http://pmse.scu.edu.cn

机筒销钉式场协同扭转挤出过程数值建模与仿真

董洪灿[1], 黄天宇[2], 潘 威[2], 蒋新沛[2], 鉴冉冉[2,3]

(1. 青岛科技大学 继续教育学院, 山东 青岛 266045; 2. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061;
3. 益阳橡胶塑料机械集团有限公司博士后科研工作站, 湖南 益阳 413064)

摘要: 为揭示场协同扭转螺杆在强化混合与传热性能方面的内在机理,探究机筒销钉对其性能的影响,文中基于ANSYS Polyflow 软件,分别对增设机筒销钉前后的场协同扭转螺杆建立了数值模型并开展了模拟仿真。通过流场分析、性能评估与协同性研究等手段,系统研究了场协同扭转螺杆在混合与传热增强方面的作用机制,进一步探讨了机筒销钉对螺杆性能的影响。结果表明,场协同扭转螺杆中的场协同扭转元件可以迫使聚合物熔体形成螺旋流动,改善胶料速度场、速度梯度场与温度梯度场之间的协同作用,增加流场中的拉伸流动,强化对流换热能力。添加机筒销钉之后,销钉的分流作用使得各场协同作用进一步提高,混合及传热性能进一步增强,但销钉附近的局部温度均匀性会受到不利影响。

关键词: 场协同扭转螺杆;机筒销钉;数值模拟;场协同原理
中图分类号: TP391.9 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)03-0101-08

在传统的单螺杆挤出机中,聚合物在挤出过程中主要受到剪切力场的影响。传统螺杆的结构限制和聚合物的高黏度特性,使得聚合物熔体在螺杆根部的输送速度远远大于机筒处的输送速度,导致聚合物熔体主要以剪切层流形式输送[1,2],这严重阻碍了聚合物熔体在挤出塑化过程中的传热传质,导致混合及传热不足,最终造成严重的制品缺陷[3]。

为解决上述问题,一些研究者从螺杆结构本身入手。班董董等[4]采用流体力学模拟软件 Polyflow 对不同偏心距的波状单螺杆进行了流场和混合性能的数值模拟。研究结果表明,波状螺杆的混合性能更强,且其混合能力随着偏心距的增大而逐渐增强。Rauwendaal[5]研究了与螺杆设计相关的基本问题,开发了一种新的螺杆结构,可以迫使熔体从螺杆通道内的中心区域转移到四周,从而改善其混合和传热。此外,还有一些研究者通过改变机筒来增强聚合物挤出过程中的传热传质。Emil[6]通过将传统圆柱形机筒与具有三角形截面的直槽或螺旋槽的开槽机筒比较,指出机筒内表面的形状对挤出过程中的流场有重大影响。Chen 等[7]研究了机筒销钉式单螺杆挤出机与传统单螺杆挤出机混合段的流场。结果表明,机筒销钉的引入可以扰乱颗粒流动轨迹并改变颗粒运动方向,提高混合效率。上述研究表明,不论是螺杆结构还是机筒的改变,均可作为有效提高混合与传热的手段。

笔者所在团队将场协同理论引入到聚合物加工塑化过程中,提出了聚合物场协同塑化输运混炼理论[8,9],即速度与速度梯度场的协同有利于增强拉伸流动,且速度与温度梯度场的协同有利于强化对流换热,并据此设计出了场协同扭转螺杆元件[10]。该元件的扭转通道与机筒内壁配合可以引起扭转螺旋流动,改善速度场、速度梯度场与温度梯度场之间的协同性,进而强化螺杆的混合与传热性能[11,12]。本文应用 ANSYS Polyflow 软件对添加机筒销钉前后

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0039
收稿日期: 2025-04-19
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52206095); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE232)
通讯联系人: 鉴冉冉, 主要从事高分子材料加工成型与智能制造技术研究, E-mail: jianrr@qust.edu.cn

的场协同扭转螺杆进行了数值模拟分析，并与常规单螺杆进行了对比，旨在揭示场协同扭转螺杆强化混合与传热性能的内在机理，分析机筒销钉对场协同扭转螺杆性能的影响。

1 理论模型

1.1 物理模型和边界条件

通过 Solidworks 三维建模软件建立了场协同扭转元件和不同螺杆的几何模型，如 Fig.1 所示。如 Fig.1(a)所示，场协同扭转元件有 10 个以 45°角倾斜的周向均匀排列的分流棱，形成 10 个扭转通道，扭转通道的底部由 2 个几乎垂直的 90°扭转曲面组成。Fig.1(b)为 4 种不同螺杆，包括常规单螺杆 A1，场协同扭转螺杆 B1，以及安装有机筒销钉的上述 2 种螺杆的改进结构，分别称为 A2 和 B2。

Fig.2 展示了流域的结构尺寸以及施加的流动和热边界条件。为消除出入口对模拟结果的影响，流域在螺杆出入口处均向外延伸了 2 mm。

1.2 数学模型

在本文中，采用的模拟流动介质为三元乙丙橡胶，针对其流动特性进行了如下假设。将熔体视作不可压缩的黏性非牛顿流体，流动状态为层流且为非等温瞬态；假定熔体完全充满流道，螺杆表面绝热，壁面无滑移，并且忽略重力的影响。参考先前的研究工作[13]，模拟过程中所使用的流体物性参数列于 Tab.1 中。

在以上假设的情况下，建立流场的控制方程，公式如下

连续性方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)+\frac{\partial p}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\eta\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{2}$$

能量守恒方程：

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u_i\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)=k\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}\varphi \tag{3}$$

本构方程采用 Bird-Carreau 模型和近似 Arrhenius 模型进行描述，其黏度/剪切速率曲线如 Fig.3 所示。

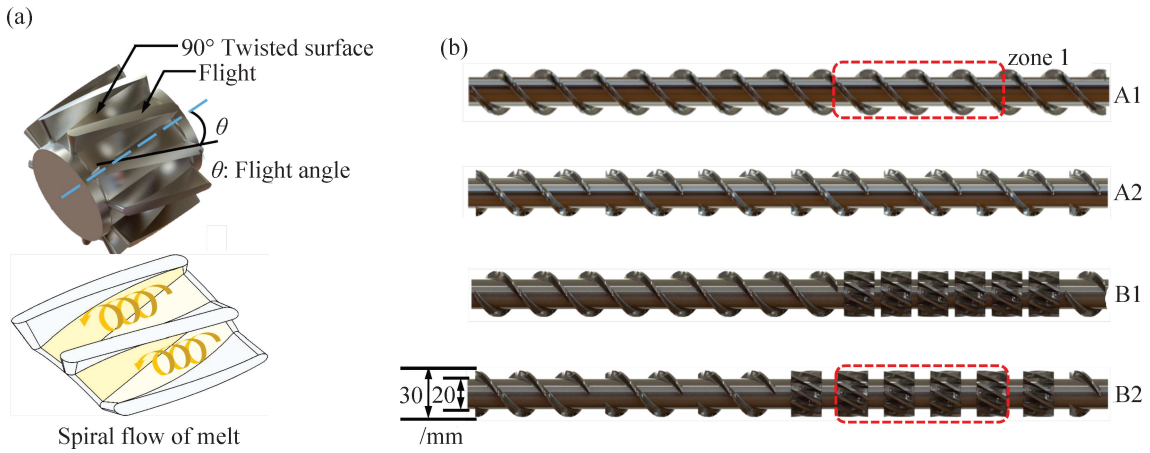


Fig. 1 Numerical simulation model: (a) proposed field synergy torsion element; (b) screw configuration

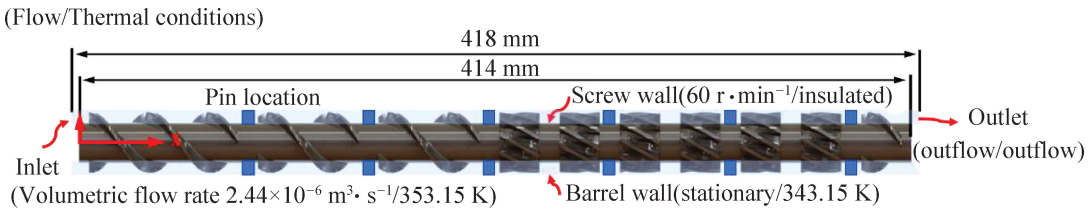


Fig. 2 Flow domain model and boundary condition

Tab. 1　Fluid properties parameters

Parameter	Symbol	Value
Density/(kg·m^{-3})	ρ	1150
Specific heat capacity/(J·kg^{-1}·K^{-1})	C_p	1600
Thermal conductivity(W·m^{-1}·K^{-1})	k	0.25
Viscosity at an infinite shear rate/(Pa·s)	η_∞	0
Zero shear viscosity/(Pa·s)	η_0	1.75×10^5
Natural time/s	λ	14
Non-newtonian index	n	0.408
Coefficient of temperature sensibility/K^{-1}	f	2.5×10^{-3}
Reference temperature/K	T_α	373.15

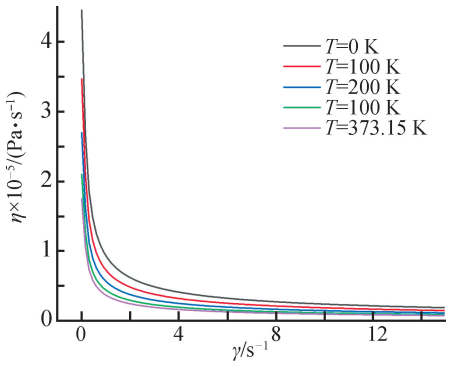


Fig. 3　Shear rate-dependent viscosity curve

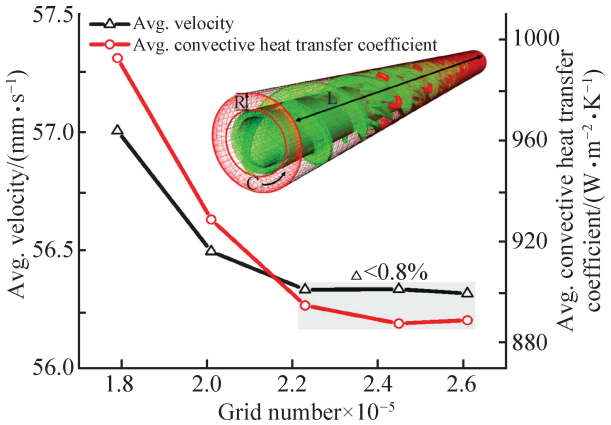


Fig. 4　Mesh independence validation of flow domain model

$$\eta=[\eta_\infty+(\eta_0-\eta_\infty)(1+\lambda^2\dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}}]\exp[-f(T-T_\alpha)] \tag{4}$$

1.3　网格无关性验证

为保证数值模拟结果的准确性,对流体域网格进行了独立性验证。Fig.4 为螺杆在转速 60 r/min 的情况下,其体平均速度、体平均温度随流体不同网格数量的变化情况。从径向(R)、周向(C)和轴向(L)3 个维度中进行了评估。由图可以看出,在网格数量大于 2.2×10^5 时,体平均速度及体平均温度随网格数量的增加变化率小于 1%。因此在之后的工作中,选择 20×70×160(R×C×L)的网格划分方式,总网格数量为 2.2292×10^5。

2　性能评价指标

(1)分离尺度:分离尺度反映了塑化过程中混合相浓度场的均匀程度,其值越小,粒子混合越均匀,混合性能越好。在 Polystat 中定义属性为 0,1 的浓度场后,分离尺度表达式为

$$\sigma=\int_0^{\zeta}R(r)\,\mathrm{d}r \tag{5}$$

式中:$R(r)$——2 个浓度场之间的相关程度。

(2)时均混合效率:时均混合效率表示粒子整体的混合情况,可衡量物料在拉伸作用下面积伸展的程度,公式为

$$\langle e_\eta\rangle=\frac{1}{t}\int_0^t e_\lambda\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

(3)协同角:在聚合物场协同塑化输运混炼理论中,速度矢量与速度梯度、温度梯度之间的夹角定义为“协同角”,该角度可用于评估螺杆的混合与传热性能。在 0°~90°的区间内,速度矢量与速度梯度之间的夹角(即混合协同角 α)越小,表明拉伸流动的

比重越大,反之,则剪切流动的比重越大;同样地,速度矢量与温度梯度之间的夹角(即传热协同角 β)越小,意味着传热能力越强。协同角的示意图如 Fig.5 所示。

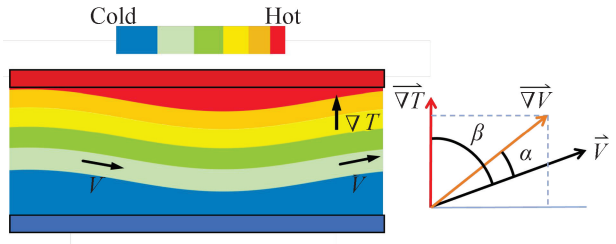


Fig. 5 Synergy angle schematic

(4)对流换热系数:对流换热是指流体与固体表面接触时,由于流体流动而发生的热量传递过程。对流换热系数是衡量熔体与机筒壁面传热强度的物理量,对流换热系数的数值越大,传热效率越高。对流换热系数计算公式为

$$h=q/(T_w-T_{qve}) \tag{7}$$

式中:T_w——机筒壁面温度,K;q——热流密度,W/m^2。

(5)平均温度及其标准差:螺杆结构的塑化均匀性是评价螺杆性能的重要指标,采用截面平均温度及其温度标准差来描述胶料的温度均匀性。

截面平均温度计算公式为

$$T_{avg}=\frac{\sum_{i=1}^{n}A_iT_i}{\sum_{i=1}^{n}A_i} \tag{8}$$

温度标准差计算公式为

$$\sigma_T=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}A_i(T_i-T_{avg})^2}{\sum_{i=1}^{n}A_i}} \tag{9}$$

式中:T_i——网格平均温度,K;A_i——网格面积,mm^2。

3 结果与讨论

3.1 流场分析

Fig.6 为 A1 和 B2 螺杆中区域 1 位置处的流场。从 Fig.6(a)中的速度流线轨迹可以看出,A1 螺槽中的熔体流动状态为稳定层流,而在 B2 中的场协同扭转元件处,熔体产生了明显的径向翻滚,形成了扭转螺旋流动。还可以观察到,熔体经过机筒销钉时被迫分流。上述现象表明,螺杆结构对聚合物挤出过程中的内部流场有相当大的影响。进一步观察 Fig.6(b)所示流场的径向切片发现,A1 螺槽中熔体流动为简单的剪切层流,速度梯度方向平行于螺槽的径向,熔体层与层之间几乎没有径向传热传质,这将导致混合和传热不足。在 B2 的流场切片中可以看出,场协同扭转元件产生的扭转螺旋流增强了熔体的径向对流,并导致流体的速度及其速度梯度方向产生径向偏移,从而产生拉伸流动,这将改善熔体中的径向传热和混合。此外,拉伸流动也发生在机筒销钉位置处,这归因于销钉对熔体的强制分流作用。

3.2 性能分析

螺杆结构引起的内部聚合物熔体流场的改变将直接影响螺杆的混合及传热性能。Fig.7 观察了一系列用以表征螺杆混合与传热性能的参数,如分离

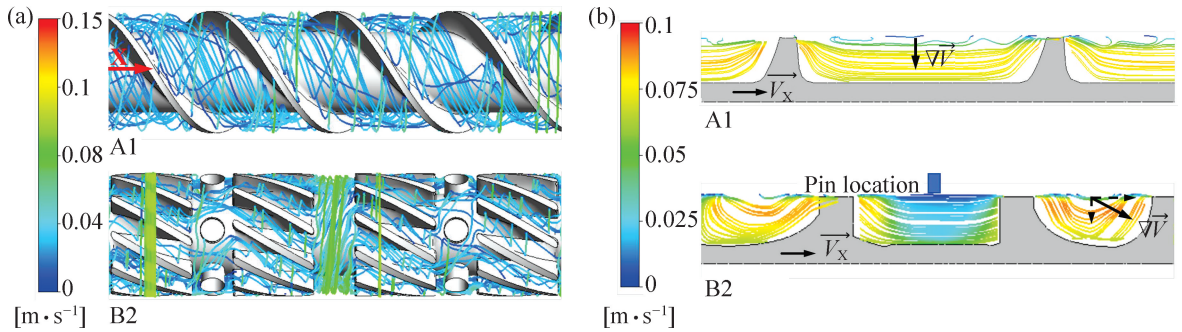


Fig. 6 Flow field analysis

(a):flow patterns; (b):streamline trajectory cloud map

尺度、混合效率、沿程温度及温度标准差等。

Fig.7(a)和 Fig.7(b)为 4 种不同螺杆的分离尺度随时间的变化曲线以及时均混合效率沿流动方向的变化曲线。从图中可以看出,稳定后的分离尺度数值从大到小为 A1>B1>A2≈B2,时均混合效率在场协同扭转元件处及机筒销钉处产生明显抬升。这表明场协同扭转元件及销钉的加入均可以降低分离尺度,提高混合效率,进而增强螺杆的混合能力。值得注意的是,B2 具有最佳的混合能力,这说明机筒销钉的加入可以进一步提高挤出机的混合性能。

Fig.7(c)为沿流动方向的平均温度分布。可以看出,A1 中的温度稳定在 353.7 K 左右,而在 B1 中,聚合物熔体在流经场协同扭转元件之后,沿程平均温度有所下降,低于 A1。这表明场协同扭转元件可以增强螺杆的传热能力,从而获得良好的冷却效果。此外,从添加了销钉的 A2 和 B2 的温度分布曲线可以看出,销钉位置处的温度波动显著增大,这可能会对熔体的局部热稳定性产生不利影响。因此,进一步观察了 4 种螺杆的温度标准差沿流动方向的变化曲线,如 Fig.7(d)所示。可以看出,不论是在 B1 还是 B2 中,场协同扭转元件处的温度标准差均较低,而 A2 和 B2 的销钉处的温度标准差均显著增大。上述现象进一步证明了 Fig.7(c)所得结论,表明场协同扭转元件的加入可以提高螺杆的传热能力,改善熔体的温度均匀性,而销钉的加入可能会对熔体的温度均匀性带来一定程度的不利影响。

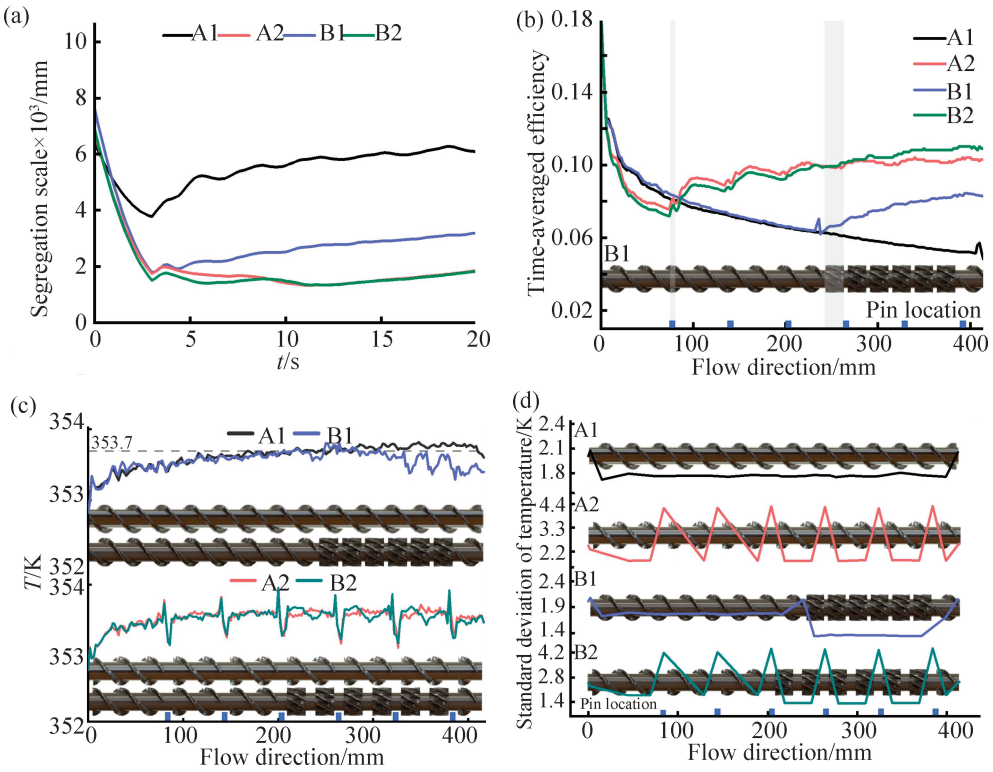


Fig. 7　Comparison chart of different screw performance

(a):segregation scale curves; (b):time-averaged efficiency curves; (c):temperature curves; (d):standard deviation of temperature curves

3.3　协同分析

Fig.8 为 4 种螺杆的混合协同分析结果。Fig.8(a)展示了混合协同角 α 沿流动方向的变化曲线。可以看出,A1 的协同角 α 数值稳定在 80°左右,其他 3 种螺杆的协同角 α 数值在场协同扭转元件处及销钉处均明显下降,这表明场协同扭转元件及销钉的加入均可以增加流场中的拉伸流动,提高拉伸流动比重,改善速度场与速度梯度场之间的协同性。计算 4 种螺杆的体平均协同角 α 数值发现,B2 的体平均协同角 α 数值最低,其次是 A2,B1 和 A1,表明 B2 具有最佳的混合性能,这与 Fig.7(a)和 Fig.7(b)所得结论一致。还观察了剪切速率、拉伸速率沿流动方

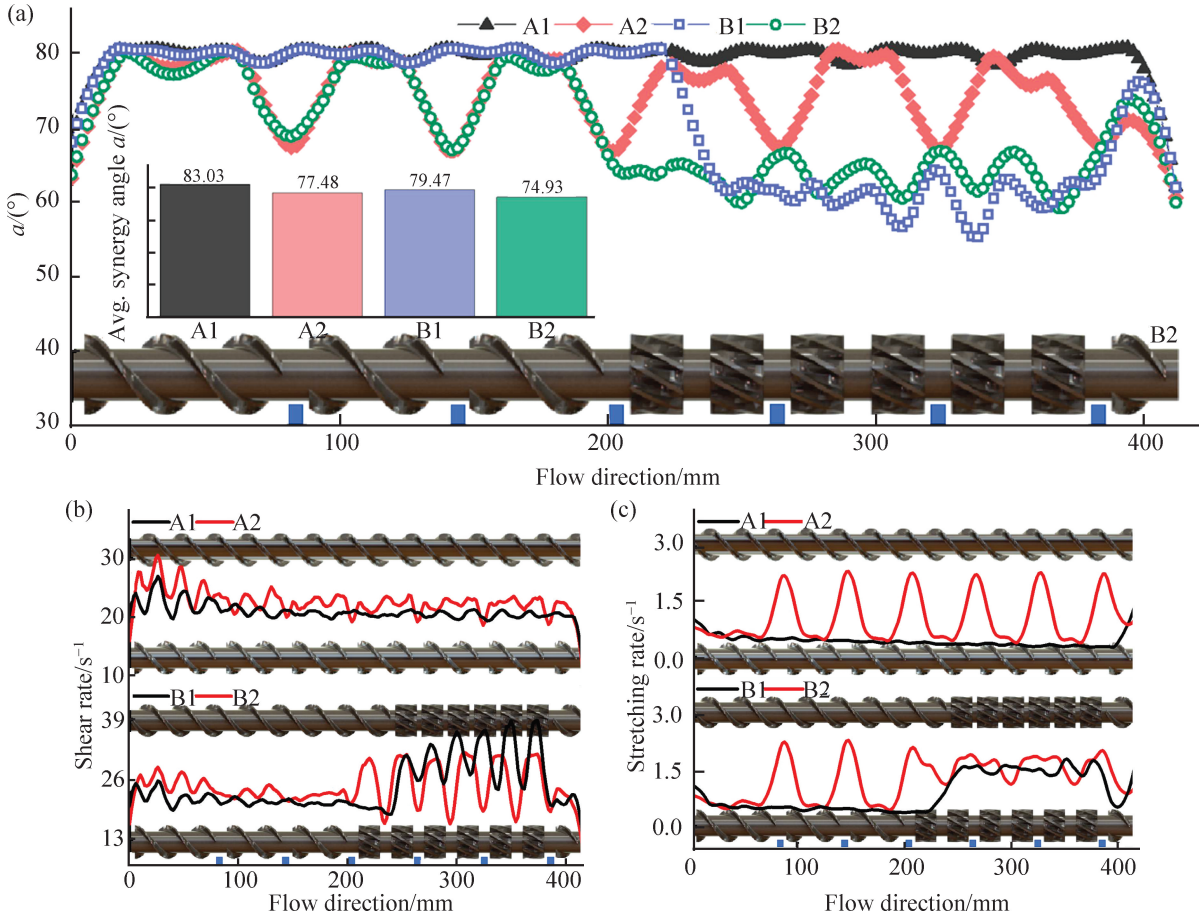


Fig. 8 Mixing synergy analysis

(a): synergy α along the flow direction; (b): shear rate curves; (c): stretching rate curves

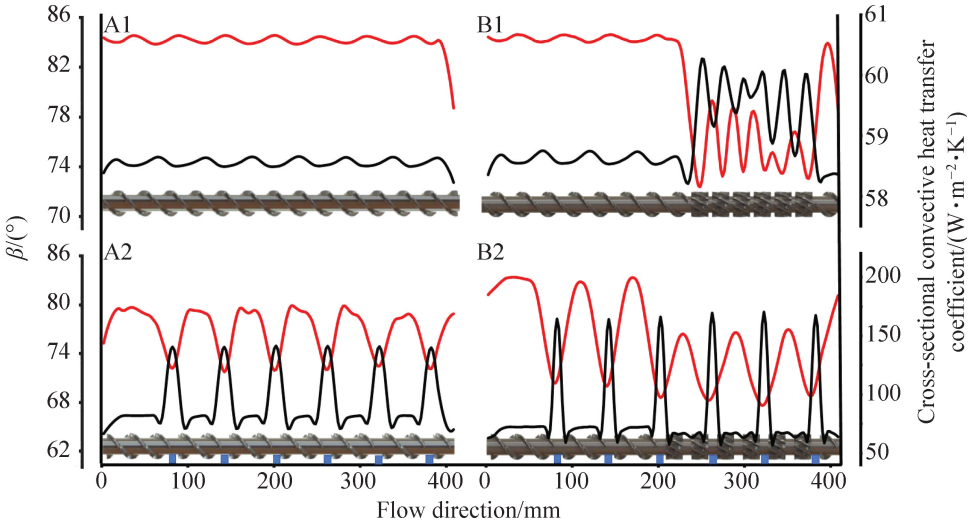


Fig. 9 Heat transfer synergy analysis

向的变化情况,结果分别如 Fig.8(b)和 Fig.8(c)所示。相比 A1,B1 和 B2 的剪切速率和拉伸速率在场协同扭转元件处均得到了较大提升,而 A2 和 B2 的剪切速率在销钉处减小,拉伸速率在销钉处增大。结合协同角 α 结果分析可知,这与聚合物场协同塑化输运混炼理论相一致,即协同角 α 越小,拉伸流动

比重越高。此外,值得一提的是,4 种螺杆的协同角 α 仍均大于 45°,说明在 4 种螺杆中,聚合物熔体流动仍以剪切流动为主。

Fig.9 为 4 种螺杆的传热协同分析结果。从图中可以看出,A1 的传热协同角 β 稳定在 84°左右,同时,其截面对流换热系数数值稳定在 58~59 W/(m^2·K)之间。反观其他 3 种螺杆,在场协同扭转元件和销钉处的协同角 β 减小,截面对流换热系数数值增大。这说明场协同扭转元件增强了螺杆的传热能力,并且添加销钉后,传热能力进一步增强。同时,协同角 β 和截面对流换热系数的变化趋势相反,这与聚合物场协同塑化输运混炼理论一致。

4　结论

(1)流场分析表明,与常规单螺杆中的剪切层流不同,场协同扭转元件处出现了扭转螺旋流动,销钉处出现了分流现象。扭转螺旋流动及分流均有助于增加流场中的拉伸流动,增强螺杆的混合与传热能力。

(2)与常规单螺杆相比,场协同扭转螺杆具有良好的混合与传热能力,其分离尺度更低,混合效率更高,温度均匀性更好。添加机筒销钉后,场协同扭转螺杆的混合和传热能力进一步提升。但值得注意的是,销钉的加入会对熔体的局部温度均匀性产生不利影响。

(3)协同分析表明,场协同扭转螺杆产生的扭转螺旋流动可以提高流场中的拉伸流动比重,改善速度场与速度梯度场、温度梯度场之间的协同作用,进而强化混合与传热性能,而添加销钉后,销钉的分流作用可以进一步促进速度场与速度梯度场、温度梯度场之间协同作用。

参考文献:

[1] Frankland J. Understanding melting ｜ in single-screw extruders[J]. Plastics Technology, 2022, 68: 34-35.

[2] Frankland J. Single vs. twin-screw extruders: why mixing is different[J]. Plastics Technology, 2023, 69: 14-15.

[3] 橡胶制品行业:“十三五”高端产品实现国产化[J]. 中国橡胶, 2022, 38(2): 13-16.
Rubber products industry: high-end products achieve domestic production during the 13th Five-Year Plan[J]. China Rubber, 2022, 38(2): 13-16.

[4] 班董董, 王丹华, 李亚楠, 等. 偏心距对波状单螺杆元件混合性能的影响[J]. 塑料, 2023, 52(2): 145-150.
Ban D D, Wang D H, Li Y N, *et al*. Influence of eccentricity on mixing performance of wavy single-screw element[J]. Plastics, 2023, 52(2): 145-150.

[5] Rauwendaal C. New screw design for cooling extruders[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2004, 33: 397-399.

[6] Emil S. Studies in the effectiveness of a new generation extruder. Part Ⅱ. the shape of the inner surface of the barrel rotating sleeve[J]. Polimery, 2012, 57: 296-302.

[7] Chen J N, Dai P, Yao H, *et al*. Numerical analysis of mixing performance of mixing section in pin-barrel single-screw extruder[J]. Journal of Polymer Engineering, 2011, 31: 53-62.

[8] Jian R R, Pan W, Huang S Z, *et al*. Enhancing dynamic mixing and heat transfer of polymer by inducing ductile flow applying field synergy principle[J]. Physics of Fluids, 2024, 36: 063103.

[9] 鉴冉冉, 谢鹏程, 丁玉梅, 等. 场协同理论在聚合物加工中的应用[J]. 塑料, 2019, 48(3): 8-11.
Jian R R, Xie P C, Ding Y M, *et al*. Application of field synergy principle in polymer processing[J]. Plastics, 2019, 48(3): 8-11.

[10] Jian R R, Dai R, Sain M, *et al*. A strategy of stretching melt to a thin layer: self-controlled "stretching melt-pancakes" to enhance heat transfer and mixing during polymer extrusion[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224: 120090.

[11] 潘威, 黄士争, 朱家威, 等. 场协同扭转螺杆对胶料挤出性能的影响规律[J]. 合成橡胶工业, 2024, 47(5): 403-407.
Pan W, Huang S Z, Zhu J W, *et al*. The influence pattern of field synergy torsion screws on rubber extrusion performance[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2024, 47(5): 403-407.

[12] 代瑞, 潘威, 黄士争, 等. 场协同扭转螺杆热输运性能的研究[J]. 中国塑料, 2024, 38(3): 109-115.
Dai R, Pan W, Huang S Z, *et al*. Study on thermal transport performance of field-coordinated torsion screw[J]. China Plastics, 2024, 38(3): 109-115.

[13] 潘威, 黄士争, 朱家威, 等. 场协同扭转螺杆强化混合与传热的作用机制[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(10): 89-96.
Pan W, Huang S Z, Zhu J W, *et al*. Mechanism of field synergy torsion screw enhancement for mixing and heat transfer[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(10): 89-96.

Numerical Modeling and Simulation of the Field Synergy Torsion Extrusion Process of the Pin-Barrel Type

Hongcan Dong[1], Tianyu Huang[2], Wei Pan[2], Xinpei Jiang[2], Ranran Jian[2,3]

(*1. School of Continuing Education, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266045, China;*
2. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;
3. Postdoctoral Workstation, Yiyang Rubber & Plastics Machinery Group Co., Ltd, Yiyang 413064, China)

ABSTRACT: To reveal the underlying mechanism of the field synergy torsion screw in enhancing mixing and heat transfer performance, and to analyze the influence of pin-barrel on its performance, this study employed ANSYS Polyflow software to conduct numerical modeling and simulations of the field synergy torsion screw both before and after the addition of pin-barrels, with comparisons made against conventional single screws. Through flow field analysis, performance analysis, and synergy analysis, the mechanism by which the field synergy torsion screw enhances mixing and heat transfer was systematically investigated, and the impact of pin-barrels on its performance was further examined. The research results indicate that the field synergy torsion element in the field synergy torsion screw can force polymer melt to form a torsion-spiral flow, improve the synergistic effect between rubber material velocity field, velocity gradient field, and temperature gradient field, increase the stretching flow in the flow field, and enhance the convective heat transfer capability. After adding pin-barrel, the synergistic effect is further improved due to the diversion effect of the pin, and the mixing and heat transfer performance is further enhanced. However, the local temperature uniformity near the pin will be adversely affected.

Keywords: field synergy torsion screw; pin-barrel; numerical simulation; field synergy principle