

Exploration of pipeline compensator in municipal operation and maintenance mode—Take the application of maintenance-free sleeve compensator in thermal pipe network as an example

Yifei Han

Palace Museum, Beijing, 100009, China

Abstract

As the vascular network of urban operations, the safety and stability of municipal pipelines are directly linked to the efficiency of urban operations and the well-being of city residents. With the ongoing urbanization and the technological demands of smart cities, pipelines are evolving towards higher pressure, higher temperatures, and longer distances. The displacement compensation caused by thermal expansion and contraction during pipeline operation is a critical and challenging issue in pipeline construction and maintenance. The design and use of compensators are among the core technologies in this field. Traditional sleeve compensators suffer from high friction coefficients, easy aging and leakage, and frequent long-term maintenance. Maintenance-free sleeve compensators, with their advanced sealing technology and diverse structural designs, are gradually replacing traditional compensators and becoming a core component for ensuring pipeline safety. This article, incorporating the latest technological advancements, systematically explores the technical innovations, application advantages, and development trends of maintenance-free sleeve compensators in municipal engineering.

Keywords

sleeve compensator; thermal pipe network; compensation working intensity hidden danger treatment

管道补偿器在市政运维模式中的探索——以热力管网免维护套筒补偿器应用为例

韩一飞

故宫博物院，中国·北京 100009

摘 要

市政管网作为城市运行的“血管网络”，其安全稳定直接关系到城市运行效率和城市居民的切身利益，随着城市化进程的不断推进以及智慧城市的技术要求，管道正朝着高压、高温、长距离的方向发展，在管道运行中由热胀冷缩引起的位移补偿是管道建设及运行维护中的关键和难点，而补偿器的设计和使用是其核心技术之一。传统套筒补偿器存在摩擦系数大、易老化泄漏、长期运行维护频繁等缺陷，免维护套筒补偿器凭借其先进的密封技术和多样化的结构设计正逐渐取代传统补偿器，成为保障管道安全的核心部件。本文结合最新的技术进步，系统地探讨了市政工程中免维护套筒补偿器的技术创新、应用优势及发展趋势。

关键词

套筒补偿器；热力管网；补偿器工作强度隐患处理

1 绪论

套筒补偿器的技术发展经历了从简单密封到复合系统的重要跨越。早期的套筒补偿器主要依赖单一填料密封（如纯橡胶或石墨），存在明显局限性如橡胶密封圈易老化失去弹性，而石墨密封虽耐高温但摩擦阻力大且脆性高。这些问题导致传统补偿器在运行过程中频繁出现泄漏，迫使供热企

业不得不安排定期停气维护，既影响供热连续性又增加运维成本。针对这些缺陷，新一代免维护套筒补偿器通过多重密封技术和自动补偿机构的结合，实现了技术突破。

参考中国套筒式补偿器相关行业市场调研报告，免维护类型已占新装市场份额的 45%，市政热力管网中的运用占比最高。随着北京市集中供热事业的飞速发展，根据北京市热力公司统计，目前北京市热力管网一次线的长度已经达到 1800 余公里，在新建与维修改造管网中普遍偏向于采用免检修套筒补偿器。为什么热力管网尽可能选用免检修套筒，而不是选择波纹补偿器或者传统套筒补偿器，本文将结

【作者简介】韩一飞（1991-），男，中国河南汝南人，本科，工程师，从事工程管理研究。

合最新技术进行探讨。

2 热力管网补偿器概况

通过对北京市现有热力管网调查统计，目前补偿器多为三种形式：波纹管、套筒与免检修套筒，DN100 以上干线均存在上述三种形式补偿。通过近几年实际运行、检修发现，管网补偿器是隐患多发的部位，原因主要分为检修和质量两大类，由于产品自身质量和施工工艺造成的跑冒滴漏现象为数甚少，本文暂不涉及。检修工作的主要对象就是补偿器，由于管网改造随之而来的是后期管网运行附件的维护和检修任务，维护检修工作的一项主要内容是观察补偿器是否正常工作，以及后期的隐患处理措施，这需要保证管网的经济运行的同时，在尽量不停热或减少停热对用户的影响下对失水率还要有明确的控制。

波纹管补偿器优势在于检修时不需要停热减少供热的影响，但其对热力小室内环境要求较高，其中的氯离子会对材质产生明显腐蚀造成破损引发波纹管爆裂事故，尤其在汛期和冬季雨水、绿地用水、雪水甚至融雪剂都会不同程度的流入小室，附着在波纹管或保温上造成破坏。同时，如果管沟的建造使用时间较长，其防水效果下降，再加上周边情况复杂，如存在旧污水沟，地下水位高或邻近河道等情况，渗漏现象会更为严重，热力小室内积水如不定期抽排，将会浸泡设备附件产生大量冷凝水造成水引起严重供热隐患。

套筒补偿器的耐腐蚀性高于波纹管，但需要每年进行检修以保证正常运行。检修过程要进行管线的分段放水工作，周期约为 5-7 天。停热将对用户造成一定的损失，且一部分解裂点存在截门不严的情况，这就要求扩闸增加了停热范围与面积。同时由于热力管网对于停热时间有严格的规定，对这项工作的工期和质量提出了更高的要求。

免维护套筒补偿器的技术突破主要体现在密封技术革新、结构优化与材料升级三个维度。免检修套筒相较于与普通套筒的耐腐蚀性相当，摩擦系数、耐高温性能等均得到提升（见表一），且不需要进行每年度的检修工作，但其安装要求同心度较高，免检修套筒的补偿方式属于活塞式补偿，在管网检修期间，工况调节过程中，管道压力和温度发生变化时，可能会导致套筒少量漏水，但当工况稳定后漏水现象便消除。现阶段管网设备改造部分补偿器使用该类型，使用方式大多数在小室内，个别还可以进行直埋敷设。

表 1 免维护补偿器与传统补偿器性能对比

技术参数	传统套筒补偿器	免维护套筒补偿器	提升幅度 *
摩擦系数	0.15-0.25	0.04-0.10	降低 60%-75%
耐温范围 (℃)	-20~350	-60~800	扩展 120%
泄漏周期	1-2 年	10-15 年	延长 5 倍以上
抗拉强度 (MPa)	1.5	4.0	提高 167%
维护周期	6-12 个月	5 年以上	延长 5-10 倍

3 免检修套筒补偿器优势分析

3.1 经济性分析

相较于传统补偿器，免检修套筒补偿器在经济性、安全性、适用性上均有显著优势。在建设期间如采用直埋式免维护补偿器后，降低了维修建设，直接减少建设成本和规划难度，同时因泄漏点减少，管道压损下降，也节约年运行成本。目前随着免检修套筒补偿器在技术、材料、制造水平方面的提高，许多补偿器可以在高压环境下连续运行无故障，避免了传统补偿器平均 3 年更换的维护成本。在工作强度方面以热力检修工作为例，其主要以处理管网供热隐患和套筒检修为主，波纹管与免检修套筒不存在检修问题，根据北京市热力公司提供数据：套筒检修以第二热电厂出口处 DN1000 管道涉及检修长度干线约为 1.2 公里，支户线约 6.6 公里，停热面积约为 195 万 m²。检修时关闭两端解裂点及各支户线截门，该管段干线水量为 1920 吨，设 4 点放水安放 8 台水泵相应需要 4 台 12KW 或 8 台 7.5KW 发电机。放水前需对水泵进行安装作业，每个时间约为 20-30 分钟，每个套筒按程序进行检修 (2-3 人 / 组)，整个过程需要约 50 分钟，若套筒出现下沉等情况工作量与时间陡然增加。可见在各种条件都比较理想的情况下，同时对 4 个 DN1000 套筒作业时间至少需要 100 分钟，且工作强度极大。同时，实施套筒检修工作的工人技术水平不可忽视，用量化的统一标准来衡量存在一定的困难，检修的质量参差不齐，对结果最直接的体现是送热后的套筒运行情况。检修后如出现滴漏后只能采取拧紧螺栓的方法，若无效只能下一年检修重点处理，若严重需要再次停热检修。

3.2 安全可靠性提升

免维护套筒补偿器的安全可靠基础在于其结构设计，通过多系统协同作用解决传统补偿器的固有缺陷，如采用“O 型圈 +Y 型圈 + 填料舱”的复合结构，在芯管与外套管之间依次设置氟橡胶 O 型圈、Y 型圈和另一道 O 型圈从而形成三道防线。O 型圈作为第一道屏障，主要起防尘和初始密封作用，Y 型圈的独特优势在于其唇口结构在介质压力作用下会进一步张开增强密封效果，最内层的填料密封舱则填充高回弹性石墨作为最终屏障，即使前端的橡胶密封圈因老化失效，石墨填料舱仍能独立维持密封功能。这种层次化设计确保了密封系统在单点失效情况下仍能正常运行，大幅提升了整体可靠性；还可以利用自动补偿机构解决密封材料磨损问题，在填料压盖法兰上方安装多组弹簧，利用弹簧张力持续推压密封填料，当填料发生正常磨损时，弹簧的恒定张力能自动补偿微小间隙维持密封面紧密接触。这种设计最大优势在于允许带压维护，无需停热即可完成调整彻底改变了传统补偿器必须停热更换填料的维护模式。

与传统补偿器相比，免维护套筒在极端环境下的稳定性和保护性能更胜一筹。传统的轴向波纹补偿器存在柱状失稳的风险，特别是在长距离管道中。免维护套筒补偿器通过

机械约束结构和导向系统，有效解决了这一安全隐患。对于热力网络中可能遇到的极端情况可以实施多种保护机制的设计，例如设置限位环以防止超行程操作；在填料系统后部增加二级密封室，以便在主密封失效时临时维持系统运行等。这些设计确保了补偿器在意外情况下能够保持基本的安全运行^[1]。

3.3 特殊环境适应性表现

参考国内外部分工程实例可以发现各类型免维护套筒补偿器具有更全面的复杂环境和工况下的适应能力，采用不锈钢材质配合特种密封结构解决腐蚀泄漏难题；通过特殊设计补偿器与管道采用柔性连接，设置超程限位装置，可以成功吸收地震位移，保护管道系统免遭破坏等多种方式使得免维护套筒补偿器可以在高腐蚀性环境、地震带地区等复杂情况保障了热力管网的使用和运维要求。热力管道直埋时，免维护套筒补偿器通过多重密封和防渗设计有效解决传统补偿器的外密封难题，不分补偿器采用外防腐层、牺牲阳极、防水罩壳三重防护配合本体密封系统实现全密封直埋^[2]。

4 技术发展与创新

从上文中我们可以看到免维护套筒补偿器具备诸多优势，但在实际应用中仍存在一定局限性。其在蒸汽管道中的适用限制、大管径旋转控制、复杂应力状态适应等方面均有进一步提高的需求^[3]。同时，现有免维护补偿器在应对扭转载荷和多向位移耦合等工况时还存在一定的设计短板，不过可以相信随着材料技术、智能化管理、结构设计的不断创新解决局限性问题的，免维护套筒补偿器会朝着更高性能、更智能化方向发展。

4.1 技术突破解决局限性问题的

新一代密封材料正在突破温度限制，其中，陶瓷金属复合材料（CMC）密封环耐受温度达 1100℃；石墨烯增强柔性石墨填料在 600℃下保持低摩擦系数（ $\mu < 0.08$ ）；高温记忆合金弹簧可在温度变化时自动调整压紧力，这些材料的应用将使补偿器适应更极端工况。结构设计进一步优化创新，针对超大管径，新型液压平衡式补偿器采用环形油腔均匀传递压力，解决了大尺寸密封面压力分布不均问题。在三维补偿领域，万向球铰结构的补偿器可同时吸收轴向、横向和角向位移补偿效率提升，满足更多复杂管网需求。

4.2 综合管廊中的运用模式

综合管廊作为新型市政基础设施越来越多的运用到智慧城市管理当中，热力管网作为城市基础设施的重要组成部分，其安全运行直接关系到民生保障和能源效率，不可避免

的需要接入综合管廊内，面对不断发展的新形势，传统补偿器受限于管廊内多管线共舱、空间局限等因素，适用性堪忧^[4]。而免维护套筒补偿器可以通过优化设计面对各种不同情况的管廊环境。同时，物联网技术正催生新一代智能补偿器，可集成多种传感器实时监测密封状态、温度应力及位移变化，密封磨损传感器通过检测弹簧压缩量推算剩余寿命，温度压力联合监测模块分析异常工况，位移激光测距系统记录实际补偿量。相关监控信息可以接入管廊整体信息管理平台，综合各类信息结合大数据分析等达到先进智慧管理水平。

4.3 行业发展趋势

随着市政管网的要求不断提高，免维护套筒补偿器将在扮演更加重要的角色，在此趋势下标准化与定制化的需求并行，行业标准体系需要进一步完善，针对特殊工况的定制化设计能力也需要增强以应对不同的运用场景。另一方面，全生命周期安全管理、智慧管理理念也促使补偿器运维管理正从“故障后维修”向“全生命周期管理”转变。基于数字技术构建的补偿器模型，结合实时运行信息收集，大数据分析精准预测使用寿命；建立产品电子档案，实现从生产、安装、运行到报废的全过程追溯，这些创新管理手段将使管网安全性提升至全新高度。

5 结语

免维护套筒补偿器通过不断创新升级弥补了传统补偿器安全性、经济性方面的行业痛点，在热力管网、能源输送、工业制造等领域的应用，发挥了一定作用。免检修套筒补偿器不仅在一定程度上节省了建设及后期维护的成本，对管网的管理起到了明显的改善作用。我们可以相信在不远的将来，随着智能监测技术与大数据管理的深度融合，免维护套筒补偿器将逐步进化为管道系统的“智能关节”，实现从被动防护到主动预警的跨越，因此更需要相关行业加快制定、完善技术标准，重点突破极端工况应用瓶颈，为中国基础设施的安全高效运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 王宝库. 新型套筒补偿器_王宝库[J]. 科技与企业, 2012, (06): 313.
- [2] 李晓利,王维国,高志奇,等. 350℃高温钢套钢长输蒸汽管道补偿装置埋地敷设技术研究与应用[J]. 居业, 2023, (08): 47-49.
- [3] 吴波. 免维护套筒补偿器的失效分析[J]. 装备维修技术, 2025, (02): 66-69.
- [4] 岳雷. 套筒补偿器在综合管廊热力管道中的应用分析[J]. 区域供热, 2019, (06): 107-114.