http://pmse.scu.edu.cn

# 聚合物加工基本流型对挤出性能的影响及其场协同作用

黄士争[1], 魏兴岳[1], 蒋新沛[1], 张 鹏[1], 黄天宇[1]
王世檩[1], 潘 威[1], 杨卫民[2], 鉴冉冉[1,2]
(1. 青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061; 2. 北京化工大学 英蓝实验室,北京 100029)

**摘要:**流动形式是直接影响聚合物塑化挤出质量的重要因素。基于聚合物场协同塑化输运混炼理论,设计了 3 种流道:平行平板流道 M1、部分收敛流道 M2 和全收敛流道 M3。利用 ANSYS Polyflow 对其进行数值模拟,对比分析了不同模型及边界条件下胶料的流动形式,及其对混合性能、拉伸/剪切比和温升情况的影响。结果表明,在胶料的挤出塑化过程中,聚合物流道对胶料塑化质量的影响较大。通过对比非弹性应力张量第一特征值及时均混合效率等混合评估指标发现,同一边界条件下,收敛流道 M2 和 M3 的混合性能均优于平行平板流道 M1,其中 M2 混合性能最优,聚合物熔体在流经 M2 的收敛流道顶端时,被强制会聚再发散,提高了胶料的塑化质量。此外,与剪切流动相比,胶料在拉伸流主导的流动形式下黏性生热更少,能耗更低。

**关键词:**场协同原理;流变学;聚合物加工理论;塑化挤出
**中图分类号:**TQ316 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7555(2026)01-0129-10

现代制造业的快速发展对聚合物制品的成型精度提出了更高要求。高端聚合物制品在军工、航空航天、电子电器及医疗卫生等高科技领域的应用日益广泛,对其成型精度与性能也提出了更严苛的标准[1]。高分子聚合物加工中的熔融塑化是一个涉及相转移和黏弹性行为的复杂过程,包括固体输送、压缩、熔融和混炼等多个阶段。其中,物料熔融过程所消耗的能量约占加工总能耗的 70%~80%,因此,提高塑化效率、缩短热机械作用时间,对实现聚合物加工节能降耗具有重大意义[2]。

近年来,研究人员不断深化聚合物加工理论,并基于理论优化挤出结构,对现有的塑化系统进行了多项改进。贾世魁等[3]将螺杆与非对称销钉结合,所设计的销钉螺杆挤出段可形成高剪切区,打破了螺槽间原有的核心流动区,增强了塑化混合效果。张杰等[4]基于混沌理论设计了作用于聚合物塑化过程的振动装置,有效促进了熔体的熔融流动与混合[5]。Kim 等[6]开发了一种新型混合增强型螺杆,通过在计量段加入周期性屏障元件扰动稳态流场,诱发混沌流动,大幅改善了塑化混炼效果。殷小春等[7]研究指出,聚合物加工体积的周期性变化所产生的拉伸流场可显著增强混合效果,并据此提出了基于拉伸流动的聚合物加工方法。班董董[8]对不同偏心距的双波螺杆元件进行了优化,结果表明,随着偏心距增大,剪切作用与应力显著增强,拉伸流场比例提高,混合指数与停留时间也相应增加,更有利于物料的破碎与分散混合。

然而,以往的研究多集中于混合性能的改善,对聚合物加工过程中多物理场之间的耦合关系及内在作用机制认识尚不充分,导致难以同时提升聚合物塑化加工过程中的综合传热传质性能与混炼塑化效果,缺乏对其进行整体优化的有效方法。针对这一

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0233
收稿日期: 2024-12-16
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); 山东省高等学校青创科技支持计划(2023KJ102)
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

问题,笔者所在团队基于聚合物加工流变学与流体力学分析,提出了聚合物场协同塑化输运混炼理论[9, 10]。该理论从多场协同的角度重新审视了高分子聚合物在塑化挤出过程中强化混合与强制对流换热的内在机理,主要包括混合协同与传热协同 2 个方面。通过动量守恒推导得到了聚合物熔体流动过程中的混合强化场协同方程,分析了速度场和速度梯度场之间的协同关系,及其与剪切流和拉伸流的关联,为混合性能优化提供了理论指导;通过能量守恒推导出考虑黏性耗散(即内热源)的聚合物熔体热输运过程的传热强化场协同方程,揭示了速度场和温度梯度场之间的协同对强化对流传热的作用机制,为传热性能优化提供了依据。基于该理论,团队设计了一种新型螺杆元件——场协同拉伸元件[11]。该元件能够使熔体主要呈现拉伸流动,其独特的收敛流道可以改变速度场方向,使速度矢量产生径向分量,从而促进速度场与温度梯度场、速度梯度场的协同作用,增强对流换热效果,实现局部热量与颗粒的高效混合,最终提高挤出制品的质量[12]。

本文采用 ANSYS Polyflow 对 3 种不同形式的流道进行了数值模拟,从传热学与聚合物加工流变学的角度,分析了流道形式对聚合物加工过程中传热及塑化混炼效果的影响,基于多场协同理论对其内在作用机理进行了解释,为后续新型流道螺杆结构的设计提供了参考。

## 1 理论模型

### 1.1 物理模型

Fig.1 展示了普通螺纹元件与场协同拉伸元件的流道结构示意图。为简化分析,假设螺杆静止、机筒反方向转动。在普通螺纹元件流道中,聚合物熔体的流动以机筒拖曳作用下产生的拖曳流为主导,流动形式为简单剪切层流,剪切速率与流速在机筒壁面或流道顶部最大,在螺杆根部最小甚至为 0[13],如 Fig.1(a)所示。在场协同拉伸元件中,收敛流道改变了熔体的流动行为,使其不再以简单剪切层流为主。如 Fig.1(b)所示,熔体在流经收敛流道斜面时发生了明显的径向速度偏转,被强制会聚后再发散,从而产生显著的拉伸流动。图中同时给出了三维实体结构及二维简化流道结构示意图,普通螺纹元件流道简化为矩形平行平板,场协同拉伸元件的流道简化为楔形收敛流道,上升区段可视为典型的收敛区域。

采用 Solidworks 建立 3 种流道:平行平板流道(M1)、部分收敛流道(M2)、全收敛流道(M3),结构参数如 Fig.2 和 Tab.1 所示。

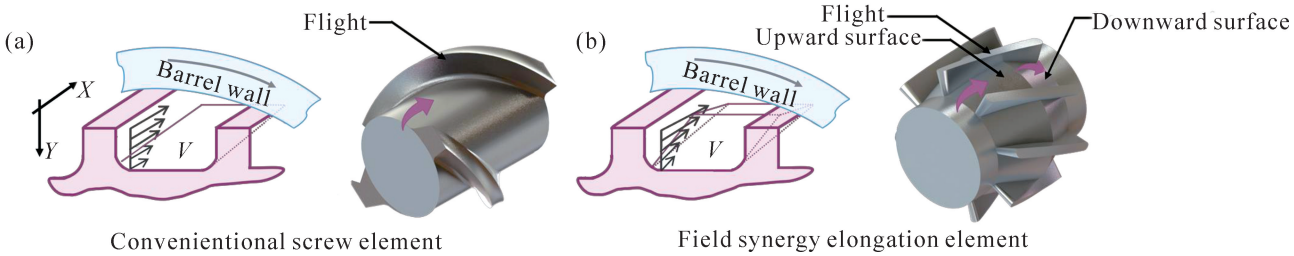



**Fig. 1 Schematic diagram of flow channel**

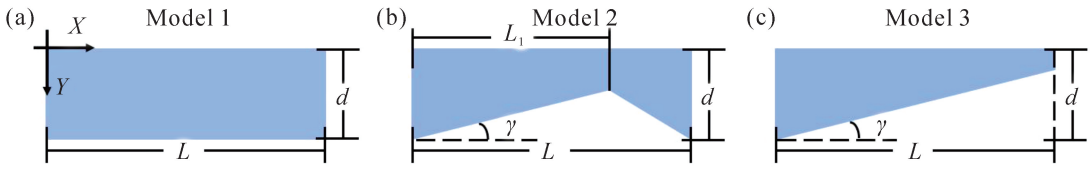



**Fig. 2 Physical model: (a) parallel flat plate flow channel; (b) partial convergence channel; (c) fully convergent flow channel**

**Tab. 1　Geometric parameters of the physical model**

| Parameter | Symbol | Value |
|---|---|---|
| Length of the model | $L$ | 42 mm |
| Width of the model | $d$ | 10 mm |
| Length of the wedge | $L_1$ | 28 mm |
| Oblique angle | $\gamma$ | 10° |

## 1.2　数学模型和边界条件

模拟流体选择三元乙丙橡胶,根据聚合物成型理论,本次模拟做出以下基本假设:模拟流体为不可压缩的非牛顿流体,熔体流动为层流非等温瞬态流动,熔体完全充满流道,且忽略重力的影响。在以上假设的情况下,建立流场的控制方程,公式如式(1~3)。

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:

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

本构方程采用 Bird-Carreau 模型和近似 Arrhenius 模型进行描述

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

**Tab. 2　Fluid properties parameters**

| Parameter | Symbol | Value |
|---|---|---|
| Density | $\rho$ | 1150 kg·m$^{-3}$ |
| Specific heatcapacity | $C_p$ | 1600 J·kg$^{-1}$·K$^{-1}$ |
| Thermal conductivity | $k$ | 0.25 W·m$^{-1}$·K$^{-1}$ |
| Viscosity at an infinite shear rate | $\eta_\infty$ | 0 Pa·s |
| Zero shear viscosity | $\eta_0$ | 175 kPa·s |
| Natural time | $\lambda$ | 14 s |
| Non-Newtonian index | $n$ | 0.408 |
| Coefficient of temperature sensibility | $f$ | 2.5×10$^{-3}$ K$^{-1}$ |
| Reference temperature | $T_\alpha$ | 373.15 K |

流域使用 ICEM 进行网格划分,将模型左右上下 4 条边框分别定义为流动入口(Inlet)、流动出口(Outlet)、模型上壁面(Walls)和模型下壁面(Wallx)4 个边界,边界条件如 Tab.3 所示。

**Tab. 3　Boundary conditions**

| Boundary | Flow conditions | | | | Thermal |
|---|---|---|---|---|---|
| | Speed driven (pressure flow) | Dragging drive (dragging flow) | Pressure & Drag | Speed driven (stretch flow) | conditions |
| Inlet | $V_n=50$ mm·s$^{-1}$ | 0 Pa | $V_n=50$ mm·s$^{-1}$ | $V_n=50$ mm·s$^{-1}$ | 353.15 K |
| Outlet | Outflow | Outflow | Outflow | Outflow | Heat outflow |
| Walls | Stationary, no-slipwall | $V_x=50$ mm·s$^{-1}$ | $V_x=50$ mm·s$^{-1}$ | Slip wall | 353.15 K |
| Wallx | | Stationary, no-slip wall | | Slip wall | Insulated boundary |

## 2 结果与讨论

### 2.1 流场及混合分析

Fig.3(a)为不同模型边界条件下的速度分布。可以看出,在壁面无滑移条件下,沿流动方向,平行平板流道 M1 在速度驱动(压力流)、拖曳驱动(拖曳流)、压力 & 拖曳及部分收敛流道 M2、全收敛流道 M3 在拖曳驱动(拖曳流)下,流动形式均为剪切流主导;M2 与 M3 在速度驱动、壁面滑移条件下流动形式为拉伸流主导;其余流动形式为剪切流动叠加拉伸流动。M1 在速度驱动、壁面滑移条件下为刚性运动。Fig.3(b)为不同模型边界条件下的胶料粒子流变分布情况。与 Fig.3(a)中结果相一致,M1 在 4 种边界条件下几乎均不存在拉伸形变,而在速度驱动(压力流)及压力 & 拖曳驱动条件下,聚合物在 M2,M3 收敛流道中均产生了一定程度的拉伸形变,总体表现为剪切形变叠加拉伸形变。值得注意的是,在速度驱动(拉伸流)边界条件下,M2 和 M3 收敛流道中的聚合物沿流动方向发生了纯拉伸形变。对比同一边界条件下 M1 的流动形式不难得出,流道对聚合物的流动形式有重要影响,流道的设计将直接影响聚合物塑化加工过程中胶料的流动形式。众所周知,在聚合物加工过程中,经过拉伸形变的胶料往往比纯剪切形变下具有更好的综合性能[14],因此,在设计新型螺纹元件时,应侧重于开发能够促进胶料产生拉伸形变的流道,以增强塑化挤出胶料的综合性能。

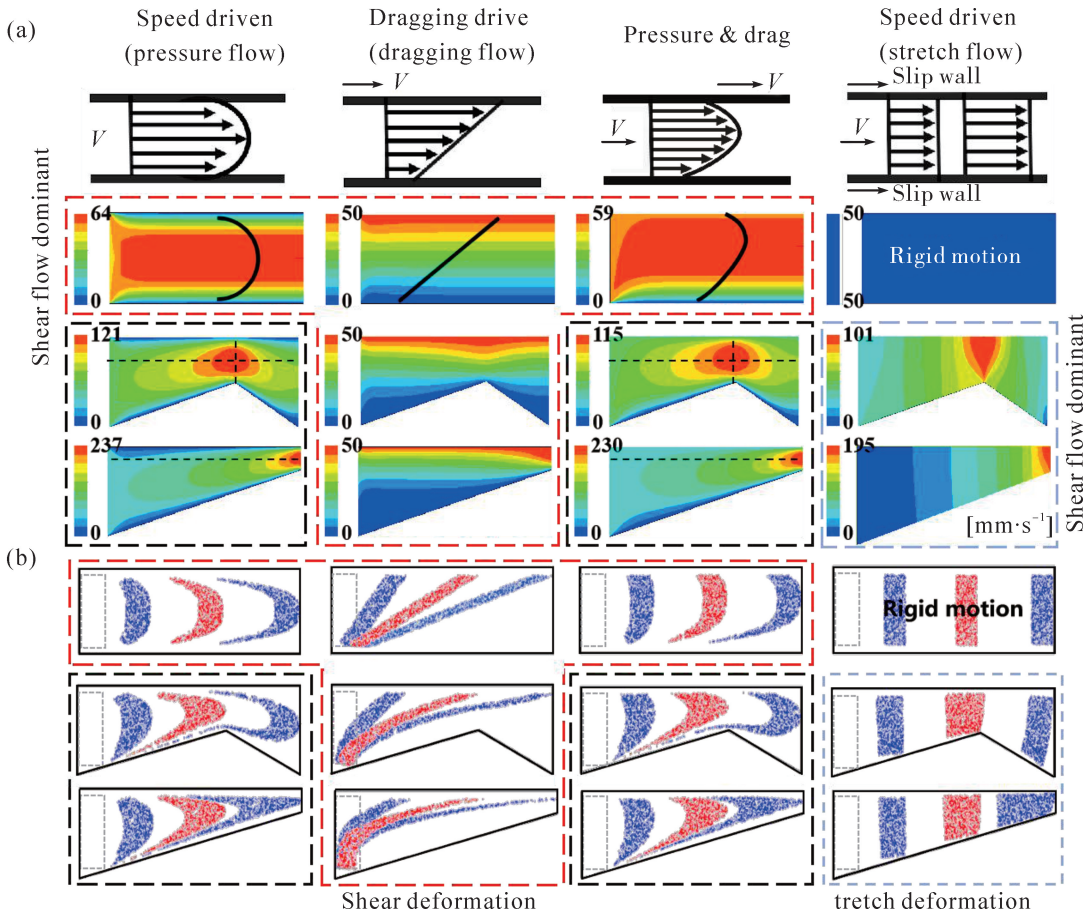



**Fig. 3 Flow forms of polymers under different models and boundary conditions**

(a): distribution of the velocity field; (b): rheological distribution of the rubber compound particles

Fig.4 为相同边界条件下不同流道模型的混合能力,通过非弹性应力张量的第一特征值和时均混合效率进行表征[15]。从前面的分析可知,不同流道模型之间流动形式差异较大。在速度驱动(拉伸流)

条件下,聚合物在 M1 中主要表现为刚性运动,几乎不发生混合。Fig.4(a)给出了各流道在相同边界条件下的非弹性应力张量的第一特征值分布。该特征值量化了非弹性变形诱导的高分子链沿主流方向的最大拉伸应力,可直接反映材料流动过程中分子链的伸展程度。从图中可以看出,M2 中产生拉伸和破坏粒子的应力最大,M3 次之,M1 最小。Fig.4(b)为相同边界条件下不同流道模型的时均混合效率分布,其结果与 Fig.4(a)一致,物料在拉伸作用下面积伸展的程度,即粒子整体的混合情况,表现为 M2>M3>M1。对于 3 种流道来说,M1 混合性能最差,结合 Fig.3 结论分析可知,这是由于 M1 中几乎不存在拉伸流动,而 M2 与 M3 中熔体的拉伸作用效果更好,混合效果更佳[16]。M2 的混合性能比 M3 好,结合 Fig.3(b)分析可知,这是由于 M2 中部分收敛流道的存在导致聚合物熔体流经楔形收敛流道顶端时,粒子被强制会聚再发散,促进了胶料混合。

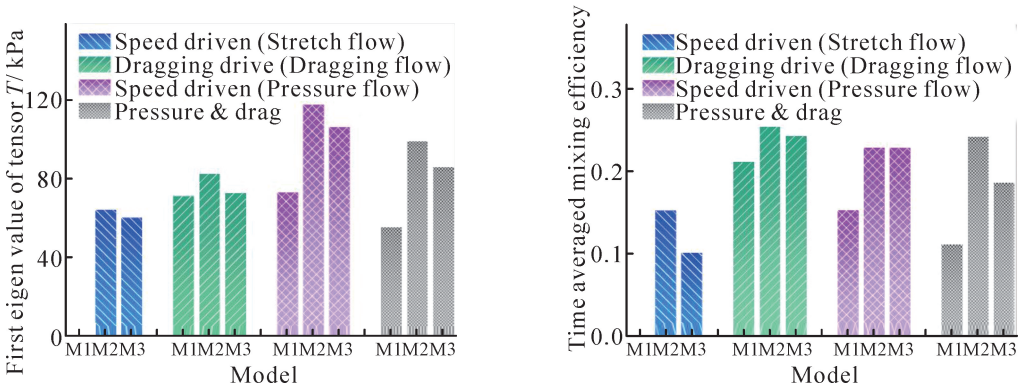



**Fig. 4　Mixing performance: (a) first eigen value of tensor; (b) time averaged mixing efficiency**

## 2.2　混合协同分析

对于二维运动坐标系,速度矢量($V$)由沿 $X$ 方向速度分量($V_X$)与沿 $Y$ 方向速度分量($V_Y$)组成,如 Fig.5(a)所示。从 Tab.4 可以看出,在 3 种流道中,聚合物熔体流动速度 $V_X>>V_Y$(2 个数量级及以上),因此,在后续讨论中忽略 $V_Y$ 的影响,只考虑 $V_X$。相应地,此时速度梯度$\nabla V_X$ 由沿 $X$ 方向速度梯度分量$(\nabla V_X)_X$ 与沿 $Y$ 方向的速度梯度分量$(\nabla V_X)_Y$ 组成。根据聚合物场协同塑化输运混炼理论,将速度 $V_X$ 与速度梯度$\nabla V_X$ 之间夹角定义为协同角 $\alpha$,如 Fig.5(b)所示。当速度梯度与速度 $V_X$ 方向一致时($\alpha=0°$),聚合物熔体被拉伸,因此用速度梯度$\nabla V_X$ 的 $X$ 分量$(\nabla V_X)_X$ 来衡量熔体的拉伸作用效果,将其命名为全局拉伸速率;同理,当速度梯度与速度 $V_X$ 方向垂直时($\alpha=90°$),聚合物熔体承受剪切作用,用速度梯度$\nabla V_X$ 的 $Y$ 分量$(\nabla V_X)_Y$ 来衡量熔体的剪切作用效果,将其命名为全局剪切速率。将全局拉伸速率与全局剪切速率之间的比值定义为拉伸/剪切比,以衡量拉伸流动在整个流动中所占的比重。

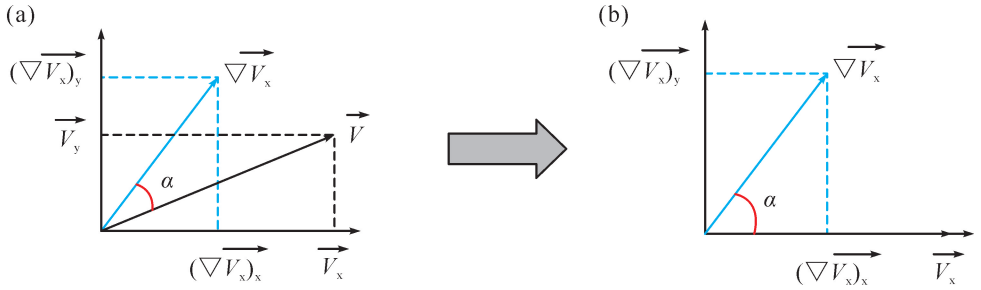



**Fig. 5　Mixing synergy theoretical analysis: (a) before simplification; (b) after simplification**

**Tab. 4 Velocity component sizes under different models and boundary conditions**

| Model | Velocity /(mm·s$^{-1}$) | Speed driven (stretch flow) | Speed driven (pressure flow) | Dragging driven (dragging flow) | Pressure & drag |
|---|---|---|---|---|---|
| M1 | $V_x$ | 5.0e+1 | 5.0e+1 | 2.5e+1 | 5.0e+1 |
| | $V_y$ | 1.2e−16 | 2.5e−3 | 1.2e−2 | 6.5e−1 |
| M2 | $V_x$ | 6.6e+1 | 6.6e+1 | 2.2e+1 | 6.6e+1 |
| | $V_y$ | 4.2e−1 | 7.9e−1 | 2.2e−1 | 1.6e−0 |
| M3 | $V_x$ | 7.9e+1 | 7.9e+1 | 1.7+1 | 7.9e+1 |
| | $V_y$ | 7.0e−1 | 6.9e−2 | 4.4e−2 | 6.9e−1 |

Fig.6(a)和 Fig.6(b)为不同模型及边界条件下速度矢量和速度梯度场之间协同角($\alpha$)与拉伸/剪切比的分布情况。从图中可以看出,当协同角较小时($\alpha$<30°),拉伸/剪切比较大,熔体流动形式以拉伸流为主导;协同角较大时(80°<$\alpha$<90°),拉伸/剪切比较小,熔体流动形式以剪切流为主导,同时线性拟合结果表明,拉伸/剪切比与协同角成负相关,相关系数 $R$=−0.95。Fig.6(c)为协同角与拉伸/剪切比云图分布,可以直观看出,协同角与拉伸/剪切比呈严格负相关,即协同角越小,拉伸/剪切比越大,拉伸流动占比越高;协同角越大,拉伸/剪切比越小,剪切流动占比越高。

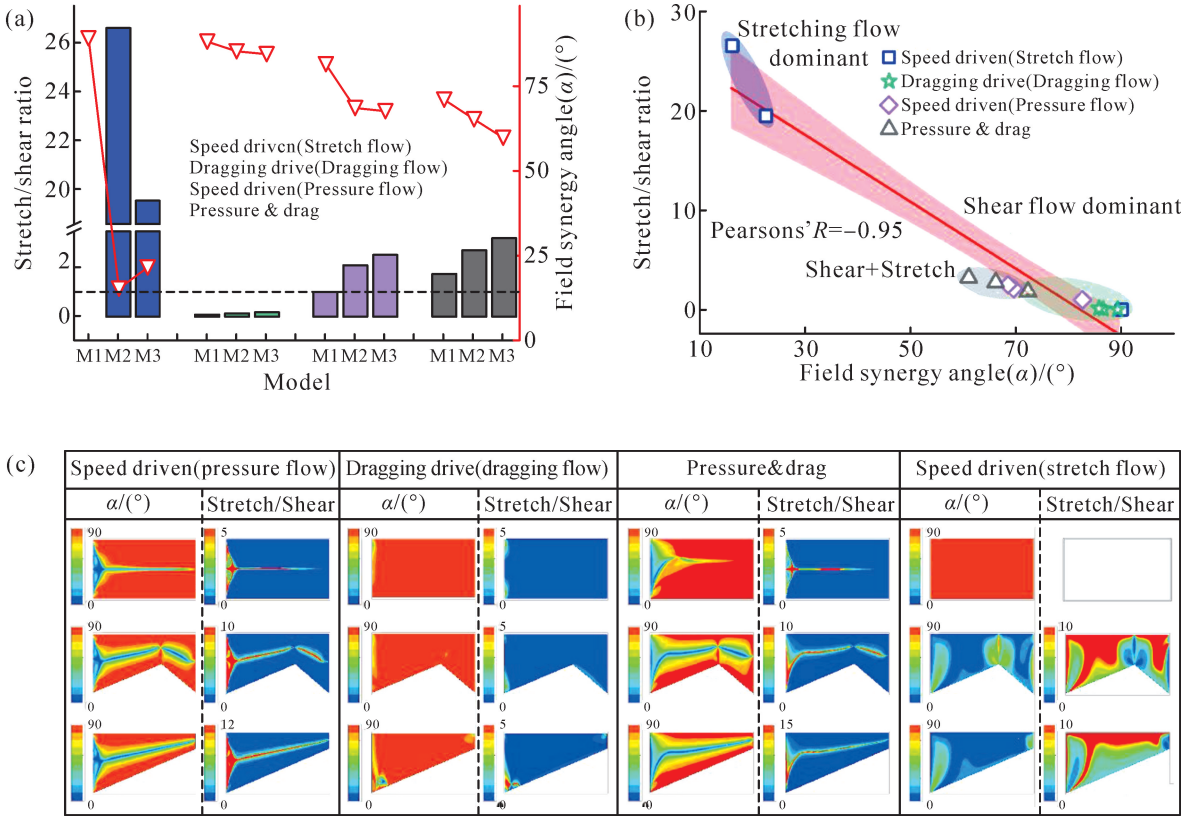



**Fig. 6 Mixing synergy analysis: (a) distribution of the velocity synergy angle $\alpha$ and the stretching/shearing ratio; (b) linear fitting results; (c) contour map distribution**

### 2.3　传热协同分析

Fig.7 为不同模型及边界条件下沿流动方向不同位置的温度分布情况。在速度驱动(压力流)、拖曳驱动(拖曳流)及压力 & 拖曳驱动下,M1,M2 和 M3 的温度依次升高,温差依次增大,结合前面流场分析可知,这是因为在 3 种边界条件下,3 组模型中熔体流速依次增大,高黏度聚合物熔体之间内摩擦增大,黏性生热更剧烈。在聚合物加工过程中,胶料温升主要来源于壁面(螺杆表面与机筒内表面)剪切生热,从温度线图可以观察到,在剪切流主导与剪切流叠加拉伸流驱动形式下,由于剪切生热的存在,上壁面(相当于机筒内表面)与下壁面(相当于螺杆根部)温升显著,温度极高;相比之下,拉伸流主导下 $Y$ 向温度变化几乎保持水平,$Y$ 向(相当于挤出机径向)温差极小,胶料均匀性更好。与此同时,横向对比同一模型不同边界下的温度变化情况可以看出,$M_2$ 和 $M_3$ 在速度驱动(拉伸流),即拉伸流主导下,聚合物熔体经历拉伸流变生热极少,温升仅有 0.16 K 与 0.11 K。因此,开发拉伸流主导的新型螺纹元件,不仅能够有效地增强混合、提高制品均匀性,还有助于推动橡胶低温挤出技术的应用。

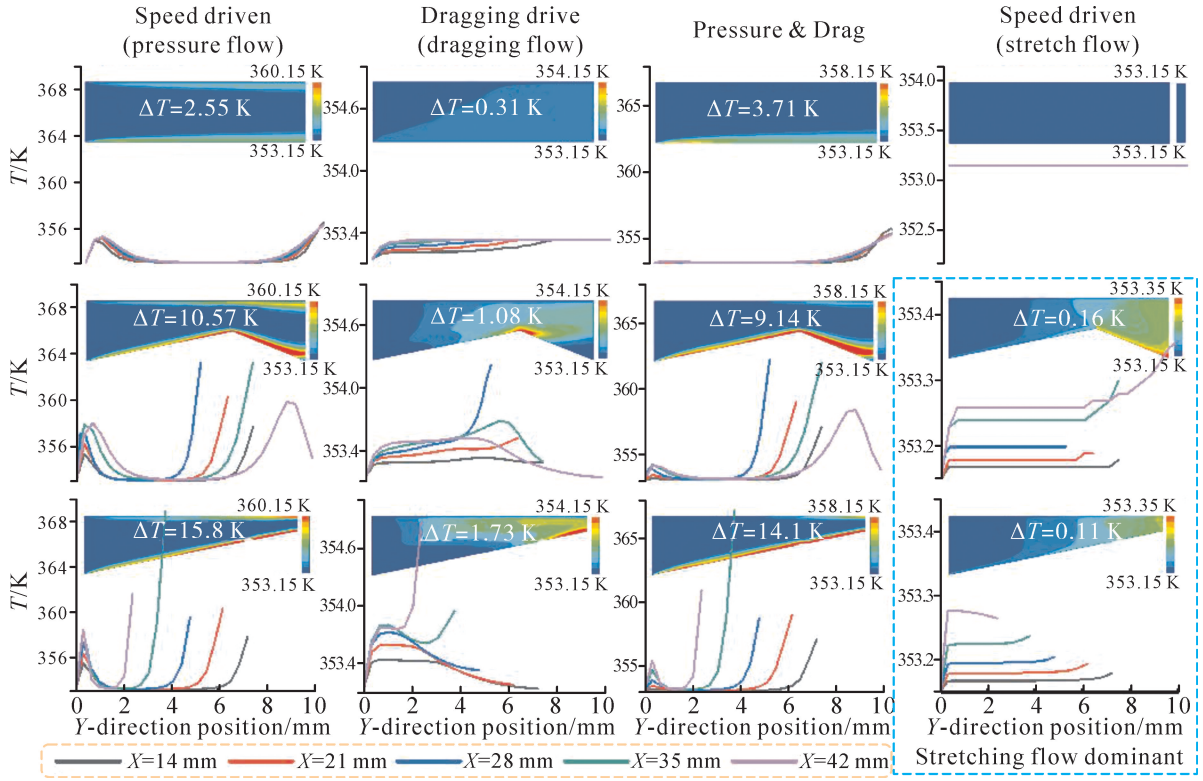



**Fig. 7　Temperature distribution at different positions along the flow direction under different models and boundary conditions**

Fig.8(a)和 Fig.8(b)为不同模型及边界条件下速度矢量和温度梯度场之间的协同角 $\beta$ 与对流换热系数的分布情况。从 Fig.8(a)与 Fig.8(b)可以看出,同一边界条件下,当协同角较小时,对流换热效果更好,即 M3>M2>M1。分析可知,这是由于 M2 和 M3 中收敛流道的存在使速度矢量发生了明显的偏转,大大降低了速度矢量与温度梯度场(方向为 $Y$ 向)之间的夹角,增强了速度场与温度梯度场的协同作用效果,Fig.8(c)的温度协同角分布云图也印证了这一结论,排除入口影响后,可以看出,M2 与 M3 的低协同角的区域远大于 M1。根据场协同理论,速度矢量与温度梯度场之间夹角越小,协同作用越好,传热效果越好,即低协同角,高传热能力。

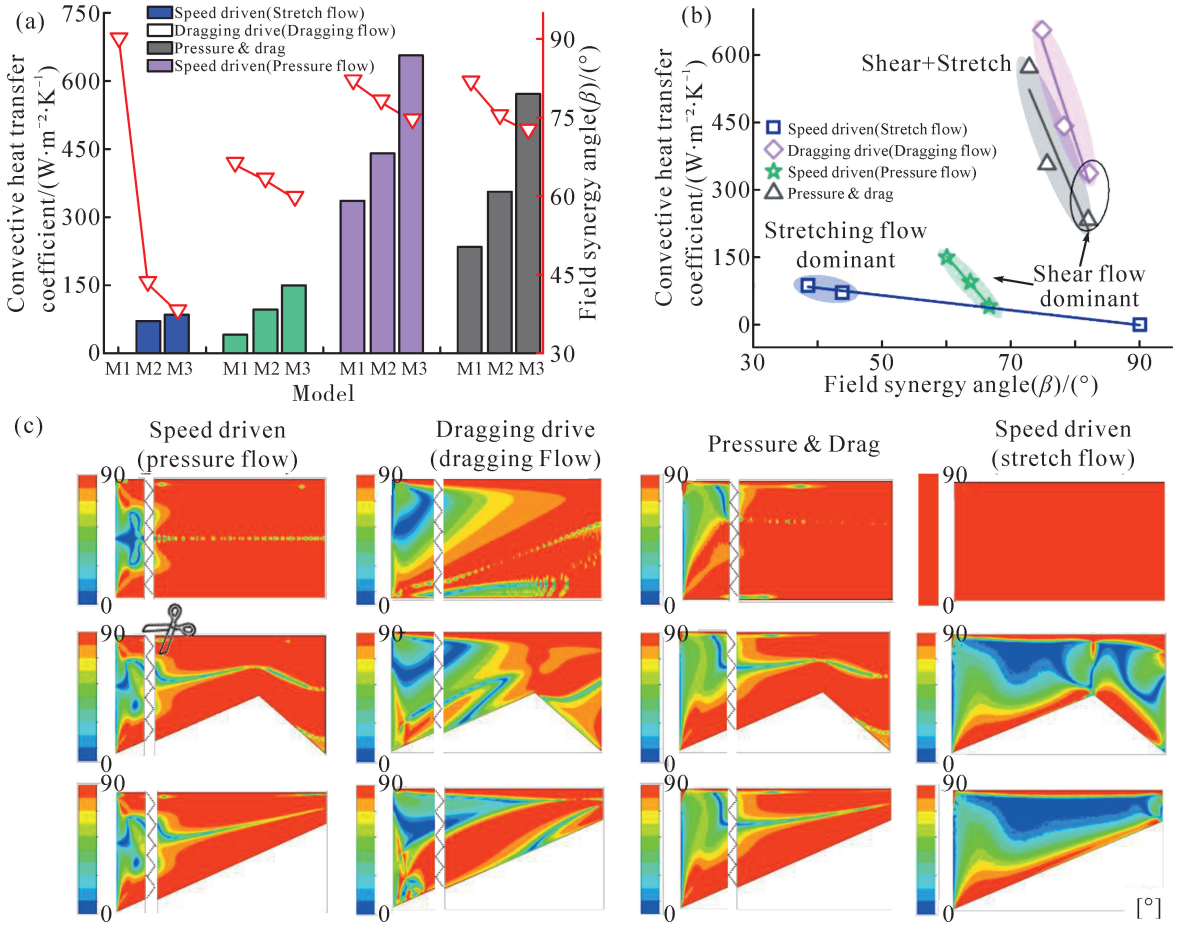



**Fig. 8 Heat transfer synergy analysis: (a) convective heat transfer coefficient and temperature synergy angle $\beta$ distribution; (b) linear fitting results; (c) distribution of the temperature synergy angle $\beta$**

## 3 结论

本文对聚合物流体在不同模型边界条件下的挤出过程进行了数值模拟,对比分析了不同模型边界条件下的流动形式、混合性能、拉伸/剪切比及温升情况,并基于聚合物场协同塑化输运混炼理论对拉伸流强化混合及强化传热的内在机理进行了分析,得到以下结论。

(1)在胶料的挤出塑化过程中,聚合物流道对胶料塑化质量的影响较大。通过对比非弹性应力张量第一特征值及时均混合效率等混合评估指标发现,同一边界条件下,部分收敛流道 M2、全收敛流道 M3 的混合性能均优于平行平板流道 M1,此外,粒子流经 M2 楔形收敛流道顶端时,被强制会聚再发散,因此 M2 的混合性能最优。

(2)通过对同一边界条件不同模型的拉伸/剪切比分析可知,拉伸/剪切比与速度协同角 $\alpha$ 成负相关,相关系数 $R=-0.95$。胶料粒子流经收敛流道时,速度场与速度梯度场之间的夹角更小,协同作用更好,拉伸流动比重更大。

(3)通过对同一边界条件不同模型的传热场协同分析可知,部分收敛流道 M2、全收敛流道 M3 中速度矢量与温度梯度场之间夹角($\beta$)更小,协同作用更好,传热效果更好。与剪切流动相比,胶料在拉伸流主导的流动形式下黏性生热更少,因此,开发拉伸流主导的新型螺纹元件,有望实现橡胶低温挤出技术的应用。

**参考文献:**

[1] 李福海, 王达, 王建. 塑料齿轮及其成型制造技术进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(11): 175-182.
Li F H, Wang D, Wang J. Progress of plastic gear and its forming and manufacturing techniques[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(11): 175-182.

[2] 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.

[3] 贾世魁, 董林福. 销钉双螺杆挤出机的结构研究与流场分析[J]. 橡塑技术与装备, 2022, 48(1): 57-60.
Jia S K, Dong L F. Structure research and flow field analysis of pin twin screw extruder[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2022, 48(1): 57-60.

[4] 张杰, 申开智, 严正. 振动技术在注射成型中的应用[J]. 现代塑料加工应用, 2001(4): 24-27.
Zhang J, Shen K Z, Yan Z. The use of vibration technology in injection molding[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2001(4): 24-27.

[5] 刘安华, 龚克成. 高分子材料粘弹过程的混沌运动[J]. 高分子材料科学与工程, 2001, 17(1): 11-15.
Liu A H, Gong K C. Chaotic movement of visco elestic process in macromolecular materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2001, 17(1): 11-15.

[6] Kim S J, Kwon TH. A simple approach to determining three-dimensional screw characteristics in the metering zone of extrusion processes using a total shape factor[J]. Polymer Engineering & Science, 1995, 35: 274-83.

[7] 殷小春, 汤邦, 余忠伟, 等. 叶片挤出机熔体压力响应及挤出特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(11): 117-121.
Yin X C, Tang B, Yu Z W, *et al*. Melt pressure response and extrusion characteristics in vaneextruder[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(11): 117-121.

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

[9] Jian RR, Yang W M, Cheng L S, *et al*. Numerical analysis of enhanced heat transfer by incorporating torsion elements in the homogenizing section of polymer plasticization with the field synergy principle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 946-953.

[10] 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.

[11] 黄士争, 潘威, 朱家威, 等. 场协同拉伸螺杆强化混合与传热机理的研究[J]. 中国塑料, 2024, 38(9): 101-106.
Huang S Z, Pan W, Zhu J W, *et al*. Study on enhancement mechanism of mixing and heat transfer of field-synergetic elongation screw[J]. China Plastics, 2024, 38(9): 101-106.

[12] 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.

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

[14] Kazmer O D, Grosskopf M C, Rondeau D, *et al*. Design and evaluation of general purpose, barrier, and multichannel plasticizing extrusion screws[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60: 752-764.

[15] 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.

[16] Ayeyemi T, Recena R, López G M A, *et al*. Efficiency of vivianite from water purification depending on its mixing with superphosphate and application method[J]. Agronomy, 2024, 14: 2639-2639.

# Field Synergy for the Influence of Basic Flow Patterns on Polymer Extrusion Performance

Shizheng Huang[1], Xingyue Wei[1], Xinpei Jiang[1], Peng Zhang[1], Tianyu Huang[1], Shilin Wang[1], Wei Pan[1]
Weimin Yang[2], Ranran Jian[1,2]
(*1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. En-Learn Laboratory, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*)

**ABSTRACT:** The flow form is an important factor that directly affects the quality of polymer plasticization extrusion. Based on the principle of polymer field synergistic plasticization, transportation and mixing, three types of channels were designed, parallel flat channel M1, partially converging channel M2, and fully converging channel M3. The numerical simulation was carried out by using ANSYS Polyflow. Comparative analysis was conducted on the flow patterns of rubber materials under different models and boundary conditions, as well as their effects on mixing performance, tensile/shear ratio, and temperature rise. The results indicate that during the extrusion plasticization process of rubber material, the polymer flow channel has a significant impact on the plasticization quality of rubber material. By comparing the first eigenvalue of the inelastic stress tensor and the mixed evaluation indicators such as time averaged mixing efficiency, it is found that under the same boundary conditions, the mixing performance of converging channels M2 and M3 is better than that of parallel flat channel M1. Among them, M2 has the best mixing performance. When polymer melt flows through the top of the converging channel of M2, it is forced to converge and then diverge, which improves the plasticization quality of the rubber material. In addition, compared with shear flow, the adhesive material generates less viscous heat and consumes less energy in the flow form dominated by tensile flow.

**Keywords:** field synergy principle; rheology; polymer processing theory; plasticizing extrusion