http://pmse.scu.edu.cn

基于权矩阵分析法的场协同扭转螺杆多目标正交优化设计

潘 威[1], 黄士争[1], 魏兴岳[1], 蒋新沛[1], 王世龙[1], 张 鹏[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:螺杆作为挤出塑化系统的关键部件,其结构对挤出质量和精度有着至关重要的影响。文中采用数值模拟的方法对场协同扭转元件结构进行了正交试验优化设计,结合混合性能及传热性能对正交试验结果进行了权矩阵分析,确定了最优与最差扭转元件结构。随后,选取正交试验得到的最优与最差扭转元件结构组成 2 种不同的场协同扭转螺杆,与普通螺杆进行了比较。结果表明,当场协同扭转元件的槽宽深比接近 1 时,其综合性能最优。2 种场协同扭转螺杆的混合与传热性能均优于普通螺纹螺杆,其中装配有最优扭转元件的场协同扭转螺杆具有最佳的综合性能,这验证了权矩阵分析结果的准确性。根据聚合物场协同塑化输运混炼理论分析可知,场协同扭转元件能够诱导流体形成螺旋流动,改善速度场与速度梯度场、温度梯度场之间的协同性,进而达到提升螺杆综合性能的效果。

关键词:场协同扭转螺杆;挤出塑化;正交试验;权矩阵分析
中图分类号:TQ320.5+2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-7555(2025)12-0106-10

现代制造业的飞速发展对聚合物制品的成型质量和精度要求越来越高,先进聚合物制品在医疗、汽车制造、航空航天、军工国防等领域的需求越来越大[1,2]。传统的螺杆挤出塑化系统由于螺杆结构限制,导致高黏度聚合物在塑化过程中传热传质不足、动态生热严重、混合及热均匀性差,易产生各种制品缺陷,难以满足高质量聚合物制品的加工[3,4]。为了提高塑化质量和效率,如何对聚合物加工温度和热均匀性进行有效管理成为该领域研究的重点和亟待解决的难题[5,6]。

螺杆作为挤出塑化系统中的关键部件,其结构对聚合物挤出质量有至关重要的影响。因此,许多国内外研究者针对螺杆结构进行了创新。Kim 等[7]基于混沌理论设计了混沌螺杆,其特点是在螺杆通道中插入障碍物,用以打破规则流动中的封闭流线,引发混沌混合。实验结果表明,混沌流动显著提高了螺杆挤出系统的混合能力。班董董等[8]采用聚合物流动分析软件 Polyflow 对不同偏心距的波状单螺杆元件进行了流场和混合性能的数值模拟。研究发现,波状螺杆分散混合和分布混合性能强,并均随着偏心距的增大而逐渐增强。Wen 等[9]使用数值模拟研究了叶片挤出机的混合特性。研究发现,与双螺杆挤出机相比,叶片挤出机产生的流动具有更强的拉伸效果,可以迫使材料颗粒分解成更小的颗粒。Spalding 等[10]针对 Maddock 混合元件的作用机制进行了研究。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。尽管上述创新结构在一定程度上增强了螺杆挤出机的混合和热性能,但它们所依赖的

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0219
收稿日期: 2024-11-04
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

理论方法存在一定的局限性,特别是在传热机理方面。当前研究的重点在于基于流变学知识的混合和黏性耗散。由于聚合物的导热性极差,混合增强引起的局部过热问题仍未得到解决。增强聚合物熔体内部的热传输,同时改善混合以消除局部热点并获得均匀的热分布,成为一个日益严峻的挑战。

针对这一挑战,笔者所在团队将场协同原理引入聚合物加工过程,提出了聚合物场协同塑化输运混炼理论,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,分为混合协同和传热协同。混合协同通过分析速度场和速度梯度场的协同性与剪切流、拉伸流之间的关系来指导混合性能的优化,传热协同通过分析速度场和温度梯度场的协同性与对流传热之间的关系来指导传热性能的优化。根据此理论设计了场协同扭转元件,通过诱导流体产生螺旋流动来改善聚合物挤出过程中的混合与热分布均匀性。目前,大量研究已证明场协同扭转元件的优异性能,但尚缺乏对场协同扭转元件特征尺寸的优化研究[11~13]。本文通过分析场协同扭转元件的结构,选定场协同扭转元件的棱数、棱宽和槽深作为优化因素,采用仿真模拟的方法,设计了正交试验,通过权矩阵分析完成了对场协同扭转元件的优化设计,并进行了验证。

1　正交试验优化设计

1.1　权矩阵分析方法

权矩阵分析是一种用于实验设计和优化的方法,该方法是基于正交试验方案,建立 1 个三层结构模型,分别为考察指标层、因素层和水平层。同时,针对三层结构模型,定义相应的数据矩阵。

定义试验考察指标层矩阵:若正交试验中有 l 个因素,每个因素有 m 个水平,因素 A_i 第 j 个水平上的试验指标的平均值为 k_{ij},如果试验结果的考察指标是越大越好,则令 $K_{ij}=k_{ij}$,反之,则令 $K_{ij}=1/k_{ij}$,建立式(1)矩阵。

定义因素层矩阵:令 $T_i=1/\sum_{j=1}^{m}K_{ij}$,建立式(2)矩阵。

定义水平层矩阵:正交试验中因素 A_i 的极差为 s_i,令 $S_i=s_i/\sum_{i=1}^{l}s_i$,建立式(3)矩阵。

$$M=\begin{bmatrix} K_{A1} & & \\ K_{A2} & & \\ K_{A3} & & \\ K_{A4} & & \\ K_{A5} & & \\ & K_{B1} & \\ & K_{B2} & \\ & K_{B3} & \\ & K_{B4} & \\ & K_{B5} & \\ & & K_{C1} \\ & & K_{C2} \\ & & K_{C3} \\ & & K_{C4} \\ & & K_{C5} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$T=\begin{bmatrix} T_A & & \\ & T_B & \\ & & T_C \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$S=\begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \tag{3}$$

定义影响试验值的权矩阵,如式(4,5)所示。

$$\omega=MTS \tag{4}$$

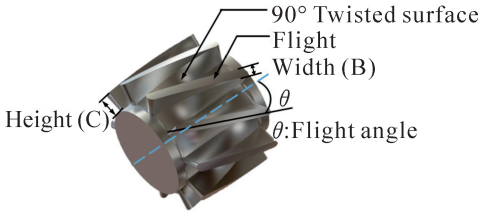
$$\omega^{T}=[\omega_1\omega_2\cdots\omega_m] \tag{5}$$

式中:ω_i——A_i 第一水平的标准值占因素 A_i 所有水平的指标值总和的比。

1.2　试验方案及模型

根据场协同扭转元件的结构,选用棱数(A)、棱宽(B)和槽深(C)等参数作为正交试验因素,每个因素设置 5 个水平,设计三因素五水平试验正交表,如 Tab.1 所示。

Tab. 1 Orthogonal experimental scheme and model

Model	Level	Factor A	Factor B	Factor C
	1	8	2	3
	2	9	2.5	3.5
	3	10	3	4
	4	11	3.5	4.5
	5	12	4	5

Tab.2 为 25 组试验模型结构参数。

Tab. 2 Structural parameters of experimental model

Number	Factor A	Factor B/mm	Factor C/mm
1	8	2	3
2	8	2.5	3.5
3	8	3	4
4	8	3.5	4.5
5	8	4	5
6	9	2	3.5
7	9	2.5	4
8	9	3	4.5
9	9	3.5	5
10	9	4	3
11	10	2	4
12	10	2.5	4.5
13	10	3	5
14	10	3.5	3
15	10	4	3.5
16	11	2	4.5
17	11	2.5	5
18	11	3	3
19	11	3.5	3.5
20	11	4	4
21	12	2	5
22	12	2.5	3
23	12	3	3.5
24	12	3.5	4
25	12	4	4.5

将上述模型 3 个 1 组并排组合在一起,随后对组合后的 25 组模型进行仿真模拟,Fig.1 为组合后的螺杆及流域的具体结构。

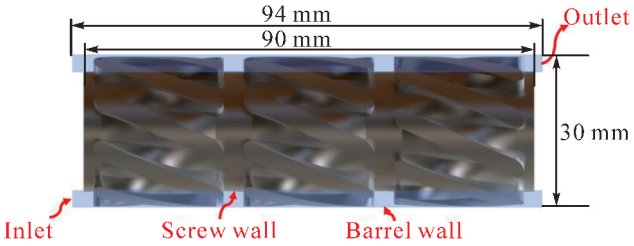


Fig. 1　Numerical simulation model

1.3　数学模型和边界条件

本文选择三元乙丙橡胶作为模拟流动介质,流动模型假设如下:熔体视为不可压缩黏性非牛顿流体,流动为层流非等温瞬态流动,熔体完全充满流道,螺杆表面绝热,壁面无滑移且忽略重力的影响。流体物性参数详见 Tab.3。

Tab. 3　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	f	0.0025 K^{-1}
Reference temperature	T_α	373.15 K

在上述假设的情况下,流场的控制方程如下

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{6}$$

动量守恒方程:

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)+\frac{\partial P}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\eta\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{7}$$

能量守恒方程:

$$\rho C_P\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u_i\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)=k\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}+\varphi \tag{8}$$

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

$$\eta=[\eta_\infty+(\eta_0-\eta_\infty)(1+\lambda^2\dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}}]\exp[-f(T-T_\alpha)] \tag{9}$$

采用流体力学模拟软件 ANSYS Polyflow 2021 R1 进行三维非等温瞬态数值模拟。使用 Gambit 进行流体域的网格划分,运用 Ploydlow 软件的网格重叠技术生成整体有限元网格,流动边界条件与热边界条件如 Tab.4 所示。

Tab. 4　Boundary conditions

Boundary	Flow conditions	Thermal conditions
Inlet	Fully developed, volumetric flow rate 2.44×10^{-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

1.4 网格无关性验证

为了保证模拟结果的准确性,对流体域网格进行独立性验证。在径向(R)、周向(C)、轴向(L)3 个维度对流体域网格进行精确划分,随后,选择体平均速度和体平均温度作为考察指标,观察它们在流体域网格数量变化的情况下的数值变化,结果如 Fig.2 所示。从图中可以看出,在同时考虑计算效率和精确性的情况下,应采用 24×80×100 的网格层数划分方式,总网格数量为 192000。

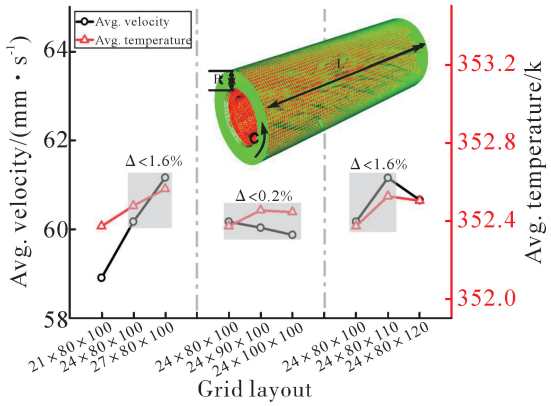


Fig. 2 Mesh independence validation of fluid model

2 结果与讨论

2.1 试验结果分析

本文选取了一系列用于表征混合和传热的性能参数作为试验考察指标,其中包括表征传热的对流换热系数(越大越好),表征混合的分离尺度(越小越好),时均混合效率(越大越好)和非弹性应力张量的第一特征值(越大越好)。Tab.5 为正交试验结果的直观分析。

Tab. 5 Visual analysis of orthogonal experimental results

Performance	Parameters		Factor A	Factor B	Factor C
Heat transfer performance	Convective heat transfer coefficient ($W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$)	K_1	1842.744	1852.722	1938.45
		K_2	1879.25	1904.888	1974.772
		K_3	1957.2	1964.448	1956.104
		K_4	2003.424	2021.94	1949.16
		K_5	2055.948	1994.568	1920.08
		S	213.204	169.218	54.692
Mixing performance	Segregation scale	K_1	0.003866	0.005390	0.005476
		K_2	0.004424	0.004916	0.005142
		K_3	0.004828	0.004800	0.004256
		K_4	0.004484	0.003776	0.003918
		K_5	0.004598	0.003318	0.003408
		S	0.000962	0.002072	0.002068
	Time-averaged mixing efficiency	K_1	0.0335	0.0267	0.0289
		K_2	0.0270	0.0286	0.0282
		K_3	0.0243	0.0264	0.0285
		K_4	0.0251	0.0291	0.0279
		K_5	0.0246	0.0236	0.0208
		S	0.00927	0.00544	0.00801
	First eigen value of tensor T	K_1	96900.283	110589.503	84327.910
		K_2	107412.563	118629.511	93586.217
		K_3	109500.743	105505.676	98867.204
		K_4	103086.519	108821.569	108655.473
		K_5	92403.093	65756.943	123866.397
		S	17097.651	52872.568	39538.487

由 Tab.5 可知,当以不同的考察指标(不同性能)为优化目标时,各因素的影响主次顺序并不相同,说明直观分析仅仅只能针对单项指标来分析各因素的影响,不能进行综合性能的影响因素的选取与分析。

由上述分析可知,综合性能的因素的选取和影响权重需要采用权矩阵分析法进行分析。首先将评估混合性能的各考察指标权重作平均处理,之后与传热考察指标权重求平均,得到最终的综合权重。结果如 Tab.6 所示。

Tab. 6　Matrix analysis of various factor levels

Performance		Mixing performance			Heat transfer performance	
Factor	ω_1	ω_2	ω_3	$(\omega_1+\omega_2+\omega_3)/3$	ω_4	ω_{Ave}
A_1	0.0431	0.1017	0.0297	0.0582	0.0923	0.07525
A_2	0.0376	0.0820	0.0329	0.0508	0.0941	0.07245
A_3	0.0345	0.0738	0.0336	0.0473	0.0980	0.07265
A_4	0.0371	0.0762	0.0316	0.0483	0.1003	0.07430
A_5	0.0362	0.0747	0.0283	0.0464	0.1030	0.07470
B_1	0.0648	0.0476	0.1048	0.0724	0.0736	0.07300
B_2	0.0710	0.0509	0.1125	0.0781	0.0757	0.07690
B_3	0.0727	0.0470	0.1000	0.0732	0.0781	0.07565
B_4	0.0924	0.0518	0.1032	0.0825	0.0804	0.08145
B_5	0.1052	0.0420	0.0623	0.0698	0.0793	0.07455
C_1	0.0638	0.0758	0.0598	0.0665	0.0249	0.04570
C_2	0.0679	0.0740	0.0663	0.0694	0.0254	0.04740
C_3	0.0821	0.0747	0.0701	0.0756	0.0251	0.05035
C_4	0.0891	0.0732	0.0770	0.0798	0.0250	0.05240
C_5	0.1025	0.0546	0.0878	0.0816	0.0247	0.05315

由 Tab.6 可知,在综合考虑混合和传热性能的情况下,比较各个因素对正交试验考察指标的影响权重值,发现各因素的影响主次顺序为 BAC,最优结构为 $B_4A_1C_5$,即棱数为 8,棱宽为 3.5 mm,槽深为 5 mm。最差结构为 $B_1A_2C_1$,即棱数为 9,棱宽为 2 mm,槽深为 3 mm。对上述结构进行分析,即测量其槽宽和槽深可知,当场协同扭转元件的槽宽深比接近 1 时,其综合性能最优。

2.2　方案对比分析

为验证正交试验结果的准确性,将选出的最优和最差的场协同扭转元件 4 个 1 组并排装配在螺杆上进行仿真模拟研究,并与普通螺纹螺杆进行比较,装配位置如 Fig.3 所示。普通螺纹螺杆命名为 STDS,装配有最优扭转元件的螺杆为 FSTS-1,装配有最差扭转元件的螺杆为 FSTS-2。



Fig. 3　Simulating the screw model used

2.2.1　螺杆性能:采用不同指标评估了上述 3 种螺杆的综合性能,结果如 Fig.4 所示。Fig.4(a)为 3 种螺杆的时均混合效率随时间的变化曲线。可以看出,在 20 s 之后,FSTS-1 具有最高的时均混合效率,

其次是 FSTS-2。这说明最优场协同扭转元件的加入极大地提高了螺杆的混合效率。Fig.4(b)为 3 种螺杆的分离尺度随时间的变化曲线。可以看出,在 30 s 后,即稳定后的分离尺度顺序为 STDS > FSTS-2 > FSTS-1。说明场协同扭转元件可以有效降低分离尺度,提高混合能力。Fig.4(c)为 3 种螺杆的体平均对流换热系数。可以看出,2 种场协同扭转螺杆的对流换热系数均大于普通螺纹螺杆,其中以 FSTS-1 为最大,说明 FSTS-1 具有最佳的传热性能。Fig.4(d)为沿螺杆流动方向上的截面温度标准差。从图中可以看出,相比 STDS,不论是 FSTS-1 还是 FSTS-2,在扭转元件位置处,截面温度标准差均大幅度下降,这说明场协同扭转元件可以很好地改善螺杆的塑化均匀性。此外,截面温度标准差以 FSTS-1 中的扭转元件处为最低,这一点在 Fig.4(d)中的截面(A-A)温度云图中也可反映出来。上述结论证明,经正交试验选出的最优扭转元件结构具有最优的综合性能,同时,也说明不论是最差结构还是最优结构,场协同扭转元件均能提高螺杆的综合性能。

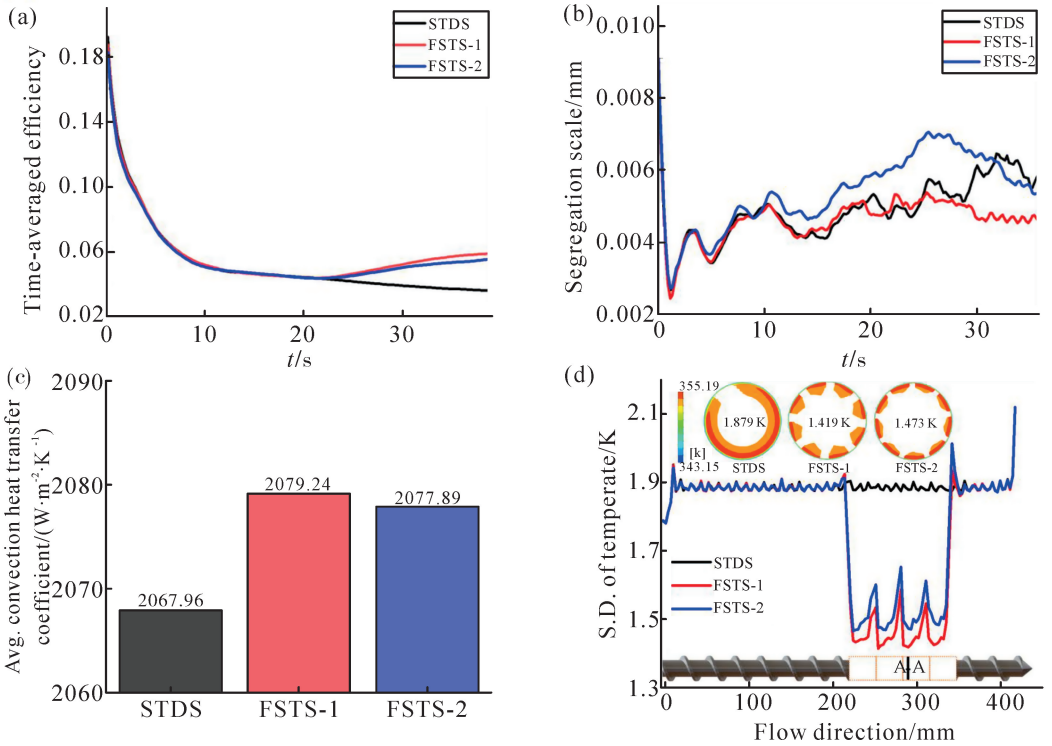


Fig. 4 Screw performance: (a) time-averaged efficiency; (b) segregation scale; (c) avg. convection heat transfer coefficient; (d) standard deviation of temperature

2.2.2 协同分析:通过后处理软件 CFD-POST 计算了速度矢量与轴向速度梯度、温度梯度之间的夹角,并指定该夹角为“协同角”,其大小可用来反映螺杆的混合与传热能力。在 0°~90°范围内,速度矢量与速度梯度之间的夹角越小,拉伸流动的比重越高,反之,剪切流动的比重越高;此外,速度矢量与温度梯度之间的夹角越小,传热能力越强。

Fig.5 为 3 种螺杆的混合协同分析结果。Fig.5(a)展示了协同角 α 随螺杆轴向位置的变化曲线。可以看出,STDS 的协同角 α 数值稳定在 80°,而 FSTS-1 和 FSTS-2 的协同角 α 数值在扭转元件处明显下降。同时,通过观察 Fig.5(a)中的 FSTS-1 的流线轨迹图发现,不同于普通螺纹处的稳定层流,扭转元件处产生了螺旋流动。说明扭转元件诱导产生的螺旋流动可以改善速度场和速度梯度场之间的协同作用。此外,还观察了剪切速率、拉伸速率和拉伸剪切比沿螺杆轴向位置的变化情况,结果分别如 Fig.5(b~d)所示。相比 STDS,FSTS-1 和 FSTS-2 的剪切速率、拉伸速率和拉伸剪切比在扭转元件处均得到了较大提升,虽然 FSTS-2 的剪切速率和拉伸速率提升

高于 FSTS-1,但 FSTS-1 的拉伸速率与剪切速率的比值高于 FSTS-2。结合协同角 α 结果分析可知,FSTS-1 在提升拉伸流动比重方面优于 FSTS-2,故其协同角 α 远小于 FSTS-2,这与聚合物场协同塑化输运混炼理论相一致,也再次说明 FSTS-1 具有最佳的混合性能。

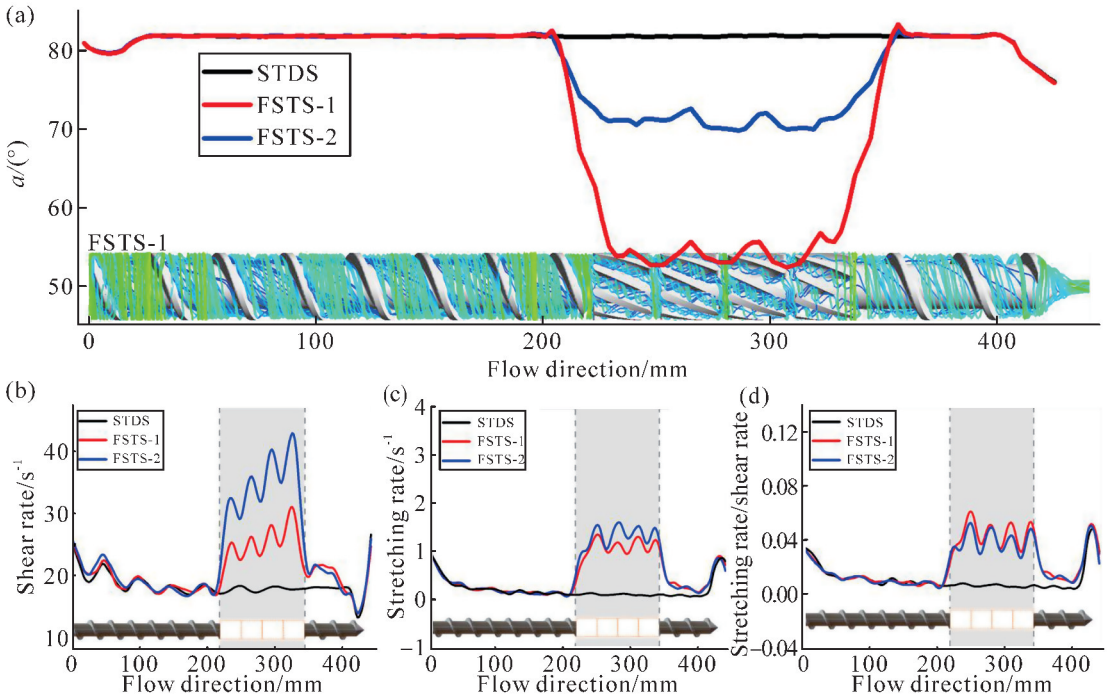


Fig. 5　Mixing synergy analysis: (a) synergy α along the direction of flow; (b) distribution of shear rate; (c) distribution of stretching rate; (d) distribution of stretching rate/shear rate

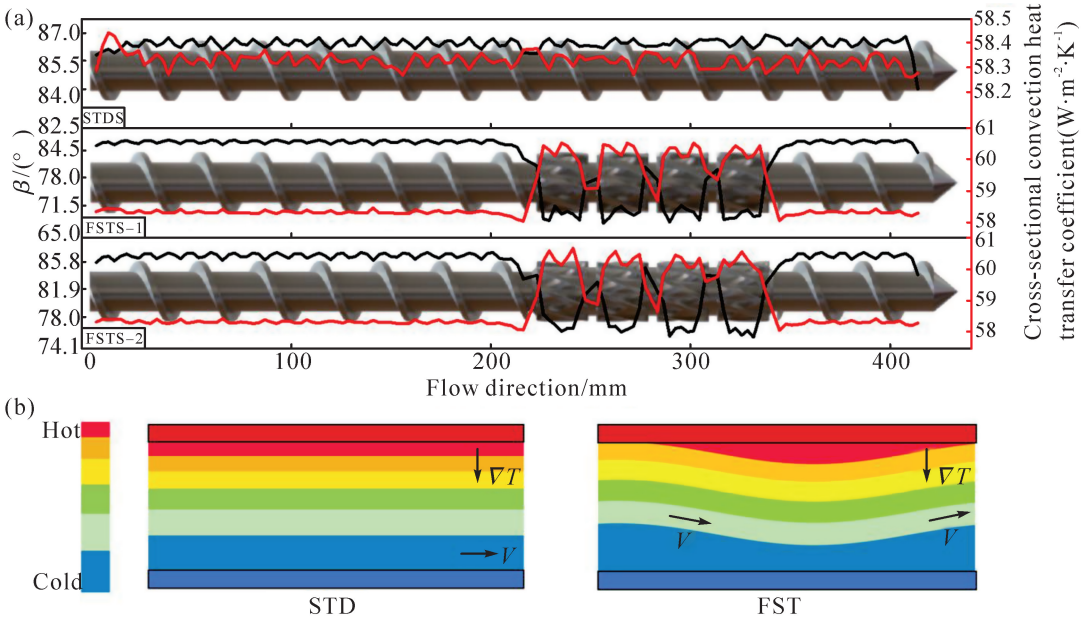


Fig. 6　Heat transfer synergy analysis: (a) heat transfer and synergy β along the direction of flow; (b) schematic of the heat transfer synergy

Fig. 6(a)为 3 种螺杆的传热协同分析结果。从图中可以看出。不管是哪种螺杆,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。此外,STDS 的协同角 β 数值基本稳定在 86°左右,远远高于其他 2 种场协同扭转螺杆,相比普通螺纹

元件处,对流换热系数在扭转元件处明显提升。这说明场协同扭转元件改善了速度场与温度梯度场的协同作用,进而增强了螺杆的传热能力。为清晰地表达场协同扭转元件对温度梯度和速度的影响机制,通过分析对比普通螺纹元件中的流动模式和温度分布,创建了传热协同效应示意图,如 Fig.6(b)所示。

3 结论

(1)正交试验的权矩阵分析结果表明,影响螺杆综合性能的因素的主次顺序为棱宽、棱数、槽深(BAC)。最优结构为 $B_4A_1C_5$,即棱宽为 3.5 mm,棱数为 8,槽深为 5 mm。最差结构为 $B_1A_2C_1$,即棱宽为 2 mm,棱数为 9,槽深为 3 mm。当场协同扭转元件的槽宽深比接近 1 时,其综合性能最优。

(2)螺杆性能对比表明,2 种场协同扭转螺杆综合性能均优于普通螺纹螺杆,同时,装配有最优扭转元件结构的螺杆的综合性能最佳,验证了权矩阵分析结果的准确性。

(3)根据场协同分析对比可知,相比于普通螺纹元件,场协同扭转元件的加入提高了流场中的拉伸流动比重,改善了速度场与速度梯度场、温度梯度场之间的协同性,进而增强了螺杆的综合性能。

本文为通过创新设计螺杆结构来强化橡胶挤出塑化过程中的混合和传热提供了重要的研究基础,为推进橡胶挤出制品的高端化制备提供了重要推动力。相关研究可更加关注螺杆内部的传热传质,增强聚合物熔体内部的热传输,同时改善混合以消除局部热点并获得均匀的热量分布。

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] 董建华. 高分子材料科学与工程漫谈[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(1): 238-242.
Dong J H. On the polymer material science and engineering[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(1): 238-242.

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

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

[5] 苏伟彦, 梁国伟, 梁国超, 等. 橡胶挤出机料筒温度控制系统仿真与验证[J]. 机械管理开发, 2024, 39(7): 223-235.
Su W Y, Liang G W, Liang G C, *et al*. Simulation and validation of barrel temperature control system for rubber extruder[J]. Mechanical Management and Development, 2024, 39(7): 223-235.

[6] 张受麒. 冷喂料橡胶挤出机销钉机筒的结构优化及其温控系统研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
Zhang S L. Research on structure optimization and temperature control system of cold feed rubber extruder pin barrel[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2023.

[7] Kim S J, Kwon T H. Enhancement of mixing performance of single-screw extrusion processes via chaotic flows: part I. basic concepts and experimental study[J]. Advances in Polymer Technology, 1996, 15: 41-54.

[8] 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-serew element[J]. Plastics, 2023, 52(2): 145-150.

[9] Wen J S, Lei S K, Liang Y H, *et al*. Numerical simulation of mixing characteristics in a vane extruder[J]. Journal of Macromolecular Science Part B: Physics, 2014, 53: 358-369.

[10] Spalding M A, Sun X F, Kodjie S L, *et al*. A maddock mixer design that mitigates gels in polyethylene resin film applications[J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2023, 39: 174-189.

[11] 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.

[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] 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.

Multi Objective Orthogonal Optimization Design of Field Synergy Torsion Screw Based on Weight Matrix Analysis Method

Wei Pan[1], Shizheng Huang[1], Xingyue Wei[1], Xinpei Jiang[1], Shilong Wang[1]
Peng Zhang[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: As a key component of the extrusion plasticization system, the structure of the screw has a crucial impact on extrusion quality and accuracy. This article used numerical simulation to conduct orthogonal experimental optimization design on the structure of the field synergy torsion element. The weight matrix analysis of the orthogonal experimental results was combined with the mixing performance and heat transfer performance to determine the optimal element structure. Subsequently, the optimal and worst element structures obtained from orthogonal experiments were selected to form two different field synergy torsion screws, which were compared with conventional screws. The results indicate that when the channel width to height ratio of the field synergy torsion element is close to 1, its comprehensive performance is optimal. The mixing and heat transfer performance of the two types of field cooperative twisted screws are superior to those of conventional threaded screws. Among them, the field synergy torsion screw equipped with optimal torsion element has the best comprehensive performance, which verified the accuracy of the weight matrix analysis results. According to the analysis of the polymeric field synergy principle, the field synergy torsion element can induce the formation of spiral flow in the fluid, improve the synergy between the velocity field, velocity gradient field, and temperature gradient field, and thus achieve the effect of enhancing the comprehensive performance of the screw.

Keywords: field synergy torsion screw; extrusion plasticization; orthogonal experiment; weight matrix analysis