

楔横轧机可拆卸轧辊液压系统的优化分析

徐悦鹏, 高俊峰, 陈钰金, 袁红霞, 邵长斌, 陈宪明, 石一馨, 刘修莘

(中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 为实现楔横轧机轧辊的可拆卸, 以便于模具更换和加热, 对楔横轧机轧辊端进行设计, 通过引入液压系统, 实现了轧辊在工作过程中固定, 在更换模具时的拆卸等工作。首先, 为进一步了解轧辊工作时的受力大小, 通过仿真分析得到了模具工作时的轴向载荷, 以此为基础设计了以液压缸为主的液压锁紧回路, 在液压缸不工作时, 不因泄漏、轴向冲击等因素改变轧辊和楔横轧半轴的相对位置, 保证了楔横轧工作时的稳定性。其次, 为了使液压系统在冲击载荷下保持稳定, 设计了以液压缸和双液控单向阀为主的液压系统, 并根据其在工作载荷下的工作状态进行了优化分析。最后, 利用楔横轧机样机对该液压系统进行了实验测试, 验证了该系统优化方案的可行性, 提升了系统的稳定性和可靠性, 节省了模具更换时间, 加快了企业的生产效率。

关键词: 楔横轧; 可拆卸轧辊; 液压锁紧回路; 优化分析; 模具更换

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.020

中图分类号: TG335 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 06-0159-10

Optimization analysis on hydraulic system of detachable roller for cross wedge rolling mill

Xu Yuepeng, Gao Junfeng, Chen Yujin, Yuan Hongxia, Shao Changbin, Chen Xianming, Shi Yiqing, Liu Xiuping
(China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the roller detachability for the cross wedge rolling mill and facilitate the die replacement and heating, the roller end of the cross wedge rolling mill was designed, and the roller was fixed during operation and disassembled during die replacement which was realized by introducing a hydraulic system. Firstly, in order to further get the magnitude of force during the operation of rollers, the axial load of the die during operation was obtained by simulation analysis, and based on this, a hydraulic locking circuit composed of hydraulic cylinders was designed. When the hydraulic cylinder was not working, the relative position between roller and cross wedge rolling half shaft was not changed due to factors such as leakage and axial impact, ensuring the stability during the cross wedge rolling operation. Secondly, in order to maintain the stability of the hydraulic system under the impact load, the hydraulic system mainly composed of hydraulic cylinders and dual hydraulic control check valve was designed, and optimization analysis was conducted based on its working state under working load. Finally, the hydraulic system was tested by the cross wedge rolling mill prototype, which verified the feasibility of the system optimization scheme, improved the reliability and stability of the system, saved the time on die replacement, and accelerating the production efficiency of the enterprise.

Key words: cross wedge rolling; detachable roller; hydraulic locking circuit; optimization analysis; die replacement

随着锻造技术的不断发展, 楔横轧逐渐广泛地应用于锻造自动化生产线中。作为轴类零件成形技术中最重要的一环, 楔横轧以其高效、节省材料等优点成为汽车制造、航空航天等关键零部件生产中的关键。

以铝合金类的零件锻造生产为例, 在生产过程中, 并不能通过简单的一道工序直接完成对铝合金

材料的成形, 大多需要通过生产工艺对其进行材料分配, 楔横轧的回转成形工艺则是可以满足铝合金锻造初期预成型的主要方式^[1-2]。然而, 大部分金属在锻造过程中, 温度范围较窄、流动性差、黏附性大, 需要对锻件及锻造模具分别进行加热, 进而保证成形过程中的温度稳定^[3]。为提高生产效率, 需要对模具进行预热处理, 这就需要采用整体式模具, 并通过内置加热棒及对应的控制系统实现对楔横轧机轧制过程中的温度控制^[4]。对于传统楔横轧机结构来说, 采用整体模具方便布置加热棒的同时, 也给模具在轧辊上的安装、维修、替换带来了一定

收稿日期: 2024-05-17; 修订日期: 2024-08-18

作者简介: 徐悦鹏 (1997-), 男, 硕士, 助理工程师

E-mail: 1379043016@qq.com

的困难。基于楔横轧机的工作原理和金属在加工过程中材料的流动规律,在楔形模具下,大部分金属随着楔横轧机模具的旋转转移至径向方向,其余部分相对于轧辊的轴向进行移动^[5],即楔横轧机工作过程中,轴向流动的金属可对模具产生轴向作用力,虽然现有研究中很少对其大小进行实际测量,但其对拆卸轧辊的影响不可忽略。

为了实现楔横轧机可拆卸轧辊系统的设计,本文将结合仿真分析对模具轴向力大小进行量化。同时在进行系统设计时,选择具有大负载、稳定性较好的液压系统为基础^[6],保证轧辊工作时的状态稳定。

在铝合金楔横轧机轧辊可拆卸液压系统设计过程中,除了要考虑轧辊可以和楔横轧机半轴紧密连

接,便于拆卸外,还应满足轧辊在工作过程中保持轴向稳定,避免轧制过程中因机械配合、轧制受力、油液压缩等因素造成模具轴向移动,进而影响锻件的成形质量。因此,需要对其液压回路进行锁紧设计,即在液压缸或者液压马达的回路中串接锁紧液压单元。当停止供油时,通过锁紧回路进行保压,以防止在重力或者外部影响下造成活塞杆移动,实现将活塞在任意位置锁定^[7-8]。常见的液压锁紧方式分为单向阀锁紧、双向阀锁紧、换向阀锁紧^[9-10],如图1所示,其原理皆为停止供油或阀体换向时防止油液回流。为保证系统稳定性,本文拟采用双向液控单向阀和双向控制阀复合控制的形式,对其液压系统进行研究。

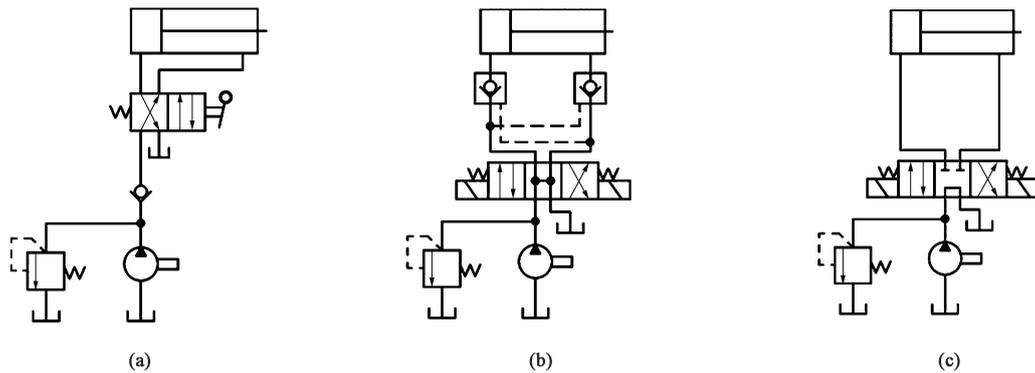


图1 常见形式的锁紧回路

(a) 单向阀锁紧 (b) 双向阀锁紧 (c) 换向阀锁紧

Fig. 1 Common forms of locking circuits

(a) Check valve locking (b) Bidirectional valve locking (c) Reversing valve locking

对于楔横轧机的研究现状,大多从轧辊轧制过程中的成形精度、模具质量、整体强度等方面出发,随着楔横轧机生产零件向着多品种、大批量的方向发展,模具更换的频率也相应提高,可拆卸轧辊液压系统的设计可以很好地解决安装调试要求高和人工安装精度低的问题,为实现模具的自动换装奠定了一定的研究基础^[11-12]。本文以铝合金锻件和整体式模具为基础,提出以液压系统为主的楔横轧机轧辊可拆卸设计,在保证工件成形质量的前提下,实现了该液压系统稳定可靠,提高了楔横轧机生产效率。

1 轧辊工作受力分析

1.1 工作原理

楔横轧作为一种高效的金属成形工艺,其工作原理如图2所示。在铝合金轧制过程中,将加热后的铝合金棒料送入楔形模具中,铝合金棒料在模具

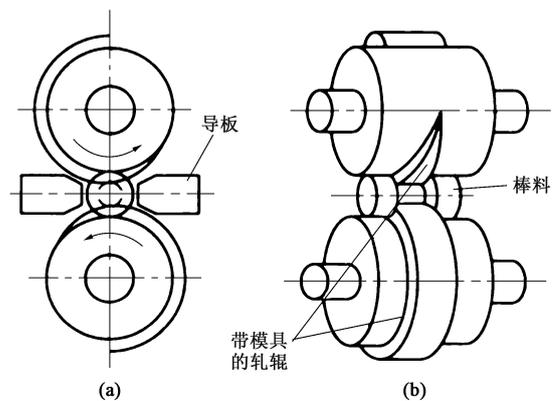


图2 楔横轧工作原理

(a) 侧视图 (b) 正视图

Fig. 2 Working principle of cross wedge rolling

(a) Side view (b) Front view

带动下做相反方向的回转运动,此时,铝合金棒料在楔形模具作用下,轧制成各种形状的台阶轴,楔横轧的变形主要是棒料的径向压缩和轴向延伸。

通过楔横轧机的工作原理可知, 轧辊、模具在工作状态中的轴向受力主要是由铝合金棒料轴向延伸所产生的, 其大小对液压系统的设计至关重要, 但实际工作状态中, 由于楔横轧机工作过程中轧辊和半轴始终处于运动状态, 并且棒料轧制时间短、成形速度快, 很难实际测量轴向力的大小, 本文将结合仿真模拟, 对其进行进一步分析。

1.2 轧辊受力有限元模拟

在楔横轧机工作过程中, 模具和轧辊固连在一起, 即模具的轴向受力为轧辊的轴向受力。因此, 为得到轴向受力大小, 采用仿真软件对模具工作过程进行有限元分析, 将上模具、下模具、前导板、后导板、棒料等模型导入到软件中, 各组件相对位置如图3所示。

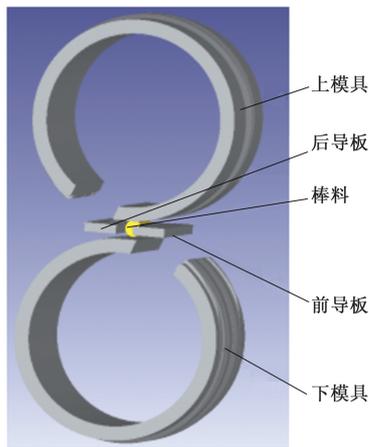


图3 各组件相对位置

Fig. 3 Relative positions of each component

分别设置模具和棒料的初始温度, 通过前后导板对棒料位置进行固定, 其在楔形模具的作用下进行回转成形。模拟完成后, 进入到模型的后处理过程, 轧制后铝合金棒料应力情况如图4所示。

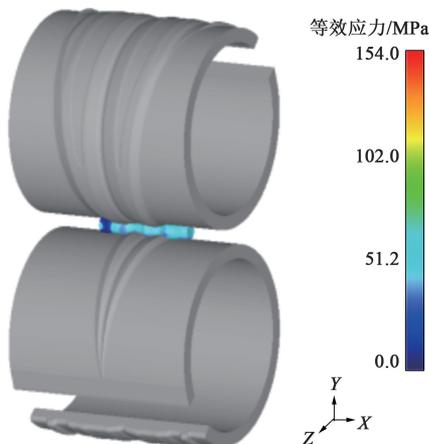


图4 铝合金棒料的等效应力

Fig. 4 Equivalent stress of aluminum alloy bar material

通过仿真结果可以发现, 棒料整体受力均匀, 并且轴向延伸较大。通过仿真软件可以得到模具在变形工件上所施加的载荷大小, 模具轴向载荷变化如图5所示。

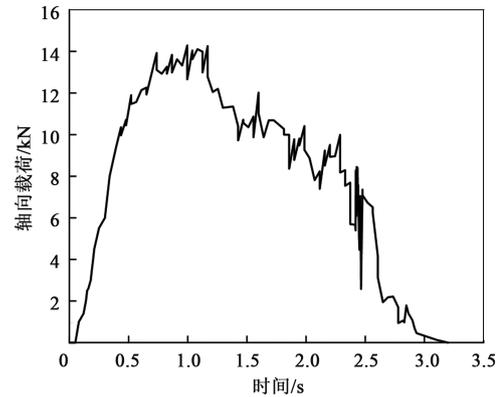


图5 模具轴向载荷变化曲线

Fig. 5 Changing curve of axial force of die

如图5所示, 通过对铝合金棒料加工过程中变形较大的区域进行载荷分析, 可以看到, 工作过程中, 模具受到的轴向载荷具有变换时间短、速度快、非线性的特点, 因此对液压系统要求也较高。在0~3.5 s时间内, 模具轴向载荷最大值为14 kN, 并且由于楔形模具的影响, 载荷减小时呈现一定的非线性, 短时间内对轧辊轴向冲击较大。所以, 在可拆卸轧辊设计过程中, 为保证该液压系统稳定性, 在锁紧后要减小轴向载荷对液压系统的影响, 进而保证轧制过程中棒料的成形精度。

2 可拆卸轧辊液压系统设计

2.1 系统工作原理

首先, 在轧辊拆卸过程中, 控制液压缸活塞杆缩回, 使半轴和轧辊在水平方向上分离, 当两者间有足够间隙时, 需要将液压缸在当前位置进行锁紧, 避免轧辊拆卸过程中发生滑落; 在轧辊安装过程中, 控制液压缸活塞杆伸出, 使半轴和轧辊贴合并固定, 同时将液压缸在当前位置锁紧。根据该液压系统的工作特点, 选择双向液控单向阀^[13], 其示意图和结构图如图6所示。

如图6所示, 双向液控单向阀由一个控制柱塞和两个阀芯组成, 当液压油从A路流入时, 在压差作用下自动将左阀芯顶开, 使A路和A'路联通, 液压油经A'路进入到液压缸的无杆腔, 同时控制柱塞向右运动, 使B路和B'路联通, 将原来B'路的液压

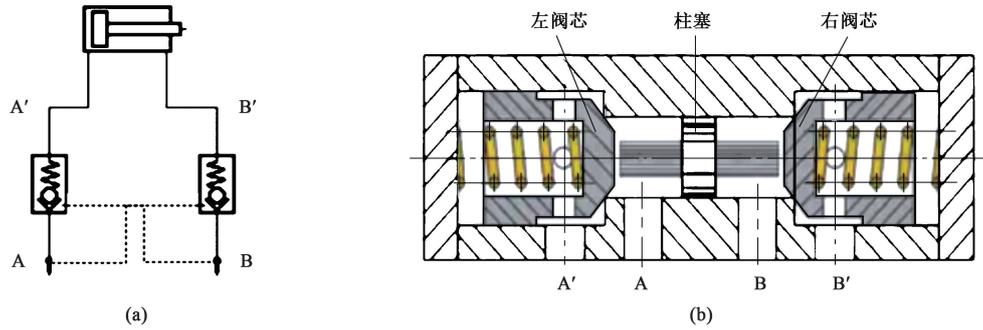


图 6 双向液控单向阀示意图 (a) 和结构图 (b)

Fig. 6 Schematic diagram (a) and structural diagram (b) of bidirectional hydraulic control check valve

油经 B 路流出。当液压缸活塞杆运动至所需的位置时, 停止供油, 右阀芯在弹簧力的作用下推动柱塞向左运动, 左阀芯关闭, 即实现保压锁紧。同理, 当液压油从 B 路流入时, 双向液控单向阀阀芯运动规律与上述相同。

为了更加深入地探究双向液控单向阀的工作状态, 假设液压缸缸筒直径为 D , 活塞杆直径为 d , 双向液控单向阀活塞直径为 D_1 , 阀芯孔直径为 d_1 , 工作状态下液压缸所受负载为 F , 进油腔压力为 p_1 , 回油腔压力为 p_2 。

其中, 液压缸活塞往复运动时的速度之比 φ 为:

$$\varphi = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{D^2}{D^2 - d^2} \quad (1)$$

式中: v_1 、 v_2 为活塞杆伸出、缩回速度; A_1 为无杆腔油液的作用面积; A_2 为有杆腔油液的作用面积。

当液压缸无杆腔为进油腔时, 在不考虑压力损失和摩擦力的前提下, 有:

$$p_1 A_1 = p_2 A_2 + F \quad (2)$$

此时, 双向液控单向阀打开的条件为:

$$p_1 \pi \frac{D_1^2}{4} > p_2 \pi \frac{d_1^2}{4} \quad (3)$$

将式 (1) 和式 (2) 代入式 (3), 可以得到:

$$\frac{D_1}{d_1} > \sqrt{\varphi - \frac{F}{p_1 A_2}} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 当负载 $F=0$ 时, 有杆腔开锁的条件为 $D_1/d_1 > \sqrt{\varphi}$; 当液压缸受压时, 负载 $F>0$, D_1/d_1 开锁最小值减小; 当负载不确定时, 要保证开锁, 仍然可取 $D_1/d_1 > \sqrt{\varphi}$; 当液压缸受拉时, 负载 $F<0$, 有杆腔开锁最小值相应增大。

当液压缸有杆腔为进油腔时, 在不考虑压力损失和摩擦力的前提下, 有:

$$p_1 A_2 = p_2 A_1 - F \quad (5)$$

同时, 可以得到无杆腔开锁时, 有:

$$\frac{D_1}{d_1} > \sqrt{\frac{1}{\varphi} + \frac{F}{p_1 A_1}} \quad (6)$$

可见, 采用双向液控单向阀的液压系统, 其结构尺寸和负载变化存在一定的关系并相互影响, 同时进油腔压力 p_1 也受到液压泵或系统最大工作压力的限制, 所以, 要综合考虑多因素之间的关系, 避免出现双向液控单向阀无法开锁的工况。

在双向液控单向阀的基础上, 为实现液压缸带动半轴左右运动, 还需对换向阀进行选择, 考虑到系统在未供油时需保持液压回路的锁紧, 选用三位四通的 Y 型换向阀, 如图 7 所示。当换向阀阀芯处于右位时, P 路和 A 路联通, 液压油经单向阀进入无杆腔, 推动液压缸活塞杆向右伸出, 停止供油时, 油路锁紧。当换向阀处于中位时, A 路和 B 路与 T 路联通, 在双向液控单向阀右阀芯作用下, A 路和 B 路中液压油经 T 路返回油箱, 此时双向液控单向阀阀芯达到平衡, 实现锁紧。同理, 当换向阀阀芯处于左位时, P 路和 B 路联通, 液压油经单向阀进入有杆腔, 推动液压缸活塞杆向左运动, 实现轧辊和半轴的分离。

通过上述液压原理分析, 选用的双向液控单向阀和三位四通的 Y 型换向阀, 可实现液压缸控制半轴和轧辊的分离和贴合过程, 并且可以在任意位置停止供油和保压, 即实现锁紧功能, 保证了轧辊拆卸过程中的稳定性, 以下将针对此液压系统进行进一步的完善和仿真分析。

2.2 系统建模与仿真

通过上述分析, 在仿真软件中搭建可拆卸轧辊部分的液压模型, 如图 8 所示, 其中 k 为电流信号

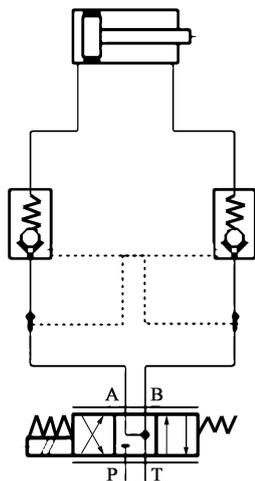


图 7 液压锁紧回路中换向阀示意图

Fig. 7 Schematic diagram of hydraulic locking circuit with reversing valve

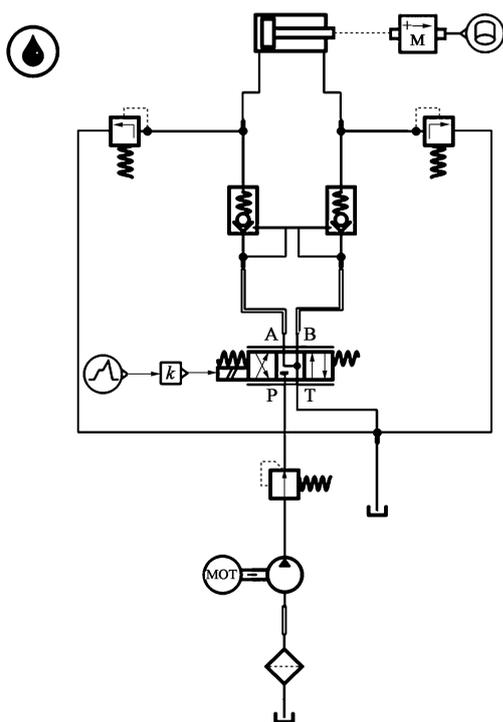


图 8 可拆卸轧辊液压模型

Fig. 8 Hydraulic model of detachable roller

放大系数。同时，为稳定电机泵的出口压力，在其出口加入一个减压阀。

液压仿真系统的关键参数设置如图 9 所示。

液压仿真系统的基本参数如表 1 所示。

设置液压缸行程为 70 mm，通过仿真得到换向阀输入信号曲线如图 10 所示，质量块位移曲线如图 11 所示。

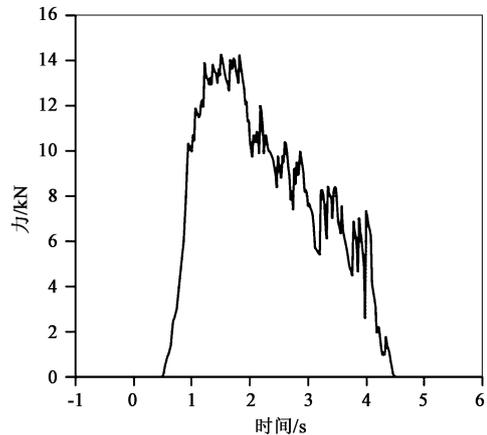


图 9 液压缸端施加的力

Fig. 9 Force applied at end of hydraulic cylinder

表 1 液压仿真系统参数

Table 1 System parameter of hydraulic simulation

参数	数值	备注
泵输出流量/(L · min ⁻¹)	12	—
系统压力/MPa	12	—
最大压力/MPa	16	—
换向阀信号/mA	40	P 路→ A 路, B 路→ T 路
	0	A 路、B 路→ T 路
	-40	P 路→ B 路, A 路→ T 路

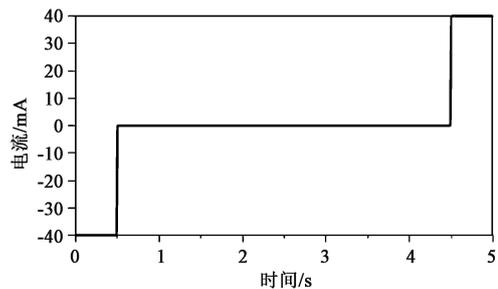


图 10 换向阀输入信号

Fig. 10 Input signal of reversing valve

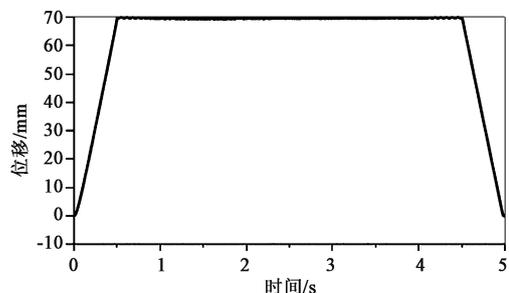


图 11 质量块位移曲线

Fig. 11 Displacement curve of mass block

根据预期工况和参数设定, 液压缸在 0.5 s 内伸出, 并且在指定时间内完成液压回路的锁紧, 在 4.5~5.0 s 内缩回, 初步验证了此方案的可行性, 并确定了双向液控单向阀和三位四通的 Y 型换向阀方案的正确性。然而, 随着负载的变化, 液压缸活塞杆存在小幅度抖动, 需要结合系统进一步优化设计。

2.3 系统优化与仿真

上述研究对可拆卸轧辊液压系统进行了建模和仿真, 实现了液压缸伸出、缩回以及锁紧。而在轴向力的作用下, 活塞杆的移动速度变化也是影响拆卸平稳性的关键指标, 通过仿真得到液压缸无杆腔压力与活塞杆速度变化曲线, 如图 12 所示。

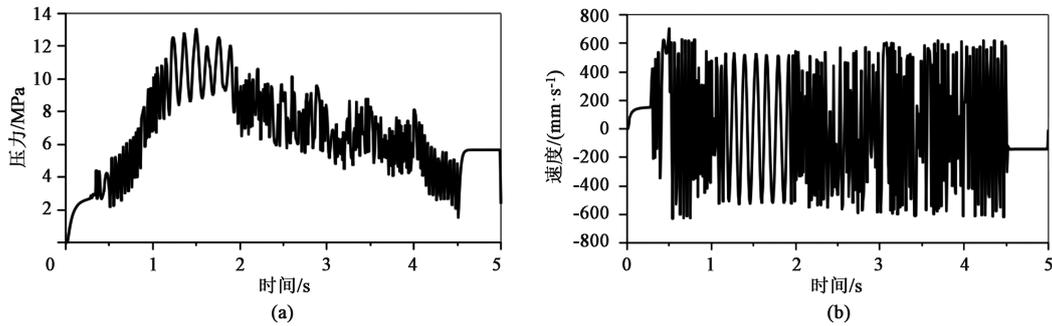


图 12 液压缸状态变化曲线

(a) 无杆腔压力 (b) 活塞杆速度

Fig. 12 Changing curves of hydraulic cylinder state

(a) Pressure of rodless chamber (b) Speed of piston rod

在系统运行过程中, 液压缸无杆腔压力变化如图 12a 所示, 0.5 s 后, 换向阀输入信号为零, 系统在液控单向阀作用下处于锁紧状态, 即液压缸进油处和回油处应处于保压状态。如图 12b 所示, 活塞杆受到轴向载荷的影响, 存在较大的速度波动, 在实际工作过程中会严重影响液压缸的控制精度和液压锁紧系统的稳定性。

通过对图 12a 进行分析, 可以发现, 系统运行后的抖动和供油量不足有关, 0.5 和 4.5 s 换向时的抖动是由于负载惯性的影响。在锁紧过程中, 正常状况下液压缸左右两腔应处于平衡状态, 但随着轴向力的变化, 使进油口、回油口两侧压力差处于不断地补偿、平衡、再补偿的变化状态, 对双向液控单向阀的平衡造成一定的影响, 从而使活塞杆速度变化较大, 如图 12b 所示, 并且随着负载的不断加大, 单向阀的开启压力均会不断升高, 进而造成冲击和抖动更加明显。

通过分析可知, 产生上述问题的主要原因是负载变化造成系统油路流量变化, 进而导致活塞杆运动速度不稳定。为了改善这种情况, 对图 8 所示的可拆卸轧辊部分的液压模型进行优化, 优化后模型如图 13 所示。

如图 13 所示, 在液压缸两侧油路中串接一个单向节流阀, 通过改变节流截面或节流长度以控制液压油的流量, 通过节流阀和单向阀串接来实现油路

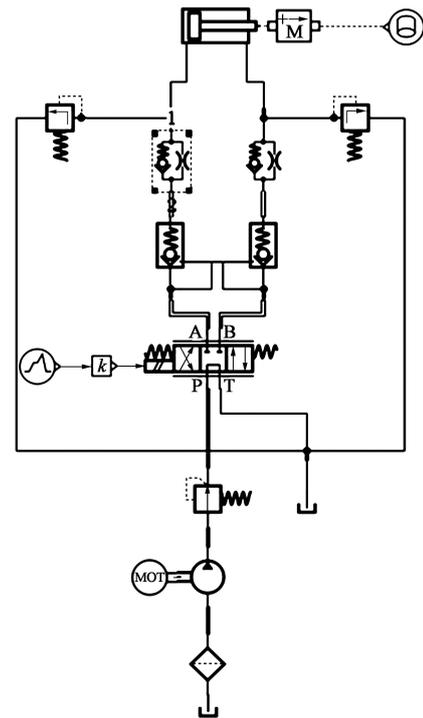


图 13 优化后可拆卸轧辊液压模型

Fig. 13 Hydraulic model of detachable roller after optimization

的节流调速, 进而使活塞杆趋于匀速运动。

通过上述分析可知, 液压缸在锁紧状态下, 即使不能回油, 无杆腔压力也会随着轴向载荷的变换而变化, 优化后压力随载荷的变化关系如图 14 所

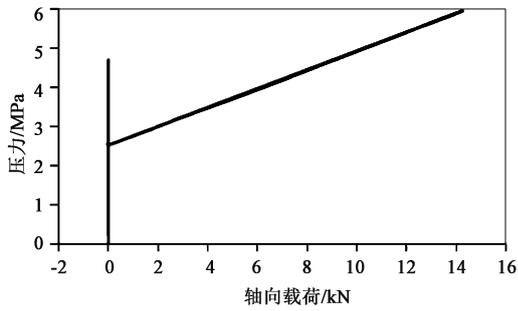


图 14 无杆腔压力随轴向载荷变化曲线

Fig. 14 Changing curve of rodless chamber pressure with axial load

示。优化后的模具轴向载荷和无杆腔压力呈线性变化，系统稳定性得到提升。

优化后得到的液压缸活塞杆的位移变化曲线和无杆腔流量曲线如图 15 所示。

如图 15 所示，优化后的活塞杆位移受载荷冲击的影响较小，整体最大波动约为 0.4 mm。同时，系统流量决定了转速的变化，优化后的液压系统可以保证系统的响应速度和换向平稳，也在一定程度上提高了液压缸启动时系统的稳定性，验证了液压系统在不同工况下的可行性和稳定性。

基于上述原理及仿真研究，搭建了楔横轧机可拆卸轧辊液压系统，如图 16 所示。为增强轧辊拆卸及贴合锁紧过程的稳定性和可靠性，上下两个轧辊端分别采用两个液压缸串联的方式。

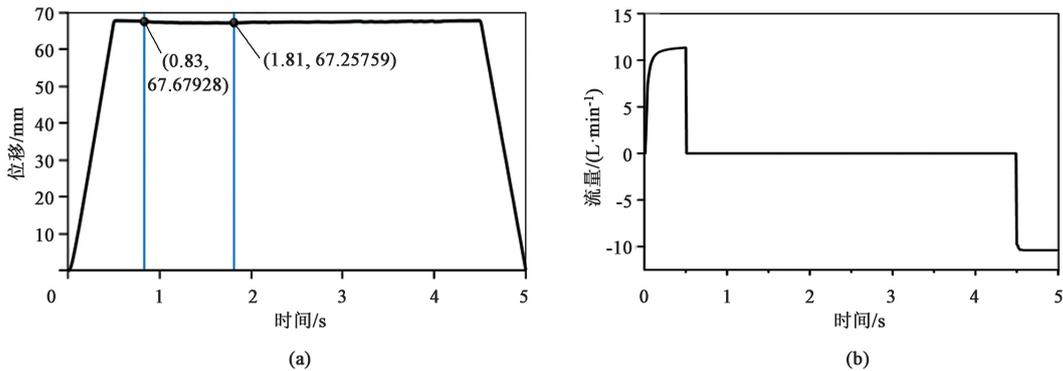


图 15 优化后液压缸状态变化曲线

(a) 活塞杆位移 (b) 无杆腔流量

Fig. 15 Changing curves of hydraulic cylinder state after optimization

(a) Displacement of piston rod (b) Flow of rodless chamber

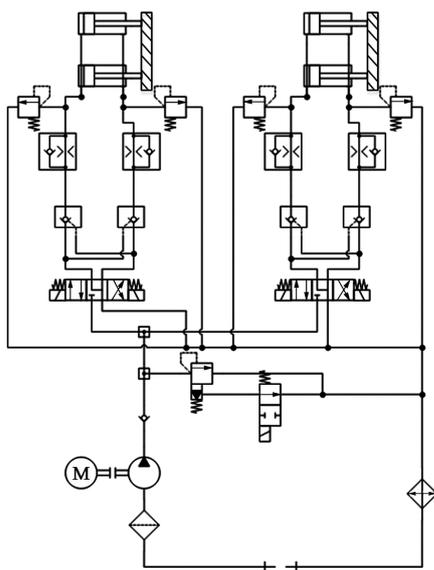


图 16 可拆卸轧辊液压系统

Fig. 16 Hydraulic system of detachable roller

通过研究，确定了楔横轧机可拆卸轧辊液压系统的主要组成，同时，针对楔横轧机可拆卸轧辊结构进行了设计，传统楔横轧机轧辊的连接结构如图 17 所示。以下轧辊为例，传统楔横轧机通过半轴和半轴套对轧辊进行固定，半轴和偏心齿轮相连接，两端分别和立柱进行相连，实现上下轧辊的转动。传统结构上，若要对轧辊上的模具进行更换或维修，

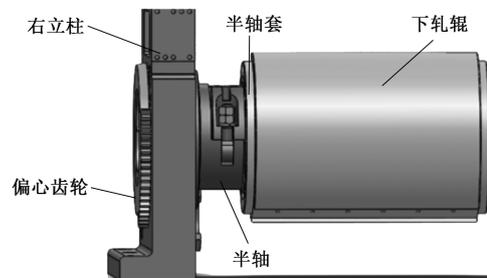


图 17 传统轧辊结构

Fig. 17 Structure of traditional roller

液压缸油路的单侧连接两个方向相反的单向阀, 只有当液压缸被锁紧时, 管路中的流量才能通过传感器, 在对其起到保护的同时, 能够准确地测量锁紧状态下回路中的流量变化。流量传感器选用 CX-DN25 型号, 量程为 $0.01 \sim 1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。其结构如图 22 所示。



图 22 FM506 流量计
Fig. 22 FM506 flowmeter

实验中规定液压缸无杆腔流量传感器采集结果为正, 液压缸有杆腔流量传感器采集结果为负。流量变化的测试结果如图 23 所示。

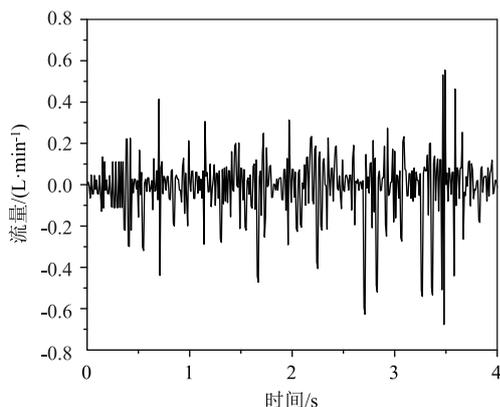


图 23 流量测试结果
Fig. 23 Flow test results

如图 23 所示, 在轧辊锁紧过程中, 流量在小范围内存在一定的波动, 且变化速度较快, 其中流量变化幅度最大为 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 并且在同一时间内, 流量变化基本围绕水平轴对称分布, 即活塞杆几乎保持静止状态, 且短时间内 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流量变化对轧制过程中锻件位移的影响较小。在实际工作状态下, 液压缸流量测试也受系统振动等诸多因素的影响, 由于楔横轧机一般用于锻造产线中的预成形, 主要对锻件材料的体积进行重新分配, 因此,

该流量变化对锻件整体精度的影响不大。

综上所述, 实验测试结果与仿真结果接近, 验证了可拆卸轧辊液压系统优化设计方案的可行性。通过液压系统实现轧辊的可拆卸设计, 工件加工精度满足实际生产要求, 增加了液压锁紧系统的稳定性和可靠性, 提高了楔横轧的生产效率。

4 结论

(1) 对楔横轧机整体式模具的轧制过程进行了模拟仿真, 得到了模具所受到的轴向载荷, 为可拆卸轧辊液压系统的设计奠定了基础。

(2) 对楔横轧机可拆卸轧辊的实现原理进行了分析, 并搭建了对应的液压原理图, 通过选用双向液控单向阀和三位四通的 Y 型换向阀, 实现了液压缸控制半轴和轧辊的分离和贴合, 同时实现了在任意位置停止供油时对液压回路进行锁紧的功能。

(3) 对可拆卸轧辊锁紧回路进行了仿真分析和优化, 通过引入单向节流阀, 并与液控单向阀进行串接, 降低了传统锁紧回路中由于负载变化造成的速度抖动现象, 实现了油路在冲击下的节流调速, 并通过实验测试验证了方案的稳定性和可靠性。

参考文献:

- [1] 高丙坤, 李思奇, 白鹭, 等. 铝合金 U 形臂的弯曲工艺设计及优化 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (3): 27-33.
Gao B K, Li S Q, Bai L, et al. Design and optimization on aluminum alloy U-shaped arm bending process [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (3): 27-33.
- [2] 赵启淦. 铝合金轧制成形的研究与现状 [J]. 世界有色金属, 2022 (21): 13-15.
Zhao Q S. Research and present situation of aluminum alloy rolling forming [J]. World Nonferrous Metals, 2022 (21): 13-15.
- [3] 赵小莲, 何奥平, 张珂星, 等. 楔横轧温度对铝合金连杆预坯坯心部质量的影响 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2020, 45 (3): 578-582.
Zhao X L, He A P, Zhang K X, et al. Effect of cross wedge rolling temperature on core quality of aluminum alloy connecting rod preform [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, 45 (3): 578-582.
- [4] 白鹭, 邵长斌, 袁红霞, 等. 铝合金楔横轧模具加热控温系统的设计及应用 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (11): 174-178.
Bai L, Shao C B, Yuan H X, et al. Design and application on heating and temperature control system for aluminum alloy cross wedge rolling mold [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (11): 174-178.
- [5] 崔丽华, 王宝雨, 胡正寰. 楔横轧铝合金轧件内部空洞演变 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34 (2): 190-195.

(下转第 179 页)