

银川“东热西送”穿黄隧道供热工程高水位适应与智慧节能运行

文 / 董志军 国能宁夏供热有限公司

摘要：随着城市供热系统向大型化、跨区域发展，穿越复杂地质与高水位环境的长距离供热通道逐渐成为供热主干网络的重要组成部分。银川“东热西送”穿黄隧道供热工程作为国内罕见的大规模黄河穿越供热项目，面临黄河高水位影响下的结构稳定性、热能传输效率与安全运行挑战。本文以该工程为研究对象，系统分析了隧道穿黄段在高水位环境下的适应性技术，包括管道防护与防腐设计、热补偿与承压稳定措施、防渗排水系统构建及预警机制部署。
关键词：穿黄隧道；高水位适应；智能热网；节能运行；供热系统；结构防护

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.082

引言

随着城市能源结构的持续优化与清洁供热需求的不断提升，集中供热工程的空间布局呈现跨区域、跨河流发展的趋势。银川“东热西送”供热工程作为宁夏自治区重大民生与节能工程，通过穿越黄河实现东部热源向西城区大面积输送热能，标志着城市供热能力的跨越式提升。穿黄隧道作为关键输送通道，承担着热力主干管线的重要功能，其运行安全性和节能性直接关系到整个系统的稳定与高效^[1]。本文聚焦穿黄供热隧道在高水位条件下的工程适应策略与智能运行机制，通过系统性分析与数据支撑，探索保障供热安全、提升能效、实现可持续运行的技术路径^[2]。

一、工程概况与技术挑战

（一）“东热西送”穿黄隧道供热工程简述

国能“东热西送”集中供热项目（以下简称“项目”）的建设、运营。项目依托国能宁夏灵武发电有限公司332万千瓦空冷机组为热源，向银川市实施集中供热，是积极响应宁夏回族自治区“生态立区”战略，打赢“蓝天保卫战”的重要政治工程、民生工程、环保工程。项目分两期建设，供热范围覆盖银川市兴庆区、金凤区、永宁县城、望远镇、德胜工业园和贺兰县区域，截至目前，已接带供热面积约7284万平方米，为银川市百万居民提供用热服务，成为宁夏回族自治区最大的集中供热项目。其中，一期工程于2017年10月开工建设，2018年10月底建成投产，设计供热面积3770万平方米，建设管网主支干线总长约109公里，集控中心1座、中继泵站2座，穿越重要铁路、水利、交通枢纽等53处；二期工程于2019年9月开工建设，2020年10月投产，设计供热面积3179万平方米，建设管网主支干线总长约116公里，中继泵站3座，涉及重要铁路、公路、水利设施穿越施工30多处。一、二期项目的建设，开创了国内首家采用百万空冷发电机组供热、盾构穿越黄河、超

长距离热力输送、大温差热泵的供热先进技术，替代银川市燃煤小锅炉248台，扭转银川市长期以来分散式燃煤小锅炉供热方式，为改善银川市冬季空气质量做出了突出贡献。

（二）高水位运行的技术难点与风险因素

穿黄隧道在高水位条件下运行，面临多项关键技术难题。首先是结构渗漏风险加剧，隧道外水压升高容易造成环缝接口处渗水，影响结构安全及电缆设备运行；其次是热能损耗增大，高水位条件下隧道内湿度上升，热水管道热损与保温系统老化速度加快，降低输热效率；再次是检修与监测难度提升，常规设备维护难以应对水淹、潮湿与高压环境，易形成运行盲区；此外，管道承压稳定性也是风险点之一，水位变化带来的浮力、地层侧压力波动可能引发结构错位或支撑变形。在这些因素共同作用下，如无有效的智慧感知与运行优化机制，将严重制约供热系统的安全与节能表现。

二、高水位环境下的适应性技术分析

（一）管道热补偿与承压稳定性设计

穿黄供热管道在高温高压工况下运行，热胀冷缩效应显著，加之隧道空间封闭、水位高、结构刚度大，对热补偿系统提出更高要求。为减缓管道因温差引发的变形与应力集中，工程采用波纹补偿器与套筒补偿器组合应用，并在隧道出入口及转弯段设置滑动支座，形成柔性支撑体系。各支撑点间距经有限元计算优化，确保热膨胀行程控制在可调节范围内，有效降低结构疲劳破坏风险。在承压方面，输热主管道采用Q345B高强度钢材，设计耐压等级不低于2.5MPa，同时在关键节点加设加劲环与导向限位装置，防止因突发应力变化导致的扰动和管道错位。此外，通过温度传感器与位移监测设备实时采集数据，实现对热补偿效果和管道应力状态的动态管理，为实现隧道段稳定输热提供可靠保障。

（二）防渗排水系统与监测预警机制建设

为应对黄河高水位带来的渗水压力与湿度挑战，穿黄隧道配套建设了完整的防渗排水与预警系统。隧道结构外设复合防水层，增强抗渗性能。内部设置纵向与环向排水沟，连接至集水坑，通过水位控制泵站实现自动排涝作业，确保隧道干燥环境。监测系统方面，隧道关键段布设渗压计、湿度传感器与视频监控装置，形成“实时监测-数据传输-智能分析-预警提示”闭环运行机制。系统对渗水量、水压变化和管道热位移进行趋势识别，若发现异常及时触发预警信号，并联动调度平台安排应急响应。

三、智慧节能运行系统构建

（一）智能热网调控系统架构设计

为提升穿黄供热系统在高水位环境下的运行安全性与能效水平，工程构建了基于“感知—分析—决策—执行”闭环模式的智能热网调控系统。该系统架构分为感知层、数据层、决策层与执行层四个部分。感知层依托管道布设的温度、压力、流量、水位、位移等各类传感器，实时采集运行数据；数据层通过无线传输、边缘计算与云平台同步运行，实现对海量数据的清洗、分类与存储；决策层引入模型驱动与数据驱动结合的算法体系，对系统负荷预测、管网运行状态评估与调节方案进行快速响应；执行层则包括智能调节阀门、变频泵组、智能补水装置等，可根据指令完成动态调整。整个系统以智慧供热调度平台为核心，实现对穿黄段及两岸热网的统一管理与可视化运维，大幅度降低人为干预成本，提高调控效率与能源利用水平。

（二）多源数据融合与运行状态感知

在穿黄供热工程中，准确感知运行状态是保障稳定与节能的前提。为实现多维度、全时段监测，系统部署了涵盖热力参数、地质水文、环境气候、设备状态等多个维度的传感器网络，形成多源异构数据采集体系。通过引入数据融合算法，系统可对不同来源、不同频率的传感信息进行同步分析，剔除噪声并补充缺失信息，从而构建出热网运行的动态数字孪生模型。在此基础上，平台可实时呈现关键节点流速、供回水温差、热损率、管道应力变化等状态指标，为运维人员提供直观决策支持。

（三）优化调度与能耗智能分析模型

优化调度与能耗分析是智慧热网系统运行的核心功能之一。针对穿黄供热系统热负荷波动大、响应速度要求高的特点，调度系统引入了基于大数据与机器学习的预测模型，能够根据历史运行数据、气象变化与用户负荷变化趋势预测未来 24 小时热负荷需求。在此基础上，

通过构建“热负荷—水力工况—能耗”多目标优化模型，系统自动生成最优调度方案，包括泵组启停顺序、阀门调节策略与回水温度控制等内容。能耗分析模块则实时评估单位热量供给的能源投入与损耗路径，识别异常能耗节点并提供节能调整建议。系统还支持按区域、时间、设备维度进行多层级能耗对比分析，便于管理者评估节能成效与运行经济性，为持续优化调度策略和节能运营管理提供精准决策支持。

四、工程实践与运行效果分析

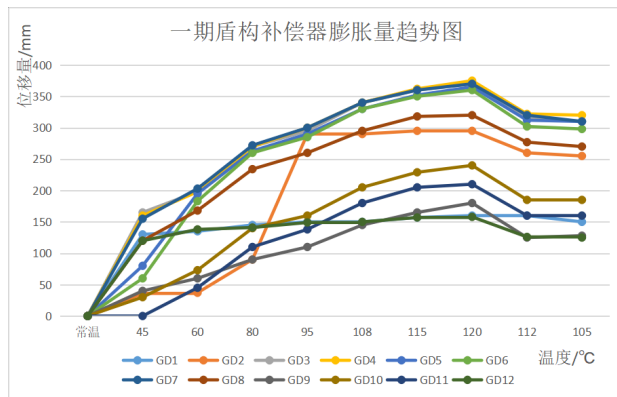
（一）系统运行监测数据分析

自工程投运以来，智能监测系统持续采集并记录运行参数，涵盖供回水温度、流量、压力、泵组功率、能耗曲线等数据。

隧道补偿器。一期一级网隧道 12 个套筒补偿器随着供水温度升高补偿量随之增大，随着供水温度降低补偿量随之减少，整个膨胀量变化周期范围内成中间膨胀量大、两头膨胀量小的膨胀变化趋势，总膨胀量为 3403mm。当供水温度由 60℃ 升至 80℃ 期间，各补偿器膨胀量增大趋势明显。部分补偿器膨胀量变化较大，情况如下：

1. GD2：从常温到 45℃ 位移仅增加到 36mm，变化缓慢。但在 80℃ -95℃ 区间，位移从 35mm 急剧增加到 290mm，说明该补偿器在特定温度范围内对温度变化的响应强烈，可能与补偿器位置或盾构整体管道补偿量变化有关，该温度期间应重点加强此补偿器数据监测。

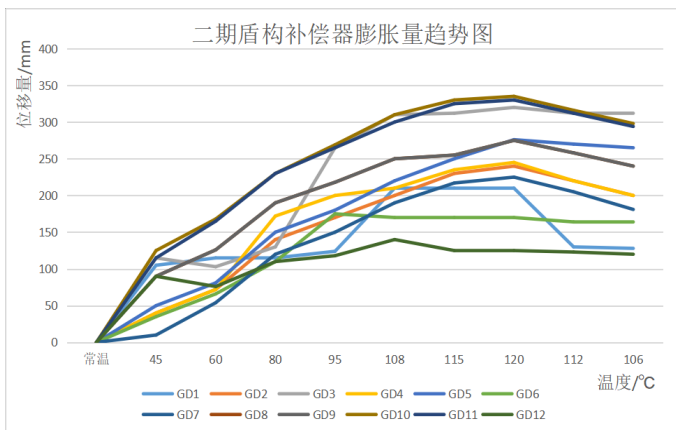
2. GD3-GD7：补偿量呈现出持续且较快的增长态势，且膨胀量为最大（GD4 375mm），表明其对温度升高的适应性是通过较大幅度的位移来实现的，增长趋势明显且变化较为均匀，能够有效应对温度变化带来的膨胀。升降温度期间应重点加强这 5 组补偿器数据监测。



二期一级网隧道 12 个套筒补偿器随着供水温度升高补偿量随之增大，随着供水温度降低补偿量随之减少，整个膨胀量变化周期范围内成中间膨胀量大、两头膨胀量小的膨胀变化趋势，总膨胀量为 2905mm。当供水温度由 60℃ 升至 80℃ 期间，各补偿器膨胀量增大趋势明显。部分补偿器膨胀量变化较大，情况如下：

1. GD4-GD11：补偿量呈现出持续且较快的增长态势，且膨胀量为最大（GD10 335mm），表明其对温度升高的适应性是通过较大幅度的位移来实现的，增长趋势明显且变化较为均匀，能够有效应对温度变化带来的膨胀。升降温度期间应重点加强这 8 组补偿器数据监测。

2. GD3：80℃时位移 130mm，95℃时达 265mm，说明该补偿器对此温度变化的响应强烈，可能与补偿器位置或盾构整体管道补偿量变化有关，该温度期间应重点加强此补偿器数据监测。



（二）高水位适应性运行效果评价

穿黄供热隧道在黄河高水位期间的适应性运行表现出色，验证了设计和技术路径的可行性。隧道结构在持续水压作用下无渗水现象，管片环缝闭合紧密，注浆防渗系统有效封堵潜在渗流通道。热力管道在浮力、压力波动下运行稳定，位移传感器数据显示管道最大变形量小于设计允许值的 60%。补偿器运行灵活，温控阀动作响应稳定，无发生“卡滞”或“热胀卡管”等异常事件。湿度与气体传感器数据表明隧道内部湿度始终维持在 60% 以下，环境保持干燥，有利于设备长期运行。自动排水系统实现精准启停，避免了低洼段积水现象。综合评估表明，该系统已形成良好的高水位运行适应能力，并具备一定的灾害冗余设计，有效提升了穿黄隧道的全年供热保障能力。

（三）节能效益与环境效益评估

本采暖季系统制定热网启动及停运方案，并充分总结以往采暖季在注水周期、注水质量、升温节点对后续水质管控、供热需要的不利影响，根据现场施工周期和升温时间统筹各管段注水，一级网严格落实首站注水要求，确保了本采暖季一、二级网氯离子含量 100% 合格，本采暖季未开展水质置换较上一采暖季节约置换水量 10 万 t/h 以上。10 月 14 日开栓启动升温，降低了管网升温速率、并进行充分暖管排气，有效降低了管网膨胀速率和管道内空气量，为管网安全运行打下较好基础，同

时在 10 月下旬大降温天气条件下，公司管网运行温度已达 68℃，为公司赢得较好社会声誉。

本采暖季基于管网运行安全和满足热负荷需求的两方面考虑，在运行管理上，制定 2024-2025 采暖季备用热源调度和热源接入方案，已确定严寒期供热可靠性，提高热源厂乏汽利用率，同时为防管道保温高温碳化失效，依据上采暖季大流量试验经验，将本采暖季一级网运行流量运行至系统投运以来最大值 14900m³/h，一级网供水运行最高温度较上一采暖季下降 4℃，二网则维持相对高高温运行，以确保热负荷的及时响应；为防止管道反复膨胀、收缩造成低周疲劳损伤以及钢管与保温脱离，根据天气预报情况充分运行热用户蓄热特性和管网热惰性，开展短时供需解耦调整，有效避免了方式升降供水温度，为管网安全奠定了坚实基础。

本采暖季初寒期平均气温为 2.97℃，末寒期平均气温为 3.90℃；极寒期平均气温为 -5.06℃，期间经历两次极端大幅降温寒潮天气，01 月 23 日-01 月 27 日，降温幅度 13℃，最低日平均气温 -13.0℃，02 月 03 日-02 月 07 日，降温幅度 7℃，最低日平均气温 -12.0℃，通过超前考虑，提前 72 小时进行系统超负荷供热进行热用户蓄热，根据室温采集系统反馈数据显示，供热效果良好，供热投诉未出现明显上升。

结语

银川“东热西送”穿黄隧道供热工程作为集结构复杂性与运行智慧化于一体的现代供热系统代表，在高水位环境下运行所面临的挑战具有一定的代表性与前瞻性。通过结构防渗、防腐与承压优化设计，有效保障了系统在极端水文条件下的稳定运行；依托智慧热网平台，系统实现了动态感知、智能分析与优化控制，显著提高了能源利用效率与供热质量。从工程实践看，该项目不仅在节能减排、技术集成方面取得了可量化成果，也为今后类似穿江、穿湖等复杂地质区域的供热工程提供了可借鉴路径。

参考文献

- [1] 雷鸣. 市政工程供热管道的安装方法研究 [J]. 中国住宅设施, 2025, (04): 202-204.
- [2] 陈永强. 基于实际工程的燃煤供热锅炉脱硫除尘及脱硝技术 [J]. 清洗世界, 2025, (04): 12-14.
- [3] 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, (04): 151-152.
- [4] 丁兰. 建筑供热通风与空调工程节能技术的创新及数字化应用探讨 [J]. 中国设备工程, 2025, (08): 224-226.
- [5] 王沫. 供热通风与空调工程施工技术应用分析 [J]. 居业, 2025, (04): 91-93.