

大型双螺杆挤出机输送特性分析及磨损规律研究

苏杰万

(广东众和高新科技股份公司, 广东 茂名 525000)

摘要 本文应用离散元法 (DEM) 对同向啮合式双螺杆挤出机固体输送段开展系统性数值分析, 通过 EDEM 仿真平台探究不同填充条件对输送区颗粒分布、传输效率、速度场及受力特性的影响规律, 进而揭示颗粒群运动行为与螺杆磨损的内在关联, 旨在为螺杆结构优化与工艺参数调整提供理论参考, 进而有助于提升挤出机的生产效能与服役周期。研究显示: 提升填充率虽能强化输运效率, 但会引发螺杆磨损恶化, 其中螺棱顶端区域呈现最显著磨损特征。应力分布分析表明, 啮合区始终构成颗粒受力的核心区域。

关键词 挤出机; 双螺杆; 离散元法; 输送特性; 物料填充率

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.005

0 引言

同向旋转双螺杆挤出机作为聚烯烃混炼系统的核心装置, 在流程工业中具有关键作用。其凭借高效混炼、精准输送、可控剪切与均质分散等多功能集成特性, 以及独特的自洁功能, 成为高分子材料多相体系加工不可替代的技术方法, 广泛应用于聚合物改性及精细化工等连续化生产过程^[1]。该装备通过优化的螺纹元件构型与热机械历程控制, 显著提升了聚烯烃产品的形态结构与性能一致性。

双螺杆挤出设备的输送动力学特性受螺杆几何参数与物料本构关系的显著影响, 其输送稳定性易受操作条件扰动^[2]。为优化混炼工艺效能, 相关学者针对螺杆构型与操作参数开展了系统性研究。何浪等通过可视化实验证实双螺杆系统存在多级输送区域^[3]; 程媛媛等揭示了填充度对颗粒压实特性与粒径分布的调控机制^[4], 高坤等构建管道弯头冲蚀模型, 验证颗粒浓度对冲蚀速率的显著调控作用^[5]; 张一明发现螺棱边缘因应力集中成为磨损敏感区, 且磨损强度与螺杆几何拓扑及操作参数强相关^[6]; 陈思萌等融合机器学习与 DEM 方法, 阐明转速、颗粒属性对多级输送系统磨损机制的影响, 并证明振动辅助技术可同步提升输送效率与耐磨性能, 双螺杆挤出系统内部流场可视性受限, 传统实验手段难以实现物料传输过程的精准观测, 制约了对其传输机理的深入解析, 从而显著增加了相关研究的复杂度^[7]。本研究采用离散元法构建瞬态动力学模型, 通过 EDEM 数值仿真平台对大型同向双

螺杆挤出机固体输送段进行多物理场耦合分析, 系统探究填充率与输送性能的映射关系, 解析颗粒体系的时空分布特征及接触力学网络, 进而阐明填充水平对输送段磨损演化规律的作用机制。基于仿真数据形成基于磨损分布的螺杆结构优化准则及工艺参数窗口, 可有效提升设备能效与混炼均匀性, 对聚烯烃加工工艺的升级改造具有重要的工程指导价值。

1 构建数学模型

离散元法基于接触力学模型与运动方程耦合求解, 实现对颗粒体系宏观运动行为的数值重构。在物料输运过程中, 单个颗粒同时存在平动与转动两种自由度, 其动力学行为遵循牛顿第二定律的微分形式, 其控制方程为:

$$m_p \frac{dV}{dt} = m_p g + F_{cn} + F_{dn} + F_{ct} + F_{dt} \quad (1)$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = -T_p \quad (2)$$

式(1)、(2)中, V 为颗粒速度, m/s ; m_p 为颗粒质量, kg ; F 为颗粒受力, N ; g 为重力加速度, m/s^2 ; F_{cn} 、 F_{dn} 分别为接触面法线弹性恢复力及黏性阻尼力, N ; F_{ct} 、 F_{dt} 分别为接触面切向弹性恢复力及黏性阻尼力, N ; I_p 为颗粒惯性矩张量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; T_p 为颗粒转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; ω_p 为颗粒角速度, rad/s 。

其中, T_p 为:

$$T_p = R \times (F_{ct} + F_{dt}) \quad (3)$$

式(3)中, R 为颗粒位置矢量, m 。

在双螺杆固体输送过程的离散元建模中, 颗粒体

系与边界壁面间存在多模态耦合作用，包括弹性形变、黏滞耗散及摩擦效应。采用 Hertz-Mindlin 非线性接触动力学模型可精确表征法向与切向接触力学行为，该模型通过耦合赫兹接触理论与 Mindlin-Deresiewicz 滑移理论，能够有效描述颗粒在啮合区与自由输送区的动态响应特性。

2 仿真模型构建及参数设定

2.1 建立仿真模型

本研究聚焦双螺杆挤出系统固体输送区段的动力学特性，采用与物理实体一致的几何建模方法，使输送段末端结构保持与机筒内径一致的流通截面。为消除进料条件对输送特性的干扰，在螺杆轴向正上方设置等宽于机筒内径的加料口，确保物料初始分布均匀性，从而准确表征螺杆本体的输运机制。基于参数化三维建模技术构建双螺杆几何模型，其中机筒采用整体式结构，螺纹元件通过过盈配合装配于芯轴，形成完整的封闭流道系统。螺杆啮合副在机筒内保持精确的运动学关系，通过动态干涉校验确保同步旋转过程中的运动学一致性。

2.2 设定仿真参数

本研究选用直径 4 mm 的球形聚丙烯 (PP) 颗粒作为输送介质，螺杆构件采用具有优异耐磨损性能的 34CrAlNi7-10 氮化钢，机筒则采用 31CrMoV9 合金钢整体锻造而成。颗粒体系与边界接触行为采用 Hertz-Mindlin 非线性接触模型进行描述。为提升初始化效率，在料斗区域生成颗粒时赋予其沿轴向 (y 向) 0.1 m/s 的初始速度以加速填充过程。颗粒及挤出机物性参数如表 1 所示，接触力学参数如表 2 所示。数值求解设置中，瑞利波控制的时间步长设置为 20%，接触检测范围定义为 3 倍颗粒直径，总仿真时长为 15 s。

表 1 颗粒及挤出机物性参数

材料	密度 (kg·m ⁻³)	弹性模量 (GPa)	泊松比
螺杆材料	7 850	315	0.3
机筒材料	7 850	210	0.29
PP 颗粒	910	1.38	0.42

表 2 接触力学参数

项目	动摩擦系数	静摩擦系数	恢复系数
PP+ 螺杆	0.25	0.35	0.22
PP+ 机筒	0.25	0.35	0.22
PP+PP	0.25	0.4	0.2

2.3 仿真假设

在输送过程中，颗粒体系因摩擦与剪切效应诱发热生成，可能改变物料的本构特性。为此，仿真采用以下本构关系简化：颗粒体系简化为刚体动力学模型，几何形态保持各向同性球形，忽略热致黏附效应与液桥力作用，并设定摩擦因数为时不变参数。依据物料空间分布特征将输送域划分为四个功能子区，通过分段积分计算各区质量通量，最终集成系统总输送量。

3 仿真及结果分析

在基准工况下，通过控制变量法保持颗粒密度、恢复系数与动摩擦因数等关键本构参数恒定，设置四组具有显著差异的梯度填充率开展数值实验。利用后处理模块提取轴向等间距分布的三个螺距单元作为特征观测窗，实施颗粒动力学与磨损特性的定量表征。

3.1 不同填充率中固体输送特性分析

分析表明，填充率对物料分布形态具有决定性影响。在低填充工况下，物料主要富集于螺杆 I、II 底部形成的下输送区，同时在啮合区上部出现局部堆积。这种分布特征源于重力沉降效应与螺杆旋转驱动的耦合作用：进入加料槽的物料在重力主导下向底部沉积，而啮合区螺棱的机械推送则促使物料沿轴向实现正位移输送。随着填充率提升，系统呈现明显的空间填充序列：左输送区优先达到饱和状态。当填充率达 30% 时，物料开始显现典型的“∞”形循环运动轨迹。据此可推断，右输送区将最终完成填充过程，形成完整的输送回路。

3.2 填充率不同对输送速率及各子区域输送量影响分析

填充率对双螺杆固体输送动力学参数的调控规律。在相同工况条件下，系统质量流率与填充水平呈正相关，当填充率从 20% 提升至 30% 时，输送效能出现显著跃升。时序分析表明，输送过程呈现典型动态响应特征：初始阶段因颗粒体系未充分建立力链网络，输送速率存在瞬态峰值；随着系统达到动态平衡，输送效率逐渐稳定并伴随小幅衰减。研究证实，填充率是影响输送性能的关键控制变量，其中 20% ~ 30% 区间为输送效能敏感区域，该发现为工艺参数优化提供了量化依据。

研究表明：填充率提高，主导输送区由下输送区转移至左输送区。在低填充工况中，垂直加料时颗粒受重力作用沉降于啮合间隙，受限于啮合区几何约束形成局部堆积，后续物料在旋转剪切与重力耦合作用下向下输送区富集，致使该区域呈现最高通量。当填

充水平提升至临界值（20%~30% 区间），左输送区因其螺槽几何容积优势，逐渐成为质量传输主通道，充分验证了输送主导区的动态迁移机制。

3.3 不同填充率对物料速度及受力影响分析

在不同填充率下，颗粒在螺杆中速度及速度矢量演化规律表明，填充率的提升促使颗粒体系速度分布趋于均匀化，且右输送区持续呈现最大速度矢量模量。该现象源于螺杆特殊几何构型与重力场的多场耦合效应：当啮合区物料堆积高度达到螺杆根径阈值时，螺杆 I 的旋转运动产生离心输送效应，将物料从啮合间隙定向抛射至非啮合区壁面，致使右输送区动能传递效率提升。高填充工况下啮合区速度梯度扩张现象显著，这归因于增强的剪切应力场与挤压作用触发的颗粒流态化响应。研究证实，右输送区与啮合区通过动力学协同作用，共同构成双螺杆系统的核心物料传输通道。

在低填充工况下，系统呈现清晰的多应力集中区，其中啮合区因承受强剪切—挤压耦合作用而形成最大应力带。随着填充率提升，全域颗粒共同参与啮合过程，新进入颗粒承受的瞬态冲击载荷可达稳态值的 2.3 倍。尽管重力场持续影响颗粒运动轨迹，但啮合区始终维持最高应力强度。研究表明，填充率通过改变力链网络拓扑结构显著调控应力分布模式，而啮合区作为核心动力传输单元，对系统效能具有决定性作用。

3.4 填充率不同对螺杆磨损影响分析

随着填充水平提升，磨损核心区持续集中于螺棱顶部，且磨损域沿推力面向螺棱背面与螺杆根部扩展。螺杆 I 的磨损强度增幅显著低于螺杆 II，呈现显著的非对称磨损特征。该现象源于颗粒动力学行为的空间异质性——冲击载荷与滑动摩擦共同构成磨损主控机制，而螺棱顶部因具有最大动态接触频率与应力集中系数成为关键磨损区。高填充条件通过提升有效接触面积引发磨损强度的非线性增长，右输送区则因填充度较低且受二次颗粒流影响，磨损增幅始终维持在 15% 以下。

当填充率提升时，平均磨损深度增加，最大磨损深度增长。这种非线性增长规律归因于接触力学机制的重构：高填充条件通过扩大接触网络规模，导致累计磨损能量密度提升至低填充工况的 2.8 倍。而在低填充条件下，得益于应力场分布均匀性，最大磨损深度增长相对趋缓，该现象与 Archard 磨损模型的预测规律高度吻合。

研究表明，磨损深度呈现显著的空间异质性：输

送段起始区域形成磨损极值区，随后沿物料运动方向呈指数衰减规律。特别在轴向距离的出口邻域，30% 与 40% 高填充工况下磨损速率急剧衰减，而 10%~20% 低填充组则保持相对平缓的下降趋势。

4 结束语

双螺杆挤出系统内物料的空间分布模式受填充率调控呈现显著分化。随着填充水平提升，输送段容积填充度持续增大，其中左输送区优先达到饱和状态，右输送区则呈现滞后填充特性。当填充率超过临界值（20%~30%）时，颗粒体系呈现典型的“∞”形循环运动轨迹。数值模拟证实：提升填充率可有效强化质量流率，尤其在 20%~30% 的过渡区间产生显著增益。颗粒动力学分析表明，高填充条件不仅促进速度场均匀化，更使右输送区产生最大速度矢量。在力学特性方面，啮合区始终作为应力集中核心区域，其峰值应力随填充率提升。磨损分析显示，螺棱顶部构成主要磨损敏感区，当填充率从 10% 增至 40% 时，平均磨损深度提升，最大磨损深度增长。本研究揭示了填充率作为关键控制参数，通过调控力链网络拓扑结构同时影响输送效能与磨损演化。通过建立输送—磨损协同优化模型，提出在 25%~35% 填充区间可实现设备效率与耐久性的最佳平衡，为工业级挤出系统工艺优化提供理论依据。

参考文献：

- [1] 张起华, 杨凯翔, 刘炳成. 基于离散元法大型双螺杆挤出机输送特性及磨损规律研究 [J]. 塑料科技, 2025, 53(08):152-157.
- [2] 傅陈超, 薛平, 张润, 等. 推进剂代料用双螺杆挤出机塑化加工过程的模拟与验证 [J]. 固体火箭技术, 2025, 48(05):748-756.
- [3] 何浪, 刘江林, 杨冬冬, 等. 双螺杆挤出机螺杆组合对碳纤维增强聚酰胺 6 均匀性的影响 [J]. 中国塑料, 2025, 39(06):14-18.
- [4] 程媛媛, 黄志刚, 徐珍, 等. 非等温环境中异向双螺杆挤出机不同接触状态对聚乳酸流动影响的仿真 [J]. 中国塑料, 2025, 39(06):54-58.
- [5] 高坤, 闫伟, 刘志刚, 等. 基于离散元法双螺杆挤出机磨损特性分析 [J]. 中国塑料, 2023, 37(11):135-140.
- [6] 张一明, 黄志刚, 徐珍, 等. 螺距变化对异向双螺杆挤出机流场影响的仿真分析 [J]. 食品与机械, 2023, 39(10):93-99.
- [7] 陈思萌, 金志明, 薛平, 等. 锥形双螺杆挤出机熔体输送段相似放大设计 [J]. 塑料, 2022, 50(06):93-97.