

城镇供热管线预加热处理技术研究

刘月卫

新疆三联工程建设有限责任公司 新疆 克拉玛依 834000

【摘要】：随着我国城镇化进程的加速和“双碳”战略目标的深入推进，城镇集中供热系统正朝着高效、节能、可靠及智能化的方向快速发展。传统供热管道敷设技术，尤其是依赖于补偿器和固定墩的直埋方式，在应对大口径、高参数、长距离管网时，暴露出工程成本高、安全隐患多、运维复杂、检修困难等突出问题。管线预加热处理作为一种先进的主动控制应力方法，通过施工阶段对管道的预先加热与伸长，使其在回填冷却后建立有利的预应力场，从而在运行期大幅抵消热膨胀应力，实现了管道的简化设计、安全运行与全寿命周期经济性的提升。本文系统阐述了该技术的基本力学原理，深入剖析了传统技术面临的关键挑战，并结合数值模拟、智能监测、先进材料与清洁热源等前沿技术，全面分析了预加热技术的应用效果、实施关键技术与方法。进一步，本文探讨了该技术与数字孪生、人工智能预测性维护相结合的优化方向，并对其在新型低碳智慧供热系统中的实践应用前景进行了展望，以期为我国城镇供热管网的高质量建设与升级改造提供理论参考与技术路径。

【关键词】：供热管道；预热安装；无补偿直埋；热应力控制；数字孪生；智慧供热；施工技术；全寿命周期成本

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.047

引言

城镇集中供热是现代城市不可或缺的重要基础设施，关系到国计民生与能源利用效率。随着供热规模不断扩大，管网正向大口径（DN1200及以上）、高温（130℃以上）、长距离（数十公里）方向发展，这对管道的安全可靠提出了前所未有的挑战。在直埋敷设这一主流方式中，如何经济有效地处理管道因热胀冷缩产生的巨大温度应力，一直是工程技术的核心难题。

传统的解决方案主要依赖于设置补偿器（如波纹管、套筒补偿器）和坚固的固定墩，形成“有补偿”敷设体系。然而，该体系存在固有缺陷：补偿器本身是管网泄漏的薄弱点，固定墩工程量大、成本高昂，且整个系统受力复杂，长期运行可靠性面临考验。管线预热无补偿直埋技术应运而生，它颠覆了“被动补偿”的思路，转向“主动预应变”的先进理念。该技术并非简单取消补偿器，而是通过一套精密控制的施工工艺，在管道投入运行前，预先在管体中建立起与运行热应力方向相反的预应力，从而在根本上优化管道的受力状态。

近年来，随着计算机仿真技术、物联网监测技术、先进材料及清洁能源技术的飞速发展，预热无补偿直埋技术从理论计算、施工控制到长期运维都获得了全新的工具与可能性。本研究旨在系统梳理该技术的原理、优势与实施要点，并结合前沿技术探讨其未来的优化方向与实践路径，推动该项先进技术在我国供热工程中的科学、规范与创新应用。

1 供热管线预加热技术的基本原理

预热无补偿直埋技术的理论基础是材料力学与弹性理论，其核心思想可概括为“先伸后锁，以预应之力克热胀之害”。

1.1 热应力与约束机制

当直埋钢管道受热膨胀时，其自由伸长量 ΔL 由公式

$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$ 决定（ α 为线膨胀系数， L 为管段长度， ΔT 为温升）。然而，管道被回填料所包裹，土壤与管外壁之间存在摩擦力与横向土压力，这些约束共同作用，阻止管道自由伸缩。当约束力足够大时，管道的热膨胀将完全转化为内部的轴向压应力。该压应力若超过管材的临界屈服应力或屈服极限，将导致管道失稳拱起或塑性破坏。

1.2 预热工艺的力学模型

预热技术通过人为干预，改变了上述过程的初始条件和应力路径：预热阶段：管道焊接并安装（但不完全回填，保证可自由滑动）后，利用外部热源将整段管道均匀、缓慢地加热至一个预先计算好的预热温度 T_i （通常介于安装环境温度 $T_{install}$ 与设计温度 T_{oper} 之间）。此时，管道在近似自由的条件下预先伸长。

锁定阶段：在管道达到预定伸长量并保持温度稳定的状态下，迅速进行管沟的最终回填与夯实，将土壤约束作用于已伸长的管道上，将其“锁定”在该几何状态。

冷却与预应力形成阶段：停止加热，管道自然冷却至环境温度。由于被土壤约束，管道无法完全收缩回原长。这种“想缩不能缩”的状态，使管体内部产生了轴向拉应力（预应力）。

运行阶段：管网正式通热运行，温度从环境温度升至运行温度。管道再次受热膨胀，其产生的热压应力首先需要抵消施工阶段形成的预拉应力。只有当温升超过预热温差（ $T_{oper} - T_i$ ）后，管道内部才会转为压应力，且其最大值远低于传统“冷安装”方式下的压应力峰值。

1.3 技术实现的关键参数

预热温度（ T_i ）：是技术的核心设计参数。其确定原则是使管道在运行期（包括各种工况组合，如最高温度、最低温度、压力试验温度等）所产生的拉、压应力循环，始终控制在管材

许用应力范围之内，并保证轴向合力对固定墩的推力最小。通常通过非线性有限元分析进行优化确定。

预热伸长率与均匀性：要求加热必须均匀，避免局部过热或温差过大，否则会产生附加弯曲应力。现代技术采用分布式温度传感器与可分区控制的加热系统来保证。

预热伸长量的预测值（中间温度 t_m 、设计温度 T_{oper} 、 T_i 预热时的管道温度），计算预热长度伸长量： $\Delta L = \alpha (t_m - t_i)L_{pr}$ ， ΔL ：预热长度伸长量； L_{pr} 预热段长度。

土壤约束的一致性：回填材料的质量、夯实度必须均匀且达到设计要求，这是形成稳定、可靠预应力的外部保证。

回缩长度预测值（预热温度 $t_{dp} \leq 60^\circ\text{C}$ ，回填后的管道温度 t_a ），计算回缩长度伸长量： $\Delta L = [\alpha (t_{dp} - t_a) - F_{max}L_{min} / (2EA \cdot 10)]L_{min}$ 。 F_{max} 不同覆土深度的管道单位最大摩擦力， L_{min} 不同覆土深度的管道最小摩擦长度，回填土分别按覆土 1.0m、1.2m、 $\geq 1.3\text{m}$ 计算， ΔL 预热后的管道回缩量。

2 现有供热管网系统施工技术面临的问题与挑战

尽管预热技术优势明显，但其发展与推广，正是基于对传统施工技术痛点的深刻认识。

2.1 传统有补偿敷设的固有缺陷

可靠性风险集中：波纹管补偿器作为柔性构件，长期承受交变应力，易发生疲劳破坏、腐蚀和密封失效，是管网系统主要的泄漏点。

工程经济性差：大量补偿器的采购与安装成本高昂，为其设置的钢筋混凝土固定墩体积庞大、土方工程量大，在城市密集区施工困难且造价高。检查井的数量也因补偿器而增多，增加了建设和维护成本。

系统复杂，运维负担重：补偿器需要定期进行巡检、维护和更换，运维工作量大、费用高，且检修时常需停热，影响供热服务质量。

水力与热力失调：补偿器处的局部阻力变化可能加剧管网的水力失调，固定墩对管道的刚性约束也可能改变局部的热应力分布，带来不可预见的风险。

2.2 直接无补偿（冷安装）敷设的局限性

直接采用无补偿冷安装（即管道在环境温度下回填）适用于小管径、低温度的场合。对于大管径、高温管道，其产生的巨大轴向压应力极易导致管道整体或局部屈曲失稳，对管道埋深、回填土质量要求极为苛刻，实际工程应用范围受限，安全裕度较低。

2.3 新型管网发展带来的新挑战

多热源联网与动态工况：随着可再生能源、工业余热等多热源并入同一管网，管网运行温度、流量更为动态多变，对传

统的静态设计方法提出挑战，对管道的疲劳寿命提出更高要求。

城市地下空间极度紧张：传统大型固定墩和检查井所需空间与日益复杂的地下管线（电力、通信、燃气、水务）矛盾突出。

全寿命周期成本与碳排放要求：“双碳”目标下，不仅要求建设期节约材料，更要求降低长期运行的泄漏损失、维护能耗和材料更换带来的隐含碳。

这些挑战共同指向了一个需求：需要一种更安全、更经济、更适应复杂工况和智慧化管理的管道敷设技术。预热无补偿直埋技术正是应对这些挑战的系统性解决方案。

3 预加热技术在供热管网中的应用效果分析

实践证明，预热无补偿直埋技术的应用带来了全方位的积极效果。

3.1 安全性与可靠性显著提升

消除薄弱环节：取消补偿器，从根本上消除了最大的泄漏风险源，使管网成为一个连续的、整体的钢质结构，可靠性类比为长输油气管道。

应力状态优化：通过预热建立有利的预应力，有效降低运行期的最大压应力，极大地避免了管道屈曲失稳的风险。应力循环幅度减小，大幅提高了管道的抗疲劳寿命。

灾害抵御能力强：整体性强的管网对地质沉降、轻微地震等外界干扰的适应能力更强。

3.2 经济效益全周期凸显

直接建设成本节约：节省了全部补偿器、大部分固定墩及相应检查井的费用。虽然增加了预热设备和监测系统的初始投入，但对于大中型项目，综合造价效益显著。

长期运维成本大幅降低：避免了补偿器的定期更换和维护费用，减少了巡检和抢修工作量及相关的停热损失。

社会效益显著：减少了因管道泄漏事故造成的道路开挖、交通拥堵、热力浪费和环境影响，社会综合成本低。

3.3 工程适用性与灵活性增强

适应大参数管网：特别适用于 DN800 以上、输送温度高于 100°C 的长距离主干线，其技术经济优势随着管径和温差的增大而愈加明显。

简化管网设计：直线段无需考虑补偿，管网布置更自由，有利于优化路由。

缩短施工周期：减少了补偿器安装、固定墩养护等工序，在组织得当的情况下，总体工期可以缩短。

3.4 契合智慧化与低碳化发展趋势

便于集成监测：简洁的管线结构更易于布设光纤测温、应

变监测等传感器，为构建基于物联网的管网健康监测系统提供了理想物理基础。

降低管网热损失：减少了补偿器井等地下构筑物的散热点，有利于提高整体能效。

材料节约减碳：大量节省混凝土和钢材，降低了工程建设阶段的隐含碳排放。

4 实施预加热技术的关键技术与方法

成功实施预热技术依赖于一系列关键技术精确控制与系统集成。

4.1 精确的设计与仿真技术

高级有限元分析（FEA）：必须采用能考虑土壤-管道非线性相互作用、大变形及材料非线性的有限元软件进行全尺寸建模。模拟应涵盖安装、预热、冷却、运行、压力试验、各种异常工况的全过程，以精确计算预热温度、应力分布、固定墩推力及潜在屈曲模式。

参数化与优化设计：利用仿真平台，对预热温度、回填材料参数、埋深、升温速率等关键变量进行参数化研究和多目标优化，找到安全性与经济性的最佳平衡点。

4.2 可控的预热装备与热源技术

清洁热源选择：传统采用燃油或燃气锅炉加热循环水，存在碳排放与现场污染问题。前沿方向是采用电加热锅炉（结合绿电）、高温热泵或利用邻近的工业余热、地热作为预热热源，实现施工过程的低碳化。

分布式智能加热系统：采用模块化电加热带或分区循环加热系统，配合分布式温度传感器网络，实现对管道轴向、径向温度梯度的实时监测与闭环反馈控制，确保加热均匀、精确。

太阳能辅助预热：在日照充足地区，可探索集成太阳能集热系统作为预热辅助能源，进一步降低化石能源消耗。

4.3 智能化的施工过程监控

物联网（IoT）监控平台：在预热施工期间，集成温度、应力/应变、位移传感器数据，通过无线传输至云平台，实现施工状态的实时可视化、远程监控与智能预警。任何异常的温度波动或位移偏差都能被及时发现和纠正。

数字孪生（Digital Twin）驱动的施工：基于设计阶段的管网模型，结合实时传感数据，构建施工过程的“数字孪生体”。该孪生体可以实时预测应力变化，并与设计允许值进行对比，指导现场操作人员调整加热功率或回填进度，实现动态、自适应的施工控制。

4.4 标准化的工艺与质量控制

充分的技术准备：管道预热前应完成焊口检测工作，长距离管道应分段预热，分段预热长度应根据现场施工条件确定，

一般在 600m-1000m 之间。沟槽内不得有任何可能阻碍管道自由伸长的土石方或结构。预热段内不能存在不同材质的钢管。所有三通分支在预热过程中必须敞沟，而且不能与三通分支连接。在弯头处不得进行覆土，以便弯头在受热后可以运动。钢管内积水必须排放干净。预热段两端端头出现积水时，需要将水抽干。

严格的回填工艺：制定并执行科学的回填作业指导书，对砂基材料粒径、分层夯实厚度与密度进行全程监控，确保土壤摩擦特性符合设计假设，回填持续时间应控制在 30 小时以内，回填完成后方可关闭预热机器，拆除附件。

完整的应力监测与记录：从预热开始到投入运行后一段时间，持续监测关键截面的应变和温度，形成完整的“应力健康档案”，作为工程验收和后期运维的重要依据。

5 预加热技术的优化方向与实践展望

结合新兴技术，预热无补偿直埋技术仍有广阔的提升空间。

5.1 与数字孪生和人工智能深度融合

全生命周期数字孪生（LDT）：构建从设计、施工、验收到运行维护的全生命周期数字孪生体。孪生体不仅用于施工指导，更能在运行期持续接收 SCADA 系统（数据采集与监视控制）和在线监测系统的数据，实时反映管道的力学状态，实现应力安全状态的在线评估与预警。

AI 驱动的预测性维护：利用机器学习算法，分析历史运行数据、应力监测数据和外部环境数据（如土壤湿度、温度），建立管道应力演化、潜在缺陷（如腐蚀）发展的预测模型，从“定期检修”转向“预测性维护”，在风险发生前主动干预。

5.2 新型材料与结构的应用

高性能保温材料：采用真空绝热板（VIP）或高性能气凝胶复合材料，在相同保温效果下大幅减小保温层厚度，降低回填土对管道的约束刚度，为设计提供更大灵活性。

柔性接头与局部增强：在管道转弯或分支处，研究应用有限柔性的特殊接头，以更优的方式处理局部集中应力。对高应力区可采用复合材料进行局部增强。

5.3 面向未来智慧供热系统的集成

作为智慧热网的“强健动脉”：预热无补偿管网因其高可靠性，可作为未来智慧供热系统中承担基荷或关键传输任务的骨干网络，与灵活的分布式热源和用户侧智能调节相结合，构建安全、高效、弹性的新型供热体系。

动态应力管理与调度协同：在智慧热网调度中心，除了水力、热力工况外，将管道应力状态纳入全局优化目标。在调整全网运行参数时，通过数字孪生预演，避免因调度操作（如急速升温、降压）对管道造成不利的应力冲击。

5.4 标准化、模块化与人才培养

加快标准规范修订：推动将成熟的设计方法、施工工艺、验收标准纳入国家及行业标准体系，为技术推广提供法规依据。

发展模块化预热装备：研发集装箱式、快速部署的智能预热工作站，降低设备使用门槛，提高施工效率。

培养复合型人才：需要培养既懂传统供热工程，又掌握有限元分析、物联网、智能控制等新技术的复合型工程设计与项目管理人才。

6 结语

预热无补偿直埋敷设技术是现代城镇供热管道工程技术发展的一项重要成就。它从力学原理出发，通过精密的施工工艺将热膨胀问题“前置化”解决，实现了管网安全性、经济性

与可靠性的跃升。该技术不仅有效回应了传统有补偿敷设的诸多弊端，更因其结构简洁、易于监测的特性，天然地契合了供热系统智慧化与低碳化转型的时代需求。

当前，该技术的成功应用已不再局限于理论，其在国内外多项重大供热工程中的实践已验证了其巨大价值。面向未来，随着数字孪生、人工智能、物联网监测、清洁热源等前沿技术的深度赋能，预热无补偿技术正从一项“先进工艺”向一套“智能化的管道应力全生命周期管理系统”演进。它将在设计上更加精细智能，在施工上更加可控低碳，在运维上更加主动预防。

因此，大力研究、推广并持续优化预热无补偿直埋技术，对于提升我国城镇供热基础设施的本质安全水平、降低全社会的供热能耗与碳排放、构建适应未来能源格局的韧性智慧热网，具有重大的战略意义和广阔的实践前景。

参考文献：

- [1] 赵宁.城市化背景下太原市供热管线河底直埋施工设计方案[J].建筑,2025,(09):122-125.
- [2] 韩力.城镇供热管网中长输管线的节能设计探究[J].建材发展导向,2025,23(06):19-21.