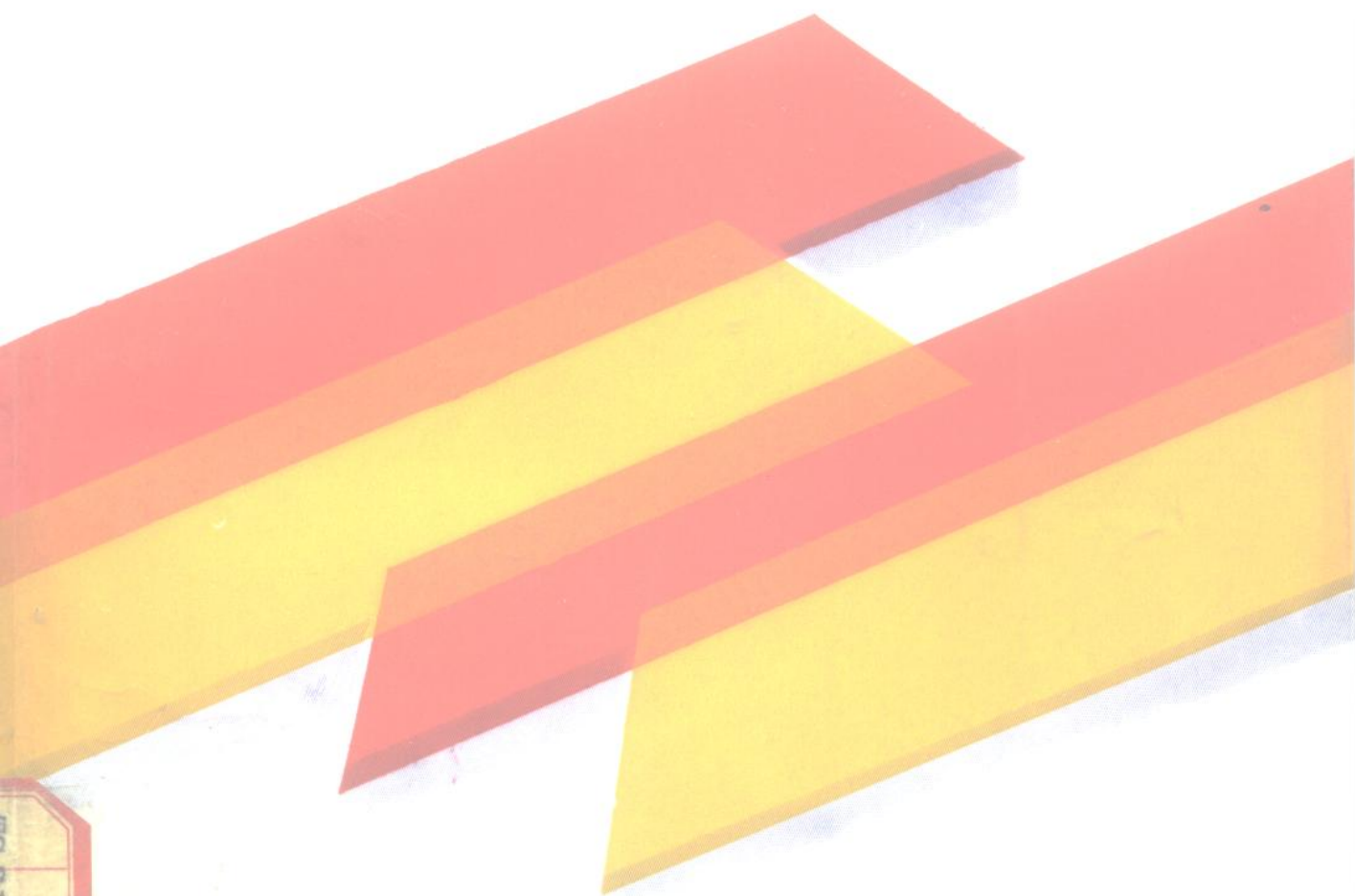


特种锻压工艺

林法禹 主编



机械工业出版社

特种锻压工艺

林法禹 主编



机械工业出版社

本书综合了国内外锻压生产中几种特殊的锻压方法,是对《锻造工艺学》教材的补充,主要论述每一种方法的塑性变形机理、工艺和模具设计的基本原则。全书共八章,包括挤压、辊轧、墩锻、径向锻造、多向模锻、超塑性锻造和粉末冶金锻造等,对计算机的应用也作了粗浅的介绍。

本书可供高等院校锻压专业学生使用,也可供有关单位从事锻压工作的科技人员参考。

特 种 锻 压 工 艺

林法禹 主编

责任编辑:杨 燕 版式设计:胡金瑛

封面设计:方 芬 责任校对:肖新民

责任印制:王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 18·字数 440 千字

1991 年 6 月北京第一版·1991 年 6 月北京第一次印刷

印数 0,001—2,050·定价:15.10 元

*

ISBN 7-111-02609-8/TG·587

前 言

特种锻压是锻造工艺的一个组成部分，专门论述各种特殊的、专用的锻压方法。书中每一章介绍一种锻压方法，着重论述其塑性变形机理、工艺和模具设计的原则。本书是锻压专业的基本或选修教材之一，也可供有关的科技人员参考。

本书共分八章，第一章由西北工业大学张志文、合肥工业大学洪深泽编写；第二章由上海交通大学洪慎章编写；第三章由内蒙古工学院白学周、合肥工业大学刘永熙编写；第四、五、六章由华南工学院林法禹编写；第七章由武汉工学院李念辛编写；第八章由西北工业大学张志文编写。

本书由林法禹教授主编，李林章教授主审。

本书在编写过程中，得到不少院校的大力支持，编者谨在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限，并且时间仓促，书中的缺点和错误在所难免，敬希读者批评指正。

目 录

绪论	1	§ 2-2 辊锻工艺	67
第一章 挤压工艺	3	一、辊锻工艺(或称辊轧工艺)的实质及特点	67
§ 1-1 挤压的基本方法、特点、应用范围及发展概况	3	二、辊锻的分类和应用	67
一、挤压的基本方法	3	三、辊锻时的咬入条件及前滑	69
二、挤压的特点及应用范围	4	四、制坯辊锻工艺及模具设计	71
三、挤压技术在国内外的的发展概况	6	五、辊锻力及力矩计算	76
§ 1-2 挤压原理	7	六、辊锻模的结构及模具材料	79
一、各种挤压方法的金属流动规律	7	七、连杆制坯辊锻工艺实例	79
二、应力与应变关系	8	八、成形辊锻	86
三、变形力学条件对挤压变形的影响	11	九、冷辊锻	86
四、温度对挤压变形的影响	12	§ 2-3 横轧工艺	86
五、附加应力和残余应力	14	一、楔形横轧	86
六、挤压对金属组织和机械性能的影响	15	二、螺旋横轧(孔型斜轧)	92
§ 1-3 挤压用原材料的软化、表面处理及润滑	18	三、三辊横轧(仿形斜轧)	100
一、软化	18	§ 2-4 齿轮轧制	107
二、表面处理及润滑	19	一、齿轮热轧的原理及特点	107
§ 1-4 挤压力计算及压力机的选择	22	二、齿轮轧机	107
一、挤压力的阶段性	22	三、轧轮设计要点	108
二、影响单位挤压力的主要因素	22	四、齿轮轧制工艺参数	109
三、单位挤压力的理论计算法	27	§ 2-5 碾压扩孔工艺	110
四、单位挤压力的经验计算法	31	一、碾压扩孔工艺原理及特点	110
五、单位挤压力的图算法	34	二、碾压扩孔工艺制订	111
六、压力机吨位选择	40	三、碾压扩孔力和电动机功率的计算	114
§ 1-5 模具设计	40	第三章 锻 锻	117
一、冷、热挤压模的结构	41	§ 3-1 锻锻的基本原理	117
二、模具工作部分设计	42	一、锻锻的应用范围及变形特点	117
三、组合凹模的优化设计	47	二、锻锻工艺参数的选定	120
四、导向、紧固部件的设计	51	§ 3-2 锻锻模设计特点	129
五、模具材料	52	一、锻锻模材料的选择	129
§ 1-6 挤压工艺的应用	55	二、导向装置的选定	131
一、挤压工艺规程编制的一般内容	55	三、凹模设计特点	131
二、挤压工艺实例	56	四、凸模设计特点	133
第二章 辊轧工艺	65	§ 3-3 锻锻工艺应用举例	134
§ 2-1 周期轧制工艺	65	一、通用设备上的锻锻生产	135
		二、专用设备上的锻锻生产	142

第四章 径向锻造150

- § 4-1 径向锻造原理及工艺特点150
- § 4-2 径向锻造的变形过程153
- § 4-3 径向锻造时的变形区受力分析及应力、应变状态154
- § 4-4 径向锻造的工艺设计155
 - 一、锻件设计156
 - 二、毛坯的选用158
 - 三、变形工艺程序的确定159
- § 4-5 工艺参数的选定159
 - 一、变形程度160
 - 二、锻件转速161
 - 三、轴向进给速度161
 - 四、径向进给速度162
 - 五、径向压下量162
 - 六、锻造温度162
- § 4-6 变形力计算162
 - 一、实心圆柱形锻件变形力的计算162
 - 二、空心锻件变形力的计算162
- § 4-7 工夹具的设计163
 - 一、锻模设计163
 - 二、夹头167
 - 三、芯棒168
- § 4-8 典型工艺实例168
 - 一、实心台阶轴168
 - 二、带锥度和台阶的实心轴169
 - 三、空心转接轴169
- § 4-9 径向锻造件的缺陷及预防169
 - 一、尾部凹坑169
 - 二、棱角170
 - 三、螺旋形凹坑170
 - 四、螺旋形脊椎纹170
 - 五、尾部马蹄形170
 - 六、各台阶不同心170
 - 七、裂纹170
 - 八、弯曲170
 - 九、管壁起皱170
 - 十、管件开裂170

第五章 多向模锻171

- § 5-1 多向模锻工艺的特点171
- § 5-2 锻件设计173
 - 一、分模面的选择173

- 二、余量与公差174
- 三、模锻斜度174
- 四、圆角半径174
- 五、连皮设计174
- § 5-3 多向模锻力的确定176
 - 一、变形力的确定176
 - 二、合模力的确定176
- § 5-4 多向模锻模具结构的形式178
- § 5-5 多向模锻模具设计要点180
 - 一、型腔位置180
 - 二、模具导向装置181
 - 三、凹模导向181
 - 四、深孔锻件凹模的设计182
 - 五、冲头设计182
 - 六、推杆设计183
 - 七、通气孔设计183
 - 八、水平夹座设计183
 - 九、组合模具结构184
 - 十、模具材料184
- § 5-6 成形工艺184
 - 一、毛坯的形状和尺寸184
 - 二、多向模锻中的金属流动185
- § 5-7 典型多向模锻件的工艺参数和经济效益186

第六章 超塑性锻造188

- § 6-1 金属的塑性、超塑性及其发展史188
 - 一、塑性和超塑性188
 - 二、超塑性的发展史189
 - 三、超塑性的种类190
- § 6-2 超塑性变形的力学特征196
 - 一、金属塑性变形的流动应力方程196
 - 二、拉伸变形时超塑性状态方程197
 - 三、实现均匀变形的条件198
 - 四、应变速率敏感性指数—— m 199
 - 五、 m 值与总延伸率 δ 之间的关系203
 - 六、影响超塑性和 m 值的因素204
- § 6-3 超塑性变形的机理207
 - 一、溶解-沉淀理论207
 - 二、亚稳态理论207
 - 三、扩散蠕变理论207
 - 四、由位错运动调节的晶界滑移理论208
 - 五、结合扩散蠕变的晶界滑移理论210

§ 6-4 超塑性变形时的组织结构及性能.....210	一、锻前加热及加热设备252
一、组织结构变化210	二、模锻设备253
二、超塑性变形对机械性能的影响211	三、粉锻模设计253
§ 6-5 超塑性成形工艺.....213	第八章 计算机辅助设计257
一、超塑性体积成形的特点213	§ 8-1 应用计算机技术的指导思想.....257
二、超塑性挤压工艺214	§ 8-2 模锻件的CAD基础258
三、超塑性模锻222	§ 8-3 锻件复杂程度标准及毛边和毛坯尺寸计算.....260
四、超塑性成形锻件图的设计224	一、锻件复杂程度标准260
五、超塑性成形的模具结构及材料226	二、毛边尺寸及其金属量的计算261
六、润滑227	三、圆形锻件锻粗毛坯尺寸的计算262
第七章 粉末冶金锻造229	§ 8-4 应力和载荷计算的近似方法.....262
§ 7-1 粉末冶金锻造特点.....229	一、平面应变状态下的应力与载荷计算262
一、粉锻工艺过程229	二、轴对称应变状态下的应力和载荷计算264
二、粉锻工艺的特点229	三、终锻时的锻压力266
§ 7-2 粉末冶金工艺.....230	四、压力中心的计算268
一、粉末制取和选用230	§ 8-5 模锻长轴类锻件制坯方案的选择.....269
二、粉末成型232	一、曲线拟合269
三、烧结235	二、选择制坯工步的计算机程序271
§ 7-3 粉末烧结体的塑性变形.....236	三、运行示例271
一、粉末热锻成形方法236	§ 8-6 轴对称锻件的辅助设计.....273
二、烧结体塑性变形的特点237	§ 8-7 顶锻制坯辅助设计.....275
三、烧结体的致密化239	一、顶锻制坯的CAD过程275
四、粉锻件的性能242	二、计算机设计程序的编制思路276
§ 7-4 粉锻件和预制坯的设计.....246	三、源程序277
一、锻件分类与锻件图设计246	参考文献280
二、预制坯的设计247	
§ 7-5 粉锻工艺与模具设计.....252	

绪 论

在锻压生产中,特种锻压工艺在国内外得到了迅速发展,以满足锻件精度和内部质量的要求。为了提高锻压生产的技术经济效益,采用自由锻和一般模锻,往往不能达到预期目的,应根据各种锻件的材料、形状尺寸、生产批量、性能等要求,以及所具备的生产条件,来选择适当的特种锻压方法,以获得最佳效果。特种锻压方法繁多,本书只涉及其中应用较广而且较为成熟的工艺方法,如挤压、辊轧、墩锻、径向锻造、多向模锻、超塑性锻造和粉末冶金锻造等。

挤压工艺是金属在强三向压应力状态下,以恒定的变形程度,从一定几何形状尺寸的孔口挤出成形。按变形温度可分为冷挤压、温挤压和热挤压;按材料可分为有色金属挤压和黑色金属挤压。在第二次世界大战中,挤压工艺首先由德国用于军事工业,生产了大量的钢弹壳和弹体。战后,各国把冷挤压转向民用工业,如手表、电子仪表和汽车等工业部门。我国从60年代开始对黑色金属的冷挤压进行了开发,近几年来更是发展迅速。温挤压的应用在国外已有二十几年的历史,我国在70年代也开始了这方面的应用研究。至今,用于温挤压的钢种不仅有碳素钢、合金结构钢,而且有不锈钢、耐热钢和高速钢等。不少国家在热挤压方面的应用,具有更长的历史,特别是50年代以来,所建立的型材和管材的生产线,具有大量生产的自动化水平。

辊轧是将轧制工艺应用到锻压生产上而发展起来的一种锻造方法。其变形特点是在一定变形区的连续成形。按辊轧成形方向,可分为纵轧和横轧两类。至今,辊轧的应用甚为广泛,例如汽车、飞机发动机、拖拉机、自行车、纺织机械、机车、机床以及五金工具等部门,都已采用辊轧来生产零件。辊轧具有设备结构简单、劳动条件好,并便于进行机械化生产的特点。辊轧生产率高,材料和能量消耗都较小,而且产品的内部质量较高。

墩锻是使用棒料、线材或管材,仅在局部以墩粗、冲孔、挤压等方式成形。在汽车、拖拉机、标准件和航空工业中具有广泛的用途。根据生产条件、产品尺寸大小和对产品性能的要求,可以进行冷墩锻或热墩锻成形。冷墩锻的生产率、材料利用率、锻件尺寸精度及其表面质量都比热墩锻的高,而且便于实现机械化或自动化生产。热墩锻由于毛坯变形抗力较小,因而多用来生产尺寸较大的锻件。当生产批量不大时,可在通用锻压设备上用专用模具进行墩锻,如平锻机、螺旋压力机、曲柄压力机、水压机、锻锤等。当大量生产时,则采用专用自动、半自动墩锻机进行冷墩锻或热墩锻,如螺钉、螺栓、螺母和铆钉等,都采用专用墩锻机进行生产。

径向锻造的变形特点是在多向、高频率脉冲锻击作用下,小变形区的反复断续成形。它适用于生产变断面或等断面的实心轴和空心轴类件。径向锻造机有滚柱式旋转锻造和径向精密锻造两种。径向锻造具有脉冲和多向锻造的特点,因此,金属变形速度低、流动路线短、摩擦阻力小、变形均匀和动力消耗小。这种锻造方法用来锻造强度高、塑性低的合金钢,尤其是钨、钼、铌等合金更为合适。径向锻造件的尺寸,直径可达600 mm,长度甚至达到10 m以上,而且便于实现机械化-自动化生产。因此,径向锻造在机床、汽车、机车、拖拉机

和军事工业都得到应用。

多向模锻也是一种新兴的成形方法，其变形特点是多向加压，金属在强烈的压应力状态下一次成形。它在实现锻件少无切削和提高尺寸精度、形状复杂程度方面，都有独特的长处。多向模锻是在多向模锻液压机上，利用组合锻模来生产无毛边、无（或小）模锻斜度、形状复杂的多孔型锻件，如阀体、管接头、套筒体、导弹喷管、泵壳体和高压容器等。多向模锻在我国的应用历史不长，而且只有个别厂家具有这样的生产条件。由于这种成形方法生产的锻件尺寸精确、材料损耗小、变形时的应力状态好、金属流线沿轮廓分布、一次加热成形表面质量好，以及易于实现机械化操作，因此，普遍引起生产厂家的重视。

超塑性锻造在国内外的研制状况更是方兴未艾。在特定的生产条件下，金属材料具有异常高延伸率和很低的变形抗力，现在称之为超塑性。超塑性模锻也是近20年来发展起来的一种新工艺，由于这种方法可锻成形状复杂、尺寸精确的锻件，并且变形力不大，因此在工业上的应用具有很大的潜力。我国对超塑性技术的研究开展较迟，但进展不慢，无论在变形机理和应用方面，在国际上都产生了很大的影响。金属的超塑性，按其变形特性和状态可分为微细晶粒超塑性、相变超塑性、短暂超塑性和相变诱发超塑性等。此外，还有大晶粒超塑性、单相固溶体超塑性和单晶超塑性等，这些方法在超塑性成形技术中都得到了应用。

粉末冶金锻造早在本世纪初，便用于钨的生产实践，然而到了60年代才用于钢类锻件的生产。这一工艺是粉末冶金与锻造相结合，通过锻造可将粉末冶金件的机械性能提高，同时具有成形精确、材料利用率高、模具寿命长和生产成本低的优点。目前，国外的粉末冶金锻造已经进入到大规模的生产阶段。我国从70年代便开始这方面的应用研究工作，主要在齿轮类锻件和环类件的开发上取得了显著的进展，其中建成的生产线达到年产100万件的产量；对粉末冶金锻造的机理研究也取得了不断的进展，为其进一步的发展打下了基础。粉末冶金锻造分为热锻和冷锻。热锻有粉末锻造、烧结锻造和锻造烧结之分。粉末锻造的毛坯为粉末预制件，由于冷锻不易提高其密度，因而常采用热锻进行生产。

特种锻压工艺除上述常见的几种外，还有摆动碾压、磁力锻造、超声波润滑成形、悬浮式锻造和静液压成形等，由于篇幅所限，本书不予以介绍。

应当指出，锻造在生产组织管理、工艺和模具设计、生产过程控制和产品质量检验等方面采用电子计算机辅助，可获得技术经济上的实惠。国外的锻造业现况早已对此作出了回答，国内不少单位正在开展其应用研究，努力缩短与其他国家间的差距，这是一项属于方向性的先进技术的开发。

本书与《锻造工艺学》教材密切相关，也可说是后者的一个组成部分。书中各种工艺方法除有塑性成形的共性之外，都各有其特性，并自成体系。编者对各种工艺方法的原理、工艺和模具的设计等基本内容，尽力反映其客观实际，以便读者学以致用。

第一章 挤 压 工 艺

§ 1-1 挤压的基本方法、特点、应用范围及发展概况

一、挤压的基本方法

挤压是将金属毛坯放入模具型腔内，在一定的压力和速度作用下，迫使金属从型腔中挤出，从而获得所需形状、尺寸以及具有一定机械性能的挤压件。

根据毛坯的温度不同，挤压可以分为三种：

- (1) 冷挤压 在室温中对毛坯进行挤压。
- (2) 温挤压 将毛坯加热到金属再结晶温度以下某个适当的温度范围内进行挤压。
- (3) 热挤压 将毛坯加热至热锻温度范围内进行挤压。

挤压的成形速度范围很广，它既可以在专用挤压机上进行，也可以在一般的机械压力机、液压机、摩擦压力机以及高速锤上进行。

根据挤压时金属流动方向与凸模运动方向之间的关系，挤压可以分为以下几种：

1. 正挤压

挤压时，金属的流动方向与凸模的运动方向一致。正挤压又分为实心件正挤压，如图1-1所示；空心件正挤压，如图1-2所示。零件的断面形状可以是圆形、椭圆形、扇形、矩形或棱柱形，也可以是等断面的不对称零件。

2. 反挤压

挤压时，金属的流动方向与凸模的运动方向相反，如图1-3所示。反挤压法适用于制造横断面是圆形、方形、长方形、“山”形、多层圆形、多格盒形的空心件。

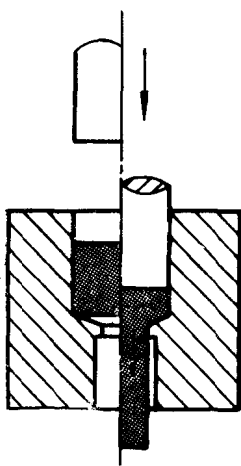


图1-1 实心件正挤压

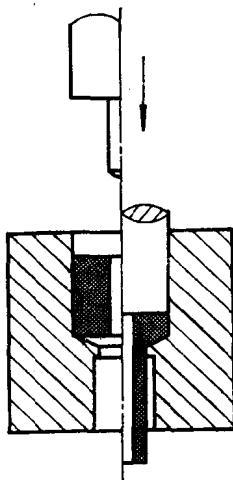


图1-2 空心件正挤压

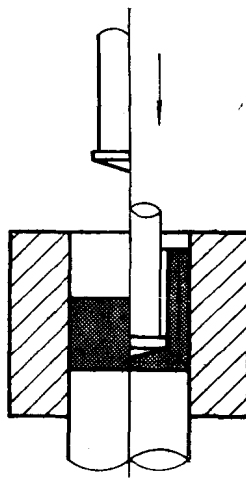


图1-3 反挤压

3. 复合挤压

挤压时，毛坯一部分金属的流动方向与凸模的运动方向相同，而另一部分金属的流动方

向则与凸模运动方向相反,如图1-4所示。复合挤压法适用于制造横断面是圆形、方形、六角形、齿形、花瓣形的双杯类、杯-杆类或杆-杆类零件,也可以制造等断面的不对称零件。

4. 减径挤压

它是变形程度较小的一种正挤压法,毛坯断面仅作轻度的缩减,如图1-5所示。减径挤压主要适用于制造直径差不大的阶梯轴类零件以及作为深孔杯形件的修整工序。

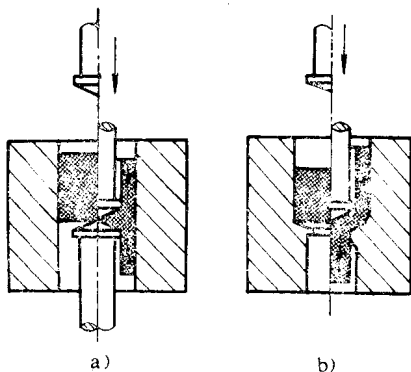


图1-4 复合挤压

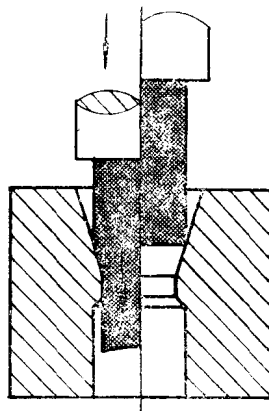


图1-5 减径挤压

以上几种挤压方法的共同特点是: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。

5. 径向挤压

挤压时,金属的流动方向与凸模的运动方向相垂直,如图1-6所示。径向挤压法又分为离心和向心径向挤压两种,该方法可以制造十字轴类零件,也可以制造花键轴的齿形部分、直齿和螺旋齿小模数齿轮的齿形部分,还可以制造某些型材。

6. 挤镦复合法

它是挤压和局部镦锻结合在一起的加工方法。该方法主要用于制造大头或粗腰类零件。

应当指出的是,径向挤压法(含挤镦复合法)与轴向挤压法在毛坯断面积的变化上是不同的。前者挤压件的断面积比毛坯的断面积有所增加,而后者挤压件的断面积比毛坯的断面积有所减小。

二、挤压的特点及应用范围

1. 冷挤压的特点及应用范围

采用冷挤压法加工零件可以降低原材料消耗,材料利用率可达70~90%。如图1-7所示的纯铁底座,原来用切削方法加工一个零件所需的材料,可供十个同样尺寸的冷挤压件使用。冷挤压法是在压力机上进行的,压力机的一次行程就可以完成一道工序,因此与切削加工相比,生产率可以大幅度地提高,生产成本也大为降低。在冷挤压过程中,金属材料处于三向不等的压应力作用下,挤压变形后,金属材料的晶粒组织更加致密;金属流线不被切断,而是沿着挤压件轮廓连续分布;同时,由于冷挤压利用了金属材料冷变形的冷作硬化特性,从而使冷挤压件的强度大为提高。冷挤

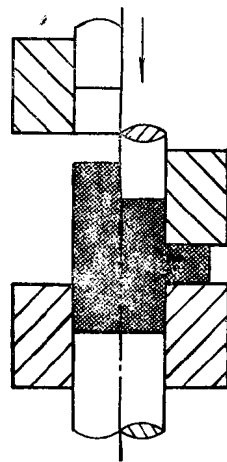


图1-6 径向挤压

压时，靠强大压力来压平毛坯表面，因此可以获得较高尺寸精度和较小的表面粗糙度的挤压件。

从上述分析可以看出，冷挤压是一种“高产、优质、低消耗”的先进压力加工工艺，在技术上和经济上都有很高的价值。目前，已在机械、仪表、电器、轻工、宇航、船舶、军工等工业部门中得到初步应用，已成为金属塑性成形技术中不可缺少的重要加工手段之一。

当然，冷挤压也存在一些缺点。比如，冷挤压的变形力相当大，特别是对较硬的金属材料进行冷挤压时，所需的变形力更大，这就限制了被挤零件的尺寸，同时也限制了难变形材料采用冷挤压这项先进工艺。当变形抗力大到接近或超过模具材料的许用压力时，就会降低模具使用寿命甚至造成模具的破坏。

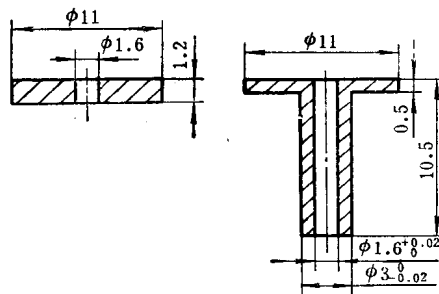


图1-7 纯铁底座

2. 温挤压的特点及应用范围

温挤压是针对冷挤压的缺点，充分体现冷挤压的优点而发展起来的一种挤压新工艺。它与冷挤压相比，由于毛坯的变形抗力小，成形容易，压力机吨位可以大为减小。如果使用恰当，模具的寿命也比冷挤压要长一些。与热挤压相比，由于温挤压件的加热温度较低，加热时的氧化、脱碳都比较少，因此，产品的尺寸精度和表面粗糙度皆较热挤压优越。产品的机械性能比热挤压件高，基本上接近于冷挤压件的性能。

由于温挤压兼有冷、热挤压的优点，克服了冷、热挤压的不足之处，因此对于一些在室温下难以加工的材料，例如，析出硬化相的不锈钢和中、高碳素钢、含铬量高的合金钢、耐热合金、镁及镁合金、钛及钛合金等均可采用温挤压工艺。甚至对合金工具钢和高速工具钢也可以进行一定变形程度的温挤压变形。在国内，对于黑色金属，如纯铁、20、45、20Cr、40Cr、GCr15、12CrNi3、30CrMnSiA、2Cr13、4Cr13、1Cr18Ni9Ti、18Cr2Ni4WA、38CrA、T10V、T10A、Cr12MoV、W6Mo5Cr4V2A1以及GH140等均可成功地进行温挤压。对于冷挤压难于成形的铅黄铜HPb59-1，用温挤压成形的效果也较好。

温挤压还便于组织连续生产，因为在温挤压温度范围内，毛坯可以不进行预先软化退火和各工序之间的退火，也可以不进行表面磷化处理，这就有利于实现机械化、自动化生产。

温挤压的变形量比冷挤压大，这样就可以减少工序。模具费用也可以大为减少，而且不一定需要昂贵的专用挤压机，一般可以采用通用的锻压设备进行温挤压。

当然，温挤压至今并非十分完备，如目前采用的润滑剂，还不能令人满意；模具材料也有待于进一步研究解决。

总之，温挤压是一种有效的毛坯精化加工工艺。虽然温挤压技术在国内的应用时间还不长，但是在汽车、拖拉机、轴承、电器、仪表、军工、航空等工业部门已得到了应用。

3. 热挤压的特点及应用范围

热挤压时，由于毛坯加热至热锻温度，这就可使材料的变形抗力大为降低。但是由于加热时产生氧化、脱碳及热膨胀等问题，降低了产品的尺寸精度和表面质量，因此热挤压一般都用于毛坯预成形。

热挤压法不仅可以成形有色金属及其合金，而且对于高碳钢、结构用特殊钢、不锈钢、

高速工具钢、耐热钢等也可进行热挤压成形。

冶金部门已开始采用热挤压法加工型钢、钢管和双金属管等，它与轧制法比较具有如下优点：生产小批量或非标准件时比轧制法经济得多；从生产一种型钢改为生产另一种型钢十分简便，只需简单地更换模具；能够生产一些不能轧制的低塑性合金，适用范围比轧制更广；在同一台挤压机上只要更换模具就能生产棒、条、管以及多边形断面等异形型材。总之，热挤压法与轧制法相比，具有更大的灵活性和适用性，用它生产的型材可以广泛用于汽车、造船、农机、运输、轻纺、动力、仪表、化工以及建筑等工业部门。

热挤压法在机械工业部门中已得到初步应用，例如发动机气阀、汽轮机叶片、机床花键等皆已成功地采用热挤压成形。

三、挤压技术在国内外的发展概况

挤压技术的发展经历了漫长的历史过程。上世纪末，英、美、法、德等国开始用冷挤压法生产软质有色金属器件。第一次世界大战期间，美国采用冷挤压法大批量生产黄铜弹壳，并曾企图用冷挤压法生产钢质弹壳，但未获成功，原因是当时还不可能用工具钢作模具材料，也没有找到良好的润滑剂。第一次世界大战后的1931年，德国冷挤压钢管获得成功，但由于模具材料和润滑剂的原因，也没有正式投入生产。

第二次世界大战前夕，德国对弹壳的需求猛增，因黄铜原料不足，于1937年采用磷化皂化处理毛坯，成功地用冷挤压法大批量生产了钢弹壳。第二次世界大战后，美国掌握了德国关于钢的冷挤压技术，也开始用冷挤压法制造钢弹壳和弹体。

第二次世界大战以后，冷挤压技术的应用开始由军事工业向民用工业转化。从1947年开始，美、德等国在民用工业中采用冷挤压法加工各种零件，并进一步进行了钢的冷挤压试验研究。

日本于1957年引进专用冷挤压压力机，首先在钟表等精密仪器工业中采用冷挤压加工。由于这种加工方法的经济效益极其显著，不久，便在大批量生产的汽车和电器等工业部门中得到广泛应用，现在已成为一种极重要的加工手段，遍及于各个工业部门。

在我国，解放前的冷挤压加工是极端落后的，当时只有极少数工厂用铅、锡等有色金属挤压牙膏管、线材和管材。解放后，冷挤压加工得到了发展。50年代开始了铅、铜及其合金的冷挤压；60年代开始了黑色金属的冷挤压。近几年来，随着我国工业生产技术的蓬勃发展，冷挤压技术也得到了迅猛发展。这种先进的压力加工工艺已在我国“四化”建设中起着令人瞩目的作用。

温挤压是在冷挤压基础上发展起来的一种新的挤压工艺。60年代初，国外开始用于工业生产。我国从70年代初开始对温挤压技术进行了试验研究，并将这项新技术陆续应用于生产。目前温挤压的零件材料不但有碳素钢、合金结构钢，而且还有不锈钢、耐热钢、合金工具钢和高速工具钢。生产的零件形状也是多种多样的，有圆形件、多边形件，也有异形、轴对称形或非轴对称形零件。我国除了对温挤压进行了一系列工艺研究外，还分别根据产品要求，对产品性能与质量作了比较深入的研究。

热挤压法也是从挤压有色金属开始的。近半个世纪以来，随着机械工业、航空工业的发展，要求钢材品种日益增多，断面形状也日益复杂化，轧制技术愈来愈难以满足这些高技术的要求，因而黑色金属的挤压技术日益受到重视。钢的热挤压技术转入工业性生产已有30多年的历史，它在配合火箭工业、原子能工业和其它尖端技术部门的发展上，起了很大的作

用。

50年代以来,一些国家先后兴建了专门生产挤压型钢和钢管的工厂,装备了现代化的大功率挤压设备,掌握了难于或不可能用其他热加工方法生产的各种高级钢种和复杂断面的生产工艺。热挤压生产操作的自动化程度也迅速得到了提高。因此,热挤压技术在钢的热压力加工领域内得到愈来愈广泛的应用。

§ 1-2 挤 压 原 理

一、各种挤压方法的金属流动规律

金属与合金在挤压变形时的流动情况,很大程度上取决于金属与模具接触的界面上的摩擦、模具与毛坯的尺寸形状、毛坯的内外表面温度、组织性能的不均匀性等。由于上述因素作用的不同,金属的流动特性也各不相同,不均匀变形是客观存在的。

为了解各种挤压方法的金属流动情况,可将圆柱体毛坯切成两块,如图 1-8 所示,在其中的一块剖面上刻上 $5 \times 5 \sim 20 \times 20\text{mm}$ 的正方形网格,将拼合面涂上润滑油,再与另一块拼合在一起,进行各种方式的挤压,就可以看到被挤毛坯内部的金属流动情况。

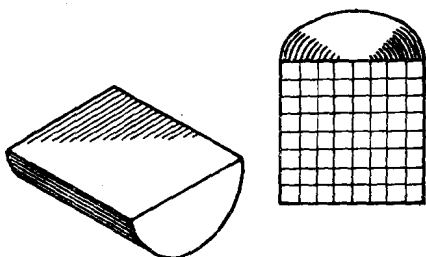


图1-8 毛坯上的坐标网

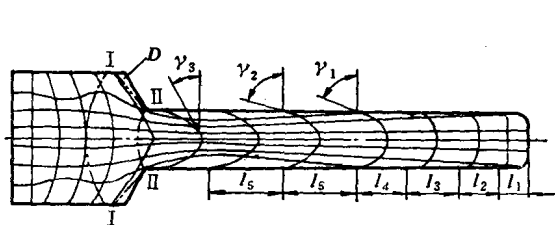


图1-9 正挤压实心件金属流动情况

1. 正挤压实心件的金属流动情况

正挤压实心件时,坐标网的变化情况如图1-9所示。由图中网格的变化,可以对金属的流动情况作如下分析:

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表面摩擦,使金属在流动时外层滞后于中层的缘故。被挤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,受摩擦影响较小。横向坐标线的间距从挤出部分端部开始是逐渐增加的,即 $l_5 > l_2 > l_1$,这说明挤出金属的纵向拉伸变形愈来愈大;而当达到某定值 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) 纵向坐标线挤压后也发生了较大的弯曲。如果把开始向内倾斜的点连成 I-I 线,把开始向外倾斜的点连成 II-II 线。I-I 线与 II-II 线之间所构成的区域为剧烈变形区。I-I 线以左或 II-II 线以右坐标线基本上不变化,说明在这些区域内金属不发生塑性变形,只作刚性平移。

3) 正方形网格经过出口以后,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。愈接近外层,剪切角愈大,即 $\gamma_2 > \gamma_1$,这是由于外层金属受到摩擦阻力的影响较大,使得内外层金属流动存在着较大差异的缘故。刚开始挤出端部剪切角较小,以后逐

渐增大, 即 $\gamma_2 > \gamma_1$, 这是由于刚开始挤压时, 受摩擦影响较小的缘故。当进入稳定变形区以后, 相应处的剪切角保持不变。

4) 凹模出口转角 D 处, 在挤压过程中形成金属流动的“死区”。“死区”的大小受摩擦力、凹模形状与尺寸等因素的影响, 当摩擦力愈大、凹模锥角愈大时, 则“死区”部分也愈大。

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 至 II - II 线之间的区域时才发生变形, 此区称为剧烈变形区。进入此区以前或离开此区以后, 金属几乎不变形, 仅作刚性平移。在变形区内, 金属的流动是不均匀的, 中心部分流动快, 外层流动慢; 而当进入稳定变形阶段以后, 不均匀变形的程度是相同的。在凹模转角处会产生程度不同的金属“死区”。

2. 反挤压杯形件的金属流动情况

用实心坯料反挤压杯形零件时, 挤压变形各阶段的金属流动情况如图1-10所示。图1-10 b 表示高度大于直径的毛坯进入稳定变形状态时的变形情况。此时可将毛坯内部的变形情况分为三个区域: I 区为金属“死区”, 它紧贴着凸模端面, 呈倒锥形, 该锥形大小随凸模端表面与毛坯间的摩擦力大小而变化。II 区为剧烈变形区, 毛坯金属在这个区域内产生剧烈的流动, 该区的轴向界限大约为 $0.1 \sim 0.2d_1$ (d_1 为反挤压凸模直径)。当凸模下行, 到毛坯底部尺寸大于此界限尺寸时, 尽管变形区内金属产生了强烈的流动, 而底部的一部分金属仍保持原状, 此时仍处于稳定变形状态。但当凸模再继续往下运动, 毛坯残余厚度小于此界限尺寸时, 在此残余厚度内的全部金属材料皆产生流动, 成为如图1-10 c 所示的非稳定变形状态。III 区为刚性平移区, 强烈变形区的金属流动至形成杯壁后, 就不再变形, 而是以刚体平移的形式往上运动, 该运动一直延续到凸模停止工作时为止。

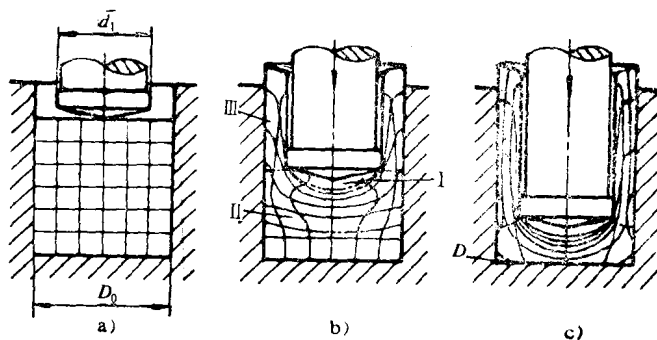


图1-10 杯形件反挤压的流动情况

3. 复合挤压时金属的流动情况

况

复合挤压时, 金属的流动情况

如图 1-11 所示。在变形区内, 有向出口流出的区域边界面, 即“分流面”, 由于受模具结构、零件形状以及外摩擦等因素的影响, “分流面”不能用简单的方法来确定。图 1-11 a 为上扁方下圆的上下非对称形状的实心件复合挤压, 由于金属向上流动所受到的阻力较向下流动所受到的阻力大, 因此向下流动的体积较多。图 1-11 b 为上下对称形状的双杯类零件复合挤压, 且又是在双动冷挤压压力机上进行加工的, 因此金属材料均匀地向上和向下流动, “分流面”在中间对称面上。图 1-11 c 为杯形件复合挤压, 上部金属材料的流动情况与杯形件反挤相似, 下部与实心件正挤相似。

二、应力与应变关系

1. 应力与应变状态的定性分析

挤压变形时, 变形区内任一点的应力与应变状态, 皆可用主应力简图与主应变简图来表

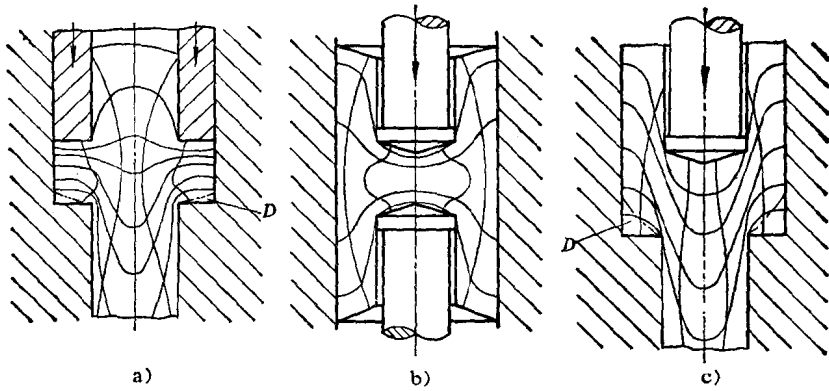


图1-11 复合挤压时金属的流动情况

示。众所周知，挤压变形区内的基本应力状态皆为三向压应力。但是，在整个变形区的不同区域中，主应力与主应变的顺序和种类是不相同的。

正挤压实心件和反挤压杯形件时，如果摩擦阻力很小，且坯料的长径比也较小时，可分别把变形区分为两个不同的区域，如图1-12所示。

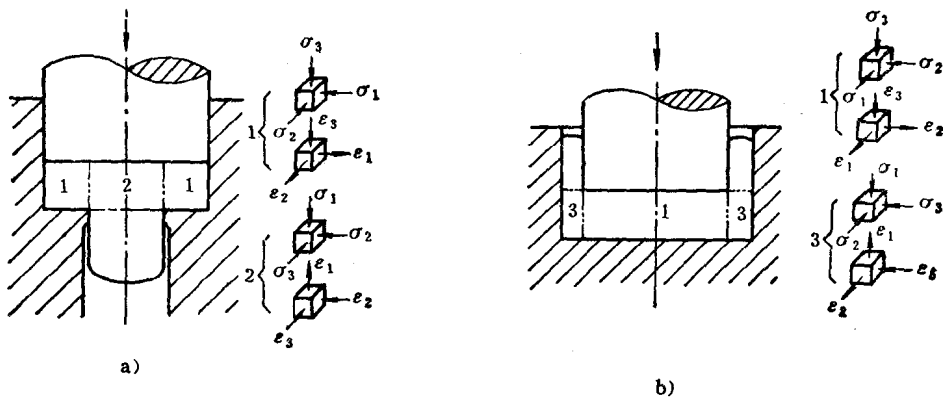


图1-12 挤压变形区内的应力应变状态

a) 正挤压 b) 反挤压

正挤压实心件的区域1与环形毛坯在封闭模中镦粗变形相似；区域2与棒子棒圆的中间芯棒相似，其主应力、主应变状态图如图1-12 a 所示。反挤压杯形件的区域1与圆毛坯镦粗相似，区域3与受内压的圆筒相似，其主应力、主应变状态图如图1-12 b 所示。

2. 挤压时变形程度的表示方法

在挤压技术中，表示变形程度的方法有如下几种：

(1) 断面缩减率 ε_A

$$\varepsilon_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 A_0 ——挤压变形前毛坯的横断面积；

A_1 ——挤压变形后挤压件的横断面积。

(2) 挤压比 G

$$G = \frac{A_0}{A_1} \quad (1-2)$$

(3) 对数变形程度 ϵ 。

$$\epsilon_e = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (1-3)$$

三者之间存在着如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_A &= 1 - \frac{1}{G} \\ \epsilon_i &= \ln G \\ \epsilon_e &= \ln \frac{1}{1 - \epsilon_A} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

ϵ_A 、 G 、 ϵ_e 的值愈大,则表示变形程度愈大。

3. 应力与应变关系

挤压时的应力与应变之间的关系可以用应变比例定律来表示。所谓应变比例定律就是指相对应变与相应的应力偏量成比例,即

$$\frac{\delta_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\delta_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\delta_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \lambda > 0 \quad (1-5)$$

式中 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ——相对主应变;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——主应力;

σ_m ——平均应力, $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$;

λ ——正值比例常数。

式(1-5)没有反映加载过程的经历,对于加载过程中应力比值不恒定的过程,严格说是不适用的。不过由于该式运算简便,因此可用来近似表示挤压技术中的主应力与相对应变的对应关系。例如,由式(1-5)可以得出相对应变顺序与主应力顺序的对应关系。

因为 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$,由式(1-5)得

$$\delta_1 > \delta_2 > \delta_3 \quad (1-6)$$

由体积不变条件可知

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0 \quad (1-7)$$

式(1-6)表明,与最大主应力 σ_1 对应的相对应变 δ_1 为最大,与最小主应力 σ_3 对应的相对应变 δ_3 为最小,而与中间主应力 σ_2 相对应的相对应变 δ_2 介于 δ_1 与 δ_3 之间。

相对应变的大小和方向既应满足式(1-6),又应满足式(1-7)。同时满足这两式的条件是,相对应变的符号应该有正有负。与最大主应力 σ_1 相对应的相对应变 δ_1 必然是正应变(拉应变);与最小主应力 σ_3 相对应的相对应变 δ_3 必然是负应变(压应变),至于中间主应力 σ_2 所对应的相对应变 δ_2 是拉应变还是压应变,要看 σ_2 接近于 σ_1 还是 σ_3 而定。如果 σ_2 接近于 σ_1 则 δ_2 是拉应变,如果 σ_2 接近于 σ_3 则 δ_2 是压应变。如何判断 σ_2 接近于 σ_1 ,还是接近于 σ_3 ,可根据图1-13所示的主应力与相对应变轴来确定。

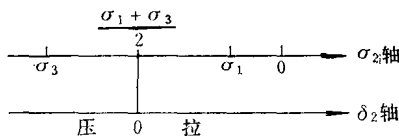


图1-13 应变 δ_2 与应力 σ_2 符号对应关系