

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.07.014

一种新型嵌入式行星螺杆挤出机及其混沌混合行为^{*}

何亮¹, 徐百平^{1,2}, 喻慧文¹, 刘跃军², 王小龙²

(1. 广东轻工职业技术学院, 广东高校高分子材料加工工程技术开发中心, 广州 510300;

2. 湖南工业大学, 先进包装材料与技术湖南省普通高校重点实验室, 湖南株洲 412008)

摘要: 提出了一种新型嵌入式行星螺杆挤出机结构, 引入了周期性扰动及排气功能, 研制成功 1.5 代实验样机。对嵌入式行星螺杆内流动与混合开展了数值模拟研究, 初步进行了线性低密度聚乙烯填充 10% CaCO_3 挤出样品扫描电子显微镜测试, 并与同向双螺杆挤出机挤出样品进行了对比分析。证实了行星螺杆的周期性扰动可以导致混沌混合的发生, 有利于螺杆压力的建立、能有效提高物料分散混合效果和提高制品质量。

关键词: 嵌入式行星螺杆; 混沌混合; 粒子示踪; 分散准数

中图分类号: TQ320.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)07-0061-05

A Kind of Novel Embedded Planetary Screw Extruder and Chaotic Mixing Performance

He Liang¹, Xu Baiping^{1,2}, Yu Huiwen¹, Liu Yuejun², Wang Xiaolong²

(1. Guangdong Industry Technical College, Technology Development Center for Polymer Processing Engineering of Guangdong Colleges and Universities, Guangzhou 510300, China; 2. Hunan University of Technology, Key Laboratory of Advanced Materials and Technology for Packaging of Hunan Universities, Zhuzhou 412008, China)

Abstract: A kind of novel geometry of embedded planetary screw extruder was proposed. The periodic perturb was introduced and the degassing function was added in, and then 1.5 generation of the experimental prototype extruder was developed successfully. The numerical simulation of the flow and mixing in such machine was carried out. The primary experimental investigation was conducted to characterize the mixing effect of sample of polyethylene, linear low density filled with 10% CaCO_3 , and comparison was made with the sample extruded by co-rotating twin screw extruder on the condition of the same output. The results confirm that the periodic disturbances derived from the planetary screws can lead to chaotic mixing. This is beneficial to the establishment of the more steady screw pressure, and can effectively improve the material dispersion mixing effect and the quality of the product.

Keywords: embedded planetary-screw; chaotic mixing; particle tracking; dispersion index

混沌理论是关于非线性系统在一定参数条件下展现分岔、周期运动与非周期运动相互纠缠, 以至于通向某种非周期有序运动的理论。混沌是非线性系统所独有且广泛存在的一种非周期运动形式, 混沌不是混乱, 它不同于平衡态, 是一种序, 是貌似无序的序。其覆盖面涉及到自然科学和社会科学的几乎每一个分支。混沌理论是当前世界上多学科共同研究的热点问题, 通过诱发产生混沌效应, 能使确定性的系统发生不一样的变化。

自 20 世纪 80 年代中期以来, 混沌理论已用来研究聚合物混炼的动力学和运动学, 混沌混合作为一种新型的聚合物混炼混合方法有利于解决传统螺杆混炼能力差的问题。混沌混合通过对聚合物流体或熔体反复的拉伸折叠作用, 能很好地解决层流域的混合问题, 因此它在聚合物加工领域具有广泛的应用。

1984 年, H. Aref^[1] 首先将混沌的概念引入到流体力学领域, 发现二维流动时流动函数就是相空间的哈密顿函数, 提出了著名的“blinking vortex flow”, 为人们提高层流混合效果开辟了新思路。当这种现象出现在以混合为主导的流体流动中时, 发现层流混合效果极大提高, 则称之为混沌混合。此后, 怎样在二维空间内实现粒子混沌运动一直是研究的热点问题, 高黏度流体混合过程与混沌场的诱导机理研究也一直在深入, 先后出现了轴承偏心流动模型、方腔上下盖拖动模型等^[2-4], 象周期点、

^{*} 国家自然科学基金项目 (11272093)、广东省高等职业院校珠江学者岗位计划资助项目 (2012)、广东轻工职业技术学院自然科学基金项目 (KJ201213)

联系人: 何亮, 讲师, 主要从事塑料成型机械、塑料成型加工和塑料模具设计等研究

收稿日期: 2013-05-11

Poincaré 映射、微分拓扑流型等微分动力学的研究方法被引入到对混合问题的实质性研究,推动了人们对混合问题的认识。1994 年, S. C. Jana 等^[5]首次尝试在单螺杆挤出过程中引入混沌混合,当时的研究仅局限于二维时间周期性流动。1996 年, M. Tjahjadi 等在前人理论的基础上,提出在单螺杆挤出机中插入混沌混合的建议,申请了第一个利用混沌场提高聚合物混合的专利^[6]。同年 S. J. Kim 等^[7-8]从简单的几何思想入手,在单螺杆沿螺槽展开方向插入间断矮螺棱而引入周期性双曲点扰动,形成“8”字形流动扰动,并提出了混沌螺杆的新概念。他们通过实验和数值模拟的方法研究了这种螺杆的混合效果,研究发现该螺杆在挤出功率增加不大的情况下,聚合物熔体的混合效果得到了提高,进一步研究证实了混沌场的存在,这种混沌螺杆中的混合效果远优于普通单螺杆。

笔者把前人开发的螺杆中的被动混沌触发器改成主动触发器,尝试将混沌动力学应用到行星螺杆挤出机上,研制出新型的嵌入式行星螺杆挤出机,该机器克服传统行星螺杆挤出机扰动不连续、难建立稳定挤出压力、分散混合效果差的缺点。

1 嵌入式行星螺杆挤出机研制

笔者发现 S. J. Kim 等设计的混沌螺杆中仍然存在大范围的常规层流混合区域^[9],为了提高混合效果,提出了对多螺杆结构进行一些修改,并进行了相应数值仿真研究^[10],另外还发现,二维方腔流的模式可以提供更多有价值的信息诱发混沌混合。通过引入周期性的几何变化和运动边界的扰动,提出了一种全新的行星螺杆结构,让扰动元件产生周期性的运动,将周期性扰动及对称破缺效应引入到挤出过程,可以在单螺杆挤出机中引发混沌流。具体的技术方案如下:将一定数量的小行星螺杆插入中心大螺杆的螺旋槽中,它们的轴线与中心大螺杆的轴平行。小螺杆一边随着中心大螺杆绕着中心轴线一起旋转,一边绕其自身轴线反方向旋转,对此已经申请了中国发明专利^[11-12]。第一代嵌入四根小螺杆的实验样机已经在 2008 年研制成功^[13]。并在第一代样机的基础上,通过数值模拟的研究结果及实际工程中的加工要求,将行星螺杆的数量增加为 6 根,加入了排气功能,进行了初步结构优化,制造出了第 1.5 代嵌入行星螺杆的样机,部分螺杆结构如图 1 所示。

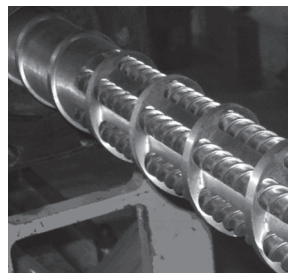


图 1 第 1.5 代嵌入式行星螺杆挤出机结构简图

2 混沌混合强化效果分析

为了分析嵌入式行星螺杆挤出机中混沌混合的强化效果,利用有限体积数值模拟方法对熔体输送过程进行了 CFD 数值模拟研究。在 CFD 数值模拟中,螺杆构型根据行星螺杆的根数及主螺杆落槽深度不同分为 5 种,分别为普通单螺杆、四行星螺杆、六行星螺杆 I、六行星螺杆 II 和十行星螺杆,其中,中心主螺杆的直径都为 70 mm,螺距都为 59.2 mm,行星螺杆与中心主螺杆的传动比为 4:1,其它螺杆模型几何参数如表 1 所示。在模拟时将行星螺杆简化为具有轴向速度的圆柱体,采用稳定流的模型,如图 2 所示,更多的细节见参考文献[10]。

表 1 螺杆模型几何参数

螺杆构型	mm			
	主螺杆螺槽高度	行星螺杆直径	研究区域	进出口延长区
普通单螺杆	10		280	140
四行星螺杆	5.5	16	280	140
六行星螺杆 I	5.5	16	280	140
六行星螺杆 II	10	16	280	140
十行星螺杆	5.5	9.2	280	140

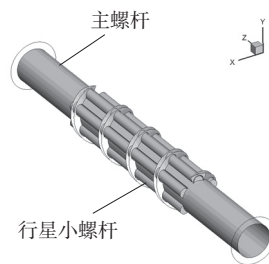
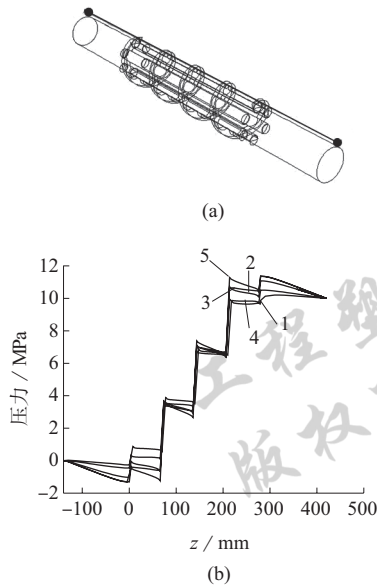


图 2 第 1.5 代嵌入式行星螺杆数值模拟物理模型简图

2.1 压力分布

在螺杆转速为 60 r/min,压力梯度为 10 MPa 边界条件下进行结果分析。图 3 示出各种螺杆轴向压力分布。在模型中定义点 A(0,34,-140),点 B(0,34,420),连接两点作出直线 AB,考察这条线上的压力变化趋势。可以看到在螺杆研究区域 [$z=0 \sim 280(\text{mm})$],考察线上压力沿着挤出方向呈现波浪状升高趋势。在研究区域的出口 (280 mm) 处,可以看到不同螺杆模型建立起的压力大小不一。比较同

螺槽深度的六行星螺杆 I、四行星螺杆与十行星螺杆的压力大小可以看到,十行星螺杆的出口压力最大,六行星螺杆 I 次之,四行星螺杆最小,其主要原因是行星螺杆个数增多,会使得主螺杆流道发生多次的空间放大与缩小的变形,提高了物料的压缩次数,同时由于行星螺杆的轴向输送能力作用,螺杆个数越多建压能力越好。对比六行星螺杆 I 与 II,发现前者比后者的建压能力强,这说明螺槽深度对螺杆压力建立也有影响,螺槽越浅建压能力越强。单螺杆的建压能力最弱,可以看出嵌入式行星螺杆对物料能产生更好的压缩作用,能更好地提高物料挤出的稳定性。



1—普通单螺杆; 2—四行星螺杆; 3—六行星螺杆 I;
4—六行星螺杆 II; 5—十行星螺杆

a—压力考察线(以六行星螺杆为例); b—沿 z 方向压力分布

图3 螺杆轴向压力分布

2.2 分散准数

Cheng J J 等在研究 Banbury 混合器时,提出利用分散准数 λ 描述流场中拉伸流动程度^[14],其定义为:

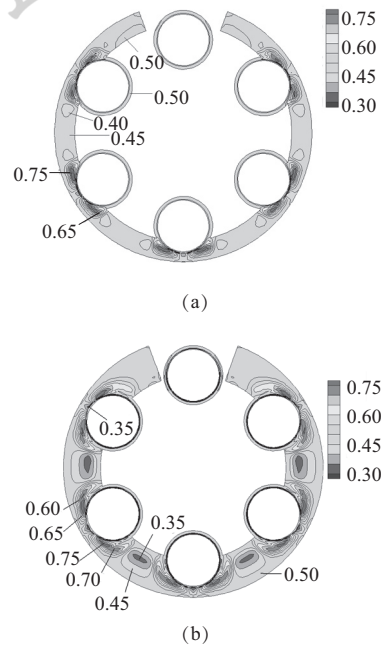
$$\lambda = \frac{|\overline{D}|}{|\overline{D}| + |\omega|} \quad (1)$$

式中: $\overline{D}$ ——形变速率张量, s^{-1} ;

ω ——涡量, s^{-1} 。

当 $\lambda=0$ 时,反应器中不存在混合,只为单纯有旋运动;当 $\lambda=0.5$ 时,拉伸流动与剪切流动相当,为简单剪切流动;当 $\lambda=1$ 时,流动为纯拉伸运动,混合效果最强。

图 4 示出在螺杆转速为 60 r/min,压力梯度为 10 MPa 条件下, $z=140(\text{mm})$ 截面处嵌入式六行星螺杆 I 和 II 的分散准数的分布。由图 4 可以看出,分散准数大于 0.5 的区域主要集中在物料进出行星螺杆的间隙部分,说明了此处物料流动以拉伸运动为主,混合效果最好。在其它螺槽区域分散准数为 0.5 左右,说明在没有行星螺杆扰动的地方,物料的流动为简单的剪切流动。在新型的嵌入式行星螺杆中,分散准数的分布主要是行星螺杆的加入导致流道体积发生变化,起到了压缩物料的作用,同时行星螺杆同机筒一起转动的效果使得物料在途经行星螺杆与机筒间隙时,受到了上下速度不等的边界作用,从而导致物料受到较强的拉伸流动作用。另外在中心主螺杆螺槽较深时,分散准数大于 0.5 的区域分布较大,可见螺槽深度对分散准数有着重要影响,随着螺槽深度的加深,拉伸流动分布的区域明显增加。但螺槽加深也会加大一些低分散准数的区域,在图 4b 中两个行星螺杆之间就出现了分散准数为 0.35 的环形区域。



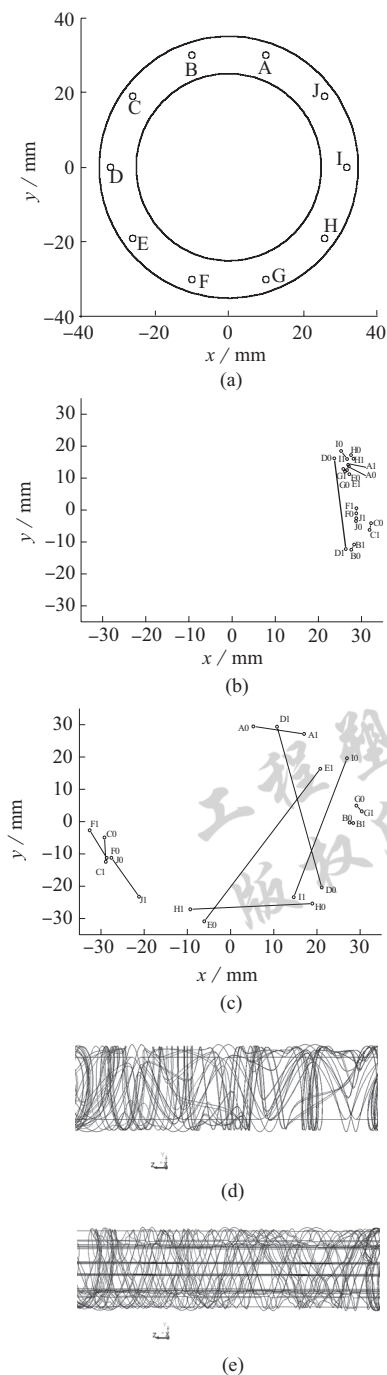
a—六行星螺杆 I 模型; b—六行星螺杆 II 模型

图4 六行星螺杆 $z=140(\text{mm})$ 横截面上分散准数的分布

2.3 粒子示踪模拟

在进口截面上,沿着直径为 64 mm 的圆环上平均取 10 个人射点 A~J,每个人射点有两个粒子,这两个粒子在 y 方向坐标相同仅在 x 方向坐标上相差 0.001 mm,因此可以认为是极其靠近的两个点,笔者开展了流体质点追踪计算。给定主螺杆转速为

60 r/min,压力梯度为 10 MPa 的情况下,得到了粒子群运动轨迹,如图 5b~5e 所示。



a—粒子群初始位置; b—单螺杆 xoy 平面观察粒子群终点位置;
c—六行星螺杆 II xoy 平面观察粒子群终点位置;
d—单螺杆 yoz 平面观察粒子群运动轨迹;
e—六行星螺杆 II yoz 平面观察粒子群运动轨迹

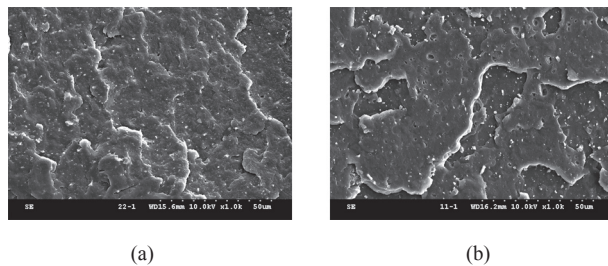
图 5 螺杆内示踪粒子运动的轨迹

图 5b, 5d 为单螺杆挤出机粒子示踪结果, 单螺杆内由于压力反流的影响, 粒子运动轨迹在螺槽内

产生了折叠的效果, 折叠后的粒子轨迹又发生了一定的分离, 但是轨迹路线还是保持一致。粒子运动终点始终保持在一起没有分开, 可见此时的混合为典型的常规层流混合。六行星螺杆 II 挤出机内的示踪剂粒子运动的轨迹如图 5c, 5e 所示, 示踪粒子出现了杂乱无章的运动轨迹。有时是从行星螺杆内部向前输送, 有时在环流区域折叠前行, 还有时从行星螺杆底部进入下一个螺槽, 且明显要比单螺杆密集, 运动行程要长。除 B, G 两点外, 其它各点的出口位置已经明显分开, 根据混沌理论对初始条件的敏感性条件, 则说明流场中存在着混沌效应, 有关混沌场作用的尺度将进一步通过 Poincaré 映射得到, 目前正在进一步研究当中。

2.4 嵌入式行星螺杆与同向双螺杆混合效果对比分析

使用线性低密度聚乙烯 (PE-LLD) 填充 10% 活性纳米 CaCO_3 的体系进行初步的实验研究, 将 1.5 代嵌入式行星螺杆挤出机对物料的混合效果与直径为 35 mm, 长径比为 48 的同向双螺杆进行对比。考虑到两台机器在结构上存在较大差异, 无法通过常规的同等转速的方法进行对比, 故通过在两台机达到同等产量的情况下对比物料中的 CaCO_3 分散混合效果。固定相同的输出产量为 8.8 kg/h, 嵌入式行星螺杆挤出机的转速为 20 r/min。扫描电子显微镜 (SEM) 分析结果如图 6 所示, 除了双螺杆内有一些小的团聚发生, 两种状态下物料的分散效果相差不大, 这说明这种新型的螺杆构型对物料的混合效果如传统的同向双螺杆挤出机一样优异。



a—嵌入式行星螺杆混合效果; b—同向双螺杆混合效果

图 6 嵌入式行星螺杆与同向双螺杆混合效果对比

3 结论

提出了一种全新的嵌入式行星螺杆挤出机螺杆结构, 将混沌混合引入到聚合物加工中, 研制成功 1.5 代嵌入式行星螺杆挤出机实验样机。对嵌入式行星螺杆内流动与混合情况进行了数值模拟表征, 以同向双螺杆挤出机为比较对象, 开展了相同产量

下 PE-LLD 填充 10% CaCO_3 体系的挤出实验,进行了 SEM 混合情况表征。结果表明,混沌场的引入对嵌入式行星螺杆挤出机来说有利于螺杆建立更稳定的挤出压力、能有效提高物料分散混合效果和提高制品质量,这为聚合物加工设备的改进提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] Aref H. Stirring by chaotic advection[J]. J Fluid Mech, 1984, 143:1-21.
- [2] Boyland P L, Stremmer M A, Aref H. Topological fluid mechanics of point vortex motions[J]. Physica D, 2003, 175:69-95.
- [3] Anderson P D, Galaktinov O S, Peters G W M, et al. Mixing of non-newtonian fluids in time-periodic cavity flows[J]. J Non-Newtonian Fluid Mech, 2000, 93(2-3):265-185.
- [4] Kang T G, Kwon T H. Colored particle tracking method for mixing analysis of chaotic micromixer[J]. J Micromech Microeng, 2004(14):891-899.
- [5] Jana S C, Tjahjadi M, Ottino J M. Chaotic mixing of viscous fluid by periodic changes in geometry[J]. The American Institute of Chemical Engineers Journal, 1994, 40(11):1769-1775.
- [6] Tjahjadi M, Foster R W. Single screw extruder capable of generating chaotic mixing:US, 5551777[P]. 1996-09-03.
- [7] 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[J]. Advances in Polymer Technology, 1996, 15(1):41-54.
- [8] Hwang W R, Jun S H, Kwon T H. Experiments on chaotic mixing in a screw channel flow[J]. AIChE J, 2002, 48(8):1621-1630.
- [9] 徐百平, 宋建, 彭响方, 等. 混沌挤出过程相空间动力学行为分析与表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(12):34-37.
Xu Baiping, Song Jian, Peng Xiangfang, et al. Analysis and characterization of dynamics performance in phase space during the course of chaotic extrusion[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(12):34-37.
- [10] 王小龙, 徐百平, 刘跃军, 等. 嵌入式行星螺杆挤出机内三维流动数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(3):171-174.
Wang Xiaolong, Xu Baiping, Liu Yuejun, et al. Simulation of the three-dimensional flow in embedded planet-screw extruder[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2012, 28(3):171-174.
- [11] 徐百平, 王玫瑰, 何亮, 等. 一种嵌入式行星螺杆脉动塑化排气挤出装置及其方法: 中国, CN101837633A[P]. 2010-09-22.
Xu Baiping, Wang Meigui, He Liang, et al. An embedded planetary screw plasticizing and degassing extrusion device and its method: China, CN101837633A[P]. 2010-09-22.
- [12] 徐百平, 瞿金平. 行星螺杆混沌触发挤出方法及其装置: 中国, CN1775506[P]. 2006-05-24.
Xu Baiping, Qu Jinping. Planetary screw chaos trigger extruding method and apparatus: China, CN1775506[P]. 2006-05-24.
- [13] 王玫瑰, 徐百平, 孔萍, 等. 混沌场强化高分子材料加工装备技术实现[J]. 现代塑料加工应用, 2010, 22(4):57-60.
Wang Meigui, Xu Baiping, Kong Ping, et al. Enhancement of polymer processing by chaotic advection and its application to devices[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2010, 22(4):57-60.
- [14] Cheng J J, Manas-Zloczower I. Hydrodynamic analysis of a banbury mixer-2D flow simulations for the entire chamber[J]. Polym Eng & Sci, 1989, 29(15):1059-1065.

鞍山君利工程塑料有限公司

鞍山君利工程塑料有限公司是股份制企业,生产以工程塑料为主的改性材料。由教授级高工、中国塑协专家委员会专家负责生产技术。可为用户提供增强、增韧、复合、阻燃、环保阻燃、抗静电、耐磨、塑料合金类系列改性工程塑料。公司竭诚为用户“量身订做个性化需求的产品,为客户创造价值”。公司通过 ISO9001:2000 国际质量管理体系认证。公司宗旨:信誉第一;质量第一。

欢迎新老客户前来指导、合作!

- 改性品种: PA66、PA6、PP、PE、ABS、AS、HIPS、POM、PC、PC/ABS、PBT、PET、PVC 等系列改性塑料。
- 适用行业: 家电、汽车、机械、铁路、纺织、石油化工、煤矿、农业等。

经理: 徐长旭 13604228259, xuchangxu315@163.com

总工: 赵文聘 13804910274, zhaowenpin315@163.com

地址: 辽宁省鞍山市旧堡 邮编: 114041 电话: 0412-8935903 传真: 0412-8935803 网址: www.asjls.com