

用于比例变量泵供液系统的预压阀组设计与仿真分析

黄周轩^{1,2,3}, 刘赞清^{1,2,3}, 张晓丽⁴, 王拴庆^{1,2,3}, 王 雪^{1,2,3}, 钱宝旭^{1,2,3}

(1. 兰州兰石重工有限公司, 甘肃 兰州 730314; 2. 甘肃省金属塑性成形装备智能控制重点实验室, 甘肃 兰州 730314;
3. 甘肃省大型快锻液压设备技术创新中心, 甘肃 兰州 730314; 4. 兰州兰石集团有限公司能源装备研究院, 甘肃 兰州 730314)

摘要: 设计一种用于快速锻造液压机组供液系统的预压阀组, 当比例变量泵的摆角瞬时变化时, 预压阀组根据设定压力及时调整阀芯开度, 使供液压力保持在比例变量泵吸油的许用范围之内。为了验证预压阀组设计中阻尼孔直径、控制腔直径、弹簧刚度及预压力等关键参数对阀特性以及快速锻造液压机组液压供液系统供液压力的影响, 利用 AMESim 液压仿真技术建立预压阀组及快锻压机比例变量泵供液系统的仿真模型, 并根据样本与快锻压机测试参数对仿真模型的准确性进行验证。通过不同参数的仿真对比分析, 得到阻尼孔、控制腔直径的选取直接影响着阀组的响应特性与系统的压力稳定性, 而弹簧刚度及预压力则无明显影响等结论, 并将结论应用到预压阀组的参数设计中。

关键词: 快锻压机; 比例变量泵; 预压阀组; 供液压力; 阻尼孔直径; 控制腔直径

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.022

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0162-08

Design and simulation analysis on pre-charge valve group for hydraulic supply system of proportional variable pump

Huang Zhouxuan^{1,2,3}, Liu Yunqing^{1,2,3}, Zhang Xiaoli⁴, Wang Shuanqing^{1,2,3}, Wang Xue^{1,2,3}, Qian Baoxu^{1,2,3}

(1. Lanzhou LS Heavy Machinery Technology Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Control of Metal Forming Equipment, Lanzhou 730314, China;

3. Gansu Large Fast Forging Hydraulic Equipment Technology Research Center, Lanzhou 730314, China;

4. Lanzhou Ls Group Co., Ltd., Energy Equipment Engineering Research Institute, Lanzhou 730314, China)

Abstract: A pre-charge valve group for hydraulic supply system of rapid forging hydraulic unit was designed, and when the swing angle of proportional variable pump changed instantaneously, the pre-charge valve group adjusted the opening of valve core in time according to the set pressure, so that the hydraulic supply pressure remained within the allowable range of oil suction for the proportional variable pump. Then, in order to verify the influence of key parameters such as damping hole diameter, control chamber diameter, spring stiffness and pre-pressure in the design of pre-charge valve group on the valve characteristics and the hydraulic supply pressure of hydraulic supply system for rapid forging hydraulic unit, the simulation model of the pre-charge valve group and the hydraulic supply system with proportional variable pump for rapid forging press was established by the AMESim hydraulic simulation technology, and the accuracy of the simulation model was verified according to the samples and the test parameters of rapid forging press. Through the simulation and comparative analysis of different parameters, it is concluded that the diameters of damping hole and control chamber directly affect the response characteristics of valve group and the pressure stability of system, while the spring stiffness and the pre-pressure have no obvious impact, and the conclusion is applied to the parameter design of the pre-charge valve group.

Key words: fast forging press; proportional variable pump; pre-charge valve group; hydraulic supply pressure; damping hole diameter; control chamber diameter

快速锻造液压机组是为了满足特殊材料锻造温度范围窄的工艺要求, 保证锻造过程的快速性和劳

动生产率以及自由锻造锻件尺寸精度的提高, 在锻造水压机的基础上发展起来的^[1]。随着国家新形势下推进能源绿色低碳转型的需要, 以及各类新型材料自由锻成形工艺对快锻压机速度、压力的精细化要求, 快锻压机主泵选用也逐渐由常规的定量泵转变为比例变量泵。相较于定量泵, 比例变量泵通过变量机构来改变泵的输出流量^[2], 良好的自适应性

收稿日期: 2023-03-25; 修订日期: 2023-06-02

基金项目: 兰州市科技计划项目 (2022-2-1)

作者简介: 黄周轩 (1988-), 男, 学士, 工程师

E-mail: choution@126.com

使其输出的流量和压力能够与负载需求相匹配，解决了节流调速系统的流量和压力不适应的问题，节流、溢流损失降低，能量损耗减少，系统效率提高，其节能效果十分明显，工艺适应性更强。

当快速锻造液压机组采用多比例变量泵配置时，工作中的比例变量泵的摆角会根据锻造工艺的要求不断变化，使其吸油口供液系统压力瞬时变化，造成比例变量泵吸空或内泄增大，从而影响主泵的寿命及输出效率。为了解决上述问题，设计了一种用于快锻压机供液系统的预压阀组，如图1所示，预压阀组安装在供液管路末端与主油箱回油管路之间，当比例变量泵的摆角瞬时变化时，供液压力随之发生变化，预压阀组根据设定压力及时调整阀芯开度，使供液压力保持在比例变量泵吸油的许用范围之内。

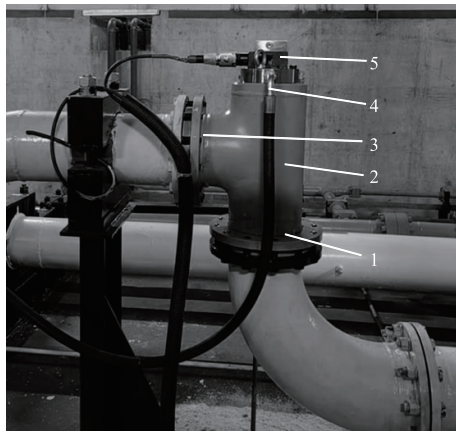


图1 预压阀组实物图

1. 主阀进油口 2. 主阀 3. 主阀出油口 4. 先导控制油口
5. 比例减压阀

Fig. 1 Physical drawing of pre-charge valve group

该研究通过搭建预压阀组仿真模型，对该阀进行仿真分析，并以快速锻造液压机组比例变量泵供液系统为应用对象，对比分析了预压阀组的关键参数对阀特性及供液系统供液压力的影响，为预压阀组的关键参数设计、保证比例变量泵供液系统供液压力的稳定提供指导。

1 预压阀组的工作原理

图2为预压阀组的结构简图，包括先导比例减压阀1和主阀2，其中，先导控制阀选用力士乐的比例减压阀， P'_x 为减压后的控制油液压力。快锻压机供液系统供液泵输出的压力油从主阀的A腔进入，从B腔流出至主油箱回油区，控制油液经比例减压阀减压后，通过主阀阀盖上的阻尼孔C作用在可变控制容腔

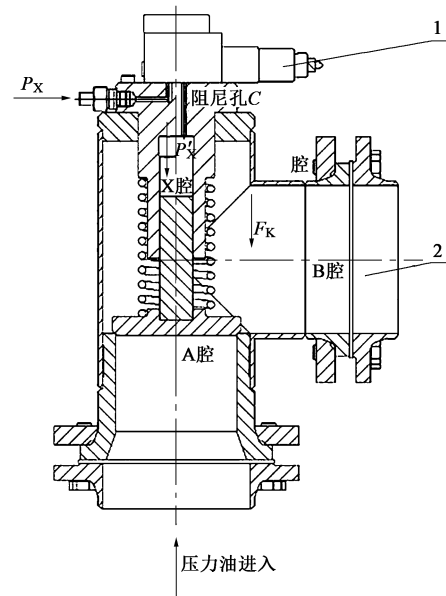


图2 预压阀组的结构简图

1. 先导比例减压阀 2. 主阀

Fig. 2 Structure schematic diagram of pre-charge valve group

X上，阀芯所受的合力 $\sum F$ 可表示为：

$$\sum F = P_A \cdot A_A + P_B \cdot A_B - P_X \cdot A_X - F_H - F_K - F_G \pm F_f \quad (1)$$

式中： P_A 、 P_B 、 P_X 为预压阀组 A、B、X 腔的液压压力； A_A 、 A_B 、 A_X 为预压阀组 A、B、X 腔的液压压力作用面积； F_H 为阀口的（稳态）液动力； F_K 为弹簧的作用力； F_G 为阀芯的重力； F_f 为摩擦力。

其中， F_G 、 F_f 与液压力 $P_A A_A$ 、 $P_B A_B$ 、 $P_X A_X$ 相比较小，可忽略不计。

从式（1）中可知，通过控制 X 腔的液压压力 P_X 即可以控制 $\sum F$ ，达到启闭阀芯的目的。当 $\sum F < 0$ 时，阀芯下压，阀口关闭；当 $\sum F > 0$ 时，阀芯上抬，阀口开启。

因此，通过控制先导比例减压阀的阀芯位移，改变减压后的控制油液压力 P'_x ，调整主阀阀芯开度，即可改变预压阀组进口的液压力，从而实现供液压力的调整^[3]。

2 预压阀组仿真

2.1 先导比例减压阀仿真

预压阀组由先导比例减压阀和主阀组成，先导比例减压阀选用力士乐的比例减压阀，型号为 ZDREE10VP2。利用仿真平台 AMESim 搭建先导比例减压阀的仿真模型^[4-6]，如图3所示，其中，p 为

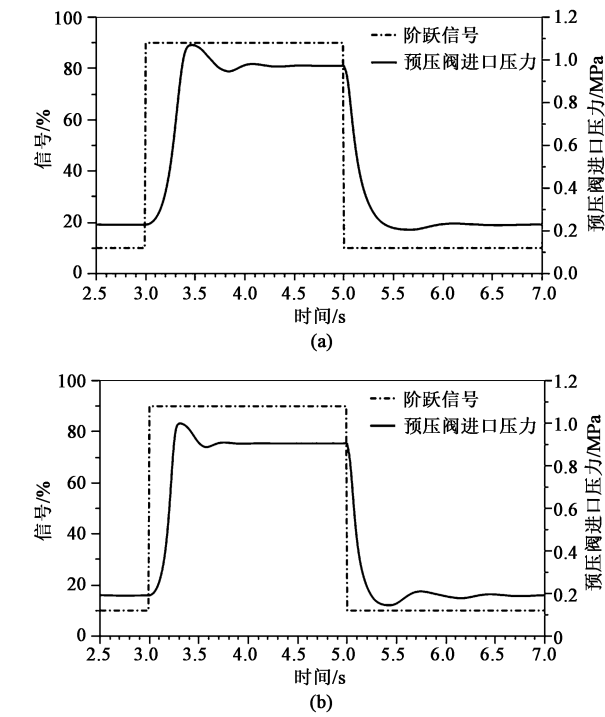


表 1 恒流源条件下预压阀组的响应时间 (ms)

Table 1 Response time of pre-charge valve group under constant current source (ms)

阶跃控制信号/%	输入流量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	
	10455	3347
10 → 90	440	290
90 → 10	410	230

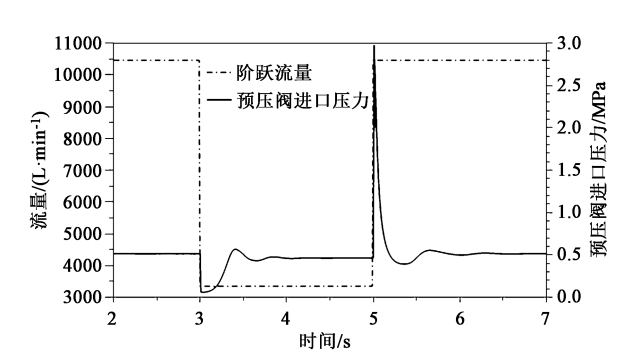


表 2 先导比例阀控制信号为 40% 时例预压阀组响应时间 (ms)

Table 2 Response time of pre-charge valve group at pilot proportional value control signal of 40% (ms)

输入流量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	上升时间	稳定时间
10455 → 3347	340	700
3347 → 10455	190	740

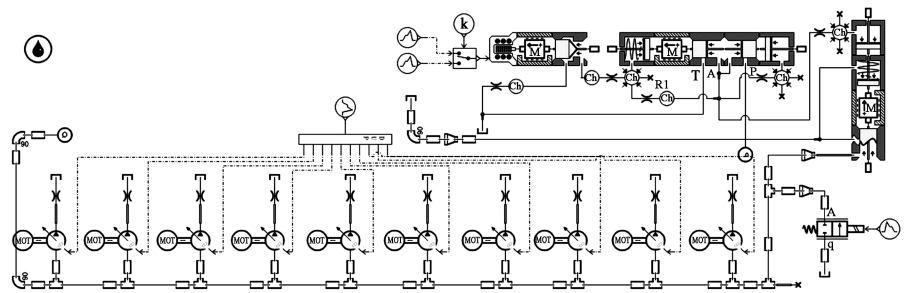
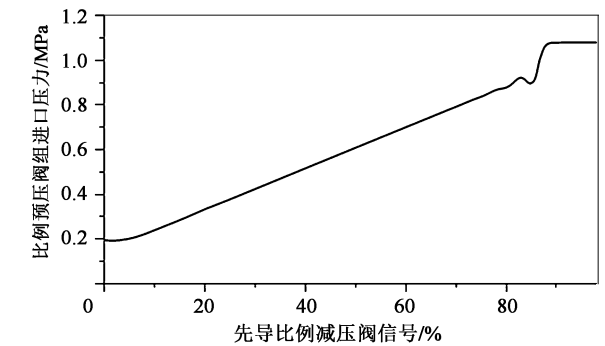


图 10 主泵供液系统仿真模型

Fig. 10 Simulation model of main pump liquid supply system

3 仿真分析

以快速锻造液压机组液压系统为应用对象，以预压阀组作为主泵供液压力保持阀，搭建快速锻造液压机组比例变量泵供液系统仿真模型^[10-12]，如图

10 所示。供液泵为工业螺杆泵，供液总流量为 $10455 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，供液泵压力 $0.2 \sim 0.8 \text{ MPa}$ ，主泵为力士乐比例变量柱塞泵，响应时间为 150 ms 。

该预压阀组安装在实验装置上进行初步测试，供液流量为 $10455 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，预压阀设置压力为 0.8 MPa ，4 台主泵在 6 s 内，摆角变化从 70% 到

100%再到 70%，通过检测设置在预压阀组进口侧的压力传感器获得供液压力变化曲线，对仿真模型设置相同参数得到供液压力仿真曲线，如图 11 所示，现场实测曲线与仿真曲线接近，验证了仿真参数设置的合理性与模型的准确性。

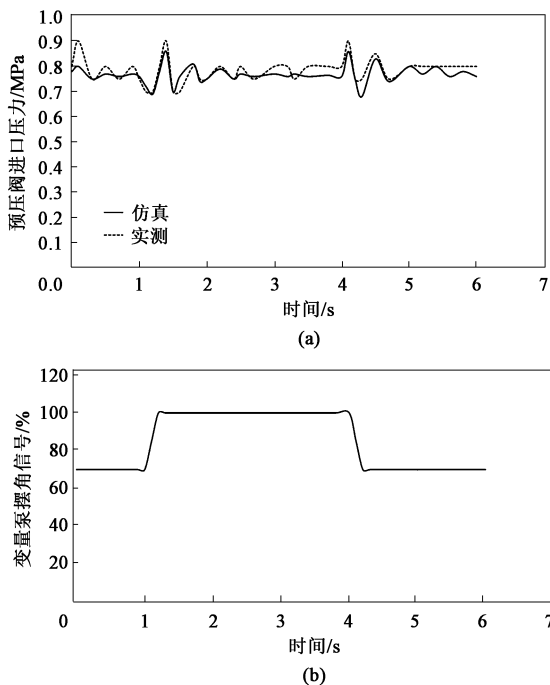


图 11 主泵摆角变化时预压阀组的进口压力
(a) 预压阀组进口压力仿真与实测对比 (b) 主泵摆角信号
Fig. 11 Inlet pressure of pre-charge valve group at variable swing angle of main pump

(a) Comparison between simulation and measurement of inlet pressure for pre-charge valve group
(b) Swing angle signal of main pump

影响预压阀组特性的主要因素有先导控制油源、阻尼孔直径、控制腔容积及弹簧，其中，先导控制油源压力、流量及预压阀组的主阀行程为已有定值，因此，本文通过设计不同阻尼孔直径、控制腔直径、弹簧来对比分析，以选取最佳设计参数。

3.1 阻尼孔的影响

在如图 6 所示的比例预压阀仿真模型中设置不同的阻尼孔 R1 (图 2 中阻尼孔 C) 的直径 dr ，流量源为恒流源 $10455 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，控制信号在 3 s 时由 10% 阶跃为 90%，5 s 时由 90% 阶跃为 10%，通过批处理，得到不同阻尼孔直径下的预压阀进口压力曲线，如图 12 所示。当阻尼孔直径 $dr > \Phi 1.7 \text{ mm}$ 时，预压阀组的启闭响应时间短，但进口压力出现波动；随着 dr 的减小，预压阀组进口压力较稳定，但启闭响应时间增加；当阻尼孔直径为 $\Phi 1.0 \text{ mm}$ 时，预压

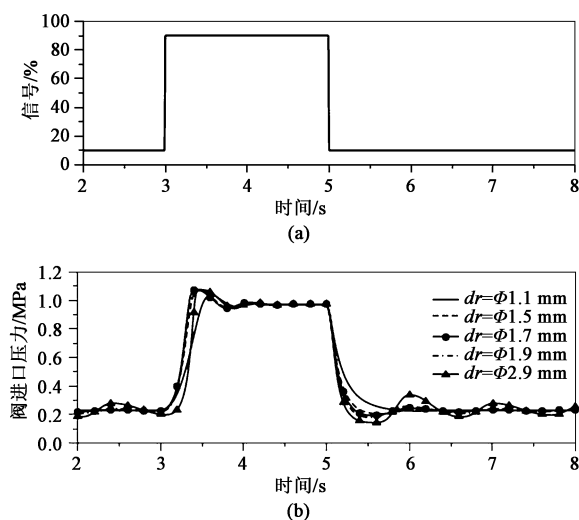


图 12 阻尼孔直径对预压阀组的影响

(a) 阶跃控制信号 (b) 预压阀进口压力

Fig. 12 Effect of damping hole diameter on pre-charge valve group
(a) Step control signal (b) Inlet pressure of pre-charge valve

阀组关闭时间为 700 ms，开启时间为 820 ms。

在实际测试中，阻尼孔直径选用 $\Phi 3.0 \text{ mm}$ 时，供液泵启动瞬间，预压阀组的进口压力发生振荡，系统产生振动，而改用直径为 $\Phi 1.2 \text{ mm}$ 的阻尼孔后，预压阀组进口压力响应过慢，无法及时跟随进口压力进行调整，最终选定直径为 $\Phi 1.5 \text{ mm} \sim \Phi 1.8 \text{ mm}$ 的阻尼孔。

图 13 为图 10 所示的供液系统中的阻尼孔在不同直径下对供液压力的影响，变量泵控制信号为阶跃信号，响应时间为 150 ms。从图 13 中可以看出，在 0~

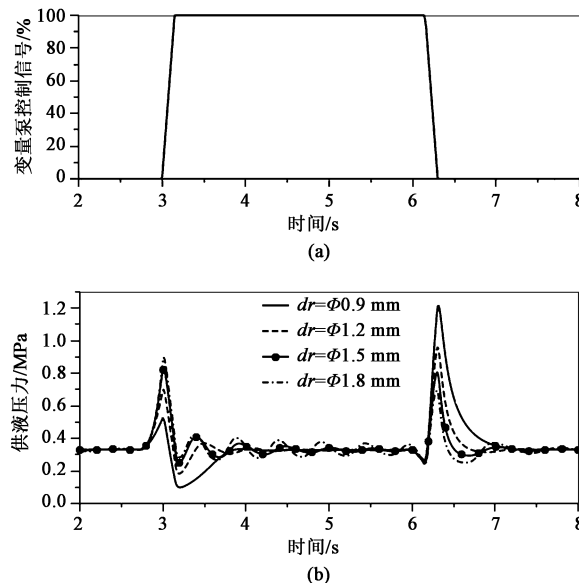


图 13 在系统中阻尼孔直径对供液压力的影响

(a) 阶跃控制信号 (b) 供液压力

Fig. 13 Effect of damping hole diameter on liquid supply pressure in system
(a) Step control signal (b) Liquid supply pressure

3 s内,所有主泵摆角同时由0%阶跃为100%,此时预压阀组位移减小,当阻尼孔直径小于 $\Phi 1.5$ mm时,阀口压力的稳定时间较短,但压力突降幅值较大、阀的响应时间较长,当阻尼孔直径大于 $\Phi 1.5$ mm时,阀口压力有一定的波动。

3.2 控制腔直径的影响

在如图6所示的预压阀组仿真模型中设置不同的控制腔(图2中控制腔B)的直径,流量源为恒流源 $10455 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。预压阀组控制信号在3 s时由10%阶跃为90%,5 s时由90%阶跃为10%,通过批处理得到不同控制腔直径 d_p 下预压阀进口压力曲线,如图14所示。从图14中可以看出,在先导比例减压阀控制信号由10%阶跃为90%时,预压阀组进口压力瞬时增大,随着控制腔直径的增加,变化后预压阀组进口压力越大,响应时间相应增大。当输入阶跃流量信号时,不同控制腔直径下预压阀进口压力曲线如图15所示。从图15中可以看出,控制腔直径越大,在流量发生瞬时变化时,预压阀组进口压力的响应时间越长,但变化后的压力波动小,较为稳定,控制腔直径越小,在流量发生瞬时变化时,预压阀组进口压力的响应时间越短,但变化后的压力波动大,稳定性不好。

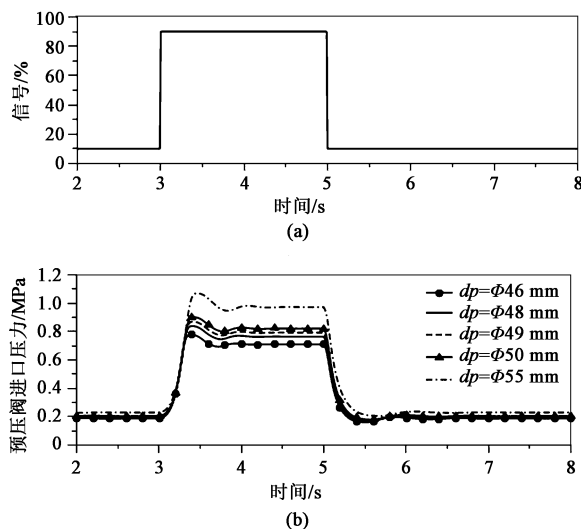


图14 阶跃控制信号下控制腔直径对预压阀进口压力的影响
(a) 阶跃控制信号 (b) 阀进口压力

Fig. 14 Effect of control chamber diameter on inlet pressure of pre-change value under step control signal

(a) Step control signal (b) Inlet pressure of pre-change valve

图16为在如图10所示的供液系统中设置不同的控制腔直径,计算得到的供液压力曲线。从图16中可以看出,当比例变量泵按照如图16a所示的控制信号周期工作时,控制腔直径对系统供液压力的

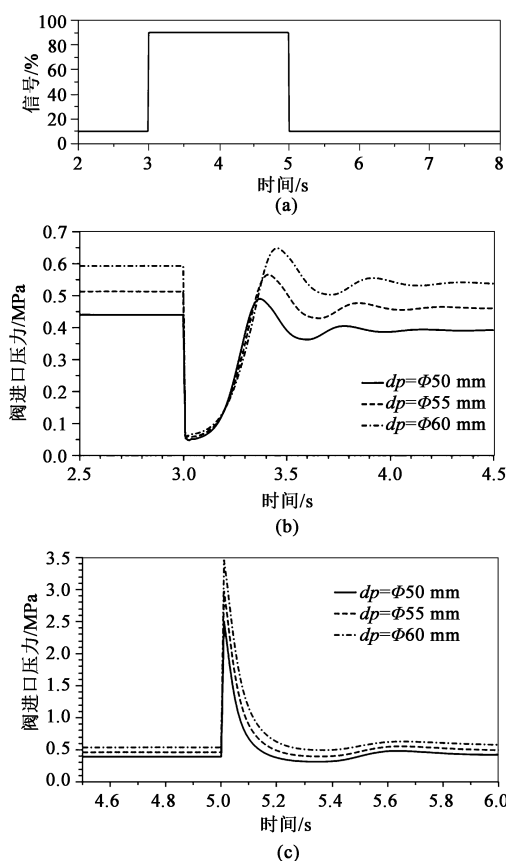


图15 阶跃流量信号下控制腔直径对阀特性的影响

(a) 阶跃流量信号 (b) 阶跃流量为0%→100%时阀进口压力变化曲线 (c) 阶跃流量为100%→0%时阀进口压力变化曲线

Fig. 15 Effect of control chamber diameter on valve characteristics under step flow signal

(a) Step flow signal (b) Value inlet pressure change curve at step flow signal of 0%→100% (c) Value inlet pressure change curve at step flow signal of 100%→0%

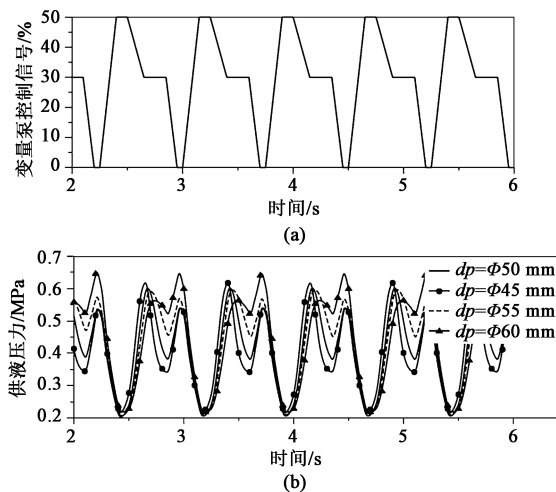


图16 控制腔直径对供液压力的影响

(a) 控制信号 (b) 供液压力

Fig. 16 Effect of control chamber diameter on liquid supply pressure

(a) Control signal (b) Liquid supply pressure

影响不大, 供液压力均可控制在 0.21~0.65 MPa 之间周期变化。

3.3 弹簧的影响

在如图 6 所示的预压阀组仿真模型中, 设置不同的弹簧刚度 k 和预压力 F , 仿真结果如图 17~图 20 所示, 可以看出, 弹簧的刚度和预压力大小对预压阀组响应时间和系统中的供液压力均影响不大。

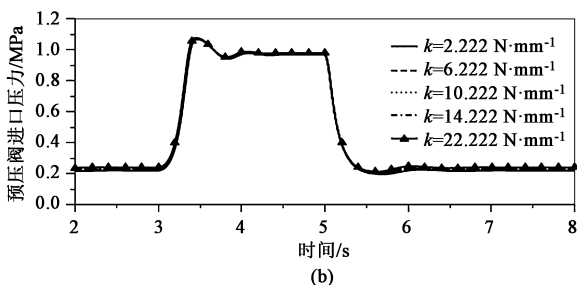
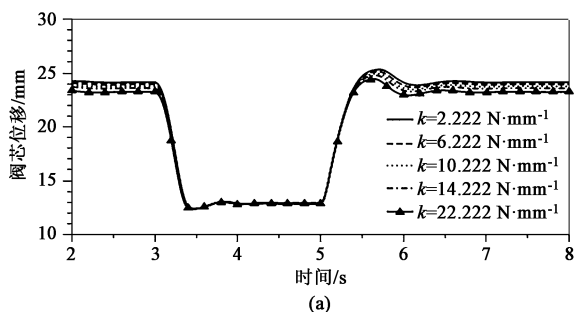


图 17 弹簧刚度对阀特性的影响

(a) 阀芯位移 (b) 预压阀进口压力

Fig. 17 Effect of spring stiffness on valve characteristics

(a) Valve spool displacement (b) Inlet pressure of pre-change valve

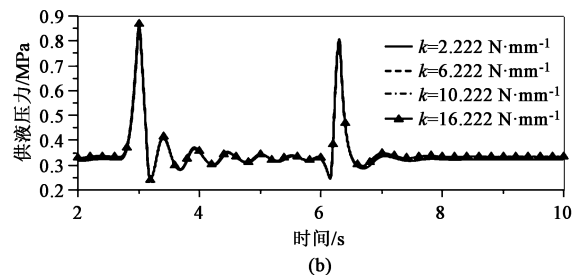
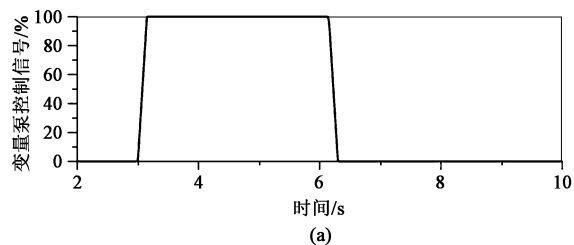


图 18 弹簧刚度对供液压力的影响

(a) 阶跃控制信号 (b) 供液压力

Fig. 18 Effect of spring stiffness on liquid supply pressure

(a) Step control signal (b) Liquid supply pressure

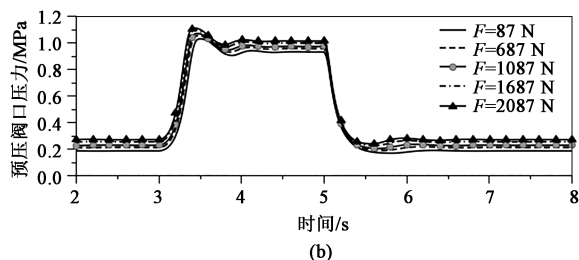
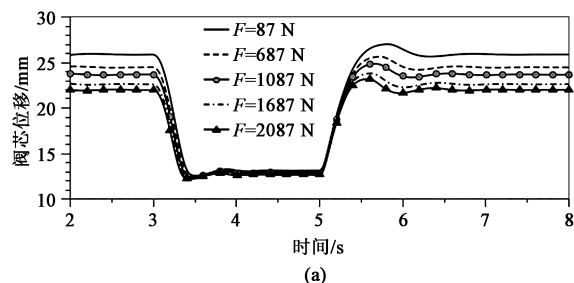


图 19 弹簧预压力对阀特性的影响

(a) 阀芯位移 (b) 预压阀进口压力

Fig. 19 Effect of spring pre-pressure on valve characteristics

(a) Valve spool displacement (b) Inlet pressure of pre-change valve

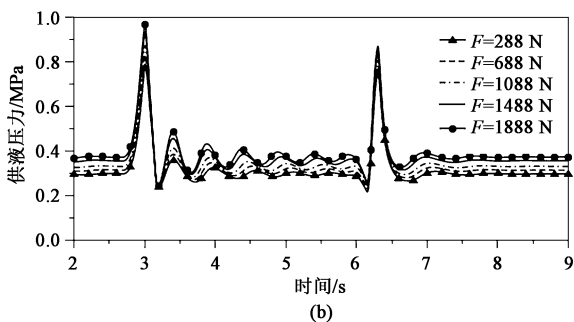
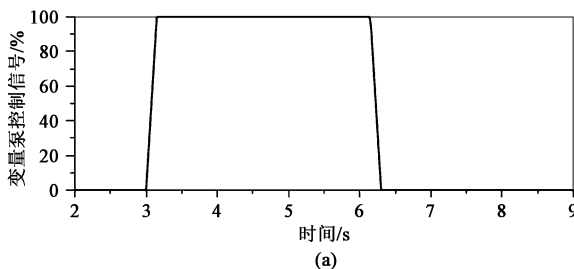


图 20 弹簧预压力对供液压力的影响

(a) 阶跃控制信号 (b) 供液压力

Fig. 20 Effect of spring pre-pressure on liquid supply pressure

(a) Step control signal (b) Liquid supply pressure

4 结论

(1) 在快速锻造液压机组液压系统中, 当比例变量泵摆角瞬时变化时, 通过主动控制预压阀组阀芯开口, 可使供液压力保持在主泵吸油压力的许用范围内。

(2) 先导比例减压阀控制信号在 0%~100% 变化时, 预压阀组进口压力的变化范围为 0.2~1.1 MPa, 满足供液泵压力 0.2~0.8 MPa 的控制要求。

(3) 随着阻尼孔直径的增大, 预压阀组启闭响应时间逐渐缩短, 但进口压力的偏差增大、过渡时间增长。

(4) 随着控制腔直径的增大, 变化后预压阀组进口压力越大, 响应时间相应增加。当输入阶跃流量信号时, 控制腔直径的增大, 会造成进口压力响应时间逐渐增长, 但压力波动偏差逐渐减小, 过渡时间缩短。控制腔直径对系统供液压力的影响不大, 供液压力均可控制在 0.21~0.65 MPa 之间周期变化。

(5) 由于弹簧力的在阀芯所受的各种作用力中占比较小, 因此, 弹簧的刚度和预压力大小对预压阀组的响应时间和系统中的供液压力均影响不大。

参考文献:

- [1] 姚保森. 我国锻造液压机的现状及发展 [J]. 锻压装备与制造技术, 2005, 40 (3): 28-30.
Yao B S. States and development of chinese hydraulic forging press [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2005, 40 (3): 28-30.
- [2] 李南, 赵静, 马晓光. 大型油压机的多泵组合控制系统优化设计 [J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36 (6): 48-51.
Li N, Zhao J, Ma X G. Optimization design of multi pump combination control system for large-scale liquid press [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36 (6): 48-51.
- [3] 李壮云. 液压元件与系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Li Z Y. Hydraulic Component and System [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [4] 梁全, 谢基晨, 聂利伟. 液压系统 AMESim 计算机仿真进阶教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Liang Q, Xie J C, Nie L W. Advanced Tutorial of Hydraulic System AMESim Computer Simulation [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [5] 付永领, 祁晓野. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真参考手册 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
Fu Y L, Qi X Y. Reference Manual of LMS Imagine. Lab AMESim System Modeling and Simulation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2011.
- [6] 张伟, 李淳潮, 李志远, 等. 基于 AMESim 的电/气比例压力阀仿真与试验 [J]. 液压与气动, 2020, (3): 65-70.
Zhang W, Li C C, Li Z Y, et al. Simulation and test for electro-pneumatic proportional pressure valve based on amesim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (3): 65-70.
- [7] 周杰, 常映辉, 冀鹏飞. 基于 AMESim 的定差减压阀的建模和仿真 [J]. 煤矿机械, 2021, 42 (3): 180-182.
Zhou J, Chang Y H, Ji P F. Modeling and simulation of constant pressure reducing valve based on AMESim [J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42 (3): 180-182.
- [8] 张锐尧, 李军, 柳贡慧, 等. 基于 AMESim 的节流阀自动控制系统 [J]. 石油机械, 2021, 49 (4): 35-43.
Zhang R Y, Li J, Liu G H, et al. Automatic throttle control system based on AMESim [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (4): 35-43.
- [9] 王阳阳. 基于 AMESim 与 Fluent 联合仿真的安全阀启溢闭研究 [J]. 液压与气动, 2019, (11): 92-98.
Wang Y Y. Research on safety valve's opening, overflowing and closing via co-simulation between AMESim and Fluent [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, (11): 92-98.
- [10] 陈雨洋, 李靖祥, 杨昌群, 等. 基于 AMESim 的轴流先导式水击卸压阀动态特性分析 [J]. 液压与气动, 2020, (11): 8-14.
Chen Y Y, Li J X, Yang C Q, et al. Analysis of dynamic characteristics of axial pilot-operated surge relief valve based on AMESim [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (11): 8-14.
- [11] 潘多斐, 张建鹏, 刘赟清, 等. 快锻压机锻造频次仿真与试验研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57 (4): 28-32.
Pan D F, Zhang J P, Liu Y Q, et al. Simulation and experimental study on forging frequency of fast forging press [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57 (4): 28-32.
- [12] 魏海涛, 张晓丽, 魏海峰, 等. 快锻压机主泵供液系统仿真分析 [J]. 液压与气动, 2022, 46 (2): 184-188.
Wei H T, Zhang X L, Wei H F, et al. Simulation analysis of liquid supply system for main pump of fast forging press [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46 (2): 184-188.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

