

低压天然气管道内检测工艺技术

王文龙 葛 壮 白晓晖 王慧鑫（山西压缩天然气集团晋东有限公司，山西 阳泉 045200）

摘要：长期以来，中国都属于世界能源生产和消费大国，天然气资源丰富，且分布较广。在我国能源体系当中，天然气始终占据着重要的地位。天然气管道是否安全运行，与经济增长和社会稳定息息相关。内检测是一种高效、经济的油气管道检测技术，本文在充分了解内检测原理及特点的基础上，阐述了低压天然气管道内检测工艺技术的意义，并对前期清管和后期检测工艺技术要点进行了分析与探究，以期提高天然气管道运行的安全性，为城市燃气管网的定期检验和安全维护提供可靠的保障。

关键词：低压；天然气管道；内检测；原理；清管

中图分类号：TE973.6 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)020-0094-03

Internal inspection technology for low-pressure natural gas pipelines

Wang Wenlong, GeZhuang, BaiXiaohui, WangHuixin (Shanxi Compressed Natural Gas Group Jindong Co., Ltd., Yangquan Shanxi 045200, China)

Abstract: For a long time, China has been a major producer and consumer of energy in the world, with abundant and widely distributed natural gas resources. Natural gas has always held an important position in China's energy system. The safe operation of natural gas pipelines is closely related to economic growth and social stability. Internal inspection is an efficient and economical oil and gas pipeline inspection technology. Based on a full understanding of the principles and characteristics of internal inspection, this article elaborates on the significance of low-pressure natural gas pipeline internal inspection process technology, and analyzes and explores the key points of pre cleaning and post inspection process technology, in order to improve the safety of natural gas pipeline operation and provide reliable guarantees for regular inspection and safety maintenance of urban gas pipeline networks.

Keywords: low voltage; Natural gas pipelines; Internal testing; Principle; Clearing pipes

伴随全球能源需求的日益增长，作为一种高效、清洁的能源，天然气在能源结构中所占比例不断攀升。据相关数据显示，截至2020年，我国基本上已形成了一张较为完善的天然气管道运输网络，天然气管道总里程也已经超过了11万km。长久以来，安全性始终是困扰天然气管道运输的难题。早期阶段，在天然气管道检测中，往往采用人工目测与外部设备检测等传统方法，但这种检测方法，不仅效率不高，也无法及时检测出管道内部存在的问题。为了克服这一缺陷，内检测技术得到了大力发展与广泛应用。为此，开展低压天然气管道内检测工艺技术研究具有重要的意义。

1 内检测原理及特点

1.1 原理

低压天然气管道的内检测技术是一种基于智能清管器的非破坏性检测方法。其核心原理是通过将带有传感器的清管器送入管道内部，利用传感器采集管道内壁的几何和缺陷信息，并将这些数据传输到地面进行分析和处理。这种技术能够实时获取管道的状态信息，从而为维护和管理提供科学依据。

一般可以将内检测分为两个阶段，即前期清管和后期检测。为了提升管道的清洁程度，减少输送过程

中的能源消耗，需要做好清管作业。要求根据管道的实际参数设计适合的清管器；在清管器中安装多种类型的传感器，例如磁通泄漏传感器、超声波传感器以及惯性测量单元等。

但是在复杂运行工况下，低压天然气管道的清管器或是检测器很容易出现问题，比如卡堵等，这种情况下，就必须做好内检测工艺技术要点控制，比如发球控制、速度控制等等。

1.2 特点

在实际应用中发现，低压天然气管道内检测技术特点显著，如灵敏度高、精准性高、自动化程度高、适应性强等等，具体如表1所示。

表1 内检测的特点

序号	特点	内容
1	灵敏度和精准性高	采用了先进的传感器技术，内检测能够准确捕捉到管道内壁微小的变化。
2	非破坏性检测	内检测无需对管道本身造成任何物理损伤即可完成任务。
3	自动化程度高	从清管器的发射到数据的收集与分析都实现了高度自动化。
4	适应性强	可用于高压管道，亦可用于低压管道，适应性强。
5	经济性好	延长管道使用寿命，减少突发事故，大幅降低总体维护费用。

2 低压天然气管道内检测的重要意义

随着技术的进步，内检测设备逐渐小型化、智能化，并能够适应更多复杂工况，包括低压天然气管道的检测需求。内检测技术的重要性体现在多个层面：

2.1 安全性层面

一般来讲，当低压天然气管道一旦发生泄漏事故，可能会引发火灾、爆炸等严重后果，威胁人民群众的生命财产安全。根据统计数据，2022年全球范围内因管道泄漏导致的事故达数百起，其中约40%的原因可归结为管道内部缺陷未被及时发现。而内检测技术可以通过全面、精准的检测，提前发现并处理隐患，从而有效降低事故发生率。

2.2 经济性层面

传统的开挖检修方式耗时费力，且容易造成不必要的资源浪费。相比之下，内检测技术无需破坏管道结构即可完成全面检查，大幅降低了维护成本。

2.3 环境保护层面

天然气的主要成分甲烷是一种强效温室气体，其逃逸排放对气候变化具有显著影响。通过采用内检测技术，可以及时发现并修复泄漏点，减少甲烷排放量，助力实现碳减排目标。

3 清管器 / 检测器准备

在低压天然气管道内检测工艺中，设备准备是确保整个检测过程顺利进行的重要前提。首先需要对检测设备进行全面检查和校准，以确保其在实际操作中的准确性与可靠性。这包括了智能清管器、发射装置、接收装置以及数据采集系统等关键设备的检查。还需要根据具体管道的规格选择合适的检测设备型号。不同类型的管道可能需要不同尺寸或功能的智能清管器。例如，对于直径较小的管道，应选用紧凑型清管器；而对于复杂地形下的管道，则需采用具有更强适应能力的多轮式清管器。考虑到现场环境条件的影响，如温度、湿度等因素，也需要提前做好设备防护措施，以保证其正常运行。在低压天然气管道内检测当中，为了保证清管作业顺利开展，应遵循“强—弱”的顺序控制通过能力，同时按照“弱—强”的顺序控制清管能力。在清管设备当中，常见的包括泡沫清管器、机械清管器等，在整个施工过程中，要将管内的杂质清理干净，并结合实际情况，确定最佳清管器类型。在清管器 / 检测器当中，主要构成如表2所示。

表2 清管器 / 检测器构成

项目	清管器	检测器
构成	①皮碗及过盈量 ②测径板 ③钢刷 ④清管器骨架及紧固件	①皮碗及过盈量 ②磁钢与钢刷 ③内检测器骨架

4 内检测工艺关键技术要点

4.1 发球控制

发球控制作为内检测工艺的第一个环节，直接关系到整个检测流程的质量与效率。在实施过程中，首先要确保发球站的压力参数设置合理。通常情况下，低压天然气管道内的压力范围为0.4MPa至1.6MPa之间，因此需要依据实际情况调整发球压力值。同时，还要注重发球时机的选择。合理的发球时间间隔可以避免因清管器频繁启动而导致的能源浪费问题，同时也能够减少对管道内壁造成的冲击损伤。一般建议在每次检测开始前预留足够的时间用于设备调试与参数确认，确保发球动作平稳有序地进行。

在发球筒选择中，根据大小头类型进行划分，可以将其分为2类，其一，偏心大小头发球筒；其二，同心大小头发球筒。现阶段，应用最多的为偏心大小头发球筒，其发球过程往往由三个阶段构成，“顶端紧贴直管段—前端部分进入直管段—前端整体进入直管段”，具体如下：①顶端紧贴直管段。将盲板开启，通过防爆发球杆，向大小头位置推送清管器；②前端部分进入直管段。待发球流程切换之后，假设，压差不足，那么，清管器前端部分将会进入直管段，这种情况下，清管器应静止不动，亦或是速度较慢地移动；③前端整体进入直管段。若压差持续加大，此时，推力将会在摩擦力之上，清管器便会整体进入直管段，则表明发送清管器作业完成。

在整个发球过程中，其受力模型及加速度计算公式如下：

$$ma = f_1 - f_2 - f_3$$

$$f_1 = p_1 F$$

$$f_2 = p_2 F$$

$$f_3 = \mu mg + \mu \int \sigma dS$$

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$a = \frac{(p_1 - p_2)F - \mu \int E\varepsilon dS}{m} - \mu g$$

其中，清管器质量可由m表示(kg)；重力加速度可由g表示(9.8N/kg)；加速度可由a表示(m/s²)；上游和下游推力可由f₁、f₂表示(N)；摩擦力可由f₃表示(N)；上游和下游压力可由p₁、p₂表示(MPa)；管道内部截面积可由F表示(m²)；静摩擦系数可由μ表示；皮碗和管道接触面积可由S表示；皮碗与管壁接触径向应力可由σ表示(MPa)；皮碗的弹性模量可由E表示；皮碗的轴向应变可由ε表示。

基于上述分析，想要提升发球的成功率，笔者认为可以采用以下几种方法，具有如下：

第一，在发球前期，应对上、下游截止阀进行适

当调节，从而实现憋压。或者将调压压缩机启动，这样能够大幅增加清管器的前后压差。第二，为了达到清管器或者检测器质量减轻的目的，应优化其结构，亦或采用轻质高强材料。第三，将润滑油均匀涂抹到皮碗摩擦面上，从而达到减小摩擦系数的效果。第四，对于清管器皮碗的相关参数，比如弹性模量、过盈量、厚度，可适当降低一些，这样才能达到最佳效果。

4.2 速度控制

速度控制在整个内检测工艺中起着至关重要的作用。为了实现最佳检测效果，必须严格把控清管器在管道内的移动速度。一般来说，低压天然气管道内检测时推荐的速度范围为 $0.5\text{m/s}\sim 2.5\text{m/s}$ 。过低的速度可能导致检测分辨率下降，而过高的速度则会增加清管器偏离轨道的风险。基于管道力学性能的考虑，可按下式计算其最大运行速率：

$$\sigma = 0.0104v^3 - 1.0439v^2 + 36.517v + 102.42$$

其中，管材许用应力由 σ 表示(MPa)；清管器或检测器的运行速度可由 v 表示(m/s)。

在实际操作中，可以通过调节驱动气体流量来实现对清管器速度的有效控制。例如，在一条重要输气干线检测项目中，通过引入自动化控制系统，实现了对清管器速度的精准调控。该系统能够根据管道内部阻力变化情况自动调整驱动气体流量，从而始终保持清管器在设定速度范围内稳定运行。这种做法不仅提高了检测精度，还显著缩短了整体作业时间。另外，还需要特别关注特殊地段的速度控制策略。对于弯头较多或者坡度较大的区域，适当降低清管器速度可以更好地保证其通过性与安全性。也要注意避免因速度突变引发的不必要的振动或噪声干扰。

4.3 跟踪控制

跟踪控制主要指的是对清管器在整个管道内运动轨迹的实时监控与管理。这一环节对于及时发现潜在问题并采取相应措施至关重要。目前常用的跟踪技术包括超声波定位法、磁感应标记法以及GPS定位系统等。其中，超声波定位法因其高精度特性被广泛应用于短距离管道检测场景。例如，在城市中心区域的一些小型支管网络检测中，利用超声波传感器每隔一定距离布置监测点，可以精确获取清管器的位置信息。而磁感应标记法则更适合长距离管道检测需求，通过在管道沿线预设多个磁性标记点，结合专用接收设备即可实现对清管器全程轨迹的有效追踪。

4.4 收球控制

第一，收球站位置的选择。理想情况下，收球站应当设置在管道末端附近且便于操作维护的地方。同时还要综合考虑周边地形地貌特征以及现有基础设施

布局等因素，以确保收球过程顺畅无阻。例如，在某些山区地形复杂的管道检测项目中，经过多次实地勘察后最终确定了一处相对平坦开阔的地点作为收球站位置，极大地方便了后续工作的开展。第二，收球设施的设计与安装。针对不同类型和规模的管道检测任务，需要配备相应的收球装置。例如，对于高压大口径管道，通常需要使用更加坚固耐用的重型收球筒；而对于低压小口径管道，则可以选择轻量化设计的产品。还应加强对收球装置密封性能的检查，防止因泄漏等问题影响收球效果。第三，收球后的数据处理工作。当清管器成功到达收球站后，应及时提取存储在其内部的数据，并对其进行初步整理与分析。若发现存在异常情况，则需要迅速组织专业团队展开进一步调查，直至彻底解决问题为止。

5 结束语

综上所述，随着城市化进程加快，越来越多的低压天然气管道被铺设于人口密集区域，这对管道的安全运行提出了更高要求。传统检测手段已无法满足日益复杂的检测需求，因此内检测技术的推广显得尤为重要。在本文当中，基于低压天然气管道的特殊工况，通过合理选择清管器/检测器，最大限度提升清管工作效率，保证清管质量。同时，通过发球、速度、跟踪及收球控制，规范内检测工艺流程，提高检测技术水平。

参考文献：

- [1] 刘浠尧. 中缅天然气大落差管道安全清管方案研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [2] 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 自然资源部油气资源战略研究中心. 中国天然气发展报告(2021)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021.
- [3] 刘定智, 张元涛, 梁严, 等. 基于“全国一张网”的天然气管输优化模型构建及应用 [J]. 油气与新能源, 2021, 33(05):64-70.
- [4] 邵卫林, 何津, 杨白冰, 等. 成品油管道内检测清管技术 [J]. 油气储运, 2019, 38(11):1232-1239.
- [5] 索杏兰. 天然气管道黑粉积聚原因浅析 [J]. 化工管理, 2018(13):223-224.
- [6] 孙长保, 胡春阳. 海底管道卡球风险分析及预防措施 [J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(07):21-25+106.
- [7] 张宏, 李伟, 王磊. 基于磁记忆效应的天然气管道应力检测技术研究 [J]. 石油机械, 2022, 50(3):112-118.
- [8] 周利剑, 等. 基于机器学习的管道内检测数据智能分析系统开发 [J]. 天然气工业, 2023, 43(2):138-146.
- [9] 刘凯, 等. 基于声发射技术的低压天然气管道微小泄漏检测方法 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4):89-95.