

现代重型模锻液压机的关键技术研究

崔金达

天津市天锻压力机有限公司 天津 301800

摘要：现代重型模锻液压机是高端装备制造领域的核心基础设备，直接支撑航空航天、能源装备等关键领域的发展。本文围绕其核心构成、工作原理与工艺流程，重点研究机架结构设计与强度优化、超高压液压系统、模锻精度控制与误差补偿及智能化等关键技术。通过分析各技术的实际应用要点，结合工程实操细节，提出贴合生产需求的技术实施方案，解决设备运行稳定性、动力输出、精度控制等核心难题，为重型模锻液压机的技术升级、国产化推广及智能化运维提供理论与实践支撑。

关键词：现代重型；模锻液压机；核心构成；工艺流程；关键技术

引言：随着高端装备制造产业的快速发展，航空航天、能源等领域对大型复杂锻件的精度与质量要求不断提升，推动现代重型模锻液压机向高精度、高压化、智能化方向发展。目前，我国该类设备在核心技术、关键零部件等方面仍存在短板，部分依赖进口。基于此，本文聚焦现代重型模锻液压机的关键技术，系统分析其核心构成与工作机理，深入研究各关键技术的实操要点与优化路径，旨在突破技术瓶颈，提升设备国产化水平与运行效能，满足高端装备制造的实际需求。

1 现代重型模锻液压机的核心构成

1.1 重型模锻液压机的界定与分类

现代重型模锻液压机是高端装备制造领域的核心基础设备，其界定主要以额定工作吨位、压力等级及应用场景为核心标准，通常将额定吨位 $\geq 100\text{MN}$ 、可实现大型复杂锻件精密成型的液压机归为重型范畴，广泛应用于航空航天、能源装备、轨道交通等关键领域。分类上可按多维度划分，按结构形式可分为立式框架式、卧式挤压式，其中立式框架式因刚性好、操作便捷，是目前应用最广泛的类型；按驱动方式可分为泵直接驱动式和蓄能器驱动式，前者节能性突出，后者可实现短时间大流量供油，满足高强度模锻需求；按应用领域可分为航空航天专用、能源装备专用等，适配不同锻件的成型要求。

1.2 核心构成部件

现代重型模锻液压机的核心构成部件是设备稳定运行、实现精密模锻的关键，各部件协同配合，共同完成锻件成型作业，具体包括以下四部分：（1）机架系统。作为设备的承载基础，主要分为预应力机架和整体框架结构两种形式，由上横梁、下横梁、立柱等部件组成，核心作用是承受模锻过程中产生的巨大冲击力和偏载力，保障设备整体刚度与结构稳定性，避免因受力变

形影响锻件精度。（2）液压系统。是设备的动力核心，主要包含主工作缸、控制系统和辅助液压元件，主工作缸负责将液压能转化为机械能，提供模锻所需的巨大压力；控制系统精准调控压力、流量等参数；辅助液压元件则保障液压系统的稳定循环与安全运行。（3）模锻执行系统。核心由滑块和模具夹持装置构成，滑块可实现精准的上下往复运动，传递模锻动力；模具夹持装置能牢固固定模具，确保模具定位精准，防止模锻过程中模具偏移，保障锻件成型质量。（4）检测与反馈系统。主要由传感器和数据采集模块组成，传感器实时采集模锻过程中的压力、位移等关键数据，数据采集模块对数据进行快速处理并反馈给控制系统，为参数调整提供依据，保障模锻过程的精准可控^[1]。

2 现代重型模锻液压机原理与工艺流程

现代重型模锻液压机的核心是通过液压传动实现能量传递与精准控制，结合模锻工艺完成大型锻件的成型，其原理与工艺流程具有较强的专业性和系统性，具体如下：（1）核心工作原理。设备以帕斯卡定律为基础，通过液压系统将电能转化为液压能，再将液压能转化为机械能传递至模锻执行机构。液压泵输出高压油，经控制系统调控后输入主工作缸，推动活塞带动滑块向下运动，利用滑块与下模的挤压作用，使高温坯料在模具型腔中发生塑性变形，最终成型为符合要求的锻件。同时，预应力机架抵消模锻过程中的反作用力，检测与反馈系统实时采集压力、位移等参数，实现对成型过程的精准闭环控制，保障锻件精度与设备运行稳定性。（2）核心工艺流程。首先进行坯料准备，根据锻件尺寸与材质要求裁剪金属坯料，采用中频感应加热炉将坯料加热至规定锻造温度，不同材质坯料加热温度精准控制（如钛合金850-950℃、高温合金1100-1200℃），加

热后通过高压水枪冲洗去除表面氧化皮,再用专用工装修整坯料尺寸,确保坯料符合装夹要求。其次是模具安装与调试,采用起重机将上下模具精准固定在滑块与工作台的模具座上,借助百分表调整模具间隙,确保间隙均匀,同时校准模具定位精度,避免模锻时出现错位。随后进行模锻作业,通过机械手将加热后的坯料平稳放入下模型腔,启动设备后,滑块在液压系统驱动下带动上模匀速下行,根据锻件复杂度完成一次或多次挤压成型,过程中实时监测压力与位移参数。成型后滑块平稳回程,采用专用夹具取出锻件,先进行自然冷却或可控冷却至室温,再清理表面残留氧化皮与飞边,通过超声波探伤检测锻件内部缺陷。最后对设备进行维护,仔细检查模具磨损情况并及时打磨修复,排查液压系统油液液位与泄漏问题,确保后续作业正常开展,全流程严格遵循精密成型规范^[2]。

3 现代重型模锻液压机智能化控制与运维关键技术

3.1 机架结构设计与强度优化关键技术

机架作为现代重型模锻液压机的承载核心,其结构与强度优化直接决定设备运行稳定性,核心技术贴合工程实际,具体如下:(1)预应力机架设计技术。采用钢丝预应力缠绕技术与正交预紧结构,针对大型机架采用分段式缠绕工艺,控制缠绕张力误差在 $\pm 5\%$ 以内,通过液压拉伸器施加预紧力,抵消模锻过程中的反作用力,同时集成“闷车解脱”功能,当设备过载卡死时,可通过高压油缸二次拉伸螺栓并卸除垫片实现快速复位,保障连续生产。对于多向模锻机型,采用“钢丝缠绕预应力正交预紧机架”技术,解决正交载荷下机架受力干涉问题,提升疲劳强度与刚度。(2)机架结构选型与加工技术。根据设备吨位选择适配结构, $\leq 40\text{MN}$ 机型采用整体铸造式机架,大吨位机型采用组合预应力式机架,部分超大吨位机型可选用C形板预紧组合机架并优化结构设计。加工过程中,采用大型数控落地镗铣床进行整体加工,控制横梁、立柱的平面度与平行度误差 $\leq 0.02\text{mm/m}$,关键焊缝采用窄间隙埋弧焊工艺,焊后进行消除应力热处理,避免焊接变形影响结构强度。(3)强度与刚度优化技术。采用有限元仿真分析技术,建立机架三维力学模型,模拟模锻过程中不同工况下的应力分布,重点优化横梁与立柱的过渡圆角、焊缝结构等应力集中部位,将最大应力控制在材料许用应力的80%以内。通过试验测试机架的静态刚度与动态刚度,采用加厚关键受力部位、增设加强筋等措施,使机架刚度优于1/8000,满足高精度模锻需求。同时对机架疲劳寿命进行分析计算,通过结构改进延长使用寿命^[3]。

3.2 超高压液压系统关键技术

超高压液压系统是重型模锻液压机的动力核心,需解决高压密封、缸体强度、参数控制等实际技术难题,具体关键技术如下:(1)超高压大间隙密封技术。针对超高压工况下缸壁膨胀导致的间隙增大问题,采用“支撑件+O形圈”补偿式密封结构,支撑件选用弹性模量高、耐磨性强的材料,装配时施加预压力压实O形圈,工作时高压油推动支撑件向外膨胀,补偿缸壁变形间隙,防止密封件被挤入间隙破坏。该技术可适配80-130MPa超高压工况,最大间隙补偿量可达2.5mm,已在200MN、100MN级别超高压液缸中成熟应用。(2)新型超高压液缸结构技术。采用剖分嵌入式缸底结构,替代传统整体式缸底,避免缸底与缸筒过渡处的应力集中,减少疲劳裂缝风险;缸筒采用预应力结构设计,通过外层缠绕钢丝施加预紧力,抵消工作时缸筒的径向膨胀,提升缸体承载能力。减少主工作缸数量、增大单个缸体吨位,在较小结构空间内实现高压制比压,使超高压压机重量仅为同等吨位普通压机的1/3~1/2。(3)超高压液压元件与控制技术。核心液压元件采用国产化研发产品,柱塞泵选用恒功率变量泵,控制流量波动 $\leq \pm 2\%$,伺服阀采用电液伺服比例阀,响应时间 $\leq 5\text{ms}$,保障压力与流量的精准调控。采用恒应变速率控制策略,通过闭环控制算法,将锻造速度控制在0.001-10mm/s范围内,适配钛合金、高温合金等难变形材料的等温锻造需求,同时采用负载敏感与节能控制技术,降低能耗。

3.3 模锻精度控制与误差补偿关键技术

模锻精度直接决定锻件质量,需针对设备自身、工艺环境等误差来源,采用精准控制与补偿技术,具体关键技术如下:(1)精度检测技术。构建多模态感知网络,在滑块、工作台、模具等关键部位布置高精度传感器,压力传感器精度达0.1%,位移传感器分辨率达0.01mm,实时采集压力、位移、温度等参数,确保数据采集的全面性与准确性。采用边缘计算节点进行数据预处理,快速过滤冗余数据、降低传输延迟,同时集成机器视觉检测系统,搭配红外测温模块,实现热态锻件在线测量,尺寸检测精度达 $\pm 0.5\text{mm}$,温度检测精度达 $\pm 2\%$,可实时反馈锻件成型状态。(2)主动误差补偿技术。建立机架变形弹性动力学模型,通过拉格朗日函数推导机架变形量、实际锻件尺寸与传感器测量尺寸的数学关系,实现一次补偿;结合主缸压力变化工况,分析不同升压速率对锻件变形量的影响,引入二次补偿控制,通过非线性补偿控制器与高速电磁阀(响应时间 $< 8\text{ms}$),实现误差实时修正,将保压阶段压力波动控

制在 $\pm 0.5\text{bar}$ 内,位置跟踪误差 $< 0.1\text{mm}$,有效抵消设备运行中的动态误差。(3)模具与工况误差控制技术。采用滑块导向优化技术,选用X形或八面导轨、加长导路结构,搭配高精度润滑系统,抑制滑块倾斜,确保上下模闭合精度;定期对模具进行精度检测与磨损修复,采用表面硬化处理技术延长模具使用寿命,减少模具磨损带来的精度误差。严格控制坯料加热温度均匀性,误差控制在 $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内,通过抛丸处理去除表面氧化皮,避免坯料尺寸偏差与表面缺陷影响模锻精度,同时优化坯料定位工装,提升装夹精度^[4]。

3.4 现代重型模锻液压机智能化关键技术

依托工业4.0技术,实现重型模锻液压机的智能化控制与运维,核心关键技术贴合实际生产需求,具体如下:(1)数字孪生与虚拟仿真技术。构建设备数字孪生模型,融合设备几何参数、运行数据与工艺参数,实现物理设备与虚拟模型的毫秒级同步,通过DEFORM等有限元分析软件,在物理试模前优化模具流道与坯料分配,提升材料利用率3%-5%。精准模拟模锻过程中的应力、温度分布,预判折叠、裂纹等工艺缺陷,提前优化工艺参数,减少试模次数,将换模时间缩短30%以上,大幅提升生产效率。(2)AI驱动的智能控制技术。集成PLC控制系统与AI优化算法,基于LSTM神经网络建立压制过程模型,输入坯料材料、尺寸、加热温度等信息后,自动生成最优工艺参数,实时动态调整压制速度、保压时间,将生产节拍压缩至45秒/件,锻件合格率提升15%。搭载多维度监测模块,具备异常工况预判功能,可快速识别模具偏载、油液泄漏、温度异常等隐患,预警准确率达92%以上,避免设备故障停机。(3)智能运维与远程控制技术。搭建云端协同管理平台,通过5G高速网络实现工艺参数一键下发与远程实时监控,支持多终

端查看设备运行状态、故障报警与远程诊断,降低现场运维成本。采用预测型维护系统,基于设备运行数据与振动监测模块,结合大数据分析技术,精准分析零部件疲劳状态,提前制定维护计划,延长设备使用寿命10%以上。集成AGV智能物流系统与六轴机器人,实现坯料输送、锻件取放、成品转运全流程自动化,构建无人化生产流水线,进一步提升生产智能化水平^[5]。

结束语:本文围绕现代重型模锻液压机的关键技术展开全面研究,明确了设备核心构成与工作原理,系统阐述了机架结构优化、超高压液压系统、精度控制与误差补偿及智能化等核心技术的实操方案。研究表明,各关键技术的协同优化的可有效提升设备稳定性、精度与生产效率,解决实际生产中的核心难题。后续可针对超大吨位设备技术、核心零部件国产化等方向进一步深入研究,持续推动现代重型模锻液压机技术迭代,为高端装备制造产业高质量发展提供更有力的设备支撑。

参考文献

- [1]王鑫,石磊,李明珠.基于等温模锻和自由锻工艺的120MN多功能重型锻造液压机有限元分析[J].锻压装备与制造技术,2024,59(5):19-25.
- [2]张齐.多向模锻制造技术及其装备研制[J].科学与财富,2021,13(33):49-50.
- [3]李明珠,苏德林,王鑫.兼顾模锻、等温锻、自由锻的重型多功能液压机结构设计概述[J].锻压装备与制造技术,2024,59(6):7-13.
- [4]胡明杰,胡凡澍,刘飞,等.YJ44单柱式伺服锻造液压机关键技术研究[J].锻压装备与制造技术,2023,1:16-18.
- [5]任运来,李明权,任杰,刘世超,聂绍珉.高温高压阀体的多向模锻技术研究[J].重型机械,2015(5):1-5.