

停用油气管道内部穿放光缆技术研究

葛迎超 杨子慧 史乾坤 王毅 宋宇(国家管网集团技术创新有限公司,天津 300450)

摘要:在油气管道运行期间,由于市场形式变化和外力破坏等因素,管道最终会走向停用。针对停用油气管道可能造成的资源浪费问题,研究了一种停用油气管道内部穿放光缆技术。在清管器完成清管作业的基础上,提出了利用清管器拖放钢丝绳间接拖放光缆的技术方案,并对方案中清管器类型、钢丝绳计算和空压机压力选择进行具体分析。经过某停用管道现场内部试验,证明了该方法克服了由于光缆输送机功率限制和管道机器人续航及复杂管道通过性差等原因造成的在长距离管道敷设困难的问题,成功完成2km停用管道内部光缆敷设。经过试验测试,光缆内部70根纤芯每公里衰减 $\leq 0.20\text{dB}$,满足光纤光缆验收要求。

关键词:停用油气管道;管道内部;清管器;光缆敷设

中图分类号: TE973

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 028-0106-03

Research on the Discontinuation of Cable Laying Technology Inside Oil and Gas Pipelines

GE Yingchao, Yang Zihui, Shi Qiankun, Wang yi, Song Yu(PipeChina Engineering Technology Innovation Co.,Ltd. Tianjin 300450, China)

Abstract: During the operation of oil and gas pipelines, the pipelines will eventually go out of service due to factors such as changes in market forms and external damage. Aiming at the possible waste of resources caused by the decommissioning of oil and gas pipelines, a technique of threading and placing fiber optic cables in decommissioned oil and gas pipelines is studied. On the basis of the pipe cleaner to complete the pipe cleaning operation, the technical scheme of indirectly dragging and placing the fiber optic cable by using the pipe cleaner to drag and drop the steel wire rope is proposed, and the type of pipe cleaner, the selection of steel wire rope, and the selection of the pressure of the air compressor in the scheme are analyzed in detail. After an out-of-service pipeline on-site internal test, proved that the method to overcome the cable conveyor power limitations and pipeline robot renewal and complex pipeline through the poor and other reasons caused by the laying of long-distance pipeline difficulties, successfully completed 2km out-of-service pipeline internal fiber optic cable laying. After the test, the attenuation of 70 cores per kilometer inside the cable is $\leq 0.20\text{dB}$, which meets the acceptance requirements of fiber optic cable.

Keywords: deactivation of oil and gas pipelines; interior of pipelines; pipe cleaners; fiber optic cable laying

在管道运行期间,由于腐蚀减薄、外力破坏、油气源枯竭、市场形势变化、沿途规划变化等诸多原因最终也会导致管道退出服役,走向管道全生命周期的最后阶段—停用^[1]。国家大力推进基础设施建设共建共享^[2],在停用管道内部穿放光缆可以解决互联互通和运营商数据利用问题。因此为防止资源浪费,并将停用管道变废为宝,需研发一种停用管道穿放光缆技术。

1 现状研究

目前,常用的管道内部穿放技术有光缆输送机和管道机器人敷设两种。光缆输送机是一种通过机械传动装置,将光缆或电缆沿着管道内壁推送前进的设备^[3-4]。由于是依靠摩擦力推动,在长距离穿放时,光缆或电缆与管道内壁的摩擦力不断累积,导致所需的推送力急剧增大,很容易造成光缆或电缆外皮的磨损,甚至可能因推力不足而无法完成穿放任务。管道机器人则是借助自身的动力系统,在管道内自主移动并携带光缆或电缆进行穿放的设备^[5]。管道机器人在长距

离穿放方面存在局限。以上方法针对完成无害化处置的油气管道多数以2km管段为一个单位的长距离应用存在显著瓶颈。

《压力管道定期检验规则—长输管道》(TSG D7003—2022)规定应对长距离油气管道进行定期检验,其中清管作业是检验的关键环节。王锋等介绍了原油管道内检测作业安全分析与清管技术的发展,清管器需在管道内部长距离运行完成内检测作业。此外,付晓东等研究了靖西二线天然气管道漏磁内检测技术及应用,其装置在油压或者气压的推动下前进,证实清管器可携带漏磁检测机构完成长距离管道内部的缺陷识别。以上反映了清管器在长输油气管道牵引其他设备的良好效果,利用其牵引能力可完成在停用管道中的光缆敷设工作。

综上所述,光缆输送机和管道机器人敷设两种技术在长距离油气管道存在明显短板,清管器由于其可在长距离油气管道中稳定运行,并且有一定的携带设备能力,所以可以利用清管器设计相关方案,完成油

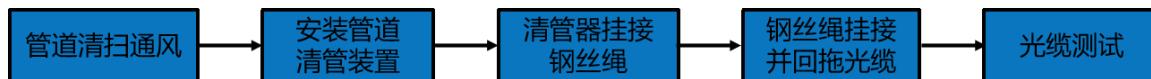


图 1 总体方案设计流程图

气管道内部光缆敷设。

2 方案设计

2.1 总体方案设计

对利用清管器完成管道内部光缆敷设的方案进行分析。清管器直接拖放光缆可以单次操作完成光缆穿放，减少工序衔接时间，减少人为操作失误风险，其缺点也非常明显，首先，光缆损伤风险高，清管器直接拖拉光缆，可能会导致信号衰减或光纤断裂。其次，清管器拉力并不恒定且控制困难，作用力过大时易对光缆造成不可逆损伤。因此深入分析后总体方案为：清管器牵引钢丝绳，首先将钢丝绳敷设进管道内部，之后将光缆捆扎在钢丝绳一端上，在另一端利用输出恒定功率的绞车卷扬机或绞车将钢丝绳收回，带出光缆，最后完成光缆指标测试。具体方案流程图如 1。

2.2 分级方案设计

2.2.1 清管器类型

国内主要油气田清管多采用硬质泡沫清管器、直板清管器和皮碗清管器等。

①硬质泡沫清管器：硬质泡沫清管器具有较高的耐磨性，但不适合长距离应用。主要用于清除管道内积液、隔离不同介质（如油/气），或作为简单清管工具；

②直板清管器：前端为刚性刮板，后端配有弹性密封组件。强力刮削管壁，适用于硬质沉积物（如结焦、硬垢），但不适用于牵引作业；

③皮碗清管器：由多个刚性或弹性碟片（金属/塑料）串联组成，边缘与管壁紧密贴合。通过碟片刮削管壁，清除顽固沉积物（如蜡、垢），同时具备一定密封性，适合进行牵引作业，实际应用中可牵引陀螺仪等具有一定重量和体积的装置。结合不同清管器的特性，考虑到本方案需要利用清管器进行牵引作业，所以选择皮碗清管器。

2.2.2 钢丝绳计算

工程应用中，常用的钢丝绳的直径范围会根据具体用途、承载要求和行业标准而有所不同。常见的钢丝绳直径范围及典型应用场景如表 1 所示。

表 1 不同直径钢丝绳应用场景

| 应用领域 | 常用直径 (mm) | 示例用途 |
|------|-----------|---------------------|
| 轻型应用 | 6mm~12mm | 适用于小型设备、牵引绳、捆绑固定等 |
| 中型应用 | 14mm~24mm | 常见于起重机、卷扬机、建筑吊装等 |
| 重型应用 | ≥ 26mm | 用于大型桥梁、港口机械、矿山提升设备等 |

本工程达不到大型桥梁等重型应用，并且结合油气管道工程中钢丝绳常用型号，选择 $\phi 6.2$ 和 $\phi 12.5$ 的钢丝绳进行方案设计。由于清管过程需将管道密封，考虑到 $\phi 12.5$ 的 2km 钢丝绳盘直径较大，无法放入常规 720mm 管道中，并且《钢丝绳通用技术条件》（GB/T 20118-2017）中给出了钢丝绳的破断拉力计算公式，通过计算可知， $\phi 6.2$ 钢丝绳破断拉力约为 $T_{\phi 6.2\max}=15\text{kN}$ ， $\phi 12.5$ 钢丝绳破断拉力约 $T_{\phi 12.5\max}=70\text{kN}$ 。为避免光缆受到敷设牵引力，和保证后续停用管道内其他厂家的光缆敷设，需在内部存有一根钢丝绳进行牵引工作，因此本步骤需同步拖放 2km144 芯铠装光缆和 $\phi 12.5$ 钢丝绳，产生的摩擦力计算公式如下：

$$F = \mu \times (m_1 + m_2) \times g \times L \quad (1)$$

其中 m_1 和 m_2 是 $\phi 12.5$ 和光缆的线密度， L 是管道长度， g 是重力加速度， μ 是摩擦因数。

本次试验中，摩擦因数 $\mu=0.6$ ， m_1 约为 0.548 kg/m ， m_2 约为 0.583 kg/m ， L 为无害化处置的油气管道管段的一般长度 2000m ，因此计算可知 F 为 13.572kN 。通过计算可知，管道内部摩擦力 F 与 $T_{\phi 6.2\max}$ 接近，由于实际过程中管道内部不可视，摩擦力不恒定，选用 $\phi 6.2$ 钢丝绳具有断裂风险。但 F 远小于 $T_{\phi 12.5\max}$ ，因此考虑到试验的安全和可推广性，选用 $\phi 12.5$ 钢丝绳完成 2km144 芯铠装光缆和 $\phi 12.5$ 钢丝绳停用管道内的敷设。

通过以上计算可知，本实验需先用清管器挂接 $\phi 6.2$ 钢丝绳绳盘，待清管器将 $\phi 6.2$ 钢丝绳拖出后，利用其牵引 $\phi 12.5$ 钢丝绳，之后利用 $\phi 12.5$ 钢丝绳牵引 $\phi 12.5$ 钢丝绳及光缆，完成停用管道内部光缆敷设。

2.2.3 空压机压力选择

空压机压力选择需要考虑皮碗清管器的牵引力，皮碗清管器的牵引力既不能过大，也不能过小，牵引力过大可能超过钢丝绳的承受能力导致钢丝绳被拉断；牵引力过小有可能导致当钢丝绳长度过长时，自重及摩擦力过大，无法继续前进。

对比 $\phi 6.2$ 钢丝绳的破断拉力 15kN ，目前停用管道多为老旧油管道，管道内径多为 700mm 左右，因此结合压强计算公式：

$$P=F/S \quad (2)$$

其中 F 为 $T_{\phi 6.2\max}=15\text{kN}$ ， S 为直径 700mm 的清管器横截面面积 0.38m^2 ，计算可知空压机压力最大

值 P_{max} 约为 0.04MPa, 因此需控制空压机压力不超过 0.04MPa, 过大可能会导致钢丝绳被拉断。

3 工程实践

3.1 现场实施

在某停用管道管段将本方案进行现场实践, 具体实践操作过程及注意事项说明如下: ①管道清扫通风。试验开始前进行一次清扫通风操作, 清除管道中无害化处理过程残留的杂质; ②安装清管装置和钢丝绳盘。清扫工作完成后, 进行 $\phi 6.2$ 钢丝绳敷设。清管器一侧挂接 $\phi 6.2$ 钢丝绳(可采用焊接管钩或绑扎方式, 保证连接牢固), 钢丝绳盘固定于临时发球筒内, 保证清管器前进过程中绳盘同步转动; ③清管器携带 1 根 $\phi 6.2$ 钢丝绳前进。本步骤需控制压缩机压力不大于 0.04MPa, 否则容易造成钢丝绳断裂情况; ④ $\phi 6.2$ 钢丝绳尾部牢固连接 $\phi 12.5$ 钢丝绳。利用绞车拖曳 $\phi 6.2$ 钢丝绳来完成 $\phi 12.5$ 钢丝绳敷设; ⑤ $\phi 12.5$ 钢丝绳尾部牢固连接 $\phi 12.5$ 钢丝绳及 1 根光缆, 利用绞车/卷扬机回拖 $\phi 12.5$ 钢丝绳, $\phi 12.5$ 钢丝绳及光缆牵引头牢固固定, 其余部位处于自由状态, 直至光缆和 $\phi 12.5$ 钢丝绳成功拖出并完成相关测试, 如图 2 所示。



图 2 光缆成功敷设图

3.2 结果测试

对牵引的光纤抽取 30 根纤芯进行测试, 光纤衰减指标合格。测试结果见下表 2:

表 2 光纤衰减指标

| 纤号 | 波长 | 平均衰减 (dB) | 平均长度 | 衰减 (dB) | 纤号 | 波长 | 平均衰减 (dB) | 平均长度 | 衰减 (dB) |
|----|------|-----------|-------|---------|----|------|-----------|-------|---------|
| 1 | 1550 | 0.447 | 2.232 | 0.2 | 16 | 1550 | 0.435 | 2.232 | 0.195 |
| 2 | 1550 | 0.438 | 2.232 | 0.196 | 17 | 1550 | 0.435 | 2.232 | 0.195 |
| 3 | 1550 | 0.433 | 2.232 | 0.194 | 18 | 1550 | 0.438 | 2.232 | 0.196 |
| 4 | 1550 | 0.444 | 2.231 | 0.199 | 19 | 1550 | 0.446 | 2.233 | 0.2 |
| 5 | 1550 | 0.444 | 2.231 | 0.199 | 20 | 1550 | 0.44 | 2.233 | 0.197 |
| 6 | 1550 | 0.452 | 2.232 | 0.203 | 21 | 1550 | 0.44 | 2.233 | 0.197 |
| 7 | 1550 | 0.442 | 2.232 | 0.198 | 22 | 1550 | 0.439 | 2.231 | 0.197 |
| 8 | 1550 | 0.443 | 2.232 | 0.198 | 23 | 1550 | 0.431 | 2.232 | 0.193 |

| 纤号 | 波长 | 平均衰减 (dB) | 平均长度 | 衰减 (dB) | 纤号 | 波长 | 平均衰减 (dB) | 平均长度 | 衰减 (dB) |
|----|------|-----------|-------|---------|----|------|-----------|-------|---------|
| 9 | 1550 | 0.442 | 2.232 | 0.198 | 24 | 1550 | 0.447 | 2.232 | 0.2 |
| 10 | 1550 | 0.457 | 2.232 | 0.205 | 25 | 1550 | 0.459 | 2.234 | 0.205 |
| 11 | 1550 | 0.453 | 2.232 | 0.203 | 26 | 1550 | 0.459 | 2.234 | 0.205 |
| 12 | 1550 | 0.458 | 2.232 | 0.205 | 27 | 1550 | 0.451 | 2.234 | 0.202 |
| 13 | 1550 | 0.439 | 2.232 | 0.197 | 28 | 1550 | 0.457 | 2.234 | 0.204 |
| 14 | 1550 | 0.423 | 2.232 | 0.19 | 29 | 1550 | 0.432 | 2.232 | 0.193 |
| 15 | 1550 | 0.441 | 2.232 | 0.197 | 30 | 1550 | 0.435 | 2.232 | 0.195 |

抽取的 30 根纤芯均每公里衰减 ≤ 0.20 dB, 满足 GB/T 9771-2020《通信用单模光纤》中规定的衰减要求, 最终本方案成功完成 2km 停用管道内部光缆敷设, 光缆指标测试合格, 清管器拖放钢丝绳间接拖放光缆是一种停用油气管道内部穿放光缆技术。

4 结论

本方案利用清管器长距离牵引能力, 无需大规模开挖作业, 与管道现有的清管系统相结合, 就能实现清管器牵引敷设钢丝绳, 进一步完成停用管道内部光缆的敷设。充分彰显了该方案在应对长距离、复杂管道环境时所具备的卓越可行性与稳定性。此方案减少了新设备的投入, 降低了系统的复杂性, 提高了整体系统的兼容性和协同性。有效利用了停用的油气管道资源, 避免了新建通信管道带来的土地占用、环境破坏等问题, 符合国家绿色发展和资源节约的政策导向。并且通后续与运营商合作, 为通信网络的拓展提供了新的路由选择, 提升了通信基础设施的覆盖范围和稳定性, 满足了社会日益增长的通信需求, 促进了数字经济的发展。

参考文献:

- [1] 刘寅秋. 停用或废弃燃气管道及设施管理的探讨 [C]// 中国城市燃气协会安全管理委员会. 2021 第五届燃气安全交流研讨会论文集(下册). 北京: 中国城市燃气协会, 2023:3.
- [2] 曾娅. 共建共享: 融合之间显智慧 [N]. 人民邮电, 2025-02-13.
- [3] 段晓伟. 变频调速节能控制技术在带式输送机上的应用 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(03):98-100.
- [4] 吴晓峰. 带式输送机沿线光纤测温装置及安装方式 [J]. 机械工程与自动化, 2021(04):206-207+210.
- [5] 查益程, 陈炜峰, 刘雪飞, 蔡怀璇, 粟冰, 吉爱红. 管道机器人研究综述 [J]. 机械传动, 2024:1-18.

作者简介:

葛迎超(1997—), 男, 2023 年毕业于河北工业大学电子信息专业, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 油气管道通信设计工作。