

塑料挤出成型发展概况

张春吉 唐 跃 张惠敏

(青岛科技大学,青岛 266042)

摘要 介绍塑料挤出成型原理的研究发展、挤出成型主要工艺参数和挤出成型的新工艺,通过对挤出成型主要工艺参数(机筒温度、口模温度、螺杆转速与挤出速率和牵引速率)和挤出成型的新工艺(反应挤出、固态挤出和共挤出技术)的研究,进一步展望了挤出成型设备的发展趋势。

关键词 塑料挤出 挤出成型原理 挤出工艺 挤出成型设备

挤出成型是聚合物加工中出现较早的一门技术,在塑料加工中占有重要的地位。经过 100 多年的发展,挤出成型制品几乎占塑料制品总量的 1/3 以上。在生产实践中,挤出成型原理和技术得到不断的深化和拓展;可加工的聚合物种类、制品结构和制品形式越来越多;挤出工艺也得到不断的发展;挤出成型设备不断改进和创新,设备正向着大型化、高效率化、精密化、智能化及专用化发展;计算机技术在挤出成型加工中的广泛应用使加工质量及工艺控制水平不断提高。

1 挤出成型原理

挤出成型原理主要是研究物料在螺杆式挤出机中的塑化挤出过程、状态变化及运动规律的工程原理,如物料在螺槽内速度、压力、温度分布规律;螺杆的输送能力、塑化能力及功率消耗等^[1]。

1.1 物料的塑化挤出

对于具体的挤出过程来说,虽然存在许多不同之处,但作为挤出成型原理的研究,则取个性中的共性问题研究。根据三个功能区:固体输送区、熔融区、熔体输送区,概括为三个理论:固体输送理论、熔融理论和熔体输送理论。这些区段的存在与否及在挤出机中的位置,视具体的挤出过程而有所不同,相邻各段也会互相交叠,当聚合物性能或操作条件变化时,各段边界可以改变。

1.1.1 固体输送

固体输送是全部塑化挤出过程的基础,它的主要作用是将固体物料压实后向熔融区输送。近年来,固体输送理论得到不断的发展,非塞流固体输送和动力场作用下的固体输送理论是固体输送理论中较有代表性的。

(1) 非塞流固体输送

在进行了大量的固体输送研究之后,人们发现固体输送理论不能完全解释固体输送现象。通过全程可视化挤出机的玻璃视窗^[2,3]观察到进入延迟区之前,塑料颗粒之间几乎都存在明显相对位移和空隙,甚至螺槽未充满的现象。这一现象直到进入延迟区之后才逐渐消失。除此之外,固体颗粒之间存在亮晶晶的熔体,愈到熔融后期颗粒间的熔体会愈来愈多,这证实了固体塞的不连续性和固体塞变形的可能性^[4]。以此为基础,将固体输送区的研究又分为非塞流区和塞流区,提出了非塞流固体输送理论,在非塞流区采用散粒

体的概念来代替固体塞并建立相应的数学模型,得到了散粒体系内产生的应力场、速度场、流量、压力分布、能耗和温升等。后来,又对非塞流固体输送理论进行了简化,将非塞流固体输送理论得出的压力与流量的结果与 Dar - Mol 固体输送理论计算的结果进行了比较。结果表明,用非塞流固体输送理论计算出来的结果与试验结果比较接近,且在计算压力分布时,可以不用初压力值^[5]。当颗粒与颗粒之间的摩擦系数无限大时才满足固体塞输送理论,说明其理论的普遍意义,即固体塞输送理论是非塞流固体输送的特例。

(2) 动力场作用下的固体输送理论

塑料电磁动态塑化挤出机将振动力场引入挤出全过程^[6],对塑料电磁动态塑化挤出机中固体输送机理进行了研究,建立了振动力场作用下的固体输送的物理模型和数学模型^[7]。将振动力场作用下的固体输送过程分为两个阶段:第一阶段是无弹性形变阶段,塑料颗粒从孔隙率最大的松散状态被压实到孔隙率很小的紧密排列状态;第二阶段是压实阶段,塑料粒料在正压力的作用下,通过弹性形变使散粒体孔隙率减少,达到压实的目的。在此物理模型基础上,对动态压实过程进行了模拟和分析,得到了一些关于动态压实过程中压实率和压实速率与振动力场的频率、振幅之间的基本规律:

①振动力场作用下,压实过程出现明显的阶段性。

②振动力场的引入改变了压实体内部的压力分布,促进了压力在散粒体中的传播,对压实过程产生一定的促进作用。

③振动场的频率和振幅的改变对压实过程有明显作用,提高频率和加大振幅会使压实速率提高,压实密度增大。

④频率和振幅的改变对压实过程和压实速率的影响程度是不同的:在低频段,频率的提高会对压实过程产生明显的加强作用,而频率提高到一定程度,压实体密度增大趋势会逐渐减弱;压实速率与压实体密度随振幅的加大而一直呈现明显的增长趋势。

1.1.2 熔融

一般在操作过程进入正常状态以后,在受热机筒和圆柱

形固体粉、粒之间界面处开始形成薄层熔体膜时,即为熔融过程开始。此薄层膜的厚度随着外部的热传导与粘性热扩散而逐渐增厚,逐渐在螺棱后面形成熔体堆积,此熔体的生成与流入是稳定进行着的,与此同时,沿螺槽流动方向前进的固体粉、粒连续逐渐减少^[8]。在此领域的经典理论是由 Tadmor 建立的数学模型,可以初步计算熔融速率。

为了提高固体粉、粒材料的熔融速率,进行螺杆设计时附加了多种其它部件,使固体粉、粒料与熔融体同时做两相移送,即防止固体物料层混落在熔体中分散移动^[9]。这样,将螺棱的前部附近位置的固体粉、粒与占据螺槽后部侧面的堆积熔体分离,并分别按各自的路径流动。其结果是减少了尚未熔融固体流动所占螺杆槽的截面积,而熔体流动所占螺杆槽的截面积随熔融速率以一定的比例连续增大。这种典型设计的螺杆称为屏障型螺杆。由于屏障螺棱有高低,所以屏障螺纹与机筒壁面之间的间隙也不同^[10],因此,熔体可容易地越过屏障流动;另一方面,屏障螺纹间隙狭小,所以未熔融的固体不可能通过。

1.1.3 熔体输送

熔体输送理论又称流体动力学理论。它研究螺杆均化段在保证物料完全熔融的基础上进一步的均化,并且定温、定压、定量地从机头挤出,以获得稳定的产量和高质量的制品。近年来熔体输送理论得到不断的发展,其中何红等^[11]利用基于宏观和亚宏观可视化试验观察到的单螺杆挤出过程的粒子熔融现象,提出了与宏观熔融模型相结合的粒子熔融渗流模型,得出挤出机内部压力变化与粒子空隙为渗流发生提供条件的结论;袁明君等^[12-14]提出了固体粒子熔融的物理模型和数学模型,进一步研究表明,螺槽表层粒子熔融过程不发生熔体迁移的假设与实际情况差异较大,而存在熔体迁移的模型与试验现象较为接近;螺槽中芯层粒子的封闭球壳结构模型与实际情况也存在一定的差异。

1.2 口模成型

口模是基础系统的重要组成部分,聚合物熔体实际分布取决于聚合物的流动性能、流道的几何形状、通过口模的流率及模头中的温度分布状况。口模流动分析的目的在于计算压力、应力、速度、温度场及挤出产物的尺寸,或按所要求的挤出物形状来确定口模几何结构。涂志刚等^[15]采用粘弹性 PTT 本构模型对聚合物熔体口模挤出胀大进行了三维计算机模拟研究,使挤出胀大的计算趋于简单化,但在模拟计算高维数推进的过程中仍然遭遇到高维问题,因此对于如何提高挤出胀大数值模拟中的临界维数,还有待进一步研究。

口模主要包括三个部分:输送区、过渡区和成型区。在挤出工艺中,口模主要分为平缝模、异型材模、棒材口模、管口模等。下面以平缝模和异型材模为例,对口模成型进行说明。

(1) 平缝模

无论是衣架式还是鱼尾式模头^[16],常用的数值方法是利用建立在物理基础上的控制体积法^[17](代替有限差分法

或有限元法)求解控制方程,决定体积流率与压力的关系。针对平缝模的几何特征,将三维流动形态转化为等效的二维流动网络,将复杂的三维流动问题通过细分使其变得容易求解。在模头几何形状^[18]没有突变的情况下,采用 Hele-Shaw 流动模型可以很好地模拟熔体在平缝中的流动。对于螺旋芯棒薄膜模头^[19],上述方法同样适用。

(2) 异型材模

异型材模头设计面临的主要问题是,如何在将挤出机的熔体过渡到需要的异型材端面形状的同时,保证无降解条件下的流动平衡,即各个出口断面的流速均匀且相等。采用三维有限元法可以分析这样复杂的流动问题,但这不仅需要耗费大量的时间,而且往往无法指导如何改变流道形状来达到流动平衡。目前,通常采用通过建立每个分支流道的压力降和流率的平衡方程来分析优化流道截面形状,也有利用横截面/假想区域法,将异型材口模中的三维问题转变为 $(2+1)$ 维问题求解^[20],利用有限元法计算流道任一截面上的速度分布,由速度分布求得剪切速率和剪切应力,计算出熔体流动过程的粘性耗散能,最后由能量平衡方程计算出熔体的压力降。

1.3 定型与冷却

挤出物离开口模后仍处于高温熔融状态,还具有很大的塑性变形能力,定型与冷却的目的是使挤出物通过降温将形状及时固定下来。若定型与冷却不及时,挤出物往往会在自重的作用下发生变形,导致制品形状和尺寸发生改变。在大多数情况下,定型与冷却是同时进行的^[21],定型只不过是限制挤出物变形条件下的冷却。冷却是一切挤出制品生产过程中必有的工序,冷却不均和降温过快,都会在制品中产生内应力并使制品变形,特别在成型大尺寸截面的管材、棒材和异型材时,更应特别注意。

2 挤出过程的主要工艺参数

挤出制品的质量和生产效率是同原料配方、挤出成型设备及挤出工艺条件等密不可分的,实际生产中需要根据原料的挤出成型工艺性和挤出成型设备结构(主要是螺杆结构、模头结构)特点,合理调整挤出工艺参数。挤出工艺参数主要有机筒温度、口模、螺杆转速、挤出速率和牵引速率等。

2.1 机筒温度

机筒各加热段温度的选择要根据挤出机的结构特点,所用塑料的配方体系及固体物料的形状(粒状、粉状)等进行。单螺杆挤出机主要用粒状原料成型,机筒三段即加料段、压缩段、均化段,以加料段温度为最低,压缩段、均化段温度逐渐上升。双螺杆挤出机几乎都是排气式的,即在机身中段处设有排气孔,并配有真空吸出装置,用于吸出物料中包含的挥发物。这就要求双螺杆挤出机排气口前的温度不能太低,以保证物料在机筒内被送至排气孔处为半塑化状态并包覆于螺槽表面,防止粉状物料被真空吸出。双螺杆机筒的温度一般设定为两端高、中间低,有时加料段的温度还高于均化段^[22]。

2.2 口模温度

口模是制品横截面的成型部件,口模温度过高或过低所产生的后果与机头的影响相似,所不同的是口模温度直接影响产品的质量^[23]。熔融聚合物的传热问题一般包括两个方面:径向的温度分布和轴向的温度差。这两类问题都可以借助三传方程(连续方程、动量方程和能量方程)和本构方程及合理的边界条件、初始条件并经过适当的简化来解决。通常的方法是要先将方程化为无因次的形式,再利用数值方法求解。口模处的温度比机头温度稍低一些,口模与芯模温度差不应过大,否则挤出的制品会出现向内或向外翻或扭曲变形。因此,口模温度的设定除需要考虑所用塑料的配方体系外,还应考虑制品界面的几何形状。

2.3 螺杆转速与挤出速率

挤出速率是指单位时间内挤出机从口模中挤出的制品的质量或长度。螺杆转速是控制挤出速率和制品质量的重要工艺参数:转速增加,机筒内物料的压力增加,挤出速率增加,产量提高,并可强化对物料的剪切,提高料温,降低熔体粘度,有利于物料的充分混合与均匀塑化,但螺杆转速过高、挤出速率过快会造成物料在口模内流动不稳定、离模膨胀加大,使制品表面质量下降,并且可能会出现因冷却时间过短造成制品变形、弯曲;转速过低,挤出速率过慢,物料在机筒内受热时间过长,会造成物料降解,使制品的物理力学性能下降。

2.4 牵引速率

牵引速率直接影响制品壁厚、尺寸公差和性能外观。牵引速率越快,制品壁厚越薄,冷却后的制品在长度方向的收缩率也越大;牵引速率越慢,制品壁厚越厚,且容易导致口模与定型模之间积料。牵引速率必须稳定且与制品挤出速率相匹配,一般是牵引速率略大于挤出线速率。正常生产时,牵引速率应比挤出线速率快1%~10%,以克服型材的离模膨胀。

3 挤出成型新工艺

随着聚合物加工的高效率和应用领域的不断扩大和延伸,挤出成型制品的种类不断出新,挤出成型的新工艺层出不穷,其中主要有反应挤出工艺、固态挤出工艺和共挤出工艺^[24]。

3.1 反应挤出工艺

反应挤出工艺是20世纪60年代后才兴起的一种新技术,是连续地将单体聚合并对现有聚合物进行改性的一种方法^[25],因可以使聚合物性能多样化、功能化且生产连续、工艺操作简单和经济适用而普遍受到重视。该工艺的最大特点是将聚合物的改性、合成与聚合物加工这些传统工艺中分开的操作联合起来。

反应挤出成型技术是可以实现高附加值、低成本的高新技术^[26],已经引起世界化学和聚合物材料科学与工程界的广泛关注,在工业方面发展很快。与原有的挤出成型技术相比,它有明显的优点:节约加工中的能耗;避免了重复加热;

降低了原料成本;在反应挤出阶段,可在生产线上及时调整单体、原料的物性,以保证最终制品的质量^[27]。

反应挤出机是反应挤出的主要设备,一般有较长的长径比、多个加料口和特殊的螺杆结构。它的特点是熔融进料预处理容易;混合分散性和分布性优异;温度控制稳定;可控制整个停留时间分布;可连续加工;未反应单体和副产品可以除去;具有对后反应的限制能力;可进行粘流熔融输送;可连续制造异型制品。

3.2 固态挤出工艺

固态挤出是使聚合物在低于熔点的条件下被挤出口模。固态挤出一般使用单柱塞挤出机,柱塞式挤出机为间歇式操作。柱塞的移动产生正向位移和非常高的压力,挤出时口模内的聚合物发生很大的变形,使得分子严重取向,其效果远大于熔融加工,从而使制品的力学性能大幅度提高。固态挤出有直接固态挤出和静液压挤出两种方法^[28]。在直接固态挤出中,预成型的实心圆棒状物料^[29]被放入料筒,柱塞直接接触固体物料,推动物料从口模中挤出。在静液压挤出中,挤出所需的压力由柱塞经润滑油传递至料锭,料锭形状与口模相配合以防止润滑油漏失。

由于单柱塞挤出机的料筒截面积远大于口模截面积,因此挤压料锭通过口模时需要足够的压力,在力的作用下固体物料产生变形和分子取向。固态挤出中,将料筒截面积与口模截面积之比定义为挤出比。在高挤出比的情况下,基本上不产生熔融挤出中的离模膨胀现象,因而挤出物的尺寸与口模尺寸相等。固态挤出高密度聚乙烯(HPDE)的力学性能优于熔融挤出的HPDE,其拉伸强度与碳素钢相近^[30]。固态挤出的基本过程不连续,不能用普通的聚合物加工设备成型,而且需要很高的压力才能实现挤出。

3.3 共挤出工艺

在塑料制品生产中应用共挤出技术可使制品多样化或多功能化,从而提高制品档次。共挤出工艺由两台以上挤出机完成,可以增大挤出制品的截面积,组成特殊结构和不同颜色、不同材料的复合制品,使制品获得最佳性能。

按照共挤物料的特性,可将共挤出技术分为软硬共挤、芯部发泡共挤、废料共挤、双色共挤等。由三台挤出机共挤出聚氯乙烯(PVC)发泡管材的生产线^[31],比两台挤出机共挤方式控制的挤出工艺条件更准确,内外层和芯部发泡层的厚度尺寸更精确,因此可以获得性能更优异的管材。

随农用薄膜、包装薄膜功能发展的需要,共挤出吹塑薄膜趋于向多台挤出机、多层化发展,目前多层共挤出吹塑膜可达9层。多层共挤对各种聚合物的流变性能、相粘合性能,各挤出机之间的相互匹配有很高的要求,机头流道的设计与制造更为关键。

4 塑料挤出成型技术与设备的发展趋势

作为三大合成材料之一的塑料自问世以来迅猛发展。以塑代钢、以塑代有色金属、以塑代水泥等,被广泛地应用于农业、建材、包装、机械、电子、汽车、家电、石化和国防,以及

人们的日常生活等各个领域。因此可以预测, 在 21 世纪里, 塑料将是人类活动的最主要的原材料之一。由于挤出成型是塑料加工的最主要形式, 因此发展塑料挤出成型技术与设备具有重要意义。主要表现为:

(1) 新型挤出混炼技术与设备的开发。目前国际上用于高分子材料共混改性的新型混炼装备机种^[32]主要有三大类: 同向平行双螺杆挤出机、往复移动式螺杆混炼机和串联式磨盘挤出机。其中中小型同向平行双螺杆挤出机国内已能生产, 但万吨级大型混炼挤压造粒机组全部要依靠进口。同时, 往复移动式螺杆混炼机和串联式磨盘挤出机是制备高填充、高附加值高聚物合金的必要装置, 目前国内对它们的研制刚刚处于样机阶段, 规格不多、品种不全, 具有广阔的发展前景。

(2) 大口径管材挤出的异向平行双螺杆挤出机组、钢塑复合管挤出机组和大型双壁波纹管挤出成型机组及特种塑料管材专用挤出机组^[33]的开发研究。

(3) 复合挤出成型技术和设备^[34]的开发研究。最近, 多层共挤的超宽土工膜、包装用拉伸拉幅平膜、建筑用复合瓦楞板、芯层发泡板材和管材的市场需求量很大, 与此相关的成型技术和装备的开发研究必须引起足够的重视。

(4) CAD/CAE/CAM 技术在塑料工业中的应用研究。应用 CAD/CAE/CAM 技术可使塑料机械的设计从费时、费钱的经验设计—试车修改的模式提高到准确、快速、高精度的现代化水平, 从而提高塑料机械制造业的竞争力。

(5) 在线检测及自动控制技术应用。发达国家注塑机的数字、智能控制和比例^[35]或伺服系统技术^[36]已成熟, 挤出机组可以实现全线联机控制, 并与在线检测装置相连, 根据采集和储存的信号实现反馈控制, 保证了工艺条件的稳定, 提高了产品的精度。此外电器元件的可靠性研究也不容忽视, 国产设备故障率高的一个重要原因是电控制系统的可靠性太差。

可以预料, 未来挤出成型技术的发展方向是: 减少劳动力和材料消耗, 主要体现在尽量缩短更换产品的时间, 尽可能在生产过程中更换及自动更换; 通过增加设备的塑化能力, 加大齿轮扭矩, 进一步加大螺杆长径比来提高生产效率; 突破冷却限制, 提高生产效率^[37]; 在挤出生产线控制系统中不断应用感测技术、控制技术和人工智能技术, 使制品的质

量和生产的稳定性得到进一步的提高。

参考文献

- 1 朱复华. 挤出理论及应用. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- 2 Zhu F, et al. Polym Sci, 1991, 31(15): 1113
- 3 Fang S, et al. Polym Sci, 1991, 31(15): 1117
- 4 Spalding M A, et al. Polym Eng Sci, 1995, 35: 1907
- 5 冯彦洪, 等. 中国塑料, 2002, 16(11): 1
- 6 李建波, 等. 轻工机械, 2002(3): 26
- 7 瞿金平. 华南理工大学学报, 1992(20): 4
- 8 徐百平, 等. 现代塑料加工应用, 2003(4): 51
- 9 江顺亮, 等. 中国塑料, 2003, 17(1): 100
- 10 Barr R A. Advances in Extrusion Technology, 1993(10): 18
- 11 何红, 等. 中国塑料, 2003, 17(2): 102
- 12 袁明君, 等. 中国塑料, 1999, 13(11): 88
- 13 袁明君, 等. 中国塑料, 1999, 13(12): 80
- 14 袁明君, 等. 中国塑料, 2000, 14(1): 93
- 15 涂志刚, 等. 塑料科技, 2003(1): 15
- 16 余晓容. 工程塑料应用, 2002, 30(9): 45
- 17 陈晋南, 等. 中国塑料, 2003, 17(1): 19
- 18 刘斌, 等. 塑料科技, 2003(1): 27
- 19 梁基照. 轻工机械, 2001(2): 34
- 20 徐北, 等. 塑料科技, 2002(3): 25
- 21 王世明, 等. 塑料工业, 2002, 30(5): 14
- 22 罗德, 等. 橡胶技术与装备, 1990(3): 1
- 23 申长雨, 等. 工程塑料应用, 1999, 27(12): 32
- 24 高峰, 等. 工程塑料应用, 2003, 31(6): 52
- 25 林明德, 等. 现代塑料加工应用, 2003(2): 45
- 26 张广成. 现代塑料加工应用, 2001(5): 50
- 27 陈卫丰, 等. 塑料科技, 2001(3): 23
- 28 张丽叶. 挤出成型. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- 29 冯伟刚. 工程塑料应用, 2002, 30(9): 22
- 30 于瀛浩. 工程塑料应用, 2002, 30(10): 18
- 31 秦晓南, 等. 塑料, 2002, 31(3): 51
- 32 江波. 橡塑技术与装备, 2002(10): 1
- 33 江波. 橡塑技术与装备, 2002(11): 5
- 34 江波, 等. 工程塑料应用, 2003, 31(3): 49
- 35 孙利民, 等. 塑料工业, 2002, 30(5): 18
- 36 王红玉, 等. 塑料, 2003, 32(1): 48
- 37 孙铁铠, 等. 中国塑料, 2003, 17(1): 27

DEVELOPMENT OF THE PLASTICS EXTRUSION

Zhang Chunji, Tang Yue, Zhang Huimin

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

ABSTRACT The principle of plastics extrusion, the main processing parameters of extrusion and the new processing of plastics extrusion are introduced, by means of the research of the main processing parameters of extrusion (the cylinder temperature, the die temperature, the screw revolution speed, the extrusion speed and the draw velocity) and the new technology of the plastics extrusion (the reaction extrusion, the solid state extrusion and the co-extrusion), and the development trend of processing equipment has been forecast.

KEYWORDS plastics extrusion, extrusion theory, extrusion technology, extrusion equipment