生产车间余热梯级利用热能综合调配体系构建

张振星

中核第七研究设计院有限公司　山西　太原　030000

摘　要：针对生产车间余热利用方式单一、热能供需错配、设备协同性差等问题，本文结合车间余热资源的温度、形态及时空分布特性，构建集资源采集、梯级利用、智能调配与运维管控于一体的热能综合调配体系。通过分温区余热回收、储能调峰及智能算法优化供需匹配，依托联合仿真验证体系效能。结果表明，该体系可大幅提升余热利用率，降低生产能耗与碳排放，兼具良好经济与环保价值。

关键词：生产车间；余热梯级利用；热能综合调配；体系构建

引言：工业生产车间蕴含大量余热资源，是企业节能降碳、提质增效的核心可利用能源。当前车间余热普遍存在梯级利用缺失、热能调配无序、系统能耗偏高的现状，高品质热能降级浪费、供需时空错配等问题突出，严重制约工业能源利用效率提升。为破解上述痛点，本文基于余热资源特性与供需适配规律，搭建系统化热能调配体系，优化余热回收与分配模式，为车间余热高效资源化利用提供技术支撑。

1 生产车间余热资源特性与利用现状分析

1.1 生产车间余热来源与分类

（1）生产车间余热主要源自生产设备散热、工艺废气废水、物料显热及空调系统排热等。其中设备散热与工艺废气占比最大，具有间歇性强、品位差异大的特点。（2）按温度层级划分：高温余热（＞250℃）多见于窑炉、热处理炉，宜用于同品位工艺预热或发电；中温余热（80～250℃）适用于蒸汽生产、烘干等；低温余热（＜80℃）总量庞大但品位低，适配采暖、热水制备及热泵提级利用。（3）按形态划分：气态余热（烟气、热风）热容量小、传输快，宜就近利用；液态余热（冷却水、废水）热容量大、储热稳定，便于长距离输送；固态余热（热物料、铸件）储热密度高，但回收设备复杂，需结合工艺节奏设计[1]。

1.2 车间余热资源量化测算

（1）测算以热平衡法为基础，参照《工业余热资源评价方法》（GB/T1028）选取参数，关键指标包括烟气流量、进出口温差、比热容及设备运行负荷率，确保数据可溯源。（2）依据不同工况（正常满产、低负荷、季节性停产）分别测算余热排放量与可回收量。采用焓值法计算气态余热，热平衡法测算液态载热介质，综合修正系数得到实际可回收值。（3）时空分布上，余热排放呈日间高、夜间低，夏季低、冬季高的时段波动特征；区域上靠近热源核心区余热密集，辅助区较低，需绘制车间热负荷分布图辅助决策。

1.3 余热梯级利用与热能调配适配性分析

（1）不同温度余热与终端需求存在明确适配关系（见表 1）：高温段匹配工艺预热、蒸汽发生；中温段匹配烘干、清洗；低温段匹配车间采暖、生活热水及热泵提升，形成温度对口、梯级利用的链条。（2）车间余热供给与冷热需求在年尺度和日尺度上具有一定互补性，冬季供热需求增大时余热排放同步上升，夏季制冷需求突出时可通过吸收式制冷实现热—冷转换，供需耦合潜力显著。（3）梯级利用模式通过多级换热网络串联不同温区用户，显著提高热能综合利用率，对热能调配具有较强的支撑作用。结合储热装置缓冲峰谷波动，可实现余热资源按质利用、按需调配，技术上具备可行性，具体分级利用途径见表 1。

表 1 余热资源温度分级及梯级利用途径

温度分级	温度范围	主要来源示例	适宜利用方式	典型设备/系统	能级匹配建议
高温余热	＞250℃	窑炉烟气、热处理炉排气	同品位工艺预热、蒸汽发生、发电	余热锅炉、蒸汽发生器、透平机组	优先做功或制汽，排热供下级利用

续表：

温度分级	温度范围	主要来源示例	适宜利用方式	典型设备/系统	能级匹配建议
中温余热	80~250℃	加热炉烟气、热风、高温冷凝水	物料烘干、工件预热、清洗用水预热、采暖	烟气-水换热器、导热油换热器	就近供应中温工艺用户，剩余热量转供暖
低温余热	< 80℃	冷却循环水、空调冷凝热、低温废水	车间采暖、生活热水、新风预热、热泵提级	热泵机组、预热盘管、热水储罐	经热泵提升温度后利用，或直接供低温需求

2 生产车间余热梯级利用与热能综合调配体系构建

2.1 体系构建原则与整体框架

（1）五项核心原则：能效最优——单位余热产出有效能量最大化；梯级适配——温度对口、按质用能，杜绝高品位低用；经济可行——控制投入与运维成本，回收期合理；稳定可控——供热量与生产需求动态匹配，避免波动影响工艺；低碳环保——最大化替代化石燃料，降低碳排放[2]。（2）四层纵向架构：资源采集层（底层）负责余热源数据感知与参数汇入；梯级利用层按温度等级实施分流、分级转化与多级联通；智能调配层（中层）以算法模型驱动热能跨时空优化配置；运维管控层（顶层）统筹设备协同、安全防护与能效评估。四层信息互通、控制互连，形成纵向贯通整体架构。（3）闭环运行逻辑：遵循“采集—分级—调配—调控”四步流程。采集层获取余热排放与用热实时数据，梯级利用层完成温区划分与能级匹配，智能调配层生成最优调度指令，运维管控层下达执行并采集反馈修正参数。循环迭代、动态寻优，保障体系长期高效运行。

2.2 车间余热梯级利用子系统设计

（1）高温余热利用（热源 > 250℃）：配余热锅炉或蒸汽发生器，将高温烟气、窑炉排气转化为 0.8 ~ 1.6MPa 工业蒸汽，并入厂区蒸汽管网，直供高温加热、烘干、反应釜等高能耗场景，替代燃料消耗。（2）中温余热利用（热源 80 ~ 250℃）：设烟气—水换热器或导热油系统，回收中温烟气加热供暖循环水，用于车间冬季采暖；同时部分热能引至工装预热区，用于模具、工件预热及工艺清洗用水预热，形成多用户辐射供应。（3）低温余热利用（热源 < 80℃）：采用压缩式或吸收式热泵，提取冷却循环水、冷凝废热中的低品位热量，提升温位后供生活热水或辅助供暖；在空调新风入口设预热盘管，利用低温余热冬季预热新风，降低空调加热负荷[3]。（4）多级联动机制：以串联换热网络将高温模块排出的中间载热介质依次导入中温、低温模块，形成温度梯级下降、用户梯级接入的级联链路。高温余热优先制汽，排热供中温用户，剩余低品位热量由热泵提取，实现全层级余热有序接力利用，综合利用率显著提升。

2.3 热能综合调配核心子系统设计

（1）热能供需监测模块：在余热源出口、各级换热节点、储热装置及终端用热设备处部署高精度温度、压力、流量传感器，实时采集余热产量、各车间用热负荷、设备运行工况等参数，构建覆盖全车间全时段的热能信息感知网络，为调度决策提供实时数据基础。（2）智能调度算法设计：以供需动态平衡为约束条件，以综合能效最优为目标函数，构建多温区多用户的热能调度数学模型。采用” 负荷预测—滚动优化—反馈修正” 的框架，基于历史数据预测未来时段的余热产出与用热需求，实时求解热能最优分配方案，动态下发执行指令。（3）热能传输与储能调控模块：优化管网布局与管径选型，减少输送热损，配置相变储热罐或热水储罐作为缓冲调节环节。依据峰谷负荷差异自动控制储能设备充放热切换策略，用热低峰时储热、高峰时放热，实现余热产能与用热需求之间的解耦与柔性匹配[4]。（4）多场景热能切换调配机制：针对满产工况、低产工况、夜间值班、冬季采暖期、夏季供冷期等典型场景，预设针对性调配策略。当生产工况或季节模式切换时，系统自动执行阀门切换与参数调整，快速实现余热分配方向的重新配置，确保余热供给与变动后的用热需求精准对接。

2.4 体系配套保障系统设计

（1）设备协同管控系统：将余热锅炉、换热器、热泵机组、储热罐、输送泵组及末端用热设备统一纳入集中管控平台，依据智能调度指令对各设备实施启停控制、阀门开度调节、变频调速等联动操作，实现分散设备的有序协同运行。（2）安全防护系统：设置超温保护、超压泄放、管网泄漏检测、烟气倒灌防护等多重安全防线；建立红橙黄三级预警机制，针对不同紧急程度触发相应处置流程；制定管网爆裂、设备故障等突发事件的应急排热与紧急供热切换预案，确保突发状况下人员及生产安全。（3）数据监测与运维系统：持续采集体系各环节运行数据，建立运行数据库，具备故障自动诊断与异常报警推送功能，支持按设备、按时段、按工质的能耗逐级溯源分析，定期自动生成能效评估报告，为设备检修更换和系统优化升级提供精确数据支撑，实现全生命周期运维管理。

3 生产车间余热梯级利用热能综合调配体系仿真验证与应用效果分析

3.1 仿真模型构建与参数设定

（1）仿真采用 TRNSYS 与 MATLAB 联合仿真平台，TRNSYS 负责热能系统动态建模，MATLAB 承担智能调度算法嵌入与数据交互。模型按“热源—换热网络—储热调节—用热终端”四段式搭建，模块化构架各子系统，实现梯级利用与调配逻辑的数字化映射。（2）依据车间实测数据设定参数：高温烟气量 12000Nm³/h、温度 320℃，中温冷却循环水量 80t/h、温度 95℃，低温废水量 15t/h、温度 55℃。设备性能参数按选型样本赋值，换热器效率取 0.75，热泵 COP 取 4.2，储热罐容积 300m³，用热侧设置生产预热、车间采暖、生活热水三类负荷，时序曲线依据生产排班设定。（3）评价指标体系涵盖三方面：能效指标包括余热综合利用率、单位产品节能量、系统 COP；经济指标包括年节能收益、投资回收期、运行维护成本；环保指标包括 CO_2 减排量、SO_2 及 NO_x 减排量，采用全年逐时动态模拟方法开展量化评估。

3.2 体系运行仿真模拟试验

（1）常规工况模拟：以车间满产日运行数据为输入，连续模拟 72 小时。梯级利用层按 320℃→95℃→55℃逐级换热，结果显示高温段制汽 6.2t/h，中温段供应采暖负荷 850kW，低温段经热泵提升供应热水负荷 320kW，余热综合利用率达 72.4%，系统供需匹配率维持在 91%以上。（2）峰谷负荷波动工况模拟：设置生产负荷从满产降至 60%再恢复的波动曲线，考察体系动态适配能力。智能调度算法在负荷突变后 3～5 分钟内完成再优化计算，通过储热罐充放切换填补短期缺口，波动时段供需偏差控制在 ±8%以内，验证了调配策略的响应速度与抗扰动能力。（3）极端工况模拟：设定高温余热源骤降 30%、主换热器突发效率衰减及储热罐检修三类极端场景，测试应急调控效果。体系通过自动切换备用换热路径、提高热泵出力比例、启动应急辅助热源等组合措施，确保用热侧最低供应不低于需求量的 70%，安全预警系统在异常发生后 15 秒内触发报警并完成故障隔离[5]。

3.3 应用效果综合分析

（1）能效效果：体系投运后，车间余热综合利用率由原有的 28.6%提升至 72.4%，年回收余热量折合标准煤约 1860 吨，车间综合能耗较改造前下降 31.2%，单位产值能耗显著优化。（2）经济效益：年节能收益约 372 万元（按工业电价 0.65 元/kWh、天然气 3.8 元/Nm³ 折算），体系初期建设投资约 820 万元，投资回收期为 2.2 年。运维方面，自动化调度减少人工干预，年运维成本较常规分散回收系统降低 16.8%。（3）环保效益：年减少 CO_2 排放约 4860 吨，SO_2 减排约 36 吨，NO_x 减排约 21 吨，折合每年减少标准煤燃烧产生的污染物排放总量约 42%，环保降碳成效显著。

3.4 现存问题与优化对策

（1）仿真中暴露的不足主要包括：低温段热泵在极端低温工况下 COP 衰减明显，极端工况下应急热源切换存在短暂滞后，储热罐保温层热损在长时间静置工况下偏高，低温余热回收经济性在低产时段明显下降。（2）优化方案：针对热泵衰减引入变频调节与多机组并联冗余配置；应急切换滞后问题通过增设预判触发逻辑与旁路预充压措施改善；储热罐增设相变保温夹层降低热损，并对回收系统的辅助设备（泵、风机）进行变频改造，进一步降低体系自身电耗。（3）工程落地建议：优先在余热资源稳定、用热需求集中的连续生产企业推广应用，新建车间宜在规划设计阶段预留梯级利用管网接口与设备安装空间；推广时需针对不同行业余热品位差异进行参数适配，制定分行业的设计规范与运行导则，确保技术方案的迁移性与可复制性。

结束语

本文构建的余热梯级利用与热能综合调配体系，有效解决了车间余热利用低效、调配失衡等行业难题，显著提升了热能综合利用率，实现了节能、降耗、降碳的多重效益。针对体系运行中暴露的热泵性能衰减、应急切换滞后等问题，提出针对性优化方案与落地建议。该体系适配工业车间生产工况，实用性与可复制性强，可为工业余热资源化利用提供有效参考。

参考文献

[1] 王培红. 基于能量品位匹配的工业车间余热梯级利用系统优化 [J]. 热能动力工程,2023,38(6):112-119.

[2] 刘健, 赵文超. 工业厂区多源余热协同回收与热能动态调配技术研究 [J]. 节能技术,2024,42(3):245-251.

[3] 陈俊, 吴海波. 制造车间余热资源梯级利用能效评价与系统构建 [J]. 机械科学与技术,2022,41(9):1421-1426.

[4] 周鑫, 杨晨. 基于负荷动态匹配的工业余热综合调配优化策略 [J]. 工程热物理学报,2023,44(8):205-221.

[5] 顾权荣. 工业生产车间废气余热梯级利用技术路径与系统构建 [J]. 前沿科技,2025,11(3):45-50.