高分子材料科学与工程
POLYMER MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING

http://pmse.scu.edu.cn

同向双螺杆场协同扭转元件强化混合与传热的作用机制

张　鹏[1]，王泽欣[1]，宋启鑫[1]，王世龙[1]，魏兴岳[1]，王世檩[1]，曾宪奎[1]，鉴冉冉[1,2,3]

（1. 青岛科技大学 智能制造学院，山东 青岛 266061; 2. 北京化工大学 英蓝实验室，北京 100029；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：基于聚合物场协同塑化输运混炼理论，设计开发了新型同向双螺杆场协同扭转元件，旨在解决同向双螺杆挤出过程中传热效率低、温度分布不均以及热敏性材料易局部降解等技术难题，通过优化螺杆结构提升物料的塑化质量与混合均匀性。并采用流体力学模拟软件 ANSYS Polyflow 对扭转元件、普通螺纹元件和啮合块元件进行了数值模拟，对比分析了三者之间的传热性能、混合性能以及协同作用。结果表明，扭转元件的传热、混合性能要优于其余 2 种元件，这得益于其速度场与温度场之间协同作用的改善。扭转元件通过引入 90°扭转曲面，改变了速度场的方向，使物料沿着扭转曲面发生径向流动，促进了速度场与温度梯度场、速度梯度场的协同相互作用，强化了热质传递输运过程，其独特的结构实现了局部热量和颗粒的有效混合，使混炼塑化效果得到增强，提高了物料的塑化质量。

关键词：场协同；强化传热；扭转元件；数值模拟

啮合同向双螺杆挤出机在聚合物改性、造粒、填充纤维增强和反应挤出等诸多领域有着极为广泛的应用[1]，尤其是在造粒母料的生产中扮演者至关重要的角色。然而，在造粒过程中，常常会面临挤出设备摩擦生热多、传热效率低以及材料导热性能差等一系列技术瓶颈[2-6]。这些问题的存在，使得母料在塑化过程中出现物理温度分布不均匀[7]，进而引发了材料大分子链断裂[8,9]、局部过热降解[10,11]以及制品母粒缺陷率高等诸多不良后果。随着现代制造业的飞速发展，对于高分子造粒母料的性能要求也在不断提高，仅靠工艺参数的优化已难以满足高性能、高品质造粒母料的生产需求。因此，国内外众多学者纷纷将研究焦点转向了螺杆结构的创新。

Werner & Pfleiderer[12]公司开发的直齿齿形盘（TME）和斜齿齿形盘（ZME）元件通过多次分流合并的设计，显著提升了物料的分布混合能力。在此基础上，耿孝正等[13]设计研制了S型元件，其独特的楔形区结构有效防止了局部物料因高剪切而发生降解，通过诱导拉伸流动进一步增强了分布混合效果。近年来，随着加工需求的日益复杂化，六棱柱元件、波状螺杆元件等新型元件相继问世[14]，推动着混合技术不断发展。然而，现有研究主要聚焦于混合能力的提升，对温度均匀性这一关键问题却鲜有突破，这严重制约了热敏性材料的加工与应用。特别是在高精度、高性能制品的制备过程中，塑化温度分布的均匀性已成为影响制品质量的决定性因素[15]。因此，深入研究挤出过程中温度场的分布规律，优化塑化质量，对于提升热敏性材料制品的性能具有重要的理论意义和实用价值。

针对这一关键难题，笔者所在团队通过对挤出螺杆中流动与热输运过程进行理论分析，提出了

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0104
收稿日期：2025-07-17
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52206095）
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

聚合物场协同塑化输运混炼理论，并依据该理论设计了一种新型场协同扭转元件[16, 17]，在单螺杆挤出成型中取得了良好效果。该元件通过引入 90°扭转曲面，改变了速度场的方向，使物料沿着扭转曲面发生径向流动，增加了流场中的拉伸流动和拉伸形变，有效改善了速度场、速度梯度场与温度梯度场之间的协同作用[18]，从而实现了强化传热和高效混炼的双重效果。

本文针对同向双螺杆结构特点，对场协同扭转元件进行了优化设计，以期适用于同向双螺杆挤出机并改善双螺杆挤出过程中的混合与温度均匀性。通过 ANSYS Polyflow 软件，对同向双螺杆场协同扭转元件传热、混合性能及其协同性进行了系统分析，并与普通螺纹元件和啮合块元件对比。研究结果为场协同扭转元件在双螺杆挤出成型中的应用提供了理论支持，并为螺杆结构优化设计及高效塑化混炼系统的开发提供了参考。

1　理论模型

1.1　物理模型

采用 UG、Solidworks 分别建立同向双螺杆场协同扭转元件 A、普通螺纹元件 B 和啮合块元件 C 的几何模型，如 Fig.1 所示。

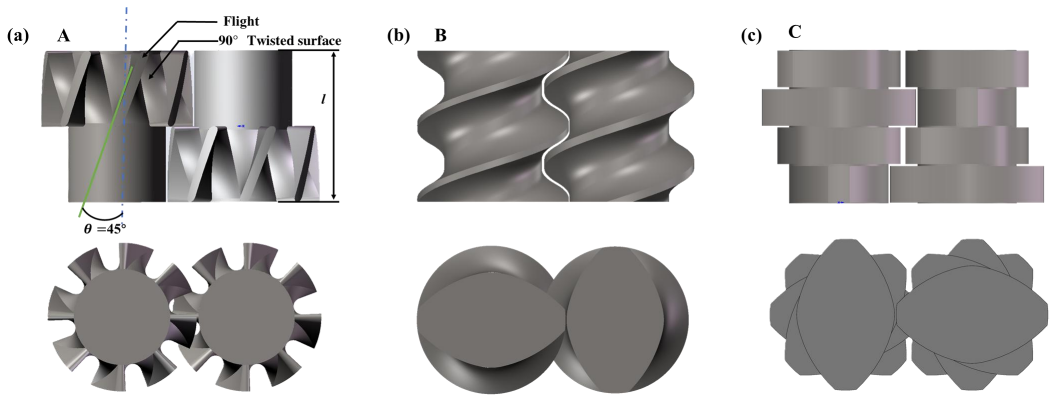


Fig. 1　Numerical simulation model

(a): proposed field synergy torsion element; (b): screw element; (c): kneading block element

螺杆元件的具体结构尺寸参数如 Tab.1 所示。

Tab. 1　Physical model geometry parameters

Parameter	Value/mm
Screw length	36
Screw diameter	36
Screw root diameter	23.2
Screw pitch	18
Screw groove depth	6.4
Center distance	30
Staggered angle	45°
Kneading block thickness	8.6

Parameter	Value/mm
Flight number of field synergy torsion element	8

1.2 数学模型和边界条件

聚合物熔体选择聚丙烯，根据聚合物成型理论，本次模拟做出以下基本假设：（1）模拟熔体为不可压缩的非牛顿流体，熔体流动为非等温瞬态流动；（2）熔体在机筒流道内处于充满状态，与壁面无滑移；（3）不计重力影响。

根据上述假设，建立控制方程，如式（1）～（3）所示

连续性方程：
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

动量守恒方程：
$$\rho(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j})+\frac{\partial P}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\eta\frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \tag{2}$$

能量守恒方程：
$$\rho C_P(\frac{\partial T}{\partial t}+u_i\frac{\partial T}{\partial x_i})=k\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}+\varphi \tag{3}$$

本构方程采用 Bird-Carreau 模型和近似 Arrhenius 模型进行描述，如式（4）所示。流体物性参数如 Tab.2 所示。

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

Tab. 2 Fluid physical parameters

Parameter	Symbol	Value
Density	ρ	900 kg/m^3
Natural time	λ	1 s
Specific heat capacity	C_p	1860 J/(kg·K)
Thermal conductivity	k	0.207 W/(m·K)
Viscosity at an infinite shear rate	η_∞	0 Pa·s
Zero shear viscosity	η_0	1000 Pa·s
Non-Newtonian index	n	0.408
Coefficient of temperature sensibility	f	0.0025 K^{-1}
Reference temperature	T_α	453.15 K

流域使用 Gambit 进行网格划分，定义了流动入口（Inlet）、流动出口（Outlet）、机筒内表面（Barrel wall）、螺杆外表面（Screw wall）四个边界，具体边界条件如 Tab.3 所示。

Tab. 3 Boundary conditions

Position	Flow conditions	Thermal conditions
Inlet	F_n, F_s=0	473.15 K(200℃)
Outlet	Flow outflow	473.15 K(200℃)
Barrel wall	Stationary, no-slip wall	473.15 K(200℃)
Screw wall	Screw speed 60r/min	200 W/(m^2·K)

1.3 网格独立性验证

Fig.2 展示了螺杆在转速 60r/min 条件下，体平均速度和体平均温度随不同网格数量变化的情况，综合评估了径向(R)、啮合区周向(C_1)、流道周向(C_2)、轴向(L)不同维度上的影响。结果表明，当网格划分方式为 20×18×70×48（R×C_1×C_2×L）时，体平均温度与体平均速度的变化均小于 0.2%，因此，在兼顾计算效率与精度的前提下，确定计算流域网格数量为 168960。

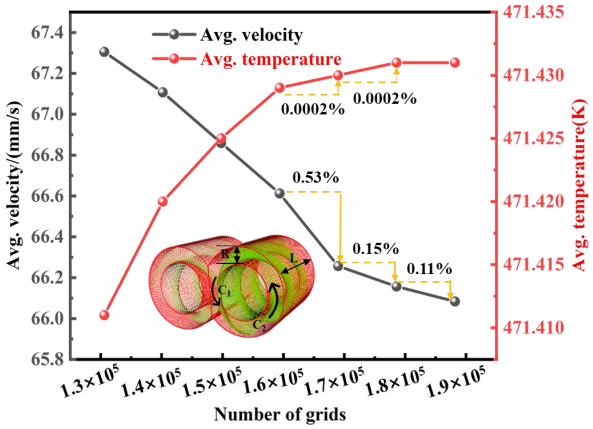


Fig. 2 Mesh independence validation of fluid model

2 结果与讨论

2.1 传热性能分析

Fig.3 为三种元件啮合区中心轴向和距离入口 30mm 处的面平均温度云图和轴向面平均温度曲线图，可以看出扭转元件在温度均匀性方面具有较大优势。从 Fig.3(a)中扭转元件的轴向和径向温度分布云图观察，其颜色过渡自然且均匀，温度变化梯度较小，表明在工作过程中，该元件内部热量分布较为均衡，整体热场的不均匀性得到了良好控制，局部温差较小，能够有效避免因局部过热或过冷导致的性能不稳定和材料老化等问题。而 Fig.3(b)中普通螺纹元件的温度分布存在明显的不均匀区域，高温和低温聚集现象明显，颜色对比强烈，说明其内部热量传递和分布存在较大波动，局部区域温度差异较大，易出现热点和冷点，影响整体性能和使用寿命。Fig.3(c)所示的啮合块元件同样存在类似问题，温度分布不够均匀，部分区域温度过高或过低，这可能会导致加工过程中物料受热不均，影响产品质量，且增加设备的能耗和维护成本。相比之下，扭转元件凭借其独特的设计结构，使螺槽内发生径向传质，引起元件内部物料的翻滚，优化了热量传递路径，实现了更高效的热量扩散和均衡，从而在温度均匀性方面表现出较好的效果。

另外，从 Fig.3(d)中的轴向面平均温度曲线来看，扭转元件在轴向位置 0-20mm 区间内，面平均温度迅速降低，相较于螺纹元件和啮合块元件，在该区间内温度下降幅度较大，有效地降低了物料温度。在 20-35mm 区间，扭转元件温度虽有回升，但整体升温幅度相对较小且平稳。这表明扭转元件在温度控制上具有独特优势，可使物料在加工过程中温度变化更为合理，有助于减少因温度过高引发的物料性能劣化等问题，在温度控制方面相比另外两种传统元件表现更优。因此扭转元件这种特性可用于聚合物改性造粒场景，其温度先快速降低后平稳回升的特性，能使聚合物在加工初期迅速降温，避免因过热导致的降解、交联等问题，保障聚合物分子结构稳定；在后续升温阶段，又能为造粒提供适度的温度条件，让物料更好地塑化成型，提升颗粒质量与性能。在回收料重新造粒中也颇具优势，回收料成分复杂，扭转元件可精准调控温度，防止杂质引发的局部过热，保证回收料在稳定温度区间内实现有效熔融、混合与造粒，提高回收料利用率与再生颗粒品质。此外，在对温度敏感的特殊材料加工中，扭转元件能有效控制温度波动，避免材料性能劣化，满足生产工艺对温度控制的严苛要求。

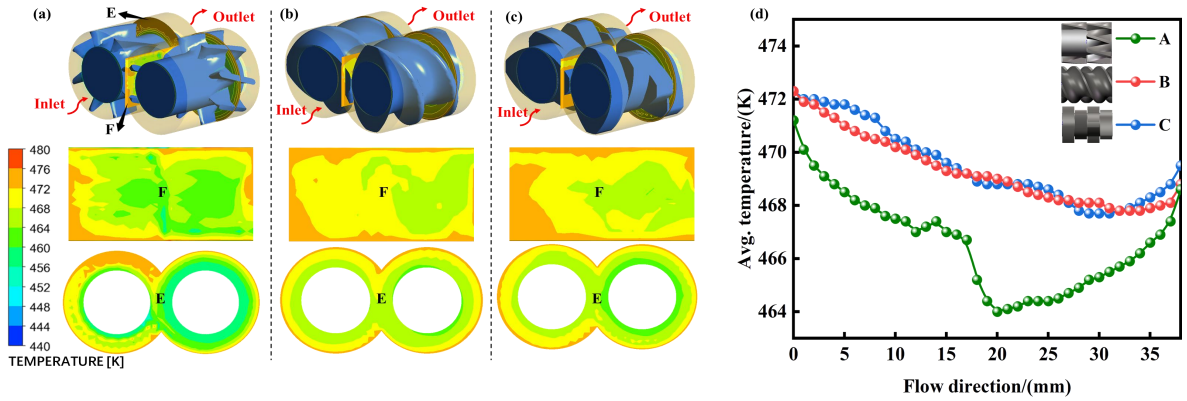


Fig. 3　Temperature cloud map and axial average temperature

(a): temperature cloud map of field synergy torsion element; (b): temperature cloud map of screw element; (c): temperature cloud map of kneading block element; (d): axial surface average temperature curves

Fig.4 为三种元件的体平均对流换热系数，从图中三种元件的体平均对流换热系数数据可以看出，扭转元件的体平均对流换热系数为 66.52 W/(m²·K)，在三种元件中表现最优。结果表明，扭转元件在传热性能方面具有较大优势。这是由于扭转元件独特的扭曲结构设计，可以增强流体在元件内部的扰动程度，使得流体与元件表面的接触更加充分，从而增大了热量传递的速率和效率。同时，其结构也有利于打破流体边界层，减少热阻，进一步提升传热效果。

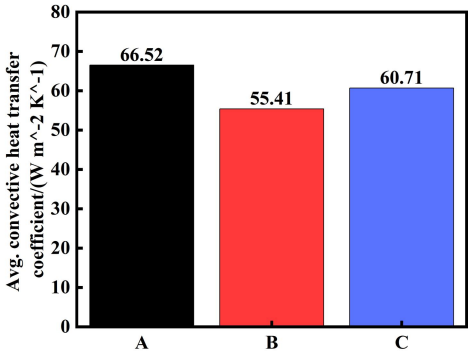


Fig. 4　Avg. convective heat transfer coefficient

2.2　混合性能分析

Fig.5(a)为累计停留时间分布曲线，累计停留时间分布曲线越靠右，物料在机筒内的停留时间越长，混合效果越好。Fig.5(b)为时均混合效率曲线，可以看出扭转元件在整个时间范围内都保持高于普通螺纹元件和啮合块元件的混合效率，且曲线波动更小，说明其混合效果更稳定，能持续提供均匀的混合质量。Fig.5(c)的瞬时混合效率曲线中显示出，扭转元件在混合初期迅速达到较高效率峰值，并在中后期仍能维持较高水平；而普通螺纹元件和啮合块元件的瞬时混合效率在整个时间范围内均低于扭转元件。这表明扭转元件能更快地实现初始混合，并在后续过程中保持混合动力学优势，有效防止混合效率衰减。综合分析，扭转元件在混合性能上更具优势，能实现更高效、稳定且均匀的混合效果。

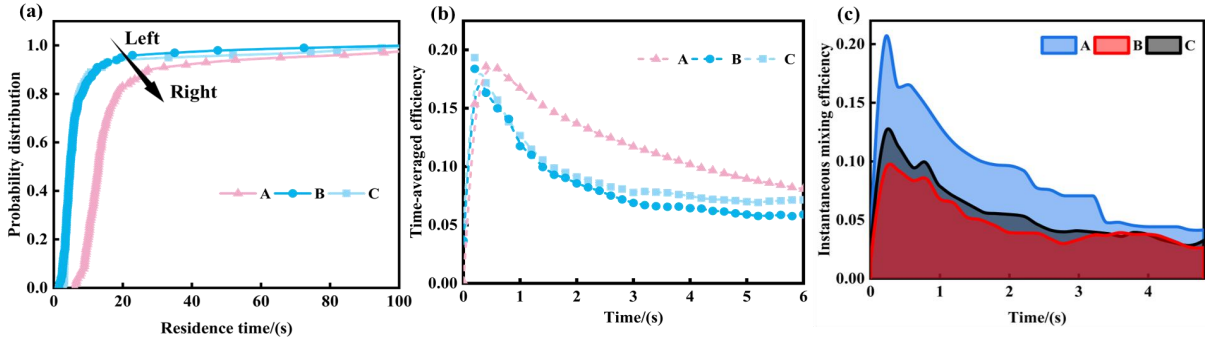


Fig. 5　Mixing performance characterization

(a): probability distribution curves; (b): time-averaged efficiency curves; (c): instantaneous mixing efficiency curves

2.3　协同机理分析

Fig.6(a)和(b)所示分别为 3 种不同螺杆元件的速度矢量与温度梯度场之间的协同角(β)大小分布与对流换热系数关系和轴向速度矢量与温度梯度云图。Fig.6(a)显示，3 种螺杆元件，协同角β均与截面对流换热系数表现出明显的反比关系，即低协同角β，高传热能力，这与聚合物场协同塑化输运混炼理论一致。同时扭转元件的对流换热系数整体高于啮合块元件和普通螺纹元件，且随β角变化波动较小，表明其对流换热能力强且稳定。从 Fig.6(b)来看，扭转元件内部速度矢量与温度梯度方向，其轴向速度矢量在扭转曲面处发生了明显的径向偏转，导致其与温度梯度的夹角变小，实现了速度场和温度场的高效协同，有利于热量的快速传递和均匀分布。而螺纹元件的速度矢量与温度梯度多呈大角度甚至接近垂直，导致传热效率低下，易出现局部温差。啮合块元件虽然比普通螺纹元件的

传热性能有一定改善，但与扭转元件相比，其速度矢量与温度梯度的协同性仍较差，传热效果不如扭转元件。综上，扭转元件凭借速度矢量与温度梯度场之间更好的协同作用，改善了对流换热，使其在传热性能方面更具优势。

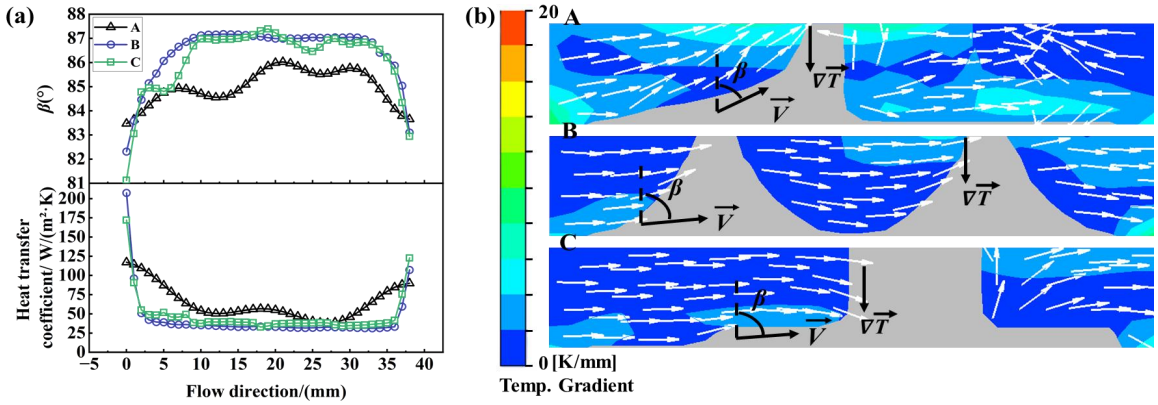


Fig. 6　Synergy between velocity and temperature gradient fields

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

Fig.7(a)所示为 3 种元件的速度矢量与轴向速度梯度场之间的协同角(α)大小分布。从图中可以看出，啮合块元件和普通螺纹元件的协同角α基本都在 70°以上，而扭转元件的协同角α整体在 68°以下，意味着其内部流体运动方向与速度变化趋势更加吻合，这将更利于高效动量传递与混合，促进流体微团的拉伸、折叠与混合，增强微观混合效率，实现更均匀、高效的流体混合。此外，对三种元件的速度流线进行了研究，结果如 Fig.7(b)所示。从图中可以看出，扭转元件速度矢量与速度梯度场具有更小的夹角，能够有效增强流体的剪切和拉伸作用，使不同物料在三维速度场中得到充分的分散与折叠，从而提升混合效率。而啮合块元件和普通螺纹元件的速度流线与速度梯度场近乎垂直，主要表现为纯剪切流动，无法像扭转元件那样构建强烈的三维速度分布，混合能力有限。综上，扭转元件通过调节速度矢量与速度梯度场之间的协同作用，使物料产生径向流动，混合能力得到提升。

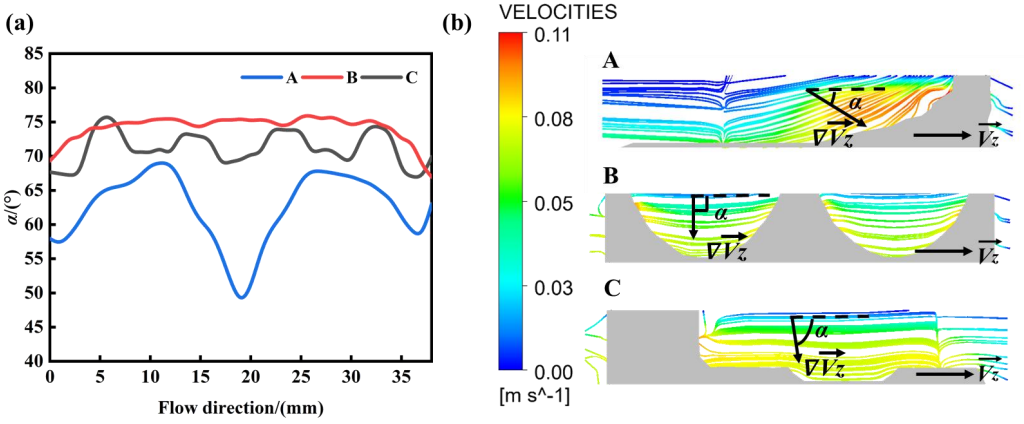


Fig. 7　Synergy between velocity and velocity gradient fields: (a) synergy *α* along the flow direction; (b) streamline trajectory contour map

3 结论

（1）在传热性能上，扭转元件通过引入 90°扭转曲面，强制改变了物料的速度场方向，诱导其沿曲面产生强烈的径向流动与翻滚。该机制有效打破了流体边界层并减小了热阻，使轴向面平均温度分布更趋均匀，从物理机理上解决了普通螺纹与啮合块元件传热效率低、易引发热敏性材料局部降解的难题，为后续新型高效传热元件的结构设计提供了核心机理支撑。

（2）在混合性能上，扭转元件凭借其独特的三维扭转结构，使物料停留时间显著延长，增强了流体的剪切与拉伸作用，实现了物料在空间上的充分分散与折叠。为多组分物料混合过程的流场调控与效率提升提供了新的理论视角。

（3）本研究通过量化分析证实，协同角的大小直接决定了对流换热与动量传递的效率。扭转元件通过减小速度矢量与温度梯度场、速度梯度场之间的夹角，实现了多场之间的高效协同，达成了强化传热与高效混炼的双重效果，丰富了场协同作用在传热-混合协同强化领域的理论研究。

参考文献：

[1] 李明谦. 低熔指聚丙烯大型造粒双螺杆构型研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.
LI M Q. Research on twin-screw configuration for large-scale granulation of low melt index polypropylene[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.

[2] Stritzinger U, Albrecht H, Loew-Baselli B, et al. Modeling melt conveying and power consumption of conveying elements in co-rotating twin-screw extruders[J]. International Polymer Processing, 2025, 40: 336-345.

[3] Wu G Q, Xu B P, Tan L C, et al. Conveying and breakup of a viscoelastic droplet in a dual-speed co-rotating non-twin screw extruder with multi-perturbation rings[J]. Chemical Engineering Science, 2025, 304: 120970.

[4] Teixeira C, Gaspar-Cunha A, Covas J A. Flow and Heat transfer along the length of a co-rotating twin screw extruder[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2012, 51: 1567-1577.

[5] Sun Y C, Wang S L, Huang S Z, et al. Mixing and thermal transport behavior in a pin or non-pin extruder equipped with a field synergy elongation screw[J]. Polymers, 2024, 16: 1793.

[6] Li H N, Xu B P, Tan L C, et al. Enhancing heat transfer in a single screw extruder using chaotic mixing[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 168: 108094.

[7] 姚康, 田桂英, 王忠昊, 等. PA6/66/蒙脱土复合材料的低吸水共混改性[J]. 高分子材料科学与工程, 2025, 41(4): 52-60.
Yao K, Tian G Y, Wang Z H, et al. Low water absorption blending modification of PA6/66/montmorillonite composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2025, 41(4): 52-60.

[8] 薛禹, 谢锦辉, 谭妍妍, 等. HDPE/$BaSO_4$ 复合材料的制备及热氧老化性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(7): 64-74.
Xue Y, Xie J H, Tan Y Y, et al. Preparation and thermo-oxidative aging properties of HDPE/$BaSO_4$ composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(7): 64-74.

[9] 张雨昕, 谢艳玲, 宋攀, 等. 基于不同温度作用下橡胶再生方法与原理研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(4): 167-176.

Zhang Y X, Xie Y L, Song P, et al. Research progress on rubber regeneration methods and principles based on different temperatures[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(4): 167-176.

[10] Vidal J, Nóbrega J M. An enhanced temperature control approach to simulate profile extrusion[J]. Polymers, 2024, 16: 904.

[11] Mackinnon D, Godzina M, Becer C R. Baroplastics-the future of low temperature plastic processing[J]. Progress in Polymer Science, 2025, 165: 101967.

[12] 李庆领. 聚合物在挤出加工过程中的传热及流动特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
Li Q L. Study on heat transfer and flow characteristics of polymer in extrusion process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

[13] 梁畅, 马秀清, 耿孝正. 啮合同向双螺杆挤出机中新型螺杆元件 S 型元件与捏合块元件的性能对比研究[J]. 中国塑料, 2002, 16(11): 80-86.
Liang C, Ma X Q, Geng X Z. Comparative study on performance of novel screw element S-type element and kneading block element in co-rotating twin-screw extruder[J]. China Plastics, 2002, 16(11): 80-86.

[14] 班董董. 波状螺杆元件流场和混合性能的研究[D]. 开封: 河南理工大学, 2022.
Ban D D. Study on flow field and mixing performance of wavy screw elements[D]. Kaifeng: Henan Polytechnic University, 2022.

[15] 朱家威, 王世檩, 王泽欣, 等. 基于场协同原理的注射打印技术高效塑化螺杆设计[J]. 塑料工业, 2024, 52(11): 85-93.
Zhu J W, Wang S L, Wang Z X, et al. Design of high-efficiency plasticizing screw for injection printing technology based on field synergy principle[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(11): 85-93.

[16] 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.

[17] Jian R R, Dai R, Sain M, 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.

[18] 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-synergistic torsion screw for enhancing mixing and heat transfer[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(10): 89-96.

Mechanism of Co-Rotating Twin-Screw Field Synergy Torsion Screw Enhancement for Mixing and Heat Transfer

Peng Zhang[1], Zexin Wang[1], Qixin Song[1], Shilong Wang[1], Xingyue Wei[1], Shilin Wang[1], Xiankui Zeng[1], Ranran Jian[1,2,3]

(1. College of Intelligent Manufacturing, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061,

China; 2. En-Learn Laboratory, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. Postdoctoral Workstation, Yiyang Rubber & Plastics Machinery Group Co., Ltd, Yiyang 413064, China)

ABSTRACT: Based on the field-synergistic principle of polymer plasticization, conveying, and mixing, a novel co-rotating twin-screw field-synergistic twisting element was designed and developed. This study aims to address technical bottlenecks such as low heat transfer efficiency, non-uniform temperature distribution, and local degradation of heat-sensitive materials during the co-rotating twin-screw extrusion process, thereby improving plasticization quality and mixing uniformity through structural optimization. Numerical simulations were conducted by using the computational fluid dynamics (CFD) software ANSYS Polyflow to compare the heat transfer performance, mixing performance, and synergistic effects among the twisting element, conventional screw element, and kneading block element. The results indicate that the twisting element exhibits superior heat transfer and mixing performance compared to the other two types of elements, attributed to the improved synergy between its velocity field and temperature field. By introducing a 90° twisted surface, the twisting element alters the direction of the velocity field, generating make the material flow radially along a twisted surface. This enhances the synergistic interaction between the velocity field and the temperature gradient field as well as the velocity gradient field, thereby intensifying heat and mass transfer. The unique structure of the twisting element facilitates effective local heat and particle mixing, improving the plasticization quality of the material.

Keywords: field-synergistic principle; enhanced heat transfer; twisting element; numerical simulation