

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.019

注塑机用波状型分离螺杆混炼性能数值模拟

柳天磊¹, 杜遥雪², 何显运¹, 孙涛涛¹

(1. 广东工贸职业技术学院机械工程系, 广州 510510; 2. 五邑大学智能制造学部, 广东江门 529020)

摘要:借助于有限元数值模拟软件 Ansys Polyflow, 对普通型分离螺杆和波状型分离螺杆混炼性能进行数值模拟研究, 对比分析了两种螺杆构型在相同的参数条件下的塑化效果和流场特点。结果表明, 相对于普通的双螺纹型分离螺杆, 波状型分离螺杆螺槽深度的周期性变化, 使熔体获得更大的压力和剪切作用, 但由于波状凸起占据了部分螺槽空间, 导致副螺棱的分离作用没有得到充分发挥; 波状型分离螺杆螺槽内的起伏变化, 造成螺杆径向方向受力大小波动较大、轴向受力较大, 这对螺杆强度和传动动力有着严格的要求。因此, 需要进一步优化波状型分离螺杆螺槽构型, 设计出分离作用明显、径向受力平稳且轴向受力较小的螺杆构型。

关键词: 分离螺杆; 波状构型; 混炼性能; 数值模拟

中图分类号: TQ320.64 / TQ330.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0107-06

Numerical Simulation on Mixing Properties of Wave Barrier Screw in Injection Moulding Machine

Liu Tianlei¹, Du Yaoxue², He Xianyun¹, Sun Taotao¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, Guangzhou 510510, China;

2. School of Intelligent Manufacturing, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract : With the finite element numerical simulation software Ansys Polyflow, the numerical simulation on the mixing properties for the wave barrier screw unit and normal barrier screw unit was carried out. The plasticizing quality and flow field characteristics of the two above screws under same operating conditions were compared. The results show that, in comparison with the normal barrier screw, the wave barrier screw can make the melt obtain greater pressure and local shear rate because of the periodic depth change in the screw groove. However, the screw wave takes up the space for conveying the melt which can cause the separating function of the secondary flight develop inadequately. Moreover, the wave groove can result in the violent shock for the radial force and larger increase for the axial force, which leads to strict requirements on the screw strength and the drive power. Consequently, optimized screw configuration is needed to gain small radial force fluctuation and little axial force together with an obvious separation action.

Keywords : barrier screw ; wave configuration ; mixing efficiency ; numerical simulation

螺杆是塑化设备中的关键部件,按其结构及其几何形状的特征,可分为通用螺杆和新型螺杆。通用螺杆又称三段式螺杆,是螺杆的基本形式。新型螺杆形式很多,主要有分离型螺杆、分流型螺杆、波状螺杆、横纹螺杆、无计量段螺杆、两段式排氯螺杆、强混炼型螺杆等。波状螺杆是其中应用很广泛的一种新型螺杆,通过设计不同螺槽深度、螺槽结构来替代传统的等深螺槽结构,目前主要有单波螺杆、双波

螺杆、多波螺杆^[1-2]。国内外研究者的实验表明^[3-8]:与通用螺杆相比,双波螺杆熔融温度低、加工能力强、循环时间短,是一种高效能螺杆。

波状型分离螺杆是双波螺杆众多设计中的一种螺杆构型,集成了分离型螺杆和波状螺杆两种螺杆的优点,适用于加工多种聚合物。笔者利用流体分析软件 Ansys Polyflow 对比分析了波状型分离螺杆和普通型分离螺杆的混炼性能,为优化螺杆构型

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11972023), 广东省普通高校特色创新类项目 (2019GKTSCX022), 广州市科技计划项目 (201904010281)

通信作者: 柳天磊, 高级工程师, 研究方向为塑料机械及模具 CAD/CAE

收稿日期: 2021-03-18

引用格式: 柳天磊, 杜遥雪, 何显运, 等. 注塑机用波状型分离螺杆混炼性能数值模拟 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6) : 107-112.

Liu Tianlei, Du Yaoxue, He Xianyun, et al. Numerical simulation on mixing properties of wave barrier screw in injection moulding machine[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6) : 107-112.

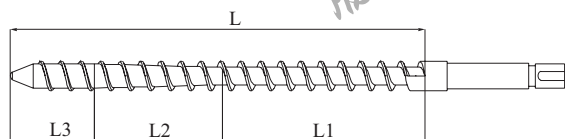
设计提供借鉴和指导。

1 模型与材料

为了简化分析,作如下假设^[9]:熔体流动为连续、等温的层流;熔体不可压缩,沿机筒和螺杆表面无滑移;忽略重力的影响和界面的表面张力。

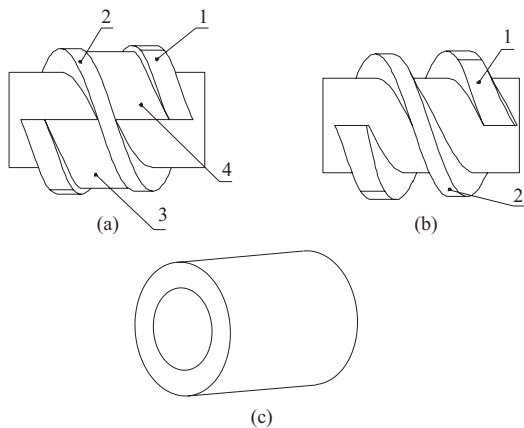
1.1 物理模型及网格划分

通用型三段式螺杆构型如图1所示,由输送段、压缩段、计量段组成。研究分析模型在压缩段设计为波状型分离螺杆,即在普通双螺纹型分离螺杆的基础上在螺纹底槽增加椭圆形波状凸起,并设计普通型分离螺杆作为对照进行比较研究,其模型如图2所示。实体模型参数如下:波状型分离螺杆轴向长度为33 mm,螺距与直径均为25 mm,螺槽共设1对椭圆形上波下波,椭圆长轴为23 mm,短轴为16 mm,上下波基圆直径均为16 mm,主螺棱宽度为4 mm,副螺棱宽度为3 mm;普通双螺纹型分离螺杆轴向长度为33 mm,螺距与直径均为25 mm,主螺棱宽度为4 mm,副螺棱宽度为3 mm;两种螺杆通用流道是环形柱体,内径为16 mm,外径为26 mm,轴向长度为35 mm。网格模型参数如下:两种螺杆均采用Tet/Hybrid单元,类型采用TGrid划分网格,其中波状型分离螺杆网格单元数为166 721个,节点数为38 073个,普通型分离螺杆网格单元数为147 700个,节点数为34 919个;流道



L—螺杆工作段; L1—输送段; L2—压缩段; L3—计量段

图1 通用型三段式螺杆构型



1—主螺棱; 2—副螺棱; 3—上波; 4—下波

a—波状型分离螺杆; b—普通型分离螺杆; c—流道

图2 螺杆及流道构型

采用Hex/Wedge单元,类型采用Cooper划分网格,网格单元数为183 680个,节点数为197 948个。

1.2 材料及模拟方法

模拟采用Bird-Carreau Law本构模型来表征混炼熔体的黏度(η)。

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

式中: η_0 ——零剪切黏度;

λ ——松弛时间;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率;

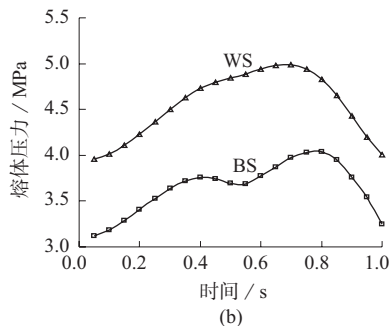
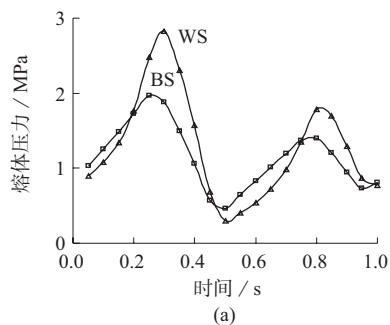
n ——幂律指数。

模拟采用的聚合物为聚丙烯(PP),其物性参数为 $\eta_0 = 26470 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $n = 0.38$, $\lambda = 2.15 \text{ s}$,密度 $\rho = 0.91 \text{ g/cm}^3$,入口流量 $Q = 6677 \text{ mm}^3/\text{s}$,转速 $N = 60 \text{ r/min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 压力

图3是流道内靠近外壁面(对应于注射机料筒内壁面,螺杆与料筒间隙处)及内壁面(对应于注射机螺杆根径面)处两种分离螺杆熔体压力随时间变化关系曲线,图中WS代表波状型分离螺杆,BS代表普通型分离螺杆。图3a中,在螺杆与料筒内壁之间的间隙内,两种螺杆熔体压力变化趋势相同,不同之处在于波状型分离螺杆流道内熔体压力波动幅度更大。如图2a所示,造成上述现象主要由于波状



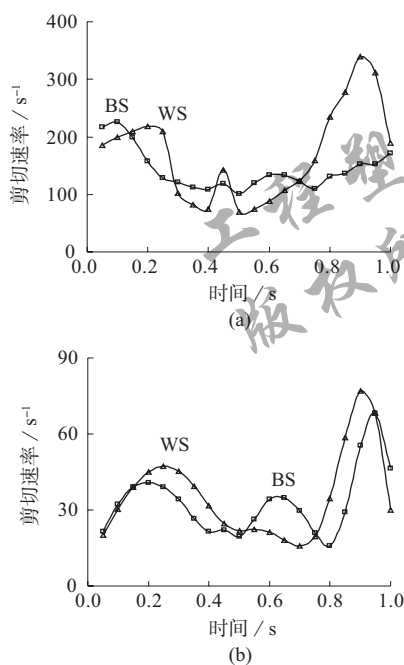
a—螺杆与料筒间隙处; b—螺杆根径处

图3 流道内不同位置熔体压力随时间变化

型分离螺杆螺槽底部波状变化造成熔体流动空间不断变大或变小,在螺槽空间变小的区域熔体挤压造成压力升高,而在螺槽空间变大的区域熔体膨胀导致压力降低。这在螺槽底部即螺杆根径处表现得更加突出,如图 3b 所示,波状型分离螺杆螺槽底部形成的熔体压力远大于普通型分离螺杆螺槽底部形成的熔体压力。因此,波状型分离螺杆一方面可以用于降低注射油缸压力,另一方面可应用于需要较大熔融压力的塑料制品注射成型。

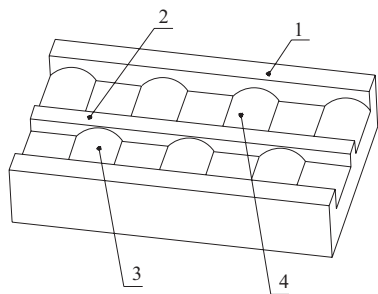
2.2 剪切速率

图 4 是流道内不同位置两种分离螺杆熔体受到的剪切速率随时间变化关系曲线。图 5、图 6 为波状型分离螺杆螺槽展开示意图及螺杆波峰局部流道示意图。由图 5 可知,螺槽由波峰和波谷组成,从波谷到波峰形成一个收敛区,由波峰到波谷形成一个发散区,分别对应于图 6 中 I 区和 II 区。在收敛



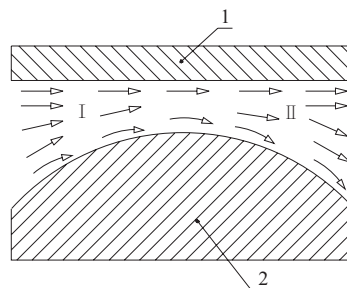
a—螺杆与料筒间隙处;b—螺杆根径处

图 4 流道内不同位置剪切速率随时间变化



1—主螺棱;2—副螺棱;3—上波;4—下波

图 5 波状分离型螺杆螺槽展开示意图



1—料筒;2—螺杆;I—收敛区;II—发散区

图 6 波状型分离螺杆波峰局部流道示意图

区 I 内,随着螺槽腔体逐渐变小,熔体物料受到不断增大的剪切作用,剪切速率不断变大;如图 4a 所示,螺杆与料筒间隙处波状型分离螺杆对物料的剪切作用波动大小明显大于普通型分离螺杆对物料的剪切作用,导致前者熔体的剪切速率大于后者,原因主要在于波状型分离螺杆波峰与料筒内壁形成的收敛区的挤压作用。在发散区 II 及波谷处,随着螺槽腔体逐渐变大,熔体物料受到的剪切作用不断减小,在波谷处达到最小值,剪切速率不断变小;如图 4b 所示,在螺杆根径处,波状型分离螺杆与普通型分离螺杆流道内熔体的剪切速率变化趋势基本一致,并无明显的差别,这主要是因为根径处波状型分离螺杆与普通型分离螺杆的构型一样,因此对熔体的剪切作用基本一样。

2.3 混合指数

为了表征熔体内粒子运动形式和运动强度,引入混合指数 (ζ)^[10-13]。

$$\zeta = \frac{|D|}{|D| + |W|} \quad (2)$$

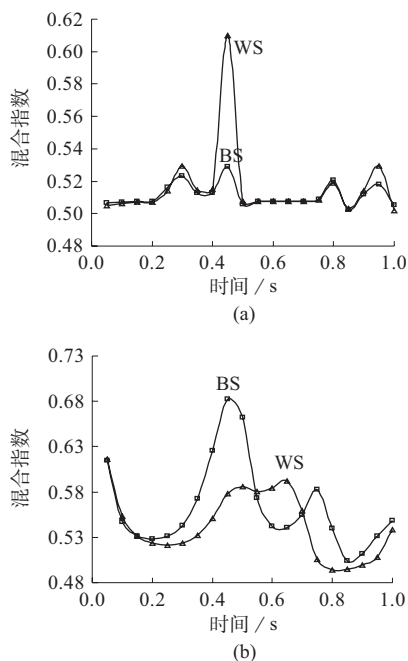
式中: $|D|$ ——形变速率张量绝对值;

$|W|$ ——旋度张量绝对值。

$\zeta=0$, 对应于纯旋转运动; $\zeta=0.5$, 对应于简单剪切运动; $\zeta=1$, 对应于纯拉伸流动。

图 7 为流道内不同位置混合指数随时间变化曲线。由图 7a 可知,在螺杆与料筒的间隙处,两种螺杆的混合指数随时间变化趋势除了部分偏离外基本重合,说明两种螺杆对物料主要起剪切作用,两种螺杆混合指数曲线发生偏离的地方主要是由于波状型分离螺杆波状变化的螺槽收敛区尤其是波峰处形成的强剪切作用。由文献 [9] 可知,波状螺槽波峰与波谷的相间分布又导致物料粒子发生旋转运动。

相对于图 7a 螺杆与料筒间隙处两螺杆内熔体混合指数基本在 0.50 ~ 0.54 小区间内振荡变化,图



a—螺杆与料筒间隙处; b—螺杆根径处

图7 流道内不同位置混合指数随时间变化

7b 螺杆根径处两螺杆内熔体混合指数变化区间显著变宽,在 0.50~0.70,且波状型分离螺杆内熔体混合指数低于普通型分离螺杆内熔体混合指数。这说明在一个工作周期内,波状型分离螺杆螺槽内熔体在螺槽底部主要受到剪切作用,在螺槽顶部会受到短时间的强剪切作用和拉伸作用;而普通型分离螺杆螺槽内熔体在螺槽底部主要受到较大的剪切作用和拉伸作用,在螺槽顶部则主要受到剪切作用。

2.4 黏度

由熔体黏度的 Bird-Carreau Law 本构模型可知,示踪点处的黏度变化和流场内剪切速率的变化成反比例关系。由图 4a 可知,螺杆与料筒间隙处熔体受到的剪切速率变化范围为 $50 \sim 350 \text{ s}^{-1}$,将剪切速率的值代入到 Bird-Carreau Law 本构模型公式(1)中,可得本构模型曲线,见图 8。由图知,模拟采用的 PP 材料熔体黏度随着剪切速率的增大而减小,

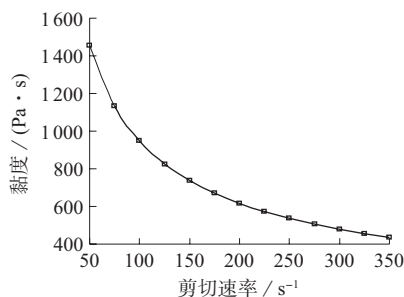
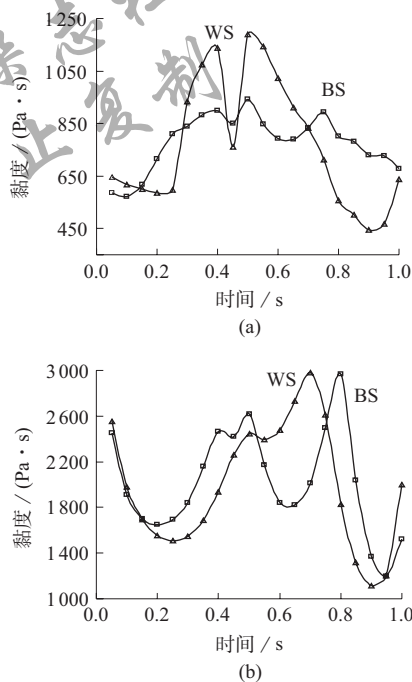


图8 熔体黏度与剪切速率本构模型曲线

即呈现出热塑性材料“剪切变稀”的特性。

图 9 为螺槽内不同位置处熔体黏度随时间变化曲线。图 9a 中,螺杆与料筒间隙处,普通型分离螺杆螺槽内熔体黏度变化比较平稳,波动范围在 $550 \sim 950 \text{ Pa} \cdot \text{s}$;而波状型分离螺杆由于其自身螺杆构型形成的收敛流道和发散流道导致其螺槽内熔体变化急剧波动,波动范围为 $450 \sim 1200 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。结合图 4a 和图 9a 可知,螺杆螺槽内熔体黏度变化范围的模拟结果与由公式理论计算出的结果基本一致,这间接证明了模拟研究结果的可取性。图 9b 中两螺杆螺槽底部熔体黏度随时间变化曲线基本一致,熔体黏度波动范围均在 $1200 \sim 3000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,这远大于图 9a 中螺槽顶部熔体黏度,结合图 8 反映的热塑性塑料“剪切变稀”特性,说明熔体在螺槽顶部受到的剪切作用远大于螺槽底部受到的剪切作用。

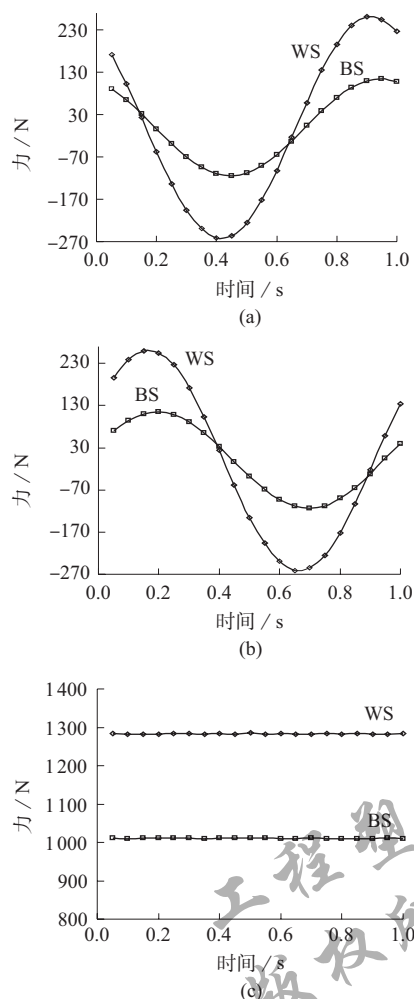


a—螺杆与料筒间隙处; b—螺杆根径处

图9 流道内不同位置黏度随时间变化

2.5 螺杆受力

实际生产过程中螺杆受力大小主要取决于机头压力、输送和塑化塑料熔体所产生的阻力等,分析螺杆受力,尤其是轴向受力,对于螺杆传动系统设计有着重要的指导作用。图 10 给出了波状型分离螺杆和普通型分离螺杆在 X, Y, Z 三个方向上受力大小随时间变化曲线(X, Y 方向为螺杆径向平面的两个方向, Z 方向为螺杆轴向即长度方向)。由图 10a 和图 10b 可知,两个螺杆在 X 方向 $t=0 \text{ s}$ 时刻受力



a—X方向; b—Y方向; c—Z方向

图10 螺杆在X, Y, Z方向受力随时间变化

大小与Y方向 $t=1$ s时刻受力大小相等,在X方向 $t=1$ s时刻受力大小与Y方向 $t=0$ s时刻受力大小相等,可以推出在X方向 t_0 时刻受力大小与Y方向 t_0+1 时刻受力大小相等,即在X, Y方向上受力大小是周期性变化的。这主要是由于两种螺杆构型都是周期性变化,对于任意一个参照点螺杆螺棱都是周期性作用于该位置。由图10a和图10b还可以看出,普通型分离螺杆在X, Y方向受力大小变化波动范围在 $-120 \sim 110$ N,波状型分离螺杆在X, Y方向受力大小变化波动范围在 $-260 \sim 260$ N,说明波状型分离螺杆在X, Y方向受力变化波动范围大于普通型分离螺杆。而在图10c中,两种螺杆在Z方向受力大小稳定,波状型分离螺杆受力大于普通型分离螺杆,普通型分离螺杆受力在1010 N上下波动,而波状型分离螺杆受力在1280 N上下波动。出现上述现象,原因在于波状螺杆螺槽深度的高低变化对

熔体产生的挤压和膨胀作用,熔体受力后反作用螺杆。综上所述,相对于普通型分离螺杆,波状型分离螺杆承受着更大的轴向力,且在径向方向波动较大。

3 结论

(1) 相对于普通的双螺纹型分离螺杆,波状型分离螺杆螺槽深度的周期性变化,形成收敛流道和发散流道,使熔体获得更大的熔体压力和剪切作用,对于机头压力较高的场合或需要高剪切进行分散混合的项目中,可以采用设计波状型分离螺杆。但是波状型螺杆螺槽中由于波状凸起占据了部分螺槽空间,且和起分离作用的副螺棱有重叠,导致副螺棱的分离作用没有得到充分发挥,其分离剪切和拉伸作用在波状凸起和副螺棱重叠区域小于普通型分离螺杆。因此波状型分离螺杆设计时应考虑增加分散混合作用较强的混炼元件如销钉元件等,从而弥补其不足。

(2) 波状型分离螺杆螺槽内的起伏变化,造成收敛区和发散区物料填充密度不一致,螺杆径向方向受力大小波动较大,对于螺杆强度有较高的要求;同时,波状型分离螺杆轴向受力较大,需要较大的传动动力,在一些机头压力较大的场合,这会增加传动动力的负荷。因此,需要进一步优化波状型分离螺杆螺槽构型,使得螺槽内熔体可以获得更大的剪切作用、拉伸作用,设计出径向受力波动较小且轴向受力较小的螺杆构型,为波状型分离螺杆的优化设计和工程应用提供理论参考。

参考文献

- [1] Kruder G A, Calland W N. Triple channel wave screw, US5375992[P].1994-12-27.
- [2] 柳天磊. 振动场作用下双波螺杆混炼性能数值模拟[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(3):57-61.
Liu Tianlei. Numerical simulation on mixing properties of double wave screw under vibration force field[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(3):57-61.
- [3] 彭学成. 全波动螺杆提高产量改善稳定性[J]. 国外塑料, 1992, 10(1):24-25.
Peng Xuecheng. Double-wave screw improves product and stability [J]. World Plastics, 1992, 10(1):24-25.
- [4] Heathe W R. Double wave screw, US6227692B1[P].2001-05-08.
- [5] 陈子运, 彭玉成, 任鸿烈. 波状螺杆的熔融速率[J]. 华南工学院学报, 1985, 13(1):29-40.
Chen Ziyun, Peng Yucheng, Ren Honglie. The melting rate of

- twin-channel wave screw extruders[J]. South China Institute of Technology, 1985, 13(1):29-40.
- [6] 陈子运. 波状螺杆及其应用[J]. 塑料, 1987(5):15-19.
Chen Ziyun. Wave screws and their applications[J]. Plastics, 1987(5):15-19.
- [7] 王兴天, 杨红, 杨于光. 波状注塑螺杆熔体输送机理的研究[J]. 中国塑料, 1991, 5(2):60-73.
Wang Xingtian, Yang Hong, Yang Yuguang. Research of melt conveying mechanism of wave screw for injection moulding[J]. China Plastics, 1991, 5(2):60-73.
- [8] 张康生. 新型双波状分离型螺杆[J]. 塑料包装, 1999, 9(1):34-39.
Zhang Kangsheng. New double wave screw[J]. Plastics Packing, 1999, 9(1):34-39.
- [9] 柳天磊. 振动力场强化塑料挤出过程混合机理研究[D]. 江门: 五邑大学, 2011:18-25.
Liu Tianlei. Research on mixing mechanism under vibration force field in extruding process[D]. Jiangmen: Wuyi University, 2011:18-25.
- [10] 钱欣, 许王定, 金杨福. POLYFLOW 基础及其在塑料加工中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010:317-319.
- Qian Xin, Xu Wangding, Jin Yangfu. The basis and its application of POLYFLOW in plastic processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010:317-319.
- [11] 张霞, 谢林生, 马玉录. 双转子连续混炼机混炼段拉伸作用的研究[J]. 中国塑料, 2010, 24(3):108-113.
Zhang Xia, Xie Linsheng, Ma Yulu. Study on stretching effect in mixing section of two-rotor continuous mixers[J]. China Plastics, 2010, 24(3):108-113.
- [12] 柳天磊, 杜遥雪. 振动力场对销钉挤出机混炼过程的影响[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(3):80-84.
Liu Tianlei, Du Yaoxue. Effect of vibration force field on mixing process of pin screw extruder[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(3):80-84.
- [13] 柳天磊, 王建鸿, 杜遥雪. 注射机屏障型螺杆结构设计及其数值模拟研究[J]. 塑料科技, 2013, 41(1):89-92.
Liu Tianlei, Wang Jianhong, Du Yaoxue. Structure design of the barrier injection screw and numerical simulation on its plasticization process[J]. Plastics Science and Technology, 2013, 41(1):89-92.
- (上接第 106 页)
- [11] Connelly R K, Kokini J L. Mixing simulation of a viscous Newtonian liquid in a twin sigma blade mixer[J]. Aiche Journal, 2006, 52(10):3383-3393.
- [12] Connelly R K, Kokini J L. 3D numerical simulation of the flow of viscous Newtonian and shear thinning fluids in a twin sigma blade mixer[J]. Advances in Polymer Technology, 2006, 25(3):182-194.
- [13] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
Han Zhanzhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. FLUENT: Fluid engineering simulation calculation examples and applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [14] 林清安. Pro/ENGINEER 野火 3.0 中文版零件设计应用实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
Lin Qingan. Pro / ENGINEER Wildfire 3.0 Chinese version part design application example[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [15] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战: FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
Li Pengfei, Xu Minyi, Wang Feifei. Proficient in CFD engineering simulation and case combat: FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2011.