

铝合金环筒件锻造液压机功能开发及应用验证

刘浩^{1,2}, 张旭¹, 张文学^{1,2,3}, 周世杰¹, 祁磊⁴, 计鑫⁴, 潘高峰⁴

(1. 首都航天机械有限公司, 北京 100076; 2. 天津航天长征技术装备有限公司, 天津 300462;

3. 中南大学轻合金研究院, 湖南长沙 410083; 4. 天津市天锻压力机有限公司, 天津 300142)

摘要: 针对航天大型铝合金环筒件的制造需求, 开展了6000 t锻造液压机设备的研制工作。首先, 对设备主要参数、主机结构与核心功能进行了详细设计, 确定了四柱“拉杆预紧组合框架”式结构; 通过引入速度闭环控制理论、优化滑块和立柱导向结构以及移动工作台的定位方式, 解决了自由锻造与模锻功能兼容的难题; 通过开发预冲+终冲的快速冲孔模块, 设计了3个工位的移动工作台, 提高了环筒件的制孔效率。其次, 分析和确定了锻造工艺的主要内容, 开展了工装模具设计与制造工作。最后, 进行了产品的工程化试制, 验证了设备及工艺的可行性。结果表明, 6000 t锻造液压机可以满足环筒件的生产需求, 对减少锻造火次与工装更换次数、提高生产效率起到较大的作用。

关键词: 铝合金; 环筒件; 锻造液压机; 工装模具; 拉杆预紧组合框架

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.028

中图分类号: TG316.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 06-0199-10

Function development and application verification on forging hydraulic press for aluminum alloy ring and cylindrical workpiece

Liu Hao^{1,2}, Zhang Xu¹, Zhang Wenxue^{1,2,3}, Zhou Shijie¹, Qi Lei⁴, Ji Xin⁴, Pan Gaofeng⁴

(1. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China; 2. Tianjin Aerospace Long March Technical Equipment

Co., Ltd., Tianjin 300462, China; 3. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China;

4. Tianjin Tianduan Press Co., Ltd., Tianjin 300142, China)

Abstract: For the manufacturing demand of large aluminum alloy ring and cylindrical workpiece in aerospace, the development work of 6000 t forging hydraulic press was carried out. Firstly, the main parameters of equipment, the structure of main body and the core functions were designed in detail, and the four-column “tie rod pretension assembled frame” structure was determined. By introducing speed closed-loop control theory, optimizing guide structure of slider and column and positioning mode of mobile workbench, the problem of compatibility between free forging and die forging was solved. Through the development of quick punching module for pre-piercing and final-piercing, three-station mobile workbench was designed, and the piercing efficiency of ring and cylindrical workpiece was improved. Secondly, the main contents of forging process was analyzed and determined, and the tooling and dies were designed and made. Finally, the engineering trial production was carried out, and the feasibility of equipment and process was examined. The results show that the 6000 t forging hydraulic press can meet the manufacturing demand of ring and cylindrical workpiece which plays a great role in reducing forging heating times and tooling replacement times and improving production efficiency.

Key words: aluminum alloy; ring and cylindrical workpiece; forging hydraulic press; tooling and dies; the rod pretension assembled frame

大型铝合金环筒件是运载火箭箭体结构中的关键零件^[1], 主要分为环形件、直筒件和锥筒件3类, 为确保产品具有良好的力学性能并具备较高的质量稳定性, 一般采用自由锻或模锻工艺制造。

自由锻造液压机是生产大型锻件的重要设备,

常用的结构形式有三梁四柱式和双柱斜置式。三梁四柱液压机的通用性强, 通过更换工装可满足各类锻件的生产需求, 因而其应用最广泛; 双柱斜置式液压机具有宽阔的操作视野, 一般具有快锻功能, 常被用于生产长轴或长板类锻件^[2-6]。

国内铝合金锻件生产企业一般采用上述两种类型的设备, 生产中存在3方面问题: (1) 铝合金环筒件的制坯效率低, 需多次更换工装, 锻造火次多、生产周期长; (2) 自由锻造液压机设备的精度低,

收稿日期: 2022-04-10; 修订日期: 2022-06-16

基金项目: 国家科技重大专项 (2019ZX04022001)

作者简介: 刘浩 (1989-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: liuh4_530@163.com

无法满足高精度薄壁锥筒件模锻成型的需求；(3) 工艺过程、工装模具、控制措施沿用黑色金属锻造经验，对铝合金材料的特性关注不足，对铝合金环筒类锻件的工艺适应性差。

2019 年，首都航天机械有限公司联合相关单位承担了国家科技重大专项某项目，针对航天铝合金环筒件的制造需求，研制一台兼具自由锻造、环筒件快速制坯料以及精密模锻功能的锻造液压机，并

实现提高产品质量、提升制造效率、扩大生产能力的目的。

1 产品及工艺流程

1.1 产品情况

图 1 为运载火箭中常用的 3 类铝合金环筒件锻件模型，包括环形件、直筒件和锥筒件。

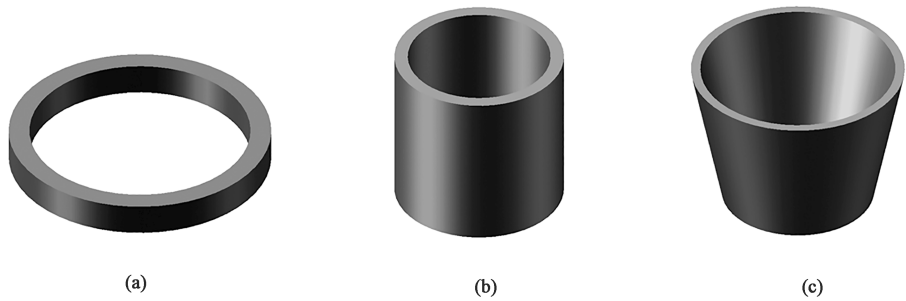


图 1 锻件模型

(a) 环形件 (b) 直筒件 (c) 锥筒件

Fig. 1 Models of forgings

(a) Ring workpiece (b) Cylindrical workpiece (c) Conical cylindrical workpiece

表 1 为铝合金锻件的基本信息。环形件多用于燃料箱过渡环、级间段对接框等，材料牌号以 2219、2A14、7050、2195 为主，高度一般不超过 500 mm，直径尺寸远大于高度尺寸，常见的直径规格有 $\Phi 5000$ 、 $\Phi 3350$ 和 $\Phi 2250$ mm，锻件的最大质量约为 4900 kg；直筒件多用于壳段类结构，材料牌号包括 2A14、7A04、5A06 等，其高径比较大，常

见的高度规格有 1600、1000 和 800 mm，最大质量约为 3000 kg；锥筒件与直筒件类似，区别为一端直径大、一端直径小，这种产品一般壁厚较薄，最大质量约为 1500 kg。

1.2 工艺流程

图 2 为 3 类铝合金环筒件的锻造工艺流程图，包括铸锭准备、坯料加热、开坯锻造以及锻件成形等工序。环形件的锻造工艺较复杂，首先需要对铸锭进行开坯锻造，然后冲中心孔、马杠扩孔，以制备环形毛坯，最后通过辗环成形制得最终环形件。直筒件的工艺流程与环形件大致相同，区别在于增加了芯棒拔长工序。锥筒件则采用模锻成型的方式制造，先开坯锻造来制备特定形状尺寸的模锻毛坯，再模锻成形为最终锥筒件^[1,7]。

表 1 铝合金锻件的基本参数

Table 1 Basic parameters of aluminium alloy forgings

| 种类 | 材料牌号 | 规格/mm | 质量/($\times 10^3$ kg) |
|-----|-----------------------|---|------------------------|
| 环形件 | 2219、2A14、7050、2195 等 | $\Phi 5000$ 、 $\Phi 3350$ 、 $\Phi 2250$ | 4.9、2.0、1.2 |
| 直筒件 | 2A14、7A04、5A06 等 | 1600、1000、800 | 3.0、2.2、0.5 |
| 锥筒件 | 2A14、5A06、1420 等 | 1200、1000、600 | 1.5、0.7、0.5 |

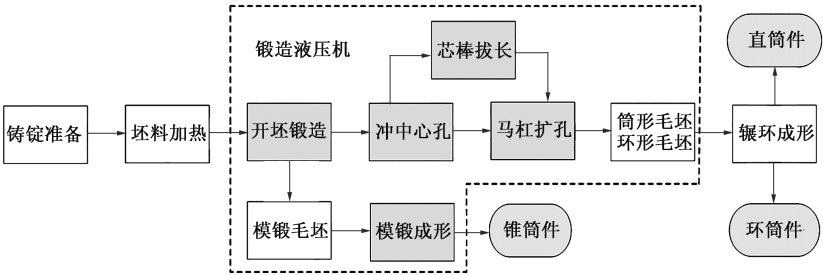


图 2 锻造工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of forging process

1.3 设备需求分析

新研锻造液压机的需求如下：

- (1) 设备能力覆盖表 1 所示产品的环形毛坯、筒形毛坯、模锻毛坯的自由锻造成形，以及锥筒件的模锻成形；
- (2) 集成自由锻造和精密模锻功能，既可实现开坯锻造、冲中心孔、芯棒拔长、马杠扩孔等自由锻造工序，又可满足模锻件对成形精度的要求；
- (3) 具有环筒件快速冲孔的功能，可解决传统环形毛坯和筒形毛坯的制备火次多、生产周期长的问题；
- (4) 移动工作台具有合理的布局，适应性开发环筒件的自由锻造工装与模锻模具，实现锻造过程中工装更换简单快捷、更换次数少的目的，提高生产效率。

2 设备参数与功能实现

2.1 设备选型

锻造液压机设备选用四柱上压式结构，如图 3 所示。与通用液压机类似，设备机械部分包括上横梁、立柱、滑块、下横梁、移动工作台等；为满足环筒件快速冲孔的需求，开发了对中装置与摆臂装置。

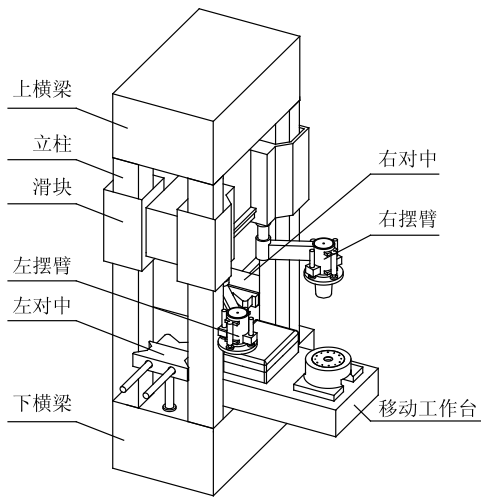


图 3 锻造液压机模型
Fig. 3 Forging hydraulic press model

2.2 设备参数

锻造液压机的设备参数如表 2 所示。对主要设备参数选定做如下说明。

(1) 设备公称力

设备公称力取决于锻件成形时所产生的最大变形抗力。在环形毛坯开坯锻造工序的镓粗工步，坯

表 2 设备参数

Table 2 Parameters of device

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-----------------------------------|---|----------------------------------|---------|
| 公称力/kN | 60000 (3 级) | 模锻速度/ (mm · s ⁻¹) | 0.5~5.0 |
| 回程力/kN | 6000 | 下顶出公称力/kN | 3000 |
| 最大开口高度/mm | 4500 | 下顶出行程/mm | 1100 |
| 滑块行程/mm | 3000 | 上顶出公称力/kN | 1000 |
| 左右立柱间距/mm | 3700 | 上顶出行程/mm | 200 |
| 移动工作台尺寸/ (mm×mm) | 2800×7000 | 对中装置公称力/kN | 500 |
| 自由锻速度/ (mm · s ⁻¹) | 20 MN 载荷：0~60 40 MN 载荷：0~45 60 MN 载荷：0~30 | 对中装置升降行程/ mm | 80 |
| 空程速度/ (mm · s ⁻¹) | 200 | 摆臂装置打料缸 公称力/kN | 1000 |
| | | 摆臂装置打料缸 行程/mm | 480 |

料呈圆饼状，投影面积最大，按最大锻件计算的锻造变形抗力为 53000 kN；在薄壁锥筒件模锻成形时，也会产生较大的变形抗力，通过仿真分析算得该变形抗力约为 48000 kN。同时考虑到厂房已有设备基坑，对原有基础动静载荷计算，综合考虑后选定设备公称力为 60000 kN，既满足目标产品的生产制造，又可充分利用现有基坑。

(2) 几何尺寸

设备最大开口高度取决于环形毛坯马杠扩孔的最大外径或锥筒件模锻成形的最大高度。环形毛坯的最大外径约为 $\Phi 3000$ mm，上砧高度为 800 mm 左右，因此，马杠扩孔工序所需的最大开口高度应大于 3800 mm；锥筒件的最大高度为 1200 mm，为确保顺利装取料，最大开口高度应大于上下模具垫板高度+3 倍零件高度，因此，最大开口高度应大于 4200 mm。此外，最大开口高度决定了设备总高，还应考虑厂房天车轨顶高度，综合考虑后，选择 4500 mm 作为设备的最大开口高度。滑块行程应大于最大开口高度减去上下模具高度，自由锻造时上下模具的总高度为 1600 mm，因此，滑块行程选择为 3000 mm。左右立柱间距应大于最大环形毛坯直径，考虑到对中装置占用部分立柱空间，左右立柱间距选择为 3700 mm。

(3) 锻造速度

锻造速度与材料变形特性有关，铝合金的变形温度为 400 ℃ 左右，锻造过程中变形温度下降不明显，变形速度过快有可能导致材料温升，造

成过热或过烧。因而设定液压机压力三级可调, 各级压力对应相应的锻造速度, 20 MN 载荷对应的锻造速度为 $0 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 40 MN 载荷对应的锻造速度为 $0 \sim 45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 60 MN 载荷对应的锻造速度为 $0 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 主机结构及液压系统

锻造液压机的主机结构如图 4 所示。

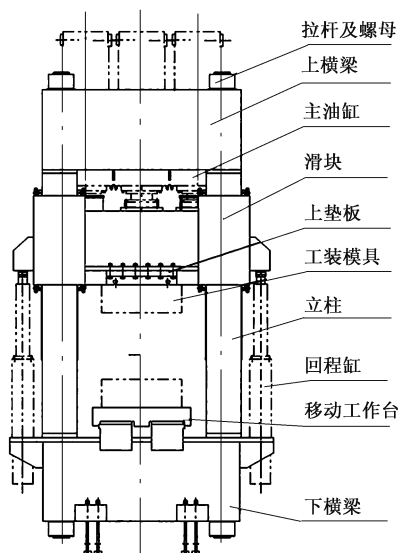


图 4 设备主机结构

Fig. 4 Host structure of device

为提高设备刚度, 主机机身采用“拉杆预紧组合框架式结构”, 主体框架由上横梁、下横梁、4 支立柱、4 根拉杆和 8 个螺母组成封闭框架, 框架承受设备工作时的全部载荷, 基础仅承受压机的本体重量^[8]。为满足快速换模及多工位锻造的需求, 设置 1 个穿梭式移动工作台。

液压系统采用三缸传动结构, 由能量转换装置 (油缸、电机、泵等)、能量调节控制装置 (控制

阀、比例阀、压力阀、方向阀等)、辅助装置 (油箱、冷却系统、过滤系统、管路等) 及液压附件 (滤油器、空气滤清器、法兰、接头、压力表、液位计、管路等) 等组成。

2.4 模锻功能的实现

与自由锻造液压机不同, 模锻液压机要求滑块的加载速度精确可控、滑块与立柱导向精密、移动工作台可准确定位, 可通过如下措施实现。

(1) 模锻速度的控制

引入模糊控制和速度闭环控制理论, 如图 5 所示, 其中, V_1 为目标速度, V_2 为实时速度, e 为速度偏差, K_p 为比例参数, K_i 为积分参数, K_d 为微分参数, t 为时间。采用理论建模研究、仿真分析试验和实际应用相结合的方法, 实现模锻加载速度在 $0.5 \sim 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 内精确可控, 滑块的定位精度为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。

(2) 滑块与立柱导向的控制

滑块与立柱的接触采用十六面导向的结构形式, 每个立柱均设计 1 处 45° 导向, 如图 6 所示, 立柱侧面安装高硬度耐磨板, 滑块配合部位安装楔形导向滑块。这种导向结构不仅可以减小自由锻造偏载对设备的损害, 而且在模锻成形时滑块首先与 45° 导向配合, 其他导向作为辅助功能, 通过调节导轨间隙可实现精密模锻成形的功能, 从而实现自由锻造与模锻功能的兼容。

(3) 移动工作台的定位

为确保模锻时模具定位准确, 在移动工作台两侧安装楔形定位槽, 当预定工位进入机身中心时, 移动工作台外侧的定位缸顶出, 与楔形定位槽配合, 实现移动工作台的精确定位与锁定, 重复定位精度可达 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。

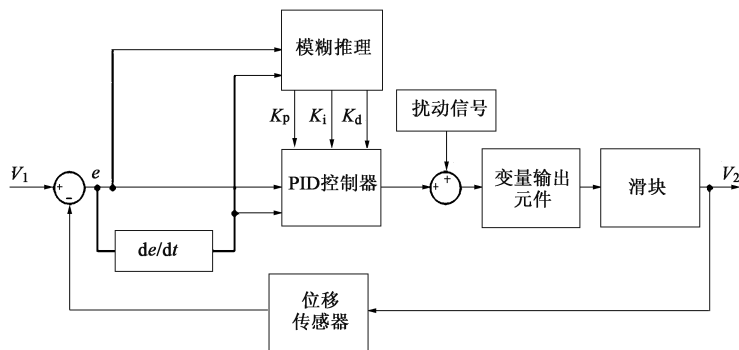


图 5 模糊 PID 闭环控制系统原理图

Fig. 5 Principle diagram of fuzzy PID closed-loop control system

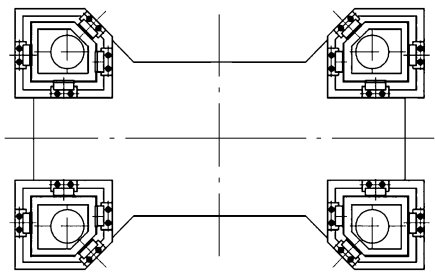


图 6 导向结构示意图
Fig. 6 Schematic diagram of guide rail structure

(4) 上下顶出缸参数的选择

锥筒模锻件的深度较大，成形后极易与凹模或凸模粘连，导致锻件无法取出。设计上下顶出缸各 1 个，下顶出缸的公称力为 3000 kN，顶出行程为 1100 mm，可将锻件顺利顶出凹模；上顶出缸的公称力为 1000 kN，顶出行程为 200 mm，可实现锻件顺利脱离凸模。

2.5 多工位移动工作台布局

移动工作台共设计 3 个工位，布局如图 7 所示。

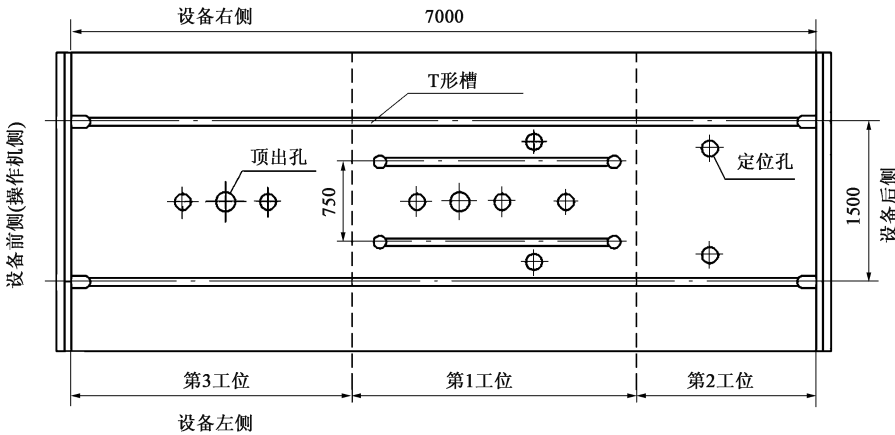


图 7 移动工作台布局图
Fig. 7 Layout diagram of mobile workbench

第 1 工位为开坯锻造工位，用于安装自由锻造下砧，可在此工位完成铸锭开坯锻造工序、预冲工序；第 2 工位为终冲工位，用于安装终冲漏盘，可在此工位完成冲中心孔工序；在自由锻造冲孔完成前，第 3 工位不安装工装模具，以免影响操作机动作，冲孔工序完成后在第 3 工位吊装 V 型砧或马架，完成芯棒拔长或马杠扩孔工序；第 3 工位设有顶出孔，还可安装模锻凹模。这种布局方式可使整个锻造过程的工装更换次数大大减少，有利于减少锻造火次、提高生产效率。

2.6 快速冲孔功能的实现

为解决传统活动冲头双面冲孔效率低、质量差的问题，开发了预冲+终冲的单面快速冲孔模块，冲中心孔工序通过对中装置和摆臂装置实现。

对中装置由左右两个对中机构组成，安装于前后立柱中间，包括升降油缸、顶出油缸、立柱、夹钳、导杆等部件，如图 8 所示。该装置可实现坯料与设备中心的对正、坯料抬起与转移等功能。

摆臂装置安装于滑块后侧，由左右两个摆臂组成，如图 9 所示，主要包括打料油缸、导杆、打料盘等部件，预冲头、终冲头分别安装于摆臂装置内

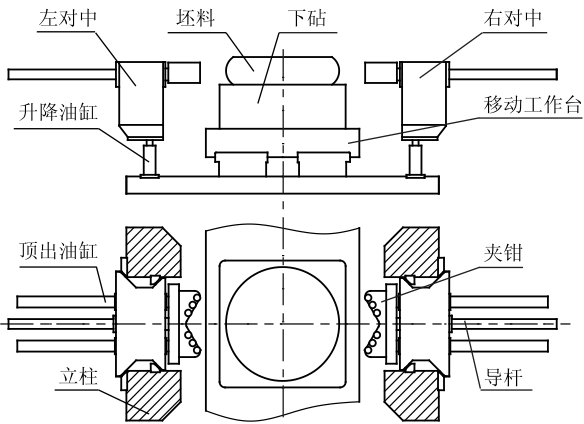


图 8 对中装置原理图
Fig. 8 Principle diagram of centering device

- 部。该装置可将冲头摆入设备中心线上。
- 在开坯锻造工序完成后，坯料被镦粗为圆饼状，随后对中装置与摆臂装置对其进行冲中心孔，工艺动作为：
- (1) 对中装置的顶出油缸顶出，推动夹钳夹持坯料，使坯料的中心与设备中心重合；
 - (2) 右侧摆臂摆入设备中心，滑块下行，推动预冲头进行预冲；

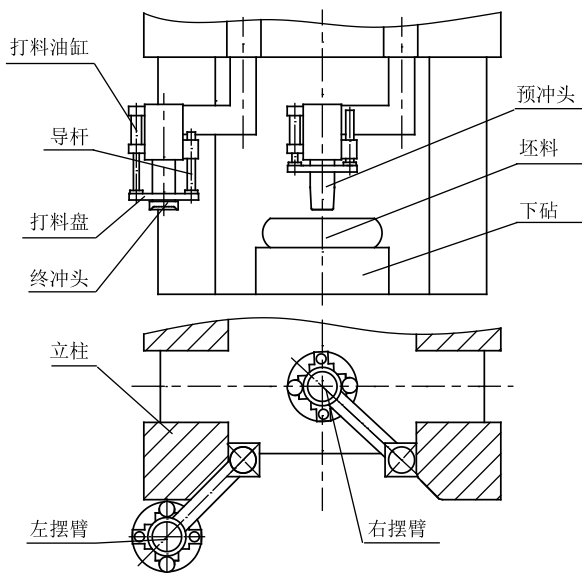


图9 摆臂装置原理图

Fig.9 Principle diagram of swinging arm device

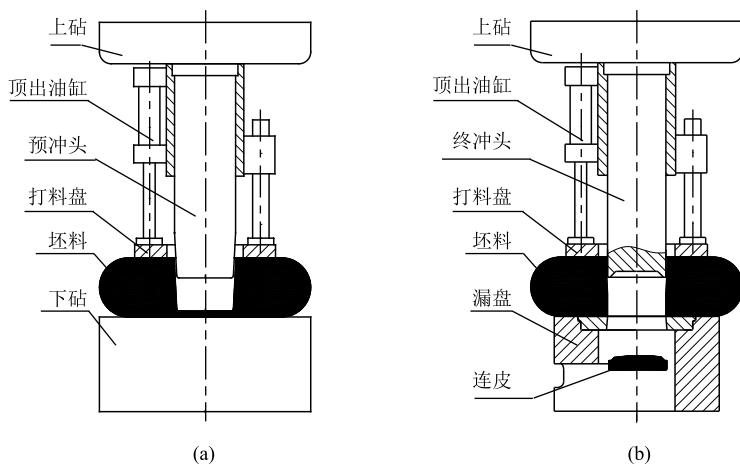


图10 预冲(a)与终冲(b)示意图

Fig.10 Schematic diagrams of pre-piercing (a) and final-piercing (b)

3 应用验证

图11为建成的环筒件锻造液压机设备。设备前侧安装1台10t有轨锻造操作机，实现对坯料的夹持。

为验证设备的功能与参数，针对环筒件产品制定了锻造工艺，设计和制造了通用的自由锻造及模锻工装，并进行了典型产品的试制。

3.1 锻造工艺制定

锻造工艺一般包括坯料加热参数、锻造变形方式、锻件工艺余量等内容。坯料的加热温度与保温时间应根据材料牌号选择，保证坯料被热透；大型锻件

(3) 滑块上行的同时打料油缸顶出，打料盘将坯料打落，如图10a所示，然后右侧摆臂摆出设备；

(4) 对中装置夹持坯料，升降油缸顶出，使坯料脱离下砧；

(5) 移动工作台切换至第2工位，使漏盘中心与设备中心重合；

(6) 升降油缸、顶出油缸先后退回，将坯料放置于漏盘上；

(7) 左侧摆臂摆入设备中心，滑块下行推动终冲头进行终冲，将连皮冲掉，如图10b所示；

(8) 滑块上行同时打料油缸顶出，打料盘将坯料打落，左侧摆臂摆出设备，完成冲孔。

通过预冲、终冲两个过程，可快速完成环筒件的冲孔过程，冲孔过程中坯料轴线始终与设备中心线重合，终冲头将连皮切掉后，内孔质量较好，无裂纹、折叠等缺陷。

的锻造方法较多^[9]，研究表明采用多向锻造的变形方式便于操作，对提高锻件性能有较大作用，如图12所示。锻件工艺的余量需根据产品尺寸形状、锻造难度等因素确定，对于大尺寸环筒件还需掌握冷热尺寸变化规律，以减小工艺余量、提高材料利用率^[7, 10-12]。

3.2 工装模具设计

为满足液压机的锻造需求，设计制造了一套工装模具，如表3所示，主要包括平砧、V型砧、冲头、芯棒、马架、模锻模具等。

(1) 平砧与镦粗冒口

平砧的作用是在开坯锻造过程中实现材料的镦粗与拔长，设计了4种规格平砧，宽度分别为600、1250、1600和2200mm，宽度大的作为下砧、

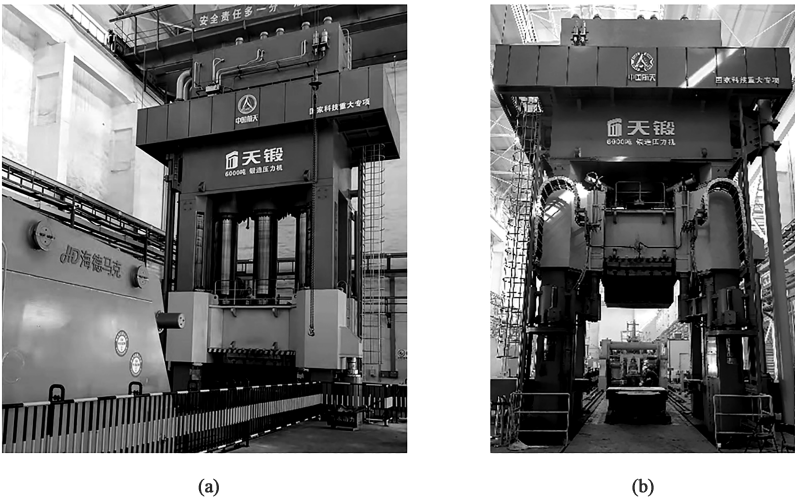


图 11 6000 t 锻造液压机
(a) 前侧 (b) 后侧
Fig. 11 6000 t forging hydraulic press
(a) Front side (b) Rear side

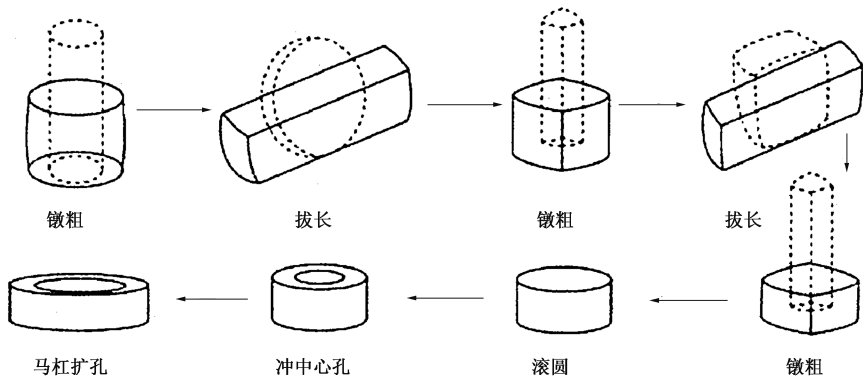


图 12 多向锻造流程图
Fig. 12 Flow chart of multi-directional forging

表 3 工装模具参数

| Table 3 Parameters of tooling and dies | | | | | |
|--|----|------------------------------|-------|----|-------|
| 名称 | 数量 | 规格 | 名称 | 数量 | 规格/mm |
| 平砧 1 | 2 | 600 mm×2000 mm | 终冲头 2 | 1 | Φ335 |
| 平砧 2 | 1 | 1250 mm×2200 mm | 终冲头 3 | 1 | Φ415 |
| 平砧 3 | 1 | 1600 mm×2200 mm | 漏盘 | 1 | — |
| 平砧 4 | 1 | 2200 mm×2200 mm | 芯棒 1 | 2 | Φ250 |
| 镦粗冒口 1 | 1 | Φ1000 mm | 芯棒 2 | 1 | Φ320 |
| 镦粗冒口 2 | 1 | Φ1600 mm | 芯棒 3 | 1 | Φ400 |
| V 型砧 | 1 | 600 mm×1600 mm (角度为 125°) | 芯棒 4 | 1 | Φ600 |
| 预冲头 1 | 1 | Φ250 mm | 芯棒 5 | 1 | Φ800 |
| 预冲头 2 | 1 | Φ320 mm | 小马架 | 1 | — |
| 预冲头 3 | 1 | Φ400 mm | 大马架 | 1 | — |
| 终冲头 1 | 1 | Φ265 mm | 模锻模具 | 1 | — |

宽度小的作为上砧。这种设计的优势在于下砧的尺寸较大，可防止坯料掉落，并有利于整体镦粗变形，上砧与坯料的接触面积小，防止产生过大的变形抗力与偏载，且较小的上砧更适于拔长操作。当坯料的镦粗尺寸超过上砧宽度时，可将活动的镦粗冒口置于坯料上方进行整体镦粗变形。

(2) V 型砧

在直筒毛坯芯棒拔长时下砧使用 V 型砧，上砧使用平砧 1，较小的砧宽更利于坯料向轴向流动。V 型砧的角度过大会造成拔长的效率低，角度过小会导致材料流动不均匀，经验表明 125°是较为适宜的角度。

(3) 冲头与漏盘

预冲头与终冲头分别安装于摆臂装置内部，预冲头具有一定的斜度，终冲头角部带有尖锐的刃口，

如图 10 所示, 预冲头、终冲头与漏盘配合使用, 可确保冲孔后坯料内孔质量好, 无折叠、裂纹等缺陷。

(4) 芯棒

芯棒用于芯棒拔长或马杠扩孔工序, 共设计 5 种规格, 在马杠扩孔过程中不断更换较大直径的芯棒可使环形或筒形毛坯的壁厚更均匀、尺寸精度更高。

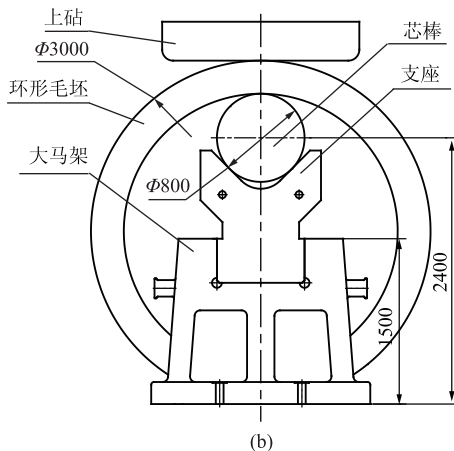
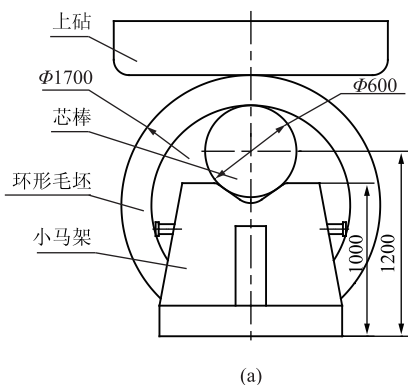


图 13 马杠扩孔示意图

(a) 扩孔-小马架 (b) 扩孔-大马架

Fig. 13 Schematic diagrams of saddle forging

(a) Expanding-small mandrel supporter (b) Expanding-big mandrel supporter

(6) 模锻模具

以某锥筒件为目标产品设计了如图 14 所示的模具。上模由凸模、上垫板和打料杆组成, 打料杆由弹簧与锁紧螺母安装固定; 下模由凹模、隔热板和下垫板组成, 凹模与下垫板通过压板固定。这种模具的结构简单、安装方便、具有通用性, 可为其他锥筒件模具的设计提供参考。

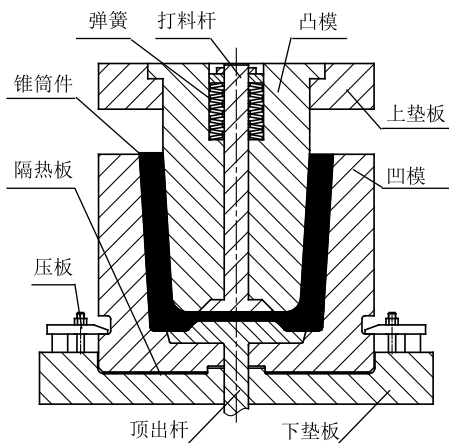


图 14 锥筒件模锻成形模具图

Fig. 14 Die diagram of die forging for conical cylindrical workpiece

(7) 工装模具的连接方式

(5) 马架

设计小马架、大马架各 1 副, 如图 13 所示。小马架为整体结构, 用于生产较小直径的锻件, 可生产的最大毛坯直径约为 $\Phi 1700$ mm; 大马架为组合式结构, 通过更换支座可调节高度, 可生产的最大毛坯直径约为 $\Phi 3000$ mm。

平砧及砧座、V 型砧及砧座、马架、模锻模具需要固定在设备上, 定位销定位、螺栓连接的方式结构简单, 这种连接方式拆装方便、生产效率较高。

3.3 产品试制

针对典型环筒件进行了自由锻造制坯与模锻成形试制, 分别制备了环形毛坯、筒形毛坯与锥筒件, 涉及开坯锻造、冲中心孔、马杠扩孔、芯棒拔长、模锻成形等工序。

开坯锻造过程如图 15 所示, 平砧 2、平砧 3 分别作为上、下砧, 移动工作台处于第 1 工位。锻造变形方式为多向锻造, 整个变形过程约 20~25 min, 最终将坯料锻粗为圆饼状毛坯, 以便进行后续的冲孔工序。

冲中心孔的过程如图 16 所示, 漏盘安装于第 2 工位, 预冲头、终冲头分别安装于两侧摆臂装置上。在开坯锻造工序完成后, 预冲头摆入进行预冲孔, 如图 16a 所示; 然后对中装置将坯料夹持转移至第 2 工位, 如图 16b 所示; 最后终冲头摆入进行终冲孔, 如图 16c 所示。冲孔时坯料会粘连在冲头上, 打料盘可使坯料顺利脱离冲头, 整个冲孔过程动作连贯, 用时约 2~3 min, 开坯锻造、冲中心孔这两个工序可在 1 火次内完成。冲孔后内孔质量好, 无



图 15 开坯锻造过程
(a) 墩粗 (b) 拔长
Fig. 15 Blank forging process
(a) Upsetting (b) Drawing

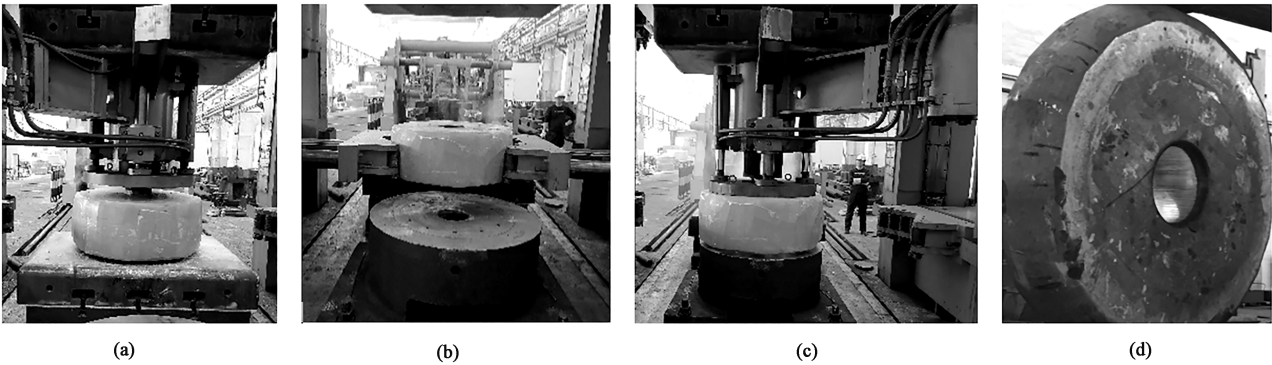


图 16 冲中心孔过程
(a) 预冲 (b) 转移 (c) 终冲 (d) 冲孔质量
Fig. 16 Process of piercing center hole
(a) Pre-piercing (b) Transferring (c) Final-piercing (d) Piercing quality

折叠、裂纹等缺陷，如图 16d 所示。

图 17a 为直筒毛坯芯棒拔长过程，V 型砧安装于第 3 工位，成形过程需 1 火次。图 17b、图 17c 分别为环形毛坯、直筒毛坯的马杠扩孔过程，分别使

用了大马架、小马架，马架安装于第 3 工位，扩孔过程需 1 火次。

图 18 为锥筒件模锻成形过程，模具采用了图 14 所示结构，凹模安装于工位 3，成形后由顶出杆

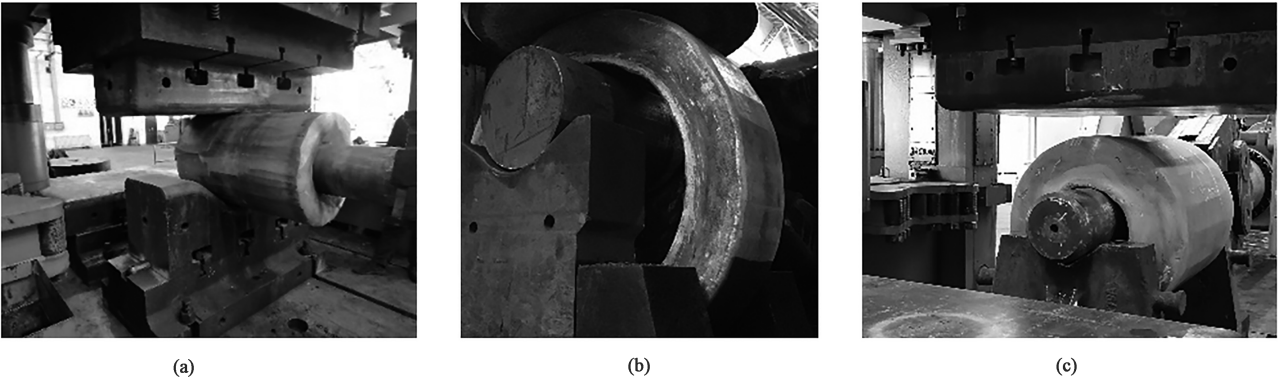


图 17 产品应用验证过程
(a) 芯棒拔长 (b) 环形坯马杠扩孔 (c) 直筒坯马杠扩孔
Fig. 17 Process of product application and validation
(a) Drawing out with core bar (b) Saddle forging of ring blank (c) Saddle forging of straight cylindrical blank

或打料杆将模锻件顶出,如图 18a 所示。滑块的加载速度为 $1.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,模锻成形后的锻件如图 18b 所示,模锻件侧壁的厚度精度为 $\pm 0.2 \text{ mm}$,底部的厚度精度为 $\pm 0.1 \text{ mm}$,满足工艺要求。

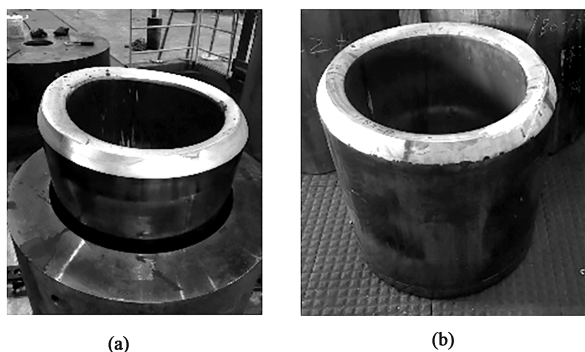


图 18 模锻成形过程 (a) 与模锻件 (b)

Fig. 18 Die forging process (a) and die forgings (b)

应用验证表明,自由锻造过程中更换工装次数少、操作简便、生产效率高;冲中心孔过程连贯、耗时较短,冲孔后坯料内孔质量好;模锻成形过程中滑块速度控制平稳、定位准确,锻件成形精度高。锻造液压机设备及工艺工装可较好地满足环筒件的制造需求。

4 结语

本文针对环筒件制坯效率低、成形精度差、工艺适应性差等问题,开发了铝合金环筒件专用锻造液压机,并设计、制造了自由锻造与模锻模具。工程应用表明,自由锻造、环筒件快速制坯、精密模锻功能在一台设备中实现了较好的兼容,环筒件的制备火次少、工装更换简单、易操作,生产效率得到了极大提高。该设备的研制与应用可为国内大型铝合金环筒件制造提供坚实的理论与实践经验。

参考文献:

- [1] 刘浩,付敏敏,姚梦,等. 航天大型铝合金环筒件制造技术现状与发展方向 [J]. 中国航天, 2021, (7): 39-41.
Liu H, Fu M M, Yao M, et al. Present situation and development trend of manufacturing technology of large aluminum alloy ring and cylindrical parts [J]. Aerospace China, 2021, (7): 39-41.
- [2] 聂绍珉. 现代大中型锻造液压机的特点及发展趋势 (上) [J]. 金属加工: 热加工, 2008, (23): 20-23.
Nie S M. Characteristics and development of modern medium and heavy forge hydraulic-press (1) [J]. MW Metal Forming, 2008, (23): 20-23.
- [3] 郝铁文,殷文齐,宋清玉,等. 100 MN 大型油压机的设计与

研究 [J]. 一重技术, 2014, (5): 4-6.

Hao T W, Yin W Q, Song Q Y, et al. Design & study of 100 MN oil press [J]. CFHI Technology, 2014, (5): 4-6.

- [4] 吴生富. 150 MN 锻造液压机本体组合结构研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
Wu S F. Study on Composite Structure of Body for 150 MN Hydraulic Press [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.
- [5] 郑文达,权晓惠,李俊辉. 锻造液压机的现状及其展望 [J]. 重型机械, 2012, (3): 2-10.
Zheng W D, Quan X H, Li J H. Development history and trend of forging hydraulic press [J]. Heavy Machinery, 2012, (3): 2-10.
- [6] 张伟伟,王小松,王仲仁. 重型液压设备本体结构的发展与创新 [J]. 锻压装备与制造技术, 2016, 51 (2): 12-18.
Zhang W W, Wang X S, Wang Z R. The development and innovation of body structure in heavy forging equipment [J]. China Metal Forming Equipment and Manufacturing Technology, 2016, 51 (2): 12-18.
- [7] 何海林. 2219 铝合金大型环件组织性能调控方法与工程应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2018.
He H L. Research on Method for Controlling Microstructure and Mechanical Properties of 2219 Aluminum Alloy Large Rings and Its Engineering Application [D]. Changsha: Central South University, 2018.
- [8] 祈磊,张亚飞,施立军. 6000 t 多功能液压机结构概述与建模分析 [J]. 机械设计, 2020, 37 (S1): 229-231.
Qi L, Zhang Y F, Shi L J. Structure overview and modeling analysis of 6000 t multi-function hydraulic press [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37 (S1): 229-231.
- [9] 辛向阳,刘方红,邓蜀宁. 大锻件锻造方法综述 [J]. 大型铸锻件, 1999, (1): 43-48.
Xin X Y, Liu F H, Deng S N. Summary of forging methods for large forgings [J]. Heavy Casting and Forging, 1999, (1): 43-48.
- [10] 阳代军,徐坤和,丁鹏飞,等. 2219 铝合金大直径圆锭铸造性能分析及其改进措施 [J]. 航天制造技术, 2014, (6): 1-5.
Yang D J, Xu K H, Ding P F, et al. Analysis and improvement measures on casting property of 2219 aluminum alloy large diameter round ingot [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014, (6): 1-5.
- [11] 张文学,徐坤和,阳代军,等. 大规格 2219 铝合金圆铸锭锻造开坯与质量分析 [J]. 航天制造技术, 2015, (6): 7-10, 14.
Zhang W X, Xu K H, Yang D J, et al. Analysis on process and quality of forging-cogging for large size 2219 aluminum alloy round ingot [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015, (6): 7-10, 14.
- [12] 吴长俊,易幼平,何海林. 变形温度对 2219 铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (19): 19-23.
Wu C J, Yi Y P, He H L. Effects of deformation temperature on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (19): 19-23.