

供热系统管网热损控制关键技术研究及优化

董李娜

(山东兴源热电设计有限公司, 山东 济南 250014)

摘要 本文对供热管网热损控制的关键技术与优化策略进行了研究, 分析了影响热损的因素, 并探讨了相关控制技术, 重点包括管网保温优化、热损监测、泄漏检测、热源优化、供热介质输配等核心技术, 提出了管网设计优化、运行参数调控、智能控制、综合能效提升等优化策略, 以期为提高供热系统效率、降低能源损耗提供有益借鉴。

关键词 供热管网; 热损控制; 保温优化; 智能控制

中图分类号: TU995.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.003

0 引言

供热系统是城市能源基础设施的重要组成部分, 其运行效率直接影响能源利用率和环境可持续性。供热管网在输送过程中存在热损失, 导致能源浪费和运行成本增加。有效控制热损可降低能耗, 提升供热系统经济性和可靠性。随着节能政策推进, 热损控制技术不断优化, 但仍面临保温材料性能、智能监测、运行参数优化等挑战。因此, 研究供热管网热损控制技术与优化策略, 对提高系统效率、降低碳排放、推动绿色发展具有重要意义。

1 供热管网热损控制关键技术

1.1 管网保温与结构优化

供热管网的保温性能直接影响热损控制效果。常用的保温材料包括聚氨酯泡沫、聚苯乙烯泡沫等。聚氨酯泡沫的导热系数约为 $0.022 \sim 0.033 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 在保温材料中表现出优异的隔热性能。聚苯乙烯泡沫的导热系数约为 $0.033 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 也是常用的保温材料之一。供热管道的保温层厚度应根据输送介质的温度和管径等因素进行设计, 以确保热损失控制在合理范围内。例如: 对于输送温度在 $100 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热水管道, 保温层厚度通常设计为 $50 \sim 80 \text{ mm}$, 以减少单位长度热损耗。对于高温蒸汽管网, 采用多层复合保温结构, 并填充高效保温材料, 可进一步降低热损失, 提高热效率。

1.2 热损监测与智能诊断

热损监测是供热管网运行维护中的关键环节, 通过高精度温度传感器、红外热成像技术和智能无线监测系统, 实时监测管网热损状况, 提高运行效率和安全性。高精度温度传感器可在 $-20 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内工作, 测温误差小于 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 适用于大规模分布式测温。

红外热成像仪能够捕捉温度异常区域, 并通过温差分析定位热损高发点。智能无线监测系统的信号覆盖范围可达 $15 \sim 100 \text{ kbps}$, 适用于远程供热管网热损监测, 可实现大规模热网的动态跟踪和预警。不同监测技术的结合可提高监测精度, 减少热损失, 提升供热系统的整体运行稳定性。结合多种技术手段, 可有效提高热损监测的准确性和效率, 优化供热管网的运行状态。

1.3 泄漏检测与快速修复

1.3.1 泄漏检测技术

供热管网泄漏检测主要依赖高精度传感技术和智能监测手段。超声波传感器可检测流速变化, 当泄漏量达到 0.5 mm/s 时触发报警, 适用于小口径管道和局部泄漏监测。负压波法基于管道压力波动特性, 可在长输热力管网中实现 $2 \sim 3 \text{ L/min}$ 的小型泄漏点检测, 误报率低, 适用于远距离监测。氦气示踪技术的灵敏度可达 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 适用于精准定位埋深 $1.5 \sim 3 \text{ m}$ 的地下管道泄漏点, 尤其在复杂环境或非开挖检测中具有优势。无线传感网络结合 LoRa 或 NB-IoT 通信 (信号覆盖 $15 \sim 20 \text{ km}$, 数据速率 $10 \sim 100 \text{ kbps}$), 可实现全天候远程监测, 提高管网运行的安全性和可靠性。

1.3.2 在线封堵技术

在线封堵适用于管网运行期间的小范围泄漏修复, 避免大规模停供造成的影响。常用方法包括高分子密封剂填充、机械卡箍封堵和热收缩套管修复。高分子密封剂在 $-20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内可保持稳定黏结力, 对裂缝宽度 $0.2 \sim 2 \text{ mm}$ 的泄漏点封堵效果良好。机械卡箍封堵适用于管径 $\text{DN}50 \sim \text{DN}800$ 的金属管道, 耐压能力可达 1.6 MPa , 适用于中高压管网的紧急修复。热收缩套管技术通过加热使材料收缩并紧密包覆泄漏部位, 温度范围控制在 $100 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$, 适用于直埋管道的局部防护, 提高管道密封性能, 延长使用寿命。

1.3.3 局部更换与焊接修复

对于严重腐蚀、机械损伤或大面积泄漏的管道，局部更换是恢复管网完整性的关键措施。采用液压切割设备，可以在10~20分钟内完成对DN100~DN600管道的精准切割，误差控制在 ± 0.5 mm^[1]。焊接修复通常采用自动氩弧焊或埋弧焊，焊缝质量需满足超声波探伤检测要求，确保强度达到母材的95%以上。焊接后使用防腐涂层（厚度200~500 μ m），确保耐温范围-40~120 $^{\circ}$ C，增强管道抗腐蚀能力。对于长期服役的旧管网，局部更换可结合内衬修复技术，如PE或环氧树脂内衬，提升耐磨性和密封性，提高管道整体耐久性。

1.4 热源优化与余热回收

供热源优化可减少系统热损，提高整体能效。热电联产机组的综合效率可达80%~90%，远高于单一锅炉供热方式，因此采用热电联产作为主要热源可有效降低燃料消耗。工业余热回收是另一种重要措施，如钢铁、电力、化工等行业的排放烟气温度通常在300~600 $^{\circ}$ C，通过高温换热器可将废热回收用于供热网，提高一次能源利用率。低温余热回收可结合相变储能技术，采用熔点在50~70 $^{\circ}$ C范围内的相变材料储存热能，并在夜间或低负荷时段释放，提高供热调节能力。余热回收系统可集成可编程逻辑控制器（PLC）和分布式控制系统（DCS），实现自动化运行，并结合人工智能智能调度，提高能源回收利用率。

1.5 供热介质优化与输配

1.5.1 供热介质优化

供热介质的合理选择直接影响到系统的能效和管网的运行寿命。热水供热系统通常采用软化水或除氧水，以减少管道结垢和腐蚀，水中溶解氧含量应控制在50~100 μ g/L，硬度应低于0.03 mmol/L。对于蒸汽供热系统，过热蒸汽是常见输送介质，其干度需保持在98%以上，以减少冷凝水含量，避免传输过程中的热损失。蒸汽压力通常控制在0.8~1.5 MPa，温度范围在180~250 $^{\circ}$ C，以匹配不同用户的需求。采用热媒油作为介质的高温供热系统，工作温度可达300~400 $^{\circ}$ C，适用于高精度制造和特种工业应用。优化供热介质的水处理工艺，如采用膜过滤和离子交换技术，可降低水质杂质含量，提高供热管网的长期运行稳定性。

1.5.2 输配系统优化

供热输配系统优化涉及水力平衡调节和动态调控技术，以确保热量输送高效均衡。变频循环泵广泛应用于热网输配系统，其调速范围为20~50 Hz，可根

据实时负荷调整流量，减少低负荷运行时的能耗。动态调节阀采用电动比例控制技术，使流量偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内，提高管网的输配均衡性，减少远端热损。二次管网采用分区调控策略，将供热区域划分为2~3个压力区，通过自动压力调节阀维持各区间的流量稳定性，避免局部过供或欠供现象^[2]。热网水力平衡优化结合智能控制系统，通过SCADA平台远程监测管道压力、流速和温度，确保供热输配的精准性，并减少运行能耗。

2 供热管网热损控制优化策略

2.1 管网设计与布局优化

供热管网的设计与布局影响热损失和运行效率。环状或网格式布局可提高供热稳定性，减少单点故障影响。主管道流速宜控制在0.8~1.5 m/s，支管道流速在0.4~0.8 m/s，以降低摩擦阻力。管道埋设深度一般为1.2~1.5 m，极寒地区可达1.8 m，以减少冻土层影响。输送温度120~150 $^{\circ}$ C的管道保温层厚度宜为60~100 mm，蒸汽管网为80~120 mm^[3]。计算流体力学（CFD）模拟优化管道布局，使局部阻力损失降至0.3~0.5 m水柱，提高热输送效率。

2.2 运行参数与动态调控

供热系统的运行参数优化有助于降低热损，提高能源利用效率，并确保供热质量稳定。合理调整供水和回水温度，优化流量控制策略，可以减少能源浪费，提高系统整体运行效率。动态平衡阀用于调节系统的水力平衡，避免局部区域过热或供热不足，而变频泵的应用能够根据实际需求动态调整循环流量，降低无效能耗。结合智能控制系统，通过温度传感器监测运行状态，并利用PLC与DCS实现自动调节，提高响应速度，使供热更加精准和节能，实验数据如表1所示。

表1 运行参数与动态调控实验数据

参数	实验值范围
供水温度（ $^{\circ}$ C）	85~105
回水温度（ $^{\circ}$ C）	55~70
供水—环境温度差（ $^{\circ}$ C）	30~50
变频泵调节频率（Hz）	20~50
流量精度（%）	$\pm 2\%$
动态平衡阀流量偏差（%）	$\leq 5\%$
温度传感器测量误差（ $^{\circ}$ C）	± 0.3
自动调节响应时间（秒）	3~5

表 1 数据显示,合理设定运行参数,结合智能化调控手段,可有效优化供热系统运行状态,减少热损,提高能源利用率,并保障供热的稳定性和可靠性。

2.3 智能控制与节能调度

2.3.1 远程监测与数据采集

智能控制系统依赖于实时监测数据,确保供热管网的精准调控。温度、压力、流量传感器分布在管网关键节点,采集供回水温度(85~105℃)、流量(0.8~1.5 m/s)和压力(0.3~0.6 MPa)等参数。无线通信采用 LoRa 或 NB-IoT 技术,信号覆盖 15~20 km,数据传输速率 10~100 kbps,确保远程监测的稳定性和高效性。SCADA(数据采集与监控系统)结合 GIS(地理信息系统),形成热网可视化管理平台,实现供热数据的实时更新与存储,为智能调度提供基础数据支持。

2.3.2 AI 热负荷预测与智能调节

人工智能(AI)技术在供热调度中发挥着重要作用。基于历史运行数据、用户需求曲线和室外温度变化,AI 预测未来 2~3 小时的热负荷变化,并提前调整供水温度、泵速和流量。调度精度可达 $\pm 0.5\%$,减少能源浪费。结合天气预报,如室外温度从 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统可提前降低供水温度 5~10℃,避免过热供给,减少燃料消耗。热网仿真技术与机器学习算法结合,使调度方案更加精准,优化供热响应速度,提高系统的节能水平^[4]。

2.3.3 分布式能源管理与热能优化

分布式能源管理系统(DEMS)可在 10~20 km 范围内进行热能分区调控,提高整体能效。各区域依据实际热负荷动态调整供热量,减少热能损失 2%~5%。在低负荷时段,通过相变储能(熔点 50~80℃)存储余热,高负荷时释放,实现供热调节的平衡。余热回收系统结合 PLC(可编程逻辑控制器)控制策略,提高废热再利用率,减少供热能源消耗。通过分布式调度优化,可降低峰值热负荷波动,提高能源使用效率。

2.3.4 用户端智能调控与舒适性提升

智能温控阀在用户端实现精准供热调节,控制精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,可在 2~3 小时内平稳调节室温。热量计数据传输至中央调度系统,结合用户需求调整供热参数,确保室内温度稳定在 20~24℃范围。远程控制模式允许用户通过手机或智能终端调节室温,优化能耗。低温辐射采暖系统(供水温度 35~50℃)与智能调控结合,可提高供热舒适度,同时节能 15%~20%^[5]。基于用户反馈和大数据分析,优化供热模式,实现按

需精准供热,提高用户体验并减少能源浪费。

2.4 综合能效提升与低碳化

提高供热能效,减少碳排放,推动可持续发展。热电联产能源利用率达 85%~90%,较传统锅炉降低燃料消耗 10%~15%。余热回收应用于钢铁、化工等行业,换热温度 200~600℃,回收热能 30%~40%。相变储能材料熔点 50~80℃,储热密度 100~200 kJ/kg,提高低负荷时能源利用率。太阳能集热器工作温度 60~90℃,结合生物质锅炉(燃烧温度 800~1 000℃),减少碳排放 5%~10%。既有建筑改造采用低温辐射采暖,供水温度 35~50℃,较传统系统(65~85℃)节能 15%~20%。外墙保温厚度 100~150 mm,单位面积供热负荷减少 10~15 W/m²,提高供热效率。

3 结束语

供热管网热损控制与优化对提升能源利用效率、降低碳排放具有重要作用。未来,智能供热调度、精准热损监测及智能控制将进一步优化系统运行。新型保温材料、相变储能及分布式供热模式的推广,将降低输配能耗,提高热能利用率。可再生能源深度融合,如太阳能、地能与余热回收系统的协同应用,将推动供热行业向低碳化、智能化发展。智能传感、物联网及大数据技术的应用,将助力供热管网实现动态调控,提高稳定性和经济性,为城市能源体系的可持续发展提供支撑。

参考文献:

- [1] 郭明宇,祖国刚.供热企业一次管网热损失分析及对策研究[J].暖通空调,2024,54(05):173-176,12.
- [2] 李鸿,张欢,王雅然,等.基于水力-热力耦合模型的供热管网优化调度研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(01):27-36.
- [3] 张毅.城市集中供热管网热平衡调节技术研究[J].中国新技术新产品,2023(01):94-96.
- [4] 张磊,王满康,叶婧,等.兼具求解速度与隐私性的复杂供热管网等值简化模型[J].电力系统保护与控制,2024,52(10):105-117.
- [5] 王宏博.基于BP神经网络算法的长输供热管网热损失预测[J].节能,2023,42(04):46-48.