

填埋场渗漏检测高压直流电法等效电路模型的建立

能昌信^{1,3}, 王彦文¹, 王琪², 董路²

(1. 中国矿业大学(北京校区)机电学院,北京 100083; 2. 中国环境科学研究院固体所,北京 100012; 3. 山东工商学院计算机系,山东烟台 264005)

摘要:通过对 400 V、350 V、300 V 高压直流工作电压下小型模拟填埋场实验数据的分析,提出了简化的模型等效电路。由于高密度聚乙烯(HDPE)衬层的存在使得模型具有了整流特性,其电容大小将随着衬层面积和供电电压的增加而增加;供电电极的接触电阻与大地的电阻率成正比,与电极的粗细及入土深度有关。同时,接触电阻主要由电极附近的土壤电阻决定,大于 10 倍电极半径以外的土壤对接触电阻的影响不超过全部电阻的 10%,故降低电极附近土壤的电阻率可有效地降低电极的接触电阻。

关键词:等效电路模型;电解电容;接触电阻;垃圾填埋场

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2005)01-0200-04

Setup of High Voltage Direct Circuit Equivalent Circuit Model in Leakage Detection of Landfill

NAI Changxin^{1,3}, WANG Yanwen¹, WANG Qi², DONG Lu²

(1. School of Mechatronic Engineering, China University Mining & Technology (Beijing Campus), Beijing 100083, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 3. Computer Department, Industrial and Commercial Institute of Shandong, Yantai 264005, China)

Abstract: An equivalent circuit model is put forward through analysis of the experiment data under the conditions of applying 400 V, 350 V and 300 V DC supply power to a small-scale simulated landfill. Due to the fact that the existence of the HDPE geomembrane liner endows the model with commutating character, the electrolytic capacity increases as the area of geomembrane liner and the supplying electric voltage increase. The contact electric resistance of the power supply electrode is in direct proportion to earth electric resistance rate, and in relation to the diameter of the electrode and the depth of the earth. Moreover, the contact resistance is mainly determined by the earth electric resistance around the electrode (the influence induced by the earth farther than 10 times electrode radius is less than 10 percent of those involved by all resistance), hence decrease of the earth electric resistance rate around the electrode may result in effective decrease of the contact electric resistance of the electrode.

Key words: equivalent circuit model; electrolytic capacity; contact resistance; landfill

垃圾填埋是我国目前固体垃圾处理的主要手段^[1],而填埋场的渗漏检测及补漏处理是填埋场功效保障的主要措施,在众多渗漏检测方法中(地下水监测法、扩散管法、电容传感器法、跟踪剂法、电化学感应电缆法、电学法)^[2~6]高压直流电法由于其测量准确、可实施性强等特点,在美国等发达国家已被广泛采用^[7]。目前我国填埋场渗漏检测方法的研究才刚刚起步,各种方法仍然处在实验研究阶段。高压直流电法就是利用高密度聚乙烯(HDPE)衬层的绝缘性,在填埋场内及场外土壤中各埋一个供电电极,如果衬层没有漏洞,2个电极间就不会有大量的电流产生。否则,将通过漏洞和大地形成回路,产生电流,检测系统将根据电流的分布密度,来判断漏洞的位置。由于大地的自然电噪声以及工业电噪声的存在,使得检测系统在信号提取时存在很大困难。虽然剔除噪声的方法有很多,但是,提高有效信号的绝对

值是最直接也是最有效的方法。因此,为检测系统提供足够大的电流是至关重要的。本文将通过对试验现场的数据分析,对供电电极的接触电阻和填埋场地电模型的电学特性进行论述。

1 试验

1.1 试验场所

40 m × 10 m × 0.8 m (长 × 宽 × 深)的模拟填埋场,池内铺设厚度为 1.2 mm 的 HDPE(高密度聚乙烯)衬层,池内有约 200 mm 厚的沙土用来模拟填埋场的垃圾。池内沙土中埋一个供电电极,池外的土壤中埋一供电电极,试验模型如图 1 所示。

收稿日期:2004-02-15;修订日期:2004-08-27

基金项目:国家高科技研究发展计划(863计划)项目(2001 AA644010)

作者简介:能昌信(1965~),男,博士研究生,副教授,主要从事计算机控制和环境监测方面的研究。

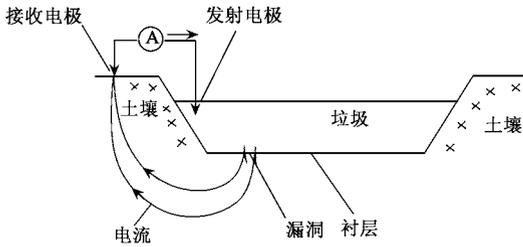


图 1 试验模型

Fig.1 Experimentation model

1.2 实验设备

FLUCK-187 数字万用表 2 块;0 ~ 1 000 V 可调直流电压源一台;一种供电电极为镀钉钛片电极 (20 mm × 80 mm × 1 mm), 另一种供电电极为不锈钢柱体电极, 长度和粗细待定;导线采用 1.5 cm² 多芯铜丝导线;秒表等.

1.3 实验电路连接

将电流表串行接入电路中, 用来测量供电回路中的电流, 将电压表并行接入电路中, 用来测量供电电极两端的电压, 如图 2 所示.

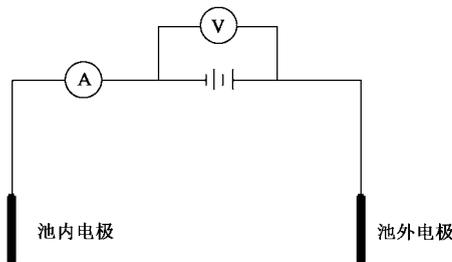


图 2 实验电路的连接

Fig.2 Connection of experiment circuit

2 实验结果与分析

2.1 衬层对供电信号的影响

如图 1 所示, 池内电极 (镀钉钛片电极) 接电源正极, 放置于池内沙土中, 距离模拟漏洞 (预置) 约 1 000 mm. 池外电极 (直径为 18 mm, 长度为 1 000 mm 的不锈钢柱体) 接电源负极, 放置于池外的土壤中, 电极埋深 1 000 mm. 在恒定电压下, 负载呈现出典型的电容充电特性, 供电电流在不同的电压下随时间变化的情况如图 3 所示.

电极不变, 保持和上一个试验相同. 将供电电源反接, 池内电极接电源负极, 放置于池内沙土中, 距离模拟漏洞约 1 000 mm. 池外电极接电源正极, 放置于池外的土壤中, 电极埋深 1 000 mm. 在恒定电

压下, 负载基本呈现出电阻特性, 供电电流在不同的电压下随时间变化的情况如图 4 所示.

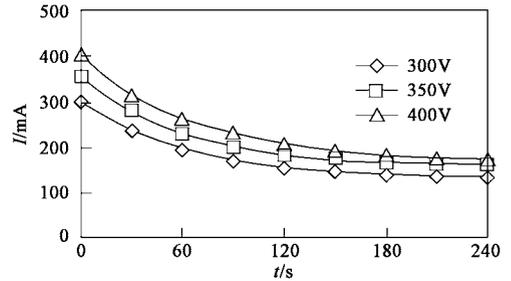


图 3 池内电极为正时不同电压下电流变化情况

Fig.3 Electric current change under the different voltage with positive electrode in the pool

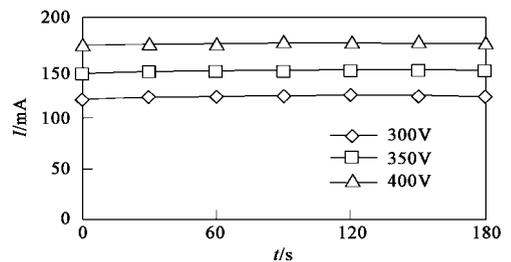


图 4 池内电极为负时不同电压下电流变化情况

Fig.4 Electric current change under the different voltage with negative electrode in the pool

图 3 图 4 表明, 该试验模型具有典型的电解电容的负载特性, 当电解电容接正向电压时, 模型呈现出电容充电过程. 当电解电容接反向电压时, 模型中的电容充电现象消失, 呈现出纯电阻特性. 地电模型的等效电路如图 5 所示. R₁ 为电极的接触电阻, R₂ 为电流回路的土壤电阻, C 为土壤和衬层接触面上形成的具有极性的导电膜.

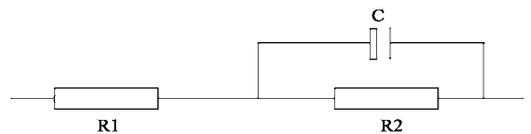


图 5 池内电极为正时模型的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of model with positive electrode in the pool

根据高聚物静电产生的机理, 任何 2 个固体不论其化学组成是否相同, 只要他们的物理状态不同, 其内部结构中电荷载体能量的分布也就不同. 当这 2 个固体接触时, 在固-固表面就会发生电荷再分配. 一般认为, 当高聚物接触时, 介电系数大的高聚

物带正电,介电系数小的带负电^[8].当高密度聚乙烯衬层和土壤充分接触时,在他们的接触面上将出现电荷的再分配,在衬层一端聚集大量负电荷,在土壤一端聚集大量的正电荷,从而在接触面上形成一个PN结.当池内电极加正电压,池外电极加负电压时,靠近衬层这端相当于正极,将聚集负电荷;靠近土壤这一端相当于负极,将聚集正电荷,从而使原先的PN结加厚,也就是加大了阻碍层的厚度.当池内电极加负电压,池外电极加正电压,靠近衬层这端相当于负极,将吸引正电荷,将和原来PN结上的负电荷进行中和,靠近土壤这一端相当于正极,将吸引负电荷,将和原来PN结上的正电荷进行中和,从而使原先的PN结厚度减小,直至消失.从而使得该导电模型具有了整流特性,也就是具有了电解电容的特性(上述导电机理和电解电容导电机理完全相同)^[9].不难看出,电解电容的大小不仅与衬层和土壤的特性有关,而且与衬层的面积成正比.同时,电压越大电容值越大.

2.2 无衬层时土壤负载特性

改变试验场所,在相距100m的土壤中(无衬层),分别埋置一个不锈钢电极(直径为18mm,长度为1000mm),埋深仍然为1000mm,其编号分别为1和2.当1号电极接电源正极,2号电极接电源负极时,电流随时间变化的情况如图6中系列1所示.将2个电极的电源反接,2号电极接电源正极,1号电极接电源负极,电流随时间变化的情况如图6中系列2所示.

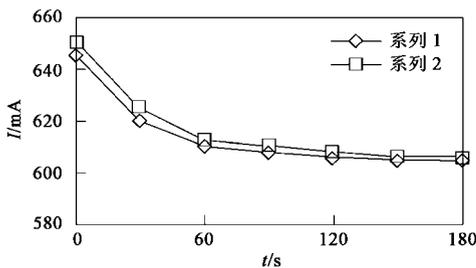


图6 无衬层时供电电极不同连接方式下电流变化情况

Fig. 6 The electric current change under the different connection ways in supply power electrode without liner

从图6不难看出,在无衬层时模型的负载特性与供电方向无关.但是,土壤中仍体现出电容特性,模型的等效电路如图7所示,不过此时的电容相比有衬层时小了很多.在土壤中,土壤胶体微粒具有双电层,微粒的内部称为微粒核,一般带负电,形成一个负电子层,其外部由于电性吸引,而形成一正离

子层,即合称为双电层^[10].在外电流的作用下,土壤胶体的双电层分散区的阳离子发生移动,形成双电层形变,以实现电荷的传递.双电层形变的快慢,决定于粒子沿颗粒表面移动的速度和路径的长度,这就是土壤激化的机理,这种激化的过程在电学上体现为电容的充放电过程^[9].无衬层时模型的等效电路如图5所示.

2.3 电极与介质的接触电阻

影响供电电极与介质接触电阻的因素有很多,电极的形状、大小、材质以及介质的分布和导电特性等因素都会对接触电阻产生影响.本文考虑到实际应用,电极的形状一般采用柱状电极,而电极的材质问题由于试验较为复杂在这里不再论述.本文仅对不锈钢柱状电极的长度及直径对均匀介质的接触电阻产生的影响进行论述.

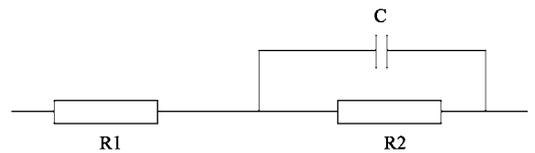


图7 无衬层时模型的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of the model without liner

2.3.1 电极的长度对接触电阻的影响

依据上述埋置场地电模型的等效电路,显然有衬层比无衬层时模型所体现出来的电容要大得多.为减小试验在读取数据时造成的误差,试验场所选择为无衬层的场地(和无衬层时土壤负载特性试验相同),1号电极(直径18mm的不锈钢柱体)埋深1000mm,改变2号电极(直径18mm的不锈钢柱体)的埋深深度,观察电流变化如表1所示.

表1 不同电压下电极埋深对接触电阻的影响/kΩ

Table 1 The affect of contact resistor by the length of electrode in different voltage/kΩ

电压 / V	深度/cm									
	0	5	10	15	20	30	40	50	100	150
80	5.714	1.251	1.143	0.721	0.667	0.640	0.625	0.610	0.479	0.411
200	5.556	1.224	0.843	0.683	0.633	0.613	0.581	0.575	0.445	0.383
300	5.545	1.228	0.845	0.682	0.633	0.612	0.581	0.573	0.448	0.383

2.3.2 电极的直径对接触电阻的影响

试验场所选择为无衬层的场地(和无衬层时土壤负载特性试验相同),1号电极(直径18mm的不锈钢柱体)埋深1000mm,改变2号电极(埋深深度为1000mm的不锈钢柱体)的直径,观察电流变化如表2所示.

表 2 在不同电压下接触电阻随电极直径的变化情况/kΩ

Table 2 The change of contact resistor by the electrode diameter in different voltage/kΩ

电压 / V	电极直径/ mm					
	6	8	10	12	16	18
80	0.667	0.640	0.615	0.571	0.528	0.470
200	0.667	0.645	0.615	0.571	0.526	0.455
300	0.667	0.645	0.612	0.573	0.526	0.448

2.3.3 均匀介质对接触电阻的影响

电极的接触电阻是指从电极表面到大地无限远处所呈现的电阻.在实际测量中,总希望接触电阻越小越好,这样才能为供电回路提供尽可能大的电流.

假设电极半径为 r_0 ,电极长度为 l_0 ,与大地电阻率 ρ 相比,电极可以看作等位体,以圆柱体的中心线外扩一系列的圆柱体层,每层的厚度为 d_r ,即将大地划分为一系列厚度为 d_r 的圆柱体层,整个大地的电阻变为这一系列圆柱体层电阻的总和^[11].

对于任意一层圆柱体层来说,由于 $d_r \ll r$,圆柱体层的面积:

$$S = \pi r^2 + 2 \pi r (r + l_0 - r_0)$$

该圆柱体层的电阻:

$$d_R = \rho \frac{d_r}{\pi r^2 + 2 \pi r (r + l_0 - r_0)}$$

将各圆柱体层的电阻进行积分,便可以得到圆柱体电极的接触电阻:

$$R = \int_{r_0}^{\infty} d_R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho d_r}{\pi r^2 + 2 \pi r (r + l_0 - r_0)}$$

$$= \frac{\rho}{2 \pi (l_0 - r_0)} \ln \frac{r_0 + 2 l_0}{3 r_0}$$

可见,圆柱体电极的接触电阻与大地的电阻率成正比,并与电极的粗细及入土深度有关.

离电极距离为 r 处所呈现出的电阻:

$$R_r = \int_{r_0}^r \frac{\rho d_r}{\pi r^2 + 2 \pi r (r + l_0 - r_0)}$$

$$= \frac{\rho}{2 \pi (l_0 - r_0)} \ln \frac{r (r_0 + 2 l_0)}{r_0 (3 r + 2 l_0 - 2 r_0)}$$

通过分析不难看出:大于 10 倍电极半径以外的土壤对接触电阻的影响不超过全部电阻的 10%.因此,接触电阻主要由电极附近的土壤的电阻决定,故在干燥土壤上埋放电极时,为了降低接触电阻,可在电极周围浇水.

3 结论

(1) 当高密度聚乙烯衬层和土壤充分接触时,在其接触面形成一种类似于 PN 结的导电膜,在衬层端聚集了大量的负电荷,在土壤端聚集了大量的正电荷,当衬层端加正电土壤端加负电时,其 PN 结加厚,将阻碍电流的运行;当衬层端加负电土壤端加正电时,其 PN 结迅速消失,其电容特性将在短时间内消失,使整个试验模型体现出具有整流特性.同时,当衬层面积越大时它所表现出的电解电容特性会越来越明显.

(2) 电极与土壤的接触电阻不仅与大地的电阻率成正比,并与电极的粗细及入土深度有关.而接触电阻主要由电极附近的土壤的电阻决定,故在干燥土壤上埋放电极时,为了降低接触电阻,可采取在电极周围降低介质导电系数的办法,例如浇水等.该等效电路模型的建立为电场中各点的感应电势信号的提取提供了依据,找到了提高电流的方法和获取感应信号的最佳时机.

参考文献:

- [1] 唐鸿寿,王如松.城市生活垃圾处理和管理[M].北京:气象出版社,2002.
- [2] Godfrey K A. Monitoring for hazardous waste leaks [J]. Civil Engineering, 1987, 57:48~49.
- [3] Williams C V, Dunn S D, Lowry W E. Tracer verification and monitoring of containment systems (II)[A]. Proceedings of the International Containment Technology Conference[C]. St. Petersburg, Florida: 1997,1039~1045.
- [4] Rumer, Ralph R, Mitchell. Assessment of barrier containment technologies[M]. Baltimore, Maryland: International Containment Technology Workshop.1995,355~394.
- [5] White C C, Barker R D. Electrical leak detection system for landfill liners: a case history[J]. Ground Water Monitor Remediation, 1997,17(3): 153~159.
- [6] Glenn T Darilek, Jorge O Parra. The electrical leak location method for geomembrane liners[J]. Journal of Hazardous Materials, 1989, 21:177~187.
- [7] Daren L, Laine, Glenn T Darilek. Detecting leaks in geomembranes[J]. Civil Engineering, 1993,(8): 50~53.
- [8] 中国科学技术大学高分子物理教研室.高聚物的结构与性能[M].北京:科学出版社,1981.
- [9] 陈国光.电解电容器[M].西安:西安交通大学出版社,1986.
- [10] 戴树桂.土壤化学[M].北京:高等教育出版社,1997.
- [11] 傅良奎.电法勘探教程[M].北京:地质出版社,1983.