异常工况下合成氨尿素甲醇物料平衡快速恢复策略的应用

尤　曾
宁夏和宁化学有限公司 宁夏 灵武 750411

【摘　要】：合成氨、尿素、甲醇联合生产装置受原料波动、设备故障、操作扰动等因素影响易偏离稳态，物料失衡会引发中间介质累积、产品收率下降与安全风险升高。针对异常工况下多单元耦合带来的物料传递滞后、组分相互干扰难题，构建以在线组分监测、单元物料偏差实时核算为核心的物料平衡快速恢复策略。依托装置物料流向拓扑关系，划分合成、转化、精馏等关键子系统，建立偏差溯源判定规则，优先调节循环回路物料流量与组分配比，同步联动气化、合成与后处理单元操作参数，缩短系统非稳态持续时长。现场应用结果表明，该策略可快速定位物料失衡根源，降低中间物料积压损耗，稳定装置产出品质，减少异常工况停车概率。

【关键词】：合成氨；尿素；甲醇；多联产装置；异常工况；物料平衡；工况恢复

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.024

1 多联产装置异常工况物料失衡成因及危害分析

1.1 原料侧扰动引发跨单元物料组分偏移

多联产系统共用气化原料供给链路，原料煤品质波动、进料流量瞬时变化直接改变粗合成气内有效气与惰性组分比例[1]。气化产物作为氨合成、甲醇合成的共同原料，组分变化沿物料管网同步传递至两套合成回路，造成合成塔内氢碳比、氢氮比偏离设计区间。原料组分突变时，循环气缓冲能力有限，未及时调整的物料在中间缓冲罐、洗涤塔内持续富集，且介质通过共用管线扩散至尿素工序，影响二氧化碳原料供给稳定性。

1.2 设备运行异常造成物料截留与泄漏失衡

生产流程包含压缩机、换热器、分离器、合成塔等联动设备，设备内部构件堵塞、密封失效、换热效能衰减会改变物料停留状态。分离器填料堵塞使气液分离效果下降，液相物料随气相进入下游回路，循环回路内重组分蓄积；换热器结垢改变介质温度场，气相物料液化量异常，引发上下游流量不匹配；管道法兰、阀门密封失效出现微量外泄，外泄物料脱离计量体系，核算物料量与实际物料量出现缺口。某项目甲醇循环分离器滤网堵塞，液相甲醇被带入循环压缩机，甲醇组分在氨合成系统持续累积，循环气组分恶化，各工段物料账出现持续性偏差。设备类物料截留与流失具备隐蔽性，常规巡检难以快速识别，失衡状态随运行时长不断加剧，提升安全管控压力。

1.3 单元联动操作失配诱发物料循环紊乱

气化、氨合成、甲醇合成、尿素合成单元之间存在物料互供关系，单元间参数调整不同步会打破整体物料循环闭环[2]。甲醇合成回路循环量调整改变粗合成气分配比例，直接影响氨合成工段原料气量；尿素工序负荷变动使二氧化碳抽取量变化，反向扰动前端合成气组分。独立调控模式下，各单元只关注本工段指标，忽略跨单元物料耦合关系，局部工况优化引发其余工段失衡。某装置尿素工段短时提负荷，二氧化碳抽取量加大，前端合成气碳组分快速下降，甲醇合成氢碳比超出适宜区间，转化效率下降，未反应原料在循环回路堆积，物料流向失去稳定约束。

1.4 物料失衡对多联产系统产生的综合危害

物料平衡失效改变各反应单元反应条件，降低主反应转化效率，未反应原料持续蓄积占用系统容积，增加压缩、循环设备负荷。惰性组分、重组分大量累积提升合成回路压力，增大承压风险，介质异常富集诱发副反应，生成杂质进入产品流，影响尿素、甲醇品质。中间储罐液位持续超限，增加溢料、超压风险，系统操作窗口不断收窄，装置被迫降负荷运行，严重时触发联锁停车。物料非正常损耗、无效循环提升公用介质消耗水平。多联产系统物料相互耦合，局部失衡逐级传导扩散，单点异常演变为全流程工况波动，恢复稳态需消耗较长时间，频繁调整参数进一步抬升误操作风险。物料失衡危害覆盖安全、产品质量、连续生产多个维度，提前识别诱因并建立快速处置手段，是保障装置长周期稳定运行的基础。

2 异常工况下物料平衡快速恢复策略构建与调控方案

2.1 建立多联产系统物料拓扑模型与偏差核算框架

梳理各单元物料进出节点，绘制全流程物料流向拓扑结构，明确各支路介质组分、流量分配关系，界定共用管线与中间缓冲单元物料传递路径。依托拓扑框架划分独立核算子系统，实时采集进出口物料流量、组分检测数据，开展分段物料衡算，对比实时核算值与设计基准值，计算物料偏差量。搭建分层偏差判定逻辑，区分组分偏差、流量偏差、介质蓄积类偏差，标记偏差来源所属子系统，完成失衡位置初步定位。模型内置物料传递滞后修正机制，适配介质在管线、缓冲罐内停留带来的时间差，减少滞后效应对判断结果的干扰。某装置应用该框架，在气化原料扰动工况下快速识别甲醇循环回路惰性组分蓄积，剔除传输滞后干扰，锁定失衡发生支路，为后续调控

提供依据。拓扑模型将复杂耦合系统拆解为可独立核算单元，简化异常工况溯源流程。

2.2 构建物料失衡分级溯源与故障判别规则

依据物料偏差大小、组分变化特征、参数波动速率划分失衡等级，对应设置差异化处置流程。低等级失衡局限于单一子系统，仅需调整本单元循环参数；中等级失衡出现跨单元组分传递，需要同步调节物料分配节点；高等级失衡覆盖全流程，循环杂质大量累积，需统筹调整原料分配与放空策略。建立特征参数匹配判别规则，关联压力、组分、液位、流量等监测信号，匹配各类失衡场景特征，区分设备堵塞、原料波动、操作失配等不同诱因，并筛除监测信号噪声干扰，减少误判概率。该装置甲醇合成回路出现组分波动时，判别规则对比参数特征，排除仪表信号故障因素，判定为分离器物料截留引发失衡，锁定故障设备类型。分级溯源规则压缩故障定位耗时，减少盲目调节操作，保障调控动作靶向作用于物料失衡根源。

2.3 设计跨单元联动物料调节方案

围绕物料平衡恢复目标，设计原料分配、循环回路流量、惰性组分排放协同调控方案。原料支路设置可调分配节点，根据各合成单元物料需求动态分配粗合成气，稳定氨合成氢氮比、甲醇合成氢碳比[3]。优化循环气放空点位，定向排出惰性组分，控制杂质在系统内上限浓度，避免介质持续富集。尿素工段二氧化碳抽取量与前端合成单元建立联动约束，碳组分抽取动作同步反馈至气化与甲醇合成回路，消除负荷调整带来的跨单元扰动。调控动作遵循先稳定物料分配、再调节循环参数的逻辑，控制单次调整幅度，规避大幅度操作带来二次扰动。装置出现氨合成回路惰性气累积工况时，启动跨单元联动调节，适度调整粗合成气分流比例，同步微调甲醇循环放空量，逐步降低惰性组分含量，平稳恢复各单元物料配比，抑制物料失衡跨工段扩散。

2.4 制定工况恢复过程安全约束与操作边界

梳理恢复阶段各设备、介质安全操作边界，明确调节过程压力、温度、液位、组分控制阈值，所有调控动作均在安全操作区间内开展。设置操作限制条件，当关键参数逼近安全限值，自动限制调整幅度，优先保障设备与介质安全，防止调控引发次生风险。划分恢复阶段，初始阶段抑制失衡持续恶化，控制杂质累积速率；中期阶段逐步消除物料偏差，回归配比基准；后期阶段巩固稳态，缓慢收窄调节量。建立参数监护机制，持续跟踪全流程物料指标变化，评估恢复进度，动态调整调控策略。该装置处置分离器堵塞引发的失衡时，严格遵守安全边界，控制循环气压力波动范围，避免组分快速变化诱发副反应，分步完成物料平衡重建。安全约束体系限定恢复操作空间，平衡快速恢复需求与安全生产要求，降低调控阶段安全隐患。

表 1 多联产装置典型物料失衡场景及对应调控策略

失衡类型	核心特征	调控核心措施	适用工况等级
原料组分扰动型	粗合成气有效气/惰性组分比例突变，多单元组分同步偏移	调整原料分配比例，优化循环回路惰性气排放	中等级
设备截留型	局部液相/重组分在循环回路蓄积，单回路物料账持续偏差	隔离故障设备，疏通物料通路，清理回路蓄积介质	中/高等级
跨单元操作失配型	尿素碳抽取或合成负荷调整引发上下游物料配比偏离	锁定物料分配节点，联动上下游参数同步微调	低/中等级
循环杂质累积型	惰性组分持续富集，系统压力上升，转化效率下降	定向放空循环杂质，降低回路循环量，稳定反应配比	高等级

3 物料平衡快速恢复策略工程应用效果与调控要点

3.1 策略在原料扰动异常工况下的工程应用

原料品质波动属高频异常工况，扰动发生后，依托物料拓扑核算框架实时计算各子系统物料偏差，分级溯源机制识别组分偏移幅度，判定失衡等级，启动对应跨单元物料调节方案。调控过程中持续监测粗合成气组分、各合成回路物料配比、中间储罐液位指标，在安全边界约束下微调原料分配支路阀门开度，匹配氨合成、甲醇合成单元原料需求，同步管控循环回路惰性气体排放速率，阻断扰动持续传导至尿素工段。某装置气化原料煤变质，粗合成气惰性组分升高，物料平衡出现偏移，投入该策略处置。

3.2 策略在设备故障诱发物料失衡工况下的工程应用

设备堵塞、内构件失效引发的物料截留具备隐蔽性，常规监测手段难以快速定位。物料偏差核算框架对比各子系统进出口物料数据，捕捉物料截留带来的物料账缺口，故障判别规则匹配监测参数特征，区分设备类与原料扰动类失衡，锁定故障所属单元。调控优先采取旁路分流操作，转移蓄积在循环回路的物料，限制截留介质继续扩散，在满足安全条件前提下安排故障设备隔离处置，同步调整上下游物料供给量，弥补设备隔离带来的流量变化。

3.3 多单元操作协同调控实施要点

跨单元协同调控需要保持物料信息实时互通，各工段监测

数据统一接入物料核算体系，消除信息孤岛，保障物料偏差计算、溯源判断的数据基础。物料调节动作保持渐进式特征，单次参数调整幅度控制在合理区间，避免新增扰动叠加在原有失衡之上。调控过程按照子系统物料偏差优先级排序，优先处置偏差持续扩大的单元，控制失衡扩散源头，再依次修复其余关联单元配比。操作人员依托物料偏差核算结果开展操作，减少经验型盲目调节，所有动作匹配分级溯源规则与安全边界约束。

3.4 策略长期落地运行配套管控要点

保障策略稳定落地，需持续校验物料监测仪表准确性，定期开展流量、组分仪表校准，消除计量偏差对物料衡算结果的干扰。结合历次异常工况案例，持续完善物料拓扑模型参数、故障判别规则，适配设备老化、管线改造带来的物料流向变化。建立工况复盘机制，每次异常处置结束后复盘物料失衡发展过程与调控效果，优化分级判定阈值与调控参数。完善岗位技术多培训，强化操作人员对多联产物料耦合关系、恢复策略逻辑的理解，提升现场异常工况执行能力。该装置长期应用该策略，定期校验在线组分分析仪，更新物料拓扑模型，积累各类失衡处置案例，优化判别规则阈值，保障策略持续适配装置运行状态，维持快速恢复体系可靠性，持续发挥抑制物料失衡、稳定装置运行的作用。

4 结语

合成氨、尿素、甲醇多联产系统物料耦合关系复杂，各类异常工况极易引发跨单元物料失衡，扰动沿物料管网逐级传递，制约装置连续稳定运行。围绕原料扰动、设备异常、操作失配等典型诱因，构建依托物料拓扑核算、分级溯源判定、跨单元联动调控的物料平衡快速恢复体系，明确处置安全边界，形成覆盖故障识别、协同调节、效果监护的完整技术方案。工程应用验证该体系可快速定位失衡根源，抑制介质异常蓄积，减少生产波动与安全风险，降低非计划停车概率。

参考文献：

[1] 赵亚红.工业光总线技术在合成氨尿素生产装置中的应用[J].石油化工自动化,2024,60(5)94-96+112.

[2] 贺美晋.巴斯夫公司为其合成氨和尿素产品组合提供首批生物质平衡产品[J].石油炼制与化工,2024,55(8)17.

[3] 刘小芳.配位工程调控关键中间体吸附增强硝酸盐电合成氨和尿素性能研究[D].苏州大学,2024.