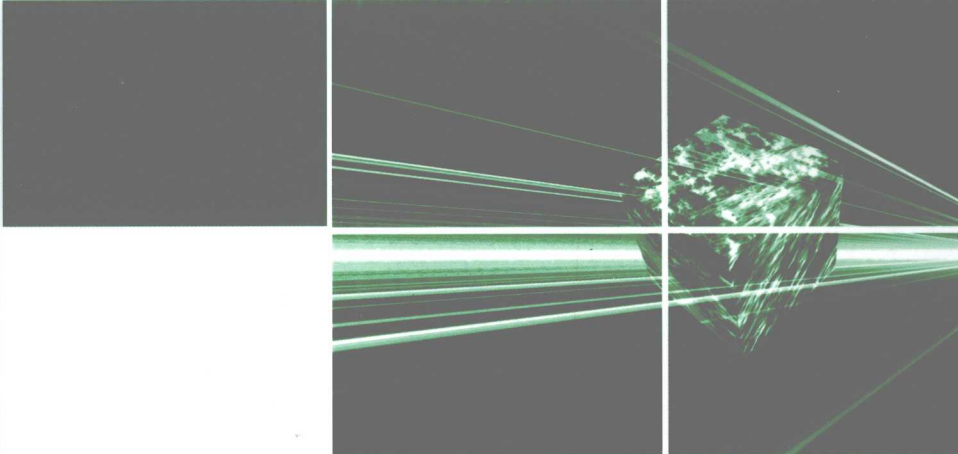
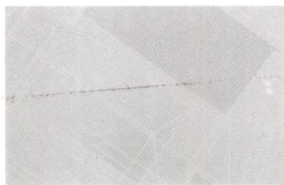


普通高等教育“十二五”规划教材

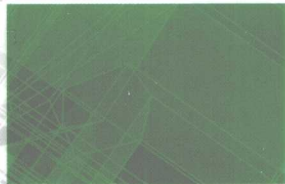


# 锻造工艺与 模具设计

闫洪 主编



YZL10890123271



普通高等教育“十二五”规划教材

# 锻造工艺与模具设计

主 编 闫 洪  
副主编 李 萍 郝 新 张如华  
参 编 赵 才 霍晓阳 薛克敏  
王大勇 宋志真 冯再新  
杨 军 周六如  
主 审 夏巨谔



YZLI0890123271

机械工业出版社

本书对锻造技术作了全面、系统的介绍,共分13章,包括绪论、锻造用材料准备、锻造的加热规范、自由锻造工艺、模锻成形工序分析、锤上模锻、机械压力机上模锻、螺旋压力机上模锻、平锻机上模锻、液压机上模锻、模锻后续工序、特种锻造、锻造工艺的技术经济分析。本书理论联系实际,有较强的实用性。

本书可作为高等院校、成人高校模具、材料成形及控制工程、机械类等专业的教材,也可供有关技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

锻造工艺与模具设计/闫洪主编. —北京:机械工业出版社,2011.12  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-36662-1

I. ①锻… II. ①闫… III. ①锻造—工艺学—高等学校—教材②锻模—设计—高等学校—教材 IV. ①TG316②TG315.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第248509号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:冯春生 责任编辑:冯春生 周璐婷

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22印张·541千字

标准书号:ISBN 978-7-111-36662-1

定价:42.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 普通高等教育“十二五”规划教材 编审委员会

**主任委员** 李荣德 沈阳工业大学

**副主任委员** (按姓氏笔画排序)

方洪渊 哈尔滨工业大学  
朱世根 东华大学  
邢建东 西安交通大学  
李永堂 太原科技大学  
聂绍珉 燕山大学

王智平 兰州理工大学

许并社 太原理工大学

李大勇 哈尔滨理工大学

周荣 昆明理工大学

葛继平 大连交通大学

**委员** (按姓氏笔画排序)

丁雨田 兰州理工大学  
王卫卫 哈尔滨工业大学(威海)  
邓子玉 沈阳理工大学  
刘金合 西北工业大学  
毕大森 天津理工大学  
闫久春 哈尔滨工业大学  
张建勋 西安交通大学  
李桓 天津大学  
李亚江 山东大学  
周文龙 大连理工大学  
侯英玮 大连交通大学  
赵军 燕山大学  
黄放 贵州大学  
薛克敏 合肥工业大学

文九巴 河南科技大学

计伟志 上海工程技术大学

刘永长 天津大学

华林 武汉理工大学

许映秋 东南大学

何国球 同济大学

李尧 江汉大学

李强 福州大学

邹家生 江苏科技大学

武晓雷 中国科学院

姜启川 吉林大学

梁伟 太原理工大学

蒋百灵 西安理工大学

戴虹 西南交通大学

**秘书长** 袁晓光 沈阳工业大学

**秘书** 冯春生 机械工业出版社

# 塑性成形及模具教材编委会

## 会员委审编

### 顾问

王仲仁 哈尔滨工业大学  
聂绍珉 燕山大学

俞新陆 清华大学  
（兼职）

主任委员 李永堂 太原科技大学

副主任委员（按姓氏笔画排序）

邓子玉 沈阳理工大学  
华林 武汉理工大学  
陈拂晓 河南科技大学  
赵军 燕山大学

刘建生 太原科技大学  
许映秋 东南大学  
周文龙 大连理工大学  
薛克敏 合肥工业大学

委员（按姓氏笔画排序）

于宝义 沈阳工业大学  
王雷刚 江苏大学  
石连升 哈尔滨理工大学  
刘守荣 中国农业大学  
毕大森 天津理工大学  
闫洪 南昌大学  
侯英玮 大连交通大学  
郝滨海 山东大学  
曹建国 四川大学  
董湘怀 上海交通大学

王群 湖南大学  
冯再新 中北大学  
刘全坤 合肥工业大学  
吕琳 重庆理工大学  
池成忠 太原理工大学  
李国禄 河北工业大学  
姚兴军 华东理工大学  
袁子洲 兰州理工大学  
梅益 贵州大学  
霍晓阳 河南理工大学

秘书长 宋建丽 太原科技大学

秘书 冯春生 机械工业出版社

# 前 言

## 录 目

本书论述了锻造生产理论、各种锻造方法以及相关模具设计知识。其内容包括下料、加热、成形、切边冲孔、清理、热处理、检验等。本书应用塑性成形原理分析变形工序，密切联系生产实际，阐述锻造工艺规程的制订和工艺装备的设计及锻件质量控制等问题。

本书共分13章，包括绪论、锻造用材料准备、锻造的加热规范、自由锻造工艺、模锻成形工序分析、锤上模锻、机械压力机上模锻、螺旋压力机上模锻、平锻机上模锻、液压机上模锻、模锻后续工序、特种锻造、锻造工艺的技术经济分析。

本书由南昌大学闫洪任主编，由合肥工业大学李萍、内蒙古工业大学郝新、南昌大学张如华任副主编。各部分编写分工如下：南昌大学闫洪编写第1章、第11章，太原科技大学赵才编写第2章，河南理工大学霍晓阳编写第3章，内蒙古工业大学郝新编写第4章，合肥工业大学李萍、薛克敏编写第5章、第12章，南昌大学张如华编写第6章6.1~6.8和6.10、第7章，南昌大学周六如编写第6章6.9，大连交通大学王大勇编写第8章，河南科技大学宋志真编写第9章，中北大学冯再新编写第10章，大连交通大学王大勇、杨军编写第13章。全书由闫洪统稿。

全书由华中科技大学夏巨谔教授主审，在此深表感谢。

由于学术水平所限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

### 编 者

# 目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 锻造生产的特点与作用	1
1.2 锻造方法分类及应用范围	1
1.3 锻造生产的历史及发展	3
1.4 本课程的性质及任务	4
思考题	4
第2章 锻造用材料准备	5
2.1 锻造用原材料	5
2.1.1 钢锭的结构及缺陷	5
2.1.2 锻造用型材	7
2.2 下料方法	8
2.2.1 剪切法	9
2.2.2 锯切法	10
2.2.3 其他下料方法	12
思考题	12
第3章 锻造的加热规范	13
3.1 锻前加热	13
3.1.1 锻前加热的目的	13
3.1.2 锻前加热的方法	13
3.2 金属加热过程中的变化	16
3.2.1 氧化和脱碳	16
3.2.2 过热和过烧	19
3.2.3 导温性的变化	21
3.2.4 应力的变化	22
3.3 锻造温度范围的确定	24
3.3.1 锻造温度范围确定的原则及方法	24
3.3.2 始锻温度的确定	26
3.3.3 终锻温度的确定	26
3.4 锻造的加热规范	28
3.4.1 装炉温度	29
3.4.2 加热速度	30
3.4.3 均热保温	32
3.4.4 加热时间	33
3.4.5 钢锭、钢坯、钢材的加热规范	34
3.5 金属的少无氧化加热	36
3.5.1 快速加热	36
3.5.2 介质保护加热	36
3.5.3 少无氧化火焰加热	37
思考题	38
第4章 自由锻造工艺	39
4.1 概述	39
4.2 自由锻工序及自由锻件分类	40
4.2.1 自由锻工序组成	40
4.2.2 自由锻件分类	41
4.3 自由锻基本工序分析	45
4.3.1 墩粗	45
4.3.2 拔长	50
4.3.3 冲孔	60
4.3.4 扩孔	63
4.3.5 弯曲	65
4.3.6 错移	66
4.4 自由锻工艺规程的制订	66
4.4.1 锻件图的制订与绘制	66



4.4.2	坯料质量和尺寸的确定	67	5.4.3	挤压时常见缺陷分析	123
4.4.3	制订变形工艺和确定锻造比	69	5.5	顶墩	126
4.4.4	选择锻造设备	70	5.5.1	顶墩概述	126
4.4.5	制订自由锻工艺规程举例	74	5.5.2	电热墩粗	127
4.5	大型锻件自由锻造工艺特点	76	5.5.3	在带有导向的模具中墩粗	128
4.5.1	钢锭冶金质量的提高	77	思考题		128
4.5.2	大型钢锭加热的特点	78	<b>第6章 锤上模锻</b>		129
4.5.3	锻造对钢锭组织和性能的影响	78	6.1	锻锤工艺特点及锤锻工艺流程	129
4.5.4	大型锻件的变形工艺	82	6.1.1	锻锤工艺特点	129
4.5.5	大型锻件锻造工艺实例	84	6.1.2	锤锻工艺流程	130
4.6	胎模锻	90	6.2	模锻件分类	130
4.6.1	胎模锻特点及胎模锻分类	90	6.3	模锻件图设计	133
4.6.2	胎模锻工艺	93	6.3.1	分模面	133
4.6.3	胎模设计	101	6.3.2	余块、余量和锻件公差	135
4.6.4	胎模锻工艺举例	111	6.3.3	模锻斜度	140
思考题		111	6.3.4	锻件圆角	142
<b>第5章 模锻成形工序分析</b>		112	6.3.5	冲孔连皮	142
5.1	概述	112	6.3.6	锻件图	144
5.2	开式模锻	113	6.4	模锻模膛设计	145
5.2.1	开式模锻各阶段的应力应变分析	113	6.4.1	终锻模膛设计	146
5.2.2	开式模锻时影响金属成形的主要因素	114	6.4.2	预锻模膛设计	150
5.3	闭式模锻	117	6.5	模锻变形工序设计	154
5.3.1	闭式模锻的变形过程分析	118	6.5.1	短轴类锻件制坯工步	155
5.3.2	坯料体积和模膛体积偏差对锻件尺寸的影响	119	6.5.2	长轴类锻件制坯工步	156
5.3.3	打击能量和模压力对成形质量的影响	120	6.6	锤锻坯料尺寸	162
5.4	挤压	121	6.6.1	短轴类锻件	162
5.4.1	挤压的应力应变分析	121	6.6.2	长轴类锻件	163
5.4.2	挤压时筒内金属的变形流动	121	6.7	制坯模膛设计	163
			6.7.1	滚压模膛	163
			6.7.2	卡压模膛及成形模膛	168
			6.7.3	拔长模膛	169
			6.7.4	弯曲模膛	170
			6.7.5	墩粗台和压扁台	173
			6.8	锻锤吨位的确定	174
			6.9	锤锻模结构设计	175
			6.9.1	模膛的布排	175
			6.9.2	错移力的平衡与锁扣	178



设计 .....	178	压力的选择 .....	212
6.9.3 脱模机构设计 .....	181	8.4.2 离合器式螺旋压力机 公称压力的选择 .....	213
6.10 锻模材料及锻模的使用 与维护 .....	181	8.5 螺旋压力机上模锻的锻模 设计 .....	214
6.10.1 锻模材料 .....	182	8.5.1 锻模设计特点 .....	214
6.10.2 锻模损坏形式及其 原因 .....	183	8.5.2 锻模的结构形式 .....	219
6.10.3 锻模的使用与维护 .....	183	8.5.3 模膛及飞边槽设计 .....	220
思考题 .....	185	8.6 螺旋压力机用模架 .....	222
<b>第7章 机械压力机上模锻</b> .....	186	8.6.1 摩擦螺旋压力机模架 结构 .....	222
7.1 锻件分类 .....	188	8.6.2 新型及离合器式螺旋压 力机模架结构 .....	225
7.2 锻件图设计特点 .....	189	8.7 螺旋压力机上模锻工艺实例 .....	226
7.3 变形工步及其设计 .....	190	思考题 .....	229
7.3.1 变形工步安排 .....	190	<b>第9章 平锻机上模锻</b> .....	230
7.3.2 工步设计 .....	191	9.1 平锻机工艺特点 .....	230
7.4 模锻力及设备吨位确定 .....	196	9.2 平锻机上模锻工步与锻件分 类 .....	231
7.5 机锻模结构设计 .....	196	9.2.1 平锻机上模锻工步 .....	231
7.5.1 模架简介 .....	196	9.2.2 锻件分类 .....	232
7.5.2 模块与模座的连接 .....	197	9.3 平锻机模锻件图设计 .....	233
7.5.3 工作零件设计 .....	199	9.3.1 分模面确定 .....	233
7.5.4 机锻模选材 .....	201	9.3.2 机械加工余量和公差 .....	234
7.5.5 机锻模闭合高度 .....	202	9.3.3 模锻斜度 .....	234
思考题 .....	202	9.3.4 圆角半径 .....	235
<b>第8章 螺旋压力机上模锻</b> .....	204	9.3.5 平锻件允许的形狀偏差 .....	235
8.1 螺旋压力机工作原理和 工作特性 .....	204	9.4 聚集规则及其工步计算 .....	237
8.1.1 分类 .....	204	9.4.1 聚集规则 .....	237
8.1.2 工作原理 .....	204	9.4.2 聚集工步计算 .....	239
8.1.3 螺旋压力机力能关系 .....	205	9.5 通孔和盲孔类平锻件工艺 分析 .....	241
8.2 螺旋压力机上模锻工艺 特点 .....	206	9.5.1 冲孔成形 .....	241
8.2.1 惯性螺旋压力机上模锻 的工艺特点 .....	206	9.5.2 通孔平锻件热锻件图 设计 .....	242
8.2.2 离合器式螺旋压力机上 模锻的工艺特点 .....	209	9.5.3 冲孔次数的确定和冲 孔工步设计 .....	242
8.3 锻件图设计特点 .....	210	9.5.4 冲孔原始坯料尺寸的 确定 .....	244
8.4 螺旋压力机公称压力的选 择 .....	212		
8.4.1 惯性螺旋压力机公称			



9.6 管类平锻件的工艺分析 .....	245	11.1 切边与冲孔 .....	271
9.7 平锻机吨位的确定 .....	247	11.1.1 切边和冲孔的方式及 模具类型 .....	271
9.7.1 经验-理论公式 .....	247	11.1.2 切边模 .....	272
9.7.2 经验公式 .....	247	11.1.3 冲孔模和切边冲孔复 合模 .....	278
9.7.3 查表法 .....	247	11.1.4 切边力和冲孔力的 计算 .....	279
9.8 平锻机上锻模结构特点与 模具使用 .....	248	11.1.5 切边、冲孔模材料 .....	279
9.8.1 平锻模的安装 .....	248	11.2 校正及模具设计 .....	280
9.8.2 平锻模结构设计特点 .....	249	11.2.1 校正 .....	280
9.8.3 型槽设计 .....	250	11.2.2 精压 .....	281
9.8.4 平锻模的使用 .....	254	11.3 锻件冷却与热处理 .....	284
9.9 典型平锻件成形工艺流程 举例 .....	255	11.3.1 锻件的冷却 .....	284
9.9.1 转向节摇臂轴平锻成 形工艺 .....	255	11.3.2 锻件热处理 .....	286
9.9.2 铲齿成形平锻工艺 .....	256	11.4 表面清理 .....	288
9.9.3 联轴器滑套成形平锻 工艺 .....	258	11.5 锻件质量检验及主要缺陷 .....	290
思考题 .....	258	11.5.1 锻件质量检验 .....	290
<b>第10章 液压机上模锻</b> .....	259	11.5.2 锻件的主要缺陷 .....	293
10.1 液压机工作原理及特点 .....	259	思考题 .....	295
10.1.1 液压机的工作原理 .....	259	<b>第12章 特种锻造</b> .....	296
10.1.2 液压机的分类 .....	260	12.1 摆动辗压 .....	296
10.1.3 液压机的工作特点 .....	261	12.1.1 摆动辗压的工作原理 .....	296
10.2 水压机上模锻的特点 .....	261	12.1.2 摆动辗压的特点 .....	297
10.3 多向模锻液压机的发展 .....	262	12.1.3 摆动辗压的分类与 应用 .....	297
10.4 锻件图设计及工艺特点 .....	263	12.2 旋转锻造 .....	298
10.4.1 锻件图设计特点 .....	263	12.2.1 旋转锻造的原理及 工艺特点 .....	298
10.4.2 分模面的选择 .....	263	12.2.2 旋转锻造件的缺陷 及预防 .....	300
10.4.3 制坯工步方案的设计 .....	264	12.2.3 旋转锻造的分类与 应用 .....	300
10.5 液压机吨位计算 .....	265	12.3 液态模锻 .....	301
10.5.1 根据模锻材料及投影 面积确定 .....	265	12.3.1 液态模锻的原理 .....	301
10.5.2 根据公式计算 .....	265	12.3.2 液态模锻的分类 .....	301
10.6 液压机上模锻锻模设计及 材料的选择 .....	266	12.3.3 液态模锻的特点 .....	302
10.7 典型锻件工艺举例 .....	267	12.3.4 液态模锻对设备的 要求 .....	303
思考题 .....	270		
<b>第11章 模锻后续工序</b> .....	271		



12.3.5 液态模锻对模具的要求 ..... 304

12.4 等温锻造 ..... 304

12.4.1 等温锻造的原理 ..... 304

12.4.2 等温锻造的分类 ..... 305

12.4.3 等温锻造的特点 ..... 305

12.4.4 等温锻造模具设计的一般原则 ..... 306

12.5 辗锻 ..... 307

12.5.1 辗锻的原理 ..... 307

12.5.2 辗锻的分类及特点 ..... 307

12.5.3 辗锻的咬入条件及前滑 ..... 308

12.5.4 辗锻工艺与模具设计 ..... 309

12.6 楔横轧 ..... 311

12.6.1 楔横轧的原理及特点 ..... 311

12.6.2 楔横轧的分类及应用 ..... 311

12.6.3 楔形模的参数及设计 ..... 313

12.7 粉末锻造 ..... 314

12.7.1 粉末锻造的特点、分类及应用 ..... 315

12.7.2 金属粉末的选用 ..... 316

12.7.3 预成形坯的制备 ..... 316

12.7.4 预成形坯的锻造 ..... 317

12.8 半固态金属成形 ..... 318

12.8.1 半固态金属成形的特点 ..... 318

12.8.2 半固态金属坯料的制备 ..... 318

12.8.3 半固态金属成形的分类 ..... 319

12.8.4 半固态金属触变锻造 ..... 320

思考题 ..... 321

第13章 锻造工艺的技术经济分析 ..... 322

13.1 锻造工艺分析和方案确定 ..... 322

13.2 锻件成本分析 ..... 324

13.2.1 原材料费用 ..... 325

13.2.2 锻件加工费用 ..... 326

13.2.3 模具费用 ..... 328

13.2.4 设备折旧 ..... 329

13.2.5 其他费用 ..... 330

13.3 锻造工艺方案的技术经济分析 ..... 334

13.3.1 成本批量曲线 ..... 334

13.3.2 工艺方案技术经济分析举例 ..... 335

思考题 ..... 335

附录 锻造技术经济指标 ..... 336

参考文献 ..... 338

1. 锻造工艺学 ..... 338

2. 锻造模具设计 ..... 338

3. 锻造工艺学 ..... 338

4. 锻造工艺学 ..... 338

5. 锻造工艺学 ..... 338

6. 锻造工艺学 ..... 338

7. 锻造工艺学 ..... 338

8. 锻造工艺学 ..... 338

9. 锻造工艺学 ..... 338

10. 锻造工艺学 ..... 338

11. 锻造工艺学 ..... 338

12. 锻造工艺学 ..... 338

13. 锻造工艺学 ..... 338

14. 锻造工艺学 ..... 338

15. 锻造工艺学 ..... 338

16. 锻造工艺学 ..... 338

17. 锻造工艺学 ..... 338

18. 锻造工艺学 ..... 338

19. 锻造工艺学 ..... 338

20. 锻造工艺学 ..... 338

# 第1章 绪论

## 1.1 锻造生产的特点与作用

锻造是一种借助工具或模具在冲击或压力作用下加工金属机械零件或零件毛坯的方法，其主要任务是解决锻件的成形及其内部组织性能的控制，以获得所需几何形状、尺寸和质量的锻件。

金属材料通过塑性变形后，消除了内部缺陷，如锻（焊）合空洞，压实疏松，打碎碳化物、非金属夹杂并使之沿变形方向分布，改善或消除成分偏析等，得到了均匀、细小的低倍和高倍组织。铸造工艺得到的铸件尽管能获得比锻件更为复杂的形状，但难以消除疏松、空洞、成分偏析、非金属夹杂等缺陷；铸件的抗压强度虽高，但韧性不足，难以在受拉应力较大的条件下使用。切削加工方法获得的零件尺寸精度最高，表面光洁，但金属内部流线往往被切断，容易造成应力腐蚀，承载拉压交变应力的能力较差。因此，与其他加工方法相比，锻造加工生产率最高，锻件的形状、尺寸稳定性好，并有最佳的综合力学性能。锻件的最大优势是纤维组织合理、韧性高。

近几十年来，在锻造行业中出现了冷镦、冷挤、冷精压、精密锻造、温挤、等温成形、精密辗压、错距旋压等净形或近净形成形新工艺，其中一些新工艺的加工精度和表面粗糙度已达到了车、铣加工，甚至磨加工的水平。

锻造生产广泛应用于机械、冶金、造船、航空、兵器以及其他许多工业部门，在国民经济中占有极为重要的地位。锻造生产能力及其工艺水平反映了国家装备制造业的水平。

毫无疑问，随着锻造技术的日益发展以及锻造方法在工业生产中的重要作用，锻造生产对国民经济的贡献将更为重大。随着锻造方法和设备的不断完善以及新的锻压技术的出现，锻造生产的领域将更加广阔。

## 1.2 锻造方法分类及应用范围

### 1. 锻造方法分类

根据使用工具和生产工艺的不同，锻造生产分为自由锻、模锻和特种锻造。

(1) 自由锻 自由锻一般是指借助简单工具，如锤、砧、型砧、棒子、冲子、垫铁等对铸锭或棒材进行镦粗、拔长、弯曲、冲孔、扩孔等方式生产零件毛坯的方法。其加工余量大，生产效率低；锻件力学性能和表面质量受生产操作工人的影响大，不易保证。这种锻造方法只适合单件或极小批量或大锻件的生产；不过，模锻的制坯工步有时也采用自由锻。

自由锻设备依锻件质量大小而选用空气锤、蒸汽-空气锤或锻造水压机。

自由锻还可以借助简单的模具进行锻造，亦称胎模锻，其效率比人工操作要高，成形效果也大为改善。

(2) 模锻 模锻是将坯料放入上、下模块的型槽（按零件形状尺寸加工）间，借助锻锤锤头、压力机滑块或液压机活动横梁向下的冲击或压力成形为锻件的方法。模锻件余量小，只需少量的机械加工（有的甚至不加工）。模锻生产效率高，内部组织均匀，件与件之间的性能变化小，形状和尺寸主要是靠模具保证，受操作人员的影响较小。模锻需要借助模具，加大了投资，因此不适合单件和小批量生产。

模锻常用的设备主要是模锻锤、机械压力机、螺旋锤（摩擦、液压、高能、电动）、模锻液压机等。模锻还经常需要配置自由锻、辊锻或楔横轧设备制坯，尤其是曲柄压力机和液压机上的模锻。

(3) 特种锻造 有些零件采用专用设备可以大幅度提高生产率，锻件的各种要求（如尺寸、形状、性能等）也可以得到很好的保证。如螺钉，采用镦头机和搓丝机，生产效率成倍增长。利用摆动辗压生产盘形件或杯形件，可以节省设备吨位，即“用小设备干大活”。利用旋转锻造生产棒材，其表面质量高，生产效率也比其他设备高，操作方便。特种锻造有一定的局限性，特种锻造机械只能生产某一类型的产品，因此适合于生产批量大的零件。

锻造工艺在锻件生产中起着重大作用。工艺流程不同，得到的锻件质量（指形状、尺寸精度、力学性能、流线等）有很大的差别，使用设备类型、吨位也相去甚远。有些特殊性能要求只能靠更换强度更高的材料或新的锻造工艺解决，如航空发动机压气机盘、涡轮盘，在使用过程中，盘缘和盘毂温度梯度较大（高达 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ ），为适应这种工作环境，需要双性能盘，通过锻造工艺和热处理工艺的适当安排，生产出的双性能盘能同时满足高温和室温性能要求。工艺流程安排恰当与否不仅影响质量，还影响锻件的生产成本。合理的工艺流程应该是得到的锻件质量最好，成本最低，操作方便、简单，而且能充分发挥出材料的潜力。

对工艺重要性的认识是随着生产的深入发展和科技的不断进步而逐步加深的。等温锻造工艺的出现解决了锻造大型精密锻件和难变形合金需要特大吨位设备和成形性能差的困难。锻件所用材料、锻件形状千差万别，所用工艺不尽相同，如何正确处理这些问题正是锻造工程师的任务。

## 2. 应用范围

锻件应用的范围很广。几乎所有运动的重大受力构件都由锻造成形，不过推动锻造（特别是模锻）技术发展的最大动力来自交通工具制造业——汽车制造业和飞机制造业。锻件尺寸、质量越来越大，形状越来越复杂、精细，锻造的材料日益广泛，锻造的难度更大。这是由于现代重型工业、交通运输业对产品追求的目标是长的使用寿命，高的可靠性。如航空发动机，推重比越来越大。一些重要的受力构件，如涡轮盘、轴、压气机叶片、盘、轴等，使用温度范围变得更宽，工作环境更苛刻，受力状态更复杂而且受力急剧增大。这就要求承力零件有更高的抗拉强度、疲劳强度、蠕变强度和断裂韧性等综合性能。

随着科技的进步，工业化程度的日益提高，要求锻件的数量逐年增长，据有关调查，锻压（包括板料成形）零件在飞机中占85%，在汽车中占60%~70%，在农机、拖拉机中占70%。目前全世界仅钢模锻件的年产量就达数千万吨。

### 1.3 锻造生产的历史及发展

早在两千五百多年前,我国的春秋时期就已应用锻造方法锻造生产工具和各类兵器,并已达到了较高的技术水平。例如:在秦始皇陵兵马俑坑的出土文物中有三把合金钢锻制的宝剑,其中一把至今仍光艳夺目,锋利如昔。另一件锻制品要数在同一历史阶段(即公元前几世纪至公元3世纪)生产出来用作船锚的铁柱,其直径为400mm,长达7.25m。

锻造真正获得较大发展是在工业化革命时期,1842年,内史密斯(Nasmith)发明了双作用锤,这种锻锤具备现代直接在活塞杆上固定锤头的锻锤结构的所有特点。1860年,哈斯韦尔(Haswell)发明了第一台自由锻水压机。这些设备的出现标志着锻压技术成为一门具有影响力的学科的开始。

锻压经过一百多年的发展,今天已成为一门综合性学科。它以塑性成形原理、金属学、摩擦学为理论基础,同时涉及传热学、物理化学、机械运动学等相关学科,以各种工艺学,如锻造工艺学、冲压工艺学等为技术,与其他学科一起支撑着机器制造业。锻压这门传统学科至今仍朝气蓬勃,在众多的金属材料 and 成形加工及国际、国内学术交流会上仍十分活跃。

锻造成形工艺飞速发展的同时也大大促进了锻压设备的发展。锻压成形所使用的设备应具有良好的刚性、可靠性和稳定性,要有精密的导向机构等,对生产工序要能自动监控和具备检测功能。

古老的锻锤是各种锻压设备的先驱,虽在近些年来因能耗高、劳动环境差而不断受到针砭,但由于其成形能力强、工艺通用性好的优点至今未被完全淘汰。改造蒸汽锤的动力源始于20世纪60年代,70年代初初步成功,80年代有了大的发展,既达到了高效、节能的目的,又保持了锻锤原有的优点,也不改变操作习惯,投资也不太高。至今有几十家工厂的百余台锻锤接受了这种以电液驱动代替蒸汽驱动的“换头”技术。

摩擦压力机是我国20世纪的主要锻压设备之一。其在国内总体数量很多,与锻锤相当。该设备因投资较小,被用以代替锻锤,并不断向大吨位级发展。20世纪,发展摩擦压力机上的精密模锻曾是我国锻压业发展的主要方向。

摩擦压力机与锤相比,名称不同,外形也相差很大,但基本上属于锤类设备,生产效率也较低、能耗较大。因其特殊的力能转换关系和整体框架式结构,实际工作中由于打击力超载,有时可能发生机架、螺杆、主螺母断裂。人们正在从过载保护及更新操纵机构方面着手研究解决这些问题。

20世纪70年代,国外开发并应用了现代的机、电、液、计算机技术,研制成功了新型螺旋压力机,如液压螺旋压力机、离合器式螺旋压力机、电动螺旋压力机。这些压力机高效、节能、有效行程长且可调,打击力和输出能量可控,虽然造价和维护技术比摩擦压力机高,但由于其突出的优点,已具有逐渐取代摩擦压力机的发展趋势。

20世纪50年代,国内出现了用于热模锻的机械压力机,70年代原第二汽车制造厂用它完全取代了模锻锤。机械压力机主要是由刚性连接的机械传动机构发出强制压力克服变形阻力,把执行部件从高速运动中获得的动能转化为金属塑性变形位能,使金属在准静态下塑性变形。

机械压力机生产率高、锻件余量小,可以多工位锻造,易于实现自动化,适宜大批量生产,是先进的锻压设备。但相对于锤的造价更贵、通用性较差,对工艺设计、下料精度、模



具安装、设备调试等环节的要求都很高。

据 2010 年不完全统计,全国有锻造厂点约 5000 个(重要锻造企业约 400 家),拥有各种锻造设备(主机)4 万余台。自由锻设备总量约 3.4 万台,其中,70% 以上为 400kg 以下的小型空气锤,液压机约 170 台(最大吨位 185MN)。模锻设备总量约 0.6 万台,其中,模锻锤约 0.12 万台,机械压力机约 0.1 万台,螺旋压力机约 0.34 万台,模锻液压机约 10 台(最大吨位 300MN),特种模锻设备约 400 台。这些装备为我国机器制造业持续高速发展奠定了雄厚的基础。不过,世界上最大的模锻水压机(750MN)安装在俄罗斯,美国拥有最大的模锻水压机(450MN),德国的模锻设备比例高于我国。可见,差距还很大。

近年来,我国锻件年产量已超过 1000 万 t,其中,模锻件比例约占 2/3。随着我国跻身世界钢铁生产大国(2010 年已达 6.3 亿 t)的行列,汽车制造业、飞机制造业以及发电设备、机车、轮船制造业的飞速发展,对锻件需求量日益增大,必然促进锻造技术的发展,使锻造业与飞跃发展的制造业相适应。

当代科学技术的发展对锻压技术本身的完善和发展有着重大的影响,这主要表现在以下几个方面:

1) 材料科学的发展。这对锻压技术有着最直接的影响,材料的变化、新材料的出现必然对锻压技术提出新的要求,如高温合金、金属间化合物、陶瓷材料等难变形材料的成形问题。锻压技术也只有不断解决材料带来问题的情况下才能得以发展。

2) 新兴科学技术的出现。当前主要是计算机技术应用于锻压技术各个领域。如锻模计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术、锻造过程的计算机有限元数值模拟技术,无疑会缩短锻件生产周期,提高锻件设计和生产水平。

3) 机械零件性能的更高要求。现代交通工具如汽车、飞机、机车的速度越来越高,负荷越来越大。除更换强度更高的材料外,研究和开发新的锻造技术,挖掘原有材料的潜力也是一条出路,如近年来出现的等温模锻、粉末锻造,以及适应不同温度-载荷的双性能锻件锻造工艺等。

## 1.4 本课程的性质及任务

“锻造工艺与模具设计”是利用塑性成形原理,研究如何利用各种锻造工艺有效生产锻件的一门技术科学,实践性较强;同时也是探讨理论知识与生产实际结合的一门应用技术。要掌握好这门技术,除要学好“塑性成形原理”、“材料科学基础”等有关理论课程外,还要重视实践性教学环节,如生产劳动实习、工艺实验、课程设计、毕业专题研究等。

通过本课程的学习,应使学生达到以下目标:

- 1) 基本掌握自由锻工艺设计、模锻工艺设计和锻模设计方法。
- 2) 具有初步进行锻造工艺分析的能力。
- 3) 具有初步分析和解决锻件质量问题的能力。

### 思考题

1. 简述锻造生产的特点。
2. 论述锻造生产技术的发展趋势。

## 第 2 章 锻造用材料准备

锻前材料准备主要包含两项内容：一是选择材料；二是按锻件大小切成一定长度的毛坯。在锻造生产过程中，锻造用的金属材料主要包括碳素钢、合金钢、高温合金、有色金属及其合金等，按加工状态可分为铸锭、轧材、挤压棒材和锻坯等。中小型锻件常使用轧制材料、锻制材料，大型自由锻件和某些合金钢的原材料一般直接用锭料锻制。

模锻件的质量除与原材料有关外，还与锻造工艺有关。因此，为便于进行锻件质量分析，首先应对所加工的坯料有所了解。

### 2.1 锻造用原材料

#### 2.1.1 钢锭的结构及缺陷

钢锭常常作为大、中型自由锻件的原材料，根据其截面形状可分为圆钢锭、方钢锭、八角钢锭等品种；根据钢锭的总质量（单位：吨）的不同可分为不同的钢锭，其品种及规格由各生产厂自行定制。钢锭内部组织结构取决于浇注时钢液在锭模内的结晶条件，即结晶热力学和动力学条件。钢液在钢锭内各处的冷却与传热条件很不均匀，钢液由模壁向锭心、由底部向冒口逐渐冷凝选择结晶，从而造成钢锭的结晶组织、化学成分及夹杂物分布不均。由图 2-1 可知，钢锭表层为细小等轴结晶区（也称激冷区），厚度一般仅为 6~8mm，因过冷度较大，凝固速度快，无偏析，但伴有夹杂、气孔等缺陷。位于激冷区内侧为柱状结晶区，由径向呈细长的柱晶粒组成，其凝固速度较快，偏析较轻，夹杂物较少，厚度为 50~120mm。再往里为倾斜树枝状结晶区，该区温差较小，固液两相区大，合金元素及杂质浓度较大，心部为粗大等轴结晶区。由于选择结晶的缘故，心部上端聚集着轻质夹杂物和气体，并形成巨大的收缩孔，其周围还产生严重疏松。心部底端为沉积区，含有密度较大的夹杂物。因此，钢锭的内部缺陷主要集中在冒口、底部及中心部分，其中冒口和底部作为废料应予切除；如果切除不彻底，就会遗留在锻件内部而使锻件成为废品。钢锭底部和冒口占钢锭质量的 5%~7% 和 18%~25%。对于合金钢，切除的冒口占钢锭的 25%~30%，底部占 7%~10%。

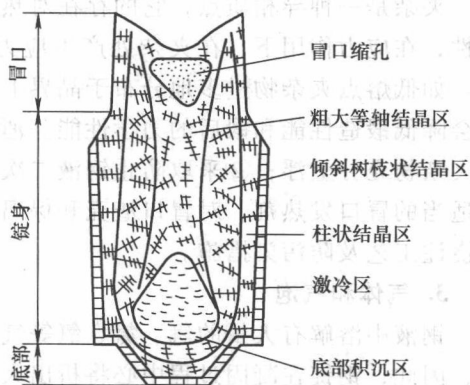


图 2-1 钢锭纵剖面组织结构图

由于冶金方面物理化学的规律性，钢锭中存在的常见缺陷有偏析、夹杂、气体、气泡、



缩孔、疏松、裂纹和溅疤等。它们的性质、特征及其分布情况对锻造工艺和锻件质量都有影响。这些缺陷的形成与冶炼、浇注和结晶过程密切相关,虽然由于冶金技术的完善,钢锭的纯净度有了显著提高,但是空洞和疏松一类缺陷仍是无法避免的。锻造的锻件越大,使用的原材料钢锭越大,其组织中的缺陷越严重,这往往是造成大型锻件报废的主要原因。为此,应当了解钢锭内部缺陷的性质、特征和分布规律,以便在锻造时选择合适的钢锭,制订合理的锻造工艺规范,并在锻造过程中消除内部缺陷和改善锻件的内部质量。下面对上述常见缺陷加以说明。

### 1. 偏析

偏析是钢锭在凝固过程中产生的化学成分以及杂质的分布不均匀现象,包括枝晶偏析(指钢锭在晶体范围内化学成分的不均匀性)和区域偏析(指钢锭在宏观范围内的不均匀性)等。偏析是由于选择性结晶、溶解度变化、密度差异和流速不同造成的。不同元素于不同温度下在固液两相中的溶解度不同,由不同温度梯度形成的结晶差别,凝固过程中的收缩及各种化学反应过程等都将引起偏析,即成分在宏观、微观区域的分布不均匀,偏析会造成力学性能不均和裂纹缺陷。目前减轻偏析的措施有:①改进熔炼技术,尽量降低P、S含量;②采用VCD技术及真空浇注技术;③改进锭模形状,控制凝固条件;④加冒口发热剂或用电渣加热冒口。钢锭中的枝晶偏析现象可以通过锻造、再结晶、高温扩散和锻后热处理得到消除,而区域偏析很难通过热处理方法消除,只有通过反复锻-拔变形工艺才能使其化学成分趋于均匀化。

### 2. 夹杂

不溶解于金属基体的非金属化合物叫做非金属夹杂物,简称夹杂。常见的非金属夹杂有硫化物、氧化物、硅酸盐等。夹杂分内在夹杂和外来夹杂两类:内在夹杂是指冶炼和浇注时的化学反应产物;外来夹杂是冶炼和浇注过程中由外界带入的砂子、耐火材料及炉渣碎粒等杂质。

夹杂是一种异相质点,它的存在对热锻过程和锻件质量均有不良影响,它破坏金属的连续性,在应力作用下,在夹杂处产生应力集中会引起显微裂纹,成为锻件疲劳破坏的疲劳源。如低熔点夹杂物过多地分布于晶界上,在锻造时会引起热脆现象。由此可见,夹杂的存在会降低锻造性能和锻后的力学性能。消除、改善夹杂的措施有:①将钢包在浇注前静置,使夹杂物充分上浮;②采取防止钢液二次氧化的措施;③改变粉渣的组成和加入方法;④选择适当的冒口发热剂,对冒口渣壳和保温帽予以保护,防止其塌落物落入锭身;⑤采用适当的浇注工艺及防污染措施。

### 3. 气体和气泡

钢液中溶解有大量的氢、氮、氧等气体,由于其在钢液中的溶解度远高于固体钢的溶解度,因此,钢锭在凝固过程中必将析出大量的气体,但总有一些仍然残留在钢锭内部或皮下形成气泡。钢锭内部的气泡只要不是敞开的,或虽敞开但内壁未被氧化,均可以通过锻造锻合,但皮下气泡容易引起裂纹。

在钢锭中常见的残存气体有氧、氮、氢等。其中氧和氮在钢锭里最终以氧化物和氮化物存在,形成钢锭内的夹杂。氢是钢中危害性最大的气体,它在钢中的含量超过一定极限值( $2.25 \times 10^{-2} \sim 5.625 \times 10^{-2} \text{cm}^3/\text{g}$ )时,锻后冷却过程中会在锻件内部产生白点和氢脆缺陷,使钢的塑性显著下降。