智能生产系统在塑料助剂制造中的集成与应用

吴会廷[1]，孙 芳[2]

（1.信阳航空职业学院信息技术学院，河南 信阳 464000；2.信阳师范大学计算机与信息技术学院，河南 信阳 464000）

摘 要：塑料助剂是塑料工业的关键辅助材料，其制造过程具有多品种、小批量、高精度及严格环保要求等特点。智能生产系统凭借自动化、数据驱动和柔性化生产等优势，正逐步嵌入塑料助剂制造行业，以应对传统生产模式中效率低下、质量控制不稳定及资源浪费等问题。文章综述智能生产系统嵌入塑料助剂制造中所面临的技术集成难度高、数据安全与系统稳定性风险、工艺参数优化与质量控制等挑战，提出分阶段推进技术集成、构建多层次数据安全防护体系、打造智能工艺优化与质量控制体系等针对性措施，旨在提升塑料助剂制造业的智能化水平，实现高效、精准、绿色的塑料助剂制造。

关键词：智能生产；塑料助剂；技术集成；安全防护；质量控制

中图分类号：TQ314 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3360（2026）09-0220-05

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.039

Integration and Application of Intelligent Production System in Plastic Additive Manufacturing

WU Huiting[1], SUN Fang[2]

(1. Information Technology Academy, Xinyang Aviation Vocational College, Xinyang 464000, China; 2. School of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Plastic additives are key auxiliary materials in the plastics industry, and their manufacturing processes are characterized by a wide variety of products, small batch sizes, high precision, and stringent environmental protection requirements. Intelligent production systems, leveraging advantages such as automation, data-driven operations, and flexible manufacturing, have been increasingly integrated into the plastic additives manufacturing industry to address issues including low efficiency, unstable quality control, and resource waste inherent in traditional production modes. The article reviewed the challenges faced during the integration of intelligent production systems into plastic additives manufacturing, including high technological integration difficulty, data security and system stability risks, as well as process parameter optimization and quality control challenges. Corresponding countermeasures were proposed, such as phased implementation of technology integration, establishment of multi-level data security protection systems, and development of intelligent process optimization and quality control systems. The aim was to enhance the intelligence level of the plastic additives manufacturing industry and achieve efficient, precise, and green production of plastic additives.

Keywords: Intelligent production; Plastic additives; Technical integration; Security protection; Quality control

塑料助剂作为高分子材料改性的关键组分，其制造过程依赖传统间歇式生产模式。该模式存在自动化程度低、能耗高以及质量控制不稳定等问题，严重制约行业效益的提升[1]。在“双碳”目标与数字化转型的双重驱动下，

收稿日期Submitted date 2025-10-20；修回日期Revised date 2025-11-15；录用日期Accepted date 2025-12-17

基金项目：2024年度教育部产学合作协同育人项目（231000506111911）

联系人，im_wht@126.com

引用本文：吴会廷，孙芳.智能生产系统在塑料助剂制造中的集成与应用[J].塑料科技，2026，54(9)：220−224.

Citation：WU H T, SUN F. Integration and application of intelligent production system in plastic additive manufacturing[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 220-224.

智能生产系统嵌入塑料助剂行业已成为必然选择[2]。智能生产系统以自动化设备、工业互联网、大数据分析为核心，通过“手、眼、脑”协同实现全流程智能化运作，具备自感知、自决策、自优化能力，能够为塑料助剂制造的高效、低耗运行提供全新路径[3]。

本文综述智能生产系统在塑料助剂制造中的应用前景、现实问题和优化路径，为塑料助剂制造提供参考。

1 智能生产系统在塑料助剂制造中的应用前景

智能生产系统在塑料助剂制造领域呈现广泛的应用前景[4]。该系统能够融合智能传感、数字孪生及大数据分析等技术，系统分析其在塑料助剂制造工艺优化、质量控制和能效管理方面的应用价值，明确智能生产系统在构建全流程智能化生产体系及推动间歇式生产向连续化制造的范式转移中的关键作用，为后续特种塑料助剂开发、定制化生产提供新的价值增长空间[5]。

智能生产系统通过高精度传感器与自动化控制单元的协同工作，降低塑料助剂制造中的配料误差[6]。在增塑剂生产过程中，系统可通过实时监测邻苯二甲酸酯类原料的投料量，利用闭环反馈机制自动调整阀门开度确保配比精确性。这不仅能够提升塑料助剂产品质量，还能降低质量事故风险[7]。金泓集团投资建成的智慧管理平台集成分布式控制系统(DCS)和安全仪表系统(SIS)等功能，实现了生产全流程的实时监控与智能调控，使总人工成本降低30%，总成本降低10%~15%[8]。

人工智能的应用能够显著提升塑料助剂生产过程中配料环节的精确性。人工智能在聚氨酯配方研发过程中能够构建原料属性信息库与效能评估系统，运用数据挖掘对过往配方记录进行智能分析，准确推算最佳原料配比方案[9]。该技术手段不仅能够缩短复合型助剂的研发周期，还能够确保产品性能达到理想状态。在实际应用中，百子尖的化工仿真软件通过“计算筛选-实验验证”的高效创新链，帮助特种工程塑料企业将新型聚酰亚胺的开发周期从36个月缩短至18个月，研发成本降低55%[10]。

原料成本在塑料助剂生产中占比较高，智能生产系统通过实时物料追踪与动态配方优化，可降低塑料助剂生产的原料损耗率[11]。临朐县三义集团通过建设高分子新材料智慧化工厂，实现24 h无人值守生产，产品合格率提升至99%以上，良品率从95%升至99%[12]。

2 智能生产系统在塑料助剂制造中面临的问题

智能生产系统在塑料助剂制造领域的实际嵌入仍面临诸多挑战[13]。该生产过程具有多组分协同、工艺复杂及反应条件敏感等特点，传统智能化改造方案难以直接适配，导致技术集成难度高、数据安全风险突出以及质量控制难度大等问题，严重制约塑料助剂制造行业的发展[14]。

2.1 技术集成难度高

塑料助剂生产设备普遍存在自动化程度低、通信接口缺失及非标准化等问题，兼容性不足已成为制约智能生产系统集成的主要瓶颈[15]。以促进剂2-巯基苯并噻唑(MBT)生产线为例，反应釜温度控制仍依赖手动调节，波动幅度达数十摄氏度且高度依赖操作人员经验，严重制约行业整体效益与竞争力[16]。高速混合机、反应釜等关键设备缺乏标准化数据采集接口，设备状态参数难以直接接入智能监控系统[17]。

数据孤岛现象是阻碍智能生产系统发挥效能的另一关键因素[18]。塑料助剂制造涉及原料特性、工艺参数及质量指标等多维度数据，但数据分散在不同部门和系统中，缺乏有效整合[19]。许多企业的企业资源计划(ERP)系统与生产车间之间严重脱节，生产计划需通过手动报表下发，生产数据同样依赖人工汇总反馈。这种系统间的割裂状态，使企业难以实现从原料采购到产品出厂的全流程数据追溯与优化[20]。

塑料助剂种类繁多，不同产品(如热稳定剂、抗氧剂、增塑剂及阻燃剂等)的配方与加工工艺差异显著。这种工艺的复杂性已成为智能生产系统实施的主要挑战之一，标准化方案难以直接套用，需针对具体产品特性进行定制化开发[21-22]。

2.2 数据安全与系统稳定性风险

塑料助剂制造业生产过程中涉及大量专有配方、工艺参数和客户数据等敏感信息。在工业互联网环境下，塑料助剂制造企业面临网络安全威胁[23]。实现设备、系统与人员的高度互联是智能制造系统的核心，这种开放性架构在提升塑料助剂生产效率的同时也扩大了攻击范围[24]。塑料助剂生产环境中主要的威胁包括：(1)攻击者通过工程工作站入侵，利用恶意工业插件窃取核心配方数据或篡改生产参数；(2)中间人攻击移动人机界面(HMI)，可能造成生产指令被恶意篡改；(3)攻击者直接攻击制造执行系统(MES)数据库，可能导致生产订单和工艺参数被非法修改。此外，塑料助剂生产过程中使用的Modbus和开放平台通信(OPC)等工业协议缺乏加密和认证机制，使数据传输过程易遭受窃听和篡改。

系统稳定性风险主要源于智能生产系统的复杂性和故障恢复机制的不完善[25]。连续化、自动化的塑料助剂生产过程一旦发生控制系统故障，可能导致整条生产线停摆，造成重大经济损失。当前多数企业的智能生产系统存在单点故障，可编程逻辑控制器(PLC)或关键服务器出现问题时，缺乏有效的冗余切换机制。因此，供应链安全风险也成为塑料助剂制造企业面临的关键挑战[26]。智能生产系统的建设涉及多个供应商和第三方服务提供商，任何一个环节的安全漏洞都可能成为整个系统的致命弱点。

数据保护体系薄弱在塑料助剂制造业中尤为突出。

生产数据具有较高的商业价值，一旦泄露可能造成不可估量的经济损失。然而，许多企业的数据保护措施存在严重缺陷。如生产数据在传输和存储过程中缺乏强加密保护、访问控制机制不健全、数据备份策略不完善等，均能够增加数据泄露风险。

2.3 工艺参数优化与质量控制挑战

塑料助剂制造过程中，工艺参数的精确控制与产品质量的稳定性是智能生产系统面临的核心挑战。热稳定剂和光稳定剂等塑料助剂产品对反应温度、压力及时间等工艺参数极为敏感，微小的波动就可能导致产品性能显著下降。在钙锌复合稳定剂生产中，皂化反应阶段对温度控制精度要求较高，传统控制方式难以实现±1 ℃以内的精确调控，影响产品热稳定效率[27]。不同类型塑料助剂的质量指标各异，如抗氧剂的酚含量、增塑剂的酯含量等关键参数，传统离线检测方式滞后性强，难以及时指导生产调整。智能质量预测模型的构建也面临数据不足的瓶颈，尤其对于新型特种助剂，历史数据的匮乏制约了可靠预测算法的训练[28]。

3 智能生产系统在塑料助剂制造中的优化路径

针对智能生产系统在塑料助剂制造中面临的实践困境，可以从技术集成、数据安全及质量控制3个维度来提升塑料助剂生产效率，助力塑料助剂行业实现降本增效和精准化生产。

3.1 分阶段推进技术集成

塑料助剂制造企业应识别生产流程中的关键瓶颈工序，优先在这些环节实施智能化改造，聚焦关键工序能够使塑料助剂制造企业集中优势资源，显著提高改造成效[29]。塑料助剂制造企业可对影响产品质量稳定性和生产效率的核心设备(如预混系统、反应釜温度控制系统、成品包装线等)进行升级，为塑料助剂制造后续工序的稳定质量奠定基础。在关键设备改造过程中，塑料助剂制造企业还应采用边缘计算技术作为过渡方案，解决老旧设备与智能系统的连接问题[30]。边缘计算节点部署于设备端，通过加装传感器和通信模块采集运行数据，完成初步处理与协议转换后上传至中央管理系统。该方案尤其适用于无法直接进行智能化改造的老旧设备，通过在原有系统上叠加智能层，实现渐进式的技术升级[31]。

针对塑料助剂生产多品种、小批量的特点，模块化设计理念是提升系统兼容性与灵活性的关键。模块化智能解决方案将复杂生产系统分解为相对独立的功能模块，各模块专注于特定任务，通过标准化接口实现交互[32]。该架构使生产系统能够根据需求灵活配置，同时降低整体改造的复杂度与风险。

企业可采用微服务架构的软件平台，将传统一体化MES拆分为订单管理、生产调度、质量监控及设备维护等独立服务，各服务通过应用程序接口(API)通信[33]。该架构允许企业根据实际需求部署特定功能模块并随业务发展逐步扩展系统能力。针对配方管理需求，可优先部署物料编码与配方管理模块，实现原材料和组件的精确追踪。待系统稳定运行后，再逐步引入生产排程、质量分析等高级功能，构建完整的智能制造体系。

3.2 构建多层次数据安全防护体系

工业防火墙的专项部署是塑料助剂制造企业构建网络安全防线的首要任务。与通用防火墙不同，工业防火墙需要针对塑料助剂生产环境的特点进行专门配置，重点支持Modbus、OPC、Profinet等工业协议深度解析[34]。塑料助剂制造企业可以在网络边界和关键区域之间部署具备深度包检测(DPI)功能的专用工业防火墙，实现对异常协议指令和恶意流量的精准拦截。网络分区分域管理是深度防御策略的核心组成部分。根据塑料助剂生产流程的功能特点，企业应将智能生产网络划分为办公区、生产管理区、过程控制区和现场设备区等多个安全域。各区域间实施严格的访问控制，将MES作为连接塑料制造企业信息网与生产网的枢纽部署，在专门的隔离区(DMZ)区域，实施双向流量监控[35]。部署入侵检测与威胁感知系统，可显著提升塑料助剂制造系统对潜在网络攻击的感知与响应能力。企业可在塑料助剂生产网络的关键节点部署支持工业协议的入侵检测系统(IDS)，结合签名检测与异常检测机制，识别已知攻击与异常行为。

传输层加密技术为塑料助剂生产数据在网络中的安全流动提供基础安全屏障。在控制指令、工艺参数等关键数据的传输方面，塑料助剂企业应强制使用TLS 1.2及以上版本的加密协议，避免使用明文传输的工业协议。存储数据加密是保护塑料助剂核心配方和工艺机密的关键防线[36]。塑料助剂企业应对存储重要生产数据的系统(如MES数据库、历史数据库等)实施透明数据加密(TDE)，确保即使数据文件被非法窃取，也无法直接读取其中的内容。对于特别敏感的数据，可进一步采用应用层加密，通过专业的密钥管理系统(KMS)集中管理，防止密钥泄露。对PLC冗余系统进行部署是提升塑料助剂生产稳定性的核心技术手段。寂山智工最新推出的PLC冗余系统采用多控制器协同工作模式，该系统通过创新的映像区访问模块实现数据实时同步，当主控制器故障时可实现毫秒级切换，确保生产过程连续不中断[37]。塑料助剂制造企业可以在反应釜温度控制以及配料精度控制等对关键控制节点部署此类系统，减少非计划停机时间，并辅以预测性维护机制，提升系统的智能化容错能力。

3.3 打造智能工艺优化与质量控制体系

针对不同助剂的生产特性建立多变量预测控制模型，应部署先进过程控制(APC)系统[38]。以钙锌复合稳定剂生产为例，在皂化反应阶段，APC系统可通过实时采集反应釜温度、压力、pH值及物料流量等多维度数据，结合反应动力学模型，动态计算最优控制参数。该系统能够调节蒸汽阀门开度和搅拌器转速，将关键温度区间的波

动控制在±0.5 ℃范围内，确保金属离子与有机酸充分反应，从而提高产品的热稳定性和透明性[39]。对于增塑剂生产线，APC 系统可根据酯化反应进程，自动调节醇酸质量比及催化剂添加量，从而有效提升酯化率[40]。

实现实时质量控制的核心环节是构建在线质量监测系统。塑料助剂生产企业应在生产线关键节点安装近红外(NIR)光谱分析仪、在线黏度计和色度仪等检测设备，形成分布式质量监测网络[41]。在抗氧剂生产过程中，红外光谱分析仪可实时监测中间体的酚羟基含量，每 30 s 完成一次数据采集与分析，与传统离线化验相比，时间明显缩短。当检测到关键指标偏离设定范围时，系统会自动触发调整机制，调节反应温度或补加原料，确保产品质量的一致性[42]。同时，建立基于统计过程控制(SPC)的质量预警机制，对质量数据的趋势进行分析，在出现偏差前进行干预。

图 1 为智能生产系统在塑料助剂制造中的优化路径。针对塑料助剂多组分协同的复杂性，应开发智能配方优化平台。该平台需要整合历史生产数据、实验室研发数据和原料特性数据，利用随机森林、神经网络等机器学习算法，构建组分配比与产品性能的预测模型[43]。

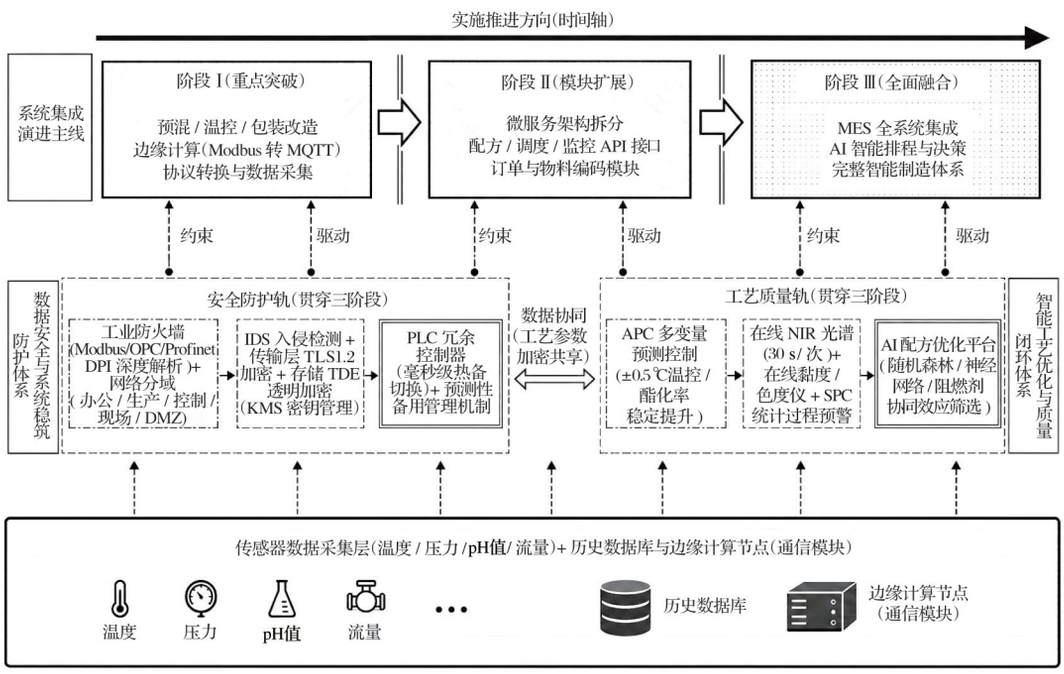


图 1　智能生产系统在塑料助剂制造中的优化路径

Fig.1 Optimization path of intelligent production system in plastic additive manufacturing

4　结论

智能生产系统在塑料助剂制造领域的应用，已显著提升了自动化配料与精准投料、实时过程监控与智能优化、智能仓储与物流管理等方面的运行效率。本文针对智能生产系统嵌入塑料助剂制造过程中面临的技术集成难度高、数据安全与系统稳定性风险、工艺参数优化与质量控制等挑战，提出分阶段推进技术集成、构建多层次数据安全防护体系、打造智能工艺优化与质量控制体系等措施。未来，塑料助剂制造企业可进一步推动 5G 网络与数字孪生技术的深度融合，实现更高效的智能化升级，助力塑料助剂制造行业向智能化、绿色化和柔性化方向发展。

参考文献

[1] LAW K L, SOBKOWICZ M J, SHAVER M P, et al. Untangling the chemical complexity of plastics to improve life cycle outcomes[J]. Nature Reviews Materials, 2024, 9(9): 657-667.

[2] 潘丽娜. 塑料材料与室内环境设计的融合创新: 评《塑料材料与助剂》[J]. 化学工程, 2025, 53(4): I0009.

[3] CHEN W G, WEI H J, LUO J C, et al. Highly stretchable, ultratough, and multifunctional poly(vinyl chloride)-based plastics via a green, star-shaped macromolecular additive[J]. Macromolecules, 2021, 54(7): 3169-3180.

[4] 张训成, 胡锦轩, 伦云霞, 等. 废旧塑料协同增塑剂对沥青高低温性能的影响[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(5): 106-111.

[5] 张涛涛, 王思懿, 张颖, 等. 聚丙烯塑料的环境分布与毒理学研究进展[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(5): 151-172.

[6] 杨倩, 陆嘉莉, 冉露, 等. 气相色谱串联质谱法测定塑料玩具中非邻苯二甲酸酯类增塑剂的迁移量[J]. 塑料科技, 2025, 53(6): 144-151.

[7] 李波, 殷明刚, 胡兴宇. 聚氯乙烯塑料地板研究进展[J]. 塑料助剂, 2025(3): 82-85.

[8] 搜狐网. 金泓集团: 破垄断 闯世界 领跑新材料赛道[EB/OL]. [2025-08-27]. https://www.sohu.com/a/944604642_121124364, 2025-10-16.

[9] 李潇. 产品设计中秸秆填充塑料的应用领域[J]. 塑料助剂, 2025(3): 95-98.

[10] 搜狐网. 化工仿真技术:数字孪生重构化工产业价值链条[EB/OL]. [2025-08-27]. https://www. sohu. com/a/901925628_121460057, 2025-

06-06.
[11] 刘东然, 谢永红, 戚永军, 等. AI引领塑料助剂行业的技术变革与产业转型[J]. 塑料科技, 2026, 54(3): 222-226.
[12] 齐鲁网. 潍坊临朐: 以技改赋能激活企业发展新动能[EB/OL]. [2025-08-27]. https://sdxw. iqilu. com/w/article/YS0yMS0xNjU1NjMxNw. html.
[13] 张亚春. 利用近红外光谱对包装塑料原料的分析[J]. 塑料助剂, 2025 (3): 68-72.
[14] MONCLÚS L, ARP H P H, GROH K J, et al. Mapping the chemical complexity of plastics[J]. Nature, 2025, 643(8071): 349-355.
[15] 杨春维, 刘明俊, 王乾. 人工智能驱动的图像识别技术在微塑料检测中的研究进展[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2025, 46(3): 104-109.
[16] TIAN J X, YAN Z F, DENG J, et al. A much cleaner oxidation process for 2, 2′-dibenzothiazole disulfide synthesis catalyzed by phosphotungstic acid[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(1): 207-214.
[17] 邹勇, 张晓明, 王振, 等. 超细滑石粉在PP及PVC领域的应用研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2023(6): 73-75.
[18] 祝嫣然. 破解"数据孤岛"难题首个全国性政务数据共享法规出台[N]. 第一财经日报, 2025-06-06(7).
[19] KANG D, KIM H I. Improvement in nano-pattern replication of injection molding by polyamide/dendrimer blend[J]. Polymer Engineering & Science, 2021, 61(3): 822-829.
[20] 张友根. 虚拟工厂科学发展开拓塑料加工智能数字化转型升级新模式[J]. 塑料包装, 2025, 35(3): 28-41,124.
[21] SUN J W, UNIVERSITY J, et al. Can rhizosphere effects mitigate the threat from nanoplastics and plastic additives to tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59 (26): 13421-13433.
[22] 李峥, 陈守开. AI在塑料助剂功能化设计中的应用潜力与实现路径[J]. 塑料科技, 2026, 54(5): 219-224.
[23] 中国石化有机原料科技情报中心站. SABIC开发苯酚纯化工艺[J]. 石油化工技术与经济, 2023, 39(5): 38.
[24] 杨善林, 张强, 康宇. 基于工业互联网的高端装备研发价值链共创生态与智能协同技术[J]. 中国工程科学, 2025, 27(3): 22-37.
[25] SPICER A J, BRANDOLESE A, DOVE A P. Selective and sequential catalytic chemical depolymerization and upcycling of mixed plastics[J]. ACS Macro Letters, 2024: 189-194.
[26] 黄菊, 李蓓. 芯片供应链安全风险检测研究[J]. 电脑知识与技术, 2025, 21(10): 5-8.
[27] 杨新, 王林林, 贾太轩. 复合热稳定剂研制及不溶性硫磺规模化生产的应用[J]. 江西化工, 2024, 40(3): 71-73.
[28] 陈宏志, 宫本儒, 王笑妍, 等. 预训练大模型在油气领域的价值场景、挑战及未来方向[J]. 现代信息科技, 2024, 8(13): 129-135.
[29] 肖津. 循环经济下塑料企业的资源循环利用[J]. 塑料助剂, 2025(1): 122-126.
[30] 肖智杰, 谢嘉成, 乔晓军, 等. 边缘计算和数字孪生融合驱动的多机高效协同运行方法[J]. 工程设计学报, 2025, 32(5): 579-589.
[31] CAO Y Y, LIU Y, GUO K H, et al. Molecular characteristics and plastic additives in dissolved organic matter derived from polystyrene microplastics: Effects of cumulative irradiation and microplastic concentrations[J]. Water Research, 2025, 282: 123641.
[32] 穆弘, 汪和龙, 杨臻, 等. 多舱体系变电站模块化布局及其方案智能生成方法[J]. 科技通报, 2024, 40(9): 36-42.
[33] 王晓璞, 赵海龙, 任玲玲, 等. 结合人工智能图像识别的微塑料运移与滞留微观可视化实验方法[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(4): 14-19.
[34] NGU J, NAJMI S, SELVAM E, et al. Catalytic deconstruction of organic additive-containing plastics[J]. Nature Chemical Engineering, 2025, 2(3): 220-228.
[35] 任杰. 基于MES的改性塑料生产线生产过程控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
[36] 石洪曙. 注塑智能生产线运行安全远程监测方法[J]. 中国高新科技, 2025(5): 26-28.
[37] WANG H S, AGRACHEV M, KIM H, et al. Visible light-triggered depolymerization of commercial polymethacrylates[J]. Science, 2025, 387(6736): 874-880.
[38] 赵长斌. 先进过程控制系统在催化裂解和气体分离装置的应用[J]. 石化技术与应用, 2023, 41(2): 130-134.
[39] 伍焕铭, 吴海龙, 曹宇. 钙锌稳定剂的质量控制[J]. 聚氯乙烯, 2021, 49(8): 19-23.
[40] 宁二龙, 李坤, 苗成才, 等. 偕二硝基酯类含能增塑剂研究进展[J]. 含能材料, 2025, 33(9): 1050-1066.
[41] 钱应平, 薛杭, 梅建良. 结晶性塑料制品注塑成形质量在线监测方法研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(9): 1073-1076.
[42] 刘婷, 邢玉琴, 戴和坤, 等. 抗氧剂1010制备工艺及生产优化研究[J]. 化学工程与装备, 2025(7): 25-27.
[43] 姜旭, 毕凤阳, 刘长喜, 等. 基于响应曲面设计的短碳纤维增强塑料注塑成型工艺优化[J]. 合成树脂及塑料, 2024, 41(6): 38-42.