第38卷第6期 2014年12月

doi: 10.11720/wtyht.2014.6.31

杨萍,孔波,姜余祥,等.防渗膜渗漏偶极子检测的应用[J].物探与化探,2014,38(6):1265-1269.http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.6.31 Yang P, Kong B, Jiang Y X, et al. Application research on dipole method leakage detection[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(6): 1265-1265.http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.6.31

防渗膜渗漏偶极子检测的应用

杨萍1,孔波2,姜余祥1,王燕妮1

(1.北京联合大学信息学院,北京 100101;2.国家质量监督检验检疫总局,北京 100088)

摘要:偶极子法可用于防渗膜渗漏检测。膜上介质厚度以及偶极子与膜的距离会对偶极子检测的灵敏度产生影响。基于填埋场防渗膜高压直流电法的检测原理,对膜上介质厚度对偶极子检测的影响进行了研究,结果表明:防 渗膜上介质厚度增大,通过在介质表面上移动偶极子来检测漏洞是困难的;但若偶极子能逼近膜的表面进行检测, 无论膜上介质厚度多大,在漏洞附近都能检测到明显的电势异常。

关键词: 防渗膜; 渗漏; 偶极子检测

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2014)06-1265-05

填埋作为固体废物的重要处理方式,目前被广 泛应用于处理城市生活垃圾甚至危险废物[1]。为 防止被填埋生活垃圾或危险废物污染周围环境和地 下水资源,我国"危险废物填埋污染控制标准"^[2]、 "危险废物贮存污染控制标准"[3]、"生活垃圾填埋 污染控制标准"[4] 中均规定,填埋场基础设施必须 防渗。高密度聚乙烯膜(HDPE 膜)由于其良好的防 渗性和耐腐蚀性被广泛应用于填埋场防渗系统[5]. 因此 HDPE 膜对阻隔渗滤液于填埋场中,防止其迁 移至填埋场之外的环境、污染土壤和地下水起着至 关重要的作用。但在实践中发现,HDPE 膜是极其 脆弱的。早在1978年,美国环境总署就报道过所有 的垃圾填埋场都会发生渗漏的事实[6],因此,需采 用技术手段对 HDPE 膜的渗漏进行定位并修补。 高压直流电法由于能对整个防渗膜进行百分之百的 无损检测和漏洞定位,成为防渗膜渗漏检测的主要 方法^[7]。

1 检测原理

高压直流电法的基本原理是利用膜的高阻特性,在膜两侧施加高压直流电压。若膜完好,则由于 膜的高阻特性使得回路电流很小(通常为1~2 mA),此时,膜上下介质中的电势近似为零;若膜的 完整性被破坏(即膜上有9洞),则漏洞为电流提供 通路,回路电流显著增大(通常为几十mA)^[8]。由 于此时漏洞相当于一个电流源^[9],漏洞附近电势有 明显异常,因此,可以通过检测膜上介质中的电势分 布来确定漏洞位置。实践中,通常利用有固定间距 的两检测电极(偶极子)来检测介质中的电势差,当 偶极子逼近漏洞的过程中,偶极子检测电压增大,当 偶极子两极关于漏洞对称时,偶极子检测电压为零, 据此可以判断漏洞所在位置。该方法被称为偶极子 法^[10],图1为其检测原理示意。该方法被广泛用于 HDPE 膜裸膜的施工质量验收和膜上铺设覆盖层后 的施工验收^[11]。笔者在实践中发现,膜上介质的厚 度对偶极子检测效果有明显的影响,为此,对膜上介 质厚度对检测结果的影响进行了深入的研究,并对 工程应用中利用偶极子检测提出了建议。



基金项目:国家高技术研究发展计划"863"项目(2007AA061303);

2 理论分析

通常情况下,填埋场横向尺度远大干纵向尺度, 因此,在高压直流电压作用下,从电势分布的角度, 填埋场可以看作具有层状介质分布的物理模型[12]. 自上而下依次为: 膜上介质层, 设电阻率为 ρ_{μ} , 厚度 为h;人工合成衬层,电阻率为 ρ_l ,厚度为t;土壤层, 电阻率为 ρ ,厚度为无穷大。若膜上施加供电电极 为电源正极,则对膜上电势分布而言,漏洞等效为一 负电流源,且该电流源位置为漏洞所在位置,电流的 大小为流经漏洞的电流值^[9]。为简化分析,将漏洞 看作点电流源,将漏洞在膜上介质层上表面的投影 点作为坐标原点,z轴向下建立笛卡尔坐标系,如图 2 所示。由电磁场理论,当膜上供电电极电流为单 位点电流源时,对周围空间任意一点(x,y,z),其电 势分布 G 满足: $\nabla^2 G = -4\pi\delta(x-x_z)(y-y_z)(z-z_z)$,其 中, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, (x, y, z), (x_s, y_s, z_s) 分别为检$ 测点和电流源的坐标^[13]。



图 2 填埋场高压直流电法渗漏检测模型

由电磁场边界条件和交界条件:介质与空气接触面上电流密度法向分量为零,交界面两侧电位函数连续,电流密度的法向分量连续^[13],可以求出膜上供电电极电流 I_s 在膜上介质层任意检测点产生的电势 ϕ_s ,以及漏洞电流 I_0 在膜上介质中产生的电势 ϕ_1 :

$$\begin{split} \phi_{s} &= \frac{I_{s} \rho_{w}}{4\pi} \Biggl[\frac{1}{\sqrt{|r - r_{s}|^{2} + (z - z_{s})^{2}}} + \\ \frac{1}{\sqrt{|r - r_{s}|^{2} + (z + z_{s})^{2}}} + \int_{0}^{\infty} R(\lambda) \frac{e^{-\lambda(h + z_{s})} + e^{-\lambda(h - z_{s})}}{1 - R(\lambda)e^{-2\lambda h}} \cdot \\ e^{-\lambda h} (e^{-\lambda h} + e^{\lambda h}) J_{0}(\lambda | r - r_{s} |) d\lambda \Biggr] , \end{split}$$

$$\phi_{1} = \frac{I_{0}\rho_{w}}{4\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{Q(\lambda)}{1 - R(\lambda) e^{-2\lambda h}} \left[e^{-\lambda(h+z)} + e^{-\lambda(h-z)} \right] J_{0}(\lambda r) d\lambda ;$$
$$R(\lambda) = \frac{\rho_{s} - \rho_{w} + \lambda t \rho_{l}}{\rho_{s} + \rho_{s} + \lambda t \rho_{l}} ,$$

$$Q(\lambda) = 1 + R(\lambda);$$

式中: h 为 膜 上 介 质 厚 度; $| r - r_s | = \sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2}$, 为检测点与源点在 xOy 平面上的投影距离; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为检测点与漏洞在 xOy 平面上的投影距离; $J_0(\lambda r)$ 为第一类零阶 Bessel 函数。

由叠加原理,膜上介质中任意一点的电势 $\phi = \phi_s + \phi_l^{[12]}$,从式中不难看出,在膜下土壤电阻率 ρ_s 、HDPE 膜电阻率 ρ_l 、膜上介质电阻率 ρ_w 不变的情况下,若膜上供电电极位置及电流大小固定,则膜上介质中任意点的电势只与膜上介质厚度 h 和该点所在位置(r,z)有关。

3 模型验证

试验场所为40m×10m×0.8m(长×宽×深)的 模拟试验池,池底铺设厚度为1.5mm的HDPE(高 密度聚乙烯)衬层,池内有约500mm深的水,用来 模拟填埋场的垃圾及其渗滤液。水中放置一个供电 电极(20mm×80mm×1mm镀钌钛片电极),在试验 池的西北角,距离漏洞北20m,西5m;池外的土壤 中埋一供电电极(直径20mm、长度300mm的不锈 钢柱体),距离试验池北部50m。

试验使用设备为 0~1 kV 可调直流电压源 1 台,为有漏洞时提供 20 mA 以上的回路电流,使用 手持式偶极子(长 60 cm、宽 3 cm、厚 2 mm)进行漏 洞定位。

图 3 给出的是在回路电流为 50 mA,偶极子下 沿距离 HDPE 膜 5 cm,沿经过漏洞(两侧各 110 cm) 的检测线每 5 cm 采集一个电压的试验结果。与实 验条件相吻合的仿真条件为: h=50 cm, $\rho_w=100$ Ω



图 3 膜上检测理论值与试验值比较

・m, $\rho_l = 10^{14}$ Ω・m, $\rho_s = 100$ Ω・m,t = 1.5 mm, $I_0 = I_s$ = 50 mA, 膜上供电电极的位置为(-20, -5, 0.5),即 $r_s = 20.62, z_s = 0.5,$ 检测面距离 HDPE 膜 5 cm,即 z =0.45,取点位置与偶极子采集电压位置对应。

通过上述试验和理论仿真的比较,可以看出,理 论值和试验值基本吻合,可以证明该理论分析的可 靠性。

4 参数研究

4.1 研究一: 膜上介质厚度 h 不变, 偶极子检测层 与膜的距离 h-z 变化

假设在防渗层底部中心位置有一个半径为 2 mm 的漏洞,膜上介质电阻率 $\rho_w = 50 \ \Omega \cdot m$,厚度为 h,人工合成衬层电阻率 $\rho_l = 10^{14} \ \Omega \cdot m$,厚度 t = 1.5 mm,膜下介质层电阻率 $\rho_s = 100 \ \Omega \cdot m^{[14]}$,膜上供电电极的位置 $(x_s, y_s, z_s) = (-50, 0, 0.3)$,膜下供电电极位置任意。在供电电流 $I_s = 50 \text{ mA}$,漏洞电流 $I_0 = 48 \text{ mA}^{[12]}$,膜上介质厚度 h = 0.6 m 时,利用间距 s = 0.8 m的偶极子,在介质表面下不同深度 z(即与膜的距离 h-z不同)处过漏洞正上方检测线上,每 20 cm 采集一组数据点,结果见图 4。



图 4 研究一的偶极子检测电压

从图 4 可以看出,在膜上介质厚度相同的情况 下,偶极子的检测面与膜的距离越大(z 越小),偶极 子检测电压的峰峰值就越小,偶极子检测的灵敏度 越低。因此,在利用偶极子进行膜上检测时,偶极子 越靠近膜越有利于检测。

4.2 研究二: 膜上介质厚度 h 增大, 偶极子检测层 与膜上介质上表面的距离 z 固定

固定考虑在填埋场或危险废液暂存库运营期 间,随着接收的垃圾或废液的不断增多,膜上介质厚 度会不断增加,此时,能否通过移动偶极子在膜上介 质的上表面处进行渗漏检测呢?为此,讨论在其他 参数不变的情况下,若h增大,偶极子检测层与膜上 介质上表面的距离 z=5 cm时,间距 s=0.8 m的偶 极子在介质表面下深度 z=5 cm时,过漏洞正上方 检测线上,每 20 cm 采集一组数据点时,偶极子的检 测电压见图 5 所示。



从图 5 可以看出,当偶极子在介质上表面附近 检测时,h 越大,偶极子检测电压的峰峰值越小,当 h =1.5 m时,间距为 0.8 m的偶极子在漏洞正上方膜 上介质表面下 5 cm 处检测的峰值电压不到 0.2 V。 填埋场运营期间,膜上垃圾一般都超过几米厚,实际 操作中,偶极子只能在膜上介质的上表面附近移动; 考虑到膜上介质(固体废物)的厚度以及偶极子检 测线的可能偏离(偏离漏洞正上方),此时,偶极子 检测的峰值电压会更小。因此,在填埋场运营期间, 利用偶极子检测膜上漏洞是困难的。

4.3 研究三: 膜上介质厚度 h 增大, 偶极子检测层 与膜的距离 h-z 不变

对接收固体废物的填埋场而言,偶极子要穿过 膜上介质逼近膜的表面进行连续检测是困难的。但 对危险废液暂存库而言,由于膜上介质为液体,偶极 子贴近膜进行检测是可操作的。此时,h增加是否 影响偶极子检测呢?为此,对偶极子检测层与膜的 距离保持不变,h增大对偶极子检测的影响进行讨 论。其他参数不变,当h不同时,偶极子在距离膜上 表面 5 cm 的平面上沿着过漏洞正上方的检测线,每 20 cm 采集一个数据点时,偶极子的检测电压如图 6 所示。

从图 6 可以看出,若偶极子的检测面与膜的距离保持不变,随着 h 的增大,在过漏洞的检测线上偶极子检测电压的峰值会减小。当 h=0.1 m时,偶极子检测电压的峰值超过 15 V;当 h=0.3 m时,偶极子检测电压的峰值约为 6 V;当 h继续增大到 1 m时,偶极子检测电压的峰值(即偶极子的灵敏度)有所降低,但减幅明显下降。为此,在上述条件下,对



图 6 研究三的偶极子检测电压

膜上介质厚度对偶极子检测电压的峰值的影响进行 了研究。图 7 为不同 h 情况下,与膜的距离为 0.05 m 的检测面上同一偶极子检测的峰值电压。

从图 7 可以看出,当 h 较小(约为 0.1~0.5 m) 时,随着其增加,偶极子检测电压的峰值急剧下降, 但当 h 增大到 1 m 后,偶极子检测电压的峰值几乎 不受其影响(当漏洞电流为 48 mA 时,偶极子检测 电压的峰值约为 5.3 V)。也就是说,若偶极子能逼 近膜的表面进行检测,即使 h 增大,在漏洞处,偶极 子仍能检测到明显的电势异常;因此,让偶极子逼近 膜的上表面,对运营中的危险废液暂存库进行渗漏 检测是可行的。同时,图 7 还表明,对运营中的垃圾 填埋场而言,在防渗膜上表面附近布置固定电极,在 高压直流电压作用下,通过检测电极所在位置的电 势来定位漏洞也是可行的。

5 结论

对填埋场渗漏检测高压直流电法而言,单衬层 填埋场可以看作水平方向为无穷大的三层介质空 间,漏洞电流可视为电流流入端的负电流源和电流 流出端的正电流源;膜上介质厚度不变的情况下,偶 极子的检测面与膜的距离越小,相同尺度的偶极子 的检测电压越大,偶极子检测灵敏度越高;在膜上介 质(固体废物)厚度增大的情况,利用偶极子法来检 测膜上漏洞是困难的,但可以通过在膜的上表面附 近布置固定检测电极的方法来检测漏洞。

对危险废液暂存库而言,膜上废液量的增加会 对偶极子检测精度有影响,但若偶极子能逼近膜的 上表面附近检测,在漏洞附近,仍能检测到明显的电 势异常,因此,可以利用偶极子法进行渗漏检测。



图 7 h 对偶极子检测电压峰值的影响

上述研究成果不仅适用于填埋场防渗膜的渗漏 检测,同样适用于其他以 HDPE 膜作为防渗层的系 统。

参考文献:

- [1] 李国刚,曹杰山,汪志国.我国城市生活垃圾处理处置的现状与问题[J].环境保护,2002(4):35-38.
- [2] GB 18598-2001,危险废物填埋污染控制标准[S].
- [3] GB 18597-2001,危险废物贮存污染控制标准[S].
- [4] GB 16889-1997,生活垃圾填埋污染控制标准[S].
- [5] 赵由才,龙燕,张华.生活垃圾卫生填埋技术[M].北京:化学工 业出版社,2004:140-144.
- [6] Crozier F, Walker T. CQA+GLLS=TEC: how much does your liner leaks[J].Monthly journal of the waste management, 1995(2): 32-36.
- [7] 王斌,王琪,董路,等. 垃圾填埋场土工膜渗漏电学检测法的研究[J].环境科学研究, 2003(2):54-57.
- [8] 能昌信,董路,王琪,等.填埋场地电模型的电学特性[J].中国 环境科学, 2004,24(6):758-760.
- [9] 杨萍,能昌信,董路,等.人工合成衬层渗漏检测高压直流电法 漏洞电流模型[J].环境科学学报,2005,25(10):1361-1364.
- [10] 能昌信,管绍朋,董路.填埋场渗漏检测偶极子法的影响因素分析[J].环境科学研究,2008,21(6):35-38.
- [11] 管绍朋,王玉玲,能昌信,等.偶极子间距对电法检测填埋场渗漏的影响[J].物探与化探,2012,36(3):445-447.
- [12] 杨萍,董路,王琪.单合成衬层填埋场渗漏检测的多介质模型 [J].中国环境科学,2008,28(1):63-67.
- [13] 乔松,周锰钰,白朗.勘探电磁场论[M].北京:中国矿业大学出版社,1991:104-107.
- [14] Darilek G T, Laine D L. Performance-Based specification of electrical leak location surveys for geomembrane liners. Geosynthetics 99 conference Proceeding, Boston Massachusetts, USA, April, 1999:28-30.

Application research on dipole method leakage detection

YANG Ping¹, KONG Bo², JIANG Yu-Xiang¹, WANG Yan-Ni¹

(1. School of Information, Beijing Union University, Beijing 100101, China; 2. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China, Beijing 100088, China)

Abstract: Dipole method can be used to detect the leakage on the impermeable membrane. The thickness of the medium on the impermeable membrane and the distance from the detection point to the membrane will influence the sensitivity of dipole detection. Based on the principle of high voltage DC leakage detection method, the authors analyzed the influence of medium's thickness on the detection. The results show that it is difficult to detect the leakage by moving the dipole on the medium surface when the thickness of the medium increases, but if the dipole can approximate the membrane, the dipole can detect the obvious potential abnormalities when it is approaching the leak.

Key words: impermeable membrane; leakage detection; dipole

作者简介:杨萍(1974-),女,河南新县人,副教授,博士,主要从事信息采集与环境监测方面的研究。

上接 1264 页

Abstract: Based on geochemical investigation of soil in the study area, the authors studied characteristics of selenium distribution, sources and physical-chemical properties of soil in the Beibu Gulf coastal economic zone of Guangxi. The results show that the total selenium content in surface soil is from 0.06×10^{-6} to 0.90×10^{-6} , with the average value of 0.44×10^{-6} . The total selenium content in deep soil is from 0.07×10^{-6} to 0.92×10^{-6} , with the average value of 0.44×10^{-6} . The total selenium content in deep soil is from 0.07×10^{-6} to 0.92×10^{-6} , with the average value of 0.44×10^{-6} . The total selenium content in the surface soil to a certain extent has inherited the selenium from the parent materials. The correlation analysis indicates that the total selenium content in soil has a significant positive correlation with carbon, organic carbon, aluminum oxide and total iron oxide, indicating that organic carbon, iron and manganese oxides in the soil and the weathering and leaching extent play important roles in the geochemical behaviors of selenium. The ecological quality of the study area is excellent with the potential of developing selenium-rich agricultural products.

Key words: Beibu Gulf coastal economic zone of Guangxi; soil environment survey; soil geochemistry; selenium

作者简介:杨志强(1963-),男,教授级高级工程师,本科,地球化学专业,主要研究方向为矿产资源勘查和勘查地球化学。E-mail:zyyangzq@163.com