

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.014

三螺杆分散混合数值模拟及实验分析

贺存政¹, 樊瑜瑾¹, 赵玉程¹, 王怀¹, 李静¹, 郑淮河², 吴家喜³

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500; 2. 昆明开开专用数控设备有限公司, 昆明 650106;

3. 中船重工 750 试验场, 昆明 650051)

摘要: 为了研究平行同向啮合三螺杆挤出机的分散混合效果, 采用离散元法对三螺杆挤出机中聚丙烯 (PP)/ 低密度聚乙烯 (PE-LD) 两种塑料颗粒在加料段的混合情况进行数值模拟。首先建立了三螺杆挤出机的三维模型, 在 EDEM 软件中仿真出不同螺杆转速下挤出机的混合效果, 通过对收集盒分层处理计算得出混合过程中混合均匀度的变化趋势。分析结果表明, 当转速为 200 r/min 时, 三螺杆挤出机有最高均匀度稳态值, 此时分散混合效果最好。在转速低于 200 r/min 时, 表现为螺杆的转速越高, 塑料颗粒混合均匀度稳态值越高, 所用最佳混合时间越少; 当转速高于 200 r/min 时, 物料颗粒所用最佳混合时间继续减少, 但均匀度稳态值下降。同时捏合块对挤出机的混合效果影响较大, 最优是单根螺杆轴上安装 2 个捏合块。最后通过自行设计的小型三螺杆挤出机做验证实验, 结果表明, 此次实验与仿真模拟表现一致, 200 r/min 转速下两种塑料的分散混合效果最佳。

关键词: 三螺杆挤出机; 捏合块; 数值模拟; 分散混合; 混合均匀度

中图分类号: TQ320.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0082-07

Numerical Simulation and Experimental Analysis of Tri-screw Dispersion Mixing

He Cunzheng¹, Fan Yujin¹, Zhao Yucheng¹, Wang Huai¹, Li Jing¹, Zheng Huaihe², Wu Jiaxi³

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Kunming Kunkai Special CNC Equipment Limited Liability Company, Kunming 650106, China;

3. China Shipbuilding Industry Corporation 750 Proving Ground, Kunming 650051, China)

Abstract: In order to study the dispersing and mixing effect of the parallel co-rotating tri-screw extruder, and the numerical simulation was performed on the mixing of polypropylene (PP)/low-density polyethylene (PE-LD) plastic particles in the feeding section by using discrete element method. Firstly, a three-dimensional model of the tri-screw extruder was established, and the mixing effects of the extruder under different screw speeds were simulated in EDEM software. The layered processing of the collection box was calculated to obtain the change of the mixing uniformity during the mixing process. The analysis results show that, when the rotation speed is 200 r/min, the tri-screw extruder has the highest steady-state value of uniformity, and the dispersion and mixing effect is the best at this time. When the rotation speed is lower than 200 r/min, the higher the rotation speed of the screw, the higher the steady-state value of the plastic particle mixing uniformity and the shorter the optimal mixing time; when the rotation speed is higher than 200 r/min, the optimal mixing time of the plastic particle continues to reduce, but the steady-state value of uniformity decreases. At the same time, the kneading block has a greater influence on the mixing effect of the extruder. The best is to install two kneading blocks on a single screw shaft. Finally, a self-designed small tri-screw extruder was used for verification experiments. The results show that this experiment is consistent with the simulation performance, and the dispersion and mixing effect of the two plastics at 200 r/min is the best.

Keywords: tri-screw extruder; kneading block; numerical simulation; dispersion mixing; mixing uniformity

塑料是重要的高分子材料之一, 其中聚丙烯 (PP) 是目前用量较大的通用塑料之一^[1], 但是较高

的结晶度也给 PP 造成低温韧性差、成型收缩率大和缺口敏感性大等缺点, 在一定程度上限制了其广

通信作者: 樊瑜瑾, 博士, 教授, 主要从事材料成形加工研究

收稿日期: 2022-02-27

引用格式: 贺存政, 樊瑜瑾, 赵玉程, 等. 三螺杆分散混合数值模拟及实验分析 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5):82-88.

He Cunzheng, Fan Yujin, Zhao Yucheng, et al. Numerical simulation and experimental analysis of tri-screw dispersion mixing[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):82-88.

泛的应用。共混改性是增韧 PP 的一种有效方法^[2]。对 PP 进行共混增韧,可以使 PP 的性能得到显著改善。其中双螺杆挤出机是制备这些共混材料的主要设备。

在双螺杆挤出机中使用低密度聚乙烯 (PE-LD) 改性 PP 可以得到 PP/PE-LD 共混物。与单一 PP 塑料相比,该共混物的透明性能、热性能和力学性能都与加入的 PE-LD 含量密切相关^[3-4]。对于此类的混合是加工过程的重要工序,还要加入相容剂和各种助剂^[5-6]。社会需求对材料的性能要求增高,混合效果的差异直接影响着产品各项性能,因此对设备的要求也愈来愈高。

双螺杆挤出机在混合性能方面有局限性,因此由它制造出来的共混材料也存在性能局限,这促进了三螺杆挤出机替代设备的研发^[7]。平行排列的三螺杆挤出机有两个啮合区,可看作两个双螺杆啮合工作,它能够增加剪切次数,使物料经历多次剪切分散混合,混合效果优异,具有很广的应用前景^[8-10]。

何和智等^[11]通过平衡式三螺杆动态混炼挤出机在稳态与振动条件下制备复合材料。该三螺杆挤出机螺杆两边对称、旋向相反,能够消除螺杆的轴向阻力,验证了振动力场可提高装置的混合性能和效果。Wang 等^[12]研究了平行排列方式的三螺杆挤出机横截面的混合性能,采用二维模型和 Carreau-Bird 流体模型对挤出机进行混合性能模拟,求解得出混合指数云图和混合效率等,揭示了该三螺杆比传统双螺杆有更好的混合性能。王克俭^[13]发明了平行排列的差速锥形三螺杆挤出机,不啮合处可增强混炼和排气,可实现差速运作且共轭啮合无干涉,该挤出机具有良好的混合、输送能力,适用于多种物料的加工和分散混合。陈志强^[14]发明了一种三螺杆挤出机上的螺杆组件,包括螺杆、套设在螺杆上的若干螺纹组件和啮合组件,这样将两种组件分割成多个螺纹和啮合块元件的形式,使得该组件既能够轻松拆换和拼装,又能对物料进行均匀混合,从而提高物料分散的效果。

笔者以同向平行排列的三螺杆挤出机为研究对象,在三根螺杆上安装有捏合块,分析探究在不同转速和不同数目捏合块下该设备加料段处的混合均匀度变化规律,再通过实验加以验证。

1 理论模型及评价指标

1.1 理论模型

所研究的三螺杆挤出机由三组螺杆同向平行

排列而成,采用以中间螺杆为对称、两边螺杆排列相同的方式。螺杆是通过截面沿螺旋线扫描而成,因此螺杆在运转时将有两个方向的运动——沿圆周方向运动和轴向方向运动。三根螺杆轴基本结构都是由相同的双头螺纹积木式拼接组成。

根据图 1 及理论力学相关知识,螺槽内物料各速度之间有如式 (1) 的关系式成立。

$$\vec{V}_{sn} = \vec{V}_{sz} + \vec{V}_{sc} \quad (1)$$

式中: $\vec{V}_{sn}$ ——物料沿螺杆轴线的运动速度;

$\vec{V}_{sz}$ ——物料沿螺槽方向的运动速度;

$\vec{V}_{sc}$ ——物料沿螺杆周向的运动速度。

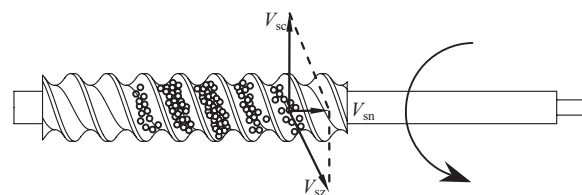


图1 螺杆轴颗粒运动图

采用离散元法中的 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型^[15-16]和标准滚动摩擦力理论模型,前者的结构参数和物理意义为:假定两个球状塑料颗粒半径分别设置为 R_1 和 R_2 ,当它们之间相互发生弹性接触,法向重叠量 δ_n 的计算公式如式 (2) 所示。

$$\delta_n = R_1 + R_2 - |r_1 - r_2| \quad (2)$$

式中: r_1, r_2 ——两个塑料颗粒球心的位置矢量。

两个颗粒间的法向力 F_n 计算公式如式 (3) 所示。

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{1.5} \quad (3)$$

式中: E^*, R^* ——颗粒的等效拉伸弹性模量、等效半径。

E^*, R^* 计算公式如式 (4) 和式 (5) 所示。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (5)$$

式中: E_1, ν_1 和 E_2, ν_2 ——颗粒 1 和颗粒 2 的拉伸弹性模量、泊松比。

法向阻尼力 F_n^d 表达式如式 (6) 所示。

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_{n-rel}} \quad (6)$$

式中: β ——系数;

S_n ——法向刚度;

m^* ——等效质量;

v_{n-rel} ——相对速度的法向分量。

β 的数学表达式如式 (7) 所示。

$$\beta = \frac{\ln a}{\sqrt{\ln^2 a + \pi^2}} \quad (7)$$

式中: a ——恢复系数。

1.2 混合度评价指标

为了评估三螺杆挤出机对 PP 与 PE-LD 两种不同塑料颗粒的混合效果,需对两种颗粒进行采样和分析。设两种颗粒的总样品数为 n , X_i 为每种样品某一组分比例分数如浓度、质量分数等^[17]。则该组分比例分数的平均值 $\bar{X}$ 按式 (8) 计算。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (8)$$

当试样次数有限时,算术平均值与真值最接近,该组分比例分数的标准偏差 S 按式 (9) 计算。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (9)$$

为了客观地反映混合程度,需同时考虑标准偏差和平均值两个参数。其中标准偏差与测定平均值的比值,即为离散度(变异系数) CV ,如式 (10) 所示。

$$CV = (S/\bar{X}) \times 100\% \quad (10)$$

均匀度 H_s 用来描述一组测定值接近测定平均值的程度,其数学表达式如式 (11) 所示。

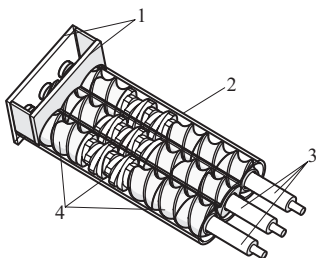
$$H_s = 100\% - CV \quad (11)$$

均匀度和离散度是属于同一问题的不同方面,但其实质相同。均匀度越大则离散度越小,表示混合效果越好。

2 仿真模拟

2.1 几何模型

为更加真实地还原和模拟塑料颗粒混合传输的过程,在 Solid works 中建立三维模型,主要由四个单元部分组成:落料口单元、机筒单元、3 个螺杆构成的传输单元、螺杆上负责啮合的螺纹元件与捏合块元件单元,如图 2 所示。在三螺杆挤出机中,右旋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捏合块,其具备较好的轴向分布混合性能。单根螺杆上的螺纹和捏合块均由螺纹元件和捏合块元件一一拼接组合而成。各部件的



1—加料口; 2—机筒; 3—螺杆轴; 4—螺纹元件和捏合块元件

图2 三螺杆挤出机模型

建模尺寸大小根据实际尺寸为标准,建模完成后对各部分进行组合装配,经过软件验证无干涉,其基本几何参数见表 1。

表 1 三螺杆挤出机基本几何参数

部 件	几何参数	数 值
机身	螺杆顶径 /mm	35.6
	螺杆根径 /mm	16.0
	机筒内径 /mm	36.6
	中心距 /mm	30.8
螺纹元件	啮合间隙 /mm	1.0
	单个长度 /mm	32.0
	螺距 /mm	16.0
	螺旋角 /($^{\circ}$)	17
捏合块元件	错列角 /($^{\circ}$)	45
	单个长度 /mm	32
	捏合盘厚度 /mm	6.4
	捏合盘数目 / 个	5
	啮合间隙 /mm	1.0

其中,螺纹、螺杆轴和捏合块材料均为高速钢。该三维模型主要由机筒以及安装在机筒中的三根螺杆组成,螺杆的螺旋线旋向方向一致,均为右旋向,安装三螺杆平行排列,左右两边螺杆安装相位相同,与中间螺杆的相位差 90° 交错安装,挤出方向为落料口到出料口。各螺杆的横截面物理模型如图 3 所示。

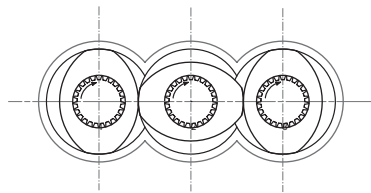


图3 三螺杆横截面图

2.2 前处理

将三维模型导入 EDEM 软件中,模拟颗粒在设备中经过螺纹传输区和捏合块混合区的混合运动状态,出口处的混合均匀程度,并以此分析影响颗粒混合均匀度的因素。

采用离散元法对三螺杆挤出机中两种塑料颗粒的分散混合进行数值模拟时,需要标定相关物理参数,主要包括:材料属性、泊松比、密度、剪切弹性模量以及接触材料之间的动、静摩擦系数和恢复系数。对本文所涉及到的材料的相关力学参数进行设置,其中螺杆、螺纹和捏合块泊松比为 0.3,剪切弹性模量 7×10^{10} Pa,密度为 7800 kg/m^3 ,PP 颗粒与 PE-LD 颗粒属性见表 2。

表 2 PP 颗粒与 PE-LD 颗粒属性

材料	泊松比	剪切弹性模量 /Pa	密度 /(kg · m ⁻³)
PP	0.42	3.1×10^8	920
PE-LD	0.3	2.3×10^7	900

设置颗粒形状均为球形,塑料颗粒半径为 1.5 mm,把入料口等分成两部分,分别添加不同颗粒,混合比例为 1:1,入料量恒定,定义固定时间步长为 2×10^6 s,总仿真时间为 10 s,观察不同影响因素下的混合效果。

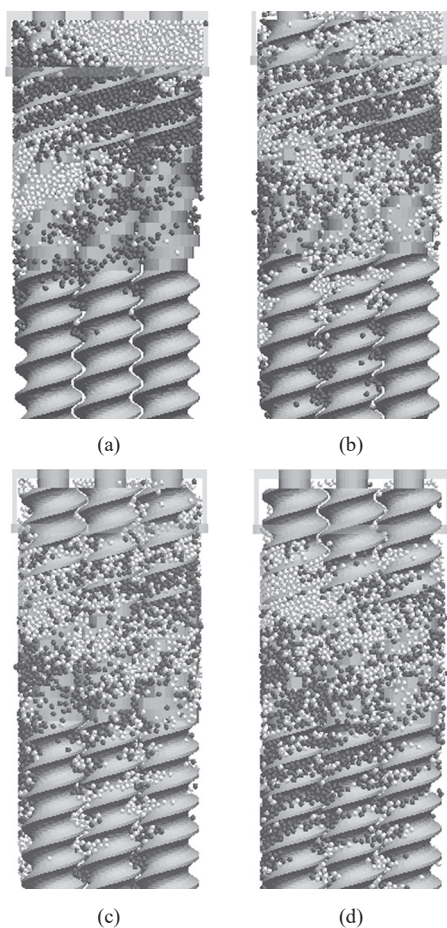
2.3 不同螺杆转速条件下的颗粒混合

经三螺杆物料混合后,颗粒在螺杆传输下最终落入收集盒,设置收集盒的目的是得到颗粒在充分混合后最终时刻下的均匀度,比较不同转速时收集盒中的颗粒混合效果。设置螺杆转速分别为 120, 160, 200, 240 r/min, 分别观察在传送第 3 s 和第 5 s 时两种塑料颗粒的混合情况,再比较混合完成后收集盒的混合效果。

图 4 为传送第 3 s 时的混合效果图。图 4 中,深色为 PE-LD 塑料颗粒,浅色为 PP 塑料颗粒。由图 4 可以看出,在第 3 s 时,120 r/min 下的两种塑料颗粒堆积面积较大且聚合明显,颜色分明,右上角浅色的 PE-LD 塑料大部分还处于入料端口处,混合效果差。160 r/min 下的两种塑料颗粒渐渐开始交

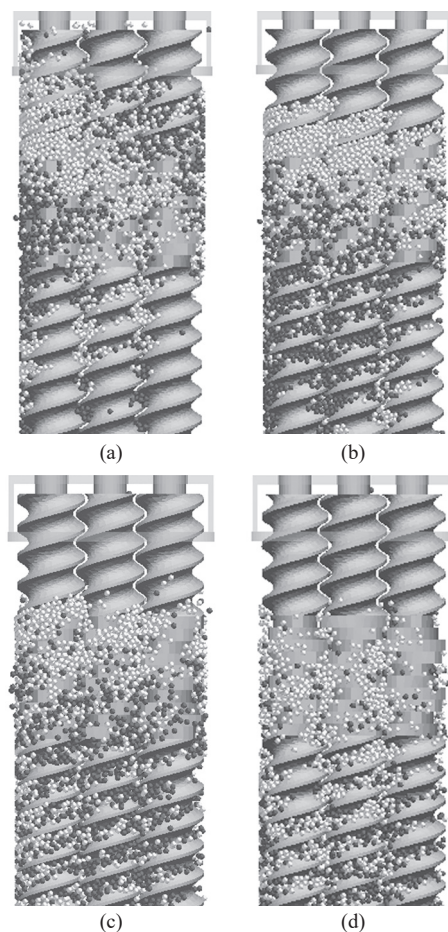
错混合,但在捏合块混合区域,浅色和深色颗粒堆积现象仍然明显,冗余大,混合性能不理想。200 r/min 下的两种塑料颗粒在捏合块混合区域分布均匀,堆积面积较小,混合效果较理想。240 r/min 下的塑料颗粒在入料口阶段浅色颗粒堆积较多,捏合块混合区域混合效果与 200 r/min 相差不大,但在经过螺纹元件传输后,深色颗粒愈来愈多,混合效果较差。从整体来看,两种颗粒距离螺杆轴向方向入料口越远,其颗粒混合程度也越高。

图 5 为传送第 5 s 时的混合效果图。由图 5 可以看出,第 5 s 处 120 r/min 下的深色颗粒大多数分布在底部,浅色颗粒同样出现大面积的聚合现象,混合效果差。160 r/min 下的两种塑料颗粒渐渐开始交错混合,但在入料端口处,浅色颗粒堆积现象仍然明显,冗余大,混合性能不理想。200 r/min 下的两种塑料颗粒在捏合块后半段区域分布均匀,堆积面积较小,在末端也可以看到两种颜色颗粒相互纵横交错,错落有致,混合效果理想。240 r/min 下,浅色颗粒在入料口区域存在大面积分布现象,深色颗



螺杆转速: a—120 r/min; b—160 r/min; c—200 r/min; d—240 r/min

图 4 3 s 时混合效果图



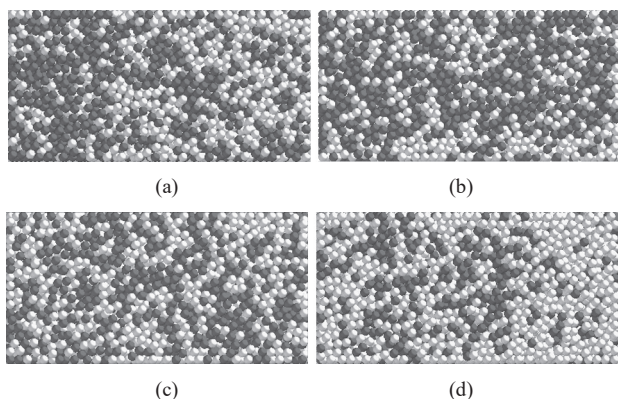
螺杆转速: a—120 r/min; b—160 r/min; c—200 r/min; d—240 r/min

图 5 5 s 时混合效果图

粒大多位于出料端,混合效果相对较差。

将图5与图4横向对比,可以看出时间越长,相同转速下的混合效果也越明显,故时间与混合程度成正比关系。

混合完成后效果图如图6所示。从图6可以看出,200 r/min下两种颗粒基本均匀分布,各个面积的混合均匀程度高于其它螺杆转速下的混合效果。为了更为严谨地反映出各转速下的混合效果,需要分别计算各转速下的均匀度。收集盒分层图如图7所示,把收集盒由高到低等分成8层,分别导出两种颗粒的数目,从各颗粒所占百分数按相应公式计算出均匀度,以此来比较得出最佳转速。为优化计算过程,在得出每层颗粒数目的基础上,摒除前3层数量过于小的数据,减小误差。



螺杆转速: a—120 r/min; b—160 r/min; c—200 r/min; d—240 r/min

图6 收集盒相同高度截面混合效果图

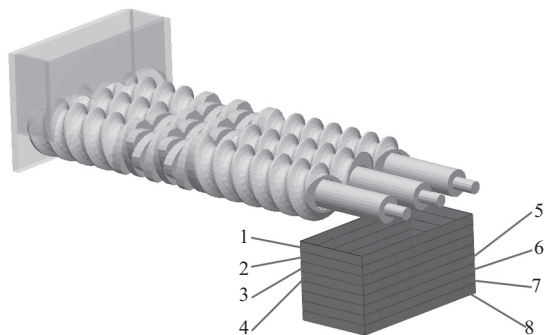


图7 收集盒分层图

以PE-LD颗粒入手,研究其均匀度变化趋势和性质,PP颗粒属性类似。表3为最后时刻下PE-LD塑料的混合均匀度。由表3看出,在最后时刻10 s处PE-LD塑料在螺杆转速为200 r/min时,混合均匀度明显高于其它转速下的均匀度,为0.874。图8为在螺杆转速120,160,200,240 r/min下PE-LD颗粒均匀度随仿真时间变化的状态曲线图,每个转速下所取节点仿真时间间隔为0.1 s,把计算出的均匀

度作为纵坐标。从图8可以看出,在两种颗粒没有完全混合时,此时未达到各自转速下的稳态位置,表现为螺杆转速越高,混合均匀度越高。均匀度达到稳态的时间点即为最佳混合时间,表明螺杆转速越高,混合所用时间越少。在两种颗粒达到完全混合时,各个转速下混合均匀度达到稳定状态,此时稳态值各不相同,其中200 r/min转速下最终时刻的均匀度稳态值明显高于其它三组,分散混合效果最好。

表3 最后时刻下PE-LD塑料的混合均匀度

参 数	螺杆转速/(r·min ⁻¹)			
	120	160	200	240
$\bar{X}$	571.2	572	574	499
S	116.9	92.39	72.44	86.03
$CV/\%$	20.5	16.2	12.6	17.2
$H_s/\%$	79.5	83.8	87.4	82.8

注: $\bar{X}$ 为PE-LD的比例分数的平均值, S 为比例分数的标准偏差,

CV 为离散度, H_s 为混合均匀度。

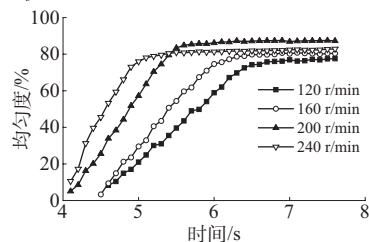


图8 不同螺杆转速下均匀度变化曲线

2.4 不同数目捏合块作用下的颗粒混合

分别建立在单根螺杆上有捏合块数量为0个、1个、2个和3个的三维模型,在最优螺杆转速200 r/min的作用下模拟仿真,计算并对比其均匀度的变化如图9所示。

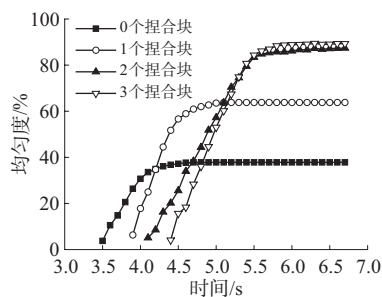


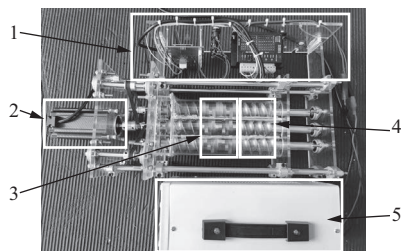
图9 不同数量捏合块下均匀度变化曲线

从图9可以看出,当三根螺杆上不装配捏合块时,三螺杆挤出机的均匀度稳态值明显低于其它三组装配捏合块的稳态值,混合效果最差。当存在有捏合块的情况下,随着捏合块数量的增加,三螺杆挤出机混合均匀度稳态值显著增大,成正比关系。当捏合块数目大于2时,此时设备混合均匀度稳态值提升不明显,因此从经济利益的角度出发,最优解是单根螺杆轴上安装2个捏合块。

3 实验验证及其分析

3.1 实验装置及步骤

为检测带有捏合块的三螺杆下两种颗粒真实混合效果,更好反映混合均匀度的变化情况,通过混合实验的方式来验证仿真结果。实验装置外观和基本组成部件如图 10 所示。笔者使用小型三螺杆挤出机的特点在于加入的控制系统能够精确控制三根螺杆的转速、正反转和运转时间,有助于减少实验误差,同时运用螺纹元件和捏合块元件组合的方式,便于更换组件,使得挤出机具有更强的混合性能。



1—控制部分; 2—57 步进电机; 3—捏合块元件;
4—螺纹元件; 5—直流电源

图 10 实验装置组装图

此次实验选择仿真基础上的最优数据。其单根螺杆上安装的元件顺序为: 2 个螺纹元件 + 2 个捏合块元件 + 2 个螺纹元件。

实验步骤为: 将直流电源通电之后, 在控制面板处将三螺杆转速调整为 200 r/min, 时间设置为 20 s 并顺时针旋转, 设备空转正常后, 加入 PP 和 PE-LD 颗粒各 60 g, 粒径大小均为 3 mm, 然后进行分散混合实验, 分别计算不同时间段出口处各颗粒所占总颗粒的比例分数、平均值、标准偏差和变异系数从而得出均匀度的变化。

3.2 实验结果分析

按上述流程, 将直流电源电压调试在 24 V, 为减小误差重复实验 5 次, 记录各时间段相关原始数据, 计算并绘出 PP 颗粒离散度变化图如图 11 所示。

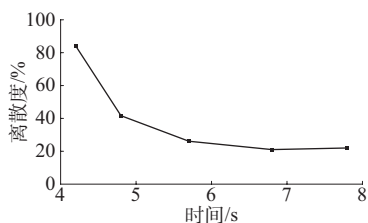


图 11 螺杆转速 200 r/min 下 PP 颗粒离散度变化图

由图 11 可以看出, 离散度与混合时间在一定时间段成反比关系, 混合时间越长, 离散度越小, 表示混合均匀度也就越高。但混合均匀度并非无限制地

升高, 当混合均匀度到达一定值时将不再变高, 而是逐渐达到平衡状态。

实验所反映的 PP 颗粒混合均匀度变化曲线及与模拟结果的对比如图 12 所示。由图 12 可以看出, 模拟结果和实验计算结果基本吻合, 200 r/min 转速下两种塑料的分散混合效果最好。但是实验所得颗粒分散混合均匀度稳态值比仿真所得数据稍低, 并且达到稳态后仍然有较大波动现象, 其原因可能是加料时无法做到同步均匀添加两种塑料颗粒或者提取物料时的间隔时间过短导致计算仍然有误差。

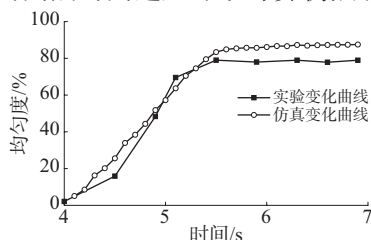


图 12 PP 颗粒混合均匀度仿真结果与实验结果对比图

从实验现象来看, 单根螺杆上安装 2 个啮合块、转速为 200 r/min 时混合效果最优异。当转速低于 200 r/min, 颗粒运动不剧烈, 出现同一颗粒大面积堆积不分散现象, 收集盒只有中层混合效果良好, 底层和顶层有未混合的情况。当转速高于 200 r/min, 虽然颗粒运动十分剧烈, 堆积现象不明显, 但是在啮合区停留时间过短导致混合不均匀。在捏合块数目少于 2 时, 颗粒停留捏合块区域运动不剧烈且时间短, 效果不理想; 当数目大于 2 时, 颗粒运动剧烈, 但收集盒颗粒混合现象同 2 个啮合块时差别不大, 均匀度提升不明显。

4 结论

为了实现塑料颗粒混合均匀性的模拟分析, 建立了平行排列三螺杆物料挤出机三维模拟模型, 同时利用挤出机出口处颗粒分层比例来评估混合程度, 在小型三螺杆挤出机模型中真实模拟颗粒在不同转速下的混合效果。主要结论如下:

(1) 当转速为 200 r/min 时, 三螺杆挤出机有最大均匀度稳态值 0.874, 此时分散混合效果最好。在转速低于 200 r/min 时, 表现为螺杆的转速越高, 则塑料颗粒混合均匀度稳态值就越高, 所用最佳混合时间就越少; 当转速高于 200 r/min 时, 物料颗粒所用最佳混合时间继续减少, 但均匀度稳态值下降。

(2) 在相同转速条件下, 单根螺杆上安装的捏合块数量越多, 则颗粒均匀度稳态值越高, 混合效果相对越好。当捏合块数目大于 2 时, 混合效果提升不

明显,故应适当增加捏合块数目有助于提升颗粒混合的均匀度,其中最佳为安装2个捏合块。

(3) 在沿螺杆轴向的方向,表现为时间越长、颗粒与入料口处距离越远,则两种塑料颗粒混合均匀程度越高,直到达到稳定状态。

参考文献

- [1] 李琴梅,魏晓晓,郭霞,等.高性能与功能化高分子材料的表征技术及其特点[J].分析仪器,2020(4):1-9.
Li Qinmei, Wei Xiaoxiao, Guo Xia, et al. Characterization technology and characteristics of high performance and functional polymer materials[J]. Analytical Instrumentation, 2020(4):1-9.
- [2] 白剑臣,姚志光,郭俊峰.塑料成型工艺学[M].北京:北京理工大学出版社,2012.
Bai Jianchen, Yao Zhiguang, Guo Junfeng. Plastic molding technology[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2012.
- [3] 陶炫旭,曹长林,朱珂郁,等.废旧PE/PP共混体系的增容改性研究进展[J].塑料科技,2022,50(2):107-110.
Tao Xuanxu, Cao Changlin, Zhu Keyu, et al. Research progress on compatibilizing modification of waste PE/PP blends[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(2):107-110.
- [4] 蔺海川,袁炜,罗发亮,等. NX8000K对PP/LDPE共混体系增透增韧改性[J].现代塑料加工应用,2022,34(1):36-39,43.
Lin Haichuan, Yuan Wei, Luo Faliang, et al. Modification of transparency and toughness of PP/LDPE blend system by NX8000K[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2022, 34(1):36-39,43.
- [5] 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.
- [6] 王杰,韩吉彬,吴卫东,等.相容剂对丙烯酸酯橡胶/PP/TPV性能影响[J].塑料,2021,50(5):51-55,71.
Wang Jie, Han Jibin, Wu Weidong, et al. Effects of the compatibilizer on properties of acrylate rubber/PP/TPV[J]. Plastics, 2021, 50(5):51-55,71.
- [7] Zhu X Z, Xie Y J, Miao Y. Numerical study on temperature and power consumption of intermeshing co-rotation triangle arrayed tri-screw extruders[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2009, 48(4):367-373.
- [8] 姜南,邢应生,闫宝瑞,等.三螺杆挤出机及其特性[J].塑料,2003,32(1):56-58,30.
Jiang Nan, Xing Yingsheng, Yan Baorui, et al. The triple screw extruder and its performance[J]. Plastics, 2003, 32(1):56-58,30.
- [9] 何和智.聚合物复合材料三螺杆动态挤出过程及其结构性能研究[D].广州:华南理工大学,2012.
He Hezhi. Research on polymer composites dynamic extrusion process in triple-screw extruder and its structural performance[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2012.
- [10] 朱向哲,谢禹钧,苗一.三螺杆挤出机常规螺纹元件挤出过程的CAE研究[J].塑料工业,2004(9):29-32.
Zhu Xiangzhe, Xie Yujun, Miao Yi. CAE study on extrusion process of flight element of tri-screw extruder[J]. China Plastics Industry, 2004(9):29-32.
- [11] 何和智,张天然,邢月.振动力场下PP/CF复合材料的结构与力学性能[J].塑料,2018,47(5):72-76.
He Hezhi, Zhang Tianran, Xing Yue. The micro structure and mechanical properties of PP/CF composite under periodical vibration force field[J]. Plastics, 2018, 47(5):72-76.
- [12] Wang G, Zhu X Z, Sun C Y. Numerical simulation of mixing performance of intermeshing co-rotating tri-screw and twin-screw extruders[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1670:2 211-2 214.
- [13] 王克俭.螺杆一字型排列的差速锥形三螺杆挤出机:CN102275286A[P]. 2011-12-14.
Wang Kejian. Differential speed conical three-screw extruder with screw in-line arrangement:CN102275286A[P]. 2011-12-14.
- [14] 陈志强.一种三螺杆挤出机上的螺杆组件:CN212194147U[P]. 2020-12-22.
Chen Zhiqiang. A screw assembly on a three-screw extruder:CN212194147U[P]. 2020-12-22.
- [15] 叶广朋,刘振峰,周国发.双螺杆粉体混合机混合均匀性的三维模拟与评价[J].中国粉体技术,2021,27(4):130-137.
Ye Guangpeng, Liu Zhenfeng, Zhou Guofa. Three-dimensional simulation and evaluation of mixing uniformity of twin-screw powder mixer[J]. China Powder Science and Technology, 2021, 27(4):130-137.
- [16] 赵玉程,樊瑜瑾,唐军,等.同向啮合双螺杆固体颗粒输送行为的研究[J].农业装备与车辆工程,2021,59(8):9-14.
Zhao Yucheng, Fan Yujin, Tang Jun, et al. Research on conveying behavior of co-rotating twin-screw solid particles[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(8):9-14.
- [17] 谢洪勇,刘志军.粉体力学与工程[M].2版.北京:化学工业出版社,2007.
Xie Hongyong, Liu Zhijun. Powder Mechanics and Engineering[M]. 2nd ed. Beijing:Chemical Industry Press, 2007.