

基于数值模拟单螺杆挤出机加热方式与螺杆设计优化研究

吴伟强, 杨松伟, 周为明, 曹长林*, 陈庆华, 钱庆荣

- (1. 福建师范大学环境与资源学院, 聚合物资源绿色循环利用教育部工程研究中心,
福建省污染控制与资源循环利用重点实验室, 福建 福州 350007;
2. 福建师范大学泉港石化研究院, 福建 泉州 362800)

摘要: 涤棉混纺材料对温度和剪切均极为敏感, 现有的螺杆挤出设备难以满足其熔融分离的需求。本研究提出了一种基于电磁加热与等深等距螺杆设计的优化方案。通过对比传统云母加热与电磁加热的性能差异, 发现电磁加热能显著改善加热均匀性, 降低温度梯度, 有效避免局部过热现象。同时, 结合有限元仿真分析了物料在螺杆中的流动特性和受力情况, 验证了等深等距螺杆在挤出过程中的低剪切特性 (最大剪切速率 172 s^{-1}) 和稳定流动性能 (混合指数 $\lambda \approx 0.85$ 的高流动性区域占比 30%)。研究结果表明, 优化后的加热方式与螺杆结构能够显著提升挤出机的加工效率与产品质量, 尤其适用于对温度敏感的聚合物材料。

关键词: 单螺杆挤出机; 电磁加热; polyflow; 剪切速率; 有限元分析

引用论文: 吴伟强, 杨松伟, 周为明, 等. 钱庆荣基于数值模拟单螺杆挤出机加热方式与螺杆设计优化研究 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(3):09-14.

中图分类号: TQ330.46

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)07-0009-06

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.07.003

0 引言

涤棉混纺材料, 由于其融合了涤纶的耐磨性、抗皱性与棉纤维的吸湿性、柔软性, 已成为纺织行业中广泛应用的重要原料^[1]。然而, 随着涤棉混纺制品的大量生产和消费, 其废弃物也逐年增加, 给环境保护和资源循环利用带来了巨大挑战^[2]。涤棉高效分离技术逐渐成为当前纺织领域研究的热点^[3]。

传统的涤棉分离方法主要包括手工分拣、化学溶解和高温熔融等, 这些方法虽然能够实现涤棉的分离, 但存在效率低下、成本高昂、环境污染严重等问题^[4]。

随着科技的不断进步, 涤棉连续分离技术得到了快速发展^[5-6]。这种技术旨在通过一系列连续的物理或化学过程, 实现涤纶和棉纤维的高效、环保、低成本分离^[7]。通常采用螺杆的高温熔融使涤纶纤维熔化而与棉纤维分离。但涤棉混纺材料对温度和剪切均极为敏感, 现有的螺杆挤出设备难以满足高效分离的需求^[8]。

近年来, 国内外学者针对单螺杆挤出机的优化开展了大量研究^[9]。在加热方式方面, 电磁感应加热技术因其高效、节能^[10]和温度均匀性好的特点受到广泛

关注^[11-12]。在螺杆设计领域, 等深等距螺杆因其稳定的流场特性展现出独特优势, 而渐变式螺杆和变速反螺纹螺杆则通过改变几何结构或运动特性, 显著提升了混合性能和剪切效率。例如, 罗林等^[13]通过渐变式螺杆设计, 实现了更高的建压能力和混合均匀性; 王梦杰等^[14]采用非等距变速反螺纹结构, 有效延长了物料停留时间, 改善了混合分布性能。然而, 现有研究多聚焦于单一优化方向, 对加热方式与螺杆结构协同优化的系统性研究仍较为缺乏。

本研究以解决涤棉纤维加工中的焦化和结构破坏问题为目标, 结合电磁加热技术与等深等距螺杆设计, 通过多物理场耦合仿真分析, 探究温度场、压力场、剪切速率场及混合性能的协同优化效果^[15-16]。研究结果不仅为单螺杆挤出机的性能提升提供了新的技术路径, 也为热敏性高分子材料的加工工艺优化提供了重要参考。

作者简介: 吴伟强 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固废资源化。

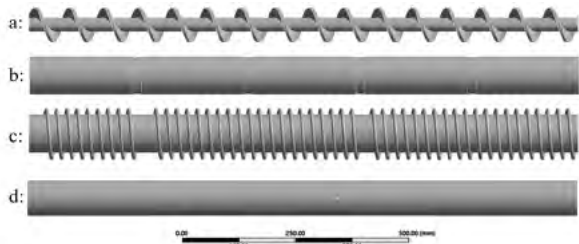
基金项目: 福建省科技厅项目 (2023HZ027004)

* 为通讯联系人

1 单螺杆挤出机

1.1 几何模型构建

模型由 solidworks 软件建立, 热仿真模型分别建立了三个零件体, 分别为螺杆、螺杆机筒、传统加热器和电磁线圈, 将三者组合成装配体。Polyflow 仿真模型由流体域与运动域(螺杆)组成。螺杆为总长 1 600 mm, 外径 100 mm, 底径 40 mm, 导程 100 mm, 机筒与螺杆间隙 2 mm, 螺槽宽度 10 mm。

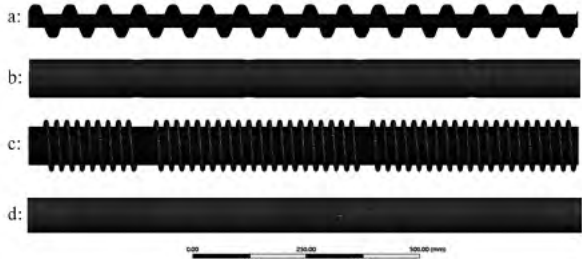


(a) 螺杆, (b) 传统加热器, (c) 电磁加热器, (d) 流体域

图 1 模型正视图

1.2 有限元模型

采用 Workbench Meshing 将螺杆划分成正四面体网格, 流场划分成正六面体网格。螺杆、加热器、机筒和流场均以 3 mm 尺寸划分网格。图 2 为有限元模型。



(a) 螺杆, (b) 传统加热器, (c) 电磁加热器, (d) 流体域

图 2 模型网格划分

在网格划分中, 网格的大小会影响节点的个数, 进而影响整个仿真过程的计算量和精度, 因此对模型进行合理的仿真十分必要^[17]。利用 Mesh 模块中网格单元质量统计, 可以观察划分网格的合理性, 如图 3 所示, 运动域(螺杆部分 screw)平均网格质量为 0.834; 流体域(fluid)由于流体需设定 0.01 厚度的边界, 故修正后 fluid 平均网格质量为 0.894; 传统加热器(CT)平均网格质量为; 电磁加热器(DC)平均网格质量为 0.854; 说明网格质量较好, 此网格划分可用。 T_{ri} 为 3 个节点的三边形单元; Hex 为 20 个节点的六面体单元; Tet 为 10 个节点的四面体单元。

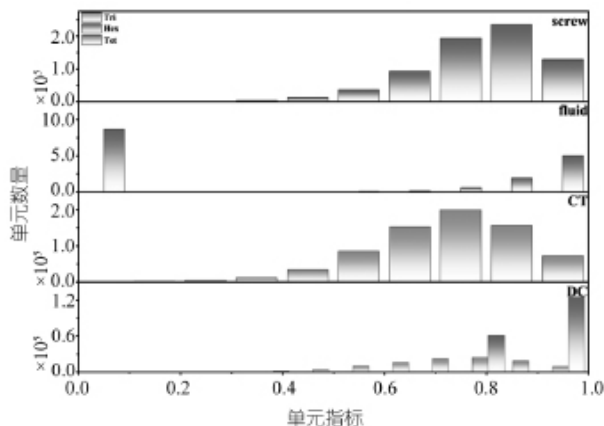


图 3 网格质量分布

1.3 物性参数

螺杆其他物性参数用于后续仿真分析如表 1 和表 1 所示。

表 1 38CrMoCl 物性参数

项目	38CrMoCl
抗拉强度 R_m /MPa	980
下屈服强度 R_{eL} /MPa	835
密度 $/(kg \cdot cm^{-3})$	7.85
热膨胀系数 $1/^\circ C$	1.25×10^{-5}
热导系数 $/[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	12~20
比热容 $/[J \cdot (g \cdot ^\circ C)^{-1}]$	0.45
磁导率 $/(H \cdot m^{-1})$	8000
泊松比 μ	0.3
弹性模量 E /GPa	210

表 2 材料参数

材料特性参数	参数值
零剪切速率黏度 $\eta_0/(Pa \cdot s)$	2 258.7
无穷剪切速率黏度 $\eta_\infty/(Pa \cdot s)$	0
松弛时间 λ/s	0.124
非牛顿指数 n	0.9

2 数值模拟

2.1 基本假设

在开始计算之前, 为了仿真模拟结果的准确性和可靠性, 对流场做出以下假设^[18]: 熔体为层流流动; 熔体不可压缩; 熔体在机筒内无滑移现象; 忽略惯性;

2.2 数学模型建立

2.2.1 电磁控制方程

电磁加热利用交变电磁场在导体内部产生感应电流, 从而使导体发生热效应的方法, 当加热线圈中通入交变的电流时, 在空间中会产生垂直于电流方向的交变磁场, 这个磁场与线圈形状和电流大小、频率有着密切的联系, 当交变的磁场穿过机筒时, 会在导体内感生出相同频率相反方向的感应电动势^[19], 表达式

如式 (1) 所示：

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

式中： e —感应电动势，V。

由于感应电动势产生的方向与磁通变化方向相反，因此表达式前需加入负号。若磁通中以正弦规律条件下变化，可由式 (2) 表示：

$$\Phi = \Phi_M \sin \omega t \quad (2)$$

结合式 (1) 和式 (2) 得：

$$e = -2\pi f \Phi_M \cos \omega t \quad (3)$$

感应电动势的有效值为：

$$E = \frac{2\pi f \Phi_M}{\sqrt{2}} = 4.44 f \Phi_M \quad (4)$$

若金属导体内有感应电动势存在则会产生感应电流，即涡流，涡流在导体内形成闭合回路，根据电流热效应使金属导体发热。整个过程产生的热量为：

$$Q = I^2 R t \quad (5)$$

本研究用到了 ANSYS 软件中的电磁感应加热耦合场，包括磁场、电磁热和传热三部分。为分析热板加热达到稳态时的温度分布，选取研究场为稳态场。

电磁感应线圈符合麦克斯韦方程组，在频域—稳态的情况下满足以下方程：

$$\Delta \cdot H = J \quad (6)$$

$$B = \Delta \cdot H \quad (7)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + J \quad (8)$$

$$E = -j\omega A \quad (9)$$

式中 E 为电场强度，V/m²； J 为电流强度，A/m²； Δ 为哈密顿算子； A 为矢量磁位，Wb/m； ω 为角速度，rad/s； H 为磁场强度，A/m； B 为磁感应强度，N/A.m； D 为电位移量，C/m²； σ 为电导率，S/m。

线圈产生的磁场本构关系 (B, H) 满足以下方程：

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (10)$$

线圈产生的电场本构关系 (D, E) 满足以下方程：

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (11)$$

其中涉及的 μ_r 、 ϵ_r 来自于材料。电磁感应加热过程中分为电磁热和传导热，在正常磁场产生的涡流范围内为电磁热，超出该范围的为传导热，因此在频域稳态带内，电磁热符合以下方程：

$$\rho C_p \mu \cdot \nabla T = \Delta \cdot (k \nabla T) + Q_c \quad (12)$$

$$Q_c = Q_{rh} + Q_{ml} \quad (13)$$

$$Q_{rh} = \frac{1}{2} R_c (i^2 \cdot V) \quad (14)$$

$$Q_{ml} = \frac{1}{2} R_c (i^2 \cdot V) \quad (15)$$

式中： ρ 为材料密度，kg/m³； C_p 为材料比热容，J/kg·m； U 为微元温度，K； ∇T 为单位时间，s； K 为传热系数，W/m²·K； R_c 为电阻， Ω ； i 为电流，A； q 为单位体积热传导功率，W/m³； Q_c 、 Q_{rh} 、 Q_{ml} 为热源项。

软件默认空间为真空域，需要人为设定一定体积的空气域，稳态情况下空气域温度为 20℃，则热板表面对环境辐射符合以下方程：

$$-n \cdot q = \epsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \quad (16)$$

式中： q 为辐射热通量； ϵ 为辐射系数； σ 为斯特藩·玻尔兹曼常数； T 为绝对温度，K。

2.2.2 流体控制方程

PET 流体属于非牛顿流体，选择与剪切速率有关的黏度本构方程 Bird-Carreau 来描述其流变特性：

$$\eta = \eta_0 + (\eta_\infty - \eta_0) (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (17)$$

式中： η_0 为零切黏度，Pa·s； η_∞ 为无穷大剪切速率下黏度，Pa·s； λ ，松弛时间，s； n 非牛顿指数； $\dot{\gamma}$ 为剪切速率，s⁻¹； η 为物料黏度，Pa·s。

2.3 边界条件设定

根据实际工艺过程的工况以及文献参考，PET 在熔体状态下的流变参数如表 2 所示；流动边界条件设定，本例中设定密度为 0，且不考虑惯性的影响。这是因为在当前加工条件下，物料的黏性力作用远远大于惯性力作用，可以忽略惯性作用的影响；入口边界及出口边界施加法向力和切向力并将 f_n 和 f_s 均赋值为 0，这样的边界条件说明流体区域入口流体为自由流动；同样，出口边界也施加 f_n 和 f_s 均为 0 的边界条件；内孔设定 $v_n=0$ 和 $f_s=0$ 的边界条件，这种类型的边界条件属于滑移边界，不仅没有流体能够贯穿该边界流动，而且该边界上的流体所受的切向力为 0；对于外壁面给定 $v_n=v_s=0$ 的边界，表示壁面无滑移；螺杆转速设定为 60 r/min。

3 结果与讨论

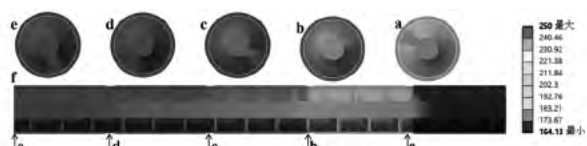
3.1 温度均匀性

图 4a、b、c、d 和 e 为传统加热方式下的螺杆横截面温度分布图。图 4f 为纵截面温度云图，展示了螺杆沿长度方向的温度变化。图 5a、b、c、d 和 e 为电磁加热方式下的螺杆横截面温度云图。图 5f 为纵截面

温度云图, 同样展示了螺杆沿长度方向的温度变化。

如图所示, 在横截面上, 电磁加热器的温度从橙到红渐变, 整体处于较高区间, 但温度梯度较小, 变化相对平缓, 温度分布更为均匀, 没有显著的内外温差。而传统加热器在横截面上则呈现出明显的温度梯度, 从图 4 a、b、c 可看出中间浅青色范围表示螺杆的核心, 为未直接受热的区域, 而外围的红黄色边缘则表示温度较高的区域。这种分布表明, 在传统加热方式下, 热量从外部传入, 导致螺杆表面温度高于中心温度, 形成了明显的温度梯度。

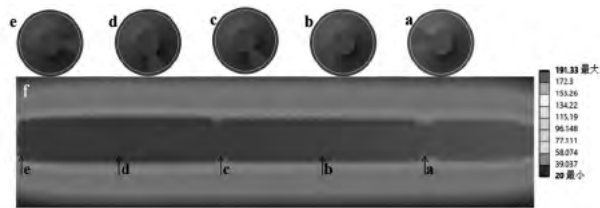
综上所述, 传统加热方式可能导致螺杆表面温度高于中心温度, 形成较大的温度梯度, 而电磁加热方式能够更均匀地加热螺杆, 减少温度梯度, 由此可分析电磁加热器在加热均匀性方面表现出明显优势。



a、b、c、d、e 分别为横截面温度云图

f 螺杆纵截面温度云图

图 4 传统加热器温度云图



a、b、c、d、e 分别为横截面温度云图

图 5 电磁加热器温度云图

3.2 流体模拟分析

利用模拟软件对等深等距螺杆的挤出过程进行了模拟分析。通过压力云图、速度云图和局部剪切速率云图, 研究了物料在螺杆中的流动特性和受力情况。

3.2.1 压力场

图 6 为单螺杆挤出机挤出 PET 过程的压力场仿真结果图, 展示了流场表面的压力分布情况。从图中可以看出, 设计的等深等距螺杆在挤出过程中压力分布均匀, 没有出现明显的压力波动或压力集中现象, 有利于保证挤出过程的稳定性及减少对棉纤维破坏。

3.2.2 剪切速率场

螺纹顶端与机筒内表面之间的间隙在理论上是最大剪切速率出现的区域, 图显示了在单螺杆挤出机挤出 PET 的过程中, 最大剪切速率区域出现在靠近螺杆



图 6 压力场

出口及物料接触区域, 最大剪切速率数值约为 172 s^{-1} 。这一区域的高剪切速率主要是由于螺杆与机筒之间的间隙较小, 以及螺杆的旋转运动加剧了物料的流动和剪切作用。同时从断面剪切速率场发布可以看出, 大部分区域是处于低剪切速率的情况, 这有利于物料在挤出过程中的低破坏性。总体而言, 等深等距螺杆在挤出过程中产生的剪切力较小, 对物料的破坏程度低, 有利于保护物料的物理性能和化学性能。

3.2.3 黏度场

图 7 展示了两种单螺杆结构在 Y-Z 平面内、X 为 100 mm 处的黏度流场云图。从图中可以看出, 黏度场分布呈现出中心区域低、周边区域高的特征。中心区域颜色对应较低黏度值, 而周边区域颜色对应较高黏度值。

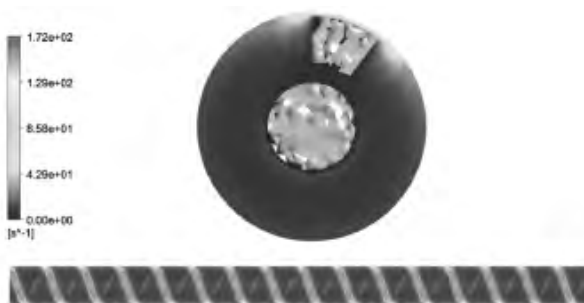


图 7 剪切速率场

在单螺杆挤出过程中, 黏度场分布与剪切速率场密切相关。通常, 黏度会随着剪切速率的增加而降低。图中中心区域黏度相对较低, 周边区域黏度较高, 这是因为中心区域距离单螺杆较远, 受到的剪切作用较弱, 剪切速率较低; 而周边区域靠近单螺杆, 受到强烈的剪切作用, 剪切速率较高, 导致黏度降低。

3.2.4 速度场

图 9 展示了螺杆挤出过程的速度矢量图, 图中箭头所指方向即为挤出方向。从断面速度云图中可以看出, 速度场分布呈现出明显的非均匀性。在机筒附近



图 8 黏度场

区域, 速度较低, 颜色偏蓝, 对应速度值接近 0 m/s 到 0.078 1 m/s。而在靠近螺杆的区域, 速度较高, 颜色偏黄到红, 对应速度值从 0.156 m/s 到 0.312 m/s。速度场的这种非均匀分布与螺杆结构相关。螺杆的几何形状, 特别是螺槽的存在, 决定了速度场的分布^[20]。在靠近螺杆壁面处, 流体受到螺杆旋转的带动作用更强, 因此速度较高; 而在螺槽中心, 由于远离螺杆壁面, 流体受到的带动作用相对较弱, 因此速度较低。整体物料在螺杆中的流动速度分布均匀, 没有出现明显的速度梯度或涡流现象, 表明设计的螺杆结构能够促进物料的平稳流动。



图 9 速度场

3.2.5 混合指数

混合指数是评价螺杆混合性能的有效指标, 其定义如下:

$$\lambda = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma} + \omega} \quad (18)$$

$\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} , 其定义为:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2D^2} \quad (19)$$

式中, ω 为涡旋量的大小, s^{-1} 。漩涡流, $\lambda=0$, 此时流动性较差; 剪切流动, $\lambda=0.5$, 此时一般出现在螺杆与机筒间隙区域; 拉伸流动, $\lambda=1$, 此时流动最好。中圈过渡区域 ($\lambda \approx 0.43 \sim 0.64$): 呈现剪切流特征, 该区域数值接近 0.5 的理论分界值。螺杆螺纹顶隙或机

筒间隙区域, 流体在此处受剪切作用主导, 形成规则的层流运动。内圈红色高值区 ($\lambda \approx 0.85$): 达到拉伸流阈值, 表明该区域流体元沿流线方向产生显著拉伸形变。显示流体在此的流动性良好, 与高 λ 值对应的优异流动性相吻合。

这种分布与挤出机工作特性一致: 近轴区域因粘性耗散大而流动性差, 中圈受螺杆剪切作用主导, 外围因机筒约束产生拉伸形变。值得注意的是, 高 λ 值区域占比约 30%, 表明该设计具有较好的拉伸流强化效果。



图 10 混合指数

4 结论

本文针对单螺杆挤出机在加工涤棉纤维时存在的温度不均、棉纤维焦化及结构破坏等问题, 提出了一种基于电磁加热和等深等距螺杆设计的优化方案。通过对比传统云母加热器与电磁加热器的性能, 研究发现电磁加热能够显著提高温度均匀性并降低能耗, 有效避免了局部过热现象。同时, 采用等深等距螺杆设计, 结合 workbench 和 Polyflow 软件进行多物理场耦合仿真, 结果表明该螺杆结构在挤出过程中压力分布均匀, 剪切速率较低 (最大 $172 s^{-1}$), 混合性能良好 (混合指数 $\lambda \approx 0.85$ 的区域占比 30%), 从而减少了对物料的破坏。该研究为提升单螺杆挤出机的加工性能提供了理论支持和技术方案, 尤其适用于温度敏感物料的加工, 具有较高的工程应用价值。未来可进一步探索其他加热方式和螺杆结构优化, 以拓展其在聚合物加工领域的应用潜力。

参考文献:

- [1] 王彦彦. 精梳工艺路线对涤/棉混纺纱线面料性能及风格的影响 [D]. 中原工学院, 2024.
- [2] 中国石油和化学工业联合会化工新材料专委会. 中国化工新材料产业发展报告 [M]. 化学工业出版社: 202302: 578.
- [3] 侯楠楠, 何璐娜, 赵赛雨, 等. 废旧纺织品剥色技术的研究进展 [J/OL]. 棉纺织技术, 1-7.

- [4] 张文. 中国近代浆纱技术的发展及其建制化研究 [D]. 东华大学, 2025.
- [5] 赵国樑. 我国废旧纺织品综合再利用技术现状及展望 [J]. 北京服装学院学报 (自然科学版), 2019,39(01):94-100.
- [6] 张玮, 刘妹瑞, 张明宇, 等. 废旧纺织品回收再利用的研究进展 [J]. 纺织科学与工程学报, 2023,40(01):96-102+108.
- [7] 张兰, 孟家光, 支超, 等. 废旧聚酯化学回收法及其再生产物的应用研究进展 [J]. 合成纤维, 2023,52(05):42-48+53.
- [8] 郭燕. 我国废旧纺织品回收及再利用现状和建议 [J]. 棉纺织技术, 2013,41(04):59-61.
- [9] 崔雯, 姜晓鸣, 贾朝阳. 螺杆组合对同向双螺杆挤出机能耗影响的研究 [J]. 工程塑料应用, 2013,41(3):65-69.
- [10] ZHAO Z B, ZHU B X, YANG D L, et al. Research on the application of electromagnetic heating energy-saving technology in the heating system of extrusion machine [J]. Plastics Industry, 2014,42(02):72-74.
- [11] 陈浩, 杨卫民, 寻尚伦, 张海涛, 焦志伟. 双螺杆挤出机塑化系统电磁加热过程的数值模拟与实验研究及应用 [J]. 中国塑料, 2024,38(3):101-108.
- [12] MA Y Y. Research progress on energy saving of heating and cooling system of plastic extruder [J]. Synthetic Resins and Plastics, 2018,35(05):100-102.
- [13] 罗林, 王春涛, 宋都都, 等. 渐变式单螺杆结构的螺杆性能仿真分析 [J]. 塑料科技, 2025,53(03):115-120.
- [14] 王梦杰, 郭树国. 非等距变速反螺纹单螺杆挤出分析 [J]. 畜牧产业, 2025,(03):54-61.
- [15] 张伟, 成文凯, 张先明. 涤纶工业丝熔融纺丝过程的数值模拟 [J]. 现代纺织技术, 2022,30(05):52-59.
- [16] LI Z, LING S L, LIU B K. Application of electromagnetic heating technology in the steel industry [J]. Industrial Heating, 2011,41(5):62-66.
- [17] 毛宇, 胡小秋, 范雪坤, 等. 发射药螺杆挤压机叶片强度分析及结构参数优化 [J]. 机床与液压, 2022,50(20):159163.
- [18] 张英建, 惠卫军, 董瀚, 等. 曲轴坯料锻前冷却过程的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2007,36(21):83-85.
- [19] 陈浩, 杨卫民, 寻尚伦, 等. 双螺杆挤出机塑化系统电磁加热过程的数值模拟与实验研究及应用 [J]. 中国塑料, 2024,38(3):101.
- [20] 边靖. 锥形双螺杆挤出机螺杆结构对制品性能的影响 [D]. 北京化工大学, 2016.

Research on heating method and screw design optimization of single screw extruder based on numerical simulation

Wu Weiqiang, Yang Songwei, Zhou Weiming, Cao Changlin*, Chen Qinghua, Qian Qingrong

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China;
2. Quangang Petrochemical Research Institute, Fujian Normal University, Quanzhou 362800, Fujian, China)

Abstract: Polyester-cotton blended materials are highly sensitive to both temperature and shear, and existing screw extrusion equipment struggles to meet their melting and separation requirements. This study proposes an optimized scheme based on electromagnetic heating and an equal-depth and equal-pitch screw design. By comparing the performance differences between traditional mica heating and electromagnetic heating, it is found that electromagnetic heating significantly improves heating uniformity, reduces temperature gradients, and effectively avoids local overheating. Additionally, this paper combines finite element simulations to analyze the flow characteristics and stress conditions of materials in the screw, verifying the low shear characteristics (maximum shear rate of 172 s^{-1}) and stable flow performance (a high-flowability region with a mixing index $\lambda \approx 0.85$ accounting for 30%) of the equal-depth and equal-pitch screw during the extrusion process. The research results show that the optimized heating method and screw structure can significantly enhance the processing efficiency and product quality of the extruder, especially for temperature-sensitive polymer materials.

Key words: single screw extruder; electromagnetic heating; polyflow; shear rate; finite element analysis

(R-03)

