

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.06.013

双螺杆啮合元件与反螺纹元件对流场影响的仿真

韩海川^{1,2}, 刘谨^{1,2}, 李开国^{1,2}, 孙亮^{1,2}, 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. 太原理工大学煤矿综采装备山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: 为了提高双螺杆挤出机的混炼剪切效果, 搭建带有捏合盘元件的双螺杆和带有反螺纹元件的双螺杆的组合螺杆模型, 导入 Gambit 进行网格划分, 使用 Polyflow 对等温条件下线型低密度聚乙烯与苯乙烯-丁二烯-苯乙烯共聚物共混熔体在不同组合螺杆中进行瞬态任务的仿真, 利用粒子示踪法分析并得出不同螺杆中粒子的分散混合与分布混合规律, 将结果与常规螺杆进行对比分析。从而得出结论: 组合螺杆的混合效果比常规螺杆更好, 其中具有反螺纹元件的螺杆在挤出过程中比常规螺杆提高约 78% 的剪切应力; 其轴向的反流情况增加了粒子的停留时间, 适用于反应挤出实验; 且径向粒子混合效果优异, 粒子间混合后的分离尺度是常规螺杆的一半, 说明其混合均匀程度能够达到常规螺杆的 2 倍。

关键词: 螺杆元件; 粒子示踪; 分散混合; 分布混合

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)06-0074-04

Simulation of Influence of Twin-Screw Meshing Element and Anti-Thread Element on Flow Field

Han Haichuan^{1,2}, Liu Jin^{1,2}, Li Kaiguo^{1,2}, Sun Liang^{1,2}, Yao Aiyong^{1,2}, Chen Zhanchun^{1,2}

(1. Taiyuan University of Technology School of Mechanical and Transport Engineering, Taiyuan 030024, China;

2. Taiyuan University of Technology coal mining equipment Shanxi key laboratory, Taiyuan 030024, China)

Abstract : To improve the mixing shear effect of twin-screw extruder, a combined screw model with pinching disc element and twin-screw with anti-thread element was built, introduced into the Gambit for mesh division, and the mixture of linear low density polyethylene and styrene-butadiene-styrene copolymer was simulated in different combination screw under isothermal conditions. The particle tracer method was used to analyze and obtain the dispersion and distribution of particles in different screw. It is concluded that the mixing effect of the combined screw is better than that of the conventional screw, in which the screw with the anti-thread element increases the shear stress by about 78% compared with the conventional screw during extrusion. The axial reflux increases the particle residence time and is suitable for the reaction extrusion experiment.

Keywords : screw element ; particle tracer ; dispersion mixing ; distribution mixing

聚合物材料由于其成本低、易改性等特点, 在汽车、家电等领域都有广泛的应用。为满足人们生产生活所需, 聚合物通常需要多种材料共混改性, 从而制备出符合韧性、硬度等要求的材料。啮合同向双螺杆挤出机是最常见的聚合物共混加工设备^[1], 其中的螺杆结构由螺纹元件、捏合盘元件和反螺纹元件等单个元件通过花键组合连接而成, 而不同的组合结构会对熔体流场产生不同的混合效果。

王飞等^[2]从力化学反应器的新型螺杆与料筒

的配合结构入手, 在料筒内壁与螺杆外表面开设内齿与螺棱隔断, 通过数值模拟对物料的剪切速率、运动速度和压力等的分析, 发现开设内齿的新型料筒螺杆结构比普通强剪切挤出机剪切效率提高了 67% ; 张帅等^[3]利用 Polyflow 软件对螺杆与料筒不同的断面形状组合进行了模拟研究, 研究发现了螺杆与料筒螺槽断面形状都为梯形时剪切效果更好; 张鹏等^[4]对螺棱梯形底角和凹槽半径进行了数值模拟, 发现螺棱界面梯形底角为 60° 且凹槽半

通讯作者: 陈占春, 硕士生导师, 副教授, 博士, 主要从事高聚物加工及形态结构的研究 E-mail: chenzhanchun2003@163.com

收稿日期: 2020-04-06

引用格式: 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 the influence of twin-screw meshing element and anti-thread element on flow field[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):74-77, 87.

径为 1.5 mm 时,螺杆的剪切效果最好;I. Manas-Zloczower 等^[5]得出,错列角和长度一定时,捏合盘厚度增加,它的分散混合能力变强而分布混合减小;J. I. Orisaleye 等^[6]开发了设计螺杆挤出机的分析模型,推导出了螺杆最佳通道深度和螺旋角的表达式,可以有效预测螺杆挤出机的性能;胡东东等^[7]系统分析了捏合盘厚度、错列角等参数对流场的影响,并分析出各项参数下的混合同律。沈晓斌^[8]等人设计了圆弧齿廓代替渐开线齿廓的双螺杆磨浆机,增大了设备的传动功率,提高了效率。

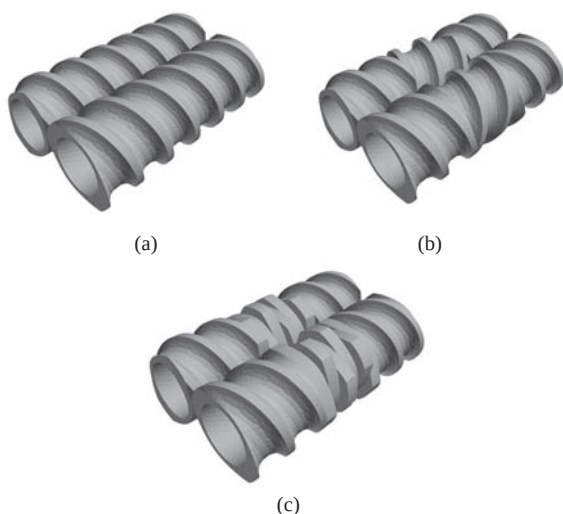
国内外学者们对啮合同向双螺杆进行了许多较为深入的研究^[9-11],多集中在对捏合盘不同结构的分析中,还不足以全面分析螺杆中的混合情况。笔者针对螺杆中对流场影响显著的元件捏合盘和反螺纹,利用粒子示踪方法,研究粒子在不同元件组合的螺杆中的混合情况,通过统计分析,比较其分散混合与分布混合的规律。

1 理论模型

1.1 有限元模型

根据搭建同向双螺杆的几何学原理^[12],建立常规双螺杆 I、带有反螺纹的双螺杆 II、带有捏合盘的双螺杆 III (下文以 I、II、III 表示) 的三维模型,如图 1 所示。

螺杆外径为 16.6 mm,内径为 13 mm,每个元件导程为 30 mm,每个捏合盘厚度为 5 mm,错列角为 72°,螺杆中间挖空便于网格划分和数值计算。



a—双螺杆 I; b—双螺杆 II; c—双螺杆 III

图 1 双螺杆的有限元模型

1.2 数学模型

(1) 模拟假设。

在模拟过程中,根据聚合物的性质和熔体在混合段的输送情况,可以做以下的假设:

①壁面无滑移;②流体为不可压缩的非牛顿流体;③相较于流体的粘滞力可以忽略惯性力和重力的作用。

(2) 模拟方程。

根据以上的假设条件,描述流体的方程如下:

连续性方程: $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$

运动方程: $-\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0$

流体本构方程:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}}$$

式中, $\mathbf{v}$ 为速度矢量, m/s; P 为静压力, Pa; $\boldsymbol{\tau}$ 为剪切应力张量; η 为表观黏度, Pa·s; η_{∞} 为无限剪切速率下的黏度; η_0 为零剪切黏度, Pa·s; λ 为松弛时间, s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s⁻¹; n 为非牛顿指数。

为了便于粒子示踪的观察和分析,模拟中采用质量比为 50 : 50 的线型低密度聚乙烯 (PE-LLD) 与苯乙烯-丁二烯-苯乙烯共聚物 (SBS) 混合流变值^[13],见表 1。

表 1 Bird-Carreau 粘度模型参数

PE-LLD/SBS	η_0 / Pa·s	λ / s	n
50 : 50	5520	0.049	0.500

2 数值模拟

2.1 建立有限元模型

将三维模型导入到 Gambit 中进行有限元网格的划分,螺杆采用非规则型 (TGrid) 四面体单元 (Tet/Hybrid) 划分网格。流体流动的区域流体域采用六面体 (Hex) 类型单元和规则性网格划分方法 (Map),如图 2 所示。其中啮合区域是混合发生的地方,网格需要细化以增加计算结果的可靠性。

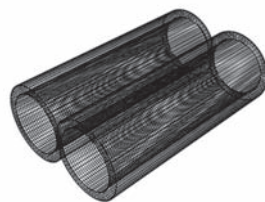


图 2 流体域网格模型

2.2 模拟参数设定

在瞬态任务中,螺杆转动过程会带来网格重复划分从而增加计算量的问题。而在 Polyflow 中具有网格重叠技术 (MST),可以自动将螺杆与流体域的网格进行组合生成,方便计算。

设定螺杆转速为 100 r/min,每隔 0.05 s (一

个时间切片)螺杆转动 30° 取一个结果值储存,共储存6个结果也就是螺杆转动 180° 回到初始位置时刻。流体域入口压力为0,出口压力为1 MPa。用Picard插值进行黏度迭代计算。

3 结果分析

混合过程是将聚合物的非均匀性趋于均匀的一种物理混合方式,各组分并没有改变其本质。而混合指标是衡量螺杆工作效果的重要参数,其中主要包括:分散混合,通过外力减小粒子尺度并使其分布均匀;分布混合,在不改变粒子尺度的情况下使其在空间中均匀分布。

在流体域的入口处放置1000个粒子进行混合任务的计算,将模拟结果在Polystat中读入,通过函数计算统计并观察粒子的混合及分布情况。

3.1 分散混合

(1) 剪切应力分布。

剪切应力能很好反映粒子在混合过程中所经历的受力情况。计算粒子可能经历的所有剪切应力值,并统计所经历某一剪切应力值及以下的粒子个数占所有粒子的百分比,记此剪切应力值为最大剪切应力值^[14]。统计结果如图3所示。

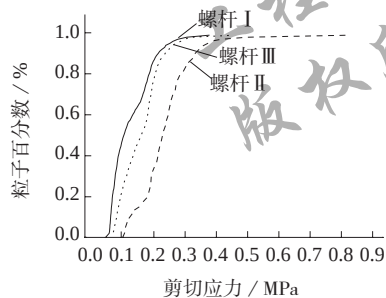


图3 剪切应力分布图

从图3可看出,三种螺杆中最大剪切应力分布的趋势大致相同,常规螺杆最小的剪切应力大约为0.07 MPa,带反螺纹的螺杆为0.125 MPa,带捏合盘的为0.075 MPa。在相同的粒子百分数情况下,带有反螺纹的II中粒子经历的最大剪切应力最大,带有捏合盘的III中次之,常规螺杆I中最小。而在分布曲线的末端,I中所有粒子经历的最大剪切应力值在0.4 MPa处已经结束;III中还有少量粒子经历的最大剪切应力值仍在增加,大约可以接近到0.5 MPa;而II中仍有相当一部分粒子经历着更高的最大剪切应力,大约为0.9 MPa。

根据统计曲线分布情况,具有反螺纹和捏合盘的组合螺杆结构剪切效果更好,具有反螺纹结构的

螺杆在正向螺纹与反向螺纹交汇处,反螺纹可以阻挡粒子的正常输送,并且在螺杆转动过程中给粒子一个反向的剪切应力,在正向螺纹与反向螺纹的共同剪切下形成了更大的剪切应力,比常规螺杆的剪切应力提高了近78%。

由于粒子所经历的最大剪切速率与最大剪切应力分布曲线趋势相同,因此不再赘述。

3.2 分布混合

(1) 分布指数。

将粒子随机的分布在流体域三维空间中,记此时的随机分布为粒子的最优分布,然后将每个计算结果的粒子分布情况与最优分布作比较,差异越小则证明粒子混合状态越好。分布指数统计如图4所示。

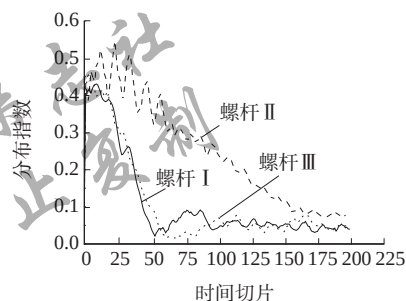


图4 分布指数统计图

图4中每个时间切片为0.05 s,共200个切片。加有反螺纹的螺杆II在起始阶段粒子混合与最优解有一段差异减小的过程,大约在第四个时间切片的时候,随着螺杆工作时间的增加,II中的粒子分布指数出现剧烈的波动且大幅增加。反螺纹结构使粒子产生了回流阻碍了粒子继续沿轴向的分布,与随机分布在整个流体域空间的最优解粒子差异增大。带捏合盘螺杆III与常规螺杆I中粒子在第50个时间切片处就已经在整个流体域空间中分布均匀,而带有反螺纹的螺杆II中在第150个时间切片处曲线才趋于最小,其粒子在整个空间的分布才相对均匀。

因此,带有反螺纹的螺杆在空间分布时间上相对滞后,增加了粒子在挤出机内的停留时间宽度,这种特性适用于反应挤出实验中。

(2) 分离尺度。

建立粒子的浓度场,设置入口处左半边的粒子浓度为1,右半边粒子浓度为0,分别代表不同的粒子^[15],粒子经过螺杆的剪切混合之后在出口处的分布状态,如图5所示。

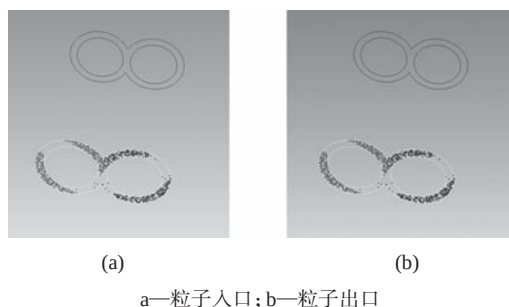


图5 粒子入口(左)、出口(右)

示踪粒子在向前输送时,不断被螺杆掺混,分离尺度也由最初入口两侧不断减小,统计图如图6所示。

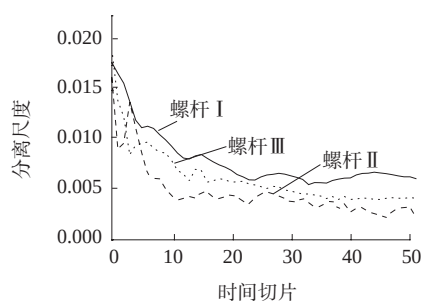


图6 分离尺度统计图

时间切片后半段分离尺度的变化趋势不大,因此只取前50个时间切片用来分析。

通过分离尺度可以得到径向平面粒子间的混合情况。可以看到常规螺杆中分离尺度下降趋势相对较缓,当曲线平稳时,两种组合螺杆的分离尺度要比其小,证明其径向平面的粒子间经过螺杆的剪切混合,两种粒子的间距减小。带有反螺纹的螺杆Ⅱ的分离尺度达到最小,能够达到常规螺杆中粒子分离尺度的1/2。在回流与多次剪切下,带有反螺纹结构的螺杆使得径向平面的粒子掺混均匀,其优异的径向混合效果是常规螺杆的2倍。

4 结论

通过建立不同元件在啮合同向双螺杆中的三维组合模型,使用 Polyflow 对 PE-LLD 和 SBS 混合熔体在三维模型中进行转动剪切模拟,最后利用粒子示踪统计方法,分析不同模型的分散、分布混合规律,得出结论:

(1) 两种组合结构的螺杆剪切效果优于常规螺杆,并且在组合螺杆中,带有反螺纹的螺杆剪切力最大,比常规螺杆提高了约78%,其所具备的分散混合能力更强;

(2) 在空间分布混合中,反螺纹的回流现象阻碍了粒子在空间中的分布混合,这种反流的特性增加

了粒子的停留时间,可以应用于反应挤出中。而常规螺杆与带有捏合盘的螺杆中粒子的空间分布混合较快,并且二者的分布指数趋势大致相同,在工程实验中的表现不会有太大差异;

(3) 径向平面中粒子的分离尺度,两种组合螺杆的混合情况要比常规螺杆好。带有反螺纹的螺杆在回流与强剪切的作用下,使得径向平面中不同粒子均匀的掺混,大大提高了粒子间的混合效果,其粒子径向混合效果是常规螺杆的2倍。

综上所述,在实际生产中双螺杆中的每一种元件对挤出流场的影响不同,进而影响整个螺杆的挤出分散效果。通过计算机模拟 PE-LLD/SBS 材料在不同螺杆结构中的混合分散效果及规律,可以有效指导啮合同向双螺杆挤出机的螺杆元件搭配设计以及聚合物的生产加工。

参考文献

- [1] 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.
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.
- [2] 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):84-87.
Wang Fei, Chen Zhanchun, Li Hong, et al. Effect of new structural parameters of screw barrel on the performance of mechanical chemical reactor [J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(12):84-87.
- [3] 张帅,李峰,王宁,等. 螺杆与料筒不同断面形状组合对挤出机流场的影响[J]. 工程塑料应用,2014(10):79-82.
Zhang Shuai, Li Feng, Wang Ning, et al. Influence of screw and channel sectional shapes on extruder flow field [J]. Engineering Plastics Application, 2014(10):79-82.
- [4] 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(6), 45(6):75-79.
- [5] Manas-Zloczower I, Tadmor Z. Mixing and compounding of polymers-theory and practice[M]. New York:Hanser Publishers, 1994.
- [6] Orisaleye J I, Adefuye O A, Ogundare A A, et al. Parametric analysis and design of a screw extruder for slightly non-Newtonian (pseudoplastic)materials[J]. Engineering Science & Technology An International Journal, 2018, 21(2):229-237.
- [7] 胡冬冬,陈晋南. 啮合同向双螺杆挤出机中组合螺杆性能的数值研究(I) 瞬态流场分析[J]. 中国塑料,2005(3):90-100.

- [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(12):97-100.
- Ma Zhenfeng, Liu Shengyong, Wei Min. Design of mould with semi-circle reversal core-pulling mechanism for fuel injector top cover[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(12):97-100.
- [8] 黄继战, 范玉. 汽车侧后视镜壳体注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5):110-114.
- Huang Jizhan, Fan Yu. Design of injection mold for automobile side rear view mirror shell[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):110-114.
- [9] 张春彬, 张织璇. 基于UG的电吹风圆扁风口塑件工业造型与注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2):82-87.
- Zhang Chunbin, Zhang Zhixuan. Industrial modeling and injection mould design for circular and flat tuyere plastic part of hair dryer based on UG[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):82-87.
- [10] 吴冬俊, 周小军, 梁莉, 等. 基于Rhino造型的口部螺纹花艺瓶吹塑成型设计[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(12):91-96.
- Wu Dongjun, Zhou Xiaojun, Liang Li, et al. Design of injection-stretch-blow molding for floral bottle with mouth thread based on rhino modeling[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(12):91-96.
- [11] 杨华林. 锥形盖差速滑块脱内螺纹机构及注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11):64-70.
- Yang Hualin. Design of internal thread demoulding mechanism and injection mold for taper cap differential slider[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):64-70.
- [12] 任永胜, 孙世臣, 田玉晶, 等. 展板支架连接件注塑模具设计与优化[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(10):90-94.
- Ren Yongsheng, Sun Shichen, Tian Yujing, et al. Design and optimization of injection mold for connector of display board bracket[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):90-94.
- [13] 翟林, 韩国泰, 胡海朝, 等. 基于Moldflow与Abaqus的注射成型及模具结构联合仿真分析[J]. 中国塑料, 2018, 32(2):128-133.
- Zhai Lin, Han Guotai, Hu Haichao, et al. Structural analysis of injection moulds based on moldflow and abaqus softwares[J]. China Plastics, 2018, 32(2):128-133.
- [14] 陈黎明, 熊建武, 沈忠良. 内壁六面包围框形塑料件脱模机构及模具设计[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(9):87-93.
- Chen Liming, Xiong Jianwu, Shen Zhongliang. Design of compound core-pulling mechanism and injection mold for six-bread frame-shaped parts with inner wall[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9):87-93.
- [15] 汪海涛. 基于正交试验法的注塑成型参数优化[J]. 上海塑料, 2019(2):58-62.
- Wang Haitao. Optimization of injection molding parameters based on orthogonal test method[J]. Shanghai Plastics, 2019(2):58-62.
-
- (上接第77页)
- Hu Dongdong, Chen Jinnan. Numerical Investigation of screw assemblies performance in intermeshing co-rotating twin-screw extruders(I) Instantaneous Flow Analysis[J]. China Plastics, 2005(3):90-100.
- [8] 沈晓斌, 张付英, 王平, 等. 新型双螺杆磨浆机传动系统的设计研究[J]. 机械设计与制造, 2009(7):180-181.
- Shen Xiaobin, Zhang, Fuying, Wang Ping, et al. The design and research of a new transmission system of high-power BIVIS[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(7):180-181.
- [9] 王明岩. 挤出机螺杆与机筒的加工及其装配工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- Wang Mingyan. Research on machining and assembling technology of extruder screw and barrel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [10] 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.
- [11] 王远, 马秀清. 新型捏合盘元件不同螺杆构型混合性能的数值模拟[J]. 橡塑技术与装备, 2016(12):63-67.
- Wang Yuan, Ma Xiuqing. Numerical simulation of mixing performance for different screw configuration of new kneading disc element[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment, 2016(12):63-67.
- [12] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- Geng Xiaozheng. Application of twin screw extruder[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003.
- [13] 许王定, 钱欣. PE-LLD/SBS共混过程中浓度分布的数值模拟及实验研究[J]. 中国塑料, 2009(2):70-74.
- Xu Wangding, Qian Xin. Numerical and experimental study on concentration distribution of PE-LLD/SBS blending process[J]. China Plastics, 2009(2):70-74.
- [14] 李彦周, 张鹏, 张帅, 等. 机筒槽深和机筒与螺棱间隙的变化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.
- [16] 庄园园, 李翱, 毕超, 等. 主要工艺参数对串联式磨盘挤出机混合性能的影响[J]. 塑料, 2014, 43(5):4-7.
- Zhuang Yuanyuan, Li Ao, Bi Chao, et al. Influence of main technological parameters on mixing performance of series disc extruder[J]. Plastics, 2014, 43(5):4-7.