



# 机械工程手册

## 第 40 篇 锻 压

(试 用 本)

机械工程手册  
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

本篇介绍锻压的工艺原理、基本工艺方法和主要的工艺装备及设备,共12章,包括概述、锻压原理、锻压加热及设备、自由锻、模锻、精密锻压、微锻、轧锻、挤压、非铁合金锻压、锻压设备、锻压安全技术等内容,重点介绍大型自由锻、锤上模锻以及各种少无切屑加工工艺,提供了主要的工艺参数和工艺过程设计的数据。

## 机械工程师手册

### 第40篇 锻 压

(试 用 本)

第一机械工业部 机电研究所 主编  
机械研究院  
哈尔滨工业大学

\*

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  $787 \times 1092^{1/16}$  · 印张  $11^{1/4}$  · 字数 318 千字

1978年6月北京第一版·1978年6月北京第一次印刷

印数 00,001—56,000 · 定价 0.85 元

\*

统一书号: 15033·4486

## 编辑说明

(一) 我国自建国以来,特别是无产阶级文化大革命以来,机械工业在伟大的领袖和导师毛泽东主席的无产阶级革命路线指引下,坚持政治挂帅,以阶级斗争为纲,贯彻“**独立自主、自力更生**”的方针,取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验,加强机械工业科学技术的基础建设,适应实现“四个现代化”的需要,我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》,使出版工作更好地为无产阶级政治服务,为工农兵服务,为社会主义服务。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用,也可供教学及其他有关人员参考。《手册》在内容和表达方式上,力求做到深入浅出,简明扼要,直观易懂,归类便查,以便广大机电工人使用,有利于工人阶级技术队伍的发展和壮大。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书,着重介绍各专业的理论基础,常用计算公式,数据、资料,关键问题以及发展趋势。在编写中,力求做到立足全局,勾划概貌,反映共性,突出重点。读者在综合研究和处理技术问题时,《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成,构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分,共七十九篇;《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分,共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区的科技交流部门, 为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中, 广泛征求广大机电工人的意见, 坚持实行工人、技术人员和领导干部三结合的原则, 发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面, 广泛征求意见, 先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验, 试用本在内容和形式方面, 一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证, 提出批评和建议, 以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是《机械工程手册》第40篇, 由一机部机械研究院机电研究所、哈尔滨工业大学主编, 参加编写的单位有一机部天津设计院、东北重型机械学院、第一重型机器厂、齐齐哈尔钢厂、内蒙古工学院、第一汽车厂、天津大学、北京粉末冶金研究所、上海螺帽五厂、湖北农机学院、常州齿轮厂、吉林工业大学、济南铸锻机械研究所等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助, 在此一并致谢。

机械工程手册  
电机工程手册 编辑委员会 编辑组

# 目 录

## 编辑说明

### 第1章 概 述

### 第2章 锻压原理

- 1 金属的塑性和流动 .....40-3
  - 1.1 影响金属塑性的因素和提高金属塑性的要点 .....40-3
  - 1.2 摩擦对金属流动的影响和塑性变形的不均匀性 .....40-4
  - 1.3 控制金属流动要点 .....40-5
- 2 塑性变形对金属组织与性能的影响 .....40-5
  - 2.1 冷变形对金属组织与性能的影响 .....40-5
  - 2.2 热变形对金属组织与性能的影响 .....40-6
  - 2.3 温变形对金属组织与性能的影响 .....40-6
  - 2.4 控制锻件组织与性能要点 .....40-7
- 3 变形力的确定 .....40-7
  - 3.1 确定变形力的方法 .....40-7
  - 3.2 变形抗力 .....40-8
  - 3.3 摩擦系数 .....40-8
  - 3.4 降低变形力的途径 .....40-8

### 第3章 锻压加热及其设备

- 1 加热工艺基础 .....40-10
  - 1.1 锻压温度范围 .....40-10
  - 1.2 加热速度和加热制度 .....40-10
  - 1.3 锻件冷却 .....40-10
  - 1.4 金属加热缺陷及防止方法 .....40-11
- 2 火焰加热炉 .....40-11
  - 2.1 炉型选择 .....40-11
  - 2.2 主要技术经济指标 .....40-11
  - 2.3 煤炉、油炉和煤气炉 .....40-13
  - 2.4 锻压车间常用加热炉 .....40-16
  - 2.5 快速加热 .....40-19
- 3 电加热 .....40-19
  - 3.1 感应加热 .....40-19
  - 3.2 接触加热 .....40-20

- 3.3 电阻炉加热和盐浴加热 .....40-21
- 4 无氧化加热 .....40-22
  - 4.1 涂保护性覆盖层 .....40-22
  - 4.2 玻璃浴中加热 .....40-22
  - 4.3 在马弗炉中使用保护气氛加热 .....40-22
  - 4.4 敞焰无氧化加热 .....40-22

### 第4章 自由锻

- 1 基本工序和锻比 .....40-25
  - 1.1 基本工序 .....40-25
  - 1.2 锻比 .....40-27
- 2 变形工艺的确定 .....40-28
- 3 大型锻件锻造 .....40-33
  - 3.1 加热 .....40-33
  - 3.2 锻造 .....40-34
  - 3.3 大型锻件缺陷分析 .....40-39
- 4 高合金钢锻造 .....40-41
  - 4.1 基本特点 .....40-41
  - 4.2 不同基体组织钢种锻造的特殊要求 .....40-42
- 5 耐热合金锻造 .....40-44
  - 5.1 坯料准备 .....40-44
  - 5.2 加热 .....40-44
  - 5.3 自由锻 .....40-44
  - 5.4 模锻 .....40-45
- 6 胎模锻 .....40-45
  - 6.1 特点及应用 .....40-45
  - 6.2 胎模分类及应用 .....40-48
  - 6.3 各类锻件常用胎模锻变形工艺 .....40-50
  - 6.4 胎模锻所需设备能力 .....40-53

### 第5章 模 锻

- 1 锤上模锻 .....40-55
  - 1.1 锻件图制定 .....40-56
  - 1.2 模锻锤吨位确定 .....40-59
  - 1.3 模膛选择和坯料尺寸的确定 .....40-59
  - 1.4 模膛设计 .....40-65

## VI 目 录

- 1.5 锻模结构.....40-71
  - 2 热模锻压力机上模锻 .....40-76
    - 2.1 工艺特点.....40-76
    - 2.2 模具结构.....40-78
    - 2.3 压力机吨位确定.....40-80
  - 3 平锻机上模锻 .....40-81
    - 3.1 锻件分类.....40-81
    - 3.2 锻件图制定.....40-81
    - 3.3 坯料尺寸的确定.....40-82
    - 3.4 局部锻粗规则和积聚工步计算.....40-83
    - 3.5 冲孔工步及预成形尺寸.....40-83
    - 3.6 平锻模结构.....40-84
    - 3.7 平锻机吨位确定.....40-86
  - 4 螺旋压力机上模锻 .....40-86
    - 4.1 工艺特点.....40-86
    - 4.2 模具结构.....40-86
    - 4.3 压力机吨位确定.....40-87
  - 5 切边与冲孔 .....40-87
    - 5.1 切边模设计.....40-88
    - 5.2 冲孔模设计特点.....40-89
    - 5.3 复合模设计.....40-89
    - 5.4 压力机吨位确定.....40-90
  - 6 锻件清理、校正和精压 .....40-90
    - 6.1 锻件清理.....40-90
    - 6.2 锻件校正.....40-91
    - 6.3 锻件精压.....40-91
  - 7 模锻用原材料及备料 .....40-92
    - 7.1 模锻用原材料分类和用途.....40-92
    - 7.2 剪切下料.....40-92
- ### 第6章 精密锻压
- 1 精密模锻 .....40-94
    - 1.1 齿轮的精密模锻.....40-94
    - 1.2 扭曲叶片的精密模锻.....40-95
  - 2 高速锤上锻造 .....40-96
    - 2.1 高速锤工作原理.....40-96
    - 2.2 高速锤用锻模.....40-97
    - 2.3 工艺特点.....40-98
  - 3 多向模锻 .....40-99
    - 3.1 阀体类锻件多向模锻.....40-99
    - 3.2 曲轴类锻件多向模锻.....40-99
- 4 精密锻轴机和轮转锻机上锻造.....40-100
    - 4.1 工艺特点 .....40-100
    - 4.2 锻机 .....40-101
    - 4.3 锻造范围 .....40-102
    - 4.4 工具设计 .....40-103
  - 5 粉末锻造.....40-103
    - 5.1 工艺流程 .....40-103
    - 5.2 原料粉末 .....40-104
    - 5.3 预制坯设计要点 .....40-104
    - 5.4 粉锻设备 .....40-104
    - 5.5 差速器行星齿轮实例 .....40-105
- ### 第7章 冷挤压
- 1 冷挤压用材料及坯料准备.....40-106
    - 1.1 冷挤压材料及软化处理 .....40-106
    - 1.2 下料 .....40-108
    - 1.3 润滑 .....40-108
  - 2 冷挤压的变形程度和挤压力计  
算.....40-109
    - 2.1 变形程度 .....40-109
    - 2.2 挤压力 .....40-110
  - 3 挤压件的工艺设计和经济精度.....40-113
    - 3.1 挤压件的工艺设计 .....40-113
    - 3.2 挤压件的经济精度 .....40-115
  - 4 冷挤压模具设计.....40-117
    - 4.1 冷挤压模具结构 .....40-117
    - 4.2 冷挤压模工作部分设计 .....40-118
    - 4.3 组合凹模的应用和计算 .....40-120
  - 5 冷挤压设备.....40-121
  - 6 温挤.....40-121
    - 6.1 挤压温度及挤压力 .....40-121
    - 6.2 模具设计 .....40-122
    - 6.3 润滑剂 .....40-122
- ### 第8章 锻 锻
- 1 多工位冷锻.....40-122
    - 1.1 冷锻用材料准备 .....40-122
    - 1.2 多工位冷锻工艺 .....40-123
    - 1.3 螺帽冷锻工艺设计——Z41系列多工  
位冷锻机 .....40-123

- 1.4 凹穴螺栓(钉)冷锻工艺设计——Z47  
系列多工位冷锻机 .....40-124
- 2 多工位热锻锻 .....40-126
- 3 电热锻 .....40-126
  - 3.1 电热锻基本原理 .....40-126
  - 3.2 电热锻的主要工艺参数 .....40-126

## 第9章 轧 锻

- 1 纵轧—辊锻 .....40-129
  - 1.1 纵轧咬入条件、变形区和前后滑 .....40-129
  - 1.2 纵轧——镰刀用复合钢板的轧制 .....40-130
  - 1.3 辊锻 .....40-130
- 2 楔形模横轧 .....40-134
  - 2.1 原理及应用范围 .....40-134
  - 2.2 楔形模具设计原则 .....40-135
  - 2.3 设备参数 .....40-135
- 3 螺旋孔型斜轧 .....40-135
  - 3.1 工艺特点 .....40-135
  - 3.2 钢球轧制 .....40-136
  - 3.3 实心 and 空心周期断面零件轧制 .....40-136
  - 3.4 设备参数 .....40-136
  - 3.5 冷轧丝杆 .....40-136
  - 3.6 麻花钻头斜轧 .....40-137
- 4 仿形斜轧 .....40-137
  - 4.1 工艺特点 .....40-137
  - 4.2 轧辊设计要点 .....40-137
  - 4.3 基本工艺参数的选择 .....40-138
  - 4.4 设备参数 .....40-138
- 5 辗扩 .....40-138
  - 5.1 扩孔机 .....40-138
  - 5.2 辗扩工具设计要点 .....40-139
  - 5.3 坯料 .....40-139
  - 5.4 后续工序 .....40-139
  - 5.5 实例 .....40-140
- 6 齿轮轧制 .....40-140
  - 6.1 热轧圆柱齿轮 .....40-140
  - 6.2 冷精轧圆柱齿轮 .....40-141
- 7 摆动辗压 .....40-142
  - 7.1 摆动辗压的应用范围与特点 .....40-142
  - 7.2 工艺原理 .....40-142

- 7.3 摆头结构 .....40-143
- 7.4 实例 .....40-143

## 第10章 非铁合金锻压

- 1 铝合金锻压 .....40-144
  - 1.1 铝合金的可锻性 .....40-144
  - 1.2 坯料准备 .....40-144
  - 1.3 加热与锻造温度范围 .....40-144
  - 1.4 锻件设计和锻模设计 .....40-145
  - 1.5 模具预热和润滑 .....40-145
  - 1.6 切边与清理 .....40-145
  - 1.7 精压 .....40-145
  - 1.8 设备选择与操作 .....40-146
  - 1.9 铝合金锻件的缺陷及消除方法 .....40-146
- 2 镁合金锻压 .....40-146
- 3 钛合金锻压 .....40-147
  - 3.1 钛合金的可锻性 .....40-147
  - 3.2 原材料准备 .....40-148
  - 3.3 加热 .....40-148
  - 3.4 锻压温度范围与显微组织 .....40-148
  - 3.5 模具设计与润滑 .....40-148
  - 3.6 切边、冷却与清理 .....40-149
  - 3.7 钛合金的 $\beta$ 锻压法 .....40-149
- 4 铜合金锻压 .....40-149
- 5 铍合金锻压 .....40-150
  - 5.1 铍毛坯的锻压 .....40-150
  - 5.2 铍粉末锻压 .....40-150
  - 5.3 铍铝合金的锻压 .....40-151

## 第11章 锻压设备

- 1 液压机 .....40-151
  - 1.1 液压机传动 .....40-151
  - 1.2 锻造液压机 .....40-152
  - 1.3 快速锻造液压机 .....40-156
  - 1.4 模锻液压机 .....40-156
- 2 锻锤 .....40-158
  - 2.1 蒸汽-空气自由锻锤 .....40-158
  - 2.2 蒸汽-空气模锻锤 .....40-159
  - 2.3 无砧座模锻锤 .....40-160
  - 2.4 空气自由锻锤 .....40-161
  - 2.5 空气模锻锤 .....40-161



## 目 录

2.6	液压锤 .....	40-162
3	螺旋压力机 .....	40-162
3.1	摩擦压力机 .....	40-162
3.2	液压螺旋压力机 .....	40-162
4	机械压力机 .....	40-164
4.1	热模锻压力机 .....	40-164
4.2	精压机 .....	40-165
4.3	切边压力机 .....	40-167
4.4	平锻机 .....	40-168
5	机械传动式棒料剪切机 .....	40-169

## 第12章 锻压安全技术

1	设备使用和维修方面的 安全技术 .....	40-171
2	工艺装备及工具方面的 安全技术 .....	40-171
3	安全操作要求 .....	40-171
4	锻造加热炉的安全操作 .....	40-172
	参考文献 .....	40-172

# 第1章 概述

锻压加工利用金属塑性变形以得到一定形状的制件，同时提高金属的机械性能。负载大、工作条件严峻的关键零件，如汽轮发电机组的转子、主轴、叶轮、护环，大量生产的汽车和拖拉机的曲轴、连杆、齿轮，巨大的水压机立柱、高压缸和冷热轧辊等，都是锻压加工而成的。各种刀具、模具、农具、日常用手工工具、紧固件、轴承环等，也大都采用锻压加工。锻件的年产量，模锻件在锻件总产量中的比例，精密锻件在模锻件总产量中的比例，锻压生产的机械化自动化程度，以及锻压设备在加工机床总量中所占比例和重型水压机拥有量等，在一定程度上反映一个国家的机械制造工业的水平。

汽车、电站设备、造船、重型机械以及新兴的宇航和原子能工业的发展，对锻压加工提出了越来越高的要求，例如要求提供更巨型的大锻件，少无切屑的精密锻件，形状复杂和机械性能很高的大小锻件等。锻压加工方法多种多样(表40·1-1)，而且还在不断发展，但就其工艺的本质而言，则都是金属的塑性变形。决定金属塑性的内在因素是化学成分和组织结构，而影响塑性变形的的主要外因是：变形温度、变形程度、变形速率、应力状态。由于外部条件的变化，形成了不同的工艺方法，例如，冷锻(包括冷锻冷精压等)是在室温下进行塑性变形，可以获得机械性能高、尺寸精度高、表面光洁度好的少无切屑的制品；挤压是在三向压应力状态和不同温度下进行塑性变形，金属产生强烈的流动，可加工低塑性的金属；精锻轴、摆动辗压等是采用逐步累积变形、以较低吨位的设备获得大变形量；高速锻是采用超过通常变形速率进行加工的少无切屑工艺；等温锻造是在恒定的变形温度下进行锻压加工，用较小吨位的设备，成形大型、复杂的零件；中心压实法是利用大锻件内外温差来控制变形程度的分布，达到中心大变形、焊合内部缺陷的目的。

为了多快好省地发展锻压工艺和设备，深刻揭示影响塑性变形的因素，必须加强锻压基本理论的研究和试验，例如金属的塑性、超塑性、高速变形和提高塑性的措施，金属塑性流动规律、变形不均

匀性、残余应力、合理制坯、大锻件工艺参数的确定和内部缺陷的焊合；金属塑性变形时的摩擦理论和摩擦系数的测定；金属在不同变形条件下的金相组织结构与机械性能；准确简便的变形力计算方法、测定方法和降低变形力的措施等等。与此同时，必须重视锻压基本技术的提高和发展，例如下料方法与精密下料；加热技术与快速加热、无氧化加热；润滑剂与润滑技术；锻件尺寸自动测量技术；锻件质量检验与无损探伤技术；模具制造技术等。

锻压工艺方法的革新与发展和其他加工工艺与技术(冶金、铸造、金相、焊接、机械加工、液压等)有密切联系，在发展过程中相互吸取成熟的经验，互补不足。例如：轧锻是轧制与锻压的复合工艺，对于某些零件，在满足性能要求的前提下，提高了劳动生产率；粉末锻造是粉末冶金——锻压复合工艺，它综合了粉末冶金零件的制造简单、材料利用率高、尺寸精度高和锻件的高强度、高韧性的优点；液态模锻是铸锻复合工艺，它克服了通常锻压成形复杂程度较低，变形抗力较高和铸造组织疏松、冲击韧性较低的缺点，以较小吨位的设备锻成形状复杂、机械性能高的锻件；超塑性成形是具有超细晶粒的金属在适宜的变形温度和变形速率的条件下，完成延伸率为300~1300%的加工方法，可制造形状极为复杂、精度要求较高的零件。

锻压工艺流程一般包括：备料、加热、锻造成形、热处理、整形、检验等环节。因锻件尺寸形状、技术要求、生产批量及现场条件不同，上述流程常有较大的伸缩。大型自由锻造汽轮机转子的工艺流程为：冶炼——铸造钢锭——加热——锻造成形——第一次热处理——锻件检查——粗加工——探伤——调质热处理——取试样检验机械性能——粗车外圆——最后探伤和检验尺寸。大批大量生产内燃机连杆工艺流程为：原材料检验——下料——加热——辊锻毛坯——热模锻压力机上模锻——切边——中间检验——锻后热处理——表面清理——检验——校正和精压——最后检验。

表40-1-1 锻压方法及其适用性

加工方法	使用设备	特点及适用范围	生产率	设备费用	锻件精度及光洁度	模具质量要求	模具寿命	机械化及自动化	劳动条件	对环境的影响
自由锻	手工锻	单件、小批		很低					差	
	3吨以下自由锻锤	单件、小批, 小型锻件	中	低	低			较难	差	震动 噪音
	3吨以上自由锻锤	单件、小批, 中型锻件	中	中	低			较难	差	震动 噪音
	1250吨以下自由锻水压机	单件、小批, 中型锻件	中	高	低			较易	较好	
	1250~12000吨自由锻水压机	单件、小批, 大型及特大型锻件		很高	低			较易	较好	
胎模锻	利用自由锻锤及水压机	中小批, 中小型锻件。用胎模成形, 提高锻件质量和设备的生产效率	较高	低、中	中	低	低	较难	差	
模锻	有砧座模锻锤	成大批量, 中小型模锻件; 可在一台设备上拔长、聚料、预锻、终锻	高	中	中	高	中	较难	差	震动 噪音
	无砧座模锻锤	大、中批, 中小型模锻件; 单模膛模锻	高	较低	中	高	中	较难	较差	噪音
	热模锻压力机	大、中批, 中小型模锻件; 大批量需配备制坯设备; 亦可用于精密模锻	很高	高	较高	较高	较高	易	好	
	平锻机	大批大量。适用于法兰轴、带孔模锻件; 多模膛模锻	高	高	较高	高	较高	易 (水平分模)	较好	
	螺旋压力机	大、中批, 中小型模锻件; 一般是单模膛模锻; 可进行精密模锻; 大型精密模锻件用液压螺旋压力机	较高	较高	高	高	中	较易	好	
	高速锤	中、小批。变形速率高; 单模膛模锻; 用于锻制低塑性合金锻件和薄壁高筋复杂模锻件	中	中	高	高	较低	较难		噪音
	多向模锻水压机	大批, 可锻制不同方向具有多孔腔的复杂模锻件	中	高	高	高	高	易		
	模锻水压机	小批, 锻制大型非铁合金模锻件	中	很高	高	高	高			
精锻轴	精密锻轴机	大批, 锻制空心 and 实心阶梯轴	中	高	高	高	中	较易		
挤压	冷挤	冷挤压力机	大批大量, 钢及非铁合金小型零件	高	高	高	高		较易	好
	温热挤	机械压力机	大批大量, 挤压不锈钢、轴承钢零件以及非铁合金的坯料	高	高	较高	高		较易	好
		螺旋压力机								
	液压机									

(续)

加工方法	使用设备	特点及适用范围	生产率	设备费用	锻件精度及光洁度	模具质量要求	模具寿命	机械化及自动化	劳动条件	对环境的影响
锻	多工位冷锻机	大批大量生产标准件	很高	高	高	高		易	好	
	多工位热锻机	大批大量生产轴承环、齿轮等	很高	高	较高	高		易	好	
	电热锻机	大批大量生产大头细杆锻件	很高	中	中	中		易	好	
轧	纵 轧	二辊或三辊轧机	成批大量。可改制坯料，轧等截面或周期截面坯料。冷轧或热轧	高		中		易		
	辊 锻	辊锻机	大批大量。辊锻连杆、扳手、叶片等。亦可用于模锻前制坯	高	中	中	高	高	易	好
	楔形模横轧	平板式、辊式、行星式楔形横轧机	大批大量。可轧锻圆形变截面零件，如带台阶、锥面或球面的轴类件以及双联齿轮坯等	高	高	高	高	高	易	好
	螺旋孔斜轧	二辊或三辊斜轧机	大批大量生产钢球、丝杆等	高	高	高	高	高	易	好
锻	仿形斜轧	三辊仿形斜轧机	大批大量生产实心或空心台阶轴、纺锭杆等	高	高	高	中	高	易	好
	扩孔	扩孔机	大批大量生产大、小环形锻件	高	中	高	中	高	易	好
	齿轮轧制	齿轮轧机	大批大量生产。热轧后冷轧，可大大提高精度	高	高		高		易	好
	摆动辗压	摆动辗压机	中、小批生产盘类、轴对称类锻件。要求配备制坯设备。可热辗、温辗和冷辗	中	高	高	高	中	较易	好

## 第2章 锻压原理

本章重点分析：金属塑性和流动规律，塑性变形对金属组织和性能的影响，以及变形力的计算方法。为合理选用和正确设计锻压设备及模具提供依据。

### 1 金属的塑性和流动

#### 1.1 影响金属塑性的因素和提高金属塑性的要点

金属产生塑性变形而不遭破坏的能力称为金属

的塑性。金属塑性可用允许最大变形程度、延伸率、断面收缩率、热扭转次数，冲击韧性等指标直接或间接表示。金属塑性取决于金属的化学成分、组织结构与变形条件，见表40·2-1。

表40·2-1 各种因素对金属塑性的影响

因 素	提 高 塑 性	降 低 塑 性
化学成分	成分简单，合金含量低，分布均匀	成分复杂，合金含量高，分布不匀
相的数量和组成	相态少和简单	相态多和复杂
组织状态	锻轧组织，再结晶组织，晶粒细小，晶粒大小均匀	铸态组织，加工硬化组织，晶粒粗大，晶粒大小不均
表面状态	无裂纹，光洁度高	有微裂，粗糙
变形温度	处于高塑性温度区间	处于低塑性温度区间
变形速率	变形速率引起软化作用，或由于热效应处于高塑性温度区间；高速成形	变形速率引起加工硬化作用，或由于热效应处于低塑性温度区间
受力状态	三向受压而且压应力数值相近的变形方式，如闭式滚粗、挤压	有拉应力，或虽三向受压但压应力数值相差较大的变形方式，如锻轧、开式滚粗
变形不均匀性	变形分布较均匀，摩擦作用不显著	变形分布不均，摩擦影响大

在适宜的变形温度和变形速率条件下，具有超细晶粒的某些金属与合金具有超出一一般塑性的变形性能，称为超塑性。在超塑性状态下，轴承钢的延伸率可达300%以上。镍基M17超合金(用于制造工作温度大于950℃的涡轮空心叶片和导向器叶片)在1036℃时，延伸率可达1330%。超塑性状态时变形速率一般很低(小于 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 秒 $^{-1}$ )，不适合高生产率要求。

某种金属和合金在变形速率很高的条件下(如采用高压气体、炸药、高压放电或电磁场所产生的高速变形)，塑性大为提高，适用于某些形状复杂锻件和低塑性难加工材料的成形。

提高金属塑性的措施：选用塑性较高的材料；对坯料进行退火、均匀化处理；在锻压加工前和加工过程中随时清除坯料表面裂纹；避免在低塑性温

度区间加工；合理选用锻压设备；尽量选用三向压应力变形方式；采用良好润滑以降低摩擦系数；合理确定坯料形状尺寸，使变形分布均匀。

### 1.2 摩擦对金属流动的影响和塑性变形的不均匀性

塑性变形时，变形体内质点间或局部区域间的相对位移，以及变形工具与坯料间的相对位移均称为金属流动。变形体内任一质点或微小区域的流动总是沿着阻力最小的方向进行。影响金属流动的因素有变形金属与工具接触面上的摩擦，工具与坯料间的相互作用，坯料的化学成分、组织和温度的不均匀等。

现以垫环上滚粗为例，说明摩擦对金属流动的影响。图40·2-1, a为变形初始阶段，工具与坯料接触面(上下端面)比坯料自由表面(侧表面)小，向外径方向流动摩擦阻力小，流入垫环环孔阻力较大，变形表现为减小高度，增大外径，流入环孔金属甚少。b为变形继续发展，接触面增加，自由表面减小，这时金属既沿径向外流，又向环孔挤入，两者分界面直径以 $D_c$ 表示。当变形至阶段c，分界面直径不断增大，沿径向外流金属相对减少，流入环孔金属相对增加，直至环孔完全充满(阶段d)。变形程度愈大，环孔直径愈大，坯料直径愈大和高度愈小，金属变形抗力愈低和加工硬化率愈小，则金属流向环孔倾向愈强。

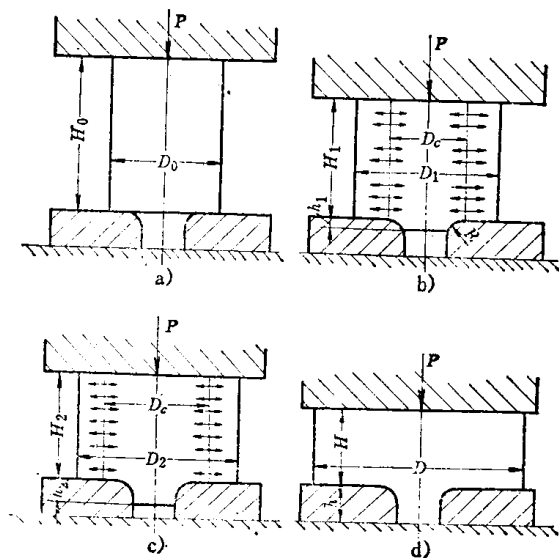


图40·2-1 垫环滚粗时摩擦对金属流动的影响

金属塑性变形时，由于金属组织、成分和温度不均匀，坯料各部分的形状尺寸和应力不同，产生变形不均。

变形不均。变形不均。在锻压加工中难以完全避免，造成锻压加工后内部组织和性能的不均匀。以平板间圆柱体坯料镦粗为例，镦粗后侧表面形成鼓肚，轴向截面上变形不均(图40·2-2)，区

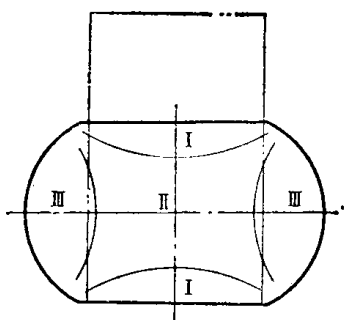


图 40·2-2

域 I 为难变形区，区域 II 变形最大，为剧烈变形区，区域 III 变形介于 I、I 之间。

### 1.3 控制金属流动要点

掌握和运用金属流动规律，采取相应措施，可使金属按预定方向流动，获得所需形状尺寸的锻件。

a. 改变工具形状 改变工具与坯料接触面的形状和尺寸，可以减少在某一方向上的流动，增大在另一方向上的流动。例如：采用凸型砧展宽以增大宽度方向的变形和流动(图40·2-3)；在V型砧间拔长时，V型砧侧表面限制了展宽变形，强化了伸长变形(图40·2-4)。

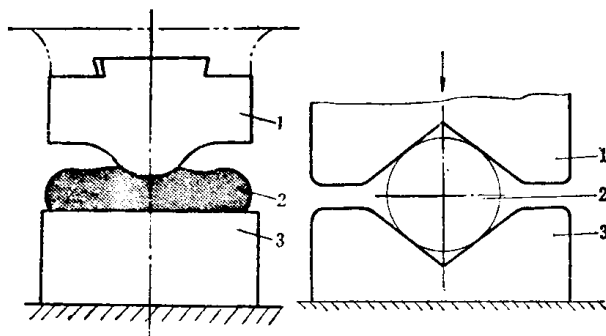


图 40·2-3

图40·2-4 在V型砧中拔长

1—凸形砧 2—锻坯  
3—平台

1、3—V型砧 2—锻坯

b. 增加或减小摩擦 例如：在开式模锻中加大飞边桥部宽度，增大金属流出模膛的阻力，强迫金属充满凹模腔；在平面精压时，提高模面的光洁度和润滑条件，以减小平面凸起现象。

c. 采用合理的坯料形状和尺寸 如镦粗圆柱体时，为了获得直角端(清棱清角)可采用柳锻法

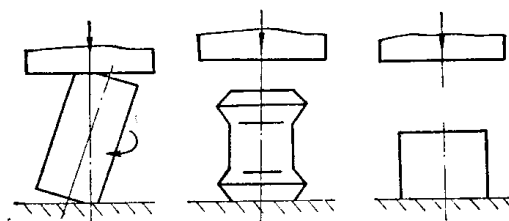


图40·2-5 圆柱体镦粗的柳锻法

(图40·2-5)。坯料先略微倾斜地放在砧面上旋转轻击，使两端略为胀大，成柳钉状。然后放直重击。

d. 利用坯料各部分的温差 如中心压实法利用钢锭中心温度高。锭壳温度低，以强化中心部分的变形，锻合内部缺陷。

e. 合理选用设备 例如：锤上锻造时，锻锤吨位必须足够，否则变形局限于表层，中心部分不能锻透；高速锤变形速率高，有利于模锻薄壁高筋锻件。

## 2 塑性变形对金属组织与性能的影响

按加工硬化与软化的关系，塑性变形可分为：

- (1) 冷变形 加工硬化占绝对优势，如冷挤压、冷锻、冷轧等；
- (2) 温变形 加工硬化与软化同时并存，但硬化仍占优势，如温挤压、半热锻等；
- (3) 热变形 软化与加工硬化同时并存，但软化能完全克服硬化的影响，如热锻、热轧等。

### 2.1 冷变形对金属组织与性能的影响

冷变形过程中，变形程度增加，变形抗力(真实应力)随之不断增大，称为加工硬化。图40·2-6

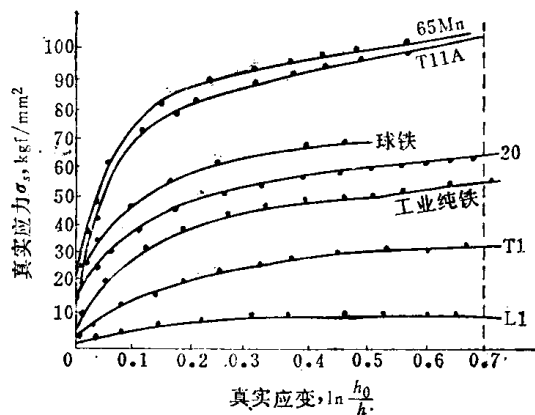


图40·2-6 几种金属均匀压缩的真实应力曲线

为几种金属不同冷变形程度时的变形抗力曲线。由图可知，在相对压下量不超过25%时，加工硬化率较高；继续增大变形程度，加工硬化率减小，并趋向一稳定数值。

冷变形引起金属机械性能、物理性能和化学性能的改变。冷变形程度增加，强度指标和硬度随之提高，塑性指标降低，电阻增大，抗腐蚀性能和导热性能降低，导磁率也有变化，产生了异向性等。表40·2-2为钢15冷挤压变形后的强度变化。

表40·2-2 钢15冷挤压变形后的强度变化

冷挤压变形程度 %	抗拉强度 $\sigma_s$ kgf/mm <sup>2</sup>
20	50
40	68
70	78
75	80
80	84

冷变形可提供尺寸精度和表面光洁度较高的零件。零件具有加工硬化组织，强度与硬度较高。对不能采用热处理方法强化的材料，冷变形是提高机械性能的主要方法。但冷变形零件残余应力高，并且只能在接近常温下使用，温度增高，硬化组织改变，性能降低。冷变形抗力高，需要使用较大吨位的设备。

### 2·2 热变形对金属组织与性能的影响

热变形时，变形抗力降低，塑性提高，可用吨位较小的设备获得形状复杂的锻件。一般具有再结晶组织。

热变形是改变铸态组织的必要方法。锻件经热变形加工，铸态粗大柱状晶粒被打碎，获得等轴细晶，内部疏松、空隙、微裂等被压实或焊合，高熔点化合物均匀分布，晶间低熔点杂质沿变形方向分布，组织呈纤维流向，导致机械性能的异向性。

再结晶图（图40·2-7）表示热变形温度、变形程度、变形后的保温时间与晶粒大小关系，是制定热变形工艺的主要依据之一。由图可见，在某一变形温度、变形程度与保温时间下，再结晶晶粒出现高峰，表明该处晶粒最大，与其相对应的变形程度称为临界变形程度。晶粒粗大一般降低金属机械性能，因此热变形加工，特别是最后一次热变形加工，应尽量避免在临界变形程度下进行。对于不能

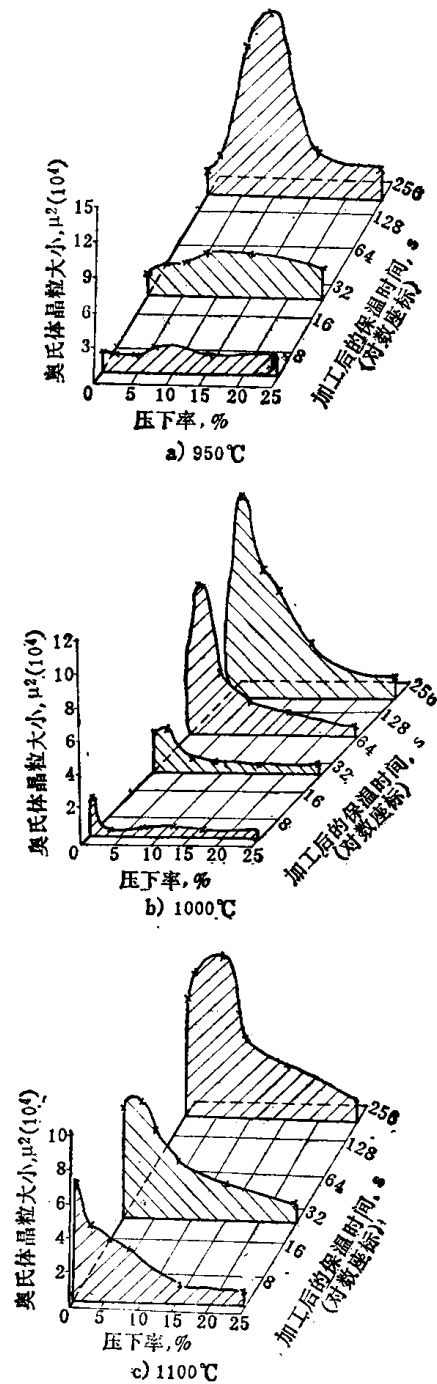


图40·2-7 含碳0.18%优质碳素钢的再结晶立体图

采用重结晶相变细化晶粒的钢种（如奥氏体钢），热变形再结晶是唯一能够改变晶粒大小的方法。

### 2·3 温变形对金属组织与性能的影响

温变形得到既有加工硬化也有再结晶的不均匀组织。与冷变形相比，由于加热的影响，锻件的尺寸精度和表面光洁度略低，变形抗力则显著减小，

塑性增高,适用于变形抗力较大、加工硬化敏感的高碳钢、中高合金钢、轴承钢、不锈钢锻件的成形。发电机护环用的奥氏体钢在600℃温锻(半热锻)变形程度与机械性能关系见图40·2-8。

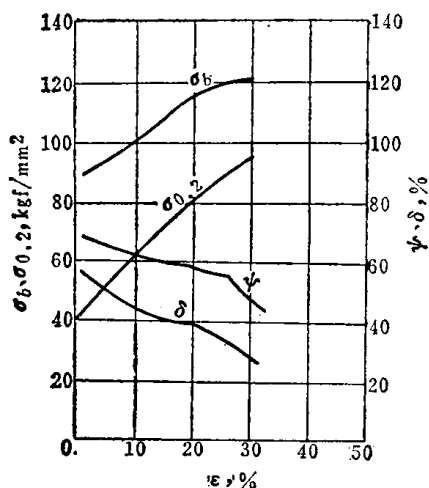


图40·2-8 护环钢 (50Mn18Cr4WN) 600℃ 温锻变形程度与机械性能的关系

## 2.4 控制锻件组织与性能要点

除合理选用原材料和变形方法外,还应注意:

a. 控制金属加热、冷却和锻压温度规范 加热中避免过热与过烧,尽量减小氧化和脱碳。高温时保温时间不宜过长,防止晶粒粗大。始锻温度不宜过高。在规定终锻温度停锻。若最后一次变形量较小,则应降低始锻温度,以免停锻温度过高,晶粒长大。尽量减少火次。避免无变形加热。合理选定冷却方式及规范,避免锻件内部出现过高残余应力,或裂纹。

b. 控制总变形量 铸态毛坯(钢锭)到锻件间的总变形量(以锻比表示)对保证金属组织和性能有很大影响。锻比不足,中心变形小,铸态组织仍局部保留。锻比过大,机械性能异向性增大,横向机械性能降低较多,且过多地消耗动力、工时。合理的锻比应是使铸态组织全部得到改善的最小锻比。通过改善熔炼与浇注工艺(如电渣重熔)可降低所需锻比。

c. 合理选用变形工艺 对于要求综合机械性能的重要锻件(如转子)必要时可采用中间锻粗,以减小机械性能异向性并获得较高机械性能。大型

多拐曲轴采用弯曲锻(全纤维锻造)成形,使纤维流向与零件外形轮廓基本吻合。采用中心压实法,可不经锻造粗而较好地锻合内部缺陷。

## 3 变形力的确定

### 3.1 确定变形力的方法

可采用经验类比法、实验测定法和分析计算法。

经验类比法是在统计分析生产实践数据的基础上整理出经验公式、表格或图线。常根据锻件某一主要参数(如重量、尺寸,接触面积)直接通过公式、表格或图线得出所需锻压设备能力(锤的落下部分重量或打击能量,压力机压力等)。经恰当地选择经验公式(及其系数)、表格或图线,能简单地求得比较符合实际的数值。

实验测定法是在生产现场或实验室应用各种仪表直接测定变形力。其中以电测法应用最广。一般较经验类比法或分析计算法直观可靠。实验测定的可靠性主要取决于实验方案的选择、实验条件与生产条件的相近程度与测定的精确程度。在生产条件下测定时,常需进行设备、模具的改装,配备专用测试装置,故多用于试验研究。

分析计算法根据塑性理论将变形体视为各向同性均匀连续体,通过微体平衡方程与塑性条件联立求解,得出工具与坯料接触面上正应力分布积分后求得变形力。如图40·2-9为圆柱体锻粗时接触面上正应力分布。

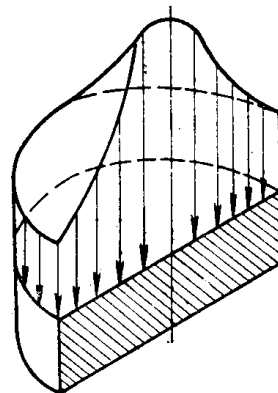


图40·2-9 圆柱体锻粗时接触面上正应力分布

分析计算法所得结果是近似值,其可靠程度取决于简化假设的合理性和求解精度,常需通过实验测定法验证。虽然如此,分析计算法得出的计算公式,用于分析各有关因素对变形力(功)的影响,常有启发提示作用。

按工程计算法(分析计算法中一种)得出圆柱体在液压机上(静态变形)锻粗变形力公式为:

$$F = A\sigma_s \left( 1 + \frac{\mu}{3} \cdot \frac{d}{h} \right) \text{ kgf}$$



式中  $A$ ——工具与金属接触面积  $\text{m}^2$   
 $\sigma_s$ ——金属在变形温度时的变形抗力（真实应力） $\text{kgf}/\text{mm}^2$   
 $\mu$ ——塑性变形摩擦系数  
 $d, h$ ——圆柱体镦粗后直径与高度  $\text{mm}$ 。

当动态变形时，应乘一考虑变形速率影响的速度系数  $w$ 。

### 3.2 变形抗力

变形抗力由实验测定。冷变形及温变形时变形抗力主要与变形程度、变形温度有关，可按相应曲线查找。热变形变形抗力与变形程度关系不大，与变形温度、变形速率有关，如表40-2-3。

表40-2-3 钢在高温下的变形抗力 $\sigma_s$

钢 号	变 形 温 度 $^{\circ}\text{C}$						
	600	700	800	900	1000	1100	1200
10	14	9.8	6.8	4.7	3.25	2.26	1.58
50	21.5	13.6	8.6	5.6	3.55	2.28	1.46
T10	23.5	15	9.3	5.8	3.7	2.15	1.3
30Mn	19.6	12.6	8.3	5.45	3.55	2.32	1.52
40Cr	22	13.9	8.6	5.75	3.65	2.32	1.5
12CrNi3	19.4	13	8.9	6.05	4.1	2.8	1.9
3Cr13	23.5	15	9.2	6.1	3.9	2.5	1.6
1Cr18Ni9Ti	41.0	26.2	16.6	10.8	7.0	4.5	2.9
45CrNiMoV	24.3	16	10.4	6.7	4.4	2.9	1.85
40Mn18Cr4		16.6	7.4	5.9	4.9	3.9	
60Mn	22.5	14	8.7	5.8	3.6	2.3	1.5
GCr15	26.0	16.2	10	6.3	3.7	2.3	1.42

注：1.表中数据在变形速率为 $5 \times 10^{-4}$ 秒，变形程度为20%条件下测得。计算动态变形力时应乘速度系数 $w$ ，表40-2-4。  
 2.40Mn18Cr4变形抗力系在曲柄压力机上镦粗时测得。

表40-2-4 速度系数 $w$ 值

设备类型	液 压 机	曲 柄 压力机	摩 擦 螺 旋 压力机	蒸 汽- 空气锤
$w$	1.0~1.1	1.0~1.3	1.3~1.5	2~3

### 3.3 摩擦系数

塑性变形时，工具与变形金属间不断产生新的接触面，其摩擦系数 $\mu$ 不同于机械摩擦的数值。

表40-2-5 不同工具表面光洁度与润滑条件下的 $\mu$ 值

工具表面 光洁度	润 滑 条 件	钢		铝及铝合金
		碳含量 <0.2%	碳含量 >0.2%	
$\nabla 9$	无	0.16~0.18	0.12~0.15	0.25~0.30
$\nabla 8$	无	0.25~0.30	0.20~0.25	
$\nabla 9$	矿物油	0.06~0.10	0.06~0.10	0.10~0.15
$\nabla 9$	矿物油+20%石墨	0.05~0.08	0.05~0.08	

注：本表为静态变形摩擦，动态变形时降低20~25%。

表40-2-6 不同变形方式与变形温度时的 $\mu$ 值

变形方式	变形温度 $^{\circ}\text{C}$	模具表面 光洁度	润 滑 条 件	$\mu$ 值
镦 粗	900~1100 20	$\nabla 4 \sim \nabla 5$ $\nabla 7 \sim \nabla 8$	无 机 油	0.3~0.5 0.15~0.25
精 压	20	$\nabla 9 \sim \nabla 10$	机 油	0.05~0.10
正反挤压	900~1200 20	$\nabla 8 \sim \nabla 9$	液 态 玻 璃	0.1~0.2
		$\nabla 10 \sim \nabla 11$	石 墨、机 油、木 质 膏	0.05~0.15

注：本表为静态变形摩擦，动态变形时降低20~25%。

表40-2-7 不同金属、合金与变形温度时的 $\mu$ 值

金 属 或 合金类别	工 具 运 动 速 度 $\text{m/s}$	变 形 温 度 与 熔 化 温 度 比 值 (按绝对温度计算)		
		0.8~0.95	0.5~0.8	0.3~0.5
碳素钢	1	0.40~0.35	0.45~0.40	0.35~0.30
铝合金	1	0.50~0.48	0.48~0.45	0.35~0.30
镁合金	1	0.40~0.35	0.38~0.32	0.32~0.24
非铁重合金	1	0.32~0.30	0.34~0.32	0.26~0.24
非铁耐热合金	1	0.28~0.25	0.26~0.22	0.24~0.20

注：本表为无润滑条件下数值。采用润滑时，表中数值可降低25~15%。

### 3.4 降低变形力的途径

a. 改变加工方式 主要指改变变形应力状态。例如：将挤压充满改为镦粗充满；闭式镦粗改为开式镦粗；采用超塑性加工等。

b. 减少工具与金属接触面积 例如：大型锻件整体模锻改为分段模锻；航空用大型隔框锻件由整体模锻改为顺序分段模锻（模具垫板法）。

c. 降低变形抗力 主要是提高变形温度，例如：将冷变形改为温变形、热变形；合理预热工具；缩短操作时间，减少温度下降；薄件宜在变形速度及每分钟行程次数较高的设备上成形。冷变形时坯料应预先退火软化等。

d. 降低摩擦系数 提高变形工具表面光洁度；采用良好润滑条件和强制润滑方式；采用塑性金属垫片等。