

工业余热回收利用技术研究

杨恒岳

中核第七研究设计院有限公司 山西 太原 030000

摘 要：针对当前工业余热资源化过程中回收效率偏低、工艺选型与热源品位匹配失配等行业痛点开展系统性研究。依据热源温度区间、介质物相形态量化划分高温气态、中温液态、低温多态三类余热资源，明确各类余热热值密度、回收热损失、设备投资门槛差异；定量剖析换热式、热泵式、余热发电三类主流回收工艺的能效区间、适用温度边界与运行短板，指出纯换热工艺无热量提质能力、热泵机组低负荷工况 COP 衰减幅度可达 35% 以上、余热发电系统初始投资成本增幅超 120%。基于热源物性参数建立分级精准选型体系，提出热泵-换热器协同耦合低品位余热提质方案、多梯级余热复合集成架构与全周期在线运维管控机制，为工业余热综合回收率提升提供量化技术支撑。

关键词：工业余热；余热梯级回收；能量品位；多技术耦合；能效系数

引言：工业余热是生产流程中未被梯级利用的废弃载热介质，属于工业系统存量规模最大的低代价次生能源。国内制造行业统计数据显示，生产环节余热总排放量约占工业总能耗 32%，其中中低温余热占比超 62%，仅 28% 实现有效回收，大量低温载热介质直排造成不可逆能源损耗与区域性热污染。现阶段行业普遍存在余热回收工艺选型与热源参数不匹配、低品位热源换热烟损失大、单一设备系统工况适配性差等瓶颈，直接限制余热资源化利用效益。本文依托余热温度、介质、热值量化数据，对比三类主流回收工艺

的热力学特性与工程边界，梳理现场应用典型问题，从分级选型、低温换热提质、多工艺耦合、长效运维四个维度给出量化优化方案。

1 工业余热概述及资源特性

工业余热为冶金、化工、建材、轻工等工艺产出的废弃热能，热源温度、介质形态、热流稳定性直接决定回收设备换热负荷、烟利用效率以及项目投资回报周期。按温度区间、物相形态分类的余热资源量化参数见表 1。

表 1 工业余热分级资源量化特征参数

余热等级	温度区间	热源来源	资源占比	平均热损失率	回收难度
高温余热	> 500℃	冶金窑炉、煅烧烟气、高温熔渣	18%	12%~20%	低
中温余热	200~500℃	工艺蒸汽、热处理废气、高温循环水	20%	22%~35%	中等
低温余热	< 200℃	冷却废水、低温烟气、设备表面散热	62%	38%~65%	高

按载体物相可分为气态、液态、固态三类余热：气态余热含工业烟气、热风，换热过程散热速率高，粉尘、腐蚀性组分易造成换热元件堵塞腐蚀，设备年检修频次提升 2~3 倍；液态余热包含工艺废水、循环冷却水、废导热油，介质温度均匀、流量稳定，换热热损失可控制在 15% 以内，是工程回收最优介质；固态余热为高温炉渣、热加工废料，热量释放周期长、固-液换热热阻大，同等热负荷下换热设备体积提升 40% 以上。综合

来看，工业余热具备总量基数大、热源分散、工况波动系数 0.3~0.8、能量品位跨度极宽的特征，是回收工艺差异化选型的核心判定依据^[1]。

2 工业余热主流回收利用技术

2.1 换热式余热回收技术

换热式回收为工业存量项目应用占比超 75% 的基础余热回收工艺，热力学本质为等品位热量传递，无能量形式转换，依靠间壁式换热器完成冷热介质热量交换。主流换热设备性能量化对比见表 2。

表 2 不同类型换热器适用工况与换热性能（介质温差 30℃）

换热器类型	适用介质	换热效率	设备投资系数	运行阻力损失
管壳式	高温含尘烟气、腐蚀性废水	72%~78%	1.0	中等
板式	清洁低温液态介质	85%~92%	0.7	偏高
热管式	低温烟气、气-气换热	80%~86%	1.3	极低

（1）各类换热器适配边界：管壳式结构承压耐磨损，适配冶金、化工高温高杂质余热，单台换热负荷可达 2~8MW；板式设备单位容积换热面积大，仅适用于洁净低温循环水余热回收；热管换热器依靠工质相变传热，最小换热温差可低至 5℃，适配各类低温烟气余热深度回收。（2）技术综合特性：设备初始投资低、无额外电耗、运维简单，多用于工艺水预热、助燃空气加热、厂区采暖等场景；固有短板为无热量提质功能，热源温度低于 80℃时综合换热效率降至 50% 以下，仅适配热源稳定、介质洁净度高的工况^[2]。

2.2 热泵式余热回收技术

热泵工艺是低品位余热提质的核心技术，基于蒸汽压缩逆循环原理，以少量电能输入为代价提取低温余热，将热源温度提升 40~80℃后供给用热单元，实现低品位热量的升级利用。工业主流热泵制热性能系数 COP 区间为：水源热泵 3.2~5.6，空气源热泵 2.1~3.8，地源热泵 3.5~5.2，其中水源热泵因适配性强，在工业废水余热回收场景中占比超过 85%。（1）在系统应用优势方面：热泵可将 <100℃低品位余热提质至 120~160℃，满足中温供热需求，余热综合回收利用率达 60%~80%。机组采用模块化设计，单台制热量 50~1200kW，可按需并联扩容，适配全规模工业厂区。系统运行过程无燃料燃烧、无烟气排放，适配食品、纺织、轻工等低温余热富集行业的清洁用热需求。（2）在工程短板方面：机组耗电占系统总输出热量的 18%~32%，电耗占比偏高。当热源流量波动幅度超过 40%或低负载运行时，COP 降幅可达 35%，能效显著下降。换热侧介质中杂质易造成蒸发器结垢，年度清洗维护成本较纯换热系统提升 60%，长期运行综合经济性受到制约。

2.3 余热发电技术

余热发电是实现高品位余热资源化利用的核心工艺，通过热力循环将工业废弃热能转化为高品位电能。按循环工质不同，分为蒸汽朗肯循环（SRC）、有机朗肯循环（ORC）与卡琳娜循环（Kalina Cycle）三类，各工艺在适配温度区间、发电效率及应用场景方面差异显著。（1）蒸汽朗肯循环适配 500℃以上高温烟气，发电效率 18%~26%，单机装机容量 5~30MW，广泛应用于钢铁、水泥熟料等高温连续生产线。有机朗肯循环采

用低沸点有机工质，适配 100~300℃中低温余热，发电效率 8%~14%，适用于中小型分散热源的分布式发电。卡琳娜循环以氨水混合工质运行，适配热负荷波动较大的热源，同等工况下发电效率较有机朗肯循环提升 10%~15%，热源适应性更优。（2）该技术可将废弃热能就地转化为自用电力，厂区外购电成本降低 20%~40%。但其缺陷同样突出：单位千瓦初始投资较换热系统高出 120% 以上，系统辅机繁多、占地面积大，且要求热源连续稳定、热负荷不低于 2MW，仅大型连续化生产企业具备工程落地条件^[3]。

3 工业余热回收技术应用问题与优化路径

3.1 技术应用现存核心问题

（1）热源与工艺匹配度偏低，余热利用率不足。大量小型低温热源盲目配置余热发电系统，设备年利用率不足 40%，投资回收期延长至 8~12 年，经济性严重不达标。500℃以上稳定高温热源仅配置基础换热设备，高品位热能仅作低阶供热利用，焓损失超过 45%。含尘、腐蚀性烟气未配套预处理单元，换热器腐蚀堵塞速率提升 3 倍，设备使用寿命缩短 50%，运维成本显著增加。（2）低品位余热回收能效瓶颈突出。<200℃低温余热占工业余热总资源的 62%，纯换热系统无热量提质能力，当热源温度 <70℃时回收收益为负值，不具备经济可行性。热泵系统在低负荷工况下 COP 大幅衰减，分散间歇热源热流间断，机组频繁启停，综合能效再降 20% 以上，超半数低温余热因回收经济性差而直接排放。（3）单设备系统集成度差、运行稳定性不足。多数余热回收系统采用单一工艺搭建，无法覆盖宽温度区间热源，系统适配能力有限。生产负荷波动造成热源温度、流量波动系数达 0.3~0.8，单一设备运行效率起伏幅度超过 40%。换热元件长期积垢、腐蚀，换热效率年均衰减 7%~12%，且缺乏常态化运维管控机制，系统长期运行性能持续劣化。

3.2 技术精准选型优化

技术精准选型是消除余热回收系统投资浪费与能效损失的关键环节。以热源温度、介质形态、额定热负荷、工况稳定性四大量化指标为基础，构建分级选型体系，实现技术方案与热源特性的精准匹配，从源头避免错配导致的资源浪费。（1）在温度与热负荷匹配

准则方面： $> 500^{\circ}\text{C}$ 稳定大流量高温热源优先配置余热发电系统，最大化焓收益，降低单位热量的贬值损失； $200\sim 500^{\circ}\text{C}$ 中温热源采用“换热+小型有机朗肯循环”梯级耦合方案，在满足基础供热需求的同时实现余热发电，提升综合能源利用率； $< 200^{\circ}\text{C}$ 清洁液态余热以水源热泵为核心实现热量提质，满足低品位热量的升级利用需求；分散间歇、小体量低温热源选用热管换热设备，避免大系统过度配置，有效控制初始投入。（2）在介质预处理配套规则方面：含粉尘烟气增设布袋除尘装置，降低换热面污堵风险，维持换热效率稳定；腐蚀介质采用316L不锈钢或钛材换热元件，提升耐蚀性能，延长设备使用寿命；高杂质废水前置自清洗过滤装置，减少换热通道堵塞，降低运维频次。上述措施使换热设备年故障停机时长降低60%，显著延长设备服役周期^[4]。

3.3 低品位余热回收技术优化

低品位余热回收面临低温热源换热温差大、机组能效衰减两大核心瓶颈，常规回收方案在低温差条件下换热效率急剧下降，需从热泵系统与换热设备两条路径开展参数级优化，提升低温热量捕捉效率与系统运行稳定性。（1）在热泵系统升级方面：配置变频压缩机组，当热源流量波动时实时调节制冷剂循环量，避免定频运行导致的部分负荷能效大幅下降，低负载工况下COP回升25%。蒸发器替换为微通道换热结构，单位换热面积较传统结构提升60%，换热端差由常规 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 缩小至 $4\sim 8^{\circ}\text{C}$ ，低温侧热量捕捉能力显著增强，系统在低品位热源条件下运行稳定性明显提高，可适应 100°C 以下低温热源的持续稳定运行。（2）在换热设备迭代方面：以热管换热器、螺旋板式换热器替换传统板式换热器。热管换热器最小换热温差可低至 5°C ，适用于极低品位热源回收场景；螺旋板式换热器通过螺旋流道增强流体扰动强度，低温侧换热系数增长30%，有效缓解换热面积不足导致的性能衰减。此外，增设余热集中预收集装置，将分散低温热源汇流后介质温度提升 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，解决热源分散、单股热值偏低的工程难题，有效拓宽低品位余热回收技术的适用边界。

3.4 多技术耦合与设备运维优化

单一余热回收工艺仅适配窄温度区间热源，换热效率受限且难以应对工况波动。多技术梯级耦合系统可覆盖全温度段余热资源，搭配储热单元平抑供需波动，从

系统层面提升余热回收综合性能。1）在复合系统架构方面：构建“换热+热泵+储热”三级耦合方案。高热稳定工况下，换热器直接供热，焓损失最低，避免热力循环附加能耗；当余热温度偏低、直接换热不满足供热需求时，启动热泵系统提质升温，保障供热温度达标；当余热供给量大于用热负荷时，利用相变储热介质储存多余热量，在供需错峰阶段释放，系统全年余热回收利用率提升18%~28%。（2）在长效运维管控方面：建立季度化学清洗与年度元件拆检更换制度，定期清除换热面结垢与腐蚀产物，换热效率年均衰减控制在3%以内，保障换热性能长期稳定。同时搭建在线监测系统，实时采集热源温度、流量、设备功耗、换热端差等关键运行参数，自动调节机组运行负荷，消除人工调控滞后误差，保障系统长期高效稳定运行，有效降低全周期能耗与设备损耗^[5]。

结束语

工业余热梯级回收是工业领域节能降碳、提升一次能源综合利用率的核心技术路径。本文结合量化数据表梳理高温、中温、低温余热资源物性差异，定量对比换热式、热泵式、余热发电三类主流工艺的能效区间、投资成本与适用边界；针对工艺选型失配、低品位余热能效不足、系统集成度弱等现实问题，构建热源分级精准选型规则，提出低温余热设备优化方案、多工艺耦合集成架构与标准化运维管控体系。换热工艺实现低成本基础热量传递，热泵解决低品位热源提质难题，余热发电完成高品位热能向电能转化，三者梯级耦合可实现全温度区间余热高效资源化。未来依托智能在线调控、相变储热新材料技术迭代，工业余热回收系统将向全流程智能化、多能互补一体化方向持续发展。

参考文献

- [1] 罗德彬. 工业余热分级回收利用技术在企业节能降耗中的应用研究[J]. 能源与节能, 2026(4): 80-82+276.
- [2] 田言峰. 汽电双驱技术在工业余热余压回收中的应用研究[J]. 电站系统工程, 2026, 42(2): 53-55.
- [3] 付强, 张静波. 基于焦炉煤气取热量计算的焦炉上升管余热回收技术研究[J]. 化工时刊, 2026, 40(1): 38-42.
- [4] 殷圣胜, 刘岩崑. 冶金工业废气热能回收技术应用研究[J]. 中国金属通报, 2026(8): 43-45.
- [5] 赵伟. 多工况下锅炉烟气余热回收利用技术综述[J]. 山东化工, 2026, 55(4): 146-150.