

混料 PE 管生产用行星齿轮混料机的优化设计与分析

邵海祥

杭州中祥通讯器材有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】行星齿轮混料机是混料PE管生产的关键设备，传统设计存在混料不均、能耗高和设备易损等情况。重新规划结构参数、制定动力学优化方案并创新关键部件设计，可改善物料混合路径与动力传输效率。仿真验证和企业生产测试显示，优化后混料机单批次混料周期缩短33%，产品壁厚偏差缩小67%，能耗明显降低，年度综合经济效益提升150万元，为行业设备升级提供技术方案。

【关键词】行星齿轮混料机；PE管生产；优化设计；动力学分析

Optimization design and analysis of planetary gear mixing machine for mixed PE pipe production

Shao Haixiang

Hangzhou Zhongxiang Communication Equipment Co., LTD. Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】The planetary gear mixer is a critical piece of equipment in the production of PE pipes. Traditional designs often suffer from uneven mixing, high energy consumption, and frequent equipment wear. By redefining structural parameters, formulating dynamic optimization plans, and innovating key component designs, the efficiency of material mixing paths and power transmission can be significantly improved. Simulation and production tests have shown that after optimization, the mixing cycle for a single batch of the mixer is reduced by 33%, the wall thickness deviation of the product is reduced by 67%, energy consumption is notably decreased, and the annual comprehensive economic benefits are increased by 1.5 million yuan, providing a technical solution for industry equipment upgrades.

【Key words】planetary gear mixer; PE pipe production; optimization design; dynamic analysis

引言

混料 PE 管因性能优异在给排水、燃气输送等领域应用广泛，其产品质量与混料环节设备性能密切相关，传统行星齿轮混料机受结构设计局限和技术滞后影响，难以满足市场对管材高精度、高效率的生产要求。伴随行业竞争加剧和环保标准提高，优化混料机性能成为企业降本增效、增强竞争力的重点，探索行星齿轮混料机的优化途径，对推动混料 PE 管生产技术创新有重要现实意义。

一、行星齿轮混料机现存问题分析

（一）结构设计缺陷对混料效果的影响

行星齿轮混料机结构设计影响物料运动轨迹与混合均匀度，传统机型齿轮传动比和搅拌桨叶布局欠合理，使物料在混料腔内形成局部滞留区域，齿轮组中心距偏差与模数选

择不佳，造成搅拌轴转速和扭矩输出不稳定，导致物料混合时剪切力分布不均。混料腔内壁粗糙度和导流板角度未依 PE 管原料特性优化，易引发物料粘附与混合死角，致使最终混合物料粒度分布离散度大，难以满足 PE 管生产对物料均匀性的严格要求，这些结构缺陷造成混料效率低，成品管材出现壁厚不均、力学性能波动等质量问题。

（二）能耗与设备磨损问题成因剖析

行星齿轮混料机运行时能耗与磨损问题相互关联且成因复杂，齿轮啮合副齿廓精度不足和润滑系统设计缺陷，加剧传动部件间摩擦损耗，导致设备运行能耗明显增加^[1]。高负荷运转中，齿轮表面易出现点蚀与胶合现象，缩短设备使用周期，混料机动力传输系统缺少缓冲设计，启动与制动瞬间的冲击载荷进一步加速轴承、联轴器等关键部件磨损，物料混合时的交变应力使搅拌桨叶产生疲劳裂纹，而传统材料抗磨损性能欠佳，难以适应高强度混料作业，导致设备维护频率提高，维修成本与停机时间显著增多。

（三）现有技术难以满足高质量生产需求

混料 PE 管生产朝高精度、高效率方向发展，现有行星齿轮混料机技术显现明显局限，传统设计依靠经验公式选取参数，缺少对物料流变特性的动态响应机制，难以满足不同配方 PE 原料的混合需要。控制系统自动化程度低，不能实现混料过程实时监测与精准调控，造成批次间产品质量一致性差，设备模块化与可扩展性不足，难以集成新型材料工艺与智能监测技术，在市场对 PE 管环保性能、耐老化性能要求日益提升的背景下，现有混料技术在温度控制精度、物料氧化防护等方面的缺陷，限制了高质量管材的稳定生产。

二、行星齿轮混料机优化设计思路

（一）基于混料需求的结构参数重新规划

为进一步符合混料 PE 管生产对物料混合均匀性及生产效率的严格需求，进行行星齿轮混料机结构参数的系统性规划极为关键，在混料腔设计这个范畴，依靠 CFD 流体仿真做分析，把内壁曲率优化成一种渐变式抛物线结构，把导流板倾斜角度自传统的 30° 调至 45° ，让物料在腔内造就三重螺旋的对流路径，全面消除物料的滞留死角。以行星齿轮组为对象，采用齿轮动力学计算软件，把模数从 2.5 优化至 2.2，把压力角从 20° 调至 18° ，把传动比再次匹配到 5:1 保证搅拌轴在 120 – 300r/min 转速区间的扭矩波动不超出 $\pm 3\%$ 范围，搅拌桨叶采用的是不对称变螺距设计方式，与具备 0.1Hz 级精度调节能力的变频调速系统相配合，3 分钟内即可完成从高密度聚乙烯到交联聚乙烯不同配方物料的适配性混料操作，实现混料精度至 98.5% 的提升，极大增进设备对多样化生产需求的回应能力。

（二）动力学优化方案的制定

为减少能源损耗、延长设备服役寿命，必须对行星齿轮混料机的动力学性能开展全面优化，凭借建立齿轮传动系统的动力学模型，审视齿轮啮合过程中载荷分布与振动的特性，实施齿轮修形参数的优化，减小传动开展期间的冲击与噪声，采用阻尼减振装置及柔性联轴器，降低启动、制动瞬间出现的冲击载荷，减少轴承跟轴系的疲劳伤害。对润滑系统设计进行优化，采用强制循环式润滑手段，采用高精度的密封结构，让齿轮副及轴承处于理想的润滑状态，让摩擦损耗有所下降，依照物料混合过程的动态负载属性，定制智能功率调节系统，做到动力输出跟混料工况的精确匹配，切实

减少能源消耗。

（三）关键部件的创新设计

着眼于混料机易损部件及核心功能要求，实施关键部件创新型设计，采用高强度耐磨合金材料制作搅拌桨叶，表面采用激光熔覆处理，增强耐磨蚀与抗腐蚀的能力，提升使用的寿命长度，行星齿轮借助粉末冶金成型工艺，实现齿形结构的优化，改善齿轮承载能力及传动效率^[2]。构建新型快拆式密封格局，让维护流程得以简化，加大设备密封的力度，阻止物料泄漏及外界杂质的侵入，把温度传感器及压力传感器集成到混料腔关键处，实时检测混料过程相关参数，为控制系统提供精准无误的数据支持，做到混料流程的智能调控及故障预警，保证设备稳定运转，提升产品质量。

三、优化设计的模拟验证与分析

（一）仿真模型的构建与参数设定

运用多物理场耦合方法构建行星齿轮混料机仿真模型，对混料腔、行星齿轮传动系统、搅拌桨叶等部件进行三维实体建模，通过有限元网格划分技术，对齿轮啮合面、桨叶边缘等关键结构区域实施加密处理，将最小网格尺寸控制在 0.5mm 以保障计算精度。参数设定上，根据 PE 原料流变特性数据，输入物料密度、粘度、热传导系数等参数，并结合混料工艺要求，设定搅拌轴转速、混料时间等运行参数，齿轮传动系统参数按优化后的设计方案配置，涵盖齿轮模数、压力角、中心距等，定义各部件间接触关系与约束条件，添加流体域与固体域耦合边界，同时引入热-结构耦合模块模拟混料过程升温效应，实现对混料过程流固耦合效应、热传递现象的精确模拟。

（二）混料效果与能耗指标模拟结果

仿真计算可获取混料过程中物料混合均匀度、速度场分布、温度场变化等数据，量化评估混料效果^[3]。混合均匀度指标采用方差分析法计算物料组分浓度分布离散程度，直观反映混料质量，速度场模拟显示，优化后的搅拌桨叶布局使物料形成多层循环流动，有效消除混合死角，能耗指标通过监测齿轮传动系统扭矩变化、轴承摩擦力矩及电机输入功率，分析设备运行能量损耗分布。模拟数据表明，优化设计明显降低单位混料量能耗，且混料腔内温度波动控制在工艺要求范围内，为实际生产提供可靠性能预测。

（三）模拟数据的对比与优化方案调整

仿真模拟数据与传统设计参数计算结果对比,从混料均匀度、能耗、设备受力等维度分析差异,引入方差分析与浓度梯度映射技术量化混合均匀度差异,针对浓度标准差超标的 0.15 区域,将搅拌桨叶前倾角度从 12° 调至 18° ,导流板弧度修正为 R150mm。若能耗模拟值超出目标值 8%,则采用齿廓修缘量 0.08mm 的优化设计,并用粘度指数 150 的合成润滑油提升润滑效率,经 12 轮迭代计算,建立参数-性能响应曲面模型,筛选出传动比 4.8、桨叶线速度 12m/s 的最优组合,结合敏感性分析,明确齿轮模数与桨叶螺距为关键影响参数,灵敏度系数分别达 0.72 与 0.68,为后续设计优化提供量化依据,确保最终方案满足生产需求并实现设备性能最大化提升。

四、优化设计的实际应用与效益评估

(一) 优化后混料机的生产测试

国内某大型 PE 管生产企业引入优化设计的行星齿轮混料机后开展全面生产测试,针对不同规格 PE 管产品对应的原料配方进行连续 100 批次混料作业,测试中精确监测混料机运行参数,包括搅拌轴转速波动、电机电流变化等,并利用在线粒度分析仪与浓度检测仪实时采集物料混合均匀度数据。结果显示,混料机启动平稳,运行全程无异常振动与噪声;处理常用 PE 原料时,搅拌轴转速稳定在设定值 $\pm 2\%$ 范围内,电机电流波动控制在 5% 以内,保障动力输出稳定;物料混合均匀度经检测,关键组分浓度标准差较传统设备降低 30%,粒度分布变异系数缩小至 10%,充分验证优化后混料机在复杂生产工况下的稳定性与混料精准度。

(二) 生产效率与产品质量提升效果

前面提到的企业用上优化混料机后,生产效率大幅上扬,因混料时间明显缩减,单批次混料周期从最初的 30 分钟减少至 20 分钟,生产效率增进了 50%,以往每日产能 100

吨,现在提升至 150 吨,切实缓解订单交付难题,利用引入在线质量监控系统这一举措,即刻采集混料数据并反馈校准,产品质量维度而言,由于物料实现了更均匀地混合,所制成 PE 管的壁厚偏差维持在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内,与之前 $\pm 0.3\text{mm}$ 的偏差跨度而言,精度实现明显提升。管材拉伸强度标准差出现 15MPa 的降低,于抗冲击性能测试期间,破损率从 5% 减低至 1%,产品性能一致性呈现显著强化态势,次品率自 8% 降低至 3%,设备连续稳定运转时长从 48 个小时提升至 72 小时,极大增强了企业产品在市场里的竞争力,

(三) 经济效益与行业应用价值分析

从经济收益角度看,该企业运用优化混料机以后,每年节省的电费差不多 50 万元,因次品数量下降,节约原料成本 80 万元,设备维护的频次显著下降,年设备维护费用下降了 20 万元,年度综合经济效益实现 150 万元的提升^[4]。从行业应用价值的层面看,这一优化成果为混料 PE 管生产行业给予示范借鉴,其拥有高效、节能、优质属性的混料模式,可在各类规模企业里推广,助力行业整体向精细化、高效生产迈进转型,助力行业在原料利用、产品质量、能源消耗等关键指标处实现系统性改良,强化行业于国际市场的综合竞争力。

结语

针对混料 PE 管生产需求,对行星齿轮混料机结构、动力学性能优化及关键部件创新设计,可改善物料混合均匀度与设备运行效率,降低能耗与磨损,仿真验证与生产实践表明,优化后混料机在混料精度、生产效率及产品质量上均显著提升,为企业创造可观经济效益。未来,随着 PE 管生产工艺向智能化、绿色化发展,行星齿轮混料机将融合先进传感技术与智能控制算法,持续提升混料过程精准度与设备自适应能力,推动行业技术升级与可持续发展。

参考文献

- [1]任大勇.PE 管在滚装船压载水系统的应用及生产设计[J].船舶物资与市场, 2022, 30 (05): 56-58.
- [2]梅怡.空间特殊运动混料机的分析研究[J].贵阳学院学报(自然科学版), 2012, 7 (02): 37-40.
- [3]徐兵, 杨宏美.PE 管过滤器在 ADC 发泡剂生产中的应用[J].广州化工, 2011, 39 (17): 108-109+119.
- [4]廖毅.PE 管在蓬莱盐化生产中的应用[J].中国井矿盐, 2007, (02): 37-38.

作者简介: 邵海洋, 出生年月: 1968.01.17, 男, 汉族, 籍贯: 浙江省杭州市萧山区, 学历: 大专, 研究方向: 机电制造方向。