

综述

精锻机关键技术研究进展

马鹏举¹, 兰小龙¹, 王文杰¹, 刘勇², 田洁²

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 西安创新精密仪器研究所 技术部, 陕西 西安 710300)

摘要: 精锻机广泛应用于国防、航空航天领域特殊原材料的加工, 已经成为“大国重器”。介绍了精锻机主机锻造箱的最新研究成果。基于锤头运动方式的不同对主机锻造箱进行区分, 并总结了其外部箱体和内部锤头的设计及优化过程。同时, 对有关操作机夹头结构的研究进行了梳理。结合精锻机工作原理, 分类论述了锻造过程中锤头同步运动、夹头旋转和操作机轴向进给的控制难点及解决方法。概述了精锻机整体控制系统的研究现状, 并在此基础上提出了专用数控系统的设计。探究了精锻机工艺参数对锻件质量的影响, 提出了采用仿真优化与实时监测相结合的方法来提高锻造效率和精度。最后, 总结了精锻机设备的全面国产化研发思路, 展望了精锻机的发展方向。

关键词: 精锻机; 主机锻造箱; 操作机; 控制系统; 径向锻造工艺

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.001

中图分类号: TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 11-0001-15

Research progress on key technology for precision forging machine

Ma Pengju¹, Lan Xiaolong¹, Wang Wenjie¹, Liu Yong², Tian Jie²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Engineering Department, Xi'an Innovation Precision Instrument Research Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract: Precision forging machine is widely used in the processing for special raw materials in the fields of national defense and aerospace and has become a “great power” gradually. Therefore, the latest research results of forging box of main engine for precision forging machine were introduced. Then, the forging box of main engine was distinguished based on the different movement modes of hammer head, and the design and optimization process of external box and internal hammer head were summarized. At the same time, the research on the collet structure of manipulator was reviewed. Furthermore, combined with the working principle of precision forging machine, the control difficulties of hammer head synchronous movement, collet rotation and axial feeding of manipulator during the forging process were discussed, and the solutions were proposed. In addition, the research status of integral control system of precision forging machine was summarized, and the design of special CNC system was put forward on this basis. The influences of process parameters for precision forging machine on forging quality were investigated, and a method combining simulation optimization and real-time monitoring was proposed to improve forging efficiency and accuracy. Finally, the overall domestic research and development ideas of precision forging machine equipment were summarized, and the development direction of precision forging machine was prospected.

Key words: precision forging machine; forging box of main engine; manipulator; control system; radial forging process

锻造成形是机械产品加工过程中不可缺少的一个步骤, 是机器设备、汽车、船舶等领域一些金属零部件制坯的重要手段。传统锻造工艺以人工操作为主, 生产效率低, 锻件质量不高^[1-2]。径向锻造是一种新型的锻造工艺, 是基于四锤头的全方位径向锻造模

式, 专门用于加工实心或空心长轴类零件^[3-5]。

在径向锻造变形过程中, 工件受三向压应力, 有利于修复其内部疏松、缩孔等组织缺陷; 坯料总变形率的增加, 提高了锻件的生产率和成材率; 锻打过程产生的变形热减少了锻造加热火次和能源消耗^[6-8]; 径向冷锻^[9-10]使坯料氧化脱碳的可能性大大降低。因此, 径向锻造工艺非常适用于极端环境下的高强度、难变形的合金轴类件的锻造, 已经逐渐成为锻造工艺发展的重要方向之一。

实现径向锻造工艺的设备即为精锻机, 国外又

收稿日期: 2021-12-01; 修订日期: 2022-03-08

基金项目: 国家科技重大专项 (2019ZX04018001-9)

作者简介: 马鹏举 (1962-), 男, 博士, 副教授

E-mail: lanxlbuaa@126.com

称径向锻造机，是一种由 4 个两两对称锤头对金属坯料进行高频锻打的短冲程压力机^[11]，其集液压传动、微电子、自动控制、网络通讯、传感测试等相关技术于一体，是少、无切削加工的先进设备^[12]。精锻机完美实现了径向锻造的工艺特点，非常契合我国锻造工业的发展需求^[13]。

精锻机广泛应用于各领域轴类件、锥形件和薄壁管的生产。在国防工业材料加工领域^[14]，炮管和速射武器身管普遍采用径向锻造，锻件具有较好的表面光洁度和较小的内部缺陷，炮管内孔的膛线精度得到了大幅度提高；在机械加工领域^[15]，各种机床的切削刀具、重型设备的零部件、高载荷模具等的原材料——特种钢材多是由精锻机径向锻造而成；在轨道交通领域^[16]，铁路车轴和高精度外形的空心驱动轴，以及汽车镁合金材料均采用径向锻造方式，可减少原材料费用和加热燃料的消耗；在航空航天领域^[17]，精锻机专门适用于锻造变形抗力大和导热系数小的模具钢、低塑性高强度的难熔金属及高温合金等难变形材料。密封接头、球形高压储气罐和火箭用喷管等航空航天典型零件均采用径向锻造工艺。精锻机锻造的带有台阶内孔的细长类零件，是航空发动机中动力传输的关键部件。

国外径向锻造技术和设备的研发已经十分成熟，国际上通用的精锻机 GFM-SX 型、GFM-SKK 型和 GFM-RF 型均由奥地利公司研发，SMS-SMX 型精锻机则由德国 SMS MEER 公司自主研发。世界上已经有许多国家使用精锻机大量生产高强度合金钢和难

变形合金等工业产品^[18-20]。

国内精锻机自主研发进展缓慢，有关精锻机控制系统的研究介绍更是稀少，直至今日精锻机设备仍然需要依靠国外进口。随着国家对核心锻件的芯部和表面精度提出了更高的要求，精锻机在锻造加工行业的应用越来越普遍，精锻机设备及控制系统的全面国产化已成为我国锻压行业的迫切需要，精锻工艺的深入研究也刻不容缓。

本文的主要内容便是对精锻机关键部件及其工作原理进行分析，针对其锻造过程提出合理的控制策略，在此基础上提出整体数控系统的设计思路，使其平稳高效运行，利用先进的算法对锻造工艺参数进行优化，以求最大程度地发挥出精锻机的性能和优势。通过对精锻机目前已有研究的梳理和阐述，总结出精锻机未来的研究重心和研究思路，同时为本行业的研究人员提供较为完善的参考资料，加速国内精锻机的自主研发进程。

1 精锻机机械设备

1.1 精锻机组成及工作原理

精锻机分为主机锻造箱和操作机两大机械部分，其中主机锻造箱包含齿轮传动箱体、锻造箱体和内部的锤头结构，操作机夹头装配在主机锻造箱两侧。此外，精锻机还配有调节装置、液压驱动装置以及润滑液压等辅助装置，如图 1 所示，其中图 1b 中箭头表示运动和旋转方向。

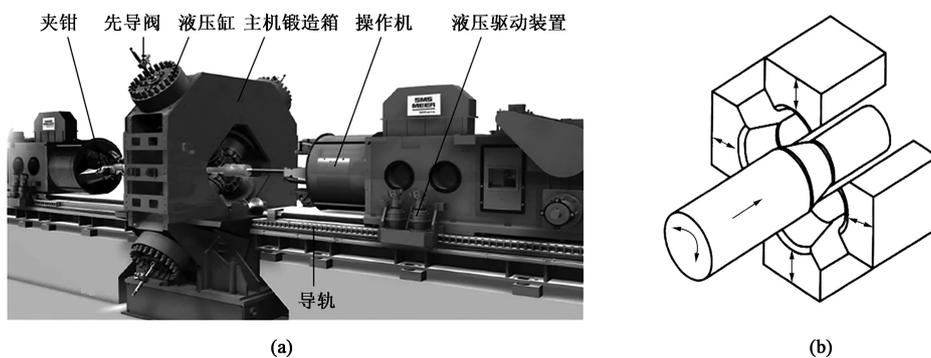


图 1 精锻机整机结构 (a) 及径向锻造原理 (b) 示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of complete structure for precision forging machine (a) and radial forging principle (b)

在实际工作中，操作机夹头夹持坯料沿导轨方向送入主机锻造箱接受锤头的高频锻打，同时在锤头锻打间歇期带动坯料沿径向自旋转。通过快速调整坯料轴向进给速度补偿锻件锻后的伸长量，同时根据主机锻打频率来调节坯料旋转速度，最终完成

工件的高质量锻造。

1.2 主机锻造箱

1.2.1 主机锻造箱类型

主机锻造箱是精锻机完成锻打工作的核心部件，锻造箱体和其中 4 个相互正交的锤头装配成一个整

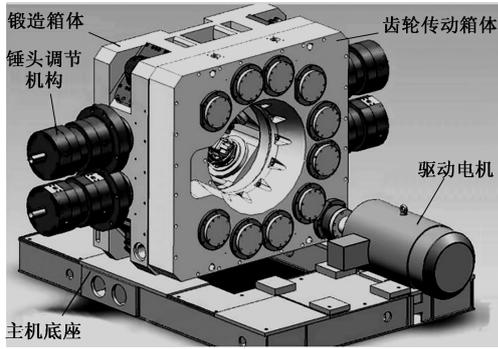


图 2 主机锻造箱 3D 模型

Fig. 2 3D model of forging box for main engine

体，如图 2 所示。驱动电机负责提供源动力，齿轮装置实现锻造力的均匀分散传动，4 锤头的对称布置使各向的锻造力相互抵消，而锤头通过位置调节可获得不同的锻造尺寸，实现不同规格及截面形状的锻件输出。主机锻造箱主要区别在于内部锤头锻

打和位置调节的方式。

李佳等^[21]首先基于 GFM 公司研制的精锻机系列阐述了 3 种锤头位置调节方式的实现过程，如图 3 所示。SX 型精锻机采用双偏心结构，驱动电机驱动齿轮传动箱内偏心轴旋转，从而带动锤头往返运动，液压缸带动偏心轴旋转，实现锤头位置的调整；RF 型精锻机通过改变液压缸的油液体积实现锤头行程调节；SKK 型精锻机是目前市场上最先进的精锻机，通过驱动电机驱动蜗轮蜗杆带动丝杠螺母转动，实现锤头往复正弦运动，锤头在锤击工件时处于减速阶段，不会对锻造箱体进行较大的冲击。苏建婷等^[22]简要概括了精锻机不同类型主机锻造箱的特点，指出机械式主机锻造箱的锤头锻打频率快，但其对摩擦材料的选用和制造要求极高，而液压式主机锻造箱具有缓冲和能量蓄存的特点，锤头锻造力和进给速度均能被很好地控制。

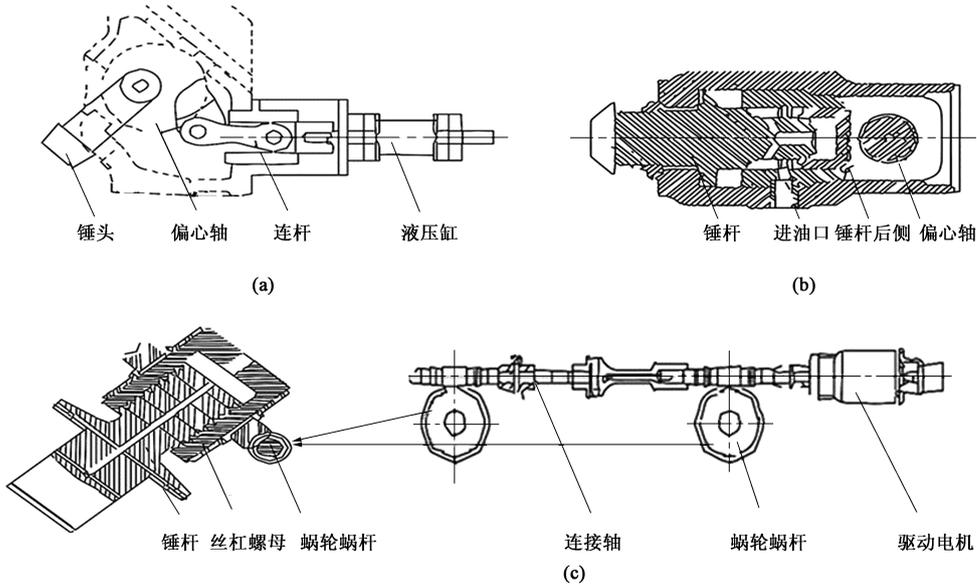


图 3 不同类型精锻机锤头结构模型图

(a) SX 型 (b) RF 型 (c) SKK 型

Fig. 3 Hammer head structure model drawings for different types of precision forging machine

(a) SX type (b) RF type (c) SKK type

武哲等^[23]详细地阐述了国外最新的精锻机产品，分为液压式和机械式。液压式 SMX 型精锻机如图 4 所示。其锤头分为两级驱动，一级先导缸伺服控制，二级输出缸随动控制，对每个锤头的速度、回程、锻造精度进行精准控制。锤头驱动过程中油液单向流动，具有振动低、做功行程短、压缩容积小等开拓性优势。SMI 系列更在 SMX 型基础上增加了先进的过程性能及可视化计算机控制系统、操作机协调控制系统等，锻打频率大大提高。

机械式的最新产品则是 GFM 公司生产的基于双冲程作用机制的 DSR 型精锻机，如图 5 所示。该精锻机的锤头采用独特的“椭圆驱动轴装置”，椭圆驱动轴转动时各部件按图 5b 所示的箭头方向运动，在此特殊装置下，精锻机具备 2 倍的锻打频率以及重叠的锻造模式，经实验结果表明，该 8 锤头精锻机极大地提高了锻件的尺寸精度及表面质量，大幅提升了锻件外径壁厚比，有利于将钢管的锻造极限延伸至更薄壁。

杨华等^[24]针对锤头同步度、锻造力、锻造频



图 4 SMX 型液压式精锻机

Fig. 4 Hydraulic precision forging machine for SMX type

次、锻造精度和安全经济实用性的性能评价指标，对比分析了不同主机锻造箱对锻造性能的影响，如表 1 所示。对比结果表明：GFM 公司生产的 3 种型号的精锻机均保证了锤头同步，但锻透性不佳。而 SMS 公司生产的液压式精锻机的锻造力和压下量能够灵活控制，但是所得锻件的尺寸精度和表面质量还有待提升。

上述研究详细介绍了精锻机锤头运动的机械原理，总结了主机零部件结构等精锻机自主研发过程的共性难点，其为后续研究者需要首要关注的因素。

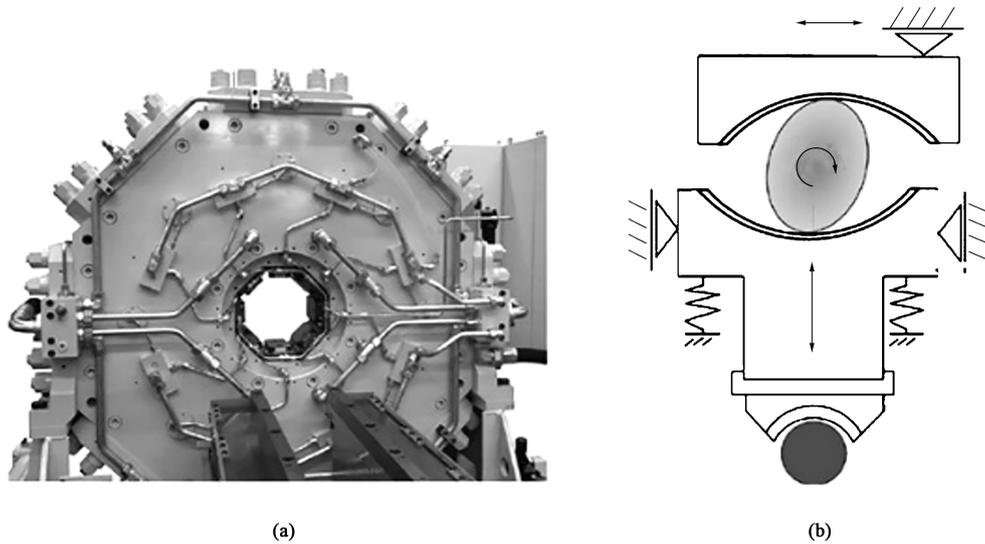


图 5 DSR 型机械式精锻机主机 (a) 及锤头 (b) 示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of main engine (a) and hammer head (b) for DSR type mechanical precision forging machine

表 1 精锻机综合性能的对比分析

Table 1 Comparative analysis of comprehensive performance for precision forging machine

类型	锤头同步度	锻造力	锻造频次	锻造精度	过载保护	维护成本	运行费用
GFM-SX 型	齿轮同步传动	传动效率低，锻造力小	锻造频次低	锻造中心有误差	环形液压缸泄压	主机设备故障点多	操作简单，能耗低
GFM-SKK 型	齿轮同步传动	无阻力传导，锻造力较大	响应速度快	锤头锻造调节准确	无保护	机械液压结构简单	自动化程度高
GFM-RF 型	滞后或超调	飞轮空转加大锻造力	控制难度大	控制补偿精度较高	液压缸保护功能	结构简单，故障易解	锻造效率高
SMS-SMX 型	滞后或超调	锻造力大，振动小	频次道次可调	液压滞后精度较低	安全阀控制	液压庞大，难维护	油泵不间断工作

1.2.2 锻造箱体结构设计及优化

传统锻造箱体自身拆卸复杂、不易维修，且在其运行过程中频繁出现断裂失效等事故，经常造成经济损失。此外，4 锤头同步锻打冲击可能会引起锻造箱体的共振，对其结构强度是个极大的考验。部分学者针对锻造箱体的设计和优化方向展开了详细研究。

钟丽萍^[25]在实际工况载荷边界条件下，用 ANSYS 的一阶优化方法对 10 MN 4 锤头液压式精锻机锻造箱体各尺寸参数进行了优化设计，最终找到了能够有效降低锻造箱体最大应力的结构参数，该参数使得锻造箱体的危险点应力减小 15.5%，延长了使用寿命。牛勇等^[26]利用 ABAQUS 有限元分析软件

对 25 MN 4 锤头精锻机进行了上、下砧座的受力分析, 得到了锻造箱体的应力分布云图, 结果表明, 所设计的锻造箱体满足强度和刚度要求。段志东等^[27]对 160 t 精锻机在锻造过程中的箱体振动进行了模态与瞬态动力学分析, 获取了锻造箱体模态频率和关键部件的动等效应力响应曲线, 如图 6 所示, 得出了锤头锻打时动等效应力波会近乎全部释放, 使得锻造箱体不会产生共振这一重要结论。

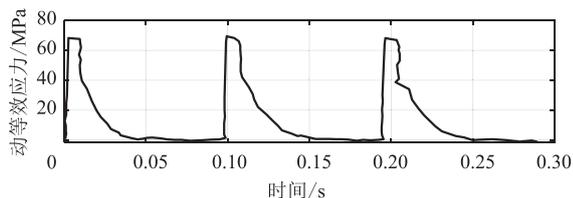


图 6 锻造箱体最大动等效应力响应

Fig. 6 Maximum dynamic equivalent stress response of forging box

精锻机主机的自主设计是该设备国产化进程中的一个关键节点。兰州兰石集团有限公司葛鹏^[28]首次完整地阐述了 1.6 MN 精锻机主机的详细设计流

程。首先, 规划了传动齿轮箱和锤头调节装置的功能, 重点介绍了主机锻造箱双偏心结构的工作原理, 并对锻造变形力、锤头运动速度及行程、变形功等基本参数和锤头位置、锻造反馈力等重要控制参数进行计算, 这是主机设计的理论依据。然后, 对锻造箱体进行有限元强度分析、瞬态动力学分析和疲劳分析, 仿真显示, 最大等效应力为 59 MPa, 远低于材料的屈服强度; 结构固有频率和外载荷频率相差较大, 外载荷不会激发机构共振; 高周疲劳极限为 115 MPa, 低于一般工程设计的疲劳极限 147 MPa, 证明了该锻造箱体结构在设计载荷作用下满足强度、刚度和永久设计的要求。该设计方案的理论计算部分为精锻机的研制提供了非常好的指导。

1.2.3 主机锻造箱内部锤头结构设计

精锻机锤头具有多种形状, 对应于不同截面的锻造, 各类锤头模型如图 7 所示。锤头结构对锻件表面精度和整体质量有着至关重要的影响, 同时锤头的制作成本也非常高, 多次锻造的磨损补偿和修复也必不可少。

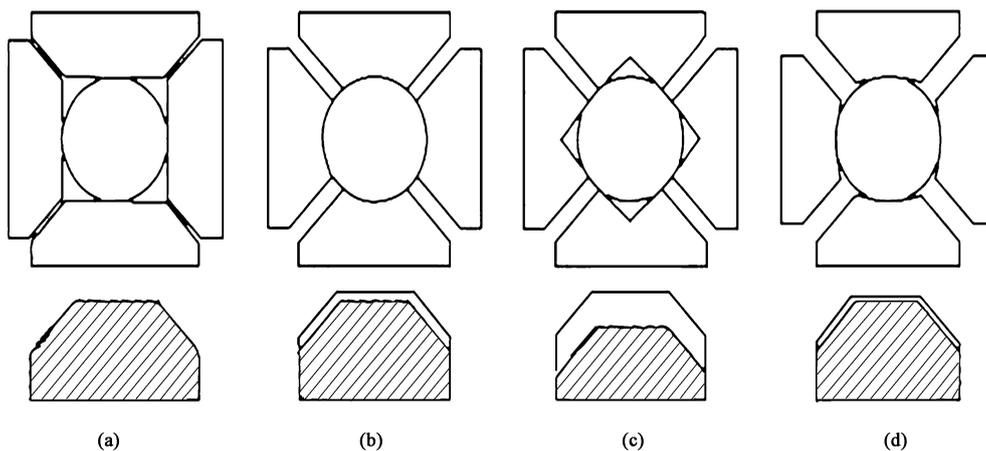


图 7 各类锤头的径向锻造模型及径向剖视图

(a) 平锤头 (b) 圆弧锤头 (c) V 型锤头 (d) 样条曲面锤头

Fig. 7 Radial forging models and radial section views of various hammer heads

(a) Flat hammer head (b) Arc hammer head (c) V-shaped hammer head (d) Spline curved hammer head

从锤头的锻造面出发, Ghaei A 等^[29]仿真发现锤头在横截面角度为 180° 时的锻件载荷和等效应变达到最小值, 锻件的外表面产生较大的拉应力而引起裂缝。对比之下, 横截面角度为 135° 时的锻件载荷和等效应变达到最大值, 有利于降低锻件裂纹的发生概率。Wu Y J 等^[30]发现锤头与坯料接触的长度会影响锻件端面的凹坑深度, 其原因为: 锤头与工件之间的摩擦作用导致冗余变形, 从而使轴向金属流的径向分布不均匀。卫建军等^[31]分析了不同锤

头锻造时的材料流动模式和应力、应变分布, 对比发现, 由于预成形面的锤头与锻件接触面积大, 锻造力更易深入锻件内部, 但锻件会增加不必要的余面。而使用双圆弧形面的锤头锻造出的工件内部质量较好, 锻件凹坑明显减少, 成材率和生产率均有所提高。Afrasiab M 等^[32]提出根据锻件几何形状优化曲面锤头的形状和条件的分析方法, 测试发现, 具有二次曲线轮廓的锤头具有最好的残余应力, 但需要克服的径向压力阻力最大, 而具有三次曲线轮廓的锤

头则仅需提供较小的锻造力即可获得理想的锻造质量。

锤头的形状也会对锻造性能产生影响。张建^[33]获取了 M2 高速钢在径向锻造过程中的变形应变场相关图谱及锻件的颗粒度和不均度信息,发现采用万能锤头锻造可以产生弥散均匀的碳化物组织,有较好的锻透性。除此之外,还有一种 V 字锥型锤头的设计方案,经过对坯料金属流动及各变形区域进行仿真分析,得知采用 V 字锥型锤头锻造会增加金属横向变形,有利于其轴向拉应力状态的改善和芯部质量的提高^[34]。贾斗余^[35]首先根据锻件内部的应力状况提出了平锤头的改进方法,即利用锥面锤头实现小锻造比的锻造效果,以提升锻件内部的均匀度。然后设计了一种新型锤头模型,有限元分析结果表明,其成功地弥补了锥面锤头锻透性不足和锻后形状不规则的缺点。

负鹏飞等^[36]统计分析得出了锤头磨损和锻造量之间的数学规律,得出锻造量的增加会带来锤头磨损的增加,磨损区一般集中于锤面较高一侧等结论。曹敏曼^[37]提出了使用再制造堆焊技术对锤头的磨损进行修复,通过对堆焊过程中温度场和应力场的模拟研究,得到了合理的焊接速度和预热温度以避免焊接缺陷,还提出了热处理法、锤击处理法等,以减小焊接残余应力,保证焊接质量。

1.3 操作机夹头

操作机夹头作为精锻机主要的辅助设备之一,是实现工件夹持、轴向进给和径向旋转的重要机构,其整体模型如图 8 所示。

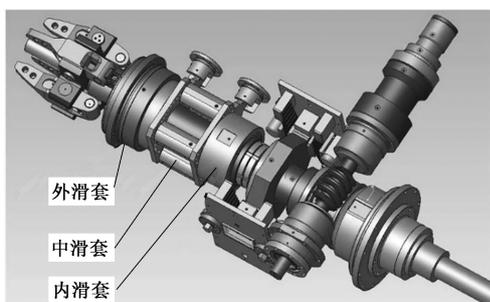


图 8 精锻机夹头 3D 模型

Fig. 8 3D model of precision forging machine collet

夹头需要设置合适的夹持直径以适应工件毛坯,需要提供足够的夹持力以实现轴向大范围无级调速的进给,还需具有高频制动松开功能和定位夹紧功能,匹配主机锤头锻打频率实现工件的旋转。操作机夹头的机械设计和运动的实现,是精锻机锻造工作顺利完成的关键。

张信军^[38]针对 SX55 精锻机设备展开研究,通

过对其旋转参数的数学计算,提出了间歇旋转系统、夹紧系统、行走系统和制动系统的设计方案,该设计方案属国内首次提出,具有重要参考意义。同时,对精锻机夹头滑套进行几何建模发现,轴套受到压力后产生的焊缝处的轴向应力较大,易导致结构破坏。杨瑛娣^[39]经过有限元分析验证了内滑套花键焊缝位置的轴向应力过大是造成断裂损坏的主要原因。其提出的修复建议包括加长焊缝尺寸、焊缝轴向后移远离轴向拉应力最高的位置、调整施焊顺序、采用局部加热等方法。该研究可作为夹头机械制造的重要参照。

李阳等^[40]详细阐述了夹头 3 个滑套结构及运行原理,提出的夹头间歇缓冲机构如图 9 所示。夹头旋转由驱动电机驱动蜗轮蜗杆旋转带动内滑套转动实现,夹头内减震碟簧负责缓冲旋转的停滞,抱闸避免物料锻造时扭曲变形,板簧则负责缓冲物料的延展造成的夹头轴向推进停滞;而中滑套和外滑套则通过与液压缸相连而相对滑动,实现夹头张开和闭合功能;夹头底部通过螺母与液压缸活塞杆前端的螺纹连接,实际锻造时液压缸的活塞杆借助液压伺服系统对夹头的移动速度进行调整,最终实现了工件的轴向精确移动。

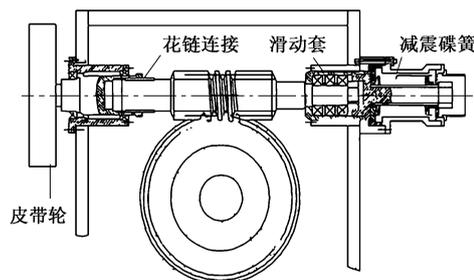


图 9 夹头间歇缓冲机构

Fig. 9 Collet intermittent buffer mechanism

刘贵明等^[41]提出夹头间歇旋转的实现方案。变频电机经皮带轮带动一侧蜗杆旋转驱动蜗轮(即夹头)的持续旋转,另一侧蜗杆由液压缸驱动做水平往复运动,蜗轮蜗杆的啮合和分离,使得蜗轮受复合运动进而完成夹头的间歇旋转,两个蜗杆需同步运动以保证旋转过程的平稳实现。

周兵等^[42]在此基础上完成了操作机夹头旋转补偿系统的设计,如图 10 所示。对该系统的工作参数展开了具体计算,包括锻打频率、操作机旋转转速 n_3 、补偿液压缸连接的飞轮转速 n_2 、补偿皮带传动比和蜗轮蜗杆传动比等。在对补偿系统各工作环节进行能量分析后,理论计算了操作机平稳运行时的液压缸压力值,可用作实际参考。

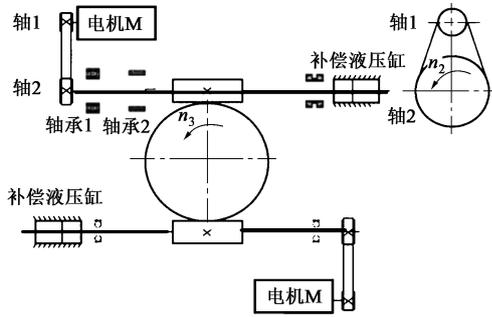


图 10 夹头旋转补偿系统原理图

Fig. 10 Principle diagram of collet rotation compensation system

由于精锻机的高温工作环境，操作机夹头位移的实时反馈是设计的难点。王飞伟等^[43]基于精锻机夹头精准快速移动的需求，介绍了先进的磁致伸缩位移传感器，实时检测夹头位移，保证精锻机夹头轴向移动的高精度和可靠性。

2 精锻机控制系统

2.1 关键部件的控制

精锻机控制的整体要求为快速性、平稳性和高精度。其中，锤头锻造行程同步控制、夹头间歇旋转控制、操作机轴向进给的精确控制以及锻件形变引起的伸长量补偿控制，是精锻机的关键控制点。

精锻机 4 锤头的同步运动保证了其闭合直径无偏差，是锻造精度的保障。锤头由驱动电机驱动，本质上是电液伺服控制。

武哲^[44]针对精锻机锤头液压伺服系统展开了具体研究，首先构建了 AMESim 模型，如图 11 所示。通过采取 PID 闭环加主从控制方式，验证了 PID 各参数对系统同步误差和稳定性的影响，得到了最佳的工作参数，最终得到 2 锤头先导缸同步响应曲线，如图 12 所示。还得出锤头重力负载对同步伺服系统动态特性的影响规律：锻造过程中 4 锤头的运动

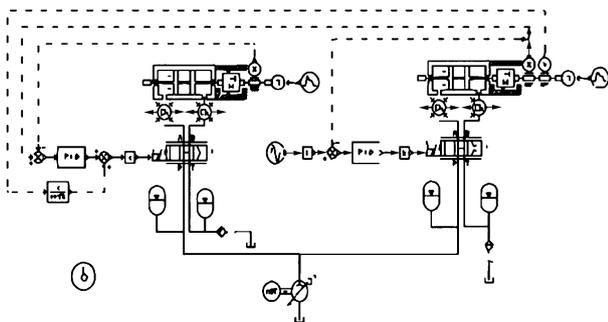


图 11 液压缸 AMESim 仿真模型结构图

Fig. 11 AMESim simulation model structure diagram of hydraulic cylinder

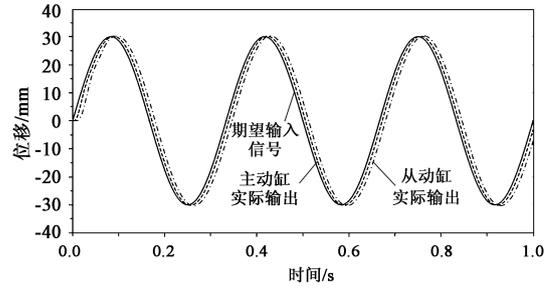


图 12 2 锤头先导缸同步响应曲线图

Fig. 12 Synchronous response curves of pilot cylinder for two hammer heads

速度相对较大，会产生较大的同步误差；而回程时不同锤头的位移曲线有不同程度的滞后，导致同步误差呈进一步增大的趋势。

夹头的间歇旋转使工件在锻造过程中受到均匀锻打，不会产生扭曲，保证其内部质量。

太原科技大学的李春^[45]对 SX-32 型精锻机夹头旋转控制系统展开了深入研究。首先，将液压驱动的夹头旋转机构等效为一般的电液伺服结构，利用 AMESim 软件搭建起基于伺服阀、液压缸及位移传感器等环节的电液伺服系统模型，得到的电液伺服阀近似传递函数如式 (1) 所示，得到液压缸传递函数如式 (2) 所示。

$$\frac{Q_o}{I_c} = \frac{K_{sv}}{s^2 + \frac{2\xi_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} = \frac{0.056}{\frac{s^2}{502.4^2} + \frac{2 \times 0.7}{502.4}s + 1} \quad (1)$$

式中： Q_o 为伺服阀输出流量； I_c 为伺服阀输入电流信号； s 为拉普拉斯变换因子； ω_{sv} 为电液伺服阀固有频率； ξ_{sv} 为电液伺服阀阻尼比； K_{sv} 为静态流量放大系数。

$$\frac{X_p}{Q_L} = \frac{1}{A_p} \frac{1}{s \left(\frac{s}{W_h} + \frac{2\xi_h}{W_h}s + 1 \right)} = \frac{1}{15.26 \times 10^{-4}} \frac{1}{s \left(\frac{s^2}{156.4^2} + \frac{0.4}{156.4}s + 1 \right)} \quad (2)$$

式中： X_p 为液压缸活塞位移； Q_L 为液压缸流量； ξ_h 为液压阻尼比； A_p 为液压缸活塞面积； W_h 为液压缸频率。

然后，提出了模糊自整定 PID 的控制算法，联合 Simulink 进行夹头振荡控制系统的仿真分析。结果显示，该算法满足夹头在高频间歇旋转时的控制精度，系统在 5 Hz 正弦信号下仍有很好的跟随特性。

操作机夹头送料时的轴向运动也是精锻机的重要控制过程，需保证在最短时间内完成定位动作，

且符合规定精度要求。

张新玉等^[46]研究了精锻机在实际锻造过程中操作机夹头夹持工件沿导轨的轴向进给运动,基于各部件的数学模型建立了电液位置伺服控制系统。基于系统需要快速响应和稳定不超调的特点,提出了减速比曲线的定位控制算法,如图 13 所示,其中, $P_1 \sim P_5$ 为操作机速度切断点, $V_0 \sim V_4$ 为操作机实时速度。通过设定多个速度切断点实现了减速制动,利用 Simulink 进行模拟仿真,结果表明,夹头在 1000~2000 mm 的轴向运动过程中,位移曲线平稳无超调,能够克服机械运动中的惯性。

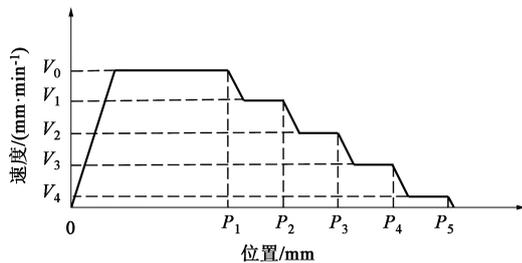


图 13 减速比定位控制算法的速度-位置曲线

Fig. 13 Speed-distance curve of reduction ratio positioning control algorithm

赵玮^[47]对精锻机工作过程中操作机的轴向运动进行分析,提出了位置控制+随动控制的综合算法,搭建位置控制系统方框图如图 14 所示。针对位置控制环节采取分段减速控制,设定减速比并计算出减速节点坐标,得出期望的位置控制曲线。针对工件伸长量补偿的随动控制环节,根据工件的形变规律定量计算轴向随动位移,基于常规 PID 控制在不同加工阶段和温度变化下的局限性,采用模糊 PID 控制器,仿真验证了其准确性和抗干扰能力满足精锻机轴向运动的控制要求。

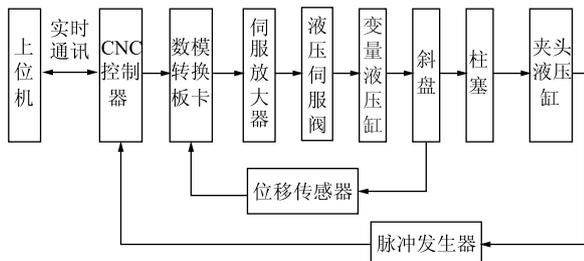


图 14 精锻机位置控制系统方框图

Fig. 14 Block diagram of position control system for precision forging machine

牛勇等^[48]基于液压式精锻机搭建了主缸运动电液伺服位置控制数学模型,仿真表明,伺服缸作为位置反馈时系统运行更加平稳,加载频次增加则会

导致锻造行程减小,从而使控制精度降低,该结果为液压式精锻机的研制提供了理论依据。

2.2 控制系统

精锻机控制系统的总体要求为:软件功能完善,运算速率高;操作性能良好,可灵活调整各子单元;锻造加工自动化;系统故障时及时报警和保护。

国内现有的精锻机大多为 20 世纪引进的,其原有 CNC 控制系统老旧失修,电控系统故障发生率高,故障的查找和排除也较为困难,且相关配件报价昂贵、供货周期长。可编程控制器凭借其较高的控制稳定性受到研究人员的青睐,出现了越来越多以 PLC 为主控单元的控制模式。

暴怀乾等^[49]采用目前应用成熟的 PLC、HMI 控制系统,详细地介绍了锤头调整系统和夹头进给控制系统的具体实现方法,提出了整体控制系统的硬件组成及程序设计方法,最后将该控制系统用于锻造加工测试,得到锤头行程调整测试表如表 2 所示,其中锤头 L 和 R 为处于物料左侧和右侧的锤头。结果验证其能够很好地满足精锻机的锻造精度。

表 2 锤头行程调整测试表

Table 2 Adjustment test table of hammer head stroke

HMI 设定 尺寸/mm	编码器测量尺寸/mm		锻造后物料 实测尺寸/ mm	偏差/%	
	锤头 L	锤头 R		锤头 L	锤头 R
25	24.8	24.9	25.3	0.9	0.8
31	30.7	30.8	31.4	0.9	0.4
47	46.7	46.8	47.3	0.6	0.4
66	65.7	65.8	66.4	0.5	0.5
90	89.6	89.7	90.5	0.5	0.5
110	109.5	109.7	110.6	0.5	0.5

陈殿领^[50]采用模块化的思路对老旧的 1400 t GFM 精锻机的电气系统进行了数控化改造,在原有的液压伺服控制原理基础上设计了新的控制方案,即利用 SIMOTION C 核心控制器和 PROFIBUS 工业现场总线搭建控制系统。该系统投入实际生产使用后,大大提高了系统的可靠程度,有效地降低了设备的故障维修率,提高了工件的加工精度,为工厂带来了更好的经济效益。

李显通^[51]进行了卧式精锻机电控系统的改造,将西门子 S7-300 作为主控单元,利用 MMI 系统显示机组设备状态信息。重点阐述了液压传动控制系统、人机接口系统、温度测量系统和多频制动系统的改造过程,介绍了多频制动原理及实现方法。改

造后，该系统可直接调用工艺程序执行加工功能，保证了产品性能的稳定性。

苏振华等^[52]针对 3 MN 液压式精锻机的锤头位置控制设计了一种 PID+前馈的控制系统。首先，设计了由工控机、PLC 及逻辑运动控制器组成的、基于 TCP/IP 网络的系统架构，并将精锻机整体控制分为机械、液压、传感器、监控操作等子系统。然后，选择了 RMC75E 运动逻辑控制器，负责单锤头液压缸精密定位和锻造力控制以及多锤头液压缸同步运动控制。最后，提出 PID+前馈控制的策略，前馈控制对主要干扰进行粗调，前馈控制则负责补偿未知的非线性负载变化。实际测试该系统的锤头同步运动位移精度可达到 ± 0.5 mm，锻造频率可达到 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，展现了该算法应用于锤头位置控制的良好效果。

PLC 控制器仍然存在缺少智能化处理的不足，随着精锻机的广泛应用，如何基于精锻机的运动特点研发出高精度控制系统，已经成为研究人员的重要任务。基于已有研究，可提出精锻机整体数控系统的实现思路，如图 15 所示。

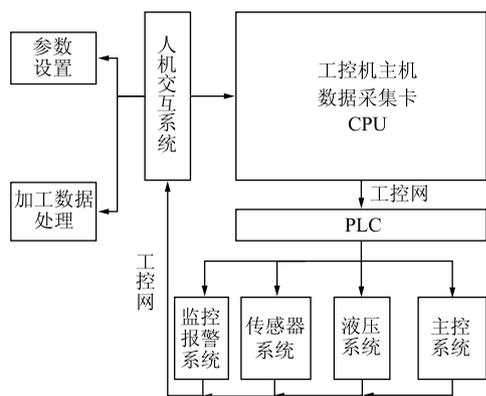


图 15 精锻机整体数控系统结构图

Fig. 15 Overall NC system structure drawing of precision forging machine

(1) 主控系统协调控制各液压缸系统、润滑系统、运动机构等，实时获取反馈信号调整，实现闭环控制；

(2) 液压系统实时控制液压缸，电机启动，从而带动机械设备运动；

(3) 传感器系统利用压力传感器、磁致伸缩位置反馈传感器、红外测温传感器等，实时传输各系统的压力、位移值和温度；

(4) 监控报警系统将采集的机组设备状态信息传输至操作台予以实时显示，重点进行电机状态监控、锤头状态监控和阀状态监控，如状态信息超出设定范围则声光报警并显示故障信息；

(5) 人机交互系统接收工件锻造信息，并根据存

储的工件模型计算出工件所需锻造量和锻造频次值，根据锻造压力限制值和频次参数值变化自适应匹配各道次锻造量和锻造频次值，保证精锻机平稳运行。

目前，国内已有研究基于上述专用整体数控系统设计思路实施具体控制。任耀庭等^[53]基于 SHP32 型精锻机设备设计了一条车轴精锻数控生产线。首先，增加温度红外线装置、基于光栅和变频控制的毛坯定位装置等传感器实时检测；然后，在夹头上安装新的自适应液压振荡系统实现精确控制，同时，增加生产线中加热、锯切、运输、冷却等界面监控和平面布置。整条生产线用于车轴锻造全自动化批量生产，最终产能提升了 10%，产品质量合格率达 99% 以上，验证了精锻机专用整体数控系统的可行性和高效性。

3 精锻机锻造工艺

3.1 工艺参数对锻造性能的影响

实际锻造过程中，温度、轴向进给速度、径向压速率、锻造比、锻打道次等工艺参数均会极大地影响锻件质量。例如，锻件局部温度上升可能造成纤维组织不均匀；轴向进给速度过低会增加锻打道次，过高不仅不方便去棱，而且影响应力分布；径向压速率增大会粗化晶粒；锻造比控制不当会出现芯部锻不透的现象。

董节功等^[54]重点分析了径向压速率和轴向进给速度对锻件内部压应力的影响，利用有限元分析找到了锻件受三向压应力时的临界锻造参数。当轴向进给速度为 $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，径向压速率的临界值为 14.58%；当轴向进给速度为 $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，径向压速率的临界值为 16.67%，该参数有助于压实芯部，焊合内部缺陷，防止裂纹产生。栾谦聪等^[55]以等效应变大于临界值和不出轴向拉应力作为判断准则，得到了工艺参数与锻透性的具体数学关系。将经验准则与数值模拟结果对比后验证了所提经验准则的正确性。

樊黎霞等^[56]基于身管径向锻造过程，对不同变形阶段的锻造比与塑性应变的关系展开研究。提出了局部锻造比的概念，总结出锻造比对塑性应变的影响规律：下沉段的锻造比过大对内膛成形不利，锻造段的锻造比增大则有利于内膛的成形。张雪等^[57]建立了以轴向和周向塑性应变为表征的锻透判断准则，通过锻打实验找到了锻造比极限值，验证了锻透判断准则的合理性。

龙朋^[58]首先通过三维分析得到了毛坯在不同径向

进给量下的内部等效塑性应变分布结果。其次,借助离散点拟合圆度评价方法研究了锻造进给和锻造频次对毛坯成形尺寸的影响规律,然后建立了材料模型,

探究了不同的径锻工艺参数对各变形区域内部金属材料晶粒细化情况以及组织均匀化程度的影响,如图 16 所示。其所得结果有助于实际锻造过程时的参数选定。

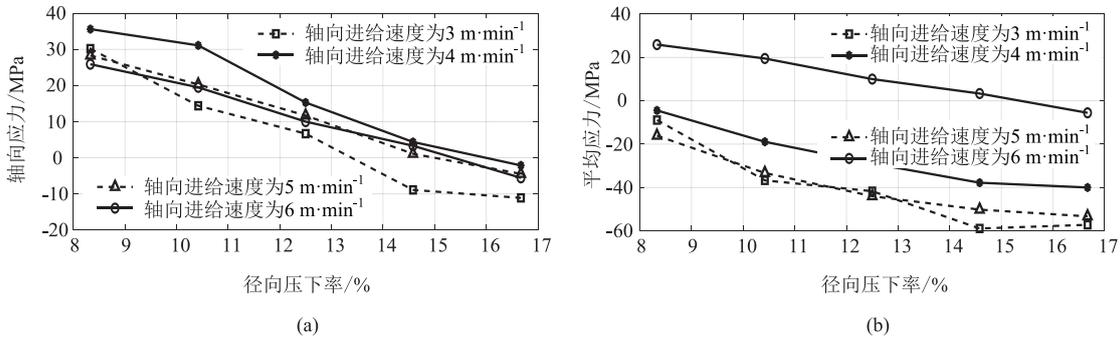


图 16 固定工艺参数下锻件的各项应力表现

(a) 轴向应力 (b) 平均应力

Fig. 16 Various stress performances of forgings under fixed process parameters

(a) Axial stress (b) Average stress

徐宝池等^[59]分析了轴向进给速度和锤头角度对身管中间层剪切应力分布的影响规律,发现选用较高的轴向进给速度和较小的锤头入口角度可以降低成形身管壁厚方向的变形不均匀性。韩风等^[60]采用不同的径向压下率和轴向进给速度,对新型镁合金

棒材试样进行了径向锻造实验和力学性能测试,总结出了二者对锻件性能的影响规律,如图 17 所示。结果表明:在 $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的轴向进给速度和 10% 的径向压下率下,试样的抗拉强度和屈服强度最大,断后伸长率最小。

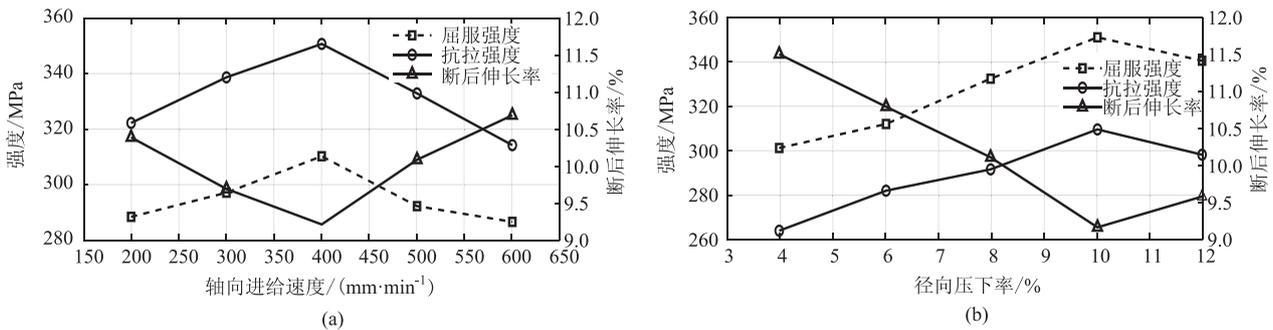


图 17 不同工艺参数对精锻机锻造性能的影响

(a) 轴向进给速度 (b) 径向压下率

Fig. 17 Effects of different process parameters on forging performance for precision forging machine

(a) Axial feeding velocity (b) Radial reduction rate

邹景锋等^[61]探究了径向压下率对镁棒热力参数及组织演变的影响,基于应变场理论建立了不同压下率的应变分量数学模型,并利用热力学耦合分析得到了镁合金的等效应变分布,如图 18 所示。利用 GFM-SSP32 精锻机对镁合金棒材进行阶梯锻造实验后表明,随着径向压下率的增大,晶粒细化明显。所建的数学模型和实际锻造结果的平均相对误差仅为 8.4%,可用于较准确地预测锻件的等效应变分布情况。

赵斌^[62]基于 18 MN 精锻机锻造 GH2909 高温合金的过程提出了合理的锻打道次分配,毛坯锻造初期表面温度会损失,仅能采用小变形量快速送进,

第 2 和第 3 道次分别采取 25.6% 和 21.5% 的大变形量,最大限度地增加锻透深度,以保证毛坯同截面各部分充分变形,获得均匀细小的晶粒组织。最后道次采用 5.0% 的小变形量,进一步缩小毛坯内外温度差,改善锻材表面质量。

3.2 工艺参数的优化

利用先进的数学软件和智能算法对锻造过程进行仿真分析,得到最优的工艺参数组合,有助于最大程度地实现精锻机的锻造性能。

Hsiang S H 等^[63]对硬化材料的径向锻造过程进行分析,得到了模角半径、环间隙高度、摩擦因数、

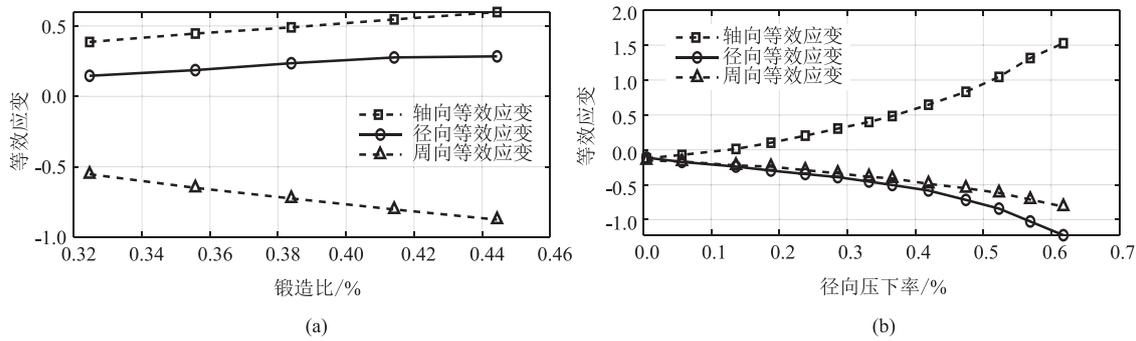


图 18 不同工艺参数下的锻件等效应变
(a) 锻造比 (b) 径向压下率

Fig. 18 Equivalent strain of forgings under different process parameters
(a) Forging ratio (b) Radial reduction rate

加工硬化系数等对凸缘厚度比和外凸形状比的影响，为其优化设计提供了一定的理论依据。Sahoo A K 等^[64]基于六西格玛改进方法和响应面法，实现了径向锻造工艺参数的优化，最大限度地减少了工件的残余应力。经工业案例测试后最终确定了可用于生产的工艺参数。Karamyshev A P 等^[65]在考虑热膨胀和变形的影响下，对空心坯料多级径向锻造过程进行数值模拟，该模型包括模具标定、模具运动、初始模具温度、摩擦条件等过程特征，所得结果可用于确定必要的工艺参数和模具标定。Huang J L 等^[66]研究了瞬态径向热锻造过程的特征，准确地捕捉到径向锻压过程中高频短行程引起的振动特性，

得到了多道次锻造过程中材料流动、残余应力和晶粒尺寸演变的详细数据，为工艺参数的优化提供了样本数据支撑。

Sanjari M 等^[67]采用人工神经网络和 Taguchi 法对径向锻造过程中的径向锻造力进行了优化。采用正交实验法选择工艺参数组合，训练神经网络模型预测最优条件，并与 Taguchi 方法的结果进行了比较，两组结果吻合较好。王碧凝^[68]构建了以锤面直径比、锤宽比、咬入比、径向压下率和轴向进给速度为输入参数的 T-S 模糊神经网络，用于预测锻造载荷和端部凹坑值，结果显示预测结果准确度非常高，如表 3 所示。

表 3 T-S 模糊神经网络设计径向锻造实例

Table 3 Examples of radial forging design by T-S fuzzy neural network

实例	输入参数					结果				
	锤面直径比	锤宽比	咬入比	径向压下率/%	轴向进给率/%	凹坑深度/mm		锻造载荷/kN		锻造载荷误差/%
						预测值	模拟值	预测值	模拟值	
1	1.0	0.50	0.40	15	8	0.0110	0.0513	1729.3	1663.0	3.99
2	1.2	0.50	0.45	15	6	0.0052	0.0081	1585.7	1663.3	-2.91
3	1.2	0.50	0.00	15	6	0.2387	0.2608	1617.8	1570.8	2.99
4	1.6	0.55	0.00	15	8	0.2553	0.2672	1481.2	1608.8	-7.93

Zhu F Y 等^[69]利用锻件的变形均匀性和材料损伤来评价成形质量，利用锤头的成形载荷来评价使用寿命，设计了一种数值优化和有限元模拟相结合的多目标优化方法。首先，基于二阶响应面法建立了多目标优化的数学模型，并利用非支配排序遗传算法得到了最优解；然后，通过数值模拟实验，发现锻件变形均匀性和成形载荷增加，材料损伤有所降低，验证了所提出的多目标优化方法的可行性。徐方^[70]采用多目标模糊线性加权算法对矩形截面件

径向锻造工艺参数进行了优化组合，仿真分析得知，减小径向压下率和轴向进给速度会减少矩形截面锻件宽展，径向压下率只有过量补偿后，锻件尺寸形状才能得到保证。Kitayama S 等^[71]提出了基于弹簧的冷锻工艺参数的多目标优化方法，重点考虑裂纹风险和使用载荷总锻造能量两个优化指标。通过试错法调整弹簧刚度、初始载荷和冲头速度等工艺参数，使用径向基函数网络的顺序近似优化以减少模拟次数。所得的最佳工艺参数使用机械压力机进行实验，

实验中未观察到裂纹,证明了该参数的可靠性。

3.3 工艺参数在线监测

精锻机工艺参数的实时监测环节也是至关重要的一部分,实际工况下操作人员需根据监测系统实时调整工艺参数,确保锻造过程顺利进行。

GFM 公司开发的工艺监测系统主要包含实时监测和数据处理两个功能,可以达到故障分析的目的。在实际锻造过程中,首先,借助传感设备对工件位移、速度、主机电流、功率等参数进行监测;然后,将采集到的传感器参数和工艺数据显示在界面上,采用数据库对工艺数据进行统计存储;最后,针对不同参数的震荡情况逐步排查出故障点并进行有效的信息提示^[72]。实际工况下工件锻造前后的温度相差较大,从而造成该处的锻造功率波动大,而锻造功率超过极限容易造成设备报警停机,带来不可逆转的设备部件损坏。王飞伟^[73]展开了有关精锻机锻造功率监测的研究,设计了其软硬件组成,包括电流互感器、功率监控器、模拟输入板及电气参数补偿装置,最后阐述了该系统的具体工作流程,如功率波动超过上限则发出报警信息,经工作人员手动参数设置及补偿量调整后,精锻机恢复正常运行。

向玲芳等^[74]基于生产锻造过程中工艺参数整定复杂的现状指出了研究重点,首先建立工艺参数数据库并对其整合分类,同时引入先进的算法实现工艺参数的优化,自适应、自调整、自平衡以补偿加工误差,实现整体锻造生产过程的自动化。

4 结论和展望

(1) 精锻机设备的研制首先需要考虑主机锻造箱的设计,其中锤头驱动方式和调节方式决定了主机锻造箱的结构组成,采取偏心锻打方式会提高锻造效率,而采取液压驱动方式则有利于保证锻造力和锻造精度。

(2) 精锻机夹头旋转依靠内、中、外 3 滑套实现,传动蜗杆采用非固定设计,配以减震碟簧等辅助机械结构,实现间歇旋转功能,从而使工件被均匀锻造,保证其内部质量。

(3) 精锻机工作过程中的控制难点为:4 锤头同步锻打的精确运动和操作机夹头夹持工件作轴向进给、径向旋转的复合运动。采取了主从 PID、模糊 PID 和减速比控制相结合的算法,仿真结果表明其满足控制要求。

(4) 精锻机径向锻造时多个因素会对最终的锻造质量造成影响。最佳锤头形状可经有限元分析和

实际工况选择。轴向进给速度、径向压下率、锻造比等工艺参数则采取神经网络多目标智能优化算法优化得到最优组合。

通过梳理精锻机自主研发过程中的难点,展望了以下几点未来精锻机的发展方向。

(1) 精锻机液压系统的控制实质上是电液伺服控制,可以采取自抗扰控制、自适应控制等智能算法控制代替原有的 PID 控制方式,提高控制精度。

(2) 精锻机整机包括机械、液压、电气多个系统,针对其子系统的协作控制过程可以提出集运动控制、过程控制、自适应加工、在线监控等为为一体的专用整体数控系统的设计方案,将先进数控系统的理念和精锻机独特运动特点相结合,设计出完整实用的专用数控系统用于生产实际,以最大程度发挥出径向锻造的优势。

(3) 精锻机的零部件造价成本高,而在锻造过程中又容易磨损,装配复杂,需要着重考虑部件修复替换等问题,延长设备使用寿命,提高生产效益。

(4) 现实工况下,锻打尺寸和锻打频率的追求需要研究者开发双叶驱动等新型锤头驱动结构,这也是国外学者目前的研究热点。

参考文献:

- [1] 李建军,黄茂林,彭谦之,等. 锻造技术的发展现状及趋势[J]. 热处理技术与装备, 2015, 36 (3): 57-62.
Li J J, Huang M L, Peng Q Z, et al. Development status and trend of forging technology [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2015, 36 (3): 57-62.
- [2] 张驰,何巧,骆静,等. 汽车变速器结合齿温锻-冷整形复合精锻工艺及模具研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6 (1): 9-14.
Zhang C, He Q, Luo J, et al. Compound precision forging of warm forging-cold shaping and die for automatic transmission conjunction gear [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6 (1): 9-14.
- [3] 周海东. 精锻机工艺特点及生产管理体会[J]. 科技信息, 2009, (18): 618-619, 609.
Zhou H D. Process characteristics and production management experience of precision forging machine [J]. Science and Technology Information, 2009, (18): 618-619, 609.
- [4] 宋涛,赵升吨,刘洪宝. 径向锻技术的应用及其发展[J]. 重型机械, 2012, (3): 11-16.
Song T, Zhao S D, Liu H B. Application and development of radial forging technology [J]. Heavy Machinery, 2012, (3): 11-16.
- [5] Bapari A, Najafzadeh A, Moazeny M, et al. Simulation of radial forging conditions by third hits hot compression tests [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 491 (1-2): 258-265.
- [6] 曹明,韩笑宇,栗文锋. 四砧径向锻造工艺研究[J]. 大型铸锻件, 2015, (4): 4-7.
Cao M, Han X Y, Li W F. Research on radial forging process of

- four anvil [J]. *Large Castings and Forgings*, 2015, (4): 4-7.
- [7] Fan L X, Wang Z G, Wang H. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16 (2): 329-334.
- [8] Darki S, Raskatov E Y. Analysis of the hot radial forging process according to the finite element method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110: 1061-1070.
- [9] 王德林, 陆有根, 吴兵. 温、冷精锻复合成形技术应用及其发展趋势 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42 (5): 107-110.
Wang D L, Lu Y G, Wu B. Application and development of warm-cold combined precision forging technology [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42 (5): 107-110.
- [10] Panov D, Pertsev A, Smirnov A, et al. Metastable austenitic steel structure and mechanical properties evolution in the process of cold radial forging [J]. *Materials*, 2019, 12 (13): 2058.
- [11] Hsiang S H, Ho H L. A study on the warping problems of thin flange under the radial forging processes by FEM and experiments [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 26: 47-55.
- [12] 牛勇, 权晓惠, 张营杰, 等. 现代自由锻造装备技术研究现状与发展趋势 [J]. *精密成形工程*, 2015, 7 (6): 17-24.
Niu Y, Quan X H, Zhang Y J, et al. Current development of free forging equipment [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2015, 7 (6): 17-24.
- [13] 杨震, 王炳正, 宋道春, 等. 径向锻造设备与工艺综述 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2018, 53 (6): 27-30.
Yang Z, Wang B Z, Song D C, et al. Overview of radial forging equipment and process [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2018, 53 (6): 27-30.
- [14] 黄雷. 不锈钢身管弹膛精锻成形分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
Huang L. Analysis of Precision Forging of Stainless Steel Barrel Chamber [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [15] 邹景锋, 马立峰, 朱艳春, 等. 径向锻造成形技术及其在镁合金锻造中的应用 [J]. *轻金属*, 2018, (5): 48-52.
Zou J F, Ma L F, Zhu Y C, et al. The application of radial forging forming technology to magnesium alloy forging [J]. *Light Metals*, 2018, (5): 48-52.
- [16] 王艳芳. 精锻机锻造车轴工艺余量研究 [J]. *内燃机与配件*, 2018, (24): 20-21.
Wang Y F. Research on process allowance of forging axle of precision forging machine [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2018, (24): 20-21.
- [17] 张超, 赵升吨, 母东. 航空锻件用径向锻机液压驱动方式合理性探讨 [J]. *液压与气动*, 2014, (6): 13-16.
Zhang C, Zhao S D, Mu D. Study of hydraulic driving radial forging machine for aeronautic products [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2014, (6): 13-16.
- [18] Koppensteiner R, Auer M, Fair B. GFM radial forging machines for the titanium market [A]. *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium* [C]. San Diego, 2016.
- [19] Koppensteiner R, Auer M. New forging drive system for radial forging based on double stroke mechanism [J]. *BHM Bergund Hüttenmännische Monatshefte*, 2018, 163: 361-366.
- [20] Glushenkova S G, Polozhentsev K A, Dmitriev A I, et al. Development of a technology for a hydraulic radial forging machine at the electrothermal metallurgical plant [J]. *Metallurgist*, 2017, 61: 394-399.
- [21] 李佳, 何雪龙, 黄艳龙, 等. 径锻机锤头调节过程分析 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2016, 51 (6): 28-29.
Li J, He X L, Huang Y L, et al. Analysis of adjusting process for hammer in radial forging machine [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2016, 51 (6): 28-29.
- [22] 苏建婷, 黄艳龙, 何雪龙, 等. 精锻机锻造箱结构型式及特点 [J]. *装备制造技术*, 2016, (8): 186-188.
Su J T, Huang Y L, He X L. Forging box structure and characteristics of precision forging machine [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2016, (8): 186-188.
- [23] 武哲, 柯锋贤, 姜旭庆. 径向锻造机锤头驱动方式的发展与思考 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (8): 6-15.
Wu Z, Ke F X, Jiang X Q. Development and thinking of hammer driving mode of radial forging machine [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (8): 6-15.
- [24] 杨华, 高俊峰, 何琪功, 等. 径向锻造机的几种典型主机结构分析 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (6): 16-32.
Yang H, Gao J F, He Q G, et al. Analysis on several typical main machine structures of radial forging machine [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (6): 16-32.
- [25] 钟丽萍. 10 MN 液压精锻机锻造箱的结构优化设计 [J]. *机械设计*, 2011, 28 (3): 88-91.
Zhong L P. Structural optimization research of forging box of 10 MN precision hydraulic forging machine [J]. *Journal of Machine Design*, 2011, 28 (3): 88-91.
- [26] 牛勇, 张营杰, 卫凌云, 等. 四锤头径向锻造装置受力分析 [J]. *重型机械*, 2013, (2): 47-49.
Niu Y, Zhang Y J, Wei L Y, et al. Mechanics analysis on radial forging device with four dies [J]. *Heavy Machinery*, 2013, (2): 47-49.
- [27] 段志东, 葛鹏, 周亚宁, 等. 四锤头径向锻造机锻造箱结构的动力特性研究 [J]. *机械设计与制造*, 2013, (6): 109-111.
Duan Z D, Ge P, Zhou Y N, et al. Research on dynamic response of forging box of precision forging machine with four hammer [J]. *Machine Design & Manufacture*, 2013, (6): 109-111.
- [28] 葛鹏. 1.6 MN 精锻机主机设计 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
Ge P. The Design of 1.6 MN Precision Forging Machine [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [29] Ghaei A, Movahhedy M R. Die design for the radial forging process using 3D FEM [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182, 534-539.
- [30] Wu Y J, Dong X D, Yu Q. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 93: 102-110.
- [31] 卫建军, 刘建生. 径向锻造锤头结构对车轴成形的影响分析 [J]. *太原科技大学学报*, 2008, (4): 313-316.

- Wei J J, Liu J S. Influence of radial forging hammer on the forming process of the axle [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2008, (4): 313-316.
- [32] Afrasiab M, Afrasiab H, Movahhedy MR, et al. Design of the die profile for the incremental radial forging process [J]. IJST, Transactions of Mechanical Engineering, 2015, 39 (M1): 89-100.
- [33] 张建. 不同锤头和进给量对径向锻造高速钢 M2 碳化物的影响 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2012.
Zhang J. Radial Forging M2-High Speed Steel on Different Hammer and Feed Influence on Carbide [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2012.
- [34] 张建. 长轴类件 GFM 精锻机锻造压实新技术的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
Zhang J. Research on GFM Precise Forging Machine's New Forging Compaction Technology of Long Axis Parts [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [35] 贾斗余. 精锻机锻造锻造透性及相关工艺研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
Jia D Y. Forging Penetration Efficiency of Radial Forging Machine and Study of the Related Process [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [36] 俞鹏飞, 廖强, 谢强, 等. 锻料量对精锻机锤头磨损影响研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50 (2): 60-62.
Yun P F, Liao Q, Xie Q, et al. Study on influence of feeding amount to the hammer wear situation in precision forging machine [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2015, 50 (2): 60-62.
- [37] 曹敏曼. 基于有限元的精锻机锤头再制造技术与工艺研究 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
Cao M M. The Research of Forging Machine Hammer Remanufacturing Technology Based on the Finite Element Analysis [D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [38] 张信军. 精锻机夹头设计及关键件有限元分析 [D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
Zhang X J. Design of Precision Forging Machine Chuck Head and Key Pieces Finite Element Analysis [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007.
- [39] 杨瑛娣. 精锻机夹头内滑套疲劳断裂有限元分析 [J]. 河北冶金, 2010, (4): 52-55.
Yang Y D. Finite element analysis of fatigue fracture of slide sleeve in clamp head of precision forging machine [J]. Hebei Metallurgy, 2010, (4): 52-55.
- [40] 李阳, 白景年, 王飞云, 等. 精锻机夹头结构及运行原理研究 [J]. 机械工程师, 2014, (1): 173-174.
Li Y, Bai J N, Wang F Y, et al. Study on chuck structure and function theory of forging machine [J]. Mechanical Engineer, 2014, (1): 173-174.
- [41] 刘贵明, 刘希宽, 况怀波. 径锻操作机旋转自动控制 [J]. 一重技术, 2006, (4): 31-32.
Liu G M, Liu X K, Kuang H B. Automatic rotation control to manipulator of radial forging machine [J]. CFHI Technology, 2006, (4): 31-32.
- [42] 周兵, 唐海涛, 王彬鹏, 等. 精锻机操作机旋转补偿系统工
作参数的修正研究 [J]. 机电信息, 2015, (36): 34-35.
Zhou B, Tang H T, Wang B P, et al. Research on correction of working parameters of precision forging manipulator rotation compensation system [J]. Mechanical and Electrical Information, 2015, (36): 34-35.
- [43] 王飞伟, 朱秦岭, 杨鹏飞, 等. 磁致伸缩位移传感器在精锻机夹头中的应用 [J]. 中国设备工程, 2018, (18): 201-203.
Wang F W, Zhu Q L, Yang P F, et al. Application of magnetostrictive displacement sensor in chuck of precision forging machine [J]. China Plant Engineering, 2018, (18): 201-203.
- [44] 武哲. 径锻机四锤头液压伺服系统的同步特性研究 [D]. 甘肃: 兰州理工大学, 2015.
Wu Z. The Research on the Synchronization Characteristics of the Four Hammer Hydraulic Servo System of the Radial Forging Machine [D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2015.
- [45] 李春. 基于模糊自整定 PID 算法的精锻机夹头控制研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
Li C. Research on Chuck Control of Precision Forging Machine Based on Fuzzy Self-tuning PID Algorithm [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [46] 张新玉, 仇宝玉. 抚钢 1000 t 精锻机定位控制算法的研究 [J]. 辽宁石油化工大学学报, 2004, (2): 42-45.
Zhang X Y, Yu B Y. Research on positioning control algorithm of 1000 t precision forging machine of fusteel [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2004, (2): 42-45.
- [47] 赵玮. 精锻机随动控制系统的设计 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
Zhao W. Design of Servo Control System for Precision Forging Machine [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [48] 牛勇, 权晓惠, 张营杰. 径向锻造油压机电液伺服控制系统建模与仿真 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 144-152.
Niu Y, Quan X H, Zhang Y J. Modeling and simulation on electrohydraulic servo control system for radial forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 144-152.
- [49] 暴怀乾, 赵洪章, 刘永平. 基于 PROFIBUS-DP 的 PLC、HMI 控制系统在径锻机中的应用 [J]. 宁夏工程技术, 2014, 13 (2): 170-173.
Bao H Q, Zhao H Z, Liu Y P. Application of PROFIBUS-DP PLC, the HMI control system based on the radial forging machine [J]. Ningxia Engineering Technology, 2014, 13 (2): 170-173.
- [50] 陈殿领. 利用西门子电气对 1400t 精锻机进行电气及数控化改造 [J]. 制造技术与机床, 2011, (9): 133-135, 150.
Chen D L. The electrical and NC transformation for 1400 t precision forging machine using SIEMENS electric [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2011, (9): 133-135, 150.
- [51] 李显通. SXP-130 卧式精锻机电控系统改造 [J]. 设备管理与维修, 2019, (1): 88-89.
Li X T. Transformation of SXP-130 horizontal precision forging electromechanical control system [J]. Plant Maintenance Engineering, 2019, (1): 88-89.
- [52] 苏振华, 张营杰, 冯东晓, 等. 基于 PID+前馈的 3 MN 径向锻造机控制系统研究 [J]. 重型机械, 2020, (3): 44-47.

- Su Z H, Zhang Y J, Feng D X, et al. Research and development of the control system based on PID closed-loop control plus feedforward for 3 MN radial-direction hydraulic forging machine [J]. *Heavy Machinery*, 2020, (3): 44-47.
- [53] 任耀庭, 崔永亮, 徐俊生. 车轴精锻生产线的升级改造 [J]. *机械工程与自动化*, 2017, (6): 138-140.
- Ren Y T, Cui Y L, Xu J S. Upgrading of axle precision forging production line [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2017, (6): 138-140.
- [54] 董节功, 周旭东, 高全德, 等. 实心锤头径向锻造压应力分析 [J]. *河南科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 28 (3): 4-7.
- Dong J G, Zhou X D, Gao Q D, et al. Compressive stress analysis of radial forging with solid hammers [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2007, 28 (3): 4-7.
- [55] 栾谦聪, 董湘怀, 吴云剑. 径向锻造工艺参数对锻透性的影响 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25 (22): 3098-3103.
- Luan Q C, Dong X H, Wu Y J. Effects of process parameters on fpe in radial forging processes [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25 (22): 3098-3103.
- [56] 樊黎霞, 赵轲, 董雪花. 身管径向精密锻造的塑性应变分析与锻造比研究 [J]. *精密成形工程*, 2014, 6 (1): 1-8, 14.
- Fan L X, Zhao K, Dong X H. Study on plastic strain and forging ratio in radial forging process of barrel [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2014, 6 (1): 1-8, 14.
- [57] 张雪, 樊黎霞, 张鹤词. 身管膛膛精密径向锻造的锻透性分析 [J]. *兵工学报*, 2019, 40 (3): 473-479.
- Zhang X, Fan L X, Zhang H C. Analysis of forging penetration of barrel rifling in precision radial forging process [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40 (3): 473-479.
- [58] 龙朋. 汽轮机叶片毛坯数控径向锻造关键技术研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- Long P. Research on Key Technology of Numerical Control Radial Forging for Turbine Blade Blank [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [59] 徐宝池, 石必坤, 樊黎霞, 等. 冷径向锻造身管壁厚方向变形不均匀性研究 [J]. *兵工学报*, 2020, 41 (1): 13-20.
- Xu B C, Shi B K, Fan L X, et al. Research on deformation inhomogeneity along wall thickness direction of cold radial forged barrel [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41 (1): 13-20.
- [60] 韩风, 胡强. 径向锻造工艺参数对 Mg-8Al-0.6Zn-0.3V 镁合金棒材性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (17): 115-117.
- Han F, Hu Q. Effect of radial forging process parameters on performance of Mg-8Al-0.6Zn-0.3V magnesium alloy bars [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (17): 115-117.
- [61] 邹景锋, 马立峰, 朱艳春. 径锻压下率对镁棒热力参数及组织演变的影响 [J]. *精密成形工程*, 2021, (5): 48-52.
- Zou J F, Ma L F, Zhu Y C. Effect of radial forging reduction rate on thermodynamic parameters and microstructure evolution of magnesium alloy bar [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, (5): 48-52.
- [62] 赵斌. GH2909 合金径向锻造工艺优化研究 [J]. *特钢技术*, 2016, 22 (4): 49-53.
- Zhao B. Study on optimization of radial forging process for GH2909 alloy [J]. *Special Steel Technology*, 2016, 22 (4): 49-53.
- [63] Hsiang S H, Ho H L. Investigation of the influence of various process parameters on the radial forging processes by the finite element method (FEM) [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 23: 627-635.
- [64] Sahoo A K, Tiwari M K, Mileham A R. Six Sigma based approach to optimize radial forging operation variable [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 202 (1-3): 125-136.
- [65] Karamyshev A P, Nekrasov I I, Pugin A I, et al. Modelling of the radial forging process of a hollow billet with the mandrel on the lever radial forging machine [J]. *IPO Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 124: 12054.
- [66] Huang J L, Slater C D, Mandral A, et al. A dynamic model for simulation of hot radial forging process [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 478-483.
- [67] Sanjari M, Taheri A K, Movahedi M R. An optimization method for radial forging process using ANN and Taguchi method [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40: 776-784.
- [68] 王碧凝. 基于神经网络的径向锻造工艺分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- Wang B N. Process Analysis of Radial Forging Based on Neural Network [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [69] Zhu F Y, Wang Z H, Lyu M. Multiobjective optimization of precision forging process parameters based on response surface method [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, (6): 1-7.
- [70] 徐方. 矩形截面工件径向锻造工艺分析与优化设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- Xu F. Process Analysis and Optimization Design of Radial Forging for Rectangular Cross-Section Billet [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019.
- [71] Kitayama S, Kadoya S, Takano M, et al. Multi-objective optimization of process parameters in cold forging minimizing risk of crack and forging energy [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21 (3): 1-12.
- [72] 夏波. RF70 精锻机在线监测与故障分析 [J]. *设备管理与维修*, 2013, (12): 58-59.
- Xia B. Online monitoring and fault analysis of RF70 fine forging machine [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2013, (12): 58-59.
- [73] 王飞伟. 精锻机锻造功率监测系统研究 [J]. *设备管理与维修*, 2018, (18): 25-27.
- Wang F W. Research on forging power monitoring system of precision forging machine [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2018, (18): 25-27.
- [74] 向玲芳, 郭志强, 黄胜操, 等. 拖拉机零件智能精锻及生产工艺发展趋势探讨 [J]. *拖拉机与农用运输车*, 2018, 45 (6): 1-3, 10.
- Xiang L F, Guo Z Q, Huang S C, et al. Discussion on development trend of intelligent precision forging and production technology of tractor parts [J]. *Tractor and Farm Transporter*, 2018, 45 (6): 1-3, 10.