DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90258 [文章编号] 1003-5788(2023)03-0072-06

四螺杆挤出机螺杆排列方式对聚乳酸流场特性的影响

Effects of screw arrangement in four screw extruder impact on characteristics of polylactic acid flow field

商嘉玮[1,2] 黄志刚[1,2] 张一明[1,2]

SHANG Jia-wei[1,2] *HUANG Zhi-gang*[1,2] *ZHANG Yi-ming*[1,2]

杨亚楠[1,2] 代祥基[1,2]

YANG Ya-nan[1,2] *DAI Xiang-ji*[1,2]

(1. 北京工商大学人工智能学院,北京 100048;2. 塑料卫生与安全质量评价技术北京市重点实验室,北京 100048)

(1. *School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing* 100048, *China*;
2. *Plastic Beijing Municipal Key Laboratory of Health and Safety Quality Evalvation Technology, Beijing* 100048, *China*)

摘要:目的:探究聚乳酸在四螺杆挤出机不同螺杆排列方式下的流道分布规律。**方法:**运用三维建模软件 Solidworks 分别建立一字型螺杆排列方式、四方型螺杆排列方式和环绕型螺杆排列方式下的螺杆模型与对应的流体区域模型,通过仿真软件 Polyflow 进行数值模拟。**结果:**一字型与环绕型的螺杆排列方式与四方型排列相比有更好的建压能力与分布混合能力,四方型排列对聚乳酸的输送能力较弱。**结论:**一字型螺杆排列方式的四螺杆挤出机对加工聚乳酸有较好的效果。

关键词:螺杆挤出机;螺杆排列方式;聚乳酸;数值模拟;等温;同向

Abstract: Objective: The flow channel distribution of polylactic acid in four screw extruder with different screw arrangement was studied. **Methods:** The three-dimensional modeling software Solidworks was used to establish the screw model and the corresponding fluid region model under the arrangement of one-word screw, four-square screw and encircle screw. Numerical simulation was carried out by the simulation software Polyflow. **Results:** The screw arrangement of monotype and surround type had better pressure building ability and distribution mixing ability than the square arrangement, and the square arrangement had weaker transport ability of polylactic acid. **Conclusion:** The four-screw extruder with one-line screw arrangement has a good effect on the processing of PLA.

Keywords: screw extruder; screw arrangement mode; polylactic acid; numerical simulation; isothermal; codirection

聚乳酸是一种可生物降解的脂肪族热塑性聚酯材料,主要以玉米、土豆等植物中提取的淀粉为原料制作而成,具有良好的加工性能,可用作石油基聚合物的替代品[1]。聚乳酸作为一种包装材料被广泛应用于食品包装袋、一次性餐盒和餐具等食品包装领域。聚乳酸主要是通过螺杆挤出机来加工,螺杆挤出机具有良好的输送、混合、塑化和剪切作用[2]。常见的螺杆挤出机有单螺杆、双螺杆、三螺杆、四螺杆,而四螺杆挤出机在挤出过程中可以有效减少物料生热,有利于排气与散热,延长物料停留时间,改善物料分散混合效果,极大地提高了挤出效率,具有广阔的食品工程应用前景。李响等[3]对同向旋转的三螺杆以及双螺杆挤出机固体输送段进行数值模拟,结果表明在相同的转速下,三螺杆挤出机质量流率比双螺杆挤出机要高约 25%;朱向哲等[4]从拉格朗日法的新视角分析了四螺杆扰动下黏性流体的混沌动力学特性,为优化四螺杆端面参数提供了理论支撑。

现在对聚乳酸的研究大多是以双螺杆挤出机为基础进行分析,而对四螺杆挤出机的研究较少且更多是基于理论的推论,仅限于定性研究。研究拟对四螺杆挤出机加工聚乳酸的流场特性进行仿真,在等温条件下,对四螺

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:32172277)

作者简介:商嘉玮,男,北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:黄志刚(1966—),男,北京工商大学教授,博士。
E-mail:huangzg@btbu.edu.cn

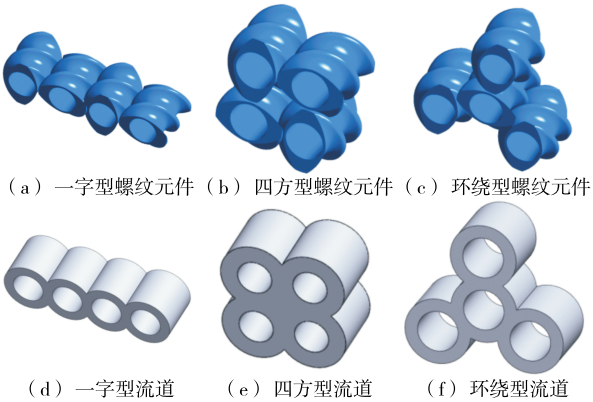
收稿日期:2022-10-15 **改回日期:**2023-02-10

杆挤出机螺杆3种不同的排列方式下聚乳酸熔融段的压力场、速度场、黏度场以及聚乳酸停留时间进行分析,总结螺杆的排列方式对聚乳酸熔融段流场分布的影响规律,为四螺杆挤出机挤出聚乳酸提供理论依据。

1　数值模拟过程

1.1　几何模型的建立

首先根据螺杆几何学的基本原理[5],按照如下建模数据在Solidworks软件中绘制四螺杆挤出模型,螺纹元件外径25 mm、螺纹元件根径16 mm、中心距16 mm,流道长度26 mm、机筒间隙0.5 mm,构建如图1所示的3组流道模型和螺杆元件模型。



(a) 一字型螺纹元件　(b) 四方型螺纹元件　(c) 环绕型螺纹元件

(d) 一字型流道　(e) 四方型流道　(f) 环绕型流道

图1　四螺杆挤出模型

Figure 1　Four screw extrusion model

将建立好的挤出模型导入Gambit软件中进行划分网格,其中由于螺杆元件模型曲面相对复杂,使用非规则型四面体网格进行划分。流道模型使用六面体规则型网格进行划分[6]。划分结果见表1。

表1　四螺杆挤出模型网格划分结果

Table 1　Four-screw extrusion model meshing results

分网模型	体网格划分类型	网格数	节点数
螺杆元件	非规则型四面体网格	12 930	3 591
一字型流道	六面体规则型网格	168 000	184 782
四方型流道	六面体规则型网格	125 025	137 644
环绕型流道	六面体规则型网格	192 000	210 522

1.2　数学模型的建立

1.2.1　基本假设[7]

(1) 熔融体是不可压缩的且充满整个流道。

(2) 熔融体在流场中的各个位置温度都是相同的。

(3) 机筒壁面是无滑移的。

(4) 重力与惯性力忽略不计,且远远小于黏性力的体积力。

(5) 熔融体为雷诺系数较小的层流流动。

1.2.2　控制方程

以等温假设为前提,并且不考虑能量方程的情况下,由上述基本假设条件,给出下列流体控制方程[8-9]:

连续性方程:

$$\nabla \cdot \nu = 0, \tag{1}$$

动量方程:

$$-P + \nabla \cdot T = 0, \tag{2}$$

式中:

∇——哈密顿算子;

ν——速度矢量,m/s;

P——流体静压力,Pa;

T——应力张量,Pa。

其中Bird-Carreau模型就是该流体的实际本构公式:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 (1 + \lambda_c^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2}, \tag{3}$$

式中:

η_0——零剪切黏度,Pa·s;

$\dot{\gamma}$——剪切速率,s^{-1};

λ_c——松弛时间,s;

η_∞——无穷剪切黏度,Pa·s;

n——流动指数。

在使用仿真软件Polyflow进行模拟分析时,计算产生的结果精准度与挤出物料的相关材料系数设定之间存在关系,所以选用的本构方程模型为Bird-Carreau,所选择的聚乳酸的参数[10]见表2。

表2　聚乳酸的物性参数

Table 2　Physical properties of polylactic acid

η_0/(Pa·s)	η_∞/(Pa·s)	n	λ_c/s	数值模拟设定温度/℃
2 504.235	0	0.253	0.060 7	190

1.3　边界条件的设定[11]

(1) PLA为自由流体,在机筒内部的内壁上不发生滑动或者移动。

(2) 入口边界与出口边界的法向力和切向力均为0。

(3) 将法向速度和切向速度均设定为0。

(4) 流道孔的边界法向速度和切向力设定为0。

(5) 螺杆逆时针旋转,螺杆转速设定为60 r/min。

2　仿真分析

2.1　压力场分析

将在Polyflow得出的数值模拟结果导入后处理软件CFD-post中,获得图2所示压力效果云图,流体区域内的压力是由螺杆向前输送聚乳酸过程中的挤压作用建立的。

由图2可知,一字型排列与四方型排列的4个流道区域压力变化规律相同,压力梯度比较明显,且压力梯度

分布面积比较均匀，都在啮合区螺棱处出现了局部高压。而环绕型排列中心螺杆下部区域压力明显增大，这是因为流道底部的聚乳酸通过下部的两根螺杆的旋转送料时由于压延间隙尺寸较小[12]，造成聚乳酸在中心螺杆处堆积，使中心螺杆啮合区上方与啮合区下方压力差明显。

2.2　速度场分析

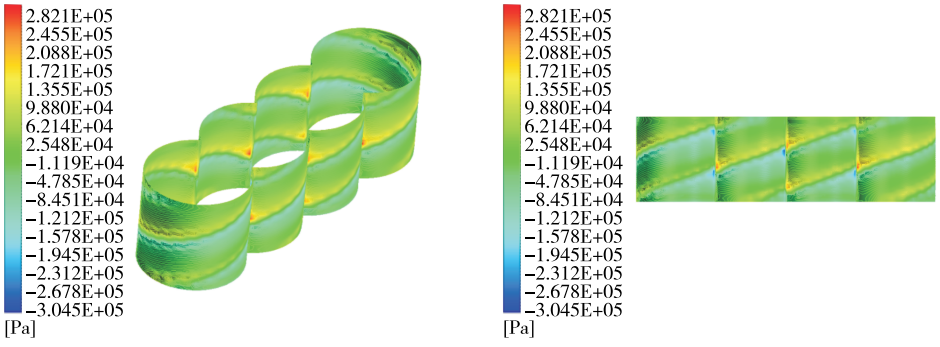
在后处理软件 CFD-post 建立流道入口处的速度云图，并使用 Streamline 功能在流体区域内插入 500 根速度流线[13]，获得如图 3 所示结果，从中能够观察到螺杆转速为 60 r/min 时聚乳酸熔体在一字型排列流场与环绕型排列流场中速度场的分布较为均匀，聚乳酸熔体在螺棱处速度较高，在螺槽处速度较低[14]，使得聚乳酸可以在 4 根螺杆之间不断流动有利于物料的混合。

四方型排列流场由于存在中心区[15]，中心区内的聚乳酸熔体不能被四根螺杆的螺棱扫掠，使得物料在中心区停留时间较长，不利于物料的流动。由图 4 可以看出，四方型螺杆排列在入口端面中心区范围较小，聚乳酸熔体随着螺杆运动到出口端面，在出口端面不断堆积，速度逐渐减小，使得出口端面中心区范围变大并出现环流。

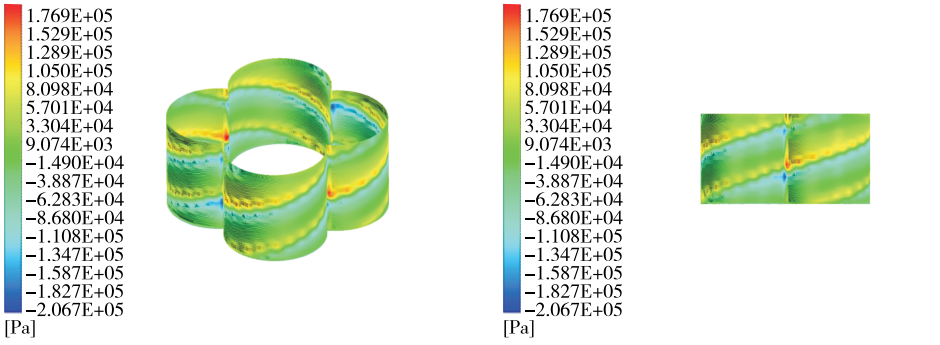
2.3　黏度场分析

图 5 为聚乳酸熔体在不同螺杆排列方式下的黏度场云图。由图 5 可知，熔体在螺槽较深处黏度较大，在螺棱顶处黏度较小，主要是因为聚乳酸熔体在螺棱处速度较高，并且螺杆与流道尺寸间隙较小，产生了较大的剪切速率，剪切速率与黏度值正好相反，所以螺棱处黏度值小[16]。

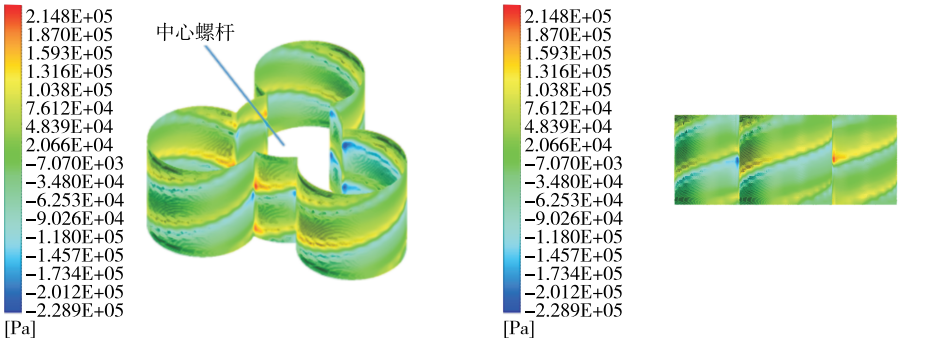
观察四方型螺杆排列的黏度云图可以看出，中心区的黏度值由中心点向外逐渐减小，主要是因为中心点并不受到螺杆的剪切作用，聚乳酸熔体在中心点黏度值较



（a）一字型螺杆排列压力云图



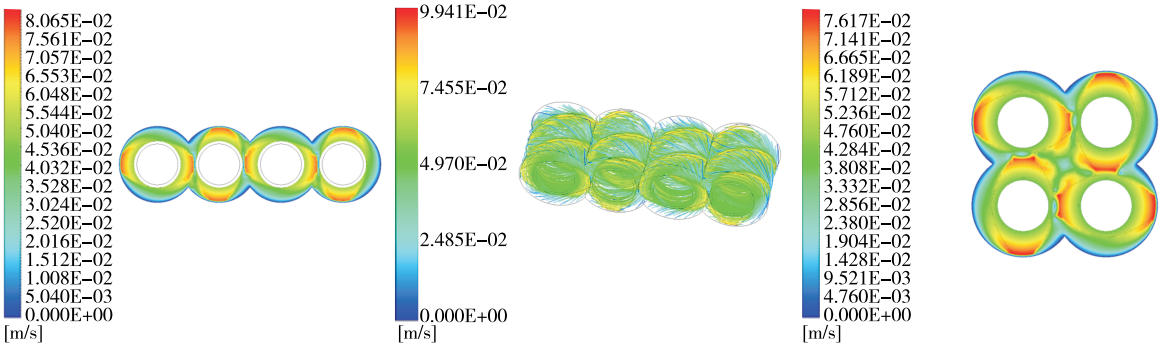
（b）四方型螺杆排列压力云图



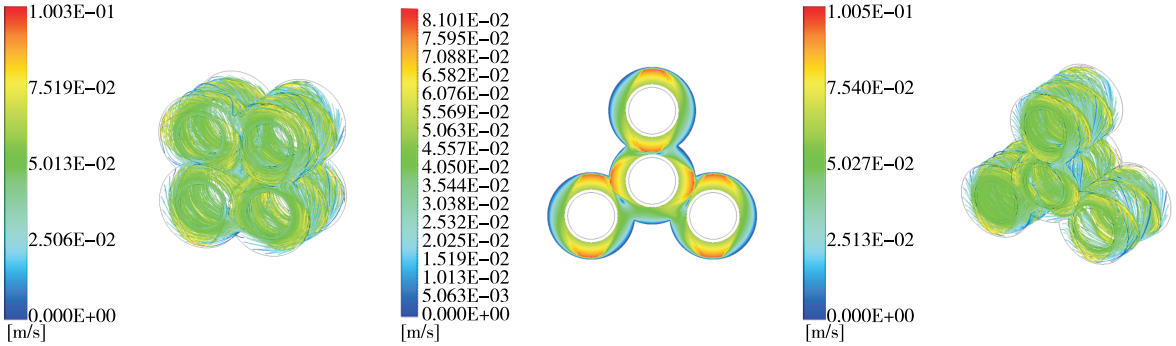
（c）环绕型螺杆排列压力云图

图 2　不同螺杆排列方式下的压力云图

Figure 2　Pressure cloud diagrams under different screw arrangements



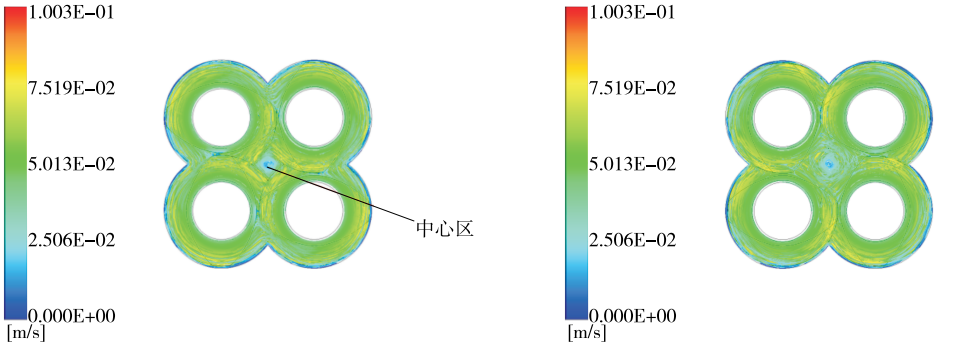
（a）一字型螺杆排列入口处速度云图　（b）一字型螺杆排列速度流线云图　（c）四方型螺杆排列入口处速度云图



（d）四方型螺杆排列速度流线云图　（e）环绕型螺杆排列入口处速度云图　（f）环绕型螺杆排列速度流线云图

图 3　不同螺杆排列方式下的速度云图

Figure 3　Velocity contours of different screw arrangements



（a）四方型螺杆排列入口处速度流线图　（b）四方型螺杆排列出口处速度流线图

图 4　四方型螺杆排列端面速度流线图

Figure 4　The velocity streamline diagram of the end face of the square-arranged screw

高。比较 3 种螺杆排列方式可以得出,一字型排列的螺杆最大黏度为三者最小,对聚乳酸熔体有较好的输送能力。

2.4　停留时间分析

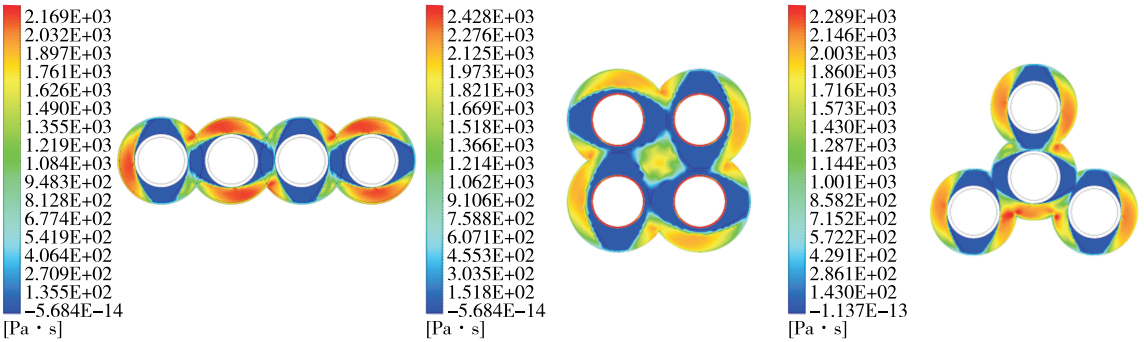
运用 Polyflow 软件中的示踪轨迹跟踪技术,在 3 种不同排列方式下的螺杆流道入口处布置 2 000 个示踪粒子,然后在 Polystat 模块中对示踪粒子的轨迹进行统计分析[17],并绘制图 6 的累计停留时间分布曲线和图 7 的停留时间分布曲线。

从图 6 可以看出,环绕型排列方式的螺杆和一字型排列方式的螺杆曲线较为陡峭,表明粒子在这种排列方式下停留时间最短[18],螺杆的输送能力较强。四方型排列方式下的螺杆相较于其他两种螺杆的排列方式停留时间曲线较为平缓,粒子停留时间最长,螺杆输送能力最差。

从图 7 可以看出,3 种不同排列方式下的流体区域内绝大部分粒子停留时间集中在 1～2 s,一字型排列方式的螺杆在这段时间域内有最高的峰值,分布混合能最佳。

3　结论

(1) 四螺杆挤出机相较于双螺杆挤出机有多个啮合区,四方型螺杆排列方式有 4 个啮合区,有利于聚乳酸物料充分混合,而中心区的存在使得聚乳酸熔体在中心区有较长的停留时间,而中心区速度较小并且会产生环流,有利于聚乳酸物料的轴向混合。



（a）一字型螺杆排列黏度场云图　（b）四方型螺杆排列黏度场云图　（c）环绕型螺杆排列黏度场云图

图 5　不同螺杆排列方式下的黏度云图

Figure 5　Viscosity cloud diagrams under different screw arrangements

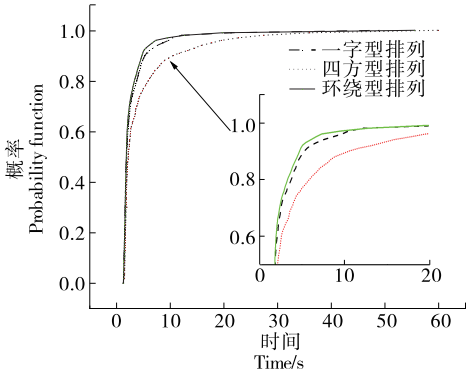


图 6　不同螺杆排列方式下的累计停留时间分布曲线

Figure 6　Distribution curve of cumulative residence time under different screw arrangements

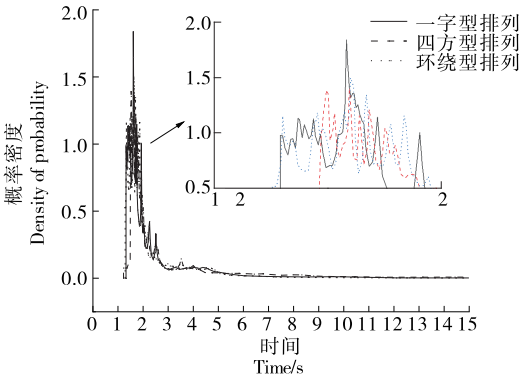


图 7　不同螺杆排列方式下的停留时间分布曲线

Figure 7　Residence time distribution curves with different screw arrangements

（2）一字型与环绕型螺杆排列方式与四方型排列相比剪切能力较强，有较好的建压能力和对聚乳酸的输送能力，与传统的双螺杆挤出机相比挤出物料的效率更高。

（3）一字型与环绕型螺杆排列方式有利于物料在螺杆之间的流动，使聚乳酸物料可以充分混合，与四方型螺杆排列方式相比有效地阻碍了聚乳酸粒子的聚集，加强了剪切作用，使分布混合能力增强。

参考文献

[1] 单梦瑶, 杨操, 张世科, 等. 聚乳酸增强增韧的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(3): 183-190.
SHAN M Y, YANG C, ZHANG S K, et al. Progress in reinforcing and toughening of polylactic acid[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(3): 183-190.

[2] CHARLIE M. Twin screw extruders as continuous mixers for thermal processing: A technical and historical perspective[J]. AAPS Pharm Sci Tech, 2016, 17(1): 3-19.

[3] 李响, 王东阳, 朱向哲. 同向旋转三螺杆挤出机固体输送段输送特性研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(1): 160-165.
LI X, WANG D Y, ZHU X Z. Research on conveying characteristics of solid conveying section of three-screw extruder [J]. China Plastics, 2022, 36(1): 160-165.

[4] 朱向哲, 佟莹, 高鹤. 四螺杆扰动下粘性流体混沌动力学特性研究[J]. 计算力学学报, 2019, 36(1): 83-89.
ZHU X Z, TONG Y, GAO H. Study on the chaotic dynamic properties of viscous fluid in four-screw extruders [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(1): 83-89.

[5] 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: 167-168.
GENG X Z. Twin-screw extruder and its application[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003: 167-168.

[6] 毕超. Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 10-16.
BI C. Polyflow software fundamentals and its application to twin-screw extrusion simulation processes[M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 10-16.

[7] 崔同伟, 马秀清. 螺杆构型对 PA6/PE-LD 共混体系性能的影响[J]. 中国塑料, 2015, 29(7): 104-111.
CUI T W, MA X Q. Effect of screw configuration on performance of PA6/PE-LD blends[J]. China Plastics, 2015, 29(7): 104-111.

[8] 商嘉玮, 张丽梅, 黄志刚, 等. 不同螺杆接触状态下异向双螺杆挤出机的流道分布规律[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 61-64.

SHANG J W, ZHANG L M, HUANG Z G, et al. Study on flow channel distribution of different twin screw extruder under different screw contact state[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 61-64.

[9] 安琪, 黄志刚, 胡淑珍, 等. 适应性网格技术在异向双螺杆挤出机中的仿真[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 91-97.
AN Q, HUANG Z G, HU S Z, et al. Simulation in counter-rotating twin screw extruder by adaptive grid technology [J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 91-97.

[10] 李梦林, 刘凯, 黄志刚, 等. 聚乳酸用单螺杆挤出机熔体输送段数值模拟研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(11): 102-107.
LI M L, LIU K, HUANG Z G, et al. Numerical simulation of melt conveying sections of a special single screw extruder for PLA[J]. China Plastics, 2015, 29(11): 102-107.

[11] 赵玉莲, 李鑫, 安琪, 等. 非等温条件下啮合同向双螺杆挤出过程数值模拟分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 76-79.
ZHAO Y L, LI X, AN Q, et al. Numerical simulation of meshing co-rotating twin screw extrusion process under non-isothermal conditions[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 76-79.

[12] 黄凤春, 马秀清, 周炳斌, 等. 同向双螺杆拉伸元件的设计及混合性能的研究[J]. 中国塑料, 2011, 25(9): 90-94.
HUANG F C, MA X Q, ZHOU B B, et al. Design of elongational co-rotating twin-screws element and its mixing performance [J]. China Plastics, 2011, 25(9): 90-94.

[13] TOR-SWIATEK A, SUBERLYAK O, KRASINS'KYI B, et al. Distribution and geometric characteristics of pores and the strength properties of extrudates obtained by the twin-screw extrusion [J]. Materials Science, 2014, 49(6): 812-818.

[14] 魏静, 张光辉. 双螺杆捏合机螺纹元件型线设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 129-190.
WEI J, ZHANG G H. Design theory and method of screw element profile of twin-screw kneader [M]. Beijing: Science Press, 2012: 129-190.

[15] 朱向哲, 袁惠群. 四螺杆挤出机中聚合物流动特性的计算机模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2008(9): 14-18.
ZHU X Z, YUAN H Q. Computer simulation of polymer melt flow in the metering region of a four-screw extruder [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008(9): 14-18.

[16] 张宏建, 黄志刚, 李梦林, 等. 啮合同向双螺杆挤出机不同螺杆流场仿真分析[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(9): 70-74.
ZHANG H J, HUANG Z G, LI M L, et al. Intermeshing co-rotating twin-screw extruder with different screw of flow field simulation analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44 (9): 70-74.

[17] 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 J B, YU B, CHEN F F, 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.

[18] 宗原, 戴干策. 单螺杆挤出机中停留时间分布的数值模拟[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2011, 37(6): 673-678.
ZONG Y, DAI G C. Numerical simulation of residence time distribution in single screw extruders [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 37(6): 673-678.

信息窗

中国科学家构建完成食品化学危害因子非定向筛查技术平台

随着现代分析技术的不断进步,食品化学危害物的定向检测方法得到快速发展,为食品质量安全提供了重要保障。然而,该类方法都是事先选定目标物,所涵盖的被测物数量仅仅是食品中潜在化学危害物的"冰山一角",无法有效应对食品污染和食物中毒。因此,迫切需要开发"无目标"的食品化学危害物非定向检测新技术。

近期,在国家重点研发计划项目的支持下,由北京市疾病预防控制中心等国内 12 家科研院所、高校和企业组成的研究团队构建完成了一套集食品前处理方法、筛查数据库和数据处理系统为一体的食品化学危害因子非定向筛查技术平台。该平台通过自行研发的异孔共价有机骨架(COF)等一系列性能优异的前处理材料,可以实现食品中干扰性基质的一次性高效去除及化学危害物的高效回收。同时,基于大数据处理和组学分析技术,实现了化学危害物标准质谱库、模拟质谱库、质谱裂解特征数据库、食品本源组成质谱库等多个大容量、自建数据库的有机融合,大幅提升了非定向筛查数据的解析速度和甄别效率。相关研究成果发表在《Chemical Engineering Journal》等学术期刊。

上述非定向筛查技术平台的数据处理系统实现了对 5 家主要质谱公司质谱数据的兼容,目前已公开上线测试,并成功应用于中国多起食品安全事件的处置,有望进一步提升中国对食品未知化学危害物的识别及预警能力。

(来源:https://www.cifst.org.cn/)