

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.013

同向差速双螺杆引入摄动环元件制备 PP/ABS 复合材料

张志旋^{1,2}, 谭寿再², 杨卫波¹, 喻慧文¹, 杜遥雪^{1,2}, 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: 为取消捏合块的应用, 自主研发了一种差速摄动环螺纹元件, 对转速比为 2:1 的同向差速双螺杆挤出机进行改造, 使用带摄动环的差速双螺杆挤出机、传统等速双螺杆挤出机和差速双螺杆挤出机制备聚丙烯 (PP)/ 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS) 复合材料, 并对 PP/ABS 复合材料的相形态和力学性能进行表征和分析。通过摄动环差速双螺杆挤出机制备的 PP/ABS 复合材料中的分散相表现出最小的直径和最佳均匀分布。与传统双螺杆挤出机相比, 摄动环差速双螺杆挤出机制备的 PP/ABS 复合材料表现出更好的力学性能: 拉伸强度提高 9.21%~21.95%、弯曲强度提高了 16.1%~19.48%、冲击性能提高了 40.56%~77.62%。拉伸和弯曲性能与差速双螺杆相比, 制备的 PP/ABS 复合材料也提高了 6.93%~11.24% 和 8.53%~15.47%。力学性能的提高是由于上下啮合区拓扑流道的变化以及摄动环和机筒间存在的窄间隙产生的拉伸场作用导致的。

关键词: 差速; 同向双螺杆; 摄动环; 力学性能

中图分类号: TQ320.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0063-06

Preparation of PP/ABS Composites by Introducing Perturbation-Ring Element into Dual-Speed Co-rotating Non-Twin Screws Channels

Zhang Zhixuan^{1,2}, Tan Shouzai², Yang Weibo¹, Yu Huiwen¹, Du Yaoxue^{1,2}, 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: A new type of dual-speed perturbation-ring elements was self-developed to replace the traditional kneading elements, which were assembled into co-rotating dual-speed non-twin screw extruder with a speed ratio of 2:1. Polypropylene (PP)/acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) composites were prepared by a traditional co-rotating twin screw extruder, a co-rotating dual-speed non-twin screw extruder, and a co-rotating dual-speed non-twin screw extruder with perturbation-ring elements, respectively. The morphologies and mechanical properties of PP/ABS composites were characterized and analyzed. The dispersive phase droplets prepared via dual-speed non-twin screw extruder exhibited the smallest diameters and best distributions. Compared with the traditional co-rotating non-twin screw extruder, the composites prepared via co-rotating dual-speed non-twin screw extruder exhibit better mechanical properties: an increase of 9.21%-21.95% in tensile strength, 16.1%-19.48% in bending, and 40.56%-77.62% in impact performance, respectively. In addition, the co-rotating dual-speed non-twin screw extruder with perturbation-ring elements results in an increase of 6.93%-11.24% in the tensile strength and 8.53%-15.47% in bending strength when compared with the co-rotating dual-speed non-twin screw extruder. The improves mechanical properties are resulted from the topology change in the upper and bottom intermeshing regions and the elongation provided by the existence of elongation in the gaps between the barrel and perturbation-rings.

Keywords: dual-speed; co-rotating twin screws; perturbation-ring; mechanical property

同向双螺杆挤出机为聚合物、食品、热熔药品成型的重要的混合设备之一。由于传统的同向旋转

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11972023, 11272093), 广东省自然科学基金项目 (2019A1515110316)

通信作者: 徐百平, 教授, 主要研究方向为高分子材料加工新理论与新方法 E-mail: xubaiping2003@163.com

收稿日期: 2021-02-26

引用格式: 张志旋, 谭寿再, 杨卫波, 等. 同向差速双螺杆引入摄动环元件制备 PP/ABS 复合材料 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 63-68.

Zhang Zhixuan, Tan Shouzai, Yang Weibo, et al. Preparation of PP/ABS composites by introducing perturbation-ring element into dual-speed co-rotating twin screws channels[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 63-68.

双螺杆挤出机的两条螺杆具有完全对称性,只是安装时存在固定的相位差,这导致高分子熔体在加工过程中经历的几何空间缺少变换,在螺槽中的流体基本属于层流混合,混合效果有限,主体混合能力还需要进一步提高。混合质量是影响最终产品质量的关键因素,它也是螺杆混合能力的最终指标。由于左右螺杆几何结构中存在的对称性,常规的同向旋转双螺杆挤出机难以实现功能化聚合物制备所需的更高质量的混合^[1-2]。研究表明,聚合物加工过程中的熔滴在拉伸流场下更能有效的破裂^[3-5],国内外学者^[6-7]试图用固定设备产生拉伸流动,瞿金平^[8]发明了一类新型的塑化挤出设备,引入叶片及偏心转子结构,以期产生更高的拉伸流场作用,实现更加优异的分散混合;徐百平等^[9]提出了一种非对称差速双螺杆挤出机的新概念,旨在引入对称破缺和拉伸场,引入混沌场强化原理,以增强熔融和混合。前期的实验研究表明,徐百平等^[10-12]自主研发的差速双螺杆结构的流体输送路径和混合效果与传统的双螺杆结构的不同,数值模拟及可视化实验研究进一步揭示了新型螺杆优异的混合能力^[13-15]。

虽然差速双螺杆元件引入部分拉伸力场的作用,但是上下啮合区的非对称作用仍然有提升空间,为取代捏合块组合的应用,进一步提升熔融混炼效率,徐百平等^[16]又发明一种摄动环同向差速螺纹元件,差速非对称双螺杆引入摄动环结构,进一步打破了新型螺杆的轴对称结构,能够在多个螺杆之间的啮合区产生强扰动作用和强拉伸作用,且实现上下啮合区的拓扑结构明显不同,全面提高了对物料的熔融和塑化混合效果,力争研制一种替代捏合块的新型螺杆结构,将捏合块的侧向间啮合强剪切作用转变为新型元件的径向强拉伸作用,并进一步提高自清洁功能。当差速双螺杆的转速比为2:1时,3种螺纹元件的端面结构对比如图1所示。

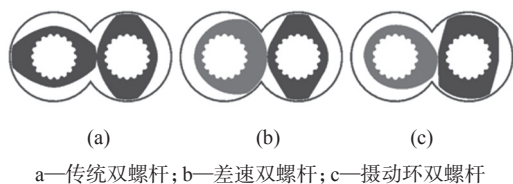


图1 3种螺纹元件截面图

为进一步比较几种螺纹元件的加工效果,笔者分别采用差速双螺杆、传统等速双螺杆作为加工装备,再采用新型摄动环元件替代一段差速螺纹元件和捏合块组合。针对不同质量比配方对聚丙烯(PP)

与丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)简单共混,在不加入增容剂的情况下制备PP/ABS复合材料,进行力学性能测试与扫描电子显微镜(SEM)等表征,揭示新型摄动环元件的混合加工性能,为制备性能更加优异的高分子材料提供新方法和新设备。

1 实验与方法

1.1 主要原材料

PP: PPH-T03, 熔体流动速率(MFR) 3.0 g/10 min, 中国石油化工股份有限公司茂名分公司;

ABS: PA-757型, MFR为1.8 g/10 min, 密度1.05 g/cm³, 维卡软化点105℃, 台湾奇美实业股份有限公司。

1.2 设备及仪器

电子天平: WTC30002型, 准确度III级, 杭州万特衡器有限公司;

电热鼓风干燥箱: SD101-3型, 盐城市苏意暖通设备有限公司;

高速混合机: SHR-10A型, 张家港市雄震塑料机械厂;

同向非对称差速双螺杆挤出机: JWP35型, 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与五邑大学智能制造学部联合研制;

传统等速同向双螺杆挤出机: SHJ35型, 南京杰恩特机电有限公司;

注塑机: CJ110E II型, 震德塑料机械厂;

电子万能试验机: CMT4204型, 新三思材料检测有限公司;

悬臂梁冲击试验机: XJU5.5型, 金建检测仪器有限公司;

SEM: Phenom pure+型, 采用Image Pro软件统计分析分散相粒径, 荷兰Phenom公司。

1.3 同向差速双螺杆摄动环结构及排布组合

摄动环螺纹元件截面构型图如图2所示。左螺杆和右螺杆分别为单头螺杆、双头螺杆, 两螺杆做差速旋转啮合运动时相互刮擦, 实现加工过程自清洁功能。圆弧FA, DE, BC分别构成单头螺杆的大径、小径和摄动圆弧半径, 截面构型沿垂直路径旋转拉伸, 相互啮合的摄动圆弧DE和D₁E₁, D₂E₂形成摄动环结构, 如图2a, 图2b和图2c所示。这种摄动圆弧的引入打破了螺杆横截面轮廓的轴对称性, 而且摄动环结构在啮合区发生周期性交错啮合, 使流道发生拓扑结构变化, 有效地在啮合区引入强拉

伸和强扰动作用,螺杆与机筒内腔流道空间的变化加速了物料的熔融和输送。实验采用摄动环元件改装排气段上游部分螺杆组合。所用螺纹元件内外径分别为 25 mm 和 35 mm,两条螺杆安装中心距为 30.5 mm,单双头摄动环半径分别为 13 mm 和 17 mm,单头导程为 16 mm,双头对应导程为 32 mm,摄动环元件装配见图 2。

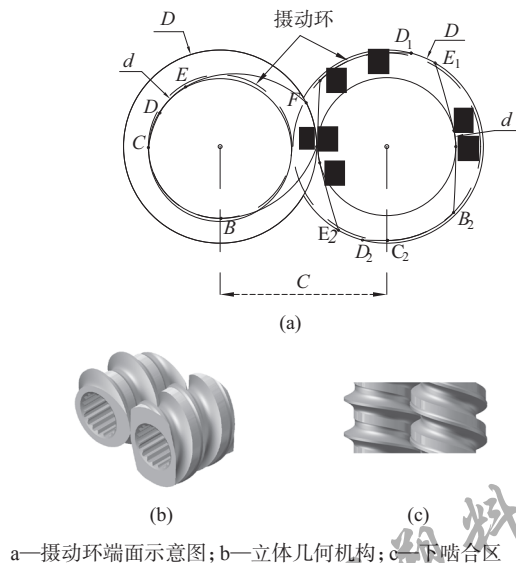


图 2 摄动环螺纹元件几何示意图

整体螺杆组合示意图如图 3 所示。实验使用的差速双螺杆长径比为 39.4,熔融段长度约 301 mm,占总长 21.8%。改装位置位于真空排气口上部,长度 96 mm,约占螺杆总长的 7%,改装结构见图 3c,具体细节见图 3d。传统双螺杆长径比为 40。

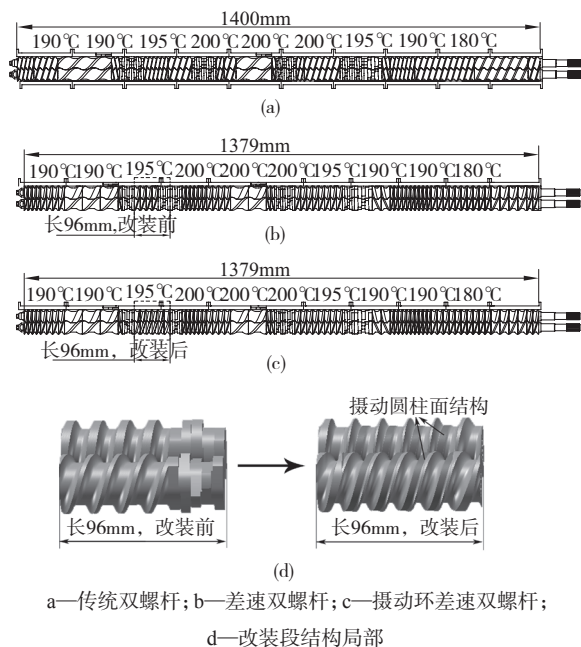


图 3 整体螺杆组合示意图

1.4 试样制备

将原料 PP 与 ABS 置于 80 ℃ 干燥箱中干燥 8 h,干燥完成后按 ABS 质量分数分别为 5%,10%,90% 准确称重各物料后,将配混料放于高速混合机中混合 5 min,确保混合均匀,再加入三种同向双螺杆挤出机中挤出造粒。将挤出的粒料干燥 4 h 后,加入到同一种注塑机注塑成标准试样。

挤出工艺条件:同向差速双螺杆和引入摄动环螺纹元件改装后的新型结构,机筒至口模温度设置相同,如图 3b,依次为 170 / 180 / 190 / 190 / 195 / 200 / 200 / 200 / 195 / 190 / 190 ℃,差速双螺杆转速为 150 / 75 r/min;传统双螺杆转速为 113 / 133 r/min,加料量为 13.2 kg/h。传统等速双螺杆挤出机,机筒至口模的温度如图 3a 所示,依次为 170 / 180 / 190 / 195 / 200 / 200 / 200 / 195 / 190 / 190 ℃。

注塑工艺条件:上节温度 190 ℃,中节温度 200 ℃,下节温度 200 ℃,PP/ABS 共混物射出压 45 MPa,注射二压 40 MPa,保压 40 MPa,加料压 45 MPa,保压时间 2.5 s。

1.5 性能测试与结构表征

拉伸性能按 GB/T 1040.2-2006 测试,室温条件,拉伸速率为 20 mm/min,8 次取平均值;

弯曲性能按 GB/T 9341-2008 测试,室温条件,试验速度为 2 mm/min,挠度为 6.5 mm,8 次取平均值;

冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试,室温,采用 A 型缺口试样,缺口深度为 2 mm,8 次取平均值;

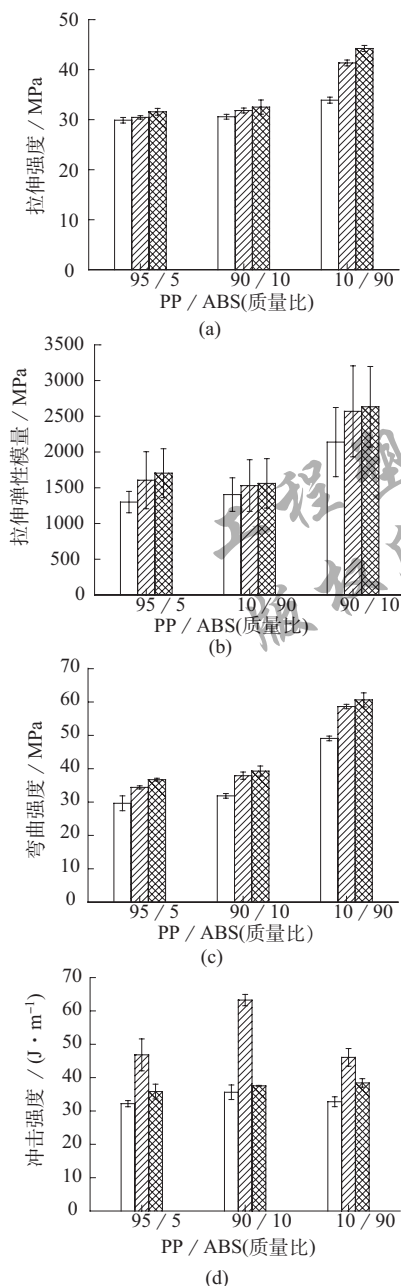
将挤出样条经液氮淬断后表面喷金,然后用 SEM 观察断面并拍照,Image Pro 软件对拍摄的 SEM 图片处理,对分散相粒子尺寸、分布及分散情况进行统计。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

图 4 为 PP/ABS 复合材料的力学性能。由图 4 可见,PP/ABS 共混物的拉伸强度和弯曲强度随着 ABS 含量的增加而增大,ABS 的质量分数由 5% 增加到 10% 时,拉伸强度和弯曲强度的增幅分别为 6.1%~12.1%,6.5%~10.2%,当 ABS 的质量分数从 10% 增加到 90% 时,对应指标增幅分别为 14.6%~25.9%,50.5%~54.7%。这是因为在 ABS 含量较低时,形成 ABS 为分散相、PP 为连续相的共混体系结

构,分散的细小 ABS 颗粒起到刚性粒子增强效果,增加了共混物的力学性能;当 ABS 含量较大时,则转变为 ABS 为连续相,PP 为分散相。实验发现拉伸强度、拉伸弹性模量和弯曲强度呈现上升趋势;而冲击韧性表现不同:当 ABS 含量少量增加时,冲击强度小幅增加;当 ABS 含量较大时,体系的冲击强度则下降。这与材料 PP,ABS 配方比例、分散相的粒径及相对间距、两相体系的相容性及界面的粘结强度有很大的关系,需要进一步深入研究^[16]。



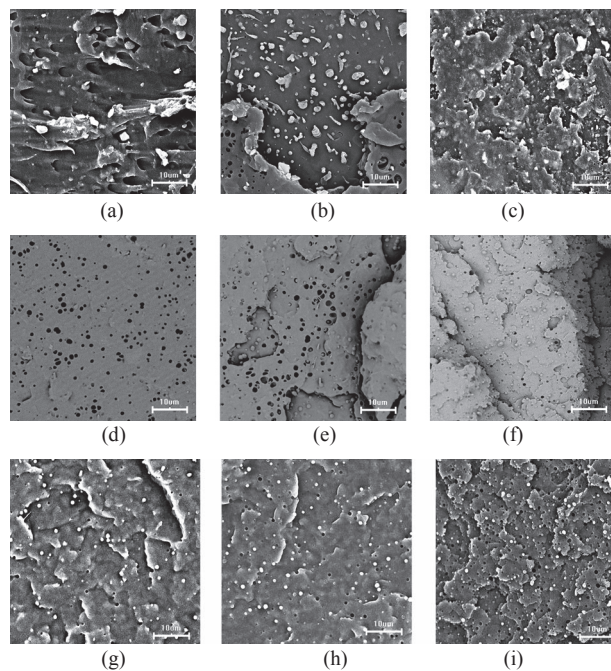
□—传统双螺杆; ▨—差速双螺杆; ▩—摄动环差速双螺杆
a—拉伸强度; b—拉伸弹性模量; c—弯曲强度; d—冲击强度

图4 PP/ABS 复合材料力学性能

由图4还可以看出,在相同配比参数下,差速双螺杆制备的复合材料的性能明显优于传统等速双螺杆,在ABS质量分数为5%,10%,90%时,拉伸强度分别提高9.21%,10.99%,21.95%;弯曲强度分别提高16.1%,18.99%,19.48%;拉伸弹性模量分别提高了23.53%,8.99%,20.14%。改装摄动环元件后,拉伸强度则分别提高了16.78%,23.46%,30.47%;弯曲强度分别提高了34.05%,32.74%,29.67%;拉伸弹性模量分别提高了31.13%,11.17%,23.16%。从图4d可以看到,对于差速双螺杆,改装摄动环元件后的复合材料冲击强度出现下降,但仍然高于传统等速双螺杆。分散相的大小和形状是决定不相容聚合物共混物力学性能的重要因素,分散相间的尺寸间距也会影响功的吸收, Wu Souheng^[17]在橡胶增韧的塑料中,观察到两种行为:在主要通过基体开裂消散断裂能的共混物中,在最佳橡胶粒径下韧性最大,在临界橡胶粒径或当颗粒间距离为临界值时,会发生急剧的脆韧过渡。这种粒径分散尺度带来的影响可能是导致冲击强度降低的原因,今后需要继续深入研究。

2.2 相形态分析

图5为三种螺杆构型下挤出PP/ABS共混物样条的SEM照片。



传统双螺杆: a, b, c—ABS 质量分数分别为 5%, 10%, 90%;
差速双螺杆: d, e, f—ABS 质量分数分别为 5%, 10%, 90%;
差速摄动环元件: g, h, i—ABS 质量分数分别为 5%, 10%, 90%

图5 3种螺杆构型下挤出PP/ABS 共混物样条 SEM 照片

由图 5 可见,传统双螺杆存在比较大的颗粒,且分布、分散混合不均匀,形态差异度比较大;差速双螺杆分散优于传统等速双螺杆,对于差速双螺杆,改装后的搅动环元件后混合效果更优,尽管改装段只占螺杆总长的 7%,但分散相的粒径更小,分布更加均匀。搅动环元件在上啮合区可实现横向纵向均开放(见图 2b 俯视图),物料运输时产生分流流道;同时下啮合区轴向封闭(见图 2c 仰视图),交替式的封闭与开放使得物料可直接返回上一螺槽进行二次混合,每通过一个导程被 2 次分割产生回流现象一次,故改装段最多可发生 2^6 次回流效果,使得物料停留时间变长,混合更加均匀,而且由于搅动环结构的存在,在搅动环面上产生新的拉伸与剪切作用,使得混合物料粒径更小。

表 1、表 2 分别为 PP/ABS 分散相平均粒径及粒径标准差。由表 1、表 2 可见,分散相粒径在 ABS 质量分数为 90% 时最小,在质量分数为 10% 时最大,这是因为当 ABS 质量分数为 10% 时,PP 作为连续相,ABS 作为分散相,ABS 含量增加时因为黏度比 PP 高,所以存在团聚现象使得粒径增加,表现为 ABS 质量分数 10% 时的分散相粒径大于 ABS 质量分数为 5%。当 ABS 质量分数为 90% 时,两相互换,属于低黏度流体在高黏度流体中混合,流动分散更容易,表现为分散相粒径更小。

表 1 PP/ABS 分散相平均粒径 μm

螺杆构型	ABS 质量分数 / %		
	5	10	90
传统双螺杆	1.17	1.24	0.98
差速双螺杆	0.79	0.89	0.69
搅动环差速双螺杆	0.68	0.72	0.60

表 2 PP/ABS 分散相粒径标准差 μm

螺杆构型	ABS 质量分数 / %		
	5	10	90
传统双螺杆	0.61	0.47	0.48
差速双螺杆	0.31	0.32	0.24
搅动环差速双螺杆	0.22	0.21	0.17

与传统双螺杆相比,差速双螺杆分散混合效果更好。当 ABS 质量分数 5% 时,分散相粒径减小 32.5%,粒径标准差减小 49.2%;当 ABS 质量分数 10% 时,分散相粒径减小 28.2%,粒径标准差减小 31.9%;当 ABS 质量分数 90% 时,分散相粒径减小 14.5%,粒径标准差减小 50%。用 Image Pro 软件统计分散粒径和数目,如图 6~图 8 所示。

3 种螺杆混合 PP/ABS 分散相粒径分布,搅动环元件加工 PP/ABS 共混物分散相的平均粒径小

于 $1\ \mu\text{m}$,且分布范围较窄且集中在小于 $1\ \mu\text{m}$ 。而且,引入差速搅动环元件后,分散混合效果进一步提升:当 ABS 质量分数 5% 时,分散相粒径减小 41.8%,粒径标准差减小 63.9%;当 ABS 质量分数 10% 时,分散相粒径减小 41.9%,粒径标准差减小 55.3%;当 ABS 质量分数 90% 时,分散相粒径减小 38.8%,粒径标准差减小 64.6%。特别是,当 ABS 质量分数为 10% 时,搅动环元件引入减小粒径的幅度更加明显,这表明搅动环元件在分散高黏度流体时更具优势。

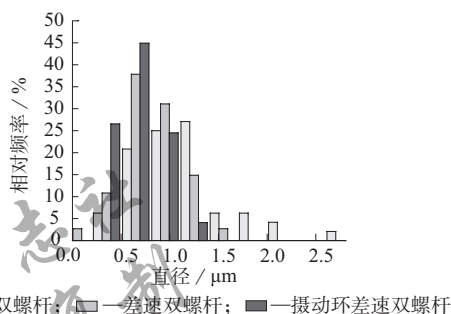


图 6 ABS 质量分数为 5% 时 PP/ABS 粒径分布统计

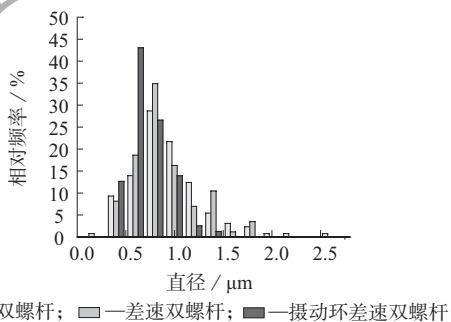


图 7 ABS 质量分数为 10% 时 PP/ABS 粒径分布统计

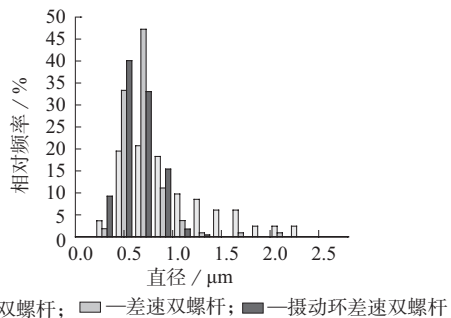


图 8 ABS 质量分数为 90% 时 PP/ABS 粒径分布统计

3 结论

(1) 引入同向差速搅动环螺纹元件,改变上下啮合区流通拓扑结构,引入拉伸力场作用,通过简单共混制备 PP/ABS 复合材料,考察新型螺纹元件加工性能。虽然更换长度只占螺杆总长的 7%,但产生了显著影响,为研制新型无捏合块差速双螺杆挤出

跨出了重要一步。

(2) 与传统的同向双螺杆挤出机相比, SEM 分析结果表明, 差速双螺杆结构制备的样品分散相平均粒径及标准差均小于传统等速双螺杆, 而且摄动环元件的引入可以进一步提高差速双螺杆的分散混合能力, 平均粒径及分布宽度进一步下降: 当 ABS 质量分数 5% 时, 分散相粒径减小 13.92%, 粒径标准差减小 29.03%; 当 ABS 质量分数 10% 时, 分散相粒径减小 19.10%, 粒径标准差减小 34.38%; 当 ABS 质量分数 90% 时, 分散相粒径减小 13.04%, 粒径标准差减小 29.17%。

(3) 与传统的等速双螺杆元件相比, 新型差速摄动环元件制备的复合材料的拉伸强度提高 9.21%~21.95%; 拉伸弹性模量提高 8.99%~23.53%; 弯曲强度及冲击强度提高 16.1%~19.48% 及 40.56%~77.62%。对于差速双螺杆构型, 新型摄动环元件的引入反而导致冲击韧性下降: 当 ABS 质量分数 5% 时, 冲击强度下降 23.5%; 当 ABS 质量分数 10% 时, 冲击强度下降 40.65%; 当 ABS 质量分数 90% 时, 冲击强度下降 16.59%, 导致这种现象的原因需要进一步分析。

参考文献

- [1] Connelly R K, Kokini J L. Examination of the mixing ability of single and twin screw mixers using 2D finite element method simulation with particle tracking[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3):956-969.
- [2] 杜遥雪, 石绍伟, 杜思莹, 等. 混沌螺杆混沌混合性能模拟与实验[J]. 塑料科技, 2019, 47(6):86-89.
Du Yaoxue, Shi Shaowei, Du Siying, et al. Simulation and experiment of chaotic mixing properties for chaos screw[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(6):86-89.
- [3] Sarhangi Fard A, Anderson P D. Simulation of distributive mixing inside mixing elements of co-rotating twin-screw extruders[J]. Computers & Fluids, 2013, 87:79-91.
- [4] Scott C E, Macosko C W. Morphology development during the initial stages of polymer-polymer blending[J]. Polymer, 1995, 36(3):461-470.
- [5] Tjahjadi M, Ottino J M. Stretching and breakup of droplets in chaotic flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 232(1982):191-219.
- [6] Chen Jiajia, Liu Huanyu, Zhang Guizhen, et al. Mechanical properties and thermal behavior of thermoplastic polyurethane toughening polylactide prepared by vane extruder[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2754(862):110-115.
- [7] Qu Jinping, Zhao Xiaoqiang, Li Jianbo. Power consumption analysis of polymer solids discharging process in vane plasticization extruder[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1671(947):1941-1944.
- [8] Qu Jinping. Plasticizing transport method and equipment of polymer materials based on tensile rheology:CN, 200810026054.X[P]. 2008-07-15.
- [9] 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.
- [10] 喻慧文, 徐百平, 庄文柳, 等. 非对称双螺杆制备 ABS/PUR-T/HNTs 阻燃复合材料的性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 44(1):7-11, 28.
Yu Huiwen, Xu Baiping, Zhuang Wenliu, et al. Properties of flame retardant ABS/PUR-T/HNTs composites prepared by novel non-twin screws[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 44(1):7-11, 28.
- [11] Xu Baiping, Liu Yao, Yu Huiwen, et al. A numerical simulation of enhanced mixing of a non-newtonian fluid in a cavity with asymmetric non-twin rotors[J]. Macromolecular Theory and Simulations, 2018.doi.org/10.1002/mats.201800021.
- [12] Xu Baiping, Liu Yao, He Liang, et al. Effect of centerline distance on mixing of a non-newtonian fluid in a cavity with asymmetric rotors[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(2).doi.org/10.1063/1.5049236.
- [13] Yu Huiwen, Xu Baiping, Wu Hongwu, et al. A Visualization of flow patterns of viscoelastic fluid partially filled in a co-rotating nontwin screw extruder[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(1):151-160.
- [14] Xu Baiping, Liu Yao, He Liang. Numerical study of mixing dynamics inside the novel elements of a corotating nontwin screw extruder [J]. Advances in Polymer Technology, 2017, 37(7):1-19.
- [15] Yu Huiwen, Xu Baiping, Wu Hongwu, et al. Breakup of a viscoelastic droplet in co-rotating non-twin screw channels[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(33):15075-15086.
- [16] 徐百平, 喻慧文, 杜遥雪. 一种同向差速多螺杆挤出机以及加工方法 :ZL201910349687.2[P]. 2019-04-28.
Xu Baiping, Yu Huiwen, Du Yaoxue. Co-rotating dual speed multi-screw extruder an processing method thereof:ZL201910349687.2[P]. 2019-04-28.
- [17] Wu Souheng. Formation of dispersed phase in incompatible polymer blends:Interfacial and rheological effects[J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 27(5):335-343.