

标准及检测

埋地环境下容器外腐蚀检测技术浅析

黄颖军, 楼淼, 芦玉峰, 周萌

(西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 通过分析皮尔逊检测法、交流电流梯度法、直流电位梯度法和密间隔极化电位法等几种埋地环境下管道外腐蚀检测技术的工作原理及技术特点,研究了这几种方法用于埋地环境下容器外腐蚀检测的可行性。同时,提出了电阻探针法、电感探针法、场信号法、耦合多电极腐蚀监测等几种外腐蚀在线检测技术,为开展相关工作提供了理论参考。

[关键词] 埋地容器; 外腐蚀; 在线监测; 检测技术; 可行性

[中图分类号] TG172.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)04-0122-05

Analysis of Detection Technology for the External Corrosion of Buried Vessel

HUANG Ying-jun, LOU Miao, LU Yu-feng, ZHOU Meng

(The North-west Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] By analyzing the working principle and technical feature of the detection technology for the external corrosion of buried pipeline, including pearson, pipe current mapping, direct current voltage gradient and close interval potential survey, the feasibility of the external corrosion detection of buried vessel by these methods was analyzed. Meanwhile, several on-line external corrosion monitoring technologies of soil corrosion were introduced, such as electrical resistance probe method, inductance probe method, field signal method, coupling electrode corrosion monitoring, etc. which offered theory reference for doing correlative work.

[Key words] buried vessel; external corrosion; on-line monitoring; detection technology; feasibility

在某些工程中,经常会将一些严重污染环境,甚至危及人类生存的有毒物质用密封容器进行填埋处理,为保证容器内物质在危险期内不发生泄露,通常在密封容器外涂覆重防腐涂层,并用阻水性优良的膨润土作为回填材料,对容器进行填埋处理,以减慢涂层的腐蚀,延长安全年限^[1]。但仅仅如此并不能可靠地保证容器的密封安全,即使定期采集土样分析土壤成分,也只能是在有毒物质已经泄漏的情况下检测到异常,此时周围环境已经受到不同程度的污染,再处理则存在较大的危险。要想解决上述问题,就必须采用一种能定期检测容器外腐蚀状况的技术,从而在容器基体受到腐蚀前,发现涂层破损位置,及时处理。

容器被填埋在地下几米深处,膨润土回填时采用压实处理,不利于开挖,因此无法采用常规的电火花检

测技术、超声波检测技术、涡流检测技术等接触式检测手段进行检测,必须引入埋地环境下容器外腐蚀检测技术,在不开挖的条件下,实现涂层缺陷的地面检测。目前,关于埋地环境下密封容器外腐蚀检测技术的研究报道非常少,大部分检测技术都是针对石油化工领域埋地长管道的。国内外埋地管道常用的外腐蚀检测方法主要有 Pearson 检测法、交流电流梯度法、直流电位梯度法、密间隔极化电位法等^[2],但容器与管道在外形上存在较大区别(密封容器一般长度为数米,直径为几米,且尺寸不均匀;管道一般为几十公里,直径较小,且均匀),这些测试方法对于埋地密封容器的外腐蚀检测效果有待理论和实验考证。文中通过分析上述几种测试方法的原理和特点,研究了这几种方法用于埋地环境下容器外腐蚀检测的

[收稿日期] 2013-03-25; **[修回日期]** 2013-04-15

[作者简介] 黄颖军(1987—),男,浙江人,硕士,助理工程师,主研究方向为腐蚀与防护工程技术。

可行性,并提出了相关建议,为将来开展相关研究提供理论参考。

1 常用埋地管道外腐蚀检测技术分析

1.1 Pearson 检测法

Pearson 检测法的工作原理为:在管道与接地棒之间施加特定频率的交流信号,使两者形成回路。当管道外防腐层完好时,管道中电流信号将沿管道均匀衰减;当管道外防腐层存在破损或绝缘不好时,电流将会从破损点漏入土壤中,并在破损点和土壤之间形成电势差。采用高灵敏度探测仪可以测出两点之间的电势差,当电势差接近零时即为破损点正上方^[3-4]。

该方法的优点是操作简单,测试效率高,适合野外操作,能够准确、快速地定位防腐层的缺陷位置;不足之处是不能准确判断破损点的大小,不能检测防腐层的轻微腐蚀和剥离现象,不适于局域性管网。这种方法一般可测深度 3 m 以内、10 mm² 以上的管道防腐层破损面积,定位精度在±0.5 m 范围以内^[5]。

1.2 交流电流梯度法

交流电流梯度法,即管中电流测绘法(Pipe Current Mapping,PCM),是向埋地管道发射接近直流的 4 Hz 交流激励信号,当电流沿管道传导时,由于管道与地面之间存在分布电容及防腐层电阻,所施加的电流信号强度沿管道随着距离的增长呈缓慢的指数衰减趋势,并会在管道四周产生相应的电磁场,通过磁力仪(接收机)测量地表磁场强度就可准确测定管道中电流的大小,并通过分析电流变化,实现对管道防腐层质量的评估^[6]。

交流电流梯度法的优点是:检测速度较快,自带信号发射机,操作简便,查找涂层缺陷位置的精确度在 5 cm 以内。缺点是:测试员必须具备丰富的经验和技巧,否则不但找不出准确的缺陷位置,还容易给出不存在的缺陷信息;对涂层剥离但尚未露铁的破损点不易指示;不能指示 CP 效率,易受地电场干扰。

1.3 直流电位梯度法

直流电位梯度法(Direct Current Voltage Gradient,DCVG)的基本原理是:对管道施加一个直流信号,信号沿管道传输,当遇到防腐层破损点时,就会以破损点为中心形成一个球形辐射状衰减电位场,在破损点到地面间形成电压降 ΔU ,如图 1 所示。通过高灵敏度的电压表在地面上测试 2 个 Cu/CuSO₄ 半电池电极的电位差,可找出电位场中心(电压表指针指示为零),从而确定破损点位置。依据土壤电压降占管道对地电压的百分比,可计算出涂层缺陷的大小和破损点的严重

程度,越靠近管道的破损点,电压梯度越大,流失的电流也越大。其判断标准为:(0% ~ 15%) ΔU 是小破损点,(16% ~ 35%) ΔU 是中破损点,(36% ~ 100%) ΔU 是大破损点^[7]。

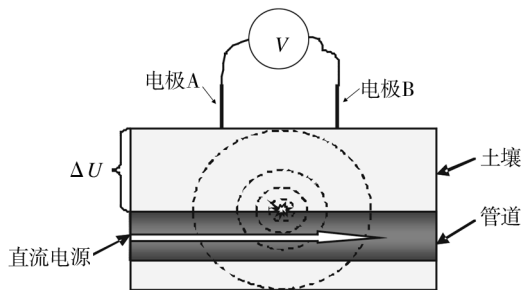


图 1 直流电位梯度法原理示意图

Fig. 1 Sketch map of direct current voltage gradient

为区分管道上的其他直流信号,如长线电池、杂散电流等,要通过特殊设计的中断器,以 1/3 s (开) 和 2/3 s (关) 的比例,向管道施加不对称的直流信号。对于不带阴极保护的管道,可以在管道测试中,用电池或直流发电机临时建立这种系统。直流电位梯度法不受交流电干扰,受地貌影响小,操作简单,准确度高,但不能判断剥离^[8]。

1.4 密间隔极化电位法

密间隔极化电位法(Close Interval Potential Survey,CIPS)是通过测定阴极保护系统的效果,间接反映外防腐层保护状况。测试时,采用一个高灵敏的毫伏表和一个 Cu/CuSO₄ 半电池探杖,以 1 ~ 3 m 为间隔,沿管道测量电位数据,并绘制连续的开/关阴极保护电流管地电位曲线图^[9-10],如图 2 所示。当外防腐层存在破损时,该处电流将导入土壤,使密度增大,保护电位升高,当电位高达一定数值时,在地表就可检测到。当电位(Cu/CuSO₄ 参比电极)高于 -850 mV 时,管道就会发生腐蚀。

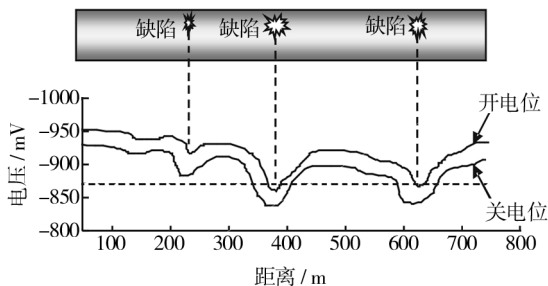


图 2 密间隔极化电位法原理示意图

Fig. 2 Sketch map of close interval potential survey

为实现外防腐层缺陷的准确定位及大小评判,常将 CIPS 法与 DCVG 法相结合,先用 CIPS 法进行保护状况全面评测,再用 DCVG 法对存在严重腐蚀的管段进行精确定位。CIPS 法测得的管-远地电位可用于 IR

(Ir drop, 电压降)值的计算,通过测量,确定防腐层缺陷处的保护度,并对防腐层缺陷大小定量,根据每一个缺陷的 IR,确定缺陷的大小和被腐蚀程度。

该方法能准确找出外防腐层的缺陷位置,可估算缺陷大小,并通过 IR 判定缺陷的大小,并且抗交流电干扰能力强,精度高,操作简单。但该方法不能指示管线阴极保护效果,无法识别涂层的剥离,并且土壤电阻率、杂散电流等因素对测量结果存在一定干扰^[11]。

2 针对埋地环境下容器外腐蚀检测的可行性分析

根据上述几种腐蚀检测方法的原理分析,对其用于埋地环境下容器外腐蚀检测作出如下可行性分析。分析中假设:密封容器外形为圆柱状,直径为 2 m,长为 10 m;填埋深度为 4 m(容器低端到地表距离),所用填埋材料成分均匀(膨润土),电阻率适中,周围环境利于接地;容器一端焊有导线连接到地表(导线与容器连接处的腐蚀暂不考虑)。

2.1 Pearson 检测法

采用 Pearson 检测法对埋地容器施加特定频率交流信号时,由于环境接地良好,可以形成回路。同时由于容器不长,在外防腐层完整的情况下,电流衰减不明显,可视为等势体,在上方地表任意两点电势差均接近于零(排除存在干扰的情况)。当外防腐层出现缺陷时,电流会从该点流失,采用两根高灵敏度探测仪可在地表测出相关电势差异常。但由于容器直径较大,如果缺陷位于容器下半部分,或者上、下半部分的缺陷垂直投影重合,将无法判断缺陷具体位置,加之该法定位精度为 ± 0.5 m,所以不适合容器具体缺陷位置的精确定位,但该法可以用于粗略地判断外腐蚀层的完整程度。建议在外腐蚀层完整的情况下测量电势差数据,将使用一段时间后的电势差与之进行比较,若存在差异,则可以定性地判断外腐蚀层发生了变化,并采用更精确的方法进行测量。

2.2 PCM 检测法

如果采用 PCM 检测法,当大功率发射机施加准直流 4 Hz 交流激励信号于外防腐层完好的容器上时,由于容器不长,外防腐层电阻较大,无法产生明显的电流信号,容器成为等势体,因而在地表的磁力仪无法测得磁信号,可反向推断涂层完好。当容器防腐层绝缘性能变差或有漏点存在时,电流与土壤导通,形成回路,电流信号加强,从接收机处反而可以看到信号,并且缺陷点到容器另一端的电流信号微弱,有助于找到破损点位置。但是当存在较大 IR、电流衰减等干扰时,信

号会变弱,影响测量精度。该方法相对于 Pearson 检测法,同样存在容器尺寸太大,无法立体定位缺陷的难题,考虑可以通过测量容器填埋方向平行的正上方、左右两侧多个部位来减少缺陷的遗漏。该方法对容器缺陷所在横截面位置的定位精度比 Pearson 检测法高,因而具有一定实用价值,有望用于容器外腐蚀状况的检测。

2.3 DCVG 检测法

通过 DCVG 法检测时,对没有采取阴极保护的容器,需用电池或直流发电机施加直流信号。对于大直径的容器,同一截面处的多个缺陷之间的相互干扰不可忽略。图 3 给出了同一截面两个不同位置缺陷(A 和 B)的电场分布情况,假设两处缺陷特征相同,则 A 点在地表的电位高于 B 点,B 点电位被 A 点覆盖,在地表测得的电位中心在 A 点正上方,但 A 点左侧的电位梯度高于右侧,可分析出右侧存在覆盖缺陷。对于非同一截面的相邻缺陷也同样存在这种情况。因此,综合测量(横向和纵向均测量)时,会出现多个缺陷信号相互叠加的情况,将很难分析出缺陷数量和位置,在一定范围内会出现电位最高点,但无法用于确定缺陷的具体分布,此时根据土壤电压降占容器对地电压的百分比,只能判断一定区域的涂层整体破损程度,无法精确到点。

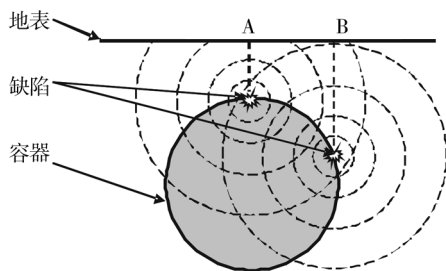


图3 直流电位梯度法测容器缺陷示意图

Fig. 3 Sketch map of detecting the vice by DCVG

针对这种情况,可以考虑将容器正上方的电位数据进行综合分析,绘制出三维等压线图,类似于电位等势图,并与容器外防腐层完整时的电位图谱作比较,可有助于分析容器缺陷分布情况及整体腐蚀状况。当等压线图呈同心圆分布时,则缺陷在容器上方;若为椭圆时,则在下方;若为长条状,则为连续缺陷。

2.4 CIPS/DCVG 联合检测法

用 CIPS/DCVG 联合检测法检测埋地容器时,若容器有阴极保护,则采用阴极保护电源作为信号源;若容器无阴极保护,则用蓄电池或直流稳压电源提供直流信号,并用中断器进行中断,以区别直流干扰。

采用 CIPS 法对容器进行全面评测时,由于容器直径较大,测量开/关电位时,需对投影面积上的点进行

较全面的测量,最后将各部位数据汇总,作成三维图。如图 4 所示,所有电位高于 -850 mV 的面(图 4 中灰白色以上部位)对应的容器位置都存在腐蚀;同时,根据容器对地电位数据计算出的 IR 值也可在一定程度上反映缺陷的大小及腐蚀程度。采用 DCVG 法进行缺陷定位的情况在前文中已有介绍,结合 CIPS 法所得的电位分布数据,有利于提高缺陷定位精度,减少误判几率,尤其是对于较大缺陷的定位。当容器的腐蚀状况用该法可以测得准确数据时,说明阴极保护基本失效,外防腐层破坏严重,应开挖补涂,防止发生泄漏事件。

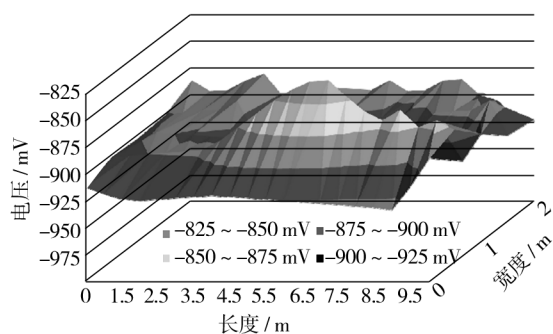


图 4 容器电位分布三维示意图

Fig. 4 3D sketch map of the potential distribution of the vessel

3 其他检测方法

由于容器不长,填埋环境成分均匀,可以认为各部位腐蚀环境比较接近,因此可以考虑采用原位土壤腐蚀在线监测技术,实现对容器外腐蚀状况的原位实时监测。目前,技术较成熟的土壤腐蚀在线检测技术主要有电阻探针法、电感探针法、场信号法、耦合多电极腐蚀监测技术等。

3.1 电阻探针法

电阻探针法的原理为:在土壤中插入与容器材料相同的金属,由于金属腐蚀大体是均匀的,因此金属的横截面积将因腐蚀而减小,此时电阻的变化率就与金属的腐蚀量成正比。通过周期性地测量电阻增加,就可以计算出该段时间内的总腐蚀量,并可计算出平均腐蚀速率^[12]。

针对带外防腐层的容器,可以考虑在探针外刷涂相同的防腐层,然后将探针填埋在容器附近,使探针和容器腐蚀环境相同,通过观察探针腐蚀状况,可预测容器的腐蚀状况。涂层失效前,信号稳定;失效后,基体受腐蚀,可检测到电阻增大的信号。

3.2 电感探针法

电感探针法由电阻探针法演化而来,其灵敏度和稳定性均比电阻探针法高。电感法是通过在金属探针

内安置感应线圈,通过测量横截面减小引起的感抗(感应电阻)变化来反映金属腐蚀量。该方法响应时间为电阻探针的 $1/100 \sim 1/2500$,灵敏度很高,可采用与电阻探针相同的填埋方法对埋地容器进行实时原位检测^[13]。

3.3 场信号法

场信号法也由电阻探针法演化而来。它是将一系列探针以阵列形式附着在被检件上,间隔约为壁厚的 $2 \sim 3$ 倍,然后对被检件施加外加电流,当电流通过时,由于金属电阻的存在,会产生相应的压降值。当腐蚀发生时,金属横截面积减小,感应探针之间的电阻值增大,电流流经该区域产生的电压降值也将增大,通过比对初始电位分布信号和发生腐蚀后所测得的电位信号,就可确定腐蚀的影响。该方法的名义灵敏度为壁厚的 0.1% ^[13]。

检测带外防腐层的容器时,也可通过在探针上刷涂相同的防腐涂层,并按技术要求附着在容器上,检测腐蚀信号。涂层失效前,容器和探针的基体均未发生腐蚀,由于涂层电阻较大,电压降很大;涂层失效时,电阻骤减,就可检测到电压降减小。

3.4 耦合多电极腐蚀监测技术

耦合多电极腐蚀监测技术始于 20 世纪 90 年代,是一种新兴的腐蚀监测技术。其工作原理为:在耦合多电极传感器中,装有多与与被测件材质相同的耦合电极,部分电极具有阳极性质,部分电极具有阴极性质,电子从阳极通过外电路流向阴极,形成腐蚀电流,如图 5 所示。通过测量该电流,就可定量地确定局部腐蚀或不均匀腐蚀的速度,具有灵敏度高(耦合多电极矩阵传感器的测量精度为 $0.1\text{ }\mu\text{m/a}$)、数据处理简单和测量领域广泛等特点^[14]。

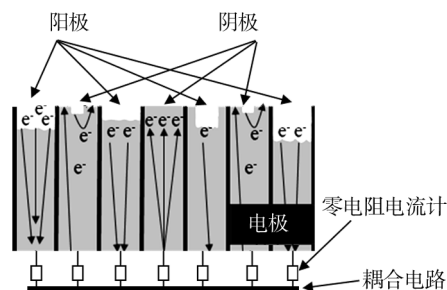


图 5 耦合多电极腐蚀传感器示意图

Fig. 5 Sketch map of the coupled multielectrode array sensor

该技术应用于埋地容器检测时,可在电极顶端刷涂与容器相同的防腐涂层,填埋于容器附近,实时检测腐蚀速率。通过对一段时间内检测的腐蚀速率进行积分求和,就可以计算出腐蚀累积量,进而可以判断出涂层是否失效。

4 结语

埋地管道外腐蚀的纵多检测方法用于埋地环境下容器外腐蚀检测时,各有优缺点,且和测试员的经验技能关系较大。采用多种技术联合检测的方法,有望检测到更可靠的缺陷信息,可实现对容器的安全监控。

采用电阻探针法、电感探针法、场信号法、耦合多电极腐蚀监测技术等土壤腐蚀在线检测技术,有望实现对埋地环境下容器外腐蚀状况的原位监测,可用于考核容器涂层的有效性。

[参 考 文 献]

- [1] 陈洪玉,刘兴,教立新.埋地煤气管道局部腐蚀原因分析[J].表面技术,2006,35(4):80—81.
- [2] 时乔伟,孙雷.埋地钢质管道外腐蚀检测技术[J].石油天然气学报,2009,31(4):371—373.
- [3] 车立新,孙立国.埋地钢管外防腐层直接检测技术与方法[J].煤气与热力,2007,27(1):1—4.

- [4] 李久青,杜翠薇.腐蚀试验方法及监测技术[M].北京:中国石化出版社,2007.
- [5] 王新华,马永超,何仁洋,等.埋地钢管交流电流检测技术[J].石油机械,2008,36(6):37—41.
- [6] 周小博.PCM在埋地管道检测中的应用[J].科技情报开发与经济,2009,19(2):161—164.
- [7] 杨永.埋地钢管外防腐层破损检测中的电位梯度法[J].管道技术与设备,2008(3):55—56.
- [8] 巢栗苹.用直流电位梯度法测量埋地管道防护层缺陷位置的模拟试验[J].腐蚀与防护,2008,29(5):257—259.
- [9] 黄昌碧,陈晖,宋根才,等.管道防腐层检测技术现状及发展[J].石油仪器,2003,17(5):5—7.
- [10] 秦国治,丁良棉,田志明,等.管道防腐蚀技术[M].北京:化学工业出版社,2003:273—286.
- [11] 段晓云,李谦定.密间隔电位检测技术(CIPS)在榆林气田的应用[J].石油化工应用,2010,29(10):88—92.
- [12] 李久青,杜翠薇.腐蚀试验方法及监测技术[M].北京:中国石化出版社,2007:229—233.
- [13] 杨列太(美).腐蚀监测技术[M].北京:化学工业出版社,2012:205—216.
- [14] 王永红,鹿中晖,李英志,等.成都站金属材料土壤腐蚀原位测试研究[J].装备环境工程,2009,6(1):1—4.

《电镀与环保》征订启事

由上海市轻工业科技情报研究所主办的技术类科技期刊《电镀与环保》杂志创刊于1981年,是我国表面处理领域内有影响的、技术上具有一定先进性与实用性的专业杂志之一。从1988年起,即被中国科技情报所列为该所国家科委委托项目的统计用期刊。现为中国科技核心期刊、中文核心期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊。

多年来,《电镀与环保》杂志先后荣获国家优秀科技期刊三等奖、中国轻工业部优秀科技期刊一等奖、中国轻工业总会优秀科技期刊二等奖、上海市优秀科技期刊三等奖、上海市新闻出版(版权)业“迎世博600天行动计划——期刊编校质量检查”优秀奖和第四届华东地区优秀期刊奖。2001年,《电镀与环保》杂志列入“中国期刊方阵”(社会效益、经济效益)双效期刊名单。

《电镀与环保》的常设栏目有:电镀、化学镀、涂装、阳极氧化膜、化学转化膜、污染治理、分析测试、经验、文摘、产品介绍、简讯等。

《电镀与环保》全年6期,单月月底出版,邮局发行(报刊代号4-328)。国内订户每本定价5.00元,全年30元(港澳台地区15美元)。国外订户全年25美元。也可汇款到编辑部补订。

地址:上海市余姚路607弄19号 邮编:200042

电话/传真:021-62303415

E-mail:ddyhbmail@163.com

网址:www.ddyhb-sh.com