大型炼化企业凝液资源回收利用效能提升与运行管理研究

邱明刚　田　振

山东裕龙石化有限公司　山东　烟台　265702

摘　要：凝液资源回收利用是大型炼化企业实现节水减排、能量梯级利用与降本增效的关键环节。本文立足炼化一体化生产背景，系统阐释凝液资源的多源特性与回收价值，分析当前回收利用率偏低、热损突出、水质波动及管理碎片化等共性难题。在此基础上，从源头减量、过程增浓、末端精制及热耦合四个维度构建效能提升技术路径，并提出涵盖监测计量、调度协同、故障预警与绩效考评的运行管理优化策略，同时论证制度标准、信息平台与人员能力等保障机制。研究表明，将工艺集成创新与精细化运营管理深度融合，可推动凝液回收系统从“被动处置”向“主动增值”转变，为炼化企业绿色低碳转型提供有力支撑。

关键词：大型炼化企业；凝液回收；效能提升；运行管理

引言

炼化行业作为高耗能、高用水产业，正面临资源环境约束趋紧与碳达峰碳中和目标的双重压力。凝液，即蒸汽凝结水和工艺过程冷凝液，蕴含可观的热能和水资源，其回收利用水平直接关系到企业能耗强度、水耗指标及运行经济性。当前，国内大型炼化企业普遍建有凝液回收系统，但实际运行中普遍存在回收率波动大、热损失严重、水质回用方向单一、系统稳定性不足等问题，制约了整体能效和水效的进一步提升。与此同时，数字化管控工具和先进分离技术的发展为凝液系统优化提供了新手段，但如何将技术潜力转化为实际运行效益，仍需在管理层面进行系统性研究。

1 凝液资源回收利用的系统特征与现实瓶颈

1.1 凝液资源的来源构成与回收价值

大型炼化企业的凝液来源具有多源、分散、品质差异大的特点。按产生环节划分，主要包括：蒸汽透平驱动压缩机、泵等转动设备排出的动力蒸汽凝液；蒸馏、加氢、催化裂化等工艺塔顶回流罐排出的工艺凝液；换热器管程或壳程蒸汽加热后产生的换热凝液；以及伴热管线、再沸器等辅助设施产生的低品位凝液。这些凝液的总量通常占企业新鲜水用量的 30%～50%，其温度范围覆盖 80℃~200℃，蕴含大量潜热和显热。回收凝液的价值体现在三个层面：一是水质价值，凝液本质上是蒸馏水或去离子水，经适当处理后可直接替代部分除盐水或锅炉给水，减少化学水处理站负荷；二是热能价值，高温凝液可作为低温热源用于预热物料、供暖或驱动吸收式制冷，降低燃料气消耗；三是环保价值，减少含油含碱凝液的外排量，降低污水处理系统冲击风险。

1.2 当前回收利用中的主要问题

尽管多数企业已建成凝液回收管网，但运行效果远未达到设计预期。突出问题集中表现为：第一，回收率偏低且波动剧烈。受工艺负荷变化、疏水阀失效、管线水击等因素影响，实际回收率常在 60%～80%之间徘徊，大量凝液被迫降压闪蒸后排放或直接冷却外送。第二，热能利用率不足。高温凝液在长距离输送过程中散热严重，且多数企业仅将其用于低温除氧器补水或采暖，未能实现梯级利用，大量低品位热量散失于空气或循环水中。第三，水质不稳定制约回用深度。工艺凝液中常夹带微量油类、铁离子、二氧化硅及有机酸，即便经过除油除铁处理，仍难以达到高压锅炉给水标准，只能回用于中低压系统或干脆降级为冷却塔补水。第四，管理碎片化严重[1]。凝液回收系统分属不同车间或工段管辖，缺乏统一的调度中心，各单元按自身需求操作，导致整体协同性差，异常工况下应急响应迟缓。

1.3 效能提升的约束条件分析

提升凝液回收利用效能并非单纯的设备扩容或管道改造，而是受多重约束的系统工程。技术约束方面，高温凝液输送存在两相流风险，管线腐蚀与结垢难以完全避免，加之不同来源凝液混合后可能产生沉淀或乳化，增加了处理难度。经济约束方面，新建高效除油膜分离系统或增设热泵机组需要可观投资，在油价波动周期中企业往往倾向于维持现状。管理约束方面，运行人员对

凝液系统的重视程度远低于主工艺装置，绩效考核指标中凝液回收率权重偏低，且缺乏实时盈亏核算手段，使得操作改进动力不足。这些约束相互耦合，要求效能提升策略必须兼顾技术成熟度、投资回报周期与管理可落地性。

2 凝液资源回收利用效能提升的关键技术路径

2.1 源头减量与分级回收策略

一方面，应推行蒸汽系统精细化管理，通过更换高效疏水阀、优化伴热蒸汽压力等级、减少不必要的工艺蒸汽喷射，从源头降低凝液产生量中的无效部分，使回收对象集中于高价值凝液。另一方面，建立分级回收体系，按温度、压力、水质将凝液划分为高品位（150℃，电导率 < 0.5μS/cm）、中品位（100~150℃，含微量油）和低品位（< 100℃，含油或铁较高）三个等级。高品位凝液优先回用于高压除氧器或锅炉给水系统，中品位凝液经简单过滤后回用于中压工艺加热或作为脱盐水原水，低品位凝液则用于低温热回收或经深度处理后回用。这种分级策略避免了“一刀切”式处理，降低了高等级处理负荷，也提高了整体回收经济性。

2.2 高效除油除铁与水质精制技术集成

针对工艺凝液中乳化油和颗粒态铁的去除难点，推荐采用“旋流分离 + 亲油疏水膜过滤 + 电化学除氧”的集成路线。旋流分离作为一级处理，依靠离心力脱除游离态油滴和较大颗粒；膜过滤采用陶瓷膜或聚四氟乙烯中空纤维膜，利用孔径筛分和表面润湿性差异实现油水深度分离，可将油含量降至 5mg/L 以下、铁含量降至 0.1mg/L 以下；后续增设电化学除氧或催化除氧单元，确保溶解氧达标[2]。对于含硅或含有机酸的特殊凝液，可引入离子交换或吸附树脂作为保护性精制单元。该集成方案的核心优势在于不添加化学药剂，避免二次污染，且膜系统可采用在线反冲洗延长运行周期。需要强调的是，技术选择必须结合凝液水质波动范围进行柔性设计，确保在进料条件变化时仍能稳定产出合格水。

2.3 凝液热能的梯级利用与热泵提质

凝液热能的充分利用应遵循“温度对口、梯级利用”原则。高温凝液（150℃）优先通过换热器预热工艺物料或作为再沸器辅助热源，实现“以热代汽”；中温凝液（100~150℃）可用于加热除盐水、供暖或驱动溴化锂吸收式制冷机组，满足夏季厂区空调冷负荷；低温凝液（< 100℃）则可通过机械压缩式热泵或吸收式热泵提升温位后回用，或直接用于低温多效蒸发海水淡化系统的热源。热泵提质技术尤其值得关注——采用高温热泵可将 80~90℃凝液提升至 120~140℃，从而进入中品位利用环节，有效扩大热能回收窗口。同时，应统筹全厂热集成分析，利用夹点技术确定凝液热量分配的最优方案，避免出现“高质低用”或“低质无用”的尴尬局面。

2.4 管网保温与闪蒸汽回收的协同优化

输送管网的散热损失和闪蒸损失是隐性的效能“漏斗”。首先，应对凝液主干管网进行保温层状态评估，及时更换老化或破损的保温材料，推荐采用气凝胶复合保温结构以降低散热系数。其次，对于长距离输送管线，可考虑增设中间缓冲罐并采用闭式回收系统，减少开放式闪蒸罐造成的蒸汽逸散。闪蒸汽中蕴含大量潜热，不宜直接放空，应通过增设小型蒸汽喷射器或螺杆膨胀机将其压缩至低压蒸汽管网，或引入吸收式热泵作为驱动热源。此外，合理布置凝液收集罐的位置，缩短输送距离，从布局层面减少温降和压降。上述措施虽为常规手段，但在大型企业中常因跨区域管理而被忽视，系统性整改后通常可提高热能回收率 5 ~ 10 个百分点。

3 运行管理优化策略

3.1 全流程监测计量与数字孪生基础

效能提升离不开精准的数据支撑。当前许多企业凝液系统计量仪表配备不足，流量、温度、压力、电导率、油含量等关键参数存在大量盲区。应按照“分级计量、关键点冗余”原则，在凝液产出点、汇集点、处理单元进出口及回用点安装在线分析仪表，并接入集散控制系统或制造执行系统。在此基础上，建立凝液管网的水力 – 热力数字孪生模型，利用实时数据驱动模型在线计算各管段散热损失、压降分布、水质变化趋势及回收率动态[3]。数字孪生不仅能够辅助调度决策，还能通过仿真推演不同工况下的最优操作参数，例如调节各支路回流比、切换处理单元组合等，从而将经验驱动管理转变为数据驱动管理。

3.2 多单元协同调度与柔性响应机制

凝液系统与蒸汽系统、除盐水系统、工艺加热系统存在强耦合关系，单一单元的局部最优往往导致全局次优。应建立厂级凝液调度中心，负责统筹各生产装置凝液外送量、处理单元负荷分配及回用去向。调度规则应包含正常工况下的“以定产定回”平衡策略，以及异常工况（如某装置停车、凝液污染突发升高）下的应急预案——包括切换至事故罐、启动备用处理线、调整回用等级等。柔性响应能力的核心在于设置适当的缓冲容量（如中间储罐容积按 15 ~ 30 分钟最大流量设计），并制定分级降负荷顺序，确保在突发波动时系统不崩溃、不

直排。同时，调度系统应与蒸汽管网调度联动，当蒸汽负荷变化时，凝液产生量同步预判，实现前馈控制。

3.3 故障预警与健康状态评估体系

凝液系统常见的故障类型包括疏水阀卡涩、管线水击、膜组件污染、换热器内漏导致凝液串油等。这些故障若不能及时发现，会迅速恶化回收效果并威胁下游设备安全。应构建基于多参数趋势分析的预警模型，例如：疏水阀前后温差缩小表征阀门失效，凝液电导率突升预示换热器泄漏，膜跨压差加速上升提示污染加剧。通过设定合理的变化率阈值和累计偏差阈值，实现故障早于操作人员感知的预警推送[4]。此外，可引入健康状态指数（HI）对凝液回收系统整体进行评分，综合回收率、热能利用率、水质合格率、设备完好率等维度，以百分制形式呈现，使管理者和操作人员直观掌握系统健康水平，并针对失分项制定改进措施。

3.4 绩效考评与持续改进机制设计

运行管理的最终落地依赖于绩效考核的导向作用。建议将凝液回收利用效能纳入各车间和班组的关键绩效指标（KPI），具体指标可设置：凝液综合回收率（目标≥ 90%）、回收热能占蒸汽总热量的比例、回用凝液替代除盐水率、凝液外排损失率等。考核方式采用月度统计与季度评审相结合，并设置专项奖励资金激励突破性改进。同时，建立持续改进机制——每月召开凝液系统运行分析会，对照数字孪生模型的预期值分析偏差原因，形成“监测 – 分析 – 改进 – 验证”的闭环。更重要的是，将凝液管理纳入企业能源管理体系（如ISO50001），定期开展内部审核和管理评审，确保改进措施不因人员变动或生产压力而中断。

4 综合保障机制

4.1 制度标准与操作规范完善

企业层面应制定《凝液回收利用管理办法》，明确各部门职责分工、操作权限、异常报告流程及应急处置步骤。针对不同等级凝液的处理和回用，编制标准化作业指导书，细化开停车操作、在线切换步骤、膜系统化学清洗周期及参数控制范围。同时，参照国家和行业相关标准（如 GB/T31967《工业蒸汽凝结水回收技术导则》），结合企业实际制定内控指标，使操作有据可依、检查有标可对。

4.2 信息化平台与数据治理支撑

凝液系统优化依赖高效的数据流转。应构建凝液管理专属模块，与现有生产执行系统、实验室信息管理系统及设备管理系统实现数据互通。该模块应具备实时监控看板、历史趋势查询、报警事件日志、报表自动生成及对标分析功能。数据治理方面，需建立仪表校准周期管理、数据清洗规则及缺失值处理策略，确保模型输入数据可靠。信息化平台还应支持移动端访问，便于现场操作人员随时查看关键参数和操作指令。

4.3 运行人员能力建设与知识传递

再先进的技术和管理体系最终由人执行。应开展凝液系统专项培训，内容涵盖凝液回收的基本原理、设备结构及操作要点、常见故障识别与处理、经济核算方法等。培训形式结合课堂授课与现场模拟操作，并定期组织技能竞赛或案例分析会，促进经验分享。尤其要重视新老员工之间的知识传递，将隐性经验（如特定工况下的调节技巧）显性化，写入操作手册或纳入专家知识库。同时，鼓励运行人员参与技术改造方案讨论，发挥一线人员对现场细节的敏锐洞察力，使优化措施更接地气、更具可行性。

5 结语

大型炼化企业凝液资源回收利用效能提升是一项系统工程，需工艺优化、装备升级、热集成与精细化管理深度融合。本文从源头分级、水质精制、热能梯级利用及管网协同阐述技术路径，并从监测调度、预警考评及保障机制论述管理要点，二者互为支撑。未来，数字孪生、人工智能及新型材料将推动系统智能化，但技术效用依赖于管理理念转变——将凝液视为重要“资源资产”而非随意处置的“副产物”。唯有坚持技术与管理双轮驱动，企业在能效水效约束下方能释放凝液潜在价值，实现高质量可持续发展。

参考文献

[1] 王明华, 李志刚. 石化企业凝结水回收利用技术进展与挑战 [J]. 石油炼制与化工,2022,53(6):112-118.

[2] 陈建峰, 刘伟, 张海燕. 基于夹点分析的炼化厂热集成优化研究 [J]. 化工进展,2023,42(3):1245-1253.

[3] 赵宏, 孙德胜, 周丽. 膜分离技术在工业凝结水除油除铁中的应用 [J]. 水处理技术,2024,50(2):78-83.

[4] 刘洋, 高建华, 王磊. 大型炼化企业能源管理体系运行效果评价 [J]. 现代化工,2023,43(8):56-61.