第 34 卷第 10 期
2018 年 10 月

FOOD & MACHINERY 食品与机械

Vol.34, No.10
Oct. 2018

DOI:10.13652/j.issn.1003－5788.2018.10.015

不同温度状态下啮合异向双螺杆挤出机的流道分布规律

Flow pattern distribution of meshing counter rotating twin screw extruders at different temperatures

王少峰[1,2]　张　媛[1,2]　刘美莲[1,2]　黄志刚[1,2]

WANG Shao-feng[1,2]　*ZHANG Yuan*[1,2]　*LIU Mei-lian*[1,2]　*HUANG Zhi-gang*[1,2]

赵玉莲[1,2]　古　劲[1,2]　宋　宇[1,2]

ZHAO Yu-lian[1,2]　*GU Jin*[1,2]　*SONG Yu*[1,2]

（1. 北京工商大学材料与机械工程学院，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 Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing* 100048, *China*;
2. *Plastic Beijing Municipal Key Laboratory of Health and Safety Quality Evaluation Technology, Beijing* 100048, *China*）

摘要：为探索等温与非等温状态下啮合异向双螺杆挤出机的流道分布规律，采用 Solidworks 三维建模软件建立啮合异向双螺杆的物理模型，在 Polyflow 分析软件中进行相应的数值模拟。结果表明：在等温问题中，随着双螺杆转速的增加，出口方向上的压力、黏度、剪切速率变化趋势不同；在非等温问题中，挤出方向从入口到出口温度呈线性增加的趋势，并且沿着径向向外的方向，温度逐渐增加。

关键词：双螺杆挤出机；啮合异向；流道分布；等温；非等温；数值分析

Abstract: In order to explore the distribution law of flow path in isothermal twin screw extruder under isothermal and non isothermal state, using Solidworks 3D modeling software to establish the physical model of meshing counter rotating twin screw extrude, the corresponding numerical simulation is carried out in the Polyflow analysis software. Numerical results show that: in the isothermal problem, the pressure, viscosity and shear rate of the exit direction vary with the increase of the speed of the twin screw; in the non isothermal problem, with the increase of the rotating speed of the twin-screw, the direction of the extrusion direction increases from the inlet to the outlet, and the temperature increases gradually along the radial direction. It can provide theoretical basis for further optimization of process parameters.

Keywords: double screw extruder; counter rotating intermeshing; flow path distribution; isothermal; non isothermal; numerical analysis

作为双螺杆挤出机的另一大类，啮合异向双螺杆包括啮合平行异向和啮合锥形异向两大类[1]。啮合异向双螺杆由于特殊的构型，形成了 C 型室，物料被封闭在彼此隔开的 C 型室中，封闭在 C 型室的物料不随螺杆作转动，只沿螺杆轴线方向作正位移动，故其广泛应用于挤出成型和配料造粒及其他方面[2]。中国挤出机的应用及发展相对发达国家滞后，自 20 世纪中叶开始，中国对双螺杆挤出机高分子加工与仿真的研究进展显著，许多模拟与试验的成果被刊登出来，与啮合同向双螺杆研究成果相比，啮合异向双螺杆研究成果却很少[3]。刘湘河等[4]对异向双螺杆 S 型元件混炼效果的数值进行了研究，证明了啮合方式能影响元件的输送能力、以剪切为主的分散混合能力和分布混合能力，但是其假设流道内熔体作三维等温稳态流动，忽略了温度变化对数值模拟的影响，使得倍数关系不够精确。

目前对于啮合异向双螺杆模拟研究，多数假设其为等温流场[5]，而非等温流场问题与啮合异向双螺杆挤出机实际工作状态密切相关，在数值模拟研究中添加非等温流场会更符合异向双螺杆实际工作状态，这样计算问题的非线性更强，是啮合异向双螺杆重要研究方向。本研究拟对啮合异向双螺杆挤出过程进行数值模拟，在等温流动与非等温流动问题下，以双螺杆转速为工艺条件，数值求解模拟过程中压力场、黏度场、剪切速率场以及温度场，分析讨论两种不同温度状态下的流道分布规律，为进一步优化工艺参数提供理论依据。

基金项目：北京市自然科学基金项目北京市教育委员会科技计划重点项目（编号：KZ201810011017）；国家重点研发计划（编号：2016YFD0400305）

作者简介：王少峰，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：2018-08-26

1　模拟过程

1.1　几何模型的建立

对异向双螺杆模型的设定如下，坐标原点为左螺杆的中心点，X 轴方向向右，Y 轴方向向上，Z 轴方向由右手法则确定，同时其方向与挤出方向相同。为保证计算结果的正确性，模型采用了国际单位制 MKS，异向双螺杆的长度单位为米(m)，质量单位为千克(kg)，时间单位为秒(s)，其中左螺杆顺时针转动，右螺杆逆时针转动，根据双螺杆几何学建立图 1 所示异向双螺杆三维模型[6-9]。螺杆建模参数：螺杆中心距 18 mm、螺纹元件导程 24 mm、螺纹元件长度24 mm、螺杆外径 22 mm。

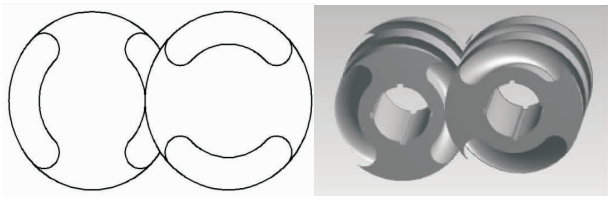


图 1　异向双螺杆模型

Figure 1　Counter rotating twin screw model

1.2　数学模型的建立

1.2.1　等温流动问题　在等温流动问题中，考虑到熔体输送的具体条件及聚合物的特性作以下假设[10]：① 熔体为不可压缩的流体；② 流场为稳定、等温流场；③ 雷诺数较小，层流流动状态；④ 惯性力、重力远不及黏性力，省略不计；⑤ 流道中全布满；⑥ 熔道壁面无滑移；⑦ 流体为非牛顿流体，其本构方程为 Bird-Carreau 模型。故而，等温流动问题中的连续性方程，动量方程，本构方程可以近似表示为[11]。

连续性方程：$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0$，　(1)

动量方程：$-\nabla \cdot P + \nabla \cdot T = 0$，　(2)

式中：

∇——哈密顿算子；

$\boldsymbol{u}$——速度矢量，m/s；

P——流体静压力，Pa；

T——偏应力张量。

流体为非牛顿流体，其本构方程采用 Bird-Carreau 模型：

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

式中：

η_0——物料在零剪切应力下的黏度，Pa·s；

$\dot{\gamma}$——剪切速率，s^{-1}；

n——非牛顿指数；

λ_c——时间常数，s

1.2.2　非等温流动问题　在非等温流动问题中，物料的黏度与剪切速率和温度有关，使用 Bird-Carreau 模型来描述物料黏度和剪切速率之间的关系[12]：

$$\eta bc(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)(1+\lambda^2{}_c\dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2}，\quad (4)$$

式中：

η_0——物料在零剪切应力下的黏度，Pa·s；

$\dot{\gamma}$——剪切速率，s^{-1}；

n——非牛顿指数；

λ_c——时间常数，s；

η_∞——物料在无穷大剪切应力下的黏度，Pa·s。

另外，在此基础上，使用近似 Arrhenius 定律来进行黏度的温度修正：

$$h(T) = \exp[-\alpha(T - T\alpha)]。\quad (5)$$

计算中，物料黏度可表示为：

$$\eta = \eta bc(\dot{\gamma})h(T)。\quad (6)$$

模拟过程中，计算准确度与物料参数设置相联系，本次仿真模拟中 Bird-Carreau 本构方程模型参数：在等温流动下物料的本构方程模型参数包括温度 190 ℃、零剪切黏度(η_0) 1 000 Pa·s、松弛时间(λ_c)1 s、非牛顿指数 0.4。在非等温流动下物料的本构方程模型参数包括无穷大剪切黏度(η_∞) 0 Pa·s、零剪切黏度(η_0)1 000 Pa·s、松弛时间(λ_c) 1 s、非牛顿指数 0.4、温度系数 0.002 5 $℃^{-1}$、物料密度 900 kg/m^3、导热系数 0.207 W/(m·K)。

1.3　边界条件的设定

1.3.1　等温流动问题　速度边界条件：对于螺杆环面上的点，熔体速度 $V(r)$ 为这个点距离螺杆中心线处的直径距离和螺杆角速度相乘[13]，即

$$\nu(r) = Ns \cdot 2\pi r。\quad (7)$$

在流道内环面，熔体的速度 $V(b)$ 是 0，即

$$\nu(b) = 0，\quad (8)$$

式中，

r——在与螺杆轴线垂直的横截面内螺杆外表面到其中心的距离，mm；

Ns——螺杆转速，r/min。

1.3.2　非等温流动问题

(1) 速度边界条件：出口给定法向力和切向力，其中法向力数值采用演变算法，切向力为 0；入口法向力和切向力均为 0；机筒壁壁面无滑移，法向速度和切向速度均为 0。

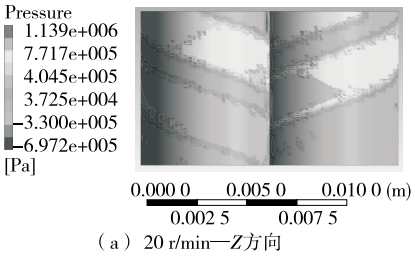
(2) 热边界条件：在出口和入口这两个面上施加进入流体区域流体温度的边界条件，在该边界条件中，当其速度方向为离开流体区域的方向时，其温度不受限制，而当其速度方向为流入流体区域的方向时，需要给定节点温度[14]。

2　仿真分析

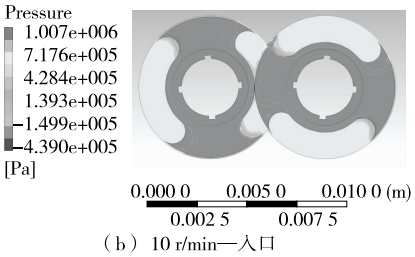
2.1　等温流动问题模拟结果

2.1.1　压力　如图 2 所示，在螺杆转速为 20 r/min 时，物料在异向双螺杆的 C 形小室中正位移向前输送，在螺棱处压力数值变大，熔体产生回流，螺槽处压力数值变小，熔体向前运动。在包含两螺杆轴线的两平面内，压力逐步增大，两啮合螺杆压力值差一个相位。在螺杆转速为 10，20 r/min 时，随着螺杆转速的增加，入口截面的压力也逐渐增加。

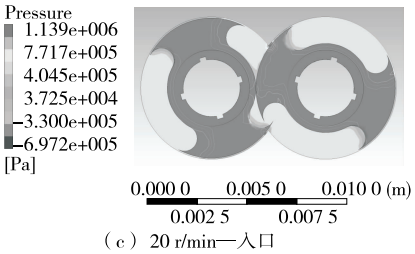
2.1.2　黏度　如图 3 所示，在螺杆转速为 20 r/min 时，同一截面上1处的物料由于左螺杆顺时针转动，经受的螺棱的剪



（a）20 r/min—Z方向



（b）10 r/min—入口



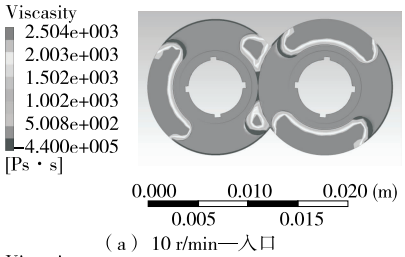
（c）20 r/min—入口

图 2　压力云图

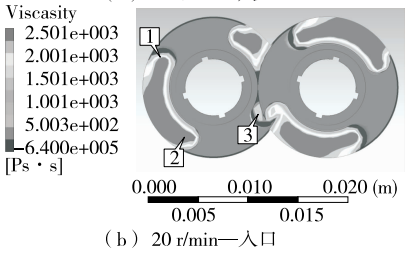
Figure 2　Pressure cloud picture

切作用较低,2 处的物料还未受到螺棱的剪切作用,与 1 处相比 2 处的物料黏度较高,3 处由于是左右螺杆啮合区,剪切作用最大,该位置的黏度最低。在螺杆转速为 10,20 r/min 时,随着螺杆转速的增加,入口截面的黏度却逐渐降低。

2.1.3　剪切速率　如图 4 所示,在螺杆转速为 20 r/min 时,左右螺杆啮合区会产生压延间隙,导致漏流,流过其中一螺杆槽底和另一螺杆螺顶之间,由啮合区域上方流向下方,所以左右螺杆啮合区的物料剪切速率大于其他 C 形区域物料的剪切速率。在螺杆转速为 10,20 r/min 时,随着螺杆转速的增加,入口截面的剪切速率也逐渐增加。



（a）10 r/min—入口



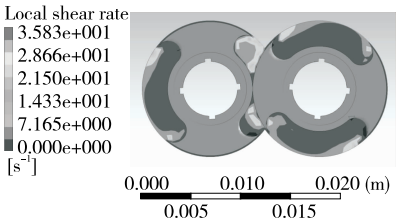
（b）20 r/min—入口

图 3　黏度云图

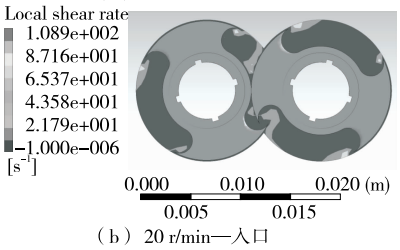
Figure 3　Viscosity cloud chart

2.2　非等温流动问题模拟结果

如图 5 所示,在螺杆转速为 10 r/min 时,由于物料熔融的主要来源是机筒的热传导,在靠近机筒内表面的物料先受热熔融,温度先升高;在 Z 方向上,物料由固体—固液两相—液体,温度逐渐升高,所以挤出方向从入口到出口温度呈线



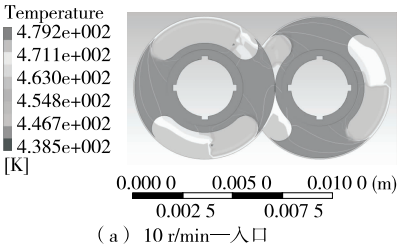
（a）10 r/min—入口



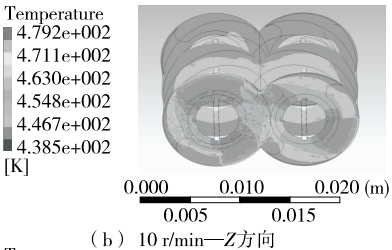
（b）20 r/min—入口

图 4　剪切速率云图

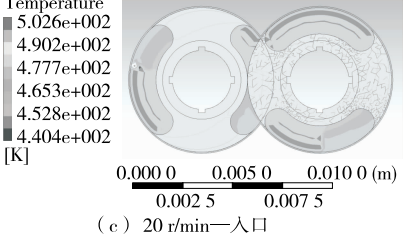
Figure 4　Shear ratenephogram



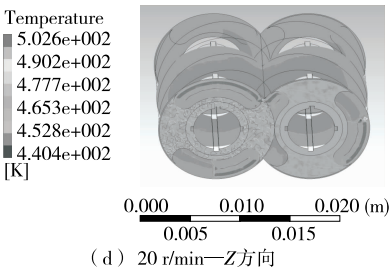
（a）10 r/min—入口



（b）10 r/min—Z方向



（c）20 r/min—入口



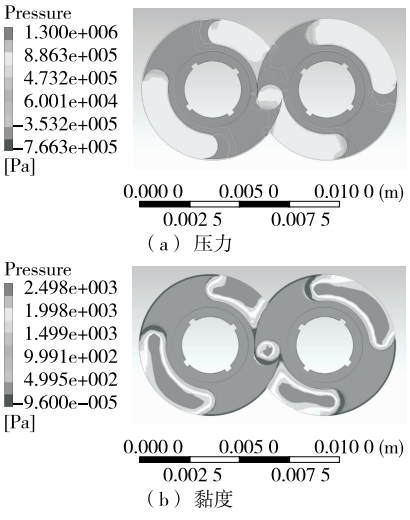
（d）20 r/min—Z方向

图 5　温度云图

Figure 5　Temperature cloud map

性增加的趋势，并且沿着径向向外的方向，温度逐渐增加。为了验证非等温流动问题模拟结果的准确性，在螺杆转速为 20 r/min 时，观察入口温度云图以及 Z 方向温度变化云图，结果与螺杆转速为 10 r/min 的温度变化一致。

如图 6 所示，在螺杆转速为 20 r/min 时，由于是非等温流动过程，在挤出过程中温度相对于等温过程会升高，相应的压力会增大，黏度会降低。



（a）压力

（b）黏度

图 6　入口压力云图和黏度云图

Figure 6　Inlet pressure cloud chart and viscosity nephogram

3　结论

本研究通过 polyflow 软件对啮合异向双螺杆挤出等温与非等温问题进行数值分析，得到如下结论：

（1）非等温过程对啮合异向双螺杆挤出机挤出过程中压力、黏度等物理量的变化存在影响。

（2）相较于之前研究人员对等温过程中各物理量的分析研究，本研究结果与挤出机实际工作状态更为符合，得出的结论更为准确。

（3）在挤出机实际工作中，对于转速的要求很严格，本研究未给予最合适挤出机工作的工艺参数，未来可以多次进行模拟与试验，反复对比，以期获得更准确的工艺参数。

参考文献

[1] 时俊峰，黄志刚，蒋卫鑫，等. 聚乳酸在啮合同向双螺杆挤出机机头过渡体的流场研究[J]. 食品与机械，2017，33(1)：72-75.

[2] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[M]. 北京：中国轻工业出版社，2003：128-129.

[3] 张其东. 异向旋转平行双螺杆设计要点及挤出工艺[J]. 塑料科技，2014，42(2)：73-78.

[4] 刘湘河，彭涛，马永寿. 异向双螺杆 S 型元件混炼效果的数值研究[J]. 工程塑料应用，2014，42(4)：51-55.

[5] 李彦辉，马秀清，武学伟，等. 啮合异向双螺杆挤出机中捏合块元件对 PE-HD/PS 不相容体系混合效果的研究[J]. 中国塑料，2010，24(9)：94-98.

[6] 王多勇. 双螺杆挤出机的关键技术[J]. 塑料工业，2012，40(4)：118-122.

[7] 王鹄，马秀清. 成核剂对聚丙烯釜压发泡的影响[J]. 中国塑料，2015，13(3)：75-78.

[8] 王蓉，耿孝正. 同向旋转双螺杆挤出机捏合盘元件的熔体输送特性及混合机理研究[J]. 中国塑料，1990，4(1)：65-75.

[9] 吴冰清. 啮合异向双螺杆参数化造型与流固藕合分析[D]. 沈阳：东北大学，2015：17-20.

[10] 黄志刚，刘凯，李梦林，等. 单螺杆挤出机计量段模拟研究[J]. 食品与机械，2016，32(1)：63-67.

[11] 李彦辉. 啮合异向双螺杆混合功能区的研究[D]. 北京：北京化工大学，2010：23-25.

[12] 陈龙，董力群，张亚军，等. 基于 SolidWorks API 的异向双螺杆的参数化设计[J]. 中国塑料，2018，32(1)：120-124.

[13] 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，2018：38-42.

[14] 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.

（上接第 25 页）

[20] 隋晓春，程显好，张友军，等. 一种抗辐射危害和缓解视疲劳保健食品的研制[J]. 食品与药品，2007(11)：19-21.

[21] 程传兴，刘晓飞，王薇. γ-氨基丁酸的生理功能及制备方法[J]. 哈尔滨商业大学学报：自然科学版，2017(6)：693-697.

[22] 吕毅，郭雯飞，倪捷儿，等. 茶氨酸的生理作用及合成[J]. 茶叶科学，2003，23(1)：1-5.

[23] 石亚亚，贾尚智，闵彩云. 茶氨酸保健功能研究进展[J]. 生物资源，2010，32(1)：52-56.

[24] 丁一，艾华. γ-氨基丁酸与人体健康的关系[J]. 中国临床保健杂志，2012，15(1)：100-103.

[25] DODD F L，KENNEDY D O，RIBY L M，et al. A double-blind，placebo-controlled study evaluating the effects of caffeine and L-theanine both alone and in combination on cerebral blood flow，cognition and mood[J]. Psychopharmacology，2015，232(14)：2 563-2 576.

[26] HIGASHIYAMA A，HTAY H H，OZEKI M，et al. Effects of l-theanine on attention and reaction time response[J]. Journal of Functional Foods，2011，3(3)：171-178.

[27] 堀江典子，菅美奈子，金武祚. GABA(γ-氨基丁酸)的功能性[J]. 中国食品添加剂，2010(6)：169-173.

[28] 中华医学会眼科学分会眼视光学组. 视疲劳诊疗专家共识(2014 年)[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志，2014(7)：385-387.

[29] 赵丹，王朝旭. 茶氨酸的国内外研究现状[J]. 食品科学，2002，23(5)：145-147.

[30] 林伟东，孙威江，郭义红，等. 茶叶中茶氨酸的研究与利用[J]. 食品研究与开发，2016(20)：201-206.

[31] 邓乾春，黄凤洪，黄庆德，等. 亚麻籽油软胶囊缓解视疲劳作用[J]. 食品研究与开发，2011，32(1)：118-122.

[32] 朱松，王洪新. 茶氨酸生理功能及其在食品中应用[J]. 粮食与油脂，2005(1)：44-46.

[33] 任晓亮. 薰衣草精油嗅吸对人体脑电波的影响[D]. 上海：上海交通大学，2012：28-32.