

文章编号 :1671 - 683X(2002)04 - 0021 - 05

# 混沌控制与振动对聚合物熔体的作用

孙利民,申长雨

( 郑州大学橡塑模具国家工程研究中心,河南 郑州 450002 )

**摘 要:**介绍了振动技术在聚合物成型过程中的应用进展和混沌的基本概念及混沌控制的方法,指出高分子的聚集态是一种混沌态,聚合物状态的转变过程是混沌运动,高分子熔体破裂现象是混沌运动的一种表现形式,聚合物的成型过程是一种复杂的混沌运动,振动波的存在,控制和干扰了聚合物熔体流动的混沌性和粘弹性的混沌性,聚合物熔体在振动波作用下运动状态的研究,需要通过混沌理论与实际试验结果相结合来进行。

**关键词:**聚合物熔体;成型;振动技术;混沌运动;混沌控制

**中图分类号:**TQ 320.66 **文献标识码:**A

在聚合物成型过程中,振动技术的应用愈来愈引起广泛的关注,也获得了许多令人欣慰的成果。这些成果基本上可以分为两种类型,第一种是借助流变仪进行研究,即在流变的毛细管上的剪切流上叠加平行振动或垂直振动,得到的结论是随着所叠加的振动频率增加和振幅的增加,呈现出聚合物熔体的动态黏度和储能模量降低及挤出胀大减小的现象,这方面的文献可见 Isayav<sup>[1]</sup>, Tanner<sup>[2]</sup>和 Simmons, Fridman<sup>[3]</sup>, 彭响方<sup>[4]</sup>等人的论文。第二种是直接成型设备上施加振动的研究, Fridman 等在挤出机头上安装振动装置;瞿金平<sup>[5,6]</sup>发明了电磁动态塑化挤出机;申开智<sup>[7]</sup>等对注射成型动态保压进行了研究;王喜顺、彭玉成<sup>[8]</sup>则进行了螺杆振动注射成型的方法研究。这些研究结果基本上一致的,即振动力场使熔体的表观黏度降低,模头压力降低,挤出胀大减小,所成型塑件的力学性能明显提高。但是,这些研究基本上是以实验研究为主,只能定性地给出振动力场减少熔体黏度与弹性的作用,而理论研究集中于聚合物熔体的稳态粘弹性行为。这些结果与在聚合物成型加工中全面推广振动技术的目的还有一段距离。本文试图采用混沌学的思维方法,从混沌控制理论出发,解释振动波对聚合物熔体的作用机理,为塑料成型的质量控制探索出一条新路。

## 1 聚合物成型过程与混沌运动

### 1.1 聚合物的材料性质及成型过程的非线性现象

人类对高分子科学的知识从点滴的感性认识到分门别类、自成体系的学科的建立,经历了漫长的过程。作为一门近代科学,高分子科学是发展比较迅速的综合性学科。其中,关于聚合物最突出特征的粘弹性的研究是最受关注的高分子科学的问题之一。从哲学的意义上讲,聚合物的粘弹性是粘性与弹性辩证统一的结果,它是两个线性过程,是牛顿粘性与虎克弹性相互作用而形成的典型的非线性现象,无论在理论上还是在实验上都是一个极为复杂的研究课题,特别是目前还不能用简单的力学模型去精确地描述聚合物的各种粘弹行为<sup>[9]</sup>。聚合物熔体挤出过程中,流速振荡和挤出胀大都是聚合物粘弹行为的复杂的非线性特征,所以,利用简单的方程去描述聚合物的成型过程如挤出、注射、铸造、压延是不可能的。

### 1.2 关于混沌的概念

现代科学一般给混沌的定义是指确定性系统中出现的貌似不规则的有序运动,实际上是一种混沌序。现在混沌可以初步理解为,在一个非线性动力学系统中,随着非线性的加强,系统所出现的不规则的有序现象。这些现象可以通过对初值的

收稿日期 2002 - 07 - 30 ;修订日期 2002 - 09 - 02

基金项目 国家自然科学基金重点资助项目(19632004)

作者简介 孙利民(1956 - )男,河南省开封市人,郑州大学教授,博士研究生,主要从事塑料成型技术方面的研究。

敏感依赖性、奇异(混沌)吸引子、费根鲍姆常数、分数维、遍历性等来表征<sup>[10]</sup>。混沌的出现从根本上打破了人类长期形成的片面的固定思维方式,丰富了科学的方法论。

混沌理论认为世界的本质是非线性的,而线性是非线性的特例。混沌现象是非线性系统的一种典型现象,它的最大特点是对初始条件具有极大的敏感性,它给人的印象是混乱和不稳定。但混沌并非混乱,它作为一个科学概念,并不等同于概率意义上的随机,看似混乱无规则的现象里存在有序,而公认有序的决定性系统里又存在着混沌。钱学森曾说过,在一个层次的混沌是紧接上一个层次有序的基础,没有混沌就死水一潭<sup>[11]</sup>。

混沌的类型,从控制与应用研究的角度,一般分为四大类:时间混沌、空间混沌、时空混沌、功能混沌。若从理论物理的角度,则分为耗散系统的混沌、保守系统的混沌与量子系统的混沌。耗散与保守系统的混沌又统称经典混沌,一般讨论都是针对这类混沌。实际系统中发生的混沌大多数都属于耗散系统。

### 1.3 聚合物的聚集态是一种混沌态

混沌理论认为,在物质系统的各个层次之间存在着奇异性,并不存在从微观层次到宏观层次的连续过渡。高分子体系的各结构层次的复杂性尤其如此。高分子的一次结构(分子结构)具有多样性;二次结构(构象)具有随机性;三次结构(聚集态结构)具有不均匀性和无规则性。聚合物分子聚集态的主导概念是有序与无序共存<sup>[12]</sup>。确定性系统里存在混乱,无规则的混乱现象里又包含着有序,这正是混沌的基本概念。聚合物聚集态的基本理论是基于概率统计的。概率统计论认为,受许多偶然因素的影响,系统的未来状态并不完全确定,从而需要用概率统计方法来描述,而混沌学的KAM理论认为,确定性定律和概率统计论分别是混沌运动的两个近似。当混沌运动不显著时,可用确定性定律来描述;当混沌运动很大时,就用概率统计论来描述。所以,高分子的分子模型在某种意义上讲,就是一个混沌模型。聚合物的粘弹性质的物质基础是其高分子聚集态,而高分子聚集态的分子运动是混沌的,由结构与性能的关系可知,聚合物的粘弹性隐埋着混沌的要素。

### 1.4 聚合物状态的转变过程是混沌运动

聚合物在一定的条件下呈现出玻璃态、高弹态(又称橡胶态)和粘流态。这三种状态在各自的温度或时间或速率范围内发生变化时,其状态可

保持不变,但当超过一定界限时,就会出现玻璃化转变区或粘流转变区,使状态之间发生过渡与转变。聚合物的成型过程就是两种转变的一个循环。所谓橡胶态转变和粘流态转变,是指聚合物从玻璃态到高弹态再到粘流态的过渡与转换。本质上这三种状态之间的分子运动都是无序的,都是热力学意义上的液态,只是物理状态不同而已。玻璃态表现为坚硬的玻璃状,高弹态表现为柔软的橡胶状,粘流态表现为粘性流体。当聚合物由玻璃态向高弹态转变再向粘流态转变时,可理解为高分子分子链由冻结状态解冻为自由舒展状态再解冻成自由运动状态。反之,高分子的长链则是从自由运动状态转化为就地冻结状态。

由于聚合物的分子量是一个分布量,也就是链的长短不完全一样;另外,在同一分子链中,各个链段也未必完全相同,可能有不同的构型和构象,且链段的长度也是随机变动的,即使链段完全相同,也可能处于不同的能量状态。分子与分子之间的关系则更加复杂,除了可能有偶极、氢键等因素外,还可能有缠结、物理交联等因素。这样,研究的对象虽然是同一种聚合物,实际上却是许多结构不同的分子的混合物,而这种混合物的组成又随外界条件、经历的历史以及许多因素而有变化。所以聚合物状态的转变过程,实质上是聚合物内部分子的一种随机性热运动,是难以准确测定玻璃化转变区或粘流转变区转变温度的。所以,聚合物的成型过程是一个混沌过程。

### 1.5 聚合物熔体破裂现象是混沌运动的一种表现

聚合物的熔体破裂现象,是聚合物粘弹性的一种典型现象,也是一种突出的混沌表现。所谓“熔体破裂”,是聚合物熔体在挤出时,如果剪切速率过大而超过某一极限值时,挤出物表面变得不平滑,呈波浪状、鲨鱼皮状、竹节状、螺旋状,出现挤出物扭曲甚至碎裂成段的现象<sup>[13]</sup>。这一系列现象从流体力学的角度称为不稳定流动或弹性湍流。对这种现象的一种典型解释是,由于管壁处的剪切速率很高,且流体的粘度又具有敏感的剪切速率依赖性,致使管壁处的高剪切速率流体具有很低的表观粘度。另外,伴随流动出现的分级效应会使更多的低分子量分子集中在管壁附近,因此使熔体容易沿管壁发生整体滑移。当低于某临界切应力时,滑移速度是切应力的单值函数,其变化是均衡的,流动也是稳定的。超过这一临界切应力后,滑移速度不再是切应力的单值函数,它可能有

多个不同的值.此时,流道横截面上各点的速度不再对称,熔体呈现不稳定的弹性湍流.

湍流运动是自然界最为广泛的一种流动状态.如果对湍流给出一个比较确切的定义,则可以说湍流是对空间不规则和对时间无次序的一种流体运动.因此,根据混沌的含义,在流体力学的范围内,湍流和混沌应该可以认为具有同样的含义<sup>[14]</sup>.因为,聚合物熔体在剪切速率不断增加时,挤出物由光滑状态(稳定流动)变为粗糙状态(不稳定流动)继而又分别出现光滑状态和破裂状态的现象正是高分子熔体稳定流动与不稳定流动对

立统一、相互转化的结果. J. D. Shore, D. Ronis 等<sup>[15]</sup>在 1996 年对高分子熔体进行了流动试验,分析了高分子熔体泊肃叶流动(Poiseuille flow)的滑动黏附动力学和混沌现象.图 1 表示了在两面之间熔体滑移长度的功率谱和庞加莱(Poincare)图,可以看到随着流道中熔体流速的增加,熔体相对流道滑动功率谱逐渐变得连续,成为混沌状态.

对高分子熔体弹性湍流的解释有多种,而将弹性湍流与混沌联系起来,就显得不难理解了,运用混沌来解释弹性湍流可以反映其本来面目.

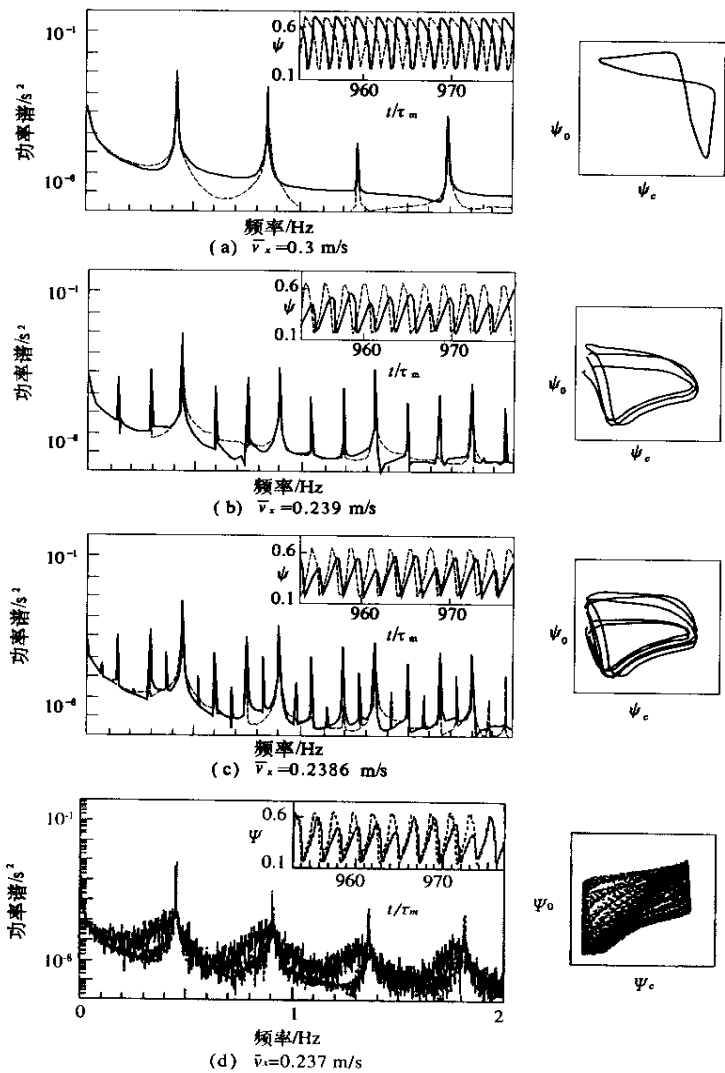


图 1 在两面平面之间熔体滑移长度的功率谱和庞加莱图

Fig.1 Power spectra and Poincare maps for the slipping lengths at the top and bottom plates in polymer-melt Poiseuille flow

## 2 振动作用与混沌控制理论

混沌现象包含其极丰富的信息,诸如各种周期与非周期态、混沌奇异吸引子等,于是混沌控制的研究,成了举世瞩目的重大课题,并取得了许多突破性进展。控制混沌的含义非常广泛,具体而言,控制混沌有几方面含义,其一是抑制问题,消除系统的混沌运动而无需考虑所得到运动的具体形式;其二是引导问题,在相空间中将混沌轨线引入事先指定的点或周期性轨道的确定的小领域内;其三是跟踪问题,通过施加控制使受控系统达到事先给定的周期性动力学行为,其特殊而重要的情形是镇定问题,使稠密嵌入相空间中混沌吸引子内的无穷多不稳定周期轨道之一稳定化。抑制问题含义最为广泛,只需消除系统的混沌状态;引导问题往往只是实施控制的准备,跟踪问题含意最为严格,受控系统以事先确定的周期和幅值运动,其特例镇定问题中跟踪目标受原系统方程的约束。因此,狭义的控制混沌问题只包括跟踪问题,尤其是镇定问题。混沌控制的研究成果大多集中在物理学的电与光方面,但其它领域也有很多混沌控制的应用。在聚合物成型过程中振动技术的应用,就是研究者是自觉不自觉地运用了混沌和混沌控制的方法。

在混沌振动控制中,合适幅值与频率谐波的施加,可将哈密顿系统振动的混沌轨道分别控制在周期、准周期及指定混沌轨道上<sup>[16]</sup>;利用施加脉冲来控制混沌 Lorenz 系统,可使混沌系统稳定在不同的目标点或不同周期的轨道上<sup>[17]</sup>;在流体力学的研究中,针对混沌在流体中的表现形式湍流,人们已经应用壁面加肋条和壁面振动等措施进行湍流边界减阻控制,取得了良好的效果<sup>[18]</sup>。因此可以认为:将振动波引入到高分子成型加工过程中,能够改变聚合物熔体的流变的混沌状态。在振动波的作用下,温度、压力、振动的频率和振幅都能控制聚合物熔体的混沌的粘弹特性,从表面上看,振动波加速和加强了高分子链段的扩散和运动,减小了高分子链及链段之间的相互缠结,使高分子解缠、取向容易;周期性脉动剪切力产生大量的耗散热,宏观上表现为聚合物熔体的粘度减小,熔体的流动性增加,流率增大;同时,振动波也使聚合物熔体的弹性减小,制品的物理机械性能得以提高。从混沌控制理论分析,振动波的存在,控制和干扰了高分子熔体流动的混沌性和粘弹性的混沌性,使其稠密嵌入相空间中混沌吸引

子内的无穷多不稳定周期轨道部分稳定化,将它们的混沌轨线引入人们所期望的轨道所确定的领域之内。

## 3 结束语

根据前面的分析,在聚合物成型过程中,其熔体的粘弹性和流动过程是一个很复杂的混沌运动。在聚合物成型过程中应用振动技术,并取得大量可喜成果,使制品质量得以提高,是研究者是自觉不自觉地运用了混沌理论和混沌控制的方法。但是,这些成果基本上是试验观测数据,虽非常重要,但由于高分子熔体的结构的多分散性、分子运动的多重性、聚集态的多样性等,都决定了高分子成型过程这个非线性系统的研究仅靠试验和定性研究是不行的。现在必需通过探索复杂性的混沌理论与试验结果相结合来分析高分子熔体在振动波作用下混沌运动状态,为振动技术在聚合物成型过程中的应用研究进一步发展找出突破口。聚合物作为一种现代高技术材料,在满足越来越苛刻的应用要求时,其成型技术也变得愈来愈复杂,混沌控制理论将在其中发挥更大作用。

## 参考文献:

- [1] ISAYAV A I, WONG, C M, ZENG X. Flow of thermoplastics in dies with oscillating boundary[A]. Soc of Plastics Engineers. USA Annual Technical Conference - Society of Plastics Engineers[C]. Rookfield Center: Soc of plastics Engineers, 1987.
- [2] TANNER R I. Stresses in dilute solutions of bead - nonlinear - spring macromolecules em dash, Unsteady flows and approximate constitutive relations[J]. Transactions of the Society of Rheology, 1975, 19(1): 37 - 65.
- [3] FRIDMAN M L. Rheology of thermoplastics under conditions of spiral flow and vibrations on extrusion[J]. Polymer Engineering and Science, 1981, 21(12): 755 - 767.
- [4] 彭响方, 瞿金平. 聚合物动态成型技术的研究及进展[J]. 高分子材料科学与工程, 1999, 15(5): 8 - 12.
- [5] 瞿金平. 电磁动态注塑机[P]. 中国专利: 90101034, 1990 - 08 - 22.
- [6] 瞿金平. 电磁式聚合物动态注射成型方法及装置[P]. 中国专利: 96108387, 1997 - 02 - 05.
- [7] 申开智, 官青, 吉继亮, 等. 动态保压注射成型技术研究[J]. 工程塑料应用, 1995, 23(1): 12.
- [8] 王喜顺, 彭玉成. 螺杆振动注射成型方法的研究[J]. 塑料机械, 1999(4): 38.
- [9] 方锦青. 非线性系统中混沌控制方法、同步原理及应用前景(II)[J]. 物理学进展, 1996, 16(2): 138 -

159.

[ 10 ] 王智勇,左铁钊.混沌及其对物理学与哲学思维的影响[J].自然辩证法研究,1997,13(8):23~27.

[ 11 ] 卢侃.混沌动力学[M].上海:上海翻译出版社,1990.

[ 12 ] 刘安华,龚克成.高分子材料粘弹过程的混沌运动[J].高分子材料科学与工程,2001,17(1):11.

[ 13 ] 成都科技大学.高分子化学及物理学[M].北京:中国轻工业出版社,1994.

[ 14 ] 是勋刚.湍流[M].天津:天津大学出版社,1994.

[ 15 ] SHORE J D, RONIS D, PICHE L, et al. Model for melt fracture instabilities in capillary flow of polymer melts[J]. Phys Rev Lett, 1996(77):655.

[ 16 ] 李伟,陈世刚.一个一维周期哈密顿系统的实例及混沌控制[J].物理学报,2001(8):1434-39.

[ 17 ] 唐国宁,罗晓曙,孔令汇.混沌系统的脉冲控制研究[J].广西师范大学学报,2000(1):13-16.

[ 18 ] 杨培才.湍流运动与非线性科学理论[J].力学进展,1994(2):205-219.

Chaos Control Technique and Vibration Technique Application in Polymer Molding

SUN Li - min , SHEN Chang - yu

( NERC of Plastic and Rubber Mold & Die ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002 ,China )

**Abstract :** This paper briefly introduces the vibration technique application to polymer molding process ,and introduces the basic concept of chaos theory and methods of chaos control . It points out that the polymer 's gather - state is one of chaos forms and the polymer forms translation processes are movements of chaos . The polymer melt fracture phenomenon is the outcome of chaos movement . Therefore , the process of polymer molding is a kind of complicated chaos movements . The vibration wave can control or interfere the chaos properties of polymer melt flowing . It is necessary to combine the chaos theory with experimental results in researching the effect of vibration wave to melt polymer .

**Key words :** polymer melt ; molding ; vibration technique ; chaos movement ; chaos control