

# 新型强化传热螺杆结构传热性能数值研究 及场协同分析

王萌萌 谢鹏程 鉴冉冉 赵世超 杨卫民\*

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 利用 CFD 软件 fluent 对普通螺杆结构和新型强化传热螺杆结构在塑化计量段中的三维非等温流场进行数值模拟, 研究两种结构流道内熔体的速度场、轴向和径向温度场、对流传热系数及场协同角的不同。结果表明: 在塑化过程中, 新型强化传热结构存在着径向的对流传质过程, 加强了径向的对流传热, 因此有较好的径向温度分布; 新型结构较普通螺杆结构有较高的对流换热系数和较好的场协同性, 从而加强了螺杆的对流传热。

**关键词:** 三维非等温流场; 强化传热; 径向温度; 场协同

**中图分类号:** TK124 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.01.011

## 引言

随着聚合物材料的迅速发展和大量使用, 人们对高聚物成型制品的精度要求越来越高, 但是高聚物作为典型的非牛顿流体, 存在黏度大、导热差、塑化均匀性差等问题, 难以满足精密注塑成型加工技术的要求。

非牛顿流体剪切应力与剪切速率的非线性关系导致这类流体的数值计算比牛顿流体更加困难<sup>[1]</sup>。近年来学者们对螺杆塑化时的流动过程进行了大量的仿真研究。马德君等<sup>[2]</sup>通过模拟两种不同结构的三维螺杆头等温流场并求解速度场、温度场等, 证明了带螺纹的螺杆头有增强塑化的作用; Geng 等<sup>[3]</sup>采用 finite element method (FEM), 通过研究注塑充填过程中温度场的三维数值分析, 实现了可求解非等温非牛顿流体在任意厚度型腔内的温度场; 陈晋南等<sup>[4]</sup>使用 CFD 软件 poly-flow 对两种止逆螺杆流道熔体非等温流场进行数值研究, 证明 35° 锥角的螺杆有较好的剪切塑化效果, 对提高塑件的质量有利; 戴晓静<sup>[5]</sup>应用螺杆简化展开模型对螺杆计量段进行了有限元模拟分析和螺杆优化设计; 李凌丰等<sup>[6]</sup>采用螺杆展开模型

数值模拟了熔融塑料在螺槽中的流动和传热, 求解得到三维流道的温度分布, 为更深入理解塑化过程及其影响因素提供了依据。

以上文献大都基于挤出机的传统基础理论或直接引用挤出机理论研究塑化传热过程, 而对螺杆塑化过程传热机理的研究非常少。Guo 等<sup>[7-8]</sup>从能量方程的角度提出了场协同理论, 并指出对流换热不仅取决于流体的物性、速度和壁面与流体的温差, 还取决于温度梯度与速度场的协同程度。当流体具有相同的温度边界条件和相同的速度时, 二者的协同程度越好, 其换热强度也越高<sup>[9]</sup>。

场协同理论已在对流换热领域尤其是换热器领域得到了广泛应用。本课题组将场协同理论应用于增强螺杆强化传热方面, 从而将场协同理论拓展至高黏度非牛顿流体强化传热领域, 并基于聚合物熔体微积分强化对流传热与高效塑化的新思路设计出一种新型强化传热结构<sup>[10]</sup>, 以期提高聚合物塑化均匀性。本文在本课题组前期成果的基础上, 利用场协同理论<sup>[11]</sup>并通过数值计算的方法进一步分析该新型强化传热结构与传统螺杆结构在塑化过程中的传热性能, 比较了两种结构在速度场、温度场、场协同角等方面的不同, 得出新型强化传热结构对增强对流换热具有实质性作用。

## 1 物理模型

塑料加工过程中, 熔融塑料在螺杆中的流动出现在螺杆和机筒之间的螺槽区域内<sup>[6]</sup>, 螺杆以  $n$

收稿日期: 2017-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(51576012)

第一作者: 女, 1992年生, 硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: yangwm@mail.buct.edu.cn

的转速转动。假设螺杆静止,则机筒以相同的转速  $n$  沿反方向转动<sup>[12]</sup>。再将其沿螺棱方向展开,最终形成如图 1 所示的普通螺杆矩形截面的直槽。

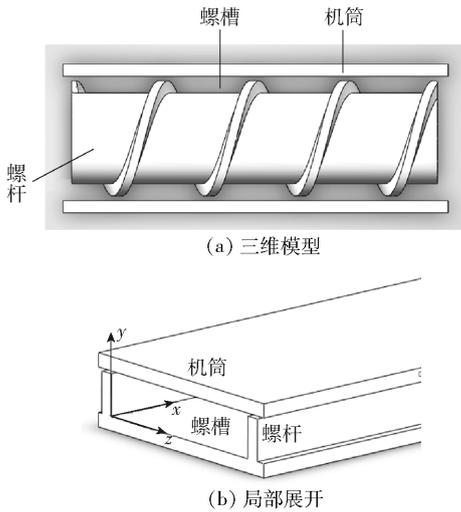


图 1 普通螺杆结构简化模型

Fig. 1 Simplified expansion model of the conventional screw

对于管内层流换热,温度降在整个管内沿径向发生,因此只要在管内径向产生较小的速度(主流速度的 1% 甚至 1‰)即可对换热产生显著的影响<sup>[13]</sup>。本文所使用的新型结构正是通过改变管内流体的方向使其产生径向的流动,其结构示意图如图 2。将一定长度的螺杆上沿周向进行  $n$  等分( $n = 10$ ),形成  $n$  个小的螺槽流道,并在每个小的螺槽流道内设计两个相互垂直的  $90^\circ$  扭转曲面,使得聚合物在轴向移动的同时还能通过扭转面产生径向流

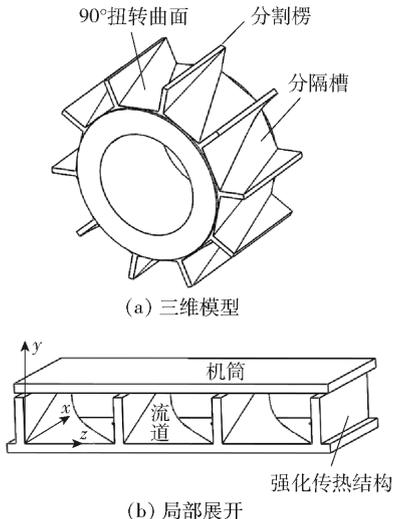


图 2 新型强化传热结构简化模型

Fig. 2 The new enhanced heat transfer structure and its simplified model

动,使螺槽底部的流体移动到螺槽顶部,从而强化聚合物的径向对流。两种螺杆结构的参数如表 1 所示。

表 1 螺杆结构参数表

Table 1 Screw structure parameters

结构名称	螺杆外径 $D/\text{mm}$	螺杆内径 $d/\text{mm}$	机筒内径 $d_1/\text{mm}$	螺槽深度 $h/\text{mm}$	螺槽宽度 $W/\text{mm}$
新型结构	38	30	40	4	10
普通结构	38	30	40	4	30

## 2 数学模型

本文模拟使用的高聚物是熔融状态下的聚丙烯(PP),假设 PP 熔体为不可压缩的高黏性非牛顿流体,且在螺杆流道中的流动为非等温稳态流动,流道全充满,流道壁面无滑移。考虑到 PP 熔体是高黏度流体,其惯性力和质量力相对于黏性力可以忽略不计,因此描述流场的基本微分方程简化为

连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中  $u, v, w$  分别为流体在  $x, y, z$  方向上的速度。

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $p$  为压力, Pa;  $\eta$  为黏度, Pa·s;  $v_x, v_y, v_z$  分别为速度在  $x, y$  和  $z$  方向的分量, m/s。

能量方程

$$\rho C_p \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q} \quad (3)$$

其中  $T$  为流域内流体的温度, K;  $C_p$  为定压比热容, J/(kg·K);  $k$  为热传导系数;  $\rho$  为物料密度, kg/m<sup>3</sup>。

PP 作为典型的非牛顿流体,其表观黏度不仅与剪切速率有关还与流体温度有关,因此本文使用 Carreau 模型和近似的 Arrhenius 型方程来综合表达黏度的变化,其本构方程分别如式(4)、(5)所示:

$$\eta = H(T) \eta_0 (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n+1}{2}} \quad (4)$$

$$H(T) = \exp \left[ \alpha \left( \frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_\alpha - T_0} \right) \right] \quad (5)$$

式中,  $\eta_0$  为零剪切黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\lambda$  为 Carreau 模型参数,  $\text{s}$ ;  $\gamma$  为剪切速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $n$  为非牛顿指数;  $\alpha$  为热力学常数, 是恒定剪切应力下的流动活化能;  $T_\alpha$  为  $H(T) = 1$  时的参照温度,  $T_0$  为参考温度, 单位均为 K。PP 的物性参数如表 2 所示。

表 2 PP 的物性参数

Table 2 Physical parameters of PP

名称	数值	名称	数值
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	900	$\lambda/\text{s}$	0.5
$k/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.24	$\alpha$	2000
$C_p/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	2300	$\eta_0/\text{Pa} \cdot \text{s}$	10000
$n$	0.75	$T_0/\text{K}$	460

### 3 网格独立性验证

经验表明网格超过一定数量后提高计算精度的效果便不再明显<sup>[14]</sup>。本文通过采用不同网格数目的模型进行初步计算来选择出最合理的网格数量, 图 3 为新型强化传热结构在转速 60 r/min 的工况下出口平均温度随流体域网格数量的变化情况。可以看出当网格数量达到 6 万左右时出口截面平均温度基本稳定, 说明此时的网格数量已经达到足够的精度。对普通螺杆进行了同样验证, 选取的网格数量为 2 万。

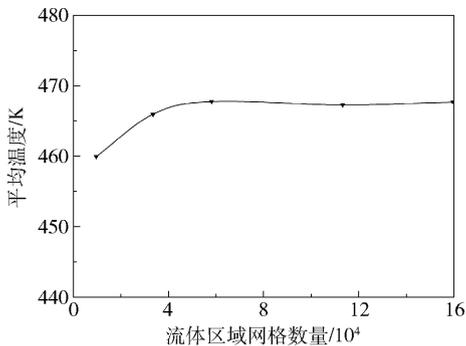


图 3 新型结构出口截面网格独立性验证图

Fig. 3 Grid independence verification diagram of the outlet section

## 4 数值模拟及结果分析

### 4.1 求解设置

所有数值计算过程在 fluent 软件中完成, 计算过程中采用的边界条件如表 3 所示。求解条件设置

为: 螺杆转速 60 r/min, 塑化轴向速度 0.01 m/s。计算采用的收敛精度为: 能量方程  $10^{-6}$ , 其余方程  $10^{-3}$ 。

表 3 边界条件

Table 3 Boundary condition settings

位置	流动边界条件	热边界条件
进口	速度进口	460 K
出口	流动出口	/
螺杆外表面	壁面无滑移	绝热
机筒内表面	转速 60 r/min	480 K

为了便于分析和保持模型尺寸的统一性, 本文选取一个分割槽的流道作为研究对象, 并从普通螺杆流道中间区域截取了相应尺寸的流道作为参照模型进行对比分析。

### 4.2 结果与讨论

#### 4.2.1 速度场

图 4(a)、(b) 分别为从进口方向观察两种结构流道中的流体流动情况。可以看出靠近螺杆底部的流体流动速度最小, 机筒附近的流体速度最大。在普通螺杆流道中流体的流动层次分明, 基本沿着与  $x$  轴平行的方向向前流动, 没有径向 ( $y$  方向) 的混合交换。而新型强化传热结构在底部两个扭转曲面的作用下, 螺杆底部速度小的流体会沿着曲面流到速度较高的机筒顶端, 这样的翻转过程便使流体在径向上有了质的交换。

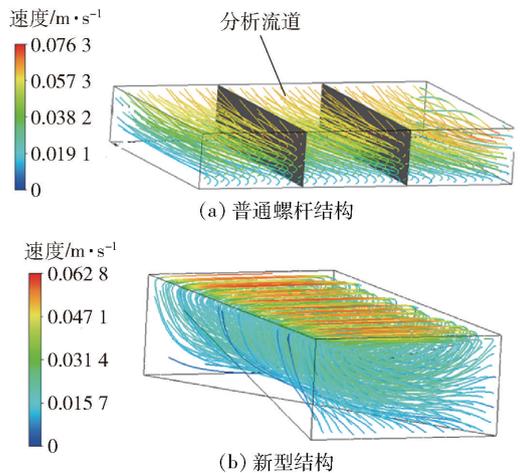


图 4 速度流线分布

Fig. 4 Velocity streamline distribution

#### 4.2.2 温度场

质交换必然会引起热交换, 因此本文分析两种

结构流道的温度场分布,通过数值计算结果截取了离进口渐远的 4 个截面: $x = 5 \text{ mm}$ ,  $x = 10 \text{ mm}$ ,  $x = 15 \text{ mm}$  和出口。截面温度分布如图 5 所示。

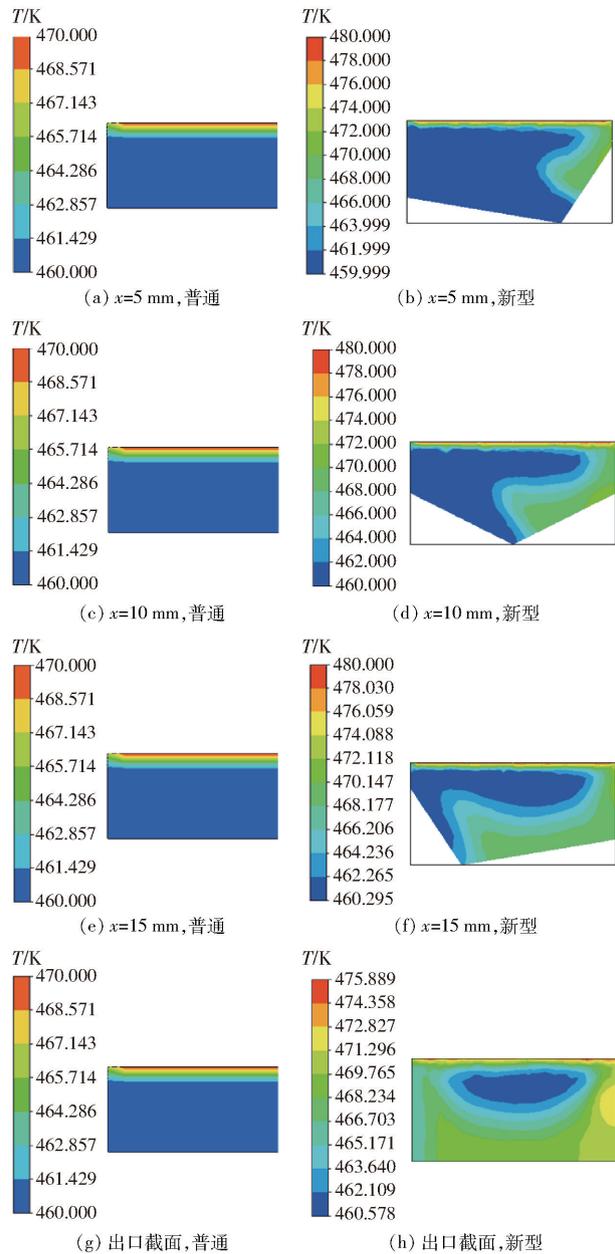


图 5 两种螺杆结构不同截面温度分布图

Fig. 5 Temperature distributions in different sections of the two screws

由图 5 可以看出,随着流体的流动,新型强化传热结构在底面两个  $90^\circ$  扭转曲面的作用下,下部靠近螺杆的熔体和机筒顶部的熔体发生径向流动混合,使得机筒顶部温度较高的流体流向了螺杆底部,从而提高了底部流体温度。而普通螺杆中的流体流动层次分明,没有径向热传递,原因是流体的流动为层流流动,雷诺数很小,而高聚合物熔体的黏度大,所

以热量传递缓慢,导致温度分布不均匀,这也是加热高黏流体的难点之一<sup>[15]</sup>。

研究表明螺杆的径向方向是热流密度最大、影响塑化均匀性最显著、高黏度聚合物对流最薄弱的方向,因此分析新型强化传热结构的径向温度分布是探究其强化换热效果的重要方面。本文在无因次轴向位置( $X = x/L$ )截取了流体在距离进口位置渐远的 5 个不同截面,分别计算得到流体沿无因次径向( $Y = y/H$ )的温度分布情况如图 6。

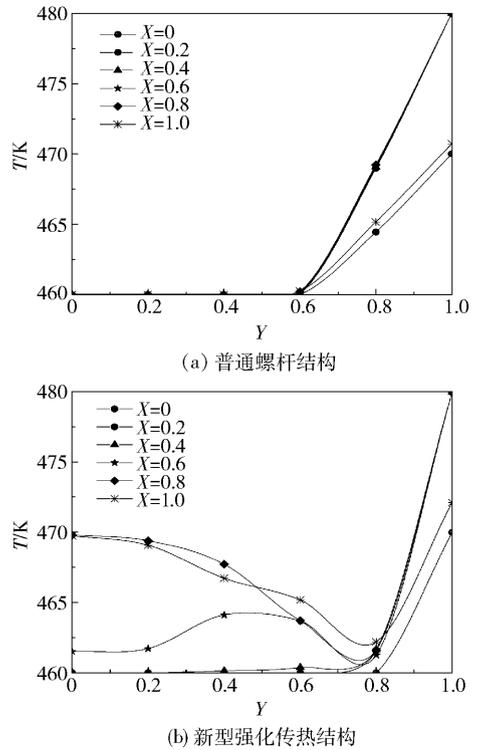


图 6 径向温度分布

Fig. 6 Radial temperature distribution

从图 6 可知,每一条曲线的走势与图 5 所示情况吻合。说明在新型强化传热结构中,流体沿轴向流动过程中机筒内壁处的高温流体沿壁面和扭转面流动到螺杆底部,使得底部的低温流体温度越来越高,并在出口处达到最高。虽然流道中心区域的流体温度没有变化,但流体在整个区域上的平均温度有了提高,径向上的温差也有所减小。而在普通螺杆结构中,流体温度基本不沿轴向变化,靠近螺杆的低温流体与靠近机筒的高温流体没有径向的热量交换,流体的径向温差很大。由此可见此新型强化传热结构对减小螺杆塑化过程中的径向温差和提高塑化均匀性都有较好的作用。

#### 4.2.3 换热性能

对流换热系数是表示对流传热快慢的准数,数

值越大表明对流传热越快。对流换热系数由公式(6)计算：

$$h = q / (T_w - T_{ave}) \quad (6)$$

其中,  $h$  为对流换热系数,  $W / (m^2 \cdot K)$ ;  $q$  是热流密度,  $W / m^2$ ;  $T_w$  为机筒内表面的壁温,  $T_{ave}$  为 PP 流体横截面的平均温度(由面积加权积分获得), 单位均为 K。图 7 为流体在不同轴向位置对流换热系数的变化趋势。

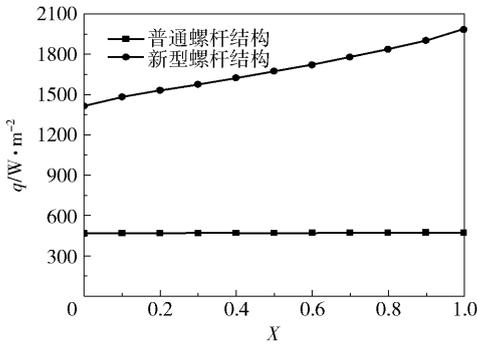


图 7 轴向对流换热系数分布图

Fig. 7 Distribution of the convective heat transfer coefficient in the axial direction

由图 7 可见, 普通螺杆的对流换热系数在整个结构流道中基本保持不变且数值较小, 说明在普通螺杆结构中对流换热现象不强烈。而新型强化传热结构的对流换热系数有很大的提升, 并且随着轴向距离的增加而增大, 在出口处达到最大, 说明新型强化传热螺杆对加快对流传热有明显的效果。

#### 4.2.4 场协同性

图 8 从温度梯度(普通线)与速度场(矢量线)的协同性的角度对新型强化传热结构的强化传热作用进行分析。可以看出, 普通螺杆流道中流速和等温线平行, 温度梯度垂直于等温线, 所以此时速度和温度梯度基本垂直, 表明基本上没有传热。而新型强化传热结构中流体流经两个扭转面时速度方向出现偏转, 与温度等值线出现小于  $90^\circ$  的夹角, 说明速度和温度梯度已不再垂直, 二者的协同性得到了提高, 换热强度也随之增强。

减小速度矢量和温度梯度之间的夹角是强化对流传热的有效措施<sup>[16]</sup>, 因此本文用协同角来具体量化两种螺杆的强化换热效果, 采用模平均角<sup>[17]</sup>公式来计算场协同角

$$\theta_m = \sum \frac{|\bar{u}| \cdot |\text{grad}t| \cdot dV_i}{\sum |\bar{u}| \cdot |\text{grad}t| \cdot dV_i} \theta_i \quad (7)$$

其中,  $\theta_m$  为整场模平均角,  $V_i$  为第  $i$  个局部节点的

控制体积,  $t$  为时间。

在 fluent 中自定义场函数, 由公式(7)计算得到场协同夹角分布如图 9 所示。

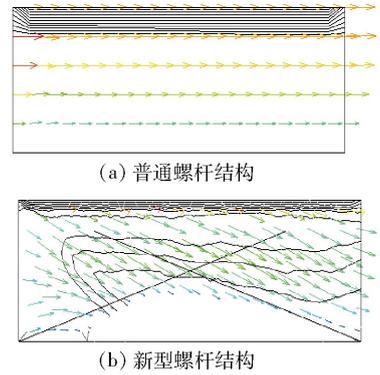


图 8 温度等值线和速度流线图

Fig. 8 Temperature contours and velocity streamlines distribution

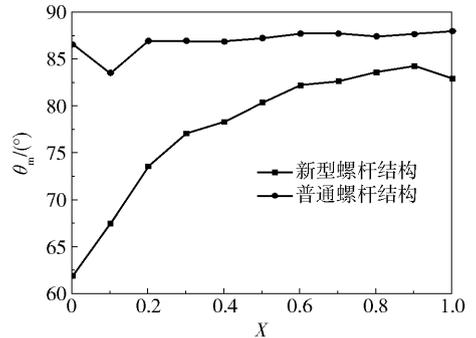


图 9 场协同角分布图

Fig. 9 Field synergy angle distribution

从图 9 中看出, 普通螺杆的场协同角整体平均值基本在  $86^\circ$  左右, 整个流场中的协同性能很差; 而新型强化传热结构中场协同角的平均角小于  $80^\circ$ , 整体场协同性良好。证明了从场协同的角度, 新型强化传热结构比普通螺杆具有更优越的传热性能。

## 5 结论

(1) 通过对普通螺杆和新型强化传热螺杆的三维数值模拟得出, 新型结构的螺杆可以实现径向上的传热, 从而使流体具有更高的平均温度和更均匀的径向温度分布。

(2) 相比于普通螺杆数值小且基本不变的对流传热系数, 新型结构的螺杆具有更高的对流传热系数, 且该系数随着流动过程逐渐提高, 从而加快了对流传热。

(3) 对比温度梯度与速度矢量的直观图, 结果

表明两种螺杆结构的速度和等温线分布存在较大的差异,计算得到新型强化传热结构的场协同角在整个流体域中小于普通螺杆,说明前者的强化传热效果优于后者。

### 参考文献:

- [1] 张钧波,张敏. 幂律非牛顿流体在偏心圆环管中流动和传热的数值计算[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版,2014,28(5):461-465.  
Zhang J B, Zhang M. Numerical calculation of flow and heat transfer for non-Newtonian fluid in eccentric annular channel[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 28(5): 461-465. (in Chinese)
- [2] 马德君,陈晋南,彭炯,等. 注塑机螺杆头三维等温流场的值模拟[J]. 工程塑料应用,2006,34(3):58-61.  
Ma D J, Chen J N, Peng J, et al. Simulation of 3d isothermal flow in the screw head of the injection machine[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(3): 58-61. (in Chinese)
- [3] Geng T, Li D Q, Zhou H M. Three-dimensional finite element method for the filling simulation of injection molding[J]. Engineering with Computers, 2006, 21(4): 289-295.
- [4] 陈晋南,王鸳鸯,彭炯. 注射螺杆流道熔体非等温流场的数值究[J]. 北京理工大学学报,2007,27(8):723-727.  
Chen J N, Wang Y Y, Peng J. Simulation of nonisothermal flow field of melt in injecting screw[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(8): 723-727. (in Chinese)
- [5] 戴晓静. 注塑机塑化理论的研究及其应用[D]. 杭州:浙江大学,2004.  
Dai X J. The research and application of preplasticizing theory of injection molding machine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [6] 李凌丰,茅旭飞,管灵波,等. 螺槽内塑料熔体传热及温度的数值模拟[J]. 机械工程学报,2013,49(14):23-30.  
Li L F, Mao X F, Guan L B, et al. Numerical study of heat transfer and temperature in the screw groove for molten plastic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(14): 23-30. (in Chinese)
- [7] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41(14): 2221-2225.
- [8] Guo Z Y, Tao W Q, Shah R K. The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48(9): 1797-1807.
- [9] 张艾萍,夏荣涛,徐志明,等. 基于场协同理论的强化管换热效果分析[J]. 化工机械,2016,43(1):97-101.  
Zhang A P, Xia R T, Xu Z M, et al. Analysis of strengthening heat transfer effects based on field synergy theory[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2016, 43(1): 97-101. (in Chinese)
- [10] 鉴冉冉,谢鹏程,丁玉梅,等. 新型扭转元件塑化过程数值模拟[J]. 塑料,2016,45(5):9-13.  
Jian R R, Xie P C, Ding Y M, et al. Numerical simulation on plastics process of metering section in screw fitted with torsion element[J]. Plastics, 2016, 45(5): 9-13. (in Chinese)
- [11] 过增元. 对流换热的物理机制及其控制:速度场与热流场的协同[J]. 科学通报,2000,45(19):2118-2122.  
Guo Z Y. The physical mechanism of convection heat transfer and its control: coordination of velocity field and heat flow field[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(19): 2118-2122. (in Chinese)
- [12] 李凌丰,刘际轩,茅旭飞. 螺杆加工塑料时熔体流动的数值模拟[J]. 机械工程学报,2011,47(24):50-56.  
Li L F, Liu J X, Mao X F. Study on simulation of molten polymer flow in the screw groove[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 50-56. (in Chinese)
- [13] 孟继安,陈泽敬,李志信,等. 管内对流换热的场协同分析及换热强化[J]. 工程热物理学报,2003,24(4):652-654.  
Meng J A, Chen Z J, Li Z X, et al. Field coordination analysis and convection heat transfer enhancement in duct[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(4): 652-654. (in Chinese)
- [14] 李明春,肖刚,史和春,等. 人字形波纹板相变流动及换热特性研究[J]. 工程热物理学报,2016,37(3):581-585.  
Li M C, Xiao G, Shi H C, et al. Study on phase change flow and heat transfer characteristics of chevron corrugated plate[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(3): 581-585. (in Chinese)
- [15] 严建平,许学谔,刘均洪. 高粘幂律非牛顿流体在管内流动和传热的计算[J]. 水动力学研究与进展,1992,7(3):315-318.  
Yan J P, Xu X Z, Liu J H. Calculation of flow and heat-conduction of non-newtonian fluid with high viscosity in a pipe[J]. Journal of Hydrodynamics, 1992, 7(3): 315-318. (in Chinese)

- [16] 淦吉昌. 螺纹螺旋管强化传热的数值模拟及场协同分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- Jin J C. Numerical simulation on heat transfer enhancement and field synergy analysis of threaded spiral tube [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012. (in Chinese)
- [17] 周俊杰, 陶文铨, 王定标. 场协同原理评价指标的定性

分析和定量探讨[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(2): 45-47.

Zhou J J, Tao W Q, Wang D B. Qualitative analysis and quantitative discussion of index for field synergy principle [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2006, 27(2): 45-47. (in Chinese)

## Numerical simulation of heat transfer enhancement and field synergy analysis of a new type of heat transfer enhancement screw

WANG MengMeng XIE PengCheng JIAN RanRan ZHAO ShiChao YANG WeiMin\*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Three-dimensional non-isothermal flow fields in the metering section of different screw structures during the plasticization process have been simulated by using CFD-fluent software, and the differences in velocity field, temperature field, radial temperature distribution, convective heat transfer coefficient and field synergy angle for the different screw structures are discussed. The results show that during the plasticization process, a new type of enhanced heat transfer screw structure affords radial mass transfer, thus enhancing the radial convective heat transfer, and the radial temperature distribution is also improved. Moreover, the new structure has a higher convective heat transfer coefficient and better synergy relationship than the conventional screw structure. The results show that there is a substantial improvement in the convective heat transfer of the screw in the case of the new design.

**Key words:** three-dimensional non-isothermal flow fields; heat transfer enhancement; radial temperature; field synergy

(责任编辑: 汪 琴)