拉伸变形外，还有剪切变形。越接近外层剪切角越大，即 $\gamma_2 > \gamma_3$ ，这是由于外层材料受摩擦阻力的影响较大，使得内外层金属流动存在较大的差异的缘故。挤出端的剪切角较小，以后不断增加，即 $\gamma_2 > \gamma_1$ ，这是由于刚开始挤压时，摩擦力较小的缘故。当进入稳定变形区以后，相应处的剪切角保持不变。

(4) 在凹模出口转角 D 处，金属在挤压过程中不参与流动，称为死区。塑性差的金属材料在挤压后，当凹模锥角很大时，会产生脱落现象。死区的大小受摩擦力、凹模锥角等因素的影响。摩擦力越大，凹模锥角越大，则死区也越大。

从上述分析可以看出正挤压实心件的变形特点是：金属进入 I—I 线至 II—II 线之间的区域才发生变形，此区为剧烈变形区。进入该区以前或离开该区以后，金属几乎不变形，仅作刚性平移。在变形区，金属流动是不均匀的，中心部分流动快，外层流动慢；当进入稳定变形阶段以后，不均匀变形程度是相同的。在凹模转角处会产生大小程度不同的金属死区。

二、正挤压空心件的金属流动

正挤压空心件网格的变化如图 2-3 所示，在挤压过程中，除了受凹模工作表面影响以外，还受到芯棒表面摩擦的影响，因此坯料上的坐标横线变为向后弯曲的曲线，不再产生超前流动的中心区域，这说明正挤压空心件的金属流动比正挤压实心件均匀。在进入稳定流动时，剧烈变形区总是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，仅作刚性平移。



(a) 挤压前的初始状态 (b) 挤压时的网格变化状态

图 2-3 正挤压空心件网格的变化

三、反挤压杯形件的金属流动

用实心件坯料反挤杯形件时，各阶段的网格变化如图 2-4 所示。图 2-4 (b) 表示高度大于直径的坯料进入稳定变形状态时网格的变化情况。此时可将坯料内部的网格变化分为三个区域：I 区为金属死区，它紧贴凸模端面，呈倒锥形。锥形大小由凸模端面与坯料之间的摩擦力大小而定。这部分金属基本上不变形。II 区为剧烈变形区。坯料在该区向外、向上急剧流动，杯形件主要靠这部分金属流动成形。该

区的轴向高度约为 $0.1 \sim 0.2d$ (d 为凸模工作部分直径)。当凸模下压到坯料底部高度仍大于该轴向高度时, 尽管变形区内的金属产生剧烈的流动, 但底部的一部分金属仍保持原状, 此时仍处于稳定变形状态。但当凸模继续下压, 坯料残余厚度小于该轴向高度时, 残余厚度内的全部金属产生流动, 成为如图 2-4 (c) 所示的非稳定变形状态。Ⅲ区为刚性平移区, 剧烈变形区的金属流动形成杯壁后, 就不再变形了, 而是以刚体平移的形式向上运动, 该运动一直进行到凸模停止下压时为止。图 2-4 中 D 为死区, 当底厚过薄时, 塑性差的材料会产生环形脱落。

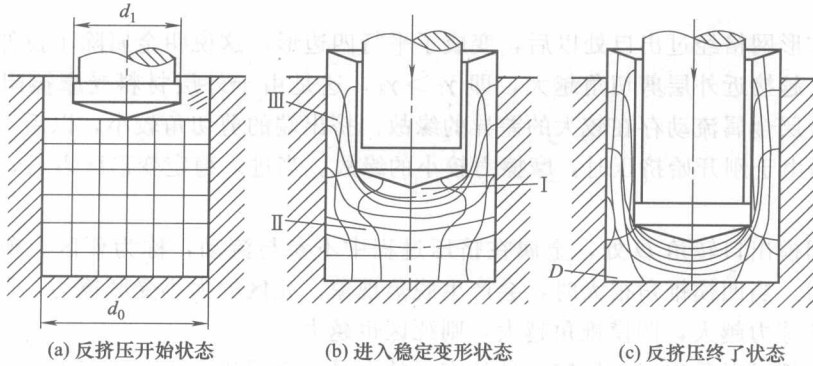


图 2-4 反挤压杯形件网格的变化

四、复合挤压件的金属流动

复合挤压时坐标网格的变化如图 2-5 所示。图 2-5 (a) 为杯-杆型复合挤压件, 相当于反挤杯形件与正挤杆形件的结合, 因此其流动的特点也必定是反挤压与正挤压时金属流动相结合的体现。从图中可见, 上部筒壁的网格变化与反挤压时的金属流动情况相似, 下部杆部的网格变化则与正挤压时相同, 反映出正挤压时金属流动特征。

图 2-5 (b) 为杆-杆型复合挤压件, 图 2-5 (c) 为杯-杯型复合挤压件, 其形状均上下对称, 挤压时上、下两部分的金属流动情况基本相同, 可以把该两类零件的变形过程看成是两个单独的正挤或反挤的组合。因此, 该两类的复合挤压过程中的金属流动要比杯-杆型挤压件的金属流动简单得多。

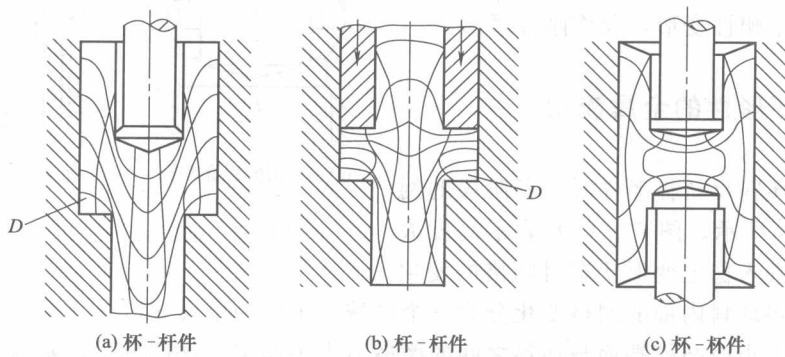


图 2-5 复合挤压件网格的变化