

· 普通高等教育“专业综合改革试点”规划教材 ·
PUTONG GAODENG JIAOYU “ZHUANYE ZONGHE GAIGE SHIDIAN” GUIHUA JIAOCAI

锻压工艺学

■ DUANYA GONGYI XUE ■

张永军 韩静涛 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

普通高等教育“专业综合改革试点”规划教材

锻 压 工 艺 学

张永军 韩静涛 主编

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

本书共分为两篇：第一篇为锻造工艺，主要包括金属体积成型的自由锻和模锻等锻造工艺；第二篇为冲压工艺，主要包括板料金属的冲裁、弯曲、拉深、胀形和翻边等冲压工艺。对各种锻压方法的介绍，均着重于成型原理、特点、适用范围及其工艺参数计算、设备吨位与工、模具结构形式等内容叙述。

本书可作为高等学校材料成型与控制工程专业及其相关专业的教材，也可供从事该专业的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

锻压工艺学/张永军, 韩静涛主编. —北京: 冶金工业出版社, 2015. 6

普通高等教育“专业综合改革试点”规划教材
ISBN 978-7-5024-6910-8

I. ①锻… II. ①张… ②韩… III. ①锻压—高等学校—教材 IV. ①TG31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 123613 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbcs@cnmp.com.cn

责任编辑 李培禄 李 臻 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6910-8

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2015 年 6 月第 1 版, 2015 年 6 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 15.5 印张; 376 千字; 236 页

39.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

锻压是锻造与冲压的总称，是机械制造业的基础工艺之一，是（利用锻压机械的锤头、砧块、冲头或通过模具）对坯料施加外力，使其产生塑性变形，改变尺寸、形状及改善性能，用以制造机械零件、工件或毛坯的成型加工方法。根据原材料供应形式不同，以锭料或棒料为原料时称为锻造，以板料为原材料时称为冲压，一般冲压是在常温下进行的。

锻压在国民经济中占有举足轻重的地位。机械、冶金、电子、船舶、航空、航天、兵器以及其他许多工业部门的发展都离不开锻压生产的密切配合，锻压生产能力及其工艺水平已成为衡量一个国家工业水平的重要标志，对一个国家的工业、农业、国防和科学技术所能达到的水平具有很大的影响。

锻压工艺学是研究如何利用各种锻造与冲压方法有效地生产半成品或零件的一门技术，是涉及成型原理、方法和质量控制的技术科学，是材料成型与控制工程专业的主要专业课程之一。编者结合专业教学情况对教材内容进行了编排，其中，锻造工艺以自由锻和模锻为主要内容；冲压工艺以冲裁、弯曲、拉深、胀形和翻边为主要内容。教材主要围绕着锻压工艺（锻造工艺和冲压工艺）方法、特点及其工艺过程，制订工艺规程和设计锻模、冲模等工艺装备的原则、步骤和方法，以及锻件质量等方面进行选材与编写。

本教材的编写得到了北京科技大学教材建设经费的资助，同时，也得到了冶金工业出版社的大力支持，谨此一并表示感谢！

由于编者编写水平所限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2015年6月

目 录

第一篇 锻造工艺

1 锻造工艺绪论	3
1.1 锻造工艺的特点	3
1.2 锻造生产的分类及工艺流程	4
1.2.1 锻造生产的分类	4
1.2.2 锻造生产的工艺流程	4
1.3 锻造用原材料与下料方法	5
1.3.1 锻造用原材料	5
1.3.2 下料方法	6
复习思考题	8
2 锻造加热及加热制度	9
2.1 加热目的及方法	9
2.1.1 加热目的	9
2.1.2 加热方法	9
2.2 加热过程中的常见缺陷	11
2.2.1 氧化	11
2.2.2 脱碳	13
2.2.3 过热	13
2.2.4 过烧	14
2.2.5 裂纹	14
2.3 锻造温度范围	15
2.3.1 始锻温度	15
2.3.2 终锻温度	16
2.4 锻造加热制度	17
2.4.1 装炉温度	18
2.4.2 加热速度	19
2.4.3 保温时间	19
2.4.4 加热时间	20
复习思考题	22

3 自由锻工艺	23
3.1 自由锻件的分类	23
3.1.1 饼块类锻件	23
3.1.2 空心类锻件	24
3.1.3 轴杆类锻件	24
3.1.4 曲轴类锻件	24
3.1.5 弯曲类锻件	24
3.1.6 复杂形状类锻件	25
3.2 自由锻工序	25
3.2.1 基本工序	25
3.2.2 辅助工序	32
3.2.3 修整工序	33
3.3 自由锻工艺流程	33
3.3.1 自由锻件图	33
3.3.2 坯料质量和尺寸	35
3.3.3 变形工艺过程	36
3.3.4 锻造比	38
3.3.5 自由锻造设备吨位	39
3.3.6 自由锻工艺流程卡片	40
3.4 大型锻件的锻造	41
3.4.1 大型锻件锻造的工艺特点	41
3.4.2 锻造对钢锭组织和性能的影响	41
3.4.3 提高大型锻件质量的工艺措施	43
复习思考题	46
4 模锻工艺	47
4.1 锤上模锻	48
4.1.1 锤上模锻的工艺特点	48
4.1.2 锤上模锻件的分类	49
4.1.3 模锻件图的设计	50
4.1.4 锤上模锻工序	54
4.1.5 锤上模锻坯料尺寸	60
4.1.6 模锻锤吨位	61
4.1.7 锤上模锻工步及其模膛	61
4.1.8 锤上制坯工步及其模膛	66
4.1.9 锤锻模结构	74
4.2 热模锻压力机上模锻	81
4.2.1 热模锻压力机上模锻的工艺特点	81
4.2.2 热模锻压力机上模锻件的分类	81

4.2.3	热模锻压力机上的模锻件图	82
4.2.4	热模锻压力机上的变形工步及工步图	83
4.2.5	热模锻压力机上模锻时的坯料尺寸	86
4.2.6	热模锻压力机吨位的选择	87
4.2.7	热模锻压力机上锻模的结构形式	87
4.3	摩擦压力机上模锻	91
4.3.1	摩擦压力机上模锻的工艺特点	91
4.3.2	摩擦压力机上模锻件的分类	92
4.3.3	摩擦压力机上的模锻件图	93
4.3.4	摩擦压力机上的模锻工艺	95
4.3.5	摩擦压力机吨位的选择	97
4.3.6	摩擦压力机上锻模的结构形式	98
4.4	平锻机上模锻	101
4.4.1	平锻机上模锻的工艺特点	101
4.4.2	平锻机上模锻件的分类	102
4.4.3	平锻机上的模锻件图	103
4.4.4	平锻机上的模锻工艺	105
4.4.5	平锻机吨位的选择	109
4.4.6	平锻机上模锻的锻模结构形式(平锻模)	110
4.5	切边与冲孔	115
4.5.1	切边与冲孔的方法	115
4.5.2	切边模	116
4.5.3	冲孔模	119
4.5.4	切边冲孔复合模	120
4.5.5	切边力和冲孔力	121
4.6	校正	121
4.6.1	校正类型	122
4.6.2	校正模	122
	复习思考题	124
5	锻后冷却与热处理	125
5.1	锻后冷却	125
5.1.1	锻件在冷却过程中的内应力	125
5.1.2	锻后冷却过程中的常见缺陷	126
5.1.3	锻后冷却方法及冷却制度	128
5.2	锻件热处理	129
5.2.1	中、小锻件的热处理	130
5.2.2	大型锻件的热处理	130
	复习思考题	132

第二篇 冲压工艺

6 冲压工艺绪论	135
6.1 冲压工艺特点	135
6.2 冲压工艺分类	136
6.2.1 按变形性质分类	136
6.2.2 按基本变形方式分类	138
6.2.3 按工序组合形式分类	138
6.3 冲压工艺用材料	138
6.3.1 冲压对材料的基本要求	138
6.3.2 常用冲压材料及其力学性能	139
复习思考题	140
7 冲裁工艺	141
7.1 冲裁过程及冲裁件断面特征	141
7.1.1 冲裁过程	141
7.1.2 冲裁件断面特征	142
7.2 冲裁间隙	143
7.2.1 间隙对冲裁件质量的影响	143
7.2.2 间隙对冲裁力的影响	145
7.2.3 间隙对模具寿命的影响	145
7.2.4 冲裁间隙值的确定	146
7.3 凸模与凹模刃口尺寸的计算	148
7.3.1 刃口尺寸计算的基本原则	148
7.3.2 刃口尺寸的计算方法	148
7.4 冲裁工艺力	150
7.4.1 冲裁力	151
7.4.2 卸料力、推件力与顶件力	151
7.4.3 压力机公称压力的选取	152
7.5 排样设计	152
7.5.1 材料的利用率	152
7.5.2 排样方法	153
7.5.3 搭边	153
7.5.4 条料宽度	154
7.5.5 排样图	155
7.6 冲裁件的工艺性	155

7.6.1	冲裁件的形状和尺寸	155
7.6.2	冲裁件的尺寸精度和表面粗糙度	156
7.6.3	冲裁件的尺寸标注	157
7.7	冲裁模	157
7.7.1	冲裁模分类	157
7.7.2	冲裁模的组成	157
7.7.3	冲裁模的典型结构	158
	复习思考题	164
8	弯曲工艺	165
8.1	板料的弯曲变形	165
8.1.1	弯曲变形过程	165
8.1.2	弯曲过程中出现的现象	166
8.1.3	板料弯曲时的应力和应变状态	168
8.2	弯曲回弹	169
8.2.1	影响回弹的主要因素	170
8.2.2	回弹值的确定	170
8.2.3	减少回弹值的措施	171
8.3	最小相对弯曲半径	172
8.3.1	最小相对弯曲半径的概念	172
8.3.2	影响最小相对弯曲半径 r_{\min}/t 的因素	173
8.3.3	最小相对弯曲半径 r_{\min}/t 的数值	174
8.4	弯曲件的坯料尺寸	175
8.4.1	弯曲中性层的位置	175
8.4.2	弯曲件坯料尺寸的计算	175
8.5	弯曲力	176
8.5.1	自由弯曲时的弯曲力	176
8.5.2	校正弯曲时的弯曲力	177
8.6	弯曲件的工艺性	178
8.6.1	弯曲件的形状和尺寸	178
8.6.2	弯曲件的精度	180
8.6.3	弯曲件的尺寸标注	181
8.7	弯曲件的工序安排	181
8.7.1	弯曲件工序安排的原则	181
8.7.2	典型弯曲件的工序安排	181
8.8	弯曲模	182
8.8.1	V形件弯曲模	182
8.8.2	L形件弯曲模	183
8.8.3	U形件弯曲模	183

8.8.4	Z形件弯曲模	184
8.8.5	Π形件弯曲模	185
8.8.6	圆形件弯曲模	186
8.9	弯曲模工作部分尺寸的设计	187
8.9.1	凸模圆角半径	187
8.9.2	凹模圆角半径	187
8.9.3	凸、凹模间隙	187
8.9.4	凹模深度	188
8.9.5	凸、凹模的宽度尺寸	188
	复习思考题	189
9	拉深工艺	190
9.1	圆筒形件拉深的变形分析	191
9.1.1	圆筒形件的拉深变形过程	191
9.1.2	圆筒形件拉深时的应力应变状态	192
9.1.3	圆筒形件拉深过程中出现的现象	192
9.2	圆筒形件拉深工艺	197
9.2.1	圆筒形件拉深的坯料尺寸	197
9.2.2	圆筒形件的拉深系数	198
9.2.3	拉深力与压力机公称压力	201
9.2.4	拉深功	202
9.2.5	拉深模工作部分的尺寸	203
9.3	其他形状零件的拉深	205
9.3.1	带凸缘圆筒形件的拉深	205
9.3.2	阶梯圆筒形件的拉深	207
9.3.3	锥形件的拉深	208
9.3.4	球形件的拉深	209
9.3.5	抛物面件的拉深	210
9.3.6	盒形件的拉深	211
9.4	其他拉深方法	213
9.4.1	变薄拉深	213
9.4.2	带料连续拉深	214
9.4.3	反拉深	216
9.5	拉深件的工艺性	216
9.5.1	拉深件的形状和尺寸	216
9.5.2	拉深件的尺寸精度	217
9.5.3	拉深件的尺寸标注	218
9.6	拉深模	218
9.6.1	首次拉深模	218

9.6.2 以后各次拉深模	220
复习思考题	221
10 胀形与翻边	222
10.1 胀形	222
10.1.1 胀形变形特点	222
10.1.2 胀形极限变形程度	223
10.1.3 胀形方法	223
10.2 翻边	229
10.2.1 圆孔翻边	229
10.2.2 外缘翻边	234
复习思考题	235
参考文献	236

第一篇 锻造工艺

- 1 锻造工艺绪论
- 2 锻造加热及加热制度
- 3 自由锻工艺
- 4 模锻工艺
- 5 锻后冷却与热处理

1 锻造工艺绪论

本章要点：锻造工艺具有上千年的发展史，如今正朝着少或无切削、机械化、自动化等更高的方向发展，在工业生产中发挥着重要作用。本章概要介绍了有关锻造的基本概念及其工艺特点、分类、生产工艺流程；同时对锻造生产用的原材料与下料方法进行了说明。

锻造是在外力作用下，利用工具或模具使金属坯料产生塑性变形，以获得一定形状、尺寸和内部组织的锻件的一种材料加工方法。机械、冶金、船舶、航空、航天、兵器以及其他许多工业部门的发展都离不开锻造生产的密切配合，锻造生产能力及其工艺水平，对一个国家的工业、农业、国防和科学技术所能达到的水平具有很大的影响。

1.1 锻造工艺的特点

锻造生产是机械制造工业中提供机械零件毛坯（或直接制造机械零件）的主要加工方法之一。对受力大、要求高的重要机械零件，大多采用锻造生产方法制造。其主要原因取决于锻造的工艺特点：

- (1) 坯料通过锻造变形，其组织得到改善，力学性能和物理性能得到提高。
- (2) 根据零件的受力情况和破坏情况，通过锻造变形可以正确控制流线在锻件上的分布状况，使其对锻件的使用性能产生良好的影响（从而进一步提高零件的使用寿命）。
- (3) 锻件形状既可简单，也可复杂，尺寸精度高，表面粗糙度低，尤其是模锻或精密锻造。
- (4) 锻造变形是通过将金属坯料的体积重新分配来获得所需的形状和尺寸，切削时其所留机械加工余量小，材料利用率较高。
- (5) 锻造过程操作简单，生产率高，尤其是专业化生产线的生产率更高。
- (6) 在大量生产条件下，尤其是模锻生产时，锻件成本较低。

综上所述，锻造生产不仅可以有效改善金属组织、控制流线分布、提高力学和物理性能、获得高质量锻件，而且还具有生产效率和材料利用率较高以及锻件成本低的优点。但是，锻造生产也存在设备投资较大，生产准备周期，尤其是锻模制造周期较长，而且锻模成本较高，且使用寿命较低等缺点。随着锻压技术的进步，这些缺点正在被不断克服。如有限元法在工艺设计中的应用，利用该方法可以对锻造成型过程进行应力应变分析和计算机模拟，预测某一工艺方案对锻件成型的可能性和将会发生的问题，这样不仅可以节省昂

贵的模具试验费用，而且可以缩短新产品的试制周期。另外，CAD/CAM 技术的应用，使锻模的设计与制造周期大为缩短；新型模具材料及润滑剂的研究与应用，使锻模使用寿命显著提高，等等。

对于机器或机械上的金属零件，其典型生产过程是：冶炼、制坯、切削加工、热处理。其中，制坯是为切削加工提供坯料。对很多零件来说，用锻造方法生产坯料是一种具有较高技术经济性的制坯方法，特别是对性能要求高、形状较复杂的零件，其优越性更为突出。不仅如此，随着精密锻造技术的应用和发展，其加工精度和表面粗糙度已达到了切削（如车加工、铣加工甚至磨加工）的水平，实现了少或无切削加工，其产品不需机械加工便可直接装机使用。这不仅节约了大量原材料，而且零件性能得到了较大提高。这说明，锻造行业不仅能提供坯料，而且已能直接提供零件。因此，锻造工艺得到了越来越广泛的应用。目前，飞机上锻件的重量占 85%；坦克上锻件的重量占 70%；汽车上锻压件重量占 80%；机车上锻压件重量占 60%；兵器上大部分零件都是经锻造制成的。

1.2 锻造生产的分类及工艺流程

1.2.1 锻造生产的分类

锻造生产一般按外力的来源、工具和变形温度进行分类。

(1) 按坯料所受作用力的来源分类：根据工作时所受作用力的来源，锻造生产可分为手工锻造和机器锻造两种。手工锻造（简称手锻）是用手锻工具依靠人力在铁砧上进行的。这种生产方式已有数千年历史，目前多用于零活、修理，以及初学者对基本操作技能的训练。机器锻造（简称机锻）是现代锻造生产的主要方式，在各种锻造设备上进行。

(2) 按所用设备和工具分类：根据所用设备和工具的不同，锻造生产可分成自由锻、模型锻造（又称模锻）、胎模锻造（又称胎模锻）、特种锻造四类。

自由锻是只用简单的通用性工具，或在锻造设备的上、下砧间直接使坯料变形而获得所需的几何形状及内部质量的方法。模锻是利用模具使坯料变形而获得锻件的锻造方法。胎模锻是在自由锻设备上使用可移动模具生产模锻件的一种锻造方法，胎模不固定在锤头或砧座上，只是在用时才放上去。特种锻造是采用专用模锻设备及专用模具与工装，实现某一特定的锻造工艺，因此，也称为专用锻造工艺。在相关工厂和车间，通常通过建立专业化特种锻造生产线，实现某种锻件的大批量生产，如辊锻、楔横轧、摆动辗压等。

(3) 按锻造变形温度分类：根据金属变形时的温度，锻造生产可分为热锻、温锻及冷锻。

热锻是在金属再结晶温度以上进行的锻造工艺；冷锻是在室温下进行的锻造工艺；温锻是在高于室温和低于再结晶温度范围内进行的锻造工艺。

1.2.2 锻造生产的工艺流程

锻造工艺流程是指生产一个锻件所经过的锻造生产过程。以模锻为例（图 1-1），其工艺流程是：备料→加热→模锻（可能在一台设备上完成，也可能依次在几台设备上完成）→切边、冲孔→热处理→酸洗、清理→校正→检查→入库。

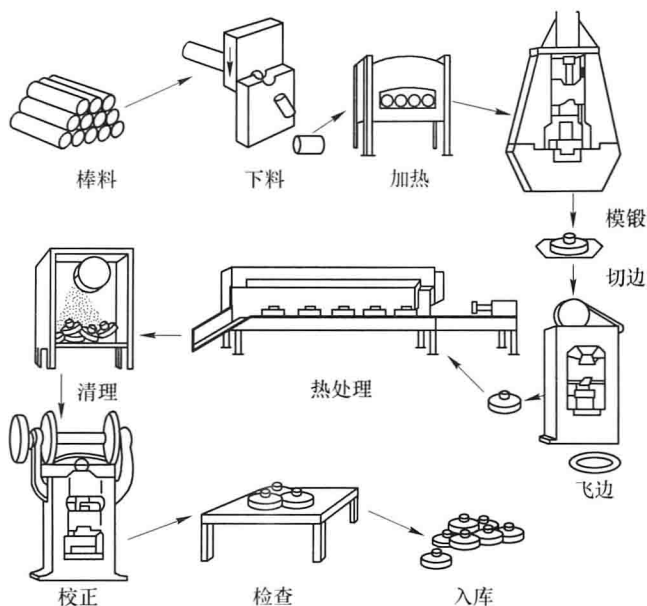


图 1-1 锻造工艺流程（模锻件的热模锻生产过程）

锻件的形状、尺寸、技术要求和批量大小等因素决定了锻件的锻造生产过程的选择。通常，单件、小批量生产采用自由锻方法，而批量大时，则采用模锻方法生产。但有些航空等重要产品上的锻件，虽然批量不大，但由于流线和性能等方面的要求，以及工艺的一致性，通常也采用模锻方法生产。大型锻件，由于受设备吨位的限制等原因，通常采用自由锻方法生产。

1.3 锻造用原材料与下料方法

1.3.1 锻造用原材料

用于锻造的原材料应具有良好的塑性，以便锻造时产生较大的塑性变形而不致被破坏。碳钢、合金钢、有色金属及其合金等金属材料在一定条件下具有良好的塑性，可以对其进行锻造成型。大型锻件和某些合金钢锻件主要用钢锭锻制，中小型锻件一般采用轧制、挤压或锻造等方法生产的型材。

1.3.1.1 锻造用钢锭

锻造用钢锭一般均为镇静钢锭，由冒口、锭身和底部（又称水口）所组成，其锭身侧面具有一定锥度，锭身的横断面为多角形。锻造用钢锭的类型主要有两种：

一种是普通型钢锭，其高径比为 2~3，锥度为 4%~7%，锭身横断面形状多为八角形，可上浇铸也可下浇铸。

另一种是短粗型钢锭，高径比为 1.0~1.5，锥度为 8%~12%，横断面为多角形，棱角数常见的有 12、16、24。该锭型有利于夹杂物上浮和气体逸出，减少偏析，改善内部质量，常用于锻造合金钢等重要的大锻件。

图 1-2 为钢锭纵剖面的组织结构示意图，按结晶组织特征不同可将其划分为细晶粒

层（亦称激冷层）、柱状晶区、倾斜柱状晶区、粗大等轴晶区、沉积堆和冒口区。

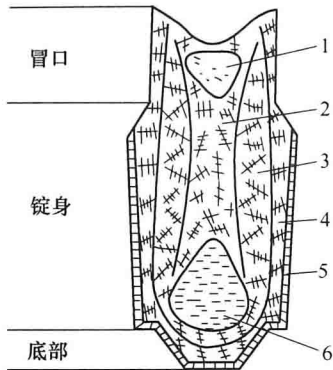


图 1-2 钢锭纵剖面的组织结构示意图

1—缩孔（冒口）；2—粗大等轴晶区；

3—倾斜柱状晶区；4—柱状晶区；

5—细晶粒层（激冷层）；6—沉积堆（底部水口）

心部结晶时钢液补缩较差，前期结晶将低熔点成分挤到中心，而使钢液心部形成较多的疏松和杂质。

(5) 沉积堆：在上述钢液从表层向中心结晶的过程中，由于固-液相界面最初形成的一些晶体下沉，在其下沉过程中，还会碰断树枝晶晶枝，而使其一起下落，于是在钢锭的底部逐渐堆成一个沉积堆，此处的组织疏松，氧化物夹杂也多。

(6) 冒口区：冒口区有保温帽的作用，它是钢液的最后凝固结晶处。因此，当该区凝固收缩时，得不到钢液的补充，会在其中部形成一个大缩孔，而在缩孔周围存在大量疏松。此外，在冒口区还聚集了大量低熔点、轻质夹杂物（如硫化物、磷化物）和气体等。

由此可见，钢锭的内部缺陷主要集中在冒口、底部及中心部分。因此，在锻造时，应锻透心部，切除冒口与底部。

1.3.1.2 锻造用型材

中小型自由锻件一般用圆形或方形截面的型材生产，模锻件除常用这两种轧材外，有时还采用周期轧制型材，如图 1-3 所示。一般而言，型材是由铸锭经过轧制、挤压或锻造加工等方法进行生产，由于经过塑性变形，其组织结构得到改善，变形越充分，铸造缺陷越少，材料的质量和性能越好。

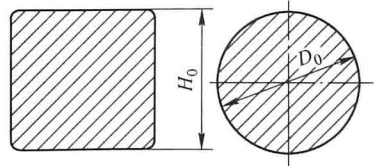


图 1-3 锻造用型材

1.3.2 下料方法

下料是在锻前将原材料切成所需长度或所需几何尺寸的工序。当以铸锭为原材料时，通常用自由锻方法进行开坯，然后在锻压设备上热剁或使用火焰切割将锭料的冒口端和水口端切除，并按一定尺寸将坯料分割开来。当以型材为原料时，其下料工作一般是在锻工车间下料工段的专门下料设备上进行，常用的下料方法有剪切法、锯切法、砂轮片切割