

# 燃气管道整体阴极保护评估方法研究

陈妍君（西南油气田安全环保与技术监督研究院，四川 成都 610000）

**摘要：**阴极保护是保障燃气管道安全的关键，本文为确保燃气管道运行安全、稳定，防止管道腐蚀问题，将保护电流法应用到燃气管道整体阴极保护中，该方法具有强大的识别功能，可判断管道达到有效阴极保护临界值。在该系统中，管道在电路中发挥阴极的作用，不会受到氧化和还原反应的影响，起到防止腐蚀的作用。研究从评估方法、密度需求角度出发，结合管道阴极保护电流需求规律，以确保保护评估方法的合理性与科学性。

**关键词：**燃气管道；阴极保护；管道间距；电流密度

## 0 引言

燃气管道长期运行，使管线防腐效果降低，管道腐蚀严重。燃气管道腐蚀，会造成燃气泄漏问题，严重威胁公共安全。阴极保护评估是一种状态识别方法，可起到预防管道腐蚀的作用。然而在实际保护期间，应结合保护电流密度，将评估方法与密度需求结合，依据管道阴极保护电流需求规律，确保评估方法的科学性、合理性。因此，以下对燃气管道整体阴极保护评估方案展开试验，实现对燃气管道整体阴极状态的科学评估。

## 1 检测方法及原理

### 1.1 检测方法

阴极保护评估可识别阴极保护状态，方法包括吸收阳极保护和强制电流保护两种，前者是指连接一个比管道更容易被氧化的金属（如镁、锌或铝），使之成为牺牲阳极，保护管道不受腐蚀。当电流通过电路时，牺牲阳极会首先被氧化，而管道则得到保护。后者是指外接直流电源，使管道呈现阴极电位，从而防止管道腐蚀。电源的负极连接到管道上，正极则连接到地床上。该方法是指计算管道单位面积的保护电流密度，运用极化曲线判断管道极化电位与对应电流的关系，计算防腐层破损和流入破损点的电流密度，牺牲阳极输出电流至限值，起到保护阴极的作用。该方法被称之为保护电流法，在保护电流密度计算和需求电流分析中，依据燃气管道防腐层的电阻率，确定防腐层的破损面积。

在评估方法的应用上，牺牲阳极的阴极评估需采用密间隔电位测试技术，或者应用断电测试技术，保护电流法则在测试桩位置牺牲阳极输出电流，依据管道材料的电阻率，识别阴极保护状态，完成阴极保护评估工作。该方法受地表环境的影响较小，在防腐层电阻率测试上，配置电池，减少了长距离拉线对评估

所产生的影响，具有便捷性、高效性、准确性的优势。

### 1.2 检测基本原理

现有的燃气管道阴极保护系统之中，系统的直流干扰水平比较低，且部分保护系统具备可断开部分管道功能。将其作为本次评估试验的主要内容，采用馈电试验方法，同步测试管段内的电位参数，计算并得到临界有效阴极保护值。依据完成步骤测试工作。具体步骤如下：

第一步：断开阴极保护系统，设置测试点，模拟馈电电流，布设测试桩。第二步：将接地体作为临时地床，接地体材料为燃气管道的阳极，位置点选择与管道之间的距离控制在 2.5m 以上。第三步：接入正极和负极，将排流地床作为连接体，正极与直流电源接通，负极与防护电位管道接通。第四步：启动直流电源，输入电流，同步调节电流参数。应用 CIPS 法，测试电位数值。第五步：基于测试所得结果，完成电位测试作业。该期间，被测燃气管道得到临界阴极保护状态，满足最正极化电位的基本要求。第六步：测量各点的通电点位的电流数值，计算电位偏移量和管内的保护电流量，结合所得的防腐层电阻率数值，完成测量点内的断电位差计算。

## 2 管道对阴极保护电流密度的需求

### 2.1 电阻与保护电流密度关系

埋地燃气管道阴极保护应依据相关规范中的要求，确保阴极保护系统的设计参数良好。我国在燃气管道阴极保护方面，颁布了 SY/T-0036 文件，按照基本要求，保护电流的密度应覆盖电阻参数。覆盖层的电阻如果超过  $5000\Omega$ ，则保护电流密度应控制在  $50\mu A$  以上，当覆盖层的电阻数值在  $1W\Omega$  以上时，则应保持密度在  $10\mu A$  至  $50\mu A$  之间，当覆盖层的电阻数值在  $5W\Omega$  以上时，则应保护电流浓密度应保持在  $10\mu A$  以下，保护电流密度与覆盖层电阻之间呈现出

反比例关系。在燃气管道的阴极保护方面，阳极地床、保护电流等使用套管或者额外绝缘法兰保护，但硫酸铜参比电极可能存在一定的问题。因此，在阴极保护设计中，应结合实际的输出电流和保护面积数值，计算具体的电流密度。

## 2.2 低压管道评估

在结合管道与阴极保护电流密度要求的过程中，应明确管道的具体参数。本试验 A 燃气管道流量压力比较小，在连接位置设置相应的绝缘接头，管道长度在 120m 左右，内径参数在 400mm 左右。采用馈电试验方法，显示具体的电位数值。测得馈电电流数值位于 0.006A，则管道内的 IR 降低至 0.1V 左右，表明所测区域内的管线处于临界保护状态，满足最正电位的基本要求。在实际评估期间，结合馈入的电流数值，计算具体的防腐层电阻率，计算所得结果为  $8 \times 10^3 \Omega / m^2$ 。所需的平均保护电流密度应满足  $15 \mu A / m^2$  的基本要求。

## 2.3 中压管道评估

测试 B 中压管道与保护电流密度之间的关系，在燃气管道的连通区域设置和安装绝缘接头，中压管道总体长度为 100m，内径为 300mm。采用馈电试验和电位测试方法，在馈电电流满足 0.25A 的基本要求是，IR 降的基本数值为 0.58V，管道处于临界阴极保护状态，得到最正电位数值。计算管道防腐层的电阻率数值，其数值为  $300 \Omega / m^2$ 。基于馈入电流与管道长度之间的关系，得到保护的平均电流密度，具体数值为  $1920 \mu A / m^2$  左右。C 燃气管道为闸管，长度为 250m，管径大小为 200mm，采用馈电试验和电位测试方法，闸管的平均 IR 降为 0.28V，即管道处于临界保护状态。计算平均防腐层的电阻率数值，其计算结果为  $1.85 \times 10^6 \Omega / m^2$ ，馈电临界保护平均电流密度数值为  $1.01 \mu A / m^2$ 。D 燃气管道为中压管道，管道长度为 1400m，管道内径为 300mm，采用馈电试验和电位测试方法，在计算结果馈电电流为 0.003A 时，平均 IR 降的数值 0.22V，管道整体达到临界阴极保护状态。计算平均防腐层的电阻率，其数值结果为  $1.3 \times 10^6 \Omega / m^2$ ，所得平均保护电流密度数值为  $2 \mu A / m^2$ 。

## 2.4 高压管道评估

E 管道为高压管道，长度为 265m，管径大小为 400mm，结合馈电试验和电位显示结果，在馈电电流达到 0.0002A 时，管道的平均 IR 降数值为 0.25V，管道整体达到临界阴极保护状态，计算防腐层的电阻率

数值结果为  $1.52 \times 10^7 \Omega / m^2$ ，得到平均保护电流密度数值为  $0.15 \mu A / m^2$ 。

## 2.5 测试结果分析

在燃气管道的阴极保护系统中，测试桩是一个重要的设备，用于测量管道的保护电位。而 IR 降是指由于电流流过电阻所引起的电位降低。在实际的阴极保护系统中，由于土壤的电阻率不同，电流通过土壤时会产生电阻，从而使得管道的电位降低。这种现象被称为 IR 降（I 表示电流，R 表示电阻）。如果不考虑 IR 降，会导致对管道保护电位的误读，影响阴极保护的效果。为了准确地测量管道的保护电位，需要消除 IR 降的影响。

防腐层电阻率越高，说明防腐层的绝缘性能越好，阴极保护电流越难以通过，因此能更好地保护管道不受腐蚀。在阴极保护中，平均电流密度是一个重要的指标。如果电流密度过低，阴极保护可能无法达到预期的效果；如果电流密度过高，则可能导致金属的过保护，引起氢脆或其他负面影响。馈电试验是检测阴极保护系统工作状态的一种方法。通过调节阴极保护电源的电流，并观察管道电位的变化，判断阴极保护系统是否正常工作。电位测试试验是评估阴极保护效果的一种方法。在测量管道表面的电位时，能够了解管道是否处于受保护状态。按照测试结果，如果管道表面的电位在 -0.85V（相对于铜/铜硫酸盐参考电极）以下，即正电位状态，管道就处于受保护状态。

对应涂层电阻与电流保护密度之间的内在联系，当阴极保护状态处于临界状态时，保护电流的密度数值与相关标准规范相比较小。仅有闸管管道的结果与设计规范和设计标准相符合。依据相关标准，埋地管道的强制电流阴极保护设计规范过于保守，对临界电流的密度要求比较低，在实际应用期间，可满足管道阴极保护的基本要求。在测试和计算期间，采用极点试验方法和电位测试方法，得到电阻率与平均电流密度之间的关系，结合相关设计规范，判断其是否设计规范中的要求。防腐层电阻率是评估防腐层保护效果的一种重要参数。

## 3 管道阴极保护电流需求影响因素分析

### 3.1 影响因素分析

牺牲阳极离管道越近，其保护效果越好，阳极和管道之间的电阻更小，会有更多的电流能够流向管道，达到阴极保护的目的。然而，如果牺牲阳极离管道太近，会产生不良影响。例如，阳极会对管道产生物理

干扰，或者在阳极被消耗完之后，阳极和管道之间会形成微电池腐蚀。此外，阳极离管道太近，阳极释放的电流可能无法均匀分布在管道上，导致管道的某些部位无法得到有效保护。因此，采用现场测试的方案，对管道阴极保护的需求影响因素分析，现场测试基于同一管道，采用不同馈电间距，得到测试数值，并利用计算机软件完成数值模拟分析的过程，分析牺牲阳极实现阴极保护下的保护电流需求影响规律，确定具体的间距，确保阴极保护电流数值与实际情况相符合。

### 3.2 管道阴极保护电流需求测试

现场测试控制馈电点与管道间距之间的距离分别为1m和10m，判断馈电点与管道距离对管道整体阴极保护电流的影响。确定在测试桩管道IR降的过程中，计算IR降的最大值、最小值、平均值，采用测试桩通断电的方法，得到电位数值，即利用测试桩进行“即时关断”测试来得到最终数值结果。操作期间，在电流通过管道的瞬间，迅速断开电源，并立即测量管道的电位。由于电流被迅速断开，因此测量到的电位基本上不包含IR降的影响，从而能够准确地反映管道的真实保护电位。

### 3.3 管道阴极保护电流需求数值模拟

#### 3.3.1 数值模拟基本流程

数值模拟是利用计算机程序和算法评估管道阴极保护系统性能的方法。首先，需要根据实际的管道和阴极保护系统的情况，建立一个数学模型。模型内容包含所有影响阴极保护电流需求的因素，其中包括管道的长度、直径、材质、阴极保护系统的类型（牺牲阳极或强制电流）、阳极的位置、土壤的电阻率等。在具体数值模拟期间，设定模型的初始条件和边界条件。根据实际的环境和工况来设定。随后，使用数值方法对模型进行模拟。在模拟过程中，不断调整模型的参数，以使模拟结果与实际观测结果相符。最后，根据模拟结果，分析阴极保护电流的需求，并根据这些结果优化阴极保护系统的设计和操作。

#### 3.3.2 数值模拟分析

在模型构建期间内，依据馈电位置完成燃气管线的模型构建，总体管道长度数值为2000m，上游数值和下游数值均为1000m，设置馈电电流数值为6A，分别设置不同管道间距，具体管道间距分别为1m、2m、5m、10m、20m，识别具体的管道阴极保护状态。在模型建立完成和边界条件设置完成后，将最小保护电流的密度作为输出结果，将馈电电流和管线面积商

作为计算结果，完成基本的数值模拟过程。

所以，在不同管道间距下和相同馈电电流下，管道间距与电位分布之间存在明显的线性关系。

#### 3.3.3 结果评估

使用保护电流法实现对燃气管道的整体阴极保护，结合数值模拟结果和现场试验结果。本案例中的保护电流密度满足相关设计规范的要求。在分析管道长度对牺牲阳极阴极保护的影响时。管道长度增加时，电流需要在更长的距离上分布，导致电流密度下降。在阴极保护中若电流密度过低，管道无法得到有效的阴极保护。因此，随着管道长度的增加，需要增加阳极的数量或者增大阳极的尺寸，以提供足够的电流。从阴极保护的覆盖范围来看，管道长度过长，阳极无法覆盖到管道的全部区域，特别是管道的两端。电流在土壤中的传播有一定的衰减效应，随着距离的增加，电流的强度会逐渐减小。因此，对于较长的管道，需要在管道的两端或者其他关键位置设置额外的阳极，以确保阴极保护的覆盖范围。从阳极材料的使用寿命来看，当管道长度增加时，需要的阴极保护电流也会增加，导致阳极材料的消耗加快。因此，对于较长的管道，需要选择更耐用的阳极材料，或者定期更换阳极，以确保阴极保护系统的持续运行。

## 4 结论

综上所述，管道防腐层的电阻率计算与保护电流密度之间存在内在联系，可用于评估燃气管道的阴极保护状态。依据计算结果，所得保护电流密度与保护设计规范不相符合，数值略小。由于燃气管道被埋在土壤中，阴极保护状态均匀程度和分布状态受管道间距影响，且两者之间呈现出正比例关系。保持管道电位的间距在2m以上，能够使得牺牲阳极对阴极保护的方法效果最佳，但在距离过小的情况下，可通过增加电流通量的方式，起到相应的电位保护效果。

## 参考文献：

- [1] 伏喜斌, 黄启斌, 闫福磊. 城镇燃气管道过海段牺牲阳极阴极保护仿真计算与分析 [J]. 城市燃气, 2023,(12):1-7.
- [2] 林健周. 小区庭院燃气管道和立管老化检测评估技术要点探讨 [J]. 城市燃气, 2023,(12):21-26.
- [3] 刘旭文. 某城镇燃气管道牺牲阳极服役情况测试及改进建议 [J]. 全面腐蚀控制, 2023,37(11):79-83.
- [4] 陈利琼, 李卫杰, 孙磊. 油气管道阴极保护效果评估技术研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2023(9):115-117.