

● 高等学校教学用书 ●

金属塑性加工学

——挤压、拉拔与管材冷轧

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU

3
0

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属塑性加工学

——挤压、拉拔与管材冷轧

西安冶金建筑学院 马怀宪 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属塑性加工学

——挤压、拉拔与管材冷轧

西安冶金建筑学院 马怀宪 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 19 字数 453 千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数00,001~4,500册

ISBN 7-5024-0843-6

TG·122(课) 定价4.90元

前 言

《金属塑性加工学——挤压、拉拔与管材冷轧》系根据冶金部金属压力加工专业教学计划而编写的。它是金属压力加工专业学生必修课之一。本书内容着重讲述加工方法的基本原理和基本知识；对已学过的《塑性加工力学》、《塑性加工物理基础》等专业基础课程的内容只立足于具体应用。

本教材内容主要包括：挤压、拉拔与管材冷轧的变形、应力与力；工艺参数与产品质量、产量、成品率的关系及确定原则；工具模具结构及设计的基本原理；加工设备的基本类型与结构。由于本课程的教学时数所限，教材中未能过多涉及管、棒、型、线材生产的工艺流程及辅助工序的工艺和设备。

本教材的内容主要结合有色金属压力加工工业生产情况，但对黑色金属在挤压、拉拔与管材冷轧方面的现状和特点也有所反映。为了帮助读者理解和运用教材中所讲述的一些原理、原则和计算公式，书中还适当地给出了一些例题。

参加本教材编写的有中南工业大学聂存中（编写第一篇中的2、3、4章和第7章中的7.1、7.2、7.3、7.4节）、东北工学院温景林（编写第二篇）和西安冶金建筑学院马怀宪（编写第一篇中的1、5、6章和第7章中的7.5节及第三篇）。全书由马怀宪负责统稿并担任主编。

由于编者水平有限，书中错误之处欢迎读者批评指正。

编者
1989年10月

目 录

第一篇 挤压	1
1 概 述	1
1.1 挤压的基本方法	1
1.2 挤压法的优、缺点	1
1.3 挤压生产的发展与现状	3
2 挤压时的金属流动实验	6
2.1 不同挤压阶段的金属流动特点	6
2.2 反挤压时的金属流动	19
2.3 影响金属流动的因素	21
2.4 挤压时的典型流动类型	28
3 挤压力	29
3.1 影响挤压力的因素	29
3.2 计算挤压力的理论公式	31
3.3 挤压力计算公式中的参数确定	37
3.4 其它挤压力计算公式	43
3.5 挤压力计算例题	46
4 挤压制品的组织性能及质量控制	49
4.1 挤压制品的组织	49
4.2 挤压制品的机械性能	55
4.3 挤压制品的质量控制	58
4.4 挤压工艺参数对制品组织性能的影响	61
5 挤压工具及其设计	65
5.1 挤压工具的组成	65
5.2 模子	66
5.3 穿孔针（芯棒）	91
5.4 挤压垫	93
5.5 挤压杆	94
5.6 挤压筒	96
5.7 挤压模具的计算机辅助设计与加工	100
5.8 挤压工具用材料及提高寿命的途径	102
6 挤压设备	105
6.1 挤压机的类型及其结构	105
6.2 挤压机的主要部件及其结构	110
6.3 挤压机的辅助设备及装置	116
6.4 挤压机的液压传动和控制	120
7 挤压工艺	129
7.1 挤压方法与挤压设备的选择	129
7.2 挤压工艺参数的确定	131
7.3 挤压时的润滑	143

7.4	锭坯尺寸选择	146
7.5	挤压新工艺和新方法	148
第二篇 拉拔		153
8	概述	153
8.1	拉拔的一般概念	153
8.2	拉拔法的优、缺点	154
8.3	拉拔历史与发展趋向	155
9	拉拔时的应力与变形	156
9.1	圆棒拉拔时的应力与变形	156
9.2	管材拉拔时的应力与变形	160
9.3	拉拔制品中的残余应力	167
10	拉拔力	172
10.1	各种因素对拉拔力的影响	172
10.2	拉拔力的实测与理论计算	176
11	拉拔工具	188
11.1	模子	188
11.2	芯头	193
12	拉拔设备	197
12.1	管棒材拉拔机	197
12.2	拉线机	202
13	拉拔工艺	209
13.1	拉拔配模	209
13.2	拉拔时的润滑	240
13.3	拉拔制品的主要缺陷	245
13.4	特殊拉拔方法	247
第三篇 管材冷轧		250
14	概述	250
14.1	管材冷轧的基本方法	250
14.2	周期式冷轧管法的优、缺点	251
14.3	周期式冷轧管法生产的发展与现状	252
15	冷轧管时的金属变形、应力和力	255
15.1	周期式冷轧管的变形过程	255
15.2	瞬时变形区压下量的确定	256
15.3	冷轧管时金属中的应力状态	259
15.4	冷轧管时的力与计算	262
16	冷轧管工具的孔型设计	268
16.1	二辊式冷轧管机工具孔型设计	268
16.2	多辊式冷轧管机工具孔型设计	279
17	周期式冷轧管机	284
17.1	二辊式冷轧管机传动系统与主要结构	284
17.2	多辊式冷轧管机传动系统与结构	289
参考文献		297

第一篇 挤 压

1 概 述

1.1 挤压的基本方法

所谓挤压，就是对放在容器（挤压筒）中的锭坯一端施加以压力，使之通过模孔成型的一种压力加工方法。

挤压方法有许多，并且可以根据不同的特征进行分类。挤压最基本的方法是正挤压与反挤压，如图1-1所示。在正挤压时，金属的流动方向与挤压杆的运动方向相同。其最主要的特征是锭坯与挤压筒内壁间有相对滑动，所以二者间存在着很大的外摩擦。在反挤压时，金属的流动方向与挤压杆的运动方向相反。其特点是金属与挤压筒内壁间无相对运动，继而也就无外摩擦。正挤压与反挤压的不同特点对挤压过程、产品质量和生产效率等都有着极大的影响。

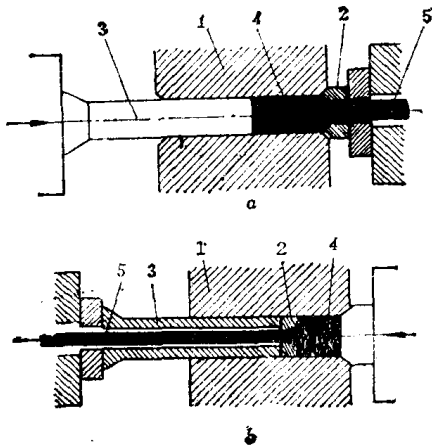


图 1-1 挤压的基本方法

a—正挤压；b—反挤压

1—挤压筒；2—模子；3—挤压杆；4—锭坯；5—制品

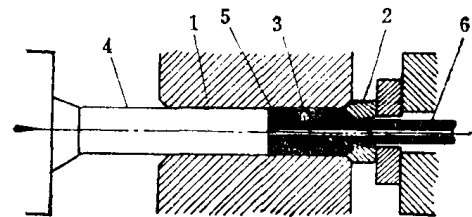


图 1-2 管材正挤压法

1—挤压筒；2—模子；3—穿孔针；

4—挤压杆；5—锭坯；6—管材

用挤压法也可以生产空心的制品，如图1-2所示。它是生产管材时最常用的正挤压法。所用的锭坯一般为实心的，在某些情况下也用空心的锭坯，这主要取决于设备结构和金属的性质。

挤压时，穿孔针与模孔形成一环形间隙，在挤压杆压力作用下，金属由此间隙中流出形成管材。

1.2 挤压法的优、缺点

作为生产管、棒、型材以及线坯的挤压法与其他加工方法，如型材轧制和斜轧穿孔相

比具有以下一些优点：

(1) 具有比轧制更为强烈的三向压应力状态图，金属可以发挥其最大的塑性。因此可以加工用轧制或锻造加工有困难甚至无法加工的金属材料。对于要进行轧制或锻造的脆性材料，如钨和钼等，为了改善其组织和性能，也可采用挤压法先对锭坯进行开坯。

由于挤压法的应力状态非常有利于发挥塑性，因而金属可以一次承受很大的塑性变形。在许多情况下，挤压比（锭坯断面面积与制品断面面积之比）可达50或更大一些，而在挤压纯铝时可高达1000以上。

(2) 挤压法不只是可以在一台设备上生产形状简单的管、棒和型材，而且还可以生产断面极其复杂的，以及变断面的管材和型材。这些产品一般用轧制法生产是非常困难，甚至是不可能的，或者虽可用滚压成型、焊接和铣削等加工方法生产，但是是很不经济的。

用挤压法生产的部分型材断面形状如图1-3所示。

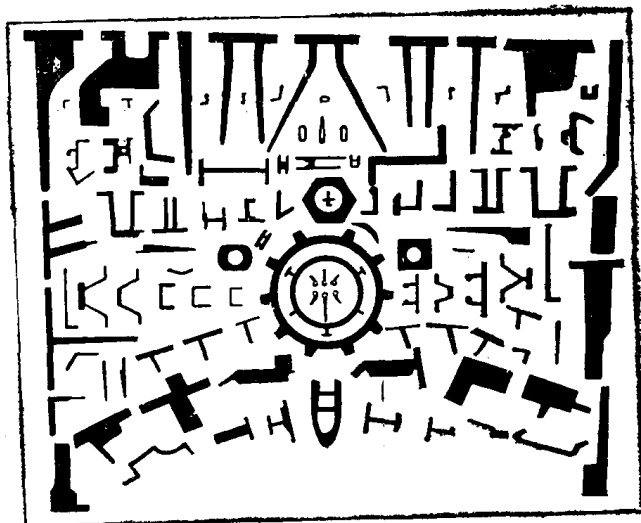


图 1-3 用挤压法生产的部分型材断面形状

(3) 具有极大的灵活性。在同一台设备上能够生产出很多的产品品种和规格。当从一种品种或规格改换生产另一种品种或规格的制品时，操作极为方便、简单，只需要更换相应的模具即可，而所占的工作时间很短。因此，挤压法非常适合于生产小批量、多品种和多规格的产品。

(4) 产品尺寸精确，表面质量高。热挤压制品的精确度和光洁度介于热轧与冷轧、冷拔或机械加工之间。用挤压法可以生产出的型材最小断面尺寸可达2mm，壁厚为0.3mm，其尺寸偏差为名义尺寸的+0.5%，制品的表面粗糙度 R_a 可达 $1.6\sim 2.5\mu m$ 。

(5) 实现生产过程自动化和封闭化比较容易。目前建筑铝型材的挤压生产线已实现完全自动化操作，操作人员数已减少到2人。在生产一些具有放射性的材料时，挤压生产线比轧制生产线更容易实现封闭化。

挤压法在具有上述优点的同时，也存在一些缺点，这就是：

(1) 金属的固定废料损失较大。在挤压终了时要留压余和有挤压缩尾。在挤压管子时还有穿孔料头的损失。压余量一般可占锭坯重量的10~15%。此外，正挤压时的锭坯长

度受一定的限制，一般锭长与直径之比不超过3~4。不能通过增大锭坯长度来减少固定的压损损失，故成品率较低。然而，用轧制法生产时没有此种固定的废料，轧件的切头尾损失仅为锭重的1~3%。

(2) 加工速度低。由于挤压时的一次变形量和金属与工具间的摩擦都很大，而且塑性变形区又完全为挤压筒所封闭，使金属在变形区内的温度升高，从而有可能达到某些合金的脆性区温度，会引起挤压制品表面出现裂纹或开裂而成为废品。因此，金属流出的速度受到一定的限制。在轧制时，由于道次变形量和摩擦都比较小，因此生成的变形热和摩擦热皆不大。在此条件下，金属由塑性区温度升高到脆性区温度的可能性非常小，所以一般金属的轧制速度实际上是不受限制的。

此外，在一个挤压周期中，由于有较多的辅助工序，占用时间较长，生产率比轧制时的低。

(3) 沿长度和断面上制品的组织性能不够均一。这是由于挤压时，锭坯内外层和前后端变形不均匀所致。

(4) 工具消耗较大。挤压法的突出特点就是工作应力高，可达到金属变形抗力的10倍。挤压垫上的压力平均为400~800MPa，有时可达1000MPa或更高。此外，在高温和高摩擦的作用下，使得挤压工具的使用寿命比轧辊的低得多。同时，由于加工制造挤压工具的材料皆为价格昂贵的高级耐热合金钢，所以对挤压制品的成本有不可忽视的影响。

综上所述可知，挤压法非常适合于生产品种、规格和批数繁多的有色金属管、棒、型材，以及线坯等。在生产断面复杂的或薄壁的管材和型材，直径与壁厚之比趋近于2的超厚壁管材，以及脆性的有色金属和钢铁材料方面，挤压法是唯一可行的压力加工方法。

1.3 挤压生产的发展与现状

挤压法在金属塑性加工领域中出现得较晚，是一种新的金属加工工艺。据文献记载，大约在1797年英国人J.Bramah首先发明了一种挤压铅管的装置，继而将此原理应用到电缆包铅上面。因为当时尚不能解决挤压时所需要的巨大而持续的压力，所以只能挤压象铅这样一类低熔点软金属。直到1894年，才由德国人A.Dick设计和制造了第一台可以用来挤压黄铜的挤压机。自此以后，挤压生产日益发展，而且所用的挤压设备到第二次世界大战结束前，水压机的能力已达125MN。

二次世界大战后，由于航空、火箭、宇宙航行技术，以及汽车、船舶、铁路运输、桥梁、输电等各部门的发展，特别是建筑业开始大量采用铝合金型材，促进了挤压生产的急剧发展，这主要体现在以下一些方面。

(1) 挤压机的台数和能力在不断地增加，挤压生产线的自动化程度不断提高。例如，为了满足制造大型运输机和客机所需的整体壁板等结构材料，建造了能力为270MN的大型水压机，并准备设计和制造500MN的水压机。

在挤压机的液压传动方面，以前主要是由高压泵——蓄能站集中供给工作液体。目前，单独传动的油压机台数明显增多，并且已成为挤压机的的发展趋势。现在，世界上最大的油压机能力已达95MN。

近代的挤压机已完全摆脱了人工操纵分配器的繁重体力劳动，改为远距离集中控制、程序控制和带有计算机的可编程序逻辑控制，从而使生产效率大幅度提高，操纵人员显著

减少，甚至有可能实现挤压生产线的无人化操作。

(2) 强化挤压生产过程，新的挤压技术不断出现。例如，在铝合金挤压方面，为了控制流出速度，防止在制品表面上出现周期性裂纹，出现了等温挤压技术，为了提高挤压速度出现了冷挤压技术和润滑挤压技术。为了提高生产效率和成材率，出现了锭接锭挤压和Conform及Castex连续挤压。为了提高铝合金型材的生产效率，近年来又出现了挤压淬火——制品出模孔后，利用其自身的余热在出料台上直接淬火。

对于易氧化的紫铜和黄铜等，则采用了水封挤压、惰性气体保护挤压和真空挤压。对在塑性变形时极易破碎的脆性材料，如钨、钼、铍等则采用了带反压力的挤压和静液挤压技术。

为了使常规的正挤压时锭坯与筒之间的摩擦所造成的有害作用变为有利于挤压过程，出现了“有效摩擦挤压”。至于具有连续挤压性质的，诸如：粘稠介质挤压、Conform挤压、Linex挤压、Extrolling挤压等方法则更是以摩擦力作为动力来实现挤压过程的。

(3) 产品品种、规格不断扩大。铝合金型材的品种已达25000多种，其中包括了逐渐变断面和阶段变断面的型材。管材方面，除一般的等壁厚管材外，还出现了变壁厚管材和多孔隙管材。

挤压法过去主要是用来生产铜和铝及其合金材，一些熔点较高和变形抗力过大的金属材料，由于工模具消耗太大，而且制品的尺寸和形状又得不到保证，因而使其应用范围受到了限制。例如，钢的热挤压，早在1917年就开始应用了，但是真正获得大规模的推广应用，还是在本世纪40年代初J.塞茹尔内发明了用熔融玻璃作润滑剂之后。玻璃润滑剂的发现，使得镍合金、钛合金、钼、钨等材料的挤压也可以实现工业规模的生产。

挤压法除了可以生产实体金属和单一的金属制品以外，目前也可以用金属粉末、颗粒挤压成材，同时，还能用来生产双金属、多层金属以及复合材料等制品。

(4) 理论研究有突破性的进展。尽管挤压法早在18世纪末就已出现，但是对其理论研究却较晚。1913年，H.C.库尔纳柯夫首先进行了挤压时金属流动和压力的研究。稍后，施维斯古特研究了挤压黄铜时的金属流动规律和挤压缩尾的形成机理。H.温凯尔则用塑胶泥研究了不同的挤压时的流动景象。

直到1931年，E.西贝尔利用了C.芬克导出的轧制变形功的解析法首先建立了计算挤压力的简略公式。由于在该公式中未考虑不均匀变形和摩擦的影响，因而计算结果与实际的相差甚远。随后，G.萨克斯，C.И.古布金相继利用平截面法得出各自的计算挤压力公式。然而，平截面法仍存在不能考虑不均匀变形影响的问题。

R.希尔于1948年经严密的数学处理，将滑移线场理论运用到解决平面应变挤压问题。此后，主要是W.约翰逊等人运用了滑移线场理论解决各种挤压条件下的平面应变问题。但是，由于用滑移线场理论求解时计算很繁琐，而且还不大适用于轴对称问题。因此，在50年代末期，W.约翰逊与工藤发展了上界定理在各种挤压条件下的平面应变和轴对称问题的解法。

此外，在50年代中期，E.G.汤姆逊等人发展了一种将金属流动实验测量和应力计算结合起来的方法，即所谓的视塑性法。利用此种方法可以成功地解挤压时的平面应变或轴对称问题，还可以确定变形区中的应变速率和应力分布等。但是，应用此法时必须先作实验。

到60~70年代, P.V.马尔卡、山田、小林等人相继将有限元技术用于解决塑性加工问题。这种方法能满意地给出塑性加工时变形区中的应力、应变、应变速率的分布及温度场。现在已将此种方法用于分析挤压过程。

上界法和有限元法虽然对分析挤压过程非常有用, 但是计算工作量太大。近年来电子计算机的普及对上述方法的推广应用提供了可能, 并且对挤压模具的优化设计创造了条件, 目前已开始实现复杂断面型材的计算机辅助设计与制造。

2 挤压时的金属流动实验

2.1 不同挤压阶段的金属流动特点

2.1.1 研究金属流动的意义与方法

研究金属在挤压时的塑性流动规律是非常重要的。这是因为挤压制品的组织、性能、表面质量、外形尺寸与形状精确度，以及工具设计原则等皆与之有密切的关系。采用不同的挤压方法，以不同的工艺参数来挤制特性各不相同的金属锭坯时，金属流动状态也会有所不同，甚至可能会存在很大差异。

有很多实验方法可以提供进行挤压时金属塑性流动规律的研究，如坐标网格法，视塑性法，组合试件法，插针法，低倍与高倍组织法，光塑性法，云纹法，以及硬度法等等。

(1) 坐标网格法

如图2-1所示的坐标网格法，是最常用的实验方法。它可较细致地反映出金属在各部位和各阶段的流动情况。此法的实验操作程序是：

1) 将圆柱形锭坯沿子午面纵向剖分成两半。取其一半，在剖面上均匀刻画出正方网格。网格大小取决于金属品种、试件尺寸和测试手段。条件允许时可采用0.25mm线距，一般可采用1~3mm (图2-16)。

2) 在刻痕沟槽中充填以耐热物质，如石墨、高岭土、氧化锌或粉笔灰等，或嵌入金属丝。然后将水玻璃涂在剖面上以防止挤压时粘结，最后用螺栓固定住试件 (图2-1b和c)。

3) 按要求进行不完全挤压。

4) 取出试件，打开，观测网格的变化 (图2-1d)。

(2) 低倍和高倍组织法 (图2.2)

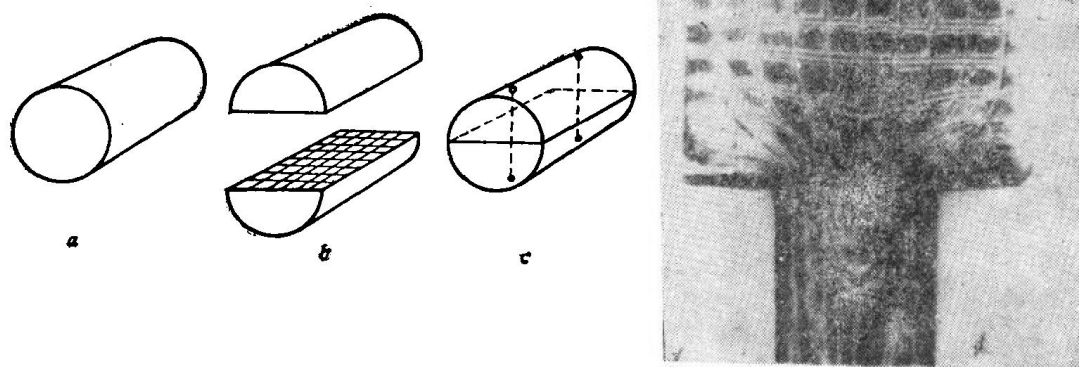


图 2-1 坐标网格法实验

a—实心锭坯；b—纵向剖分为两个试件，其一剖面上刻出网格；c—固定试件；
d—挤压后的网格变化

这是在生产条件下常用的方法。在挤压后取用压余和挤制品尾部，将它们的纵断面与横断面抛光、腐蚀，最后，根据低倍组织变化和流线来研究金属流动情况，或根据高倍组织进一步观测金属组织的分布。此法的优点是试样制备迅速简单，可以清晰地显示出变形区内的剧烈滑移区、模子边部的死区，也可计算不同部位的主变形方向和相对变形量的大小。

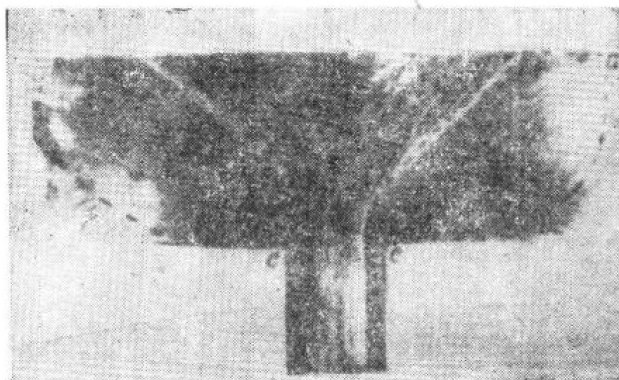


图 2-2 低倍组织法试样

(3) 视塑性法

这是将坐标网格法和数学分析法结合起来的一种研究方法。用几个尺寸相同的同一种金属试件，以不同的挤压行程进行不完全挤压。通过对试件网格变化的分析研究，计算出相应的主变形速度与方向，以及应力。最终可得到某条件下的横断面上与纵断面上近似的变形与应力图。此法的缺点是必须中断挤压过程，从而引起实验过程中的温度条件与摩擦条件的变化。

(4) 光塑性法（偏振光法）

使用偏振光透射塑性变形的透明模型，可在偏光镜屏幕上观测到一些相同颜色的条纹（等色线），这即是最大剪切应力的几何点位置。同时也会出现斜度相同的条纹（等斜线）。根据等斜线可以绘制出“等压线”，即主正应力流线。由这些数据常可得出试验模型的应力—变形状态的特点。图2-3示出挤压树脂试件时，用偏振光透射该试件所得到的等色线（明亮条纹与暗色条纹）图。所用的模拟材料，依研究目的不同可分别采用：赛璐珞，聚苯乙烯，其它高分子非晶体化合物，以及氯化银和氯化铯等。

(5) 云纹法

云纹法是介于坐标网格法和光塑性法之间的一种研究方法，它是在坐标网格法基础上发展起来的。使用坐标网格法时，根据网格尺寸变化求出的变形量只是一个平均值；为了使数值更精确些，就应刻画出更小线距的网格。但这样一来，不仅使测量工作量增大，而且需要更为精密的测试手段。基于两组网格对光的“机械干涉”或“几何干涉”现象，即所谓“云纹效应”，发展了一种新的研究方法——云纹法。图2-4示出由拉伸实验得到的云纹产生原理。图2-4a示出变形前的一组格子，其线距为 δ_1 ；图2-4b显示了经拉伸变形后试件格子的变化，其线距增大到 δ 。当偏振光束透射覆盖了的 a 、 b 格子时，则显示出明暗相间的云纹，明亮条纹的线距为 L 。用分析法根据 δ_1 与 L 数值可确定变形分量。图2-5示出挤压时的云纹。

光塑性法和视塑性法的局限性在于不能反映具体被挤压金属的流动特性，也不能承受较大的挤压比。



图 2-3 挤压树脂试件的等色线

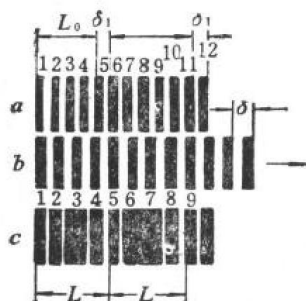


图 2-4 拉伸时的云纹示意图

a—未变形格子；b—拉伸变形后的格子；
c—两组格子覆盖产生的云纹

2.1.2 正挤压时的金属流动特点

由于生产实践中广泛使用正挤压法，故主要对正挤压时的各挤压阶段的划分和各阶段的金属流动特征加以分析。

按金属流动特征和挤压力的变化规律，可以将挤压过程分为三个阶段（图2-6）。第一阶段称开始挤压阶段或填充挤压阶段。金属承受挤压杆的作用力，首先充满挤压筒和模

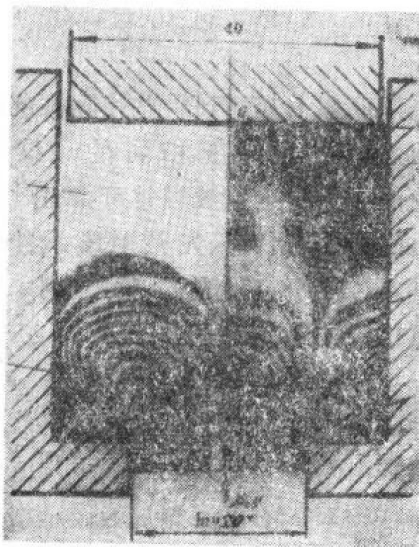


图 2-5 挤压时试件的云纹照片图

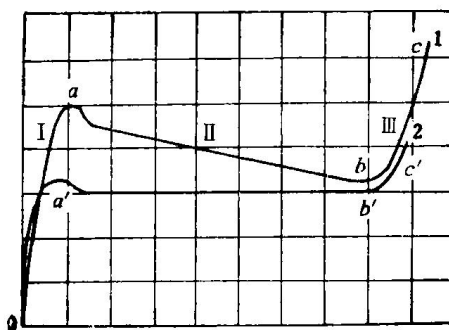


图 2-6 挤压过程的挤压力变化曲线

I $oa(a')$ —开始挤压阶段；II $ab(a'b')$ —基本挤压阶段；III $bc(b'c')$ —终了挤压阶段

孔；挤压力急剧直线上升。第二阶段称基本挤压阶段或平流（稳定）挤压阶段。一般，筒内的坯金属不发生中心层与外层的紊乱流动，即坯外层金属出模孔后仍在制品外层，

不会流到制品中心。锭坯任一横断面的径向上金属质点，总是中心部分首先流动进入变形区，外层的流动得较慢，即存在流动不均匀现象。靠近挤压垫处和模子与挤压筒的交界处，金属尚未参与流动，形成难变形区。图2-6 I区的线型特征表明，挤压力随筒内锭坯长度的缩短、表面摩擦力总量减少，几乎呈直线下降。第三阶段称终了挤压阶段或紊流挤压阶段。此时，筒内金属产生剧烈的径向流动，即紊流。外层金属进入内层或中心的同时，两个难变形区内的金属也开始向模孔流动，从而易产生第三挤压阶段所特有的缺陷“缩尾”。此时，工具对金属的冷却作用，强烈的摩擦作用，使挤压力迅速上升。一般应适时中止挤压过程。

(1) 开始挤压阶段

为了便于把热态锭坯顺利送入挤压筒，必须使两者的直径差控制在1~15mm范围；筒径越大，间隙越大。根据最小阻力定律，锭坯金属在挤压杆压力作用下，首先产生径向流动逐渐填充此间隙。根据平模挤压实验得知，在开始挤压阶段后期，锭坯前端金属承受剪切变形而流出模孔；但在锥模挤压时，填充的同时前端金属进入了模孔。

填充挤压阶段沿锭坯长度上的不均匀径向流动，对制品的机械性能与质量有一定的影响。一般，希望锭筒间的间隙尽可能小些，以便减小填充挤压时的变形量——填充系数 λ_c ：

$$\lambda_c = \frac{F_0}{F_p} \quad (2-1)$$

式中 F_0 ——挤压筒内孔横断面积， mm^2 ；

F_p ——锭坯横断面积， mm^2 。

锭筒间的间隙越大，填充系数 λ_c 越大，填充过程中流出模孔的料头越长，挤压管材时的穿孔（实心）料头也长。这部分材料基本上保留了铸造组织，机械性能低劣，必须切除。

当锭坯的长度与直径之比中等（3~4）时，填充过程中会出现和锻造一样的鼓形（图2-7a），其表面首先与挤压筒壁接触。于是，在模子附近有可能形成封闭的空间。其中的空气或未完全燃烧的润滑剂产物，在继续填充过程中被剧烈压缩（压力高达1000MPa）并显著地发热。若锭坯在鼓形变形时侧面承受不了周向拉应力，会产生轴向微裂纹。高压气体有可能进入锭坯侧面微裂纹中。这些含有气体的微裂纹在通过模孔时若被焊合，则制品表皮内存在“气泡”缺陷；若未能焊合，制品表面上则会出现“起皮”缺陷。间隙愈大，这些缺陷产生的可能性愈大。

为防止上述缺陷，除了采用适当的间隙值 ΔD 以外，还希望锭坯长径比不大于3~4，

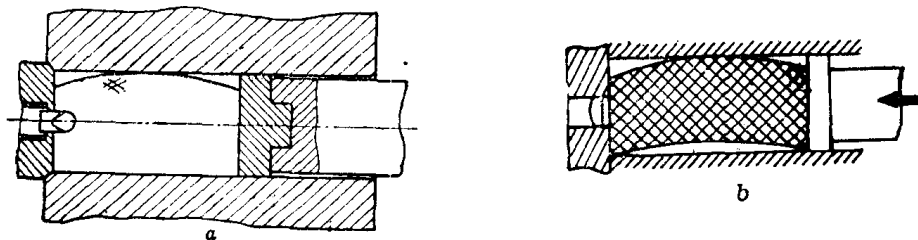


图 2-7 在卧式挤压机上挤压时形成的鼓形与封闭空间

a—锭坯较短；b—锭坯较长

否则锭坯在筒内镦粗时会被压弯 (图2-7b), 使填充过程的流动复杂。较好的措施是采用锭坯“梯温加热”法, 即锭坯获得沿长度方向上的原始温度梯度。变形抗力较低的高温端向着模子放入, 受压填充时的金属则从前向后依次产生径向流动, 从而将空气从挤压垫处排除。目前, 已将“梯温加热”法应用于铝等温挤压和电缆铝护套连续挤压。

使用实心锭坯挤制管材时, 穿孔操作应放在填充挤压之后, 即使这种操作会使穿孔料头增长也必须遵守。这是因为, 在卧式挤压时, 锭坯进入筒后沉在下面, 先穿过锭坯的穿孔针尖会被填充向上流动的金属带动而偏离挤压中心线, 其结果导致整根管材偏心。

以上述及的为开始挤压阶段可能导致制品缺陷的一面。可是在某些材料的挤制工艺中, 却希望采用较大的锭坯与筒的间隙, 以便获得较大的填充挤压变形量。例如, 航空工业部门应用的LY12和LC4高强铝合金阶段变断面型材 (图2-8), 其大头部分用于与其它结构铆接。为了保证大头部分型材的横向机械性能, 采用了 $\lambda_c = 30 \sim 40\%$ 的填充变形量。

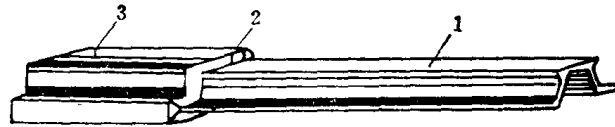


图 2-8 阶段变断面型材
1—基本型材; 2—过渡区; 3—大头部分

(2) 基本挤压阶段

基本挤压阶段是指把断面积为 F_0 的锭坯挤压成为断面积为 F_1 制品的阶段。其变形指数用挤压比 λ 表示:

$$\lambda = \frac{F_0}{\Sigma F_1} \quad (2-2)$$

1) 变形区内的应力与变形状态 图2-9示出正挤压时工具作用于金属上的外力、应力分布和变形状态。由图可知, 作用于金属上的外力有: 挤压杆通过挤压垫给予金属的单位压力 σ_d , 挤压筒壁、模子压缩锥面和工作带给予金属的单位正压力 dN_l 、 dN_{zh} 、

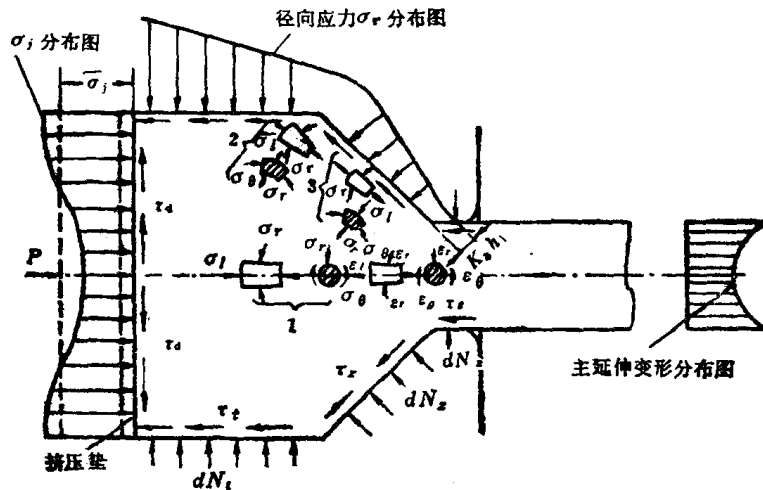


图 2-9 作用于金属上的力、应力及变形状态

dN_g 和摩擦应力 τ_t 、 τ_{zh} 、 τ_g ；在一定条件下，挤压垫与金属界面上也会出现摩擦应力 τ_d 。

挤压时，变形区内的金属一般处于三向压缩应力状态，即轴向压应力 σ_l 、径向压应力 σ_r 和周向压应力 σ_θ 。其中，轴向压应力 σ_l 是由于挤压杆作用于金属上的压力和模子的反作用力产生的；径向压应力 σ_r 和周向压应力 σ_θ 则是由于挤压筒和模孔的侧壁作用的压力所产生的。变形区内金属的变形状态图为两向压缩变形和一向延伸变形，其方向与应力状态的偏斜应力分量方向一致，即径向压缩变形 ϵ_r 、周向压缩变形 ϵ_θ 和轴向延伸变形 ϵ_l 。

变形区内各点的主应力值是不相同的，其分布规律如图2-9所示。轴向主应力 $|\sigma_l|$ 沿径向上的分布规律是边部大、中心小。这是由于中心部分正对着模孔，根据最小阻力定律可知，其流动阻力较之存在很大摩擦阻力的边部要小得多，故中心部分的主应力 $|\sigma_l|$ 也就最小。用带窄槽的挤压垫进行挤压实验时得到的金属充满槽的形态，证明了 $|\sigma_l|$ 沿径向分布的这一规律。主应力 $|\sigma_l|$ 沿轴向上的分布，是由挤压垫向模子方向逐渐减小的。在无反压力的挤压条件下，模子出口处的主应力 $\sigma_l = 0$ ；而在有反压力的挤压条件下，模子出口处的 $|\sigma_l|$ 正好等于单位反压力。径向主应力 σ_r 的分布规律与轴向主应力 σ_l 的相同。根据塑性条件（ $|\sigma_r| - |\sigma_l| = K_{zh_1}$ ）可知，在模子出口处无反压力时， $|\sigma_r| = K_{zh_1}$ 。 K_{zh_1} 为金属在变形区压缩锥出口处的变形抗力，等于工作带内的金属变形抗力 K_g 。

根据塑性变形理论，周向主应力 σ_θ 与径向主应力 σ_r 之间的关系属于轴对称问题，即 $\sigma_r = \sigma_\theta$ 。实际上两者之间仍存在着一点差异，即 $\sigma_r \approx \sigma_\theta$ 。此差值由挤压中心线（对称轴）向接触界面逐渐增大，而且总是 $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$ 。

轴向主应力 σ_l 与径向主应力 σ_r 之间的关系，在不同部位也会不一样。在挤压筒内， $|\sigma_l| > |\sigma_r|$ ；而在变形区压缩锥内，如不考虑受轴向压应力的影响，则是 $|\sigma_l| < |\sigma_r|$ 。这一结论可以通过对金属流动实验的分析得到证实：在塑性变形区中的网格格子纵向变长，而在挤压筒中的格子则在径向上变宽。

2) 基本挤压阶段金属流动的分析 与其它的压力加工方法一样，挤压时的流动不均匀性总是绝对的。首先是由于外摩擦的存在，沿横断面上的摩擦作用力场强在径向上的分布，以接触界面处最强，越远离界面越弱，对金属流动的阻力作用不会一样；其次，锭坯横断面上的温度分布，由于加热方式、变形过程中的生成热、以及热传导等因素的综合作用，不可能绝对均匀，因此，沿径向上金属的变形抗力分布不同，变形抗力低的部分易于流动；最后，模孔几何形状和模孔的布置，使实际的应力分布更为复杂，如上所述，对准模孔部分的金属流动阻力最小。

例如，外摩擦很大或锭坯外层温度较低时，金属外部变形抗力高于中心，就会产生内部流动速度高于外部流动速度的不均匀流动现象。压力加工过程中的金属被看作一个整体。由于内摩擦作用，流动速度高的部分对较慢的部分作用一个轴向拉力，从而使外部金属或流动较慢部分的金属承受轴向附加拉应力，其数值沿径向上由表面向内逐渐减小；而内部金属或流动较快部分的金属则相应地承受轴向附加压应力并由中心向外逐渐减小。附加应力大小沿轴向上的分布规律是，从金属开始流动的变形区入口断面向出口断面逐渐增大，且在出口断面处达到最大值。这是由于金属流动的不均匀性是从其入口向出口逐渐增加的结果。附加压应力与轴向主应力叠加后的工作应力仍为压应力，其强度增加；附加拉应力与轴向主应力叠加后的工作应力，有可能改变应力的符号而成为拉应力，此时金属则