

# 基于熔体黏度均匀性的注塑螺杆性能评价方法

金 艳 何亚东 信春玲 周雅文 李庆春 吴大明\*

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 通过理论推导和实验验证,开发了一种简便易行的测量注塑过程中熔体黏度均匀性的方法,即通过高速采集和分析塑化熔体流经注塑机喷嘴处的压力波动来反映塑化熔体的黏度波动。通过对 4 根不同结构类型及参数的注塑螺杆进行实验,分析螺杆构型对熔体黏度波动的影响,及熔体黏度均匀性与熔体温度均匀性、制品的质量重复精度及力学性能的关系,验证了该方法的可行性,最后从熔体黏度均匀性方面对实验用 4 根螺杆性能予以评价。

**关键词:** 注塑螺杆; 熔体黏度均匀性; 性能评价

**中图分类号:** TQ315

## 引 言

近年来随着相关行业对注塑制品的要求日益提高,人们更加关注注塑技术的精密化。为了获得高质量的注塑制品,必须保证塑化熔体的均匀性,即温度、黏度、密度及组分的均匀性,因此注塑螺杆在塑化熔体质量方面的性能至关重要。

在研究熔体均匀性的过程中,前人在熔体温度均匀性方面做过许多工作,开发出测量熔体温度的多种方法。高福荣等<sup>[1-2]</sup>通过可视化方法对熔融机理及熔体温度均匀性进行了研究;Verbraak 等<sup>[3]</sup>从混合性能、温度均匀性及塑化能力多方面对注塑螺杆的性能予以研究,但由于条件所限,对于螺杆在熔体黏度均匀性方面的研究很少。随着流变学的发展,测量聚合物熔体黏度的方法越来越多,各种在线流变检测手段也日益应用于实际加工生产过程中,人们采用离线、并线或串线的方式,研制出多种用于在线测量的流变仪。Chiu 等<sup>[4]</sup>、Padmanabhan 等<sup>[5]</sup>分别研究了挤出机加工过程中聚合物的流变特性;Qin 等<sup>[6]</sup>研制了一种注射流变仪用于测试注塑过程中的聚合物气体混合体系的黏度。虽然测试方法越来越多,但这些测试方法在工程应用中受到很大限

制,直接测量熔体的流变行为过程相当复杂,不仅需另行购置价格较为昂贵的测试仪器,还需对现有设备进行改造,且通常会对生产过程产生影响。

从聚合物的流变曲线上可以看出,剪切速率和温度直接影响聚合物黏度,由于注塑成型具有间歇运动特性,同时螺杆轴向位移使螺杆的有效长度发生变化,同一批塑化熔体的热历程和剪切历程不同,导致黏度具有不均匀性。黏度波动过大会造成注塑工艺的不稳定,引起充模料流不稳定,密度不均,内应力过高及线收缩不对称等弊端,从而影响注塑制品的精度和降低生产效率,因此熔体黏度均匀性的研究具有重要意义。本文从工程实际出发,在无需对现有设备进行大的改造的情况下,提出了通过测量注塑机喷嘴处的压力波动来反映熔体黏度波动的方法,提出螺杆关于熔体黏度均匀性的评价方法,并通过对 4 根不同结构类型及参数的注塑螺杆进行实验及分析,验证了该方法的可行性及对螺杆性能进行评价。

## 1 实验部分

### 1.1 原料及设备

聚苯乙烯(PS),476 L,扬子巴斯夫苯乙烯系列有限公司;HTF120X2 型注塑机,宁波海天塑机集团有限公司;4 根螺杆直径均为 36 mm,螺杆类型及尺寸参数详见图 1 和表 1;实验室自行开发的基于 NI 高速采集卡的高速数据采集系统<sup>[7]</sup>,能够在线采集注塑机运行过程中温度、压力、转速等参数;KISTLER 的 4013A 型喷嘴压力传感器。

收稿日期: 2010-04-29

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2007BAF13B00/2008BAE59B04)

第一作者: 女,1976 年生,博士生

\* 通讯联系人

E-mail: wudaming@vip.163.com

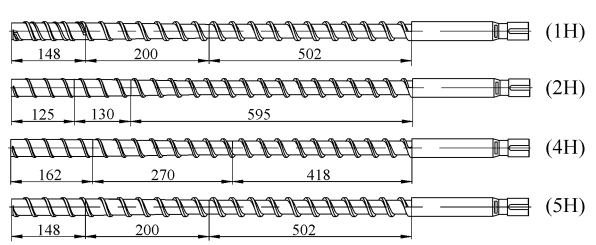


图 1 螺杆类型  
Fig. 1 Different types of screws

表 1 实验用螺杆参数

Table 1 Screw dimensions used for experiments

编号	类型	加料段槽深 $h_1/\text{mm}$	压缩比 $\varepsilon$	螺距 $S/\text{mm}$	螺棱宽 $E/\text{mm}$
1H	分离型	5.9	2.3	36	3.5
2H	突变型	5.6	2.8	36	3.5
4H	渐变型	5.85	2.29	36	3.6
5H	通用型	6.1	2.39	36	3.6

1H 螺杆计量段为双螺纹,副螺纹  $S=41.8\text{ mm}$ ,  $E=3\text{ mm}$ ,主副螺棱间隙  $\delta=0.8\text{ mm}$

1.2 检测原理

如图 2 所示,在喷嘴处安装一个喷嘴压力传感器,将塑化好的熔体在较低的注射速度条件下对空注射,即可在线测得喷嘴处的熔体压力。

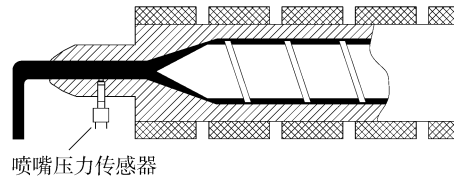


图 2 喷嘴压力传感器安装示意图  
Fig. 2 The location of nozzle pressure sensor

对于牛顿流体来说,任何流道的流率公式都可简写为<sup>[8]</sup>

$$Q=K_q\frac{\Delta p}{\eta}\tag{1}$$

式(1)中  $Q$  为体积流率,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $K_q$  为口模形状系数;  $\Delta p$  为口模两端压力降,  $\text{Pa}$ ;  $\eta$  为熔体黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

对圆孔流道的牛顿流体流动有

$$Q=\frac{\pi R^4\Delta p}{8L\eta}\Rightarrow\eta=\frac{\pi R^4}{8QL}\Delta p\tag{2}$$

对于幂律方程表示的假塑性流体,流率公式可写为

$$Q=K'_q\left(\frac{\Delta p}{\eta}\right)^z\tag{3}$$

对圆孔流道的幂律流体流动有

$$Q=\frac{\pi R^{z+3}}{(z+3)(2L)^z}\left(\frac{\Delta p}{\eta}\right)^z\Rightarrow\eta=\frac{1}{2L}\left[\frac{\pi R^{z+3}}{(z+3)Q}\right]^{\frac{1}{z}}\Delta p\tag{4}$$

对于一个确定的注射过程来说,在相同的储料量及注射速度下,  $Q$  为定值,由式(4)可以看出熔体黏度与喷嘴压力降呈线性关系。  $\Delta p$  为入口与出口的压差,由于实验采用对空注射,出口压力为大气压,因此熔体黏度与喷嘴处熔体压力的大小呈一一对应关系。

在评价熔体黏度均匀性时,本文实际上并不关注熔体黏度的确切大小,而只是希望通过获得压力的波动数据以表征熔体黏度的波动情况,因此可以由喷嘴压力的波动来表征熔体黏度的均匀性。

1.3 注塑机喷嘴处熔体压力的测量

本实验所采用的喷嘴直径为  $3\text{ mm}$ ,喷嘴处的加热温度为  $190\text{ }^\circ\text{C}$ ,预塑时喷嘴处于闭锁状态,将塑化好的熔体在较低的注射速度 ( $2\text{ mm/s}$ ) 及较低注射压力 ( $10\text{ MPa}$ ) 的条件下对空注射,待注塑机调试后处于稳定工作状态时,通过注塑机动态参数采集系统时测得喷嘴处的熔体压力,数据采集频率为  $100\text{ s}^{-1}$ 。

为消除工艺条件与环境因素对实验的影响,采用 DOE (design of experiment) 实验设计方法,实验所用的工艺条件及实验顺序如表 2 所示。

表 2 注塑工艺条件

Table 2 Injection process conditions

实验 顺序	螺杆转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	背压/ $\text{MPa}$	机筒温度/ $^\circ\text{C}$	储料长度/ $\text{mm}$
1	120	2	210	100
2	60	2	210	50
3	60	2	190	100
4	120	1	190	100
5	120	2	190	50
6	120	1	210	50
7	60	1	210	100
8	60	1	190	50

在所获取的实验数据中,计算出每组工艺条件下的注射过程中的喷嘴压力方差的算术平均值作为黏度波动的表征,压力方差数值低的代表熔体黏度波动小,即熔体黏度均匀性好。

## 2 结果与讨论

### 2.1 熔体黏度均匀性与熔体温度均匀性

在与测量喷嘴压力相同的工艺条件下,采用实验室自行研制的如图3所示的测温装置对前机筒储料室内不同位置的熔体温度进行测量,得到使用不同螺杆时熔体轴向温差及熔体径向温差。

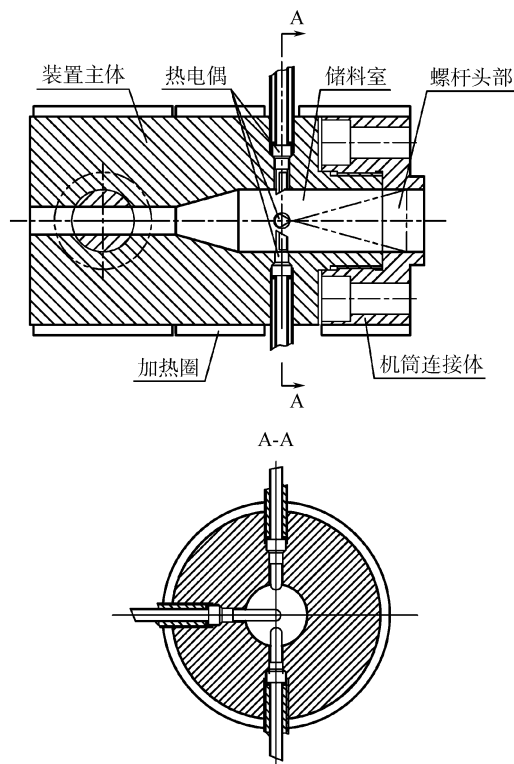


图3 测温装置示意图

Fig. 3 The schematic diagram of melt temperature measurement devices

由图4可以看出,熔体黏度均匀性与熔体温度均匀性具有相关性。从流变学的角度上来看,熔体黏度主要与剪切速率和熔体温度有关,熔体温度是影响熔体黏度的主要因素。由于注塑机间歇运动的特性,同一批注射的熔体热历程和剪切历程的不同,其温度和黏度都会有所不同。温度不均导致黏度不均,二者的变化趋势应是一致的。本实验的结果对此得以验证,而且从2个对比图中可以看出,不同螺杆所导致的熔体均匀性差别很大,仅就实验所用的4根螺杆,所测得的压力方差从0.499 MPa到0.883 MPa不等,其中1H螺杆和5H螺杆的压力方差较小,即所对应的熔体黏度均匀性较好,同时从实验结果上来看,这两根螺杆对应的熔体温度均匀性也较好。相比之下,2H螺杆和4H螺杆所致的熔体黏度

波动及熔体温差都较大,说明其塑化熔体质量均匀性较差。

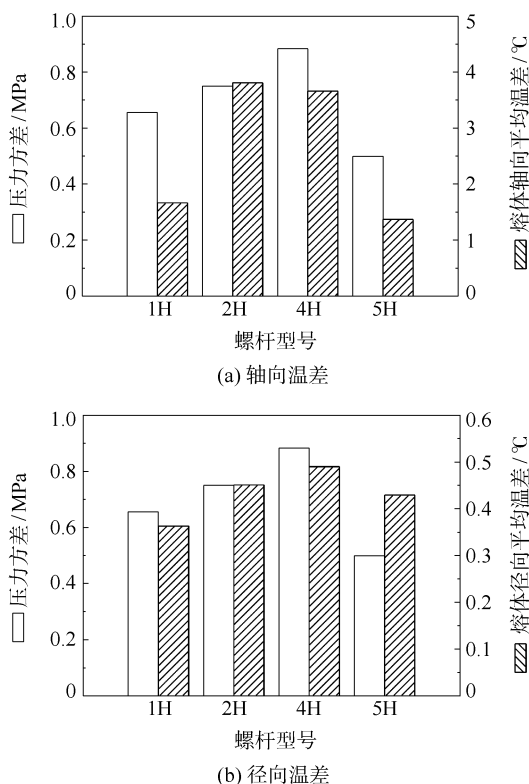


图4 不同螺杆的熔体黏度均匀性与熔体温度均匀性

Fig. 4 Melt viscosity homogeneity and temperature homogeneity for different screws

### 2.2 熔体黏度均匀性与质量重复精度

在与测量喷嘴压力相同的每组工艺条件下制备多个样品,对样品质量进行称量并按式(5)求得样品的质量重复精度

$$\delta_w = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}}{\bar{w}} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中, $\delta_w$ 为制品质量重复精度; $w_i$ 为第*i*个制品质量,g; $\bar{w}$ 为制品的平均质量,g; $n$ 为试验制品数量。数值越小代表则表示每个样品间的质量相差较小,即质量重复性好。

理论上讲,熔体黏度均匀性与质量重复精度具有相关性。黏度均匀性好,对应的质量重复性也好,反之,黏度均匀性差的质量重复性也较差。要想获得良好的质量重复性需保证每次的注射量是一致的,在体积一定的情况下,密度是影响质量的最主要因素。熔体黏度不均则引起充模料流不稳,导致密度不均,因此,为获取质量重复性好的制品,需保证

塑化熔体和黏度均匀。

图5所示的实验结果对二者之间的联系得以很好地验证。从图中的数据可以看出,1H螺杆和5H螺杆的黏度波动较小,其对应的制品质量重复性也较好,分别为0.033%和0.030%,2H螺杆和4H螺杆的黏度波动较大,其质量重复性也较差,其中4H螺杆的质量重复精度达0.042%。

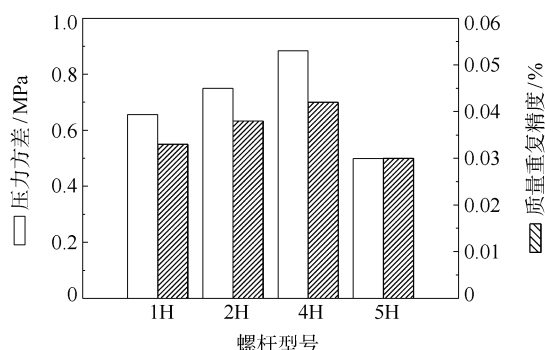


图5 不同螺杆的熔体黏度均匀性与质量重复精度

Fig.5 Melt viscosity homogeneity and repeating weight precision for different screws

### 2.3 熔体黏度均匀性与制品力学性能

对于注塑制品的内部质量,由于冲击强度主要由聚合物加工过程所形成的内应力(取向、温度、形变诱导)所决定的,故其冲击强度表现出更突出的各项异性,因此冲击强度可间接表示熔体的均匀性。在与测量喷嘴处熔体压力相同的工艺条件下,制得GB/T 1043.1—2008所规定的冲击试样,并按此标准进行冲击强度性能测试,以得到每根螺杆所对应的制品冲击性能。

从图6可以看出,熔体黏度均匀性与制品的力学性能具有相关性。塑化熔体黏度均匀性较好,对应冲击强度也较高;相反地,塑化熔体黏度均匀性较

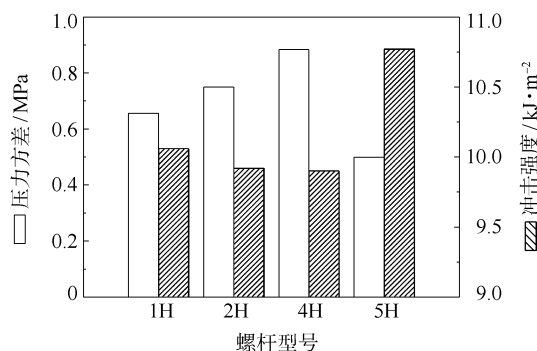


图6 不同螺杆的熔体黏度均匀性与制品冲击强度

Fig.6 Melt viscosity homogeneity and impact strength for different screws

差,对应的冲击强度也低。这是由于熔体黏度均匀,则充模时熔体流动性稳定,所制得的最终制品密度也均匀,内应力小,因此力学性能更为优良。在所研究的4根螺杆中,5H螺杆熔体黏度均匀性最好,其所得制品的冲击强度最高(10.77 kJ/m<sup>2</sup>),1H螺杆次之,2H螺杆和4H螺杆在熔体黏度均匀性方面较差,制品冲击强度也较差(分别为9.90 kJ/m<sup>2</sup>和9.92 kJ/m<sup>2</sup>)。

熔体黏度均匀性以及由此所引发的质量重复精度及制品力学性能与螺杆结构及参数密切相关。而且不仅从多方面证实了这种测量熔体黏度均匀性的方法是可行的,同时对于实验所用的4根螺杆在熔体黏度均匀性方面的性能可以据此进行评价。综合来看,加工PS时,在实验所用的4根螺杆中,1H螺杆和5H螺杆可获得较好的熔体均匀性,2H螺杆次之,4H螺杆的熔体均匀性最差。从螺杆结构上来看,1H螺杆和5H螺杆各段长度适宜,且1H螺杆的计量段为双螺纹结构,混合均化效果得以增强,因此塑化熔体均匀性更好;4H螺杆加料段较短,压缩段较长,理论上讲更适用于加工PS等无定型塑料,但因为实验螺杆的长径比( $L/D = 23.6$ )较大,这一优势在本实验中没有得以显现,2H螺杆计量段槽深较浅,从混合效果上来说,较小的槽深混炼程度高,熔体比较均匀,因此2H螺杆所得到的熔体均匀性反而要好于4H螺杆。

## 3 结论

(1)研究了一种由测量注塑机喷嘴压力波动来表征塑化熔体黏度均匀性的方法,在不需要对现有设备进行大的改动的情况下即可进行,并通过与温度均匀性、质量重复精度及力学性能的比较验证了其可行性,适用于工程实际且简便易行。

(2)螺杆构型对于熔体黏度均匀性有重要影响,最终与制品的温度均匀性、质量重复精度、力学性能密切相关。

(3)熔体黏度均匀性是衡量熔体质量的重要指标,此方法所得的熔体黏度均匀性可以作为螺杆性能评价体系中的一部分。

### 参考文献:

- [1] Gao F R, Jin Z M, Chen X. A visual barrel system for study of reciprocating screw injection molding[J]. Poly Eng and Sci, 2000, 40(6): 1334-1343.



- [2] 金志明, 朱复华, 高福荣. 注射成形中的熔体温度均匀性研究[J]. 中国塑料, 2003, 17(3): 88-91.  
Jin Z M, Zhu F H, Gao F R. Study on melt temperature homogeneity in injection molding[J]. China Plastics, 2003, 17(3): 88-91. (in Chinese)
- [3] Verbraak C P J M, Meijer H E H. Screw design in injection molding[J]. Poly Eng and Sci, 1989, 29(7): 479-487.
- [4] Chiu S H, Pong S H. Development of an on-line twin capillary rheometer[J]. Polymer Degradation and Stability, 1999, 64(2): 239-242.
- [5] Padmanabhan M, Bhattacharya M. In-line measurement of rheological properties of polymer melts[J]. Rheologica Acta, 1994, 33: 71-87.
- [6] Qin X, Thompson M R, Hrymak A N, et al. Rheology studies of polyethylene/chemical blowing agent solutions within an injection molding machine[J]. Poly Eng and Sci, 2005, 45(8): 1108-1118.
- [7] 陈清培. 基于虚拟仪器的注塑机性能参数测试系统研究[D]. 北京: 北京化工大学机电工程学院, 2009.  
Chen Q P. The study of performance parameters test system based on virtual instrument for plastic injection molding machine[D]. Beijing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] 朱复华. 挤出理论及应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.  
Zhu F H. Extrusion theory and application[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001. (in Chinese)

## Melt viscosity homogeneity for performance evaluation of injection molding screw

JIN Yan HE YaDong XIN ChunLing ZHOU YaWen LI QingChun WU DaMing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Through theoretical analysis and experimental verification, a simple method that measuring melt pressure fluctuation at the nozzle to reflect melt viscosity fluctuation in injection molding process was developed. The experiments for four injection screws and analysis for the relationships between melt viscosity homogeneity and screws configuration, melt temperature homogeneity, repeating weight precision and mechanical properties of the injection molding parts verified the feasibility of the method. At last, the four injection screws were evaluated based on melt viscosity homogeneity.

**Key words:** injection molding screw; melt viscosity homogeneity; performance evaluation