

原创研究型文章

聚合物场协同原理：揭示螺杆结构优化的内在机制，提高热管理和工艺效率

潘威¹, 黄士争¹, 朱家威¹, 曾宪奎¹, 杨卫民², 鉴冉冉^{1,*}

¹ 机电工程学院, 青岛科技大学, 青岛市 266061, 山东省, 中国

² 机电工程学院, 北京化工大学, 北京市 100029, 中国

* 通讯作者: 鉴冉冉, jianrr@qust.edu.cn

引用格式

潘威, 黄士争, 朱家威, 等. 聚合物场协同原理: 揭示螺杆结构优化的内在机制, 提高热管理和工艺效率. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(2): 166.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i2.166>

Pan W, Huang S, Zhu J, et al. Polymeric field synergy principle: Revealing the intrinsic mechanism of screw channel optimization to enhance thermal management and process efficiency (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(2): 166. <https://doi.org/10.18686/cncest.v2i2.166>

文章信息

收稿日期: 2024-02-29
录用日期: 2024-04-07
发表日期: 2024-04-10

版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/134>

4

摘要: 挤出设备的工艺效率和能耗问题成为制约聚合物挤出行业发展的关键挑战。本文提出了一种全新的聚合物场协同原理, 用以指导解决传统挤出设备混合效率和能源利用效率低的问题。文章对 Maddock 结构、主副螺纹结构、销钉结构、波状结构四种新型非常规螺杆结构进行了有限元分析, 并与传统的单螺杆进行了比较。结果表明, 新型非常规螺杆通道中产生了更复杂的熔体流动模式, 增强了拉伸变形或螺旋流动。在熔体挤出过程中, 不同程度的拉伸或螺旋流动提高了混合和热传输效率。其中 Maddock 元件诱导的螺旋流对流场中的拉伸塑性变形影响最大, 同时螺旋流引起了通道内熔体的径向运动, 极大地促进了速度场、速度梯度场和温度梯度场之间的协同作用。拉伸或螺旋流动提高了螺杆通道内的径向热量和质量传输效率, 从而提高了设备的整体工艺效率。有限元分析的结果证实了聚合物场协同原理的科学性。

关键词: 聚合物挤出; 混合效率; 热量和质量传输效率; 能源利用效率; 场协同原理

1. 引言

随着能源危机和环境问题的加剧, 许多国家将实现碳达峰和碳中和的目标列入国家战略 [1,2]。因此, 开发低能耗、高效率的绿色加工成型技术和设备已成为高分子机械行业的发展趋势 [3,4]。

在聚合物挤出加工中, 混合过程的效率和能源利用一直是研究的重点。在传统的螺杆挤出系统中, 由于熔体粘度高, 流场以平流为主, 径向对流薄弱; 并且聚合物导热系数低, 传热过程普遍受限, 从而导致温度和热量分布不均匀、塑化效率低、能耗高等问题。传统挤出设备的运行模式表现出较低的能源利用率, 属于机械行业中的“高能耗”设备 [5,6]。提高挤出系统的热管理和工艺效率尤为重要。为此人们开发出了各种新型螺杆, 如 Maillefer 式分离型螺杆 (主副螺纹结构)、销钉螺杆、波状螺杆和 Maddock 螺杆等。

一般来说, 均匀的熔体分布和热管理可以通过增强混合和剪切生热来实现。例如, Dray [7] 模拟了各种分离型混合螺杆的熔融能力, 并开发了一个计算机模型来表征具有不同分离型结构设计的螺杆的熔融能力。结果表明, 与非分离型螺杆相比, Maillefer 式分离型螺杆通过分离固体床与熔池增加了额外的熔融面积, 将熔融能力从 482 lb/hr 提高到 539 lb/hr。Chen 等 [8] 研究了销钉单螺杆挤出机与传统单螺杆挤出机混合段的流场, 评估了这两种挤出机的混合性能。结果表明, 销钉的引入可以扰乱颗粒流动轨迹并改变颗粒运动方向, 有利

于拉伸速率的增加，从而提高混合效率。Liu 等 [9]利用 CFD 软件 ANSYS POLYFLOW 对波状螺杆元件和屏障螺杆元件的混合性能进行了数值模拟研究。结果表明，波状螺杆元件的周期性深度变化可以增强剪切和拉伸效应，从而改善混合、提高效率 and 实现更均匀的热分布。Spalding 等 [10]通过分析 Maddock 混合元件的作用机制，为获得最佳混合应力提供了依据。结果表明，通过 Maddock 混合元件进行挤出可以消除挤出物内的固体成分和热梯度，在减少挤出物中的固体聚合物碎片和未混合凝胶方面表现出优异性能。

此外，增强挤出过程中的热传输过程可以促进热管理和能源效率。考虑到传热主要受聚合物熔体塑性流动状态影响，控制流型是强化传热的有效途径，这与螺杆结构密切相关。Formela 等 [11]使用同向双螺杆挤出机来连续回收废旧轮胎橡胶（ground tire rubber, GTR）。热重分析结果表明，再生 GTR 的热稳定性很大程度上取决于螺杆结构。Jian 等 [12]提出了一种新型的“翻煎饼”螺杆结构，通过设计扭转螺旋流型来增强径向对流，实现了螺杆流道径向顶部区域和底部区域之间的分子热迁移，结果表明局部热量的径向有效传递改善了热分布均匀性。随后，Jian 等 [13]提出了另一种新颖的“摊煎饼”螺杆结构来产生拉伸流动，并将其与传统螺杆和“翻煎饼”结构进行了比较。“摊煎饼”螺杆结构的会聚楔形通道所引起的拉伸变形可以增强径向传质和传热，实现局部热量及颗粒的有效混合。上述研究表明，通过螺杆结构的设计和优化来控制流型是一种有效的方法。

尽管上述研究证实了新型螺杆结构在工业领域的优异性能，但对其潜在机理的深入分析仍有待解决。聚合物挤出过程中的熔体流动非常复杂，涉及拉伸流和剪切流等各种粘弹性流动形式 [14]，并伴随着粘性耗散、流变特性等，而螺杆结构对流动和热传输的影响机制仍缺乏有效的理论来统一解释。

本文对挤出螺杆流道中物料输运过程进行了理论分析，深入研究了速度场、速度梯度场和温度梯度场之间的相互关系 [15]，发现控制物理场协同可以达到强化传热与高效混炼的目的，并提出了聚合物场协同原理以阐明聚合物在挤出过程中传热和传质的内在机制 [16]。为了验证该理论的科学有效性，选取工业上广泛使用的四种代表性非常规新型螺杆进行分析，并与常规螺杆进行了比较。

2. 聚合物场协同原理

为了克服聚合物熔体挤出塑化过程中传热传质能力弱的挑战，提高能源利用效率，我们提出了一种新的、广泛适用的聚合物场协同原理。基于聚合物加工流变学和流体力学分析，详细阐述了聚合物场协同原理的核心思想，分为混合协同和传热协同 [17]。

2.1. 混合协同

聚合物挤出过程中的动量守恒方程如式（1）所示：

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = \nabla \cdot \bar{\tau} - \nabla P + \rho g \quad (1)$$

式 (1) 的左侧表示流体动量的波动，其特征在于它与两个向量（速度和速度梯度）相关。这些矢量及其相互作用在一定程度上影响聚合物挤出过程中传质和混合的强度。右侧的项分别依次为粘性应力项、静压项和重力项。进一步展开，可得式 (2)。

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v}\right) = \nabla \cdot \bar{\tau} - \nabla P + \rho g \quad (2)$$

其中 ρ 、 v 、 t 、 τ 、 P 和 g 分别是密度、速度、时间、应力、压力和重力加速度。式 (2) 揭示了速度和速度梯度之间的矢量点积，影响整个流体域动量增量的变化，该点积可以展开为式 (3)。

$$\bar{v} \times \nabla \bar{v} = |\bar{v}| |\nabla \bar{v}| \cos \alpha \quad (3)$$

结合式 (2) 和 (3) 可以发现动量增量和质量传递不仅取决于速度和速度梯度的大小，还取决于它们之间的夹角。换句话说，速度与速度梯度之间的相互作用关系（即矢量夹角）是影响流体域动量的关键因素之一。当夹角 α 接近零时，点积达到最大值，对动量增量产生的影响最显著。相反，当夹角 α 达到 90° 时，点积为零，对动量增量的影响最小。因此，夹角应尽可能小，以使速度和速度梯度的相互作用最大化。这也解释了拉伸流混合效果优于剪切流的原因。如图 1(a) 和 1(b) 所示，在纯剪切流场中，速度与速度梯度之间的夹角为 90° ，而在纯拉伸流场中，夹角趋近于 0° 。

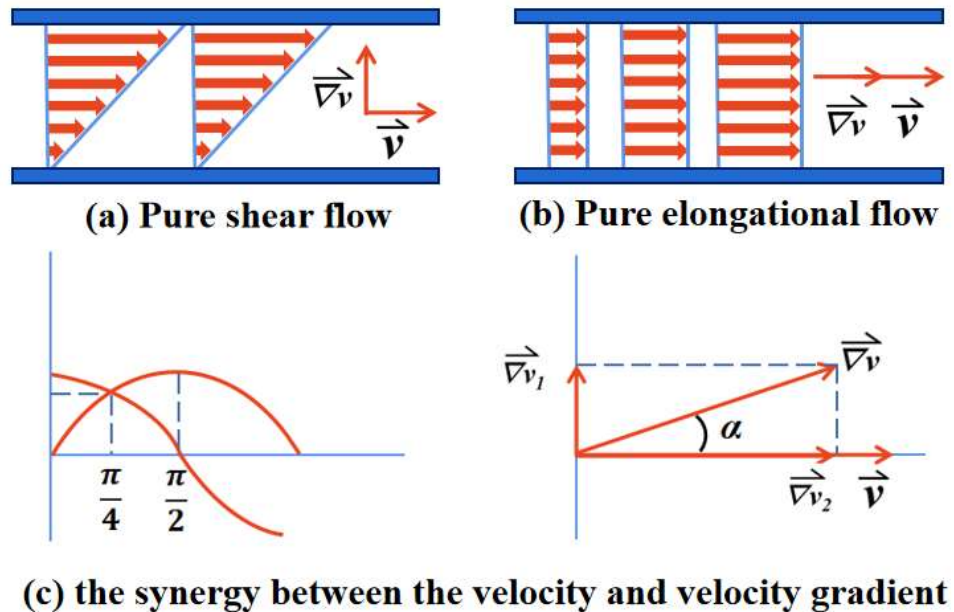


图 1. 基本流型及其矢量协同关系。

Figure 1. Basic ductile deformation and its vector relation.

由动量守恒推导出的聚合物熔体流动过程的混合强化场协同方程，可以用来分析速度场和速度梯度场的协同作用及其与剪切流和拉伸流的关系。从图 1(c) 中可以看出，速度与速度梯度夹角 α 越小，拉伸流所占比例越高，动量增量越大。从根本上说，拉伸流对混合的影响源于动量增量的最大化。这为从场协同的角度理解聚合物加工中的物理问题提供了新的可能性。为了增强混合，

应尽可能提高流场中速度与速度梯度的协同性，例如拉伸流动，而不仅仅是依靠剪切混合。

2.2. 传热协同

聚合物加工过程中的能量守恒可用式 (4) 表示。

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot \bar{q} - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_P (\nabla \cdot \bar{v}) + (\bar{\tau} : \nabla \cdot \bar{v}) \quad (4)$$

式 (4) 左边项对应于内能的增加，表示热量的变化。右侧的三项分别包括传热能、单位体积流体膨胀或压缩引起的能量变化以及粘性耗散能。对于不可压缩聚合物，式 (4) 右侧的第二项可以忽略不计。进一步展开后，可得出式 (5) 如下：

$$\rho C_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla T \right) = -\nabla \cdot (-K \nabla T) + (\bar{\tau} : \nabla \cdot \bar{v}) \quad (5)$$

其中 C_v 、 T 和 K 分别是定容比热、温度和传热系数。从式 (5) 中，我们发现速度和温度梯度的矢量点积影响整个流体域内能的变化。该点积可以展开为式 (6)。

$$\bar{v} \cdot \nabla T = |\bar{v}| |\nabla T| \cos \beta \quad (6)$$

同样，可以推断内能和传热不仅取决于速度和温度梯度的大小，还与它们之间的夹角有关。在粘性耗散功恒定的情况下，较小的夹角 β 会导致较大的传热系数 K 。这为增强聚合物加工中的传热提供了一种新方法。

图 2 中的示意图直观地说明了这种协同效应。当冷流体的流动方向有朝向热流体的分量时，即它们之间的流动方向不垂直，冷热流体粒子有更大的概率彼此聚结并交换热量，从而实现更均匀的热量分布。

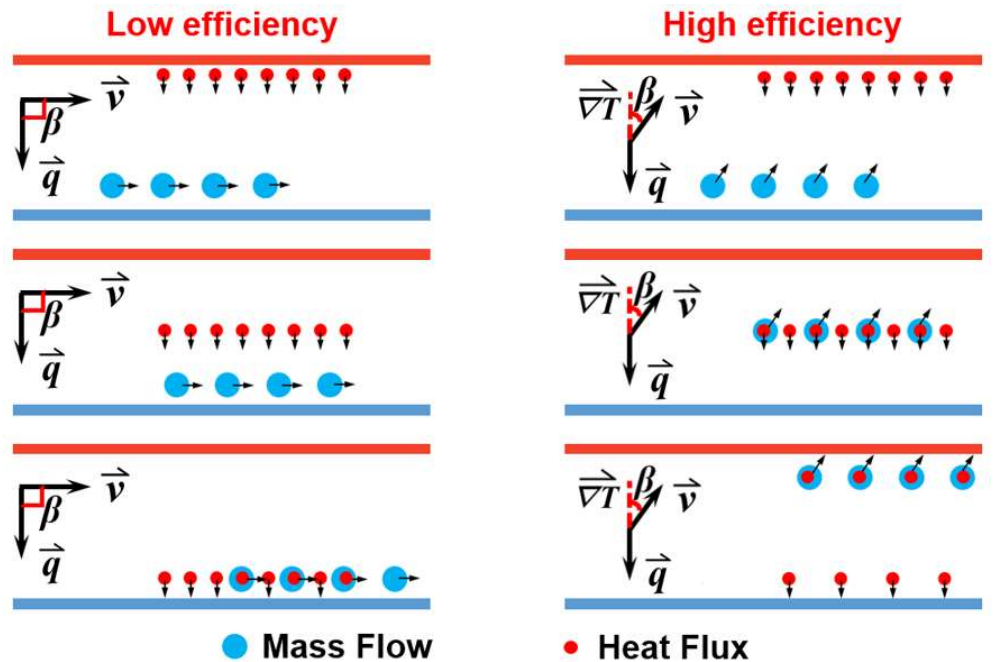


图 2. 流动和热传输之间的协同作用示意图。

Figure 2. Schematic of the synergy between flow and thermal transport.

3. 模型与方法

3.1. 物理模型

图 3 展示了所研究的五种螺杆的几何结构。其中，图 3(a)所示为工业中的常规单螺杆（single-threaded screw, STD），在本研究中作为对照组。图 3(b)所示为 Maillefer 式分离型（Maillefer-type barrier, BM）螺杆，它在常规单螺杆的基础上增加了一个辅助螺纹，以分离螺槽中的固体和熔体。图 3(c)所示为销钉螺杆，在单螺杆的头部设置 5 排整齐排列的销钉，这是分流型螺杆中最常见的螺杆结构。图 3(d)和 3(e)分别表示波状螺杆和 Maddock 螺杆，它们是变流道型螺杆和屏障型螺杆的典型代表，被广泛使用。其中，波状螺杆采用偏心距为 3 mm 的波状单螺杆元件，Maddock 元件有 8 个深槽和 4 个浅槽。

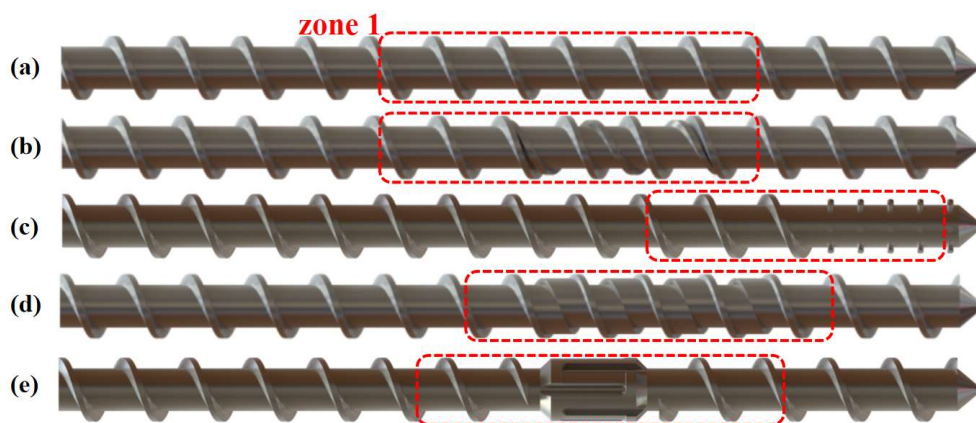


图 3. 所研究的螺杆：(a) 常规单螺杆；(b) BM 螺杆；(c) 销钉螺杆；(d) 波状螺杆；(e) Maddock 螺杆。

Figure 3. The studied screw: (a) Single-thread screw; (b) BM screw; (c) Pin screw; (d) Wavy screw; (e) Maddock screw.

机筒壁与螺杆表面之间的区域构成流域。为了避免入口的影响，流域从螺杆入口处延伸了 2 mm。具体模型如图 4 所示，几何参数详见表 1。

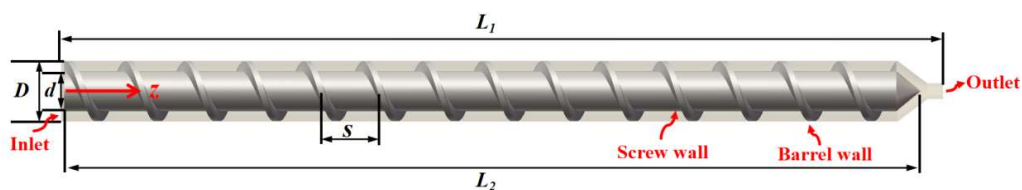


图 4. 单螺杆及其流域模型。

Figure 4. Single-thread screw and working fluid model.

表 1. 物理模型的几何参数。

Table 1. Geometric parameters of the physical model.

参数	代号	值/mm
机筒长度	L_1	445
螺杆长度	L_2	432
螺杆直径	D	30
螺杆根径	d	20
螺杆螺距	S	30

3.2. 控制方程和边界条件

高粘度聚合物的挤出过程非常复杂，涉及被动流动、粘性耗散、塑性变形、传热传质等。本研究中采用的模拟流动介质是三元乙丙橡胶（ethylene propylene diene monomer, EPDM）。假设熔体为不可压缩的粘性非牛顿流体，并且流动为层流非等温瞬态流动。熔体充满整个流道，且壁面无滑移。由于三元乙丙橡胶是一种高粘弹性橡胶，在挤出塑化过程其流动主要受粘性力控制，因此惯性力可以忽略不计。在上述假设下，工作流场遵循质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程，如下 [18]。

质量守恒方程，

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

动量守恒方程，

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

能量守恒方程，

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + \varphi \quad (9)$$

本构方程采用 Bird-Carreau 定律和近似 Arrhenius 定律来描述 EPDM 的流变特性 [19]，

$$\eta = [\eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}}] \exp[-f(T - T_\alpha)] \quad (10)$$

表 2 提供了模拟中使用的 EPDM 的相关材料特性，而边界条件如表 3 所示。

表 2. 模拟中使用的 EPDM 的特性。

Table 2. Properties of EPDM used in the simulation.

参数	代号	值
密度	ρ	1150 Kg/m ³
比热	C_p	1600 J/(Kg·K)
热导率	k	0.25 W/(m·K)
无穷切黏度	η_∞	0 Pa·s
零切黏度	η_0	175000 Pa·s
自然时间	λ	14 s
非牛顿指数	n	0.408
温度敏感系数	f	0.0025 K ⁻¹
参考温度	T_α	373.15 K

表 3. 边界条件。

Table 3. Boundary conditions.

边界	流动条件	热条件
入口	充分发展, 体积流率=2.44 × 10 ⁻⁶ m ³ /s	353.15 K (80 °C)
出口	流动出口	热出口
机筒壁面	静止, 无滑移	343.15 K (70 °C)
螺杆表面	螺杆转速 60 r/min	绝热

3.3. 网格系统和独立性验证

本研究采用 ANSYS Polyflow 2021 R1 (美国 ANSYS 公司) 计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 软件进行计算, 网格系统由 ANSYS Mesh 2021 R1 网格软件 (美国 ANSYS 公司) 生成。使用六面体结构网格对流体域进行离散化处理, 并对机筒内壁附近的边界层网格进行细化, 以确保计算精度。由于螺杆模型的结构不规则, 因此采用四面体非结构网格对螺杆部分进行离散化处理。最后, 采用网格重叠技术生成流体域和螺杆运动部分的叠加有限元网格系统。

为了确保模拟结果的可靠性, 对流体网格模型进行了独立性验证。图 5 给出了转速为 60 r/min 时不同流体网格下熔体平均速度和平均温度的变化情况。网格评估是在径向 (R)、周向 (C) 和轴向 (L) 三个尺寸维度上进行的。考虑到计算效率和精度之间的平衡, 后续数值模拟将采用 18 × 70 × 180 的网格划分方式, 总网格数为 263,563。

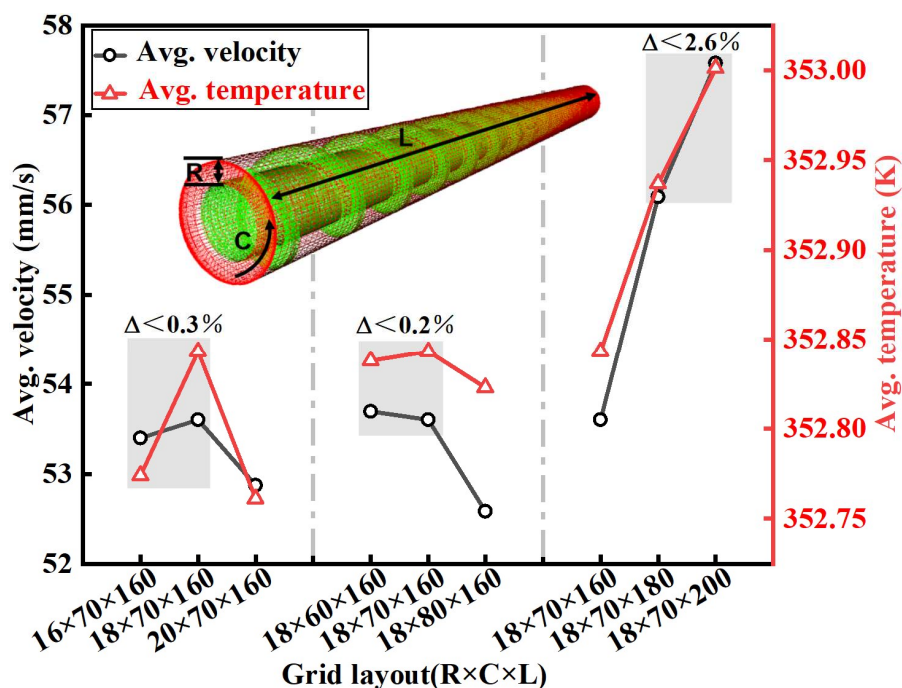


图 5. 流体模型的网格独立性验证。

Figure 5. Mesh independence validation of fluid model.

4. 结果与讨论

4.1. 熔体流动模式分析

螺杆的结构决定了聚合物熔体的流动特性，从而影响混合和传热性能。为了清楚地说明不同螺杆的流动模式，我们采用旋转参考系，即机筒绕螺杆反向旋转。五种螺杆在区域 1 位置的流型如图 6 所示。从图 6(a)可以看出，在 STD 螺杆中，熔体沿着螺杆流道以柱塞平流的形式向前输送，几乎不存在径向运动。在 BM 螺杆中，大部分颗粒首先积聚在辅助螺纹与前面的主螺纹形成的狭窄通道（即固体床区域）中，熔融后越过辅助螺纹到达主通道，实现熔体与固体床的良好分离。Gaspar-Cunha 的研究也证实了这一现象 [20]。销钉螺杆的流线轨迹显示，在销钉位置出现了明显的分流现象。波状螺杆的偏心结构导致径向通道深度的周期性变化，熔体流动倾向于向更深的通道内流动，从而在变流道处形成了拉伸流。Maddock 元件独特的结构设计及机筒内壁的拖曳作用，导致颗粒在深通道中径向翻滚，形成独特的螺旋流动模式。在图 6(b)所示的横截面流线中，Maddock 元件深槽中出现的涡流也很好证明了这一点。此外，除了 Maddock 元件和波状螺杆深浅通道交汇处外，这些螺杆之间几乎没有径向流动。

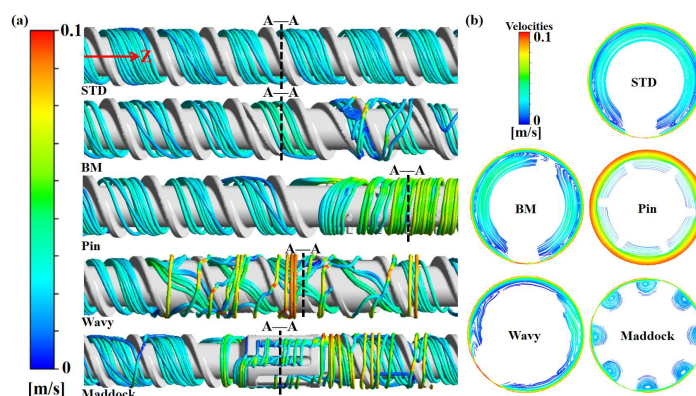


图 6. (a) 旋转参照系中的熔体流动模式：轴向速度流线；(b) A-A 截面上的轴向速度。

Figure 6. (a) Melt flow patterns in the rotating reference frame: velocity streamline in the axial direction; (b) the axial velocity in the cross-section A-A.

4.2. 混合性能及其协同分析

混合工艺效率是评估挤出设备性能的关键因素。图 7 给出了一系列评估混合性能的常用指标。其中，分离尺度是表征混合能力的重要参数，用来反映混合相浓度场的均匀程度。分离尺度越小表明混合越均匀。如图 7(a)所示，在五种螺杆中，STD 螺杆的分离尺度最高，而四种新型螺杆的分离尺度值均有所下降，其中 Maddock 螺杆的分离尺度值最低，其次是波状螺杆。这表明 STD 螺杆的混合均匀程度最低，混合效果最差；而其他四种新型螺杆在一定程度上改善了混合均匀性，尤其是 Maddock 螺杆。

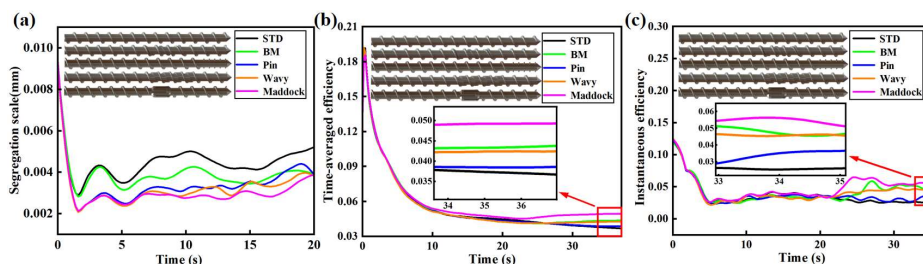


图 7. (a) 混合性能评估：分离尺度；(b) 时均混合效率；(c) 瞬时混合效率。

Figure 7. (a) Mixing performance evaluation: segregation scale; (b) time-averaged mixing efficiency; (c) instantaneous mixing efficiency.

混合效率是表征混合能力的运动学参数，表示物料受拉伸作用引起的面积伸展程度，用以量化流动形变的能力。混合效率越高，表明混合能力越好。图 7(b)和 7(c) 分别显示了五种螺杆随时间变化的时均混合效率和瞬时混合效率曲线。可以看出，Maddock 螺杆的时均混合效率最高，其次是 BM 螺杆和波状螺杆，而 STD 螺杆最低。结果表明，与其他四种螺杆类型相比，Maddock 元件产生的螺旋流可以显著增强熔体的径向对流，从而使混合效率大幅提高。图 7(c) 中五种螺杆类型的瞬时混合效率顺序为：Maddock > BM ≈ Wavy > Pin > STD，与图 7(b)中描绘的趋势一致。另外，结合 Zitzenbacher 的研究 [21]，可以清楚地看出 Maddock 元件在增强螺杆混合方面表现出良好的效果。

为了进一步探索 Maddock 元件增强混合的内在机制，对 STD 和 Maddock 螺杆进行流场分析。图 8 给出了轴向截面流线轨迹云图。结果发现，流体在 STD 通道中仅经历简单剪切层流，每个径向层的速度大小几乎没有变化，速度梯度方向几乎平行于螺槽径向；而 Maddock 通道中速度发生了显著变化，速度梯度不再平行于螺槽径向。可以看出，Maddock 元件引起的螺旋流增强了径向传质，促进了速度和速度梯度之间的协同作用，从而提高了挤出过程中的混合效率。

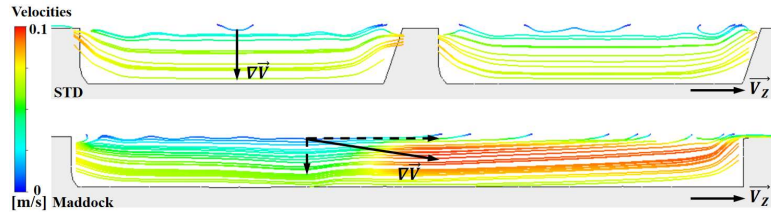


图 8. STD 和 Maddock 螺杆流道中的轴向速度流线。

Figure 8. Axial velocity streamlines with the screw channels for STD and Maddock.

为了进一步验证四种非常规螺杆结构的混合增强机制，对包括 STD 螺杆在内的这五种螺杆进行了场协同分析。图 9(a)显示了五种螺杆轴向速度和速度梯度之间的协同角 α 分布。很明显，与 STD 螺杆相比，非常规螺杆元件位置处的协同角 α 值减小。其中，Maddock 元件的协同角 α 最低，销钉螺杆次之。根据聚合物场协同原理，可以推断协同角 α 的减小是由于元件位置处产生了拉伸流动，这一点在图 9(c)中得到了进一步验证。

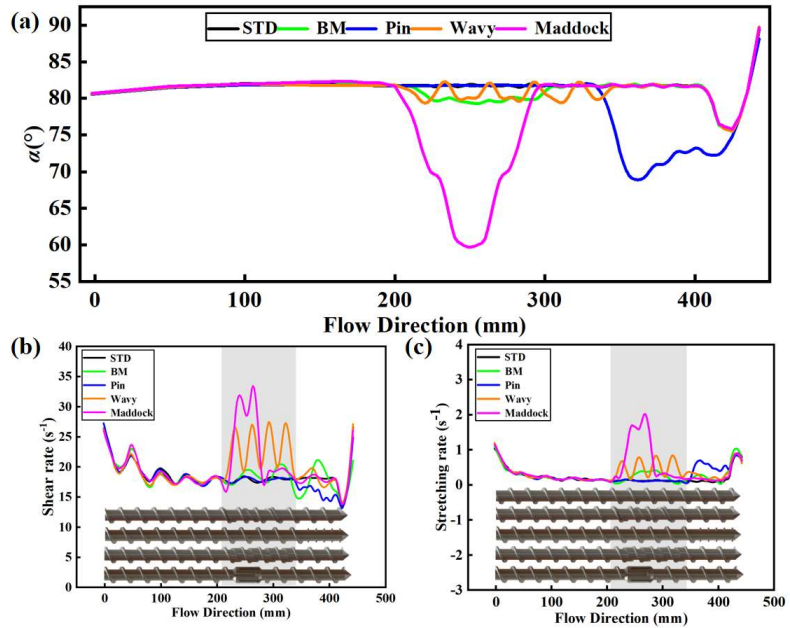


图 9. 螺杆的混合协同作用和塑性变形：(a) 沿流动方向的协同角 α ；(b) 剪切速率分布和(c) 拉伸速率分布。

Figure 9. Mixing synergy and ductile deformation for screws: (a) synergy angle α along the flow direction; (b) shear rate distribution and (c) stretching rate distribution.

从图 9(b)中可以得到不同螺杆的剪切速率大小顺序为: Maddock > Wavy > BM > STD > Pin; 在图 9(c)中可以观察到 Maddock 处的拉伸速率最高, 其次是 Wavy、Pin、BM 和 STD。结果表明, 非常规螺杆结构增强了剪切变形和拉伸变形。在 BM 螺杆中, 当颗粒进入连续变窄的通道并越过辅助螺纹时, 受到剪切和拉伸作用。销钉螺杆的销钉可以迫使流体分流, 产生拉伸流动, 提高拉伸速率, 但剪切作用会被削弱, 这与 Chen 等的研究结果一致 [8]。波状螺杆由于其偏心结构, 当流体通过体积周期性变化的螺杆流道时, 会产生周期性的强烈剪切和拉伸效应。在 Dörner 等的研究中 [22], 这种周期性变化被认为是改善波状螺杆混合性能的根本原因。此外, Maddock 螺杆同时具有很强的剪切和拉伸作用。浅通道给熔体带来强大的剪切力, 而深通道中产生的螺旋流动则显著增加了拉伸流动和变形。因此, 非常规螺杆的混合能力有所提高。尽管如此, 由于协同角 α 值大于 45° , 这五种螺杆的流动仍以剪切流动为主。

4.3. 传热性能及其协同分析

在聚合物挤出塑化过程中, 由于热扩散率极低, 熔体传热效率有限, 通常导致径向温差较大。我们研究了五种不同螺杆类型的径向温度分布, 结果如图 10 所示。

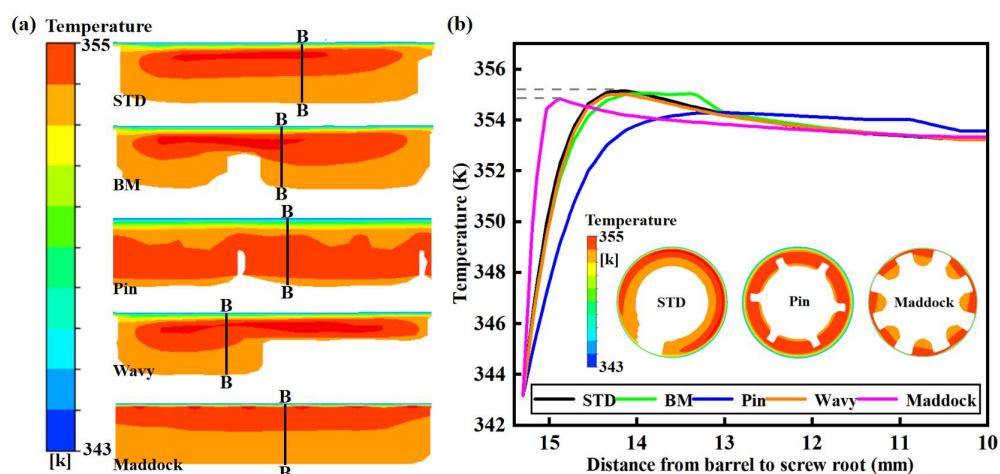


图 10. 传热性能: (a) 各种螺杆元件的温度场; (b) B-B 截面温度的径向分布。
Figure 10. Heat transfer performance: (a) temperature fields for various screw elements; (b) radial distribution of temperature at section B-B.

图 10(a)显示了五种螺杆流道内的温度场分布。可以看出, Maddock 元件处的高温区域更靠近机筒内壁。这是由于 Maddock 元件引起的螺旋流动, 实现了通道底部到顶部的质量和热量交换, 导致高温区向上延伸。然而, 销钉螺杆的传热性能最差, 甚至低于 STD 螺杆。图 10(b)显示了 B-B 截面处的径向温度分布。结果发现, 与 STD 螺杆相比, 其他四种螺杆的最高温度均有所降低。其中销钉元件温度最低, 其次是 Maddock 元件。一种可能的解释是因为销钉元件的剪切生热能力较弱, 这并不一定表明销钉元件的传热能力良好, 图 11(a)中的对流传热系数结果进一步证明了这一点。与销钉元件不同, Maddock 元件由

于能够产生螺旋流，促进熔体中的热量和质量传递，大大增强了传热能力。此外，Maddock 元件的径向温度分布曲线呈左移趋势，再次说明了高温区域向机筒内壁的延伸，这在一定程度上促进了机筒内壁的冷却效果。

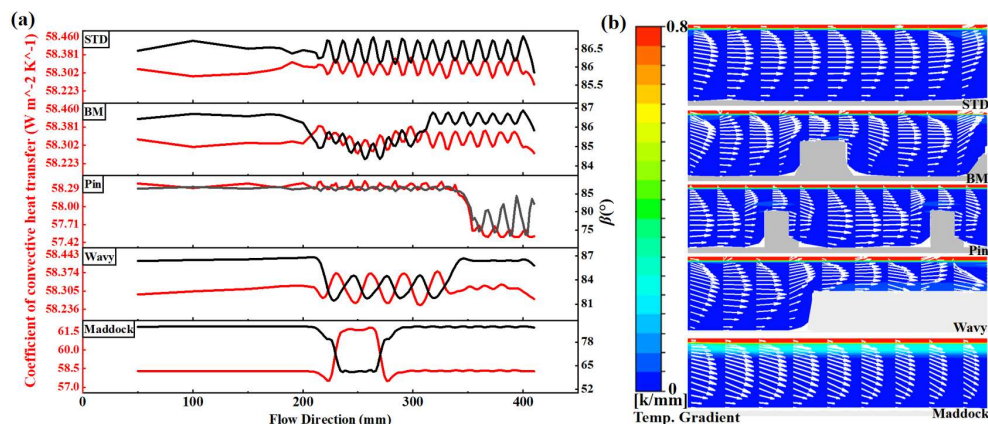


图 11. (a) 沿流动方向的传热性能；(b) 螺杆螺纹通道的温度梯度等值线和轴向速度矢量。

Figure 11. (a) Heat transfer performance along the flow direction; (b) the temperature gradient contours and axial velocity vector with the screw channels for screws.

对流换热系数的大小反映了对流换热的强度。图 11(a)描绘了五种螺杆对流换热系数沿轴向位置的分布，以及速度和温度梯度之间的协同角 β 分布。除销钉螺杆外，非常规螺杆的对流传热系数均有所提高。Maddock 元件处的协同角 β 值最小，对流传热系数最大。这表明 Maddock 螺杆元件表现出最佳的传热性能。此外，从图 11(a)可以明显看出，对流传热系数与协同角 β 之间存在负相关关系，这与聚合物场协同原理非常吻合。轴向速度矢量和温度梯度等值线图如图 11(b)所示。结果表明，STD 螺杆的速度矢量几乎平行于等温线，表明速度场和温度梯度场之间几乎不存在协同作用。在非常规螺杆中，速度在特定位置存在径向偏移，例如 BM 螺杆的辅助螺纹附近、销钉螺杆的销钉附近以及波状螺杆的通道深度过渡处，这种偏移增强了速度场和温度梯度场之间的协同作用。特别是 Maddock 元件中的螺旋流导致整个深通道中的速度径向偏移，显著增强了径向传热。

5. 结论

本文从理论上研究了聚合物挤出过程中熔体的速度场、速度梯度场和温度梯度场之间的相互关系，并提出了聚合物场协同原理。与常规螺杆相比，采用有限元法探讨了四种非常规螺杆的流动、混合和传热性能，并进行了场协同分析。结论如下：

- 1) 与 STD 螺杆中产生的柱塞平流相比，BM 螺杆通过辅助螺纹实现了固体床和熔体的分离；销钉螺杆通过成排的销钉实现了明显的分流；波状螺杆的偏心结构造成径向通道深度的周期性变化，从而在变流道处产生了拉伸流

动；Maddock 元件独特的深浅通道交替结构设计产生了螺旋流动模式，增强了剪切和拉伸作用。此外，除了 Maddock 元件和波状螺杆的深浅通道交汇处外，其他螺杆的径向对流都很弱。

- 2) 与 STD 螺杆相比，非常规螺杆元件引起的不同流动模式可增加聚合物熔体的拉伸变形。此外 Maddock 元件引起的螺旋流动可导致流体径向翻转，增强径向传质；同时极大地促进了速度场和速度梯度场之间的协同作用，从而提高了混合过程的效率。
- 3) 传热分析表明，Maddock 元件引起的螺旋流动可促进高温区向机筒内壁延伸。同时螺旋流动引起的速度方向变化改善了速度场和温度梯度场之间的协同作用，显著提高了热量和质量的传输效率，从而提高能量利用率。

该研究验证了聚合物场协同原理的科学性，阐明了聚合物挤出过程中热量和质量传输的内在机理，为提高聚合物挤出设备的混合工艺效率和能源利用率提供了新的理论指导。

作者贡献：概念化，潘威；方法学，潘威和鉴冉冉；调查，潘威、黄士争和鉴冉冉；写作—原稿准备，潘威、黄士争和鉴冉冉；写作—审阅和编辑，潘威、杨卫民、曾宪奎和鉴冉冉；可视化，潘威、黄士争、朱家威和鉴冉冉；监督，鉴冉冉；项目管理，鉴冉冉；经费获取，鉴冉冉。所有作者均已阅读并同意手稿的出版版本。

资金项目：该工作得到国家自然科学基金项目（批准号 52206095）、山东省自然科学基金（批准号 ZR2021QE232）和山东省高校青年创新项目（2023KJ102）的资助。

致谢：我们非常感谢多伦多大学的 Mohini Sain，感谢他帮助我们润色了本篇稿件的英语原文。

利益冲突：作者声明没有潜在的利益冲突。

术语：

ρ	density	kg/m ³
\vec{v}	fluid velocity vector	m/s
$\vec{\tau}$	stress tensor	Pa
P	pressure	Pa
g	gravitational acceleration	9.80 m/s ²
$\vec{\nabla}_v$	velocity gradient vector	s ⁻¹
t	time	s
α	interaction angle between velocity and velocity gradient	°
C_v	constant-volume specific heat capacity	J/(kg·K)
T	fluid temperature	K
\vec{q}	heat flux	W/m ²
$\vec{\nabla}T$	temperature gradient vector	K/m
K	heat transfer coefficient	W/(m ² ·K)

β	interaction angle between velocity and temperature gradient	$^{\circ}$
L_1	barrel length	mm
L_2	screw length	mm
D	screw diameter	mm
d	screw root diameter	mm
S	screw pitch	mm
u_i	i-velocity component in rectangular coordinate system	m/s
x_i	i-coordinate component in rectangular coordinate system	m
x_j	j-coordinate component in rectangular coordinate system	m
η	apparent viscosity	Pa · s
C_p	constant-pressure specific heat capacity	J/(kg · K)
φ	viscous dissipation term	-
η_0	zero shear viscosity	Pa · s
η_{∞}	viscosity at an infinite shear rate	Pa · s
λ	natural time	s
$\dot{\gamma}$	shear rate	s^{-1}
n	non-Newtonian index	-
T_{α}	reference temperature	K
k	thermal conductivity	W/(m · K)
f	coefficient of temperature sensibility	K^{-1}

参考文献

- Dong H, Liu Y, Zhao Z, et al. Carbon neutrality commitment for China: from vision to action. *Sustainability Science*. 2022; 17(5): 1741-1755. doi: 10.1007/s11625-022-01094-2
- Dong H, Xue M, Xiao Y, et al. Do carbon emissions impact the health of residents? Considering China's industrialization and urbanization. *Science of The Total Environment*. 2021; 758: 143688. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143688
- Yu S, Xiang H, Zhou J, et al. Typical polymer fiber materials: An overview and outlook. *Acta Polymerica Sinica*. 2020; 51(1): 39-54. doi:10.11777/j.issn1000-3304.2020.19148
- Li W, Liu Q, Zhang Y, et al. Biodegradable Materials and Green Processing for Green Electronics. *Advanced Materials*. 2020; 32(33). doi: 10.1002/adma.202001591
- Abeykoon C, Kelly AL, Vera-Sorroche J, et al. Process efficiency in polymer extrusion: Correlation between the energy demand and melt thermal stability. *Applied Energy*. 2014; 135: 560-571. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.086
- Deng J, Li K, Harkin-Jones E, et al. Energy monitoring and quality control of a single screw extruder. *Applied Energy*. 2014; 113: 1775-1785. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.084
- Dray RF. How to compare barrier screws. *Plastics Technology*. 2002; 48(12): 46-49, 59.
- Chen J, Dai P, Yao H, et al. Numerical analysis of mixing performance of mixing section in pin-barrel single-screw extruder. *Journal of Polymer Engineering*. 2011; 31(1): 53-62. doi: 10.1515/polyeng.2011.009
- Liu T, Du Y, He X. Statistical research on the mixing properties of wave based screws by numerical simulations. *International Polymer Processing*. 2023; 38(2): 200-213. doi: 10.1515/ipp-2022-4253
- Spalding MA, Sun X, Kodjie SL, et al. A maddock mixer design that mitigates gels in polyethylene resin film applications. *Journal of Plastic Film & Sheeting*. 2022; 39(2): 174-189. doi: 10.1177/87560879221124172
- Formela K, Cysewska M, Haponiuk J. The influence of screw configuration and screw speed of co-rotating twin screw extruder on the properties of products obtained by thermomechanical reclaiming of ground tire rubber. *Polimery*. 2014; 59(02): 170-177. doi: 10.14314/polimery.2014.170
- Jian 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. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022; 186: 122517. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122517
13. Jian 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. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 224: 120090. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120090
 14. Abeykoon C, Pérez P, Kelly AL. The effect of materials’ rheology on process energy consumption and melt thermal quality in polymer extrusion. *Polymer Engineering & Science*. 2020; 60(6): 1244-1265. doi: 10.1002/pen.25377
 15. Jian R, Yang W, Xie P, 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. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 164: 114448. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114448
 16. Jian R, Shi Z, Liu H, et al. Enhancing Mixing and Thermal Management of Recycled Carbon Composite Systems by Torsion-Induced Phase-to-Phase Thermal and Molecular Mobility. *Polymers*. 2020; 12(4): 771. doi: 10.3390/polym12040771
 17. Jian R, Xie P, Liu H, et al. Ductile forming of polymers by inducing torsional flow to enhance heat transfer and mixing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020; 283: 116715. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116715
 18. Jian R, Yang W, Cheng L, et al. Numerical analysis of enhanced heat transfer by incorporating torsion elements in the homogenizing section of polymer plasticization with the field synergy principle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017; 115: 946-953. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.121
 19. Dhakal P, Das SR, Poudyal H, et al. Numerical simulations of partially - filled rubber mixing in a 2 - wing rotor - equipped chamber. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016; 134(2). doi: 10.1002/app.44250
 20. Gaspar-Cunha A, Covas JA. The Plasticating Sequence in Barrier Extrusion Screws Part II: Experimental Assessment. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2014; 53(14): 1456-1466. doi: 10.1080/03602559.2014.909482
 21. Zitzenbacher G, Karlbauer R, Thiel H. A New Calculation Model and Optimization Method for Maddock Mixers in Single Screw Plasticising Technology. *International Polymer Processing*. 2007; 22(1): 73-81. doi: 10.3139/217.0109
 22. Dörner M, Marschik C, Schöppner V, et al. Development of an Analytical Model to Describe the Disperse Melting in Wave-Dispersion Screws. *Polymers*. 2020; 12(4): 946. doi: 10.3390/polym12040946

Article

Polymeric field synergy principle: Revealing the intrinsic mechanism of screw channel optimization to enhance thermal management and process efficiency

Wei Pan¹, Shizheng Huang¹, Jiawei Zhu¹, Xiankui Zeng¹, Weimin Yang², Ranran Jian^{1,*}

¹ College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong Province, China

² College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

* **Corresponding author:** Ranran Jian, jianrr@qust.edu.cn

Abstract: The process efficiency and energy efficiency of extrusion equipment emerge as pivotal challenges constraining the development of the polymer extrusion industry. This article presents a new principle of polymeric field synergy to guide the solution to the low mixing efficiency and energy utilization efficiency of traditional extrusion equipment. Finite element analysis was conducted on four novel unconventional screw configurations and compared with the traditional single-thread screw. Results revealed that more complicated melt flow patterns generated in the modified novel screw configurations enhanced the stretching deformation or helical flow. The stretching or helical flows to varying degrees during the melt extrusion process thereby improved the mixing and heat transport efficiency. Among them, helical flow induced by the Maddock element exhibited the most significant impact on stretching flow and ductile deformation in the flow field. Simultaneously, the helical flow caused radial motion of the internal material, significantly promoting the synergy between the velocity field, velocity gradient field, and temperature gradient field. This enhanced radial heat and mass transport efficiency within the screw channel, subsequently improving the overall operational efficiency of the equipment. The results of the finite element analysis have substantiated the scientific validity of the polymeric field synergy principle.

Keywords: polymer extrusion; mixing efficiency; heat and mass transport efficiency; energy utilization efficiency; field synergy principle