

MTM 金属磁记忆 检测技术及工程应用

1. 引言

MTM 金属磁记忆检测技术作为一种新兴的无损检测方法，利用铁磁材料的磁弹性和磁机械效应，通过对铁磁构件在周期性载荷和地磁场的共同作用下产生磁记忆现象的检测，来确定出构件表面或近表面的应力集中区域和应力分布，能够准确地对金属构件实施缺陷定位和安全评价。磁记忆检测技术成为了继涡流检测、渗透法、磁粉法、射线检测法和超声检测之后的又一主流的检测手段，在对以应力集中为主要特征的危险部位的探测，特别是金属构件早期诊断领域得到了广泛应用。该检测技术无需对构件进行磁化，操作简单，判断准确，对构件表面洁净度要求不高，具有传统磁法检测无法比拟的优势。磁记忆检测技术也能通过测量管道路由地面上方的漏磁场变化，对埋地钢质管道上的应力集中部位以及腐蚀损伤等管体的缺陷进行准确定位和可靠性的评价。非接触式的磁记忆检测方法对于应对目前管体腐蚀检测领域缺少非开挖条件下检测金属腐蚀损伤的技术手段，提高管道安全管理技术水平，减少管道失效事故的发生具有重要意义。

由于国内大部分埋地钢质管道不具备实施内检测的条件，管体的腐蚀损伤只能通过外检测发现防腐层破损点后开挖，应用 NDT 检测手段对管体的缺陷进行评价。这种方法难于全面准确地排查出威胁管道运行的安全隐患，致使管道运行单位无法准确地掌握管道的运行状况。非接触式金属磁记忆检测方法可以在不施加任何检测信号、不接触管道、不影响介质正常输送的情况下，沿着探测出的管线路由实施检测，进行数据采集。在检测过程中实时记录检测路由的相对距离和 GPS 坐标等信息。通过专业的数据分析软件对检测数据进行分析及计算，可得到管道管体磁力异常位置、异常严重等级、安全运行压力和安全运行期限等等重要参数。再经过对部分异常位置实施校准检测，对初步分析结果进行校正，即可得出更加准确的管道安全信息。随着这项检测技术及其流程的日趋完善，有望彻底地改变针对无法内检的管道，在地面上不能进行全方位管体腐蚀损伤检测及评价的现状。该检测技术在工程领域的应用也愈加广泛，得到了越来越多的认可。

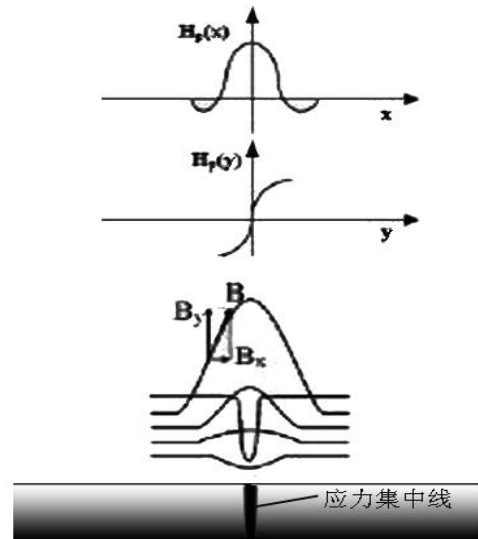
天津嘉信公司自 2013 年开始磁记忆检测技术的研发，经过五年多的持续攻关，成功地推出 JX-MTM 金属磁记忆检测系统，并开展了大量的工程应用，积累了丰富的检测实施和数据分析经验，并依此成功地开发出了磁记忆数据分析软件系统。在新疆地区，JX-MTM 自 2015 年起就开展了多个检测项目。2017 年在新疆地区共实施金属磁记忆检测近 300 余公里，检测成果显著，尤其是在新疆油田采油一厂红克输气管线的检测，发现 4 处超过 50% 壁厚损失的严重缺陷，以及多处管体缺陷，受到了业主的一致好评。JX-MTM 检测设备自投入市场以来，已经在新疆地区、华北东北地区、广东以及四川等多地展开了相关实验及检测项目，为油气管网及各个市区中高压燃气管网提供了优质服务，已经成功地完成了 2000 余公里的检测工程。从目前各个项目的检测结果看，其检测结果准确率可达 85% 以上。在未来，随着研发和应用人员的不断努力和经验积累，MTM 技术将为埋地管线的安全运营提供强有力的支持手段。

2. MTM 的技术原理

MTM (Magnetic Tomography Method) 金属磁记忆检测技术是一种无需与被检测的管道进行直接接触, 无需对管道施加任何激励信号, 便能够在管道上方地面检测出管体腐蚀损伤, 评估管道安全级别的全新检测方法。检测人员手持便携式检测仪沿管道路由行走, 对管道因制造、建设、运营过程中形成的缺陷、腐蚀损伤而导致的应力集中进行磁扫描, 采集铁磁性材料上磁场变化的数据曲线, 经腐蚀应力诊断软件的数据处理系统确定出管体上各种类型的缺陷。因非接触管道或侵入管道内部, 在整个检测的实施过程中无需中断管道的正常运行。

MTM技术的检测原理是: 地球是一个巨大的磁体, 地表上到处都分布着磁力场。由于铁磁性材料的磁弹性作用, 使得处在地磁场中的铁磁性材料制成的管道周围同时存在着与管体的应力分布相关联的磁场分布。由物理学的维拉里 (Villari effect) 效应可知, 管体上存在的冶金、机械或介质腐蚀导致的缺陷, 都会引起该区域内管体应力的变化, 进而导致管道附近和周边区域内磁力场发生变化, 从而引起管线上方的磁力剖面发生可以探测和测量的变化。这种现象被称之为磁力异常, 它是通过高灵敏的磁力仪检测阵列在地面上方进行探测和记录。

此外, 铁磁构件无论何时发生应力集中还是塑性变形, 都会导致相应区域内管材发生不可逆转的磁性变化。管道在运行压力负荷和地磁场的共同作用下, 在应力和变形集中区域会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向和不可逆的重新取向, 这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后不仅会保留, 还与最大作用应力有关。管道上方的磁场不会因为管道负荷的消减而消失 (称之为“磁记忆”效应), 而该磁场的强度取决于管道内的最大工作负荷^[2]。更详尽的阐述是: 由于应力的作用改变磁力线方向180度, 在应力峰值点的上方, 磁力场的切线 (与管道轴向垂直) 方向的磁力线为最大, 则在与管道径向方向上磁力线强度会变为零。当由于腐蚀开裂、金属疲劳损伤以及高温塑性变形损伤等原因导致的应力, 都能够由此追溯到这样的磁力改变区域。应用MTM检测系统, 将检测数据上传到计算机, 使用应力诊断数据处理软件进行分析。专用的应力诊断软件是由复杂的运算程序组成, 通过对缺陷周边区域上的应力值的相应改变进行分析和计算, 能够检测并定量地评估出所有制造缺陷、腐蚀或地壳运动引起的扭曲、下陷和应力变化造成的危害, 评价出每个缺陷的危险等级, 计算出管道管体所能承受的运行压力和管道的安全运行寿命。



随着金属磁记忆检测技术和设备的逐步完善，扭转了在地面上不能对无法内检的管道实施管体腐蚀损伤检测的现状。MTM 检测技术沿着的管线路由实施检测，即可获取由管体缺陷而形成的磁场畸变信号，并记录其位置的相对距离和 GPS 坐标等信息，可对管道内壁较为严重的金属蚀失进行检测，还可对涂层（无论完好还是有缺陷）下的金属结构状态进行判别。通过专业的检测评估软件对检测数据进行软件分析及计算，可得到管道管体磁力异常位置、异常严重程度、安全运行压力和安全运行期限。对于管道内外壁上的金属蚀失都能够进行检测。而所有这些探测工作均可以在不中断管道的运行条件下进行。比起传统的检测方法，这项技术具有较高的检测精度、更低的检测费用，还可以在管线上任意管段内进行检测。

MTM 能够在非开挖的条件下探测管线上的如下类型的缺陷：

- 由管道负荷引起的下凹、塌陷、冲刷和渐变，所引起的管体变形的管段
- 各类金属蚀失，包括较为严重的内壁腐蚀缺陷
- 开裂型缺陷 - 任何形态的缺陷（点蚀、划痕、开裂和剥落）
- 焊接缺陷（环绕、微孔、开裂、融合不良、未焊透、移位、金属剥落）
- 挤压痕、褶皱、划痕等制造或施工过程导致的管体损伤

注意事项：

- a. 要求待检测管道为铁磁性材质，管径不小于 86mm，埋深不大于 15 倍管径；
- b. 要求实施检测时管段要带压运行；在做过漏磁法等强磁检测的管段 2 年内不适于用本方法实施检测。

3. MTM 检测的评价结果

MTM 技术是基于缺陷区域内局部应力的相应变化，根据磁-机械效应的机理来评价管道的危险等级的，而不是仅仅针对管体上缺陷的几何尺寸进行评估。也就是，对管道的失效危险等级的评估既要基于管道的几何参数，又要取决于管道缺陷区域上局部机械应力的水平。

在不发生失效事故前提下确定管道的运行参数，是在考虑了管道运行期间的条件以及金属结构的变化模式等因素下进行的。针对管段上危险等级指数 F 的计算，是将缺陷的磁性异常的长度，大小以及在一定背景数值之上的磁力强度向量的分布形状等因素考虑在内计算得出的。 F 指数基于检测出的缺陷的危险性计算得出。在背景数值下，缺陷的 F 指数反映的是检测出的磁场强度数值超出的程度。计算公式为：

$$F = A \times e^{1 - \frac{Q\phi}{QaH}}$$

这里： A - 磁场变化上反映管道缺陷（完全针对）特征的校正系数。在验证过程之后确定。

Q_{ab}, Q_{ϕ} - 在“平静”背景区域上的磁异常区间内，沿管道轴向上磁场强度的密度的分布。这些数值是以区间内磁场强度曲线的段长度来确定的。

$$dQ = \sqrt{dHx^2 + dHy^2 + dHz^2}$$

dHx, dHy, dHz - 磁场强度向量的各个维度上的变化数值。

dQ - 每个测量值的密度增加值。

以管道上金属管体缺陷的危险等级指数 (F) 为基础，应用下列公式计算获得管道的安全运行压力数值：

对一级缺陷的管段： $F [0,0.2]$

$$P_{safe} = 0.9P_{operating} + 0.05P_{operating} \times F$$

对二级缺陷的管段： $F [0.2,0.55]$

$$P_{safe} = 1.01P_{operating} + 0.05P_{operating} \times F$$

对三级缺陷的管段： $F [0.55,1]$

$$P_{safe} = 1.06P_{operating} + (0.95P_{design} - 1.06P_{operating}) \times F$$

这里： $P_{operating}$ — 检测时段的管道操作压力

P_{design} — 管道设计压力

P_{safe} — 计算得出的管道安全运行压力

基于这些数据利用下面的公式，可以计算出管道不发生失效事故的运行期限。

$$T_{safe} = K_p \times K_F \times K_t$$

这里： K_p — 考虑管道压力因素的系数。当管道运行是设计压力时 $K_p=1$ 。

$$K_p = e^{1 - \frac{P_{design}}{P_{operating}}}$$

这里： $P_{operating}$ — 检测期间的管道操作压力，单位：MPa

P_{design} — 设计压力，单位：MPa

K_F — 考虑了缺陷危害等级的系数

$$K_F = -2Lg(\sqrt{1-F})$$

K_t — 考虑管道运行期限因素的系数。

$$K_t = 10 \times \frac{T}{\Delta T}$$

这里： T - 管道运行的标准年限，年

ΔT — 管道的运行年限，年

4. MTM 检测流程

检测流程分为四个阶段：

1) 管道路由定位及地面非接触式扫描仪进行的地面磁信号收集。

注意事项：

- ① 磁记忆仪器操作人员身上不能穿戴铁磁性饰品（包括皮带扣、衣服纽扣、钥匙、手表等）及其它电子产品
- ② 实施数据采集过程中，仪器偏移管道中心线的水平距离不超过 5 倍管径
- ③ 沿管道轴线正上方间距不大于 100m（可视范围内）放置标志物，如彩旗、木桩等
- ④ 检测过程中记录房屋占压、与道路和沟壑的交叉、磁场干扰源等环境标志物的位置信息

2) 在完成对收集的数据进行初步分析之后，出具初步检测报告，主要内容是校验点的数量、位置和危险等级等信息。

序号	里程 /km	纬度	经度	缺陷编号	异常等级	危险指数
1	0.448	41.16534661	83.88730122	26	1	0.1431
2	1.072	41.17047627	83.8879725	43	2	0.4832
3	1.129	41.1708973	83.88835037	46	3	0.6848
4	1.685	41.17575956	83.88898722	58	2	0.5401
5	1.846	41.17714441	83.88888855	65	2	0.3023
6	3.453	41.16425919	83.8871303	74	3	0.7401
7	4.276	41.16431424	83.8871135	80	2	0.2305

校验点选取要求：

分别针对不同级别缺陷选择具有代表性的异常点进行开挖校验，每类缺陷的校验点数量为1至2个。以下情况需分别选取校验点：

- ① 埋深：深度变化超过10倍管径
- ② 环境：土壤腐蚀性差异较大，如土壤电阻率、含水率、PH值等
- ③ 管道：变径、新旧、材质发生变化
- ④ 特殊位置：弯头、三通、补口、积液位置等

3) 校验点开挖，直接检查进行定量分析，对该段的管道检测结果进行校验。

开挖后采用超声测厚仪、探伤仪等对管体上的缺陷进行定量分析，根据SY/T 6151-2009《钢质管道管体腐蚀损伤评价方法》标准7.1, 7.2, 7.3进行分级评定，评定准则如下：

类别	修复计划	评定与结论
1	立即修复	腐蚀程度很严重，应立即修复
2	限期修复	腐蚀程度较严重，应制定修复计划或降至安全工作压力运行
3	监测使用	腐蚀程度不严重，能维持正常运行，但监测使用，如果管体存在较大附加应力，应另行考虑

7.1 按腐蚀坑相对深度评定

7.1.1 腐蚀坑相对深度按式(1)计算：

$$A = \frac{d}{t} \times 100\%$$

式中：

A-腐蚀坑相对深度；

d-实测的腐蚀区域最大腐蚀坑深度，单位mm；

t-管道公称壁厚，单位mm。

7.1.2 如果 $A \leq 10\%$ ，属第3类腐蚀。

7.1.3 如果 $A > 80\%$ ，属第1类腐蚀。

7.1.4 如果 $10\% < A \leq 80\%$ ，按7.2, 7.3评定。

4) 依据校验结果对软件参数进行调整，使调整后的校验点结果与开挖结果一致，与此同时未开挖的异常点也进行了校准，从而提升最终检测结果的准确性。最后出具最终检测报告，报告内容包含校验点开挖结果、最终异常点信息统计表、安全运行压力和期限以及维修建议。

5. 工程应用案例

管线运行条件及安全历史：红山嘴联合站至采油一厂天然气处理站天然气输送管线（简称红克输气管线）。1990年11月投用，该管线是连接两个站场的唯一一条天然气输送管道，承担红山嘴地区天然气外输的重要线路。该管线在近年的运行过程中连续发生不定点的、全管段的腐蚀损伤、泄露等失效事故。2009年由于腐蚀损伤严重，更换管段50米；其余失效原因经查明主要是因为气质不稳定、腐蚀性严重，造成管段的腐蚀穿孔和管体开裂。

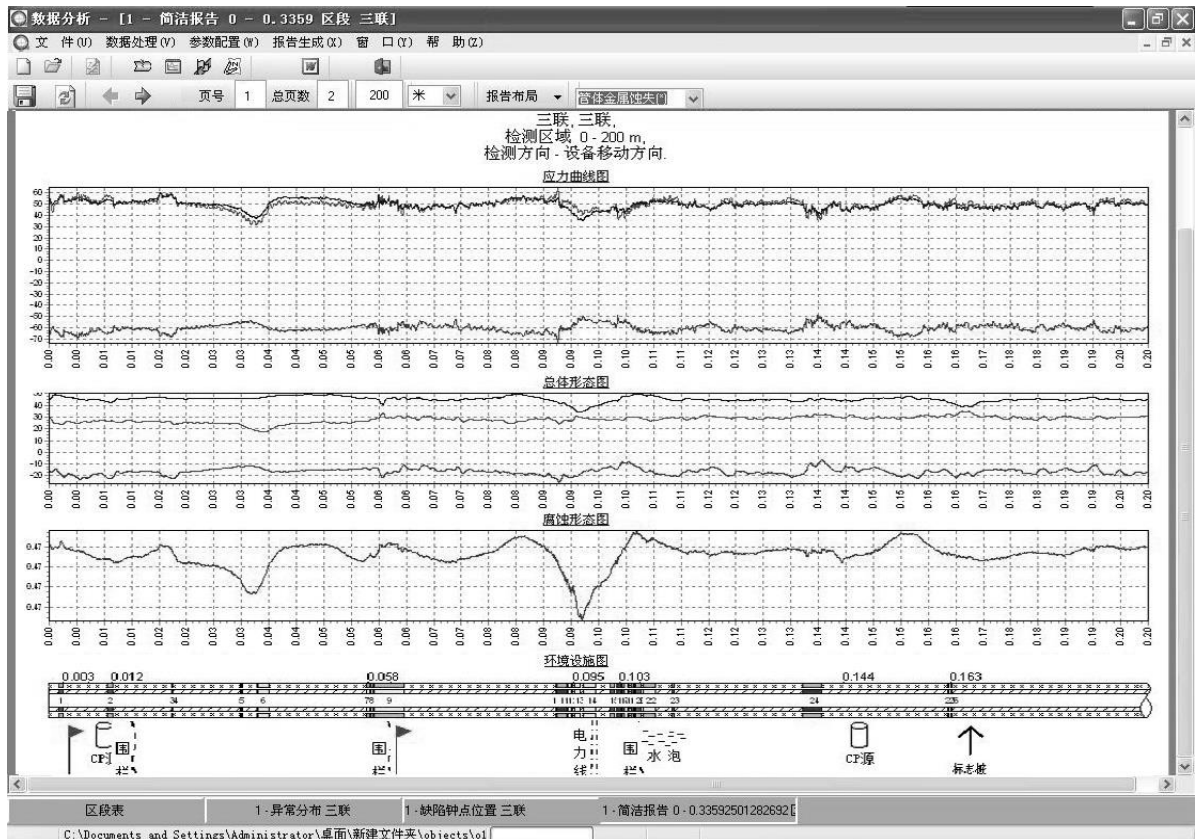
管线技术参数：

管道名称	红克输气管道
管体材质	20#
管径和壁厚, mm	159×8
外防腐层类型	沥青玻璃丝布
投产时间	1990年11月
设计/运行压力, MPa	3.2/0.6
管道长度, km	32.74

实施检测应用的设备：

英国雷迪公司RD8000PDL管线仪（管道的路由探测）；管道金属磁记忆检测JX-MTM检测仪（不开挖检测）。接触式TSC-3M-12应力集中磁检测仪、漏磁裂纹检测仪、超声波测厚仪等（进行管道缺陷的开挖验证）。

数据分析的软件界面：

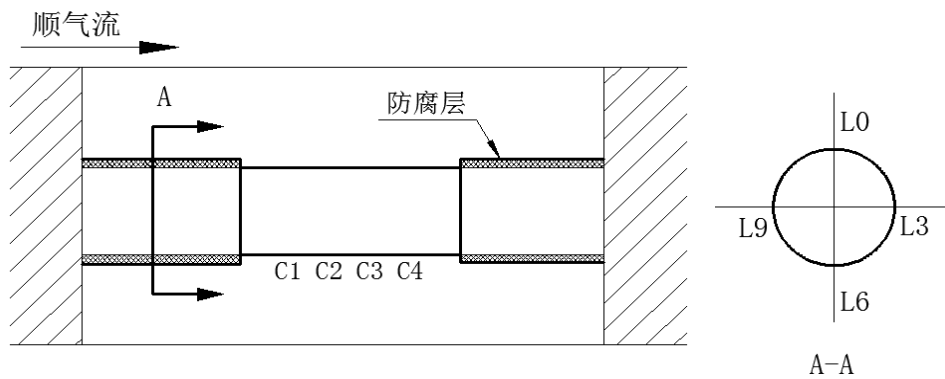


6. 检测结果和验证

2017年9月使用JX-MTM非接触式金属磁记忆检测仪，对采油一厂红克输气管线的整段32.74Km成功地实施了管体腐蚀损伤的检测。异常点的检测结果统计表如下：

检测区段	1级异常	2级异常	3级异常
红克线	12处	72处	238处

经开挖检验，最小剩余壁厚仅 2.8mm，发现 4 处壁厚损失超 50%的缺陷，并且存在严重面腐蚀情况。当前运行压力下，管道的安全运行年限最小的地方仅为 0.21 年，建议降压使用，许用压力为 0.54MPa。其中一处严重内腐蚀缺陷点开挖检测情况如下：



现场壁厚测量

测点处管道 12 点钟方位管体壁厚测量统计表

编号	厚度 (mm)	编号	厚度 (mm)	编号	厚度 (mm)	编号	厚度 (mm)
L0C1	7.62	L3C1	6.91	L6C1	7.22	L9C1	7.37
L0C2	7.52	L3C2	3.25	L6C2	6.84	L9C2	6.85
L0C3	7.53	L3C3	6.62	L6C3	7.31	L9C3	7
L0C4	7.64	L3C4	7.11	L6C4	7.32	L9C4	7.42

此次检测共开挖验证了 28 处管体异常点, 其中 1 级缺陷点 12 处, 2 级缺陷点 16 处。经检验, 壁厚损失超 50% 的有 4 处, 管体损伤 5 处, 腐蚀深度达 2mm 的麻点式面腐蚀 10 处, 管体存在直径超 2cm 焊瘤物 4 处, 焊缝缺陷 1 处, 轻微腐蚀 4 处。根据 SY/T 6151-2009 《钢质管道管体腐蚀损伤评价方法》标准进行评价, 缺陷严重性达到 1 级的为 10 处, 达到 2 级的为 14 处, 最终报告分析结果准确率为 85.7%。

维修建议:

1. 建议调整输送压力, 使其低于 0.54MPa, 立即将 12 处 1 级异常进行修复, 并最晚在 2018 年 9 月前, 对 72 处 2 级异常点实施修复并且监视管道运行状况;

2. 建议在 1 年后对 MTM 金属磁记忆检测结果中 2 级异常点进行有计划的复检, 这将有助于管理方监视管道上已经存在的异常点, 并对新的异常点做出及时的鉴别, 防止失效事故的发生;

7. 结论

通过在中石油新疆油田采油一厂 $\Phi 159 \times 8\text{mm}$ 红克线为代表等多个检测工程的成功应用, 证明了金属磁记忆检测技术在埋地钢质管道的非开挖管体缺陷检测领域的可用性和不可替代性, 以及嘉信公司 JX-MTM 检测仪和配套数据分析软件系统的成熟性。磁记忆检测方法的优越性在于: 不但能够对那些不可内检测的管道进行管体缺陷检测, 也可以对可内检的管道进行验证性的补充检测。MTM 方法具有实施便利、高检测精度、更低的检测费用等优点。非接触式的 MTM 检测技术不但可以检测出管体的腐蚀缺陷、管体的焊接缺陷, 还可以计算出管道的安全运行压力, 以及管道的剩余寿命, 在埋地钢质管道非开挖条件下实现管体腐蚀定量检测方面具有不可替代的优势。

红克线为代表的检测工程的成功实施已证明了 MTM 金属磁记忆检测检测技术比传统的腐蚀检测技术具有更强的适用性和检测能力。可以相信, 随着该技术在普遍应用中不断积累工程经验和仪器方法的不断改进提升, 会进一步提升检测仪器的抗干扰性能, 提高数据分析模型的普遍性以及检测结果的准确性, 为众多不具备实施内检测条件的管道提供强有力的管体缺陷检测和评价技术手段, 与管体的内检测技术手段形成有力的互补。