http://pmse.scu.edu.cn

场协同扭转螺杆强化混合与传热的作用机制

潘 威[1]，黄士争[1]，朱家威[1]，Mohini Sain[2]，杨卫民[3]，曾宪奎[1]，何 燕[1]，鉴冉冉[1,2,4]

(1.青岛科技大学 机电工程学院，山东 青岛 266061；2. 多伦多大学 机械与工业工程系 生物复合材料及生物质材料加工中心，安大略省 多伦多 M5S 3B3，加拿大；3. 北京化工大学 机电工程学院，北京 100029；4. 大连橡胶塑料机械有限公司，辽宁 大连 116036)

摘要：螺杆构型对胶料的挤出塑化质量有着至关重要的影响。文中使用ANSYS Polyflow仿真软件，对不同构型的5种场协同扭转螺杆进行了非等温瞬态流动模拟研究，分析了不同构型螺杆的混合性能，传热性能及塑化均匀性等，并与普通双头螺纹螺杆进行了对比。结果表明，相比于普通螺纹螺杆，5种场协同扭转螺杆的综合性能均有所提升，其中螺杆F的混合性能最佳，螺杆B的传热性能最佳。场协同扭转元件诱导产生的螺旋流动可以增加流场中的拉伸流动和拉伸形变，改善胶料速度场、速度梯度场与温度梯度场之间的协同性，增强传热传质，提高胶料挤出质量，符合场协同原理。

关键词：场协同扭转螺杆；螺杆构型；强化传热传质；场协同原理

中图分类号：TQ330.4+6 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2024)10-0089-08

现代制造业的快速发展对橡胶制品的成型质量和效率提出了更高的要求[1, 2]。但传统单螺杆挤出机存在着较为严重的结构限制，传统单螺杆挤出机中的高剪切作用主要集中在螺棱顶部(机筒内壁)处，螺杆根部剪切作用极小，导致胶料温度与黏度在径向上存在较大差异，同时由于胶料黏度极高，且螺杆旋转使螺杆根部的轴向输送速度远大于机筒内壁处，致使速度在径向上出现明显剪切分层[3, 4]。因此，传统单螺杆挤出机中的胶料在流动时倾向于保持相对相同的径向位置，即径向上表现为明显的剪切层流流动，导致胶料在塑化过程中传热传质不足、动态生热和能量损耗严重，产生各种制品缺陷，其粗放式的加工模式也严重限制了“双碳”战略目标在橡塑行业领域的突破，橡胶加工过程中的温度和热均匀性管理问题始终是该领域急需解决和突破的难题。因此，为解决传统单螺杆挤出机混炼与传热能力不足的问题，国内外学者研究开发了许多新的螺杆元件，如CRD螺杆、齿形元件、S形元件、六棱柱元件等，并对各新型螺杆的性能和应用进行了探索[5~8]。

针对这一关键问题，笔者所在团队提出了聚合物场协同塑化输运混炼理论，揭示了非牛顿黏弹性流体在塑化过程中热质传递强化机理及其在复杂流道内的流变规律，并基于聚合物加工流变学和流体力学分析，对该理论的核心思想进行了详细阐述。该理论分为混合协同和传热协同。混合协同分析了速度场和速度梯度场的协同性与剪切流、拉伸流的关系，用于指导混合性能的优化；传热协同分析了速度场和温度梯度场的协同性与对流传热的关系，用于指导传热性能的强化。基于此理论发明了一种新型螺纹元件——场协同扭转元件[9, 10]。该元件产生的螺旋流动可以增加流场中的拉伸流动和拉伸形变，能有效改善速度场、速度梯度场与温度梯度场之间的协同作用，加强胶料内部的换热和混合，提高胶料塑化质量。

在之前研究的基础上，本文对场协同扭转元件在螺杆中的排布作了不同规划，设计出了5种场协

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0199
收稿日期：2023-10-31
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的研究，E-mail：jianrr@qust.edu.cn

同扭转螺杆，运用ANSYS Polyflow软件对其流场及混合性能进行了数值模拟分析，并与普通双头螺纹螺杆进行对比，解析其强化传热传质的作用方式及机理。

1 理论模型

1.1 物理模型

模拟所用的物理模型如Fig.1所示。其中，Fig.1(a)为场协同扭转元件。Fig.1(b)展示了6种螺杆结构。普通双头螺纹螺杆A用作对照组，根据扭转元件的排布不同，场协同扭转螺杆分别命名为螺杆B，C，D，E和F。Fig.1(c)为螺杆F及流域结构。螺杆及流域的结构尺寸参数如Tab.1所示。

Tab. 1 Geometric parameters of the physical model

Parameter	Symbol	Value/mm
Barrel length	L_1	418
Screw length	L_2	414
Screw diameter	D	30
Screw root diameter	d	20
Screw pitch	s	30
Field synergy torsion element	l	24
Channel depth	h	5

1.2 数学模型和边界条件

本文模拟选用三元乙丙橡胶为流动介质，假设熔体为不可压缩黏性非牛顿流体，充满整个流道，流动为层流非等温瞬态流动，螺杆表面绝热，壁面无滑

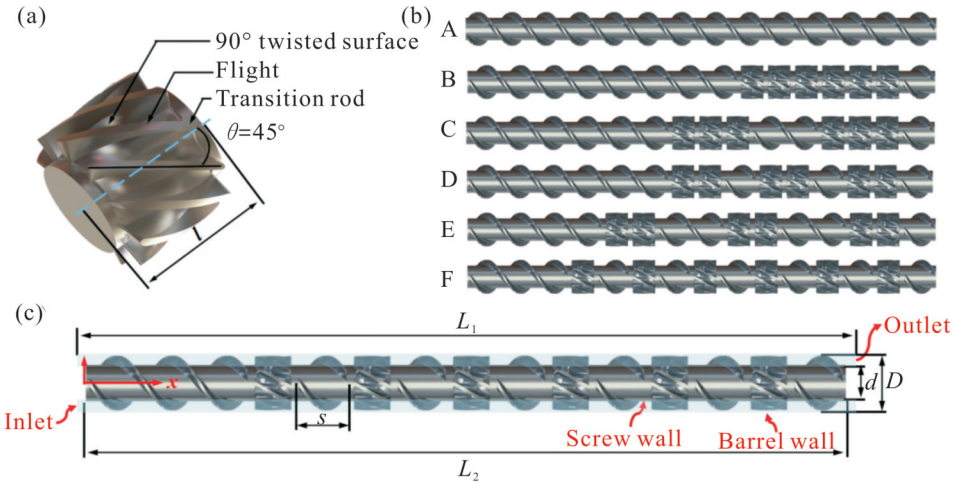


Fig. 1 Numerical simulation model

(a): proposed field synergy torsion element; (b): screw configuration; (c)：modeled screw

Tab. 2 Fluid properties parameters

Parameter	Symbol	Value
Density	ρ	1150 kg·m^{-3}
Specific heat capacity	C_p	1600 J·kg^{-1}·K^{-1}
Thermal conductivity	k	0.25 W·m^{-1}·K^{-1}
Viscosity at an infinite shear rate	η_∞	0 Pa·s
Zero shear viscosity	η_0	175000 Pa·s
Natural time	λ	14 s
Non-Newtonian index	n	0.408
Coefficient of temperature sensibility	α	0.0025 K^{-1}
Reference temperature	T_α	373.15 K

Tab. 3 Boundary conditions

Boundary	Flow conditions	Thermal conditions
Inlet	Fully developed, volumetric flow rate 2.44x10^{-6} m^3·s^{-1}	353.15 K(80 ℃)
Outlet	Flow outflow	Heat outflow
Barrel wall	Stationary, no-slip wall	343.15 K(70 ℃)
Screw wall	Screw speed 60 r·min^{-1}	Insulated boundary

移,忽略重力影响。流体物性参数如Tab.2所示。

根据以上假设,流场的控制方程如式(1)~式(3)

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:

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

采用Bird-Carreau模型和近似Arrhenius模型对本构方程进行描述[11]

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

本文利用ANSYS Polyflow 20.0进行三维非等温瞬态数值模拟,采用网格重叠技术生成整体有限元网格,并通过Gambit对流域进行网格划分。Tab.3列出了流动边界条件和热边界条件。

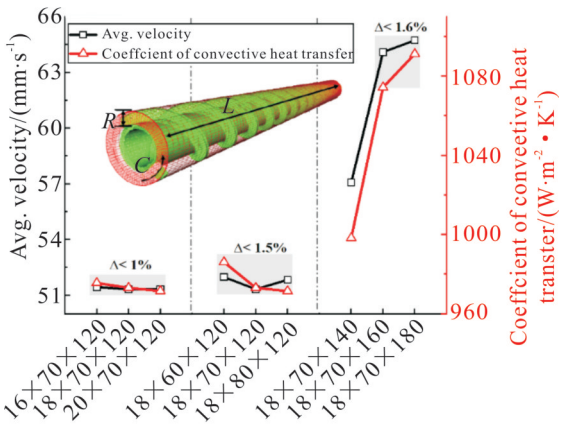


Fig. 2 Mesh independence validation of fluid model

1.3 网格无关性验证

Fig.2展示了螺杆在转速60 r/min条件下,体平均速度和体平均对流换热系数随不同网格数量变化的情况,评估了径向(R)、周向(C)、轴向(L)不同维度上的影响。在兼顾计算效率与精度的前提下,选择18×70×160的网格层数来进行数值模拟,总网格数量为201600。

2 结果与讨论

2.1 螺杆性能分析

为研究螺杆构型对胶料挤出质量的影响,分析比较了上述6种螺杆的性能,包括混合性能、传热性能及塑化均匀性等,如Fig.3所示[12~14]。

Fig.3(a)为6种螺杆的分离尺度变化曲线。可以看出,在5 s之后,螺杆A的分离尺度数值已明显大于场协同扭转螺杆。稳定之后的场协同扭转螺杆的分离尺度从大到小依次为螺杆B,C,D,E和F。结果表明,扭转元件可以通过促进粒子扩散来增强混合,螺杆F中的扭转元件分散程度最高,粒子浓度可以得到有效扩散,故其表现出最优的混合性能。为进一步探究螺杆构型对混合性能的影响,分析对比了6种螺杆的时均混合效率,如Fig.3(b)所示。可以看出,在沿螺杆A的轴向上,时均混合效率数值逐渐降低。而在沿5种场协同扭转螺杆的轴向上,扭转元件处的时均混合效率数值均出现明显抬升。这说明扭转元件可以提高时均混合效率,同时,由于螺杆F的抬升位置最靠前,混合性能最优,与Fig.3(a)结论一致。此外,考虑到流体流动形式对混合性能的影响,研究了6种螺杆的混合指数分布,如Fig.3(c)所示。

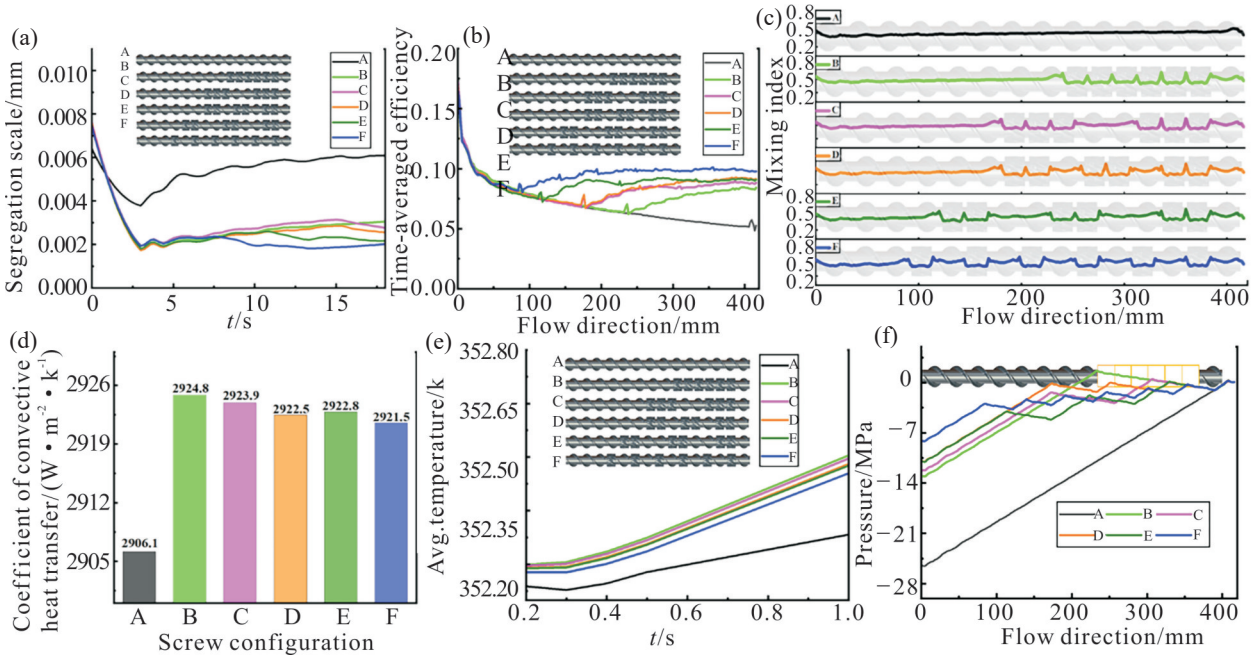


Fig. 3 Performance analysis of different screw configurations

(a): segregation scale curves; (b): time-averaged efficiency curves; (c): mixing index curves; (d): coefficient of convective heat transfer; (e): avg. temperature curves; (f): pressure curves

可以看出，螺杆A的混合指数数值基本固定在0.5，表明其仅产生简单剪切流动，而场协同扭转螺杆的混合指数在扭转元件处产生明显的下降，说明胶料在扭转元件处产生了螺旋流动，Fig.5所示的流型分析结果也进一步证实了这一点。

为对比6种螺杆的传热性能，研究了它们的对流换热系数，如Fig.3(d)所示。可以看出，螺杆A的对流换热系数远低于场协同扭转螺杆，对流换热系数从大到小依次为螺杆B，C，E，D，F和A。结果表明，扭转元件排列越集中，场协同扭转螺杆的传热性能越好。同时，为分析6种螺杆内部胶料的熔融塑化效率，研究了其内部胶料的体平均温度变化，如Fig.3(e)所示。可以看出，相比于螺杆A，场协同扭转螺杆的升温速率均有所提升，螺杆B升温最快。说明场协同扭转螺杆结构能使胶料更快达到熔融所需温度，促进胶料的熔融塑化，塑化效果好。此外，为探究场协同扭转元件对挤出过程中熔体压力的影响，对比分析了6种螺杆内部胶料沿螺杆的轴向压力，如Fig.3(f)所示。可以看出，与螺杆A不同，场协同扭转螺杆的沿程压力在扭转元件前会产生局部升高，扭转元件前后压差在1.6 MPa左右，这可能是由于场协同扭转元件结构较为复杂，导致此处产生了一定的流动阻力。图中还表明，整根螺杆前后压差在7 MPa以上，螺杆A甚至达到了25 MPa，这是橡胶材料极大的黏度造成的。

为研究场协同扭转元件在提高胶料塑化均匀性方面的作用，以螺杆F为例，对比分析了其不同截面位置处的温度分布与黏度变化云图，如Fig.4所示。可以看出，最小截面平均温差为12.1 ℃，均出现在场协同扭转元件处。普通螺纹处的截面平均温差较高，其中未经过扭转元件的截面a温差最高，为13.1 ℃，比扭转元件处高8.26%，经过扭转元件后，普通螺纹处的温差下降至12.3~12.7 ℃。同时，从图中也可以看出，扭转元件处的黏度分布比普通螺纹处更加均匀。这表明扭转元件能有效改善温度和黏度分布，提高挤出质量。

2.2 流场分析

为近一步解释场协同扭转螺杆强化混合与传热的方式，以螺杆C为例，分析对比了其内部普通螺纹元件(DT)处与场协同扭转元件(FST)处的流场，其内部的胶料流动形式及流线轨迹云图如Fig.5所示。可以看出，不同于普通螺纹元件处的流动形式，场协同扭转元件处产生了明显的螺旋式流动，这一现象很好地印证了Fig.3(c)的结论。此外，通过观察普通

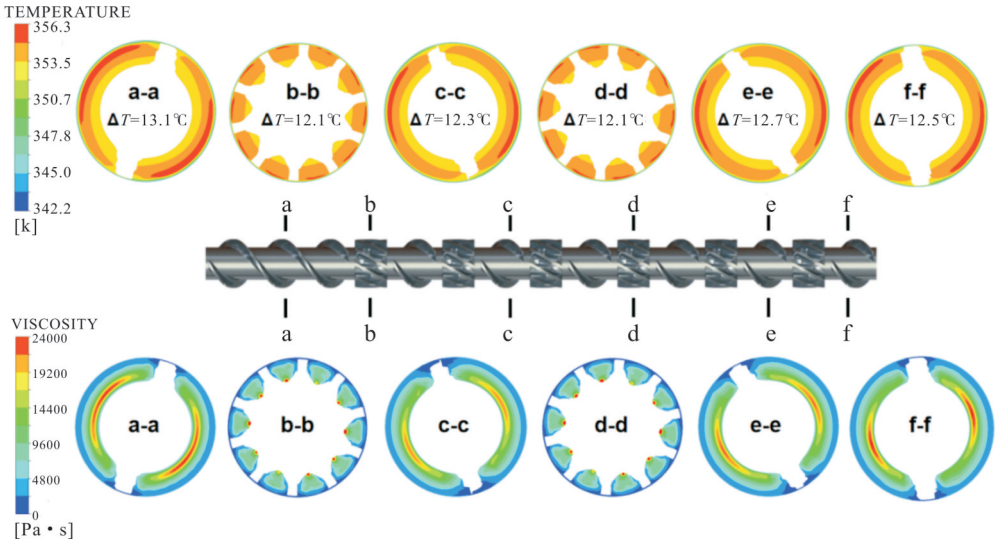


Fig. 4 Temperature and viscosity contour map at different cross-sections of field synergy torsion screw F

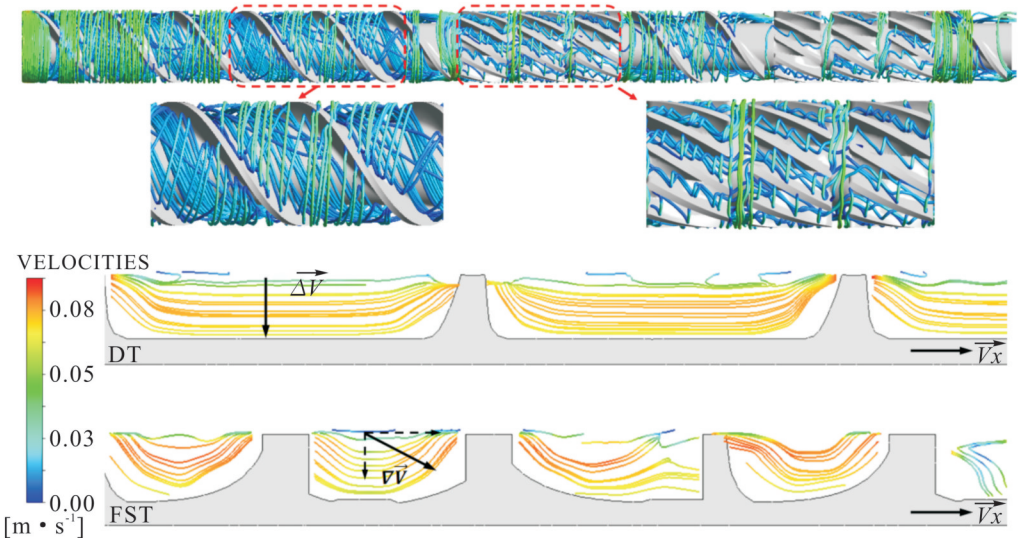


Fig. 5 Flow patterns and streamline trajectory contour map of material inside the field synergy torsion screw C

螺纹元件和场协同扭转元件处的流线轨迹云图也可看出,胶料在普通螺纹元件处只是简单的层流,且各层速度大小几乎无变化,速度梯度方向几乎与螺槽径向平行,而在场协同扭转元件处速度大小及方向都产生了较为明显的变化。

分析可知,造成上述现象的原因是普通螺纹元件存在着较为严重的结构限制,内部胶料在流动时出现明显的径向剪切分层,将其沿螺槽方向平面展开,可抽象为两平行平板间的流动,其引起的简单剪切层流流动无法使胶料在塑化过程中实现较好的混合与换热。相比较而言,场协同扭转元件产生的螺旋流动可以引起元件内部胶料的翻滚,特别是沿着螺槽径向,这增强了胶料的径向传热传质,使得胶料在塑化过程中的混合效果大大提高,传热能力也大幅增强。

2.3　协同机理分析

为探究场协同扭转螺杆提高挤出胶料质量的作用机理,以螺杆A,B和F为例,对其进行了场协同分析。利用CFD-POST后处理软件,定义速度矢量与轴向速度梯度、温度梯度之间的夹角为“协同角”,该角度可作为评估螺杆混合与传热性能的指标。在0°~90°范围内,速度矢量与速度梯度之间的协同角α越小,表明拉伸流动比重越高,反之,协同角α增大则表示剪切流动比重增大;同样地,速度矢量与温度梯

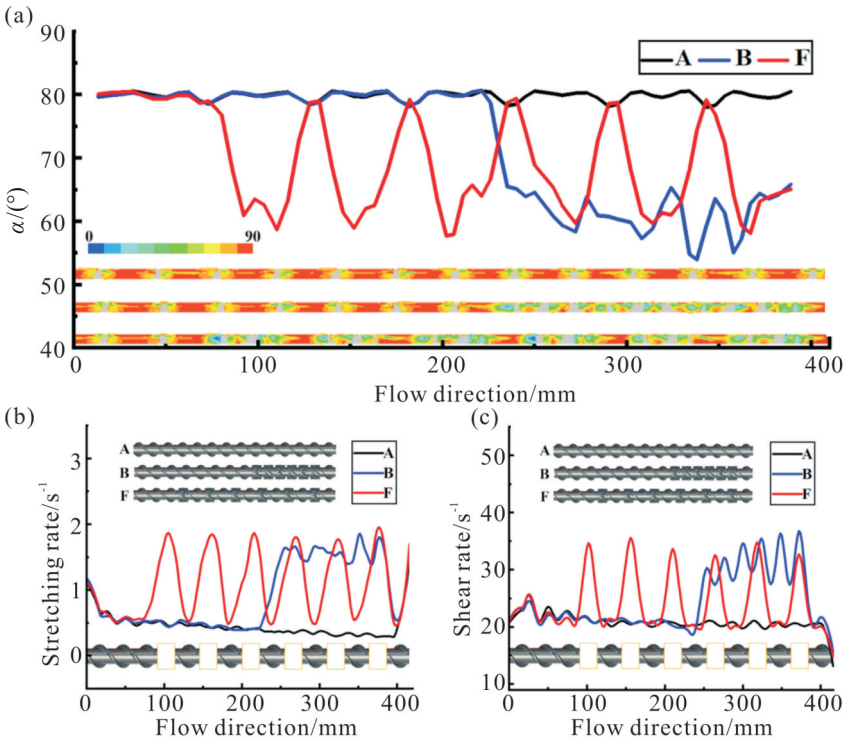


Fig. 6 Mixing synergy analysis

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

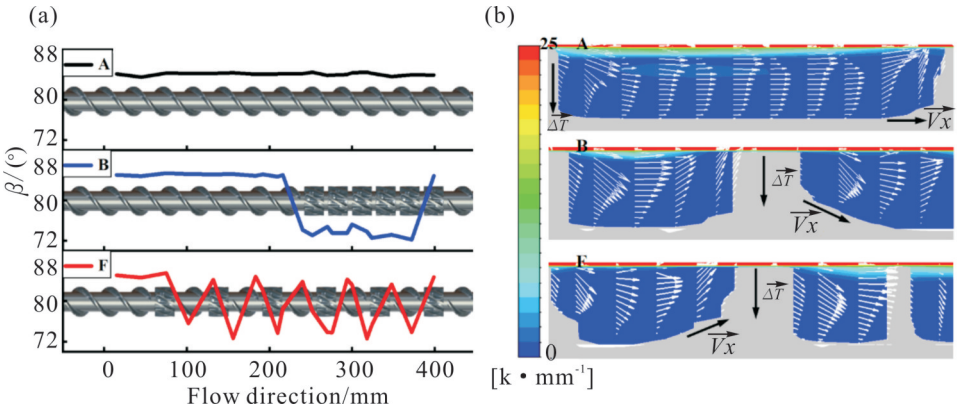


Fig. 7 Heat transfer synergy analysis

(a): synergy β along the flow direction; (b): temperature gradient contours and axial velocity vector with the screw channels for screws

度之间的协同角β越小，表明传热效率越高。

Fig.6(a)为3种不同构型螺杆的协同角α分布。可以看出，在扭转元件处，螺杆B和F的协同角α数值出现了较大的下降，仅为60°左右，相比于螺杆A的下降了约25%。为进一步分析混合协同机理，对比了3种不同构型螺杆沿轴向的流变特性，如Fig.6(b)和Fig.6(c)所示。可以看出，螺杆A的拉伸速率和剪切速率数值均无明显变化，且较低，而2种场协同扭转螺杆的剪切速率和拉伸速率在扭转元件处均出现了较大的升高。此外，在Fig.5的流线轨迹云图中可见，扭转元件处出现了明显的拉伸流动。上述结果表明，扭转元件的复杂结构可以很好地改善速度场与速度梯度场之间的协同性，增加流场中的拉伸流动和拉伸形变，使混合能力明显提高。

Fig.7(a)和Fig.7 (b)分别为3种不同构型螺杆的协同角β分布和温度梯度云图与轴向速度矢量。可以看出，速度矢量与温度梯度的协同角β大小在3种螺杆中表现出的规律与Fig.6(a)一样，即协同角β在扭转元件处明显减小，仅为72°左右，减小了约16%。这说明扭转元件能有效改善速度场与温度梯

度场的协同性,增强传热能力,这与Fig.4截面温度云图结论一致。同时,在轴向速度矢量与温度梯度云图中可以看出,相比于普通双头螺纹螺杆,场协同扭转螺杆的轴向速度矢量在扭转元件处发生了明显的径向偏转,导致其与温度梯度的夹角减小,螺杆传热能力提高。

3 结论

(1)混合及传热评估指标发现,螺杆F的混合性能最佳,螺杆B的传热性能最佳。相比于普通双头螺纹螺杆,场协同扭转螺杆综合性能均有所提升。

(2)根据流场分析对比可知,扭转元件可以诱导产生螺旋流动,增强径向传热传质,增加流场中的拉伸流动和拉伸形变,提高塑化质量。

(3)相比于螺纹元件,扭转元件处的协同角α和协同角β均出现了明显的减小,说明扭转元件可以改善速度场与速度梯度场、温度梯度场之间的协同性,增强螺杆的传热传质,其作用机理可用场协同原理进行解释。这为解决挤出塑化过程中的传热传质不足问题提供了一个新的理论视角,对提高螺杆塑化系统的塑化质量与能源效率具有重要意义。

参考文献:

[1] 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.

[2] 杨莉. 橡胶制品:发展呈现稳中向好态势 [J]. 中国橡胶, 2018, 34(5): 24-27.

[3] Single F J. Twin- screw extruders: why mixing is different[J]. Plastics Technology, 2023, 69: 14-15.

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

[5] Koichi K, Yasuya N, Toshihisa K. Distributive mixing characteristics of a Dulmage- type screw for a single- screw extruder: experimental and numerical evaluation[J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2021, 7: 100137.

[6] Xiu Q M, Wen B Z, Min L. Influence of novel screw elements on the reactive extrusion of low density polyethylene grafted with maleic anhydride in co- rotating twin screw extruder [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2065: 030050.

[7] 胡雪华, 刘彦昌, 潘弋人. 冷喂料橡胶挤出机喂料过程动力学[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(3): 112-117.
Hu X H, Liu Y C, Pan Y R. Dynamics in feeding process of cold feed rubber extruder[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(3): 112-117.

[8] 喻慧文, 徐百平, 吴宏武, 等. 差速双螺杆非充满输送粘弹流体的可视化[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(8): 79-87.
Yu H W, Xu B P, Wu H W, *et al*. Visualization of flow patterns of partially filled viscoelastic fluid in a non-twin screw extruder[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(8): 79-87.

[9] Jian R R, Yang W M, Xie P C, *et al*. Enhancing a multi-field-synergy process for polymer composite plasticization: a novel design concept for screw to facilitate phase-to-phase thermal and molecular mobility[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164: 114448.

[10] Jian R R, Dai R, Mohini S, *et al*. Ductile behavior and heat transfer efficiency in polymer extrusion by self- controlled “flipping melt- pancakes” with multi- fields synergy[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 186: 122517.

[11] Dhakal P, Das S R, Poudyal H, *et al*. Numerical simulations of partially-filled rubber mixing in a 2-wing rotor-equipped chamber [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134: 44250.

[12] Jian R R, Dai R, Mohini S, *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.

[13] 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.

[14] 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.

Mechanism of Field Synergy Torsion Screw Enhancement for Mixing and Heat Transfer

Wei Pan[1], Shizheng Huang[1], Jiawei Zhu[1], Mohini Sain[2], Weimin Yang[3], Xiankui Zeng[1], Yan He[1], Ranran Jian[1, 2, 4]

(*1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Centre for Biocomposites and Biomaterial Processing, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto, ON M5S 3B3, Canada; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 4. Dalian Rubber & Plastics Machinery Co., Ltd, Dalian 116036, China*)

ABSTRACT: The screw configuration is an important factor directly affecting the plasticizing quality of rubber extrusion. Through ANSYS Polyflow software, the non-isothermal transient flow simulations were conducted on five different field synergy torsion screw configurations with varying arrangements of twisted elements. A comparison was made with a conventional double-threaded screw, and the analysis focused on the impact of different screw configurations on extrusion performance factors such as rubber material mixing, heat transfer, and plasticization uniformity. The results indicate that all five field synergy torsion screw configurations outperform the conventional threaded screw in terms of overall performance. Among them, screw F exhibits the best mixing performance, while screw B shows the best heat transfer performance. The helical flow caused by the twisted elements in the field synergy torsion screw can enhance the synergistic interaction between the velocity field, velocity gradient field, and temperature gradient field of rubber material, which increases stretching flow and deformation in the flow field, enhances radial heat and mass transfer, thereby improving the plasticizing quality of rubber material. This process aligns with the principle of field synergy.

Keywords: field synergy torsion screw; screw configuration; enhanced heat and mass transfer; field synergy principle