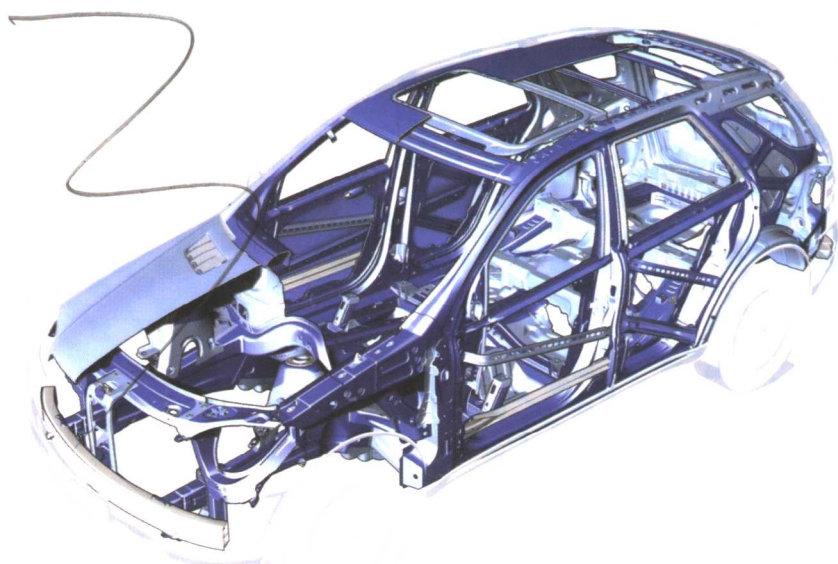




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

金属塑性成形工艺 及模具设计

华中科技大学 夏巨谔 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TG3/22

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

金属塑性成形工艺及模具设计

主编 夏巨谔
参编 王新云 陈志明
主审 华 林 姜奎华

机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，共分两篇：第一篇为体积金属塑性成形工艺及模具设计，系统地讲述了锻前与锻后辅助工序，开式模锻、闭式模锻、精密模锻、特种锻造及挤压成形的特点、工艺参数计算与模具结构设计，以及相应的体积金属成形新工艺；第二篇为板料金属塑性成形工艺及模具设计，系统地讲述了板料金属冲压成形理论、基本的冲压成形工艺、冲压模具设计、覆盖件冲压成形工艺及模具设计特点、板料金属加工新工艺和管料的冲压与液压成形。

本书可供高等院校材料成形及控制工程专业的学生使用，也可供机类专业学生和从事塑性加工生产与研究开发工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属塑性成形工艺及模具设计/夏巨谌主编. —北京: 机械工业出版社, 2007.11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 22824 - 0

I. 金… II. 夏… III. ①金属-塑性变形-金属加工-工艺-高等学校-教材②金属压力加工-模具-设计-高等学校-教材 IV.TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177659 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 董连仁 版式设计: 张世琴 责任校对: 樊钟英

封面设计: 王伟光 责任印制: 洪汉军

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm 1/16·21印张·515千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 22824 - 0

定价: 31.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379715

封面无防伪标均为盗版

前 言

金属塑性成形工艺及模具设计,是先进制造技术的一个重要领域,它在汽车、铁路机车、船舶、拖拉机、航空航天、军工、家用电器、仪器仪表和轻工等产品的零部件制造业中应用量大面广。因此,在制造业领域内,对这方面的技术和人才的需求迫切且量大。

本书已入选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。它是在参考有关模锻、挤压、冲压及管材塑性成形工艺及模具设计方面的教材与专著的基础上,并借鉴国内外相关文献以及作者的科研成果与教学经验编撰而成,力争编写成一本精品教材。

本书的编写思路及特色为:以工艺为主线,工艺与模具设计并重;着重于工艺分析、工艺参数计算和模具设计方法的论述;以传统工艺和模具设计为基础,兼顾新工艺和新模具的导向;对于诸多的塑性成形工艺及模具,做到精选内容,写透一至二种,其余仅介绍工艺原理、特点及适用范围,举一反三;每种成形工艺及模具设计,都较为详细地介绍了应用实例。

总之,力求体现既要培养学生具有较宽的专业知识面,又要有利于培养学生分析解决实际工艺及模具问题和开拓创新能力。

全书由体积金属塑性成形工艺及模具设计和板料金属塑性成形工艺及模具设计两篇组成。第一篇系统地讲述锻前与锻后辅助工序,开式模锻、闭式模锻、精密模锻、特种锻造及挤压成形过程的特点、工艺参数计算与模具结构设计和相应的体积金属成形新工艺;第二篇为板料金属塑性成形工艺及模具设计,系统地讲述了板料金属冲压成形理论,基本的冲压成形工艺、冲压模具设计、覆盖件冲压成形工艺及模具设计特点、板料金属加工新工艺和管料的冲压与液压成形工艺。

本书由华中科技大学夏巨谌担任主编,具体参加编写的有:夏巨谌(第一、二、三、四、五、六章),王新云、陈志明、夏巨谌(第七、八、九、十、十一、十二章)。本书由武汉理工大学华林、姜奎华两位教授主审。

鉴于作者水平所限,书中难免有不当之处,诚请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一篇 体积金属塑性成形工艺及模具设计

第一章 概述	1	第七节 闭式模锻工艺与模具应用实例	99
第一节 下料	4	复习与思考题	107
第二节 毛坯加热方法	6	第四章 精密模锻工艺及模具设计	
第三节 锻件的冷却和热处理	9	要点	108
第四节 模锻时的润滑	11	第一节 精密模锻的特点及应用	108
复习与思考题	12	第二节 影响锻件尺寸精度的主要因素及其 控制方法	108
第二章 开式模锻工艺及模具 设计	13	第三节 模具设计要点	113
第一节 模锻件的分类及表示锻件复杂 程度的参数	13	第四节 应用实例	115
第二节 锻件图设计	17	复习与思考题	121
第三节 终锻模膛设计	26	第五章 特种锻造工艺及模具 设计	122
第四节 预锻模膛设计	28	第一节 辊锻	122
第五节 制坯工步的选择及制坯 模膛设计	31	第二节 楔横轧	127
第六节 锤上锻模结构设计	41	第三节 摆动辗压	130
第七节 螺旋压力机上模锻工艺及锻模 设计特点	54	第四节 等温锻造	134
第八节 热模锻压力机模锻工艺及锻模 设计特点	61	第五节 电热墩粗 (电墩)	136
第九节 切边模与冲孔模设计	74	第六节 粉末金属锻造	137
复习与思考题	80	复习与思考题	140
第三章 闭式模锻工艺及模具设计	82	第六章 挤压工艺及模具设计	142
第一节 闭式模锻的特点及应用	82	第一节 概述	142
第二节 闭式模锻件的分类及成形 工步选择	84	第二节 挤压成形金属流动规律及成形 力的计算	143
第三节 闭式模锻成形过程分析	86	第三节 冷挤压工艺	149
第四节 闭式模锻成形力的计算	89	第四节 温挤压的特点与应用	154
第五节 闭式模锻工艺的制订	91	第五节 挤压模具设计	155
第六节 闭式模锻模具设计	94	第六节 应用实例	162
		复习与思考题	165

第二篇 板料金属塑性成形工艺及模具设计

第七章 概述	166	第十章 覆盖件冲压成形工艺及模具设计特点	280
第一节 冲压成形的基本理论	169	第一节 覆盖件拉深成形工艺特点	280
第二节 板料的冲压成形性能及试验方法	174	第二节 覆盖件拉深模设计特点	284
第三节 常用冲压材料及其性能	176	第三节 覆盖件修边模设计	291
复习与思考题	179	第四节 覆盖件翻边模设计	295
第八章 基本的冲压成形工艺	180	复习与思考题	297
第一节 普通冲裁	180	第十一章 板料金属加工新工艺	298
第二节 精密冲裁	191	第一节 旋压成形	298
第三节 弯曲	195	第二节 电水成形	301
第四节 拉深	203	第三节 电磁成形	301
第五节 翻边	218	第四节 激光冲击成形	302
第六节 局部成形	225	第五节 超塑性成形	303
复习与思考题	227	第六节 液压成形	304
第九章 冲压模具设计	229	复习与思考题	307
第一节 冲裁模设计	229	第十二章 管料的冲压与液压成形	308
第二节 弯曲模设计	246	第一节 缩口	308
第三节 拉深模设计	252	第二节 管壁上的孔翻边	311
第四节 多工位级进模的典型结构及设计要点	262	第三节 翻管	315
第五节 翻孔与翻边模设计	273	第四节 管料的橡胶胀形	318
第六节 冲模设计基础	276	第五节 管料的液压成形	322
复习与思考题	278	复习与思考题	326
		参考文献	327

第一篇

体积金属塑性成形工艺及模具设计

第一章 概 述

本章在概述锻造的作用及地位、锻造生产和特点、工艺分类、工艺方案选择、主要生产工序基础上,对下料、加热、锻件的冷却及锻造时的润滑等锻造成形的辅助工序进行简要介绍。

体积金属塑性成形工艺是,在锻压设备动力作用下,通过工模具使棒料或块状金属毛坯产生塑性流动成形,从而获得所需形状、尺寸并具有一定力学性能的零件成品。

这里把各种体积金属塑性成形工艺统称为锻造成形工艺,简称为锻造。把采用各种体积成形工艺所生产的零件或毛坯零件成品统称为锻件。

一、锻造的作用和地位

锻造生产主要是为汽车、拖拉机、机车车辆、工程及动力机械、机床工具、航空航天与军工等提供关键零部件毛坯或成品零件,例如曲轴、连杆、前梁、半轴、万向节叉、滑动叉、十字轴、等速万向壳体、齿轮、同步器齿环、叶片、蜗轮盘、喷嘴、阀体、管接头等。锻造生产能力及其工艺水平,对一个国家的工业、农业、国防和科学技术的发展水平,影响很大。

世界上锻件生产起源于何时,无从考证。但中国采用锻造工艺生产的历史,从1972年河北藁城县商代遗址出土的兵器考证,距今已有3300余年,经采用现代技术检验,其刃口是采用合金嵌锻而成,这是我国至今发现最早生产的锻件。我国的锻件生产历史虽然悠久,但长期处于手工锻造状态,直到1949年新中国成立之后,我国的锻造工业随机械制造业的发展同步地壮大起来。

我国目前拥有重点锻造企业350余家,其中合资与外资锻造企业约16家。主要锻造设备约30000台,其中,自由锻设备约26500台,模锻设备约3500台。锻件年产量在220万t以上,1997年达到253万t,其中模锻件151万t,占锻件总产量59.6%。1997年以来,每年出口锻件约5000t。2004年,我国锻件年产量480万t,居世界第一。

改革开放以来,随着汽车、摩托车及其他工业的发展,引进了一些先进的锻造生产技术和设备,也自主研制开发了一些新工艺、新设备,建立了一批具有国际先进水平的生产线。如锥齿轮、同步器齿环的冷温锻工艺,汽轮机长叶片的热精锻技术,轴齿轮与凸轮轴楔横轧

技术,曲轴及前梁热模锻生产线,连杆的热模锻生产线(全国约有28条),前梁精辊制坯整体模锻成形生产线(全国近10条)等,使部分锻件生产工艺水平、质量、效益有了较为显著的提高。

我国锻造工业虽然取得了很大的成就和进步,但与工业发达国家相比,依然存在不少差距,这主要表现在:企业数量多,但规模小,尤其是专业化企业少,商品锻件少;设备数量多,但模锻设备所占比例小,且较落后;一般锻造能力过剩,而高精和特种锻造能力不足;计算机技术CAD/CAM/CAE应用不广;专业人才力量薄弱等。

虽然存在这些问题,但发展前景还是非常广阔的,一是汽车工业的发展,为我国锻造工业的进步提供了动力;二是锻件出口前景广阔,尤其是我国加入WTO后,更提供了机遇。按照成形工艺生产的零部件的总量与钢产量之比,精密成形零部件的总量与一般成形工艺生产的零部件总量之比,用来衡量一个国家的锻造(包括铸造)工业的发展水平,我国更存在着极大的发展空间。

二、锻造生产的特点

一般地说,锻造生产具有如下优点:

- 1) 锻件形状较复杂,尺寸精度较高,表面粗糙度较低。
- 2) 锻造的机械加工余量较小,材料利用率较高。
- 3) 可使金属流线分布更为合理,从而进一步提高零件的使用寿命。
- 4) 锻造过程操作简便,生产率高,尤其是专业化生产线的生产率更高。
- 5) 锻件成本较低。

但是锻造也存在缺点:

- 1) 设备投资较大。
- 2) 生产准备周期,尤其是锻模制造周期较长。
- 3) 锻模成本较高,且使用寿命较低。

随着锻压技术的进步,这些缺点正在被不断克服。如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。

三、锻造工艺的分类

锻造工艺通常可分为自由锻、胎模锻、模锻、挤压和专用锻造工艺。

(1) 自由锻 它是利用锻压设备上下砧块和一些简单工具,使坯料在压力下产生塑性变形的一种工艺方法。由于所用的工具简单,通用性强,灵活性大,因此适合单件和小批量生产。自由锻件是由坯料逐步变形而成,工具只与坯料局部接触,故所需设备功率比模锻要小得多。自由锻所用设备主要是自由锻锤和液压机,前者主要用于中小型锻件的生产,后者主要用于大型锻件的生产。

(2) 胎模锻 它是利用自由锻锤、水压和等锻压设备,通过胎模模膛使坯料产生塑性变形而得到所需形状和尺寸锻件毛坯的一种工艺方法。由于胎模锻件是通过胎模的模膛使坯料成形,所得锻件毛坯比较接近于对应的零件形状和尺寸。因而,其材料利用率和生产效率比自由锻高。由于胎模不是固定在锻压设备的砧块或滑块上,而是靠手工抬上抬下,所以只适合于中小锻件的小批量生产。

(3) 模锻 它是在锻压设备动力作用下,通过固定在设备上的锻模模膛迫使坯料产生塑

性流动充满模膛,从而得到所需形状和尺寸的锻件毛坯或成品零件的锻造方法。所得锻件质量与尺寸精度比胎模锻件高,比自由锻锻件更高。模锻是成批大量生产锻件的主要方法。

模锻按是否形成飞边可分为开式模锻(即有飞边模锻)和闭式模锻(即无飞边模锻);若按机加工余量的大小又可分为普通模锻和精密模锻;若按所采用的设备分类,模锻工艺可分为锤类设备模锻、螺旋压力机模锻、热模锻压力机模锻、平锻机模锻、液压机模锻等。

(4) 挤压 按金属流动方向与凸模运动方向的互相关系,可分为正挤、反挤、正反复合挤和径向挤压等。

(5) 专用锻造 按工模具及设备的运动方式和金属的变形特点,可分为辊轧、摆动辗压、液态模锻、径向锻造、曲轴弯曲锻、等温锻造、超塑性模锻、粉末锻造、粉末热等静压和喷射锻造等。

四、锻造工艺方案的选择依据

一个零件可以有多种生产方法,在其中选择一个最好的方案颇为不易。在生产实际中,主要考虑以下一些问题。

(1) 零件在使用中的强度要求 选用零件的制造方法,需考虑零件的强度、复杂程度、表面粗糙度和精度等方面的因素。若强度要求不高,因形状复杂,则用铸造;若形状较简单,强度要求较高,则用锻造。

(2) 锻件的年产量 采用何种锻造方法,取决于锻件的年产量。产量很小,用自由锻;产量较小,用胎模锻;产量较大,用模锻或挤压;产量很大,可用专用模锻或挤压生产线。

(3) 零件的形状、尺寸和技术条件 模锻采用的设备类型主要取决于零件的形状。也就是说,每一类型的锻压设备都有其合适的典型锻件。

1) 模锻锤。适合锻造齿轮、轴类、连杆及形状复杂的弯曲件、叉形件。

2) 机械锻压机。适合锻造齿轮及截面变化不大的长轴类。若在热模锻压力机上配以辊锻机,截面变化很大的长轴件也可锻造。

3) 平锻机。适合锻造带杆的局部锻粗件和带孔的锻件。

4) 挤压压力机。适合杯筒件、杯杆类零件或阶梯轴等零件。

(4) 现场设备条件 尽管某一类型的设备有其合适的典型锻造,但也要依据具体条件而定。

五、锻造工艺的主要生产工序

(1) 下料 将原材料切割成所需尺寸的坯料。

(2) 加热 为了提高金属的塑性,降低变形抗力,便于模锻成形。

(3) 锻造 得到所需锻件的形状和尺寸。

(4) 切向或冲孔 切去飞边或冲掉连皮(闭式模锻时仅需冲孔)。

(5) 热校正或热精压 使锻件形状和尺寸更准确。

(6) 在砂轮上磨毛刺(切边所剩下的毛刺)。

(7) 热处理 为保证合适的硬度和合格的力学性能,常用正火和调质。

(8) 清除氧化皮 为得到表面光洁的锻件,常用喷砂、喷丸、滚筒抛光、酸洗等方法。

(9) 冷校正和冷精压 进一步提高锻件的精度,降低表面粗糙度值。

(10) 检查锻件质量。

第一节 下料

模锻一般用轧材或棒材生产，常用剪床、冲床或锯床下料。

一、剪床下料

剪床下料是一种普遍采用的方法。其特点是效率高，操作简单，断口无金属损耗，模具费用低。

剪切过程如图 1-1 所示，在刀片的作用力下，坯料产生弯曲和拉伸变形，当剪切面上的应力超过材料的抗剪强度时发生断裂。这种下料方法的缺点是，坯料局部被压扁，端面不平整，剪切面常有毛刺和裂缝。

剪切端面质量与刀刃锋利程度、刃口间隙 Δ 大小、支承情况及剪切速度等因素有关。刃口圆钝时，易引起剪切端面不平整；刃口间隙大时，坯料易产生弯曲，造成断面与轴线不垂直；刃口间隙过小时，容易损坏刀刃；若坯料支承不力，易引起断口偏斜；剪切速度快，可获得平整断口，剪切速度慢时，情况则相反。

剪床用剪切模如图 1-2 所示。棒料 2 送进剪床后，由压板 3 压紧，下料长度 L_0 由可调螺杆 5 定位，在上刀片 4 和下刀片 1 的作用下将坯料 6 切断。

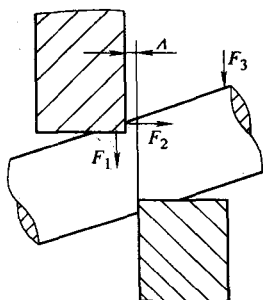


图 1-1 剪切示意图

F_1 —剪切力 F_2 —水平阻力 F_3 —压板阻力

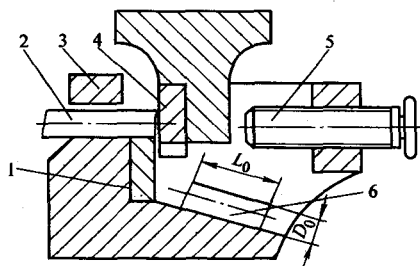


图 1-2 剪床下料模

1—下刀片 2—棒料 3—压板 4—上刀片
5—定位螺杆 6—坯料

在剪床棒料入口的一边附加液压式或机械式径向夹紧装置。装置的下部固定在剪床工作台的外侧，上部固定在剪床滑块相应的外侧。剪切时随滑块向下，夹紧装置首先将棒料沿径向夹紧，随后上下刀刃将棒料剪断。加上附加装置后，前述剪床下料的缺点可得到明显改善，下料质量显著提高。这也属于一种精密下料方法。

剪切下料时所需剪切力 F 按下式计算：

$$F = KA\tau_b \quad (1-1)$$

式中， A 为剪切断面积 (mm^2)； τ_b 为材料抗剪强度 (N/mm^2)，一般取 $\tau_b = (0.7 \sim 0.8) \sigma_b$ (σ_b 为材料的抗拉强度)； K 为考虑刃口磨钝和间隙 Δ 变化的系数，一般 $K = 1.0 \sim 1.2$ 。

高碳钢、合金钢棒料，尤其是大截面的棒料，剪切下料时可通过预热来降低材料的抗剪强度。其预热温度应按化学成分和截面尺寸大小，在 $400 \sim 700^\circ\text{C}$ 范围内选择。

图 1-3 所示为一台棒料剪床和一台两工位热模锻压力机生产线。棒料经感应加热炉加热至蓝脆区温度，加热炉的出口端安置一台带径向夹紧装置的棒料剪床，其上还装有机械式或由计算机控制的挡料装置。剪下的毛坯经过感应加热至始锻温度从出口端经过斜槽，送入压力机第一工位。

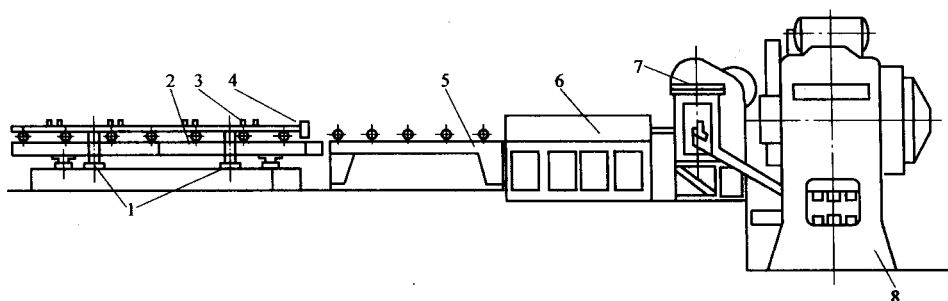


图 1-3 剪切加热和精密模锻生产线

1—称重传感器 2—升降台 3—料架 4—挡块
5—加热炉送料台 6—加热炉 7—剪床 8—热模锻压力机

二、冲床下料

直径 50mm 以下的棒料可用冲床下料。冲床上用的一般剪切模如图 1-4 所示，刀片间隙由上刀片 4 与上刀架 3 之间加垫片调整。挡板 8 在挡料板支架 9 上，用螺栓调整和固定。

冲床上用的全封闭式精密剪切模具如图 1-5 所示。工作时，由上压头 5 推动滑块 4 带

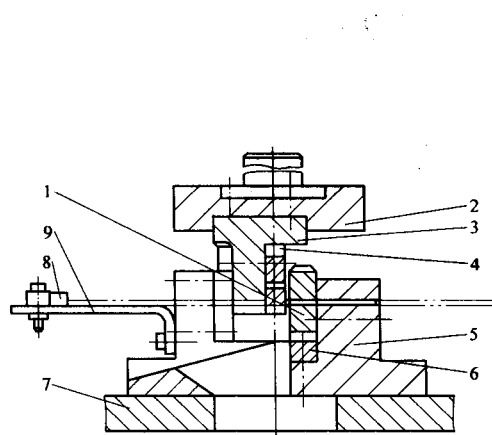


图 1-4 剪切模结构

1—下刀片 2—上模板 3—上刀架 4—上刀片
5—下模座 6—支承板 7—工作台 8—挡板 9—支架

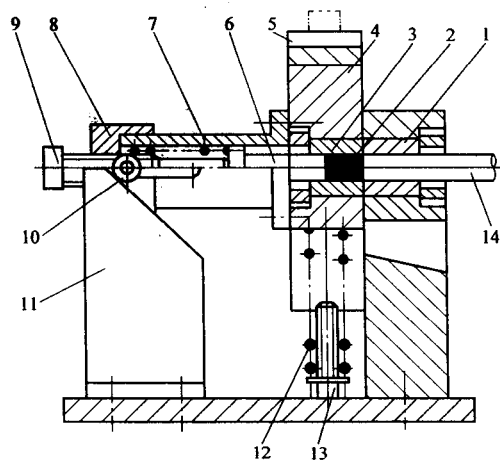


图 1-5 全封闭剪切模

1—固定剪刀 2—毛坯 3—活动剪刀 4—滑块 5—上压头
6—打料销 7、12—弹簧 8—推弹阀 9—定位螺钉
10—滑轮 11—斜块 13—螺钉 14—棒料

动活动剪刀 3 向下运动, 将棒料 14 剪断。固定剪刀 1 与活动剪刀 3 之间的间隙为 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ 。若间隙过大, 将使剪切断面不平整; 过小, 则会影响滑块 4 的复位。固定剪刀 1 与棒料 14 之间的间隙为 0.2mm 。剪口与棒料之间的间隙应在保证送料畅通的前提下尽量取小值。滑块向下运动时, 依靠斜块 11、滑轮 10 将推料弹簧 7 压缩, 待滑块运动至下死点, 则通过打料销 6 将已剪好的毛坯弹出, 滑块依靠弹簧 12 复位, 开始下一次送料。其优点是生产率高, 材料利用率高; 其缺点是毛坯形状欠规则。

三、自动卧式带锯床下料

自动卧式带锯床为近十多年来发展起来的一种精密下料设备, 在日本等工业发达国家的锻造行业应用很广, 我国近年来也在逐步推广。图 1-6 为 GZ4032 型自动卧式带锯床。该机主要特点为: 凸轮控制液压进给恒定; 液压张紧锯条; 锯切速度可无级调整, 其范围为 $18 \sim 120\text{m/min}$; 锯条断裂可自动停车; 自动送料系统可用单程 ($0 \sim 380\text{mm}$) 或多程 (380mm 以上)。当锯切圆料时, 最大直径为 320mm ; 锯切方料时, 最大截面为 $320\text{mm} \times 320\text{mm}$ 。当锯切直径较小的棒料时, 可将数根棒料捆在一起下料, 即一次可锯切数根棒料。使用表明: 采用该机下直径为 50mm 的棒料时, 其锯口缝宽在 1mm 以内, 长度公差可控制在 0.5mm 左右。因此, 这种自动卧式带锯床已成为国内外主要的精密下料设备。

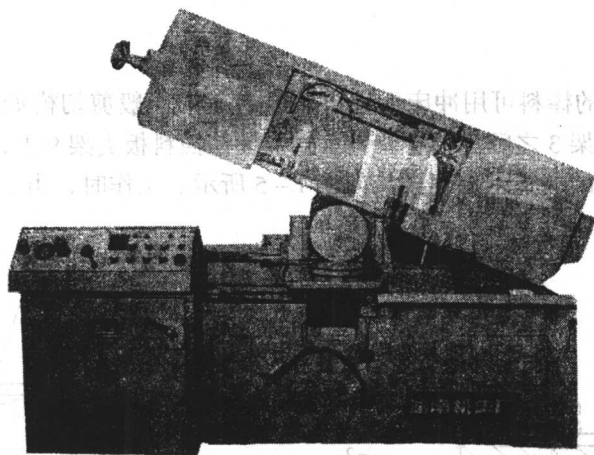


图 1-6 GZ4032 型自动卧式带锯床

第二节 毛坯加热方法

一、锻前加热的目的及方法

在锻造生产中金属毛坯锻前加热的目的是提高金属塑性, 降低变形抗力, 使金属易于流动成形, 是锻造生产过程中的一个极其重要的环节。

1. 燃料 (火焰) 加热

燃料加热是利用固体 (煤、焦炭等)、液体 (重油、柴油等) 或气体 (煤气、天然气等), 在加热炉内燃烧产生高温炉气, 通过炉气对流、炉围辐射和炉底热传导等方式对毛坯

进行加热。在炉温低于 650℃ 时, 金属主要依靠对流传热; 在温度为 650 ~ 1000℃ 或更高时, 金属加热则以辐射方式为主。在普通高温锻造炉中辐射传热量可占到总传热量的 90% 以上。燃料加热炉的通用性强, 建造比较容易, 燃料费用比较低, 所以广为采用。中小型锻件生产多采用油、天然气或煤气作为燃料, 以室式炉、连续炉或转底炉等来加热钢料。对大型毛坯或钢锭, 则常采用油、煤气和天然气作为燃料的转底式炉。燃料加热的缺点是劳动条件差, 炉内气氛、炉温及加热质量较难控制, 容易造成环境污染。

2. 电加热

电加热是将电能转换为热能而对金属毛坯进行加热。电加热具有加热速度快、炉温控制准确、加热质量好、工件氧化少、劳动条件好、易于实现自动化操作等优点; 但设备投资较大, 加热成本较高。随着我国发电量持续快速增长, 加上环保的需要, 在锻造生产中采用电能加热方式也在快速增长。按电能转换为热能的方式可分为电阻加热和感应加热。

感应加热是主要电加热方式, 即在感应器内通入交变电流产生的交变磁场作用下, 置于交变磁场中的金属毛坯内部产生交变涡流, 由于金属电阻引起的涡流发热和磁滞损失发热, 使毛坯得到加热 (图 1-7)。由于感应加热时的集肤效应, 金属毛坯表层的电流密度大, 中心电流密度小。电流密度大的表层厚度, 即电流透入深度 δ (cm) 为

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

式中, f 是电流频率 (Hz); μ 是相对磁导率, 各类钢在 760℃ (居里点) 以上时 $\mu = 1$; ρ 是电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)。

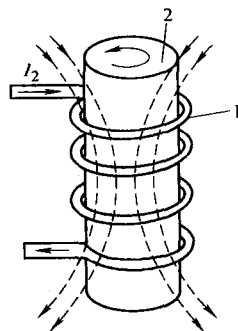


图 1-7 感应电加热的基本原理
1—感应器 2—毛坯

由于集肤效应, 感应加热时热量主要产生于毛坯表层, 并向毛坯心部传导。为了提高大直径毛坯的加热速度, 应选用较低的电流频率, 以增大电流透入深度。而小直径毛坯, 因截面尺寸较小, 可用较高的电流频率, 以提高加热效率。

按采用电流频率范围, 感应加热被分为: 工频 ($f = 50\text{Hz}$) 加热、中频 ($f = 50 \sim 10000\text{Hz}$) 加热和高频 ($f = 10^5 \sim 10^6\text{Hz}$) 加热。生产中多采用中频加热。

感应加热速度非常快, 烧损率一般小于 0.5%, 因此不用保护气氛就可实现少无氧化加热。另外, 加热规范稳定, 便于实现机械自动化操作, 特别适合在生产批量大的流水线上使用。缺点是: 设备一次性投资较大, 耗电量也较大, 一种规格的感应加热器能加热的毛坯尺寸有限。

3. 少无氧化加热

精密模锻时, 毛坯必须采用少无氧化加热, 可减少钢材的氧化和脱碳, 有利于提高模具寿命。实现少无氧化加热的方法有多种, 简单而效果较好的是带保护气氛的感应加热。

如前所述, 在感应加热中钢材的氧化和脱碳较少, 脱碳层约为 0.1 ~ 0.4mm。但当温度从 1050℃ 增加到 1200℃ 时, 烧损几乎增加 0.5 倍, 氧化层厚度已超出精密模锻所允许的范围。随着温度和在高温下停留时间的增加, 脱碳层也明显增厚。因此, 为了实现少无氧化加热, 常采用带有工业惰性气体和还原性气体等保护性气体的感应加热。其具体做法是, 在感应器炉膛内充满惰性气体或还原性气体, 为了将气体保持在炉膛内, 感应器的进口及出口均

要装上活门。

二、金属加热时的变化和常见的缺陷

金属在加热过程中,由于能量升高,原子的振动加快、振幅增大,以及电子运动的自由行程改变,还有周围介质的影响等原因,金属将发生如下变化:

(1) 化学变化 金属表层与炉气或周围其他介质发生氧化、脱碳、吸氢等化学变化,结果生成氧化皮与脱碳层等缺陷。

(2) 物理变化 金属的物理性能,如热导率、热扩散系数、膨胀系数、密度等均随温度的升高而变化。

(3) 组织结构变化 大多数金属在加热过程中不仅有组织转变,其晶粒也会长大,严重时会造成过热、过烧。

过热:当钢的加热温度超过其一定温度,并在此温度下停留时间过长,会引起奥氏体晶粒迅速长大,这种现象称为过热,如中低碳钢和高碳钢的过热温度分别为 1300℃ 和 1150℃。

过烧:当钢加热到接近熔化温度,并在此温度下长时间停留,这时不仅奥氏体的晶粒粗大,而且由于氧化性气体渗入到晶界,使晶间物质氧化,形成易熔共晶体氧化物,这种现象称为过烧。

(4) 力学性能变化 总的趋势是随着加热温度的升高,金属的塑性提高,变形抗力降低,残留应力逐步消失;但也可能产生温度应力与组织应力,过大的内应力会引起加热金属(特别是合金化程度高的合金)的开裂。

三、金属材料锻造温度范围的确定

金属的锻造温度范围是指开始锻造(始锻温度)与结束锻造(终锻温度)之间的温度区间。

锻造温度确定的原则是:应能保证金属在锻造温度范围内具有较高的塑性和较小的变形抗力,并能使锻件获得所希望的组织与性能。在此前提下,锻造温度范围应尽可能取得宽一些,以减少锻造火次,降低消耗,提高生产效率。

确定锻造温度范围的基本方法是:依据合金相图、塑性图、抗力图和金属再结晶图等,从塑性、变形抗力和终锻后锻件所能获得的组织与性能三个方面进行综合分析,确定出合理的锻造温度范围,并在生产实际中进行验证和修改。

一般来讲,碳钢的锻造温度范围根据铁-碳相图就可确定。大部分合金结构钢和合金工具钢,因合金元素含量少,对铁-碳相图无明显影响,可参照铁-碳相图初步确定锻造温度范围。对于铝合金、钛合金、铜合金、不锈钢及高温合金等,往往需要综合运用各种方法,才能确定出合理的锻造温度范围。各种金属材料的始锻温度和终锻温度均可在有关手册中查获。

四、金属的加热规范

金属在锻前加热时,应尽快达到规定的始锻温度,以减少氧化,节省燃料,提高生产率。但是,温度升得太快,温度应力就大,往往会造成毛坯开裂。因此,在实际生产中,金属毛坯应按一定的加热规范进行加热。

加热规范是指从金属毛坯装炉开始到出炉的整个过程中,炉温和料温随时间变化的规定。为应用方便起见,加热规范通常是以炉温-时间的变化曲线来表示。根据金属材料的种类、特性及断面尺寸的不同,锻造生产中常见的有一段、二段、三段或多段加热规范(图 1-8)。

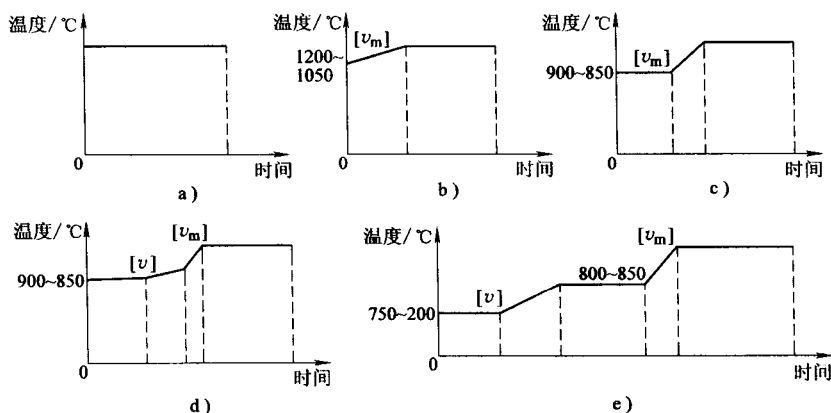


图 1-8 钢的锻造加热曲线类型

a) 一段加热曲线 b) 二段加热曲线 c) 三段加热曲线 d) 四段加热曲线 e) 五段加热曲线

[v] — 金属允许的加热速度 [v_m] — 最大允许的加热速度

从图 1-8 可见, 在多段加热过程中含有预热、加热、均热等几个阶段。制订加热规范就是要确定加热过程不同阶段的炉温、升温速度和加热与均热时间。预热阶段, 主要是合理规定装料时的炉温; 加热阶段, 关键是正确选择加热速度; 均热阶段, 则应保证钢料温度均匀, 确定保温时间。好的加热规范, 才能保证金属在加热过程中不产生裂纹, 不过热, 不过烧, 氧化脱碳少, 断面温度均匀, 加热时间短和节约能源。对于大型自由锻件, 尤其是合金钢和有色金属锻件, 一般选用多段加热。而对于中小型模锻件, 应采用电感应连续加热。

第三节 锻件的冷却和热处理

一、锻件的冷却

1. 锻件冷却时的内应力

毛坯在加热过程中会产生内应力, 同时, 锻件在冷却过程中也会产生内应力。因为锻件冷却后期温度较低, 材料已进入弹性状态, 冷却内应力的危险性比加热内应力更大。内应力有温度应力、组织应力和锻造变形不均匀而引起的残留应力。

(1) 冷却时的温度应力 锻件在冷却初期, 表层冷却快, 体积收缩大; 心部冷却慢, 体积收缩小。由于表层金属收缩受到心部金属的阻碍, 结果在金属的表层产生了拉应力, 心部产生了压应力。此时心部温度仍较高, 变形抗力小, 且塑性较好, 还允许微量塑性变形, 使温度应力得以松弛。到了冷却后期, 锻件表面已接近室温, 基本上不再收缩, 这时表层金属反而阻碍心部金属继续收缩, 导致心部由受压应力转变成受拉应力, 从而易产生冷却裂纹。

若锻件材料为抗力大、塑性低的合金, 在冷却初期表层金属产生的拉应力不能得到松弛, 就是在冷却后期, 也只能使表层初期产生的拉应力有所降低, 但表层仍为拉应力, 心部

仍为压应力。因此,冷却过程中低碳钢与低合金锻件可能出现内裂,而高碳钢与高合金锻件则易产生外裂。

(2) 冷却过程中的组织应力 在相变的材料,锻件的冷却过程中不可避免要经历相变。由于相变前后组织的比体积不同,在不同的相之间会产生组织应力。当锻件表层与心部温差较大时,这种组织应力更为明显。

(3) 冷却过程中的残留应力 锻件在成形过程中,由于变形不均匀所引起的附加应力,特别是在终锻温度较低时,停锻之后冷却速度又较快,使得锻后锻件中残留的弹性应变和点阵畸变较大,由于温度低,又不能发生再结晶软化将其消除,最终便使残留应力保留下来。残留应力在锻件内部的分布,根据锻件各部位变形程度和冷却速度的不同,可能是表层为拉应力而心部为压应力,或者与此相反。

综合上述,锻件在冷却过程中存在上述三种内应力,总的内应力为这些应力的叠加。当叠加后的总内应力值超过材料的强度极限时,便会在锻件上相应部位产生裂纹。

2. 锻件的冷却方法

按照冷却速度的不同,锻件的冷却方法有三种,即在空气中、灰砂中和炉内冷却。

(1) 在空气中冷却 在空气中冷却的速度较快,适合合金化程度低、导热性及塑性好的材料的中小锻件的锻后冷却。锻后一般是以单件直接散放或成堆摆放在地面上,但不能放在潮湿的地面上或金属板上,也不要摆放在有穿堂风的地方,以免冷却不均匀或局部急冷引起翘曲变形或开裂。

(2) 在干燥的灰、砂坑(箱)内冷却 在干燥的灰、砂坑(箱)内冷却的速度较慢,适合合金化程度较高、导热性及塑性较差的合金材料锻后冷却。一般来说,锻件入砂温度不应低于 500°C ,周围灰、砂厚度不少于 80mm 。

(3) 在炉内冷却 在炉内冷却的速度最慢,适合合金化程度高、导热性及塑性差的高合金钢、特殊合金钢或大型锻件的锻后冷却。对白点敏感的钢(如铬镍钢 34CrNiMo 、 34CrNi4Mo 等)也需要在炉内慢冷,以便让氢气充分析出。锻件入炉温度不应低于 600°C ,炉温与入炉锻件温度相当。由于炉冷可通过炉温调节来控制锻件的冷却速度,可获得质量优良的锻件。

二、锻件热处理

1. 热处理的目的

为了消除锻件在冷却过程中所产生的内应力,保证锻件质量,锻件需要进行热处理。其具体目的是:调整锻件的硬度,以利锻件进行切削加工;消除锻件内应力,以免在机械加工时产生变形;改善锻件内部组织,细化晶粒,为最终热处理作准备;对于不再进行最终热处理的锻件,以保证达到规定的力学性能要求。

2. 中小锻件常用的热处理方法

(1) 退火 分为完全退火(通常称为退火)和球化退火(不完全退火)。完全退火是把锻件加热到 A_3 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$,经一定时间保温后随炉缓冷,从而得到平衡状态的组织。球化退火是将锻件加热到 Ac_1 以上 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$,经长时间保温后随炉缓冷。由于钢中渗碳体凝聚成球状,从而获得球状的珠光体组织。

(2) 正火 一般是把锻件加热到 Ac_3 或 A_{cm} 以上 $50\sim 70^{\circ}\text{C}$,有些高合金钢锻件加热到

A_{c3} 或 A_{cm} 以上 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ ，经保温后在空气中冷却。如正火后锻件硬度仍较高，为了降低硬度，还应进行高温回火，其回火温度一般为 $560 \sim 660^\circ\text{C}$ 。

(3) 调质 一些含碳 w_c 为 $0.35\% \sim 0.5\%$ 的中碳钢和低合金钢锻件，尤其是不进行最终热处理时，为了获得良好的综合力学性能，采用淬火后再进行高温回火的调质处理最为合适。

(4) 淬火、回火 淬火是为了获得不平衡组织，以提高强度和硬度，将锻件加热到 A_{c3} 以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ （亚共析钢）或 A_{c1} 和 A_{cm} 之间（过共析钢），进行保温后急冷。回火是为了消除淬火应力，获得较稳定组织，将锻件加热到 A_{c1} 以上某一温度，保温一定时间，然后空冷或快冷。

上述各种锻件热处理的加热温度范围，如图 1-9 所示。

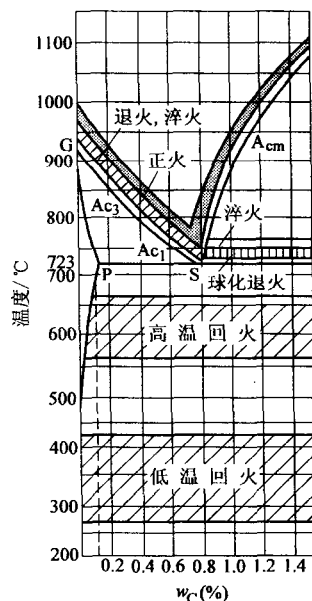


图 1-9 各种锻件热处理加热温度范围示意图

第四节 模锻时的润滑

模锻无论是开式还是闭式，模锻时接触面上的单位压力一般在 $800 \sim 1200\text{MPa}$ ，有的甚至高达 2500MPa ，温度一般在 $1150 \sim 1200^\circ\text{C}$ 。在如此高的压力和温度下，润滑膜的建立是非常困难的。模锻时变形金属与模膛表面间的摩擦，将使模膛表面磨损，增大金属的流动阻力而造成脱模困难。所以，必须采用和研制专门的润滑剂以改善模锻条件。

实际应用表明，石墨水悬浮液（即水剂石墨）的润滑效果比较理想，故目前在各种热态成形中应用比较广泛。

其配方主要是由固体物质与介质水组成。前者主要起润滑、绝热、脱模和高温湿润等作用；后者采用水作介质，主要是考虑价格便宜、不燃烧和无污染。用水作介质，在高温汽化时能带走模具的热量，起冷却作用。另外，水蒸发汽化后，在模具表面上能形成一层均匀的固体润滑膜。

水剂石墨润滑剂的主要成分（质量分数）如下：

1) 石墨（ $20\% \sim 22\%$ ）。一般矿区提供的石墨纯度平均在 82% 左右，因此进厂后要采用化学酸进行提纯，去掉 Si、Fe、Na、K、Mg、Al 和 Ca 等主要杂质，使石墨纯度达到 98% 以上。另外，一般矿区提供的石墨粒度在 $140\mu\text{m}$ 左右，因此进厂后要采用机械气流粉碎，把石墨粒度粉碎到 $4\mu\text{m}$ 以下，最好在 $2.5\mu\text{m}$ 左右。

2) 添加剂（ $16\% \sim 18\%$ ）。在石墨中加入某种在升温过程中能不断脱掉结晶水的无机盐，使石墨在升温过程中不断得到微量水分，是提高石墨高温润滑性能的有效途径。一般常