

天然气管道阴极保护效果的长期监测与评价

张博宇 付长博（国家管网集团北京管道有限公司北京输油气分公司，北京 100000）

杨 巍（国家管网集团北京管道有限公司山西输油气分公司，北京 100000）

摘要：文章先对阴极保护基本原理进行阐述，接着对天然气管道阴极保护效果监测方法进行深入探讨。然后给出评价指标。接着对天然气管道阴极保护效果中出现的局部电位分布不均，电流分布不均匀以及涂层破损问题进行分析。最后提出改善阴极保护效果应采取的措施及建议，主要有选取适当的保护参数及涂层材料，优化管道设计，定期对阴极保护系统进行维护与检验等、加强对杂散电流的管理与保护，同时增强操作人员的技巧与意识。

关键词：天然气管道；阴极保护；监测

随着我国经济的飞速发展，天然气用量也在逐年上升。天然气管道是天然气运输过程中重要的基础设施，天然气管道的安全运行非常关键。阴极保护作为一项防腐技术被广泛地应用在天然气管道中，它能够有效地延长管道使用寿命和降低事故发生率。但目前阴极保护系统的应用还存在着一定的问题。所以，必须要针对天然气管道阴极保护效果开展长期的监测和评估工作，并且要采取有效的措施来改善保护效果。

1 阴极保护的基本原理

阴极保护就是将外部电流供给金属表面作为电化学阴极来减小腐蚀速率。它的基本原理就是通过外加电流将金属表面保持在一个负电位上，使得金属处于一种不容易被氧化的环境中，以达到延缓或者避免金属被腐蚀的目的。该负电位可由外部电源所施直流电流所达到，由此构成保护层，使得金属在电化学方面是安全的。阴极保护关键是要保证金属表面一直处于某一负电位以抑制其氧化还原反应和延缓腐蚀速率。该方法被广泛用于地下管道，船舶及油罐的防腐并金属结构起到防护作用，对延长其使用寿命，降低维护成本有着重要意义。

2 天然气管道阴极保护效果的监测方法

2.1 电位测试

电位测试常被用来监控天然气管道阴极保护效果。该实验通过测试管道表面的电位差来评估阴极保护系统的工作性能。该阴极保护系统通过外加电流将管道变成阴极来延缓金属腐蚀的发生。电位测试采用参比电极接在管道表面，测其电位差。通过追踪电位在时间上的变化情况来判断阴极保护系统的有效性。若电位差很小且接近甚至大于阴极保护所需要的负范

围时，则说明管道受到很好的保护。该测试方法在天然气管道监测与维修中得到了广泛运用。

2.2 电流测试

电流测试是通过检测管道中电流，判断阴极保护系统是否正常工作。阴极保护系统的外加电流将电子经阳极注入管道，将管道变成阴极以降低腐蚀。电流测试是用电流计或者分流器对注入或者流出管道的电流进行检测。将实际测得电流值和设计所需电流值进行对比即可对阴极保护系统进行性能评价。若实际电流与设计值相近时，说明阴极保护系统工作正常。电流测试一般和电位测试相结合对管道阴极保护效果进行综合评价。

2.3 杂散电流测试

所谓杂散电流，就是管道周边环境中的非期望电流。这些电流的来源可能是其他电源或管道连接点间的电势差异。杂散电流对阴极保护系统产生扰动，造成管道腐蚀。杂散电流的检测是利用电流传感器对管道周边环境的电流强度进行检测。对测量结果进行分析可判断杂散电流产生的根源及强弱。若杂散电流较强，则可能需采取措施降低对管道造成的冲击，从而保证阴极保护系统运行效果。

2.4 涂层缺陷测试

涂层是指施加于管道表面以阻止腐蚀的保护性涂料。但涂层也会有瑕疵，比如划痕，气泡或者涂层从管道表面剥离等。这些缺陷将使腐蚀介质入侵管道金属并削弱阴极保护的作用。涂层缺陷测试采用电子显微镜、X射线或超声波等非破坏性检测技术对管道涂层完整性进行检验。对涂层缺陷进行识别与修复可保证阴极保护系统有效运行并提高管道使用寿命。

3 天然气管道阴极保护效果的评价指标

3.1 保护电位指标

通过检测保护电位，对比指定要求，可评价阴极保护系统能否维持管道处于较好阴极状态。一般保护电位应在负、靠近或高于阴极保护规定要求。保护电位较负，说明管道表面已被充分保护以防腐蚀。

3.2 保护电流密度指标

保护电流密度为流经阴极保护系统注入管道电流占管道表面积比。通常保护电流密度应视管道特点及设计要求而定。保护电流密度过低可能意味着阴极保护系统不能提供充分防护而造成腐蚀问题。反之，保护电流密度过大会导致涂层破裂等问题。因此，通过对保护电流密度进行测量与监测可对阴极保护系统有效性及管道腐蚀风险进行评价。

3.3 涂层完整性指标

涂层是指在管道表面上覆盖一层保护性涂料以阻止腐蚀。涂层完整性指标为涂层对管道表面保护覆盖率，涂层有无缺陷。通过使用非破坏性检测技术（例如电子显微镜、X射线检测或者超声波检测等等），可以评估涂层的完整性。涂层完整性指标越高说明管道表面得到了较好的防护，腐蚀风险减小。

3.4 杂散电流指标

所谓杂散电流，就是管道周边环境中的非期望电流。这些电流的来源可能是其他电源或管道连接点间的电势差异。杂散电流对阴极保护系统产生扰动，造成管道腐蚀。通过对杂散电流的强弱进行测量与监测，可评价阴极保护系统是否有效以及杂散电流在管道中的作用大小。杂散电流指标越小，说明管道受到的防护越好，腐蚀风险越小。

4 天然气管道阴极保护效果中存在的问题

4.1 局部电位不均匀

天然气管道阴极保护效果普遍存在的问题之一就是局部电位分布不均。这说明管道表面不同地区电位有差别。造成局部电位不均的原因可能有很多，例如管道的几何形状，电流密度的非均匀分布以及涂层缺陷。这种电位的不均衡性可能会使得某些地方电位较高，而其他地方电位较低，从而提高了腐蚀发生的可能性。

4.2 电流分布不均

阴极保护系统的电流应均匀分布于管道的表面。但由于管道几何形状，涂层等原因，电流有可能分布不均。这可能导致某些区域的电流密度过高，而其他区域的电流密度过低。电流分布不均可能造成某些地区防护过强，另一些地区防护不足，引起腐蚀问题。

4.3 保护电位过低或过高

保护电位对管道保持良好阴极状态至关重要。但有时保护电位也可偏离所设范围。过低的保护电位意味着阴极保护系统不能提供充分的防护而造成腐蚀问题。保护电位过高可能造成涂层破裂等问题。该偏离设定范围保护电位可由电流密度不均，电源故障等造成。

4.4 涂层破损或失效

涂层在管道表面起着保护层的作用，以阻止腐蚀。但由于受到机械损伤，化学腐蚀或者年龄老化等外在因素的影响，涂层会发生断裂或者失效现象。涂层破损有可能裸露管道金属而不能充分阴极保护管道。另外，断裂涂层易被进一步腐蚀或者腐蚀加速。所以，对涂层破损或者失效需及时进行检测与维修，才能保证管道得到长效防腐保护。

4.5 杂散电流干扰

所谓杂散电流，就是管道周边环境中的非期望电流。这些电流的来源可能是其他电源或管道连接点间的电势差异。杂散电流干扰了阴极保护系统正常运行，从而造成管道腐蚀。杂散电流扰动可能造成阴极保护电位与设定值偏差较大，使得管道不能充分保护。另外杂散电流也会对管道周边环境造成腐蚀并进一步增加腐蚀风险。

5 提高天然气管道阴极保护效果的措施与建议

5.1 选择合适的保护参数和涂层材料

为了改善天然气管道的阴极保护作用，选取适当的保护参数及涂层材料至关重要。保护电位及电流密度等保护参数的合理选取取决于管道材料，环境条件及腐蚀风险。合适的保护参数可以保证管道有充分的阴极保护以避免过护或者过护不到位等情况。同时，选用耐腐蚀性能好的涂层材料是关键。涂层要能够有效地保护管道表面不被腐蚀侵蚀。

5.2 优化管道设计，减少局部腐蚀风险

优化管道设计可从多方面着手，包括管道合理布局、支撑设计等，从而减小管道应力集中区域进而减小腐蚀发生概率。管道设计时应考虑适当的管道材料及厚度来提高其抗腐蚀性能。选用耐蚀性较好的材质如不锈钢或者腐蚀抗性涂层等能有效延长管道使用寿命。这些物质及涂层可抵抗腐蚀介质侵蚀并降低腐蚀程度。在湿润或容易受到腐蚀的地方，我们可以思考增设防腐层或实施其他的保护手段，从而进一步减少管道受到腐蚀的可能性。其中包括采用防腐涂层，防护套管或者阴极保护系统来保护管道不被外界环境腐

蚀。综合运用这些防护措施和管道设计可极大地减少管道腐蚀引起的各种问题。所以需要在管道设计阶段就对腐蚀风险进行充分的考虑,并且采取适当的优化措施。管道布局合理,支撑设计及材料选择合理,防腐层及防护措施得当有利于减少管道腐蚀潜在风险。

5.3 定期进行阴极保护系统维护和检查

阴极保护系统要定期维护检查才能保证正常工作。例如:2022年,位于宁夏回族自治区的某家石油管道公司对其管理的一条长达30公里的输油管道实施了阴极保护系统的年度维护和检查工作。自从2018年开始安装,该系统已经稳定运行了4年,并且在这段时间里没有出现任何严重的故障。此次巡检时,技术人员全面排查电源及保护设备,以保证设备的正常运行。同时采用专业检测设备对管道保护电位及电流密度进行监测,结果表明电位 -1.2V 、电流密度 $0.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 处于正常范围。除此之外,技术团队还对管道涂层进行了深入的检查,并在其中发现了一个 0.5 平方米的损坏区域。公司迅速动员了维修团队进行维修工作,经过修复,涂层的厚度达到了 1.5mm ,完全满足了设计标准。通过此次排查,该企业及时发现和解决了可能存在的问题,保证阴极保护系统运行效果。据估计,经定期维护与检验,公司年节约防腐维修费用50万元左右。

5.4 加强杂散电流的管理和防护

杂散电流是一种通过管道附近的土壤或其他导电物质传播的电流,这种电流有可能对管道造成腐蚀效应。要对杂散电流进行较好的治理与降低,就必须对管道进行系列的防护。一方面,利用电位测量及电流密度分析可判断杂散电流产生的根源及大小。这将有助于管道运营人员对腐蚀风险做出准确的评价和相应的保护措施。例如,当检测到杂散电流源于附近的电源设备或其他的管道系统时,我们可以与相关部门合作,通过调整电源的接地策略或改变管道的布局,来降低杂散电流的干扰。另一方面,采取屏蔽措施又是对杂散电流进行有效治理的一个重要途径。其中包括电缆与地网的合理布置,减少杂散电流在管道中的作用。通过在管道周围布置导电材料,可以引导杂散电流流入地下回路,从而减少对管道的腐蚀风险。另外,地网的合理设计与布置能够有效地散播杂散电流并进一步降低对管道造成的不利影响。再者,使用负极保护与电流阴极保护结构对杂散电流亦有很好的治理作用。负极保护通过将负极材料埋置于管道四周营造出低电位区域来吸引并控制杂散电流。该负极保护结构能

有效降低管道被杂散电流腐蚀的风险。另一种方法是采用电流阴极保护结构,通过在管道周围布置阴极材料并施加一定的电流,形成一个保护电场,将杂散电流引导到安全的回路中,从而减少对管道的腐蚀作用。

5.5 提高操作人员技能和意识,确保阴极保护系统正常运行

要保证阴极保护系统正常工作,就必须致力于操作人员技能与意识的提升。这样可通过对操作人员进行专业培训,让其对阴极保护系统原理及操作要点有一个全面的认识。培训内容应当包括保护电位、电流密度等保护参数监测、调节等能力。操作人员除具备理论知识外,还应具有对问题做出及时反应的能力。他们必须具备迅速地识别并处理系统内出现的问题的能力,以防止可能的伤害。这就要求其必须要有一定技术能力与经验,能准确判断出问题产生的根本原因,并且采取相应措施加以修补。另外,操作人员还应掌握对管道进行正确保养与检验的能力。他们有必要定期对管道进行检查,以确保其保持完好并正常工作。这涉及对阴极保护设备的运行状况进行检查,以确保其运行的可靠性和高效性。操作人员要熟悉维护程序并能根据需要进行维护,才能保证阴极保护系统的连续作用。通过操作人员技能与意识的提升可降低人为错误发生率。他们将有能力更为娴熟地操控阴极保护系统,能够及时识别并解决存在的问题,从而确保系统能够稳定运行。

6 结束语

文章深入讨论了天然气管道阴极保护基本原理,监测方法和评价指标及存在问题,并给出解决方法。采取上述措施后,可有效地改善阴极保护效果和保障天然气管道安全运行。

参考文献:

- [1] 汪久虎,吴相.深井阳极在天然气管道保护中的设计及创新应用[J].科技创新与应用,2021,11(15):48-50.
- [2] 赵梦杰.苏南地区中高压输气管道阴极保护系统检测分析与对策研究[D].常州大学,2021.
- [3] 窦坤.天然气长输管道阴极保护管理[J].山西化工,2019,39(03):97-99.
- [4] 张明轩.强排流式管道阴极保护控制策略的研究[D].中国石油大学(华东),2019.
- [5] 赵磊,衣晓辉.天然气管道阴极保护率分析报告[J].中国石油石化,2017,(10):17-18.
- [6] 闫青松.淄青天然气管道阴极保护电位欠保护问题研究[D].中国石油大学(华东),2017.