

Solar energy + air energy hybrid energy - energy-saving optimization of coal-fired boilers

Decai Zhang

Lanzhou Yuanda Zhicheng Technology Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730030, China

Abstract

In response to the issues of high energy consumption, severe pollution, and high operating costs associated with traditional coal-fired boiler heating in coal mines in Gansu Province, this paper takes Jingmei Energy Dahuishu Branch as the research object and proposes an energy-saving renovation scheme using a “solar + air source heat pump” hybrid energy system to replace the original coal-fired boiler. Through theoretical analysis, system design, equipment selection, implementation process, and operational data verification, this scheme achieves efficient and clean supply of heat for coal mine bathing. After renovation, the system saves approximately 1,682 tons of standard coal annually, reduces CO₂ emissions by approximately 4,313 tons, has an investment recovery period of about 2.55 years, and achieves a comprehensive energy-saving rate of 88.78%. The research results show that the “solar + air source heat pump” hybrid energy system has significant economic, environmental, and social benefits in coal mine bathing heating in arid and semi-arid regions of Northwest China, providing a replicable technical path and management experience for similar projects.

Keywords

solar energy; air energy; composite energy; coal mine bathing; energy-saving renovation; low-carbon transition

太阳能 + 空气能复合能源——燃煤锅炉节能优化

张德财

兰州远大至成科技有限公司, 中国·甘肃 兰州 730030

摘要

针对甘肃地区煤矿传统燃煤锅炉供热存在的能耗高、污染重、运行成本大等问题, 本文以靖煤能源大水头分公司为研究对象, 提出“太阳能+空气能”复合能源系统替代原燃煤锅炉的节能改造方案。通过理论分析、系统设计、设备选型、实施过程及运行数据验证, 该方案实现了煤矿洗浴用热的高效清洁供应。改造后系统年节约标煤约1682吨, 减少CO₂排放约4313吨, 投资回收期约2.55年, 综合节能率达88.78%。研究表明, “太阳能+空气能”复合能源系统在西北干旱半干旱地区煤矿洗浴供热中具有显著的经济、环境和社会效益, 为同类项目提供了可复制的技术路径和管理经验。

关键词

太阳能; 空气能; 复合能源; 煤矿洗浴; 节能改造; 低碳转型

1 引言

1.1 研究背景

中国“双碳”目标(2030年前碳达峰、2060年前碳中和)的提出, 对高耗能行业的节能减排提出了更高要求。煤炭行业作为中国能源体系的支柱, 同时也是能源消费和碳排放的重点领域, 其绿色转型迫在眉睫。据《中国能源统计年鉴2022》数据显示, 煤炭开采和洗选业能源消费占全国工业总能耗的12.3%, 其中供热系统能耗占比超过40%。传统燃煤锅炉因热效率低(平均约60%)、污染物排放量大(SO₂、NO_x、粉尘等), 已成为制约煤矿企业可持续发展的瓶颈。^[1]

【作者简介】张德财(1990-), 男, 本科, 工程师, 从事建筑节能与智能控制技术研发, 新能源技术在工业领域的应用研究与工程实践研究。

甘肃地处西北干旱半干旱区, 具有丰富的太阳能资源(年日照时数2200-3000小时, 年太阳总辐射量4800-6400MJ/m²)和空气能资源(冬季低温环境下空气源热泵仍能稳定运行)。然而, 受限于技术认知和经济成本, 多数煤矿仍沿用燃煤锅炉供热, 导致能源浪费和环境污染问题突出。以靖煤能源大水头分公司为例, 原燃煤锅炉系统年耗煤量达2640吨, 年碳排放超5000吨, 不仅增加了企业运营成本, 还面临日益严格的环保监管压力。在此背景下, 探索清洁高效的替代能源系统成为煤矿企业的重要课题。“太阳能+空气能”复合能源系统凭借其能源互补性强、运行成本低、环境友好等优势, 逐渐成为研究热点。本文以靖煤能源大水头分公司为案例, 系统研究该系统的设计、实施及运行效果, 旨在为西北煤矿绿色转型提供技术参考和实践依据。^[2]

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究进展

欧美发达国家在太阳能与空气能复合供热领域起步较早。德国自2000年起推行“可再生能源供热法”，鼓励太阳能与热泵联合系统应用，截至2022年，全国已建成此类系统超50万套，平均节能率达70%以上。瑞典学者Lund等(2019)通过模拟分析发现，太阳能+空气源热泵系统在北欧寒冷地区的年综合能效比(SCOP)可达3.2-3.8，较单一空气源热泵提升25%-30%。美国能源部(DOE)2021年发布的报告显示，复合能源系统在商业建筑中的应用可使碳排放减少40%-60%，投资回收期缩短至4-6年。^[1]

1.2.2 国内研究进展

中国对太阳能与空气能复合供热的研究始于21世纪初。清华大学江亿院士团队(2015)提出“多能互补分布式能源系统”理论，强调太阳能与空气能的动态耦合机制。近年来，随着“煤改清洁能源”政策的推进，相关研究进入快速发展阶段。王伟等(2020)在《暖通空调》发表的论文指出，北方地区太阳能-空气源热泵联合系统的平均节能率为65%-75%，但存在冬季低温环境下热泵效率下降的问题。李强等(2022)通过对内蒙古某煤矿的案例研究发现，采用低温型空气源热泵(-25℃环境下COP≥2.0)可有效解决寒冷地区供热稳定性问题。尽管国内外研究已取得一定成果，但针对西北干旱半干旱地区煤矿洗浴系统的专项研究仍较少，尤其在系统集成优化、极端天气应对、长期运行维护等方面缺乏系统性总结。本文通过实际工程案例，填补了这一领域的研究空白。

1.3 研究意义与创新点

1.3.1 研究意义

(1) 环境效益：替代燃煤锅炉可减少SO₂、NO_x、粉尘等污染物排放，助力甘肃“蓝天保卫战”目标的实现；(2) 经济效益：降低煤矿企业能源采购成本和环保税支出，提升盈利能力；(3) 社会效益：推动煤炭行业绿色转型，为西北地区能源结构调整提供示范。

1.3.2 创新点

(1) 提出“太阳能优先、空气能辅助、智能调控”的复合能源系统架构，实现能源利用效率最大化；(2) 针对西北干旱半干旱地区气候特点，优化设备选型(如高集热效率集热器、低温型热泵)，解决冬季低温环境下的运行稳定性问题；(3) 通过实际运行数据验证系统性能，为同类项目提供可量化的技术参数和投资回报分析。

2 项目概况与需求分析

2.1 煤矿基本情况

靖煤能源大水头分公司位于甘肃省白银市平川区，地理坐标为东经105°12'，北纬36°45'，海拔1600米。矿井设计产能180万吨/年，服务年限50年，现有职工820人，

其中一线生产人员650人。矿区属温带大陆性气候，冬季寒冷干燥(极端最低温-25℃)，夏季炎热少雨(极端最高温38℃)，年均降水量200-300mm，年日照时数2800小时，太阳能资源丰富。原供热系统采用2台DZL4-1.25-A II型燃煤蒸汽锅炉(额定蒸发量4t/h，工作压力1.25MPa)，配套1台板式换热器(换热量200kW)将蒸汽转化为55℃热水，供应职工浴室。系统于2010年投运，设计寿命15年，目前已接近退役年限。^[4]

2.2 用能需求分析

2.2.1 热负荷计算

根据《建筑给水排水设计规范》(GB 50015-2019)，煤矿洗浴热水需求计算公式为：

$$Q = \eta m \times c \times (t_2 - t_1)$$

其中：

m 为日用热水量(300吨/日)；

c 为水的比热容(4.186kJ/kg·℃)；

t₂ 为热水温度(55℃)；

t₁ 为冷水温度(当地年均冷水温度10℃)；

η 为系统热效率(原燃煤锅炉效率58%)。

计算得日用热量：

$$Q = 0.58300000 \text{kg} \times 4.186 \text{kJ/kg} \cdot \text{℃} \times (55 - 10) \text{℃} \approx 97.8 \text{GJ}$$

折合功率：

$$P = 24 \times 3600 \text{s} \times 97.8 \times 106 \text{kJ} \approx 1132 \text{kW}$$

考虑同时使用系数(0.8)和热损失(10%)，实际设计热负荷为：

$$P_{\text{设计}} = 1132 \text{kW} \times 0.8 \times 1.1 \approx 996 \text{kW}$$

2.2.2 负荷特性分析

通过对原系统运行数据的统计分析(2021年全年)，得出以下结论：(1) 时间分布：热水需求集中在早7:00-9:00(占全日用量40%)和晚18:00-20:00(占全日用量35%)，其余时段用量较小；(2) 季节变化：冬季(11月-次年3月)因气温低，热水用量增加15%(职工洗澡频率提高)，夏季(6月-8月)用量减少10%；(3) 瞬时峰值：早高峰瞬时热负荷达50kW，晚高峰达45kW，平均热负荷30kW。^[5]

2.3 原系统痛点分析

2.3.1 能耗高、效率低

原燃煤锅炉热效率仅58%，远低于国家现行标准(GB 24500-2020要求燃煤锅炉热效率不低于78%)。经实测，锅炉排烟温度高达180℃，大量显热随烟气流失。此外，煤炭运输、储存过程中的损耗占总耗煤量的5%-8%。

2.3.2 污染严重

燃煤锅炉每年排放SO₂约12吨、NO_x约8吨、粉尘约15吨，远超《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271-2014)中重点地区限值要求。2021年，企业因超标排放被环保部门处罚3次，累计罚款25万元。

2.3.3 运行成本高

燃料成本：年耗煤量 2640 吨，按 2021 年均价 850 元/吨计算，年燃料费用 224.4 万元；

人工成本：需配备 3 名专职司炉工，年工资支出 18 万元；

维护成本：锅炉本体、辅机设备及管道年维护费用约 12 万元；

环保成本：环保税按污染物排放量计征，年支出约 15 万元。合计年运行成本约 269.4 万元。

3 “太阳能 + 空气能”复合能源系统设计

3.1 技术路线选择

基于甘肃气候特点和项目需求，确定“太阳能优先、

空气能辅助、智能调控”的技术路线，具体设计原则如下：

- (1) 能源互补性：利用太阳能的间歇性和空气能的连续性，实现全年稳定供热；
- (2) 气候适应性：针对冬季低温环境，选用超低温设备（如 -20℃ 低温型空气源热泵）；
- (3) 经济合理性：通过设备优化配置，平衡初期投资与长期运行成本；
- (4) 智能化管理：采用 PLC 控制系统实现无人值守，降低运维难度。^[6]

3.2 系统组成与工作原理

系统主要由太阳能集热系统、空气源热泵机组、储热水箱、集热水箱、智能控制系统及辅助设备（水泵、阀门、管道等）组成，其工作原理如图 1 所示。

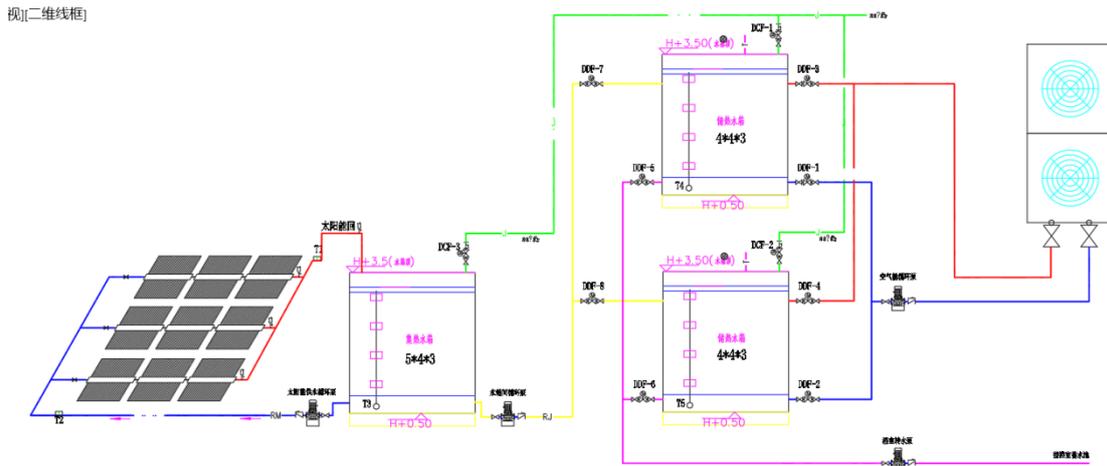


图 1 太阳能 + 空气能洗浴热水系统图

3.2.1 太阳能集热系统

集热器类型选择：对比全玻璃真空管集热器和平板集热器，前者在低温环境下集热效率更高（≥ 55% vs. 45%），且抗冻性能更好，故选用全玻璃真空管集热器；

集热面积计算：根据日均用热水量 300 吨（晴天工况）、集热器效率 55%、太阳辐射度 5kWh/m²·d，计算得集热面积：

$$A = Q_{需} / (I \times \eta) = 300000 \text{kg} \times 4.186 \text{kJ/kg} \cdot \text{d} \cdot \text{d} \times 45^\circ \text{C} / (5 \times 3.6 \text{MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{d} \times 0.55) \approx 5700 \text{m}^2$$

安装方式：集热器阵列采用南北向布置，倾角 45°（与当地纬度一致），间距 1.5m，避免前后排遮挡。

3.2.2 空气源热泵机组

机型选择：选用低温型空气源热泵（型号：RASRW 300S-PS-BP），其技术参数为：额定制热量 90kW，-20℃ 环境下 COP ≥ 2.02，输入功率 25.2kW；

数量配置：根据峰值热负荷 90kW，配置 12 台机组（10 用 2 备）并联运行（单台制热量 90kW，总制热量 900kW），满足极端天气下的供热需求。

3.2.3 储热水箱与换热系统

水箱容积计算：按“日用水量的 50%+ 调节水量”设计，即 V=300 吨 × 50% 吨=150 吨，实际选用 3 台 60 吨不锈钢保温水箱（总容积 180 吨）；

保温设计：水箱外壳采用 304 不锈钢，内胆厚度 3mm，中间填充聚氨酯泡沫保温层（厚度 100mm，导热系数 ≤ 0.024W/m·K），热损 ≤ 5%/d。^[7]

3.2.4 智能控制系统

核心组件：西门子 S7-200 SMART PLC 控制器、温度传感器（PT100，精度 ± 0.5℃）、压力传感器（量程 0-1.0MPa）；

控制逻辑：

当水箱水温 < 45℃ 且光照强度 > 500W/m² 时，启动太阳能集热器；

当水箱水温 < 40℃ 或光照强度 < 300W/m² 时，启动空气源热泵；

当环境温度 < 5℃ 时，热泵机组开启电辅热功能（功率 10kW），防止蒸发器结霜。

3.3 关键技术参数

设备名称	型号/规格	主要技术参数
全玻璃真空管集热器	Φ58×1800mm	集热面积 2m ² /组, 集热效率 ≥ 55%, 工作温度 -30℃~200℃
低温型空气源热泵	RASRW300S-PS-BP	额定制热量 50kW, -25℃环境下 COP ≥ 2.0, 输入功率 22kW, 噪音 ≤ 55dB
不锈钢保温水箱	60m ³ /台	材质 304 不锈钢, 保温层厚度 100mm, 热损 ≤ 5%/d
PLC 控制器	S7-200 SMART	数字量输入 16 点, 输出 12 点, 模拟量输入 4 路, 通信接口 RS485

4 项目实施与运行效果

4.1 改造实施过程

项目于 2022 年 3 月启动, 分为四个阶段实施:

4.1.1 前期准备阶段 (2022 年 3 月 -4 月)

现场勘查: 测量矿区安装位置、周边遮挡物高度及距离;

方案设计: 委托兰州远大至成科技有限公司完成系统设计图纸 (包括设备布局图、管道走向图、电气原理图);

审批备案: 取得靖煤集团立项批复、环保部门环评备案 (备案号: 甘环备 [2022] 012 号)。

4.1.2 设备采购与加工阶段 (2022 年 5 月 -6 月)

设备招标: 通过公开招标采购太阳能集热器 (天普新能源科技有限公司)、空气源热泵 (广东芬尼克兹节能设备有限公司)、水箱 (山东华昇容器有限公司);

加工定制: 根据现场尺寸定制集热器支架 (镀锌钢材质, 厚度 5mm)、管道保温层 (橡塑海绵, 厚度 50mm)。

4.1.3 安装施工阶段 (2022 年 7 月 -8 月)

土建施工: 地面夯实找平, 开挖管道沟槽 (深度 1.2m, 宽度 0.8m);

设备安装: 依次安装集热器阵列 (500m²)、热泵机组 (12 台)、水箱 (3 台)、水泵及控制系统;

管道连接: 采用无缝钢管 (DN50-DN100) 连接各设备, 焊接后进行水压试验 (试验压力 1.5 倍工作压力)。

4.1.4 调试与验收阶段 (2022 年 9 月)

单机调试: 分别测试集热器集热效率 (晴天工况下达 58%)、热泵制热量 (-20℃环境下 COP=2.1)、水箱保温性能 (24 小时温降 ≤ 3℃);

系统联调: 模拟早高峰、晚高峰及夜间工况, 验证能源切换逻辑 (切换响应时间 ≤ 30s);

竣工验收: 通过靖煤集团组织的专家验收, 各项指标均达到设计要求。

4.2 运行效果分析

4.2.1 节能效益

改造后系统年运行时间为 360 天 (与煤矿生产周期同步), 通过分项计量统计, 各能源介质消耗量如下:

能源类型	年消耗量	折标煤系数	折标煤量 (吨)
电力	188 万 kWh	0.1229kgce/kWh	231
煤炭	0	0.7143kgce/kg	0

原燃煤锅炉年耗标煤量 1890 吨, 改造后年耗标煤量 231 吨, 节能率达 88.78%, 年节约标煤 1659 吨。

4.2.2 经济效益

初始投资: 太阳能集热系统 160 万元, 热泵机组 185 万元, 水箱、水泵及控制系统 25 万元, 安装工程费 35 万元, 合计 415 万元;

年运行成本: 电费 (0.515 元/kWh × 188 万 kWh = 96.82 万元) + 维护费 (10 万元) = 106.82 万元;

年收益: 原系统运行成本 269.4 万元 - 现系统运行成本 106.82 万元 = 162.58 万元;

投资回收期: 静态回收期 = 415 万元 ÷ 162.58 万元/年 ≈ 2.55 年

4.2.3 环境效益

碳减排: 年减少 CO₂ 排放 = (原标煤耗量 - 现标煤耗量) × 碳排放系数 = (1890 - 231) 吨 × 2.6tCO₂/tce = 4313 吨;

污染物减排: 年减少 SO₂ 排放 = 1890 吨 × 0.0165 = 31.2 吨 (原排放系数 0.0165tSO₂/tce), NO_x 排放 = 1890 吨 × 0.0074 = 14.0 吨 (原排放系数 0.0074tNO_x/tce), 粉尘排放 = 1890 吨 × 0.0096 = 18.1 吨 (原排放系数 0.0096tce)。

4.3 长期运行稳定性分析

项目投运以来 (2022 年 10 月 -2025 年 9 月), 系统运行稳定, 未出现重大故障。关键性能指标如下:

太阳能保证率: 晴好天气下, 太阳能贡献率达 70%-80%; 阴雨天贡献率降至 10%-20%, 热泵自动补热;

热泵 COP 值: 冬季 (-10℃ ~ -20℃) 平均 COP = 2.1, 夏季 (15℃ ~ 25℃) 平均 COP = 3.5;

水箱水温波动: 24 小时内水温波动范围控制在 ±2℃ 以内, 满足洗浴用水要求。

5 讨论与建议

5.1 技术优势总结

(1) 能源互补性强: 太阳能与空气能的季节、昼夜特性形成天然互补, 解决了单一能源系统稳定性差的问题;

(2) 适应西北气候: 低温型热泵与高集热效率集热器组合, 克服了冬季低温对系统效率的影响;

(3) 智能化程度高: PLC 控制系统实现无人值守, 降低运维成本 (原系统需 3 名司炉工, 现仅需 1 名兼职管理员);

5.2 存在问题与改进方向

5.2.1 极端天气应对能力不足

2023 年 1 月, 白银市遭遇连续 7 天暴雪天气, 光照强度 < 200W/m², 热泵机组满负荷运行满足供热需求。建议: 增加电辅热容量 (如配置 200kW 电加热管); 与矿区备用柴油发电机联动, 作为应急热源。

5.2.2 集热器效率受沙尘影响

当地春季风沙较大，集热管表面积灰导致集热效率下降约 8%。建议：

每月定期清洗集热管（采用高压水枪冲洗）；

5.2.3 政策支持力度有待加强

目前甘肃省对新能源项目的补贴主要集中在光伏发电领域，对太阳能热利用和空气能项目的支持力度不足。

建议：

出台专项补贴政策（如按节能量给予 0.1 元 /kWh 奖励）；

将复合能源系统纳入“绿色矿山”建设评价指标体系。

5.3 推广前景展望

“太阳能 + 空气能”复合能源系统在靖煤大水头分公司的成功应用，为西北煤矿绿色转型提供了可复制的模板。据测算，若甘肃省内 50% 的煤矿（约 200 家）采用该系统，年可节约标煤约 36 万吨，减少 CO₂ 排放约 93 万吨，经济和环境效益显著。未来研究方向包括：

多能互补系统优化（如“光伏 + 光热 + 空气能 + 储能”）；

人工智能算法在能源调度中的应用；

系统全生命周期成本分析与风险评估。

6 结论

本文以靖煤能源大水头分公司为案例，系统研究了“太阳能 + 空气能”复合能源系统在煤矿洗浴供热中的应用。

通过理论分析、系统设计、设备选型、实施及运行数据验证，得出以下结论：

该系统年节能率达 88.78%，年节约标煤 1659 吨，减少 CO₂ 排放 4313 吨，投资回收期约 2.55 年，具有显著的经济和环境效益；

针对西北干旱半干旱地区气候特点，采用“太阳能优先、空气能辅助、智能调控”的技术路线，可实现全年稳定供热；

系统运行过程中需重点关注极端天气应对和设备维护，通过增加电辅热、定期清洗集热器等措施提升可靠性。

本研究成果为西北煤矿绿色转型提供了技术参考和实践依据，对推动煤炭行业“双碳”目标实现具有重要意义。

参考文献

- [1] 国家能源局. 煤炭工业“十四五”节能减排综合工作方案[Z]. 2021.
- [2] 王伟, 李强. 太阳能-空气源热泵联合供热系统在北方地区的应用[J]. 暖通空调, 2020, 50(6): 89-94.
- [3] 甘肃省发展和改革委员会. 甘肃省“十四五”能源发展规划[R]. 2021.
- [4] GB/T 2589-2020, 综合能耗计算通则[S].
- [5] Lund H, et al. A review of solar and air-source heat pump systems for district heating[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 1-12.
- [6] 江亿. 中国建筑节能发展路径研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(1): 1-8. [7] 李强, 等. 低温空气源热泵在煤矿供热中的应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 210-215.
- [7] 美国能源部. 2021年分布式能源系统研究报告[R]. 2021.