

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.013

同向差速双螺杆摄动环元件作用下分散混合性能

李秋霞^{1,2}, 谭寿再², 喻慧文^{1,2}, 杨卫波^{1,2}, 张志旋^{1,2}, 杜遥雪¹, 徐百平^{1,2}

(1. 五邑大学智能制造学部, 广东江门 529020; 2. 广东轻工职业技术学院, 广东省高分子先进加工工程技术研究中心, 广州 510300)

摘要: 针对转速比为1:2的同向差速双螺杆, 提出了一种新型摄动环元件强化分散混合。在自行研制的可视化实验样机上, 开展等速双螺杆和差速双螺杆挤出实验研究。采用浓度为1.5%的羧甲基纤维素钠溶液作为模拟的黏弹流体, 注入红色油性色浆模拟不相容示踪液滴, 出口采用与挤出速度同步的拉膜法采集实验流体, 使用高速高精度相机记录混合过程和出口薄膜上的混合图像。针对不同螺纹构型、不同转速及不同示踪剂初始位置, 在螺槽全充满输送情况下, 研究混合过程和出口示踪剂液滴分散混合。可视化实验结果表明, 两种螺纹构型具有相似的示踪液滴破裂机制, 液滴经过螺棱与机筒间隙时, 在缩颈作用下实现大尺度分离; 新型差速摄动环元件在上下啮合区存在不对称的台阶结构, 折叠拉伸现象更加显著。即使摄动环元件转速比传统双螺杆低, 新型摄动环元件仍然具有更优异分散混合能力, 而且转速越高, 液滴分散混合的优势越显著。摄动环元件同样表现出混合对初始位置的敏感性, 从单头螺杆位置出发的示踪剂液滴分散更均匀。

关键词: 同向差速双螺杆; 摄动环元件; 拉膜法; 可视化

中图分类号: TQ320.65 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0072-06

Dispersive Mixing under Action of Perturbation Ring Elements in Co-rotating Non-twin Screw Extruder

Li Qiuxia^{1,2}, Tan Shouzai², Yu Huiwen^{1,2}, Yang Weibo^{1,2}, Zhang Zhixuan^{1,2}, Du Yaoxue¹, Xu Baiping^{1,2}

(1. Faculty of Intelligent Manufacturing, Wuyi University, Jiangmen 529020, China; 2. Advanced Research Center for Polymer Processing Engineering of Guangdong Province, Guangdong Industry Polytechnic, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Regarding the dual-speed co-rotating non-twin screw geometries with the speed ratio of 1:2, a new type of perturbation ring element was proposed to enhance the dispersive mixing. On the self-developed visual experimental prototype, the experimental investigations on a co-rotating twin extruder and a dual-speed extruder were carried out. Using sodium carboxymethyl cellulose solution (NaCMC) of concentration 1.5% as the simulated viscoelastic fluid, and a drop of the red oily colorant injected as an incompatible tracer droplet, a pulling film at the speed equal to the extrusion speed was used to collect extrudates, and then high-speed cameras with high-precision were adopted to capture the mixing process and the mixing patterns on the pulling film. For different screw elements, rotation speeds and initial tracer positions, the mixing process and the dispersive mixing of the exit tracer droplets were studied under the full-filled conditions of screw channels. Visualization experiment results showed that the two kinds of screw elements shared the similar droplet breakup mechanism. When the droplets passed through the gaps between the flights and the barrel, the necking effect resulted in large-scale breakup; the alternating asymmetric step structures appeared in the upper and bottom intermeshing regions of the perturbation ring elements, which led to more folding and larger stretching action. Even if the rotation speeds of the perturbation ring element couple were lower than those of the traditional twin screw element, the new perturbation ring elements still achieved more excellent dispersive mixing. Moreover, the higher the rotation speed, the more significant the advantage of droplet breakup. The perturbation ring element also followed the sensitivity of mixing to the initial positions, and a droplet released from the single-tip screw side experienced more uniform dispersion.

Keywords: co-rotating non-twin screw extruder; perturbation ring element; pulling film method; visualization

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11972023, 11272093), 广东省基础与应用基础研究基金联合基金项目 (2019A151110316)

通信作者: 徐百平, 教授, 研究方向为高分子材料加工新理论与新方法

收稿日期: 2021-03-16

引用格式: 李秋霞, 谭寿再, 喻慧文, 等. 同向差速双螺杆摄动环元件作用下分散混合性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6): 72-77, 83.

Li Qiuxia, Tan Shouzai, Yu Huiwen, et al. Dispersive mixing under action of perturbation ring elements in co-rotating non-twin screw extruder[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 72-77, 83.

随着高分子材料的迅猛发展,工业界开发各种类型的不同用途成型加工设备,研制成功的成型加工方法多达几十种。挤出成型是成型加工的最基本和最常用的方法之一。经过几十年的发展,螺杆挤出机演变为多种形式。单螺杆塑化挤出机是最早研究和使用的设备,随着时间的推移,在产量和效率方面取得较大提升。另一方面,双螺杆挤出机应用领域不断拓宽,涵盖了在线配混成型、反应挤出等领域,应用范围越来越广泛。目前,应用最普遍的双螺杆挤出机是同向啮合型双螺杆挤出机,这是因为其螺纹元件、捏合块、混合元件以及机筒均采用积木式设计,具有优良互换性和广泛的适应性。同时,喂料速率与双螺杆转速是相互独立的,具有优异的混合性能、排气和自清洁功能,较窄的停留时间分布,不但可以降低物料加工温度,部分正位移输送还能使添加剂的喂料更为容易。

为了探索复杂几何结构及复杂运动边界作用下的混合混炼机理,近年来可视化实验技术和数值模拟技术取得了长足进步。借助可视化实验手段,前人开展了大量关于在双螺杆挤出机输送和混合方面的研究。S. Bawiskar 等^[1]采用透明的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 机筒,进行了流动可视化实验。对积木式化自洁式同向双螺杆挤出机内无进料的固体输送的流动可视化进行了实验研究,观察到了固体颗粒的输送和熔化过程,讨论了可能的熔化机理,发现在啮合区域和螺杆之间顶点附近的区域存在向前的正位移输送。A. Kumar 等^[2]采用红外化学成像的原理,使用高光谱相机收集光谱图像,采用可视化和粒子示踪的方法,对双螺杆内流动和轴向混合进行了定性和定量表征。A. L. Mundozah 等^[3]采用近距离化学成像方法,研究同向双螺杆造粒颗粒的分离,发现了由于剪切力引起的分散与颗粒分解之间存在直接的相关性,这有助于确定影响基本颗粒分离机理及不同成分含量均匀性。O. S. Carneiro 等^[4]研制了全程透明 PMMA 机筒的同向双螺杆挤出机,捕捉到了不同螺槽充满程度情况下物料运动的典型轨迹,通过添加有机硅示踪粒子得到了停留时间分布规律。J. Matic 等^[5]研究了不同类型螺杆元件的流动和混合情况,在全充满和部分充满情况下,对同向双螺杆挤出机中的流动和混合建模,通过跟踪示踪剂颗粒研究分布混合。B. Vergnes 等^[6]研究了同向双螺杆挤出机中熔融聚合物的流动,进行了双螺杆挤出机中熔化的实验研

究,探索了工艺参数(螺杆转速和进料速度)、螺杆轮廓、颗粒尺寸和挤出机尺寸的影响,进一步提出了熔化过程的原始模型。Zhu Linjie 等^[7]使用可视化同向双螺杆挤出机,在线研究了高密度聚乙烯颗粒在不同螺杆配置和操作条件下的熔融情况。发现了同向双螺杆挤出机中聚合物的熔融进程与单螺杆挤出机中的不同。同时,定义了一种新的融化机制,发现聚合物的状态、填充度和捏合块的结构是确定熔融区中捏合块能量消耗的因素。

由于传统的同向双螺杆几何结构和运动的对称性限制了熔融混炼能力的进一步提升,徐百平教授提出了同向差速双螺杆的新概念^[8],力争将混沌混合和拉伸场作用引入到双螺杆的螺槽中,带领团队开展了一系列创新,先后提出了扰动折流板双螺杆、头数渐变双螺杆,获批了一系列发明专利^[9-10],并进行了一系列前期研究^[11-14]。最近,受拓扑混沌思路启发,团队再次提出一种新型同向差速双螺杆摄动环元件^[15],在螺杆底径和顶径之间引入一系列相互啮合的摄动圆弧,形成交替的台阶结构,比早前提出的差速双螺杆结构的流道更为复杂,非对称作用更为明显。为进一步探索新型同向差速双螺杆螺纹元件的分散性能,迫切需要进行实验研究。笔者选取一对相互啮合的螺杆单元,开展新型差速双螺杆摄动环元件液滴破裂分散过程及出口分散混合的可视化实验研究,并同传统等速双螺杆螺纹元件单元进行对比,揭示新型摄动环元件的分散混合理理。

1 实验部分

1.1 原材料

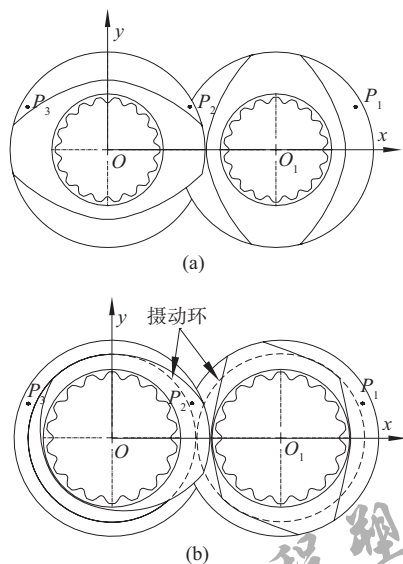
羧甲基纤维素钠 (NaCMC): fv6-7, 取代度 0.72, 重庆力宏精细化工有限公司;

红色油性色浆: 细度 5 μm , 东莞友盟色浆有限公司。

1.2 实验装置

实验采用自制的 SJ35 24 型同向双螺杆全程可视化挤出设备,其可实现两根螺杆等速差速旋转切换。图 1 为新型同向差速双螺杆与传统双螺杆的截面对比。如图 1 所示,新型同向差速双螺杆与传统双螺杆几何参数一致:螺杆直径为 35 mm,中心距 OO_1 为 30.2 mm。摄动环元件几何形状不同,左右螺杆的摄动环半径均为 15 mm,左螺杆为双头,右螺杆为单头,左右螺杆转速比为 1 : 2。机筒结构采用聚碳酸酯 (PC) 材料,机筒间设置轴向定位结构,采用积木式连接,为测量测试段元件处于全充

满的状态下,测试段前后用套筒代替,挤出口膜处设置有与挤出机速度一致的拉膜装置,将工业相机(VCXG-124C型,瑞士堡盟公司)安装在机筒的上下左右四个方向和出口拉膜上方,以记录液滴分散混合过程和出口拉膜处示踪液滴形态,如图2所示,图3为实验单元元件及示踪剂注入位置示意图,图4为不同螺纹构型内示踪液滴拉伸变形图。



a—传统等速双螺杆; b—新型差速双螺杆

图1 螺杆截面对比示意图

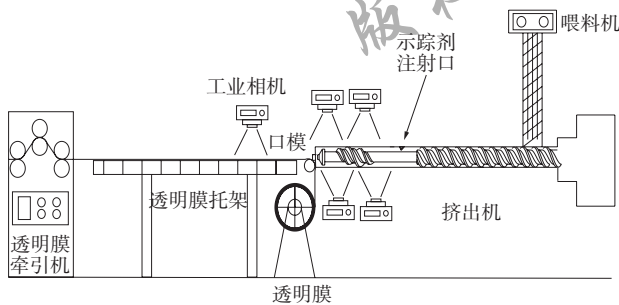


图2 实验示意图

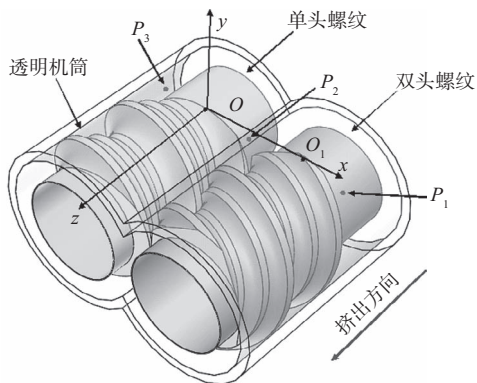
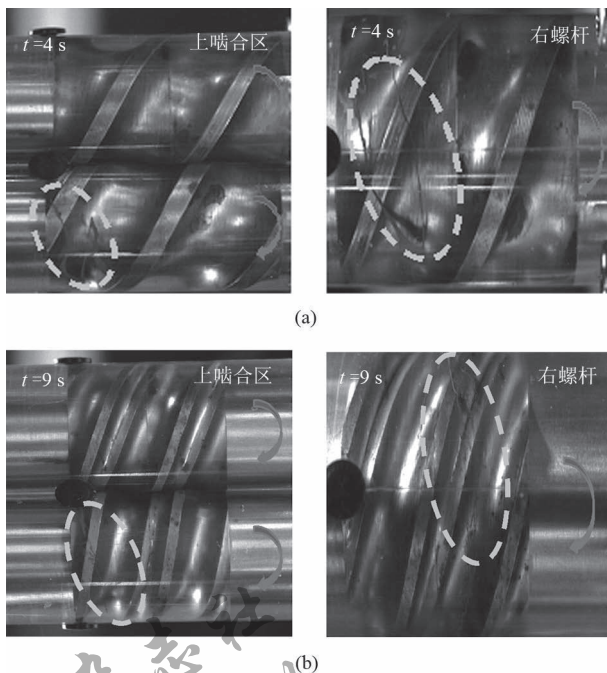


图3 实验单元元件及示踪剂注入位置示意图



a—传统等速双螺杆,速度 30 r/min,示踪剂初始位置为 P_2 ;
b—新型差速双螺杆,速度 15/30 r/min,示踪剂初始位置 P_2

图4 不同螺纹构型示踪液滴拉伸变形

1.3 实验方法

(1) 实验流体的配置。

在 60℃ 下干燥 NaCMC 8 h, 然后配置浓度为 1.5% 的 NaCMC 溶液, 恒温搅拌 4 h, 静置 8 h, 待流体中气泡完全消失后备用。

(2) 流变学实验测试。

使用转矩流变仪 (MCR 302 型, 奥地利 Anton-Paar 公司) 测量 NaCMC 溶液和红色油性色浆的黏弹性^[16], 测试温度恒定为 22℃, 剪切速率 $10^{-3} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$, 两块平行板的直径为 25 mm, 间距为 1 mm; 两种物料的流变特性见图 5, 其中 N 为螺杆转速。

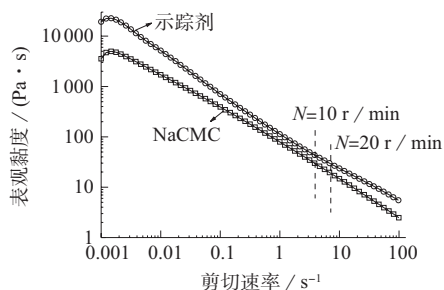


图5 物料的流变特性

(3) 可视化实验过程。

选用摄动环圆弧半径 15 mm 的新型差速螺纹元件单元进行实验, 将对应测试段的透明机筒上设置注射示踪剂的孔, 在 z 正方向的螺纹起头位

置 0 mm 的平面内选择 3 个点,以 mm 为单位,分别为双头注射孔 $P_1(47.7, -7.5)$ 、上捏合区注射孔 $P_2(15.1, -7.5)$ 、单头注射孔 $P_3(-17.5, -7.5)$,如图 3 所示,并安装好橡胶塞,挤出机出口设置速度一样的拉膜装置,以记录出口的示踪剂形态和数目,固定加料频率为 30 Hz (产量为 9.9 kg/h),螺杆速度为 5 / 10, 10 / 20, 15 / 30 r/min。当挤出机内实验流体全充满时,挤出机稳定挤出后停机,注射 0.15 mL 的红色油性色浆,用工业相机记录混合过程和示踪液滴形态。进行传统双螺杆实验时,螺杆转速与差速单头螺杆转速相同,分别为 10, 20, 30 r/min。

(4) 实验数据的提取和最终混合结果表征。

在全充满输送黏弹性流体情况下,为了研究不同螺纹构型作用下挤出机出口拉膜上红色示踪剂液滴的分散、分布情况。采用图片工厂处理软件将采集到的图片进行灰度处理,提高对比度将示踪剂在图像中凸显出来,由于示踪剂为红色,实验流体为无色透明溶液,将图像转化为黑白色,降低后期统计示踪剂形态的难度。采用 Image pro 软件进行示踪液滴统计提取。为研究示踪液滴粒径随时间的变化规律,提取图片样带如图 6 所示, A 为拉膜上示踪液滴

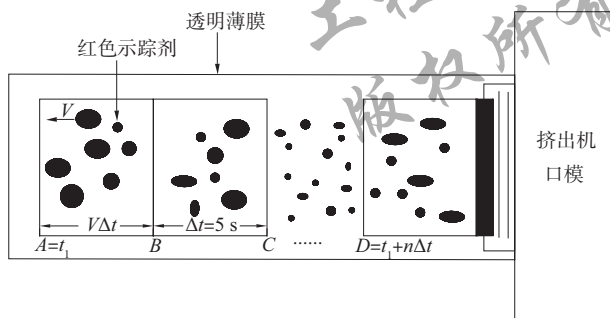


图 6 出口处薄膜牵引物料过程示意图

开始挤出时间, B, C 为示踪液滴形态明显的开始时间, D 为示踪液滴即将挤出完全的开始时间。

粒径和粒径分布是表征颗粒分散性能的重要指标,对液滴的直径进行统计学分析,采用液滴平均直径及其标准偏差法表征物料的混合程度。

统计出口处液滴总数 n , i 代表第 i 个液滴,求得平均粒径 ($\bar{d}$) 为:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

进一步求得粒径的均方差 (σ_d^2) 为:

$$\sigma_d^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 \quad (2)$$

求得标准差 (σ_d) 为:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (3)$$

引入粒径的变异系数 (C_{vd}):

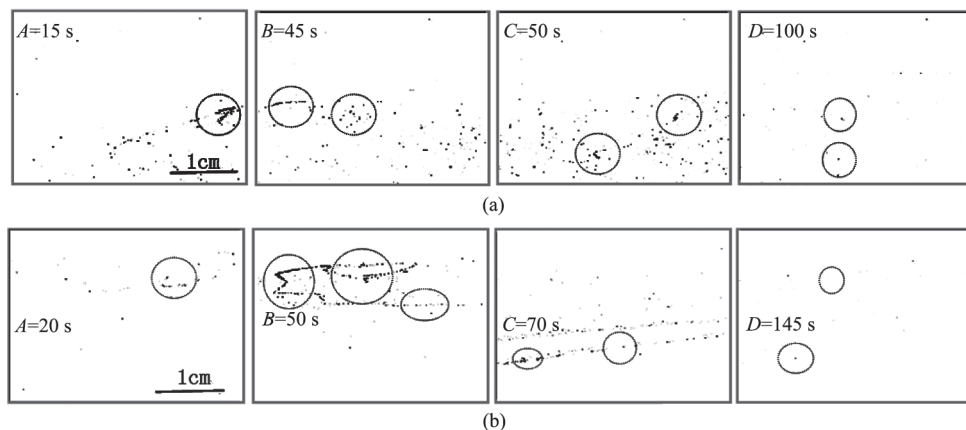
$$C_{vd} = \sigma_d / \bar{d} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 螺纹构型的影响

选用新型同向差速双螺杆和传统等速双螺杆进行对比试验,保持新型同向差速双螺杆的转速为 15 / 30 r/min,传统等速双螺杆的转速为 30 r/min,从上捏合区 P_2 点注射 0.15 mL 的红色示踪剂。示踪液滴演变过程如图 4 所示,两者构型具有相似的示踪液滴破裂机制,该机制为液滴经过螺棱引起的缩颈作用,新型差速双螺杆由于不对称的台阶结构,经过反复拉伸和折叠后,示踪剂团块逐渐减少,而示踪液滴条絮状逐渐增加,直至分散成示踪液滴。

对出口拉膜进行分析,选取 A, B, C 及 D 特殊时刻的图像,如图 7 所示。从图中的圆圈可以看出,



a—传统等速双螺杆; b—新型差速双螺杆

图 7 传统等速双螺杆和新型差速双螺杆出口液滴分布

摄动环元件作用下的示踪液滴形状呈明显的折叠拉伸形态,为细小的圆状液滴,且液滴间的距离较大;传统等速双螺杆的示踪液滴折叠现象不明显,且示踪液滴尺寸较大。不同构型下液滴粒径随时间分布见图8。从图8发现,当时刻小于40 s时,摄动环元件薄膜液滴平均粒径小于传统双螺杆,但当时刻大于40 s时,摄动环元件的平均粒径大于传统双螺杆。图8也揭示了由于摄动环元件导致啮合区的开放效应,停留时间分布变宽。由于摄动环元件引入台阶结构,使得物料在运输过程中被二次分割导致回流折叠拉伸,在台阶环面上产生二次拉伸与剪切作用,使得分散液滴的粒径更小,液滴尺寸更均匀。

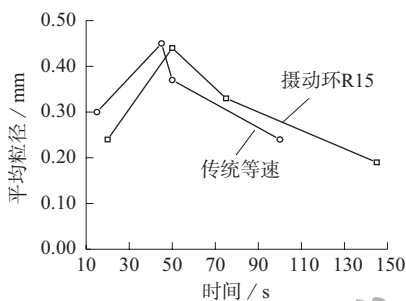


图8 不同构型下液滴粒径随时间分布

G. I. Taylor^[17] 研究发现,液滴发生混合、破裂等形态,主要影响因素为毛细管数(C_a)及黏度比(P_r), C_a 主要受液滴黏性力和表面张力的影响,表述为^[18]:

$$C_a = \frac{\eta_1 \gamma R}{\tau} \quad (5)$$

式中 η_1 为基体黏度; γ 为剪切速率; R 为液滴半径; τ 为界面张力。

当流场确定时,体系存在临界毛细管数 C_{acr} , 当 $C_a > C_{acr}$ 时,液滴形变主要取决于 P_r 。 P_r 常定义为基体黏度与分散相黏度 (η_2) 的比值^[13]:

$$P_r = \eta_2 / \eta_1 \quad (6)$$

G. I. Taylor^[17-18] 指出了黏度比对液滴形变破裂机理的重要性,当 $P_r < 0.1$ 时,液滴较易发生拉伸,破裂难度较大; $0.1 < P_r < 1$ 时,基体中分布的液滴在剪切力的作用下会发生增宽现象;而当分散相黏度与基体黏度相近时,液滴破裂较为容易;当 $P_r > 4$ 时,在简单剪切场作用下,液滴只能形变,无法发生断裂。由于双螺杆周期性啮合作用,尤其是摄动环元件引入的强拉伸扰动作用,在螺槽内引入了与螺杆转动频率相当的中低频大幅振荡作用,对

液滴分散也起了重要作用,笔者将在后续工作中进行进一步研究。

选取的示踪剂和基体的流变特性曲线如图5所示,当剪切速率较小,流动较慢时,两者的表观黏度随剪切速率的变化较小,随着剪切速率升高,黏度迅速降低,剪切变稀现象明显,表现出非牛顿流体特性;两者的表观黏度接近,液滴破裂较为容易,此时液滴破裂分散程度与螺纹构型相关。

选取从示踪液滴开始出现到结束时的完整图像,总体统计示踪液滴直径,如图9所示。传统等速双螺杆粒径范围为 0.13 ~ 1.2 mm; 新型摄动环元件粒径范围为 0.11 mm ~ 1.16 mm,液滴直径在 0.11 ~ 0.5 mm 范围内的比例较大,而大液滴的比例较低。

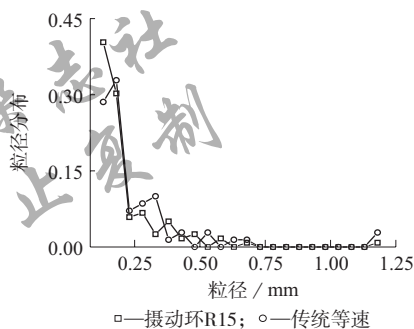


图9 不同螺纹构型下液滴粒径分布

进一步求解示踪液滴数、平均粒径以及标准差等,结果见表1。由表1可看出,与传统等速双螺杆相比,新型差速双螺杆的示踪液滴平均直径、标准差、变异系数均较小,说明新型双螺杆的示踪液滴子分布较为均匀,混合效果较好。

表1 不同螺纹构型下液滴粒径统计结果

螺纹构型	平均粒径 / mm	液滴数 / 个	标准差	变异系数
传统等速	0.28	623	0.33	1.18
新型差速	0.24	927	0.26	1.08

2.2 转速的影响

喂料频率固定为 30 Hz, 改变差速双螺杆转速分别为 5 / 10, 10 / 20, 15 / 30 r/min, 进行可视化实验,从 P_2 位置注射等量的红色示踪剂。统计不同转速下的结果,见图10和表2。随着转速增加,粒径范围主要集中在 0.13 ~ 0.7 mm,小液滴的分布范围增大,平均粒径、粒径标准差以及粒径的变异系数减小,粒径的变异程度越小,说明分散越均匀。由于转速的增加,新型摄动环元件的台阶结构导致更为明显的拉伸和剪切作用,加速了示踪液滴分散混合。

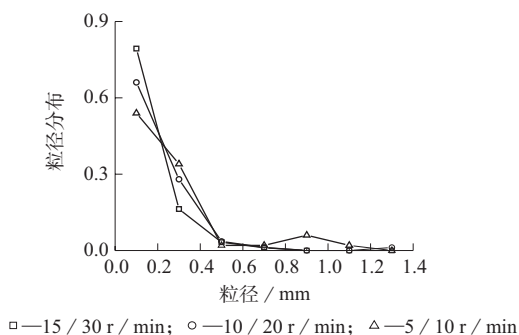


图 10 不同转速下液滴粒径分布

表 2 不同转速下液滴粒径统计结果

螺杆转速 / ($r \cdot \min^{-1}$)	平均粒径 / mm	液滴数 / 个	标准差	变异系数
5 / 10	0.28	451	0.23	0.82
10 / 20	0.22	532	0.15	0.68
15 / 30	0.19	560	0.09	0.47

2.3 示踪剂初始位置的影响

为探索新型摄动环元件对初始喂料位置的敏感性,仍将喂料频率固定在 30 Hz,保持转速为 15 / 30 r/min ,分别在 P_1 , P_2 , P_3 初始位置注射红色示踪剂。统计不同转速下的粒径,结果见图 11 和表 3。 P_3 为示踪剂初始位置时,粒径分布范围主要集中在 0.05 ~ 0.28 mm, P_2 为示踪剂初始位置时,粒径分布范围主要集中在 0.09 ~ 0.33 mm, P_1 为示踪剂初始位置时,粒径分布范围主要集中在 0.12 ~ 1.96 mm。相比之下,在 P_3 位置时平均粒径、粒径标准差以及粒径的变异系数最小,由于新型螺杆为差速结构,单头螺杆转速为双头螺杆的 2 倍,拉伸和剪切作用增加,加快示踪液滴分散,呈现的液滴尺寸较小且分散距离较大。

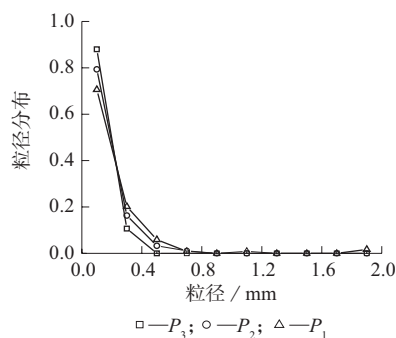
图 11 转速 15 / 30 r/min 时不同示踪剂初始位置液滴粒径分布

表 3 不同初始位置示踪剂液滴粒径统计结果

初始位置	平均粒径 / mm	液滴数 / 个	标准差	变异系数
P1	0.24	927	0.26	1.18
P2	0.19	560	0.09	0.47
P3	0.16	378	0.04	0.25

3 结论

(1) 传统等速双螺杆和新型差速摄动环元件具有相似的大尺度液滴破裂机理,即螺棱机筒间隙引起的液滴缩颈破裂现象;但新型摄动环元件由于不对称的台阶结构,反复折叠拉伸作用及螺棱的切割二分作用更加明显,揭示了螺槽内混沌混合机理。

(2) 与传统双螺杆采用 30 r/min 转速相比,新型差速摄动环元件采用 15 / 30 r/min 转速时液滴平均粒径相当,而标准差更小,液滴面积统计也证实此时摄动环元件具有更优异的分散混合能力。随着差速双螺杆转速的提高,分散混合的优势更加明显。

(3) 对于新型同向差速双摄动环元件,随着螺杆转速的增加,平均粒径和粒径标准差随之减小,物料在螺杆高转速下经历的折叠拉伸和剪切作用更为明显,更有利于物料的分散。当螺杆转速一定时,对于新型差速双螺杆初始位置处于单头螺杆位置与其它位置相比,示踪液滴分散较为均匀,平均粒径和粒径标准差最小。

参考文献

- [1] Bawiskar S, White J L. Solids conveying and melting in a starve fed self-wiping co-rotating twin screw extruder[J]. International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society, 2013, 10(2):105-110.
- [2] Kumar A, Alakarjula M, Vanhoorne V, et al. Linking granulation performance with residence time and granulation liquid distributions in twin-screw granulation: An experimental investigation[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2016, 90:25-37.
- [3] Mundoza A L, Yang J, Tridon C C, et al. Assessing particle segregation using near-infrared chemical imaging in twin screw granulation[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2019. doi:10.1016/j.ijpharm.2019.118541.
- [4] Carneiro O S, Caldeira G, Covas J A. Flow patterns in twin-screw extruders[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92:309-315.
- [5] Matic J, Eitzlmayr A, Kondor I, et al. Particle-based modelling of free-surface flow and distributive mixing in modular co-rotating twin-screw extruders[C]. PARTEC 2016, 2016.
- [6] Vergnes B, Souveton G, Delacour M L, et al. Experimental and theoretical study of polymer melting in a co-rotating[J]. International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society, 2013, 16(4):351-362.
- [7] Zhu Linjie, Geng Xiaozheng. Experimental investigation of polymer pellets melting mechanisms in corotating twin-screw extrusion[J]. Advances in Polymer Technology, 2002, 21(3):188-200.

- 及优化[J]. 中国医疗器械信息, 2017, 23(13):22-23, 132.
- Ding Youjiang, Li Chao, Zhai Yunfei. Orthogonal experiment study and optimization on preparation of bone balloon[J]. China Medical Device Information, 2017, 23(13):22-23, 132.
- [10] Dai G H, Zhang Q Q, Jin G B. A model developed for predicting uniformity of kypho-plasty balloon wall thickness based on the orthogonal test[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(6):1-8.
- [11] Wei H, Yan S, Goel S. Characterization and modeling the mechanical behaviour of poly (l-lactic acid) for the manufacture of bioresorbable vascular scaffolds by stretch blow molding[J]. International Journal of Material Forming, 2020. doi:10.1007/s12289-018-01463-2.
- [12] 靳国宝, 王敏杰, 赵丹阳, 等. 聚合物双腔微管挤出成型工艺试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24):19-27.
- Jin Guobao, Wang Minjie, Zhao Danyang, et al. Experimental investigation of extrusion process of double-lumen micro tube[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24):19-27.
- [13] Madhavi S K, Hanuman N, Rao R. Regression model developed using RSM for predicting withstanding pressure of HDPE pipe during extrusion process[J]. Recent Advances in Material Sciences, 2019(8):177-185.
- [14] 舒海涛, 刘治华, 梁帅, 等. COC 微流控芯片收缩变形工艺参数优化[J]. 塑料, 2020, 49(6):133-136, 142.
- Shu Haitao, Liu Zhihua, Liang Shuai, et al. Optimization of shrinkage and deformation process parameters of COC micro fluidic chip[J]. Plastics, 2020, 49(6):133-136, 142.
- [15] 曾军亮, 王荣吉, 冯晓欣. 注射成型工艺参数对塑料制品翘曲变形的影响研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(3):56-59.
- Zeng Junliang, Wang Rongji, Feng Xiaoxin. Effects of injection molding process parameters on warpage of plastic parts[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(3):56-59.
- [16] 刘良先, 冯志华, 呼春雪, 等. 基于正交试验的 PET 瓶拉伸吹塑优化设计[J]. 中国塑料, 2020, 34(6):73-79.
- Liu Liangxian, Feng Zhihua, Hu Chunxue, et al. Optimization design of PET bottle stretch blow molding based on orthogonal test[J]. China Plastics, 2020, 34(6):73-79.
- (上接第 77 页)
- [8] Xu Baiping, Wang Meigui, He Liang, et al. Self-cleaning plasticizing venting and extruding apparatus by co-rotating non-twin multi-screws and method thereof:US 9174380[P]. 2015-11-03.
- [9] 徐百平, 王玫瑰, 喻慧文. 嵌入式矮螺棱同向非对称多螺杆挤出机及其加工方法: ZL201611127519.1[P]. 2019-05-07.
- Xu Baiping, Wang Meigui, Yu Huiwen. Embedded multi-screw extruder with low-edge codirectional asymmetry and its processing method: ZL201611127519.1[P]. 2019-05-07.
- [10] 徐百平, 王玫瑰, 何亮, 等. 头数渐变全程自洁的同向自洁双螺杆挤出机及其加工方法: ZL201510442207.9[P]. 2019-05-07.
- Xu Baiping, Wang Meigui, He Liang, et al. The same direction self-cleaning twin-screw extruder and a processing method: ZL201510442207.9[P]. 2019-05-07.
- [11] Yu H, Xu B, Liu B, et al. A conveying model of fluid partially filled in a nontwin screw extruder allowing for a positive displacement[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(1):151-160.
- [12] Xu B, Liu Y, He L, et al. Effect of centerline distance on mixing of a non-Newtonian fluid in a cavity with asymmetric rotors[J]. Physics of Fluids, 2019.10.1063/1.5049236.
- [13] Xu B, Liu Y, He L, et al. Numerical study of mixing dynamics inside the novel elements of a corotating nontwin screw extruder[J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(7):2 478-2 496.
- [14] Yu H, Xu B, Wu H, et al. A visualization of flow patterns of viscoelastic fluid partially filled in a co-rotating nontwin screw extruder[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(S1):E24-E32.
- [15] 徐百平, 喻慧文, 杜遥雪. 一种同向多螺杆挤出机及其加工方法: ZL201910349687.2[P]. 2019-04-28.
- Xu Baiping, Yu Huiwen, Du Yaoyue. The utility model relates to a co-direction multi-screw extruder and a processing method: ZL201910349687.2[P]. 2019-04-28.
- [16] Yu H, Xu B, Wu H, et al. Breakup of a viscoelastic droplet in co-rotating non-twin screw channels[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59:15 075-15 086.
- [17] Taylor G I. The viscosity a fluid containing small drops another fluid[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1932, 138:41-48.
- [18] Taylor G I. The formation of emulsions in definable fields of flow[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1934, 146:501-523.