

\*\*\*\*\*  
\* 防腐保温 \*  
\*\*\*\*\*

## 用电位分布数学模型评价 罐底阴极保护效果

翁永基\* 李相怡

(石油大学(北京))

翁永基 李相怡:用电位分布数学模型评价罐底阴极保护效果,油气储运,1998,17(1) 35~40。

**摘 要** 地面金属储罐底板阴极保护技术中关键问题之一是判断罐底,特别是罐底中心的保护效果。目前缺少经济和简便的测量罐底保护电位的方法,电位分布数学模型为研究罐底保护提供了一种解决途径。根据稳流电场理论推导并试验验证了罐底阴极保护电位分布的数学模型,发现罐底保护电位和距罐底中心比率距离成类似立方抛物线方程形式。根据这个模型讨论罐底电位分布规律,提出罐周电位检测及一点法、二点法、多点法等电位检测技术用于评价阳极位置影响及预测罐底中心保护电位值,无需在罐底埋设全程的 PVC 参比管,方法简便实用。实例数据分析表明,精度满足日常检测工作的需要。

**主题词** 罐 罐底 电势 分布 数学模型 评价 阴极保护

储罐罐底阴极保护电位定义为罐底金属电位和其相邻介质电位的差。罐底各处保护电位不相等,实际测量难度大。目前国外推荐的罐底电位测量技术需要在罐底钻水平孔埋入(或预埋)全程的多孔硬质聚氯乙烯塑料管,孔的位置对应罐底径向各测量点,测量时管内注入导电液体,用一支参比电极在其中移动测量。近年来,有人提出用铜接头密封测量孔,以克服测量过程中导电液体渗入罐底沙基的缺点<sup>[1]</sup>。但不管如何改进,这种技术实施起来并非易事,耗资也很大,只能供少量试验研究用,不可能在所有储罐普遍推广。发展罐底阴极保护电位分布的

参数计算当量管径的方法推算管道内的积蜡厚度,依此确定清管器的直径,而实际上管道内输送油品的含蜡只是在原油的析蜡高峰区析出,特别是当原油中的蜡分子组分比较接近时,析蜡过程将集中在很短的一段管段内进行,此段析蜡管段对整个管道起节流作用,将导致管压上升,输量下降。针对新疆的轻质高含蜡原油,由于其蜡质较为坚实,因此宜采用带跟踪和带环形细密钢刷的皮碗清管器。

理论计算模型,以便根据罐底保护参数及罐外电位测量数据来衡量罐底,特别是罐中心的保护电位值。目前对较复杂阴极保护体系,以拉普拉斯方程为基础,采用有限元、边界元、有限差分等方法求解,一般只能得到数值解,得不到解析解。而日常检测中希望用简化解析公式来计算罐底保护电位分布,为此,课题组在石油大学校科研基金资助下,开展了罐底保护电位分布模型解析公式的研究及其试验验证。用稳流电场理论成功推导出罐底保护电位分布公式。本文根据这些模型来建立储罐阴极保护电位的常规检测和评价方法。

(2)利用管道内外腐蚀检测器检测管道的变形和腐蚀情况,是寻找管道本身潜在的不安全因素的最先进、最经济、最有效的方法和途径,能把管道事故隐患消灭在萌芽之中,同时可以大大地节约管道的大修费用。初步预测,火三管道前 10 km 的大修费用可以从  $200 \times 10^4$  元以上降至  $65 \times 10^4$  元以下。

(收稿日期:1997-05-15)

编辑:褚贵生

\* 102200,北京市昌平区水库路;电话:(010)69745566-3454。

### 一、罐底保护电位分布的数学模型

文献[2]介绍了研究阴极保护电位分布数学模型的一般理论和方法,在用稳流电场理论推导时,假设阴极保护体系已处于稳定状态,即:罐底金属极化以及总保护电流等参数不随时间而变化,此外罐底及周围介质均看作均匀一致。以下简述其推导过程。

将保护电位看作是罐底金属电位和其相邻介质电位之差,用稳流电场理论分别建立保护电流沿罐底金属流动时的金属电位分布公式和阴极电流与阳极电流在罐底附近土壤介质产生的介质电位分布公式。实际计算表明,沿罐底金属流动的电流造成的电位在微伏数量级上变化,对实际保护电位分布无影响。罐底保护电位分布取决于罐底附近地电场电位,即:

无阳极电位影响时

$$\Delta\phi = \Delta U_m - (\Delta U_a + \Delta U_c) = -\Delta U_c \quad (1)$$

考虑阳极电场影响时

$$\Delta\phi = \Delta U_m - (\Delta U_a + \Delta U_c) = -(\Delta U_c + \Delta U_a) \quad (2)$$

式中  $\Delta\phi$ ——罐底阴极保护电位分布;

$\Delta U_m$ ——罐底金属内电位分布;

$\Delta U_a$ ——阳极造成的罐底相邻介质的内电位分布;

$\Delta U_c$ ——阴极造成的罐底相邻介质的内电位分布。

参照经典静电学原理,假设距罐底中心距离为  $x$  处电流密度  $i_x$  用以下通式表示:

$$i_x = i_0 \left[ 1 + k \left( \frac{x}{r} \right)^2 \right] = \frac{2 i_s}{(k+2)} \left[ 1 + k \left( \frac{x}{r} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中  $r$ ——罐底半径;

$i_s$ ——罐底平均电流密度;

$i_0$ ——罐底中心的电流密度;

$k$ ——反映罐底电流密度不均匀程度的常数,  $k \approx 30$  (详见以下讨论);

$x/r$ ——离罐底中心的比率距离,以下运算中该项用符号  $y$  表示。

将罐底看作由无数置于地表的同心圆环组成,按以下简化公式推导阴极电位的分布。

$$U_{c(y)} = \frac{i_s \rho r}{(2+k)} \int_0^y \left( 1 + \frac{y^2}{k} \right) dy \quad (4)$$

式中  $\rho$ ——罐底周围土壤的电阻率。

积分得到:

$$U_{c(y)} = U_{c(0)} + \frac{i_s \rho r}{6(2+k)} (6y + ky^3) \quad (5)$$

罐底最大阴极电位差为:

$$(\Delta U_c)_{max} = \frac{i_s \rho r (6+k)}{6(2+k)} \approx 0.1875 i_s \rho r \quad (6)$$

当不考虑阳极电场影响时,罐底保护电位分布公式可写为:

$$\phi_{(y)} = \phi_{(0)} - \frac{i_s \rho r}{6(2+k)} (6y + ky^3) \quad (7)$$

或用总电流  $I$  表示:

$$\phi_{(y)} = \phi_{(0)} - \frac{I \rho}{6\pi r (2+k)} (6y + ky^3) \quad (8)$$

式中  $\phi_{(y)}$ ——罐底某点  $y$  的保护电位值;

$\phi_{(0)}$ ——罐底中心的保护电位值;

$i_s$ ——罐底的平均保护电流密度;

$I$ ——罐底的总保护电流密度。

这个简化公式表示罐底保护电位按离罐底中心距离成类似立方抛物线形式分布。

有阳极电场影响时,罐底保护电位分布(衰减)除了式(7)或(8)所示的阴极电场贡献外,还要增加一项阳极电场的贡献。后者的公式形式与阳极形状、位置、电流及介质电阻等均有关。例如,对立式棒阳极有以下公式:

$$U_{a(x)} = \frac{I \rho_1}{4 \pi L} \ln \frac{(h+2L) + \sqrt{x^2 + (h+2L)^2}}{h + \sqrt{h^2 + x^2}} \quad (9)$$

式中  $L$ ——棒阳极长度的一半;

$h$ ——阳极顶部距地面深度(阳极中心埋深为  $h+L$ );

$\rho_1$ ——阳极周围的土壤电阻率;

$I$ ——阳极输出电流;

$x$ ——该点到阳极中心的水平距离。

阳极距罐底周边最近距离为  $a$  时,罐底近阳极点和远阳极点上最大阳极电位差为:

$$(\Delta U_a)_{max} = U_a(a) - U_a(a+2r) \quad (10)$$

此时,用公式计算罐底保护电位分布比较繁琐,可采用图解法计算(见下文讨论)。

## 二、试验验证

### 1、室内模拟试验

在实验室水池内进行了罐底电位分布的模拟测量试验。阳极为平铺水池底部的金属丝网(减少阳极电场对保护电位分布的影响);阴极为钢质金属圆片,用稳压直流电源提供保护电流,等电流稳定后;

用带毛细管的甘汞参比电极在圆片表面移动测量。每隔 0.5~1 cm 设一测量点。主要记录位置、电位、总电流、圆片直径、水电导率等参数。

试验测定了 3 种圆片直径在 10 种不同保护电流值下,圆片边缘与中心间的最大保护电位差,并按式(6)计算的电位差值比较,两者吻合,偏差不超过 7%。此外,还测定了圆片上的电位分布,表 1 给出了直径为 0.11 m 的圆片实测电位分布数据。

表 1 室内试验中保护电位分布的部分试验数据

电流 I(mA)	不同 y 值下的保护电位分布实验数据(V)							
	0.0	0.091	0.27	0.45	0.64	0.82	0.91	1.00
3.000	-1.207 5	-1.209 8	-1.222 0	-1.226 3	-1.252 5	-1.286 6	-1.303 9	-1.356 5
2.000	-1.139 9	-1.143 0	-1.151 4	-1.165 7	-1.181 1	-1.208 5		-1.253 3
1.400	-1.069 4	-1.070 7	-1.073 9	-1.082 7	-1.092 7	-1.112 5		-1.142 1
1.100	-1.004 6	-1.006 3	-1.009 5	-1.015 0	-1.024 6	-1.041 8		-1.064 1

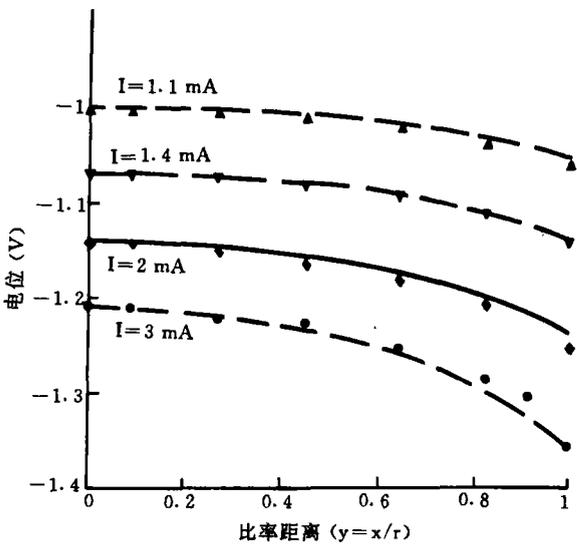


图 1 模拟罐底的钢圆片上保护电位数据及拟合曲线  
(实心点—测量数据;连续曲线—理论拟合曲线)

## 2. 现场试验

文献[3]提供了一组用多孔 PVC 参比电极管测量实际罐底保护电位分布的数据。罐的直径为 36 m,  $i_s \approx 6 \text{ mA/m}^2$ , 从罐边缘到罐中心径向方向等距测量了 13 个点。阳极离罐较远,因此不考虑阳极电场,用式(7)拟合实测电位分布数据, $k$  也等于 30, 公式为  $\phi(y) = -1.080 - 12 \times (6y + 30y^3)$  (单位为 mV)。实际罐底保护电位的测量值及拟合分布曲线见图 2 所示。

有阳极电场影响时,罐底保护电位分布要复杂得多,文献[3]中另一个实例:地面碳钢储罐,直径为

用式(8)拟合圆片保护电位分布数据, $k$  均等于 30。拟合公式分别为(单位:V):

$$3 \text{ mA: } \phi(y) = -1.2075 - 0.0041(6y + 30y^3)$$

$$2 \text{ mA: } \phi(y) = -1.1399 - 0.00273(6y + 30y^3)$$

$$1.4 \text{ mA: } \phi(y) = -1.0694 - 0.0019(6y + 30y^3)$$

$$1.1 \text{ mA: } \phi(y) = -1.0046 - 0.0015(6y + 30y^3)$$

图 1 给出了相应的实测数据和理论拟合曲线,两者吻合良好。

36.5 m,紧靠罐边设一个深井阳极,保护电流 2.1 A。沿罐底圆周等距安排 8 个电位测量点,它们的差值高达 185 mV,由于阴极电场不可能造成罐底周边的电位差,这完全由阳极电场造成。

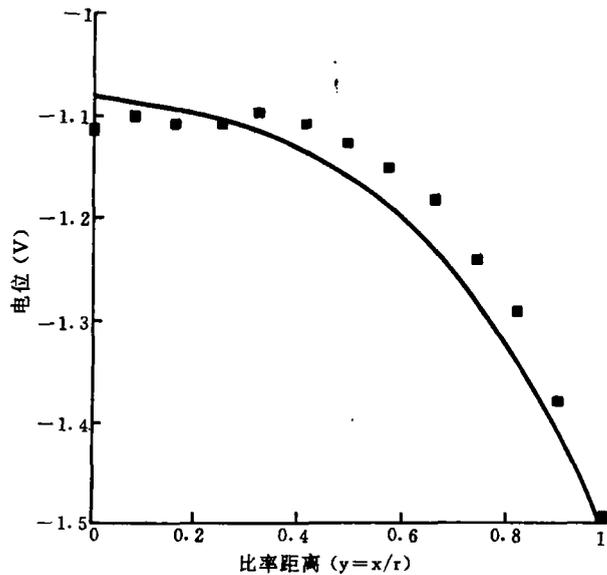


图 2 实际罐底保护电位的测量值和拟合分布曲线  
(实心点—测量数据;连续曲线—理论拟合曲线)

## 三、罐底电位分布模型的讨论

### 1. 罐底电位分布不均匀性

根据罐底保护电位分布公式,可知靠近罐底边缘处的电位变化较大,而罐中心附近电位变化较小。

罐中心电位往往比罐边缘电位要大(正)200~300 mV。例如,直径 20 m 的罐,罐底平均电流密度为 6 mA/m<sup>2</sup>,土壤电阻率 10 Ω·m 时,按式(6)计算,罐中心电位要比罐周边电位正 225 mV,如有阳极电场影响时,这个差值还会增大。因此,英国规范及我国石油行业规范规定<sup>[4]</sup>,罐边缘电位应当负于-1.1~-1.15 V(CSE)。

但这个值不是定值,从式(6)得知,它和罐底平均保护电流密度、土壤电阻率和罐径三项乘积成正比。在实际设计中应尽量减小其差值,如:罐底板采用耐焊接覆盖层防护或提高罐底沙基层的绝缘等级(降低所需保护电流密度)以减小阳极位置的土壤电阻率等。在罐底深度方向土壤电阻率不均匀时,如果罐底位于高电阻率岩层,那么其下面为低电阻土层(置阳极),罐底保护电位分布较均匀;反之,若罐底置于低电阻土层,那么其下面为高电阻率地层(置阳极),则罐底保护电位分布会很差。

2、关于常数 k 的讨论

本文试验及所引资料计算结果都发现经验常数 k 等于 30。这表明罐底保护电位分布基本遵循立方抛物线形式。在公式中保留参数 k,一是留待今后更多数据检验,二是反映和早期线性公式的某些联系。50 年代末,Morgan 假设罐底电流密度分布均匀,推导出罐底保护电位随距离成线性变化的公式<sup>[5]</sup>(相当本文公式中 k=0)。他同时指出,对直径较大的储罐,应认为罐底电流密度不均匀,建议用经典的带电圆盘电荷分布模型作为电流密度分布假设(此时,相当于 k=2),但未作实际推导。根据研究,无论 k=0 或 k=2,都和储罐罐底的实际电位分布情况有较大差异。

本文认为 k 为 30,同样可以解释特定条件下线性公式的适用性。表 2 给出不同罐径和电流值(介质电阻率变化不大)下,用线性公式拟合电位分布数据时可能出现的最大误差 ΔE。

在介质电阻率变化不大,且当电流密度和罐径乘积小到一定程度时,其罐底边缘与中心的电位差也相应减小,此时立方抛物线电位分布和线性电位分布的差异在工程应用时可忽略不计,即:只有在这个条件下才可采用线性公式。

k 值越大,罐底保护电位分布曲线越弯曲,但 k 值对罐底保护电位最大差值的影响不大。例如,当 k 值分别为 15、20、25、30、35、40、50 时,式(6)(罐底最

大电位差)中的系数(6+k)/(2+k)则分别为 1.23、1.18、1.15、1.11、1.10、1.08。由此可见,k 值的变化对该系数值影响不大。

表 2 不同条件下的线性公式计算值和实际电位的最大可能误差

试验地点	$i_a \times r$ (mA/m)	ΔE (mV)	弯曲度
现场*	108(6×18)	±68	很大
室内**	17(315×0.055)	±25	大
	12(210×0.055)	±15	有
	8(147×0.055)	±10	小
	6(115×0.055)	±7	很小

注 \* 分布图见图 2; \*\* 分布图见图 1。

四、罐底保护电位的检测和评价技术

1、罐底中心保护电位的检测

(1)多点法电位检测技术 在被测量罐底钻一水平孔,向罐中心延伸 3~5 m(视罐大小),测量罐边及罐底内各点(两点以上)的保护电位,设测量点距罐边距离分别为: d<sub>1</sub>、d<sub>2</sub>……d<sub>i</sub>,按式: y<sub>i</sub> = 1 - d<sub>i</sub>/r 计算出相应的比率距离,将全部数据以横坐标为 6 y<sub>i</sub> + ky<sub>i</sub><sup>3</sup>;纵坐标为实测电位 φ<sub>(y<sub>i</sub>)</sub> 来作图,数据点应成线性。延长直线与纵坐标交点即为罐底中心电位值。

实例 1:文献[3]提供一组沿罐半径 18 m 的罐底,用多孔 PVC 管测量的电位分布值(见表 3)。

以实测电位对(6 y + 30 y<sup>3</sup>)作图,得一条直线,相关系数高达 -0.997;外推到横坐标零点,得到罐底中心位置的电位为 -1.03 V(见图 3)。

由此实例还可看出,对直径 18 m 的罐,由罐边延伸测量深度在 3~5 m(相应的 y 值为 0.7~0.8),罐底测量点有 2~3 个时,外推电位精度已能满足工程预测需要。

(2)二点法电位检测技术 上述方法可简化为二点法测量,即测量罐边一点和罐底内一点(距罐边 d,相应 y 值应为 0.7~0.8)的保护电位 φ<sub>1</sub> 和 φ<sub>2</sub>。

罐底边缘: φ<sub>1</sub> = φ<sub>(y<sub>1</sub>)</sub>, y<sub>1</sub> = r/r = 1

罐底内延伸点: φ<sub>2</sub> = φ<sub>(y<sub>2</sub>)</sub>, y<sub>2</sub> = (r-d)/r

可通过解方程组方法来求罐底中心保护电位值,详见实例 2。

实例 2:据中国石油天然气华东输油管理局泗

县泵站一座 3 000 m<sup>3</sup> 油罐罐底阴极保护实测数据, 罐边保护电位和罐底内距罐边 5 m 处的电位分别为: -1.085 V 和 -1.050 V。已知罐底直径约 20 m, 罐底土壤电阻率约 5 Ω·m,  $k$  值取为 30, 因为:  $y_2 = (10-5)/10 = 0.5$ , 即可得到以下方程组:

$$\phi_{(0)} - B(30+6)/(30+2) = -1.085$$

$$\begin{aligned} \phi_{(0)} - B[6 \times 0.5 + 30 \times (0.5)^3] / (30+2) \\ = -1.050 \end{aligned}$$

式中  $B = \frac{I\rho}{6\pi r} / (30+2)$

解此方程组得到:  $\phi_{(0)} = -1.042$  mV。此罐罐底最大电位差只有 43 mV, 按式(6)和  $i_s \approx 6$  mA/m<sup>2</sup> 计算, 此值为 56 mV。均比原设计估计值 200~300 mV 要小得多。

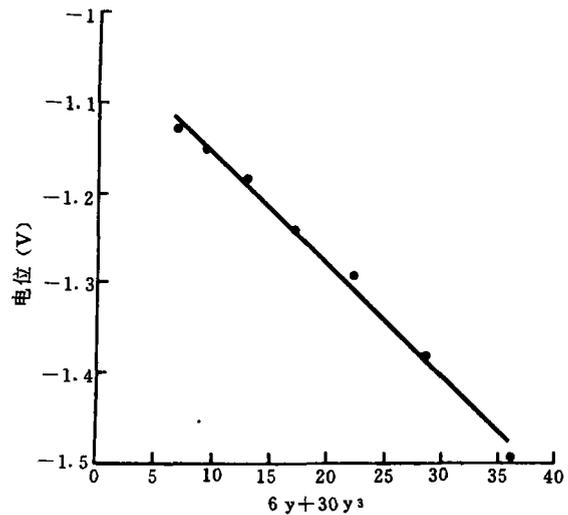


图 3 多点法预测罐底中心电位的线性外推图

表 3 多点法计算罐底电位的数据处理表

实测电位 (V)	距罐边距离 (m)	距罐底中心距离 (m)	比率距离 $y$	$6y$	$30y^3$	$6y + 30y^3$
-1.492	0.0	18.0	1.00	6.0	30.00	36.00
-1.379	1.5	16.5	0.92	5.5	23.10	28.60
-1.291	3.0	15.0	0.83	5.0	17.20	22.20
-1.242	4.5	13.5	0.75	4.5	12.70	17.20
-1.183	6.0	12.0	0.67	4.0	8.90	12.90
-1.151	7.5	10.5	0.58	3.5	5.80	9.30
-1.127	9.0	9.0	0.50	3.0	3.75	6.75
待求	18.0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00

(3) 一点法电位检测技术 当在罐底打探孔有困难或罐底阴极保护电流和介质电阻率等参数值可准确得知时, 可以用一点法, 即: 只测罐周一点的保护电位值, 直接用式(6)估算罐底中心保护电位值。如实例 1 中, 罐底土壤介质电阻率为 20 Ω·m, 则可计算罐中心电位值:

$$\phi_{(y)} - \phi_{(0)} \approx -0.1875 i_s \rho r$$

$$\begin{aligned} \phi_{(0)} &= -1.492 + 0.1875 \times 6 \times 18 \times 20 \\ &= -1.087 \text{ (mV)} \end{aligned}$$

同样, 对实例 2, 可得到:

$$\begin{aligned} \phi_{(0)} &= -1.085 + 0.1875 \times 6 \times 5 \times 10 \\ &= -1.028 \text{ (mV)} \end{aligned}$$

## 2、罐周电位检测

以上 3 种方法中, 都假设阳极电场对罐底电位分布无影响。对有阳极电场影响的实际体系, 应先用罐周电位检测法来评价阳极影响和预测罐中心电位。方法是先在罐周等距位置测量 8 个罐周电位, 找

出罐周电位变化最大的轴线方向。具体过程见实例 3 的方法。

实例 3: 数据引自文献[3], 碳钢制地面储罐, 直径 33.5 m, 靠罐边设一个深井阳极, 保护电流 2.00 A。沿罐底圆周等距安排 8 个电位测量点(依次为: A、B、C、D、E、F、G、H, 测量位置分别为南、东南、东、东北、北、西北、西和西南, 8 个实测电位数据(对饱和硫酸铜参比电极)分别为 -1.04、-1.15、-1.19、-1.11、-1.09、-1.07、-0.93、-0.95。

可以判定阳极位于罐东边, 阳极电位变化最大的轴线为: C—G。将罐周电位数据按距阳极远近排列成表(见表 4)

图 4 给出罐周电位值对距阳极距离的散布图, 横坐标零点代表罐边近阳极点(C 点), 该点距阳极距离为  $a$ , 横坐标 1 表示罐中心, 横坐标 2 表示罐周远阳极点(G 点)。罐周电位数据点近似以线性散布(相关系数: -0.9815)。

表 4 罐底阳极电场影响的数据处理表

测量位置	电位范围 (V)	平均电位 (V)	距阳极距离
C	-1.190	-1.190	a+0
B 和 D	-1.150~-1.11	-1.130	a+0.29 r
A 和 E	-1.090~-1.04	-1.065	a+r
H 和 F	-1.070~-0.95	-1.010	a+1.71 r
G	-0.930	-0.930	a+2 r

注 a—阳极距罐底的最近距离;r—罐底的半径。

本例中,如粗略将罐底阳极电场看作线性,则阳极电场在罐中心电位可计算如下:

$$E_{(0)} = \frac{(E_{(C)} + E_{(G)})}{2} = -1.060 \text{ V}$$

如果各种参数精确已知,罐周电位也可用公式计算,如:将立式棒阳极的电位分布式(9)或式(10)解联立方程来计算上述数值。

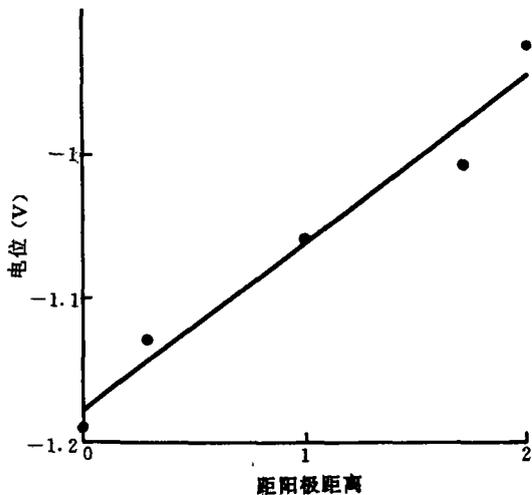


图 4 罐底周边电位数据与距阳极距离的数据散布图

罐底中心的保护电位是由阳极电场贡献和阴极电场贡献两部分组成,即:

$$\phi_{(0)} = E_{(0)} + |(\Delta U_c)_{max}| \quad (11)$$

本例中部分参数未知,而已测定罐底中心电位为-0.640 V。可计算阴极电场造成的罐底最大电位差 $|(\Delta U_c)_{max}|$ 为420 mV。一般情况下,可根据式(6)先计算出阴极电场在罐底的最大电位差,再按式(11)计算罐底中心的实际保护电位。

本例中,罐边与中心最大电位差为550 mV;其中阴极电场和阳极电场的贡献分别为420 mV和130 mV。如果规定阳极电场对罐底电位差贡献不得大于30 mV;或不得超过阴极电场贡献的十分之一,那么本例数据说明其阳极设置不太合理,应当增

加阳极位置点或加大阳极离罐的距离。

注意,在本方法检测中应排除杂散电流干扰影响,可采用多次测量或排干扰措施等。

综上所述,得出以下结论:

(1)地面金属储罐阴极保护时,在不考虑阳极电场影响时,罐底保护电位按类似立方抛物线方程的形式随距罐底中心比率距离而变化。罐周边与中心的最大电位差是和罐底平均电流密度、土壤电阻率及罐底半径这三项乘积成正比。

(2)常数k主要影响罐底保护电位衰减曲线的弯曲程度,k值越大,曲线弯曲度越大,研究结果发现k始终为30左右。只有保护电流和罐径的乘积非常小时,才可能用线性分布公式近似处理,一般条件下均应采用k为30的立方抛物线分布公式。

(3)根据公式,建立了一系列检测和评价方法,如:多点法、二点法、一点法和罐周电位法等,用罐底周边及罐底位置个别实测电位数据来预测罐底中心电位值,或评价阳极电场对罐底电位分布的影响,这些方法无需在罐底埋设全程参比测量管,使用简便,经济、实用,精度可满足工程的需要,有极大的推广应用价值。

参 考 文 献

1. Barrien, P. et al; Evaluation the Feasibility of Cathodically Protecting Aboveground Storage Tanks, Materials Performance, 1995, 34(5) 17~22.
2. 李相怡 翁永基; 阴极保护电位分布数学模型的研究及其应用, 腐蚀科学与防护技术, 1998(1).
3. Garrity, K. G. and Urbas, M.; Cathodic protection of external tank bottoms, Materials Performance, 1988, 27(4).
4. 中华人民共和国行业标准 SY/T0088-95; 钢质储罐罐底外壁阴极保护技术标准。
5. Morgan, J. H.; Cathodic Protection, Leonard Hill (Book) Limited(London), 1959, 159~161.

(收稿日期:1997-08-25)

编辑:王 华

