

制造工艺丛书

锻压工艺 及应用

谢水生 李强 周六如 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

制造工艺丛书

锻压工艺及应用

谢水生 李强 周六如 编著

国防工业出版社

·北京·

前 言

锻压(锻造与冲压)工艺是将材料通过塑性变形的方式进行成形的材料成形工艺。锻压生产的优越性在于:它不但能获得机械零件所需要的形状,而且能改善材料的内部组织结构,提高力学性能。因此,锻压生产是向各工业部门提供高性能机械零件毛坯的重要途径之一。锻件的应用与开发对国民经济持续、高速发展具有重要意义,并在国防工业现代化中占有重要的地位。

随着我国工业的快速发展,大飞机项目的启动,汽车、造船行业的快速崛起,机械制造行业的稳步前进,对锻压成形的要求也越来越高。为此,新的锻压工艺和锻压设备不断涌现,锻压行业已成为工业领域中不可或缺的重要部门。

为了反映我国锻压技术的发展,满足锻压工程技术人员的需要,我们编写了此书以供从事锻压行业的人员学习和参考,也可以作为普通高等院校的教材。本书内容侧重于生产实践,也涉及一定的理论分析,适用性强。

本书内容分为锻造和冲压两大部分:第一部分讲锻造工艺,主要内容包括锻造成形概述、锻前准备、锻造成形前加热、自由锻、模锻工艺、特种锻造、常用锻压设备、锻造过程信息化;第二部分讲冲压工艺,主要内容包括冲压变形的基本原理、冲裁工艺及模具设计、弯曲工艺及模具设计、拉深工艺及拉深模具设计、其他成形工艺及模具。

第1章~第8章由沈阳工业大学李强撰写初稿,第9章~第13章由南昌大学周六如撰写初稿,全书由北京有色金属研究总院谢水生修改及统稿。最后,由谢水生、李强、周六如共同定稿。

本书在编写过程中,参阅了不少相关著作,在此向相关作者表示感谢。限于水平和经验,书中不妥之处在所难免,敬请各位读者不吝赐教。

编 者

2010年12月

目 录

第1章 锻造成形概述	1
1.1 概述	1
1.1.1 锻造成形的特点	1
1.1.2 锻造发展趋势	2
1.2 锻造成形的基本原理	3
1.2.1 金属塑性变形机理	3
1.2.2 塑性变形对组织和性能的影响	5
1.2.3 回复和再结晶	6
1.3 锻造的基本分类	6
1.4 锻造过程的摩擦与润滑	8
第2章 锻前准备	17
2.1 锻造用料与模具	17
2.1.1 锻造用材料	17
2.1.2 模具	19
2.2 下料	25
第3章 锻造成形前加热	29
3.1 锻造加热的目的	29
3.2 加热方法	29
3.2.1 燃料加热	29
3.2.2 电加热	30
3.3 加热过程的物理化学变化	33
3.4 加热温度及范围的确定	36
3.4.1 始锻温度	36
3.4.2 终锻温度	37
3.4.3 加热规范	38
3.5 加热时间确定	44
3.6 锻造过程温度测量	47
3.6.1 接触式测温	48

3.6.2 非接触式测温	52
3.7 加热过程缺陷分析与预防技术	54
3.7.1 过热和过烧	54
3.7.2 氧化、脱碳和增碳	56
3.7.3 裂纹	58
3.7.4 其他缺陷	58
第4章 自由锻	60
4.1 概述	60
4.2 自由锻基本工序	60
4.2.1 镦粗	60
4.2.2 拔长	64
4.2.3 冲孔	69
4.2.4 扩孔	71
4.2.5 弯曲	72
4.3 自由锻工艺规程制定	72
4.3.1 工艺规程的制订原则	72
4.3.2 自由锻工艺过程的内容	73
4.3.3 自由锻造的基本工艺参数及锻件图	73
4.4 合金钢和有色金属锻造	79
4.4.1 莱氏体高合金工具钢的锻造	79
4.4.2 不锈钢锻造	82
4.4.3 高温合金锻造	84
4.4.4 铝合金锻造	86
4.4.5 镁合金锻造	89
4.4.6 铜合金锻造	92
4.5 典型自由锻工艺举例	94

4.5.1 轴类零件的自由锻 工艺示例.....	94	6.2.2 等温锻造工艺 及模具	140
4.5.2 水压机自由锻热轧辊 锻件工艺示例.....	99	6.3 超塑性锻造.....	142
第5章 模锻工艺	103	6.4 粉末锻造.....	144
5.1 概述.....	103	6.4.1 粉末锻造特点 与工艺	144
5.1.1 模锻的特点	103	6.4.2 粉末锻造种类 及应用	146
5.1.2 模锻的分类	103	6.5 液态模锻.....	148
5.2 模锻图制定.....	106	6.6 高速锤锻造.....	152
5.3 自由锻锤上胎模锻.....	113	6.7 典型特种锻造工艺举例—— 精密模锻某汽车差速器 行星齿轮.....	153
5.4 模锻锤上模锻.....	115	第7章 常用锻压设备	158
5.4.1 锤上模锻的特点 和要求	115	7.1 空气锤.....	159
5.4.2 模锻设备吨位的 确定	116	7.2 蒸汽锤—空气锤.....	161
5.4.3 毛坯尺寸的确定	118	7.3 液压机.....	162
5.4.4 锻模结构设计	118	7.4 旋转锻压机.....	164
5.4.5 确定模锻工序	120	7.5 螺旋压力机.....	166
5.5 高速锤及对冲锤上模锻.....	122	7.6 曲柄压力机.....	168
5.5.1 高速锤上模锻	122	7.7 平锻机.....	169
5.5.2 对冲锤上模锻	123	第8章 锻造过程信息化	172
5.6 螺转压力机上模锻.....	124	8.1 锻造工艺计算机辅助设计 (CAD)	172
5.7 热模锻机上模锻.....	126	8.1.1 锻造工艺设计 CAD 相关国内外软件	172
5.8 平锻机上模锻.....	127	8.1.2 零件造型及锻件 输入	173
5.9 典型模锻工艺举例——壁薄 筋高叉形类锻件锻造工艺.....	129	8.2 有限元分析概述.....	176
第6章 特种锻造	134	8.3 金属塑性成形模拟.....	178
6.1 精密模锻.....	134	8.4 锻造工艺 CAD/CAM	180
6.1.1 精密模的特点及 工艺要点	134	8.4.1 模具 CAD/CAM 技术 的应用	180
6.1.2 精密模锻锻件及 模具设计	135	8.4.2 锻模 CAD/CAM	183
6.1.3 精密模锻工艺	137	8.4.3 几种锻模 CAD/CAM 系统	185
6.2 等温锻造.....	138		
6.2.1 等温锻造的特点及 分类	138		

8.5	锻造工艺 CAE	187
第 9 章	冲压变形的基本原理	189
9.1	冲压的定义及分类	189
9.2	冲压变形的特点与应用	190
9.3	冲压变形毛坯的分区	191
9.4	板料冲压成形的性能试验	191
9.5	常用冲压材料及其力学性能	193
9.6	冲压设备简介	195
第 10 章	冲裁工艺及模具设计	196
10.1	冲裁变形及受力分析	196
10.1.1	冲裁变形过程	196
10.1.2	冲裁变形区的受力分析	196
10.1.3	冲裁件断面的特征	197
10.2	冲裁模具间隙及凸模与凹模刃口尺寸确定	198
10.2.1	冲裁模具间隙	198
10.2.2	凸模与凹模刃口尺寸确定	200
10.3	影响冲裁件质量的因素	203
10.4	冲裁力和压力中心的计算	204
10.4.1	冲裁力的计算	204
10.4.2	压力机公称压力的选取	204
10.4.3	压力中心的确定	204
10.4.4	降低冲裁力的措施	205
10.5	排样	206
10.6	冲裁模的结构设计	207
10.6.1	单工序冲裁模	207
10.6.2	复合冲裁模	209
10.6.3	级进冲裁模	209
10.7	冲裁模主要零部件的结构设计	211

10.7.1	凸模与凸模组件的结构设计	211
10.7.2	凹模的结构设计	213
10.7.3	卸料与推件零件的设计	215
10.7.4	模架	216
第 11 章	弯曲工艺及模具设计	217
11.1	弯曲变形过程及特点	217
11.1.1	弯曲变形过程	217
11.1.2	板料弯曲的塑性变形特点	218
11.1.3	弯曲变形区的应力和应变状态	219
11.2	弯曲变形卸载后的回弹	220
11.2.1	回弹现象	220
11.2.2	影响回弹的主要因素	220
11.2.3	回弹值的确定	221
11.2.4	减少回弹的措施	222
11.3	弯曲成形工艺设计	223
11.3.1	最小相对弯曲半径 $r_{\min}/t$	223
11.3.2	弯曲件坯料展开尺寸的计算	225
11.3.3	弯曲力的计算	227
11.4	弯曲模具设计	228
11.4.1	典型弯曲模结构	228
11.4.2	弯曲模工作部分尺寸的设计	229
第 12 章	拉深工艺及拉深模具设计	233
12.1	拉深变形过程及受力分析	233
12.1.1	拉深变形的过程及特点	233
12.1.2	拉深变形过程的受力分析	234
12.1.3	拉深成形的起皱	

	与拉裂	237		12.3.4 高盒形件多工序 拉深方法及工序 件尺寸的确定	249
12.2	圆筒形件拉深	237	12.4	拉深力及功的计算	250
12.2.1	拉深件毛坯尺寸 的确定	238	12.5	拉深模具的设计	253
12.2.2	拉深系数及其 影响因素	239	12.5.1	拉深模具的分类 及典型结构	253
12.2.3	无凸缘件的拉深 次数和工序尺寸的 确定	241	12.5.2	拉深模工作部分 的结构和尺寸	254
12.2.4	有凸缘圆筒形零件 的拉深方法及工艺 计算	242	第13章 其他成形工艺及模具	260	
12.2.5	阶梯圆筒形件的 拉深	244	13.1	胀形	260
12.3	盒形件的拉深	246	13.1.1	胀形变形特点	260
12.3.1	盒形件的变形 特点	246	13.1.2	局部胀形	260
12.3.2	盒形零件拉深 毛坯形状与尺寸 的确定	247	13.1.3	空心毛坯的胀形	261
12.3.3	盒形件拉深的变形 程度	249	13.2	翻边	262
			13.2.1	内孔翻边	262
			13.2.2	外缘翻边	264
			13.3	缩口	265
			参考文献	266	

第1章 锻造成形概述

1.1 概 述

锻造是塑性加工的重要分支。塑性加工是利用材料的可塑性,借助外力(锻压机械的锤头、砧块、冲头或通过模具对坯料施加压力)的作用使其产生塑性变形,获得所需形状尺寸和一定组织性能锻件的材料加工方法。目前国际上习惯将塑性加工分为两大类:①生产板材、型材、棒材、管材等为主的加工称为一次塑性加工;②生产零件及其毛坯为主(包括锻件和冲压件)的加工称为二次塑性加工。大多数情况下,二次加工都是用经过一次塑性加工所提供的原材料进行再次塑性加工。但是,大型锻件多用铸锭为原材料,直接锻造成锻件。对于粉末锻造则是以粉末为原料。

锻造成形主要指二次塑性加工,即以一次塑性加工的棒材、板材、管材或铸件为毛坯生产零件及其毛坯。锻造成形又称为体积成形,受力状态主要是三向压应力状态。

1.1.1 锻造成形的特点

在锻造过程中,坯料发生明显的塑性变形,有较大量的塑性流动。

锻造是机械制造中常用的成形方法。通过锻造能消除金属的铸态疏松、焊合孔洞,锻件的力学性能一般优于同样材料的铸件。机械中负载高、工作条件严峻的重要零件,除形状较简单的可用轧制的板材、型材或焊接件外,多采用锻件。图1-1是锻造加工的基本工序。

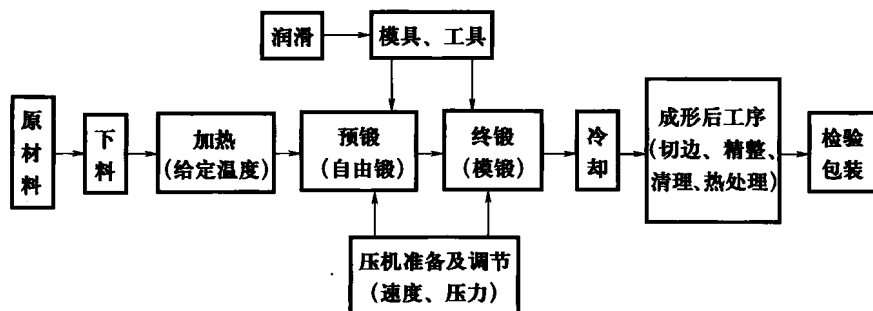


图1-1 锻造成形的基本工序

锻造加工的目的是为了获得符合图样要求的外形、尺寸及内部组织性能合格的锻件。锻造成形应满足两个基本条件:①在变形过程中材料能承受所需的变形量而不破坏;②施力条件,也就是设备通过模具向工件施加足够大的变形力,即特定的分布力。

1. 锻造工艺选择的原则

锻造工艺选择是灵活多样的,仅以成形工序为例,同一种模锻件可以用不同设备或不同方法来完成。在保证产品的外观和内部质量及生产率的前提下,选择成功工艺方案应考虑的基本出发点就是经济效益,具体说明如下。

(1) 尽可能节约原材料。尽量采用近无余量成形或近静成形,减少切削加工。

(2) 减少能耗。不能只看某一工序的能耗,而且要看总能耗,初看起来冷锻因省去加热工序,能耗下降,但还应该考虑冷锻前的软化处理及工序间的退火所消耗的能量。非调质钢及余热变形处理都是节能工艺。

(3) 降低变形力。尽量采用省力的成形方法,这不仅可以减少设备吨位,减少初投资,还可以提高模具寿命。回转成形近年来获得广泛应用的原因也在于此。

(4) 工艺稳定性好。一个好的工艺应表现在能实现长期连续生产,而不可以因追求某些单项指标高(如道次少,每道次变形量大),反而导致成品率低或折损模具。

2. 金属塑性加工的特点

金属塑性加工与金属铸造、切削、焊接等加工方法相比,有以下特点。

(1) 金属塑性加工是在保持金属整体性的前提下,依靠塑性变形发生物质转移来实现工件形状和尺寸变化的,不会产生切屑,因而材料的利用率高。

(2) 塑性加工过程中,除尺寸和形状发生改变外,金属的组织、性能也能得到改善和提高,尤其是对于采用铸造坯,经过塑性加工将使其结构致密、粗晶破碎细化和均匀,从而使性能提高。此外,塑性流动所产生的流线也能使其性能得到改善。

(3) 塑性加工过程便于实现生产过程的连续化、自动化,适于大批量生产,如轧制、拉拔加工等,因而劳动生产率高。

(4) 塑性加工产品的尺寸精度和表面质量高。

(5) 设备较庞大,能耗较高。

金属塑性加工由于具有上述特点,不仅原材料消耗少、生产效率高、产品质量稳定,而且还能有效地改善金属的组织性能,使它成为金属加工中极其重要的手段之一,因而在国民经济中占有十分重要的地位。如在钢铁材料生产中,除了少部分采用铸造方法直接制成零件外,钢总产量的90%以上和有色金属总产量的70%以上,均需经过塑性加工成材,才能满足机械制造、交通运输、电力电信、化工、建材、仪器仪表、航空航天、国防军工、民用五金和家用电器等部门的需要;目前我国飞机上85%,汽车上约58%,农机上约70%的零部件是采用锻造工艺制造的。因此,金属塑性加工在国民经济中占有十分重要的地位。

1.1.2 锻造发展趋势

1. 提高锻压件的内在质量

主要是提高它们的力学性能(强度、塑性、韧性、疲劳强度)和可靠度。这需要更好地应用金属塑性变形的理论;应用内在质量更好的材料,如真空处理钢和真空冶炼钢;精确进行锻前加热和锻造热处理;更严格和更广泛地对锻压件进行无损探伤(见无损检测)。

2. 省力锻造工艺

锻件的优点就是组织致密而且比较均匀,性能优于焊接件和铸造件,但缺点就是需要较大的变形力,因此发展省力的锻造工艺一直是研究人员热衷的一个研究领域。目前省力的途径主要有3种:①减少拘束系数,实际生产中常用分流的办法来减少变形抗力;②减少流变应力的方法,实际生产中的超塑性成形和液态模锻均属于这种方法;③减少接触面积。

3. 精密锻造成形工艺

锻件不需要再进行机械加工就能满足公差要求,目前已经能将锻件精度控制在0.01mm~0.05mm以内。净成形和近净终形锻造均属于这类方法。少无切削加工是机械工业提高材料

利用率、提高劳动生产率和降低能源消耗的最重要的措施和方向。

4. 采用复合工艺

锻造用坯料是使用喷射沉积或是半固态方法制备而成,然后这些坯料再经过锻造工艺制备零件的工艺过程。实际生产中坯料可以用多种其他成形工艺方法制备,最后经锻压而成形,此工艺可称为复合工艺。

5. 锻造过程信息化

锻造过程 CAD、CAE、CAM 和 CAD/CAE/CAM 一体化,实现锻造全过程的虚拟生产、锻造后锻件组织性能预测与缺陷预测,人工智能、神经网络和专家系统实现锻造过程在线质量检测与在线控制,锻造工艺过程、生产过程的信息管理,提升了生产过程的效率,信息化融入锻造全过程是时代的要求。

6. 微成形技术

通常指零件变形小于 0.5mm 的变形,这类变形所用材料晶格尺寸没发生多大变化。目前随着微电子工业的快速发展,对微成形技术的需求也越来越大。但微成形技术的一个难点就在于其尺寸效应。

7. 多点柔性成形

应用成组技术、快速换模等,使多品种、小批量的锻压生产能利用高效率和高自动化的锻压设备或生产线,使其生产率和经济性接近于大批量生产的水平。

8. 环境友好成形技术

环境友好成形技术包括锻造过程的绿色化、无害化,减少环境危害,同时锻造过程节约能源,促进节能减排,环境友好的成形工艺过程。

1.2 锻造成形的基本原理

图 1-2 是普通中碳钢试样的拉伸曲线。由图可见,当圆形试样受外力拉伸时,拉力 P 与试样长度变化量 Δl 成正比。当外力小于 P_e 时,卸载后,试样沿 oe 方向减少,最后恢复到原始尺寸,即 $\Delta l = 0$ 。这个阶段就是材料的弹性变形阶段。当载荷超过 P_e 屈服极限时,试样长度将变化到 c 点,卸载后,试样长度将沿 cd 方向变化($cd \parallel oe$)。金属的锻造过程就是利用金属材料的塑性而加工成一定形状尺寸的零件的工艺过程。

大多数金属材料都是多晶体,晶粒之间存在晶界,而晶粒内部还存在着亚晶粒和相界。因此在锻造过程中,多晶体材料的塑性变形机理较单晶体塑性变形复杂。而且在锻造中产生的现象也较单晶体复杂。

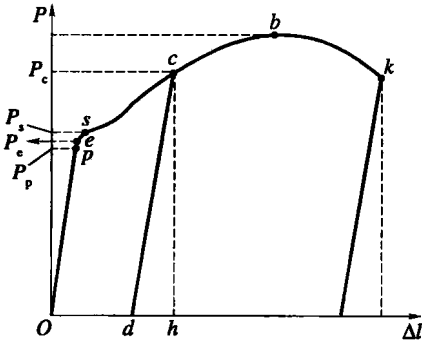


图 1-2 中碳钢试样的拉伸曲线示意图

1.2.1 金属塑性变形机理

单晶体受力后,外力在任何晶面上都可分解为正应力和切应力。正应力只能引起晶体的弹性变形及解理断裂,只有在切应力的作用下金属晶体才能产生塑性变形。对于多晶体来讲,同样是只有在切应力的作用下金属晶体才能产生塑性变形。

由于多晶体是由不同晶粒取向的晶粒构成的,不同晶粒之间存在着晶界,因此多晶体塑性变形主要包括晶粒内部变形和晶界变形。其中多晶体的晶内变形与单晶体的晶内变形机理是一致的。

1. 晶内变形

晶体晶内变形的主要方式是滑移和孪生。滑移指晶体的一部分沿一定的晶面和晶向相对于另一部分发生滑动位移的现象。滑移常沿晶体中原子密度最大的晶面和晶向发生。因为原子密度最大的晶面和晶向之间原子间距最大,结合力最弱,产生滑移所需切应力最小。孪生指晶体的一部分沿一定晶面和晶向相对于另一部分所发生的切变。发生切变的部分称孪生带或孪晶,发生孪生的晶面称孪生面,孪生的结果使孪生面两侧的晶体呈镜面对称。滑移跟孪生的区别在于滑移不改变晶体各部分的相对取向,而孪生发生部分和未发生部分则明显具有不同的位向。但它们都是由位错运动造成的。

通常在体心立方和面心立方晶格结构中,滑移变形对宏观变形起主导作用,孪晶起次要作用。而在密排六方晶体结构的材料中,孪晶也起到非常重要的作用,它能促使晶体转动,进而启动二次滑移。

一般来讲滑移系多的金属比滑移系少的金属塑性要好,滑移面对温度敏感,但温度升高时,原子振动幅度加大,促使原子密度次大的晶面也能参与滑移。滑移系只能说明金属晶体产生滑移的可能性,而要产生滑移,还必须要沿滑移面滑移方向上一定大小的切应力。切应力大小取决于金属类型、晶体结构、变形温度、应变速率和预先变形程度等因素。滑移是通过滑移面上位错的运动来实现的,其典型示意图如图 1-3 所示。

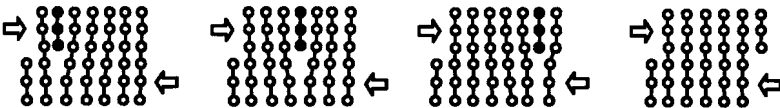


图 1-3 刃型位错运动造成晶体滑移变形示意图

当晶体受力时,由于各个滑移系相对于外力的空间位置不同,因此各个晶粒上面所作用的切应力也各不相同,如图 1-4 所示。如由外力 P 作用在某一晶体引起的拉伸应力 σ ,其滑移面的法线方向与拉伸轴的夹角为 ϕ ,面上的滑移方向与拉伸轴夹角为 λ ,则在次滑移方向上的切应力分量为

$$\tau = \sigma \cos \phi \cos \lambda \quad (1-1)$$

式中: $\cos \phi \cos \lambda = \mu$, μ 为取向因子,因此滑移系上所受切应力分量取决于取向因子。

孪生使晶格位向发生改变,其变形所需切应力比滑移大得多,变形速度极快,接近声速。孪生时相邻原子面的相对位移量小于一个原子间距。面心立方晶格结构孪生变形如图 1-5 所示。

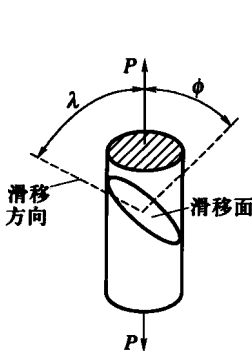


图 1-4 晶体滑移时的应力分析

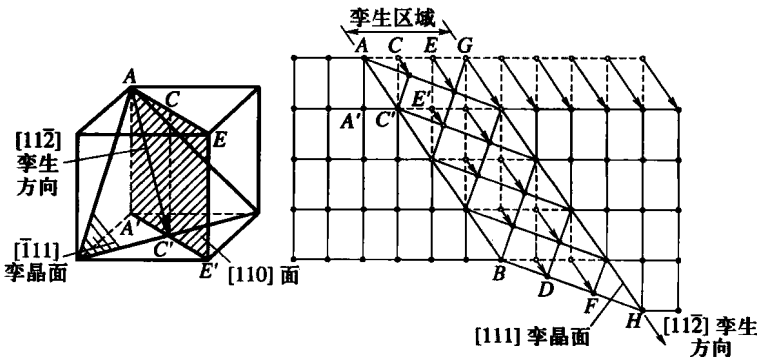


图 1-5 面心立方晶体孪生变形示意图

2. 晶间变形

晶间变形主要是晶粒之间相互滑动和转动,如图 1-6 所示。当晶粒受外力 P 作用变形时,沿晶粒边界产生可能切应力,当切应力足以克服晶粒之间相对滑动的阻力时,便发生了滑动。此外,当相邻两个晶粒之间产生力偶时,就会造成晶粒之间的相互转动。

多晶体中首先发生滑移的是滑移系与外力夹角等于或接近于 45° 的晶粒。当塞积位错前端的应力达到一定程度,加上相邻晶粒的转动,使相邻晶粒中原来处于不利位向滑移系上的位错开动,从而使滑移由一批晶粒传递到另一批晶粒,当有大量晶粒发生滑移后,金属便显示出明显的塑性变形。

在冷变形中,多晶体的塑性变形主要是晶内变形,晶间变形只起次要作用,而且还需要其他协调机制。当晶界发生变形时,容易引起晶界结构的破坏和产生显微裂纹。

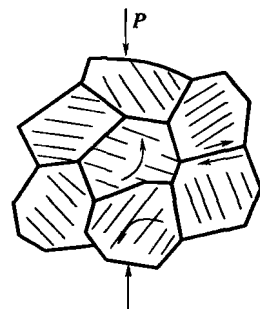


图 1-6 晶粒之间的滑动和转动

1.2.2 塑性变形对组织和性能的影响

塑性变形不仅可以改变金属的外观尺寸和形状,而且可以改变金属内部的组织和性能。

1. 塑性变形对组织的影响

(1) 显微组织的变化。金属材料经过塑性变形后,其显微组织发生了明显的改变,除了每个晶粒内部出现了大量滑移带和孪晶带之外,原始的晶粒将沿着其形变方向伸长,随着变形量的增加,逐渐形成纤维组织。

(2) 亚结构的变化。晶体的塑性变形是借助位错在应力作用下运动和不断增殖的,随着变形量的增加,晶体内部的位错密度迅速升高至 $10^{15} \text{m}^{-2} \sim 10^{16} \text{m}^{-2}$ 。晶粒内部的亚结构直径将细化至 $10^{-6} \text{m} \sim 10^{-8} \text{m}$ 。

(3) 变形织构。金属受外力作用时,多晶体会在外力作用下发生转动,当变形量很大时,任意取向的各个晶粒会逐渐调整其取向而逐渐彼此趋向一致,形成变形织构。随加工方式的不同,织构可分为丝织构和板织构。拉拔工艺会产生与拉拔方向平行的丝织构,而在轧制过程中会产生平行于轧制平面的板织构。

2. 塑性变形对性能的影响

(1) 加工硬化。随着塑性加工变形量的增加,变形材料的变形抗力也随之上升,即成为加工硬化。影响加工硬化的因素主要有变形程度、变形温度、变形速度、初始晶粒度和合金元素。加工硬化的有益之处在于:可以通过冷加工控制产品的最终性能,如冷拉钢丝绳不仅可获得高强度,而且表面光洁;有些零件通过工作中的不断硬化达到表面耐磨、耐冲击的要求,如铁路用道岔由于经常受到车轮的冲击和摩擦,采用应变硬化速率高的高锰钢后,就可以达到冲击韧性和表面硬度要求。

(2) 残余应力。金属塑性变形时,外力所做的功大部分转化为热,其余极小一部分保留在金属内部,形成残余应力和点阵畸变。残余应力主要由三部分组成:宏观内应力、微观内应力和点阵畸变。宏观应力是由于金属各部分不均匀变形所引起的。微观内应力是由晶粒和亚晶粒不均匀变形而引起的。塑性变形使金属产生大量的位错和空位,使晶格点阵中的一部分原子偏离其平衡位置,造成点阵畸变。通常残余应力对金属材料的性能是有害的,它会导致材料及工件的变形、开裂和产生应力腐蚀。

1.2.3 回复和再结晶

金属经冷塑性变形后,组织处于不稳定状态,有自发恢复到变形前组织状态的倾向。但在常温下,原子扩散能力小,不稳定状态可以维持相当长时间,而加热则使原子扩散能力增加。冷变形金属退火过程,大体上可分为回复、再结晶和晶粒长大3个阶段。

回复指在加热温度较低时,由于金属中的点缺陷及位错的近距离迁移而引起的晶内某些变化。如空位与其他缺陷合并、同一滑移面上的异号位错相遇合并而使缺陷数量减少等。由于位错运动使其由冷塑性变形时的无序状态变为垂直分布,形成亚晶界,这一过程称多边形化。在回复阶段,金属组织变化不明显,其强度、硬度略有下降,塑性略有提高,但内应力、电阻率等显著下降。工业上常利用回复现象将冷变形金属低温加热,既稳定组织又保留加工硬化,这种热处理方法称去应力退火。去应力退火可以使冷加工金属在基本保持加工硬化的状态下降低其内应力,以稳定和改善性能,减少变形和开裂,提高耐蚀性。

当变形金属被加热到较高温度时,由于原子活动能力增大,晶粒的形状开始发生变化,由破碎拉长的晶粒变为完整的等轴晶粒。这种冷变形组织在加热时重新彻底改组的过程称再结晶。再结晶也是一个晶核形成和长大的过程,但不是相变过程,再结晶前后新旧晶粒的晶格类型和成分完全相同。由于再结晶后组织的复原,因而金属的强度、硬度下降,塑性、韧性提高,加工硬化消失。图1-7为冷变形后的金属在退火时的晶粒大小和变化。

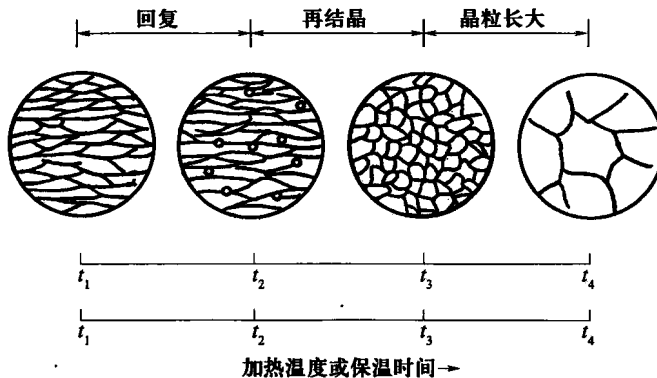


图1-7 冷变形后的金属在退火时的晶粒大小和变化

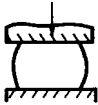
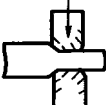
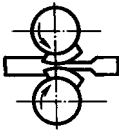
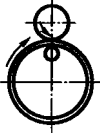
影响变形金属再结晶的因素有:退火温度、变形程度、微量溶质原子或杂质、第二相、原始晶粒、加热速度和加热时间。退火温度影响形核和长大;变形程度增高,再结晶速度加快,再结晶温度降低,并逐步趋于一稳定值;微量溶质原子或杂质提高金属的再结晶温度,降低再结晶速度;第二相可能促进,也可能阻碍再结晶,主要取决于基体上第二相粒子的大小及其分布;原始晶粒,原始晶粒细小使再结晶速度增加,再结晶温度降低;极快的加热或加热速度过于缓慢时,再结晶速度降低,再结晶温度上升;在一定范围内延长加热时间会降低再结晶温度。

1.3 锻造的基本分类

通常,锻造主要按成形方式和变形温度进行分类。按成形方式分类,锻造可分为自由锻、模锻、冷锻、径向锻造、辊锻、旋锻、辗扩等,如表1-1和图1-8所示。坯料在压力下产生的变

形基本不受外部限制的称自由锻,也称开式锻造;其他锻造方法的坯料变形都受到模具的限制,称为闭模式锻造。辊锻、旋锻、辗扩等的成形工具与坯料之间有相对的旋转运动,对坯料进行逐点、渐线的加压和成形,故又称为旋转锻造。

表 1-1 锻造按照成形方式分类的主要分类示意图

分类与 名称	自由锻造		模锻	辊锻	楔模轧	碾压
	镦粗	拔长				
图例						

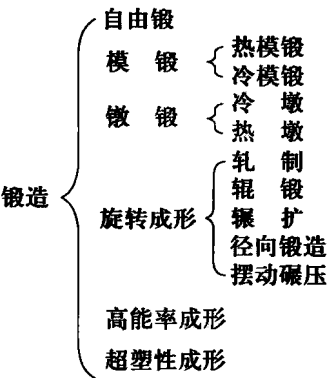


图 1-8 锻造成形的主要方式

根据坯料的移动方式,锻造可分为自由锻、镦粗、挤压、模锻、闭式模锻、闭式墩锻。闭式模锻和闭式墩锻由于没有飞边,材料的利用率高。用一道工序或几道工序就可能完成复杂锻件的精加工。由于没有飞边,锻件的受力面积减少,所需要的荷载也减少。但是,应注意不能使坯料完全受到限制,为此要严格控制坯料的体积,控制锻模的相对位置和对锻件进行测量,努力减少锻模的磨损。根据锻模的运动方式,锻造又可分为摆辗、摆旋锻、辊锻、楔横轧、辗环和斜轧等方式。摆辗、摆旋锻和辗环也可用精锻加工。为了提高材料的利用率,辊锻和楔横轧可用作细长材料的前道工序加工。与自由锻一样的旋转锻造也是局部成形的,它的优点是锻件尺寸相比,锻造力较小情况下也可实现成形。包括自由锻在内的这种锻造方式,加工时材料从模具面附近向自由表面扩展,因此很难保证精度,所以,将锻模的运动方向和旋锻工序用计算机控制,就可用较低的锻造力获得形状复杂、精度高的产品。例如生产品种多、尺寸大的汽轮机叶片等锻件。

按变形温度锻造可分为热锻、冷锻、温锻和等温锻等。热锻是在金属再结晶温度以上进行的锻造。提高温度能改善金属的塑性,有利于提高工件的内在质量,使之不易开裂。高温还能减小金属的变形抗力,降低所需锻压机械的吨位。但热锻工序多,工件精度差,表面不光洁,锻件容易产生氧化、脱碳和烧损。冷锻是在低于金属再结晶温度下进行的锻造,通常所说的冷锻多专指在常温下的锻造,而将在高于常温、且不超过再结晶温度下的锻造称为温锻。温锻的精度较高,表面较光洁而变形抗力不大。在常温下冷锻成形的工件,其形状和尺寸精度高,表面光洁,加工工序少,便于自动化生产。许多冷锻件可以直接用作零件或制品,而不再需要切

削加工。但冷锻时,因金属的塑性低,变形时易产生开裂,变形抗力大,需要大吨位的锻压机械。等温锻是在整个成形过程中坯料温度保持恒定值。等温锻是为了充分利用某些金属在某一温度下所具有的高塑性,或是为了获得特定的组织和性能。等温锻需要将模具和坯料一起保持恒温,所需费用较高,仅用于特殊的锻压工艺,如超塑性成形。钢的再结晶温度约为 460°C ,但普遍采用 800°C 作为划分线,高于 800°C 的是热锻;在 $300^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 之间称为温锻或半热锻。

当温度超过 $300^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ (钢的蓝脆区),达到 $700^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 时,变形阻力将急剧减小,变形能也得到很大改善。根据在不同的温度区域进行的锻造,针对锻件质量和锻造工艺要求的不同,可分为冷锻、温锻、热锻3个成型温度区域。原本这种温度区域的划分并无严格的界限,一般地讲,在有再结晶的温度区域的锻造叫热锻,不加热在室温下的锻造叫冷锻。

在低温锻造时,锻件的尺寸变化很小。在 700°C 以下锻造,氧化皮形成少,而且表面无脱碳现象。因此,只要变形能在成形能范围内,冷锻容易得到很好的尺寸精度和较低的表面粗糙度。只要控制好温度和润滑冷却, 700°C 以下的温锻也可以获得很好的精度。热锻时,由于变形能和变形阻力都很小,可以锻造形状复杂的大锻件。要得到高尺寸精度的锻件,可在 $900^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 温度域内用热锻加工。另外,要注意改善热锻的工作环境。锻模寿命(热锻2千个~5千个,温锻1万个~2万个,冷锻2万个~5万个)与其他温度域的锻造相比是较短的,但它的自由度大,成本低。

坯料在冷锻时要产生变形和加工硬化,使锻模承受高的载荷,因此,需要使用高强度的锻模和采用防止磨损和粘结的硬质润滑膜处理方法。另外,为防止坯料裂纹,需要时进行中间退火以保证需要的变形能力。为保持良好的润滑状态,可对坯料进行磷化处理。

1.4 锻造过程的摩擦与润滑

锻造过程中减少摩擦,不仅可以降低锻造力,节约能源消耗,还可以提高模具寿命。减少摩擦能使变形体的变形分布更加均匀,有助于提高产品的组织性能。减少摩擦的重要方法之一就是采用润滑。由于锻造过程的方式不同,以及工作温度差异,所选用的润滑剂也不同。玻璃润滑剂多用于高温合金及钛合金锻造;对于钢的热锻,水基石墨是应用很广泛的润滑剂;对于冷锻,由于压强很高,锻造前还需要进行磷酸盐或草酸盐处理。

1. 金属热成形时的摩擦

金属热成形时的摩擦指热态塑性变形的金属与工具、型槽表面之间的摩擦。它表现为两种不同金属之间的摩擦,如软硬金属之间的摩擦、两种金属表面氧化膜的接触摩擦,以及热变形时内层金属被挤出形成新生表面之间的摩擦。新生表面因时间短而未被氧化,吸附力大和实际接触面积增大而加剧摩擦。

热成形时,由于坯料的不均匀变形,在摩擦较大的部位会有润滑不良或缺乏润滑的状况。热成形一般希望减少摩擦,但有时为了使难成形部位能充满型槽,反而要增大其他部位的摩擦,以利于坯料的均匀变形。

金属塑性变形过程中,坯料和工具、模具接触表面之间的摩擦作用将导致如下结果。

- (1) 变形力增大 $10\% \sim 100\%$ 。
- (2) 锻件内部和表面质量下降。
- (3) 锻件尺寸精度降低。

(4) 模具磨损加剧,寿命缩短。

塑性成形中的摩擦可分为内摩擦和外摩擦。内摩擦指整个变形体内各个质点间的相互作用。这种作用发生在晶粒界面或晶内的滑移面上,并阻碍变形金属的滑移变形。外摩擦表现为在两个物体的接触面上产生的阻碍其相对运动的摩擦。金属塑性成形中的内摩擦出现在晶内变形和晶间变形过程中,它直接和多晶体的塑性变形过程相联系,外摩擦则只出现在变形金属与工具相接触的部分。

外摩擦一般可分为以下几种。

(1) 干摩擦。既无润滑又无湿气的摩擦叫干摩擦,实际上是指无润滑的摩擦。

(2) 边界摩擦。两接触面之间存在一层极薄的润滑膜,其摩擦不取决于润滑剂的黏度,而取决于两表面的特征和润滑剂的特性。

(3) 流体摩擦。由连续的流体层隔开的两物体表面的摩擦。

(4) 混合摩擦。是干摩擦和流体摩擦或边界摩擦与流体摩擦的混合形式。

塑性变形中的摩擦特点如下。

(1) 压力高,塑性变形中的摩擦不同于机械传动过程中的摩擦,它是一种高压下的摩擦。锻造成形时,与工具接触的工件表面所承受的压力高达 $300\text{MPa} \sim 1000\text{MPa}$ 。

(2) 温度高,锻造塑性变形过程一般是在高温下进行。在高温下金属材料的组织和性能均发生变化。表面生成的氧化皮给塑性变形中的摩擦和润滑带来很大影响。如在热变形中表面生成的氧化皮一般比变形金属软,在摩擦表面上它能起到一定的润滑作用;当氧化皮插入变形金属中,便会造成金属表面质量的恶化。冷变形和温变形时,在摩擦表面生成的氧化皮往往比变形金属硬;此时,如果氧化皮脱落在工具和金属坯料表面上就会使摩擦加剧,工具磨损加快,金属表面质量恶化。

2. 润滑与保护

为了防止表面氧化、脱碳、合金元素贫化、渗氢、渗氧等现象,钢、高温合金、钛合金、铜合金、铝合金、镁合金、难熔金属等在锻造加热时,均可采用涂覆玻璃润滑剂等方法进行表面保护。

在金属热成形过程中,润滑剂是存在于金属与模具接触表面之间的一种介质,润滑剂可以是固体、粘滞性塑性物质、液体、气体或其混合物。它们在一定条件下可以部分或全部发挥润滑作用。

由于金属塑性变形时不断产生新的金属表面,而且在高温下还要承受很大的变形压力,所以防护润滑剂应具备如下条件。

(1) 在金属表面能形成致密而连续的薄膜,能随变形金属一起流动并承受高温和高压。

(2) 金属塑性变形时,接触压力、金属流动速度和静压力都在很宽的范围内变化(接触压力为 $0.1\text{MPa} \sim 10^4\text{MPa}$,金属流动速度为 $(0.01 \sim 9.0) \times 10^3\text{m/s}$,静压力 $(0 \sim 50) \times 10^3\text{MPa}$ 。

(3) 高温下不与变形金属和工具发生化学反应,不对金属和模具产生腐蚀作用。

(4) 有一定绝热作用,以利于金属均匀变形,避免工作过热和锻件迅速冷却。

(5) 满足不同变形工艺需要的特征(如防护润滑剂的可去除性,薄膜在多次变形中的不破坏性等)。

(6) 能起脱模作用。

(7) 涂覆工艺简单或能适应涂覆工艺机械化、自动化要求。

(8) 应无毒或低毒,不产生烟雾或有害气体。

(9) 供应方便,价格便宜。

防护润滑剂可按其室温状态和用途进行如下分类。

(1) 按室温状态分类。模锻润滑剂按室温状态分类如图 1-9 所示。

(2) 按用途分类。模锻润滑剂按用途分类如图 1-10 所示。

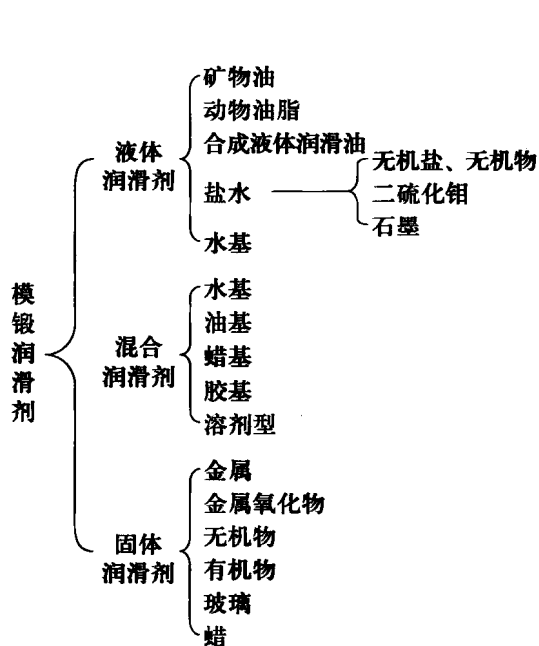


图 1-9 模锻润滑剂种类

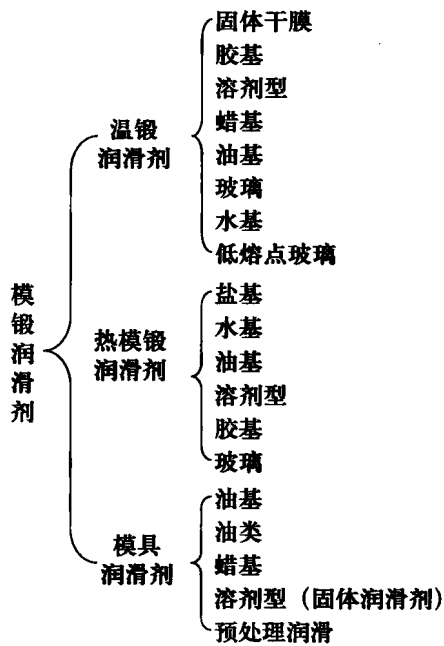


图 1-10 按用途划分模锻润滑剂种类

(3) 按适用的工艺方法分类。润滑剂按适用工艺分类如图 1-11 所示。

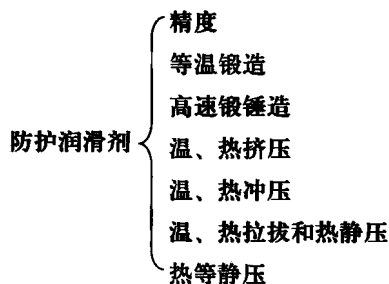


图 1-11 润滑剂按适用工艺分类

3. 几种常用的润滑剂

(1) 油基润滑剂。它属于液体润滑剂,它是目前应用较多的一种热模锻润滑剂,包括矿物润滑油、机油或汽缸油中加入添加剂而制成的矿物润滑脂、动物油(猪油、牛油等)、植物油(棕榈油、蓖麻子油、花生油、菜子油等)和植物脂(蓖麻脂等),以及按热模锻的要求在矿物润滑油、脂中加入添加剂(油性添加剂、极压添加剂、黏度指数添加剂、降凝添加剂、抗氧化添加剂等)自行调配而成的热模锻润滑油。

油基润滑剂的特征如下。

① 中温润滑特性好,高温(500℃以上)才失去润滑效果。着火点低,受热汽化燃烧温度