

DOI: 10.11779/CJGE201805002

竖井抽水下垃圾填埋场渗滤液运移规律研究

柯瀚^{1, 2}, 胡杰^{1, 2*}, 吴小雯³, 孟猛^{1, 2}

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058;

3. 杭州市城乡建设设计院股份有限公司, 浙江 杭州 310004)

摘要: 城市固废由于组成成分的多样性及分层填埋等原因, 导致渗滤液运移存在明显的优先流及各向异性现象。在成都某填埋场开展多口竖井抽水及水位恢复试验, 同时结合高密度电法技术(ERT)现场大尺度研究渗滤液分布及运移规律。多口竖井水位恢复试验显示填埋体内渗滤液运移具有明显的不均质性, 表现为同一填埋场不同位置的竖井抽排性能差异较大, 竖井周围垃圾渗透系数分布范围为 $2.35 \times 10^{-5} \sim 3.90 \times 10^{-4}$ cm/s。竖井抽水下周围监测井的水位异常变化表明渗滤液补给存在明显优先流特征。ERT 监测渗滤液抽水及回灌过程中堆体内电阻率变化, 进一步揭示了现场渗流存在显著的各向异性和优先流特征, 主要渗流路径与水平向呈 $0 \sim 30^\circ$ 。

关键词: 填埋场; 竖井; 渗滤液运移; 优先流; 各向异性; 高密度电法

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)05-0786-08

作者简介: 柯瀚(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事基础工程和环境土工方面的教学和科研工作。E-mail: boske@126.com。

Investigation into leachate transport in MSW landfills under pumping of vertical wells

KE Han^{1, 2}, HU Jie^{1, 2}, WU Xiao-wen³, MENG Meng^{1, 2}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of

Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Hangzhou Urban & Rural Construction Design Institute Co.,

Ltd., Hangzhou 310004, China)

Abstract: Owing to the composition diversity of MSW and the compacted nature in landfills, the leachate transport in landfills is found to be dominated by the preferential flow and shows significant anisotropy (i.e., horizontal permeability higher than vertical one). The vertical well pumping and leachate level recovery tests are conducted at Chengdu landfill. Meanwhile, the leachate distribution and transportation characteristics are examined quantitatively and qualitatively using electrical resistivity tomography (ERT). Through the vertical well pumping and leachate level recovery tests, it is found that the leachate transport in landfills is highly heterogeneous. The performance of vertical wells at different regions of this landfill shows great difference, and the hydraulic conductivity of the surrounding waste ranges from 2.35×10^{-5} to 3.90×10^{-4} cm/s. The leachate levels in the surrounding monitoring wells change unusually under pumping of vertical wells. It is mainly due to the existence of preferential flow in the leachate transportation process. In addition, the monitoring results on changes of waste resistivity in the process of leachate pumping and recirculation by ERT further reveal that there are significant anisotropy and preferential flow characteristics in leachate transportation. And the angle between leachate seepage path and horizontal direction is found to be $0 \sim 30^\circ$.

Key words: landfill; vertical well; leachate transport; preferential flow; anisotropy; ERT

0 引言

中国城市生活垃圾渗滤液产量大, 长期导排不畅, 无法有效导排的渗滤液淤积于填埋体内, 导致渗滤液水位普遍雍高。高渗滤液水位极易诱发垃圾堆体失稳、地下水土污染及填埋气无法有效收集等问题^[1-3]。竖井抽水是控制垃圾填埋场中渗滤液水位最常用的方法之

—^[4-5], 正确认识填埋场中渗滤液运移规律对于优化竖井降水方案设计有重要意义。

垃圾堆体内渗滤液的分布形式复杂, Burrows^[6]

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578503)

收稿日期: 2017-03-21

*通讯作者(E-mail: hujie1993@zju.edu.cn)

采用电导率法探测垃圾堆体各剖面的水位分布,发现饱和区与非饱和区相互交错。和一般均质饱和土体中水分运移服从达西定律不同,生活垃圾由于组成成分的多样性及分层填埋,导致渗滤液运移具有两个特征:①生活垃圾具有较大的孔隙比(2.0~5.0),其复杂的颗粒形状、粒径大小引起多尺寸孔隙并存,导致渗滤液分布及其渗流具有不均质性,并且由大孔隙优先流主导^[7-9];②生活垃圾中含有拉长或扁平的编织物,使得孔隙分布初始水平化,在分层填埋作用下,填埋体将发生可观的沉降,导致堆体内的孔隙减小,排列向水平倾斜,具有明显的各向异性^[10-12]。

在填埋场进行竖井抽水及回灌时,渗滤液运移的优先流和各向异性现象与竖井的工作性能密切相关。Burrow^[6]采用同一结构竖井在 5 个不同填埋场的进行降水试验,竖井抽排流量因场地不同而在 2.4~48 m³/d 之间大幅波动,其推测降水效果可能受到优先流分布及其渗透能力的影响。Singh 等^[12]在佛罗里达州的某个填埋场进行竖井回灌,周围埋设 90 个孔压计观测附近堆体的孔压变化,利用 SEEP/W 软件进行数值模拟表明,需将渗流各向异性值设置为 100 才能较好模拟实测孔压响应。

为深入研究填埋场渗滤液运移规律及其对竖井抽

排的影响,本文选取成都某填埋场为试验场地,展开多口竖井抽水及水位恢复试验。同时结合高密度电法技术(ERT)监测堆体电阻率变化,进一步确定现场大尺度填埋堆体中渗滤液运移路径,证实填埋场中渗滤液运移存在的优先流及各向异性现象。

1 试验场地概况

本次试验场地为成都市某固体废弃物卫生处置场二期工程,设计库容为 2074×10⁴ m³,日处理垃圾约 5500 t。二期工程的大坝采用浆砌块石砌筑而成,坝长 231.0 m,坝顶高程 598.0 m,坝顶宽 7.00 m。由于现有抽水井和部分原排水设施淤堵,加之雨季暴雨,导致垃圾堆体水位升高。最高水位高程达 596.8 m,此水位超过了安全警戒水位线高程 590.0 m,对二期大坝稳定性构成威胁。因此在靠近二期大坝的堆体打设 56 口竖井(47 口抽水井和 8 口监测井),降低堆体内水位,以提高垃圾堆体及二期大坝的稳定性。抽排竖井平面布置位置如图 1 所示。

1.1 工程地质条件

对现场垃圾进行钻孔取样,得到工程地质剖面图(图 2),由上到下依次表示:

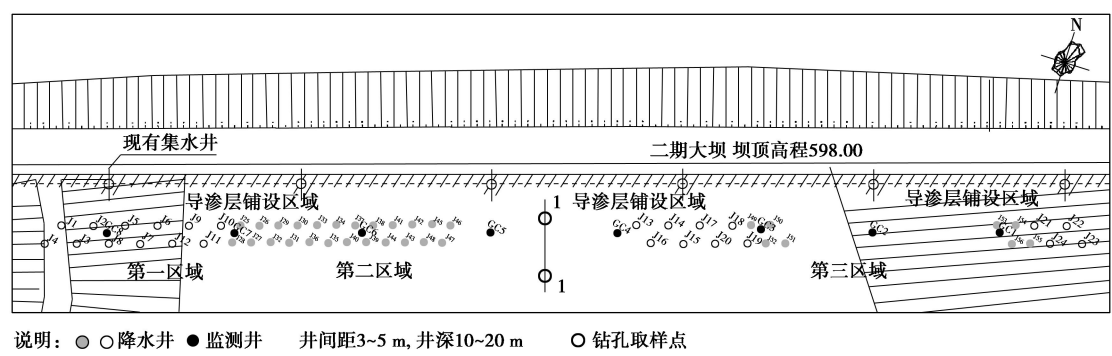


图 1 成都某填埋场竖井布置示意图

Fig. 1 Layout of vertical wells at Chengdu landfill

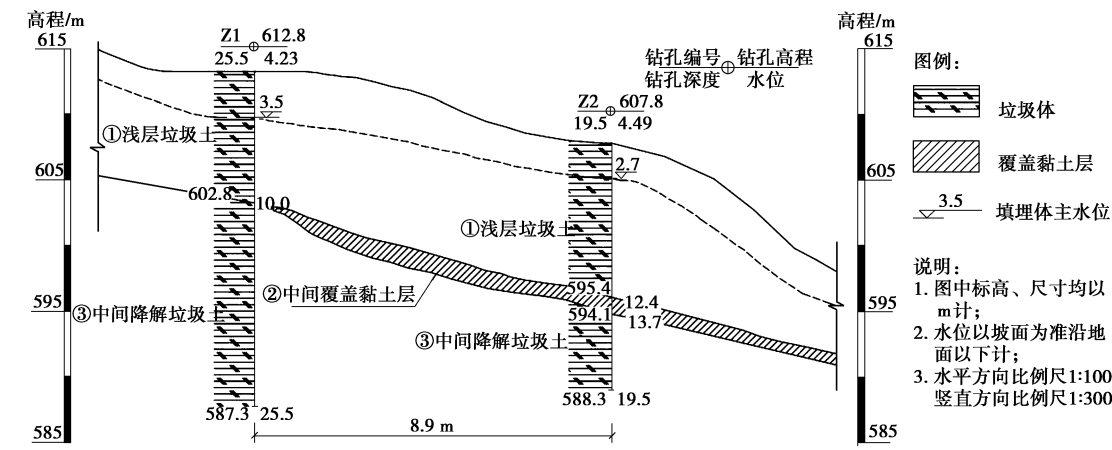


图 2 填埋堆体 1—1 钻孔剖面图

Fig. 2 1—1 borehole profile of landfill

a) 浅层垃圾土: 颜色鲜艳, 成分以塑料、纤维等生活垃圾为主, 局部含少量黏土或者灰渣、碎砖块等建筑垃圾, 松散, 层厚 7~13 m 左右。

b) 中间覆盖黏土层: 位于垃圾体中部, 以紫红色为主, 主要成分为强风化泥岩残坡积土, 有时含部分黏土, 层厚 0.4~1.0 m。

c) 中间降解垃圾土: 颜色发暗, 灰褐色, 主要成分为塑料、纤维、灰渣等物质, 和浅层垃圾相比, 塑料、纤维等有机物部分降解, 含量略低, 含少量灰土、矿渣等土粒, 厚度为 9.5~22 m。

参照《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ176—2012)^[13]对浅层和中间降解垃圾土的湿密度、含水率及比重进行了测量。①浅层垃圾: 湿密度为 1.18 g/cm³, 含水率为 108.6%, 比重为 1.92; ②中间降解垃圾: 湿密度为 1.19 g/cm³, 含水率为 101.6%, 比重为 2.02。参照《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)^[14], 对不同深度钻孔原状样采用三轴渗透仪测其饱和和渗透系数。浅层垃圾渗透系数为 3.92×10⁻⁴ cm/s, 中间降解垃圾渗透系数为 1.42×10⁻⁵ cm/s。

1.2 初始水位

水位埋深通过水位仪 (SET500 型) 测量得到, 水位仪上安装有探头, 其遇水后会发出警报声, 此时刻度尺上读数即为该点水位埋深。堆体厚度减去水位埋深即为水位高度, 前后两排共 47 口竖井的初始水位汇总记录如图 3 所示。堆体内平均水位 (相对库底高度) 为 17.5 m, #11, #14 和 #15 井相对偏低 2.5 m 左右, #3, #21 和 #29 井相对偏高 2.0 m。填埋体水位差异反映了垃圾孔隙大小或持水能力的不同, 表明生活垃圾孔隙分布存在不均质性。填埋体中垃圾组分多样, 不透水垃圾或覆盖层等的存在会阻滞渗流液的运移, 同时堆体降解产气引起孔隙封堵, 影响渗流通道的连续性, 从而导致渗滤液水位分布高低不平。

2 单井水位恢复试验

在记录每口井的初始水位后, 对每口井利用潜水泵进行 10 min 的定流量抽水。待井内有一定降深后, 关闭潜水泵进行水位恢复试验。因水位恢复过程中受

到的干扰少, 可以获得连续数据, 故利用恢复水位—时间曲线计算渗透系数更加可靠^[15]。当用恢复水位资料计算渗透系数时, 停止抽水前水位已稳定, 可采用下式计算渗透系数^[16]:

$$k = \frac{2.3Q}{4\pi H_0 m'}$$

(1)

式中 Q 为抽水过程中抽水井水位稳定时的抽水流量 (m³/h); H_0 为含水层厚度 (m); m' 为 $H - \lg[t/(t+t_p)]$ 水位恢复曲线上直线段的斜率。其中, $H(m)$ 为水位高度, t_p 为抽水开始到停止的时间, t 为抽水停止时算起的恢复时间。

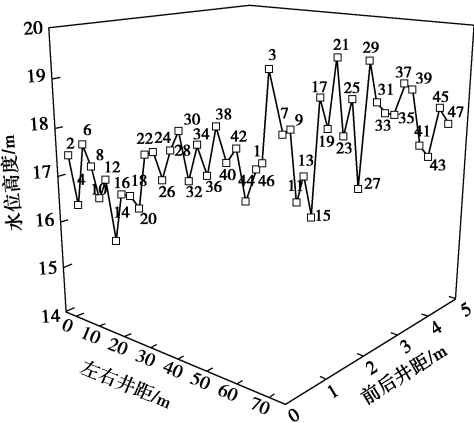


图 3 竖井初始水位

Fig. 3 Initial water levels in vertical wells

如表 1 所示, 由于同一场地不同区域垃圾渗透系数的差异, 现场 53 口竖井降水过程中表现不同的抽水流量及井内降深特征, 可分为 5 类: ①流量大, 降深大: 8 口竖井平均抽水流量为 1.2 m³/h, 抽水 10 min 井内降深达 1.5~2.0 m; ②流量大, 降深小: 7 口竖井平均抽水流量为 1.2 m³/h, 抽水 10 min 井内降深为 0.5~1.0 m; ③流量小, 降深大: 8 口竖井平均抽水流量为 0.6 m³/h, 抽水 10 min 井内降深达 3.0~5.5 m; ④流量小, 降深小: 10 口竖井平均降水流量为 0.6 m³/h, 抽水 10 min 井内降深为 0.8~2.5 m; ⑤水位骤升: 20 口竖井在抽水过程中, 填埋气释放使井内水位抬升至涌出地表, 骤升高度变化范围为 0.5~3.0 m。

表 1 成都某填埋场竖井工作性能总结

Table 1 Summary of performance of vertical wells at Chengdu landfill

参数	工作性能				
	流量大降深大	流量大降深小	流量小降深大	流量小降深小	水位骤升
竖井数量	8	7	8	10	20
流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6~1.2
抽水 10 min 降深 s/m	1.5~2.0	0.5~1.0	3.0~5.5	0.8~2.5	-0.5~~3.0
水位恢复曲线斜率 m'	0.83	0.60	5.00	3.33	—
渗透系数 $k/(cm \cdot s^{-1})$	2.80×10^{-4}	3.90×10^{-4}	2.35×10^{-5}	3.5×10^{-5}	—

根据水位恢复试验不同时间对应的降深数据绘制 $H - \lg[t/(t+t_p)]$ 水位恢复曲线。如图 4 (a) ~ (d) 所示, 不同工作性能竖井对应的水位恢复曲线平均斜率 m' 在 0.60~5.00 变化。根据式 (1) 可计算出周围垃圾渗透系数分布范围为 $2.35 \times 10^{-5} \sim 3.90 \times 10^{-4}$ cm/s, 与室内试验值 $1.42 \times 10^{-5} \sim 3.92 \times 10^{-4}$ cm/s 较为接近。同

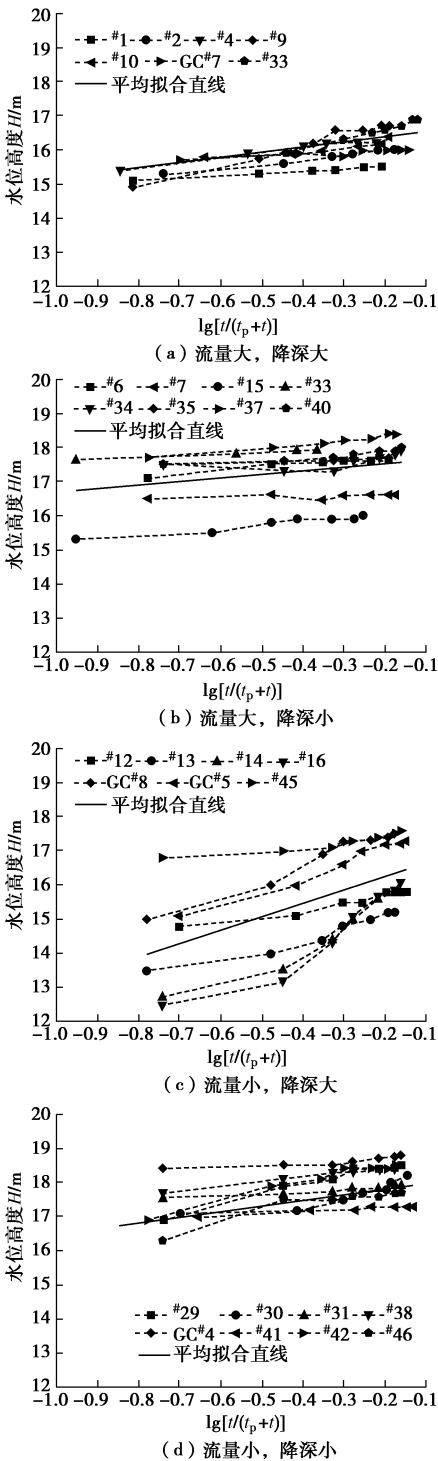


图 4 不同工作性能竖井水位恢复曲线

Fig. 4 Curves of leachate level recovery of vertical wells with different performances

一填埋场不同位置孔隙渗流能力的不同, 表明填埋体渗滤液运移存在不均质性。

3 单井抽水试验

逐一进行单井抽水试验, 同时记录抽水井周边 4~5 口监测井水位, 根据监测井水位变化情况推测竖井与监测井之间垃圾孔隙贯通情况。汇总抽水井与监测井的水位变化分析发现: 填埋场竖井降水过程中, 由于大孔隙优先流通道的存在, 部分竖井抽排过程中水位变化与常规土体中竖井存在差异。主要表现为以下 3 种情况。

(1) 低水位处监测井水位变化明显

如图 5 所示, #3 井抽水, 周围监测井仅有 #1, #4 和 GC#8 有明显降深 (降深 0.2 m)。但 #1, #4 及 GC#8 井初始水位分别为 15.9, 16.3, 16.8 m, 均小于抽水井 #3 的水位 (18.7 m)。推断低水头处竖井 (#1, #4 和 GC#8 井) 与抽水井 (#3) 之间孔隙贯通更加良好, 相比于其他高水头处监测井 (#2, #6 井) 更能向抽水井进行补给, 从而引起该区域监测井内水位发生明显变化。

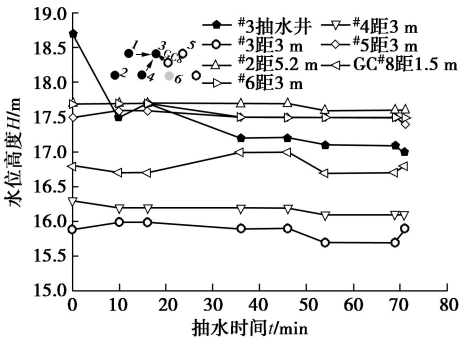


图 5 低水位向高水位进行补给

Fig. 5 Water supply from low water level to high water level

(2) 高水位处监测井水位没有明显变化

图 6 记录了 #14 井抽水时, 周围监测井的降深情况。堆体降深结果表明仅有 GC#7 井初期有明显降深, 降深为 0.1 m, 高水头处的 #15 (17.8 m) 与 #16 井 (16.7 m) 水位没有明显变化。表明 GC#7 和 #14 井之间的孔隙贯通情况相对较好, 而水头较高的 #15, #16 井与 #14 井之间孔隙不贯通, 抽水时该处水位无变化。

(3) 远距离监测井降深更大

在均质的土体中降水, 一般据抽水井越近降深越大, 而垃圾填埋场中竖井抽水时会出现远距离监测井降深更大的情况。如图 7 所示, #18 井抽水, 周围监测井均出现不同程度降深, 其中 #19 井 (距抽水井 5.2 m) 降深最为明显达 0.6 m, 而距离抽水井较近的 #15, #16 监测井 (距抽水井 3 m) 降深仅为 0.1 m。表明

#19 监测井和#18 抽水井之间的孔隙贯通情况良好,表现为远距离处的渗滤液优先于近距离处向抽水井运移。

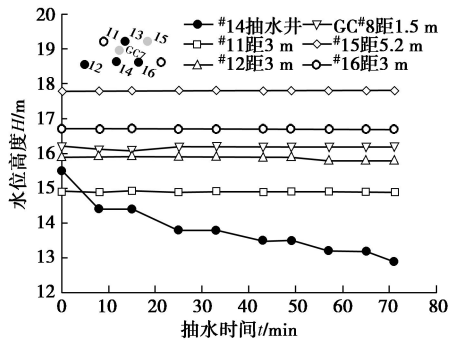


图6 高水位未向低水位进行补给

Fig. 6 No water supply from high water level to low water level

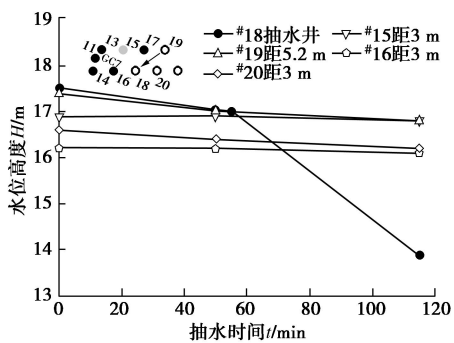


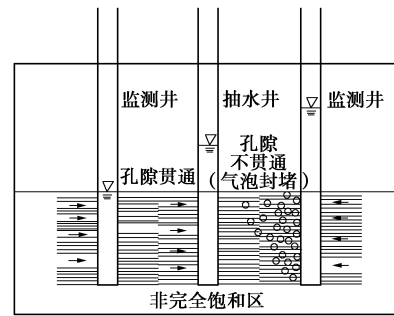
图7 远距离处降深更大

Fig. 7 Higher leachate drawdown at further distance

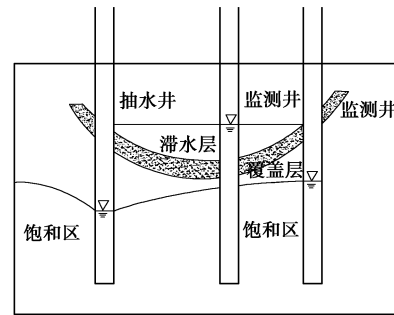
由上述分析知, 填埋场竖井抽排时, 影响堆体内降深的主要因素为监测井与抽水井之间的孔隙贯通情况。由于填埋体内组分的不均质性及有机质降解特性, 导致监测井与抽水井的孔隙贯通情况多样。如图8所示: ①低水头处监测井与抽水井之间的孔隙贯通良好, 使得低水头处监测井水位变化明显; 而由于气泡封堵孔隙的存在, 导致高水头处监测井与抽水井之间可排水孔隙较少, 孔隙不贯通, 从而导致高水头处水位变化不明显; ②中间覆盖层的存在产生滞水区, 使得该区域内的竖井水位较高, 但低渗透性的中间覆盖层阻碍该竖井处渗滤液向抽水井进行水分运移补给; 而远距离不处于滞水区的监测井与抽水井之间孔隙贯通, 渗滤液优先向抽水井侧向运移, 表现为远处水位降深更大。

4 高密度电法现场监测

高密度电法因其效率高、信息丰富和实时处理等优点, 近年来被广泛用于填埋场渗滤液扩散范围、渗滤液回灌效果及填埋体气分布形式等监测中^[17-19]。Clément 等^[17]现场进行渗滤液抽排回灌时, 采用高密度电法可明显监测到堆体内电阻率的变化; Rosqvist 等^[18]结合示踪剂跟踪试验和3D 高密度电法, 可较好地监测堆体内水气分布及运移规律。



(a) 填埋气封堵孔隙



(b) 中间覆盖层影响

图8 监测井水位变化情况分析

Fig. 8 Analysis of variation of leachate level in monitoring wells

本文采用高密度电法监测竖井抽排及回灌过程中堆体的电阻率变化, 探查填埋体渗滤液分布形式及运移规律, 验证竖井抽排过程中发现的现象。根据场地条件及竖井所在位置, 确定铺设3条水平测线。每条测线电极布置均采用 Wenner-Alpha 法, 电极间距为 0.5 m, 共 64 个电极。每条测线长度 L 为 32 m, 由于填埋体组分较不均匀, 勘探深度取为 $L/4$ ^[20], 即 8 m。

4.1 初始水位下高密度电法测试

采用高密度电法分别测试了3条测线在初始水位下电阻率, 并根据反演软件 (RES2DNIV) 得到真电阻率值, 结果如图9所示。通过测线一高密度电法测得的真电阻率与现场竖井内水位值进行对比, 确定堆体内饱和和生活垃圾对应的电阻率 $\leq 8 \text{ ohm}\cdot\text{m}$, 伴随含水率增加, 电阻率值减小^[21]。分析高密度电法反演得到的真电阻率, 可以判断堆体内水位分布形式: ①测线一对应的堆体水位分布较不均匀, 浅层电阻率分布范围 $8\sim 50 \text{ ohm}\cdot\text{m}$, 表明该区域含水率较低; 深处电阻率分布范围为 $3\sim 8 \text{ ohm}\cdot\text{m}$, 表明该区域含水率较高或离子浓度较大; ②测线二对应的堆体水位分布不均匀, 深层出现低阻区域; ③测线三对应的堆体水位分布均匀, 沿深度电阻率逐渐减小, 表明堆体含水率随深度增加而增大; 浅层出现大面积高阻区域, 对应电阻率为 $40\sim 80 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ 。

4.2 竖井抽水/回灌下高密度电法测试

初始水位监测结果表明堆体内水位分布不均匀, 为分析填埋体内渗滤液运移规律, 采用高密度电法监测竖井抽水/回灌下堆体内电阻率的时空变化规律。本

次选取#8 竖井进行长达 270 min 的抽水试验, 同时将#8 竖井中抽出渗滤液回灌至#4 竖井内。渗滤液抽水及回灌过程中高密度电法反演结果如图 10 所示。可以看出, 随着抽水时间增加 (0~270 min), #8 井附近垃圾

含水率降低, 电阻率显著上升; #4 回灌井周围垃圾含水率增加, 电阻率下降。

图 11 为#8 井抽水及#4 井回灌过程中电阻率变化比例。#8 井抽水 30 min 后, 竖井右侧浅层, 与水平向呈 0~30°

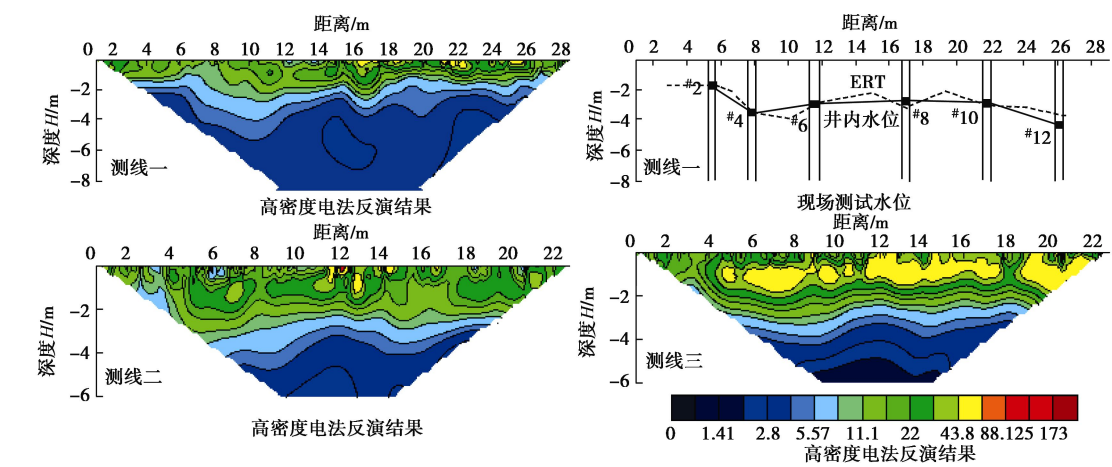


图 9 3 条测线初始水位下高密度电法反演真电阻率

Fig. 9 Inversion ture resistivity using ERT under initial leachate level

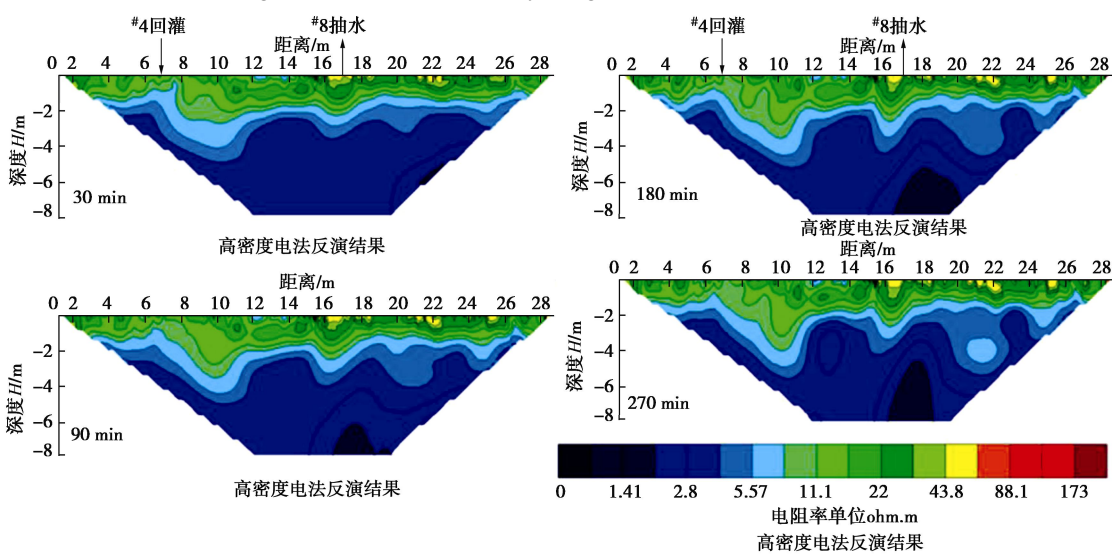


图 10 #8 井抽水及#4 井回灌对应的高密度电法反演结果

Fig. 10 Inversion results using ERT during #8 well pumping and #4 well recirculation

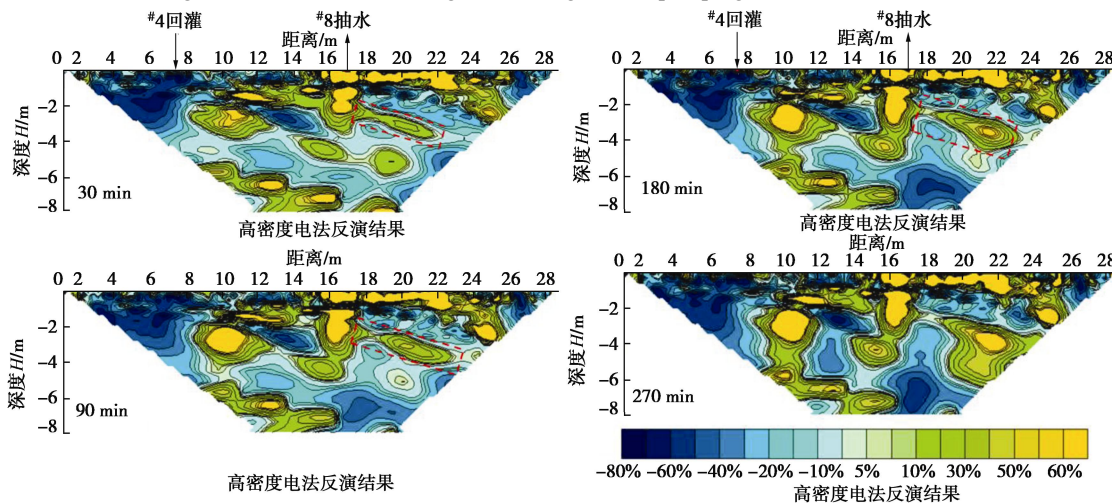


图 11 #8 井抽水及#4 井回灌对应的电阻率变化比例

Fig. 11 Percentage changes in resistivity during pumping of well No. 8 and recirculation of well No. 4

的局部区域(图中红框处)含水率下降,电阻率增加。表明该部分的渗滤液参与补给,为渗滤液运移主要路径。抽水 90 min 后,电阻率增加区域的面积扩散,主要朝左右两侧扩散。抽水 180 min 后,电阻率增加区域的面积主要朝左下方扩散。抽水 270 min 后,电阻率增加区域的面积主要朝右下方扩散。ERT 结果表明,渗滤液运移具有不均质性,竖井抽排情况下,仅有部分区域(优先流)向竖井进行水分补给。#8 竖井周边,优先流通道与水平向呈 $0\sim 30^\circ$,体现渗流各向异性。随着抽水时间增加,部分竖向通道开始供渗滤液运移。#4 竖井回灌渗滤液主要导致其左侧垃圾含水率增加,电阻率下降,表明回灌渗滤液主要朝左侧扩散。

本次通过对垃圾堆体初始水位及竖井抽水/回灌下电阻率实时监测发现,高密度电法作为一种直观,操作性强的物探手段,能较好用于探测填埋场水气分布及运移规律。根据 ERT 反演结果推算的水位线与监测井水位线较好吻合。同时相比于水位监测,其能直观地观测出竖井抽水时的影响区域(局部优先流区域)及渗滤液运移路径(与水平向呈 $0\sim 30^\circ$)。ERT 与水位监测共同使用,能更加清晰地评估竖井抽排效果。

5 结 论

(1)进行了现场 53 口竖井的单井水位恢复试验,根据水位恢复曲线计算得到竖井周围垃圾渗透系数分布范围为 $2.35\times 10^{-5}\sim 3.90\times 10^{-4}$ cm/s,与室内试验值 $1.42\times 10^{-5}\sim 3.92\times 10^{-4}$ cm/s 较为接近。

(2)按照竖井工作性能可将竖井大致分为 5 类:①流量大,降深大;②流量大,降深小;③流量小,降深大;④流量小,降深小;⑤水位骤升。同一填埋场不同位置孔隙渗流能力的不同和同一竖井工作性能差异,表明填埋体渗滤液运移存在不均质性。

(3)通过多口单井抽水下周围降深监测,发现填埋场竖井抽水出现 3 类异常情况:①低水头处监测井水位变化明显;②高水位处监测井水位没有明显变化;③远距离监测井降深更大。这是由于填埋体内存在低渗透性层的阻隔及填埋气对孔隙的封堵,导致渗滤液运移表现为明显的优先流效应。

(4)采用高密度电法实时监测竖井抽水及回灌过程中堆体电阻率变化,证实堆体内渗滤液分布及运移具有不均质性。渗滤液运移表现为明显的优先流及各向异性特征,主要渗流路径与水平向呈 $0\sim 30^\circ$ 。高密度电法作为直观,操作性强的物探方法,可有效用于填埋体渗滤液运移规律分析及抽水回灌效果监测。

参考文献:

- [1] 陈云敏, 兰吉武, 李育超, 等. 垃圾填埋场渗滤液水位雍高及工程控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 154 - 163. (CHEN Yun-min, LAN Ji-wu, LI Yu-chao, et al. Development and control of leachate mound in MSW landfills[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 154 - 163. (in Chinese))
- [2] ZHAN T L T, XU X B, CHEN Y M, et al. Dependence of gas collection efficiency on leachate level at wet landfills of municipal solid wastes and its improvement methods in China[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(4): 1 - 11.
- [3] KOERNER R M, SOONG T Y. Leachate in landfills: the stability issues[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, **18**(5): 293 - 309.
- [4] 张文杰, 陈云敏. 垃圾填埋场抽水试验及降水方案设计[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 210 - 215. (ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-min. Pumping tests and leachate drawdown design in a municipal solid waste landfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 210 - 215. (in Chinese))
- [5] 詹良通, 徐 辉, 兰吉武, 等. 填埋垃圾渗透特性室内外测试研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, **48**(3): 478 - 486. (ZHAN Lang-tong, XU Hui, LAN Ji-wu, et al. Field and laboratory study on hydraulic conductivity of MSW[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, **48**(3): 478 - 486. (in Chinese))
- [6] BURROWS M R. Landfill hydrogeology and the hydraulic properties of in situ landfilled material[D]. London: University of London, 1998.
- [7] ROSQVIST N H, DOLLAR L H, FOURIE A B. Preferential flow in municipal solid waste and implications for long-term leachate quality: valuation of laboratory-scale experiments[J]. Waste Management & Research, 2005, **23**(4): 367 - 380.
- [8] WOODMAN N D. Modelling of transport in highly heterogeneous porous media, with application to the flushing of waste[D]. London: University College London, 2007.
- [9] 柯 瀚, 吴小雯, 张 俊, 等. 基于优势流及各向异性随上覆压力变化的填埋体饱和渗流模型[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11): 1957 - 1964. (KE Han, WU Xiao-wen, ZHANG Jun, et al. Modeling saturated permeability of municipal solid waste basing on the compression changes of its preferential flow and anisotropy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 1957 - 1964. (in

- Chinese))
- [10] LANDVA A O, PELKEY S G, VALSANGKAR A J. Coefficient of permeability of municipal refuse[C]// Proceedings of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics. Lisbon, 1998: 63 - 68.
- [11] HUDSON A P. Evaluation of the vertical and horizontal hydraulic conductivities of household wastes[D]. Southampton: University of Southampton, 2007.
- [12] SINGH K, KADAMBALA R, JAIN P, et al. Anisotropy estimation of compacted municipal solid waste using pressurized vertical well liquids injection[J]. Waste Management & Research, 2014, **32**(6): 482 - 491.
- [13] CJJ 176—2012 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范[S]. 2012. (CJJ 176—2012 Technical code for geotechnical engineering of municipal solid waste sanitary landfill[S]. 2012. (in Chinese))
- [14] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [15] 陈崇希, 林 敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. (CHEN Chong-xi, LIN Min. Groundwater dynamics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. (in Chinese))
- [16] SL320—2005 水利水电工程钻孔抽水试验规程[S]. 2005. (SL320—2005 Borehole pumping test procedures for water resources and hydropower engineering[S]. 2005. (in Chinese))
- [17] CLÉMENT R, OXARANGO L, DESCLOITRES M. Contribution of 3-D time-lapse ERT to the study of leachate recirculation in a landfill[J]. Waste Management, 2011, **31**(3): 457 - 467.
- [18] ROSQUIST H, LEROUX V, DAHLIN T, et al. Mapping landfill gas migration using resistivity monitoring[J]. Waste and Resource Management, 2011, **164**(1): 3 - 15.
- [19] LING C, ZHOU Q, XUE Y, et al. Application of electrical resistivity tomography to evaluate the variation in moisture content of waste during 2 months of degradation[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **68**(1): 57 - 67.
- [20] 蒋小明. 高密度电阻率法用于垃圾填埋体气分布探测的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. (JIANG Xiao-ming. An experimental study on detection of leachate and gas distribution in municipal solid waste landfill using electrical resistivity tomography[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))
- [21] 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, **226**: 1 - 14.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)