

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.06.015

螺棱梯形底角和凹槽半径对反应挤出机流场的影响^{*}

张鹏,李彦周,张帅,吴飞,杨帆,陈占春

(太原理工大学机械工程学院,太原 030024)

摘要:利用 Polyflow 计算机软件,在相同温度的条件下,通过最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数和累计停留时间这4个指标,研究螺杆螺棱截面形状为梯形时其梯形底角角度和凹槽半径两个变量对聚乙烯在单螺杆反应挤出机中流场的影响。结果表明,当螺杆螺棱截面梯形底角角度为 60° 时,螺杆提供的最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数均较底角为 30° 和 45° 的高,粒子累积停留时间则居中;在底角为 60° 的梯形螺棱上开半径为1.5 mm的半圆凹槽时,该结构所提供的最大剪切速率、最大剪切应力和最大混合指数均较不开槽(凹槽半径0 mm)和凹槽半径为2 mm的高,粒子累积停留时间相对最短。当螺杆螺棱截面梯形底角角度为 60° 且凹槽半径为1.5 mm时,可使物料获得的剪切效果最好且使其在流道中的停留时间最短,从而为大规模生产加工节约了时间。

关键词:反应挤出机;单螺杆;螺棱;底角;凹槽;剪切速率;剪切应力;混合指数;停留时间

中图分类号: TQ320.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)06-0075-05

Effects of Screw Arris Trapezoid Base Angle and Radius of Groove on Flow Field of Reactive Extruder

Zhang Peng, Li Yanzhou, Zhang Shuai, Wu Fei, Yang Fan, Chen Zhanchun

(School of Machinery Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract : Based on the Polyflow software and under isothermal condition, when the screw arris section is trapezoidal shape, through four aspects of maximum shear rate, maximum shear stress, maximum mixing index and particle cumulative residence time, the effects of two variables : trapezoid base angle of screw arris section and radius of groove in the screw arris on the flow field of polyethylene in single screw reactive extruder were studied. The results show that when the trapezoid base angle is 60° , the maximum shear rate, maximum shear stress and maximum mixing index provided by the screw are better than those of 30° and 45° , the cumulative residence time is in the middle. When the trapezoid screw arris with 60° base angle is slotted with semicircle groove on radius of 1.5 mm, the maximum shear rate, maximum shear stress and maximum mixing index are better than those of the groove on radius of 0 mm and 2 mm, the cumulative residence time is relative shortest. Therefore, when the trapezoid base angle of screw arris section is 60° and the radius of groove in the screw arris is 1.5 mm, the materials can gain the best shear effects and has the shortest residence time in runner, which saves time for the massive production and processing.

Keywords : reactive extruder ; single screw ; screw arris ; base angle ; groove ; shear rate ; shear stress ; mixing index ; residence time

聚合物共混材料是当今生产生活中不可缺少的材料之一,伴随着当代科学技术的持续发展和生产生活需要的不断提高,人们对材料的性能提出的要求越来越高。单纯的某种材料的性能已经不能够满足人们的需求,而聚合物共混或共聚材料具有优良的性能,人们对聚合物共混或共聚材料的需求也日益增长^[1]。塑料加工中的聚合物共混或共聚通常在挤出机中进行,因此这对聚合物共混或共聚所使用的挤出机提出了更高的要求。

笔者课题组设计研发的单螺杆强剪切力化学反应挤出机主要用于聚合物材料的接枝改性,由于熔融接枝法的接枝率相对不高,而通过改变螺杆和

料筒的结构,可以改变螺杆对物料的剪切作用,从而提高接枝率,因此对于螺杆结构的设计显得尤为重要。

为了研究螺杆不同参数对挤出效果的作用,海内外很多专家都在试验用不同方式对基础过程进行研究^[2-6]。潘龙^[7-8]等和贾明印等^[9]提出了“双螺棱推动理论”,在合理的沟槽深宽比和沟槽螺棱升角下,单螺杆挤出机的输送段可以实现正向位移。李

^{*} 国家青年科学基金项目(51303123),太原理工大学青年基金项目(2012L065)

联系人:陈占春,讲师,主要从事高聚物加工及形态结构的研究

收稿日期:2017-02-16

峰等^[10-11]和张帅等^[12-13]研究发现,螺杆的螺槽截面形状为梯形且其螺旋升角增大时可以提高对聚合物材料的剪切速率和剪切压力。

螺杆螺棱梯形底角角度及凹槽半径变化是影响反应挤出机中物料流速及剪切效果的两个重要因素,其相关研究文献极少,因此笔者在螺杆螺棱截面形状为梯形的基础上,通过改变梯形底角角度及螺棱开槽半径,以最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数^[14]和累计停留时间这些对聚合物材料共混及接枝有重要影响的参数为考察指标,利用 Polyflow 计算机软件进行仿真计算,以得出最优的结构组合方案,为同类型的力化学反应挤出机设计和制造提供参考。

1 数学模型与物理模型

1.1 数学模型

为了计算简便,材料在流道内的流动过程简化如下:

(1) 聚合物熔体的流动是等温稳定流动,流场是等温流场;

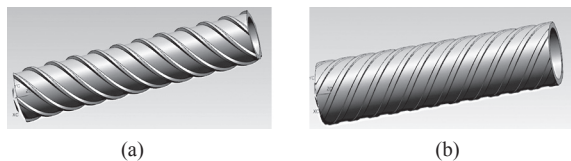
(2) 流体为符合 Bird-Carreau 模型方程的非牛顿不可压缩流体,流场的雷诺数较小,近似认为是层流流动;

(3) 忽视重力、惯性力的影响(远小于粘滞力);

(4) 流体布满流道,机筒内壁与螺杆外表面无滑移^[15-16]。

1.2 物理模型

为增加单螺杆挤出机的剪切力,通过变化螺杆剪切段的参数值,构造三维几何模型。以螺杆直径为 90 mm 的单螺杆挤出机的实际参数为基准,螺杆头数为 5 头,直径定为 90 mm,螺棱高度为 6 mm,螺杆与料筒的间隙为 2 mm,料筒上开有 2 mm 的左旋螺槽,螺杆和料筒长度均为 300 mm。螺杆和流体区域(流道)形状如图 1 所示。



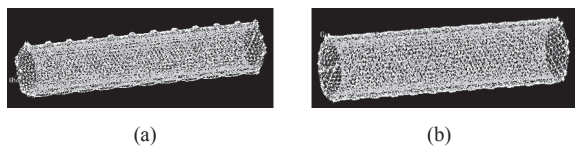
a—螺杆; b—流体区域

图 1 螺杆和流体域结构图

1.3 网格划分

在 Gambit 模块中生成螺杆和流道的有限元模型,网格划分时使用网格重叠技术(MST),将螺杆内部掏空,以便于提高计算机的计算速度。在计算机

配置许可的前提下,尽量将网格细化,达到更好的模拟效果。对于螺杆和流道,螺棱是网格划分的重要部分,因此笔者对其螺棱进行了较细致的网格划分。图 2 分别为螺杆和流体区域的有限元网格划分模型。



a—螺杆网格; b—流体区域网格

图 2 螺杆和流体区域网格划分

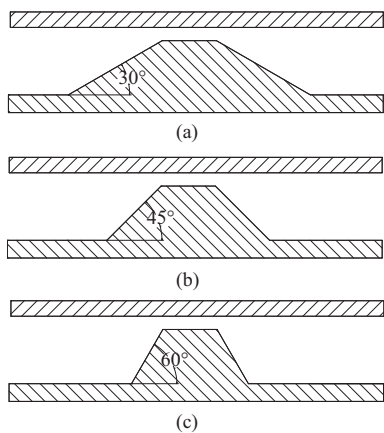
1.4 模拟参数设定

利用 Polyflow 对聚乙烯在不同螺杆结构的流场中的挤出过程进行计算机数值模拟,得出剪切速率和剪切应力的变化过程。根据实际情况,使用的插值方法为 mini-element,熔体为广义的牛顿等温流体,压力采用线性插值,黏度迭代采用 Picard 插值。螺杆转速设置为 100 r/min,入口边界设定为压力入口,压力大小为 0 MPa,出口边界设定为压力出口,压力大小为 0.1 MPa^[10]。

2 螺棱梯形底角的影响

2.1 组合方案

在螺棱截面形状为梯形的基础上,改变梯形底角角度(30°,45°,60°),如图 3 所示。示踪粒子的设置参考文献[14],通过粒子承受的最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数以及粒子累计停留时间 4 个方面,综合研究梯形底角角度对螺杆剪切能力及混合能力的影响。



底角角度: a—30°; b—45°; c—60°

图 3 机筒与螺棱不同底角截面组合图

2.2 模拟结果分析

最大剪切速率、最大剪切应力和最大混合指数的意义参考文献[14]。累积停留时间反映了物料粒

子从流道入口到出口所经历的时间:停留时间过长,物料容易在挤出机流道中发生降解,甚至可能会发生其它一些副反应;而停留时间过短,物料在挤出机中还未充分混合就被挤出,导致共混效果变差。将小于或等于某一剪切速率的粒子数量占整个设置的粒子数量的百分数称为粒子百分数,这样某一粒子百分数下所能达到的剪切速率最大值即为最大剪切速率,最大剪切应力和最大混合指数指标的设置均与此相同,累积停留时间则反映了某一粒子百分数下的粒子所能达到的最长停留时间。

图4示出不同梯形底角角度对应的最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数以及累积停留时间的分布曲线。

由图4a和图4b可以看出,梯形底角角度为 60° 时,最大剪切速率和最大剪切应力总体上最高,其值分别最高可达约 1800 s^{-1} 和 0.2 MPa ,其次为 45° 的底角, 30° 的底角最小。这表明,相对于 45° 或 30° 的底角,螺棱梯形底角为 60° 的螺杆所能提供的剪切速率和剪切应力最大。

由图4c可以看出,当最大混合指数为0.8时,底角为 60° 、 45° 和 30° 的螺杆结构所对应的粒子百分数为70%、95%、98%,即此时分别有30%、5%和2%的粒子的混合指数大于0.8。这说明随着梯形底角角度的增加,有更多粒子的混合效果得到显著提高,即螺杆对物料的混合作用得到显著提高。因此,当梯形底角为 60° 时螺杆所提供的混合效果最好。

由图4d可见,5 s后就有粒子从流道出口流出,当梯形底角角度为 60° 时,超过90%的粒子累积停留时间在28 s以下,粒子在螺杆中的最大停留时间约为42 s,与 30° 和 45° 的底角相比,其粒子累积停留时间居中。分析其原因,发现当梯形底角为 30° 时,由于其角度小,利于物料在螺杆中的流动,因此物料在该结构中的停留时间较短;同时,梯形底角为 60° 时较 45° 时粒子累积停留时间短,这是因为 60° 时所提供的剪切应力和剪切速率较大,大分子被剪切断链成小分子,提高了流动性,所以粒子在流道中停留时间缩短。

由于笔者设计的螺杆结构主要是用来对高分子材料进行剪切,所以最大剪切速率和最大剪切应力是主要考虑的指标。综合上述分析,最终选定了梯形底角为 60° 的螺杆结构作为下一步的研究对象。

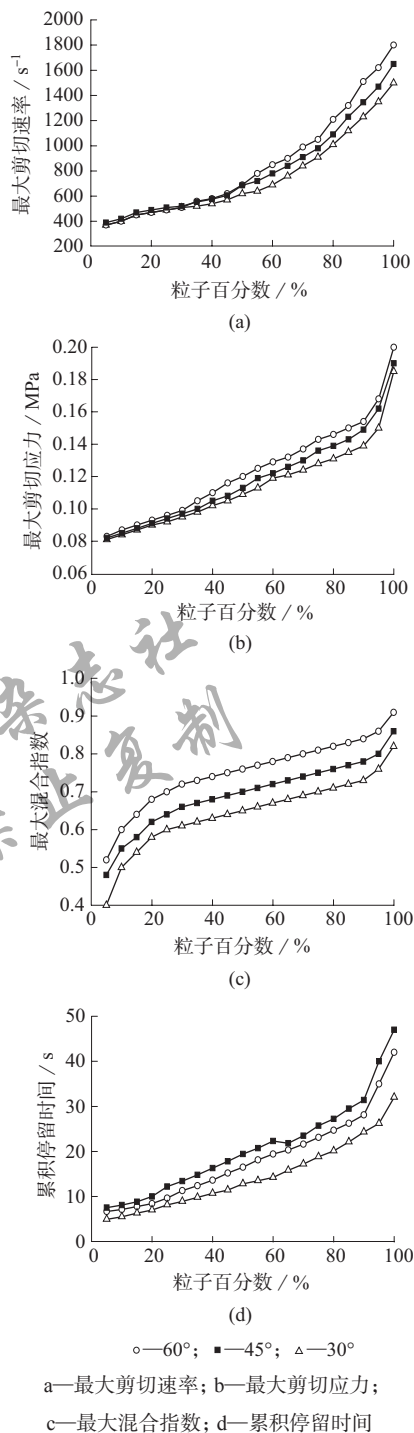


图4 不同梯形底角角度对应的最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数和累积停留时间的分布曲线

3 梯形螺棱凹槽半径的影响

3.1 组合方案

为了研究螺棱截面形状为梯形时,在其上开不同半径的凹槽对反应挤出机剪切效果的影响,选定了螺棱凹槽半径 R 分别为0, 1.5, 2 mm的梯形底角均为 60° 的3种螺杆结构,其结构示意图如图5所示。从最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数

和累积停留时间 4 个方面综合考虑不同结构对反应挤出机剪切效果的影响。

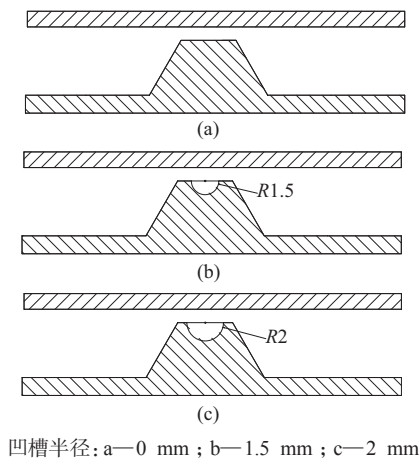


图 5 机筒与不同螺棱凹槽形状组合图

3.2 模拟结果分析

图 6 示出不同螺棱凹槽半径对应的最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数以及累积停留时间的分布曲线。从图 6a 和图 6b 可以看出,螺杆螺棱上的凹槽半径为 1.5 mm 时,螺杆所提供的剪切速率和剪切应力总体上最大,半径为 2 mm 的凹槽次之,0 mm(即不开槽)的最小。

从图 6c 可以看出,当最大混合指数为 0.8 时,凹槽半径为 1.5, 2, 0 mm 的螺杆结构对应的粒子百分数分别为 50%, 60% 和 70%, 这表明有 50%, 40% 和 30% 的粒子的最大混合指数大于 0.8。即当螺杆螺棱凹槽半径为 1.5 mm 时螺杆所提供的混合效果最好。

从图 6d 可以看出,当凹槽半径为 1.5 mm 时粒子累积停留时间相对最短,绝大多数粒子的累积停留时间在 18 s 以下,而未开槽的结构累积停留时间相对最长。在螺杆能够将物料剪切断链或者混合效果较好的前提下,物料在流道中的停留时间越短越好。由图 6a 和图 6b 可以看出,当螺棱开槽后,其剪切速率和剪切应力均有所提升,其中剪切应力的提升较为显著,同时,凹槽半径为 1.5 mm 时其提供的最大剪切应力足以将大分子链剪断^[13]。因此,凹槽半径为 1.5 mm 时,螺杆能够向物料提供足够的剪切应力且物料的停留时间缩短,从而为大规模的生产加工节约了时间。

综上所述,最终选定了螺杆螺棱凹槽半径为 1.5 mm 的螺杆结构作为最优结构。

4 结论

(1) 与螺棱截面梯形底角角度为 30° 和 45° 的

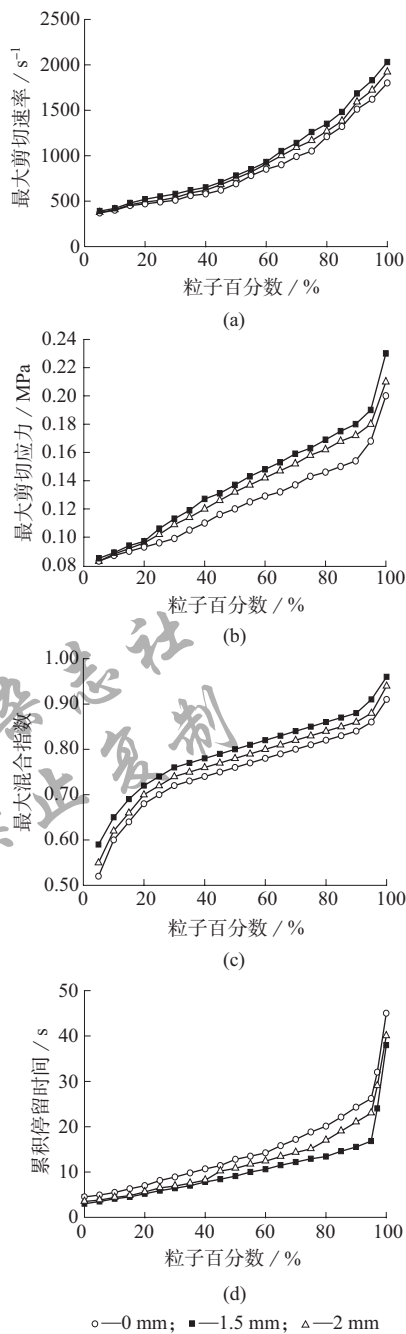


图 6 不同螺棱断面凹槽半径对应的最大剪切速率、最大剪切应力、最大混合指数和累积停留时间的分布曲线

螺杆结构相比,底角角度为 60° 的螺杆所提供的最大剪切速率、最大剪切应力和最大混合指数总体上最高,粒子累积停留时间则居中。

(2) 在梯形螺棱上开半径为 1.5 mm 的凹槽,相对于不开槽或凹槽半径为 2 mm 的螺杆结构,其最大剪切速率、最大剪切应力和最大混合指数总体上最高,粒子累积停留时间则相对最短。

(3) 采用螺棱截面梯形底角为 60° 且螺棱凹槽半径为 1.5 mm 的螺杆结构,可使反应挤出机中的物料在获得相对最好的剪切效果下缩短其在挤出机流道中的停留时间,从而为大规模的生产加工节约了时间。

参考文献

- [1] 李孜孜. 含接枝相容剂聚合物共混体系的耗散粒子动力学模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Li Zizi. Dissipative particle dynamics simulation on polymer blends with graft compatibilizers[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [2] 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.
- [3] 北京化工大学, 华南理工大学. 塑料机械设计[M]. 2版. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 1-85.
- Beijing University of Chemical Technology, South China University of Technology. Plastic machinery design[M]. 2ed. Beijing: China Light Industry Press, 1998: 1-85.
- [4] Botten A J, Burbidge A S, Blackburn S. A model to predict the pressure development in single screw extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135: 284-290.
- [5] 庄园园, 李翱, 毕超, 等. 串联式磨盘螺杆挤出机混合过程的研究[J]. 渤海大学学报: 自然科学版, 2013, 34(4): 407-411.
- Zhuang Yuanyuan, Li Ao, Bi Chao, et al. Study on the mixing process of the series disc-screw extruder[J]. Journal of Bohai University: Natural Science Edition, 2013, 34(4): 407-411.
- [6] 刘睿. 螺杆挤出机优化设计的现状[J]. 塑料科技, 2016, 44(3): 85-88.
- Liu Rui. Present situation of optimal design of screw extruder[J]. Plastics Science Technology, 2016, 44(3): 85-88.
- [7] 潘龙, 张玉霞, 金志明, 等. 单螺杆挤出机高速挤出技术研究进展[J]. 中国塑料, 2009, 23(8): 1-6.
- Pan Long, Zhang Yuxia, Jin Zhiming, et al. Technological progress in high speed extrusion of single-screw extruders[J]. China Plastics, 2009, 23(8): 1-6.
- [8] 潘龙, 贾明印, 薛平, 等. 螺旋沟槽单螺杆挤出机双螺棱推动理论模型的研究[J]. 中国塑料, 2010, 24(11): 94-99.
- Pang Long, Jia Mingyin, Xue Ping, et al. Study on double-flight driving theoretic model for helically grooved feed single-screw extruder[J]. China Plastics, 2010, 24(11): 94-99.
- [9] 贾明印, 薛平, 苗立荣, 等. 单螺杆挤出机螺旋沟槽固体段产量的实验研究[J]. 当代化工, 2012, 41(1): 4-6.
- Jia Mingyin, Xue Ping, Miao Lirong, et al. Experimental research on the throughput of solid conveying section in helically grooved feed single-screw extruder[J]. Contemporary Chemical Industry, 2012, 41(1): 4-6.
- [10] 李峰, 樊耀耀, 王宁, 等. 螺杆几何参数对强剪切应力挤出机流场的影响[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(12): 70-74.
- Li Feng, Fan Yaoyao, Wang Ning, et al. Effects of screw geometric parameters on flow fields of strong shear stress extruder[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(12): 70-74.
- [11] 李峰. 力化学反应挤出装置的优化设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- Li Feng. The optimal design of force chemical reactor extruder[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [12] 张帅, 李峰, 王宁, 等. 螺杆与机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, 42(10): 72-75.
- Zhang Shuai, Li Feng, Wang Ning, et al. Influence of screw and channel sectional shapes on extruder flow field[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(10): 72-75.
- [13] 张帅. 聚苯乙烯在强剪切力化学反应装置中断链效果的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- Zhang Shuai. Study of chain scission extend of polystyrene crossing chemical reactor with strong shear force[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [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 the changes of cylinder groove depth and the gaps between cylinder and screw on the force chemical reactor[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1): 65-69.
- [15] 秦贞明, 陈晋南, 彭炯. 双螺杆挤出机模具过渡和稳流段流场的数值模拟[J]. 计算机与应用化学, 2006, 23(9): 853-857.
- Qin Zhenming, Chen Jinnan, Peng Jiong. Simulation of flow field in die transition and steady-flow zone of twin screw extruder[J]. Computer and Applied Chemistry, 2006, 23(9): 853-857.
- [16] 吕静, 陈晋南, 胡冬冬. 流率和牵引速度对两种聚合物熔体共挤出影响的数值研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(6): 781-784.
- Lyu Jing, Chen Jinnan, Hu Dongdong. Numerical study of the effects of flow rate and drawing velocity on bicomponent coextrusion[J]. Journal of Beijing institute of technology, 2003, 23(6): 781-784.