

中深层地热清洁供暖技术应用

——以东营经济开发区地热清洁供暖项目为例

朱鹏 于义杰 程学坤 刘文 赵中超

山东省绿色资本投资集团有限公司 山东 济南 250100

【摘要】：东营市拥有丰富的中深层地热资源，通过钻凿中深层地热井并设计高效、智能的供热系统，可为区域实现地热清洁供暖。针对东营市的地质特征，本文对项目核心工艺系统展开设计研究，提出了地热钻井、供热系统、智慧管控的全流程技术方案，并将数字孪生技术创新应用于地热项目智慧管控中，形成了一套适配区域条件的地热开发技术体系。

【关键词】：中深层地热能；工艺系统设计；钻井工程；智慧管控

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.078

1 研究背景及工程概况

在“双碳”战略目标的持续驱动下，地热资源作为清洁可再生能源的重要组成部分，已成为推动区域能源结构转型的关键选项^[1,2]。东营市传统燃煤锅炉供热方式存在能耗高、污染大等弊端，已难以满足城区清洁供暖的发展需求，亟需探索一种清洁高效的新型供热方式以匹配日益增长的热负荷。而东营市得天独厚的中深层地热资源，为地热供暖模式的推广应用提供了坚实基础，使其成为替代传统供热方式的最优选择^[3]。国内外已在地热钻井、采灌系统设计等领域形成成熟技术体系，如冰岛雷克雅未克的规模化地热供暖项目、法国巴黎盆地的采灌平衡技术，均验证了地热开发的可行性。国内京津冀、雄安新区等地热项目则探索了适合华北地区的工程技术路径^[4,5]。

在此背景下，山东省绿色资本投资集团有限公司发挥国企担当，以旗下山东绿色发展基金作为载体，投资建设了东营经济技术开发区地热清洁供暖项目，实现清洁供暖面积超过400万平方米，替代标煤约5万吨/年，减碳量约12.5万吨/年，是山东省最大的单体地热供暖项目。依托该项目，本文选取其中1号能源站开展地热供暖核心工艺设计研究，设计内容紧密贴合工程实际，具备较强的实践指导价值。

2 区域地质与地热资源特征

本项目1号能源站地热井选址于某配水站北侧停车场内，基于辛镇背斜构造分析及工区周边油气探井资料研究，对1号能源站的地层及热储特征进行了详细勘察与分析：

(1) 东营组地层厚度为350~500m，岩性主要由灰白色含砾砂岩、粉砂岩、浅灰绿色泥岩及棕红色泥岩组成。该区块内东三段热储顶板埋深介于1300m~1450m之间，热储温度为

50~60℃，属于温热水型地热资源。

(2) 沙河街组沙二段主要发育（浅水）辫状河三角洲、扇三角洲及滩坝沉积，地层岩性从底部大段泥岩向上部逐渐过渡为砂岩，呈现砂泥岩互层结构，局部夹有炭质页岩，顶部主要为滨浅湖相沉积，岩石颜色以灰色、灰绿色等还原色为主。区内沙二段顶板埋深1750~1850m，热储温度65~70℃，属于热水型地热资源。

综合考量各套地层中热储层的发育程度、储能潜力及地热项目实际生产需求，确定该地块东营组为核心主力热储层系，沙河街组为次要热储层系。为科学评估矿区地热资源潜力，本项目采用热储法计算热储层储存的热量，具体计算公式如下：

$$Q = Q_r + Q_w \quad (1)$$

式中：Q——热储中储存的热量，J； Q_r ——岩石中储存的热量，J； Q_w ——水中储存的热量，J。

通过热储法精确计算，得出该区块内地热资源储量数据如下：东营组地热水储量达 $2.136 \times 10^9 \text{m}^3$ ，热储量为 $6.23 \times 10^{17} \text{J}$ ；沙河街组地热水储量为 $2.31 \times 10^9 \text{m}^3$ ，热储量为 $6.51 \times 10^{17} \text{J}$ 。丰富的地热资源储量为项目的规模化开发与长期稳定运行提供了坚实的资源保障。

3 供热需求分析

1号能源站建成投运后，将采用售热模式向周边区域输出热能。经实地调研与负荷测算，该能源站实际供热面积约为60.4万平方米，对应用户热负荷需求为30.2MW。为保障整个供热系统的稳定、可靠运行，厂区外配套供热管网由当地热力部门负责建设，实现能源站与用户端的高效衔接。

结合东营地区的地质条件与供热需求特点，本项目工艺系统需满足以下核心技术要求：

(1) 地层适应性：针对本地区松软地层的地质特征，需采用防塌钻井工艺及配套技术，保障钻井工程质量与井壁稳定性；

(2) 采灌平衡保障：通过优化井群布局、回灌工艺及运行参数，确保地下水开采量与回灌量相平衡，避免区域地下水位下降、热储层破坏等生态环境问题；

(3) 供热稳定性：系统需具备灵活的负荷调节能力，能够适应供热初末期、严寒期等不同时段的负荷变化，确保用户端供热温度稳定达标。

4 核心工艺系统工程设计

为满足用户侧供热需求，根据当地地热资源条件，结合实际地热井参数，本项目1号能源站拟配置10对地热井确定地热井的参数如下：

名称	参数
地热井出水流量 (t/h)	80
出水温度 (°C)	63
回灌温度 (°C)	20
井数 (对)	10
用户侧供回水温度 (°C)	68/40

单井供热能力计算公式如下：

$$Q_{\text{单井}} = 1.163 \times G \times \Delta t_1 + \frac{COP}{COP-1} \times 1.163 \times G \times \Delta t_2 \quad (2)$$

式中， $Q_{\text{单井}}$ ——单井供热能力，MW； G ——地热井出水流量，t/h； Δt_1 ——地热井一级利用温差，°C； Δt_2 ——地热井二级利用温差，°C。

依据上述参数及公式计算，全站供热能力可达46.52MW，能够充分满足用户侧热负荷需求。

4.1 地下钻井工程设计

钻井工程作为地热开发的基础核心环节，其设计质量直接影响后续供热系统的运行效率与稳定性。本项目结合区域地质特征（松软地层、多套热储层）及场地空间限制，采用丛式定向井设计方案。1号能源站共规划建设2个井台，配置10对地热井（含10口供水井、10口回灌井），井间距严格控制在300m以上，有效避免井间干扰；其中7对井以东营组为主力热储层，3对井以沙河街组为次要热储层。钻井轨迹经精准优化设计，确保准确抵达目标热储层；同时采用适配松软地层的防塌工艺与耐腐蚀套管材质，全面保障钻井工程质量与系统长期运行稳定性。

性。

4.2 供热换热系统设计

项目整体工艺采用“板式换热器直接换热+热泵机组梯级利用”的设计思路，最终实现“供68°C-回40°C”的热水供应标准。地热井设计运行工况为供水温度63°C、回灌温度20°C，回灌过程采用“粗效过滤+精效过滤”的双重过滤工艺，并配合加压回灌技术，确保回灌水质达标，有效保护热储层结构与功能，保障采灌平衡与地热资源的可持续利用。

供热换热系统采用“板式换热器直接换热+热泵机组梯级利用”的复合工艺，实现地热能的高效提取与梯级利用，具体流程与设计如下：

(1) 地热水开采：10口供水井开采的63°C地热水首先进入除砂器进行初步除砂处理，去除水中的砂粒杂质，避免磨损后续设备；

(2) 一级换热：经除砂后的地热水进入一级板式换热器，与供热回水进行第一次换热，地热水温度从63°C降至48°C，送往二级板式换热器。供热回水经过换热后温度从40°C升至60°C，并进入到高温热泵机组进一步提温至68°C送入到用户端；

(3) 二级换热：经一级板式换热器换热后的48°C地热水进入二级板式换热器，换热后温度降至20°C回灌至地下。

(4) 热泵机组提温：40°C的供热回水经过低温热泵机组、高温热泵机组取热后升高至68°C送往用户端。

(5) 市政衔接：当地热供暖系统运行工况异常时，切入市政供暖系统，采用市政板式换热器将供热回水提温至68°C。

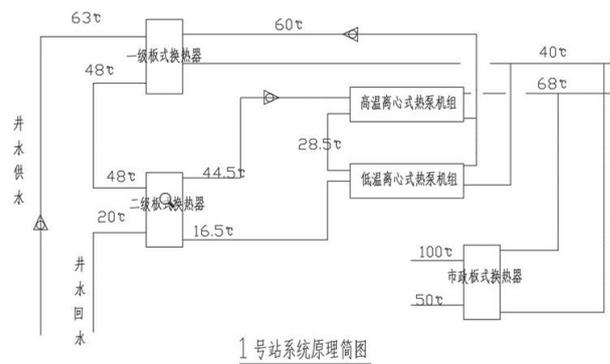


图1 供热换热系统工艺系统图

4.3 水力计算

为确保供热管网与换热系统的稳定运行，需进行详细的水力计算：

(1) 管径选择：根据各管段的设计流量与预估比摩阻，结合管材特性，确定各管段的管径规格；

(2) 流量计算：根据供热面积与热负荷需求，计算系统设计循环流量，确保各用户端流量分配均匀；

(3) 阻力损失计算: 综合考虑管段沿程阻力损失(根据管径、长度、流量及管材比摩阻计算)与局部阻力损失(阀门、弯头、换热器等局部构件的阻力损失), 计算整个供热管网的总阻力损失, 为循环泵组的选型提供依据;

(4) 水力平衡: 通过在各分支管路设置平衡阀, 调节各管段的流量分配, 确保系统水力平衡, 避免出现部分用户端温度过高或过低的问题。

4.4 系统控制与运行优化

为实现工艺系统的高效、智能运行, 本项目配置一套集中控制系统, 搭建了以数字孪生技术为核心“地热能+”多能互补智慧能源管控平台, 该控制系统核心实现四项创新性功能:

(1) 基于数字孪生技术构建地热储层三维动态模型及孔隙渗流场-地温场耦合代理模型, 完成地热开采活动的动态演化分析与预演;

(2) 通过虚幻引擎实现地热+多能互补场景的高保真三维实景复现, 支持控制策略的数字孪生模拟与运维调度方案比选;

(3) 依托统一技术底座集成可视化展示、远程监测、生

产运维、设备控制、能量管理及碳资产管理等多功能模块;

(4) 结合历史数据与气象信息构建负荷预测模型, 通过超前调节、多能互补协同及高效设备组合, 实现供热效率提升与全维度能耗、碳减排分析。

该平台通过以上功能能够通过虚实互联实现地热系统运行数据的实时监测采集与可视化展示, 并能够基于负荷预测实施多能互补调节与节能群控, 开展全维度能耗及碳减排分析, 为运营决策提供全面的数据支撑, 最终实现地热供暖系统的智慧化展示、控制、管理与节能降耗, 打造地热智慧运维样板工程。

5 结论与展望

针对东营地区清洁供暖燃煤替代需求, 本文依托于东营经济开发区地热清洁供暖项目完成了1号能源站地热核心工艺系统的一体化工程设计, 并将数字孪生技术创新性地引入到地热项目的智能管控平台中, 达成了系统运行的智能调控、风险预警与碳资产精准管理, 大幅提升了系统运行效率与运维智能化水平, 打造了地热智慧运维的示范样板。一系列绿色低碳技术的应用将助力东营经开区绿色低碳转型, 并为山东省地热能开发利用提供示范, 加快山东省地热能开发利用目标实现。

参考文献:

- [1] 韩晓琴.我国地热资源开发利用的经济性评估与政策研究[D].中国地质大学,2024.
- [2] 聂垚,李杜渊,林波荣,等.双碳背景下园区综合能源规划探索与实践——以雄安某科创城为例[J].建筑科学,2023,39(12):263-270+284.
- [3] 李皓东,朱俊宇,王辉,等.兰州市中深层水热型地热供暖工艺研究[J].甘肃地质,2024,33(03):45-51.
- [4] 王培义,张林洁,张海雄,等.雄安新区岩溶热储地热井钻井技术难点及解决方案[J].钻探工程,2025,52(03):153-159.
- [5] 邹鹏飞,徐雪球,程远志,等.长三角地区中深层地热资源勘查技术创新与应用[J].科技导报,2023,41(12):46-65.