

# 埋地钢质管道外腐蚀直接评价方法 及实施过程

**摘要** 腐蚀检测和评价结果是确定埋地钢质管道的腐蚀损伤状况、制定维修方案的基础。腐蚀直接评价提供了对不能内检的管道实施腐蚀检测和评价的技术方法。在实施 ECDA 过程中,通过多种间接检测方法的配合使用,对于保证检测结果的可靠性、应对单一方法检测结果的局限性是非常重要的。

**关键词** 钢质管道、腐蚀检测、ECDA、外腐蚀直接评价

## 1. 引言

埋地钢质管道的外腐蚀检测及评价是对管道的外防腐层、阴极保护状况、管体腐蚀损伤、土壤腐蚀条件进行全面检测之后,结合管道的运行历史数据,对管体腐蚀现状进行评价的过程。准确地掌握防腐层的缺陷、阴极保护的有效性、土壤腐蚀条件等状况,通过确定位置并实施必要的开挖验证,进而确定缺陷管道本体的剩余强度等安全保障能力,是成功地实施外腐蚀直接评价的关键。近年来,在新行业标准的推动下,我国管道行业广泛开展了外腐蚀直接评价(ECDA)方法的实践,推动了管道安全管理工作水平的提高,取得了令人瞩目的进展,这对于应对日益严峻的管道安全形势,有效降低管道失效事故的发生频率,具有十分重要的意义。

由于埋地管线所处地域的不同,土壤腐蚀环境、外防腐层的状况、阴极保护有效性、输送介质、输送介质的运行条件等差异的原因,导致了管体腐蚀损伤状况的不同。这些差异使得在腐蚀检测的过程中,实施检测项目的侧重点应有所不同,也可能需要采用不同的间接检测工具和方法。特别是我国的大多数管道以前从未实施过 ECDA 方法,管道的历史数据缺乏,加之很多检测工程受预算经费的限制,不能完全达到 ECDA 标准中的要求。但是,通过贯彻管道完整性管理等先进管理理念,基于 ECDA 方法的技术原则,对于解决我国腐蚀检测评价中普遍存在的方法单一,数据可靠性不高,实施队伍技术水平参差不齐等问题,提高腐蚀控制水平,有效保证管道的运行安全,提高管道资产的效益等方面都会起到重要的推动作用。

## 2. 腐蚀检测的实施范围

在早先的行业标准 SY/T 0087-95《钢质管道及储罐腐蚀与防护调查方法标准》中规定了管道的腐蚀调查方法分为:全线普查、重点调查以及日常调查三类。其中全线普查涉及到检测的范围最为广泛,应用的仪器方法最多。而重点调查是在普查的基础上加深、细化和扩展某些检测项目。日常调查则主要是对管道的阴保设施运行、排流设施进行常规巡检,涉及内容较为简单。但在 SY/T0087.1-2006(最新版本为 2018 版)的标准中全面引入了 ECDA 的理念,强调的是腐蚀检测评价和管道维护的持续性和周期性,而不再将检测和评价分成不同的类型,也不再规定固定的检测周期,这是我国管道行业技术管理理念的飞跃<sup>[1]</sup>。

ECDA 方法是由美国腐蚀工程师协会(NACE)提出的,在其 NACE SP 0502 标准中对实施 ECDA 检测评价的流程、适用仪器及检测方法做出了明确的阐述。标准中规定对不同的管道条件在一个 ECDA 分段上至少要使用两种间接检测工具,以达到检测结果相互验证的目的<sup>[2]</sup>。ECDA 将外腐蚀直接评价的实施过程分为四个阶段,即预评价、间接检测、直接检查和后评价,本文所阐述的内容重点集中在前三个阶段上。

仔细研读 ECDA 标准会发现,进行管道外腐蚀直接评价是一个相当复杂的过程,且标准还强调针对特定管道实施 ECDA 过程在操作方法上要有必要的灵活性。要有效地实施 ECDA,对管道实施的检测范围是很宽泛的。除了新近竣工的大型管道工程之外,在我国多数管道上全方位实施 ECDA 过程是有困难的。其原因是管道的历史数据严重缺失,业主单位能够投入的资金严重不足等等。但这不应当成为拒绝应用先进理念和原则的理由。管道的运行管理单位完全可以基于完整性管理的理念,结合管道实际引入 ECDA 的技术原则,在保证腐蚀检测评价有效性的前提下,本着循序渐进的工作思路,开展 ECDA 方法的应用和实践。

根据天津嘉信多年从事管道腐蚀检测和评价的实践经验,推荐出一般腐蚀检测的项目范围:

#### 1) 管线腐蚀环境的检测

- ◆ 土壤电阻率的测定
- ◆ 氧化还原电位(细菌腐蚀)的测定
- ◆ 管-地电位测定
- ◆ 土壤及水的 pH 值测定
- ◆ 直流杂散电流干扰的普查

#### 2) 管道防腐层状况的检测

- ◆ 管线路由的精确定位、埋深测量
- ◆ 外防腐层破损点的精确定位
- ◆ 防腐层老化状况的检测和评价
- ◆ 防腐层机械理化性能的测定

#### 3) 阴极保护运行状况的检测

- ◆ 全线保护电位的密间隔测量
- ◆ 阴极保护有效性的评价
- ◆ 阴极保护系统故障的检测
- ◆ 牺牲阳极状况的检测

#### 4) 管体腐蚀状况的检测

- ◆ 管体腐蚀损伤检测点的布置
- ◆ 管体的机械损伤及缺陷形态
- ◆ 管体最小剩余壁厚测量
- ◆ 管体的剩余强度的评价
- ◆ 管体剩余寿命的估算

### 3. 腐蚀检测的实施方法和仪器应用

在 ECDA 工程中,根据管道的基本数据、运行历史数据和现场条件制定出详细的检测方案,属于 ECDA 的预评价阶段。预评价过程主要是在了解管道建设历史、运行维护历史以及当前状况的基础上,确定是否可以 ECDA 评价和如何实施。检测方案应包括如下内容:管道检测实施的项目、应用的间接检测方法、使用检测仪器以及相应的基础信息资料。基础资料应包括:

- ◆ 负责检测部门的组织和人员资料。
- ◆ 检测管线、管段和检验区的基础资料。
- ◆ 管道事故、进行检测和维修的历史资料

这些基础资料对于检测人员了解管线的敷设条件、阴极保护设施的运行状况等历史情况是十分重要的,因为只有全面、细致、准确地掌握这些情况,才能科学高效地开展检测工作。

#### 1) 土壤环境的检测

首先应从管道的腐蚀环境调查入手。对于管线运行年限较长,地面环境等许多因素会发生变化,土壤环境的腐蚀性调查是非常必要的。土壤腐蚀性的经典评价方法有“失重法”和“最大蚀孔深度法”,尽管这些方法更准确科学,但要通过埋设试片等待较长的自然腐蚀时间,受工期和经费等因素的局限,在实际工程不大可能采用。实际工程中往往依据历史资料结合当前管线条件,对土壤腐蚀性的主要影响因素进行仪器测量。采用土壤电阻率测量,参比电极测量氧化还原电位、管地自然电位,测量含水率和土壤酸碱度是常规的土壤腐蚀性检测评价方法。

土壤电阻率是表征土壤导电性能的指标,常用作判断土壤腐蚀性的基本参数。其测量方法可采用四极法的土壤电阻率测试仪,沿管线路由布点进行测量。也可用电磁型土壤电导测量仪(CMD)沿管道整个路由进行测量。

pH 值代表了土壤的酸碱度,可以使用 pH 测量仪进行现场测量,也可应用专用试纸测定。在强酸性土壤中,通过 H<sup>+</sup>的去极化过程直接影响阴极效果。对于 pH 值小于 5 的酸性土壤,通

常也认为是腐蚀性土壤。

土壤的含水率是反映土壤腐蚀性的另一指标。腐蚀性是随着土壤的湿度增加而增强，达到某一临界湿度时为止，湿度再进一步升高腐蚀性反而会下降。

此外，大地中杂散电流对管道的干扰会造成管道局部剧烈的电解腐蚀。杂散电流按其造成的干扰表现性质可分为交流干扰和直流干扰。直流杂散电流主要是由轨道交通设施、电解和电镀等直流电气设备接地装置等引起的。尽管交流杂散电流也对金属阳极有加速溶解作用，但对管体的腐蚀危害方面相对较小，作用机理也更为复杂。杂散电流的空间分布来源复杂、流动方向和强度变化多种多样，又可将其分为静态和动态两种。由于第三方管道上外加电流保护系统不合理的设置，也有可能形成直流电性干扰，这样的干扰形态稳定属于静态直流杂散电流；而电力机车给管道造成的干扰会随着机车的运行而变化属于动态干扰。传统的检测设备及检测方法较陈旧，测量数据的用途有限，不能对动态杂散电流进行有效测量。

嘉信公司的杂散电流测绘系统 JX-SCM 能够准确测定影响管道的杂散电流干扰位置、危害机理和危害程度，还能够检测出杂散电流在管道上分布状况，测定由杂散电流影响的管段，是检测评定管道上动态杂散电流干扰模式的一个有效方法。该设备配合 PDM 可精确定出杂散电流在管线上的流出点和流入点，测量出频率和方向，从而达到识别杂散电流的干扰源的目的。

## 2) 管道防腐层完好状况的检测

外防腐层的检测是我国当前开展最为广泛、技术成熟、检测成本较低的项目，应用仪器方法也具有较多选择。按防腐层检测的方法上划分可分为防腐层漏点检测、绝缘电阻率  $R_g$  的老化状况、防腐层破损严重程度计算评估三类。通常采用的检测方法有地面电位梯度法和电流梯度法两类。介绍相关方法的资料较多，仪器的选择和相应评价条件可参考资料<sup>[3]</sup>。

防腐层检测仪 PCM、DM 的应用已经很普及，嘉信技术的 PDM 也成功上市。这些仪器具有使用相对简便，可同时进行防腐层漏点精确定位和评价完好性等检测等优点。交变电流梯度法的评价软件（嘉信技术最新推出 C-ESTEC 云服务）已经很成熟。PDM 配套的智能 A 字架检测属于 ACVG 方法的范畴，具有检测精度高，检测效率较低的特点，对 PDM 的电流梯度检测方法形成了有利的补充。人体电容法防腐层查漏仪具有检测效率高，应用简便的特点，但抗干扰性能较差。对于环境简单的检测，特别对高土壤电阻率的地区是一个较好选择。它与 PDM 仪器配合使用，形成高低搭配，提高检测效率的同时可降低检测工程的成本。

随着管理和检测技术水平的提高，近年来 DCVG 检测方法在国内的应用越来越广泛。该技术是 NACE SP 0502 标准中首推的防腐层检测方法。尽管检测技术复杂程度大于 PCM 方法，但所能提供的管道信息也大大多于其他设备。DCVG 检测防腐层缺陷的形状和在管道上的环向位置、及破损的形状和等效面积%IR 等功能是其他方法无法比拟的<sup>[4]</sup>。对于有阴保的管道使用起来更为方便，对于没有阴保设施的管道同样可以通过直流发电机建立临时信号源来完成检测。

## 3) 管道阴极保护状况的检测

阴极保护方法是实施埋地管道腐蚀控制的常规手段。通常通过两种方法来实现，一是将管道与直流电流源的负极相连，利用外加的保护电流对管体进行阴极极化，这种方法称为外加电流阴极保护；二是在管道上连接一个电位更负的金属（如锌、镁）作阳极，与管道在电解质溶液中形成大电池，而使管体阴极极化达到不发生腐蚀的状态，这种方法称为牺牲阳极保护。

在日常的管道运行管理中，测量阴保的运行状况常规方法是用万用表加参比电极测量管地电位。但由于 IR 降的影响、以及测试桩的位置局限，在实施腐蚀检测的工程中则需要测量整条管道的断电位，应用的检测仪器是密间隔电位检测仪 CIPS。这种检测方法不但可以测量任意位置上的保护电位，而不受测试桩位置的局限，还可以有效地消除 IR 降的影响<sup>[5]</sup>。

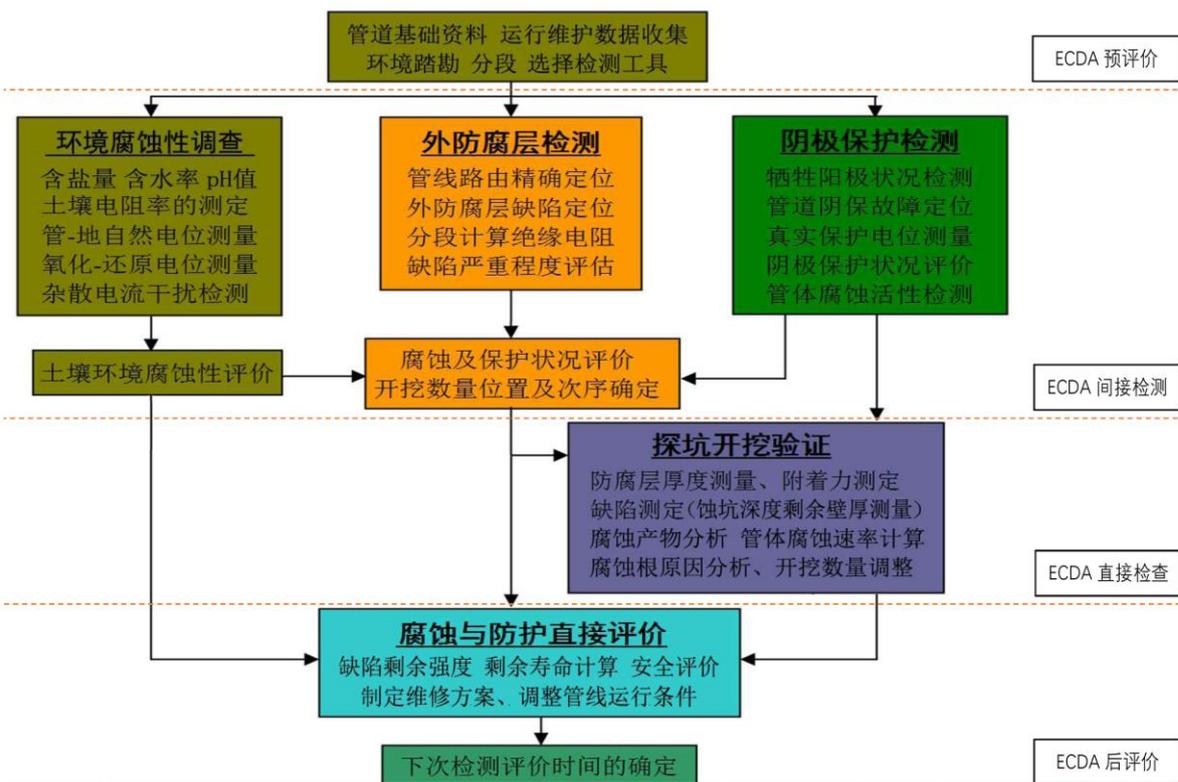
应用 PDM 检测仪进行阴保设施的故障查找和定位效果相当好。PDM 不但可以准确地找出管道因与其它金属搭接造成保护电流流失的位置，连接处绝缘失效等故障，还可以通过它特有的近直流信号，模拟管道上直流保护电流的分布状态。这是因为导致保护失效的多数故障是管道上应有的电绝缘设施失效，致使保护电流的大量流失，使部分管段未能达到有效的保护电位。测量绝缘状况的最直观方法是给管道施加一个特定的交流信号，通过检测信号的分布状况，找出电流流失的位置和原因。此外，还可以通过典型管段上信号电流的损耗情况计算外加电流保护所需的保护电流密度，为补建阴极保护设施提供设计依据。

#### 4) 开挖验证和管体腐蚀状况的调查

在确定出防腐层漏点和保护电位过低段的位置后，ECDA 过程中进入直接检查阶段。该阶段主要通过开挖的方法确定管体腐蚀状况以及验证间接检测方法的准确程度，完成管体腐蚀缺陷的程度和腐蚀原因的分析。管体腐蚀损伤是腐蚀与防护及安全评价中最为直接、最为重要内容。近年来广泛兴起的管道风险评价和适用性评价技术，就是根据管体腐蚀损伤的缺陷尺寸，通过剩余强度等可靠性分析，确定管道下一步维修、安全操作压力调整、能否继续服役等问题。

对管体腐蚀状况的调查，目前主要的检测技术和手段基本上都是在开挖条件下进行的。在开挖后可以采用超声测厚仪、涂层测厚仪以及卡尺等基本 NDT 检测工具完成腐蚀缺陷的测量。一般的检测工程建议参照 SY/T 0087.1 对腐蚀缺陷尺寸进行测量，并按 5.8 节中给出缺陷的现场快速评价方法得出缺陷的安全级别。特殊需要时应用 SY/T 6151，SY/T 6477 等标准的方法进行缺陷的剩余强度计算，进行缺陷危险等级的评价。此外，还要根据腐蚀发生的形态，腐蚀产物的分析，找到发生腐蚀的根本原因。在综合管体腐蚀缺陷状况和腐蚀条件的基础上，可以计算管体的腐蚀速率以及估算管道剩余寿命等重要参数。

### 4. 腐蚀检测及评价的工作流程



ECDA 方法中的后评价, 是对实施过程的前三个阶段的回顾和总结。通过后评价过程, 确定实施 ECDA 检测、评价以及实施管道维护维修的有效性, 确定是否对管线已经存在的腐蚀和防护方面的问题采取了有效的解决和应对措施。通过这个过程找出 ECDA 实施过程中的不足, 在以后的工作中加以改进和提高。此外, 后评价的另一个重要任务是根据管道现有的腐蚀状况, 已经确定的管体腐蚀速率, 计算出管道的剩余寿命, 整个管线中最短的剩余寿命的一半, 就决定为实施下一次 ECDA 评价的时间间隔。

在管道腐蚀检测评价的实施过程中, 外业/内业分工协作是非常重要的, 工程组织者一定要注意各个环节之间的衔接和配合, 尽可能保证环节中数据的完整性和可靠性。其工作流程如上图所示。

## 5. 结束语

埋地管道腐蚀检测评价工作是一项复杂艰苦的系统工程, 这对检测评价工程的组织和实施提出了很高的管理要求。特别是外业检测工作不但需要扎实的技术功底, 还需要现场经验积累的过程。在完整性管理理念和 ECDA 标准流程的引导下, 结合具体的工程实际规划出合理有效的检测方案, 对可能实施的检测项目进行必要的取舍, 通过检测工具的合理选用, 取得必要的、科学准确的腐蚀和防护数据至关重要。腐蚀评价的过程则是依照科学的评价模型和方法, 使用评价工具和软件得出反映管道真实腐蚀状况的描述信息和数据, 并在此基础上制定出管道的维修方案, 取得管道腐蚀控制的有效途径。

管道的腐蚀控制过程实际上是三分技术七分管理的工作。实施管道的腐蚀检测和评价是有效地提高运行管理水平, 有针对性地采取管道风险的控制措施, 减少维护费用的有效途径。相信随着新标准、新理念、新技术方法和设备的应用, 可以有效地提高管道检测工程的资金效用; 通过科学合理的管道维护方案的制定和实施, 可以实现控制管道的腐蚀进程, 延长管道的服役年限, 促进我国的埋地管道腐蚀与防护评价及运行管理水平达到新的高度。

(林守江于 2024 年 10 月修订)

## 参考文献

1. SY/T 0087.1-2006 钢质管道及储罐腐蚀与防护调查方法标准-埋地钢制管道外腐蚀直接评价方法
2. GB/T 19285-2014 埋地钢质管道腐蚀防护工程检验
3. NACE SP 0502-2010 Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology (ECDA)
4. 林守江 埋地钢质管道腐蚀检测方法及管理模式 石油化工腐蚀与防护 2000.06
5. 天津嘉信技术工程公司培训教材 埋地管道外防腐层破损检测的 DCVG 技术 2021.07
6. 天津嘉信技术工程公司培训教材 埋地管道密间距电位检测 CIPS 技术及应用 2021.06
7. 天津嘉信技术工程公司培训教材 杂散电流对埋地管道动态干扰的检测治理方法及工程实践 2017.08
8. 林守江 埋地管道腐蚀综合检测评价技术 《中国石油学会第三届腐蚀与防护研讨会论文集》 2003.10

## 作者简介

林守江 工学硕士, 高级工程师, 南开大学客座教授, 中国腐蚀与防护学会防腐蚀施工与技术专业委员会副主任委员, 全国防腐蚀标准化技术委员会 TC381 专业委员, 全国防腐蚀工程检验检测专业委员会副主任委员。1990 年毕业于北京航空航天大学软件工程专业。多年从事埋地管道检测技术、腐蚀评价方法的研究, 以及腐蚀检测设备的推广应用, 发表学术论文 30 余篇。现任天津嘉信技术股份有限公司董事长。