



开槽捏合块混炼元件在豆粕挤压加工中的应用及其流场研究

杨书根¹, 郭树国², 徐文海¹

(1. 盐城工业职业技术学院, 江苏 盐城 224043; 2. 沈阳化工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

摘要: 为了提高豆粕加工双螺杆挤出机的混合性能, 采用 ANSYS-CFX 对带有开槽捏合块混炼元件的双螺杆挤出机流道进行三维流场分析, 比较豆粕在开槽捏合块及普通捏合块挤出过程中的运动规律。包含速度场、压力场、加权平均剪切速率, 以及挤出机流场的对比分析。结果表明: 开槽捏合块元件相比于常规捏合块能够显著增强对豆粕的剪切速率, 使剪切速率提高 1.4 倍, 能够使轴向建压能力增强, 在凹槽处形成背压区, 增加豆粕在开槽处的运动时间, 提高双螺杆挤出机的分散混合性能。

关键词: 豆粕; 挤出机; 混炼元件; 模拟分析; 分散混合

Application of Slotted Kneading Block Mixing Element in Soybean Meal Extrusion Processing and Its Flow Field Research

YANG Shu-gen¹, GUO Shu-guo², XU Wen-hai¹

(1. Yancheng Institute of Industrial Technology, Yancheng 224043, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: In order to improve the mixing performance of soybean meal processing twin-screw extruder, the three-dimensional flow field of the twin-screw extruder flow path with slotted kneading block mixing elements by ANSYS-CFX was analysed for studying the movement regulation of soybean meal during extrusion. Contains velocity field, pressure field, weighted average shear rate, and comparative analysis of the extruder flow field with conventional kneading blocks. The results showed that the slotted kneading block element significantly enhanced the shear rate of the soybean meal compared to the conventional kneading block, increased the shear rate by 1.4 times, enhanced the axial pressure building capacity, formed a back pressure zone at the groove, and the flow time of the soybean meal at the slotting was increased, and the dispersion mixing performance is improved.

Keywords: Soybean meal; Extruder; Kneading block; Simulation analysis; Dispersion mixing

豆粕含有丰富的蛋白质, 是一种很好的植物蛋白资源^[1]。溶解度是蛋白质最重要的功能特性之一。大豆被挤压膨化后, 大豆蛋白的分子链被拉伸会暴露出容易被酶作用的肽键, 这有利于水解并增加溶解度^[2]。因此挤压加工是豆粕加工的主要方式。然而, 普通的双螺杆挤出机已不能适应豆粕加工业的快速发展。捏合块是一种具有强剪切力和优异混合性能的挤压机螺杆混合元件^[2-3], 其对物料的剪切能力比传统的螺纹元件更有利, 通常被用来改善物料在混合区的分布和分散。本文在传统捏合块的基础上引入开槽设计, 但由于混炼元件捏合块的特殊几何形状和多变性, 通过数学分析难以解决流场计算问题, 故采用快速发展的有限元工程分析方法进行研究, 利用其商业计算软件来模拟。为此, 实验以 ANSYS-CFX 软件为平台, 基于粘性流体力学^[4-5], 近似模拟速度场、压力场和捏合块的特

性, 为豆粕加工双螺杆挤出机混合元件的优化设计提供理论依据。

1 理论模型及参数

1.1 力学计算模型

为方便直观对比开槽捏合块元件与普通捏合块对豆粕物料的混合性能, 本文设置了具有一致参数的两个有限元模型。使用 inventor 软件制作三维 CAD 实体模型, 再利用 ANSYS 对模型进行网格化前处理。两种捏合块 CAD 模型外圆直径为 22 mm, 单个捏合块厚 6 mm, 错列角为 30°。开槽处在螺棱顶部, 半径为 1 mm。运用 ANSYS-CFX 软件的 CAD 模型处理模块获到流道模型, 再利用前处理网格软件进行自适应划分高品质结构化网格。两种捏合块三维实体模型及其流道网格化模型见图 1。

收稿日期: 2018-10-08

基金项目: 辽宁省教育高等学校优秀人才支持计划 (LJQ2015086); 辽宁省自然科学基金 (201602585, 20170540719); 盐城工业职业技术学院院本课题 (ygy1803)。

第一作者简介: 杨书根 (1969-), 学士, 高级工程师, 主要从事机械制造装备与工艺设计及教学研究。E-mail: ysg8411534@sina.com。

通讯作者: 郭树国 (1978-), 博士, 副教授, 主要研从事挤压加工技术研究。E-mail: guoshu_guo@163.com。

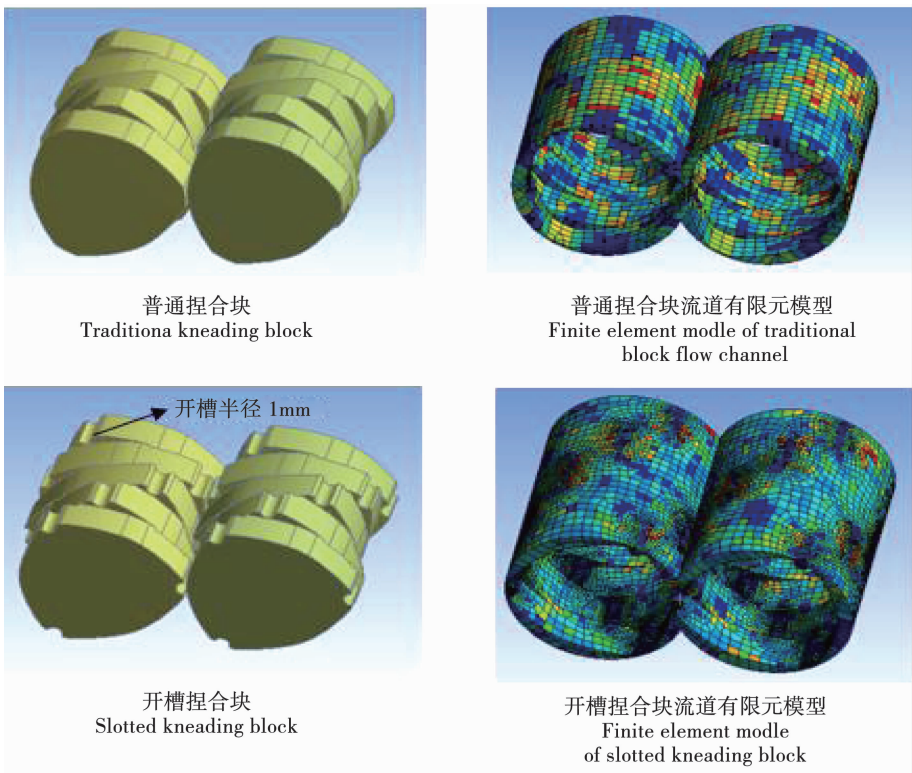


图 1 实体模型与有限元模型

Fig. 1 Solid model and finite element model

1.2 理想假设模型

豆粕物料在捏合块混炼区中的挤出运动十分复杂。因此,为了便于模拟流场,基于流体力学理论进行环境假设。试验选用豆粕作为物料,是幂律流体中的膨胀型流体。在黏流体挤出模口时水份会蒸发或分流,试验分析的混炼区近似认为是等温、稳定性流场、层流。流体为不可压缩的,机筒壁面无滑移。所采用的豆粕参数:密度为 $2\,112\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,黏度为 $1\,930\text{ Pa}\cdot\text{s}$,恒定温度为 80°C ^[6-7]。边界条件:螺杆转速 $n=120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;出口压力设定为 3 MPa ;进料速度 $u=0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

对于不可压缩的等温层流幂律流体,若不计其体积力,则其连续方程可简化为^[7-8]:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

通过牛顿第二定律推导出运动方程^[11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \tag{2}$$

幂律流体本构方程为:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}^n \tag{3}$$

公式中 V 为速度矢量,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; V_x 、 V_y 、 V_z

分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量, P 为静压力,单位 Pa ; τ_{ij} 是在直角坐标系下剪切应力的分量, i,j 由 x 、 y 、 z 来表示; $\dot{\gamma}$ 表示剪切速率,单位 $1\cdot\text{s}^{-1}$; μ 表示粘度,单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; n 表示幂律指数。

联立方程(1)(2)(3)就可求得流场的速度分布与压力分布。

用来计算流道加权平均剪切速率的公式^[9-13]如下:

$$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{\iiint_{\Omega} \dot{\gamma} d\Omega}{\iiint_{\Omega} d\Omega}$$

其中: $\dot{\gamma}$ 为局部剪切速率; Ω 是计算的整个域。

2 流道模拟结果与分析

2.1 压力场分析

2.1.1 轴向压力场 当豆粕黏流体进入混炼区后,该阶段普通捏合块流道与开槽捏合块流道的轴向压力分布分别如图2所示,普通捏合块在开始阶段压力为负压,表明其建压能力较弱,需要螺杆前段螺纹来进行压力输送。开槽捏合块流道压力由开端的 2 MPa 升到最大值 3.94 MPa ,正向压力差达到 1.94 MPa 。而普通捏合块流道最大压力为 1.9 MPa ,远低于开槽捏合块,说明开槽捏合块自身键压能力较强,对豆粕黏流体的挤出输送能力更加突出。

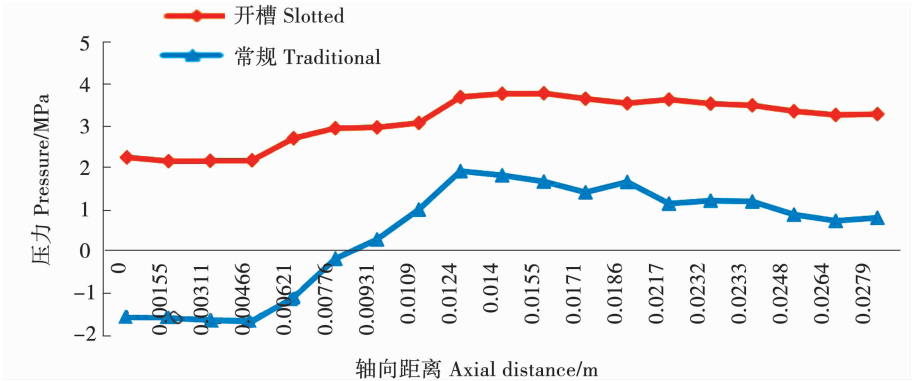
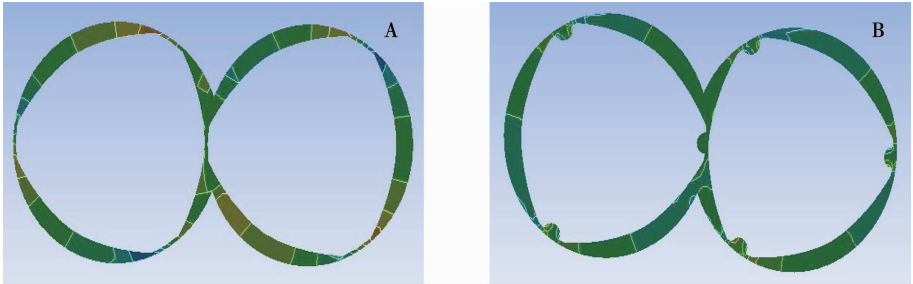


图 2 挤出方向压力分布图

Fig. 2 Reporting pressure profile in the extrusion direction

2. 1. 2 截面压力场 由图 3 可知,两种流道截面具有相似的压力分布状况,压力从顺时针方向逐渐增加,增加压力的方向与螺杆的转向相呼应,由此豆粕黏流体被螺杆推动以在流动通道中形成螺旋运

动定律。但是在比较两个流道的压力之后,发现在捏合块开槽的螺棱处压力云颜色高亮,压力增加,而凹槽内压力并未明显增加,故形成背压区,豆粕在此区域内被反复挤压,促进了分散混合效果^[8]。



A: 普通捏合块;B: 开槽捏合块。下同。
A: Traditional kneading block; B: Slotted kneading block. The same below.

图 3 截面压力云图

Fig. 3 Section of the pressure cloud map

2. 2 速度场模拟结果分析

图 4 为两种捏合块流道的宏观速度矢量分布,矢量箭头颜色的亮暗程度表示速度的大小,速度越大其矢量箭头颜色越亮;矢量箭头密度越大,表明豆粕黏流体在流道中的流动性越强。比较图 4A、4B,可以看出开槽捏合块的矢量箭头是致密的,矢量箭头的颜色也比普通捏合块的颜色更亮,这意味

着粘性流体的移动速度在开槽捏合块流道中较在普通捏合块流道中更快,流动性更好同时混合效率更高。从图中还发现普通捏合块流道中螺棱处箭头颜色最亮,即速度达到最大,而开槽捏合块矢量箭头在开槽处颜色变暗,速度降低,为更好观察分析物料在流道中的运动,分别取轴向 Z = 20 mm 处截面进行分析。

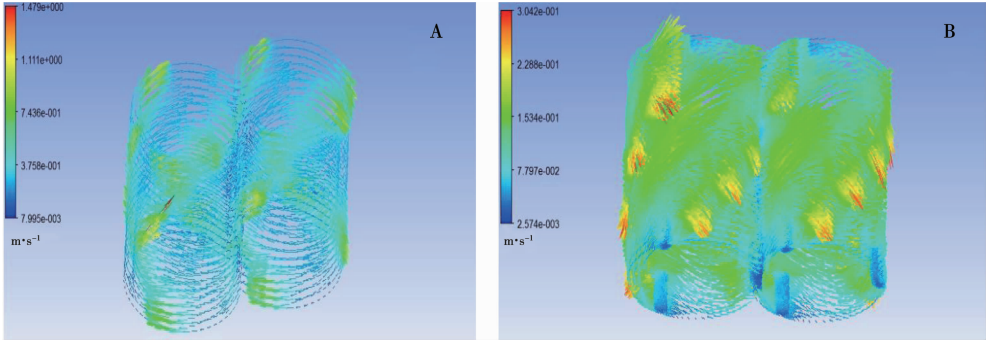


图 4 流道速度场

Fig. 4 Speed map of the flow channel

由图 5 可以看出豆粕在普通捏合块流道中做传统的∞型运动,而在开槽捏合块流道中,当物料到达凹槽处时,产生类似旋涡的运动,延长了物料在

混炼区的挤压时间,使物料获得充分时间进行交换以达到较好的分散效果。

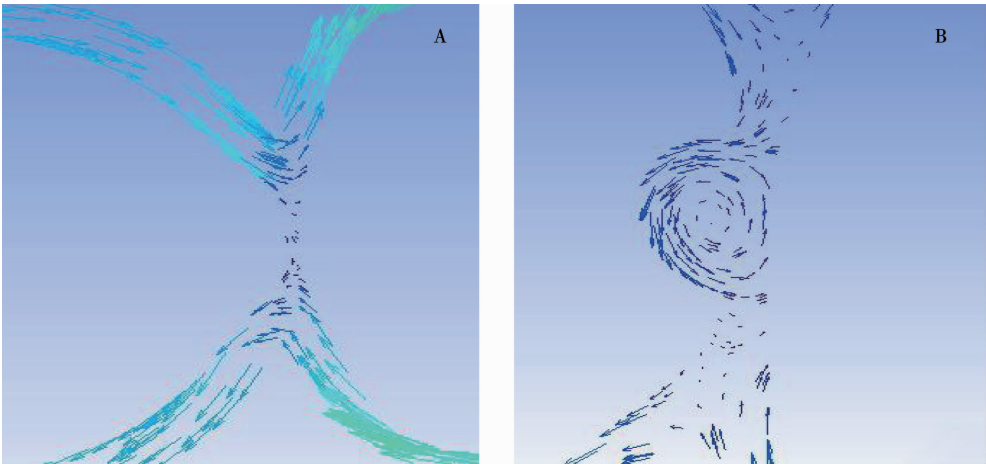


图 5 截面速率场

Fig. 5 Section of the velocity field

为进一步研究分析流道中豆粕黏流体的运动规律,构建速度流线图(图 6)。普通捏合块的流动方向平滑有序,整体不发生波动,可能导致材料混合不足。而从图 5B 可以发现开槽捏合块的流线的

有明显弯曲波动的,尤其是在开槽处更加明显。同时由于速度流线方向的骤然改变使剪切速率产生相应变化,进一步提高了物料的分散混合效果。

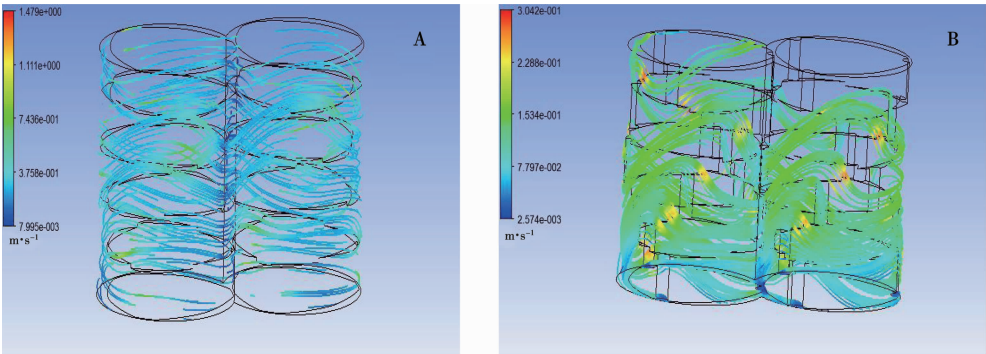


图 6 流道监测点流线图

Fig. 6 Flow chart of the flow path monitoring point

2.3 平均剪切速率场分析

由图 7 可知,在豆粕挤压加工中,开槽捏合块元件对豆粕的平均剪切速率为 63.8 m^{-1} ,普通捏合块对豆粕的平均剪切速率为 44.1 m^{-1} ,开槽捏合块中

剪切速率是传统捏合块剪切速率的 1.4 倍。豆粕在高剪切力的作用下更容易混合和分散,流动性更均匀,挤出机加工的产品质量更稳定,故开槽设计的捏合块优于传统捏合块。

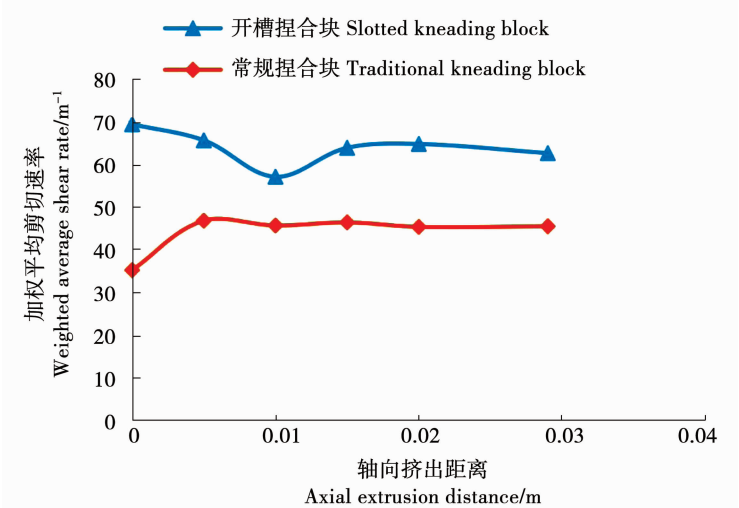


图 7 加权平均剪切速率分布图

Fig. 7 Weighted average shear rate profile

3 结论与讨论

采用数值模拟结合有限元分析对豆粕在带有不同混炼元件的双螺杆挤出机流场中的运动规律,开槽捏合块元件在凹槽处形成背压漩涡区域,促使豆粕在此区域内反复挤压,运动路径变长,有利于物料在混炼阶段的充分混合分散。开槽捏合块元件加强了对豆粕的剪切速率,是传统捏合块的1.4倍,使豆粕在混炼区产生了局部紊流运动,获得强剪切,增加了物料的混合均匀度。将三头捏合块与开槽设计相结合运用,使混炼区不产生负压,轴向正压差达到1.94 MPa,相比于普通捏合块优势明显。

本文的试验结果表明开槽螺杆元件带来的性能上的提升,但是开槽的尺寸与捏合块外形尺寸的不同组合对混炼效果的影响还不确定。在后续的研究中,可以对开槽尺寸以及捏合块外形尺寸分别进行单因素试验,再进行响应面试验设计,进行线性回归分析,找出尺寸组合的最优解,以获得加工性能最好的开槽捏合块设计。

参考文献

[1] 郭树国,王丽艳,刘强.挤压参数对组织化大豆蛋白糊化度的影响[J].中国饲料,2011(11):26-28.(Guo S G, Wang L Y, Liu Q. Effect of extrusion parameters on gelatinization degree of tissue soy protein [J]. Chinese Journal of Feed, 2011 (11): 26-28.)

[2] 阎欣,郭兴凤.挤压膨化处理对大豆蛋白功能特性影响[J].粮食加工,2017,42(6):33-37.(Geng X,Guo X F. Influence of extrusion treatment on functional properties of soy protein[J]. Cell Processing,2017,42(6):33-37.)

[3] 任冬云.双螺杆挤出——技术与原理[M]:北京:化学工业出版社,2010.(Ren D Y. Twin-screw extrusion—Technology and principle [M]: Beijing: Chemical Industry Press, 2010.)

[4] 王丽艳,郭树国.基于BP神经网络玉米蛋白粉吸水性的预测[J].中国农机化,2013,34(6):125-128.(Wang L Y, Guo S G. BP Neural network prediction cgm water absorption [J] Chinese Agricultural, 2013, 34 (6): 125-128.)

[5] 杨凯,武凯,王以龙,等.双螺杆挤压膨化机螺杆的力学模型及有限元分析[J].机械设计与制造,2013(1):175-177.(Yang K, Wu K, Wang Y L, et al. Mechanical model and finite element analysis of twin-screw extruder extruder screw [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013 (1): 175-177.)

[6] 张洪才.ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例[M].北京:机械工业出版社,2012:10.(Zhang H C. ANSYS 14.0 theoretical analysis and engineering application examples [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012:10.)

[7] 章梓雄,董曾南.粘性流体力学[M].北京:清华大学出版社,1999.(Zhang Z X, Dong Z N. Viscous fluid mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.)

[8] 耿孝正.双螺杆挤出机原理及其应用[M].北京:中国轻工业出版社,2002:4.(Gen X Z. The principle and application of twin-screw extruder [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2002:4.)

[9] 祝卫国,汪传生.单螺杆挤出机分散混炼的改进[J].特种橡胶制品,2003,24(4):31-35.(Zhu W G, Wang C S. Improvement of dispersion mixing in single screw extruder [J]. Special Purpose Rubber Products, 2003, 24 (4): 31-35.)

[10] 马秀清,耿孝正.啮合同向双螺杆挤出过程轴向循环流道三维流场分析-轴向循环流场分析(2)[J].中国塑料,2001,15(3):83-91.(Ma X Q, Gen X Z. Three-dimensional flow field analysis of axial circulating flow in intermeshing twin-screw extrusion process-axial circulating flow field analysis (2) [J]. Office of China Plastics, 2001, 15(3): 83-91.)

[11] 朱林杰,耿孝正.啮合同向双螺杆挤出过程聚合物颗粒熔融机理研究—聚合物颗粒熔融过程子区物理模型[J].中国塑料,2000(6):82-89.(Zhu L J, Gen X Z. Study on melting mechanism of polymer particles in intermeshing co-rotating twin-screw extrusion—Sub-regional physical model of polymer particle melting process [J]. China Plastics, 2000(6):82-89.)

[12] 郭树国,张召,王丽艳.基于ANSYS的豆粕双螺杆膨化机的三维流场分析[J].中国农机化学报,2014,35(6):213-216,240.(Guo S G, Zhang Z, Wang L Y. Three-dimensional flow field analysis of soybean meal twin-screw extruder based on ANSYS [J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2014, 35 (6): 213-216, 240.)

[13] 邢应生,朱复华,江顺亮.单螺杆挤出过程固体输送段的数值模拟[J].中国塑料,2004(10):85-89.(Xing Y S, Zhu F H, Jiang S L. Numerical simulation of solid conveying section in single screw extrusion process [J]. China Plastics, 2004(10):85-89.)