集中供热管网热泵梯级利用的节能设计与实践分析

赵兴帅

（山东安悦节能技术有限公司，济南 250000）

摘　要：针对集中供热管网中大量低温回水热量未能充分利用的问题，文章采用理论分析与工程实践相结合的方法，构建以吸收式热泵、压缩式热泵等为主的多种利用系统结构，并建立系统能效评价指标体系。研究结果表明，在大同某供热改造工程中，热泵梯级利用使一次网回水温度由65 ℃降至39 ℃，管网输配能力提升38%；某乏汽余热梯级回收集中供暖系统的运行数据显示，系统余热总回收量为64.91×10^4 GJ，节能率为49.11%。

关键词：集中供热；热泵；梯级利用；节能设计

中图分类号：TU96+2

Energy-saving Design and Practical Analysis of Cascade Utilization of Heat Pumps in Centralized Heating Pipeline Network

ZHAO Xingshuai

（Shandong Anyue Energy Conservation Technology Co., Ltd., Jinan 250000, China）

Abstract: In response to the problem of insufficient utilization of a large amount of low-temperature return water heat in centralized heating pipelines, this article adopts a combination of theoretical analysis and engineering practice to construct multiple utilization system structures mainly using absorption heat pumps, compression heat pumps, etc., and establishes a system energy efficiency evaluation index system. The research results show that in a heating renovation project in Datong, the cascade utilization of heat pumps reduced the return water temperature of the primary network from 65 ℃ to 39 ℃, and increased the transmission and distribution capacity of the network by 38%. The operation data of a certain exhaust steam waste heat cascade recovery centralized heating system shows that the total amount of waste heat recovered by the system is 64.91×10^4 GJ, with an energy-saving rate of 49.11%.

Key words: centralized heating; heat pump; cascade utilization; energy-saving design

传统板式换热器难以充分利用该温区的热能，导致管网输送能力不足，许多城市不得不投入大量资金进行管道扩建，但受市政条件限制，往往无法实施扩容工程。能量梯级利用原理为解决这一矛盾提供了新思路。供热管网从高温供水到低温回水存在天然能级梯度，按品位分级利用可有效防止高能低用。热泵技术能够将低品位热能提升至可利用的温区，从而实现回水余热的回收。基于此，构建由吸收式热泵和压缩式热泵按能级阶梯分布的梯级利用系统，形成高温直接换热、中低温热泵提升、余热深度回收的三级利用体系。

1 热泵梯级利用的技术原理与系统架构

1.1 能量梯级利用基本原理

能量梯级利用的基本原则是根据能源品位的差异进行分级利用，即高品位能量承担高温度需求的负荷，低品位能量承担低温度需求的负荷，从而防止高能低用的不合理配置。

集中供热系统的能质损失主要发生在一次网和二次网换热环节。传统热力站采用板式换热器，将一次网高温热水（110~130 ℃）直接换热给二次网（50~60 ℃），换热温差大，不可逆损失显著。大量一次网回水热量（60~70 ℃）无法被用户直接利用，只能返回热源厂重新加热，相当于在每一轮供热循环中浪费了近一半的可用热能[1]。

热泵技术的出现改变了这一局面。吸收式热泵以高温热源（蒸汽或天然气燃烧）为驱动能源，从低温热源中吸收热量，并将热量提升至用户所需的温度；压缩式热泵以电力为动力，通过压缩机做功将低温环境中的能量转移至高温环境中。

1.2 系统集成架构设计

根据以上匹配关系，文章建立了三级梯级利用系统结构。第一级为直接换热级，在热源首站或大型热力站设置

作者简介：赵兴帅（1988—），本科，工程师，研究方向为余热余压回收、节能改造及综合能源利用。

板式换热器，一次网供水（110~130 ℃）直接供给二次网，供出高温热水（70~90 ℃），满足对供水温度要求较高的末端用户需求。第二级为吸收式热泵提升级，在热网中段设置吸收式热泵机组，利用驱动热源（抽汽或高温烟气）从一次网回水（50~70 ℃）中提取热量，将热量提升至65~80 ℃后供给二次网，同时将一次网回水温度降至30~40 ℃。第三级为压缩式热泵深度回收级，在距离热源厂较近的回水干管上安装压缩式热泵机组，从回水（30~40 ℃）中提取热量，供低温供暖区域或热源厂补水预热使用[2]。

系统集成过程中需重点关注以下3个技术参数。首先，各梯级之间的温度分配应根据热源特性、管网布置及末端要求，通过热平衡计算确定各级温降分配比例。其次，吸收式热泵和压缩式热泵的制热容量需根据热负荷曲线的特点进行合理分配，避免容量浪费或不足。最后，在供暖期的不同阶段（初寒期、严寒期、末寒期）切换不同的梯级组合模式，以适应热负荷的季节性变化。三级纵向流程如图1所示，热媒依次经过直接换热、吸收式热泵提升和压缩式热泵深度回收，回水温度逐级下降。

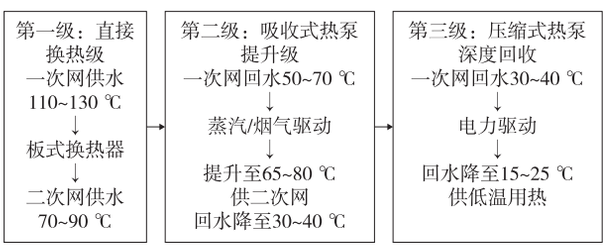

图1 热泵梯级利用三级流程示意图

2 节能设计方法与关键参数优化

2.1 热力计算模型构建

热泵梯级利用系统基于热力计算建立。建立梯级利用系统热力计算模型，需明确一次网侧、热泵机组侧和二次网侧的热力平衡关系。一级网热平衡方程为：供给末端用户的全部热量等于热源厂供热量减去回水余热折减量，通过数学表达式可描述各级热量转移的过程[3]。

热泵机组性能模拟是模型的核心部分。吸收式热泵的性能以热力系数来衡量（一般在1.5~1.8），同时需考虑驱动热源的品位折损。压缩式热泵的性能与蒸发温度、冷凝温度相关，蒸发温度越低，热力系数越低。根据实际运行数据，电动压缩式大温差机组全年平均供热热力系数为8.3，在合理运行区间内具有明显的高能效优势。

模型边界条件的设置需考虑管网实际运行工况。一次网供水温度受热源类型和室外气温共同影响，当热电联产机组在严寒期无法保证额定供水温度时，需由燃气调峰锅炉进行补充加热。二次网供水温度与室内采暖系统形式有关，散热器系统需要70 ℃以上的供水温度，地板辐射系统仅需45~55 ℃的供水温度。不同边界条件下，梯级利用系统的运行模式也应相应调整。

2.2 管网回水温度优化策略

降低一次网回水温度是梯级利用设计的主要目的，也是评价系统效果的重要指标。回水温度降低幅度越大，管网供回水温差就越大，在相同管径下输送的热量就越多。在实际工程中，采用吸收式热泵可将一次网回水温度由原来的60~70 ℃降为35~45 ℃。例如，大同某项目将回水温度从65 ℃降至39 ℃，供回水温差由55 ℃增大至76 ℃，管网输送能力提升38%。太原太古供热工程采用一级网回水集中降温优化设计，一方面可减少管网散热损失，另一方面可实现当年投资当年盈利的效果。

回水温度的改善需要热泵容量与管网水力特性达成良好匹配。回水温度过低会导致热泵机组投资大、运行电耗高，回水温度过高则余热回收不充分。应建立以年度总费用为目标函数的优化模型，在满足末端供热需求的约束条件下，求解最优回水温度取值[4]。

2.3 热泵机组选型与容量配置

热泵机组选型需综合考虑热源状况、负荷特点、投资回收期及运行稳定性等因素。吸收式热泵适用于以蒸汽或高温热水作为驱动热源的场合，常用于热电联产系统。压缩式热泵适用于电力供应充足、电价较低且无蒸汽热源的场合，在谷电时段运行可显著降低运行成本。

在容量配置方面，吸收式热泵与压缩式热泵联合使用较为有效。常见配置方式包括串联型和并联型两种。串联型配置中，吸收式热泵位于上游梯级，压缩式热泵位于下游梯级，两者按能级高低顺序运行，可最大限度地降低一次网回水温度。在并联型配置中，两种热泵分别承担不同热力站或不同温区的供热负荷，各自独立运行，在管网改造项目中更易于实施。

容量确定需依据典型供暖期热负荷延续图进行逐时分析。首先，根据热负荷保证率和设备可用率确定总设计热负荷。其次，按照热经济性分配原则，将总负荷分配至各级热泵。最后，对设备台数及组合方式做进一步优化，确保在部分负荷工况下仍能保持良好的运行效果。

2.4 运行调节与控制策略

梯级利用系统运行调节比传统供热系统复杂得多，在保证供热质量的同时，还需协调各热泵机组的启停顺序及出力分配。根据室外气温变化，建立热泵梯级利用系统运行调节曲线，并将其划分为若干运行区间。

初寒期和末寒期室外气温较高，热负荷较低，此时可优先采用压缩式热泵深度回收回水余热，吸收式热泵仅在必要时投入运行。进入严寒期后，热负荷急剧增大，吸收式热泵需满载运行，压缩式热泵在谷电时段开启以节约用电。在调节过程中，应确保一次网回水温度维持在目标值附近，避免因频繁波动导致热泵机组启停[5]。

控制系统设计应实现各梯级之间的信息共享与联动调节。以一次网回水温度为主控参数，以各热泵机组负荷率为辅助参数，采用前馈+反馈复合控制策略，使系统在短时

间内对负荷变化作出响应，同时保持长时间稳定运行。智慧供热平台的应用为梯级利用系统提供了强有力的技术支持，可对运行数据进行实时监测与分析，不断优化控制策略，以达到提高能效的目的。

3 运行效果分析与经济性评价

3.1 系统能效评价指标

热泵梯级利用系统能效评价需要建立多层次的指标体系，才能全面反映系统的节能状况。评价指标分为3类，分别为设备层指标（热泵热力系数）、系统层指标（一次能源利用率）和综合层指标（节能量、节能率）。

热泵热力系数是评价热泵设备自身性能的主要指标。实验结果表明，电动压缩式热泵在实际运行工况下热力系数可达5.93以上，吸收式热泵的热力系数在一定工况下也可达到1.5以上。压缩式热泵全年平均供热热力系数可达8.3，具有明显的节电效果。热力系数指标反映的是单位输入能量所获得的输出热量，但不能直接表征系统整体的节能效果。

系统能效比（EER）和一次能源利用率（PER）将不同能量形式转换为一次能源消耗量，消除了能源品位差异对评价带来的影响。供热系统综合能效提升率则采用改造前后相同热负荷条件下的能耗总量来表示。

3.2 节能效果分析

热泵梯级利用系统的节能效果主要体现在三个方面，即余热回收量、管网输配能耗降低以及热源厂热效率提高。以大同某热电联产供热改造工程为例，在供热区域内布置吸收式热泵，将热网回水温度由65 ℃降至39 ℃，一次网供回水温差由55 ℃增大至76 ℃，管网热力输送能力提升38%。

从系统整体角度来看，热泵梯级利用方案可将热电联产系统的节能率提升至较高水平。某乏汽余热梯级回收集中供暖工程运行数据表明，以“品位对口、梯级利用”为用能思路构建的该系统，余热总回收量达64.91×10^4 GJ，其中采用低真空技术直接从凝汽器回收的余热量占79.16%，采用吸收式热泵技术回收的余热量占20.84%，项目节能率为49.11%，标准煤节省量为3.40×10^4 t。压缩式热泵的深度余热回收作用也不容忽视。热网一次网回水温度最低可降至15 ℃，在吸收式热泵预降温的基础上进一步回收低品位热能，减少热源厂的补热需求。大同某供热改造工程应用热泵梯级利用技术前后的关键指标对比如图2所示。

3.3 经济性评估

经济性评价采用动态投资回收期法。典型工程投资回收期一般为3~6年，不同工程因项目规模、热泵类型、电价及热价等因素而有所差异。以吸收式热泵为主的项目，设备初投资较高但运行费用较低；以压缩式热泵为主的项目，初投资较低但电费支出较大。

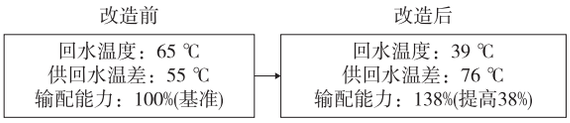

图2 大同项目改造前后回水温度与输配能力对比

以某吸收式热泵供热改造项目为例，当热网回水温度由原来的约35 ℃降至20 ℃时，在增加供热面积的同时无需扩建管网，从而节约了大量管网投资费用。实际项目运行数据表明，大温差热泵机组投资回收期约为4年。

政策性补贴对经济性有重要影响。目前，国家及地方政府对节能技术改造、可再生能源利用等项目给予一定的财政支持，主要包括节能奖励资金、税收优惠和贷款贴息等[6]。

4 结语

随着热电协同技术、智慧供热平台及新型热泵设备的发展，热泵梯级利用系统将朝着更高能效、更低成本的方向发展。一方面，应扩大梯级利用技术的应用范围，将其推广至工业余热回收、可再生能源供热等新领域；另一方面，结合梯级利用技术与源网荷储协调，推动集中供热系统向更加清洁、高效、智能的方向转变。

参考文献

[1] 刘东洋.集中供热管网直埋敷设工艺设计与施工要点[J].居业，2026(5)：113-115.

[2] 韩永.城区集中供热管网工程施工及质量控制技术[J].城市建设理论研究(电子版)，2026(12)：70-72.

[3] 李蒙.城市集中供热系统管网优化设计与能效提升研究[J].标准生活，2026(1)：70-72.

[4] 何凯.城镇化背景下集中供热管网设计优化措施[J].全面腐蚀控制，2025，39(7)：151-154.

[5] 高磊.城市集中供热管网工程施工技术探讨[J].产品可靠性报告，2025(4)：151-152.

[6] 张攀.城市集中供热管网工程全过程造价管理对策分析[J].中国招标，2025(4)：165-167.