

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.05.029

螺压设备塑化挤出停留时间评估方法研究进展

赵磊, 罗中浩, 傅陈超, 薛平, 张润

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 螺压设备作为高分子聚合物混炼塑化、加工成型的常用设备之一,可以实现管、板、片、膜等产品的生产。停留时间是反映螺压设备性能和产品质量的重要参数,如何准确评估物料在设备中的停留时间及停留时间分布成为工业界和科研界的研究重点之一。实验和模拟仿真是目前评估螺压设备中物料停留时间最常用的两种方法,基于这两种方法概述了近年来国内外学者围绕该问题取得的研究成果,分析总结了各种方法优缺点,展望了螺压加工停留时间评估方法的未来发展方向。

关键词: 停留时间;螺压;塑化;聚合物;研究进展

中图分类号: TQ315, TQ316.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)05-0194-08

Research progress on plasticizing extrusion residence time assessment methods for screw press equipment

ZHAO Lei, LUO Zhonghao, FU Chenchao, XUE Ping, ZHANG Run

(School of Electromechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : As one of the commonly used equipment for polymer mixing, plasticization and processing, screw pressing equipment can achieve the production of products such as tubes, plates, sheets, and films. Residence time is an important parameter reflecting the performance and product quality of screw pressing equipment. Accurately evaluating the residence time and residence time distribution of materials in the equipment has become one of the research focuses in the industry and scientific research community. Experiments and simulation are currently the two most commonly used methods for evaluating the residence time of materials in screw pressing equipment. Based on these two methods, the research achievements of domestic and foreign scholars on this issue in recent years were summarized, the advantages and disadvantages of various methods were analyzed and summarized, and the future development direction of screw pressing processing residence time evaluation methods was looked forward.

Keywords : residence time ; screw pressure ; plasticization ; polymer ; research progress

随着科学技术与市场需求的发展,人们对高分子聚合物产品的要求越来越高,这就要求我们不断创新现有的设备与技术,以满足实际生产的需要。螺压设备作为高分子聚合物混炼塑化、加工成型的常用设备之一,可以实现管、板、片、膜、异型材等产品的生产。高分子聚合物加工用螺压设备主要包含单螺杆、双螺杆、三螺杆^[1]和行星螺杆等挤出设备,设备结构差异导致物料输送形式不同,其用途也有所差异,例如单螺杆挤出设备主要用于物料的熔融塑化、建压成型,其结构简单、维护方便、性能价格比高^[2];同向双螺杆挤出设备具有优异的混合能力,可通过选配合适的混炼元件实现物料的混合塑化,因而广泛应用于高分子聚合物、食品、药物生产和含能材料加工等领域^[1,3-4]。

然而,目前常见的螺压设备均采用不透明机筒,无法直观知晓物料加工过程中的熔融塑化和混合输送等状况^[5],大部分情况下只能通过制品的热性能、力学性能等物性参数反演物料在机筒内的加工过程,该方法具有极大的滞后性,因此很多学者致力于螺压设备加工过程在线检测技术的研究^[6]。

停留时间(RT)是高分子聚合物在螺压设备加工成型中需关注的关键参数之一。RT能反映物料在螺压设备中从进入到离开的加工总时间^[7],但是由于不同质点的速度存在差异,因此往往以分布函数的形式表示RT的最终结果,即停留时间分布(RTD)。分析研究RT对于揭示螺压加工过程具有重要意义:RT可以用于评价螺压设备的混合能力,为确定特

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52303022),中央高校基本科研业务费专项资金项目(ZY2410)

通信作者: 张润,见习副研究员,主要研究方向为高分子成型技术与装备

收稿日期: 2024-03-07

引用格式: 赵磊,罗中浩,傅陈超,等.螺压设备塑化挤出停留时间评估方法研究进展[J].工程塑料应用,2024,52(5):194-201.

ZHAO Lei, LUO Zhonghao, FU Chenchao, et al. Research progress on plasticizing extrusion residence time assessment methods for screw press equipment[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5): 194-201.

殊材料适用的设备结构(如螺杆构型等)和工艺参数(如螺杆转速、喂料速率以及加工温度等)提供参考^[8],同时可以避免聚合物的降解,提高产品质量。

随着各类高分子聚合物产品的广泛应用,其加工成型用螺压设备RT的研究也逐渐深入。近30年来,用于评估螺压设备RT的方法层出不穷,实验研究中最为广泛是脉冲法,该方法的核心思想是当挤出过程达到稳定后,瞬时在螺压设备加料口引入示踪剂,然后测定出口处示踪剂浓度随时间变化,进而实现物料RT的在线检测^[9]。根据测试原理不同,实验研究中评估RT的方法大致可分为比色法、荧光法、电导率法、超声波法、光强法、红外法等。

近年来,随着模拟仿真软件突飞猛进的发展,可低成本、快速地评估螺压设备的RT,进而为设备结构和工艺参数的优化提供了新思路。笔者主要综述近些年国内外学者在分子聚合物螺压加工中使用的RT评估方法,以期从事相关领域研究的学者提供参考,并通过分析各种方法的利弊,总结展望未来评估螺压设备RT可能的创新方向。

1 实验评估RT的方法

1.1 比色法

比色法是指通过加入颜色染料示踪剂,在挤出端对比颜色变化评估物料在螺压设备中的RTD的方法。比色法通常使用工业相机、色差仪、光电比色计和分光光度计等进行测量,根据颜色与示踪剂含量的关系利用相关软件处理即可得到RTD。

在对颜色数据进行测定时,可以选择使用红绿蓝(RGB)颜色空间或者CIELAB颜色空间(或者称Lab颜色空间)。RGB颜色空间以红(Red)、绿(Green)、蓝(Blue)三种基本色为基础,进行不同程度的叠加,进而产生丰富而广泛的颜色。Lab颜色空间是颜色-对立空间,其中带有维度L值表示明度或亮度,a值表示红绿色度,b值则表示黄蓝色度^[10]。Lab颜色空间相比于RGB颜色空间色域更加宽阔,均匀性也更好,因此很多学者常使用Lab颜色空间来评价料条的颜色变化。一般来说,色差仪等设备初始得到的都是RGB颜色空间,需要通过相关公式进行数据转化才能得到Lab颜色空间^[10]。

Kumar等^[11]开发了一种基于图像处理的非破坏性方法测量同向啮合双螺杆挤出机的RTD,利用彩色数码相机拍摄样本照片、MATLAB软件进行图像处理来获取加工过程的RTD,实验结果证实该方法具有较高的可靠性;同时,通过对比色度计颜色测试结果,发现开发的新方法测试速度更快,偶然因素影响更小。

Villmow等^[12]讨论了啮合同向双螺杆挤出机螺杆构型、螺杆转速和加料量对RT的影响,利用光学检测确定RT,发现工况条件对RT影响很大:螺杆转速和加料量的增加均导致RT的减少,反向输送元件替换正向输送元件可显著增加RT。

Sisay等^[13]使用比色法研究了螺杆转速、进料含水率和加料速率对不同小麦配方混合物的RTD和流动模式的影

响。实验在同向双螺杆挤出机中进行,使用分光光度计分析计量a值。实验结果表明提高加料速率、螺杆转速或含水量,保持其他条件不变,平均RT减少;加料速率比其他两个变量具有更明显的影响。

Kreimer等^[14]研究了含有一定水分的药粉在双螺杆挤出机中的干燥行为,利用比色法原理测定了含水化合物的RTD。实验选用 Fe_2O_3 为示踪剂,用相机记录了挤出物颜色的颜色变化。实验发现提高螺杆转速和加料速率可以减少RT,从而降低干燥过程中的颗粒磨损。

Wahl等^[15]开发了一种在线视频分析方法,使用亲水性聚合物和表面活性剂作为熔融基质,通过引入活性药物成分,视频拍摄双螺杆挤出机挤出端物料,并对视频进行图像分割,然后计算每帧分割像素的平均颜色值,解析拟合颜色曲线来计算评估物料加工过程的RTD;实验表明捏合元件的数量和输送方向以及工艺参数对RTD的影响很大,验证了该在线视频分析方法是评估物料螺压加工过程RTD的可靠测试工具。

金鑫等^[16]为了评估双螺杆挤压机中豌豆蛋白加工过程的RTD,以活性炭作为示踪剂,利用色差仪测定L值,然后根据L值的标准曲线计算示踪剂浓度,进而得到实验的RTD。实验结果显示RTD影响因素显著性排序为:螺杆转速>喂料速度>加工温度。

Wu等^[17]则使用着色性强的食品级染料赤藓红碱B钠盐作为指示剂,利用机器视觉技术处理挤出样品的图像,探究了豌豆蛋白在用同向双螺杆挤出机挤出过程中不同工艺参数对RTD的影响。结果显示随着螺杆转速、喂料速率和初始含水率的增加,物料的RTD均减小,其中喂料速率的影响最为显著,其次是螺杆转速;相应地,喂料速率比螺杆转速对物料混合程度的影响更显著。

比色法方法简单快捷,多数情况下用于对透明物料RTD的测量。对于非透明物料,相关测定装置只能得到料条表面的颜色信息,导致测定误差较大,数据不准。

1.2 荧光法

荧光法采用荧光材料作为示踪剂,其特点在于经高能量光线(常用紫外光)照射后可以发出荧光;同等光照强度下,发出的荧光强度越高所含荧光材料越多。利用荧光法评估塑化挤出物料RT的常见测试装置示意图如图1所示。

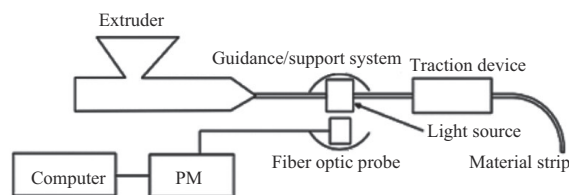


图1 荧光法评估塑化挤出物料RT的测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the testing device for evaluating the RT of plasticized extruded materials using fluorescence method

在检测装置部分,光纤探头是由两部分光纤组成的,其中一部分传导光源发射的光线,另外一部分传导荧光示踪剂产生的荧光到光电倍增管(PM)探测器,示踪剂发出的荧光经过PM与计算机处理后得到相应测试结果。需要注意的是为避免自然光的影响,整个测试过程需在避光条件下进行^[7]。

王炉钢^[9]利用意在紫外光照射下激发产生荧光的原理,研发了一套荧光在线检测装置,在确保该设备可靠的基础上,研究了双螺杆挤出机工艺参数对塑化挤出物料RTD的影响,发现平均RT随喂料速率和螺杆转速的增加均呈减小趋势;同时,实验研究表明反向捏合块元件比正向捏合块元件具有更强的轴向混合能力,物料在反向捏合块元件处的RT更长。

宋晓波^[18]自行研制检测装置在线测量双螺杆挤出机的RTD,测量了不同操作条件下捏合盘元件、齿形盘元件和人字形元件螺杆构型的部分RTD,结果表明提高螺杆转速或喂料速率可以使捏合块元件和齿形盘元件的平均RT减小;直齿形盘元件输送能力最差,混合状况最好;人字形元件混合能力强于30°捏合块和60°捏合块。

周光大等^[19]以普通聚苯乙烯(GPPS)作为物料,含葱GPPS颗粒为示踪剂,研究了机筒剖分式同向双螺杆挤出机RTD演变过程和不同区域物料填充度情况,发现物料在反向螺纹元件处和捏合块区域有较长的累计RT。

张先明等^[8]开发了双探头在线荧光测试装置,以含葱GPPS颗粒为示踪剂研究了螺杆转速和加料量对部分和全局RTD的影响,研究发现开发的测试装置测量数据准确,无论局部、部分还是全局RTD都随着螺杆转速和喂料量的增加向短时间方向移动,且喂料量对RTD曲线形状的影响更大。

Fang等^[20]以含葱共聚物为示踪剂,采用在线荧光监测设备研究了可混融和不可混融的两聚合物在同向双螺杆挤出机中的流动行为,根据聚合物的黏度和在模具处产生的相应压力,发现呈现更高黏度或更高压力的聚合物在机筒中有更长的RT,从而导致更好的轴向混合。

Ji等^[21]开发了一种反应性相容示踪剂,其含葱部分可以通过凝胶渗透色谱和紫外光检测,便于研究大型双螺杆挤出机中反应性聚合物共混物的形态和界面反应的演变。通过荧光法测定RTD的实验证实该示踪剂具有很好的应用性,为反应性混合过程的研究提供了一种工具。

Lepschi等^[22]将荧光示踪粒子注入同向双螺杆的进料段,在料筒内和挤出机出口处用荧光光谱法进行在线测量,研究了螺杆结构对RTD的影响,发现荧光法是一种非常灵敏的方法,螺杆元件的输送角越小,停留时间就越长。

张果^[23-24]基于张先明等^[8]对双螺杆挤出机RTD在线检测研究,开展了单螺杆挤出机RTD的研究。作者基于带有转矩流变仪的单螺杆挤出平台,自行设计了一套荧光在线检测装置,检测了PS在单螺杆挤出加工中的RTD,研究发现螺杆转速越快,RT越小,RTD越窄,挤出机的轴向混合能力越小。

荧光分析法简单快捷,灵敏度较高(少量的荧光示踪剂就可以在高能光线的照射下发出足够强度的荧光),可精确获得RTD结果。

1.3 电导率法

电导率法主要采用导电物质作为示踪剂,如NaCl和KCl等无机盐,同时要求所测物料为非导电性。在加入导电物质后,混合体系就有了导电能力,体系的电导率与其所含无机盐的量有一定的关系。通常来说,电导率随着盐浓度的增大而增加。实验中常使用电导率仪去测定电导率,将两个电极(通常为铂电极或铂黑电极)插入流体中,通过欧姆定律即可测出两电极间的电阻R进而得到流体的电导率。

Unlu等^[25]利用KCl作为示踪剂在双螺杆挤出机模具出口处测量玉米面熔体的电导率,通过比较几何平均RT与使用电导率法测量出的算术平均RT,发现用对数变换时间尺度来计算几何平均RT的方法最能体现双螺杆挤出机的RTD。

Einde等^[26]使用预糊化蜡质玉米淀粉水溶液作为测量流体,NaCl与淀粉溶液混合物作为示踪剂,采用在线方法确定完全填充的透明同向双螺杆挤出机中不同位置的局部RTD,结果表明完全填充的双螺杆挤出机中各种元件都会引起一定的混合,但混合程度不一样,这使得元件的位置分布很重要;在很多情况下局部流动现象无法从全局RTD测量中提取,故有必要去单独考虑局部流动现象。

刘彪等^[27]将羧甲基纤维素钠水溶液作为加工模拟流体、NaCl作为示踪剂,基于电导率法在线测试了自主研制的可视化差速非对称双螺杆挤出设备的RTD,并以红色油性色浆为第二种示踪剂通过比色法做了验证性实验。分析发现反向捏合盘平均RT最大,混合效果更好;转速越高平均RT越小。其实验示意图如图2所示。

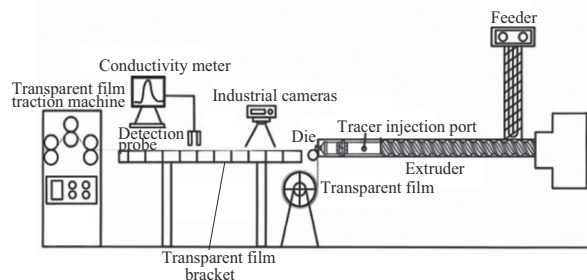


图2 电导率法实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of conductivity method experiment

电导率法简单快捷,易于使用,而且它对物料的透光性没有要求,透明或非透明物料均可。但是该方法只适用于水溶液体系,聚合物体系中离子难以移动,导电性太差,难以测定。

1.4 超声波法

超声波法主要采用固体粉状颗粒作为示踪剂(如CaCO₃等),其原理是超声波振幅衰减程度与示踪剂浓度正相关^[28]。实验中,粉末状示踪剂散布于挤出样品,超声波在遇到挤出

样品中的示踪剂后发生反射与透射,使其强度发生衰减,进而通过解析其振幅衰减曲线就可以评估螺压加工的RTD。

Gendron等^[28]在双螺杆挤出机中以 CaCO_3 为示踪剂,提出了一种对聚合物悬浮液填料浓度敏感的新型超声技术,通过评估示踪剂的超声波特性参数(传播速度和衰减程度),测量了在不同加工条件下的RTD,发现超声波技术非常适合在线监测应用,具有良好的灵敏度。

Sun等^[29]利用新型的探头设计和快速的数据采集系统,将超声波探头安装到双螺杆挤出机机筒、螺杆元件上方等位置处,对熔融段、混合段、输送段及模具出口处进行在线监测,得到局部RTD和全局RTD,并与采用光学法同步测得混合区的RTD对比,发现所提出的超声技术可用于测定挤出过程中挤出机筒内不同位置物料的混合状态,与光学法优势互补,是一种有效的在线测试方法。

Lee等^[30]选用颗粒型 CaCO_3 为示踪剂,使用无损超声设备在同向双螺杆挤出机的模具出口处进行了RTD测量,研究了示踪剂浓度对RTD和物料流动形式的影响,并对不同螺杆转速、喂料速率和螺杆配置下的RTD进行了评估。结果发现增加螺杆转速或喂料速率会降低平均RT和RT的方差,而增加 CaCO_3 浓度会增加平均RT和RT的方差。

Thieleke等^[31]使用 CaCO_3 作为示踪剂,利用超声波技术确定了三种不同挤出机(光滑机筒挤出机、加料段机筒开槽的挤出机和塑化段机筒开槽的挤出机)的RTD,其RT测试原理示意图如图3所示。研究证明在给定的超声波频率下, CaCO_3 颗粒的团聚程度对超声波信号有决定性的影响;对于后两种带强制输送功能的设备而言,在低螺杆转速下,较高的背压使螺压设备的混合效果更佳,当螺杆转速较高时,RTD与背压无关。

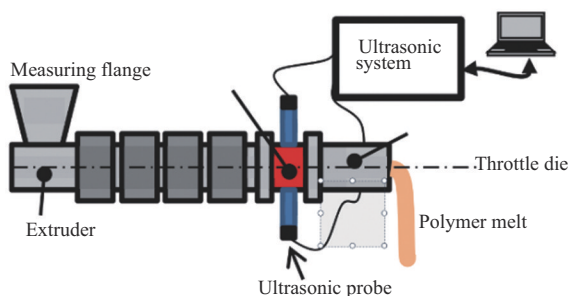


图3 Thieleke等开发的RT测试原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of RT testing principle developed by Thieleke et al

超声波法测试RT具有精确度高,它还可与其他方法搭配更全面反映物料挤出过程的信息,但是超声波法需要昂贵的测量仪器,成本昂贵,适用场合受限。

1.5 示踪粒法

示踪颗粒法通常应用于不加热熔融的情况。一般使用有一定大小、形状的固体颗粒作为示踪剂,比如色母颗粒、一定形状的微小塑料管等。一些模拟仿真也利用该原理进行

RT的测定。利用该方法评估RT的原理:在设备加料口加入基体物料和一定数量的示踪颗粒,经螺压挤出后拍摄挤出口样品的外观形貌,统计样品中示踪颗粒的分布情况,样品中不再出现示踪颗粒视为颗粒全部挤出,通过统计分析示踪颗粒数目随时间变化的分布规律获得特定工艺下的RTD曲线。其实验装置示意图如图4所示。

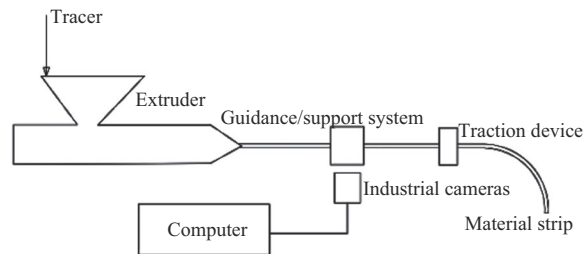


图4 示踪颗粒法评估RT的实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup for evaluating RT using tracer particle method

马秀清^[32]使用羧甲基纤维素钠为模拟物料,极细的短圆柱状塑料为示踪颗粒,研究了轴向循环段的引入对非啮合双螺杆过程中RT及RTD的影响,发现引入轴向循环段后测得的示踪物质起始时间延后,且挤出机的分布混合能力加强,自洁性能变差。此外,马秀清^[33-34]还选用红色珠光色母粒为示踪颗粒,研究了轴向循环段的引入对啮合同向与啮合异向双螺杆挤出机RT及RTD的影响,结果表明两种挤出机在引入轴向循环段后均导致测得示踪剂的起始时间延后,挤出机的分布混合能力增强,但啮合同向双螺杆挤出机自洁性能几乎不变而啮合异向双螺杆挤出机自洁性能变差。

Yu等^[35]以红色细砂为示踪剂,在模具出口处用移动薄膜收集,计数以统计分析,从而评估了羧甲基纤维素钠水溶液在非对称双螺杆挤出机中加工的RTD;构建了填充度理论模型来预测平均RT,结果发现利用该模型理论计算的结果与示踪剂可视化实验结果相一致。

示踪颗粒法方法简单,精确度不高,但是可以很快地评估分析RT情况,多用于粗略测定。

1.6 红外法

红外法是基于热辐射原理来评估测量螺压设备的RTD。样品由于具有温度而辐射电磁波的特性,热辐射的光谱是连续谱,波长覆盖范围理论上可从0至无穷大,一般热辐射主要靠波长较长的可见光和红外光传播,在温度较低时以红外辐射为主。

红外法通常使用红外温度传感器进行测量。其中,热电偶是最常见的红外探测器,它基于材料的热电效应,通过材料的热传导将红外辐射能量转化为电信号,进而计算停留时间分布。红外法精确度不高,不适用于测定微量组分。此外,测量探头无法感知示踪剂在聚合物熔体中的局部径向流动,因此可能会导致RTD测试结果不准确。

Shearer等^[36]使用炭黑为示踪剂,配合红外温度探针考察了双螺杆挤出机输送段和捏合盘处物料的局部RTD,并对该

技术的有效性进行了广泛的评估。研究表明,当炭黑浓度较高时聚合物熔体转变为黑色,炭黑示踪剂减少了探头接收到的热辐射,使得红外探头只能接受来自聚合物表面的红外辐射,导致该方法的精确度不高,只适用于局部平均RT的评估测量。

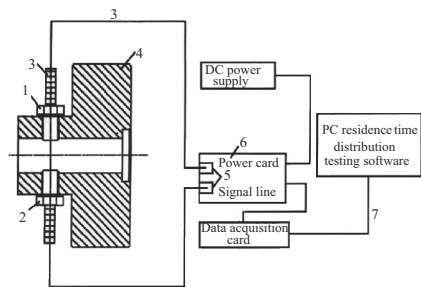
1.7 光强法

光线照射挤出样品时会发生反射与透射,测定反射光或者透射光强度即可评估RTD,该方法多用于全局RTD的在线评估。测定透射光强度要求初始状态下样品为透明状,当加入一些具有颜色的物质(如色母粒)后会导致样品的透射光强度发生变化,利用光强探测装置(如光纤探头)在另一侧对光线强度进行测试后,利用计算机处理就可以确定料条中示踪剂的浓度,进而得到挤出机的RTD;而测定反射光强度不要求样品的透明性,测量设备中光源和探头在样品同侧。

Melo等^[37]提出了一种在线RTD测定装置,该装置由固定在挤出机出口的带有透明硼硅玻璃窗的狭缝模、带有固定发光白炽灯的光学装置和光电电池组成。利用光强法测定双螺杆挤出机在不同螺杆转速、加料速率和螺杆配置下的RT。实验发现RT随着螺杆转速和加料速率的增加而减少,后者的影响更大;在螺杆结构中引入捏合块以改善熔体混合,RT与它们的数量成正比。

Pinheiro等^[38]为了探究链断裂和链支化在高密度聚乙烯热机械降解的作用,利用光线脉冲在聚合物界面产生光散射而降低光强的原理在啮合同向双螺杆挤出机中进行RTD的测量评估,发现普通螺杆元件的输送能力较差,RT较长,此外,使聚合物熔体产生逆流的左旋元件会极大增长RT。

熊辉等^[39-40]自主设计了新型RTD在线测量装置,其测试系统示意图如图5所示,该实验装置结构简单、测量成本低,测试所用示踪剂无污染且获取难度低;利用该设备研究了低密度聚乙烯与示踪色母粒在啮合同向双螺杆挤出机中螺压加工过程,实验结果表明该装置可靠性良好,示踪剂的用量会对光强法评估RT产生很大影响,过量的示踪剂会使传感器测量失真;光源与示踪剂颜色的选择也会影响RTD的测定。



1,2—Fiber optic probe;3—Glass fiber optic;4—Measurement probe;
5—Fiber optic interface;6—Fiber optic sensor;7—USB data cable

图5 基于光强法的RTD在线测量系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of RTD online measurement system based on light intensity method

Wesholowski等^[41]在双螺杆挤出机上测试了紫外-可见分光光度计是否适用于热熔挤出工艺RTD的在线测定。实验中将光透射率转化为吸光度再经过计算得到RTD。此外,还采用高效液相色谱法和紫外-可见分光光谱相结合的方法作为离线参考方法。两种方法所获得的结果总体上具有良好的一致性,在线紫外-可见分光光度计适用于测定RTD。

2 模拟仿真评估RT与RTD的方法

随着时代发展与科技进步,模拟仿真分析研究逐渐发展起来,并慢慢成为解决流体问题的重要方法之一。该方法通常需要建立几何模型、数学模型和有限元模型等理论模型,设定边界条件,进而数值计算得到模拟仿真结果并对其进行后期处理求解RTD。常用的软件有SolidWorks、Polyflow、Fieldview等。利用模拟仿真定性评估影响RT的因素时往往不需要实验,这可以节省大量资源,为工程设计和优化提供有力的支持。

毕超等^[42]使用Polyflow软件对往复式单螺杆销钉挤出机中三类典型螺纹元件(输送元件EZ、混合元件KE、止逆环适应元件ST)的RTD进行了三维动态模拟,分析了工艺参数与物料特性对RTD的影响。模拟结果显示相同工艺条件下平均RT排序依次为ST>KE>EZ,分布方差排序为KE>ST>EZ。

Baron等^[43]提出了一个新的模型来预测啮合同向双螺杆挤出机中的RTD,该模型考虑了控制参数(螺杆速度等)和几何参数(螺杆构型和模具设计)。针对各种操作和几何条件利用MATLAB进行了仿真,并用实验对海藻和聚合物材料两种不同的应用场景进行了验证,结果表明该模型能够预测各种挤压材料的RTD。

宗原等^[44]利用粒子轨迹跟踪技术和有限元法研究了单螺杆挤出机螺杆转速和聚合物弹性对挤出机内RTD的影响,发现提高螺杆转速缩短了物料的停留时间;弹性强的聚合物在流动过程中分子链一直处于拉伸的状态,使其更倾向于以活塞流的方式流动;弹性弱的聚合物其分子链松弛的时间较短,更易发生轴向混合。

Sobhani等^[45]采用混合有限元和虚构域法相结合的方法,研究了聚合物熔体在啮合同向双螺杆挤出机输送区域的流动特性。通过实验与仿真结果的对比,验证了该模型的适用性,挤出机最大剪切速率出现在啮合区域和螺杆顶端,RTD曲线随着螺杆转速的降低而变宽。

于宇等^[46]根据注塑螺杆的工作特点,推导了注塑机螺杆RTD的函数及其方差的计算式,并根据分析推导出的计算式,给出了影响RTD函数与方差的影响因素(如物料的黏度、螺杆转速、背压等)。

Michelangeli等^[47]通过基于离散单元法的数值模型研究了单个聚合物颗粒沿单螺杆挤出机固体输送区的流动,计算质量输出、体积分数、平均停留时间、RTD和速度曲线,并将模型预测结果与实验数据进行了比较,发现两者吻合度很高。

Yang等^[48]利用Polyflow软件模拟了不同喂料速率、螺杆转速和螺杆配置下三角阵列三螺杆挤出机(TTSE)的三维流场。然后通过TTSE对聚丙烯(PP)加工进行了测试,以验证数值模拟。结果表明模拟和实验的轴向压差高度一致,模拟和实验的RTD曲线显示出相同的趋势,模拟和实验的平均RT也是如此。

Muddu等^[49]使用双螺杆湿法造粒过程的历史数据与相关研究方法建立数学模型对RT指标进行半机理预测。研究发现该模型对部分实验数据预测相当好,但是某些实验数据存在偏差,该模型需要更多的数据进行训练与测试,从而获得更强大的预测。

Ismail等^[50]应用人工神经网络(ANN)建模来预测药物制剂在双螺杆造粒机中的平均RT。为了提高ANN的预测能力,采用克里金插值方法,并对两种ANN模型(克里金法前后)进行比较。结果发现所建立的模型在应用克里金插值后能够更准确地预测造粒机中的平均RT;螺杆配置对颗粒在造粒机内的RT影响最大。

Pietsch等^[51]使用等温和非等温建模方法预测小麦面筋在双螺杆挤出机螺杆部分的聚合行为,并通过比色法实验来与预测结果进行比较。实验结果表明喂料速率和螺杆转速的提高会导致平均RT的减少;测量值与预测结果比较可知该模型可用于预测挤出工艺条件下小麦面筋聚合,考虑非等温条件的方法显著提高了小麦面筋聚合的预测准确性。

Bauer等^[52]提出了一种基于光滑粒子流体动力学的模拟方法来预测双螺杆挤出机的局部RTD,模拟了五个几何形状不同的螺杆元件并研究了它们的局部RTD如何随螺杆转速、吞吐量与螺杆元件长度而变化。最后将预测结果与实验数据作比较,发现二者有良好的一致性,证实了该方法的有效性。

张雪晨等^[53]借助SolidWorks和Polyflow等软件分析啮合同向双螺杆挤出机不同螺杆构型对流场的影响,模拟结果表明:在中心距相同的情况下,通过改变螺纹元件的外径和内径之比从而改变螺槽深度,不同的螺槽深度在相同的工艺条件下,同向双螺杆流道内各物理场及混合性能均存在较大差异。

Wu等^[54]为了更好地理解植物蛋白在双螺杆挤出机中的挤出工艺机理,通过数值模拟研究了输送元件、捏合块和反向元件的参数变化和流动特性。结果表明:输送元件可以加快物料微粒的速度;捏合块可以改善大多数颗粒的停滞和聚集;反向元件可以迫使物料回流并与前端物料颗粒混合,但是会增加物料的RT。

张一明等^[55]利用示踪粒子法,基于Polyflow、Solidworks等模拟仿真软件模拟了示踪粒子在啮合异向双螺杆挤出机流道内的运动轨迹,研究了螺杆构型对加工过程各参数的影响。研究结果表明随着螺杆头数的增加,螺槽的宽度增大,聚合物熔体与螺槽接触面积增大,螺杆剪切作用增强,RT增加,混合程度提高。

Ellwanger等^[56]采用运动粒子半隐式模拟方法对部分填充双螺杆挤出机的局部截面进行仿真,研究了不同偏移角捏合块的螺杆配置对填充度、RT和机械应力的影响,为了评估仿真结果的可靠性还进行了相关实验。研究发现改变捏合块中捏合盘的偏移角度会改变捏合块的输送行为,从而产生不同的填充度和平均停留时间;正向捏合块的RT最短,反向捏合块RT最长。

Olofsson等^[57]提出了一种对工业饥饿式单螺杆挤出系统进行建模的新方法,该方法将三维计算流体动力学模型与二维降阶对流扩散模型耦合在一起,得到了一个新的预测模型。模拟研究表明,该模型可以有效应用于工业饥饿式单螺杆挤出系统的填充度和RTD研究,该模型的准确性表明其在挤出系统实时预测和工艺优化方面具有潜在应用。

模拟仿真方法成本低、利用模型可以快速地评估螺压设备的RT,具有一定的灵活性与可重复性,但是设计过程过度依赖计算机,需要大量的计算资源。此外,一些通过模拟研究构建的预测模型,其准确性与可靠性往往需要大量实验数据进行验证,且模拟结果与实际情况也总是存在一定的差异,这就需要不断改进模型以满足实际需求。

3 总结与展望

RTD评估对于研究螺压设备结构、合理设计高分子聚合物挤出工况条件等具有重要意义。总结概述了高分子聚合物螺压加工中基于实验和模拟仿真评估RT的方法,其中比色法操作简便,但是该方法一般只能用于无色/白色基体物料,有色基体物料本身的颜色会影响示踪剂颜色测定的准确性;透射光强法只能用于透明样品RTD的评估;荧光法灵敏度较高,但是实验所需的荧光剂及紫外光受环境因素的影响较大,测试一般需在避光条件下进行;超声波法、红外法和示踪颗粒法都存在精度不高的问题;电导率法原理简单但仅适用于水溶液体系,因此使用范围有限;模拟仿真法通常需要与实验结果相结合以验证其可靠性。

针对目前各种研究RT方法存在的问题,提出以下几点研究方向建议:

(1) 示踪剂开发应用。开发新的、不同种类的示踪剂以满足实验用途,比如某些接枝反应体系中的示踪剂,需要将其合理稳定地与基体物料接枝起来,使得挤出机可以稳定挤出相关聚合物并进行测量。

(2) 挤出机的可视化。研究停留时间最重要的目的是了解挤出机的挤出原理,最好的方法就是在挤出机挤出物料时进行观察,但现如今仍然无法用透明材料去完美地替代挤出机外壳进行相关研究,只能设计一些窗口对某一段进行观察,观察区域小且不方便。

(3) 新测量装置的开发。随着科技的开发,自动化、信息化技术层出不穷,可以在某些方面进行优化设计(比如自动拾取与切断料条、远程开发调控与自适应系统等),对停留时间测量装置的改进与开发成为新的研究方向。

随着社会的进步与科学技术的不断发展,人们对于开发

新的停留时间测试方法和设备要求越来越高,相信在未来可以开发出新的、简单快捷、准确度高的RTD在线测试设备或方法,以推动相关研究的拓展与深化。

参考文献

- [1] 张友根. 上海塑料, 2010(4):25-33.
ZHANG Yougen. Shanghai Plastics, 2010(4):25-33.
- [2] 王贤慧, 等. 橡塑技术与装备, 2006(4):12-16.
WANG Xianhui, et al. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2006(4):12-16.
- [3] 汪传生, 等. 橡胶工业, 2009, 56(5):316-319.
WANG Chuansheng, et al. China Rubber Industry, 2009, 56(5):316-319.
- [4] 高丰. 含能材料双螺杆自动化连续混合与挤出技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
GAO Feng. Automated and Continuous mixing and extrusion technology for energetic materials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [5] 常义, 等. 塑料, 2022, 51(6):94-98, 105.
CHANG Yi, et al. Plastics, 2022, 51(6):94-98, 105.
- [6] CARNEIRO O S, et al. Polymer Testing, 2004, 23(8):925-937.
- [7] 熊辉, 等. 橡塑技术与装备, 2007, 33(11):26-30.
XIONG Hui, et al. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2007, 33(11):26-30.
- [8] 张先明, 等. 高校化学工程学报, 2008(3):435-440.
ZHANG Xianming, et al. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008(3):435-440.
- [9] 王炉钢. 双螺杆挤出机停留时间分布的在线测量[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
WANG Lugang. Online measurement of the residence time distribution in twin-screw extruders[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [10] 刘孝锋, 等. 泉州师范学院学报, 2023, 41(5):51-56.
LIU Xiaofeng, et al. Journal of Quanzhou Normal University, 2023, 41(5):51-56.
- [11] KUMAR A, et al. Journal of Food Engineering, 2006, 75(2):237-244.
- [12] VILLMOW T, et al. Composites Science & Technology, 2010, 70(14):2 045-2 055.
- [13] SISAY M T, et al. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79:213-222.
- [14] KREIMER M, et al. Organic Process Research & Development, 2018, 22(7):813-823.
- [15] WAHL P R, et al. Polymer Engineering & Science, 2018, 58(2):170-179.
- [16] 金鑫, 等. 食品科技, 2021, 46(7):74-80.
JIN Xin, et al. Food Science and Technology, 2021, 46(7):74-80.
- [17] WU Q, et al. Foods, 2023, 12(24).DOI:10.3390/foods12244408.
- [18] 宋晓波. 双螺杆挤出机中局部停留时间分布研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
SONG Xiaobo. Study on local residence time distribution in twin screw extruder[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [19] 周光大, 等. 化工学报, 2006(12):3 025-3 028.
ZHOU Guangda, et al. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2006(12):3 025-3 028.
- [20] FANG H, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(4):2 304-2 312.
- [21] JI W Y, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(43):10 698-10 706.
- [22] LEPSCHI A, et al. Aip Conference, 2015, 1 664(1):683-690.
- [23] 张果. 单螺杆挤出机停留时间分布的在线检测[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
ZHANG Guo. On line testing of residence time distribution of single screw extruder[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.
- [24] 张果, 等. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(4):436-441.
ZHANG Guo, et al. Journal of Zhejiang University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(4):436-441.
- [25] UNLU E, et al. Polymer Engineering & Science, 2001, 41(5):743-751.
- [26] VAN DEN EINDE R M, et al. Polymer Engineering & Science, 2005, 45(3):271-278.
- [27] 刘彪, 等. 工程塑料应用, 2020, 48(5):74-80.
LIU Biao, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5):74-80.
- [28] GENDRON R, et al. Advances in Polymer Technology, 1996, 15(2):111-125.
- [29] SUN Z, et al. Polymer Engineering & Science, 2003, 43(1):102-111.
- [30] LEE S M, et al. Korea-Australia rheology journal, 2005, 17(2):87-95.
- [31] THIELEKE P, et al.//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2019.DOI:10.1063/1.5084856.
- [32] 马秀清. 中国塑料, 2002(12):90-93.
MA Xiuqing. China Plastics, 2002(12):90-93.
- [33] 马秀清. 中国塑料, 2003(9):85-88.
MA Xiuqing. China Plastics, 2003(9):85-88.
- [34] 马秀清. 中国塑料, 2003(11):91-94.
MA Xiuqing. China Plastics, 2003(11):91-94.
- [35] YU H, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62(43):17 997-18 008.
- [36] SHEARER G, et al. Polymer Engineering & Science, 2001, 41(12):2 206-2 215.
- [37] MELO T J A, et al. Polymer Engineering & Science, 2002, 42(1):170-181.
- [38] PINHEIRO L A, et al. Polymer Degradation and Stability, 2004, 86(3):445-453.
- [39] 熊辉, 等. 塑料, 2008, 37(6):106-108.
XIONG Hui, et al. Plastics, 2008, 37(6):106-108.
- [40] 熊辉. 物料停留时间测试方法及装置的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
XIONG Hui. Study on the measurement system and installation of

- residence time distributionD]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [41] WESHOLOWSKI J, et al. *Pharmaceutics*, 2018, 10(2). DOI: 10.3390/pharmaceutics10020049.
- [42] 毕超,等. *工程塑料应用*, 2007(12):72–76.
- BI Chao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2007(12):72–76.
- [43] BARON R, et al. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(10): 3 313–3 321.
- [44] 宗原,等. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(6):673–678.
- ZONG Yuan, et al. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 37(6):673–678.
- [45] SOBHANI H, et al. *Plastics, Rubber and Composites*, 2011, 40(8): 387–396.
- [46] 于宇,等. *橡塑技术与装备*, 2014, 40(2):27–31, 36.
- YU Yu, et al. *Rubber and Plastics Technology and Equipment*, 2014, 40(2):27–31, 36.
- [47] MICHELANGELLI O P, et al. *Powder Technology*, 2014, 264: 401–408.
- [48] YANG K, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2015, 55(1): 156–162.
- [49] MUDDU S V, et al. *Pharmaceutics*, 2021, 13(3). DOI: 10.3390/pharmaceutics13030393.
- [50] ISMAIL H Y, et al. *Powder Technology*, 2019, 343:568–577.
- [51] PIETSCH V L, et al. *Journal of food engineering*, 2019, 246: 67–74.
- [52] BAUER H, et al. *Chemical Engineering Science*, 2022, 247. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117029.
- [53] 张雪晨,等. *食品与机械*, 2022, 38(4):99–103, 206.
- ZHANG Xuechen, et al. *Food and Machinery*, 2022, 38(4): 99–103, 206.
- [54] WU M, et al. *Foods*, 2023, 12(18). DOI:10.3390/foods12183503.
- [55] 张一明,等. *中国塑料*, 2023, 37(10):131–138.
- ZHANG Yiming, et al. *China Plastics*, 2023, 37(10):131–138.
- [56] ELLWANGER F, et al. *Journal of Food Engineering*, 2023, 359. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2023.111665.
- [57] OLIFSSON E H, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 132(2):1111–1125.

(上接第 193 页)

- [42] WANG S L, et al. *Electrochemistry Communications*, 2005, 7(10):1 007–1 012.
- [43] BALSTER J, et al. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2007, 111 (9):2 152–2 165.
- [44] GAO P, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(30): 19 772–19 779.
- [45] GAO F, et al. *ACS Nano*, 2019, 13(7):7 655–7 664.
- [46] ROGHMANS F, et al. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2019, 6(1). DOI:10.1002/admi.201801309.
- [47] KANG Z Y, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(1): 2 335–2 342.
- [48] SEO J, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(26): 16 656–16 663.
- [49] CAPPARELLI C, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(29):26 298–26 306.
- [50] DANG Q K, et al. *Journal of Membrane Science*, 2014, 460: 199–205.
- [51] JOSEPH D, et al. *Journal of Membrane Science*, 2016, 520: 723–730.
- [52] LIU L, et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11 (16):6 319–6 331.
- [53] LEE D H, et al. *Food & Machinery*, 2022, 22(3):1 174–1 182.
- [54] JEON K, et al. *ACS Applied Energy Materials*, 2023, 6(5):3 052–3 060.