

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.007

电渗作用下高岭土的元素及矿物成分变化

彭 劼^{1,2}, 谢高强^{1,2}, 苏 波^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究电渗对土的化学成分及矿物的影响, 以高岭土为试样进行室内电渗固结试验。取一维电渗固结试验前后的土样及排出水样, 采用X射线衍射及X射线荧光光谱分析测定土样的矿物组成及化学成分, 通过ICP-MS测定水样的化学成分。土样及排出水的化学成分变化以及电渗过程中不同元素的迁移现象表明: 高岭土的主要矿物成分中, 地开石含量的变化幅度较大, 而石英、高岭石、珍珠陶土的变化幅度很小; 土体的主要化学成分 SiO_2 、 Al_2O_3 经过电渗作用后没有明显变化, 变化幅度较大的化学成分为 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O , 其中 CaO 的变化明显强于其他成分; Na 、 K 容易以离子形式发生迁移流入水中, Ca 、 Mg 则反应生成氢氧化物沉淀而不易被检测出来, 表现为“消失”。

关键词: 高岭土; pH; 矿物成分; 化学成分; 电渗固结试验; X射线衍射; X射线荧光光谱

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)02-0135-06

Effects of electroosmosis on variation of elemental and mineral composition of kaolin

PENG Jie^{1,2}, XIE Gaoqiang^{1,2}, SU Bo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the effects of electroosmosis on chemical and mineral compositions of soil, a laboratory electroosmotic consolidation test was carried out using kaolin as an example. The soil samples and drainage water samples before and after the one-dimensional electroosmotic consolidation experiment were collected. The mineral and chemical composition of soil samples were measured using the X-ray diffraction and X-ray fluorescence spectrometry techniques, and the chemical composition of the water samples were measured with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The variations of chemical composition in the soil and water samples and the migration phenomenon of different elements during the electroosmosis process were analyzed. The results show that, of the main mineral constituents of kaolin, the dickite content changed significantly, while the quartz, kaolinite, and nacrite contents changed little. The main chemical constituents in the soil samples, SiO_2 and Al_2O_3 , did not show obvious change after electroosmosis. There were large changes in CaO , MgO , Na_2O , and K_2O , of which the variation of CaO was the most significant. The analysis of water samples shows that Na and K tended to flow into water in the form of ions, and Ca and Mg tended to generate hydroxide precipitation, which meant that the Ca and Mg ions could not be detected easily.

Key words: kaolin; pH; mineral composition; chemical composition; electroosmotic consolidation experiment; X-ray diffraction; X-ray fluorescence spectrum

淤泥、污泥和超软土的快速脱水、处理是当前岩土工程研究中的重要课题。电渗法是近年来逐渐得到学

收稿日期: 2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51578214)

作者简介: 彭劼(1971—)男, 湖南衡阳人, 副教授, 博士, 主要从事软土处理研究。E-mail: pengjiehu@163.com

术界关注的软土处理方法。电渗法是在土体中插入电极,并通以直流电,土颗粒与水接触后,在土颗粒表面及其附近的液体内会有电性相反、电荷量相等的2层离子,即双电层,扩散层中的离子在电场作用下朝反向电极移动,并带动水分子一起移动从而排水,这种现象称为电渗^[1]。电渗可降低土体含水率、提高土体强度。电渗法的施工荷载小,排水速度主要取决于土的电力渗透性能而非土体的水力渗透性能,因此适合于加固渗透系数极低的淤泥、淤泥质黏土以及污泥等,目前已在岩土工程中得到了一些应用。但是由于缺乏对电渗机理的深入了解、电渗的电量和电极消耗大、电渗过程中逸出的气泡影响加固效果等缺点,尚未得到大规模的应用^[2]。

土的电渗现象首先由俄国科学家 Reuss 发现,Reuss 之后的学者对电渗在岩土工程中的应用进行了较广泛的试验和理论研究。试验研究主要是考察各种土样在电渗下的性状以及影响电渗的因素,包括:(a)电渗加固效果及应用研究^[3-7];(b)土的类型对电渗效果的影响^[8-9];(c)提高电渗效率的措施研究^[10-11];(d)电极布置及新型电极材料的研究^[12-14];(e)电渗中土的电导率或电渗透系数及 pH 的变化规律^[15-16]。岩土工程中对电渗的研究主要集中于力学特性方面。而土的电渗是一个物理化学过程^[17],电渗过程中伴随的化学反应主要有水电解反应、金属电极氧化还原反应。上述反应产生的 H^+ 和 OH^- 离子及金属离子在土体中迁移,进而影响土体的 pH,迁移的金属离子遇到 OH^- 时会生成氢氧化物而沉淀,土体的电化学特性发生改变,其矿物晶体及元素组成也会发生改变。Loch 等^[18]研究了膨润土在金电极的电渗作用下土中元素的迁移规律。Gray 等^[4]研究了用铝电极电渗后膨润土、伊利土以及伊利-蒙脱土的化学成分及物理特性的变化。

关于高岭土在电渗作用下的电化学特性的详细研究还较少见。笔者采用自制的一维电渗仪,对高岭土进行电渗固结试验,在电渗处理前后取不同部位的土体分别进行 X 射线衍射(XRD)试验以及 X 射线荧光光谱(XRF)测试,对阴、阳极出水进行了电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测试,以研究高岭土在电渗作用下的矿物晶体以及组成元素的变化及相关元素在电渗过程中可能的迁移规律。

1 试验方法与土体特性

1.1 试验仪器

为简化问题,考虑一维电渗情况,试验装置如图 1 所示。试验筒为高 24 cm 的有机玻璃圆筒,内径为 15 cm,筒底部设有出水口。试验土样(即电极板之间的土样)高度为 8 cm、直径为 15 cm,在阳极板上方还有上覆土,以模拟现场电极周围有土包裹以及阳极不排水的条件,阴极板下方为透水托板,用于承托试验土样、电渗电极。有机玻璃筒内涂抹凡士林以减小土和有机玻璃筒之间的摩擦力。

电渗装置包括直流电源和电极。电源采用兆信 PS305-D 直流稳压电源,可提供最大 30 V 的输出电压或最大 5 A 的输出电流,能够显示电路中的即时电流值,且能满足连续长时间工作要求,同时有过压保护功能。电渗时一般的金属电极均会发生氧化还原反应,为了减少电极氧化还原反应对土体电化学参数的影响,电极采用圆形惰性石墨电极,电极板直径为 14.8 cm,厚度为 8 mm,石墨电极板上有均匀的 8 mm 小孔便于透水。

1.2 试验方法

在试验槽四周涂抹凡士林以减少摩擦阻力,然后装土样、电极板,静置稳定。连接好电源、电极、电能表,并将测试仪器安放好。通恒定直流电,电压保持为 10 V,电渗至没有水排出为止。

试验前后土样的物理力学测量内容包括沉降量、电势、排水量、电流值和耗电量以及试验前后的土体强度、含水率、孔隙比、液塑限等,测量仪器包括百分表、万用表、DDS837 型单项电子式电能表、量筒、XC-1 型袖珍触探仪等,土体含水率等数据按照 GBT 50123—1999《土工试验方法标准》^[19]中的方法确定。电化学测试内容包括 pH、元素分析以及阴阳极出水的离子分析等。pH 用高灵敏度试纸测试,XRF 试验用 ARL-9800XP+荧光光谱仪测试,ICP-MS 试验用 Optima 5300DV 等离子光谱质谱仪测试,XRD 试验用 X'TRA 型 X 射线衍

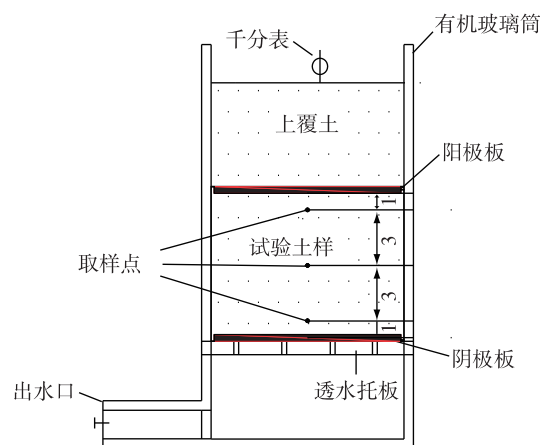


图1 试验装置示意图(单位:cm)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device (units: cm)

射仪测试。

1.3 试验土样特性

试验用土为高岭土,取自江苏省南京市江宁区方山。将高岭土按一定的比例加去离子水并充分调试以保证均匀,然后放置到试验筒中静置 10 d,稳定后的土样基本物理性质参数如下:土粒相对密度 $G_s = 2.58$ 、有机质含量为 0.1%、液限 $\omega_L = 63.3\%$ 、塑限 $\omega_p = 37.8\%$ 、天然密度 $\rho = 1.62 \text{ g/cm}^3$ 、 $\text{pH} = 6.5$ 、含水率为 60.0%、孔隙比 $e = 1.55$ 、不排水强度 $C_u = 4.0 \text{ kPa}$ 、渗透系数 $k = 5.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、压缩系数 $a_{v100-200} = 1.03 \text{ MPa}^{-1}$ 、比表面积为 $103.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 。用 BT-9300H 型激光粒度分析仪进行颗粒分析,颗粒级配曲线如图 2 所示,所用高岭土的粒组都是细粒,且黏粒质量分数超过 95%。

从原状高岭土 X 射线衍射图谱分析可以得出,高岭土的主要矿物组成是石英、高岭石、珍珠陶土、地开石。通过 X 射线荧光光谱分析得出原状土主要化学成分的质量分数如下: $w(\text{SiO}_2) = 46.7\%$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 29.8\%$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 4.44\%$ 、 $w(\text{K}_2\text{O}) = 2.43\%$ 、 $w(\text{MgO}) = 0.58\%$ 、 $w(\text{CaO}) = 0.47\%$ 、 $w(\text{Na}_2\text{O}) = 0.2\%$ 、 $w(\text{TiO}_2) = 0.4\%$ 、 $w(\text{MnO}) = 0.01\%$ 、 $w(\text{SO}_3) = 3.23\%$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5) = 0.79\%$;烧失量为 10.95%。

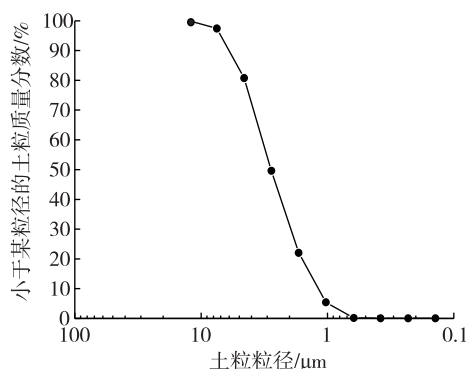


图2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain size analysis grading

2 试验结果分析

2.1 土体 pH 变化

黏土 pH 的概念来源于化学,指的是“黏土溶液”中 H^+ 活度的负对数。在溶液中, H^+ 可以均匀分布,所以溶液化学里 pH 的概念是明确的,但对于“黏土溶液”, H^+ 分布于双电层的不同部位和溶液中,其分布不均匀,所以黏土 pH 的概念没有溶液 pH 明确。通常测定的黏土 pH 是一个平均值或称之为表观值^[20]。对于黏土 pH 最简单的解释就是黏土含有吸附性的 H^+ ,这些 H^+ 有一部分在水溶液中解离,所以黏土所含 H^+ 的数量越多,解离度越大,黏土的 pH 就越低^[21]。

电渗过程中由于水的电解反应,阳极附近和阴极附近分别会生成 H^+ 和 OH^- ,导致阳极周围酸性环境的形成和阴极附近碱性环境的形成。原状土的 pH 为 6.5,略呈酸性。电渗后阳极处土样 pH 为 6.0,与原状土相比变化较小;阴极处土样 pH 为 9.0~9.5, pH 明显增大。因此高岭土在电渗作用下,阳极附近略为酸化,阴极附近则形成了较明显的碱性环境。

2.2 电渗排出水的 pH 变化

试验进行到 24 h、48 h、108 h、250 h 时收集阴极处排水。不同时间段电渗排出水的 pH 变化如图 3 所示(配置土样所用水为中性)。电渗排出水的 pH 在电渗开始后迅速由中性转变为碱性,然后基本维持不变,且稳定后的 pH 与电渗试验后阴极处土体的 pH 非常接近。

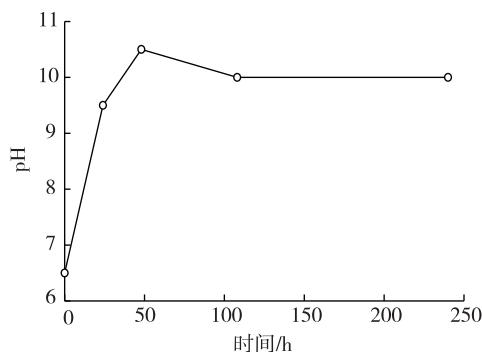


图3 电渗排出水的 pH 变化

Fig. 3 Variation of pH of drainage through electroosmosis

2.3 土体矿物成分分析

对原状土及试验后距离阳极 1 cm 处(阳极)、4 cm 处(中部)、7 cm(阴极)处的土样进行矿物成分分析,原状土样编号为 YZ,试验阳极处、中部、阴极处土样编号分别为 1-A、1-M、1-C。利用 X'TRA 型 X 射线衍射仪对碾细至 10 μm 左右的土样进行测试,得到衍射图,然后通过软件 MDI Jade 对衍射数据进行处理并进行物相分析,物相分析包括物相检索和物相含量的定量计算。

根据绝热法进行物相含量的定量计算。如果样品中含有 N 种矿物,并且不存在非晶质矿物,则第 i 种矿物的质量分数为

$$Q_i = \frac{I_i}{K_{i,j} \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{K_{i,j}}} \quad (1)$$

其中

$$K_{i,j} = \frac{K_i}{K_j}$$

式中: Q_i ——第 i 种矿物的质量分数; I_i ——第 i 种矿物的衍射强度; K_i ——第 i 种矿物的参考比强度, 即 RIR 值; K_j —— N 种矿物中被选定为内标相的矿物的参考比强度。

在绝热法中, 任何一种矿物都可以当作内标相矿物, 本文选择石英 (SiO_2) 作为内标相矿物。式(1)中需要 2 组数据: 一组是每种矿物的 K 值, 在 PDF 卡片上可以直接读出; 另一组是每种矿物的衍射强度, 一般取矿物最强衍射峰的高度或面积。为了避免采用单一高度或面积计算所得的衍射强度差距较大, 试验中分别由衍射峰的高度和面积计算衍射强度, 然后分别确定矿物含量, 最后取算术平均值作为矿物含量的计算值。

通过对衍射图谱的分析计算, 得到土样在试验后的主要矿物成分变化情况见表 1。由表 1 可以看出, 含量较多的矿物成分是高岭石和珍珠陶土, 其次是地开石, 而石英含量相对较少。其中珍珠陶土属于高岭石族, 地开石属于高岭石亚族, 和高岭石属同类矿物。总体上, 土体经过电渗作用其主要矿物成分变化并不明显。

以初始土样的矿物成分为参照值, 试验结束后土体中不同矿物成分的变化幅度: 石英为 0.8%, 高岭石为 0.3%, 珍珠陶土为 0.9%, 地开石为 5.2%。可以看出, 土体主要的矿物成分中, 地开石的变化幅度较大, 而石英、高岭石、珍珠陶土的变化幅度很小, 但不能排除是分析精度不够的原因。

2.4 化学成分分析

通过 X 射线荧光光谱分析黏土中各主要成分的含量(质量分数, 表 2), 试验仪器为美国 ARL-9800XP+ 型 X 射线荧光光谱仪。通过熔融片法制样, 即将土样与熔剂混合后放入坩埚, 于 1 200 °C 下熔融后冷却可得玻璃状试样。

表 2 土体化学成分质量分数

Table 2 Mass contents of main chemical constituents of soil

土样 编号	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	$w(\text{TiO}_2)/\%$	$w(\text{MnO})/\%$	$w(\text{SO}_3)/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	烧失量
YZ	46.70	29.80	4.44	2.43	0.58	0.47	0.20	0.4	0.01	3.23	0.79	10.95
1-A	47.34	30.58	4.31	2.32	0.48	0.27	0.17	0.4	0.01	2.79	0.80	10.55
1-M	46.60	30.80	4.32	2.32	0.51	0.28	0.18	0.4	0.01	2.90	0.79	10.91
1-C	45.87	31.00	4.35	2.31	0.59	0.42	0.20	0.41	0.01	3.12	0.79	10.95

由表 2 数据可以看出, 试样与黏土化学成分的一般规律一致, 土体的主要化学成分是 SiO_2 和 Al_2O_3 , 质量分数分别为 46.7%、29.8%, 远高于其他成分的质量分数, 这正是构成高岭石等黏土矿物的主要成分。其次 Fe_2O_3 、 K_2O 、 SO_3 的含量较高, SO_3 的含量较高是高岭土的特性之一。另外, 土体的化学成分中还包括一定量的 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 , 这些成分的含量较低, 质量分数均低于 1%, 其余的化学成分则忽略不计。

由表 2 可知, 土体各化学成分含量均发生了不同程度的变化, 以某成分的初始含量为参照值, 可知土体化学成分中含量变化幅度较大的是 CaO (31%)、 MgO (9.2%)、 Na_2O (17%)、 K_2O (4.6%), 变化幅度明显大于其他成分。除表 2 中所列成分, 其余成分认为没有变化。

土体矿物成分中变化幅度最大的是地开石 ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_8$), 而土体内 K_2O 的含量也存在一定变化, 两者是相对应的。结合土体矿物成分和化学成分的变化情况, 分析土体 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 含量变化的原因: (a) Si 、 Al 是构成土体矿物的主要成分, 其性质相对稳定, 与之相比, Ca 、 Mg 、 Na 、 K 的化学性质则相对活泼, 因此更易在电渗过程中发生反应而移动; (b) Ca 、 Mg 、 Na 、 K 在土体内并不完全以矿物形式存在, 部分以离子形式存在, 在电场作用下 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等阳离子会拖拽孔隙水分子移动与其共同排出, 电渗排水即由此实现。

除了以上几种成分, 其他成分的变化幅度都很小, 可以认为没有发生变化。总体来看, 电渗作用可以改

变土体的化学成分,这种改变主要表现在化学性质活泼、以离子形式存在的元素上。

2.5 电渗排出水中化学成分变化

通过电感耦合等离子体质谱分析检测电渗排出水中不同化学成分的含量。试验仪器采用美国 ELAN 9000 型电感耦合等离子体质谱仪。经测定,试验前配置土样所用水中化学成分含量极低,可忽略。

通过检测可知,电渗排出水中含有 Al、Si、Ca、Na、K、Ba、Mg、Sr、Cu 等元素,但除了 Ca、Na、K 外,其他成分含量极低,可以忽略,因此下面仅对含量较高的 Ca、Na、K 进行分析,其质量浓度如图 4 所示。

对于 Ca:电渗初始的 24 h,试验排出水中 Ca^{2+} 的质量浓度为 30.7 mg/L,在电渗 24 h 后第 2 个时间段内的排出水中 Ca^{2+} 的质量浓度急剧下降至 6.49 mg/L,随后的时间一直没有明显的变化直至试验结束。试验中 Ca^{2+} 在初始 24 h 的排出速率最大。

对于 Na:电渗初始 24 h,排出水中的 Na^+ 质量浓度为 21.6 mg/L,24~48 h 的排出水中 Na^+ 的质量浓度明显增加,增至 69.4 mg/L,随后试验电渗排出水中 Na^+ 的质量浓度则一直保持增长趋势,不过增长速度变慢。试验中 Na^+ 在 108~240 h 排出速率最大。

对于 K:试验初始 24 h,电渗排出水中 K^+ 的质量浓度为 16 mg/L,随后 K^+ 的含量呈现稳定的增长趋势,直至最后阶段为 141.2 mg/L。试验中 K^+ 在 108~240 h 排出速率最大。

由以上分析,可以把 Na 和 K 归为排出明显的元素,Ca 其次。

2.6 电渗过程中元素的迁移分析

综合土体及电渗排出水中的化学成分变化,可以简单分析电渗过程中土体内不同元素的迁移、流失情况。下面对上述提及的 Ca、Mg、Na、K 进行定量分析。

为了比较土体内元素减少量与电渗排出水中元素量的关系,分别对其进行计算,进而求得电渗排出水中元素量占土体内元素减少量的百分比。具体计算方法为:(a)参照土体含水总量的计算方法,将试验后土体分为 3 层,由所测密度和含水率计算每层土的土颗粒质量,进而由不同成分的质量分数计算每层土中元素的含量,相加得试验后土体内元素总量;(b)由试验前土体的密度和含水率计算土颗粒质量,进而计算试验前土体内元素含量,试验前后元素含量之差为土体内元素的减少量;(c)分别根据 4 个排水时间段的累计净排水量和元素含量计算电渗排出水中元素的量,相加得电渗排出水中元素的总量;(d)计算电渗排出水中元素量占土体内元素减少量的百分比。

计算得出电渗排出水中元素量与土体内元素减少量的比值是:Na 为 57.2、K 为 36.8,Na、K 相对较高;Ca 为 1.4、Mg 为 0(电渗排出水中基本检测不到 Mg),Ca、Mg 极低。

土体内 Ca 和 Mg 的变化幅度相对 Na 和 K 也较高,但其流失并未反映在电渗排出水中相应元素的增加量上。对 Na 和 K 来说,土体内元素的变化幅度较低,流失的元素可以较好地反映在电渗排出水中元素的增加量上。对于 Ca 和 Mg 的“消失”,分析可能的原因:电渗过程中阴极处产生的 OH^- 大量聚集在阴极电极板附近,Ca、Mg 能够以离子形式或化合物形式迁移至此与之反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 等氢氧化物沉淀,这些沉淀物会沉积在电极板表面致使相应元素不能在土体内检测出来。

总结上述分析,可以得出:电渗过程中 Ca、Mg 在土体内流失而没有进入电渗排出水中,表现为“消失”;Na、K 能够较明显地由土体迁移至电渗排出水中。

3 结 论

a. 高岭土在电渗作用下阳极附近土的 pH 基本没有变化,不呈现明显的酸性,而阴极附近土则呈现出较为明显的碱性。电渗排出水的 pH 同阴极处土体的 pH 接近,也呈碱性。不同条件下的电渗试验中土和水的 pH 变化差距不大。

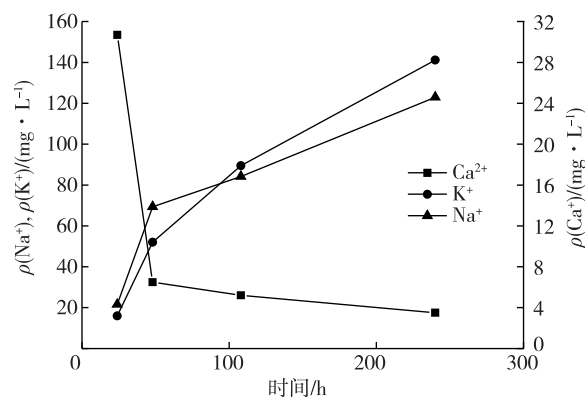


图 4 电渗排出水中各元素的质量浓度

Fig. 4 Mass concentration of each element in drainage through electroosmosis

b. 高岭土主要的矿物成分是高岭石、珍珠陶土、地开石和石英,经过电渗作用只有地开石的含量表现出一定程度的变化。

c. 高岭土主要的化学成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 , 经过电渗作用没有明显变化, 而变化幅度较大的化学成分是 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O , 其中 CaO 的变化明显强于其他成分, K_2O 的变化同地开石的变化相对应。电渗排出水中主要的化学成分是 Ca 、 Na 、 K 。

d. 电渗过程中高岭土的不同元素有着不同的迁移现象: 含量较低的 Na 、 K 容易以离子形式发生迁移流入水中; 含量相对高的 Ca 、 Mg 则可能通过反应生成氢氧化物沉淀而不易被检测出来, 表现为“消失”。

参考文献:

- [1] ADAMSON L U. Application of electrokinetic phenomena in dewatering, consolidation and stabilization of soils and weak rocks in civil and petroleum engineering, and augmenting reservoir energy during petroleum production [D]. Los Angeles: University of Southern California, 1966.
- [2] RUJIKIATKAMJORN C, INDRARATNA B, CHU J. 2D and 3D numerical modeling of combined surcharge and vacuum preloading with vertical drains [J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(2): 144-156.
- [3] CASAGRANDE L. Method of Hardening soil: 2009328 [P]. 1937.
- [4] GRAY D H, MITEHELL JAMES K. Fundamental aspects of electro-osmosis in soils [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, 93(6): 209-236.
- [5] SHANG J Q. Electroosmosis-enhanced preloading consolidation via vertical drains [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 491-499.
- [6] CHEN J L, MURDONCH L. Effects of electroosmosis on natural soil: field test [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(12): 1090-1098.
- [7] KANIRAJ S R, HUANG H L, YEE J H S. Electro-osmotic consolidation studies on peat and clayey silt using electric vertical drain [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(3): 277-295.
- [8] LAURSEN S. Laboratory investigation of electroosmosis in bentonites and natural clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5): 664-671.
- [9] 胡黎明, 洪何清, 吴伟令. 高岭土的电渗试验 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(9): 1353-1356. (HU Liming, HONG Heqing, WU Weiling. Electro-osmosis tests on kaolin clay [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(9): 1353-1356. (in Chinese))
- [10] BURNOTTE F, LEFEBVRE G, GRONDIN G. A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1038-1053.
- [11] MICIC S, SHANG J Q, LO K Y. Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(2): 287-302.
- [12] ZHENG J J, CHEN B G, LU Y E, et al. The performance of an embankment on soft ground reinforced with geosynthetics and pile walls [J]. Geosynthetics International, 2009, 16(3): 173-182.
- [13] 王协群, 邹维列. 电动土工合成材料的特性及应用 [J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(6): 62-65. (WANG Xiequn, ZOU Weilie. Properties and applications of electro-kinetic geosynthetics [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(6): 62-65. (in Chinese))
- [14] 胡俞晨, 王钊, 庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基实验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 582-586. (HU Yuchen, WANG Zhao, ZHUANG Yanfeng. Experimental studies on electro-osmotic consolidation of soft clay using EKG electrodes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 582-586. (in Chinese))
- [15] 李瑛, 龚晓南, 郭彪, 等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 4027-4032. (LI Ying, GONG Xiaonan, GUO Biao, et al. Research on conductivity characteristics of soil clay during electro-osmosis and its conductive mechanism [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup2): 4027-4032. (in Chinese))
- [16] SHANG J Q. Zeta potential and electroosmotic permeability of clay soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(4): 627-631.
- [17] ADAMSON L G, CHILINGAR G V, BEESON C M, et al. Electrokinetic dewatering, consolidation and stabilization of soils [J]. Engineering Geology, 1966, 1(4): 291-304.
- [18] LOCH J P G, LIMA A T, KLEINGELD P J. Geochemical effects of electro-osmosis in clays [J]. J Appl Electrochem, 2010, 40(6): 1249-1254.
- [19] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [20] 吴辉煌. 电化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [21] mc CARTER W J. The electrical resistivity characteristics of compacted clays [J]. Geotechnique, 1984, 34(2): 263-267.