“双碳”目标下工业热力系统热能低碳改造路径

王耀翔

中核第七研究设计院有限公司　山西　太原　030000

摘　要：工业热力系统是工业生产用热的核心保障，传统运行模式存在能源结构单一、输配损耗偏高、余热利用不足与调控方式滞后等问题，造成大量无效碳排放。结合双碳发展背景，本文梳理热力系统热能流转与碳排放生成的内在规律，剖析传统运行模式的各类短板，从热源结构、管网输配、余热利用、智能调控多维度搭建低碳改造体系，明确系统化的落地实施方式。通过结构性优化与精细化管控，改善工业热能利用模式，推动热力系统实现低耗低碳的稳定运行状态。

关键词：工业热力系统；热能损耗；梯级利用；低碳改造；智能调控

引言：工业热力系统承担着工业生产全流程的热能供给任务，用热环节的能源消耗是工业碳排放的主要来源。长期以来，国内工业热力系统多采用粗放式运行模式，能源利用效率偏低，热能损耗问题突出，难以适配绿色低碳的工业发展趋势。为改善热力系统高耗能、高排放的运行现状，需从系统运行机理与现存缺陷出发，针对性开展低碳改造优化。通过全方位重构热力运行体系，挖掘节能降碳潜力，推动工业用热模式向高效、低碳、精细化方向转型。

1 工业热力系统热能运行基础特征与碳排机理

1.1 工业热力系统基本构成与运行模式

工业热力系统是支撑工业生产热源供给的核心载体，整体由热能发生装置、热力输送设备、换热单元及末端用热设备共同组成。各部分依托管道、阀组形成闭环运行体系，适配各类工业场景的连续用热需求。热能发生装置负责基础热能的生成，是整套系统的能量源头。输送设备承担热能转移的核心作用，衔接产热单元与生产终端。换热单元完成热能品质调节，匹配不同工序的用热标准。末端设备直接服务于生产工艺，完成热能的最终消耗与利用[1]。

1.2 工业热能生产与输配转化机制

工业热能的生产以能源转化为核心，通过燃料能量释放完成热能生成，再经过多级转化适配工业生产需求。原始能源通过燃烧作用释放热量，对水体、导热介质进行加热处理，形成具备传输条件的高温热力介质。介质在管网内部完成定向流动，实现热能的远距离输送。输送过程中会根据工艺需求开展热能分级调节与能量置换，完成高温、中温、低温热能的层级转化。不同层级的热能可对应适配差异化生产工序，实现能量形态的有序转换。

1.3 工业热力系统碳排放形成原理

工业热力系统的碳排放源自能源转化的全过程，热能生产环节是碳排放的主要产生源头。传统工业用热依赖化石能源燃烧释热，能源氧化反应会持续生成碳类排放物质。能量转化过程中，能源无法实现完全利用，未充分反应的能源组分同样会产生碳排放。热力介质加热、管网稳压、工况调节等辅助运行环节，也会伴随持续性的能源消耗，衍生对应碳排放。

1.4 热能损耗与碳消耗的关联规律

工业热力系统运行期间存在多种热能损耗，损耗将催生大量无效碳消耗。管网散热、介质节流、换热参数失配等现象造成有效热能流失，系统需要加大能源投入补足热量缺口，新增能耗最终转化为无生产价值的碳排放。热能损耗规模与无效碳排放量呈正向联动特征，是造成热力系统高碳运转的核心诱因，各类损耗的产生诱因及碳排放影响特征详见表 1。

表 1 工业热力系统主要热能损耗类型及碳排放影响

损耗位置	损耗类型	形成诱因	碳排放影响特征
热源生产单元	不完全燃烧热损失	燃烧工况参数匹配失衡、过量空气系数不合理	持续性基础碳排放增量
热力输配管网	散热损失、节流压力损失	保温老化、管路配件阻力大、管线布局冗余	随运行时长累积的持续性无效能耗

续表：

损耗位置	损耗类型	形成诱因	碳排放影响特征
换热单元	换热温差㶲损失	冷热介质参数不匹配，高品位热能降级使用	间接提升热源负荷，加剧化石能源消耗
末端工序	余热直排损耗	缺少余热回收设施，废热直接排放	大量低品位热能资源闲置浪费

2 工业热力系统传统运行模式的现存短板

2.1 热能生产端能源结构适配缺陷

传统工业热力系统的热能生产长期依托常规化石能源构建供能体系，能源组成形式单一固化。生产端能源配比方式沿用传统生产标准，未能结合工业用热的动态需求完成灵活调整。多数工业生产场景采用集中式产热模式，统一输出固定参数的热力介质。不同生产工序的用热负荷、热能品质需求存在明显差异，单一能源产出模式难以匹配差异化的用热工况。能源产出与生产需求存在错配问题，部分工况下产出热能参数超出工艺所需，造成基础能源的无效消耗[2]。粗放式的能源利用结构，让生产端始终存在用能浪费问题，难以适配低碳化、精细化的工业用能发展要求。

2.2 热能输配环节能量损耗成因

热能输配是工业热力系统能量损耗的主要环节，长期运行的管网设备与固化输送模式持续滋生能耗漏洞。热力输送管网长期处于高温、高压运行环境，外层保温结构会逐步老化、破损。管道外壁与外界环境产生持续热交换，造成大量显性热能散失。管网内部阀件、接头、弯道结构会对热力介质产生流动阻力，介质流动过程中产生节流损耗与压力损耗。老旧管网布局缺乏科学优化，管线敷设长度冗余、走向不合理，进一步拉长热能输送路径。介质输送过程中的压力与温度衰减，迫使生产端持续提升产能补足损耗，形成持续性的无效能源消耗。

2.3 热能梯级利用体系架构缺失

传统工业热力系统采用单向化热能利用模式，未搭建分层、分级的热能复用架构。整套系统完成单次热能供给后，剩余余热会直接排出系统，未开展二次回收与深度利用。不同温度等级的热能资源未进行分类统筹，高温余热、中低温余热统一废弃处理。高品位热能用于低标准生产工序，低品位余热无法对接适配工况，出现热能资源错用、闲置的问题。工业生产各工序的余热资源分散独立，缺乏统一的收集、转运、复用通道。粗放的用热架构无法挖掘余热潜在利用价值，大幅降低整体热能利用效率，加剧能源浪费与碳排放冗余增量。

2.4 系统运行调控模式适配滞后性

传统热力系统运行调控依托固定人工经验与预设参数开展，调控方式固化被动。工业生产负荷会随生产节奏、工况环境产生动态波动，用热需求具备极强的随机性与阶段性。传统调控模式无法快速响应负荷波动，参数调整存在明显的时间差与精度偏差。系统运行参数长期维持固定区间，无法根据实时用热需求完成动态优化。粗放的调控手段会造成供热冗余或供热不足的问题，供热冗余产生不必要能耗，供热不足则会影响生产工况，迫使系统反复调整运行状态，进一步加剧能耗波动与资源浪费。

3 “双碳”导向下工业热力系统低碳改造体系构建

3.1 热能生产单元低碳优化架构

热能生产单元是工业热力系统碳排放的主要源头，低碳改造需要从用能结构与产热方式层面完成全方位优化。传统产热模式高度依赖化石能源，能源消耗形式单一，难以适配低碳发展的工业用能要求。优化工作可通过引入清洁热能、可再生能源替代部分传统能源，重塑生产端的用能组成。结合工业生产不同工序的用热负荷、温度参数以及运行时段差异，建立差异化的产热调控模式。摒弃粗放式恒定产热的运行方式，依据生产实际需求动态调整热能产出体量。精准匹配工艺用热标准，杜绝过量产热引发的无效能耗[3]。这种源头式的用能结构调整能够压缩能源消耗体量，减少热力生产过程中的碳排放，筑牢整套系统低碳运行的基础条件。

3.2 热能输配系统节能改造框架

热能输配过程的各类能量损耗，是造成热力系统能耗偏高的重要原因，针对性改造可大幅提升热能输送效率。老旧管网存在布局杂乱、管线冗余、保温老化等普遍问题，会持续造成热能外散与介质压力损耗。改造过程可梳理现有管网布局，删减多余管线路段，简化介质输送路径，削弱介质流动产生的阻力损耗。更换性能衰减的保温层结构，采用耐高低温、隔热性能优异的新型保温材料，阻断管道与外界环境的热交换。对管网接头、阀门、弯头易损耗点位进行升级优化，减少介质节流产生的能量损失。完整的输配改造框架可以稳定热力介质输送品质，降低生产端补热频次，有效控制输配环节的无效能耗。

3.3 余热梯级回收利用体系搭建

工业生产流程会产生大量不同品位的余热资源，传

统处置模式多以直接排放为主，造成大量热能资源闲置浪费。搭建科学的余热梯级利用体系，能够充分挖掘余热资源的利用价值。按照温度高低对生产余热进行等级划分，区分高温、中温、低温余热的资源属性，避免不同品位热能混杂处理造成的资源浪费。布设专属的余热收集、输送、存储设施，全面归集各生产工序散逸的余热资源。依托热能品位匹配原则，将不同等级余热对接适配的生产工序，实现余热的分级复用与高效转化。完善余热利用全流程机制，提升热能循环利用效率，减少全新能源的投入体量，构建低耗高效的热能利用模式。

3.4 热力系统智能调控体系重构

传统热力系统调控模式粗放固化，难以适配动态变化的工业用热工况，容易滋生各类能耗漏洞。智能调控体系的重构，能够彻底改变经验化、固定式的老旧管控模式。依托现代传感与自动控制技术，全面采集热力系统流量、温度、压力等核心运行参数，实时捕捉生产工况的动态变化。根据工序用热需求自动调整设备运行状态与供热参数，实现热能供给的精准适配。补齐传统调控模式响应滞后、参数失衡的短板，规避供热过剩或供热不足带来的能源浪费。精细化的智能管控模式可让热力系统长期维持高效运行状态，持续降低系统整体能耗，实现热力运行全过程的低碳管控。

4 工业热力系统热能低碳改造实施路径

4.1 热源清洁化替代改造实施方式

热源改造是工业热力系统实现低碳转型的核心落地举措，重点突破传统化石能源主导的产热模式。改造工作遵循平稳迭代的推进思路，在保障工业生产连续性的前提下，逐步更新原有高耗能产热设备。结合厂区场地条件、生产负荷特性与用热参数标准，合理匹配适配性较强的清洁供热设备，搭建全新的热源供给体系[4]。有序推进传统能源设备的替换更替，逐步调整能源消耗结构，减少化石能源的消耗占比。依据生产工序的负荷波动规律动态调节供热输出强度，匹配不同时段的用热需求。稳定的热源替换节奏可以规避生产工况波动问题，从热力生产源头压缩碳排放体量，构建清洁低碳的供热基础体系。

4.2 热力管网能效提升改造路径

热力管网是热能输送与分配的关键载体，管网状态直接决定整体热能利用水平。老旧管网长期处于高温高压运行环境，普遍存在保温老化、管线布局杂乱、配件损耗严重等问题，造成大量热能无端耗散。改造工作以降低输送损耗为核心目标，全面排查现有管网运行缺陷，梳理能耗漏洞的具体成因。对冗余杂乱的管线路段进行精简优化，梳理规整输送走向，缩短热能输送行程，削弱介质流动过程中产生的阻力损耗。更换老化破损的保温结构与密封配件，采用高性能隔热材料强化管网防护能力，阻隔环境热交换带来的散热损失。优化管网调压、稳流构件配置，稳定介质输送参数，持续提升热能输送的有效利用率。

4.3 余热资源多级循环利用实施方式

工业生产各工序会持续产生大量不同品位的余热资源，传统生产模式大多直接排空处置，造成能源资源严重浪费。余热低碳改造立足热能梯级利用原理，搭建分级归集、分类复用的余热利用体系。针对高温、中温、低温余热的品质差异，划分独立的回收利用通道，避免不同品位热能混杂处置导致的资源低效利用。配套布设余热收集管路、换热设备与储能装置，完整归集生产过程中散逸的各类余热。结合各生产工序的用热标准，将不同等级余热精准对接适配生产场景，实现余热资源的高效转化与重复利用。有效盘活废弃热能资源，减少外源能源投入，形成内生循环的低碳用热模式。

4.4 热力系统低碳运行管控优化方向

硬件设备改造只能解决结构性能耗问题，科学的运行管控是维持系统长效低碳运行的关键。传统热力系统依靠人工经验调节运行参数，管控模式粗放，难以适配精细化低碳运行需求。依托数字化采集与智能分析技术，实时捕捉系统温度、压力、流量等核心运行数据，总结不同工况下的能耗规律。结合生产状态动态优化设备运行参数与供热策略，精准匹配实时用热需求。建立规范化的日常运维机制，落实设备养护、管网巡检、参数校准等常态化工作，及时排查并消除设备异常引发的能耗增量。通过精细化管控手段压缩无效能耗，巩固各类低碳改造成果，实现热力系统长期高效低碳运行。

结束语

工业热力系统的高碳运行问题源于结构设计、能量流转与运行管控等多个层面，单一的设备调整无法彻底改善系统用能短板。通过开展热源清洁替代、管网能效升级、余热梯级利用与智能管控重构等系列改造工作，能够有效解决传统热力系统的能耗漏洞。完善的低碳改造体系与落地路径，可持续优化工业热能利用结构，降低无效能源消耗，夯实工业热力系统低碳高效运行的基础，提升工业用能体系的绿色化发展水平。

参考文献

[1] 李小锴. 燃气锅炉低碳燃烧改造及节能效果研究 [J]. 节能,2026,45(2):98-101.

[2] 胡文青. 某综合楼供暖热源低碳节能改造技术方案研究 [J]. 建材与装饰,2026,22(3):121-123.

[3] 聂肖虎. 油气集输管道加热炉的改造和低碳化运行 [J]. 石油化工设备技术,2023,44(2):42-47.

[4] 周航, 王慧媛, 贾宏杰, 等. 电-氢-气-热园区综合能源系统低碳化改造系统集成方法 [J]. 电力系统自动化,2026,50(7):27-38.