

装备与成套技术

精锻机关键动作协作分析

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: 介绍了精锻机的机械设备和锻造原理, 探究了精锻机关键动作——锤头偏心锻打、夹头间歇旋转、操作机随动进给之间的协作过程, 推导出锤头偏心运动的位移曲线, 并合理划分了锤头锻打期和锻造间歇期。根据锻造误差计算出夹头极限旋转速度, 并结合锤头锻造和夹头旋转的协作机理, 提出伺服油缸速度补偿的夹头间歇旋转方法, 进而分析出与精锻机锻造周期适配的补偿油缸期望运行轨迹。针对精锻机锻件变形伸长问题, 提出可工程实现的操作机随动进给方法, 在四锤头螺旋式锻造工艺基础上, 提出可使工件圆周锻造均匀的双侧操作机最佳进给速度。最后总结了精锻机关键技术协作控制的研究思路, 为后续的国产化开发和应用奠定基础。

关键词: 精锻机; 径向锻造; 锤头偏心锻造; 夹头间歇旋转; 操作机随动进给; 液压补偿

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.023

中图分类号: TG315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0176-10

Cooperation analysis on key actions for precision forging press

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: The mechanical equipment and forging principle of precision forging press were introduced, and the cooperation process between the key actions of precision forging press—eccentric forging of hammer head, intermittent rotation of chuck and manipulator follow-up feeding was discussed in detail, the displacement curve for eccentric movement of hammer head was deduced, and the forging period and forging interval period of hammer head were divided reasonably. Then, according to the forging error, the limit rotation speed of chuck was calculated, and combined with the cooperation mechanism of hammer head forging and chuck rotation, the chuck intermittent rotation method for servo cylinder speed compensation was proposed, and the expected running track of compensation cylinder suitable for the forging cycle of precision forging press was analyzed. Furthermore, for the deformation and elongation problem of forgings in precision forging press, an engineering actualized manipulator follow-up feeding method was proposed, and based on spiral forging process with four hammer heads, the optimal feeding speed of two-side manipulators was proposed, which could make the circumference of workpiece evenly forged by hammer head. Finally, the research ideas of cooperative control of the key actions for precision forging press were summarized, which could be the foundation of the subsequent development and domestic application.

Key words: precision forging press; radial forging; eccentric forging of hammer head; intermittent rotation of chuck; manipulator follow-up feeding; hydraulic compensation

锻造成形是机械制造领域内重要金属部件开坯的一种常用手段^[1]。径向锻造是一种特殊的锻造工艺, 尤其适用于极端环境下的高强度难变形合金轴类件的锻造^[2]。实现径向锻造的设备即为精锻机, 国外称径向锻机, 是一种由4个对称锤头对金属锻件进行高频锻打的短冲程压力机^[3-4]。通过4个锤

头径向锻压锻件, 同时操作机夹头夹持锻件间歇旋转进给, 最终实现全方位均匀锻造。

精锻机具有锻造频率高、锻透性好、加工自动化程度高的优点^[5-6], 锻造过程中锻件受三向压应力, 有利于修复其内部组织疏松缺陷, 产生的变形热可减少加热火次和能源消耗, 而锻件总变形率的增加则有利于提高生产率和成材率^[7-10]。

现代精锻机是集液压传动、电气控制、网络通讯、传感监测等多种技术于一体的重型机械, 为少、无切削加工的先进设备, 非常契合于我国锻造行业

收稿日期: 2022-07-13; 修订日期: 2022-10-28

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

的发展需求^[11-12]。由精锻机锻造成形的特种钢锻件被广泛应用于机床切削刀具、重型设备的零部件、高载荷模具等^[13-15]；铁路机车空心车轴、镁合金材料、高精度空心驱动轴也均采用径向锻造方式^[16-18]；特别地，在国防军工领域^[19-20]，炮管和速射武器身管普遍采用精锻机锻造，炮管内孔的膛线精度可得到大幅度提高；而在航空航天领域，精锻机尤其适用于锻造变形抗力大、导热系数小的模具钢和低塑性、高强度的难熔金属及高温合金等难变形材料。精锻机锻造的、带有台阶内孔的细长轴类件是航空发动机中动力传输的关键部件，密封接头、球形高压储气罐和火箭喷管等典型零件也均采用径向锻造方式^[21-22]。

国外有关径向锻造技术和设备的研发已十分成熟，国际上通用的机械式精锻机 SX 型、SKK 型、RF 型均由奥地利 GFM 公司研发，包括最新研发的基于双冲程作用机制的 DSR 型精锻机^[23-24]。液压式精锻机则由德国 SMS MEER 公司独家研发，其中 SMI 系列还配置了先进的可视化计算机控制系统和操作机协调控制系统等，大大提高了锻造效率^[25]。目前，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^[26]。

近年来，国家对核心锻件的质量要求越来越高，精锻机在锻压行业的应用也越来越普遍。然而，该设备长期受到国外的垄断，相关技术一直被封锁，自主研发进程十分缓慢，直至今日我国的精锻机设备仍然需要依靠国外进口。

精锻机的自主研发难点主要在以下两方面。

(1) 精锻机自身机械结构的复杂性。有学者基于 GFM 研制的精锻机系统总结了锤头运动方式和调节控制原理^[27-28]；钟丽萍^[29]基于 ANSYS 的一阶优化方法确定了主机锻造箱的最佳结构尺寸参数；苏建婷等^[30]、兰石集团葛鹏团队^[31]完整地阐述了 1.6 MN 精锻机主机锻造箱的详细设计流程；杨英娣^[32]对操作机夹头进行了几何建模，李阳等^[33]在此基础上详细地探究了操作机夹头内部的机械机构及运行原理。上述研究推动了精锻机机械设备国产化的进程。

(2) 精锻机运行过程中包含各个关键动作的密切配合流程，即操作机夹头旋转、轴向进给和主机锤头锻打的精密协作过程。此方面的研究较为匮乏，张信军^[34]基于 SX55 精锻机初步提出了夹头间歇旋转制动的研究思路，该研究具有很好的参考价值，但仍未系统地解决各动作的协作控制问题。

本文针对以上研发难点，详细地推导了精锻机锤头锻打、夹头旋转及操作机进给之间的数学关系，并在此基础上论证其协同动作机理，最后基于工程实现的角度设计出较为完善的协作控制方案。

1 精锻机机械设备及运行原理

精锻机的机械结构如图 1 所示，具体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和锻造箱体，操作机夹头装配在主机锻造箱两侧，还配有扶料、润滑液压等辅助装置。

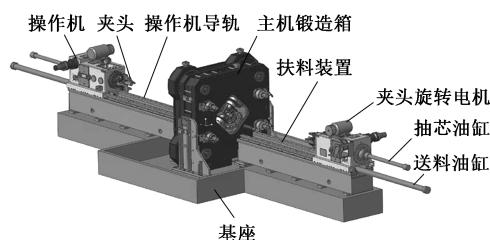


图 1 精锻机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of precision forging press structure

本文研究的精锻机为机械式，锻造原理为偏心驱动，该类型精锻机的锻造频率高、控制方便、应用需求更大。具体锻造过程为：主电机启动，将动力扭矩传递给齿轮传动箱，齿轮带动偏心轴旋转，从而驱动偏心连杆作往复运动，实现锤头的高频往复锻打；一侧的操作机夹头夹持锻件，在液压油缸的推动下以合适的速度进给。锻件进入锻造箱后受到锤头的同步高频锻打，同时在锻打间歇期由电机驱动产生自旋转运动，最终实现整体均匀锻造。

精锻机独特的锻造优势体现在其高频旋转锻造的工作机理，但锤头锻打和夹头旋转均依赖于大功率电机驱动，由开关量信号控制，通常需连接软启动器或变频器间接启动；而操作机的送料进给则由伺服阀及液压缸组成的电液位置伺服系统控制，存在一定的滞后效应。因此，关于精锻机各关键动作之间的协作研究十分必要。

2 锤头偏心锻打分析

锤头偏心锻打是整个精锻机工作的基础和核心，夹头间歇旋转和操作机随动进给必须以其为基础展开协作。锤头的机械结构如图 2 所示。

2.1 锤头运动原理

精锻机锤头偏心锻打原理如图 3 所示。大圆轨

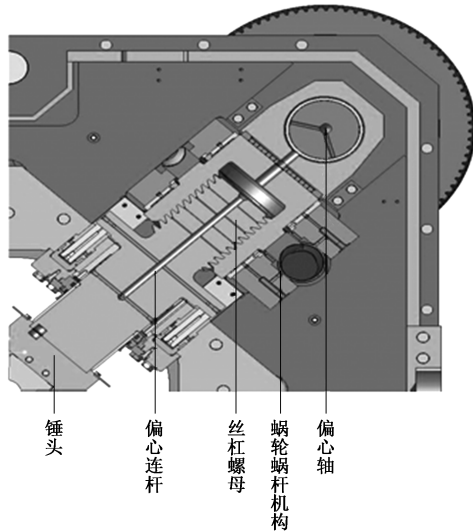


图 2 精锻机锤头的机械结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mechanical structure for hammer head of precision forging press

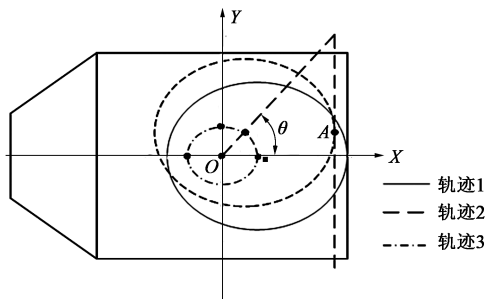


图 3 精锻机锤头偏心运动原理图

Fig. 3 Principle diagram of eccentric movement for hammer head of precision forging press

迹 1 的半径为 R ，小圆轨迹 3 的半径为 a ，大圆围绕小圆圆心 O 点作偏心转动。以 O 点为坐标原点，锤头位置即抽象化为大圆垂直切点的横坐标。大圆轨迹 1 即为锤头距离锻件最远位置，轨迹 2 为转过任意偏心角 θ 后的实时位置，设 A 点为轨迹 2 的垂直切点，坐标为 (x, y) ，其横坐标 x 即为锤头的实时位置，可用式 (1) 表示：

$$(x - a \cos \theta)^2 + (y - a \sin \theta)^2 = R^2 \quad (1)$$

根据式 (1) 求得锤头的实时位置 $x = R + a \cos \theta$ ，继续分析得知： $\theta = 0 + 2k\pi$ 时锤头距离锻件最远，其中 k 为正整数； $\theta = \pi + 2k\pi$ 时锤头下压“抱紧”锻件至最大变形处。因此，锤头的锻打行程为 $[R - a, R + a]$ 。本文研制的精锻机偏心距为 5 mm，锻打行程即为 10 mm。

2.2 锤头锻打期和锻造间歇期的计算

从锤头的实时位移曲线得知，其高频锻打为周

期性的往复运动。因此，可将锤头的运动周期划分为锻打期和锻造间歇期，在锤头锻打期，锤头从接触锻件开始至“下死点”（锤头下压的最大变形处），然后退锤离开锻件表面。

设锤头锻打期为 T_Δ ，锤头接触锻件并下压至锤头“下死点”的时间为 T_1 ，锤头退出时为避免坯料损伤而设定的滞后时间为 T_2 ， $T_\Delta = T_1 + T_2$ 。设锻造间歇期为 T_3 ，已知锤头的运动周期 T 是锻打频率 f 的倒数，则可以建立如式 (2) 所示的数学关系：

$$T_1 + T_2 + T_3 = T_\Delta + T_3 = T = 1/f \quad (2)$$

计算得知，在锤头锻打期，偏心轴转过的角度 $\varphi = 2\pi f T_\Delta$ 。实际工程中，锤头开始接触锻件下压时偏心轴转过的偏心角为 θ_1 (θ_1 位于第二象限)，锤头到达最大锻打位置处并回退时偏心轴转过的偏心角为 π ，锤头回退时为避免锻件旋转与锤头表面摩擦，设置滞后角度 α 。由此定义，偏心轴转过 $\theta_2 = \pi + \alpha$ 角度时 (θ_2 位于第三象限)，锤头重新不接触锻件。为了工程计算方便，设定 θ_1 和 θ_2 关于 $\theta = \pi$ 对称，因此，锤头接触锻件过程中偏心轴转过的角度范围为 $\varphi = 2(\pi - \theta_1)$ 。

为了保证锻造质量、锻造精度及锻造效率，工艺规定的锻造前后的半径差 h 和锤头从接触锻件至下压临界点位置的距离应相等，即：

$$h = (R + a \cos \theta_1) - (R - a) = a + a \cos \theta_1 \quad (3)$$

可根据已知工艺条件求得 θ_1 ，进而计算出得锤头锻打期和锻造间歇期，如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} 2\pi f T_\Delta = 2(\pi - \theta_1) \\ T_\Delta = \frac{(\pi - \theta_1)}{\pi f} \\ T_3 = \frac{1}{f} - \frac{(\pi - \theta_1)}{\pi f} = \frac{\theta_1}{\pi f} \end{cases} \quad (4)$$

本文研究的精锻机的锻打频率约为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，通过变频器控制主电机转速实现。通常将 θ_1 固定为 $\frac{\pi}{6}$ ，即最佳 $h = 9.33 \text{ mm}$ 。可求得锻造间歇期为 0.5 s，锤头锻打期为 0.1 s。

3 夹头间歇旋转分析

操作机夹头旋转是精锻机运行过程中另一个关键的动作，夹头必须协作配合锤头的锻打动作进行间歇旋转。在锤头锻打期，锻件被锤头抱死，夹头必须停止旋转，否则易使锻件因受扭转载荷而产生内部晶体组织扭曲；而在锻造间歇期，锤头与锻件

分离,夹头需要快速旋转一定角度,实现锻件圆周均匀锻造,保证锻件的表面质量和内部组织的一致性。

3.1 基于锻造周期的夹头旋转速度计算

精锻机成形锻件以回转表面成品为主,成品直径误差是重要的工艺指标。而精锻机锤头锻打的非连续性与夹头旋转的连续性形成的表面误差,对成品直径误差影响较大。因此,当锻打频率确定后,可根据锻制圆钢国家标准(GB/T 908—2019^[35])的偏差规定,定量计算出夹头旋转速度。夹头在每次锻造间歇期旋转的角度越小,锻件的表面越光滑。为了提升锻造效率,应在锻件允许的最大误差内考虑锻打过程夹头旋转角度的极限值。工件在锻造过程中的旋转动作原理图如图4所示。

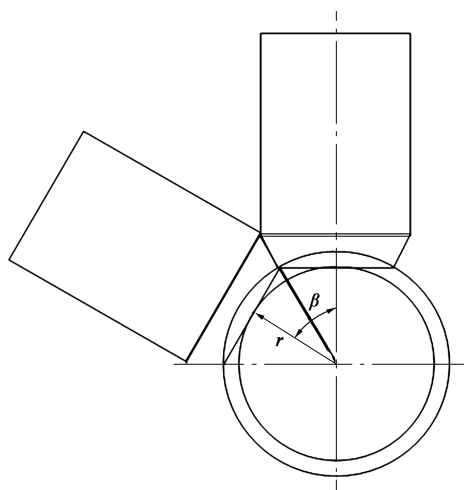


图4 精锻机旋转锻造误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rotary forging error for precision forging press

设锤头每锻打一次,夹头夹持锻件旋转角度 β ,锻件的期望锻后半径为 r ,则由图4可以得出锻造误差 ε :

$$\varepsilon = 2 \left(\frac{r}{\cos(\beta/2)} - r \right) \quad (5)$$

根据GB/T 908—2019^[35]对圆钢直径允许偏差的规定, $\varepsilon < 0.02r$,计算得知, $\beta < 16.12^\circ = 0.09\pi$ 。由式(4)可以得出,最大夹头旋转速度 V_{\max} :

$$\begin{cases} V_{\max} T_3 = \beta \\ V_{\max} = \frac{\beta \pi f}{\theta_1} \end{cases} \quad (6)$$

精锻机夹头的旋转动作是依靠置于操作机顶部的三相异步电机实现的,动力电机输出扭矩,经皮带轮降速驱动同轴蜗杆转动,带动蜗轮旋转,而蜗

轮又与夹头内滑套固连,最终实现夹头旋转。考虑到夹头旋转驱动电机皮带上的减速比为 k_1 ,蜗杆转动转化至蜗轮转动的减速度比为 k_2 。最终可以得到夹头动力电机的旋转频率 n :

$$n = \frac{V_{\max}}{k_1 k_2} = \frac{\beta \pi f}{k_1 k_2 \theta_1} \quad (7)$$

现场工况下通常取 $V_{\max} = 8\pi \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$,以满足锻造精度要求。电机与蜗杆之间皮带的减速比 $k_1 = 250/280$,蜗轮蜗杆传动的减速比 $k_2 = 1/31$,可算得夹头动力电机的旋转频率 $n = 140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,可通过变频器设置调速实现。

3.2 夹头间歇旋转的实现方法

精锻机锻打期间,夹头必须停止旋转,否则会造成锻件的扭转或机械传动系统的刚性破坏。

夹头旋转由电机驱动,其最直接的实现方法即控制电机快速起停。采用易维护、寿命高的三相异步电机,同时采用变频器恒流启动方式,以适应负载转动惯量较大的场合。选择转子阻值较大或具有高堵转转矩的电机,以便于启动时有较大力矩,同时尽可能减小夹头的旋转速度,缩短电机启停和加减速时间。

这一方案理论可行,但不适合在工程上实现。首先,夹头的振荡启停和锤头的锻打频率是对应的,而现阶段工业电机的起停时间大多仍在秒量级,最快有能达到零点几秒启动时间的特种电机,但仍难以满足精锻机的高频锻打特性。其次,分析精锻机锻造过程可知,操作机的夹头旋转振荡启停是带载的,电机处于重载态启动的时间会比空载启动或轻载启动更长。此外,大功率电机启动次数具有严格的上限要求,启停过程中会产生大量的机械热量,会减少电机寿命甚至损坏电机。

3.2.1 基于机械补偿的夹头间歇旋转

工程上常常利用特殊的机械结构进行补偿,经实验证明,对夹头间歇旋转的控制效果良好。

机械补偿最普遍的方案是基于夹头内部的碟簧缓冲阻尼系统。由于精锻机在实际生产工作中的锻打频率较高,产生的锻造间歇期较短,可在操作机夹头内部蜗杆轴一侧放置若干组碟簧作为缓冲阻尼系统,配合非固定位蜗杆,短暂实现夹头停止,其具体结构如图5所示。

一旦夹头旋转过程中遇到锤头抱紧阻力,非固定位蜗杆即刻不再将动力矩传递给蜗轮,而是变为自身的轴向运动,对碟簧进行挤压,从而将能量转

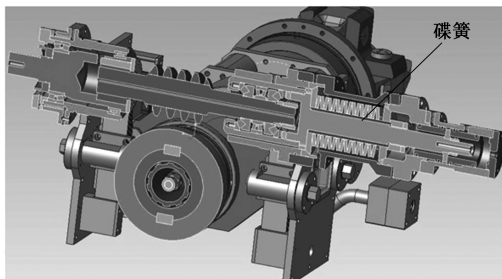


图 5 夹头碟簧的机械结构图

Fig. 5 Mechanical structure diagram of chuck disc spring

化为碟簧的弹性势能，由此可避免锻件内部的晶体扭曲和损伤。

而当夹头受到的锤头抱紧阻力消失时，碟簧阻尼系统内部存储的弹性势能便会释放，从而推动蜗杆反向移动，同时，由于旋转电机带动蜗杆持续转动，二者结合，将更大的动力矩传递给蜗轮，加速了夹头旋转。通过碟簧缓冲卸力机构，精锻机在一定程度上可实现锻造过程中夹头旋转的频繁启停功能。

除此之外，还有一种凸轮机械补偿方法，如图 6 所示，蜗杆传动由凸轮补偿，凸轮轮廓由两个方向相反的螺旋曲线组成，螺旋曲线节距等于蜗杆螺距，弹簧用于保持凸轮和插销之间的紧密接触。

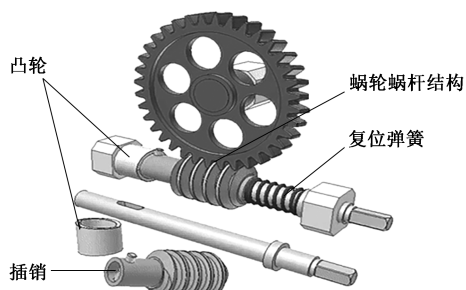


图 6 凸轮的机械结构图

Fig. 6 Mechanical structure diagram of cam

在此机械结构下，凸轮仅有半个圆周和蜗杆螺纹方向一致（左旋），蜗杆持续旋转，当插销处于凸轮的左旋曲线段时，会对蜗轮产生动力矩，而插销处于凸轮的右旋曲线段时，则不再会对蜗轮产生动力矩，至此实现了蜗轮的间歇转动。其不足之处在于：极其依赖自身机械结构的可靠性，控制精度不高，且经多次使用后蜗杆、凸轮等关键机械部件容易产生磨损。

3.2.2 基于伺服油缸位移补偿的夹头间歇旋转

刘贵明等^[36]提出一种基于伺服油缸位移补偿的夹头间歇旋转实现方案，旋转电机驱动蜗杆始终以

恒定速度转动，蜗杆另一端设置液压补偿油缸，油缸带动蜗杆作水平往复运动，通过控制蜗轮蜗杆的啮合和分离，使蜗轮受复合运动进而完成夹头的间歇旋转。李春^[37]利用 AMESim 软件搭建补偿油缸模型，同时提出将模糊 PID 控制算法用于实际控制，但该研究中未推导出油缸的期望位移输入曲线。

在上述基础上深入探究伺服油缸位移补偿方法，该方法的前提条件为蜗轮蜗杆可完全分离，蜗杆表面的中间位置有螺纹，称为滑套，正常情况下滑套与蜗轮的齿完全啮合，具体补偿方案如图 7 所示。

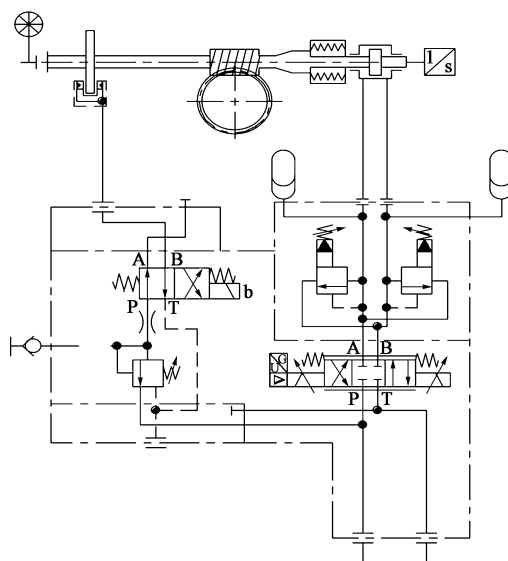


图 7 操作机夹头伺服油缸位移补偿示意图

Fig. 7 Schematic diagram of servo cylinder displacement compensation for manipulator chuck

重点推导出油缸的期望位移输入曲线。基于第 2 章的分析，精锻机的锻造过程是锤头以距离锻件最远端为运动起始点作周期性的往复运动，将此时刻作为锻造起始时间，锤头位置的变化曲线 Γ 可以改写为：

$$\Gamma = R + a \cos \theta = R + a \cos(2\pi f t) \quad (8)$$

式中： t 为时间。

根据夹头旋转和锤头锻打协作关系分析夹头旋转过程。锻造开始后，锤头位置以余弦规律变化逐渐接近工件，夹头则由最初的旋转状态开始慢慢减速；在锤头刚刚接触到锻件时，夹头恰好不再旋转，即蜗杆滑套与蜗轮完全分离；而当锤头回退至再次离开锻件时，滑套和蜗轮重新开始逐渐咬合，夹头以较小速度开始恢复旋转；锤头重新回到最大距离处，夹头恢复至最初旋转速度。

令滑套的总长度为 L ，以蜗轮、蜗杆完全啮合时的位置为滑套的初始厚点位置，基于锤头的位置

曲线可以得出滑套的期望位移曲线 Γ' 。

$$\Gamma' = \frac{L}{2(1 - \cos\theta_1)}(1 - \cos 2\pi ft) \quad (9)$$

3.2.3 基于伺服油缸速度补偿的夹头间歇旋转

实际机械结构中, 蜗轮、蜗杆始终啮合, 而蜗杆旋转和蜗杆轴向平移均能使蜗轮转动。因此, 本文创新性地提出了伺服油缸速度补偿模型, 如图8所示。其中, 蜗杆转速可由旋转编码器测得, 液压补偿油缸的实时位移则由位移传感器测量得知, 从而形成闭环反馈, 液压补偿油缸基于电液位置伺服系统实现了精确跟踪控制。

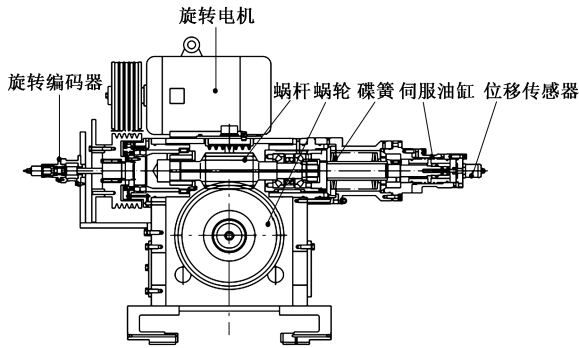


图8 基于伺服油缸速度补偿的夹头间歇旋转结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of intermittent rotation structure of chuck based on servo cylinder speed compensation

单独开启夹头旋转电机时, 蜗杆旋转传递动力矩带动蜗轮旋转; 单独启动补偿油缸拉动蜗杆轴向移动, 则会使蜗轮反向旋转。因此, 夹头旋转电机和补偿油缸同时作用于蜗轮, 速度矢量合成后蜗轮无旋转动作。

另一种解释为: 油缸拉动蜗杆让位, 补偿蜗杆沿自身螺纹移动, 从而使蜗杆的旋转动力全部转化为轴向平移, 蜗轮蜗杆间无动力矩传递, 夹头停止旋转。而当油缸推动蜗杆反向移动时, 配合电机提供旋转动力矩, 蜗轮的旋转速度加快, 夹头加速旋转。

设定一个完整的锻造周期 T , 具体动作过程为: $0 \sim t_1$ 时间段内, 锤头未接触锻件, 油缸无需补偿; $t_1 \sim t_2$ 时间段内, 锤头接触锻件, 蜗杆轴上安装旋转编码器, 测得电机驱动蜗杆的实时旋转速度 v_0 , 根据机械参数得知其旋转速度和线速度的转换比为 λ , 因此, 其作用于蜗轮的线速度 $v_1 = \lambda v_0$, 此阶段油缸带动蜗杆沿螺纹直线动作, 控制油缸的速度等于蜗轮的线速度 v_1 , 同时, 在补偿油缸内加装活塞位置传感器作为反馈信号, 通过调节电液伺服阀实时控制油缸按照期望速度运行; $t_2 \sim t_3$ 时间段内, 锤头回

退离开锻件后, 电机依旧以恒定功率转动, 为了不损坏蜗杆机械结构, 补偿油缸需驱动蜗杆以合适的速度 v_2 反向移动, 使其快速恢复至初始位置, 方便下次补偿, 此蜗杆反向移动过程中夹头旋转速度会加快; $t_3 \sim t_4$ 时间段内, 蜗杆回到初始位置, 油缸停止动作, 等待下一个锻造周期。系统历经上述阶段最终实现夹头间歇旋转功能, 得到补偿油缸期望位移曲线如图9所示。

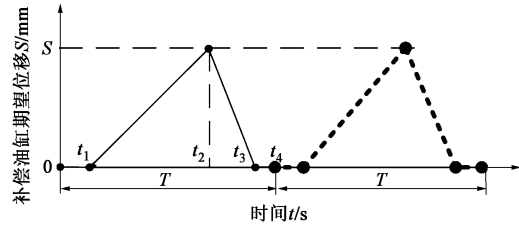


图9 夹头伺服油缸速度补偿期望位移曲线

Fig. 9 Expected displacement curve of speed compensation for chuck servo cylinder

最终得到的补偿油缸期望位移 S 的表达式为:

$$S = \begin{cases} 0, & 0 + NT \leq t < NT + \frac{T_3}{2} \\ v_1 t, & NT + \frac{T_3}{2} \leq t < NT + \frac{T_3 + 2T_\Delta}{2} \\ v_1 T_\Delta - v_2 t, & NT + \frac{T_3 + 2T_\Delta}{2} \leq t < NT + \frac{T_3 + 2T_\Delta}{2} + \frac{v_1 T_\Delta}{v_2} \\ 0, & NT + \frac{T_3 + 2T_\Delta}{2} + \frac{v_1 T_\Delta}{v_2} \leq t < (N+1)T \end{cases} \quad (10)$$

式中: N 为正整数。

4 操作机随动进给分析

操作机送料进给是锻造工艺中的关键部分, 不仅决定着锻造效率, 也会影响锻件质量。有研究表明: 轴向送进速度较低有助于压实心部, 焊合内部缺陷, 但会增加锻打道次^[38]; 轴向送进速度较高, 则可以降低身管的变形不均匀性, 却不方便去棱, 而且影响应力分布^[39]。韩风等^[40]对新型镁合金棒材试样进行径向锻造实验后发现, 在轴向送进速度为 $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和径向压速率为 10% 时, 锻件的锻后伸长率最小。因此, 在确定好锤头锻打动作和夹头间歇旋转动作的基础上, 需要基于机械部件的协作运动机理深入探究操作机送料进给过程。

4.1 工件锻后伸长量问题的提出

锤头对锻件进行同步高频锻造, 锻件处于三向压应力状态, 会形变产生一定的伸长量。锻件变形受温度、速度的影响, 会有不同的截面形状以及轴向变化, 易产生较大的锻造误差。

由于操作机两侧夹头与锻件的刚性连接, 锻件伸长后容易发生挤压弯曲, 因此, 需要实时调整两侧操作机的速度, 补偿锻造过程产生的伸长量。基于精锻机的锻造对象多为细长轴类工件, 其轴向截面变化有规律, 可根据锻件锻造前后体积不变原理展开研究。

赵玮^[41]首次对锻件伸长量补偿的操作机随动进给进行了详细研究。将精锻机的送料过程分为开环送料和闭环随动控制两部分: 开环送料时不启动锤头锻打功能, 仅根据工艺要求控制操作机送料至某一精确位置然后停止; 闭环随动控制仅发生在锤头锻造间歇期, 根据锻件的形变规律定量计算轴向随动位移, 快速精准调节两侧操作机补偿锤头锻打期产生的伸长量。

该方法具有很好的参考价值, 但问题是: 不仅需要锤头锻打动作频繁启停, 还需要操作机在极短的锻造间歇期实现快速响应, 工程实现难度非常大。

4.2 锻后伸长量机械缓冲补偿

精锻机锻造工艺包括单侧夹头夹持和双侧夹头夹持两种送料方式。在单侧操作机送料时提出基于板簧缓冲的伸长量补偿方案。板簧结构如图 10 所示。

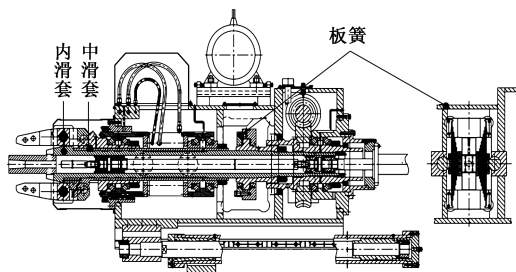


图 10 操作机板簧机械结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of mechanical structure for manipulator plate spring

锻造过程中, 锻件被锻部分发生形变轴向伸长, 伸长量会沿锻件轴向向两侧延伸, 其中一侧为自由端, 另一侧则是操作机。操作机内部设计有多组板簧缓冲结构。当锤头锻打抱紧锻件时, 锻件无法继续轴向运动, 轴向抱紧阻力可通过夹头外滑套和中滑套传递给板簧机构蓄能, 缓冲操作机的停滞效应, 同时防止锻件伸长产生的作用力无处释放而对锻件自身造成挤压弯曲变形; 而锻造间歇期锤头松开锻

件, 板簧即刻释放能量, 加快操作机送料进给速度。板簧补偿方案可以在一定程度上解决单侧操作机送料进给的伸长量延展问题。

4.3 基于双侧操作机位移控制的锻后伸长量补偿

为了锻件的质量, 大多数锻造工艺采用双侧操作机夹持协作送料, 因此, 双侧操作机随动进给是本文的重点研究部分。

首先, 4 个锤头必须正常执行持续的高频偏心锻打动作, 避免锻打主机的频繁启停带来的机器故障; 同时, 操作机夹持工件持续进给, 夹头旋转和轴向进给均以低速实现, 上述前提条件可使锻件的均匀性得到保证。操作机进给基于液压驱动实现, 其液压原理图如图 11 所示。

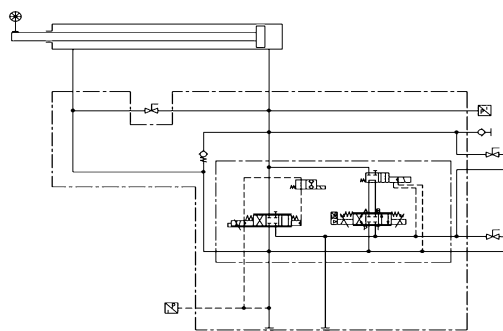


图 11 精锻机操作机进给液压驱动原理图

Fig. 11 Principle diagram of hydraulic drive for precision forging press manipulator feeding

忽略高温锻件密度变化等不可控因素, 其轴向截面的轴向变化可预测, 每次锻打, 锻件均会发生形变, 从而产生伸长量。最理想的方法是两侧操作机夹头夹持棒料移动的速度或位置均动态变化以实时补偿。但该方法需要依赖传感器的实时反馈, 而高温环境下工程上无法安装合适的传感器测量工件的伸长量, 因此, 仍然需要基于等体积不变原理在固定的时间间隔作开环位移补偿, 具体设计方案如下。

根据式 (2) 中的锤头运动周期 T 和夹头旋转时间 T_3 , 以及式 (6) 中的最大夹头旋转速度 V_{\max} , 可得知锤头锻造一次的锻件旋转角度即为 $V_{\max} T_3$ 。精锻机 4 个锤头空间对称, 均匀锻造一周各锤头至少转动 90° , 由此可计算所需的锻造次数。代入实际工程参数后得知, 4 个锤头完整锻打锻件一个圆周, 单个锤头锻造次数为 8 次。

分析锤头与锻件的接触过程, 操作机持续均匀进给, 锤头锤面长度为 L_0 , 在锻件端部刚接触到可锻造范围时, 锤头即开始动作。在前几次锻打时,

锤头的锤面未全部接触到工件，只有当锻件完全进入锻造箱，锤头才以其固定锤面长度 L_0 对锻件进行锻造。螺旋式锻造过程的锻造示意展开图如图 12 所示。

图 12 中，1-1 代表 1 号锤头第 1 次锻打锻件，2-8 则代表 2 号锤头第 8 次锻打锻件，其他编号含义依次类推，各锤头以 8 次循环锻打锻件直至完成全部加工。

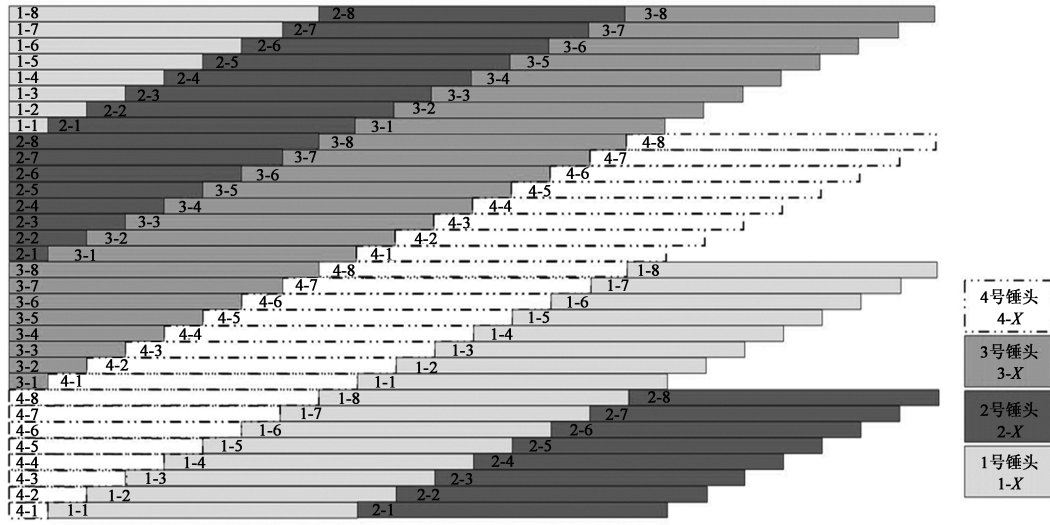


图 12 螺旋式锻造过程的锻造示意展开图

Fig. 12 Forging schematic expansion diagram of spiral forging process

由图 12 可知，当且仅当锤头锻造 8 次后，锻件轴向进给 L_0 长度时，能被锤头无空隙地均匀锻造。

首先，将精锻机 4 个锤头锻造一个圆周的时间作为计算伸长量随动补偿的控制周期，控制周期 $\tilde{T} = 8T$ 。由于锤头锻造期极短，可近似认为操作机进给和伸长量随动补偿在整个控制周期内均实现。

已知锤头锤面长度为 L_0 ，即每次锻造接触锻件的长度。根据工艺要求，锻造前锻件截面半径为 R_0 ，经过均匀锻压一个圆周后半径为 R_1 ，锻件长度从 L_0 伸长变为 $L_0 + \Delta L_0$ 。

为了不让锻件产生过多的累积伸长量，最终造成锻件弯曲等问题，采用每间隔一个控制周期 \tilde{T} ，控制进给操作机一侧相对快速移动距离 ΔL_0 的补偿方案，其中准确计算出 ΔL_0 并据此得到双侧操作机的期望进给速度，是整个方案实现的关键。

由图 12 分析得知，锻造两个端部时锻件体积变化不均匀。而从第 2 个控制周期开始至结束前一个周期内，锻件体积变化均是规则的圆柱体。根据体积相等原理得到锻件的伸长量：

$$\Delta L_0 = \begin{cases} \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_1^2} L_0, & \tilde{N} = 2, 3, 4, \dots, N-1 \\ \frac{9(R_0^2 - R_1^2)}{16R_1^2} L_0, & \tilde{N} = 1, N \end{cases} \quad (11)$$

式中： \tilde{N} 为控制补偿的次数。

因此，在控制周期内，一侧操作机轴向进给位移等于锤头锤面长度 L_0 ，另一侧操作机产生 $L_0 + \Delta L_0$ 的回退距离。若操作机两侧速度分别为 \tilde{V}_0 和 \tilde{V}_1 ，则：

$$\begin{cases} \tilde{V}_0 \tilde{T} = L_0 \\ \tilde{V}_1 \tilde{T} = L_0 + \Delta L_0 \end{cases} \quad (12)$$

依据此方案，锻造过程中的锻件伸长量补偿问题可得到较完善的解决，即一侧操作机以固定速度匀速进给，而另一侧操作机也以另一固定速度匀速回退，整体工作可在工程上完整实现。

5 结论

(1) 概括了精锻机主机锻造箱和操作机夹头的结构组成，阐明了其旋转进给高频锻造的运行原理。基于锤头偏心锻打实现方式推导出其运动曲线，同时，划分出锤头锻打期和锻造间歇期以实现锤头锻打和夹头旋转的协作控制过程。

(2) 针对精锻机夹头间歇旋转的需求，总结了基于碟簧或凸轮的机械实现方案，重点探究了基于伺服油缸补偿的位移跟踪控制和速度跟踪控制两种高精度算法，首次创新性地推导出液压补偿油缸的

期望输出曲线,可作为夹头间歇旋转实现的重要理论依据。

(3) 提出径向锻造中锻件锻后伸长量补偿的控制难点,理论推导了操作机最佳进给速度,基于工程实现角度合理规划了单侧操作机送料时的板簧缓冲补偿方法和双侧操作机送料模式下的随动控制方案。

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] 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.
- [3] 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. Research status and development trend of modern free forging equipment technology [J]. Precision Forming Engineering, 2015, 7 (6): 17-24.
- [4] 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. Review on radial forging equipment and process [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2018, 53 (6): 27-30.
- [5] 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.
- [6] 贾斗余. 精锻机锻造锻透性及相关工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
Jia D Y. Research on Forging Penetration and Related Process of Precision Forging Machine [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2015.
- [7] Bapari A, Najafizadeh A, Moazeny M, et al. Simulation of radial forging conditions by third hits hot compression tests [J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2008, 491: 258-265.
- [8] 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.
- [9] 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: 329-334.
- [10] Darki S, Raskatov E. Analysis of the hot radial forging process according to the finite element method [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110: 1061-1070.
- [11] 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 of several typical main machine structures of radial forging machine [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 16-32.
- [12] 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): 2058-2076.
- [13] 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. Effect of Different Hammer Heads and Feed Rate on M2 Carbide in Radial Forging High Speed Steel [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2012.
- [14] 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 axle forming [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2008, (4): 313-316.
- [15] 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 New Forging and Compaction Technology of GFM Precision Forging Machine for Long Axis Parts [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2016.
- [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 and Parts, 2018, (24): 20-21.
- [17] 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 diameter forging down rate on thermal parameters and microstructure evolution of magnesium bar [J]. Precision Forming Engineering, 2021, (5): 48-52.
- [18] 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. Radial forging technology and its application in magnesium alloy forging [J]. Light Metals, 2018, (5): 48-52.
- [19] 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. Precision Forging of Stainless Steel Body Tube Bore [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [20] 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. Forging penetration analysis of precision radial forging of tube bore [J]. Acta Armamentarii,

- 2019, 40 (3): 473-479.
- [21] 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. Discussion on rationality of hydraulic drive mode of radial forging machine for aviation forging [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014, (6): 13-16.
- [22] 李坤, 赵升吨, 张超, 等. 大规格花键轴单齿径向锻造变形行为 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (2): 69-75.
- Li K, Zhao S D, Zhang C, et al. Deformation behavior during single-tooth radial forging of large-scale spline shaft [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (2): 69-75.
- [23] Koppensteiner R, Auer M, Fair B. GFM radial forging machines for the titanium market [A]. Proceedings of the 13th World Conference on Titanium [C]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [24] 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.
- [25] Glushenkova S G, Polozhentsev K A, Dmitriev A I, et al. Development of a technology for a hydraulic radial forging machine at the Elektrostal Metallurgical Plant [J]. Metallurgist, 2017, 61: 394-399.
- [26] Karamyshev A P, Nekrasov 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 [A]. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) [C]. Tomsk, 2015.
- [27] 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 on adjustment process of hammer head of diameter forging machine [J]. China Metal-forming Equipment & Manufacturing Technology, 2016, 51 (6): 28-29.
- [28] 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 on control system of 3 MN radial forging machine based on PID+feedforward [J]. Heavy Machinery, 2020, (3): 44-47.
- [29] 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 design of forging box of 10 MN hydraulic precision forging machine [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28 (3): 88-91.
- [30] 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. Structure and characteristics of forging box of fine forging machine [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016, (8): 186-188.
- [31] 葛鹏. 1.6 MN 精锻机主机设计 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- Ge P. Design of 1.6 MN Fine Forging Machine [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [32] 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 inner slide sleeve in collet of fine forging machine [J]. Hebei Metallurgy, 2010, (4): 52-55.
- [33] 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. Research on structure and operating principle of collet of fine forging machine [J]. Mechanical Engineer, 2014, (1): 173-174.
- [34] 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 Chuck and Finite Element Analysis of Key Parts of Precision Forging Machine [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007.
- [35] GB/T 908—2019, 锻制圆棒尺寸外形重量及允许误差 [S].
- GB/T 908—2019, Dimension, shape, weight and allowable error of national standard forged steel bar [S].
- [36] 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 of diameter forging manipulator [J]. First Heavy Technology, 2006, (4): 31-32.
- [37] 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 Forging Machine Based on Fuzzy Self-Tuning PID Algorithm [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [38] 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. Effect of radial forging process parameters on forging permeability [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25 (22): 3098-3103.
- [39] 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 non-uniformity of cold radial forging tub wall thickness direction [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41 (1): 13-20.
- [40] 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 properties of Mg-8Al-0.6Zn-0.3V magnesium alloy bars [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (17): 115-117.
- [41] 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 Fine Forging Machine [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.