

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.04.025

螺杆挤出机挤出过程数值模拟研究进展

冯刚

(浙江工业职业技术学院, 绍兴 312000)

摘要:介绍了数值模拟方法的基础及其优点,综述了国内外单螺杆、双螺杆、多螺杆挤出机挤出过程数值模拟研究进展。

关键词:螺杆挤出机;数值模拟;研究进展

中图分类号: TQ320.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)04-0096-04

Research Progress in Numerical Simulation of Screw Extruder Process

Feng Gang

(Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The advantages and the foundation of numerical simulation method were briefly described. The domestic and foreign progress of study on numerical simulation of extruding process of single screw, twin screw and multi-screw extruder was overviewed.

Keywords: screw extruder; numerical simulation; research progress

挤出机是塑料机械的主要品种之一,占塑料机械总产值的30%,用挤出机加工的塑料制品占塑料制品总量的1/3左右。螺杆挤出机作为现代工业生产中重要的成型设备之一,它能够将一系列操作如固体输送、熔融、压缩、熔体输送、聚合、交联、发泡等基本的化工单元过程集中在挤出机筒内完成。在食品、纺织、炸药、塑料、橡胶、建材、金属加工、造纸等领域都得到了广泛的应用,同时,它对于促进聚合物改性的进一步发展起到了巨大的作用^[1]。进入21世纪,随着高分子复合材料的不断发展,尤其是聚合物共混改性的快速发展,螺杆类挤出机不断推陈出新,演化出各种各样的结构形式,其发展历程经过了由作用单一到兼具多种功能、从简单到复杂的演变,比如单螺杆式、双螺杆式、三螺杆式以及四螺杆式^[2]。研究螺杆类挤出机的挤出理论,即研究螺杆挤出过程中所发生的物理、化学过程,它有助于深入了解挤出成型工艺以及螺杆设计等对挤出过程的影响,对于实际的生产 and 操作具有重要的指导意义。

随着计算机和计算技术的飞速发展,数值计算、实验研究和理论研究成为科学研究的三种重要方法。挤出理论的研究方法也可以分为实验、理论和数值模拟三种方法。数值模拟的手段是电子计算机,因此数值模拟也可以被称为计算机模拟,与传统实验研究相比,数值模拟研究方法具有独特的优点。数值计算作为新的研究手段之一,不但能够大大缩短研发周期和降低成本,而且可以得到实验手段无法测量的数据。20世纪八、九十年代,国内在实验研究和理论研究方

面取得了较大的进展,但是,由于数值计算方法的限制及研究人员的缺乏,在数值模拟研究方面的进展却比较缓慢。近些年来,计算数值方法和软件技术的发展为挤出理论的深入研究提供了大量的技术上的条件。关于单、双螺杆挤出理论的研究吸引了越来越多的研究者和技术人员的关注。人们逐渐开始使用计算流体力学(CFD)软件,数值仿真动态模拟螺杆挤出机的挤出过程。运用CFD理论,可以减少实验次数,解决某些由于实验技术的限制而难以进行测量的问题,同时,可以提高生产效率,节省成本。近年来,国内越来越多的研究人员开始关注螺杆挤出机挤出过程的数值模拟研究^[3]。

1 数值模拟方法的基础

数值模拟包含以下几个步骤:首先,要建立反映问题(工程问题、物理问题等)本质的数学模型。具体说就是要建立反映问题各量之间的微分方程及相应的定解条件,这是数值模拟的出发点。正确完善的数学模型在数值模拟占着重要的地位。其次是要寻找高准确度的计算方法,当前在人们越来越多的关注下,研究出了越来越多的数值计算方法,例如微分方程的求解方法以及离散化方法、边界条件的处理、贴体坐标的建立等。再次就是编制程序以及进行计算。

1.1 数学模型

建立数学模型是数值模拟的出发点,没有正确完善的

联系人:冯刚,高级技师,主要从事塑料成型技术研究

收稿日期:2012-02-09

数学模型,数值模拟就无从谈起。数学模型的历史可以追溯到人类开始使用数字的时代。为了给解决现实的问题提供更加精确的数据以及可靠的理论指导,数学模型首先将现实问题归结为相应的数学问题,其次是运用数学的方法从定量或者定性的角度来刻画实际问题。建立数学模型是沟通摆在面前的实际问题与数学工具之间联系的一座必不可少的桥梁。它具有真实完整、简明实用、适应变化等优点。

建立数学模型在整个聚合物挤出过程的研究中占据举足轻重的地位,模型的好坏是系统成败的关键。

1.2 物理模型

物理模型的正确与否对数值模拟的结果起着决定性的作用,很难想象粗糙的物理模型经过数学运算能够获得与实际情况吻合良好的结果。根据信息系统的复杂度、项目资源、容量以及数据仓库项目自身的软件生命周期,物理模型设计的主要作用体现在以下几方面:确定数据仓库分层设计模式,确定数据存放位置,确定索引策略,确定存储分配等^[4]。

1.3 有限元模型

根据 CFD 的工作流程,建立数学模型、物理模型后,下一步的任务是求解方程组。为了求得精确的解析值必须有规则的几何形状、严格的边界条件,简化程度较高的方程组,因此在一般情况下,不能用解析法求解。这类问题的解决通常有两种途径:一种是引入简化假设,另一种是数值解法,有限元法是其中的主要方法之一。在进行有限元计算时,首先使用前置处理器对几何模型进行网格划分^[5]。对挤出机流体区域划分网格时,应尽可能提高网格的精度。

2 螺杆挤出机挤出过程数值模拟研究进展

2.1 单螺杆挤出机的数值模拟研究进展

单螺杆挤出是塑料加工中的一种重要方法,聚合物颗粒所组成的固相在传导热与黏性耗散热共同作用下逐渐转变为液相的过程就是其挤出过程中的熔融过程,是个复杂的两相共存的相变过程。由于单螺杆挤出机具有低耗、高产、结构简单等优点,在许多方面得到应用。单螺杆挤出理论经过近些年的发展也已经日趋完善。我国对螺杆挤出机挤出过程进行了系统的数值模拟研究,提出了完整模型和很多富有创见的见解^[6]。并在挤出数据、基础理论和 CAD 应用方面做了大量研究工作。

邢应生等^[1]介绍了挤出成型过程数值模拟的现状以及通用 CFD 软件在模拟聚合物流动时存在的缺陷,从而提出自主开发 CFD 程序的必要性。并针对单螺杆挤出过程固体输送段的数值模拟方法,讨论了传统塞流固体输送理论的缺陷,指出螺杆挤出理论的数学处理方法不仅应该保证一定的计算精度,还应该从实用的角度出发以适应工程推广。最后得出塞流固体输送理论次于非塞流固体输送理论,同时三层

模型法计算方法比较简单,便于其在工程计算中应用的结论。

孙静等^[7]通过建立挤出过程的三段七区数学模型、各种物性及螺杆参数数据库,使用高级编程语言 Visual C++6.0, openG L 等软件,开发了完全基于 Windows 的单螺杆挤出过程计算机仿真系统。该系统优于其它同类软件之处在于,能直观地显示整个生产线的情况,能近似地模拟聚合物挤出成型过程,并预测加工条件变化对制品的影响,既可以实现加工过程的分析与评估,又有利于从整体上把握挤出过程。

何红等^[8]借助宏观和亚宏观可视化技术,描述了所观测到的聚合物挤出过程中的团块熔融和粒子熔融现象,由此提出了粒子熔融物理模型。

宗原等^[9]将单螺杆挤出机简化为三维方腔,利用有限元计算软件包 Polyflow 研究了螺槽深度以及转速对螺槽混合性能的影响。研究表明,在螺槽中,聚合物的流动形式位于全混流与活塞流之间。提高螺杆转速只是加快了聚合物熔体的运动速度,并不能显著改善单螺杆挤出机内的轴向混合。螺槽的几何构型比螺杆转速对螺槽内的混合性能影响要大。单螺杆挤出机内的混合效果与物料在其中的流动密切相关。提供打破层流混合的流动以及延长形变历程是提高单螺杆挤出机混合性能的关键。在改进单螺杆挤出机混合特性的时候,应从增加流体界面取向及延长形变历程方面考虑。

江顺亮等^[6]采用三段七区模型对挤出过程进行计算机模拟。为了把各区段融合成有机的整体提出了单螺杆挤出过程的三段七区模型的自然衔接的解决方案,从而对挤出全过程进行计算机模拟。基于此,编制了单螺杆挤出分析软件 SinoTru,并详细地介绍了 SinoTru 的各种功能,对一些结果进行了分析。研究结果对于单螺杆挤出机的数值模拟研究具有很强的实用性和有效性。

2.2 双螺杆挤出机的数值模拟研究进展

双螺杆挤出机已被广泛应用于聚合物加工行业。其具有排气性能良好、混合性能优良、加料性能优异、螺杆元件组合灵活多变及自洁性能良好等优点。随着聚合物材料工业的高速发展,对双螺杆挤出机性能提出更高要求^[10]。

石兆东等^[11]利用有限元法,对玉米小碴子熔体在非啮合型双螺杆挤出机内流动的压力、速度、温度进行分析,同时对螺杆挤出特性的参数进一步进行了数值研究。研究结果表明,由非啮合双螺杆挤出机的入口到出口,物料的温度值以及压力都在逐渐增加;双螺杆挤出机内物料的流量以及温度会随着螺杆流道两端压差和转速的增加而逐渐增加。非啮合双螺杆挤出机的混合性能要好于单螺杆挤出机。找出

了影响非啮合双螺杆挤出机产品品质的螺杆结构参数和工艺参数,为非啮合双螺杆挤出机优化设计提供了理论参考。

曹春阳等^[12]应用罚函数有限元和边界元法,对啮合同向双螺杆排气段内非牛顿等温黏性流场进行了数值模拟,弥补了以往关于双螺杆熔体输送流场的研究大都集中于计量段上,而关于排气段的研究却很少的不足。计算了螺槽内熔体充满系数与其它有关工艺参数和螺杆几何参数之间的关系,为进一步研究排气段的工作特性创造了条件。

荆珂^[13]利用计算流体力学法,以啮合盘和螺纹元件的组合螺杆为研究对象,对聚合物熔体在啮合盘和螺纹元件的组合螺杆反应器中的流动规律进行了数值模拟,利用速度场和压力场计算了组合螺杆的挤出特性参数,并和常规螺纹元件进行了对比分析。最后得出组合螺杆的分布性混合和分散性混合能力远好于常规螺纹元件。

胡冬冬等^[14]为了考察放松边界条件对双螺杆挤出机流场数值模拟结果的影响,改变过去在对双螺杆挤出机流场的数值模拟中,流道进出口边界条件设置的不足。在流量恒定的前提下,运用聚合物流动分析软件 Polyflow,通过给定三种不同分布形式的速度边界条件,对双螺杆挤出机流道以及其流场进行了数值模拟。最后得出:流道进出口边界条件在体积流量恒定的条件下,其对离进出口边界较远的流场影响很小,流场的影响主要集中在进出口附近区域。

彭炯等^[15]通过数值计算分析了非牛顿黏性聚合物在螺杆中的非等温流动特性,建立了双螺杆挤出的三维模型,利用网格叠合技术分析了挤出机计量段内速度、温度、压力、黏性耗散热的分布以及螺杆转速、轴向压差对挤出量的影响。最后得出结论:聚丙烯平均剪切速率等因素会随着随着螺杆元件的螺距增大而增大;聚丙烯挤出量线性会随着螺杆轴向压差增大而降低。借助数值模拟结果,采取必要的措施控制局部高温高压,不但可以延长机器寿命,提高产品质量,同时可以对双螺杆的设计以及双螺杆中聚合物混合的优化提供理论指导。

杨海波等^[16]计算啮合同向双螺杆普通螺纹元件流道内聚苯乙烯和高密度聚乙烯熔体的流场。研究结果表明,保持转速不变,增大啮合盘元件的压差,从分散相的平均直径、最大直径和直径的分布各方面来看,可以提高啮合盘元件的分散效果;而保持啮合盘元件的压差不变,增大转速,分散相的平均直径和最大直径减小,转速的变化对炭黑直径分布的影响很小。挤出流量对物料停留时间分布的影响明显大于螺杆转速,挤出流量和螺杆转速对于分散相的直径分布范围的影响不明显。

2.3 多螺杆挤出机的数值模拟研究进展

近年来,对于单螺杆和双螺杆挤出机,已经进行了广泛

的试验和数值模拟研究^[17-19]。为了适应高速发展的聚合物工业对混合效果提出的更高要求,人们在传统的双螺杆挤出机的基础上研究开发了三螺杆挤出机、四螺杆挤出机等。多螺杆挤出机虽然面市不久,但是随着螺杆挤出机制备技术的不断发展,多螺杆挤出机已经逐渐开始应用于生产领域。多螺杆挤出机克服了单螺杆或双螺杆挤出技术的不足,具有长径比小、啮合区多、产能比较高、排布方式灵活多变、混合特性优异等优点。已在高聚物共混改性、功能塑料的制备、反应性挤出加工、高亮度涂料等领域得到很好的应用。同时,它满足了聚合物的加工产量和质量系列化、功能化、精细化、低成本等方面的要求,因此,受到了越来越多的关注。

胡冬冬等^[20]利用 Polyflow 软件模拟了三角形排列的三螺杆挤出机中捏合盘元件的流场。对中心区物料粒子的停留时间进行了统计学分析,分析了物料的流动规律,给出了粒子的运动轨迹。结果表明,中心区不会有物料滞留。在三螺杆挤出机中,为了使得塑化和混合效果更好,物料每绕螺杆旋转一周要经过三个啮合区。为研究其它复杂结构的聚合物混合机械中物料的流动机理提供了一种新的方法。

曾文^[21]利用 CFD 法对聚合物熔体在三角形排列三螺杆反应器中的流动规律进行了计算机模拟,研究了物料在中心区的流动规律。分析了三角形排列三螺杆反应器中的剪切速率分布、能耗、回流系数、流量、产能比等特性参数。结果表明,三螺杆反应器的流动死区不是出现在最大面积中心区而是出现在最小面积中心区。三螺杆反应器同双螺杆反应器相比具有多种优点。为新型三螺杆反应器的设计开发和挤出工艺的优化设计提供一定的理论参考。

邓霁兰^[22]对三螺杆挤出机中的熔体流场和混合性能进行了数值模拟,在实验验证的基础上,研究了啮合块类型、下游螺纹元件、体积流率和螺杆转速对熔体流场和混合特性的影响。结果表明,组合式三螺杆挤出机中啮合块的平均压力主要受流场下游螺纹元件的影响。在对不同组合形式的三螺杆挤出机流场定量分析的基础上得出中性、反向啮合块的混合性能好于正向啮合块。

朱向哲等^[23]利用计算流体力学的方法对聚合物熔体在三螺杆挤出机中的流动规律进行了数值模拟,并且和双螺杆挤出机进行对比分析。得出结论:物料在三啮合区具有较大的流动速度、压力梯度和剪切速率,其混合效果好于双螺杆挤出机。三螺杆挤出机具有较好的工程应用前景。

何和智等^[24]利用 ANSYS 软件中的 Flotran CFD 分析功能对同向旋转三螺杆挤出机计量段实际流道真实尺寸的三维非牛顿模型流场进行数值模拟。分析了振动力场作用下各种因素与螺杆组合性能的关系,同时与无振动状态的挤出特性进行了比较。结果表明,振动对挤出机计量段内速度、

压力、温度的分布和流量有一定的影响,振动力场的引入使熔体黏度和流量呈周期性变化,熔体黏度降低,螺棱两侧压差随振幅增大而增大,剪切作用增强,分散性混合能力和分布性混合能力提高。数值模拟的结果可以为三螺杆中聚合物混合过程的优化以及为三螺杆动态挤出机的设计提供理论指导。

朱向哲等^[25]以四螺杆挤出机啮合同向常规螺纹元件为研究对象,利用计算流体力学法,对四螺杆挤出机螺纹元件中聚合物熔体的流动规律进行了数值模拟。同时,与其它各种螺杆挤出机进行了进一步的对比分析。结果表明,在相同加工成本的情况下,四螺杆挤出机可以获得比双螺杆挤出机质量更佳的挤出产品。为多螺杆挤出机的优化设计提供了一定的理论依据,从理论上验证了多螺杆反应器在物料运输能力以及物料混合能力等方面均具有较佳的表现。

3 结语

随着现代科学技术的不断发展,对聚合物材料提出了更高的要求。21世纪是由传统技术迈向信息技术的时代,随着计算机技术的不断发展,大量软件的开发利用为螺杆元件的研发提出更好的方法。数值模拟技术发展体现在两方面,一方面是一体化模拟技术,另一方面是定量进行属性不确定性分析。在螺杆挤出机的研究过程中,采用科学计算、理论分析与实验相结合的科学研究方法,动态模拟聚合物螺杆挤出过程,深入研究螺杆结构、工艺条件和物性参数之间的规律,研究聚合物螺杆挤出加工成型的机理。

近年来,人们开始大量地使用数值模拟的方法对挤出过程进行研究。国内外在螺杆挤出机挤出过程数值模拟研究方面取得了一定的成就,但是,随着聚合物材料的进一步发展,螺杆挤出机挤出加工成型技术面临新的机遇和挑战,因此有待进一步深入这方面的研究工作。

参考文献

- [1] 邢应生,等. 中国塑料,2004,18(10): 83-87.
- [2] 王华峰,等. 工程塑料应用,2011,39(9): 85-87.
- [3] 陈晋南,等. 计算机辅助工程,2009,18(4): 5-9.
- [4] 徐振华. 基于数据仓库的煤矿决策支持系统研究[D]. 北京: 北京大学,2010: 1-45.
- [5] 钱欣. LLDPE-SBS 共混过程的数值模拟及实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学,2009: 25-33.
- [6] 江顺亮,等. 特种橡胶制品,2003,17(1): 100-105.
- [7] 孙静,等. 工程塑料应用,2002(30): 27-30.
- [8] 何红,等. 塑料,2001,2(30): 28-30.
- [9] 宗原,等. 中国科技论文在线,2009,4(3): 207-213.
- [10] Belytschkot, et al. Comput Methods Appl Mech & Eng, 1996, 139(1-4): 347.
- [11] 石兆东,等. 农机化研究,2011(1): 41-44.
- [12] 曹春阳,等. 塑料科技,1999(3): 34-37.
- [13] 荆珂. 机械设计与制造,2008(5): 85-87.
- [14] 胡冬冬,等. 计算机与应用化学,2005,22(12): 1137-1141.
- [15] 彭炯,等. 中国塑料,2001,15(7): 39-41.
- [16] 杨海波,等. 特种橡胶制品,2006,27(6): 44-46.
- [17] Connolly R K, et al. Advances in Polymer Technology, 2003, 22(1): 22-41.
- [18] Bravo V L, et al. Polym Eng Sci, 2004, 44(4): 779-793.
- [19] Ishikawa T, et al. Polym Eng Sci, 2000, 40(2): 365-375.
- [20] 胡冬冬,等. 化工学报,2004,55(2): 280-283.
- [21] 曾文. 石油化工高等学校学报,2008,21(1): 74-77.
- [22] 邓零兰. 组合式三螺杆挤出机中流动和混合的数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学,2010: 28-45.
- [23] 朱向哲,等. 高分子材料科学与工程,2008,24(3): 32-35.
- [24] 何和智,等. 中国塑料,2006,20(4): 104-107.
- [25] 朱向哲,等. 辽宁石油化工大学学报,2006,26(1): 58-62.

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。由教授级高级工程师、中国塑料加工工业协会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: 辽宁省鞍山市腾鳌镇黄县 邮编: 114225 电话: 0412-8935903 传真: 0412-8935803 网址: www.asjls.com