

精细化工设备集成化设计与生产运营经济效能提升研究

孟 鹏 (信联电子材料科技股份有限公司, 河北 黄骅 061108)

摘要: 精细化工行业产品多样、工艺复杂, 传统分散式设备设计导致生产效率低、能耗高, 制约运营经济效能提升。设备集成化设计以系统融合、功能优化为核心, 是破解此困境的关键路径, 但当前其与生产运营的协同机制尚未完善。分析精细化工设备集成化设计与经济效能提升的现存困境, 从设计优化、技术创新、管理升级、保障构建四个维度提出实践路径。

关键词: 精细化工; 设备集成化设计; 生产运营; 经济效能

中图分类号: TQ051 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0046-03

Research on Integrated Design and Economic Efficiency Improvement of Fine Chemical Equipment Production and Operation

Meng Peng (Xinlian Electronic Materials Technology Co., Ltd., Huanghua Hebei 061108, China)

Abstract: The fine chemical industry has diverse products and complex processes. Traditional decentralized equipment design leads to low production efficiency and high energy consumption, which restricts the improvement of operational economic efficiency. The integrated design of equipment, with system integration and functional optimization as its core, is the key path to solving this dilemma, but the current collaborative mechanism with production and operation is not yet perfect. Analyze the existing difficulties in the integrated design and economic efficiency improvement of fine chemical equipment, and propose practical paths from four dimensions: design optimization, technological innovation, management upgrading, and guarantee construction.

Keywords: fine chemical industry; Integrated design of equipment; Production and operation; economic efficiency

1 设备集成化的核心逻辑与经济效能关联机理

1.1 设备集成化转型的行业动因

精细化工生产呈现出“种类繁多、批量较小、附加值较高”的特性, 与传统分散式设备的“能耗偏高、柔性欠佳、衔接损耗明显”的情况构成显著的矛盾。在传统的生产模式中, 每套设备仅负责一项单一的工序, 例如反应设备与分离设备彼此独立运转, 物料的转移需要依靠额外的输送装置实现, 不仅会使物料的损耗增加超过 20%, 而且还会由于工序的间断, 造成生产周期的延长。与此同时, 精细化工产品的质量对于工艺参数的稳定性具有较高的要求, 分散设备间的参数出现波动时, 便容易致使产品的合格比例降低, 部分高端产品的合格比例甚至达不到 90%, 低于国际上先进的水准。

政策的引导以及市场的竞争态势促使集成化转型的推进。在“双碳”目标达成的背景下, 化工行业中单位 GDP 能耗的下降指标被归入刚性考核的范畴, 传统设备存在的高能耗弊端已然成为企业得以存续的瓶颈; 如欧盟 REACH 法规等国际标准, 对化工产品环保溯源方面提出要求, 反向迫使企业达成生产全流程的可控制状态。从市场方面来看, 下游的医药、电子化学品等领域, 对于产品的纯度、杂质含量等要求在不断升高, 仅依靠终端检测的质量控制模式已经无法契合需求, 必须借助设备集成实现生产过程的精确

调控, 成为设备像集成化转型的直接诱因^[1]。

1.2 设备集成化的核心逻辑

以工艺为主导的功能模块化整合, 是集成化的核心逻辑开端。有别于传统的“设备拼接”模式, 当代的集成化设计是依照具体化工工艺的反应原理、物料的特性情况, 将关联程度高的工序进行拆解, 使之成为标准化的功能模块。例如, 会将“催化反应、在线过滤以及即时换热”工序整合成为一体化的模块, 各个模块间借助通用的接口实现连接。一方面可以确保工艺流具备连续性, 另一方面还可以达成模块的快速更换, 满足多样化品种的生产需求, 解决传统设备在“一产一备”情况下存在的灵活性不足的问题。在进行多品种切换时, 设备调整所耗费的时间占比, 从传统模式下的 40% 降低到 10% 以下。

系统协同在能量与物料优化, 构成集成化过程中重要的逻辑支撑要素。集成化的设备会借助搭建内部的能量循环体系, 将反应过程中释放出来的热量运用到后续分离工序的加热需求中, 降低对外部能源的依赖。例如, 在精细化工中间体制造环节, 反应阶段释放的热能, 可以直接为精馏塔的再沸器提供能量, 让整体的能源消耗降低超过 25%。与此同时, 通过对设备内部物料进行闭环循环的设计, 将分离工序产生的副产物直接引导回反应模块作为原料进行补充, 如此一来, 原子的利用率得以提升 15%-20%, 减少物料的浪费情况。

2 现存困境

2.1 集成化设计与生产需求脱节, 适配性不足

设计理念呈现出“对设备着重关注, 对工艺轻视”的特点。设计方大多将注意力集中在设备结构的集成方面, 却忽略精细化工工艺的特殊性质。例如, 在某医药中间体的生产设备设计里, 仅达成功能单元的拼接操作, 并未对反应过程中会出现的放热特性进行考量, 最终使得局部的温度失去控制, 对产品的质量产生影响; 设计时并未同时顾及到多品种的生产需求, 集成的设备仅可以适配某种单一的产品, 当需要切换产品品种时, 便需要进行大规模的改造, 增加运营成本。

全流程的考量出现缺失情况。设计方面仅着重于生产环节中设备的集成工作, 并未涵盖原料预处理、成品包装等前后端的环节, 由此引发“集成设备高效, 然而全流程低效”的矛盾现象。例如, 集成反应设备的产能提升, 但是原料输送设备依旧采用传统模式, 成为全流程的制约因素; 并未对设备的运维需求加以考虑, 集成设备的结构较为复杂, 检修空间狭小, 使得维护时间增长, 对生产的连续性造成影响^[2]。

2.2 核心技术支撑薄弱, 性能提升受限

关键技术面临一定的瓶颈难题。如模块化密封技术、高效传热元件等核心技术, 目前较大程度依赖于从国外进口, 国内生产的相关产品在密封性方面存在欠佳情况, 造成精细化工领域中具有高腐蚀性的物料发生泄漏现象, 同时使得设备运行的稳定程度出现下滑; 智能控制芯片以及传感器在精度上存在不够精准的问题, 难以达成对工艺参数进行毫秒级的精确调控, 对集成设备的控制精准度产生不良影响。

2.3 生产运营管理滞后, 效能释放不足

管理模式与集成设备呈现不匹配的情况。企业依旧运用传统的针对分散设备的管理模式, 并未构建专门适用于集成设备的运维体系, 例如仍然采用单一设备的点检标准, 此标准无法全面涵盖集成系统的联动故障情形; 操作人员的技能存在不足, 缺少具备“设备集成+工艺控制”特点的复合型知识, 难以充分施展集成设备的智能调控功能, 使得设备长时间处于低负荷的运行状态^[3]。

存在数据协同机制匮乏的情况。由集成设备生成的生产数据, 与 ERP、MES 等管理系统的数据库未能实现互联互通, 形成“数据孤岛”现象。例如, 设备的运行数据无法及时同步到成本核算系统中, 使得成本分析出现滞后的问题; 并且未构建起基于数据驱动的优化机制, 难以借助数据分析找出设备运行过程中的瓶颈所在, 例如, 无法依据能耗数据对工艺参数做出调整, 最终导致能源的无端浪费。

3 实践路径

3.1 优化集成化设计体系, 提升与生产的适配性

搭建以“工艺主导”为特征的全流程设计模式。将精细化工的特定工艺作为核心要素, 组建由“工艺工程师、设备设计师以及运营专家”构成的联合设计团队, 清晰界定各个环节的工艺要求。例如, 在应对高粘度物料的生产情况时, 设计具备特殊搅拌构造的集成反应模块。该模式覆盖从“原料、生产、成品到运维”的整个流程, 将原料预处理模块、成品检测模块与核心生产设备进行整合, 消除流程中存在的阻碍。同时, 预留模块化的接口, 以便于后续进行工艺的优化升级以及产品品种的转换, 增强设备的灵活程度。

开展数字化与仿真设计技术的推广工作。借助三维建模软件构建设备集成模型, 达成各单元结构可视化的对接效果, 可以提前察觉衔接冲突问题; 利用 CFD 流体仿真以及传热仿真技术对设备的运行工况进行模拟, 对传热元件的结构与物料的流动路径予以优化, 提高设备的性能表现; 创建设计数据库, 将不同精细化工品类的工艺参数与设备需求进行收录, 以此为快速设计提供有力的支撑^[4]。

对运维与环保设计予以强化。在设计期间预留出足够的检修空间, 运用模块化拆分的结构, 让核心部件的更换更为便捷; 将在线监测模块与故障预警模块进行集成, 对设备密封、温度等关键参数开展实时监测, 提前对故障发出预警; 设计废弃物回收与处理的单元, 例如将反应副产物收集模块与主体设备进行集成, 达成污染物源头的控制, 使环保成本得以降低。

3.2 突破核心技术瓶颈, 强化性能支撑

着重于关键技术的攻克。增加在模块化密封技术、高效传热元件、耐腐蚀材料等核心范畴的研究与开发投入, 构建产学研联合开展攻关的团队。例如, 研制出可以适用于精细化工高腐蚀环境的陶瓷基复合材料密封部件, 提高密封的使用时长; 钻研高精度智能传感器与控制芯片, 达成工艺参数以微秒级别的采集与调节控制, 提高控制的精准度; 打破连续流反应集成技术的限制, 让反应与分离可以同时进行, 提高原子的利用率。

积极促进技术的融合与创新。搭建起以“设备集成、智能控制以及数字化管理”为一体的融合架构, 在集成设备中嵌入工业互联网的相关模块, 达成设备运行数据的即时上传以及远程操控; 研发具备智能特性的优化算法, 依据生产过程中的具体工况, 如原料的成分构成、产品的实际需求等, 自动对反应参数加以调整, 达成“工况自适应”的效果; 将 AI 视觉检测技术与集成设备相互结合起来, 实时对产品的外观

情况与纯度情况进行检测,提高质量控制的整体水平。

3.3 升级生产运营管理,释放设备效能

构建与集成设备相适配的管理机制。拟定专门针对集成设备的运维准则,清晰界定联动故障的排查程序以及点检时长,例如创立“设备联动测试—参数校准—密封检查”的日常运维步骤;施行“全员生产维护”的方式,将设备维护的职责确切落实到操作工作人员身上,增强对设备的爱护观念;创建设备从始至终整个生命周期的档案资料,记载设计、采购、运行、维护等全部流程的相关信息,以此为管理决策给予支撑^[5]。

致力于培育具备复合能力的管理与操作人才。高校专门开设“精细化工工艺+设备集成”交叉型专业,以此来培养既掌握工艺知识又具备设备操作技能的专业人才;企业积极开展针对在职员工的培训活动,邀请设备设计领域的专业设计师以及技术精湛的专家为员工讲解集成设备的具体结构原理、实用的操作技巧以及有效的故障处理办法;通过建立“师带徒”的机制,安排经验丰富的资深操作人员对新入职的员工进行指导,可以快速提升整个团队的技能水平。

打造数据协同及驱动的体系。将集成设备与诸如ERP、MES等管理系统的接口打通,达成生产数据、成本数据以及质量数据的即时共享;搭建数据分析的平台,借助大数据技术对设备运行的数据开展分析,找出能耗高峰、维护需求等可优化处,例如凭借分析能耗数据对生产排班做出调整,避开用电的高峰期;研发可视化的管理界面,实时呈现设备的运行情况与经济效益指标,为管理人员的快速决策提供辅助。

3.4 完善支撑保障机制,强化发展动力

对政策支持体系予以优化。颁布针对精细化工设备集成化的专门政策,明显提升研发补贴的力度,针对开展核心技术研发的企业给予研发费用加计扣除优惠;创设设备更新的专项基金,扶持企业将传统设备淘汰掉、购买集成设备;将设备集成化的程度纳入到环保信用评价体系中,环保信用评级良好的企业可以享受环保审批的便捷通道以及税收减免的待遇。

着手构建产业服务生态。努力培育具备专业性的集成化设计及服务机构,可以为中小企业量身打造定制化的设计方案,并且提供运维服务;积极建立设备回收以及再利用的体系,针对报废的集成设备中的核心模块开展修复与再利用工作,以此降低企业在设备更新成本;精心搭建行业交流的平台,由行业协会发挥牵头作用,组织企业、高校、科研机构共同开展技术对接活动以及经验分享活动。

增强市场激励效能。构建精细化工产品的“绿色标识”机制,针对运用集成设备制造的高品质产品予

以标识认证,以此引导市场优先开展采购活动;促使下游产业,如医药、日化等企业和集成设备制造企业构建合作关系,形成“设备升级—产品质量提升—市场范围拓展”的良性循环模式。

4 精细化工设备集成化设计与生产运营经济效益提升趋势

目前,精细化工设备集成化设计与生产运营经济效益提升趋势呈现多元,集成化设计开始聚焦模块化耦合和能量梯级利用与智能控制深度融合,通过反应和分离以及回收单元一体化配置,结合CFD模拟与热交换网络优化,显著提升传质传热效率,减排副产物。另外,设备选型也凸显耐腐蚀特种材料与标准化接口应用,能够支持多品种柔性生产,控制工艺切换周期。经济效益提升核心,开始围绕降本增效和绿色发展,通过智能化控制系统实现参数精准调控,提升生产效率,提升生产质量。另外,依托余热回收和溶剂循环等先进技术控制能耗,合理控制投资回收期。数字化与工业化深度融合、模块化和绿色化成为设备标配等,促使精细化工设备集成化设计与生产运营经济效益提升实现持续发展。

5 结语

精细化工设备集成化设计与生产运营经济效益提升的协同推进,是该行业打破“高耗低效”困境、达成高质量进步的必要途径。当下存在设计与需求不匹配、技术支持不足、管理水平落后、评估方式单一等情况,可以借助优化设计架构、攻克核心技术、升级运营管理模式、构建科学的评估架构以及完善保障制度等方式全面解决。此种协同模式不仅可以提高生产的效率,而且可以改善产品的质量以及环保的水准,增强企业在市场中的竞争能力。

参考文献:

- [1] 孙振.精细化工工艺安全的研究与设计分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(21):154-156.
- [2] 刘魁.精细化工企业甲类车间总体布置的研究与分析[J].浙江化工,2024,55(10):45-50.
- [3] 精细化工产业创新方案发布!鼓励发展特种、高端、生物基助剂和弹性体材料[J].中国轮胎资源综合利用,2024,(10):23.
- [4] 张鑫媛.基于智能化的精细化工全流程自动化实现路径研究[J].化工管理,2024,(29):24-27.
- [5] 丁全有.精细化工设备腐蚀影响因素及防护措施[J].当代化工,2024,53(05):1094-1097.

作者简介:

孟鹏(1982-),男,汉族,河北省石家庄市深泽县人,本科,职称:工程师,研究方向:石油化工工程。