

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020154

蓄能器对连续压机钢带张紧液压系统的影响研究

崔勇^{1,2}, 王帆¹, 李柏隆¹, 谢骏¹, 张俊豪¹, 张国梁³, 侯晓鹏⁴

(1. 苏州工业职业技术学院, 江苏苏州 215104; 2. 中科苏州智能计算技术研究院, 江苏苏州 215104;

3. 河北农业大学林学院, 河北保定 071000; 4. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 为给蓄能器在连续压机钢带张紧液压系统中的应用提供理论参考, 利用AMESim仿真软件分析蓄能器主要参数对液压系统稳定性的影响。结果表明, 蓄能器能够有效减小连续压机钢带张紧液压系统的压力冲击, 适当的预充气压力和连接管路直径, 可以保证液压系统的快速响应和稳定。现场测试数据证明, 在蓄能器预充气压力为16 MPa、连接管路直径为20 mm的条件下, 钢带张紧液压系统的压力值稳定, 运行可靠, 有效地保证了人造板连续压机的稳定生产。

关键词: 连续压机; 蓄能器; 仿真研究; 液压系统

中图分类号: TS64; TS653

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 05-0044-06

Effect of the Accumulator on Steel Belt Tension Hydraulic System of Continuous-Presses

CUI Yong^{1,2}, WANG Fan¹, LI Bai-long¹, XIE Jun¹, ZHANG Jun-hao¹, ZHANG Guo-liang³,
HOU Xiao-peng⁴

(1. Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, Jiangsu, China; 2. Institute of Intelligent Computing Technology,

Suzhou 215104, Jiangsu, China; 3. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China;

4. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to provide theoretical references for the application of the accumulator in steel belt tension hydraulic system of continuous-presses, the effect of main parameters of the accumulator on the stability of the hydraulic system was analyzed by using AMESim simulation software. The results showed that the accumulator reduced the pressure impact of steel belt tension hydraulic system of continuous-presses. The appropriate pre-charge pressure and the optimum size of connecting pipe diameter enabled rapid responses and effective stabilities of the hydraulic system. The experiment data proved that the pressure value of steel belt tension hydraulic system was stable, and the synchronous accuracy of tension cylinders on both sides met the technical requirements of continuous-presses, when the pre-charge pressure of the accumulator was 16 MPa, and the connecting pipe diameter was 20 mm.

Key words: continuous-presses; accumulator; AMESim simulation; hydraulic system

收稿日期: 2020-10-19; 修改日期: 2021-01-20

基金项目: 苏州市科技发展计划项目“精密检测技术重点实验室建设项目”(SZS201815); 苏工院智能加工与精密检测科技创新团队项目(2020kytd01); 苏工院智能加工与精密检测技术技能平台项目(2020kyp01)。

作者简介: 崔勇(1984—), 男, 讲师。Email: 00767@siit.edu.cn

在人造板连续压机运行过程中, 为有效传递驱动装置输出的动力, 需要通过液压系统对钢带施加适当的张紧力。当设备启动、停止或者负载变化时, 钢带张紧力往往出现较大波动, 进而对

液压系统产生冲击，轻则引起液压管路震动，严重时会导致管路破裂，影响生产的安全性^[1]。

蓄能器是储存和释放压力能的重要液压元件，能够对钢带张紧液压系统起到缓和冲击和吸收脉动的作用。前期研究表明，合理选择蓄能器参数，能够有效改善液压系统缓冲大惯量负载冲击的效果^[2]，显著提升系统的稳定性和能量回收效率^[3-4]。

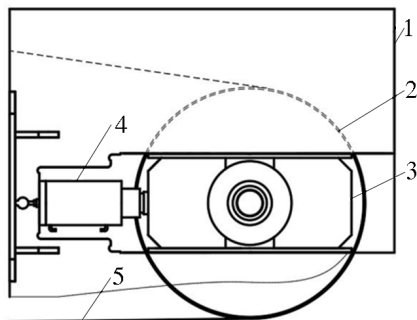
有学者借助仿真软件建立了液压系统分析模型，分析了蓄能器参数对系统压力冲击及响应速度的影响规律，并结合验证试验的结果，确定了连接蓄能器管道长度、管道直径、蓄能器体积和预充气压力等参数的合理取值范围^[5-8]。尽管蓄能器的基础研究已相对成熟，但是对于复杂、重载工况下（如人造板连续压机）的应用，还需进一步了解蓄能器参数对液压系统性能的影响。

目前，国内企业对连续压机钢带张紧液压系统的设计大多基于工程实践经验^[9]，蓄能器参数选择缺乏科学和系统的分析。因此，本文利用正版AMESim软件对钢带张紧液压系统进行仿真分析，根据工作载荷的要求和液压回路压力波动的特点调整蓄能器主要参数，减少管路压力冲击和高频振荡，为液压系统蓄能器的选取提供理论依据，进而保证连续压机安全运行和人造板质量稳定。

1 钢带张紧液压系统介绍

1.1 连续压机钢带张紧机械结构

连续压机钢带张紧的机械结构主要包括：驱动架、驱动滚筒、连接板、张紧油缸等，见图1。



1 驱动架；2 驱动滚筒；3 连接板；4 张紧油缸；5 钢带

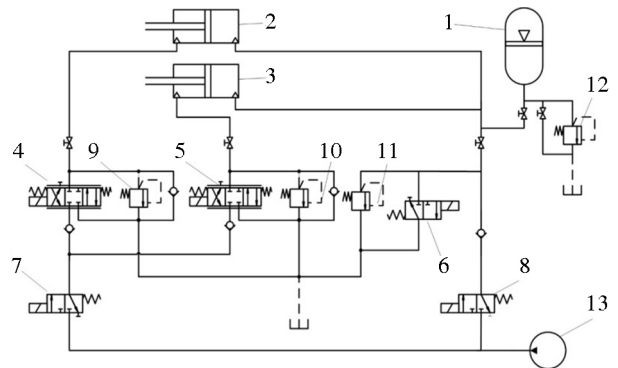
图1 连续压机钢带张紧机械结构

Fig.1 Mechanical structure of steel belt tension of continuous-presses

图1显示，钢带搭绕在驱动滚筒表面，驱动滚筒和张紧油缸之间通过连接板形成连接；张紧油缸的缸底和活塞杆分别固定于驱动架内侧和连接板左侧，同时驱动滚筒主轴与连接板固定并置于驱动架内侧的导轨上。在工作时，张紧油缸的活塞杆沿着水平方向伸出，推动连接板和驱动滚筒沿着水平导轨移动，进而使钢带产生适当的张紧力。

1.2 连续压机钢带张紧液压原理

连续压机钢带张紧液压系统主要由蓄能器、张紧油缸、液压泵和各类液压阀组成（图2）。连续压机钢带张紧液压系统及主要元件参数列于表1。



1 蓄能器；2、3 张紧油缸；4、5 三位四通比例换向阀；6~8 两位三通比例换向阀；9~12 溢流阀；13 液压泵

图2 连续压机钢带张紧液压原理图

Fig.2 Hydraulic schematic diagram of steel belt tension of continuous-presses

表1 钢带张紧液压系统及主要元件参数

Tab.1 The main parameters of steel belt tension hydraulic system

序号	名称	参数
1	油泵	流量 30 L/min 工作压力 30 MPa
2	电机	额定功率 15 kW
3	溢流阀	额定压力 22 MPa
4	比例换向阀	流量 24 L/min
5	液压缸	无杆腔压力 18.5 MPa 有杆腔压力 2~18 MPa 最大行程 400 mm
6	液压系统	工作压力 18 MPa

当钢带开始张紧时，液压泵 13 提供的高压油，一部分通过两位三通比例换向阀 7 以及三位四通比例换向阀 4、5 分别进入张紧油缸 2 和 3 的有杆腔；

另一部分通过两位三通比例换向阀8进入张紧油缸2和3的无杆腔以及蓄能器1, 两位三通比例换向阀6用于该路压力的卸载。在钢带运行时, 张紧油缸的无杆腔压力保持恒定, 通过改变有杆腔压力实现活塞杆的伸缩, 从而达到调节钢带张紧力的目的; 蓄能器1用于保持无杆腔压力的恒定, 减少压力变化对系统的冲击, 对维持液压系统的稳定起到重要作用。

2 气囊式蓄能器数学模型

连续压机使用气囊蓄能器。气囊式蓄能器(简称蓄能器)及其连接管路模型如图3所示。

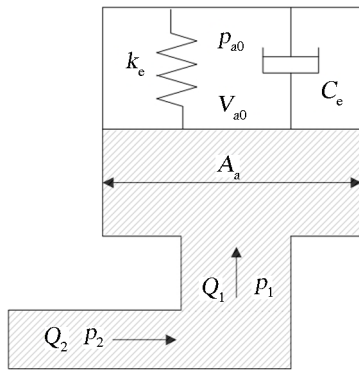


图3 气囊式蓄能器及其连接管路模型示意图

Fig.3 Airbag accumulator circuit diagram

气囊式蓄能器的内部结构主要包括气腔和液腔两个部分, 在气腔和液腔数学模型的基础上, 通过相关参数将两者联系起来, 最终得出气囊式蓄能器的整体数学模型 $H(s)$ 为^[6]:

$$H(s) = \frac{nA_a^2 V_{a0}}{kp_{a0} A_a^2 - k_e V_{a0}} \times \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{np_{a0} A_a^2}{V_{a0} m} - \frac{k_e}{m}} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{B_e + C_e}{2 \sqrt{\frac{np_{a0} A_a^2 m}{V_{a0}} - k_e m}} \quad (3)$$

式中: ω_n —蓄能器的无阻尼固有频率, Hz; ζ —蓄能器的等效阻尼比; A_a —蓄能器液腔横截面积, m^2 ; p_{a0} —蓄能器预充气压力, Pa; V_{a0} —蓄能器预充气体积, m^3 ; k —气体多变指数, 在绝热工作条件下, $k=1.4$; k_e —蓄能器气腔内的气体刚度系数, $kg \cdot m^2/s^2$; C_e —蓄能器气腔内的气体阻尼系数, $Pa \cdot s \cdot m$; B_e —蓄能器液腔油液等效黏性阻尼系数,

$Pa \cdot s \cdot m$; m —蓄能器液腔油液等效质量, kg; s —拉氏变换时引入的函数。

由式1可知, 蓄能器性能主要与蓄能器的液腔横截面面积、预充气压力、预充气体积、气腔长度、液腔长度等工作参数以及蓄能器的无阻尼固有频率和等效阻尼比相关; 从文献8可知, 气体刚度系数、气体阻尼系数、油液黏性阻尼系数等又直接受蓄能器工作参数的影响。

另外, 蓄能器连接管路两端的压力和流量之间关系的数学模型为^[8]:

$$p_1 = p_2 - \frac{128\rho vl}{\pi d^4} Q_2 - \frac{4\rho l}{\pi d^2} \frac{dQ_2}{dt} \quad (4)$$

$$Q_1 = Q_2 - \frac{\pi d^2 l}{4E} \frac{dp_1}{dt} \quad (5)$$

式中: ρ —液体密度, kg/m^3 ; E —油液弹性模量, Pa; v —油液运动黏度, m^2/s ; l —管道长度, m; d —管道内径, mm。 p_1 、 p_2 —蓄能器、连接管入口压力, Pa; Q_1 、 Q_2 —蓄能器、连接管入口流量, m^3/s 。

由上式可知, 蓄能器连接管路油液压力和流量的变化, 与管道直径、管道长度以及油液基本性质相关。

3 液压系统仿真与分析

气囊式蓄能器是标准件, 其气腔长度、液腔长度和液腔横截面面积等外形尺寸都受到产品规格的限制, 通常在液压系统设计过程中就已确定。理论研究证明^[3], 随着蓄能器容积的增加, 液压系统峰值压力逐渐降低, 但会导致蓄能器充液时间延长和系统响应速度降低等问题; 较大的蓄能器体积也会导致液压系统成本增加。工程实践证明^[9], 当蓄能器容积为15 L时, 既保证了系统压力峰值较低、响应速度较快, 又能使液压系统成本控制在合理范围内。此外, 缩短蓄能器连接管路长度可以降低压力冲击, 但是管路具体长度受到设备结构和布局的影响, 可以调整的空间很有限。因此, 本研究主要针对蓄能器的预充气压力和连接管路直径等主要可变参数, 应用AMESim软件进行仿真研究。

钢带张紧液压系统的AMESim仿真模型, 如图4所示。

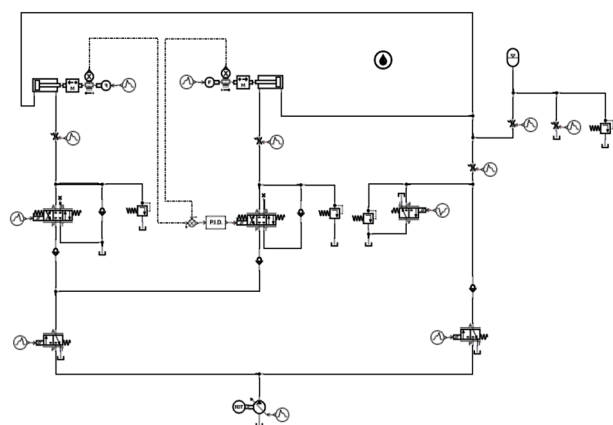


图4 钢带张紧液压系统的AMESim仿真模型

Fig.4 AMESim simulation model of steel belt tension hydraulic system

3.1 蓄能器对系统压力冲击的影响

依据企业实际生产时连续压机液压系统的工作条件和参数, 设定系统工作压力18 MPa、蓄能器容积为15 L、预充气压力为16 MPa、连接管路直径20 mm, 得到有、无蓄能器的系统压力响应曲线, 如图5所示。

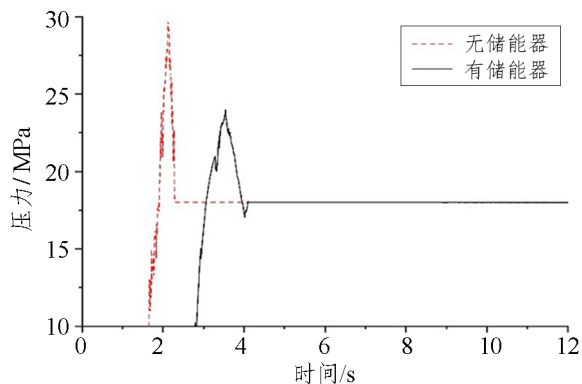


图5 蓄能器对系统压力冲击的影响

Fig.5 Effect of the accumulator on the system pressure shock

图5显示, 当关闭蓄能器时, 系统峰值压力达到了29.72 MPa, 大幅度超过了溢流阀设定的安全压力22 MPa, 这会对整个系统带来较大的压力冲击, 导致张紧油缸工作状态不稳定, 并且也会降低各个液压元件的使用寿命; 当蓄能器接入液压系统后, 峰值压力降为23.98 MPa, 压力冲击减小。证明蓄能器可以有效减小钢带张紧液压系统的冲击, 对维持系统压力稳定具有明显作用。

3.2 蓄能器预充气压力对系统压力冲击的影响

依据企业实际生产时连续压机液压系统的工

作条件和参数, 设定系统工作压力18 MPa、蓄能器容积15 L、管路直径20 mm; 根据连续压机蓄能器预充气压力调整范围, 考察预充气压力分别为8、12、16 MPa时, 系统压力变化情况的仿真结果如图6所示。

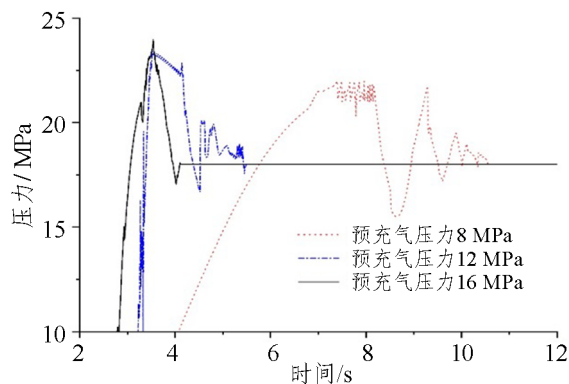


图6 蓄能器预充气压力对系统压力冲击的影响

Fig.6 Effect of the accumulator pre-charge pressure on system pressure shock

图6显示, 当蓄能器预充气压力为8 MPa时, 虽然系统压力冲击的峰值最低, 但是响应时间过长, 导致系统无法精确控制液压缸动作; 当蓄能器预充气压力为12 MPa时, 响应速度提高, 但是系统压力震荡较频繁, 工作稳定性较差; 当蓄能器预充气压力为16 MPa时, 吸收压力冲击的作用明显, 系统响应迅速, 压力稳定的时间为4.1 s, 并且系统压力冲击峰值的升高也不明显。上述仿真结果与工程实践经验基本吻合, 即蓄能器预充气压力设定为系统工作压力的0.8~0.9倍时, 能够较好地实现系统压力的快速响应和稳定^[6]。

3.3 蓄能器连接管路直径对系统压力冲击的影响

依据企业实际生产时连续压机液压系统的工作条件和参数, 设定系统工作压力18 MPa、蓄能器容积15 L、预充气压力16 MPa; 根据连续压机蓄能器连接管路直径选定范围, 考察连接管直径分别为10、15、20 mm时, 系统压力冲击变化情况的仿真结果如图7所示。

图7显示, 当连接油管直径为10 mm时, 系统峰值压力最大(24.91 MPa); 随着连接油管直径的增加, 系统压力冲击呈现减小的趋势, 当直径为20 mm时, 系统峰值压力降为23.92 MPa。这表明适当增加连接管路直径可以降低系统的峰值压力。

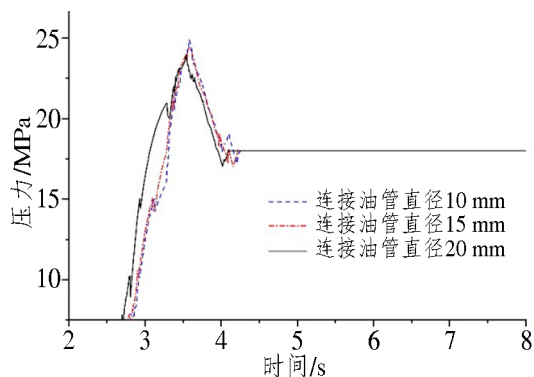


图7 蓄能器连接管路直径对系统压力冲击的影响

Fig.7 Effect of sizes of the accumulator connecting pipe diameter on system pressure shock

4 蓄能器参数验证实验

在综合分析仿真结果的基础上,选取蓄能器预充气压力 16 MPa、连接管路直径 20 mm,保持其他参数不变,以某企业连续压机钢带张紧液压系统为实验平台(图8),验证在该组参数条件下连续压机钢带张紧油缸的同步精度。实验平台为8英尺幅面人造板连续压机,钢带张紧液压系统参数同表1,机械部件与图1一致。该实验平台主要依靠内置位移传感器、压力传感器和比例阀构成的闭环控制系统,实现张紧油缸的位置同步和压力控制。在工作过程中,设定左侧张紧油缸的位移为基准值,右侧张紧油缸的位移则实时跟随。



图8 某企业连续压机钢带张紧液压系统

Fig.8 Continuous-presses steel belt tension hydraulic system of an enterprise

工程实践表明,钢带张紧油缸位移最大偏差必须 <15 mm,否则会对钢带造成损伤。张紧油缸同步精度的现场验证结果如图9所示,经过20 s左右,两侧张紧油缸都达到设定的最大位移 350 mm,油缸位移的最大偏差为 6.48 mm,这表明选

取的蓄能器参数能够满足连续压机钢带张紧液压系统平稳运行、快速响应的要求。

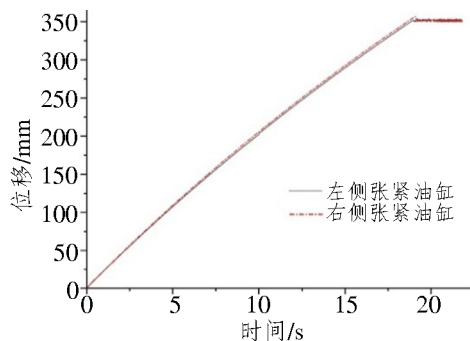


图9 张紧油缸位移同步测试曲线

Fig.9 Displacement synchronous curve of tension cylinder test

在连续压机开始生产时,钢带张紧油缸压力和位移的监控界面如图10所示,油缸压力稳定在设定值 18 MPa 附近,左右两侧油缸的位移偏差为 3.2 mm,现场监控数据证明整个钢带张紧液压系统运行可靠,有效地保证了人造板连续压机的稳定生产。

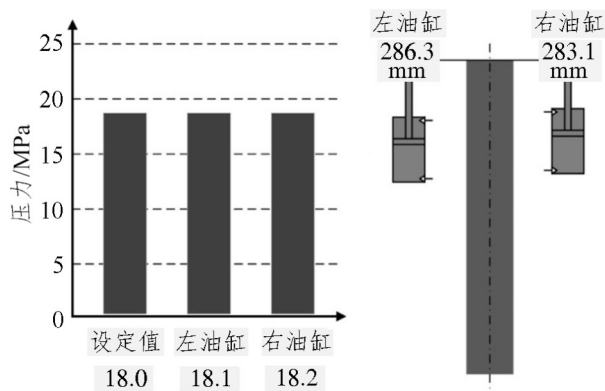


图10 钢带张紧油缸压力和位移的监控界面

Fig.10 Pressure and displacement interfaces of the steel belt tension cylinder

5 结论

采用 AMESim 仿真软件研究气囊式蓄能器及其主要参数对人造板连续压机液压系统稳定性的影响。蓄能器能够有效减小连续压机钢带张紧液压系统的压力冲击,有助于增强液压系统的响应速度和压力冲击吸收能力。

验证试验结果表明,在蓄能器预充气压力为 16 MPa、连接管路直径为 20 mm 的条件下,两侧

张紧油缸位移的最大偏差为6.48 mm,同步精度满足连续压机技术要求;在连续压机稳定生产过程中,钢带张紧油缸压力稳定在设定值18 MPa附近,左右两侧油缸的位移偏差为3.2 mm,满足人造板连续生产的要求。

本研究为连续压机钢带张紧液压系统蓄能器选型提供了理论依据,对改善液压系统稳定性和保证油缸同步精度具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 马登成.波动载荷下工程机械液压底盘性能及实验技术研究[D].西安:长安大学,2011.
- [2] 王成宾,许小庆.蓄能器缓冲惯性负载液压冲击方法研究[J].液压与气动,2017(9):66-70.
WANG C B, XU X Q. Methods of accumulator's buffering against hydraulic shock from inertia load[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(9): 66-70.
- [3] 马登成,杨士敏,陈笋,等.蓄能器对工程机械液压系统影响的仿真与试验[J].中国公路学报,2013,26(2):183-190.
MA D C, YANG S M, CHEN Z, et al. Simulation and experimental study on impact of accumulator on engineering machinery hydraulic system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 183-190.
- [4] 陆发龙,许高伦,胡凯,等.蓄能器各参数对能量回收效率和制动安全的影响研究[J].机电工程,2016,33(6):655-662.
LU F L, XU G L, HU K, et al. Influence of various parameters of accumulator on energy recovery efficiency and braking safety[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(6): 655-662.
- [5] 史彬锋,方桂花,胡娟.路面液压发电装置蓄能器吸收冲击性能[J].液压与气动,2020(6):52-56.
SHI B F, FANG G H, HU J. Accumulator shock absorption performance on pavement hydraulic power generation device[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(6): 52-56.
- [6] 王纪森,王海涛,李仕辉.蓄能器在液压试验台中的参数分析与仿真[J].机床与液压,2010,38(15):89-91,34.
WANG J S, WANG H T, LI S H. The parameter analysis and simulation of the accumulator in hydraulic test-bed[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(15): 89-91, 34.
- [7] 魏海涛,薛飞,魏小玲,等.快速锻造液压机组蓄能器回程系统特性研究[J].液压与气动,2018(4):62-68.
WEI H T, XUE F, WEI X L, et al. Characteristics research of accumulator return system for fast forging hydraulic unit[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018(4): 62-68.
- [8] 李明杰,武志斐,徐光钊.蓄能器主要参数对液压激振台系统影响的仿真与试验研究[J].液压与气动,2019(9):70-77.
LI M J, WU Z F, XU G Z. The simulation and experiment research on the influence of main parameters of accumulator on hydraulic excitation table system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019 (9): 70-77.
- [9] 余文霞,盛振湘,岳群飞,等.连续压机液压控制阀对板坯加压响应时间的影响[J].木材工业,2017,31(5):9-12.
YU W X, SHENG Z X, YUE Q F, et al. Influence of hydraulic control valves on response time of mat pressing for continuous presses[J]. China Wood Industry, 2017, 31(5): 9-12.

(本文编校 孟凡丹、向琴)