

单螺杆挤出机中熔体混合理论的研究^{*}

卿艳梅

周南桥 彭响方

(华南农业大学工程技术学院,广州 510640) (华南理工大学聚合物新型成型装备国家工程研究中心,广州 510640)

摘要 综述采用不同的函数对单螺杆挤出机中熔体混合过程进行描述的研究情况和新的混沌混合的研究进展,以及近几年来利用可视化和可视化技术对聚合物材料在挤出过程中的行为所作的观测和分析研究。指出在新型电磁动态塑化挤出机中,引入挤出加工全过程的振动力场,对熔体的混合起到了较好的促进作用。

关键词 单螺杆挤出机 熔体 混合

在聚合物加工的所有过程中都在不同程度地进行混合,混合是制品生产工艺的必要步骤,且在很大程度上影响着制品的使用性能。普通单螺杆挤出机中的混合主要是指聚合物熔体的层流混合,通过层流使物料变形,即通过层流剪切来达到使熔体各组分细化及分布均匀的目的。

1 混合机理的研究

不同的研究者采用不同的函数对单螺杆挤出机中的混合过程进行描述,对挤出机内混合理论的研究主要集中在停留时间的分布(RTD)、总的剪切变形、加权平均总变形(WATS)、条纹厚度的变化,以及界面面积的变化等方面。

R. S. Spencer 等^[1]指出,高粘度液体的混合必须依靠某种连续的变形来完成,即增加两组分的界面面积,并使界面在物料整个体积上细分,因此用界面面积的增加来定量度量层流混合。他们虽指出混合可用界面面积的增加来度量,但并没有对粘性流体混合机理作出分析。

W. D. Mohr 等^[2,3]认为,层流混合时其混合度的大小依赖于材料剪切量的大小,剪切量对条纹厚度的影响最为重要,因此在考虑了两相粘度影响的基础上把条纹厚度作为混合度的度量。他们首先将所研究的层流混合理论应用于单螺杆挤出机中的混合研究,分析了流场中多个流线中流元的剪切量。结果认为,减小螺旋角,增加压力流与拖曳流的比率,增加螺紋深度,混合效果将增加。

G. Lidor 及 Z. Tadmor 等^[4,5]则认为,在层流混合变量中,总应变是一个关键变量,并且在连续混合器中,每个流体质点走不同的路径,存在不同的停留时间。因此,为了定量描述混合的质量,必须用应变分布函数和停留时间分布函数来综合描述单螺杆的混合。Z. Tadmor 等^[5]还考察了 R. S. Spencer 等的理论而推导出在简单剪切流场下的表达式,见(1)

式:

$$\frac{A}{A_0} = (1 - 2\cos\alpha\cos\alpha\gamma + \cos^2\alpha\gamma^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中: A ——最终界面面积;

A_0 ——初始界面面积;

γ ——总应变;

α ——在 x 方向上初始表面法线的方向;

α ——在 y 方向上初始表面法线的方向。

而后,他们进一步考察了一些初始表面积为 A_0 的相等微元在三维空间组成的无规取向向量群 C , 导出了界面的平均变化,见(2)式:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\gamma}{2} \quad (2)$$

即在简单剪切流动中,以大应变无规取向的表面系统,总的最终界面面积与总的初始面积之比与施加到液体上的总应变值的一半相等。

值得指出的是,Z. Tadmor 提出了层流混合中的“反混合”现象,使后来的研究工作者对这一现象非常重视。L. Erwin 等^[6]将混合问题按主方向推导了均匀流场的表达式。

T. M. Ottion 等^[7~9]认为,混合参数的分布与流场的非均匀性及输入界面条纹的厚度与方向有关,直接推导出线拉伸率 λ 、表面变形率 η 与变形张量 D 的关系,使得混合表征直接与运动参数联系起来,见(3)式、(4)式:

$$\frac{\lambda}{\lambda} = D \cdot \hat{n} \hat{n} \quad (3)$$

$$\frac{\eta}{\eta} = \text{div} V - D \cdot \hat{n} \hat{n} \quad (4)$$

式中: λ ——线拉伸率;

^{*} 国家自然科学基金资助项目(29904001)、广东省自然科学基金资助项目(20003013, 994234)

收稿日期:2002-09-06

λ ——线拉伸长度;

D ——变形张量;

$\hat{m}$ ——线元的单位方向矢量;

η ——表面变形率;

η ——表面变形面积;

V ——速度矢量;

$\hat{n}$ ——面元的单位方向矢量。

T. H. Kwon 等^[10] 则直接基于 Green 形变张量, 根据 Green 张量提出“变形参数”(DC) 作为一种新的测量螺杆挤出加工过程变形的办法。与 W. D. Mohr 和 Z. Tadmor 等以前提出的应力测量方法相比, 这种新的 DC 法更系统地反映出分层现象与螺杆转动而进行的三维流动之间的关系。而且, DC 法提出了用“重量平均变形特性”(WADC) 来表示所有的变形参数, 这是一种测量挤出加工过程中混合好坏的方法。他们的模型把螺杆的三维流动及螺棱的影响考虑进去, DC 随着原料在螺杆流道中位置的改变而变化。同 WATS 相应, WADC 取决于挤出过程中的各个变形特性, 是停留时间的函数。作者导出了 Green 张量 C , 并取 $C_{22} - 1$ 作为一个循环的应变无因次量, 见 (5) 式、(6) 式:

$$DC = \frac{T_d}{T_{cir}} C_{22} - 1 \quad (5)$$

$$WADC = \int_{T_0}^{\infty} DC \cdot f(T) dT \quad (6)$$

式中: T_d ——停留时间;

T_{cir} ——循环时间;

$\frac{T_d}{T_{cir}}$ ——物料出口模前循环的次数;

C_{22} ——螺槽深度方向上物料矢量拉伸比(变形长度与原长度之比)的二次幂;

$f(T) dT$ ——停留时间分布函数。

综上所述, 对混合的表征是以变形及导致变形的综合因素来表达的, 它总是与导致变形的剪切、运动参数及能量联系起来, 要定义一个更合乎规律的混合表征, 必须把这三方面综合起来考虑。

2 新的混沌混合

自 20 世纪 80 年代以来, 出现了混沌混合的新概念^[11~13]。流动系统符合混沌混合的条件是:

(1) 流场中具有正的 Liapunov 指数。它表明无论流体粒子最初结合得如何紧密也能够分开。

(2) 出现同导点或异导点(同一双曲线流出和流入的交点称为同导点, 而不同双曲线流线的交点

叫异导点)。

(3) 出现 Smale 马鞍函数。二维稳态流是不会出现混沌混合的, 如果流场是周期性变化的, 并出现拉伸和折叠流来完成有效混合, 则这个过程被 Smale 称为马鞍图案, 这是混沌流的特点之一。

由于混沌混合存在独特之处, 因此文献[12] 建议将其用于螺杆流场, 这对提高混合质量、提高混合混炼元件的效果是有益的。

近几年来, S. J. Kim 等^[14,15] 设计了新型混沌螺杆。其主要设计思想是在计量段的螺槽中周期性插入混炼元件, 打破常规稳态流场, 以引起混沌流。S. J. Kim 和 W. R. Hwang 等^[15~19] 利用自行设计的新型混沌螺杆对计量段熔体混合效果进行了研究, 提出了一种有代表性的新混沌混合方法, 并通过实验和数值模拟方法研究了在单螺杆挤出机中采用混沌螺杆后的混合效果, 发现这种混沌混合远优于普通单螺杆挤出机中的混合。

3 新的研究手段

为了更好地研究挤出机中熔体混合情况, 人们采用了新的研究手段, 利用可视化和可视化技术, 即运用现代测试手段(如高速摄影、同步录像及超声波等)将具有可视结构装置体系内物体所发生的变化以图像或数据记录下来。朱复华和陈自卫等^[20,21] 研制了具有多种测试仪、能在工业条件下运行的全程透明视窗螺杆挤出机, 借助可视化技术对聚合物材料在挤出过程的行为作了较深入的观测研究和系统分析, 其结果为揭示挤出机理、推进可视化技术在聚合物加工理论研究中的应用起到了促进作用。

罗荣森等^[22] 借助具有可视性的挤出设备对几种常用的新型螺杆的挤出动力学行为特征作了实验研究。在实验方法上充分利用了挤出过程可视这一特点, 观察和记录了不同螺杆元件中物料的挤出输送动力学行为。

这些可视化技术大多是对流场外表面的可视性, 未能解决流场的三维可视描述, 但通过观察得到的结果将有助于新型螺杆挤出机理的深入研究及对新型螺杆元件进行进一步的结构优化。

4 新型电磁动态塑化挤出机的混合研究

聚合物动态成型加工是正在迅速发展的新技术。华南理工大学瞿金平教授^[23] 发明的电磁动态塑化挤出机利用机电磁一体化聚合物动态成型技术实现了将振动力场引入到聚合物挤出加工的全过

程,从而完成物料的输送、塑化、挤出成型。

笔者采用修正的 Tanner 本构方程对电磁动态单螺杆挤出机中熔体流场进行了近似理论分析^[24],最后导出横螺槽方向的速度分布(忽略漏流的影响),见(7)式:

$$v_x = \pi D N \sin \theta (1 + A_{ax} \cos \omega t) (3 \xi - 2 \xi^2) \quad (7)$$

式中: v_x ——横螺槽方向速度分布;

D ——螺杆直径;

N ——螺杆转速;

θ ——螺槽螺旋升角;

A_{ax} ——螺杆轴向振动在横螺槽方向的振动强度系数。

ω ——振动圆频率;

t ——时间变量;

ξ —— $\frac{y}{H}$, H ——螺槽深度, y ——螺槽深度方向的坐标;

通过分析发现引入振动力场后,横流(与螺槽方向相垂直的流动)的速度场发生了明显变化,随着振动频率或振幅的增加,流速增加,剪切混合增强。横螺槽方向速度在槽深方向的分布见图1、图2。横流使物料在螺槽内产生翻转运动,对熔体的混合起着关键的作用,它能促进物料的混合、搅拌和热交换,因此振动力场有利于物料的均化和塑化,对熔体的混合起到较好的促进作用。

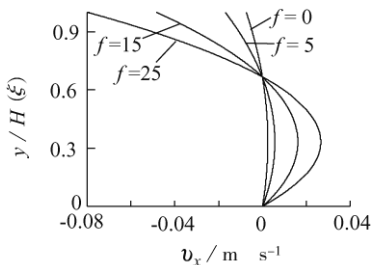


图1 不同振动频率下横螺槽方向速度在槽深方向的分布图

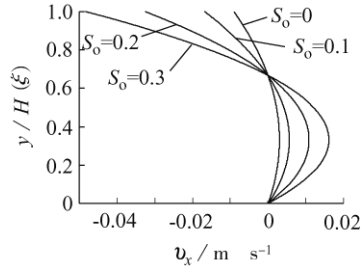
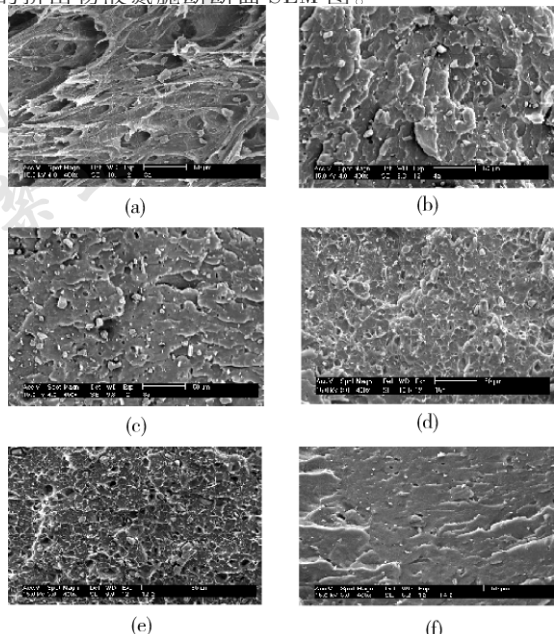


图2 不同振幅下横螺槽方向速度在槽深方向的分布图

笔者在自行设计的剖分式挤压系统塑料电磁动态塑化挤出机试验样机上进行试验研究^[24],在机器正常运转时,突然停机并对料筒、螺杆进行急冷,使

物料迅速凝固并能较好地保持物料在螺杆料筒中的物态变化状况,然后打开剖分料筒,实现对挤出过程中计量段沿程物料变化行为的观测,从而对振动力场作用下聚合物熔体混合效果进行分析探讨。通过进行稳态挤出(未加振动)和动态挤出(施加振动)加工试验来研究振动力场作用下熔体的混合变化情况及其混合机理。图3为稳态挤出、动态挤出1(振动频率 $f_1 = 5$ Hz, 振幅 $S_1 = 0.1$ mm)和动态挤出2(振动频率 $f_2 = 20$ Hz, 振幅 $S_2 = 0.1$ mm)三种工况下螺槽中的物料和挤出物的 SEM 图。其中图3a、图3c、图3e分别为稳态挤出、动态挤出1及动态挤出2时同螺槽中的物料液氮脆断断面 SEM 图;图3b、图3d、图3f分别为稳态挤出、动态挤出1及动态挤出2时的挤出物液氮脆断断面 SEM 图。



a,b—稳态挤出; c,d—动态挤出1; e,f—动态挤出2

图3 三种工况下螺槽中相应位置的物料和挤出物的 SEM 图

通过对低密度聚乙烯(LDPE)/CaCO₃填充体系计量段沿程物料的液氮脆断断面 SEM 图中分散相 CaCO₃粒子的分散及其分布的分析,发现 CaCO₃粒子沿螺槽方向的分散分布性逐渐变好;且在一定频率范围内,CaCO₃粒子的分散分布混合性随着振动频率的增大而变好^[24]。这说明螺杆作一定强度的振动后,加强了 CaCO₃在熔体中扩散和分散作用,提高了 CaCO₃填充体系的混合性能。虽然目前暂时仍未得出振动力场对物料体系混合作用机理的完整理论描述,但是可以看出振动力场对填充体系的混合作用的强化是显著的。

由于振动力场的引入, 加速和加强了大分子链段的扩散和运动, 减小和疏解了大分子链及链段之间的相互缠结。这样使得分子解缠、取向容易, 分子间容易滑移, 有效地减小了物料流动的阻力, 混合混炼被加强、加快。

当对 LDPE/CaCO₃ 熔体施加一定频率范围的振动力场后, 由瞬时压力势场导致的周期性策动力会产生瞬时冲量作用于 CaCO₃ 粒子, 这对 LDPE/CaCO₃ 熔体将产生一定的影响, 使得熔体的粘性下降, 促进了 LDPE/CaCO₃ 填充体系的混合性能。在振动力场作用下, 螺杆对熔体施加周向、轴向往复剪切, 因此不难推测, 熔体将产生混沌混合, 提高了螺杆的混合效果。

5 结语

近年来, 研究者们采用不同理论分析方法对单螺杆挤出机内高聚物熔体的混合机理进行了大量研究, 并不断出现了新的混合理论和新的研究手段, 这些都有助于挤出混合机理的进一步深入研究。

参考文献

- 1 Spencer R S, Wiley R M. The mixing of very viscous fluids. *J of Colloid Sci*, 1951(6):133
- 2 Mohr W D, Saxton R L, Jepson C H. Mixing in laminar flow systems. *Ind Eng Chem*, 1957, 49(12):1855
- 3 Mohr W D, Saxton R L, Jepson C H. Theory of mixing in the single-screw extruder. *Ind Eng Chem*, 1957, 49(12):1857
- 4 Lidor G, Tadmor Z. Theoretical analysis of residence time distribution functions and strain distribution functions in plasticating extruders. *Polym Eng Sic*, 1976, 16:450
- 5 Tadmor Z, Gogos C G. *Principle of Polymer Processing*. New York: Wiley, 1979.
- 6 Erwin L. Theory of laminar mixing. *Polym Eng Sci*, 1978, 18:1044
- 7 Ottino J M, Ranz W E, Macosko C W. A laminar model for analysis of liquid-liquid mixing. *Chem Eng Sci*, 1979, 34:877
- 8 Ottino J M, Ranz W E, Macosko C W. A framework for description of mechanical mixing of fluids. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 1981, 27:565
- 9 Ottino J M, Chella R. Laminar mixing of polymer liquids: a brief review and recent theoretical developments. *Polym Eng Sci*, 1983, 23(7):357
- 10 Kwon T H, Joo J W, Kim S J. Kinematics and deformation characteristics as a mixing measure in the screw extrusion process. *Polym Eng Sci*, 1994, 34:174
- 11 Chien W L, Rising H, Ottino J M. Laminar mixing and chaotic mixing in several cavity flows. *J Fluid Mech*, 1986, 170:355
- 12 Rauwendall C. *Mixing in Polymer Processing*. New York: Marcel Dekker, 1991.
- 13 Arfe H. Stirring by chaotic advection. *J Fluid Mech*, 1984, 143:1
- 14 Kim S J, Kwon T H. Enhancement of mixing performance of single-screw extrusion processes via chaotic flows: part I. basic concepts and experimental study. *Advances in Polym Tech*, 1996, 15(1):41
- 15 Lee T H, Kwon T H. A new representative measure of chaotic mixing in a chaos single-screw extruder. *Advances in Polym Tech*, 1999, 18(1):53
- 16 Kim S J, Kwon T H. Enhancement of mixing performance of single-screw extrusion processes via chaotic flows: part II. numerical study. *Advances in Polym Tech*, 1996, 15(1):55
- 17 Kim S J, Kwon T H. Measures of mixing for extrusion by averaging concepts. *Polym Eng Sci*, 1996, 36(11):1466
- 18 Kim S J, Kwon T H. Accurate determination of a deformation measure in the screw extrusion process. *Polym Eng Sci*, 1996, 36(11):1454
- 19 Hwang W R, Kwon T H. Dynamical modeling of chaos single-screw extruder and its three-dimensional numerical analysis. *Polym Eng Sci*, 2000, 40(3):702
- 20 朱复华, 刘延华, 郭奕崇, 等. 同向旋转双螺杆挤出可视化研究. *塑料*, 1996, 25(4):9
- 21 陈自卫, 王克坚, 刘延华, 等. 全程视窗双螺杆挤出实验机. *塑料科技*, 1995(1):30
- 22 罗荣森, 刘延华. 新型螺杆元件挤出动力学特征的实验研究. *塑料*, 1998, 27(5):7
- 23 瞿金平. 聚合物挤出成型的新方法与新设备. *中国塑料*, 1997, 11(3):69
- 24 卿艳梅. 振动力场作用下熔体混合的理论与实验研究: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2001.

STUDY ON THE MELT MIXING THEORY OF SINGLE SCREW EXTRUDER

Qing Yanmei

(Institute of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

Zhou Nanqiao, Peng Xiangfang

(National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

ABSTRACT The description of the melt mixing process of single-screw extruder with different functions and the new chaos mixing were summarized. Observation and analysis of the change of the polymer material when extruder with vision and vision technology in recently several years were introduced too. The vibration force field introduced into the whole extrusion process plays a positive role in the melt mixing in the novel electromagnetic dynamic plasticating extruder.

KEYWORDS single screw extruder, melt, mixing