# 防腐保温管道的检测方案与评价准则建议

李永年　李晓松　吕桂玉

（中国冶金地质勘查工程总局地球物理勘查院，071051，0312-5905325）

摘　要：“黄夹克”防腐保温层进水后，其绝缘电阻不一定降低，造成阴极保护“死角”，以至管体遭受腐蚀。采用综合参数异常评价方法不仅可以检测与评价防腐（保温）层的性能，还可以评估金属管体的腐蚀与疲劳损伤情况。文中提出的检测方案和评价准则经过了多个工程的实践检验。

关键词：防腐；保温层；检测方案；评价准则

## 1　引言

输油管道的防腐保温层俗称“黄夹克”。一般情况下，此类防腐保温层的结构是：防腐（涂）层——保温泡沫——防水夹克。保温泡沫层大多具有吸水性，这与其质地和发泡程度有关。在积水洼地或土壤湿度大的地段，水分通过防水夹克上的破损点、质量不合格的补口以及其它缺陷处渗入保温泡沫层。在管道输温（一般约 40℃～70℃）的作用下，水分以气态或液态的形式在保温泡沫层中扩散、运移，并在管道标高相对较低的部位或者输温降低的地方聚集。这一过程经年不断，周而复始。由于进入保温泡沫层中的水分不能透过防水夹克逸出，最终会导致保温层普遍吸水，或潮润、或潮湿、或显著蓄水。进入保温层的水分溶解有氧和其他组分，作为电解液，在防腐（涂）层或其补口存在缺陷的部位与管体金属接触，如果管体表面有细微瑕疵或缺陷，就会产生电偶腐蚀，继而发生腐蚀产物积淀、腐蚀范围增大、腐蚀速率加快的复杂过程。

实践证明，管体发生腐蚀的位置与防腐保温层的防水夹克破损点（缺陷）位置并不一定重合。除非贴近管外壁的防腐（涂）层破损或失效，而且是在黄夹克的破损点或缺陷段，一般情况下，普遍吸水的防腐保温层仍然具有很高的绝缘电阻值。这种现象既屏障保护电流，使外加强电保护达不到保护效果，同时也使得附加牺牲阳极保护因不能确定管体腐蚀部位而无从布设。

众所周知，表征某种物质电磁特性的参量是电导率 $\sigma$、磁导率 $\mu$ 和电容率 $\varepsilon$。一般地说，管道防腐（保温）层的材料无磁性，因此，大多数情况下只须用面电阻（亦称防腐层绝缘电阻）和材料损耗角正切来描述其电学性质：

$$\rho_f = \frac{d_f}{\sigma}$$

$$tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$$

式中：$\rho_f$ 和 $d_f$ 是防腐（保温）层的绝缘电阻和厚度，$\sigma$、$\varepsilon$、$\delta$ 分别是防腐（保温）材料的体电导率、电容率、损耗角，$\omega$ 是测试角频率。

管道埋入地下并运行一个阶段后，无论是防腐（保温）层材料的电学性质还是管体金属的电学性质，都会由于各种原因而发生复杂的变化。地面检测的目的就是要探查这些变化，评估这些变化对管道安全运行的影响。因此，任何假定一些（或一个）参量不变而求得某个（或某些）参量的地面检测方法，都不可能对防腐（保温）层的性能和管体是否存在安全运行隐患做出完整客观的评价。

## 2 综合参数异常评价方法的机理

### 2.1 埋地管道地面检测问题的表述

检测对象的物理模型断面如图 1。图中管道中心埋深为 $h$；防腐（保温）层的外径为 $c$，管体外径为 $b$，防腐（保温）层的厚度为 $d_f=c-b$，管壁厚度为 $d$，管体内径为 $a=b-d$；管材的电导率、磁导率分别为 $\sigma_G$、$\mu_G$；管内介质的电导率、磁导率、介电常数分别为 $\sigma_J$、$\mu_J$、$\varepsilon_J$；防腐层的电导率、磁导率、介电常数分别为 $\sigma_F$、$\mu_F$、$\varepsilon_F$；管道围土介质和空气介质的电导率、磁导率、介电常数分别为 $\sigma_e$、$\mu_e$、$\varepsilon_e$和 $\sigma_0$、$\mu_0$、$\varepsilon_0$。

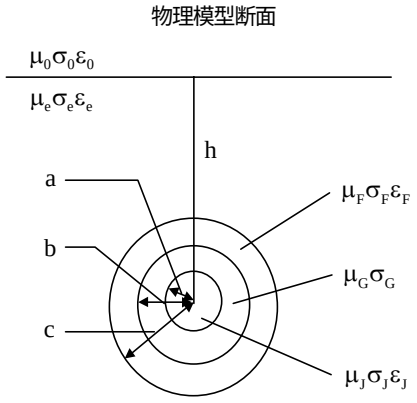


图 1

此外，检测信号为：

$$I_i = I_{0i} \cdot e^{-\gamma(\omega_i t)\cdot(x-x_0)}$$

其中 $I_{0i}$是加载信号的振幅，$\gamma(\omega_i t)$是信号角频率为 $\omega_i$时的传播常数，$x-x_0$是观测点与信号加载点之间的距离；

干扰信号为：

$$n = \sum_{j=1}^{s} I_{0j} \cdot e^{\gamma(\omega_j t)\cdot(x-x_{0j})}$$

其中 $s$ 是干扰信号的个数，$I_{0j}$是某个干扰信号的振幅，$\gamma(\omega_j t)$是该干扰信号的传播常数，$\omega_j$是其角频率，$x-x_{0j}$是观测点与该干扰信号进入（直连或耦合）管道点之间的距离。

对物理模型作适当的简化后，建立起观测信号与检测物理量（管体视电阻、防腐层绝缘电阻和视电容率）之间的关系。

### 2.2 管体视电阻

令管体的等效电阻率和等效磁导率分别为 $\rho_{DX}$、$\mu_{DX}$；充满介质的管体视电阻 $R_m$ 定义为：

$$R_m = sqrt(\mu_{DX} \cdot \rho_{DX})$$

$$\rho_{DX} = \frac{b^2 \cdot \rho_G \cdot \rho_J}{b^2\rho_J - a^2(\rho_J - \rho_G)}$$

$$\mu_{DX} = \frac{1+\kappa}{1-\kappa}$$

$$\kappa = (\frac{\mu_G - \mu_J}{\mu_G + \mu_J}) \cdot \frac{(b^2-a^2)(\mu_G+\mu_J)}{b^2(\mu_G+\mu_J) - a^2(\mu_G-\mu_J)}$$

管体视电阻即为单位长度管体的轴向归一化等效电阻。管体视电阻异常与管道腐蚀以及疲劳损伤现象之间存在密切的依存关系[1]，根据视电阻异常可以分析管体腐蚀与疲劳损伤程度，探查管体腐蚀缺陷的部位。

### 2.3 防腐（保温）层的绝缘电阻与视电容率

防腐（保温）层绝缘电阻（$R_f$）是指单位长度防腐层的横向归一化面电阻；防腐（保温）层视电容率（$E_f$）是指管体与大地之间单位长度防腐（保温）介质的归一化等效电容。两者之间有如下关系：

$$R_f \cdot E_f = \omega \cdot tg\,\delta_f$$

式中$\omega$是测试频率，$tg\,\delta_f$是防腐（保温）层的视损耗角正切。

防腐（保温）层的绝缘电阻和视电容率都是检测计算值，它们与被检测管段的管体实际电导率、磁导率以及围土电导率的大小密切相关[2]。

综上所述，仅用防腐层绝缘电阻一个参量既不能完整地评价防腐（保温）层的性能，也不能查明管体腐蚀的部位。显然，需要采用更为适用的检测手段。

## 3 防腐（保温）管道检测方案建议

(1) 查明管道防腐（保温）层破损部位（或未防腐的补口）

使用 PCM（或 RD4000），全面普查待检测管道，对防腐（保温）层绝缘电阻明显下降地段以及视电容率显著增高地段重点查定。

(2) 分级评价防腐（保温）层性能

利用专用数据处理软件（FER-PCM 2.2 或 FER-RD4000 2.2）计算防腐（保温）层的绝缘电阻和视电容率，评价防腐（保温）层的总体质量状况。

(3) 测量阴极（或牺牲阳极）保护电位

采用近参比法，分别测量阴极保护运行期间和停止运行期间的管地电位。

(4) 测量干扰电流（电位），判断防腐层缺陷点（段）的极性倾向

宜使用 SCM 杂散电流测绘系统，采用动态（被动源或主动源）观测技术，对防腐（保温）层的破损点或缺陷点逐个进行极性倾向判别。

(5) 评估腐蚀管段的剩余管壁平均厚度

对于阳极倾向点集中分布的管段，或者用其他手段确定的腐蚀管段，在测试条件允许的情况下，使用“金属蚀失量评价法”评估剩余管壁平均厚度，为制定维修（或更换）方案提供充分依据。

## 4 防腐（保温）管道评价准则建议

### 4.1 关于检测仪器、设备、方法与检测质量的建议

表 1 宜应用的检测仪器和检测方法

| 检测项目 | 宜使用仪器 | | 宜采用的方法 |
|---|---|---|---|
| | 主件 | 附、配、备件 | |
| 查明防腐（保温）层破损（缺陷）点 | RD-PCM | A 形架（附） | 电流衰减法、电位梯度法、磁场分布法 |
| 评估防腐（保温）层性能 | RD-PCM | RD4000（备） | 综合参数异常评价法 |
| 评估电保护效果 | GDP-16 | CEP1010a（备） | 近参比法、断电法 |
| 判断管道缺陷点是否阳极倾向点 | RD-SCM | SCM200A（备） | 动态（或静态）测量法、地表电位矢量法 |
| 腐蚀管段的剩余平均壁厚 | GDP-16 | NT-20（配） | 金属蚀失量评价法 |

表 2 测试物理量的观测质量指标

| 测试物理量 | 应达到的观测质量指标 | 备注 |
|---|---|---|
| 管中等效电流（毫安） | 重复观测误差 3%，总均方误差不超出±5% | PCM 适用 |
| 管地电位差（毫伏） | 无干扰时的总均方误差不超出±5% | GDP 适用 |
| 管中干扰电流（毫安） | 通过实验确定最短观测时间，以仪器输出的均方误差计算加权平均均方误差 | SCM 适用 |
| 地面干扰电位差（毫伏） | 直流电位差均方误差不超出±0.3 毫伏/米 | GDP 适用 |

| | | |
|---|---|---|
| 归一化的二次电位 | 延时窗内总均方误差不超出±3% | GDP 适用 |
| 距离（米） | 记读到 0.01 米，相对误差不超出±1% | 皮尺适用 |

### 4.2 关于防腐（保温）层性能分级评价准则的建议

与现行石油沥青防腐层绝缘电阻分级标准相适应的视电容率分级准则建议如表 3。

表 3 防腐（保温）层性能分级标准表（参照 SY/T 5918-94）

| 级 别 | 视电容率（μF/m）范围 | 绝缘电阻（Ω.m²）范围 |
|---|---|---|
| 一 级 | $E_f$＜100 | $R_f$＞10000 |
| 二 级 | 100≤$E_f$＜200 | 10000≤$R_f$＞5000 |
| 三 级 | 200≤$E_f$＜333 | 5000≤$R_f$＞3000 |
| 四 级 | 333≤$E_f$＜1000 | 3000≤$R_f$＞1000 |
| 五 级 | $E_f$≥1000 | $R_f$≤1000 |

与 NECE 现行防腐层性能分级标准相适应的防腐（保温）层性能分级准则建议如表 4。

表 4 防腐（保温）层性能分级标准表（参照 NECE Standard TM0102-2002）

| 级 别 | 视电容率（μF/m）范围 | 绝缘电阻（Ω.m²）范围 |
|---|---|---|
| 一 级 | $E_f$＜100 | $R_f$＞10000 |
| 二 级 | 100≤$E_f$＜500 | 10000≤$R_f$＞2000 |
| 三 级 | 500≤$E_f$＜2000 | 2000≤$R_f$＞500 |
| 四 级 | $E_f$≥2000 | $R_f$≤500 |

## 5 结束语

上述针对防腐（保温）管道的检测方案和评价准则已经在胜利、大港、阿尔善等油田以及齐鲁石化、锦西炼化等处的埋地管道腐蚀检测工程中得到应用。检测后的开挖验证结果表明：综合参数异常评价方法采用“一体化”的原位检测技术，利用防腐（保温）层的视电容率和绝缘电阻两个参量来描述与评估防腐（保温）层的性能的做法具有更广泛的适用性。其它方法只用绝缘电阻一个参量是不能准确评价防腐保温层性能的。此外，在观测条件满足的情况下，综合参数异常评价法还可以对金属管体和回填土的视电阻率沿线变化情况进行检测与评价。部分开挖验证结果图片如下。



胜利油田东辛寒柳线——防腐层老化破损剥离



锦西炼化——管线搭接导致防腐层破损



阿尔善油田——防腐保温层充水，管体腐蚀



阿尔善油田——防腐保温层破损，管体腐蚀

参考文献：

[1] 李永年，李晓松，吕桂玉. 管体视电阻率与腐蚀和疲劳损伤的关系［J］. 地下管线管理，2002，30(6)：18～21.

[2] 李永年，李晓松，吕桂玉. 提高埋地管道防腐层分级评价的可靠性［J］. 地下管线管理，2002，28(4)：34～36.