

文章编号: 1000-4750(2011)02-0252-05

液压脉振注射成型机注射过程螺杆动态特性分析

*王 权¹, 瞿金平²

(1. 中山火炬职业技术学院装备制造系, 广东, 中山 528436;

2. 华南理工大学聚合物新型成型装备国家工程研究中心, 聚合物成型加工工程教育部重点实验室, 广东, 广州 510640)

摘 要: 介绍自行设计新型液压脉振注射成型机的注射部分结构性能, 分析了螺杆在振动力场下的轴向受力状况, 通过将实际螺杆简化成广义螺杆, 利用集中质量的方法建立了注射过程螺杆轴向振动响应的物理和数学模型, 研究了此种振动装置在注射过程螺杆的动态响应。在工作频率范围内, 随着振动频率增大, 螺杆响应振幅减小, 低频率激励的振幅动态放大系数高于高频率激励振幅放大系数, 实验结果与理论分析相一致, 为新型液压脉振注射成型机振动参数的确定提供了理论依据。

关键词: 液压脉振; 注射; 螺杆; 阻尼; 动态特性

中图分类号: TH123; TH113.1 **文献标识码:** A

ANALYSIS ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SCREW IN INJECTION PROCESS OF HYDRAULIC VIBRATION INJECTION MOLDING MACHINE

*WANG Quan¹, QU Jin-ping²

(1. Zhongshan Torch Polytechnic, Zhongshan, Guangdong 528436, China;

2. The National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing, The Key Laboratory of Polymer Processing Engineering of Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: The structure and the performance of the injection part of the hydraulic vibration injection molding machine are presented. The axial force distribution of the screw is analyzed. By simplifying the actual screw to a generalized model, the physical model and mathematic model to describe the screw's axial vibration in the injection process are established using the method of lumped-mass, and then the screw's dynamic responses are examined. Results show that the vibration amplitude of the screw decreases with the increase of frequency; and the amplified coefficient of amplitude in low frequency is bigger than that in high frequency in the range of adjusting frequency. The experimental results are in good agreements with those of theoritical analysis.

Key words: hydraulic vibration; injection; screw; damping; dynamic characteristic

聚合物动态注射成型具有低能耗、噪音小、成型周期短、制品性能优良、可实现低温、低压注射等特点^[1-2], 得到学术界广泛重视并逐步应用于工业生产中。在动态注射成型加工技术中, 注射过程是成型的关键过程, 其加工工艺参数(振幅和频率)不是孤立地影响聚合物熔体的流变行为, 而是与其它工艺参数(如温度、压力)共同作用, 使其它工艺

参数得到优化, 综合地影响成型过程^[3-6]。

前人对动态注射成型技术的研究更多的集中在制品性能和凝聚态结构^[7-9], 对于工艺参数(振幅和频率)的特性还没有涉及, 因而, 笔者采用液压激振力为驱动力方式, 解析螺杆在注射过程的动态特性, 为后继的实验研究及液压脉振注塑成型机的优化设计提供理论依据。

收稿日期: 2009-08-07; 修改日期: 2009-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(10590351); 国家自然科学基金面上项目(10472034)

作者简介: *王 权(1977—), 男, 安徽人, 副研究员, 博士后, 主要研究高分子材料加工过程模拟仿真研究(E-mail: wq2001126@163.com);

瞿金平(1957—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 从事高分子成型加工装备研究(E-mail: jpqu@scut.edu.cn)。

1 注射螺杆脉振装置

图1 液压脉振装置的油压通过一电磁比例压力流量复合阀引入注射油缸。注射过程，注射油缸(双缸注射)带动整个注射装置轴向脉动前移。比例压力流量复合阀收到电信号后，通过调节阀输出的流量和压力，控制注射过程脉动的压力和频率。通过调节比例压力流量阀油压的大小和频率，即可以改变轴向脉动的振幅和频率，使螺杆在注射过程可作周期性轴向振动。

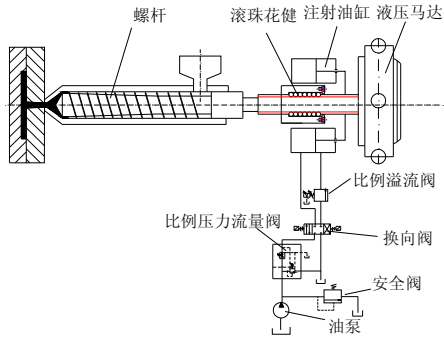


图1 螺杆轴向振动装置示意图

Fig.1 Sketch of screw axial vibration equipment

2 注射过程螺杆动态模型建立

2.1 注射过程螺杆轴向受力

设注射方向为正方向，图2是注射时螺杆轴向受力示意图。

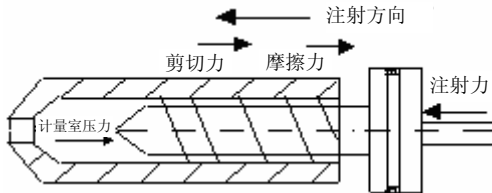


图2 注射过程螺杆轴向受力示意图

Fig.2 Sketch of screw axial force in injection process

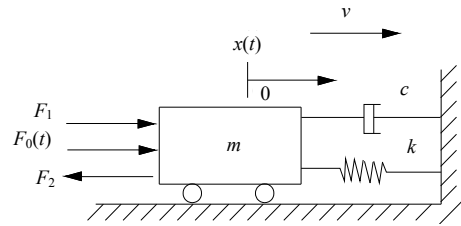
2.2 动力学模型的建立

注射过程螺杆受力很复杂，为分析需进行条件假设：

- 1) 螺杆绝对刚性，无质量偏心，忽略注射过程螺杆变形，仅用一集中质量块表示。
- 2) 注射过程忽略系统刚度分散。
- 3) 注射过程油液不可压缩。
- 4) 螺槽中物料仅存在阻尼，物料不存在刚性，阻尼为线性阻尼。
- 5) 聚合物固体对螺杆的摩擦阻尼以及聚合物熔体的粘性阻尼，统一折算为等效粘性阻尼。

根据动态注射时螺杆的受力，螺杆轴向振动可

简化为图3所示的模型。



m 为振动系统质量； k 为系统刚度； c 为系统的阻尼； F_1 为稳态注射油缸压力； F_2 为注射时螺杆头部所受熔体反作用力； $F_0(t)$ 为激振力 $x(t)$ 在 $F(t)$ 作用下螺杆的强迫响应； v 为注射速度

图3 注射过程螺杆轴向振动模型

Fig.3 Model of screw axial vibration in injection process

根据牛顿定理，可得：

$$m\ddot{x}(t) = F_1 + F_0(t) - F_2 - F_v - kx(t) \quad (1)$$

式中 F_v 为阻尼力。

注射过程 $F_v = c[V + \dot{x}(t)]$ ，代入式(1)并整理：

$$m\ddot{x}(t) + c[V + \dot{x}(t)] + kx(t) = F_1 + F_0(t) - F_2 \quad (2)$$

由式(2)可见，要求解注射过程螺杆的动态位移响应 $x(t)$ ，就要确定振动系统质量 m 、系统阻尼 c 、系统刚度 k 及作用在振动系统上总外力 $F(t)$ 。

2.3 阻尼力

注射过程螺杆计量段对螺杆的粘性阻尼力 F_v ，由螺棱间隙中粘性阻尼力 F_m 及螺槽中粘性阻尼力 F'_m 组成，如图4所示。

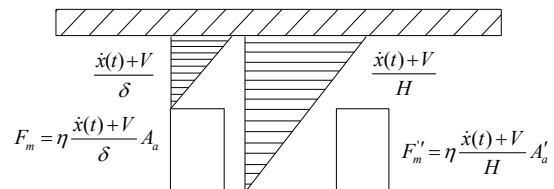


图4 阻尼力示意图

Fig.4 Sketch of damping force

$$F_v = F_m + F'_m = \eta(\dot{\gamma}) \left(\frac{A_a}{\delta} + \frac{A'_a}{H_3} \right) [V + \dot{x}(t)] \quad (3)$$

式中： $\eta(\dot{\gamma})$ 为聚合物熔体表观粘度； A_a 为螺棱顶部与料筒之间聚合物熔体剪切层面积； A'_a 为螺槽底部与料筒之间聚合物熔体剪切层面积； δ 为螺棱间隙； H 为螺槽深度。

2.4 注射过程聚合物熔体表观粘度 $\eta(\dot{\gamma})$

对非牛顿流体，根据幂律模型：

$$\dot{\gamma} = \frac{A\omega \cos \omega t + V}{H} \quad (4)$$

可对式(4)进行如下处理^[10]：

$$\bar{\dot{\gamma}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{A\omega \cos \omega t + V}{H} \right)^2 dt} = \sqrt{\frac{V^2 + \frac{1}{2}(A\omega)^2}{H^2}} \quad (5)$$

动态表现粘度为:

$$\eta(\dot{\gamma}) = K\dot{\gamma}^{(n-1)} \approx K \left[\frac{V^2 + \frac{1}{2}(A\omega)^2}{H^2} \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (6)$$

2.5 阻尼系数

比较式(2)、式(3)可得:

$$c_2 = \eta(\dot{\gamma}) \left(\frac{A_a}{\delta} + \frac{A'_a}{H} \right) \quad (7)$$

螺杆和料筒展开, 得:

$$A_a = 2i \frac{L_3}{l} \pi D e, \quad A'_a = 2i \frac{L_3}{l} \pi D W \quad (8)$$

将式(6)、式(8)代入式(7), 螺棱处粘度将 δ 代替 H , 同时, 引入系数 K_d , 将加料段和熔融段聚合物的阻尼折算到计量段, 阻尼系数可表示为:

$$c = 2\pi K_d K i D \frac{L_3}{l} \cdot \left(\frac{e}{\delta} \left[\frac{V^2 + \frac{1}{2}(A\omega)^2}{\delta^2} \right]^{\frac{n-1}{2}} + \frac{W}{H} \left[\frac{V^2 + \frac{1}{2}(A\omega)^2}{H^2} \right]^{\frac{n-1}{2}} \right) \quad (9)$$

式中: i 为螺纹头数; L_3 为螺杆计量段长度; l 为螺纹升程; D 为螺杆直径; e 为螺纹顶处螺棱法向宽度; W 为垂直于螺棱的螺槽宽度。

从式(9)可看出, 动态注射过程中, 阻尼系数 c 不仅与螺杆的参数和物料的性能(如非牛顿指数)有关, 还取决于加工过程的参数(如振动强度、注射速度等)。因此, 阻尼系数确定对注射过程螺杆的轴向振动响应有着重要的影响。

3 注射过程螺杆动态响应分析

由式(2)可知:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_1 + F_0(t) - F_2 - cV \quad (10)$$

式中: $F_1 = p_i S_2$; $F_2 = p_2 S_1$; p_i 为注射油缸稳态压力; S_1 为料筒截面积; p_2 为计量室压力; S_2 为注射油缸截面积。

假设激振力输出为一等幅矩形波, 如图 5 所示, 激振力的幅值为 F_0 。

设

$$A_1 = \frac{F_1 - F_2 - cV}{k} \quad (11)$$

其中分量 $A_1 k$ 只是使螺杆产生静位移, 只有周期分量 $F_0(t)$ 使螺杆产生强迫振动, 振动系统的微分方程

为:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0(t) \quad (12)$$

将周期分量 $F_0(t)$ 展开为傅里叶级数:

$$F_0(t) = \frac{4F_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1)\omega t = \sum_{\substack{i=2n-1 \\ n=1}}^{\infty} F_i \sin i\omega t \quad (13)$$

式中: F_i 为激振力 $F_0(t)$ 第 i 阶谐波分量的幅值; ω 为激振力角频率。

$$F_i = \frac{4F_0}{\pi i}, \quad i = 1, 3, 5, \dots \quad (14)$$

在激振力 $F_0(t)$ 作用下, 螺杆的位移响应为:

$$x(t) = \sum_{\substack{i=2n-1 \\ n=1}}^{\infty} F_i \beta_i \sin(i\omega t - \varphi_i) = \sum_{\substack{i=2n-1 \\ n=1}}^{\infty} X_i \sin(i\omega t - \varphi_i) \quad (15)$$

式中: X_i 为螺杆响应第 i 阶谐波分量的幅值; β_i 为螺杆位移响应第 i 阶谐波分量的放大因子; φ_i 为螺杆位移响应第 i 阶谐波分量的相位角。

由式(15)可得螺杆在不同阶下的响应谐波如图 6 所示。由图 6 可知, 当 $i \geq 1$ 时, $X_1 \geq X_2 \geq X_3 \geq \dots$, 故式中 $i \geq 3$ 项都可以略去, 螺杆位移响应近似为简谐波形, 即:

$$x(t) = \frac{4F_0}{\pi k} \frac{1}{\sqrt{1 - (\omega/\omega_n)^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}} \times \sin \left(\omega t - a \tan \frac{2\xi\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right) \quad (16)$$

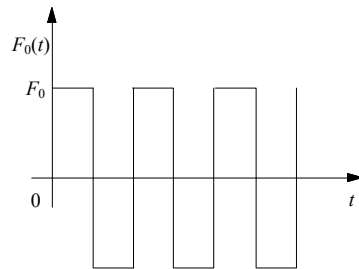


图 5 激振力矩形波

Fig.5 Square wave of excited force

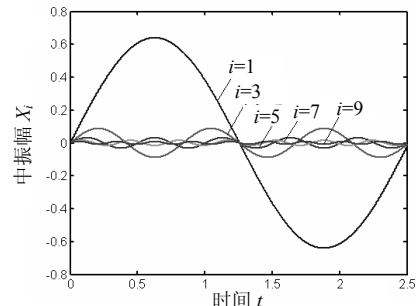


图 6 螺杆轴向振动的响应 ($\omega = 2.5, \omega_n = 10, \xi = 2.5$)

Fig.6 Response of screw axial vibration

4 计算结果与分析

计算所使用的物料为聚丙烯(PP)，单头螺纹，螺杆结构参数与物料参数分别见表 1 和表 2。

表 1 螺杆结构参数

Table 1 Structure parameter of screw

参数	螺杆直径	螺槽宽	螺槽深	螺纹升程	螺棱宽	螺棱间隙	计量段长
mm	32	30	2.5	64	4	0.12	170

表 2 PP 物料参数

Table 2 Material parameter

$K/(Nm^{-2}\cdot s^n)$	非牛顿指数 n
8.26×10^3	0.37

在加工频率 $f=2\text{Hz}$ ，注射激振力 $5.58 \times 10^3\text{N}$ ，螺杆平均注射速度为 20mm/s 下，注射过程阻尼系数为：

$$c_{PP} = 2.40 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}$$

强迫响应的幅值为：

$$A_0|_{I=0.2A} = \frac{4F_0}{\pi k} = \frac{4 \times 5.58 \times 10^3}{\pi \times 2.62 \times 10^6} = 2.71\text{mm},$$

$$A_1 = \frac{c_{PP}V}{k} = \frac{2.4 \times 10^5 \times 0.02}{2.62 \times 10^6} = 1.83\text{mm},$$

$$X|_{f=2\text{Hz}} = \frac{A_0|_{I=0.2A}}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + (2\xi\omega / \omega_n)^2}} = 1.779\text{mm}.$$

振动系统质量 $m=86.69\text{kg}$ ，系统刚度 $k=2.62 \times 10^6\text{N/m}$ ，注射过程的阻尼比：

$$\xi_{PP} = \frac{c_{PP}}{2\sqrt{m \cdot k}} = 7.96$$

根据式(16)，对单自由度一阶有阻尼系统的强迫振动，系统幅频特性函数为：

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + (2\xi\omega / \omega_n)^2}}$$

由图 7 可看出在许可的工作频率范围内，系统不会发生共振，原因就是：在高粘度聚合物的阻尼力作用下，轴向振动系统变成了过阻尼系统。注射过程中螺杆的响应幅值与受到的阻尼系数有很大关系，阻尼系数越大，螺杆响应的最大振幅越小，那么振幅可以调节的范围越窄；当螺杆轴向振动频率改变时，随着频率的增大，其响应的振幅也会减小。

由图 8 可见，实验与理论曲线有相同的变化趋势，即在工作频率范围内，低频率激励的振幅高于高频率激励的振幅，并且，随着频率的升高，振幅下降。

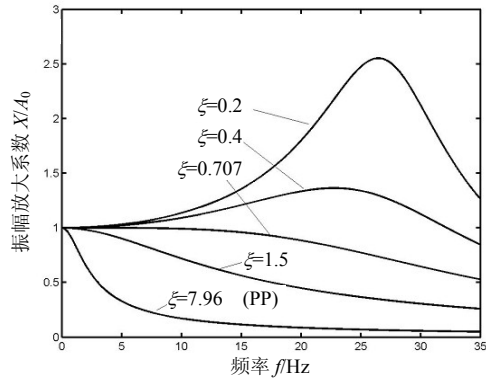


图 7 注射过程理论幅频特性曲线

Fig.7 Theoretical curve of amplitude-frequency characteristic in injection process

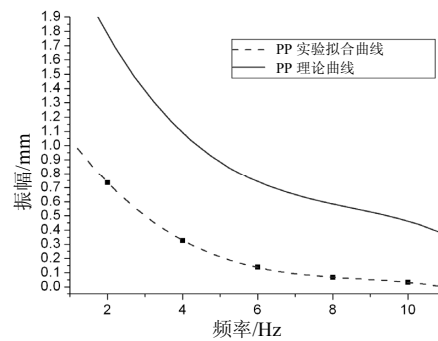


图 8 注射过程实验/理论幅频特性曲线

Fig.8 Experimental and theoretical curve of amplitude-frequency characteristic in injection process

5 结论

针对液压脉振成型机螺杆注射特性的分析，可以得到如下结论：

- (1) 注射阶段螺杆的响应比空载时的振幅有一定程度的减小，但振动的频率不变。
- (2) 动态注射时，当螺杆轴向振动频率改变时，其振幅也会发生改变。
- (3) 阻尼系数越大，螺杆响应的最大振幅越小，那么振幅可以调节的范围越窄；随着频率的增大，其响应的振幅也会减小。

参考文献：

[1] Ibar J P. Control of polymer properties by melt vibration technology: A review [J]. Polymer Engineering Science 1998, 38(1): 1—20.

[2] Wang Quan, Qu Jinping. Effect of vibration parameters of electromagnetic dynamic plastics injection molding machine on mechanical properties of polypropylene samples [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102(2): 972—976.

[3] 王权. 液压脉振注射成型机塑化注射特性研究[D]. 广

- 州: 华南理工大学, 2006.
- Wang Quan. Research on Plasticating and Injection Characteristic Based on Hydraulic Vibration Injection Molding Machine [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [4] 王权, 瞿金平, 何和智. 液压脉振塑化过程振动参数对 LDPE 性能的影响[J]. 合成树脂及塑料, 2008, 25(1): 54—56.
- Wang Quan, Qu Jinping, He Hezhi. Effect of vibration parameters of hydraulic dynamic injection machine on properties of LDPE in plasticizing process [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2008, 25(1): 54—56. (in Chinese)
- [5] Zhang Jie, Shen Kaizhi, Gao Yuegin. Mechanical properties and structure of high-density polyethylene samples prepared by injection molding with low-frequency vibration [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 96(3): 818—823.
- [6] 徐百平, 瞿金平. 三维动态混合过程界面追踪模拟与表征[J]. 应用力学学报, 2006, 23(1): 1—6.
- Xu Baiping, Qu Jinping. Trace simulation and characterization of interfaces during three-dimensional dynamic mixing [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics. 2006, 23(1): 1—6. (in Chinese)
- [7] Angstadt David C, Coulter John P. Product strength and orientation manipulation via vibration assisted injection molding [J]. American Society of Mechanical Engineers, 2002, 97: 69—74.
- [8] Zheng Yan, Shen Kaikai, Zhang Jie. The effect of vibration injection molding on mechanical properties of polyolefin parts [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 9(1): 1514—1518.
- [9] Li Youbing, Shen Kaizhi. Structure and properties of polyethylene prepared via low-frequency vibration-assisted injection molding [J]. Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, 2005, 1(43): 13—21.
- [10] 瞿金平. 聚合物动态塑化成型加工理论与技术上卷(理论篇)[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 187—188.
- Qu Jinping. Theory and technology of polymer dynamic plasticating process (theoretics book) [M]. Beijing: Science Press, 2005: 187—188. (in Chinese)

(上接第 251 页)

- [8] 陈锦祥, 倪庆清. 甲虫前翅中的三维复合材料结构[J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 6—66.
- Chen Jinxiang, Ni Qingqing. Three dimensional composite structures in the fore-wing of beetles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(6): 6—66. (in Chinese)
- [9] 陈锦祥, 倪庆清, 徐英莲. 甲虫前翅结构中的优化设计[J]. 复合材料学报, 2004, 21(5): 88—92.
- Chen Jinxiang, Ni Qingqing, Xu Yinglian. Optimum design in the structures of beetle forewings [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(5): 88—92. (in Chinese)
- [10] 陈锦祥, 倪庆清, 李庆. “蜂窝柱子”芯夹层轻量型仿生复合材料结构[J]. 复合材料学报, 2005, 22(2): 58—64.
- Chen Jinxiang, Ni Qingqing, Li Qing. Biomimetic light weight composite structure with honeycomb-trabecular [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(2): 58—64. (in Chinese)
- [11] Chen Jinxiang, Ni Qingqing, Xu Yinglian. Lightweight composite structures in the forewings of beetles [J]. Composite Structure, 2007(79): 331—337.
- [12] Chen Jinxiang, Dai Guangze, Xu Yinglian. Basic study of biomimetic composite materials in the forewing of beetle [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 483-484(15): 625-628.
- [13] Chen Jinxiang, Dai Guangze, Xu Yinglian. Optimal composite structures in the forewings of beetles [J]. Composite Structures, 2007(81): 432—437.
- [14] 杜星文, 宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Du Xingwen, Song Hongwei. Impact dynamic and crashworthiness design of cylindrical structures [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [15] Alexander J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading [J]. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960, 13: 1—9.
- [16] Guillow S R, Lu G, Grzebieta R H. Quasi static axial compression of thin-walled circular aluminum tubes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(9): 2103—2123.
- [17] El-Hage H, Mallick P K, Zamani N. A numerical study on the quasi-static axial crush characteristics of square aluminum-composite hybrid tubes [J]. Composite Structures, 2006, 73(4): 505—514.
- [18] Aare M. Prevention of head injuries [D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2003.