

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.08.012

聚丙烯/无机纳米粒子在双螺杆挤出机内的分散混合效果数值模拟

程建邦¹, 于兵¹, 陈峰峰¹, 王一飞¹, 李浩杰¹, 姚爱英^{1,2}, 陈占春^{1,2}

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学山西省虚拟仿真实验教学中心, 太原 030024)

摘要: 采用三维有限元数值模拟方法, 研究了聚丙烯(PP)/无机纳米粒子在双螺杆挤出机的三种螺杆组合元件流道内的分散混合效果。通过对比分析三种螺杆组合下无机纳米粒子的剪切应力和剪切速率、停留时间分布及粒径分布等结果, 发现含错列角 45° 捏合块的螺杆组合对其流场中大部分粒子的剪切作用最强, 含错列角 60° 捏合块的螺杆组合次之, 含错列角 90° 捏合块的螺杆组合最弱。与另两种螺杆组合相比, 含错列角 45° 捏合块的螺杆组合流场中, 无机纳米粒子团聚体的数量最少, 剥离出的碎片数量最多, 即在含错列角 45° 捏合块的螺杆组合条件下无机纳米粒子在 PP 熔体中的分散效果最好。

关键词: 聚丙烯; 无机纳米粒子; 螺杆组合; 粒径分布; 分散混合

中图分类号: TQ320.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)08-0068-06

Numerical Simulation of Dispersion and Mixing Effect of Polypropylene / Nano-inorganic Particles in Twin-screw Extruder

Cheng Jianbang¹, Yu Bing¹, Chen Fengfeng¹, Wang Yifei¹, Li Haojie¹, Yao Aiyong¹, Chen Zhanchun^{1,2}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Experimental Teaching Center of Virtual Simulation, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Using a three-dimensional finite element numerical simulation method, the dispersion and mixing effects of polypropylene (PP) / nano-inorganic particles in the flow passages of three screw combination elements of twin-screw extruder were studied. Through comparative analysis of the shear stress and shear rate, residence time distribution and particle size distribution of nano-inorganic particles under the three screw combination elements, it is found that the screw combination containing kneading blocks with a staggered angle of 45° has the strongest shearing effect on most of the particles in the flow field, followed by the screw combination containing kneading blocks with a staggered angle of 60°, and the screw combination containing kneading blocks with a staggered angle of 90° is the weakest combination. Compared with the other two screw combinations, the screw combination containing kneading blocks with a staggered angle of 45° has the least amount of nano-inorganic particle agglomerates in the flow field and the largest number of stripped fragments, which indicates the dispersion effect of nano-inorganic particles in the PP melt turns out to be the best under the conditions of screw combination containing kneading blocks with a staggered angle of 45°.

Keywords: polypropylene; nano-inorganic particle; screw combination; particle size distribution; dispersive mixing

聚丙烯(PP)是一种应用十分广泛的塑料。因为存在耐冲击性不足等缺点,所以在塑料工业生产中,通过填充或共混改性,可以使PP的性能得到显著改善。而将无机纳米粒子与PP熔融共混,制备PP/无机纳米粒子复合材料,可以对PP产生多方面的改性效果^[1]。大量的研究证明,复合材料获得优良的性能表现与无机纳米粒子是否良好分散于PP基体中密切相关,然而无机纳米粒子易于团聚,

很大程度上限制了其应用,也导致其优良特性发挥不充分^[2]。

目前有关无机纳米粒子在聚合物基体中的分散特征研究主要立足于两方面:一方面研究表面活性处理对无机纳米粒子分散效果的影响^[3-4];另一方面则从加工机械与工艺入手,以期实现更好的分散效果^[5]。

双螺杆挤出机是制备聚合物/无机纳米粒子

通信作者: 陈占春, 副教授, 主要从事高聚物加工及形态结构的研究

收稿日期: 2021-04-09

引用格式: 程建邦, 于兵, 陈峰峰, 等. 聚丙烯/无机纳米粒子在双螺杆挤出机内的分散混合效果数值模拟[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(8): 68-73, 80.

Cheng Jianbang, Yu Bing, Chen Fengfeng, et al. Numerical simulation of dispersion and mixing effect of polypropylene / nano-inorganic particles in twin-screw extruder[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8): 68-73, 80.

复合材料的主要设备。从双螺杆挤出过程数值模拟的研究进展来看,挤出过程的数值模拟对象主要是流场特性分析、瞬态混合性能分析、停留时间分布分析和反应挤出分析等^[6],然而有关无机纳米粒子经流场作用后其粒径变化的研究很少。此外,对于双螺杆挤出机螺杆结构的研究以其对流场结构的影响为主^[7-11],对无机纳米粒子与聚合物的共混研究同样少见。对于挤出过程而言,当操作参数和双螺杆挤出机基本结构确定后,通过螺杆元件结构设计调控挤出过程流场等因素是颇为有效的手段^[12]。为了同时满足挤出过程中物料输送、剪切等不同的需求,需要设计不同的螺杆元件结构并对其进行合理组合才能达到这一目的。韩海川等^[9]以常规双螺杆为对照组,研究了双螺杆啮合元件与反螺纹元件对流场的影响。

在双螺杆挤出机中,正螺纹元件主要发挥物料输送的作用,而螺杆中对流场影响显著的元件为啮合块和反螺纹元件,其中反螺纹元件具备更强的分散混合能力,啮合块则具备较好的轴向分布混合性能。然而将正螺纹元件、啮合块与反螺纹元件进行组合的结构设计尚待发掘。因此,笔者首先从结构上设计了三种螺杆组合,其次运用 POLYFLOW 软件对 PP 挤出过程的三维稳态流场进行数值模拟分析,最后对比分析三种螺杆组合的流场对无机纳米粒子在 PP 基体中分散效果的影响,为制备具有良好无机纳米粒子分散效果的 PP 复合材料提供参考。

1 理论模型

1.1 无机纳米粒子团聚体分散理论

邵雷霆等^[13]认为团聚体团聚机理和分形维数会影响团聚体在简单剪切场作用下的分散。R. L. Powell 等^[14]通过实验研究得出团聚体的形状经历了类似椭圆型的变化,在剪切场作用下,团聚体中剥离出颗粒。在此基础上,麻向军等^[15-16]研究认为团聚体先沿着流场力方向拉长变形,变形量达到一定程度时才开始分散,分散方式包括剥蚀和破碎,如图 1 所示。

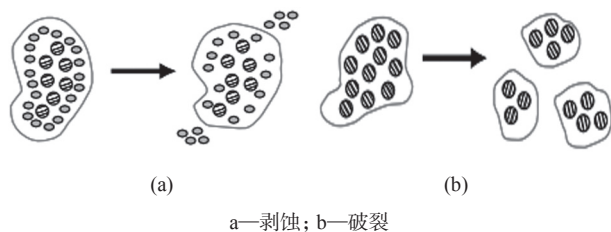


图 1 团聚体的剥蚀和破裂示意图

1.2 假设条件

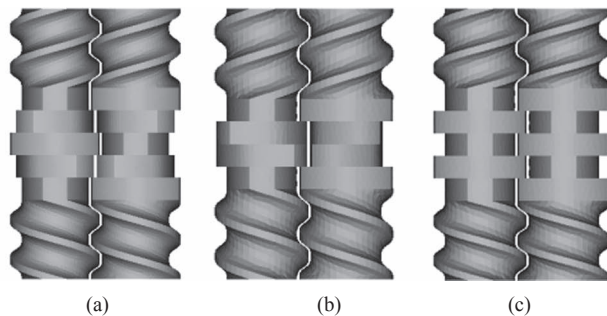
在求解过程中,对无机纳米粒子团聚体做如下假设^[17]:

- (1) 团聚体近似为球体;
- (2) 流场的流动过程中只考虑剪切和拉伸作用;
- (3) 团聚体表面和聚合物熔体之间不存在滑动;
- (4) 当团聚体破裂时,会分解成两块体积近似的碎片,即团聚体沿其径向断面破裂;
- (5) 当团聚体以破裂模式解聚,此时作用在单个团聚体的表面上会有小团聚体或碎片从中分离或剥落。

1.3 几何与有限元模型

(1) 几何模型。

笔者所使用的挤出机螺杆元件分别是正向螺纹输送元件 (CE)、反向螺纹输送元件 (RE) 和啮合块元件 (KE)。KE 中的啮合盘数目为 5,厚度为 5 mm,因错列角不同,所采用的啮合块分别为 KE-45 (错列角为 45°), KE-60 (错列角为 60°) 和 KE-90 (错列角为 90°)。由此建立三种不同的双螺杆组合 CKR45 (含 CE, KE-45 啮合块和 RE)、CKR60 (含 CE, KE-60 啮合块和 RE)、CKR90 (含 CE, KE-90 啮合块和 RE) 的三维模型,如图 2 所示。表 1 给出了采用这三种螺杆组合的双螺杆挤出机基本几何参数。该组合设计中,物料先随着 CE 的掺混和输送作用,获得大的物料界面增长,实现良好的分布混合;KE 是由全啮合、不同数目的捏合盘构成,在捏合盘之间产生一种楔性流动,当物料流动至啮合块处从一个捏合盘流向另一个捏合盘时,产生强



a—CKR45 ; b—CKR60 ; c—CKR90

图 2 螺杆组合示意图

表 1 双螺杆挤出机基本几何参数

挤出机几何参数	数值	mm
机筒内径	33	
螺杆顶径	32	
螺杆根径	26	
螺杆中心距	30	
螺纹间隙	0.5	

烈的横向混合与剪切,促进无机纳米粒子的分散; RE 会使熔体反向回流,由于物料经过多次由 KE 形成的高剪切区,对于 PP/无机纳米粒子体系而言,无机纳米粒子的分散效果会得到较大的提升。

(2) 有限元模型。

图 3 为用来计算的流场网格模型,采用六面体网格划分。

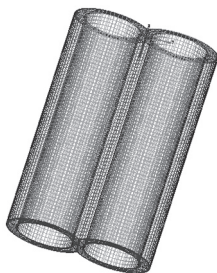


图 3 流体网格模型

2 数学模型

文献 [9] 对模拟过程中的假设条件和描述流体的方程做了详细介绍,因此在这里不再赘述。

笔者用到的统计学函数有累积概率函数和概率密度函数,分别如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$F(x)=P\{x \leq a\} \quad (1)$$

$$f(x)=\frac{\partial F(x)}{\partial x} \quad (2)$$

式 (1) 中 x 为变量, $P\{x \leq a\}$ 表示 x 小于等于 a 的概率;式 (2) 中 $f(x)$ 是 $F(x)$ 对 x 的偏导数。

模拟采用的物料为 PP,用到的 Bird-Carreau 黏度模型参数有零剪切黏度、松弛时间和非牛顿指数,其值分别为 $12\,130\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 1.64 s 和 0.32 。

3 结果与讨论

采用粒子轨迹示踪技术^[18],计算初始布置在流体区域入口的 2000 个示踪粒子在双螺杆内的运动轨迹。在此基础上,利用 Polystat 模块对示踪粒子沿轨迹的流场参数进行统计分析,建立流场混合性能评价指标体系。

3.1 剪切应力与剪切速率

在粒子最大剪切应力(速率)分布曲线中,纵坐标粒子百分比表示受某一最大剪切应力(速率)下的粒子占粒子总数的百分数,粒子百分比越小,表示有更多的粒子所经受的剪切应力大于该最大剪切应力。图 4 为三种螺杆组合流道内粒子最大剪切应力分布曲线。由图 4 可知,在相同最大剪切应力值下,CKR45 对应的粒子百分比始终低于 CKR60 与 CKR90,说明 CKR45 中有更多的粒子经受了更大

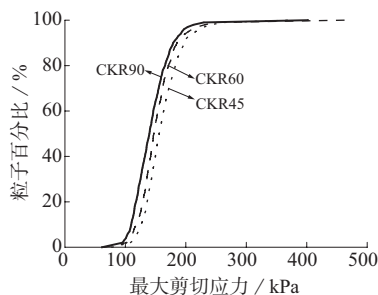


图 4 三种螺杆组合流道内粒子最大剪切应力分布曲线的剪切应力。

表 2 列出粒子百分比分别为 50%,70% 和 90% 时三种螺杆组合所内提供的最大剪切应力。由表 2 分析可知,当粒子百分比为 50% 时,CKR45 中粒子所受的最大剪切应力最大,为 155.7 kPa ;CKR60 次之,为 146.9 kPa ;CKR90 最小,为 139.7 kPa 。同样,在相同粒子百分比下,CKR45 中的粒子所受最大剪切应力始终大于另两种组合,从而表明 CKR45 的剪切效果最佳。

粒子百分比 / %	螺杆组合		
	CKR90	CKR60	CKR45
50	139.7	146.9	155.7
70	155.1	161.3	171.6
90	179.1	185.5	197.7

图 5 为三种螺杆组合流道内粒子的最大剪切速率分布曲线。最大剪切速率为 500 s^{-1} 时,粒子会经历较高的剪切作用,由图 5 可以看出, 500 s^{-1} 对应的粒子百分比从左到右依次为 41%,31%,23%,这表明,在 CKR90, CKR60 和 CKR45 中,分别有 59%,69%,77% 的粒子会经历大于 500 s^{-1} 的剪切速率。由曲线的排列位置可以看出,CKR45 流场中粒子经受高剪切速率的粒子数量最大,CKR60 次之,CKR90 最小,表明 CKR45 流场中的剪切效果更好,这与图 4 中所分析的结果一致。

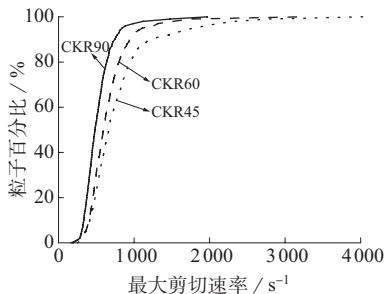


图 5 三种螺杆组合流道内粒子最大剪切速率分布曲线

3.2 停留时间分布

停留时间分布是衡量螺杆软件轴向混合性能的重要指标。图 6 为三种螺杆组合下粒子的停留时

间分布图,其中横坐标时间代表粒子流入(或流出)混合腔室的时间,纵坐标停留时间分布对应某一时刻下停留在流场中的粒子数量占粒子总数的百分数。由图6可以看出,CKR45对应的停留时间分布曲线在横坐标时间的分布上相对较宽,另外,纵坐标停留时间分布达到峰值时对应的时间也最长,故该组合下无机纳米粒子所受的剪切混合时间更久,所以对比CKR60和CKR90,CKR45有更好的混合效果,纳米粒子团聚体破裂的概率更高。

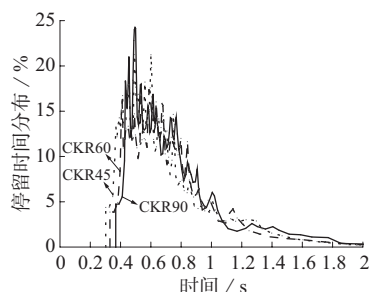
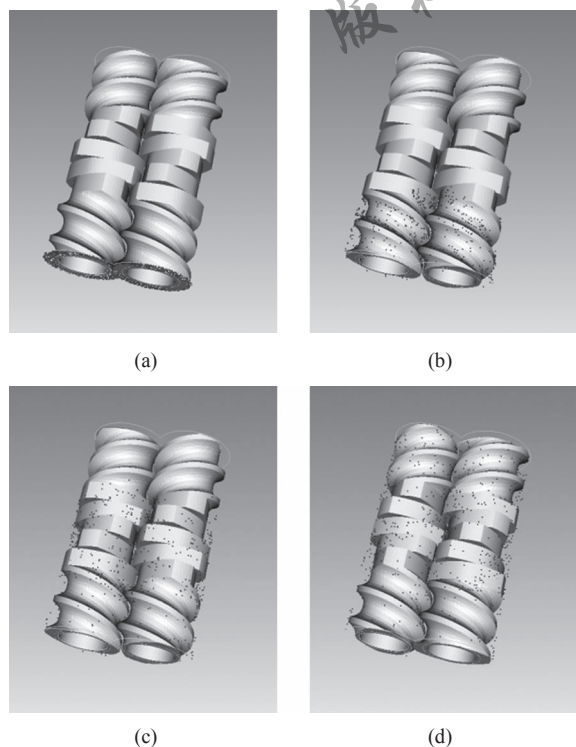


图6 三种螺杆组合下粒子停留时间分布图

图7为不同螺杆转动时间下CKR45挤出过程中粒子的分布状态图。由图7可以看出,随着螺杆的转动,粒子沿着挤出方向不断流动。当螺杆转动0.5 s时,CKR45中的粒子已经流过第一节CE并到达KE的第一块捏合盘位置,而转动时间为1 s时,粒子已经流过KE,到达RE底部,当螺杆转动



螺杆转动时间:a—0 s;b—0.5 s;c—1 s;d—2 s

图7 不同螺杆转动时间下CKR45挤出过程中粒子的分布状态图

2 s时,熔体中有粒子流动至挤出口,此时大多数粒子布满整个双螺杆,达到均匀混合的分布状态。

3.3 粒径分布函数

粒径分布是指在某一时刻的无机纳米粒子团聚体群中,不同粒径的团聚体所占的百分数。图8为不同时间的螺杆组合CKR45的粒径分布图。由图8可知,CKR45内初始时刻的团聚体粒径分布是以初始粒径25 μm 为中心的高斯分布,粒径集中在20~30 μm 范围内。随着混合进行,曲线出现了两个区域,右侧区域表示团聚体因剪切破裂生成了尺寸更小的团聚体,而左侧区域则表示产生了尺寸更小的碎片,此变化是由纳米粒子团聚体表面继续受流场剪切从而剥离出尺寸更小的碎片所导致的。由不同时刻下曲线的变化可知,曲线左侧区域所包含的面积不断增大,对应团聚体破裂生成的碎片粒径范围在0~2 μm ,且数量在不断增加。右侧区域中曲线的顶点由初始时刻25 μm 到2 s时对应的17 μm ,保持不断下降的趋势,即不断生成尺寸更小的团聚体。其它两种螺杆组合中粒径分布均发生类似的明显变化。

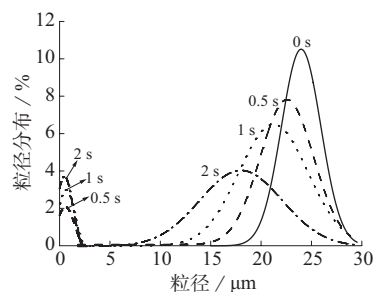


图8 不同时间的螺杆组合CKR45的粒径分布图

为了比较三种螺杆组合在每一时刻的粒径变化和分布情况,分别对时间为0.5,1 s和2 s时,作不同结构的粒径分布图并进行比较,如图9所示。

由图9a可以看出,时间为0.5 s时,观察曲线的右侧区域,三种螺杆组合流场作用下的团聚体粒径大多分布在23 μm 左右,此时生成新的团聚体粒径分布范围为15~30 μm ,由曲线纵坐标对比可知,在该粒径区域的团聚体所占比例大小依次为CKR90 > CKR60 > CKR45。观察曲线左侧区域,三种螺杆组合剪切作用剥离出的碎片粒径范围为0~2 μm ,此时该区域面积大小依次为CKR45 > CKR60 > CKR90。

由图9b可见,时间为1 s时,曲线的右侧区域,横坐标的数值范围较0.5 s时更宽,对应的粒径范围为12~30 μm ,说明流场中破碎出数量更多、体

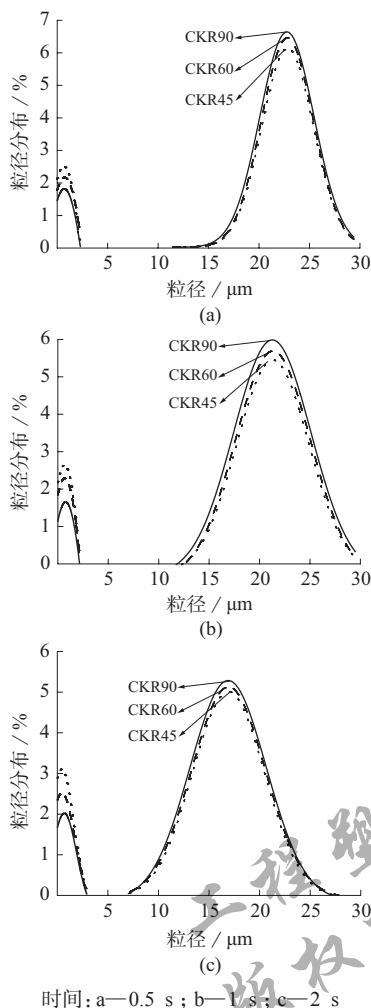


图9 不同时间三种螺杆组合粒径分布图

积更小的团聚体,团聚体解聚破裂程度进一步增强,对比曲线纵坐标可知,在此粒径范围内团聚体所占比例大小依次为 CKR90 > CKR60 > CKR45。左侧区域的曲线变化与 0.5 s 时相似,此时三条曲线的峰值按照 CKR90 < CKR60 < CKR45 顺序依次增大,表明流场中剥离出 0~2 μm 碎片数目在增大。

由图 9c 可看出,时间为 2 s 时,曲线的右侧区域,此时横坐标对应的粒径范围为 7~27 μm ,团聚体的粒径范围最大,其中粒径为 17 μm 的团聚体数量最多,因此三种螺杆组合流场作用下的团聚体粒径大多分布在 17 μm 左右。由曲线纵坐标对比可知,粒径在 7~27 μm 范围团聚体所占比例大小依次为 CKR90 > CKR60 > CKR45。

对比图 9a、图 9b、图 9c 的右侧区域,CKR45 对应曲线下降趋势均大于 CKR60 和 CKR90,表示 CKR45 流场中团聚体的破裂速度最快,CKR60 次之,CKR90 较两者最弱。

对比图 9a、图 9b、图 9c 的左侧区域,CKR45 的曲线与坐标轴围成的面积均大于 CKR60 和 CKR90,表明 CKR45 中的流场对小团聚体的剪切作用最强,团聚体破裂出的碎片最多,CKR60 次之并强于 CKR90。随着时间的增加,右侧曲线不断下移,团聚体粒径的范围更广,而左侧曲线与坐标轴围成的面积越来越大。左右两侧的曲线变化综合表明:因破裂而得到的小团聚体和粒子碎片不断增多,无机粒子在聚合物基体中的混合效果变好。

对粒径分布函数求解积分,即得到累积粒径分布函数,如图 10 所示。图 10 中横坐标左侧区域和右侧区域分别对应图 9 粒径分布曲线中左右两侧区域。由图 10 中不同螺杆组合对应的纵坐标值对比可以看出,CKR45 在左侧区域的纵坐标数值最高,得到的破碎粒子及碎片最多,而在右侧区域由破碎得到的小团聚体较少。因为 CKR45 所提供的较强

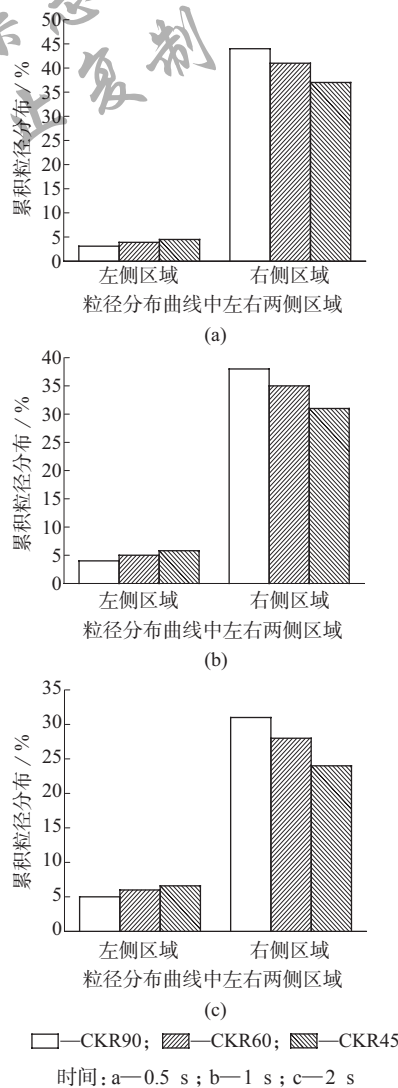


图10 不同时间三种螺杆组合累积粒径分布图

的剪切作用,使团聚体继续破碎产生更小粒径的团聚体速度更快,而小粒径团聚体表面会在流场的剪切作用下剥离出更多的碎片,因而从左侧区域处可观察到,其累积粒径分布纵坐标值更高。随着时间的增大(由0 s到2 s),共混程度越深,左侧区域处的纵坐标值不断增大,反观右侧区域处的纵坐标数值不断减小,与图9呈现的规律一致。

4 结论

(1) 由粒子经历的最大剪切应力和最大剪切速率分布曲线表明,带有错列角 45° 啮合块的双螺杆对其流场中大部分粒子的剪切作用最强、带错列角 60° 啮合块的双螺杆的次之,带错列角 90° 啮合块的双螺杆最弱。

(2) 无机纳米粒子粒径分布函数随时间变化表明,随着螺杆不断挤出,三种螺杆组合中粒子粒径皆有较明显变化,带有错列角 45° 啮合块的双螺杆中粒子粒径相比其它两种螺杆组合下降速度更快,因流场剪切侵蚀而破裂剥离出的碎片数量最多,带有错列角为 60° 啮合块的螺杆次之,带有错列角为 90° 的螺杆最少。所以在带有错列角 45° 啮合块的双螺杆中,无机纳米粒子在PP熔体中的分散效果最好。

参考文献

- [1] 张蒙,徐阳. 聚合物基纳米复合材料的制备研究进展[J]. 化工新型材料,2018,46(3):19-22.
Zhang Meng, Xu Yang. Preparation and research progress of polymer-based nanocomposite[J]. New Chemical Materials,2018,46(3):19-22.
- [2] 姜兆辉,李志迎,王婧,等. 纳米无机粒子/聚合物共混体系分散机理研究进展[J]. 化工新型材料,2015,43(2):27-29,170.
Jiang Zhaohui, Li Zhiying, Wang Jing, et al. Research progress on dispersion mechanism of nanoparticles / polymer system[J]. New Chemical Materials,2015,43(2):27-29,170.
- [3] 李冈效,王天强,张立群,等. 碳酸钙分散状态对硅橡胶流变性能的影响[J]. 橡胶工业,2018,65(3):258-262.
Li Gangxiao, Wang Tianqiang, Zhang Liqun, et al. Effect of calcium carbonate dispersion on rheological properties of silicone rubber[J]. China Rubber Industry,2018,65(3):258-262.
- [4] 吴磊,何雪莲,刘柏平. 纳米 CaCO_3 增强增韧PP/弹性体复合材料的研究[J]. 工程塑料应用,2016,44(4):1-6.
Wu Lei, He Xuelian, Liu Boping. Investigations on nano- CaCO_3 reinforced and toughening polypropylene/ elastomer composites[J]. Engineering Plastics Application,2016,44(4):1-6.
- [5] 李建军,马鹏涛,李东. 挤出工艺对PP/ BaSO_4 复合材料共混效果与性能的影响[J]. 塑料工业,2020,48(8):72-77.
Li Jianjun, Ma Pengtao, Li Dong. Effect of extrusion processing technology on properties and morphology of PP / BaSO_4 composites[J]. China Plastics Industry,2020,48(8):72-77.
- [6] 王贺祥,彭炯,葛震,等. 双螺杆挤出过程数值模拟研究进展[J]. 中国塑料,2020,34(9):96-102.
Wang Hexiang, Peng Jiong, Ge Zhen, et al. Research progress in numerical simulation of twin-screw extrusion process[J]. China Plastics,2020,34(9):96-102.
- [7] Fard A S, Anderson P D. Simulation of distributive mixing inside mixing elements of co-rotating twin-screw extruders[J]. Computers & Fluids,2013,87:79-91.
- [8] 杨高品,陈涛,谢林生,等. 啮合同向双螺杆挤出机偏心六棱柱元件混合性能的研究[J]. 中国塑料,2016,30(10):60-67.
Yang Gaopin, Chen Tao, Xie Linsheng, et al. Mixing performance of eccentric polygon elements in intermeshing corotating twin-screw extruders[J]. China Plastics,2016,30(10):60-67.
- [9] 韩海川,刘谨,李开国,等. 双螺杆啮合元件与反螺纹元件对流场影响的仿真[J]. 工程塑料应用,2020,48(6):74-77,87.
Han Haichuan, Liu Jin, Li Kaiguo, et al. Simulation of influence of twin-screw meshing element and anti-thread element on flow field[J]. Engineering Plastics Application,2020,48(6):74-77,87.
- [10] 王飞,陈占春,李红,等. 新型螺杆料筒结构参数对力化学反应器性能的影响[J]. 塑料科技,2017,45(12):96-99.
Wang Fei, Chen Zhanchun, Li Hong, et al. Effect of structural parameters of new screw barrel on performance of mechanochemical reactor[J]. Plastics Science and Technology,2017,45(12):96-99.
- [11] 张鹏,李彦周,张帅,等. 螺棱梯形底角和凹槽半径对反应挤出机流场的影响[J]. 工程塑料应用,2017,45(6):75-79.
Zhang Peng, Li Yanzhou, Zhang Shuai, et al. Effects of screw arris trapezoid base angle and radius of groove on flow field of reactive extruder[J]. Engineering Plastics Application,2017,45(6):75-79.
- [12] 唐豪,宗原,赵玲. 聚氨酯反应挤出过程的数值模拟[J]. 华东理工大学学报:自然科学版,2016,42(3):301-307.
Tang Hao, Zong Yuan, Zhao Ling. Numerical simulation of reactive extrusion of polyurethane[J]. Journal of East China University of Science and Technology:Natural Science Edition,2016,42(3):301-307.
- [13] 邵雷霆,冯连芳,许忠斌. 剪切场作用下团聚体分散的计算机模拟[J]. 高分子材料科学与工程,2006,22(2):189-193.
Shao Leiting, Feng Lianfang, Xu Zhongbin. Simulation of dispersion of fractal agglomerates in shear flow field[J]. Polymer materials science and engineering,2006,22(2):189-193.
- [14] Powell R L, Mason S G. Dispersion by laminar flow[J]. AIChE Journal,1982,28(2):286-293.
- [15] 麻向军,邱忠财,陶成文. 分形结构团聚体在流场中分散混合的数值模拟[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2013,41(10):97-102.

- [2] 索小娟,岳丽敏. 新型双模糊 PID 算法在塑料吹膜机控制系统中的应用[J]. 塑料科技,2020,48(10):100-103.
Suo Xiaojuan, Yue Limin. Application of new double fuzzy PID algorithms in control system of plastic film blower[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(10):100-103.
- [3] 高源. 计算机仿真设计在塑料制品开发中的应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料,2019,36(2):99-102.
Gao Yuan. Application of computer simulation design in development of plastic products[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(2):99-102.
- [4] 张志飞. 软包装复合膜收卷张力的优化[J]. 包装工程,2019,40(17):209-215.
Zhang Zhifei. Optimization of winding tension of flexible packaging composite film[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(17):209-215.
- [5] 马小亮. 高性能变频调速系统的几个应用问题[J]. 电气传动,2020,50(2):3-20.
Ma Xiaoliang. Application problems of high-performance inverter-fed motor drive systems[J]. Electric Drive, 2020, 50(2):3-20.
- [6] 方永锋,方昱斌. 吹膜机的模糊自整定 PID 温度控制系统的设计及应用[J]. 高技术通讯,2017,27(2):156-161.
Fang Yongfeng, Fang Yubin. Design and application of a fuzzy self-tuning PID temperature control system of inflation film manufacturing machines[J]. Chinese High Technology Letters, 2017, 27(2):156-161.
- [7] 申静. 塑料吹膜机的模糊 PID 温度智能自动控制[J]. 合成树脂及塑料,2019,36(2):82-85.
Shen Jing. Intelligent temperature automatic control on plastic film blower based on fuzzy PID[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(2):82-85.
- [8] 韩京清. 控制理论——模型论还是控制论[J]. 系统科学与数学,1989(4):328-335.
Han Jingqing. Control theory, is it a model analysis approach or a direct control approach[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1989(4):328-335.
- [9] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策,1998(1):19-23.
Han Jingqing. Auto disturbances rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998(1):19-23.
- [10] 韩晔,厉虹. 基于改进自抗扰控制的永磁同步电机无传感器系统研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(2):33-40.
Han Ye, Li Hong. Research on permanent magnet synchronous motor sensorless system based on improved active disturbance rejection control[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(2):33-40.
- [11] 张荣,韩京清. 串联型扩张状态观测器构成的自抗扰控制器[J]. 控制与决策,2000,15(1):122-124.
Zhang Rong, Han Jingqing. Auto disturbances rejection controller composed constructed by cascade extended state observer[J]. Control and Decision, 2000, 15(1):122-124.
- [12] 胡海兵,崔世林,张波,等. 基于线性自抗扰的消防水炮控制系统[J]. 现代电子技术,2019,42(5):183-186.
Hu Haibing, Cui Shilin, Zhang Bo, et al. Fire water monitor control system based on LADRC[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(5):183-186.
- [13] 黄杰,黄茹楠,程拓,等. 基于自抗扰控制器的电动缸载荷系统研究[J]. 现代电子技术,2017,40(5):143-146.
Huang Jie, Huang Runan, Cheng Tuo, et al. Study on electric cylinder loading system based on active disturbance rejection controller[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(5):143-146.
- [14] 高志清. Scaling and bandwidth parameterization based controller-tuning[C]//Proceedings of the 2003 American control conference. New York:IEEE,2003:4 989-4 996.
- [15] 陈增强,刘俊杰,孙明玮. 一种新型控制方法——自抗扰控制技术及其工程应用综述[J]. 智能系统学报,2018,13(6):865-877.
Chen Zengqiang, Liu Junjie, Sun Mingwei. Overview of a novel control method:Active disturbance rejection control technology and its practical applications[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(6):865-877.
- [16] 周蓉,韩文杰,谭文. 线性自抗扰控制的适用性及整定[J]. 控制理论与应用,2018,35(11):1 654-1 662.
Zhou Rong, Han Wenjie, Tan Wen. On applicability and tuning of linear active disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(11):1 654-1 662.

(上接第 73 页)

- Ma Xiangjun, Qiu Zhongcai, Tao Chengwen. Numerical simulation of dispersive mixing in flow field of particulate agglomerates with fractal structure[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition, 2013, 41(10):97-102.
- [16] 麻向军,吴哲浩,陶成文. 基于三维离散元法的团聚体分散机理研究[J]. 塑料工业,2015,43(7):39-42.
Ma Xiangjun, Wu Zhehao, Tao Chengwen. Research on dispersion mechanism of particulate agglomerates based on 3D discrete element method[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(7):39-42.
- [17] 谢林生,李佩宁,马玉路,等. A representation method for describing a deagglomerating process in continuous mixer[J]. Polymer Composites, 2012, 33(4):476-483.
- [18] 李彦周,张鹏,张帅,等. 机筒槽深和机筒与螺棱间隙对力化学反应器的影响[J]. 工程塑料应用,2017,45(1):65-69.
Li Yanzhou, Zhang Peng, Zhang Shuai, et al. Influence of cylinder groove depth and gaps between cylinder and screw on force chemical reactor[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1):65-69.