

## 锤上模锻设计

刘金林 聂嘉斌

中国航发燃气轮机有限公司, 辽宁 沈阳 110170

**[摘要]** 随着工业的发展, 锤上模锻的应用越来越广泛。航空航天、汽车、轮船等制造业已经越来越依赖于锤上模锻。如何设计出正确、合理的模锻件, 成为工程师们要面对的首要问题。成功的设计不仅需要丰富的理论知识, 更需要刻苦的专研和经验的积累。只有当设计者可以从头至尾独立完成一个模锻件的设计, 同时认真分析生产中遇到的问题, 并找到解决问题的方法, 才能够真正地掌握模锻件设计的灵魂。

**[关键词]** 模锻; 设计; 锻锤; 工艺

DOI: 10.33142/aem.v4i8.6776

中图分类号: TP391.7

文献标识码: A

## Hammer Forging Design

LIU Jinlin, NIE Jiabin

AECC Gas Turbine Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110170, China

**Abstract:** With the development of industry, hammer die forging is more and more widely used. Aerospace, automobile, ship and other manufacturing industries have increasingly relied on hammer forging. How to design correct and reasonable die forgings has become the primary problem that engineers have to face. Successful design requires not only rich theoretical knowledge, but also hard research and experience accumulation. Only when the designer can independently complete the design of a die forging from beginning to end, carefully analyze the problems encountered in production, and find solutions to the problems, can he really grasp the soul of die forging design.

**Keywords:** die forging; design; forging hammer; workmanship

### 引言

模锻是指在专用模锻设备上, 通过模具施力于毛坯, 使之逐步充满型槽, 得到所需锻件的一种锻造方法。采用蒸汽-空气模锻锤或电液模锻锤生产模锻件的成形方式称为锤上模锻。该方法具有尺寸精确、通用性好、打击速度快、加工余量较小、金属流动充填型腔能力好、可实现型槽制坯等特点, 获得了广泛应用。

### 1 模锻的种类

模锻件根据不同的原则, 可以分为如下类别:

按照金属变形时的流动情况, 可将模锻件分为闭式模锻件和开式模锻件。其中, 闭式模锻件由于不会产生残余毛边, 因此材料利用率较高, 可以降低原材料成本, 但其模具在锻造过程中受力较大, 寿命比开式模锻件模具的短, 这也是影响成本的一方面因素。

按照锻造时的加热温度, 可分为热锻件、温锻件和冷锻件。具体选择何种锻造温度, 是根据具体材料的塑性而定。常温下塑性较差的材料则需要进行温锻或者热锻才能保证模锻件的成型。

按照模锻件模具的组合方式, 可分为单型槽模锻、多型槽模锻、连续模锻和联合模段。形状简单的模锻件则可以用较少的模具型腔, 反之, 形状越复杂, 需要的型腔越多。

按照生产模锻件的锻压设备可分为锤上模锻、平锻机

模锻、曲柄压力机模锻、螺旋压力机模锻和液压机模锻等。不同设备的打击能量不同, 打击速度不一, 因此, 需要根据模锻件的材料具体塑性和形状复杂程度等因素来选择合适的模锻设备。

### 2 锤上模锻的工作特性和工艺特点

锤上模锻历史悠久, 是最早得到应用的模锻工艺之一。时至今日, 锤上模锻已是锻造生产中不可或缺的成型方式。随着各种模锻设备不断发展和模锻工艺的不断优化, 锤上模锻已具备如下特点:

(1) 锤上模锻过程中, 锤头打击速度的快慢、运动行程的高低和打击能量的大小均可调节, 因而锤上模锻能实现轻重缓急不同的打击方式, 如此灵活的工艺方法则可进行制坯工作, 大大减少工序周转时间, 降低锻件生产周期;

(2) 锤上模锻过程中, 金属材料是在锻锤设定的运行速度和打击能量下, 在型槽中经一次或者多次连续锤击而形成锻件, 由于惯性较大, 所以金属在上模型槽中具有更好的充满效果。利用此特点, 可以将模锻件不易充满的结构放置在上模型槽中;

(3) 锤上模锻的适应性非常广, 可生产种类繁多的锻件, 不仅可以单槽模锻, 也可以根据模锻件的复杂程度, 设计多槽模锻; 既可单个模锻件生产, 也可多个模锻件同时生产, 还可进行一料多件的连续模锻;

(4) 锤上模锻靠锤头的冲击力使型腔内金属变形, 锤头具有较高的打击能量, 在行程的最后阶段, 其速度可达  $7\text{m/s}\sim 9\text{m/s}$ , 且锤上模锻过程中受力系统非封闭, 冲击力需要通过下砧传给设备底座基础, 对厂房的地基要求很高;

(5) 锤上模锻过程中锤头的行程灵活, 可以实现各尺寸锻造, 且单位时间内可实现多次连续打击, 因此, 锤上模锻生产效率非常高;

(6) 灵活的锤头也导致了锤上模锻抗偏载能力和导向精度较差, 抗变形能力大的材料在锤上模锻时, 易产生错移, 同时, 也无法安装顶出装置, 使得模锻件出模困难;

(7) 锤头行程灵活可控, 锤上模锻件在各模膛中的变形是在锤头一次或者多次打击下完成的, 因此, 可在模锻锤上实现预锻、拔长、压饼、滚压等各种模锻工序。锤上模锻一般不需要其它设备为其锻造制坯, 具有广泛的适应性和通用性, 这也是锤上模锻生产效率高的主要原因之一;

(8) 锤上模锻的导向精度较差、锻造时的打击能量和行程不固定、无法安装顶出装置等因素使锤上模锻件的尺寸精度不高, 较压力机生产的模锻件精度差一个级别;

(9) 由于锤上模锻比压力机等其他模锻设备的打击速度快, 所以对于变形速度敏感的低塑性材料(如钛合金、镁合金等)在锤上模锻成型时, 不如压力机生产的模锻件效果好。

### 3 模锻工艺过程的确定

#### 3.1 设计工艺方案

根据零件形状尺寸的复杂情况、技术要求、生产数量, 再结合具体生产条件, 合理地选择模锻工艺方案。

#### 3.2 设计模锻件图。

模锻件图的设计要素包括非常多的方面: 锻件的加工余量、锻件公差、分模面的选取、模具的拔模斜度、锻件的圆角半径等。合理的锻件图设计既能保证锻件满足设计图要求, 也能提高锻件质量, 锻造过程便于金属充满模具。例如某尾柄锻件, 大端处过渡圆角半径为  $R3$ , 模锻成形时多次出现模具开裂报废的情况。对其锻件图进行优化, 取消毛边仓部同时加大圆角半径至  $R5$ , 并增加锻造公差, 则可以将模具寿命提高  $50\%$  以上。再如某  $\text{GH3030}$  合金的喷口接头, 一端存在单面加工后  $4\text{mm}$  的法兰台阶, 锻件图设计为共  $8\text{mm}$  的台阶长度, 在机加过程中多次出现尺寸超差的情况。原因为该处法兰部位筋部宽度较小, 模锻时造成模具型腔发生变形, 导致加工后无法保证法兰非加工尺寸。后续将该部位尺寸增加为  $15\text{mm}$ , 则大大提高了产品合格率和模具寿命。

#### 3.3 确定设备

根据模锻生产的所有工序和设备能力, 选择所用设备。

### 4 不同类型模锻件形状特征、变形特点及制坯方法

锤上模锻件的材料和外形尺寸决定了模锻方法和选

择哪种模锻工艺, 从而进行锻模件设计, 并制定模锻的工艺规程。各种形状的模锻件大致可以分为三类: 圆饼类模锻件、长轴类模锻件、复杂形状类模锻件。

圆饼类模锻件是指可以将分模面设计成与模锻件主轴线垂直, 模锻件在分模面上的投影形状为对称图形, 例如圆形、椭圆形或近似圆形、椭圆形。属于这类模锻件的有: 压气机盘、齿轮、封盘饼、圆形机匣和三通接头等。对于圆饼类模锻件, 锻造过程中锤击方向与分模面垂直, 即与模锻件主轴线方向一致, 金属可以沿高、宽、长三个方向同时流动, 即所谓金属对称流动。其制坯方法有: 锻粗、冲孔、扩孔或者自由锻。

长轴类模锻件又分为直长轴类、弯曲轴类。

直长轴类模锻件的中心线在分模面上投影形状为直线, 沿主轴线各横截面形状对称或相差很小, 典型模锻件有: 输出轴、摇臂、连杆等。当沿主轴线的各横截面面积变化很小时, 可用棒料直接进行模锻; 当沿主轴线的各横截面面积变化较大时, 应采取顶锻、拔长、卡压、滚挤等工步制坯。

弯曲轴类模锻件是指主轴线在分模面上的投影形状为曲线或折线, 属于这类的典型锻件有: 卡箍、吊钩、弯杆、摇臂、曲轴等。根据沿主轴线的各横截面面积变化情况, 选择合适的方式进行制坯。

复杂形状类模锻件是指无法找出一条中心线或者主轴线, 形状既不规则也不对称, 这样的模锻件就要具体情况具体分析, 争取用最合理的方式进行制坯, 然后进行模锻成型。

### 5 模锻工艺主工序设计

模锻工艺过程是指由坯料经过一系列生产工序, 最终制成模锻件的整个生产过程。模锻工艺过程由以下几种工序组成:

#### 5.1 下料工序

根据锻件所要求的坯料加上毛边等损耗, 确定下料规格尺寸, 必要时还需对坯料表面进行倒角、除锈、抗氧化和润滑等处理。

#### 5.2 加热工序

根据锻件材料本身锻造性和生产节拍, 确定所需的加热温度和保温时间对坯料进行加热。

#### 5.3 锻造工序

一般模锻件可分为制坯和模锻两工序。制坯的方法较多, 可采用自由锻或者机加工, 模锻工步可分为预锻和终锻, 预锻可以不进行, 终锻则是必不可少的工步。变形工序根据锻件类型和选用的模锻设备确定。

#### 5.4 锻后工序

该类工序的作用是完善模锻内部组织的工序和其他前期工序的不足, 是锻件最后能完全符合锻件图要求的关键步骤。锻后工序包括有: 校正、精压、切边、冲孔、热

处理、表面清理、清除残余毛刺等。

### 5.5 检验工序

包括过程检验和最终检验两部分。工序间检验一般根据投产数量抽检。检验项目包括几何尺寸、表面质量、内部金相组织和力学性能等,具体检验项目根据锻件的要求确定。最终检验则是根据锻件类别,对锻件的所有指标进行检验。

## 6 模锻工艺辅助工序设计

成功的模锻件设计离不开合理的辅助工序,模锻工艺中最重要的辅助工序包括以下几种:

### 6.1 试模

为验证新模具型腔尺寸是否符合设计图的要求,在正式生产前需安排试模工序,批量生产后则不进行该工序。

### 6.2 检查

在进行锻造生产之前,对坯料进行专门的检查,用以核对来料情况并控制来料质量的工序。

### 6.3 涂覆

对于摩擦力较大的材料,锻造过程中金属流动困难,为增加金属的流动性,在锻造前安排涂覆工序,将工件表面涂覆一层专门的润滑剂,以减小摩擦力,使得模锻件更易充满。

### 6.4 加热及切边

模锻前需要对坯料进行加热,并根据具体情况,安排切除毛边工序。对于切除毛边工序,根据材料特性,决定是否需要安排加热工序。

### 6.5 碱崩

对于需要涂层的锻件,每火次锻造完成后为便于去除涂层,需安排碱崩工序。对于切边后有残余毛刺的钛合金锻件,需先安排打磨工序,毛刺去除干净后再进行碱崩,以防止碱崩中发生燃烧。

### 6.6 清理

锻件每火次锻造完成后,需清除表面氧化皮或涂层。通常安排吹砂清理或抛丸清理,吹砂清理适用于大部分锻件,只有少数材料锻件需要安排抛丸清理。该工序允许重复进行直至完全清理干净。

### 6.7 打磨

切边后模锻件会产生毛边,此时需安排打磨工序,去除尖边、毛刺等缺陷。同时,校正后也需安排打磨工序,因为校正工序会再次产生过大的毛边,需打磨至工艺要求范围内。

### 6.8 腐蚀

模锻件加热后,都会产生氧化层,需安排腐蚀工序去除,用以防止后续锻造过程中产生微裂纹。

### 6.9 检查缺陷

锻件表面的氧化皮或涂层清理干净,漏出锻件本体后,需安排检查缺陷工序,将表面产生的缺陷标记出来。

### 6.10 去除缺陷

锻造过程经常会造成模锻件表面缺陷,此时需安排去除缺陷工序,将缺陷通过角磨机、砂轮机等设备并结合风钻手工抛修去除,并保证清除缺陷处圆滑转接。

### 6.11 检验

检验工序的内容包括:每火次锻造后的表面缺陷检验;锻造完成后的成品尺寸检验,对于无法直接测量的尺寸则需按图纸进行划线检验;标刻内容、错移和残留毛边等内容的检验;理化项目的检验。

### 6.12 标刻

在锤上模锻生产完成后,在模锻件表面按图纸要求标刻一定内容的工序。

### 6.13 防锈

所有易于生锈的材料,包括铁基高温合金、钢锻件等,在发货前需进行防锈处理。

### 6.14 光饰

对于有表面粗糙度和光洁度要求的钛合金、高温合金模锻件,在发货前进行光饰处理。以满足图纸要求。

## 7 模锻件常见工艺问题及分析

模锻件生产过程中,由于种种原因,会造成锻件的某些缺陷。缺陷产生的原因是多方面的,例如操作不当、设备自身特性、原材料本身存在缺陷和工艺设计方案不足等,其中工艺问题主要有以下几种:

### 7.1 下料规格和尺寸制定的不合理问题

只有合理的进行计算和对设备熟练掌握,才能保证该尺寸坯料可以充满模具的整个型腔,坯料设计首先要注意坯料的横截面面积要大于模锻件相应投影面积,同时还要考虑锻件毛边的大小和该种金属流动规律。针对三通类模锻件,由于其形状中心对称,还要考虑坯料放置方式是立式放料或者平躺放料。放料方式不同,则会影响棒料的规格和尺寸的选取,若工序中没有制坯和预锻,则需要保证坯料可以覆盖主要的部位,从而避免金属回流造成涡流等缺陷。

### 7.2 锻造温度制定问题

根据金属材料的锻造特性和生产数量情况,制定合理的锻造温度。锻造过程坯料的温度必须处于锻造温度区间;若温度超出始锻温度会导致材料出现过热,严重的则会造成过烧现象;若温度低于终锻温度则会造成局部粗晶和材料出现裂纹等问题。在满足所有要求的前提下,应尽量提高模锻加热温度,以便于金属材料顺利充填模膛并可以大大提高模具寿命。

比如塑性较好的1Cr18Ni9Ti在锤上模锻时采用1150℃至1180℃时,均可锻造成型,但采用1180℃时,减少了锻造火次,提高了效率和模具寿命。再如GH99合金材料在切边时极易沿分模面出现裂纹,在工艺中将冷切边改为回炉加热后切边,则可以保证锻件质量。



### 7.3 锻件尺寸设计不合理问题

模锻件加工余量非常小,并且一般存在非加工表面和非加工尺寸,故模锻件尺寸精度要求较高,锻件需要进行严格的尺寸检验。首先试模件需进行划线,保证所有尺寸合格后,才能进行模锻批量生产。锻件生产过程中,需要对锻件进行首件、中间件以及尾件检查以免造成批量超差。须注意的是,过程检测时的尺寸需要有平面和直线段。生产中若需要检测球面直径、过渡面尺寸和带圆弧转接的高度尺寸,则属于出尺寸设计测量性差的问题。

### 7.4 工序设计顺序不当问题

合理的工序安排能够保证获得合格的锻件,减少不必要的锻造缺陷和生产效率高的生产流程。

综上所述,模锻设计不合理会造成锻件出现各种缺陷,并给生产操作增加了难度,增加成本,难免出现各种质量问题。针对各种问题,需要不同的补救措施,具体内容如下:

凹坑大多存在于锻件表面,产生原因主要是加热时间太长和粘上炉底熔渣;或者是模具中氧化皮清除不干净。对应措施为控制加热时间,清除坯料表面的氧化皮和杂物后再进行锻造。

折叠大多存在与锻件表面,产生原因主要是制坯模膛设计不当和终锻时形状不合理。应对措施为正确设计拔长、滚压、弯曲和预锻等模具,避免终锻时金属在模膛内产生对流;制坯操作得当,避免坯料发生过度弯曲,并使坯料符合要求的体积;断面尺寸和轮廓形状在终锻时可以充满模膛。

### 7.5 厚度超差问题

厚度超差是指锻件沿模具运动的方向尺寸超上差。产

生原因为锻不足;锤击力不足;制坯模膛设计不合理或者毛边设计不合理。应对措施为不选用体积过大坯料;提高始锻温度,同时控制终锻温度;控制锤击次数;选择合适的毛边槽。

局部未充满是指锻件的筋处、圆角半径处缺少金属材料,尺寸不满足图纸要求或者是锻件轮廓不清晰。产生原因为坯料尺寸较小;加热时间过长,火耗增大;加热温度过低,金属流动性差;设备能力不足,打击能力太小等。应对措施为坯料应有足够的体积;模具设计应合理,适于金属走料;控制加热温度和终锻温度;合理设计锻件的圆角半径;选择足够阻力的毛边槽,且润滑充分;及时修整磨损模具。

## 8 结束语

我国的锻造行业相对于发达国家起步较晚,锻造能力差距较大,但在全国工程师们的努力下,我们与国外先进水平的距离越来越近。锻造是军工制造的根本,军事力量又是一个国家腰杆硬不硬支撑,希望在今后的日子里,我国锻造水平可以尽快赶超国外,为中国锻造出一片安全稳定的国际环境。

### 【参考文献】

- [1]李亚非,王伟东,和永岗,王永梅.新型钛合金 TC8-1 棒材显微组织及热处理工艺[J].航空工业,2019(13):86.
  - [2]董宝明,张胜,郭德伦,梁慧风.钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用[J].航空工业,2019(13):07.
- 作者简介:刘金林(1987.4-)男,毕业院校:南京航空航天大学;现就职单位:中国航发燃气轮机有限公司。