

## 挤压铸造机压射液压系统性能仿真分析

张晓丽<sup>1,2</sup>, 魏海涛<sup>1,2</sup>, 马志刚<sup>1,2</sup>, 王生金<sup>1,2</sup>

(1. 兰州兰石集团有限公司能源装备研究院, 甘肃 兰州 730314; 2. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730314)

**摘要:** 以 4000 t 大型智能半固态挤压铸造机为研究对象, 搭建压射液压系统仿真模型, 通过仿真分析直观地展现了关键参数变化对压射系统性能的影响。仿真结果表明: 压射系统动力源选用蓄能器, 可完全实现工艺和设备要求。压射蓄能器容积对压射阶段的速度无影响, 但随着容积的增大, 增压开启时间越早; 增压蓄能器容积对压射系统几乎无影响。压射蓄能器设定压力越大, 压射阶段可达到的最大压射速度越大, 增压开启时间越早, 但随着压射蓄能器设定压力减小, 无法实现增压; 增压蓄能器设定压力对压射阶段无影响, 但增压蓄能器设定压力越大, 增压后的压力越大。压射蓄能器和增压蓄能器参数影响压射系统性能, 需要对液压元件进行合理匹配。研究结果可为后续挤压铸造机压射控制系统的设计提供依据。

**关键词:** 挤压铸造机; 压射液压系统; 压射蓄能器; 增压蓄能器; 压射速度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.027

**中图分类号:** TH137      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0204-06

## Performance simulation analysis on injection hydraulic system for squeeze casting machine

Zhang Xiaoli<sup>1,2</sup>, Wei Haitao<sup>1,2</sup>, Ma Zhigang<sup>1,2</sup>, Wang Shengjin<sup>1,2</sup>

(1. Lanzhou LS Group Co., Ltd. Energy Equipment Research Institute, Lanzhou 730314, China;

2. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730314, China)

**Abstract:** For 4000 t large intelligent semi-solid squeeze casting machine, the simulation model of the injection hydraulic system was built, and the influences of key parameter changes on the performance of injection system were intuitively displayed by simulation analysis. The simulation results show that the accumulator is selected as the power source of the injection system, which can completely meet the requirements of process and equipment. The volume of injection accumulator has no effect on the velocity in the injection stage, but the higher the volumes is, the earlier the opening time of booster is. The volume of booster accumulator has little effect on the injection system. The higher the setting pressure of injection accumulator is, the higher the maximum injection speed can be achieved in the injection stage, and the earlier the booster opening time is. However, as the setting pressure of injection accumulator decreases, the booster cannot be realized. The setting pressure of booster accumulator has no influence on the injection stage, but the higher the setting pressure of booster accumulator is, the higher the pressure after the booster is. The parameters of injection accumulator and booster accumulator affect the performance of injection system, so it is necessary to reasonably match the hydraulic components. Thus, it can provide a basis for the design of injection control system for the subsequent squeeze casting machine.

**Key words:** squeeze casting machine; injection hydraulic system; injection accumulator; booster accumulator; injection speed

挤压铸造机是提供挤压铸造过程中所需的机械压力的设备, 它还作为挤压铸造实施的平台, 成为挤压铸造生产过程中的核心设备。挤压铸造机与通用压力机的工作原理和运动形式基本相同, 所以在挤压铸造初期, 大部分都是对通用压力机进行改造以满足要求, 但是随着挤压铸造件形状

越来越复杂, 工艺要求越来越高, 通用压力机已经无法满足生产需要, 所以, 专用挤压铸造机随之发展起来<sup>[1]</sup>。目前, 对挤压铸造机的研究主要集中在工艺和机械系统上, 对于液压系统特性的研究相对较少。

本文以 4000 t 大型智能半固态挤压铸造机为研究对象, 其主机结构为 VV 型结构<sup>[2]</sup>, 结构简单、造价低, 主要由开合模系统、压射系统、顶出系统等组成。其中压射系统用于将半固态浆料压入型腔, 所以, 挤压铸造机压射系统性能的优

收稿日期: 2022-12-09; 修订日期: 2023-03-19

作者简介: 张晓丽 (1989-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 799656900@qq.com

劣对挤铸件的质量至关重要，挤压压射系统采用全闭环实时控制，可大大提高整机的稳定性和可靠性。本文采用 Amesim 软件搭建压射液压系统仿真模型，对挤压铸造机压射液压系统性能进行仿真分析，直观地展现了参数变化对系统性能的影响，为后续挤压铸造机压射控制系统的设计提供了依据。

1 挤压铸造机压射液压系统原理介绍

4000 t 大型智能半固态挤压铸造机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 挤压铸造机主要技术参数  
Table 1 Main technical parameters of squeeze casting machine

参数	数值
锁模力/kN	40000
挤压压力/kN	≥3300
最大金属浇注量（铝）/kg	76
动模安装板行程/mm	1750
模具厚度/mm	1800

挤压铸造机压射液压系统主要由阀、液压缸、蓄能器以及压力油液管路和自动控制系统组成，是集液压和机电控制于一体的综合性系统。其中，压射缸是压射系统的关键部件，其结构简图如图 1 所示。

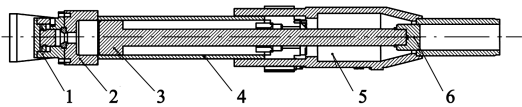


图 1 压射缸结构简图  
1. 增压器 2. 压射缸底座 3. 压射缸筒 4. 压射缸杆  
5. 压室 6. 压射头

Fig. 1 Structure schematic diagram of injection cylinder

半固态浆料由料杯向倾斜的压室 5 内注入，挤压单元回倾后和模具对接，压射头 6 向上充填半固态浆料。压射缸底座增加增压器 1，以不间断地向半固态浆料施加稳定高压，挤压增压压力的大小可达到 50 MPa。

挤压铸造机的压射速度和压力是压射系统的两个重要参数，压射速度决定了挤铸件充型的好坏，而压力决定了挤铸件的内部质量和力学性能<sup>[3-4]</sup>。因此，要想获得高质量的挤铸件，必须根据不同的情况对这两个工艺参数进行合理的控制。挤压铸造机压射液压系统的原理图如图 2 所示。

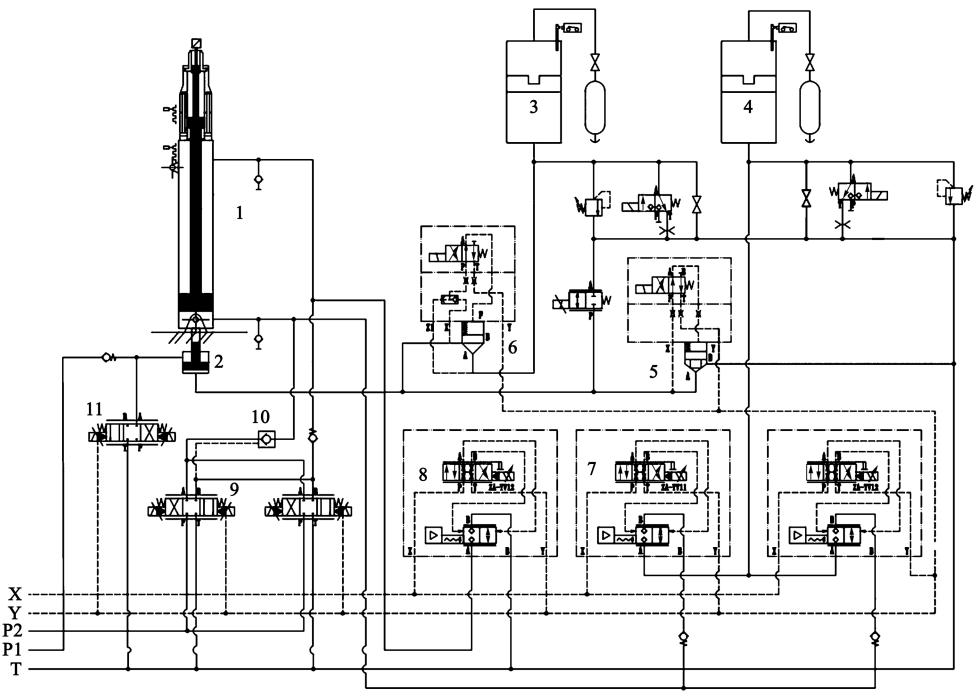


图 2 挤压铸造机压射液压系统原理图  
1. 压射缸 2. 增压器 3. 增压蓄能器 4. 压射蓄能器 5. 增压器回程阀 6. 增压器进液阀 7. 压射缸进液阀 8. 压射缸排液阀  
9. 压射回程阀 10. 液控单向阀 11. 增压器排液阀

Fig. 2 Principle diagram of injection hydraulic system for squeeze casting machine

压射系统如果采用液压泵作为动力源, 装机功率很大, 且压射需满足快速增速减速, 故选用蓄能器作为动力源, 不仅可以降低装机功率、实现液压泵的小型化、节省能源, 而且系统相对稳定、冲击小。增压由增压蓄能器 3 和增压器 2 实现, 由于实时压射控制系统要求执行机构具备快速的响应能力, 所以液压阀选用电液伺服阀。压射过程一般分为压射阶段、增压阶段和保压阶段 3 个阶段<sup>[5-6]</sup>, 其工作原理如下。

压射时, 压射缸进液阀 7 带电打开, 高压液压油由压射蓄能器 4 通过压射缸进液阀 7 和单向阀进入压射缸 1 的无杆腔, 推动冲头以缓慢速度前进, 压射缸 1 有杆腔的油液通过压射缸排液阀 8 回油

箱。可通过调整电液伺服阀阀口开度实现压射速度的无级调节, 实现快速压射过程。当半固态浆料充满型腔后, 增压器进液阀 6 带电打开, 油液由增压蓄能器 3 通过增压器进液阀 6 进入增压器的无杆腔, 在与增压蓄能器 3 的共同作用下实现增压<sup>[7]</sup>。

2 仿真计算及分析

2.1 仿真计算

计算机仿真技术已成为液压系统设计中必不可少的重要手段。本文通过 Amesim 仿真软件, 搭建挤压铸造机压射液压系统仿真模型<sup>[8-10]</sup>, 如图 3 所示。

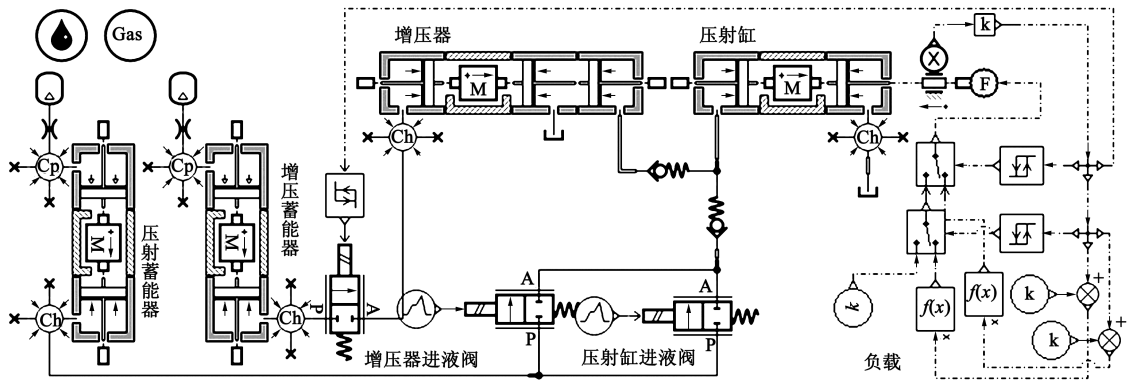


图 3 压射液压系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of injection hydraulic system

4000 t 大型智能半固态挤压铸造机压射液压系统的主要参数如表 2 所示。

表 2 压射液压系统的主要参数

Table 2 Main parameters of injection hydraulic system

参数	数值
压射缸	缸径 $D_{\text{压}}/\text{mm}$
	$\Phi 290$
	杆径 $d_{\text{压}}/\text{mm}$
	$\Phi 150$
增压器	行程 $S_{\text{压}}/\text{mm}$
	1300
	挤压力 $F_{\text{挤}}/\text{kN}$
	1100
增压器	缸径 $D_{\text{增}}/\text{mm}$
	$\Phi 290$
	杆径 $d_{\text{增}}/\text{mm}$
压射速度 $v_{\text{压}}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Phi 150$
	45
增压速度 $v_{\text{增}}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	1500
	36

压射蓄能器和增压蓄能器的设定压力和容积计算如下。

使用蓄能器作辅助动力源, 由于增压时间为

1.25 s, 压射时间小于 55 s, 气体的体积变化很快, 可视作绝热过程。

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (1)$$

式中:  $V_0$  为所需蓄能器的容积,  $\text{m}^3$ ;  $\Delta V$  为蓄能器的工作容积,  $\text{m}^3$ ;  $p_0$  为预充气体压力, MPa;  $p_1$  为系统最低工作压力, MPa;  $p_2$  为系统最高工作压力, MPa;  $n$  为可变指数, 由气体工作条件决定, 绝热时取  $n=1.4$ 。

系统最低工作压力为:

$$p_1 = \frac{4F_{\text{挤}}}{\pi D_{\text{压}}^2} = 16.66 \text{ MPa} \quad (2)$$

系统最高工作压力为系统允许的最大冲击力, 取  $p_1+3 \text{ MPa}$  和加速度最大时系统压力中的较大值:

$$p_2 = \max \left[ p_1 + 3, \frac{4ma}{\pi D_{\text{压}}^2} \right] = 19.66 \text{ MPa} \quad (3)$$

式中:  $m$  为活动部分质量, 为 192 kg;  $a$  为加速度, 最大为  $5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

预充气体压力为:

$$p_0 = 0.9 \times p_1 = 15 \text{ MPa} \quad (4)$$

压射蓄能器的工作容积为:

$$\Delta V = S_{\text{压}} \times \frac{\pi}{4} D_{\text{压}}^2 = 86 \text{ L} \quad (5)$$

计算可得压射蓄能器容积:  $V_0 = 625 \text{ L}$ 。

故可选用一个活塞式蓄能器 (容量为 200 L) 和 12 个氮气瓶 (单个容量为 50 L) 作为压射液压系统动力源。

增压蓄能器的工作容积为:

$$\Delta V = S_{\text{增}} \times \frac{\pi}{4} D_{\text{增}}^2 = 3 \text{ L} \quad (6)$$

增压蓄能器容积为:

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}} = 21.5 \text{ L} \quad (7)$$

可选用一个活塞式蓄能器 (容量为 20 L) 和 1 个氮气瓶 (容量为 50 L) 作为增压动力源。

根据表 2 对压射缸和增压器参数进行设置, 根据式 (1)~式 (7) 的计算结果设置压射蓄能器参数和增压蓄能器参数, 压射蓄能器的活塞直径为  $\Phi 355 \text{ mm}$ , 氮气瓶容积为 600 L, 增压蓄能器的活塞直径为  $\Phi 180 \text{ mm}$ , 增压氮气瓶容积为 50 L。

通过仿真计算, 可以得到压射和增压时的速度  $v$ 、加速度  $a$ 、压力  $p$  和位移  $S$  曲线如图 4 所示<sup>[11-13]</sup>。

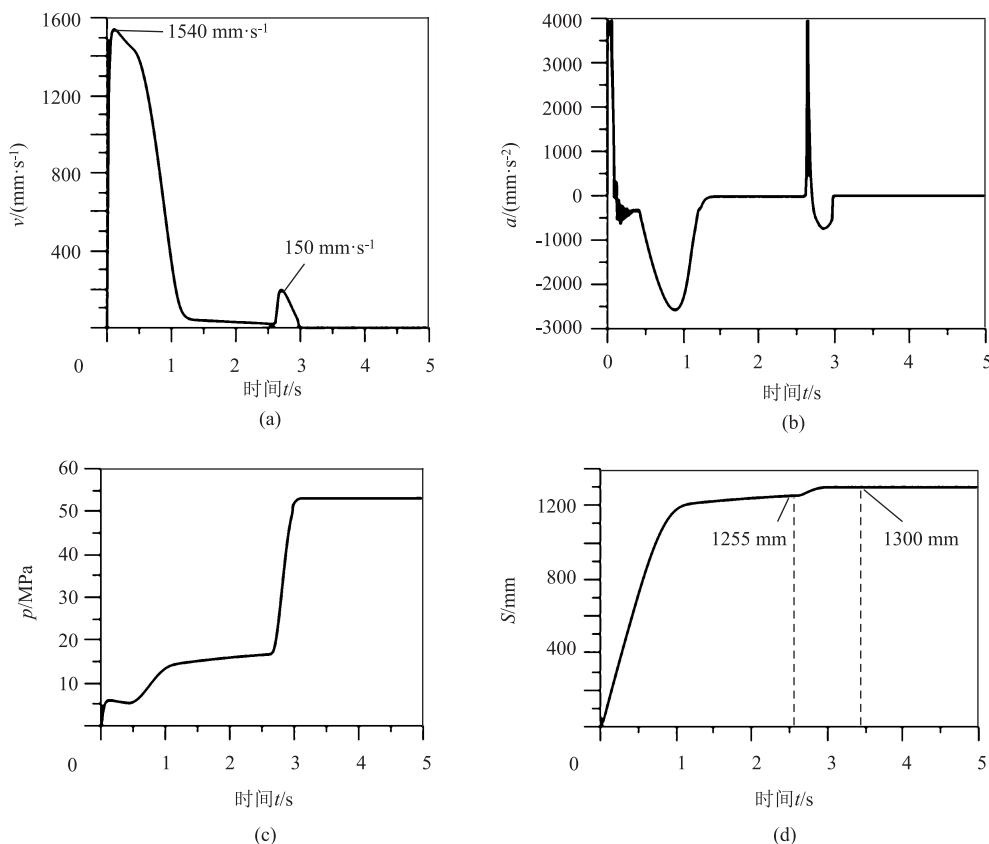


图4 压射和增压仿真结果

(a)  $v$  (b)  $a$  (c)  $p$  (d)  $S$

Fig. 4 Simulation results of injection and booster

由图4可得,  $0 \sim 2.62 \text{ s}$  为压射过程,  $2.62 \text{ s}$  开始增压, 最大空载压射速度可达到  $1540 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 压射行程为  $1255 \text{ mm}$ , 增压速度可达到  $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 增压行程为  $45 \text{ mm}$ 。故完全可以满足设计要求。

## 2.2 仿真分析

### 2.2.1 压射蓄能器容积对压射液压系统的影响

通过设定不同的压射蓄能器容积, 利用批运行, 对压射蓄能器容积对压射液压系统的影响进行分析。

图 5 为压射蓄能器容积分别设为 500、550、600、650 和 700 L 时的压射速度曲线。

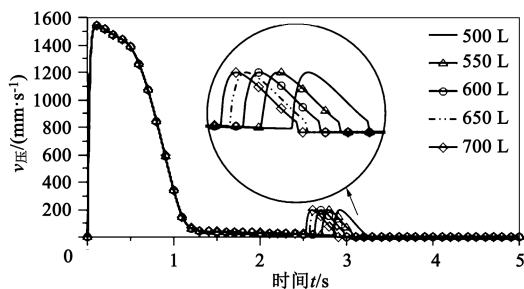


图 5 压射蓄能器容积对压射速度的影响曲线

Fig. 5 Effect curves of injection accumulator volume on injection speed

从图 5 可以看出, 压射蓄能器容积对压射阶段的速度无影响, 但随着容积的增大, 增压开启时间越早。

### 2.2.2 增压蓄能器容积对压射液压系统的影响

通过设定不同的增压蓄能器容积, 利用批运行, 对增压蓄能器容积对压射液压系统的影响进行分析。图 6 为增压蓄能器容积分别设为 40、45、50、55 和 60 L 时的压射速度曲线。

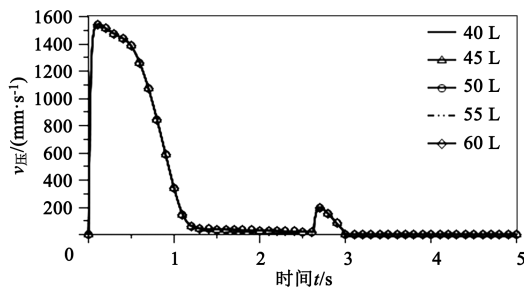


图 6 增压蓄能器容积对压射速度的影响曲线

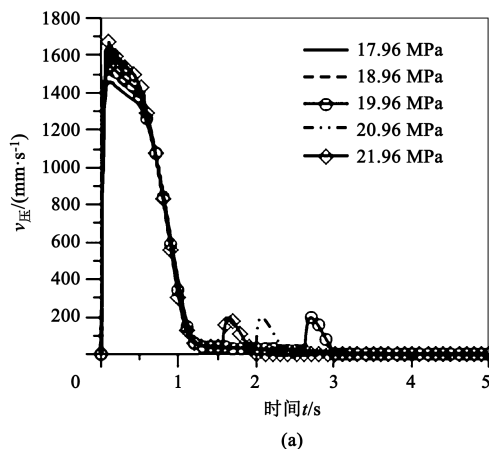
Fig. 6 Effect curves of booster accumulator volume on injection speed

从图 6 可以看出, 增压蓄能器容积对压射系统几乎无影响。

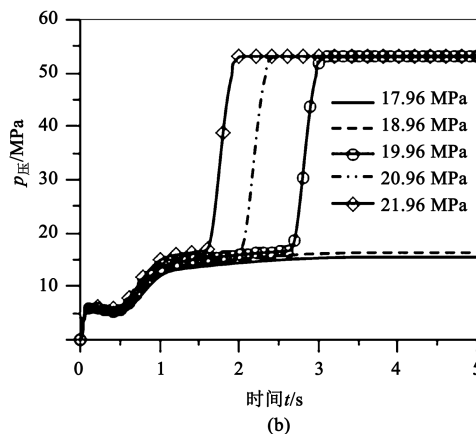
### 2.2.3 压射蓄能器设定压力对压射液压系统的影响

通过设置不同的压射蓄能器设定压力, 利用批运行, 对压射蓄能器设定压力对压射液压系统的影响进行分析。图 7 为压射蓄能器设定压力分别设为 17.96、18.96、19.96、20.96 和 21.96 MPa 时的压射速度与压力曲线。

从图 7 可以看出, 压射蓄能器设定压力越大, 压射阶段可达到的最大压射速度越大, 增压开启时间越早, 但随着压射蓄能器设定压力的减小, 无法实现增压。



(a)



(b)

图 7 压射蓄能器设定压力对压射系统的影响

(a) 速度 (b) 压力

Fig. 7 Effects of injection accumulator setting pressure on injection system

(a) Speed (b) Pressure

### 2.2.4 增压蓄能器设定压力对压射液压系统的影响

通过设定不同的增压蓄能器设定压力, 利用批运行, 对增压蓄能器设定压力对压射液压系统的影响进行分析。图 8 为压射蓄能器设定压力分别设为 17.96、18.96、19.96、20.96 和 21.96 MPa 时的压射速度与压力曲线。

从图 8 可以看出, 增压蓄能器设定压力对压射阶段无影响, 但增压蓄能器设定压力越大, 增压后的压力越大。

## 3 结论

(1) 选用蓄能器作为压射系统动力源, 完全可实现工艺和设备的要求。

(2) 压射蓄能器容积对压射阶段的速度无影响, 但随着容积的增大, 增压开启时间越早。增压蓄能器容积对压射系统几乎无影响。

(3) 压射蓄能器设定压力越大, 压射阶段可达

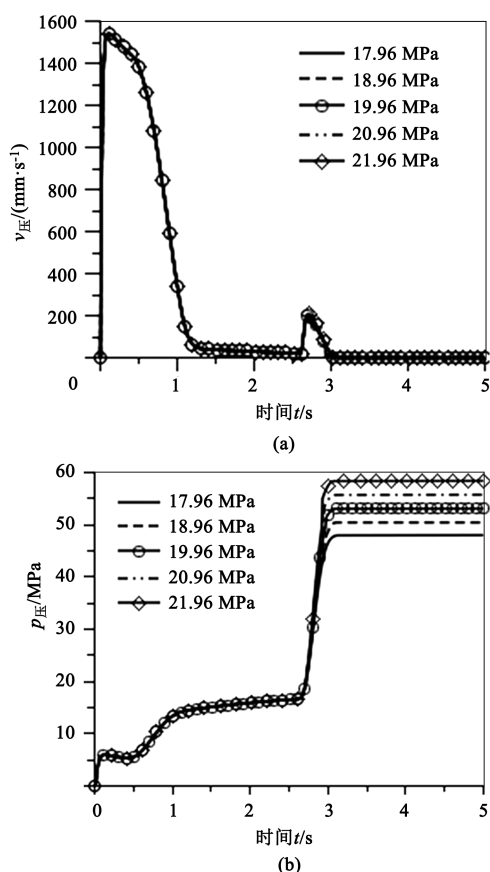


图8 增压蓄能器设定压力对压射系统的影响

(a) 速度 (b) 压力

Fig. 8 Effects of booster accumulator setting pressure on injection system

(a) Speed (b) Pressure

到的最大压射速度越大, 增压开启时间越早, 但随着压射蓄能器设定压力的减小, 无法实现增压。

(4) 增压蓄能器设定压力对压射阶段无影响, 但增压蓄能器设定压力越大, 增压后的压力越大。

#### 参考文献:

- [1] 松雷, 邵明, 游东东. 挤压铸造设备的研究进展与发展趋势 [J]. 铸造, 2010, 59 (10): 1039-1043.  
Song L, Shao M, You D D. Research and development of squeezing casting equipment [J]. China Foundry, 2010, 59 (10): 1039-1043.
- [2] 陈金城, 杨大勇. 填充式间接挤压铸造及全卧式 LK/HH 型挤压铸造机的开发 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, (12): 1124-1127.  
Chen J C, Yang D Y. Development of filling horizontal indirectional squeezing casting machine (LK/HH) [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, (12): 1124-1127.
- [3] 唐林, 苏世卿, 孔亮. 振动挤压铸造机压力控制系统优化研究 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (1): 89-92.  
Tang L, Su S Q, Kong L. Study on optimization of vibration

squeeze casting machine [J]. Foundry Technology, 2019, 40 (1): 89-92.

- [4] 郝志刚, 柯有权. 冷室压铸机压射速度的匀加速控制 [J]. 铸造技术, 2006, 27 (6): 562-564.  
Xi Z G, Ke Y Q. Equal accelerating control of the injection speed of the cold chamber die-casting machine [J]. Foundry Technology, 2006, 27 (6): 562-564.
- [5] 马俊. J1128H 型数控压铸机压射控制系统的仿真 [D]. 南京: 东南大学, 2014.  
Ma J. Simulation of Injection Control System in J1128H-type Die Casting Machine [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [6] 隋晓东. 卧式冷室压铸机压射液压及控制系统的仿真研究 [D]. 南京: 东南大学, 2011.  
Sui X D. Simulation Study on Injection Hydraulic and Control System of Horizontal Cold Chamber Die Casting Machine [D]. Nanjing: Southeast University, 2011.
- [7] 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.
- [8] 李欣星. 基于 AMESim 的节流调速回路仿真及实验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
Li X X. Simulation and Experimental Study of Throttle Speed Control Loop Based on AMESIM [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [9] 张国泰, 杨静. 调速阀出口节流调速系统动态特性仿真研究 [J]. 盐城工学院学报: 自然科学版, 2019, 32 (1): 32-36.  
Zhang G T, Yang J. Simulation study on dynamic characteristics of speed regulating valve outlet throttle speed regulating system [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology: Natural Science Edition, 2019, 32 (1): 32-36.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李明杰, 武志斐, 徐光钊. 蓄能器主要参数对液压激励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.
- [13] 桑勇, 邵利来, 赵健龙, 等. 基于 AMESim 蓄能器组的动态特性研究 [J]. 液压气动与密封, 2018, 38 (1): 20-24.  
Sang Y, Shao L L, Zhao J L, et al. Study on multiple accumulator in hydraulic system based on AMESim [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018, 38 (1): 20-24.