

注塑机用波状双螺纹屏障销钉螺杆设计及塑化性能研究

李浩娜

博创智能装备股份有限公司 广东 广州 511300

【摘要】：针对常规注塑机螺杆在短长径比运行工况下塑化质量差、生产能耗高、设备运行不稳定等工程问题，设计出一种适合于注塑机成套塑化系统的波状双螺纹屏障销钉螺杆。采用分段式功能结构来完成整体构型设计，确定加料段、变距副螺纹熔融段、屏障混炼段、销钉混炼段的结构参数和尺寸配比关系。采用固液相分离输送原理以及阶梯式多级剪切混炼机理来完成小长径比条件下聚合物物料的均质塑化。搭建工业注塑试验平台进行对照试验，试验结果表明该新型螺杆在长径比 20 比 1 的紧凑结构中完成通用聚丙烯物料的均质塑化，在零背压的特殊注塑工况下也可以满足要求。新型螺杆的物料输送效率比行业标准常规三段式注塑螺杆提高了 12.6%，设备产能提高了 10.3%，单位产品的生产能耗降低了 11.5%。能够很好地抑制螺棱机械刮磨、熔体压力周期性的波动，从而减小注塑设备的运维损耗。该设计方案可以给中小型精密注塑机高效低耗塑化核心部件的结构优化以及工程量产使用赋予理论依据和数据支撑。

【关键词】：注塑机；塑化系统；双螺纹螺杆；屏障销钉结构；螺杆结构设计

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.084

引言

高分子塑料制品具有原材料成本低、化学理化性能稳定、轻量化成型效果好等特点，已经广泛应用于航空航天精密零部件、食品医疗密封包装、工业精密装备制造、民用汽车内饰生产等全产业链中。注塑成型是热塑性高分子材料的主流成型工艺，制品成型精度、外观质量、批次生产一致性以及生产线综合运行效率，全部取决于注塑机塑化系统的性能。为了克服短长径比工况下螺杆塑化质量、运行稳定性以及生产能耗三者之间存在的矛盾，本文根据固液相分离输送理论以及多级阶梯剪切混炼机理，研制出一种波状双螺纹屏障销钉复合功能注塑螺杆。采用标准化分段参数设计压缩整机设计长径比，搭建同机台对照工业试验，对新型螺杆输送能力、熔体均质性能、能耗指标和设备运行稳定性指标进行量化分析，验证该复合结构螺杆的工程落地可行性。

1 新型螺杆整体结构设计及基础参数

本次设计的波状双螺纹屏障销钉螺杆适用于常规卧式往复式注塑机成套塑化系统，整机额定注塑压力为 130MPa，机筒内衬装配尺寸为 $\phi 50\text{mm}$ 。为了达到设备轻量化设计的目的，将螺杆整体设计的长径比定为 20 比 1，螺杆外径 D 设为 50mm。沿着高分子物料轴向输送流动方向，把螺杆分成四个独立的功能结构段，各个结构段各司其职完成物料输送、压实熔融、剪切混炼、熔体稳压全流程作业。四段功能结构为直槽加料输送段、变距波状双螺纹副熔融段、屏障孔板式剪切混炼段、圆柱销钉均质混炼退刀槽段。各个功能段的轴向长度标准化设计参数为：

- (1) 加料输送段 L_1 ：轴向有效工作长度 $8D$ ；
- (2) 变距副螺纹熔融段 L_2 ：轴向有效工作长度 $6D$ ；
- (3) 屏障销钉复合混炼段 L_3 ：轴向有效工作长度为 $1.25D$ ；

(4) 装配退刀槽功能段 L_4 ，无固定标准长度，根据注塑机料筒装配公差、液压顶出配合尺寸现场匹配加工。

螺杆基体全部采用行业专用的 38CrMoAlA 氮化合金钢，经过整体调质热处理之后再表面氮化处理，工作面硬度保持在 950~1050HV 之间，从而提高耐磨和耐腐蚀性能，适合大多数聚烯烃、通用工程塑料注塑加工的工况。

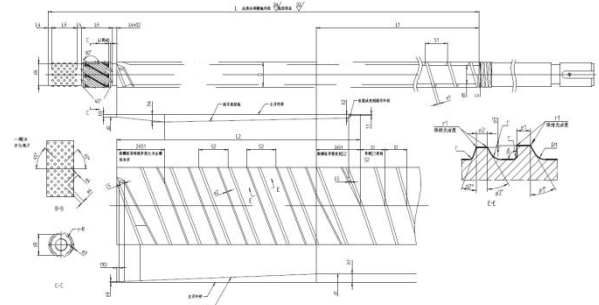


图1 螺杆专用于注塑机整体塑化系统

2 各功能段工作机理及作业流程

2.1 加料输送段

颗粒状高分子原材料从注塑机料斗落入螺杆加料段螺槽区域之后，完成了固体颗粒轴向输送以及低温预热预处理。该结构段为大槽深、等距、单螺纹基础，螺槽容积大，物料承载能力好。依靠螺杆旋转时螺棱对侧接触面的轴向推力，使固体物料床连续向前稳定输送。物料输送时依靠外部机筒环形加热圈对物料进行全域预热，原材料内部吸附的游离水汽、颗粒间的空隙被包裹着，可以由螺杆和机筒微小的配合间隙自行排出，从根本上避免了后期熔融注塑工序中出现的气泡、分层成型等问题。该结构段主要用物理输送和低温预热，没有强剪切换热动作，最大限度地减少固体物料输送运行阻力。

2.2 变距双螺纹副熔融段

变距波状主副双螺纹结构是该新型螺杆的核心创新结构之一，其主要功能就是完成固液两相物料的自动分流、固相物料的渐进压实熔融，整体工作流程和结构特点分为两个方面。

2.2.1 双螺槽固液分流输送机理

物料经过加料段进入本区段之后，异形双螺槽腔体把物料分成两相。由加料段直接延伸成型的固相物料输送槽，沿物料流动方向槽深和槽宽逐渐变小，形成正向压缩比，使松散的塑料固体颗粒得到压实，增大固相物料的堆积密度，提高物料受热熔融速度。独立设置的熔体储存输送槽按流动方向逐渐变宽加深，形成反向负压储存腔体。前期受热完全熔融的高分子熔体自动流入熔体槽内低压储存输送，解决传统单螺纹螺杆固体床大面积提前破碎、固液物料无序混杂的行业难题。

2.2.2 波状变距螺纹配合特性

本段主螺纹和副螺纹采用连续平滑波状变距构型，区段末端主副螺纹螺距完全对齐统一。副螺纹整体外形尺寸小于主螺纹结构，副螺纹棱面与机筒内壁装配间隙严格控制在熔体单向流通阈值范围内。只允许液态高分子熔体穿过间隙流动，大尺寸未熔融的固体颗粒不能穿过间隙，从而达到固液相物料全自动精准分流输送的目的。彻底解决固体颗粒卡滞螺棱间隙造成润滑失效、局部扭矩过大、熔体压力急剧变化等设备运行故障。

2.3 屏障板式剪切混炼段

屏障板式结构是螺杆核心剪切熔融单元，主要完成未熔融固相颗粒筛选、强制剪切熔融和初级熔体均质混合，工作过程可以分为物料筛选、剪切熔融、流场混炼三个环节。

2.3.1 固相颗粒分级筛选

双螺纹段初步熔融、分流后得到的固液混合物料进入前段屏障板式混炼单元。带微量细小固相颗粒的多相料流，被环形屏障棱均匀分割成多路独立薄层料流。根据屏障间隙尺寸筛选机制，粒径小于设计间隙阈值的微小固相颗粒随着熔体一起正常穿过屏障结构到达下游出料腔体。大尺寸未熔融塑料颗粒被拦截滞留在屏障进料侧腔体里，从而实现固液两相的二次筛选。

2.3.2 高压剪切辅助熔融

滞留大颗粒物料在螺杆旋转剪切、机筒高压挤压耦合的作用下，受到很大的局部剪切作用力。螺杆旋转输入的机械能大部分转化为局部剪切热能，迅速超过高分子物料熔融相变温度，使大颗粒物料瞬间发生熔融相变。本节用机械剪切生热的方式来降低机筒外的加热负荷，这也是新型螺杆节能特性的重要来源。

2.3.3 涡状流场均质混炼

物料在屏障槽体内同时有轴向输送移动和圆周旋流复合

运动，腔体内部形成稳定的涡状混合流场。该复合流场可以打散熔体局部高温区和低温区，消除熔体径向温度梯度偏差，使熔体填料和助剂得到初步的均质混合，为后端销钉精细混炼提供物料基础。

2.4 销钉均质混炼及退刀槽段

完成屏障段的初级剪切熔融，形成均质的多相熔体，然后送入后面多排圆柱销钉的精密混炼区。圆周阵列分布的圆柱形混炼销钉是高精度熔体均质化单元。螺杆连续转动时，全域熔体料流被多排交错的销钉不断物理分割、侧向分流、腔体汇合重组。

整个单元完成多轮的分割、分流、汇合闭环混炼过程，完全消除熔体径向、轴向温度差异，消除填料组分局部富集。该销钉混炼结构具有低压弱剪切的作业特点，不需要保持较高的背压就能得到全域均匀稳定的熔体。适应零背压精密注塑特殊生产工况。末端退刀槽只起到机械加工磨削退刀、整机同轴装配的作用，不参与物料塑化混炼作业。

3 工业试验方案与性能测试结果

3.1 试验基础条件

为了客观地对新型螺杆的塑化运行性能进行比较，使用单一变量对照试验的方法。试验设备采用同一台卧式 160t 标准注塑成型机，试验用料为市售通用食品级聚丙烯 PPH-T03 塑料颗粒，全过程不改变机筒加热工艺曲线、注塑行程、螺杆转速、模具冷却参数。对照组采用装配行业标准的 24 比 1 长径比三段式注塑螺杆，试验组采用本文提出的 20 比 1 长径比波状双螺纹屏障销钉新型螺杆。核心测试指标有熔体出口温度、熔体压力波动幅值、小时生产产能、单位产品电耗、机筒内壁磨损速率。

3.2 两组螺杆塑化性能对照数据

稳态生产工况下两组螺杆平行试验测试数据如表 1 所示。

表 1 不同结构螺杆塑化及运行性能对照试验数据

测试指标	常规三段式螺杆 (L/D=24:1)	新型屏障销钉螺杆 (L/D=20:1)	指标变化幅度
熔体温度均匀性/℃	±4.2	±1.8	波动降低 57.1%
熔体压力波动值/MPa	±2.8	±0.9	波动降低 67.9%
小时制品产能/件	865	954	产能提升 10.3%
单位产品电耗/kW·h	0.087	0.077	能耗降低 11.5%

螺杆运行平均 扭矩/N·m	318	276	运行扭矩下降 13.2%
零背压工况生 产适配性	无法正常稳态生 产	连续稳定量产	实现零背压工 况作业

3.3 性能结果综合分析

根据试验数据以及现场设备运行工况，从工程应用角度出发，对本新型螺杆的三个主要技术优势进行梳理。

第一，在小长径比工况下达到很高的精度均质塑化。依靠双螺纹固液分流、屏障销钉两级复合混炼结构，冲破长径比约束门槛。仅仅依靠 20 比 1 紧凑的结构尺寸，熔体温度的偏差以及压力的波动幅度都比常规的大长径比工业螺杆要小得多。设备整机轴向结构长度缩短 16.7%，注塑机组占地面积变小，适合于轻量化小型精密注塑工作站的布置。

第二，整机输送效率高、节能效果好。分流构型完全避免了固相物料堵塞螺棱间隙的问题，螺杆和机筒内壁全程有稳定的熔体润滑油膜，机械摩擦输送阻力大大减小。屏障单元剪切自发热代替一部分外部电加热负荷，整机综合能耗下降超过 11% 以上，符合注塑行业节能验收标准。生产线的有效产能同步提高，可以大批量、标准化地生产制品。

第三，机械设备的运行稳定性、服役寿命得到大大提高。常规螺杆固体颗粒卡滞造成的瞬间高压冲击被完全消除，螺杆整个行程的旋转受力均衡，螺棱同机筒内壁的硬性机械刮磨次数明显减少。设备运行无异常震动和异响故障，螺杆、机筒、止推轴承等高价易损件运维周期提高 40% 以上，降低工厂设备后期运维人工及配件费用。

4 螺杆关键结构参数优化分析

4.1 核心敏感参数筛选

根据前面的试验结果以及螺杆塑化机理分析可知，影响该波状双螺纹屏障销钉螺杆塑化效果的主要结构参数有副螺纹装配间隙、屏障棱流通间隙、销钉排布密度这三个结构变量。其余基础尺寸如螺杆外径、各个功能段的轴向长度等对整机运行趋势影响不大，是固定的参数，不需要后期工况适应性的调整。三个敏感参数直接影响到固液分流效果、物料剪切强度和

混炼均匀度，工程上给螺杆的定制化提供控制参数。

4.2 参数匹配性约束原则

根据聚丙烯注塑工况试验数据来确定该型号螺杆参数匹配设计准则，即副螺纹与机筒内壁间隙控制在 0.08~0.12mm 之间，间隙过大造成大颗粒固相物料泄漏，失去固液分流作用；间隙过小增加输送扭矩，提高设备运行能耗。屏障棱最优流通间隙设为 0.15mm，在这个参数下颗粒筛选效率和剪切生热效果达到了平衡点，防止过高的剪切使高分子物料发生热降解。最后销钉用圆周 6 列、轴向 4 排的阵列方式布置，疏密适度，既可使熔体充分被分割混炼，又不会造成熔体料流堵塞或者注塑背压过高。

4.3 结构缺陷与优化方向

试验过程中发现该螺杆存在局部工况适配的缺陷，对于高填充无机填料改性塑料，现有的销钉布置剪切强度不够，容易造成填料团聚，高温工程塑料工况下，屏障棱局部应力集中磨损速率比螺纹基体略高。后续结构优化可以局部硬质合金喷涂强化易磨损部位，对于高填充物料加大屏障段的剪切梯度，对不同类型的物料进行差异化的调整，使销钉直径和排布间距得到改变，拓宽物料适用范围。

5 结论

本文完成了波状双螺纹屏障销钉复合功能注塑机螺杆整体结构设计、工作机理分析和工业对照性能试验。采用分段功能耦合设计方法，设计出 20 比 1 短长径比新型注塑螺杆，解决了目前注塑螺杆短长径比上塑化不均、压力波动大的技术难题。结构参数标准化程度高，机械加工复刻性好，可以直接大批量生产加工。波状变距双螺纹实现固液相自动分流输送，屏障剪切+销钉均质两级混炼结构，可以完成低压、零背压多工况高质量塑化作业，适配精密薄壁制品注塑生产场景。经过工业现场的试验证明，该种新型螺杆相比传统的标准三段式注塑螺杆，具有轻量化、高效、高稳定性的特点，各项核心指标（产能、能耗、设备磨损）均优于传统结构，可以直接用于现有的卧式注塑机改造升级。后续可以对改性玻纤增强塑料、高填充功能塑料等特殊物料体系进行流场温度场耦合仿真分析，微调屏障间隙和销钉排布参数，拓宽该复合螺杆结构全品类高分子材料的适配范围。

参考文献:

- [1] 方文.塑料注塑成型技术新进展[J].塑料工业,2021,39(04):6-9.
- [2] 治睿,汪芳.双螺杆挤出机温度控制系统的设计与优化[J].合成树脂及塑料,2019,33(04):55-59.
- [3] 陈晓华.全电动注塑机的绿色生产技术[J].橡塑技术与装备,2019,45(8)33-37.
- [4] 杨卫民,高世权.注塑机使用与维护技术讲座(七)注塑机的维护和保养[J].橡塑技术与装备,2014,40(16)54-60.
- [5] 张友根.注塑机交流伺服电动机驱动液压泵系统的应用及设计研究[J].液压气动与密封,2010,30(12)15-24+40.