

基于局部椭圆变形的长输管道内检测的实践应用

姜绪彪

(惠州市大亚湾华德石化有限公司, 惠州 516081)

摘要: 论述了基于局部椭圆变形的长输管道,在无法实施局部换管的特定条件下如何实施内检测工作的应用实践。通过对漏磁检测设备的连接臂、皮碗法兰和探头进行改造,提升了检测设备在 3D(内径)弯管处的通过能力,实现了不发生卡球事故的安全目标。通过对现场实测数据和内检测报告数据的分析比对,验证了内检测数据量化精度达到 Rosen 公司标准。为今后在长输管道局部椭圆变形及其他变形的特定条件下,实施内检测工作积累了实践经验,为类似管道的内检测、技术管理和安全运营提供了一定的借鉴作用。

关键词: 长输管道;椭圆度;内检测;几何变形;漏磁;开挖验证

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)04-0075-06

长输管道内检测是管道完整性管理的核心技术,更是确保管道本质安全的重要手段之一。定期对管道开展清管作业,清除管线中杂质、积蜡和铁磁性物质,开展几何变形检测和漏磁检测,精准发现管道存在的几何变形、金属损失缺陷和焊缝异常,及时制定金属损失点修复计划,有计划有步骤消除管道存在的缺陷,对开展管道完整性风险评价和适用性评价,保障管道安全运行^[1-2],具有积极而深远的意义。

长输管道地下状况较为复杂,针对局部椭圆变形的长输管道,在无法实施局部换管的特定条件下,确保内检测工作顺利完成的前置条件是实施几何变形检测,根据几何变形状况来核算原先设计的内检测设备的通过能力是否满足要求。例如原检测器按照直径 600 mm 的标准型进行常规设计,若无法通过管道变形处,需对检测设备进行改造,以期实现该目标。

1 基本情况

某长输管道于 1997 年 3 月投用,设计压力 6.276 MPa,总长 174 km,直管尺寸为 $\phi 610 \text{ mm} \times 8(9) \text{ mm}$,弯管尺寸为 $\phi 610 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$,采用螺旋焊埋弧钢管。长输管道内检测工作主要分为两

个阶段,即清管工作阶段和检测工作阶段^[3]。清管工作包括测径清管和强化清管两部分,测径清管阶段采用泡沫清管器、铝制测径清管器;强化清管阶段采用直板清管器、钢刷清管器、磁力清管器。检测工作包括几何变形检测和漏磁检测。每道工序必不可少且密不可分,需严格按照上述顺序开展各项工作。清管器和检测器都应具有跟踪定位仪,以确保仪器在管道内安全运行。

电子几何变形检测器的原理如下:使用机械臂和涡流传感器相结合的检测技术,如图 1 所示,检测时机械臂在管道内可自动伸缩,安装在机械臂上方的涡流传感器发出的信号经过传送系统,进入智能仪器的数据存储系统,可 100% 覆盖管道内径全区域,并实时扫描内径变形。若管道没有变形,对应的蓝色线条是直线;若管道有凹陷、椭圆等变形,对应的蓝色线条就会显示波谷或曲线。检测完毕后通过软件分析,获得准确的管道轮廓形状扫描和量化的变形量。

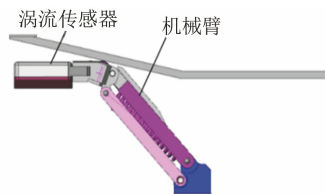


图 1 几何变形检测器的检测原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of the detection principle for geometric deformation detector

由图 2 可见:漏磁检测是利用漏磁检测器自身携带的强磁铁产生磁力线通过钢刷耦合进入管壁,

收稿日期:2023-10-22

通信作者:姜绪彪(1975—),高级工程师,本科,主要研究方向为油气储运管道完整性腐蚀防护管理,18998122886, jxb606@163.com

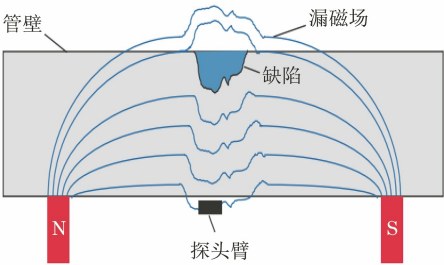


图 2 漏磁检测原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic leakage detection principle

在管壁的全圆周产生一个磁回路。如果管道没有缺陷,磁力线就会均匀分布;如果管道存在缺陷,缺陷处通道变窄,磁力线变形,部分磁力线穿过管壁两侧产生漏磁场,通过安装在磁化单元之间的探头传递管道缺陷信号。

若上所述清管工作质量达到技术指标,可按计划进入检测工作阶段,投放电子几何变形检测器,结果发现在里程 142 940.00~142 941.99 m 处椭圆度较大,采用模拟仿真建立模型,仿真结果见图 3。该段管线内径最小处为 528 mm、最大处为 624.4 mm,此处椭圆度为 15.8%,管道椭圆变形示意图 4,可见管道实际横截面近似椭圆形状。原计划安排的漏磁检测设备无法通过。

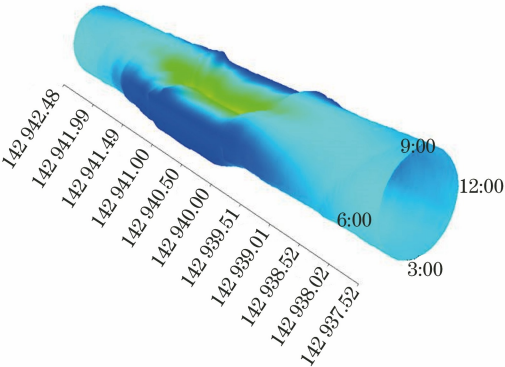


图 3 142 940.00 m 处管段的仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of pipe section at 142 940.00 m

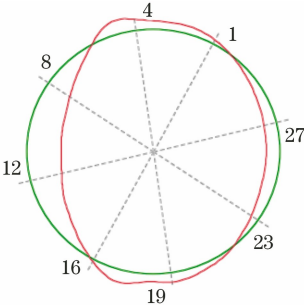


图 4 142 940.00 m 处管段椭圆变形图

Fig. 4 Elliptical deformation diagram of pipe section at 142 940.00 m

2 漏磁检测设备的改造

2.1 漏磁检测设备的改造原因

分析管道的几何变形检测数据及模拟仿真图,该段管线里程 142 940.00~142 941.99 m 处的最小内径为 528 mm,该处属于 3D(内径)弯管,原漏磁检测器无法通过此椭圆变形处。具体风险如下:

(1) 若继续发送原漏磁检测设备,在管道运行中极有可能会产生停滞、偏磨甚至卡球,若发生卡球事故,将导致下游炼化生产装置被迫停产,造成无法估量的损失。

(2) 由于该处管道埋设深度近 5 m,管道上方侧向填土高度近 7 m,如图 5 所示。即使以最快速度开展抢修,包括土建施工、封堵连头和局部换管,也至少需要 30 d。且管道左边的侧向填土部位已建成住宅小区,在开挖过程中若发生侧向护坡滑落,无法确保施工人员安全、管道本质安全和建筑物安全。

(3) 若在该处管道实施局部更换之后再实施内检测,无法及时掌握全线(174 km)的内、外腐蚀状况,会对管道的安全运行产生较大的风险。

需对漏磁检测器进行结构改进,以确保其能安全通过该处椭圆变形的管道。

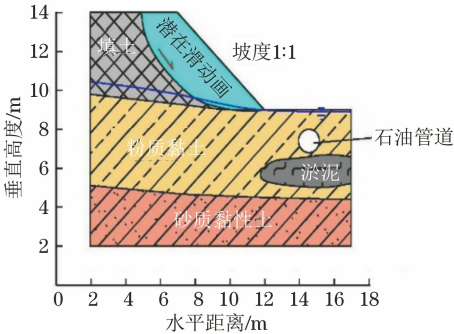


图 5 椭圆变形处管道埋设示意

Fig. 5 Diagram of pipeline burial at elliptical deformation

2.2 漏磁检测设备的改造方法

待检测管道的椭圆变形位于 3D 弯管处,漏磁检测设备的改造目标是确保改造后检测设备能安全通过 3D 弯管,实现预定的检测精度。改造后的漏磁检测设备示意图 6,主要的改造措施有:(1) 采用压缩性更好的连接臂;(2) 采用较小的皮碗法兰,并降低皮碗间距;(3) 减小探头厚度,并采用较小的探头环。改造前漏磁设备型号为 C24-1.B,3D 弯管通过能力为 542 mm;改造后漏磁检测设备型号为 C22-1.J,3D 弯管通过能力为 508 mm。

待检测管道的椭圆变形位于 3D 弯管处,最大椭

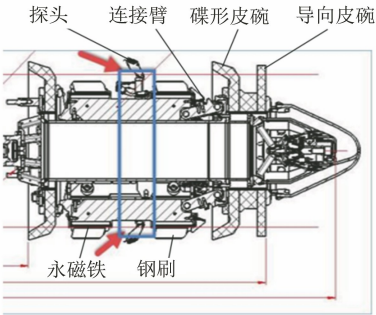


图 6 改造后漏磁检测设备示意

Fig. 6 Schematic diagram of modified magnetic leakage detection equipment

圆度 15.8%，其最小内径为 528 mm，通过模拟仿真和理论计算，可以确保检测器顺利通过该处椭圆变形管道。漏磁检测设备改造前、后参数对比见表 1。

表 1 漏磁检测设备改造前、后的参数对比

Tab. 1 Parameters of magnetic flux leakage testing equipment before and after the renovation

项目	最大检测 里程/km	检测厚度 范围/mm	检测器运行 速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大/最小 运行压力/ MPa	通过弯管 最小曲率 半径	直通管可 通过最小 内径/mm	3D 弯管 可通过最小 内径/mm	1.5D 弯管 可通过最小 内径/mm	磁化水平/ ($\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$)	检测器 长度/ mm
改造前	1 500	8.5~22.4	0.1~5.0	15.0/3.0	1.5D	530	542	564	10~30	1 328
改造后	1 570	3.1~15.9	0.1~5.0	15.0/3.0	1.5D	493	508	530	10~30	1 307

表 2 金属损失尺寸量化精度

Tab. 2 Quantitative accuracy of metal loss size

内容	普通金属损失	点蚀	轴向沟槽	环向沟槽
缺陷检出率 90% 时最小深度	0.10t	0.10t	0.10t	0.10t
置信度 90% 时深度尺寸精度	$\pm 0.10t$	$\pm 0.10t$	$-0.15t/0.10t$	$-0.10t/0.15t$
置信度 90% 时长度尺寸精度	$\pm 15\text{ mm}$	$\pm 15\text{ mm}$	$\pm 15\text{ mm}$	$\pm 15\text{ mm}$
置信度 90% 时宽度尺寸精度	$\pm 20\text{ mm}$	$\pm 20\text{ mm}$	$\pm 20\text{ mm}$	$\pm 20\text{ mm}$

Rosen 公司几何变形检测的尺寸量化精度如下:外径(OD)变化 1.5 mm，椭圆度长度方向 10% OD、椭圆度 2% OD。凹陷变形时钟方位 $\pm 20^\circ$ 、深度 1.5% OD、长度 10% OD、宽度 20% OD。

本次漏磁检测器的运行介质为原油，为确保检测精度达到表 2 所示的预期目标，从以下四个方面确保检测精度。

(1) 为检测器提供连续稳定的运行速度，通过理论计算预测最佳速度。

(2) 检测探头如图 6 所示，选用高清探头，实现预期的目标。

(3) 清出铁磁性物质质量达到 Rosen 公司技术指标要求(小于 1.6 kg)。

(4) 开展牵拉试验，确保改造后检测设备的灵敏度和精度。通过牵拉试验确定数据量化模型，同

2.3 漏磁检测设备的改造后的检测精度

改进后漏磁检测器具备如下检测能力^[4-5]:内外缺陷区分;金属损失(包括均匀损失、点蚀、沟槽、机械损伤、焊缝或凹陷处金属损失、套筒内金属损失、环焊缝等)检测,其中凹陷包括单纯凹陷、与焊缝或金属损失相关的凹陷;制造缺陷、壁厚变化、内径变化、焊缝异常检测;弯管曲率半径、角度、方向等检测;钢制套筒、偏心套筒和修复套筒鉴别。焊缝异常情况检测,包括环焊缝、螺旋焊缝和直焊缝,以及环焊缝和上下游螺旋焊缝相交点的时钟方位。

本次检测采用德国 Rosen 公司高清漏磁设备,检测内容涵盖几何变形以及金属损失,其金属损失尺寸量化精度见表 2。当缺陷检出率为 90% 时,金属损失检测最小深度为 0.10t(壁厚)。

时再结合现有缺陷数据库进行识别量化,以实现表 2 所列的精度指标。本次待检测管道壁厚最大为 12.7 mm,具体试验情况见表 3。

表 3 主探头拾取缺陷能力

Tab. 3 The ability of the main probe to pick up defects

缺陷尺寸	制作的最小 缺陷深度/%	拾取最小深度/%		
		1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
A×A	9	9	9	9
2A×2A	9	9	9	9
3A×3A	11	11	11	11
4A×4A	9	9	9	9
5A×5A	8	8	8	8

在 12.7 mm 壁厚管道上,通过预支缺陷,实施牵拉试验,分别模拟三种不同牵拉速度。结论如下:

改造后检测设备对于点蚀缺陷的检测阈值为 9%，对于均匀腐蚀缺陷的检测阈值为 9%。根据本次牵拉试验结果，改进后检测器可实现表 2 所列的检测精度指标。

3 改进后检测器的实际检测结果

对管道进行强化清管,经过 10 次磁力清管,最后一次清出铁磁性物质质量为 1.25 kg,符合 Rosen 公司的技术标准,完全具备投放漏磁检测设备的条件。

为取得最佳的漏磁检测数据,投放漏磁检测器前,需进行理论计算。因管道壁厚最大为 12.7 mm,为了全覆盖磁化,使漏磁检测器保持流量稳定,以便采集到最佳的数据,先期开展理论计算,预测流量约 1 400 m³/h,平均速度约 1.41 m/s。实际运行工况如下:管道出站运行压力 4.3 MPa,温度 33.0 ℃,流量 1 350 m³/h。

本次漏磁检测的金属损失点分布示意图 7,金属损失点共 1 193 个,其中内部金属损失点 597 个、外

部金属损失点 596 个。

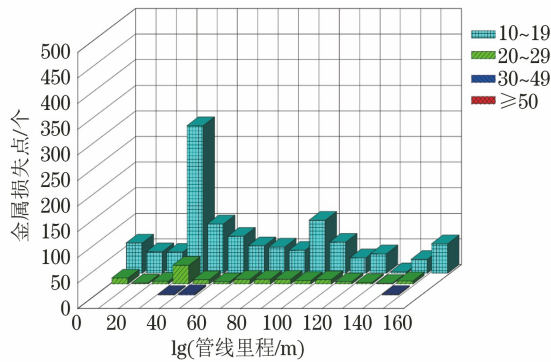


图 7 金属损失点的分布示意

Fig. 7 Distribution diagram of metal loss points

4 开挖验证

4.1 开挖数据

针对内检测报告的数据,选取 10 处金属损失点和 1 处几何变形点进行开挖验证。表 4 和表 5 为内检测结果,其中时钟方位表示从介质上游流向下游。

表 4 金属损失的内检测结果

Tab. 4 Internal detection results of metal loss

序号	特征名称	检测里程/m	缺陷轴向长度/mm	缺陷环向宽度/mm	时钟方位	金属损失深度/%	金属损失类型(内/外)
1	腐蚀	13 704.35	25	27	4:11	16	外
2	腐蚀	13 705.11	12	25	6:16	36	外
3	腐蚀	41 987.21	16	16	6:57	37	内
4	腐蚀	8 219.71	37	53	5:55	23	外
5	腐蚀	8 219.70	35	56	7:36	18	外
6	腐蚀	8 225.61	27	28	5:57	10	外
7	腐蚀	42 002.37	12	20	8:21	18	外
8	腐蚀	8 758.11	32	33	4:19	10	内
9	腐蚀	8 758.50	22	21	2:37	13	内
10	腐蚀	8 758.81	11	15	1:13	15	内

表 5 几何变形点的内检测结果

Tab. 5 Internal detection results of geometric deformation points

序号	特征 1	检测里程/m	缺陷轴向长度/mm	缺陷环向宽度/mm	时钟方位	凹陷深度(OD)/%	金属损失类型(内/外)
1	凹陷	3 208.48	352	186	4:57	2.8	外

现场进行开挖时,金属损失开挖验证点的实测数据包括里程、缺陷轴向长度、缺陷环向宽度、径向深度、时钟方位和金属损失类型,具体见表 6。几何变形开挖验证点的实测数据包括里程、凹陷轴向长度、凹陷环向宽度和时钟方位信息,具体见表 7。

4.2 数据对比

对内检测报告数据和现场实测数据进行分析比

对,结论如下:

(1) 缺陷的特征名称、检测里程、定位点、内外部缺陷等信息,内检测报告数据和现场开挖数据完全吻合;

(2) 开挖验证现场实测数据表明,缺陷的轴向长度、环向宽度、时钟方位和变形量均在 Rosen 公司给出的量化精度范围以内;

表 6 金属损失的开挖验证结果

Tab. 6 Excavation verification results of metal loss

序号	特征名称	检测里程/ m	缺陷轴向 长度/mm	缺陷环向 宽度/mm	时钟方位	金属损失 深度/%	金属损失 类型(内/外)
1	腐蚀	13 704.35	30	28	4:15	32.10	外
2	腐蚀	13 705.11	30	50	6:15	36.70	外
3	腐蚀	41 987.21	20	20	7:00	37.00	内
4	腐蚀	8 219.71	30	40	5:55	20.00	外
5	腐蚀	8 219.70	40	40	7:30	17.10	外
6	腐蚀	8 225.61	20	20	6:00	7.00	外
7	腐蚀	42 002.37	11	24	8:20	14.75	外
8	腐蚀	8 758.11	21	21	4:20	13.11	内
9	腐蚀	8 758.50	12	21	2:30	13.23	内
10	腐蚀	8 758.81	11	11	1:10	12.79	内

表 7 几何变形点的开挖验证结果

Tab. 7 Excavation verification results of geometric deformation points

序号	特征名称	检测里程/ m	缺陷轴向 长度/mm	缺陷环向 宽度/mm	时钟方位	变形量/%	凹陷类型 (内/外)
1	几何变形	3 208.48	360	181	5:00	2.95	外

(3) 开挖验证的 10 处金属损失点,其中 9 处金属损失的深度精度在 Rosen 公司给出的量化精度范围以内,另 1 处金属损失的深度精度超出 Rosen 公司给出的量化精度范围。

4.3 偏差原因分析及修复方案

对于里程 3 208.48 m 处的凹陷进行分析,其产生原因是管道回填时没有严格落实回填土技术要求,底部有石头挤压,管道发生塑性变形后产生凹陷变形,移走石头后,实测凹陷长度、宽度、深度分别为 360,181,18 mm,凹陷处没有腐蚀,凹陷周边进行无损检测,没有裂纹,凹陷深度为管道外径的 2.95%。按照 GB/T 36701—2018《埋地钢质管道管体缺陷修复指南》中关于凹陷修复的条件^[6],若同时具备以下 4 个条件,无需对凹陷进行修复:

- (1) 凹陷为普通平滑凹陷;
- (2) 凹陷深度小于管道外径的 6%;
- (3) 凹陷长度 L 与深度 d 的比值(L/d)不小于 20;
- (4) 凹陷处腐蚀深度不大于管道公称壁厚的 10%。

对照以上 4 个条件,该处凹陷无需维修,对管道打磨后采用黏弹体材料进行防护即可。

对于里程 13 704.35 m 处金属损失点,内检测报告显示深度为 16%,现场检测数据为 32.1%,该金属损失点位于长输管道 3D 弯管直管处,金属损

失类型属于外腐蚀,现场实测该缺陷处管道最大外径 $\phi 620$ mm、最小外径 $\phi 587$ mm,椭圆度为 5.4%,已超出 3D 弯管直管段的椭圆度应不大于 0.8%的技术指标。此椭圆度的弯管直管段虽然能够使几变形检测器和漏磁检测器顺利通过,但探头在圆周方向压缩不均匀,产生的实际曲线和理论曲线模型有一定差异。该处椭圆度超技术指标,是该处腐蚀缺陷现场实测数据大于内检测数据的核心原因。针对此处腐蚀缺陷,采取 B 型套筒修复方案,以保证管道的安全。

5 结论与建议

针对局部椭圆变形的长输管道,在无法实施局部换管的特定条件下,通过对漏磁检测设备的连接臂、皮碗法兰和探头进行改造,提升了检测设备在 3D 弯管处通过能力,如期实现了改造的两大目标。

(1) 改造后检测器没有发生卡球事故的安全目标。

(2) 改造后检测数据量化精度达到 Rosen 公司标准。缺陷的特征名称、检测里程、定位点、内外部缺陷等信息和现场开挖数据完全吻合;缺陷的轴向长度、环向宽度、时钟方位和变形量均在 Rosen 公司给出的量化精度范围以内,但是有 1 处金属损失的深度精度超出 Rosen 公司给出的量化精度范围。进行了偏差原因查找分析,实施了缺陷修复,并给出

了预防措施。

建议落实对压力管道元件的出厂监督检验。弯管直管段距管端 100 mm 范围内椭圆度应不大于 0.8%,弯管弯曲段的椭圆度应符合不同曲率半径的椭圆度指标要求(2.5%~3.7%),这也是确保检测量化精度的重要手段之一。

参考文献:

[1] 陈朋超,冯文兴,燕冰川. 油气管道全生命周期完整性管理体系的构建[J]. 油气储运,2020,39(1):40-47.
[2] LI R, CAI M L, SHI Y, et al. Technologies and application of pipeline centerline and bending strain of

In-line inspection based on inertial navigation [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control,2018,40(5):1554-1567.

[3] 国家能源局. 油气管道内检测技术规范:SY/T6597-2018[S]. 北京:石油工业出版社,2019:11.
[4] 邵卫林,陈金忠,马义来,何仁洋. 管道盗油孔的漏磁内检测信号识别[J]. 无损检测,2017,39(5):6-9.
[5] 邵卫林,何漳,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.
[6] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 埋地钢质管道管体缺陷修复指南:GB/T36701-2018 [S]. 北京:中国标准出版社,2018:11.

Practice and Application of Long Distance Pipeline Internal Inspection Based on Local Elliptic Deformation

JIANG Xubiao

(Huizhou Daya Bay Huade Petrochemical Co., Ltd., Huizhou 516081, China)

Abstract: The application practice of how to carry out internal inspection of long distance pipeline with local elliptic deformation under the specific condition that local pipe change cannot be carried out was discussed. Through the modification of the connecting arm, the cup flange and the probe of the magnetic flux leakage (MFL) testing equipment, the passing ability of the testing equipment at the 3D (inner diameter) bend were improved, and the safety goal of no stuck pigging accident was realized. Through the field measurement analysis and comparison of the internal detection data, it was verified that the quantization accuracy of the internal detection data reached the Rosen standard. The practical experience was accumulated for carrying out internal inspection work under the specific conditions of local elliptic deformation and other deformation of long-distance pipeline in the future, and provided a certain reference for the internal inspection, technical management and safe operation of similar pipelines.

Key words: long distance pipeline; ovality; internal inspection; geometric deformation; magnetic flux leakage; excavation verification