地下管道腐蚀检测工作中的几个问题

中国冶金地质勘查工程总局地球物理勘查院

李永年　　李晓松

摘要：陈述了埋地管道腐蚀检测的主要内容；对当前常用的几种评价防腐层性能方法的应用条件做了初步分析；提出了地下管道腐蚀与防护状况地面调查检测工作的新建议。

引言

金属腐蚀对地下管网正常运行构成极大危害，常常造成安全事故并引起环境污染，直接经济损失巨大。因此，对在线埋地管道的腐蚀状况进行检测，预估其安全险段、继而评价其剩余寿命是迫在眉睫的任务。

当前，地下管道腐蚀检测工作引起国家机关和管道权属单位的重视，腐蚀检测技术与服务市场也在逐渐形成。不少单位或企业声称能够承担地下管道腐蚀检测工程或者可以提供腐蚀检测技术服务。对于地下管道安全运行而言，这无疑是件好事。根据有关资料和所了解的情况，笔者就以下几个问题谈一点浅薄的看法。

1．关于地下管道腐蚀检测工作的任务内容

地下管道腐蚀检测工作的主要任务应包括以下三个方面：

(1)评价管体及其配设管件的金属腐蚀或疲劳损伤状况（定性）与程度（定量）；

(2)探查防护措施（内涂敷层、外包覆层、阴极保护或牺牲阳极保护等）是否老化、失效或者遭破坏；

(3)确定管道安全运行故障和隐患的空间位置，包括：

①管体及其配设管件腐蚀或疲劳损伤段（点）；

②防腐层剥离、老化、破损以及阴极（或牺牲阳极）保护失效部位；

③运行故障（应力变型与堵塞点、泄漏点）；

④管道缺陷（瑕疵、裂纹、蚀孔）等。

有些新开展地下管道腐蚀检测业务（其中多数是非腐蚀与防护行业）的单位或者企业，可以承担防腐层破损点定位和防腐层绝缘程度探测工作，但这仅仅是埋地管道腐蚀检测工作中的一部分。

2．关于防腐层性能评价工作中几个值得注意的问题

限于篇幅，这里只涉及防腐层绝缘性能探测工作中几个常见的问题，有关针对管体金属腐蚀状况的检测工作中的问题将另文叙述。

众所周知，开挖检测是最直接的手段。开挖后，包覆层绝缘性能检查与管体腐蚀状况调查同时进行，一举两得。定期抽样开挖检查，通常布置在易发生腐蚀部位或者怀疑发生腐蚀的部位。首先检查防腐绝缘层有无气泡、吸水、破损、剥离等现象，量测防腐绝缘层厚度，用电火花仪检测漏电分布情况；继而检查管体金属腐蚀状况，观察是否有蚀坑、应力裂纹等腐蚀现象，用测厚仪量测管壁剩余厚度并做出定性描述和量化记录；必要时现场取样送实验室按规定要求进行分析。开挖检测的缺点是评价准确性受采样率的限制，不仅评价难于全面，而且往往成本（包括道路修复费、青苗赔偿费等）较高，尤其是在城镇、工矿、厂区等构、建筑物密集地段难以实施。常常造成“挖了易腐，越挖越腐”的不良后果。因此，物理探测方法受到应有的重视。

采用物理手段来解决防腐层检测和性能评价问题，其核心在于解析一个复杂的信号传输系统。所涉及的参量包括：管道的管径、壁厚、空间几何状态和管材的电磁参数；防腐层介电常数和防腐层的厚度；管、内外介质分布的形式以及介质的电磁参数；所加载信号的特征和信号加载方式等。显然，同一理论基础上演化出来的不同探测或检测方法有其共性的问题。

（1） 应恰当地使用“传输线函数”

“传输线函数”被用来作为研究管道传输系统的数学—物理模型固然简单，但绝不能忽视它的应用条件（略去繁琐的推导过程，只给出结论）：①，单一直管道或者可以视为单一直管道（平行管道轴线水平间距大于其 1.5 倍中心埋深之和且无电性连接）；②，管道直径小于 5 倍中心埋深；③，以观测位置为中点，被检测管段的半长度不小于 10 倍管道中心埋深。在不具备应用条件的场合勉强使用“传输线”模型，必然得不到符合实际的检（探）测资料，甚至造成不良后果。

“传输线”模型在长输管道的腐蚀检测或探测工作中还是有不少应用机会的，但是在城镇和工矿、厂区就很难找到可以应用的场合，因此，必须研究和使用适应性更强的数学—物理模型。

（2） 不能忽视信号频率对所得防腐层绝缘电阻值的影响

当前常用的几种方法，如“皮尔逊法”、“多频管中电流法”、 “变频—选频法”

等加载的是某一频率的交变信号；“ 直流电位梯度法 ” 加载的是占空比为 2:1 的直方波，实际上是一个具有确定中心频率和带宽的 “ 波谱 ”。

计算防腐层的绝缘电阻，首先需要求取信号传播常数，但传播常数取决于表征管道传输系统特性的阻抗和并矢导纳，阻抗和导纳是传输系统对频率的响应函数。换言之，加载信号的频率不同，最终所得防腐层的绝缘电阻值也就不同。事实上，要保证检测结果的可对比性，对于不同的检测对象和检测环境而言，不仅涉及到如何选用一个 “ 最佳频率 ” 的问题，而且涉及到采用科学、合理的对比手段的问题。

如果采用改变频率使信号衰减到某个电平的办法来求取信号传播常数，那么每个检测段上所得到的是传输系统在某个特定频率下的传播常数。由此计算出的防腐层绝缘电阻值可以用来评价同一检测段上防腐层绝缘性能随管道运行时间而变化的情况（限定频率，对比电平变化；或者限定电平，对比所选频率的差别），能否用于不同检测段之间防腐层绝缘性能的比较和评价则需要斟酌。

（3） “ 等效电流 ” 不能简单地代替 “ 管中电流 ”

获得传播常数的实部——衰减系数的另一种方法是观测 “ 管中电流 ” 沿管道的衰减电平。传统的电流衰减法是在待测管段的起、止点上开挖，利用电桥法直接量测小段（1－2 米）管体上电位降并根据管材的电导率计算出起、止点上管中流过的电流从而得到电流衰减率以及待测管段的漏电阻。此种方法成本高、效果差，除非事不得已，一般情况下已很少使用。

上世纪九十年代英国 Ridiodetection 公司推出 RD600-CM，观测加载于管道上交流信号在地表引起的磁场，利用载流导线磁场原理换算出等效电流，然后根据等效电流梯度大小定性地评价防腐层绝缘性能好坏、确定防腐层破损点的大体位置。之后，Ridiodetection 公司又推出了 PCM，实际上是对 RD600-CM 做了专用化的改进，检测方法及评价内容则没有什么大变化。

PCM 在国内的销售数量已超过百台，为了尽可能地使其发挥作用并扩大其应用范围，一些同仁在假定由磁场换算的 “ 等效电流 ” 就是 “ 管中电流 ” 的前提下，把 “ 等效电流 ” 衰减率当作衰减系数并由此给出了 “ 定量 ” 评价防腐层绝缘性能的办法。实际上，传播常数是一个复数，它是传输系统功率损耗的表征参数。如果以实测的 “ 管中电流 ” 衰减率代替传播常数的实部——衰减系数，尽管不甚合理，还不至于在实用中造成难以接受的偏颇。然而，“ 等效电流 ” 并非 “ 管中电流 ”，它不仅受外界干扰磁场的影响，而且与围土介质的电磁特性有关。显然，只有在电磁干扰以及围土非均匀性可以忽略的情况下，“ 等效电流 ” 值才有可能近似 “ 管中电流 ” 值。顺便指出，增大

激励源的功率，虽然可以提高信噪比—抑制电磁干扰，但却不能减小围土非均匀性对“ 等效电流 ”的影响。

虽然此类方法原理上存在缺陷，但毕竟可以进行连续测量。在干扰小、围土介质变化不大的环境中，只要注意它的应用条件，且与已知情况作好对比，建立起界定管道防腐层绝缘性能级别的判断标志，用来定性评价管道防腐层是可以的。

（4） 管道的电磁参数选用要准确

在求取防腐层绝缘电阻的过程中，准确选用管道的电磁参数至为重要。应当知道，钢（铁）材的电磁参数并不等于管材的电磁参数，管材电磁参数受管径、壁厚以及管体类型（无缝、直缝、螺旋焊缝）的制约尤其显著；管内介质的电磁特性对管道的有效磁导率和有效电导率的影响也不容忽视，例如，在其它条件都相同的情况下，输水管道的有效电导率和有效磁导率与输气管道的迥然不同；管道运行时间越长，其有效电磁参数与初始埋设施时的差别也就越大。可见，仅仅经验性地指定管道电阻率是难于得到符合实际的检测结果的。

（5） 电感和电容并不“ 恒定 ”

采用 PCM（或其它同类探测仪）检测管道防腐层绝缘电阻所依据的是“ 线传输函数 ”理论，而且往往将问题简化为一个 R、L、C 输入—输出电路来解。在单频观测（这是目前最常用的手段）情况下，除了 R 以外，还需要给定电感 L 和电容 C 才能解出防腐层的绝缘电阻值。众所周知，电感 L 不仅与管道的有效电磁参数有关，而且还取决于管体的直径以及管外围土介质的电磁参数变化情况；电容 C 则与防腐层的厚度、结构以及组成物的介电常数有关。理论和实践都已经证实：无论管体金属腐蚀或者应力疲劳损伤都会导致其磁导率和电导率发生变化；防腐层老化或者充水的直接结果是其介电常数发生变化。显然，实际情况是电感 L 和电容 C 都不可能是“ 恒定 ”的，经验性地给定 L 和 C 或者它们的乘积 LC 都难于得到符合实际情况的检测结果。就此意义上而言，单频检测存在着明显的局限性和难以克服的缺陷。

（6） 管长的量度要准确

检测评价防腐层的绝缘电阻往往少不了对管段长度进行测量。为了保证衰减系数的计算精度，管段长度实地测量的相对误差不应大于 1%。当管段无弯曲（或拐、折点）而且与地面平行时，直接测量被测管段在地表投影的长度即可。但若遇到管道穿越、跨拱、弯曲、折拐、或与地面不平行时，显然不能以地面投影长度作为管段长度，而应当在竣工图上量取被测管段的实际长度。一般说来，腐蚀检测工作应建立在待测管道已查明（包括管道的各种附属设施）的基础之上。开展腐蚀检测工作时，应注重使

用新、全的图纸和相关资料。如果没有竣工图纸、或现有的图纸年代久远以致当前实际情况与图面不符、管道的结构标注不全等，都会给腐蚀检测工作带来一定的困难，影响检测结果的可靠程度。

（7） 注意辨识由管道周围介质不均匀所引起的“ 假异常 ”

检测防腐层缺陷（主要是破损）常常用电位梯度法（也叫皮尔逊法）。从原理上看，电位梯度法与电流衰减法并无二致，不同之处在于电位梯度法是在地面测量由管道包覆层破损创面漏入大地电流的电位分布状态，通过变向点（地表电位差零值点）确定破损位置在地表的投影并根据等位线形状判断创面大小和范围，仔细分析等位线和等梯度线特征还可以大致确定破损创面的空间位置。由于“ 点电流源 ”的电位分布与介质的均匀程度密切相关，因此，管道的围土变化，特别是管沟回填土不均匀最容易造成假异常，也就是假“ 变向点 ”，这是应当引起注意的问题。当发现“ 变向点 ”时，如果再用“ 磁场分布法 ”予以验核，可以排除大部分假异常。电位梯度法尚不能对包覆层性能做分级评价，但与其它方法共同使用可以得到较好的检测效果。

3．关于地下管道腐蚀与防护状况地面调查检测工作的建议

（1） 把管体腐蚀与疲劳损伤评价作为地面检测工作的首要任务

无论是对管体内、外实施涂敷、包覆，或者是在管道埋设后设置阴极保护与牺牲阳极保护，其目的都在于阻缓管体金属腐蚀、延长管道运行寿命。因此，腐蚀检测的首要目标是查明管体腐蚀状况和疲劳损伤程度。几年前，评价管体腐蚀程度只能通过开挖调查和管内检测来进行，效率低、成本高，可实施的对象和范围有限。目前，绝大多数的地面检测工作还仅仅局限于对防腐层绝缘性能的调查，阴极（或牺牲阳极）保护失效评价工作也未普遍开展，就腐蚀检测的主要目的而言，这显然是不全面的。近几年来，由李永年等人相继研发的“ 管体金属蚀失量评价技术 ”和“ 管道视综合参数异常评价技术 ”，实际应用效果较好，为在地面（不开挖）调查检测埋地管道腐蚀状况和疲劳损伤程度的工作补充了两种新手段。

（2） 埋地管道的腐蚀检测工作要有计划性和强制性

埋地管道腐蚀与疲劳损伤状况地面调查检测工作应当全面规划、分阶段、有层次地展开。与发达国家相比，国内城镇、工矿厂区地下管道建设的规划性差，各个权属单位在同一地段上“ 轮番开挖 ”屡见不鲜，人为破坏实属严重；相当多数的埋地管道只有防腐层，极少有阴极（牺牲阳极）保护设施；定期检测既缺少法规的保障，又缺

乏有效的检测手段和统一的技术标准。相对而言，长输管道的情况要好一些。

上世纪五十至八十年代初，为数不少的行业单位和城镇所敷设的管道是“ 三边（边设计、边施工、边投产）政策 ”影响下的产物，施工质量差、防护程度低，检测制度也不健全，管道运行故障和安全事故屡屡发生。对此类管道，首先需要强调的是整体调查,对于重点管段要适当安排监测，安全险段则要随时监测（如预埋特定传感器等)。

（3） 初始检测和定期检测都要制度化

管道建设竣工后，首先安排初始检测并详细纪录初始资料，作为以后检测的对比依据；

定期对管道尤其是腐蚀检测工作中发现的异常管段行检测，了解防腐绝缘层及管体腐蚀发展变化的规律，准确、客观地对管道运行状况进行评价和预测，及时进行必要的维修和护养；

定期对阴极或牺牲阳极的保护电位进行检测，如果保护电位达不到规定的要求或阳极（地床）耗尽，被保护的管道（部位）反而易受腐蚀；

（4） 规范埋地管道腐蚀检测的工作流程和地面调查检测技术，优化检测方法组合

针对不同检测阶段（层次）的具体检、监测目的，合理地安排检测工作的流程，选用恰当的检测手段。国内外现已问世的各类检测管线腐蚀的方法有其各自的适用范围和局限性，应用时要注意扬其长、避其短、使其优势互补，达到事半功倍的作用。注重检测效果的实际检验，逐渐优化出一套可规范的检、监测技术组合方案。

（5） 建设可标准化的腐蚀检测数据库和管理系统

埋地管道运行故障的形式多种多样，引起故障的因素也比较复杂。除了突发性的天灾人祸难以预料以外，通过对历次腐蚀检测所积累的数据、资料进行动态的对比和分析，可以及早发现问题以便采取措施消灭隐患，保证管道安全运行。为此，应尽早开发和建立规范化的“ 埋地管道腐蚀检、监测数据库 ”和智能化的“ 埋地管道安全运行综合信息评价预测系统 ”。

（6） 继续开发腐蚀检测评价新技术和隐患监测预警新技术

国内外现已问世的各类管线腐蚀检测方法有其各自的适用范围和局限性。目前，针对我国埋地管道建设与防护的历史特征以及在线管道运行现状，除了仍然需要继续研究开发准确、快速、轻便、经济、不影响管道运行的地面无损检测评价手段以外，还应当花大力气研究、应用腐蚀监测和隐患监测预警新技术，彻底化被动为主动，以保证埋地管道长期、稳定、安全运行。

参考文献

[1] 中国腐蚀与防护学会，《腐蚀科学与防腐蚀工程技术新进展》，1999 年，北京

[2] 中国腐蚀与防护学会及防腐蚀工程专业委员会，《 ` 99 全国第三届埋地管线防腐蚀工程技术交流会论文集》，1999 年，昆明

[3] 李永年等，《腐蚀检测技术与监测评估方法科研报告》，冶金地球物理勘查院，1999 年 12 月

[4] 李永年等，国内外埋地管道腐蚀状况物理检测技术现状，《岩土工程界》，2000 年第五期

[5] 李永年等，用脉冲瞬变法检测埋地金属管道腐蚀程度，《 ` 2000 国际表面工程与防腐蚀技术研讨会 论文集》，2000 年九月

[6] 李永年等，埋地管道金属蚀失量检测技术，《中国石油化工》，2001 年（上卷）

[7] 冶金地球物理勘查院，瞬变法在管道腐蚀检测中几个问题的探讨，《防腐保温技术》，2001 . No.1

[8] 李永年等，TEM 法管道腐蚀检测中的几个问题，《中国石油化工》，2001 年（下卷）