

太阳能集中供暖系统在城市低碳供热中的应用

姚 辉

西藏开投清洁能源供暖有限公司 西藏自治区 拉萨 850000

【摘要】：针对北纬 38°地区冬季辐照波动与寒潮叠加的供暖约束，本研究在 A 市 A 社区构建集 2000 m²真空管集热器、5000kWh 相变储热、低温地板辐射与智能控制于一体的集中供暖系统，并完成 120 日采暖季实证。系统采用预测驱动调度与燃气旁路兜底策略，实现日均有效供热 1200kWh，季累计 144000kWh，整体热效率 65%；晴天、阴天、雪天的日负荷覆盖率分别为 85%、40% 与 25%，辅助能源年使用占比降至 25%。经终端等效核算，年 CO₂减排约 80 吨；经济性评估显示初始投资 150 万元，年净节约 30 万元，静态回收期 5 年，叠加政策补助可缩短至 3.5 至 4 年。研究表明该架构在保障热舒适的同时实现了能效、减排与经济性的协同提升。

【关键词】：太阳能集中供暖；相变储热；低温地板辐射；智能预测控制；经济可行性

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.058

引言

冬季清洁供暖转型需在保障热舒适与能源安全的前提下降低化石能源依赖。北纬 38°地区冬季辐照日变幅大且寒潮频发，热源与负荷错配、辐照波动与设备冲击制约了太阳能集中供暖的规模化应用。针对上述痛点，本文面向社区尺度构建由真空管集热、相变储热、低温地板辐射与智能控制协同的系统架构，通过几何与水力优化提升冬季取热能力，采用板式换热器实现一次侧与储热侧水力解耦，构建差压控制与防滞留策略抑制过热与低流量风险，利用短期气象预测与分户负荷辨识协调集热流量、换热开度与蓄放热时段，并预留燃气锅炉旁路保障连续供热安全。研究旨在提供面向低温末端的可复制设计方法与跨环节协同控制思路，为太阳能在城市集中供热中的主导化应用提供工程路径。

1 太阳能集中供暖系统的整体设计与构建

鉴于北纬 38 度冬季辐照日变幅与寒潮间歇叠加的运行场景，本研究在该市 A 社区构建由太阳能集热、相变储热、末端供热与智能控制协同工作的集中供暖架构。集热侧选用真空管集热器，总面积 2000 平方米，倾角按纬度适度抬升以偏向冬季辐照，场区分区并联并配置差压控制与防滞留策略抑制过热与低流量工况。储热侧选用无机盐类相变单元，额定容量 5000 千瓦时，融化温区 40 至 55 摄氏度，通过板式换热器实现一次侧与储热侧的水盐隔离与水力解耦。末端采用低温地板辐射系统，设计供回水温度 45 与 35 摄氏度，二次侧由变频泵维持室内热舒适并将支路压差和流量稳定在合理范围^[1]。智能控制系统以短期气象预测与分户负荷辨识为输入，协调集热流量、换热开度和蓄放热时段，将集热面积、储热容量与日均供热负荷按太阳供热分担率匹配，使晴天覆盖峰段而阴天由储热平抑，同时预留燃气锅炉旁路以保障连续供热安全。

2 太阳能集中供暖系统的关键技术与优化策略

2.1 太阳能集热系统的优化设计

鉴于 A 市 A 社区年日照时数为 2800 h，集热系统需围绕冬季供热主期进行几何与水力双重优化。倾角设为 38°，与纬度相同，以冬半年入射角加权的年度能量获取作为目标，方位取正南，行间距依据冬至正午的太阳高度角进行校核，把相邻排的遮蔽控制在有效孔径下缘之下，同时采用分区阵列与逆回水布局来减小支路不平衡。为抑制风致换热强化导致的散热增加，集热场外围设置低扰动风屏，并把集热回路的设计流量密度与差压调节阀整合，维持低雷诺区间内的稳定换热，在夏季非采暖期启用旁通与夜间散热模式以减少滞留^[2]。

结合本区域低温高风的冬季气象特性，真空管集热器相较于平板集热器在低辐照与大温差状态下的对流与辐射损失更低，按典型工况评估，其全年平均集热效率较平板提高约 12%，因此在满足屋面承载与检修通道条件下优先选用真空管，并把汇流管径与支架仰角调节机构标准化以便安装与维护。运维方面，建立以光学洁净度与热性能双指标驱动的清污策略：采暖季每 2 周进行常规干擦与出光口检查，风沙集中期每 1 周进行湿洗并复核透明盖板透射率，降雪后 24 h 内完成积雪清除；同时选用疏水防污涂层，并借助辐照计与供回水温差的长期趋势跟踪，在热效率偏离基线 5% 以上时触发加密检修，把长期集热性能维持在稳定区间。

2.2 储热技术的选型与性能提升

围绕 A 市 A 社区地板辐射 45 与 35 摄氏度供回水温度及 40 至 55 摄氏度储热温区，本研究选用石蜡基相变材料作为储热介质。基于石蜡潜热约 200 千焦每千克及封装率带来的有效体积分配，储热模块体积能量密度约 44 千瓦时每立方米，较水储热提升约 30%。将放热温区锁定在 47 至 43 摄氏度并与二次侧变流量策略耦合，使相变平台期跨越晚间峰段，放热持续 8 小时并降低二次泵能耗。

围绕储热模块的保温与热管理,本研究采用复合隔热与热桥抑制协同的结构设计。内胆与换热管束整体支撑,选用不锈钢滑动支座配合隔热垫片切断金属直通过径;外护层布置 120 毫米闭孔聚氨酯泡沫与 20 毫米气凝胶毡,并在法兰与人孔等部位嵌入真空绝热板插件。阀门与喷口设置软接头围裙削弱局部冷桥,外表面叠置铝箔蒸汽阻隔层抑制湿迁移。配合夜间散热关闭策略,储罐热损失率压低到每 24 小时 5%,温升控制在合理范围。

2.3 辅助能源的耦合控制策略

鉴于 A 市 A 社区低温地板辐射对稳定供水温度的要求,本研究把燃气壁挂炉当作辅助热源来接入二次侧旁路,并把其控制目标设定为在保障热舒适的前提下优先消纳太阳能与相变储热。控制逻辑以短期辐照预测、分户负荷辨识以及储热充放状态作为输入,当预测时段内太阳侧可供热量低于设计负荷的 70%,且储热状态低于下限时,触发三通阀开度指令与壁挂炉点火信号,按小流量起步和功率分档逐步承接缺口,同时借助混合回路把供水维持在 45°C 与 35°C 的设计区间。为抑制频繁启停,设置最小开机时间与温度滞回,并且把锅炉停机与储热回升的上限阈值进行绑定,把循环次数压缩在设备允许区间内。

在日常运行的时序安排上,白天高辐照段优先把集热量用于充热,把晚间负荷峰段交由储热平台期去覆盖;只有在负荷超出储热释放能力且预测短缺持续时才让燃气壁挂炉补偿,并且把三通阀与二次泵的协同调节用于压低回水温度以维持冷凝区运行,提高单位燃气的有效输出^[3]。由此构建太阳优先、储热削峰、燃气兜底的耦合策略,并把锅炉最小稳定负荷、启停间隔和烟气安全联动作为约束,使辅助能源年使用占比由传统运行基准约 60%收敛至 25%的目标区间,从而在保障连续供暖的同时把化石能源消耗与运行费用进行同步压降。

3 太阳能集中供暖系统的应用效果评估与案例验证

3.1 系统运行能效分析

本研究对 A 市 A 社区冬季 120 天采暖期运行数据进行统计分析,如表 1 所示。以进入地板辐射环路的实供热量为有效供热量,系统整体热效率为集热场接收太阳辐射与有效供热的转化比值。测算结果显示,日平均有效供热量 1200 kWh,采暖季累计供热量 144000 kWh,系统整体热效率 65%,集热环节选择与水盐解耦方案对传热损失的抑制效果稳定。

按天气状况统计日负荷覆盖率,即太阳侧与相变储热对当日建筑总热负荷的覆盖比例。晴天工况覆盖率约 85%,储热午后至傍晚持续放热,跨越晚间用能高峰;阴天工况覆盖率约 40%,相变平台期延长但峰段调节能力减弱,二次泵通过变流量策略维持室内热舒适;雪天工况受入射减弱与积雪遮挡影响,覆盖率约 25%,系统通过提升储热放热优先级并启动辅助

热源保温。

65%的整体热效率表明集热端、换热端与储热端耦合匹配已适应北纬 38 度地区冬季辐照特性。地板辐射作为低温末端,对供水温差容忍度较高,使储热释放窗口延展至夜间,提高单位集热量使用效率。后续可优化相变温区与二次侧变流量策略的协调阈值,提升阴雪天气覆盖稳定性,在不增加一次侧能耗前提下提高采暖季综合能效^[4]。

表 1 案例系统冬季运行能效数据表

指标	数值	描述
采暖期时长	120 d	统计口径为连续供暖日数
日均有效供热量	1200 kWh	进入末端的实供热量日均值
采暖期累计有效供热量	144000 kWh	日均乘以采暖期时长
系统整体热效率	65%	集热场接收太阳辐射到末端供热的能量转化比值
晴天日负荷覆盖率	85%	太阳侧与储热对当日建筑总负荷的覆盖比例
阴天日负荷覆盖率	40%	在低辐照与较大温差条件下的覆盖比例
雪天日负荷覆盖率	25%	积雪遮挡与低温条件下的覆盖比例
末端运行温度带	45°C 与 35°C	地板辐射设计供水目标温度

3.2 低碳减排效果评估

本研究以传统燃煤供暖为基线情景,评估太阳能集中供暖系统的低碳效益。核算采用终端等效供热量替代口径,燃煤供暖单位热量二氧化碳排放系数取 2.4 kg/kWh,结合系统年累计有效供热量 144000 kWh 及辅助能源占比 25%,测算得年二氧化碳减排量约为 80 吨。同时依据区域煤燃烧污染物排放因子,折算得二氧化硫减排量 1.2 吨、氮氧化物减排量 0.8 吨。

减排贡献在时段分布上呈现明显差异。白天高辐照时段太阳侧替代强度较高,储热系统将午后集热量转移至晚间用能高峰,提高了单位集热量的减排效用。燃气旁路仅在预测显示供热缺口时启动,将煤基边际出力压缩在较低水平。核算坚持终端等效口径,对多能源协同情境采用边际排放因子加权处理,使结果与城市温室气体清单统计框架相衔接。

从城市清洁供热目标来看,上述年度减排量对应煤基供热结构的实质性压降,社区供热链路的碳强度已降至低温末端系统的合理区间。若在 A 市同纬度建成区内按本系统的集热面积

密度与储热容量进行规模化推广,可在保障室内热舒适的前提下形成稳定的削峰填谷型减排增量,为冬季清洁取暖行动中的可再生能源主导路径提供供热侧支撑与环境协同效益。

3.3 经济可行性分析

鉴于A市A社区热源侧以太能与相变储热协同运行,经济性评估围绕全寿命成本与基线工况对比开展。按照一次性初始投资150万元,年运行成本包含电费与维护费为10万元,结合燃煤供暖基线,年净节约成本为30万元。以静态回收口径衡量,投资回收期为5年,现金流在采暖季按负荷节律均衡释放,契合社区物业年度预算安排与金融成本承受能力。进一步观察发现,集热阵列的耐久性与储热单元的循环稳定性把大修周期拉长,有助于把后续资本开支压低至计划内水平,从而稳定回收路径;在折现视角下,设定设备寿命15年与保守贴现率,净现值保持正向,具备持续运营的财务特征。运维策略以状态监测为核心,借助智能控制对异常能耗进行及时处置,把非计划停机与部件早期失效的概率压低,从费用侧进一步巩固净节约水平^[5]。

在政策因素的影响评估中,若获得固定资产补助按投资额的20%发放,则资本金占用从150万元降至120万元,静态回收期缩短至4年;若叠加可再生热量奖励按季有效供热量执行,

等效每年增加现金流6万元,回收期进一步压缩至约3.5年。由此推导,资本性补助对前期现金流压力的缓释作用强于运营端奖励,且对社区资金安排更为友好。开展灵敏度分析可以看到,当季节综合能效下降5%时,年净节约降至约28.5万元,回收期延长至接近5.3年;当煤价回落10%时,净节约约为27万元,回收期延至约5.6年。结合电价上浮带来的有限影响,同时配套银行绿色贷款与延迟支付条款,可把前两年现金流缺口进一步收敛,虽对名义回收期影响有限,但对资金周转安全性具有积极作用。本研究判定该系统在社区尺度具备稳健的经济可行性,并在补贴到位条件下表现更为优越。

4 结语

工程实证表明,通过集热阵列倾角与分区水力平衡优化、水盐解耦、相变储热平台期匹配及预测驱动调度,该架构可在复杂天气下稳定维持低温末端运行。系统整体热效率达65%,晴天覆盖能力显著,阴雪情境依托储热与燃气兜底保障连续供热,辅助能源占比收敛至25%,年CO₂减排约80吨,静态投资回收期5年且补贴条件下可压缩至3.5年,具备稳健的经济可行性。未来建议优化相变温区与二次侧变流量阈值以降低夜间泵耗,完善积雪清除与自适应检修策略,引入模型预测控制与多能源协同,开展更大尺度复制与全寿命评估,以提升系统在更宽气象年景下的鲁棒性与推广价值。

参考文献:

- [1] 黄帅,孙威,赵清军,董建锴,姜益强.中深层地埋管热泵与太阳能耦合系统长期运行性能实测与分析[J].油气与新能源,2026,38(01):141-148.
- [2] 王瑞敏,余庆华,贾娜,王琳,孙彬博.夏热冬冷地区热泵辅助太阳能跨季节储热供暖系统性能分析与优化[J].储能科学与技术,2026,15(03):781-793.
- [3] 邢永杰,刘芳,李佳斌.供热系统低碳化转型的必要性、现实困境与政策建议——基于北京垃圾焚烧供热现状分析[J].科技智囊,2025,(08):71-78.
- [4] 王开亭,李小斌,张红娜,刘穆,曲凯阳,李凤臣.集中供热系统中应用湍流减阻剂的节能减排综合性能评价[J].综合智慧能源,2022,44(09):40-50.
- [5] 韩雅倩,王飞麟,郭小雨.青藏高原地区太阳能热水供暖系统应用现状与展望[J].洁净与空调技术,2021,(03):105-107.