

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.05.019

挤出机螺杆结构对 PET 纤维母粒分散性能的影响

高可正,胡蝶,丁筠,金志明,乔辉

(北京化工大学,北京 100029)

摘要: 对同向啮合双螺杆挤出机混合段选用一定规格的螺杆元件以不同的排序方式组成三种螺杆组合,研究了螺杆结构对聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 纤维母粒分散性能的影响。在 Solid Works 中建立螺杆的物理模型后采用 Polyflow 软件对三种螺杆组合进行有限元流场模拟分析,运用示踪粒子法统计分析不同螺杆组合的混合效果。以加权平均剪切应力、累积最大剪切速率表征螺杆组合的分散混合能力,以累积停留时间、回流量与回流系数表征螺杆组合的分布混合能力。基于模拟结果,用同向双螺杆挤出机对不同螺杆组合的混合流场进行实验,对经由不同混合流场制备出的 PET 母粒的形态进行扫描电镜分析。结果表明,螺纹元件与捏合块元件交错排布的螺杆组合具有更强的分布混合与分散混合能力,更有利于物料的混合。

关键词: 螺杆结构; 物理模型; 有限元流场模拟; 示踪粒子法

中图分类号: TQ320.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)05-0100-05

Effect of Extruder Screw Structure on PET Fiber Masterbatch Mixing Performance

Gao Kezheng, Hu Die, Ding Yun, Jin Zhiming, Qiao hui

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : The effect of the screw structure in the co-rotating twin-screw extruder mixing section on the dispersion performance of PET fiber masterbatch was studied. Screw elements of certain specification were used to form three screw combinations in different order. The physical model of the screw was established by Solid Works software. After that, Polyflow software was adopted to simulate the finite element flow field of the three kinds of screw combinations. Tracer particle method was used to characterize the mixing effect of different screw combinations. The weighted average shear stress and cumulative maximum shear rate were used to characterize the dispersion mixing capacity of the screw combination. The distribution mixing capacity of the screw combination was characterized by cumulative residence time, return flow and reflux coefficient. Experiments were performed on different mixed flow fields using co-rotating twin screw extruder. The morphology of prepared PET masterbatch was analyzed by scanning electron microscope. The results show that the screw combination of the screw element and the kneading block element staggered arrangement has stronger distribution mixing and dispersing mixing ability, which is more favorable for material mixing.

Keywords : screw structure ; physical model ; finite element flow field simulation ; tracer particle method

聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 纤维,国内商品名为涤纶,由于具有加工简单、价格便宜、结实耐用等诸多优点,成为了国内产量及用量最大的纤维产品之一。同时,国内的涤纶产品也存在着功能性单一、科技附加值低等缺点。因此,制备性能优异,具有多种功能的 PET 纤维将成为未来的发展方向^[1-2]。纤维母粒的制备是共混法生产 PET 功能纤维的关键

环节^[3]。在纺丝过程中由于受到纺丝机喷丝板孔径的限制,纤维母粒中功能粉体的分散程度、粒径大小等都影响着纤维的可纺性,所以对纤维母粒分散性能的要求比其他应用领域更加严格^[4-6]。目前,双螺杆挤出机是纤维母粒的常用生产设备,其混合能力的强弱与母粒配方共同决定着纤维母粒的分散性能。

基金项目: 国家十三五重点研发计划项目 (2016YFB0302801)

通讯作者: 丁筠,副教授,主要从事聚合物功能改性材料研究 E-mail: dingyun@mail.buct.edu.cn

收稿日期: 2019-02-15

引用格式: 高可正,胡蝶,丁筠,等. 挤出机螺杆结构对 PET 纤维母粒分散性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5):100-104.

Gao Kezheng, Hu Die, Ding Yun, et al. Effect of extruder screw structure on PET fiber masterbatch mixing performance[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):100-104.

螺杆混合段是对双螺杆挤出机混合性能影响最大的功能区段^[7]。笔者通过改变混合段螺杆元件的组合顺序研究其对聚合物流场混合效果的影响。根据螺杆混合段常用螺杆元件的特点,确定模拟所用的螺杆元件类型与参数,将选用的元件以不同的排布方式进行组合并建立物理模型。采用 Polyflow 软件,以 PET 母粒作为模拟对象,对采用不同螺杆组合的流场进行模拟。对模拟所得的结果进行分析,对比不同螺杆组合方式的混合能力,为设计出一种混合效果更好,适用于纤维母粒制备的螺杆组合提供参考。

1 理论模型

1.1 数学模型

假设流场为稳定、等温流场,流动为层流流动;物料为不可压缩流体;忽略惯性力、重力等体积力;物料在流道中全充满,流场内壁面无滑移^[8]。根据以上假设,在直角坐标系下流体的连续方程和动量方程分别见式(1)、式(2)。

$$\nabla v = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla p + \nabla \tau = 0 \quad (2)$$

式中: ∇ 为矢量微分算子;

v 为熔体流动速度, m/s ;

p 为压力, Pa ;

τ 为剪切应力, MPa 。

通过实验研究母粒流体的流变特性,并得到流变曲线。母粒的流变曲线最终与幂律模型成功拟合。模拟结果显示 R^2 为 0.95, 满足精度要求。拟合成功的参数为 $m=791.4453$, $n=0.23458$ 。模拟本构方程为:

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

式中: η 为黏度, $Pa \cdot s$;

m 为稠度系数;

$\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ;

n 为非牛顿指数。

1.2 边界条件

边界主要分为两螺杆的外表面、流场入口截面、出口截面及机筒的内表面^[9]。在壁面无滑移的假设条件下,机筒为静止不动的,故机筒速度为零。螺杆外表面为周向转动速度边界,螺杆转速为 200 r/min。实际生产中,同向啮合双螺杆挤出机大多采用计量加料的方式,因此出口边界条件采用压力边界,入口边界条件采用流量边界较为合理。根据在实际生产中积累的经验,具体参数设定为入口流量

40 kg/h, 出口压力 3 MPa。

1.3 物理模型

双螺杆挤出机可划分为加料、混合、排气等功能区段^[10]。笔者仅针对混合段的螺杆结构进行设计,如图 1 所示。依据螺杆元件的特点,对比分析各元件性能,最终确立以下几种元件规格,如表 1 所示。

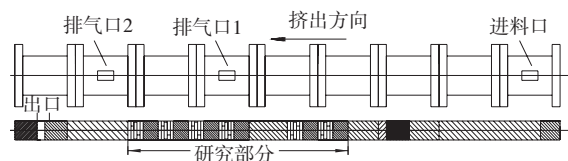
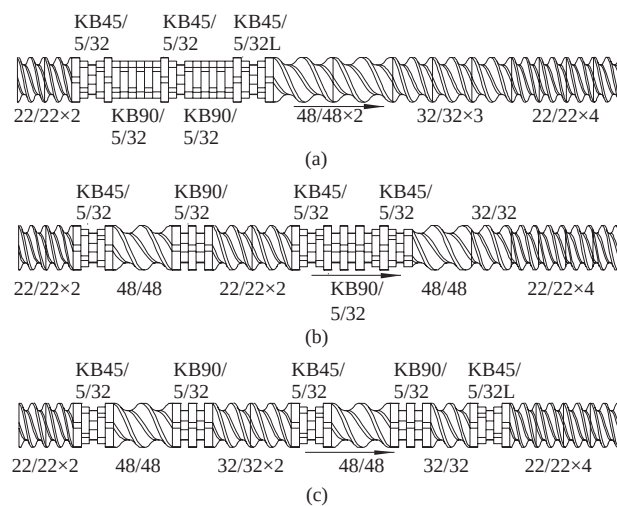


图 1 研究部分示意图

表 1 各种类元件参数及特点

元件类型	参数	特点
捏合块	KB45 / 5 / 32, KB90 / 5 / 32	优异的混合、熔融性能
螺纹元件	22 / 22, 32 / 32, 48 / 48	建立压力、输送物料
反捏合块	KB45 / 5 / 32L	增大回流与物料停留时间

将选用的各类螺杆元件按照捏合块元件集中排布(螺杆组合 I)、部分捏合块分散排布(螺杆组合 II)、螺纹元件与捏合块元件交错排布(螺杆组合 III)三种方式进行组合设计,使用 Solid Works 建立三种螺杆组合的物理模型,模型如图 2 所示,箭头方向表示物料的挤出方向。其中 22 / 22 表示选用的螺纹块元件的导程为 22 mm, 长度为 22 mm。KB45 / 5 / 32 表示选用的捏合块元件的错列角为 45°, 厚度 5 mm, 长度为 32 mm。其余元件参数含义与上述一致。各元件螺杆外径参数为 36 mm, 根径为 24 mm, 双螺杆中心距为 30.4 mm, 机筒与螺杆间隙为 0.4 mm。



a—螺杆组合 I; b—螺杆组合 II; c—螺杆组合 III

图 2 三种螺杆组合模型

1.4 有限元模型

采用 ICEM 网格划分软件完成模型的网格划分工作。网格划分主要分为三部分:螺杆、流道、螺杆和流道的接触部分^[11]。分别采用正四面体单元和正六面体单元完成螺杆和流道的网格划分。对于螺杆和流道的接触部分,由于受到较强的剪切作用,为提高模拟结果的准确程度,采用网格加密的方式对其进行处理。同时,为避免重复划分网格,造成模拟结果出现偏差,采用网格重叠技术对螺杆及流道进行组合。每套螺杆组合划分出 135 246 个四面体网格,流道共划分 17 387 个六面体网格,如图 3 所示。

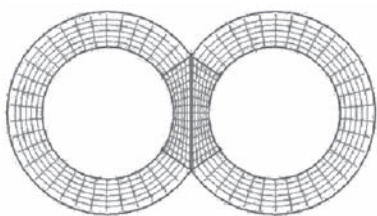


图3 流道截面网格

2 模拟结果与分析

2.1 加权平均剪切应力

局部横截面的剪切应力大小无法表征整个螺杆混合段的剪切能力,为此引入更加全面可靠的加权平均剪切应力。对加权平均剪切应力的模拟结果如图 4 所示。螺杆组合 II 和 III 的加权平均剪切应力均小于螺杆组合 I。这是因为多个捏合块元件集中排布,物料被连续不断地剪切,受到的剪切作用更加强烈。但是三套螺杆组合的加权平均剪切应力在数值上相差很小,表明三种不同的排布方式对螺杆剪切混合能力的影响并不明显。

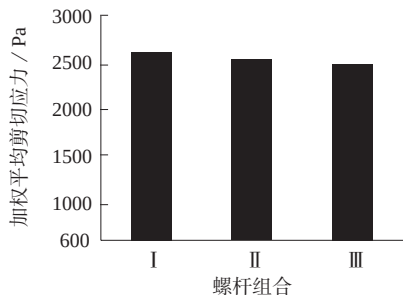


图4 三种螺杆组合加权平均剪切应力

2.2 累计最大剪切速率分布

在流场入口处设置 3 000 个示踪粒子,在整个挤出加工过程中,粒子所受的最大剪切速率随着粒子在流场中所处位置的不同而改变。运用统计学原理,以剪切速率为 $2\,000\text{ s}^{-1}$ 为界限对比三种不同构

型螺杆的剪切混合能力。如图 5 所示,在螺杆组合 I 和 II 流道内,粒子流经剪切速率大于 $2\,000\text{ s}^{-1}$ 区域的概率相等,均为 22%。在螺杆组合 III 的流道内,粒子流经剪切速率大于 $2\,000\text{ s}^{-1}$ 区域的概率最大为 30%。表明螺杆组合 III 能提供的剪切速率最大,剪切作用更强,物料在螺杆组合 III 作用的流道内的混合效果更好。

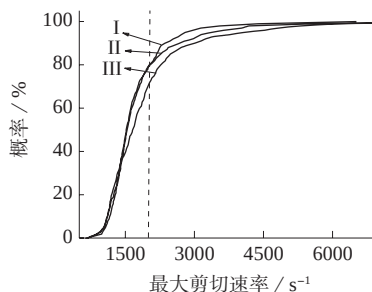


图5 三种螺杆组合累积最大剪切速率分布

2.3 累积停留时间分布

对功能母粒而言,分散混合效果和分布混合效果都是影响母粒品质的重要指标^[12]。为评价三种螺杆构型的分布混合能力,运用统计学方法,统计计算了 3 000 个粒子在模拟流道内的累积停留时间分布及回流量、回流系数。

以挤出 90% 的粒子所需要的时间作为分析三种螺杆组合方式的标准。使用此标准可以消除壁面无滑移假设对模拟结果造成的不良影响^[13]。图 6 为三种螺杆组合累积停留时间分布。如图 6 所示,物料通过螺杆组合 I 和 II 的模拟流道时,挤出 90% 粒子所需要的时间为 99 s,通过螺杆组合 III 挤出相同数量的粒子所需要的时间是前两者的 1.19 倍,共需要 118 s。说明螺杆组合 III 的分布混合能力强于螺杆组合 I 和螺杆组合 II。制备的功能母粒中粒子的空间分布趋于均匀化的程度更高。

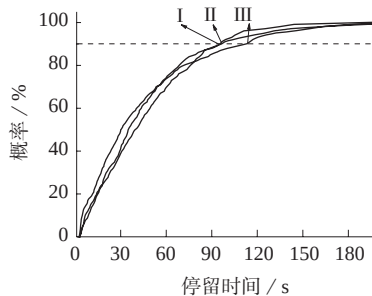


图6 三种螺杆组合累积停留时间分布

2.4 回流量与回流系数

将混合段整根螺杆做片化处理,对任意横截面

内负的轴向速度进行积分,可得到回流量,回流量与进流量之比为回流系数^[14]。图 7 为三种螺杆组合回流量和回流系数。在入口流量相同的条件下,回流量越大表明物料在流场中混合越充分,螺杆的分布混合能力越强。从图 7 可以看出,螺杆组合Ⅲ的回流量和回流系数是三种螺杆组合中最大的,表明螺纹元件与捏合块交错排布的组合方式更有助于提升螺杆的分布混合能力。

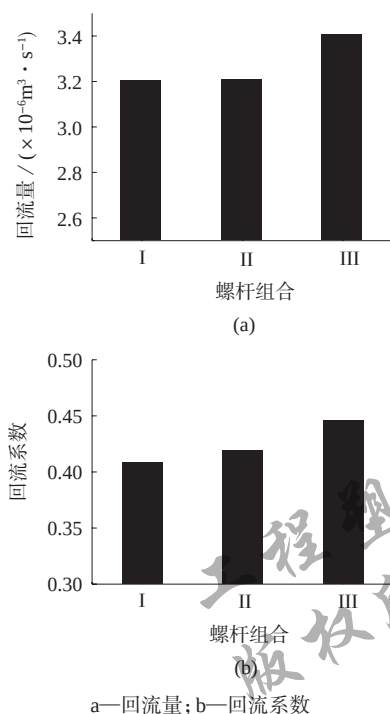


图 7 三种螺杆组合回流量和回流系数

3 实验部分

3.1 原材料及仪器

PET 切片: 纤维级, 特性黏度 0.66 dL/g, 江苏恒力化纤有限公司;

纳米 TiO_2 : 金红石型, 美国杜邦公司。

3.2 仪器及设备

同向双螺杆挤出机: CTE PLUS 型, 科倍隆机械有限公司;

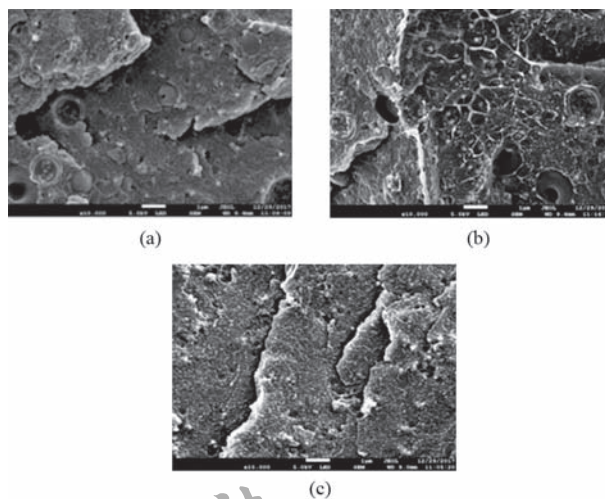
扫描电子显微镜: JSM-7800F 型, 日本 JEOL 公司。

3.3 制备工艺

将 TiO_2 与 PET 切片以 1 : 9 比例混合均匀, 并干燥, 使用同向双螺杆挤出机进行造粒实验, 制备 PET 功能母粒, 螺杆转速 200 r/min。

图 8 为三种螺杆组合制备的功能母粒随机断面位置的 SEM 照片。图 8 所展示的母粒截面均出现

少量粒子团聚, 图中的圆状粒子为 TiO_2 颗粒。相比之下, 螺杆组合Ⅲ的分散与分布混合效果优于螺杆组合 I 和 II。



a—螺杆组合 I; b—螺杆组合 II; c—螺杆组合 III

图 8 三种螺杆组合制备母粒随机位置 SEM 照片

采用图像分析方法^[15], 从拍摄的电镜照片中随机选取位置, 统计计算照片中 TiO_2 粒子的平均粒径、标准差及粒径分布概率作为表征螺杆分散混合程度的重要指标。每张电镜照片统计的 TiO_2 粒子数目约为 300 个。统计结果分别如表 2 和图 9 所示。

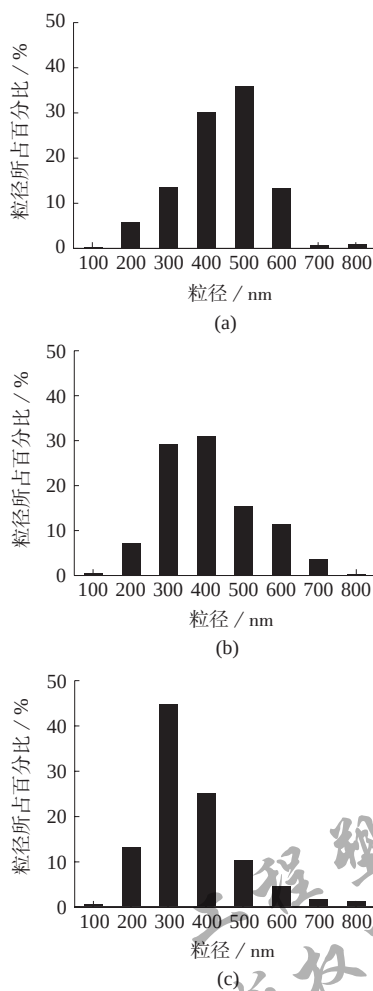
表 2 三种螺杆组合制备母粒中分散相 TiO_2 的平均粒径及标准差

螺杆组合	平均粒径 / μm	标准差
I	0.492	0.136
II	0.436	0.154
III	0.336	0.122

由表 2 和图 9 可以看出, 由螺杆组合Ⅲ制备的母粒中 TiO_2 粒子的平均粒径与标准差均最小, 且有 81% 的 TiO_2 粒子的粒径分布在 200 ~ 400 nm 区间内。螺杆组合 I 和 II 分别有 50% 与 68% 的 TiO_2 粒子的粒径分布在 200 ~ 400 nm 区间内。说明螺杆组合Ⅲ所制备母粒的分散性能是三种螺杆组合中最好的, 螺杆组合Ⅲ的分散混合能力优于螺杆组合 I 和 II。实验结果与模拟结果一致, 也表明模拟运算对实际螺杆构型设计具有一定参考意义。

4 结论

(1) 随着捏合块元件由集中排布变为部分分散排布到进一步形成捏合块和螺纹元件交错排布的组合方式, 螺杆组合提供的剪切速率呈增大趋势, 提高了物料的分散混合效果。同时, 捏合块和螺纹元件交错排布的组合方式提高了物料的累积停留时间和回流量, 双螺杆的分布混合效果得到增强。



a—螺杆组合 I ; b—螺杆组合 II ; c—螺杆组合 III

图9 三种螺杆组合制备母粒的粒径分布

(2) 使用捏合块和螺纹元件交错分布的螺杆组合,分散与分布混合效果更好,与模拟结果一致,制备的母粒平均粒径最小,粒径多分布在 200 ~ 400 nm,集中程度较高,满足纤维母粒对分散性能的要求。

参考文献

- [1] 杨艳秋. 热塑性聚酯改性的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2014, 42(9):111-114.
Yang Yanqiu. Research progress in modification of thermoplastic polyester[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(9):111-114.
- [2] 戴福文. 功能纤维的概念、分类及发展方向 [J]. 中国纤检, 2013(13):78-81.
Dai Fuwen. The concept, classification and development direction of functional fibers[J]. China Fiber Inspection, 2013(13):78-81.
- [3] 胡蝶, 盛平厚, 丁筠, 等. PET 纤维功能母粒研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(9):125-129.
Hu Die, Sheng Pinghou, Ding Yun, et al. Research progress on PET fiber functional masterbatch[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9):125-129.
- [4] Jiang Zhaohui, Jin Jian, Xiao Changfa, et al. Effect of surface modification of carbon black (CB) on the morphology and crystallization of poly(ethylene terephthalate) / CB masterbatch[J]. Colloids and Surface A:Physico Chemical and Engineering, 2012, 395:10-15.
- [5] Asano Y, Saito M. Masterbatch for coloring synthetic resin:US, 2011 / 0230611[P]. 2011-09-22.
- [6] Lazar T. Industrial dyes—Chemistry, properties, applications[J]. Color Research and Application, 2005, 30(1):74-75.
- [7] Chen J, Liu J, Cao Y H. Numerical study on the performance of screw mixing elements and conventional screw elements[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 19(2):217-223.
- [8] 聂成磊. 经典炸药模拟物流变特性及双螺杆混合研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
Nie Chenglei. Study on simulated logistics variable characteristics and twin-screw mixing of classic explosives[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [9] Bertrand F, Thibault F, Delamare L, et al. Adaptive finite element simulations of fluid flow in twin-screw extruders[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27:491-500.
- [10] 彭涛. 同向双螺杆不同螺纹元件混炼效果的数值研究 [J]. 中国塑料, 2011, 29(9):95-100.
Peng Tao. Numerical study on mixing effect of different thread elements in the same direction twin screw[J]. Chinese Plastics, 2011, 29(9):95-100.
- [11] 武学伟, 马秀清, 李彦辉, 等. 波状双螺杆元件混合性能的研究 [J]. 中国塑料, 2010, 24(7):98-101.
Wu Xuewei, Ma Xiuqing, Li Yanhui, et al. Study on mixing performance of corrugated twin-screw elements[J]. Chinese Plastics, 2010, 24(7):98-101.
- [12] Dan D. Color masterbatch technology up date:New developments for carbon black dispersion[C]. International Polyolefins Conference, 2011.
- [13] 方辉. 同向双螺杆捏合盘混炼段混合性能与接枝反应挤出关系的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2007.
Fang Hui. Study on the relationship between mixing performance and grafting reaction extrusion in the mixing section of co-rotating twin-screw kneading disc[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2007.
- [14] Fonseca J. Cerium phosphate nanoparticles with low photocatalytic activity for UV light absorption application in photoprotection[J]. Dyes and Pigments, 2013, 97:291-296.
- [15] 余徐润, 周亮, 荆彦平, 等. Image-ProPlus 软件在小麦淀粉粒显微图像分析中的应用 [J]. 电子显微学报, 2013, 32(4):344-351.
Yu Xurun, Zhou Liang, Jing Yanping, et al. Application of Image-ProPlus software in microscopic image analysis of wheat starch granules[J]. Journal of Electron Microscopy, 2012, 32(4):344-351.