

DOI: 10.11779/CJGE201512010

# 垃圾土电阻率特性试验研究

赵燕茹<sup>1, 2</sup>, 陈湘生<sup>2</sup>, 黄力平<sup>2</sup>, 周仲华<sup>3</sup>, 谢强<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055 2. 深圳市地铁集团有限公司, 广东 深圳 518112;

3. 兰州大学西部灾害教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000, 4. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 以重庆市长生桥垃圾填埋场作为研究对象, 基于垃圾土颗粒导电性分类, 通过室内试验测试了不同因素(添加不同溶液、孔隙率、含水率、温度等)影响下垃圾土电阻率变化特征。试验结果表明: 当垃圾土中添加渗滤液、NaCl、ZnCl<sub>2</sub>和柴油4种溶液时, 垃圾土电阻率随垃圾土中孔隙率的增加均呈递减趋势; 孔隙率一定时, 随含水率的增加垃圾土中固液并联导电在垃圾土导电通路中的比例增大; 渗滤液对垃圾土电阻率的影响在一定程度上受稀释作用控制, 且随含水率的增加而减小; 随着温度的升高, 垃圾土的电阻率呈指数函数衰减趋势; 含水率一定时, 孔隙率的变化将引起垃圾土中3种导电模式的互相转化, 且电阻率随孔隙率的增加呈幂函数减小趋势; 利用高密度电阻率层析技术, 对现场垃圾填埋体进行了电阻率实测, 同时结合室内试验测试结果对电阻率剖面进行了分析; 研究结果可为分析因降解引起的垃圾填埋体中渗滤液的富集状态和迁移途径的变化, 以及评价垃圾土内部结构的演化提供理论支持。

**关键词:** 垃圾土; 渗滤液; 电阻率; 含水率; 孔隙率; 温度

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)12-2205-12

**作者简介:** 赵燕茹(1983-), 男, 高级工程师, 博士后, 主要从事环境岩土工程方面研究与测试工作。E-mail: zhaoyanru54022@163.com。

## Experimental study on electrical resistivity of municipal solid waste

ZHAO Yan-ru<sup>1, 2</sup>, CHEN Xiang-sheng<sup>2</sup>, HUANG Li-ping<sup>2</sup>, ZHOU Zhong-hua<sup>3</sup>, XIE Qiang<sup>4</sup>

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Metro Group Co., Ltd., Shenzhen

518026, China; 3. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Ministry of

Education, Lanzhou 730000, China; 4. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Based on the classification of its particle sizes, the electrical resistivity properties of municipal solid waste (MSW), collected from Chongqing landfills are studied. The effects of various factors (solution, porosity, moisture content and temperature, etc.) on the electrical resistivity of MSW are tested indoors. The test results show that when more pollutants are added to the specimens, such as oil pollutant, NaCl, ZnCl<sub>2</sub> and leachate solution, a decrease trend is observed for the electrical resistivity with the increase of porosity in the waste. Supposing the porosity of landfills keeps constant, the proportion of bulk that the circuit of water and solid particles connects in parallel increases with the increase of moisture content in the waste. Meanwhile, the effect of leachate on the resistivity mainly depends on the dilution degree of leachate, and a decrease is obtained for the electrical resistivity with the increases of moisture content in refuse. Temperature tests indicate that the correlation between electrical resistivity and temperature can be expressed as attenuation exponential function. When the moisture content keeps constant, three kinds of conductive models may be mutually transformed in the waste with the change of porosity of MSW, and it eventually causes the change of electrical resistivity. Finally, a high-density resistivity chromatography is applied in the field tests. The test results can be applied for analyzing the enriched degree and migration path of leachate in the waste mass due to the process of biodegradation of MSW, and they are in favor of evaluating the change of inter-structure of MSW.

**Key words:** municipal solid waste; leachate; electrical resistivity; moisture content; porosity; temperature

## 1 概 述

随着城市人口的增多和居民生活水平的提高, 生活垃圾量逐日增加, 而选择填埋的方式对垃圾进行处

基金项目: 中国博士后科学基金第57批面上项目(2015M570296); 中央高校基本科研业务费资助项目(106112013CDJZR200008, 10611204CDJZR200012)

收稿日期: 2014-10-11

理将使可用土地资源减少，并引发城市废弃物填埋选址的“地荒”境地。现代化的垃圾填埋场，因占地面积较大，如何对封场后的填埋场进行二次开发利用，成为目前研究的热点，但是由于填埋后的垃圾土成份中含有大量可降解有机物质（食物、果蔬、纤维材料等），导致封场后的填埋体因内部降解诱发不均匀沉降及滑坡灾害发生。当内部生化反应产生的渗滤液积累到一定程度时，就会引起沿填埋体底部衬里（渗滤液回收系统）的破坏，同时填埋体内部湿润线的上升并诱发滑坡灾害和环境污染事件。因此，对填埋封场后的垃圾体进行有规律的实时动态监测，对充分了解垃圾体内部降解和渗滤液积累程度并规避滑坡灾害的发生有实践意义。

垃圾土作为一种可导电、非饱和、高压缩性的复杂介质，其降解过程中产生的渗滤液中携带有大量金属离子，赋存于垃圾体中充当了一部分孔隙液导电的角色，导致垃圾土具有不同于一般土体的导电性特性。Pozdnyakova<sup>[1]</sup>通过对美国 2000 多个受填埋体中渗滤液渗漏污染水井的水质进行了监测和取样分析，得出因降解产生的渗滤液中存在大量的有机液体，同时发现了共存的 44 种无机液体（其中普遍存在无机液体中的 6 种离子为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ）；并且指出垃圾土在生化反应和降解中产生的渗滤液，因含有大量的离子，在垃圾土中的赋存能够引起垃圾填埋体电阻率的变化。

封场后的垃圾填埋体将进行一系列的生物化学反应（好氧和厌氧反应），并且伴随有一定量渗滤液及生物反应气（ $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CH}_4$  等）的溢出；垃圾土在沉降过程中，其内部孔隙结构等随降解处于动态变化过程；填埋体内部有机质降解产生的渗滤液及外部雨水渗入填埋体将导致含水率的增加。Hossain 等<sup>[2]</sup>研究指出，随着生物反应器技术在填埋场作业的推广应用，利用渗滤液回灌技术来加速填埋场的降解和沉降进程的同时，有可能因渗滤液的回灌导致填埋体力学参数的弱化和土体结构特性的改变，并诱发严重的滑坡灾害。例如 2000 年 7 月 10 日发生于菲律宾奎松市的 Payatas 垃圾体，在持续了 10 d 的暴雨后，因雨水下渗和内部降解诱发了严重的滑坡灾害，共造成 278 人死亡<sup>[3]</sup>。因此对正在作业或者将要封场的大型现代化填埋体进行监测研究，将有助于规避滑坡灾害事故的发生。垃圾土具有成份复杂性和不均匀特性，导致在同一深度所取样品的成份和尺寸都存在一定的差异，而通过室内外测试试验得到的垃圾土力学参数分散性较大，而利用这些参数对填埋场的稳定性进行分析存在一定的

不确定性。相比而言，垃圾土是一类具有特殊导电性的非饱和土体，通过在室内试验中对影响垃圾土电阻率特性的相关因素进行量化研究，加之现有比较成熟的无损检测技术（高密度电阻率层析技术），就有可能对填埋封场后的垃圾体在压缩和降解过程中的孔隙结构和渗滤液富集程—运移途径进行动态监测和反演计算，从而为预防渗滤液泄露引起的环境污染及填埋体破坏引起的滑坡灾害进行预测。

目前国内对土体电阻率特性的研究，主要集中在非饱和或饱和污染土方面；许多学者<sup>[4-8]</sup>率先对普通非饱和土体的电阻率特性进行了研究，并且得到了大量测试数据；韩立华<sup>[9]</sup>以  $\text{CuCl}_2$  作为渗滤液中的主要化合物，通过试验得到添加污染物后污染土的电阻率下降，且随添加含量的增加，电阻率越低；王玉玲等<sup>[10]</sup>通过对土的电阻率特性研究，建立污染土中渗滤液浓度与电阻率变化关系，成为反演和评价垃圾土中渗滤液浓度、富集状态和运移规律的一种方法。查甫生等<sup>[11]</sup>借鉴 Mitchell 建立的土的三元导电模型，推导了一种有普遍适用性的非饱和土电阻率模型，为今后展开更加复杂的垃圾土电阻率模型提供了很好的指导意义。国外对土体电阻率的研究主要集中在饱和土和非饱和土的电阻率模型研究以及因渗滤液泄露引起的土体污染监测两个方面：①电阻率模型研究方面，Archie<sup>[12]</sup>在不考虑固体颗粒导电性的基础上，提出了适用于饱和无黏性土、纯净砂岩的电阻率结构模型，但其假设土体颗粒的导电是通过孔隙水来导电的；Mitchell 等<sup>[13-14]</sup>针对不同土的电阻率特性（如黏性土）对 Archie 模型进行了修正和拓展，并建立了三元导电模型；Waxman 等<sup>[15]</sup>根据土体和液体导电性能及导电模式，考虑到土颗粒表面导电性对整个土体电阻率的影响，假定土的导电是通过由土颗粒与孔隙水两个导体并联而组成的整体导电模型，建立了非饱和黏性土的电阻率模型。Halvorson 等<sup>[16]</sup>通过试验建立了一个非饱和土电阻率模型，但是该模型中考虑的影响因素较少，实际应用中有一定的局限性。②土体颗粒电阻率影响特性方面：Yoon 等<sup>[17]</sup>通过在不同土中添加渗滤液，得出电阻率随孔隙液离子浓度的增大而减小的；Grellier 等<sup>[18]</sup>通过试验得出，填埋体在经过短期的渗滤液回灌后，垃圾土的电阻率将主要由含水率和温度场决定。填埋体在后期降解过程因生化反应不但产生含有大量离子的渗滤液外，还会产生大量的生物反应气，并释放出相当的热量，同时温度的升高又加速了渗滤液中离子的运动速度，进而对电阻率造成影响<sup>[19]</sup>。

现有对土体导电特性的研究表明孔隙水导电仅是其中的一种，根据溶液导电特性，土体导电的大小主

要取决于孔隙溶液中可移动离子的数目、离子所带电荷数及其迁移率的规律<sup>[20]</sup>，填埋封场后，垃圾土内部有机质的降解对内部孔隙率、含水率、饱和度等的影响将直接决定垃圾土中各种导电模式（孔隙水与固体颗粒并联、孔隙水和固体颗粒串联然后与固体或孔隙水并联形成的通路）在整个导电模式中所占的比例以及对电阻率的影响。除此之外，垃圾土的电阻率还受诸多因素(孔隙形状和结构、饱和度、温度以及固体颗粒成份、颗粒形状、颗粒定向性以及固化状态等)的影响<sup>[3]</sup>。但是目前这些因素对垃圾土电阻率的影响规律以及相关电阻率探测方法，在填埋场中的应用以及反演解释尚处于研究之中，相关研究结果具有较大的不确定性、模糊性<sup>[21-22]</sup>。

本次研究选取重庆市长生桥填埋场（该填埋场目前为西南地区最大的一座现代化卫生填埋场，主城区约70%的垃圾以1800 t/d的速度在此堆填，因此垃圾成份具有较好的代表性）现场钻孔取到的试样作为研究对象，基于前人对常规饱和或非饱和土体电阻率理论研究基础上，对垃圾土进行导电分类（图1所示）和各种成份分析（表1）。基于Zhao等<sup>[23]</sup>对该研究区域填埋场垃圾土典型成份分类，在室内重新配置了垃圾土重塑样，测试并分析了垃圾土在不同孔隙率、含水率以及添加不同种类污染溶液（选取常见的NaCl、ZnCl<sub>2</sub>和柴油）时其电阻率变化特征；对研究区域进行了现场高密度电阻率法测试试验，基于室内测试结果，分析了不同填埋时期不同深度垃圾土电阻率变化特征。研究结果可为今后垃圾土电阻率理论的发展以及在现场利用高密度电阻率测试技术对垃圾土内部因降解引起的渗滤液赋存以及内部结构的变化实行快速、动态监测，提供较好的参考数据和理论支持。

## 2 垃圾土导电性分类

首先现场钻取垃圾填埋场新鲜垃圾，然后根据垃圾土导电性将其成份分为以下 4 类(图 1 所示)：①固体(各种导电和不导电的固体颗粒)；②液体(包括原有孔隙水及后期生化反应产生的渗滤液)；③气体(填埋体内部残留的 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等以及厌氧降解阶段产生的新的 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub> 等气体)，在传统的导电性测试中，在缺乏电离剂(温度，放射性射线等)气体通常被认为是良好的不导电体；④混合气体，是

表 1 试验用垃圾土的基本物理指标

Table 1 Physical characteristics of test soils

比重 $G_s$	天然含水率 $w/\%$	孔隙比 孔隙率			粒径分布及含量/%			重庆地区垃圾土典型组成成分及百分含量/%						
		e / %	n	>1 mm	1.0~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.1 mm	叶果	杂骨	纸类	织物	橡塑	竹木	无机物
1.7~ 2.56	43.17~ 58.95	1.0~ 4.0	0.5~ 0.8	44.90	13.97	15.20	26.83	22.82	1.55	5.39	2.84	11.82	1.53	23.57

经内部高温作用下形成的水蒸气与有机污染气体混合形成的湿混合气体，其导电性呈弱导电特性，在垃圾土试样中也起一定的导电作用，而土体中的导电模式主要以固相导电、液相导电以及固液相串联导电3种模式（简称固液并联、固液串联、固液串联与固液并联）为主。如图1所示，垃圾土中不导电的组成成份主要有塑料颗粒、动物杂骨及气体成份（后期生化反应气体的产出将在一定程度上改变填埋体的孔隙结构，从而对垃圾土固体颗粒的导电性产生一定的影响），而剩余的颗粒都具有不同程度的导电性。

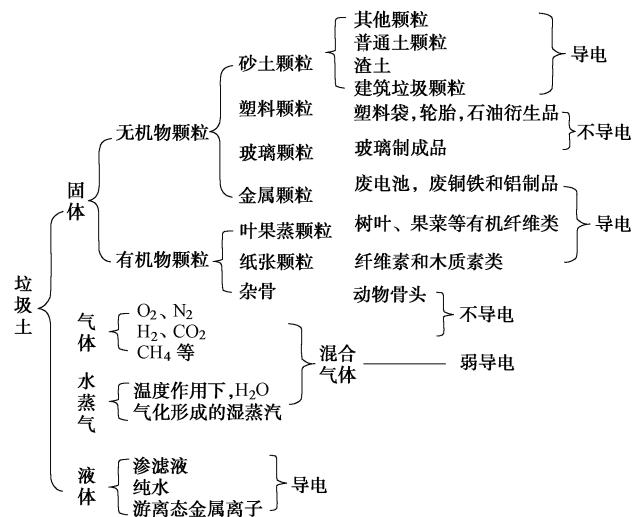


图 1 垃圾土组成及导电性分类

Fig. 1 Composition and electrical conductivity category of MSW

根据垃圾土颗粒导电性分类,在外加电场作用下,土中电流传导的路径可分为3类<sup>[14]</sup>,图2(a)所示为垃圾土中的固液气三相组成;图2(b)示为土颗粒和孔隙液串联形成的通路(路径1)、土颗粒表面导电(路径2)及孔隙溶液导电(路径3)为3种路径在垃圾土中的导电通路。

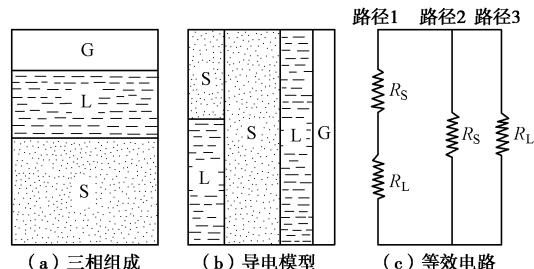


图 2 垃圾土导电模型

Fig. 2 Conduction model of MSW

图 2 中,  $R_S$ ,  $R_L$  分别代表固体相导电的电阻值、液体相单独导电的电阻值,  $R_S+R_L$  为固液串联导电的电阻值; 路径 1 为固体和液体串联形成电流通路, 路径 2 和 3 为垃圾土中固体颗粒和孔隙液体单独形成导电通路。

### 3 垃圾土电阻率试验测试

#### 3.1 试验材料

由于垃圾土试样组成成份不均匀, 导致野外试验所得测试数据离散性较大, 而室内试验具有可操作性较强, 得出的数据准确性好, 离散性小的特点。因此本次试验在分析原状垃圾土的组成成份基础上, 通过室内试验, 进行垃圾土电阻率的测试分析。垃圾土中含水状态、污染液体类型、孔隙率均对垃圾土的导电性质产生交互影响, 因此本次试验采用正交设计方法, 试验过程中选取孔隙率、含水率等为自变量, 控制其中一组自变量变化, 而其他自变量不变, 测量因变量电阻率的变化。在含水率与电阻率的影响分析中, 为了减小试样中原有孔隙水对添加溶液的稀释作用, 以及降低对电阻率变化的影响, 试样配置过程中重塑垃圾土试样  $w \leq 10\%$ , 密度为  $1.22 \text{ g/cm}^3$ 。垃圾土试样在试验前经碾碎, 过  $2 \text{ mm}$  筛, 烘干等处理, 典型组成成份及基本物理量见表 1 (采用美国布鲁克公司 D8 射线衍射仪对垃圾土中黏土矿物的化学成份进行了测试, 具体数值如表 2 所示), 所选用的渗滤液中各组成成分浓度和物理参数见表 3, 颗粒粒径级配如图 3 所示。通过对填埋场渗滤液测试, 发现其含有大量可导电的金属离子 (主要含有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  以及  $\text{Cu}^{2+}$  等离子), 为了验证渗滤液中不同离子及有机油脂类对垃圾土电阻率特性的影响, 本次试验选用渗滤液中普遍存在的 4 种溶液 (原状渗滤液、 $\text{NaCl}$  和  $\text{ZnCl}_2$ : 代表无机渗滤液、0#柴油代表有机油脂类), 蒸馏水作

为不同浓度  $\text{NaCl}$ 、 $\text{ZnCl}_2$  溶液电导率的参比液体, 具体数据见表 4。

在测定渗滤液浓度和电阻率关系时, 在垃圾土中添加不同浓度的渗滤液, 对配置的渗滤液首先进行充分调拌, 然后将渗滤液均匀喷洒式添加到测试垃圾土试样中, 以确保液体湿润混匀。然后将称取的垃圾土样均匀装入 Miller soil box<sup>[1]</sup> 中, 压实并确保试样表面与垃圾土样盒边缘齐平, 连接线路, 读取  $\Delta U$  及  $I$ , 由式 (1) 计算垃圾土样电阻率 (为了消除温度对测试结果的影响, 除温度测试外, 其他试验均在  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  温度环境下进行)。

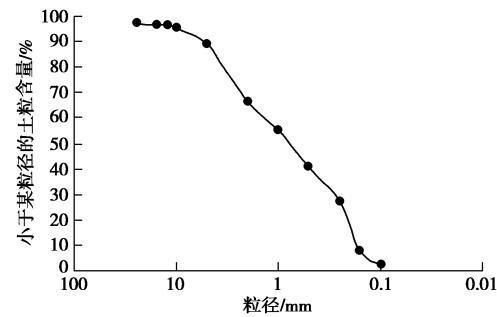


图 3 垃圾土颗粒分析曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of MSW

#### 3.2 试验方法

试验采用标准 Miller soil box<sup>[3]</sup> 和四电极电阻率测试装置, 连接线路如图 4 所示。图 4 中,  $A$ ,  $B$  为供电电极,  $M$ ,  $N$  为测量电极。Miller soil box 由  $3 \text{ mm}$  厚的有机玻璃制成, 尺寸为  $21.5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ , 长度方向的两个面内侧镶嵌  $4 \times 3 \text{ cm}$  的薄铜片, 铜片通过铜螺丝与电线连接。测量电极为直径  $2 \text{ mm}$  的铜丝, 间距  $12 \text{ cm}$ 。本次试验中, 回路中的电流大小及测量电极间电位差由 DDC-2B 电子自动补偿仪测得, 交流电源频率为  $50 \text{ Hz}$ , 电位差  $\Delta U$  在  $1200 \sim 1600 \text{ mV}$  之间。

表 2 黏土矿物化学成份测试参数

Table 2 Chemical component test results of soil

成份	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	其他
含量/%	1.217	68.321	14.68	0.003	8.25	1.843	1.255	1.447	2.984

表 3 渗滤液中污染物浓度及物理性质参数

Table 3 Constituent concentration and physical parameters of collected leachate

分类	COD /(mg·L <sup>-1</sup> )	DOC /(mg·L <sup>-1</sup> )	pH	金属离子/(mg·L <sup>-1</sup> )					非金属离子 /(mg·L <sup>-1</sup> )		密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	电导率 /(Ω·m <sup>-1</sup> )
				Cu <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	NI	CL <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>		
渗滤液	11000~13000	20~35.17	5.34~8.05	3.45	320	7.6	470	0.46	1410	92	0.995	0.31

表 4 蒸馏水及 NaCl、ZnCl<sub>2</sub> 溶液的电导率Table 4 Electrical conductivity values of distilled water, NaCl and ZnCl<sub>2</sub> solution

分类	0%	0.5%	0.8%	1.0%	1.4%	2.3%	3.5%	(S/m)
蒸馏水	0.02	—	—	—	—	—	—	—
NaCl	0.02	1.69	1.79	1.80	1.84	1.82	1.81	—
ZnCl <sub>2</sub>	0.02	1.47	1.57	1.57	1.58	1.50	1.51	—

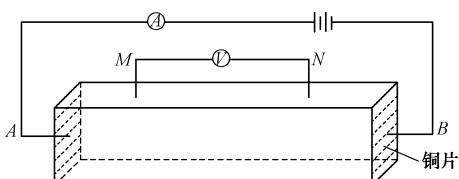


图 4 电阻率测试试验装置

Fig. 4 Laboratory apparatus of electrical resistivity measurement

垃圾土样电阻率计算公式为<sup>[4]</sup>

$$\rho_{\text{msw}} = \frac{\Delta U}{I} \cdot \frac{S}{l}, \quad (1)$$

式中,  $\rho_{\text{msw}}$  为试样的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ ),  $\Delta U$  为测量电极间电位差 (V),  $I$  为电流强度 (A),  $S$  为土样的横截面积 ( $\text{m}^2$ ),  $l$  为测量电极间距离 (m)。

## 4 试验分析

### 4.1 孔隙率 - 含水率 - 电阻率关系

垃圾土作为一种特殊的非饱和土体, 其孔隙率是随着深度的增加而有减小趋势<sup>[5]</sup>, 垃圾土的孔隙率和含水率对电阻率的变化有直接影响, 因此本次试验对垃圾土的孔隙率、含水率与电阻率之间关系进行分析, 同时与文献中砂土、黄土电阻率试验曲线进行对比。

图 5 为试样孔隙率与电阻率变化曲线 ( $w=10\%$ , 比重  $G_s=1.80$ )。从试验曲线可以得出, 当垃圾土含水率一定时, 随着孔隙率的增加, 垃圾土电阻率呈幂函数减小趋势; 分析认为, 随着孔隙率的增大, 垃圾土试样中孔隙水的导电通路增加, 导致土颗粒之间的导电通路向固液共同导电模式转化, 电阻率值逐渐减小。

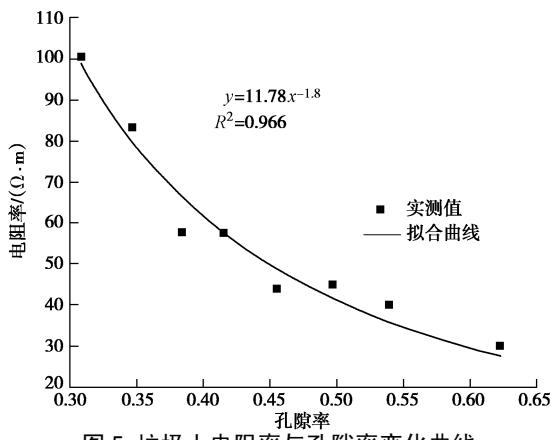


图 5 垃圾土电阻率与孔隙率变化曲线

Fig. 5 Porosity vs. electrical resistivity of MSW

图 6 所示为不同孔隙率 (0.45~0.65) 的垃圾土试

样其电阻率随含水率 (9.5%~25%) 变化曲线 (垃圾土中饱和度对电阻率的影响关系可通过试样的孔隙比、比重以及含水率进行换算得到)。如图 6 所示, 不同孔隙率的垃圾土试样和砂土的电阻率值, 都随着含水率的增加而不断减小; 分析认为随着含水率的增加, 垃圾土中可导电的电流通路增加了 (孔隙水作为导电通路的比例有所增加, 即电流  $I$  增大), 从而引起垃圾土的电阻率值逐渐下降; 当含水率为 25% 时, 孔隙率的最大值  $n=0.650$  对应的电阻率值达到最小值  $14 \Omega \cdot \text{m}$ , 说明垃圾土电阻率的减小与导电通路的变化有直接关系。通过对比文献中黄土和砂土电阻率试验曲线<sup>[17,27]</sup>, 得出砂土中孔隙率 ( $n=0.416, 0.452, 0.489$ ) 的增大, 电阻率也逐渐减小 ( $59.4 \sim 716.0 \Omega \cdot \text{m}$ ), 相比垃圾土, 砂土中石英颗粒的导电性很弱, 其电阻率趋于无限大, 因此在试样含水率较小的情况下, 砂土的电阻率值较垃圾土电阻率值大; 随着含水率的增加, 两种试样中的导电通路逐渐由固体颗粒导电为主逐渐过渡到固液共同导电为主, 并随含水率的增加而最终演变为以孔隙液体导电占主导作用的导电通路; 本次测试得出垃圾土的低阻部分与砂土较为接近, 但大于测试黄土 ( $n=0.42$ ) 的电阻率值 ( $2.7 \sim 26.5 \Omega \cdot \text{m}$ )。根据 Mitchell 三元导电模型<sup>[8]</sup>, 当温度场保持不变时, 随着土中孔隙率的减小, 土颗粒之间的接触面积增大, 但是随着孔隙液体的导电通路减少, 导致可导电的通路减少, 对应的电阻率升高; 当孔隙率增大时, 土颗粒之间的接触减少, 而土体中贯通的液体导电通路增加, 土体导电通路变为土颗粒之间、液体之间以及固液相的导电通路三者并存; 随着土体含水率的继续增大, 土水并联所占通路的比例增加; 当试样的饱和度达到一定程度后, 逐渐转变为以孔隙液体导电为主, 固液导电为辅的导电模式, 且电阻率逐渐趋于稳定, 说明此时的导电线路已经稳定并开始受溶液稀释程度的控制。本次试验得出, 在不考虑降解产生的渗滤液量的情况下, 随着垃圾土孔隙率的增大, 固液导电形成为的电流通路增大了 (即电流  $I$  增大了), 则对应的电阻率值相应的减小了<sup>[20]</sup>。图 7 为在垃圾土中分别加入污染溶液 (原状渗滤液、NaCl、ZnCl<sub>2</sub> 代表无机污染溶液、#0 柴油代表有机污染溶液、蒸馏水作为参比液体) 后, 孔隙率变化对电阻率影响曲线 ( $w=10\%$ ,  $\rho=1.22 \text{ g/cm}^3$ )。

如图 7 示曲线斜率来看, 随垃圾土试样的孔隙率的增加 (0.30~0.42), 电阻率值都呈递减趋势; 添加渗滤液时, 电阻率从 101.6 降低到 14.9  $\Omega \cdot \text{m}$ ; 添加 NaCl 和 ZnCl<sub>2</sub> 溶液时, 电阻率值分别从 82.1, 80.3  $\Omega \cdot \text{m}$  降

低至  $27.6$ ,  $24.0 \Omega\cdot m$ ; 蒸馏水次之, 从  $126.5$  降低至  $69.3 \Omega\cdot m$ ; 相比而言, 添加柴油的垃圾土电阻率呈高阻递减状态且变化较大, 从  $321.8$  降低至  $197.0 \Omega\cdot m$ 。由于实际填埋的垃圾土中含有大量厨房类油脂类, 在填埋后期厌氧降解阶段也会产生少量醇类, 会导致垃圾土的电阻率呈高阻现象<sup>[24-25]</sup>; 本次试验得出, 油脂类引起的高阻现象会随着孔隙率的增加而逐渐减小。

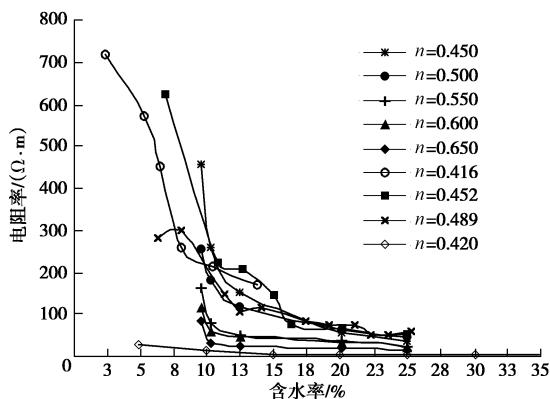


图 6 不同孔隙率下垃圾土电阻率与含水率变化曲线

Fig. 6 Water content vs. electrical resistivity under different porosities of MSW

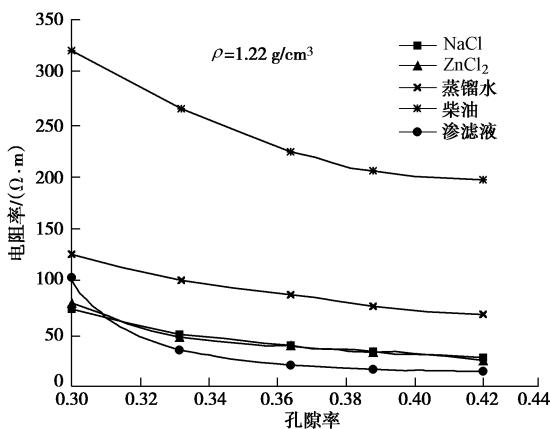


图 7 添加不同溶液垃圾土电阻率随孔隙率变化曲线

Fig. 7 Porosity vs. electrical resistivity of MSW by adding different solutions

#### 4.2 添加各种溶液时电阻率变化特性

现有的研究表明垃圾填埋封场后, 后期好氧和厌氧阶段因降解产生含有大量可导电金属离子的渗滤液体, 且在生化反应结束后才逐渐停止产出<sup>[24]</sup>。垃圾土的电阻率不仅受到饱和度、孔隙率等影响外, 还受自身降解过程中产生的渗滤液中带有大量离子溶液充当一部分孔隙溶液导电对电阻率造成影响, 分析认为这也是导致深部垃圾体呈低阻的原因之一。随着降解的不断发生及外部雨水渗入, 将引起填埋体内部渗滤液赋存量的增加和运移途径增加, 这也是导致不同深度

范围内填埋体电阻率值不同的原因之一。图 8 (a) 所示为烘干后的垃圾土试样分别添加浓度为 5%, 10%, 30% 的渗滤液 (浓度由加入渗滤液的体积与蒸馏水体积之比确定) 时试样湿密度与电阻率关系曲线, 并与现有文献中砂土的电阻率变化进行对比<sup>[26]</sup>; 图 8 (b) 为试样中加入不同浓度的渗滤液,  $\text{NaCl}$  和  $\text{ZnCl}_2$  溶液时电阻率变化曲线, 并与同等工况下文献中黄土电阻率变化曲线进行了对比; 图 8 (c) 为垃圾土试样中添加<sup>#0</sup> 柴油时对应的电阻率变化曲线, 同时与文献中添加汽油的黄土电阻率曲线进行了对比分析<sup>[26]</sup>。

Yoon 等<sup>[17]</sup>、Mansukhani<sup>[27]</sup>认为, 垃圾土的电阻率随含水率的增大而减小, 但是对于含水率相同的试样, 电阻率值是随孔隙率变化而变化的; 例如对于含水率相同的两块试样, 孔隙率较小的试样, 测试得到的电阻率值偏小。分析认为这是由于随着孔隙率的减小, 土颗粒之间的接触面积增大, 导致土体中可导电通路增加 (电流增大)。因此利用常规含水率指标是不能作为判定土电阻率的标准, 因为相同含水率的土样可能孔隙率不同 (或干密度不同)。电阻率受单位体积土体中所含水的重量的影响比传统含水率 ( $w = (m_w / m_s) \times 100\%$ , 式中,  $w$  为含水率,  $m_w$  为土里中孔隙水的质量,  $m_s$  为烘干后土的质量, 定义为水的质量与干土质量之比) 要大, 且定义为每立方厘米垃圾土的水分密度, 表达式如下<sup>[27]</sup>:

$$m_d = \frac{m_w}{v_t} = \frac{m_w \cdot m_s}{v_t \cdot m_s} = \frac{m_s}{v_t} \cdot \frac{m_w}{m_s} = w \cdot \gamma_d \quad (2)$$

式中  $m_w$  为孔隙水的质量;  $m_s$  为垃圾土中固体相的质量;  $v_t$  为垃圾土试样总体积;  $w$  为土的常规含水率;  $\gamma_d$  为垃圾土试样的干密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (如式 (2) 所示, 水分密度的增加主要是渗滤液的添加最终引起单位体积试样中含水率的变化, 从而对电阻率造成影响)。

如图 8 (a) 所示, 在垃圾土试样中添加不同浓度的渗滤液后, 随着试样中添加溶液浓度的增加, 垃圾土的电阻率呈幂函数下降趋势 (与砂土电阻率变化趋势一致); 当添加的渗滤液浓度为 30% 时, 其电阻率值降幅最大 ( $3.5 \sim 57.8 \Omega\cdot m$ )。分析认为, 渗滤液中金属离子的含量随着浓度的增加而增加, 导致液体导电通路以及固液串联导电通路中, 因可活动金属离子含量的增加而引起导电通路中电流强度增加, 最终导致电阻率值减小, 其中添加渗滤液浓度高的试样其对应的电阻率值最低; 相比而言, 砂土的密实度以及颗粒级配较垃圾土好, 且其中含有大量的二氧化硅等不导电颗粒, 因此对应的电阻率变化区间值在较小范围内 ( $1.7 \sim 51.6 \Omega\cdot m$ ); 根据图 8 (a) 所示曲线, 分析认为随着不同渗滤液的增加, 垃圾土中的导电模型由

土颗粒导电、土颗粒与液体串联导电逐渐过渡到 3 种电路并存的连接方式, 尤其是随着渗滤液浓度的增加, 渗滤液中大量导电离子含量的增加, 使得添加的渗滤液和原有的孔隙水一起形成的土水并联电路中, 电流强度增大, 导致电阻率值减小。

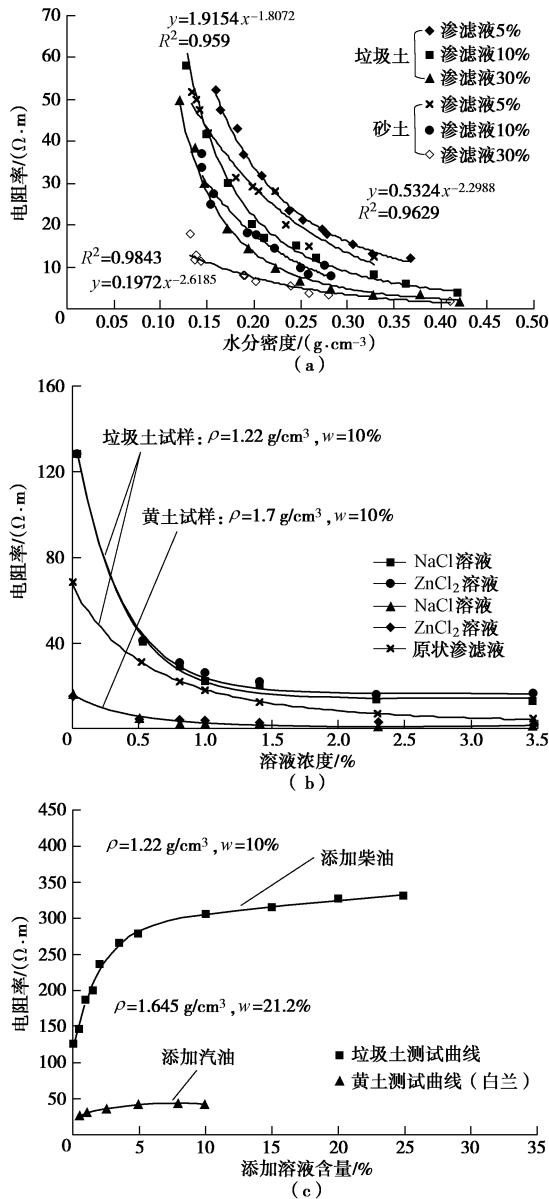


图 8 添加不同种类溶液时垃圾土电阻率曲线

Fig. 8 Curves of electrical resistivity by adding different solution in MSW

根据试验曲线, 电阻率与垃圾土试样中水分密度之间符合幂函数关系曲线, 可表示为

$$\rho_{msw} = c \cdot m_d^{-k}, \quad (3)$$

式中,  $m_d$  为垃圾土中水分密度,  $c$  和  $k$  为试验参数。

如图 8(b) 所示, 随着垃圾土中添加渗滤液、NaCl 和 ZnCl<sub>2</sub> 溶液浓度的增加, 垃圾土的电阻率都呈幂函数减少趋势。当添加渗滤液的浓度从 0 增加到 3.5% 时, 对应的电阻率值从 68 降低到 3.5  $\Omega \cdot m$ ; 而添加 NaCl

和 ZnCl<sub>2</sub> 溶液时, 对应的电阻率从 134.5 递减至 31.8  $\Omega \cdot m$  左右。其中在 0%~1% 时, 垃圾土的电阻率变化受添加溶液的影响最为明显, 降低幅度达 80.4%; 当添加溶液浓度大于 1% 之后, 电阻率下降逐渐趋于稳定。相比 3 种溶液曲线, 添加渗滤液时的电阻率测试大于黄土测试值, 而小于同类垃圾土中添加 NaCl 和 ZnCl<sub>2</sub> 溶液的测试值; 对于直接添加 NaCl, ZnCl<sub>2</sub> 溶液的黄土试样, 随着溶液浓度的增加, 其电阻率值也呈幂函数递减趋势, 且其变化范围 (1.4~16.2  $\Omega \cdot m$ ) 较小且远小于垃圾土试样的电阻率值, 分析认为这与黄土颗粒的孔隙率和密实程度较小有关, 同时与黄土颗粒表面的矿物离子总量在溶液作用下形成的导电通路的增加量有一定关系。

如图 8(c) 所示, 垃圾土的电阻率值随柴油含量 (柴油含量定义为柴油与蒸馏水的体积比) 呈指数增大关系, 此趋势与在黄土中添加汽油得到的电阻率增长趋势相同<sup>[24]</sup>, 但是电阻率变化范围 (124.6~331.4  $\Omega \cdot m$ ) 远大于黄土 (25.0~41.6  $\Omega \cdot m$ )。当柴油的含量大于 10% 后, 继续添加柴油对垃圾土电阻率的影响逐渐减小。研究结果表明, 柴油是由各族烃类化合物组成的有机物, 不具导电性<sup>[28-29]</sup>。由于黏土矿物中含有大量的石英颗粒, 而柴油对石英的浸润性大于蒸馏水<sup>[30]</sup>, 因此当试样中添加柴油 (主要由烷烃、烯烃、环烷烃、芳香烃、多环芳烃与少量硫 (2~60 g/kg)、氮 (<1 g/kg) 及添加剂组成的混合物), 土粒表面颗粒孔隙充填柴油后, 增大了传导路径的迂曲度, 且随柴油含量增大, 添加的柴油会占据土体中一部分孔隙体积, 并在一定程度上对颗粒表面和孔隙水的导电通路有所改变。随着添加柴油量的不断增加, 固体颗粒和孔隙水导电通路减少导致总的电流强度减少, 即测试的电阻率值增大; 当孔隙被污染溶液充满后, 试样的导电通路主要以固体颗粒表面的通路为主, 孔隙液体导电为辅。

#### 4.3 电阻率 - 温度试验分析

垃圾填埋场封场后, 垃圾填埋体内部可降解有机物在好氧和厌氧降解反应阶段产生了大量的热量, 并分散于填埋体中。Yesiller 等<sup>[19]</sup>通过对欧美 4 个填埋体不同深度温度的测试, 得到在 20~60 m 深度范围对应的温度区间在 40°C~65°C, 并且指出垃圾中因含有大量降解产生的渗滤液时, 温度的升高有助于: ①降低孔隙水的黏滞性, 增加渗滤液中离子迁移速率; ②增大孔隙水的离解度, 使孔隙水的矿化度增大, 对电阻率产生影响<sup>[7]</sup>。当垃圾土中孔隙溶液含有一定量的金属离子时, 温度对电阻率的影响尤其显著。本次试验通过在垃圾土中分别添加不同种类的污染溶液 (收

集的渗滤液和 NaCl 溶液), 来测试其在温度变化下所表现出的电阻率变化特性, 并对测试结果进行了对比分析, 试验曲线如图 9 所示 ( $w=15\%$ ,  $n=0.42$ )。

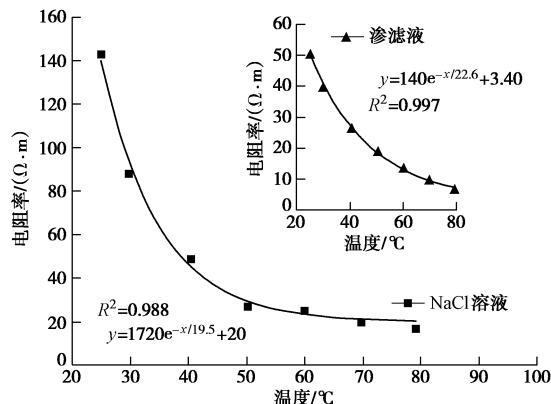


图 9 温度对电阻率影响关系曲线

Fig. 9 Relation between electrical conductivity of leachate and temperature

从图 9 中可以得出, 以  $T_s=25^\circ\text{C}$  为标准<sup>[31]</sup>, 得到随着填埋体中温度的升高, 添加渗滤液的垃圾土试样, 其电阻率在  $52.6\sim9.7\ \Omega\cdot\text{m}$  之间, 添加 NaCl 溶液的电阻率值在  $143.0\sim19.7\ \Omega\cdot\text{m}$  之间; 比较得出添加渗滤液对应的电阻率值比添加 NaCl 溶液的小 3 倍以上, 且两者的电阻率与温度之间均满足指数函数关系。分析认为这是由于渗滤液中含有更多可导电的金属离子, 随着温度的不断升高, 内部孔隙液体的黏滞性逐渐降低, 同时渗滤液中金属离子的运移速度以及离子交换速度逐渐加快, 最终导致测试电阻率值的降低。

垃圾土中占有一定比例的黏土矿物, 其土中的黏粒组(小于 2 mm)包括黏土矿物、游离氧化物及少量的石英、长石、云母等原生残余矿物颗粒、有机质等物质。当黏粒与溶液接触时, 会选择性吸附与它本身结晶格架中相同或相似的离子, 从而使其表面带电。(例如将难溶盐碳酸钙组成的黏粒置于氯化钙( $\text{CaCl}_2$ )溶液中, 因溶液中的钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )与方解石结晶格架中的钙离子一致, 所以溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  被方解石表面吸附, 使其表面带负电)。若黏粒由许多可分解的小分子缔合而成, 则其与水作用后生成离子发生基, 而后分解, 再选择性吸附与矿物格架上性质相同的离子与其表面而带电, 而此类现象会随着温度的升高而加速。

随着黏土矿物因结晶的格架破坏、表面分子的电离、选择性吸附及黏土矿物的同晶替代等在颗粒表面形成了电荷, 周围形成静电引力场。当黏粒与渗滤液溶液相互作用后, 孔隙液体中与黏粒表面电荷符号相反的离子同时受两种力的作用<sup>[16]</sup>: 一种是黏粒表面的

吸着力, 使它紧贴土粒表面; 另一种是离子本身热运动引起的扩散作用力, 使离子有离开颗粒表面, 扩散到溶液中的趋势。当温度增加时, 黏土颗粒表面液体黏稠度降低, 同时加速了周围离子的运动速度, 导致两种力都有不同程度的减小, 从而导致测试的垃圾土电阻率减小。

根据图 10 所示, 垃圾土电阻率与温度之间满足如下函数关系:

$$\rho_{\text{msw}} = Be^{-T/C} + D \quad , \quad (4)$$

式中,  $\rho_{\text{msw}}$  为垃圾土的电阻率,  $B$ ,  $C$  为试验参数, 试验中  $T$  大于  $25^\circ\text{C}$ 。(推荐试验参数  $B=140$ ,  $C=22.6$ ,  $D=3.40$ )。

为了消除温度变化对电阻率测试结果的影响, 当温度大于  $25^\circ\text{C}$  时, 需要对温度影响进行校正, 采用 Grellier 等定义的电阻率与温度关系公式<sup>[32]</sup>:

$$\frac{1}{\rho_{\text{msw}}} = g(T) \quad , \quad (5)$$

$$\Delta\rho_{\text{msw}} = \frac{g(T_s) \cdot (T - T_s)}{g(T_s + T) - g(T_s)} \quad , \quad (6)$$

式中,  $\rho_{\text{msw}}$  为以标准温度  $25^\circ\text{C}$  作为参考值对应的不同温度下电阻率增加值,  $g(T_s)$  为标准温度  $T_s=25^\circ\text{C}$  下垃圾土的电阻率值,  $g(T)$  为温度为  $T$  时对应的电阻率值,  $g(T+T_s)$  为  $T > T_s$  时, 对应的电阻率增加值,  $T$ ,  $T_s$  为温度符号。

#### 4.4 稀释倍数 - 电阻率试验分析

近些年, 因填埋体内部不均匀分布的可降解有机物的好氧和厌氧降解引起的不均匀沉降, 引起了大量的填埋场封盖层破坏事件; 在雨季随着大量外部降雨入渗到垃圾填埋体中, 不仅引起填埋体中含水率上升; 而且造成填埋体内部抗剪强度的降低<sup>[23]</sup>, 而且会稀释内部降解和生化反应产生的渗滤液的浓度, 从而对垃圾土中电阻率的测试有一定影响。

目前对垃圾土电阻率的研究表明, 通过对填埋体内部电阻率值的测试, 可间接反演垃圾土内部有机质的降解程度和渗滤液的赋存—运移情况; 但是对于因封盖层破裂引起外界雨水入渗, 造成原有内部渗滤液的稀释, 导致垃圾土电阻率的变化特性则需要进一步分析。本次试验选取两组浓度为 5% 的渗滤液, 搅拌均匀, 然后对两组试样分别添加蒸馏水来稀释, 并测试渗滤液稀释倍数与电阻率之间的变化关系, 如图 10 所示(将混合液电阻率和初始渗滤液电阻率比值为相对电阻率  $\rho'$ )。

如图 10 所示, 混合渗滤液的相对电阻率与稀释倍数  $N$  之间满足线性函数关系:

$$\rho' = \frac{\rho_{\text{稀}}}{\rho_{\text{原}}} = EN + F \quad , \quad (7)$$

稀释倍数  $N$  为

$$N = \frac{v_{\text{稀}}}{v_{\text{原}}} = \frac{v_{\text{原}} + v_{\text{水}}}{v_{\text{原}}} = 1 + \frac{v_{\text{水}}}{v_{\text{原}}} \quad . \quad (8)$$

式中  $\rho_{\text{稀}}$  为稀释后的混合渗滤液电阻率;  $\rho_{\text{原}}$  为渗滤液初始电阻率;  $\rho'$  为混合渗滤液相对电阻率;  $N$  为稀释倍数;  $v_{\text{稀}}$  为稀释后混合渗滤液体积;  $v_{\text{原}}$  为稀释前渗滤液体积;  $v_{\text{水}}$  为添加蒸馏水的体积; 本次试验中,  $E=0.8133$ ,  $F=0.2232$ , 稀释倍数  $N$  由试验室加入渗滤液体积与蒸馏水体积的比值来确定, 当含水率一定时, 随着添加渗滤液的量不断增大, 稀释倍数从式(8)可以得出其值趋于 1。

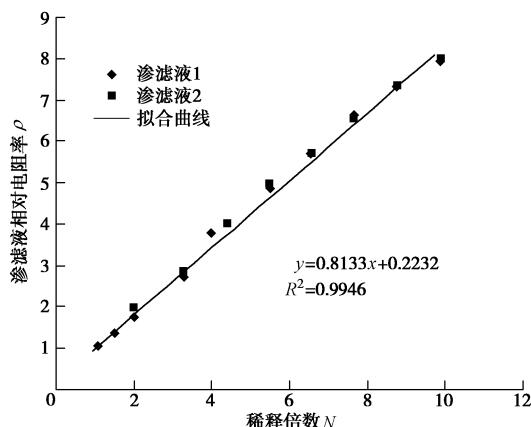


图 10 混合渗滤液相对电阻率与稀释倍数  $N$  关系曲线

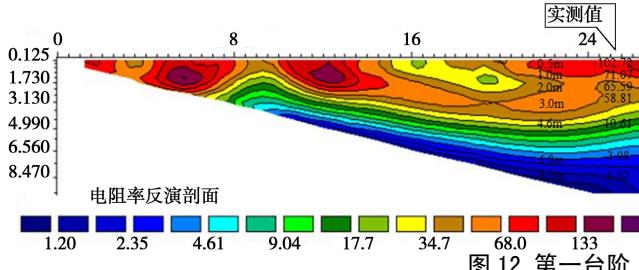
Fig. 10 Relation between relative electrical conductivity of mixed leachate and dilution ratio  $N$

## 5 填埋体电阻率实测分析

### 5.1 填埋体电阻率测试结果分析

选取重庆市长生桥卫生填埋体作为现场电阻率测试对象, 采用高密度电阻率层析法以及抗干扰能力较强的 Wenner 装置类型<sup>[4-5, 33]</sup>, 电极在覆盖层顺序排列, 极距 0.2 m, 现场布置见图 11(地面温度  $T=25^{\circ}\text{C}$ ), 同时对不同深度填埋体 (0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.6, 6.0, 8.3 m) 的含水率及温度 (通过温度探针) 进行了实测。

根据实测数据, 采用 RES2DINV(Semi Demo) 2D 反演软件进行填埋体电阻率反演计算, 根据测试得到



的电阻率反演剖面 (图 12~14), 对 3 个不同埋龄的填埋体进行对比分析。



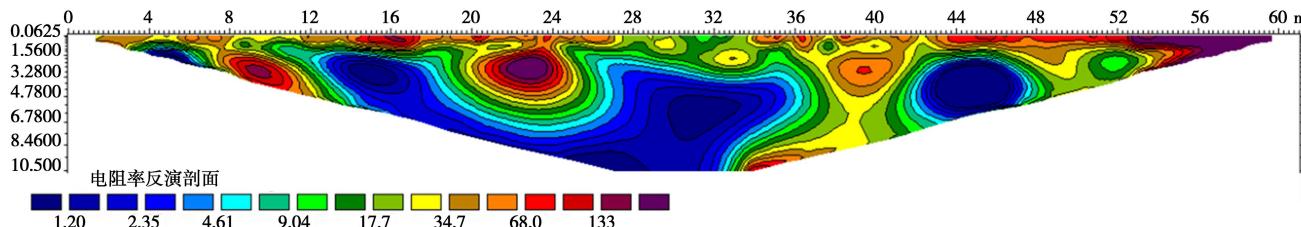


图 13 第二台阶(埋龄 5~6 a)

Fig. 13 Second plate of landfill (filled age of 5~6 years)

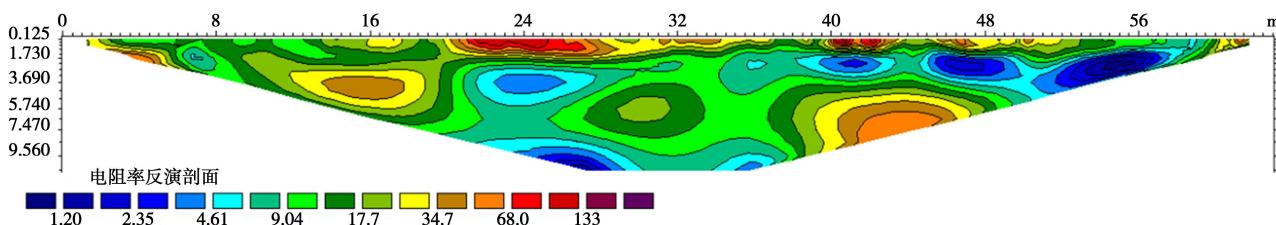


图 14 第三台阶(新填垃圾)

Fig. 14 Third plate of landfill (recently filled)

异常较少, 分析认为由于上部仍有大量正在降解中的有机质和赋存于孔隙中的渗滤液。由于降解和生化反应比第一台阶要剧烈, 导致蓝色低电阻的分布范围要大于第一台阶, 但密实度等要小于第一台阶。

图 14 所示为第三台阶(埋龄小于 1 a)由于是刚填埋的, 整体电阻率  $\leq 34.7 \Omega \cdot m$ , 垃圾土降解程度较低, 而主要的降解反应还未开始。图 14 可以得出垃圾土在填埋过程中, 填埋成份分布严重不均匀, 特别是其中可降解有机质的分布不均, 但是由于刚堆填的垃圾土含有大量水分, 导致高阻异常分布范围很小, 沿着填埋体底部衬里的渗滤液通道尚未形成, 无低阻贯穿带。通过不同填埋时期 3 个台阶的电阻率剖面, 可以根据不同填埋时期垃圾体低电阻特征分布情况而了解垃圾土结构参数以及渗滤液富集状态。

## 5.2 结果对比分析

本次试验选取现场测试电阻率剖面图 12 作为分析对象, 计算深度为 0~8.5 m; 在 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.6, 6.0, 8.3 m 分别取样, 并测试含水率和温度, 并记录实测电阻率值。根据式(4)计算垃圾体 0~8.5 m 内理论电阻率值(计算参数取推荐值), 同时根据式(5)、(6)对实测电阻率值进行温度修正, 并与计算值进行对比(如图 12, 15 所示)。表 5 为不同测试深度记录的含水率和温度监测结果, 其中电阻率值为现场实测值, 并与本文中的理论值进行对比(由于垃圾土试样经过钻取, 其孔隙结构和孔隙结构变化较大, 因此本次结果仅限于含水率与电阻率实测值与理论值的对比)。

如图 15 所示, 利用式(4)计算得到的电阻率理论曲线和实测曲线基本吻合, 垃圾土电阻率实测值和计算值的误差在 0.1%~4.8% 之间; 测试结果得到垃圾土在渗滤液富集地带对应的实测电阻率值  $\leq 4.61 \Omega$ , 且计算结果与经过温度校正后的实测值较为接近。通过对电阻率误差的分析, 认为本次试验中所选取经验

模型及相应的计算参数, 对温度影响下渗滤液内部离子运移速率及黏土颗粒表面离子的交换速率等对导电性的耦合影响考虑不周, 因此尚需要做进一步定量化的研究。由于垃圾土的降解是一个动态变化过程, 期间垃圾土的电阻率受到内部结构、含水率、温度、渗滤液浓度、密实度等多因素共同影响, 且降解过程中产生的热量以及产生的渗滤液对原有含水率的影响, 都会造成垃圾土电阻率的变化, 目前尚未有成熟的垃圾土电阻率计算模型, 因此对此还需要做更进一步的研究工作。

表 5 电阻率计算参数

Table 5 Parameters for electrical conductivity calculation

深度 /m	w/%	T	$\rho_{\text{实测}}$	$\Delta\rho$	$\rho_{\text{修正}}$	$\rho_{\text{计算}}$
0.5	20	36.60	102.72	5.07	97.65	99.97
1.0	15	29.00	71.07	2.73	68.34	70.66
2.0	28	28.00	65.59	2.24	63.35	60.24
3.0	30	25.50	58.81	0.46	58.35	55.23
4.6	31	26.10	10.61	0.97	9.64	10.23
6.0	34	27.00	3.98	1.63	2.35	5.22
8.3	36	27.30	3.02	1.82	1.20	4.21

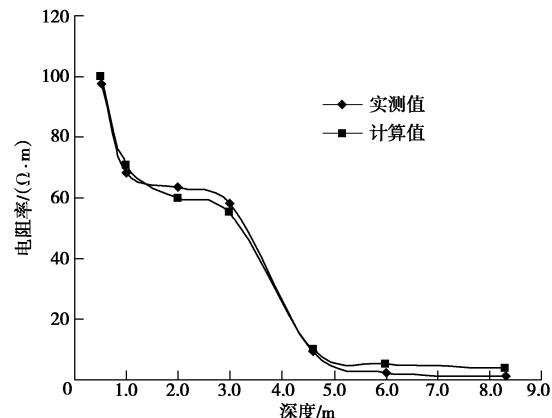


图 15 垃圾土电阻率实测值和修正值对比

Fig. 15 Comparison between calculated and monitored values of electrical resistivity of MSW

## 6 结 论

基于室内垃圾土电阻率测试结果, 对影响垃圾土电阻率特性的因素进行了分析, 并得出以下 5 点结论。

(1) 当含水率一定时, 垃圾土的电阻率随孔隙率的增加而呈幂函数减小。

(2) 随着污染溶液的添加, 试样孔隙率的增加对添加 NaCl、ZnCl<sub>2</sub> 溶液的垃圾土的电阻率影响较小, 而对添加柴油溶液的垃圾土电阻率影响较大。

(3) 当含水率和孔隙率都发生变化时, 垃圾土电阻率的变化主要是由于内部 3 种导电模式发生互相转化而引起的。

(4) 当孔隙率一定时, 渗滤液对垃圾土电阻率的影响受稀释作用的控制, 并且随含水率的增加, 影响程度减小。

(5) 随着垃圾土周围环境温度的升高, 导致渗滤液中金属离子的运移速率加快, 同时黏土颗粒表面导电离子的交换速率也加快, 是导致电阻率呈指数函数递减的原因之一。

## 参考文献:

- [1] POZDNYAKOVA L. Electrical properties of soils[D]. Laramie: University of Wyoming, 1999.
- [2] HOSSIAN M S, HAQUE M A. Stability analyses of municipal solid waste landfills with decomposition[J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 27(6): 659 - 666.
- [3] GRELLIER S, REDDY K R, GANGATHULASI J, et al. Correlation between electrical resistivity and moisture content of municipal solid waste in bioreactor landfill[J]. Geoenvironmental Engineering, 2007, 163: 1 - 14.
- [4] 刘松玉, 查甫生, 于小军. 土的电阻率特性室内测试技术研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 216 - 222. (LIU Song-yu, ZHA Fu-sheng, YU Xiao-jun. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2): 216 - 222. (in Chinese))
- [5] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83 - 87. (LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83 - 87. (in Chinese))
- [6] 邹海峰, 刘松玉, 蔡国军, 等. 基于电阻率 CPTU 的饱和砂土液化势评价研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1280 - 1288. (ZOU Hai-feng, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. Evaluation of liquefaction potential of saturated sands based on piezocene penetration tests on resistivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1280 - 1288. (in Chinese))
- [7] 刘志彬, 张 勇, 方 伟, 等. 黄土电阻率与其压实特性间关系试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(1): 84 - 90. (LIU Zhi-bin, ZHANG Yong, FANG Wei, et al. Experimental research on relationship between electrical resistivity and compactibility of loess[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(1): 84 - 90. (in Chinese))
- [8] 朱才辉, 李 宁. 基于土电阻率的黄土高填方地基细观变形机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 640 - 648. (ZHU Cai-hui, LI Ning. Mesoscopic deformation mechanical of loess high-fill foundation based on soil electrical resistivity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 640 - 648. (in Chinese))
- [9] 韩立华. 电阻率法在污染土评价与处理中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2005. (HAN Li-hua. Study on the application of electrical resistivity method in evaluation and reinforcement for contaminated soils[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese))
- [10] 王玉玲, 能昌信, 王彦文, 等. 重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1908 - 1914. (WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, et al. Numerical simulation and application of electrical resistivity survey in heavy metal contaminated sites[J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 1908 - 1914. (in Chinese))
- [11] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1671 - 1676. (ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1671 - 1676. (in Chinese))
- [12] ARCHIE G E. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1942, 146(99): 54 - 62.
- [13] MITCHELL J K, ARULANANDAN K. Electrical dispersion in relation to soil structure[J]. Soil and Mechanical Fndns, 1968, 94(2): 447 - 471.
- [14] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1993.

- [15] WAXMAN M H, SMITS L J M. Electrical conductivity in oil-bearing shaly sand[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1968, **8**(2): 107 – 122.
- [16] HALVORSON A D, RHOADES J D. Field mapping soil conductivity to delineate dry land saline seeps with four-electrode technique[J]. Soil Science Society of American Journal, 1976, **40**(4): 571 – 574.
- [17] YOON G L, OH M H, PARK J B. Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer[J]. Environmental Geology, 2002, **43**(1/2): 18 – 28.
- [18] GRELLIER S, ROBAIN H, BELLIER G, et al. Influence of temperature on the electrical conductivity of leachate from municipal solid waste[J]. Hazardous Materials, 2006, **137**(1): 612 – 617.
- [19] YEŞİLLER N, HANSON J, LIU W L. Heat generation in municipal solid waste landfills[J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(11): 1330 – 1344.
- [20] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, **46**(1): 45 – 70.
- [21] JEWELL C M, HENSLEY P J, BARRY D A, et al. Site investigation and monitoring techniques for contaminated sites and potential waste disposal sites[J]. Geotechnical Management of Waste and Contamination, 1993: 3 – 37.
- [22] KAYA M A, ÖZÜRLAN G, ŞENGÜL E. Delineation of soil and groundwater contamination using geophysical methods at a waste disposal site in Çanakkale, Turkey[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **135**(1/2/3): 441 – 446.
- [23] ZHAO Y R, XIE Q, WANG G L, et al. A study of shear strength of municipal solid waste in chongqing landfills[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(22): 12605 – 12615.
- [24] 赵燕茹, 谢 强, 张永兴, 等. 城市生活垃圾降解-压缩特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1 – 9. (ZHAO Yan-ru, XIE Qiang, ZHANG Yong-xing, et al. Experimental study on biodegradation-compression properties of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1 – 9. (in Chinese))
- [25] 赵燕茹, 谢 强, 张永兴, 等. 垃圾土蠕变 - 降解沉降特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程学报, 2013, **35**(6): 7 – 15. (ZHAO Yan-ru, XIE Qiang, ZHANG Yong-xing, et al. Experimental analysis on the decomposition-creep settlement properties of municipal solid waste[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, **35**(6): 7 – 15. (in Chinese))
- [26] 白 兰. 物探方法在污染场地中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. (BAI Lan. Study on geophysical methods used in the polluted sites[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese))
- [27] MANSUKHANI S S. Relationship of soil moisture to the dielectric property[J]. J Goetech Eng Div, 1975, **101**(GT8): 755 – 770.
- [28] SON Y, OH M, LEE S. Influence of diesel fuel contamination on the electrical properties of unsaturated soil at a low frequency range of 100 Hz~10 MHz[J]. Environmental Geology, 2009, **58**(6): 1341 – 1348.
- [29] FUKUE M, MINATO T, MATSUMOTO M, et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers[J]. Engineering Geology, 2001, **60**(1): 361 – 369.
- [30] 郑海亮, 陈家军, 杨 建, 等. 冲洗液浸润性对去除砂质土残留油的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, **38**(2): 280 – 284. (ZHENG Hai-liang, CHEN Jia-jun, YANG Jian, et al. Influence of flushing-liquid's wettability on its removal efficiency of residual oil from sandy soil[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, **38**(2): 280 – 284. (in Chinese))
- [31] ARPS J J. The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions[J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, **58**: 327 – 328.
- [32] GRELLIER S, ROBAIN H, BELLIER G, et al. In of temperature on the electrical conductivity of leachate from municipal solid waste[J]. Hazard Materials, 2006, B137: 612 – 617.
- [33] ASTM. G57-95a. Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner Four-Electrode method[S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2001.