

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.10.007

重塑污染 Q_3 黄土的电阻率特征演变试验研究

刘 华^{1,2}, 胡文乐^{1,2}, 牛泽林^{1,2}, 王松鹤³, 胡鹏飞¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;

3. 西安理工大学 土木工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了研究击实酸碱污染黄土的电阻率与含水率、污染物种类及浓度之间的关系, 采用了室内试验模拟酸碱溶液对黄土体进行污染的方法, 制备了相同条件下的击实试样。采用了自行研制的伏安法电阻率测试装置, 在不同电压下测试土体的电阻率, 分析了电压、含水率、污染成分及浓度等因素对击实土体电阻率的影响特征。结果表明: 击实污染土样的电阻率随着电压的增加表现出先减小再逐渐趋于稳定的趋势, 而且不同含水率下电阻率的变化区间差异较大; 选用 12V 电压进行测试更为合理; 轻型击实黄土试样的电阻率随含水率增加而减小, 含水率较低时, 较小的含水率增量使土样电阻率明显降低, 当含水率增加至某一临界值时, 同等梯度的含水率增量使得击实试样的电阻率降低幅度减小; 受盐酸、硝酸、氢氧化钠污染后击实黄土试样的电阻率明显降低, 且随着污染物浓度增加, 降低幅度逐渐减小; 硫酸污染黄土体的电阻率随浓度增加而增大。通过对酸碱污染击实黄土电阻率结果的分析, 得到了电阻率与酸碱溶液浓度的拟合关系式, 二者的相关性可以用于通过电阻率法评价及预测污染土体的侵蚀程度及相关物理力学参数。对于试验所用的铜川黄土, 土体的电阻率与其污染指标存在良好的相关关系, 有助于酸碱污染黄土体的工程质量评价。

关键词: 道路工程; 电阻率特征; 击实; 黄土; 酸碱污染

中图分类号: U416.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2020) 10-0064-10

Experimental Study on Evolution of Resistivity Characteristics of Remodeled Polluted Q_3 Loess

LIU Hua^{1,2}, HU Wen-le^{1,2}, NIU Ze-lin^{1,2}, WANG Song-he³, HU Peng-fei¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering of Shaanxi Province, Xi'an Shaanxi 710055, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: In order to study the relationship of resistivity of compacted acid and alkali polluted loess, water content, pollutant type and concentration, the method of simulating acid and alkali solution pollution on loess in laboratory is used to prepare the compaction samples under the same condition. The resistivity of soil is measured by using a self-developed voltammetric resistivity testing device under different voltages, and the influence characteristics of voltage, water content, pollution composition and concentration on the resistivity of the compacted soil are analyzed. The result shows that (1) the resistivity of compacted polluted soil first decreases and then tends to be stable with the increase of voltage, and the variation range of resistivity is quite different with different water contents; (2) it is more reasonable to choose 12 V voltage for testing;

收稿日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51608436); 陕西省自然科学基金计划 (2018JQ5003); 陕西省教育厅专项科研项目 (18JK0478)

作者简介: 刘华 (1983-), 男, 陕西延安人, 博士, 副教授. (liuhua029@xauat.edu.cn)

(3) the resistivity of light compacted loess samples decreases with the increase of water content; (4) the smaller increment of water content makes the resistivity of soil decrease obviously when the water content is small, while the water content increase of the same gradient makes the reduction of the resistivity of the compacted samples decrease when the water content increases to a certain critical value; (5) the resistivity of compacted loess samples decreases significantly after being polluted by hydrochloric acid, nitric acid and sodium hydroxide, and the decreasing range gradually decreases with the increase of pollutant concentration; (6) the resistivity of sulfuric acid polluted loess increases with the increase of concentration. By analyzing the resistivity result of acid and alkali polluted compacted loess, the fitting relationship between resistivity and acid and alkali solution concentration is obtained. The correlation between them can be used to evaluate and predict the erosion degree of polluted soil and related physical and mechanical parameters by resistivity method. For the Tongchuan loess used in the experiment, there is a good correlation between the resistivity of the soil and its pollution indicator, which is helpful for the engineering quality evaluation of the acid and alkali polluted loess.

Key words: road engineering; resistivity characteristic; compaction; loess; acid and alkali pollution

0 引言

黄土是一种广泛分布于我国西北地区的独特地质载体,在西部大开发和东部经济结构调整的各项工程建设中,有关黄土工程问题备受关注。在我国密集型产业向西部地区转移和工业化不断推进的过程中^[1],越来越多的工业废水和废液也随之产生,工业废水和废液会产生大量的酸碱污染源并对水土造成污染,黄土体受到酸碱污染后的物理力学特性将会发生显著变化,其作为建筑地基、公路与铁路路基及路堤填料时的工程性能备受关注^[2]。因此对击实酸碱污染黄土的研究具有重要的实际工程意义^[3-4]。20世纪70年代以来,欧美等许多国家就已开始土体污染方面的研究^[5-8],国内学者在20世纪80年代也意识到了这方面研究的重要性,刘汉龙^[9-10]、顾季威^[11]、黄世铭^[3]、陈筠^[12]、李琦^[13]、孙重初^[14]等学者对酸碱污染土的物理力学性质开展了相关研究工作,但到现阶段还没有较为完善的污染场地勘察试验及分析的应用方法和仪器设备^[15],岩土工程界和工程地质界相关学者仍采用岩土勘察的手段对污染场地进行评价^[16]。因此,对酸碱污染场地进行快速评价的研究有重要工程意义且备受关注。

电阻率法以土、水、气及水气分界面等相关介质的导电性为基础,是勘察地球物理的常用方法之一,具有连续、快速、无损伤等特点,可以有效准确地对土体性质进行评估^[17]。前人研究经验表明^[18-19],击实土的电阻率受击实条件、矿物组成、饱和度、含水率、孔隙液成分等多种因素的影响。

但上述成果都是在无污染的条件下进行击实,查甫生等^[4]在探讨击实黄土电阻率的基础上证明了土的电阻率与物理力学性质指标间的关系。然而,将电阻率法用于酸碱污染黄土击实特性评价方面的研究还未见报道。

本研究以铜川黄土为研究对象,采用4种浓度的HCl, H_2SO_4 , HNO_3 及 NaOH 溶液作为污染物,人工配制不同含水率和不同污染浓度的污染试样,对不同工况下的土样进行击实试验,并对击实后的土样进行不同直流电压下的电阻率测试,探明不同含水率下常见污染物种类及浓度对击实的影响规律,分析击实酸碱污染黄土的电阻率基本特征,为采用电阻率指标评价击实污染黄土体的质量评价提供数据支撑和理论参考。

1 试验概况

1.1 污染土样的制备

试验采用陕西铜川耀州区 Q_3 黄土(取样现场见图1),土质呈黄褐色,且较为均匀,属黄土状粉质黏土,取土深度1.5~3.0 m,颗粒分析曲线见图2。土样经阳光下暴晒风干后碾碎,含水率约为1%~2%,过5 mm标准筛备用。试验土样的物理力学指标如表1所示^[20]。

1.2 试验方案设计及试验原理

为了模拟不同工业废水成分对土体力学及电学特性的影响,配制4个等级浓度(0.1 mol/L, 0.5 mol/L, 1.0 mol/L, 2.0 mol/L)的 H_2SO_4 , HCl, HNO_3 及 NaOH 溶液作为污染物,再分别与风干后的土样进行人工拌和形成含水率依次为15%,



图 1 取样现场
Fig. 1 Sampling site

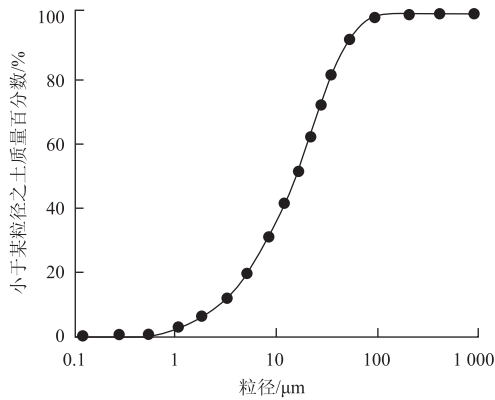


图 2 铜川 Q₃ 黄土试样的颗粒分析曲线
Fig. 2 Particle analysis curve of Tongchuan Q₃ loess

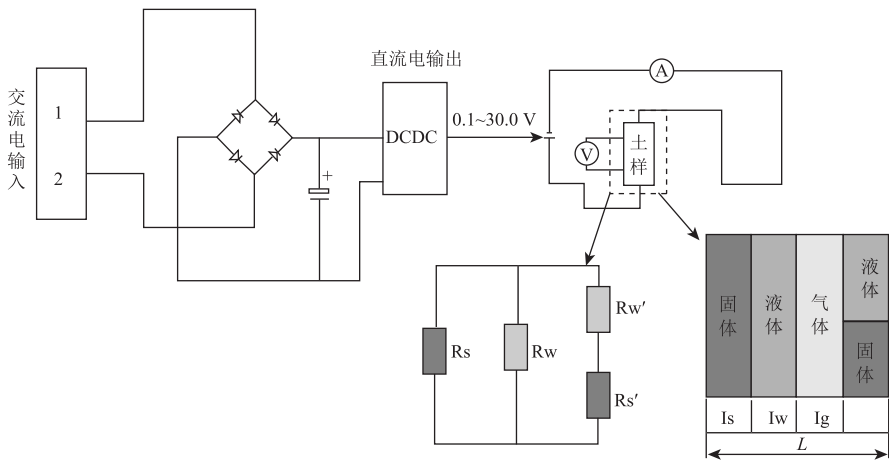


图 3 基本电路图
Fig. 3 Basic circuit diagram

足量土样分 3 层击实，各击实 25 下。用针刀在两层交界面处进行刮毛。击实工作完成后将试样从击实筒中推出，依照试验规范及方案设计进行电阻率测试。

试验装置为自行研制的伏安法电阻率测试设备，其测试部分原理如图 3 所示。电源采用交流电供电转换为 0.1 ~ 30.0 V 的直流（DC）电压，A、V 分

表 1 试验土样的物理指标				
Tab. 1 Physical indicators of loess for experiment				
比重	液限/%	塑限/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
2.72	35.43	21.42	16.8	1.78

17%，19%，21%，23% 的污染土样，在保鲜袋中密封保存 24 h 后进行轻型击实试验，包括 5 种含水率下的污染土样，共计 85 个击实试样，然后对击实试样进行不同电压（1 ~ 30 V）下的电阻率测试。根据前人研究结果，先对击实土样进行不同高度（11.6，8，4 cm）下的电阻率修正。

土的电阻率受到诸多因素的影响，但土的导电性能主要涉及 3 个过程：孔隙水导电、土颗粒导电及孔隙水 - 土颗粒导电，如图 3 所示。而土体的固、液、气等三相中，气相认为不导电。因此，土导电性能的大小主要有以下参数控制^[21-24]：一是孔隙水离子含量等成分，二是土颗粒表面吸附特征及土颗粒间的黏结特性，三是孔隙水 - 颗粒的拌和结构特性。

1.3 试验方法

将拌和好的污染土经密封保存达到试验要求后，进行同条件下的轻型击实试验，所用击实筒为标准击实筒，内径 102 mm，筒高 116 mm，护筒高度为 50 mm。为保证试样的均匀性与整体性，将制备好的

别为测试试样两端电流和电势差的高精度表； R_x 为待测击实试样。对每个试样进行了 1，3，5，10，12，15，20，25，30 V 等不同电压下的电阻率测试。为减小潜在电泳、极化以及污染物运移等有关现象产生的可能性，在切换电压时应不断地上下颠倒土样，从而改变与正负电极接触。土的电阻率计算公式为：

$$R_x = \frac{U}{I}; \rho = R_x \frac{S}{H}, \quad (1)$$

式中, U 为实测电压读数; I 为实测电流读数; R_x 为土的电阻; S 为击实试样面积; H 为试样高度。

1.4 试验数据修正

为了避免四相电极测量时电极挤入给试样带来影响,采用二相电极进行测试。二相电极的测试结果中包含着两极铜板土样间的接触电阻,而且该处电阻对于金属电极和土样都会发生明显变化,因此,对不同高度(11.6, 8, 4 cm)试样的电阻进行测试,每个高度取5次测试结果对应的中值进行线性拟合,得到接触电阻的值为 2.77 Ω ,见图4。

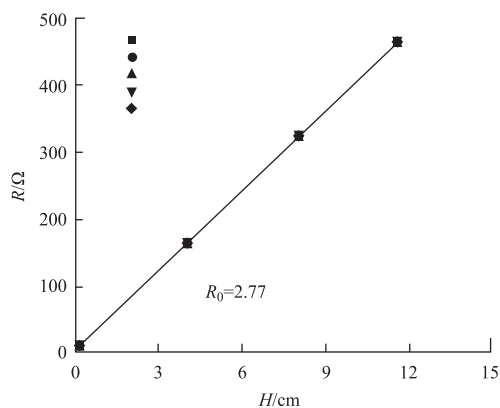


图4 R - H 数据修正拟合线

Fig. 4 R - H data correction fitting curve

2 污染土电阻率测试分析

2.1 电压的影响

电压大小是影响污染土电阻率测量结果的重要因素, Sherif Yehia^[25]曾认为,电阻率性能随电压升高会出现线性、可控制及击穿3个阶段。在前人研究成果的基础上,揭示了电压大小对污染土电阻率的影响规律:考虑浓度影响的污染液电阻率随电压变化情况如图5(a)所示,在低浓度下,各不同类型污染液电阻率的变化规律:氢氧化钠>硝酸>盐酸>硫酸;随着浓度的升高,不同类型酸污染液电阻率均随着浓度的升高而降低。

如图5(b)~(f)所示为不同含水率下三酸一碱污染土击实土样的电阻率测试曲线。从图中可以看出,击实污染土样的电阻率随着电压的增加表现出先减小再逐渐趋于稳定的趋势。不同含水率下电阻率的变化范围不同,总体表现为随着含水率的升高,集中区段变化范围从15%时的(0~300 $\Omega \cdot m$)高区段降低至23%时的(0~50 $\Omega \cdot m$)区段。随着

电压的增加,电阻率下降趋势明显,随着电压的进一步增大,变化稍显平缓。原因在于:电压的升高使得土体内部电子的能量得到提高,更易迁移,导致土样电阻率降低;采用试触法和颠倒土样两极接触等,以减小部分电子累积在电极一端而产生极化效应的可能。随着电压的增加,直流电具备的单向性和试验过程中极有可能触发的极化效应对内部电子移动的影响减小,土颗粒在强电场下发生导电,电阻率呈现较为稳定状态。因此,在使用直流电压进行土样电阻率测量时建议采用12~20 V的电压值。本研究以下讨论部分选用电阻率为12 V电压对应值。

2.2 含水率及浓度的影响

污染物作用下电阻率与含水率间的关系,如图6所示。图6(a)~(d)依次为不同浓度下的HCl, H₂SO₄, HNO₃, NaOH污染黄土。由图6(a)~(d)可知,在不同污染物种类及浓度下,随着含水率的升高,电阻率值均呈现减小的变化趋势。其中,未污染击实试样的电阻率与含水率间呈现幂函数关系,而图6(a)~(d)所示HCl, H₂SO₄, HNO₃, NaOH污染土击实试样的电阻率与含水率间表现为线性减小关系,且相对未污染土击实试样的电阻率变化显得较为平缓。

如图6所示,含水率较低时,较小的含水率增量使土样电阻率明显降低,当含水率增加至某一值时,相同梯度的含水率增量对土样的电阻率影响较小,击实土样的电阻率降低幅度也减小。其中,盐酸、硝酸污染土击实试样的电阻率随含水率变化规律相似,都表现为在低浓度下电阻率较大,高浓度下电阻率随含水率变化曲线相对集中。NaOH污染土随浓度增加逐渐降低,随含水率增加呈接近线性减小。

实际上,土颗粒和孔隙液成分对轻型击实试样的电阻率大小起到了决定性作用^[26]。当土体含水率小于一定值时,土颗粒难以挤密,同等击实条件下的孔隙较大,此时饱和度也较低,土体内部存在大量气体,土体密实性较差,颗粒间接触性较差,且土颗粒周围的双电层结构并未完全形成,土体孔隙及土颗粒几乎不导电,使得土样产生较大电阻率。反之,当击实试样的含水率大于该临界值时,土体拥有较高的饱和度,孔隙水的连通性相对较好,孔隙水的导电性能能够得到充分发挥,使得土体孔隙与土颗粒表面的电阻率均减小^[27],击实试样的电阻率也随之逐渐减小。

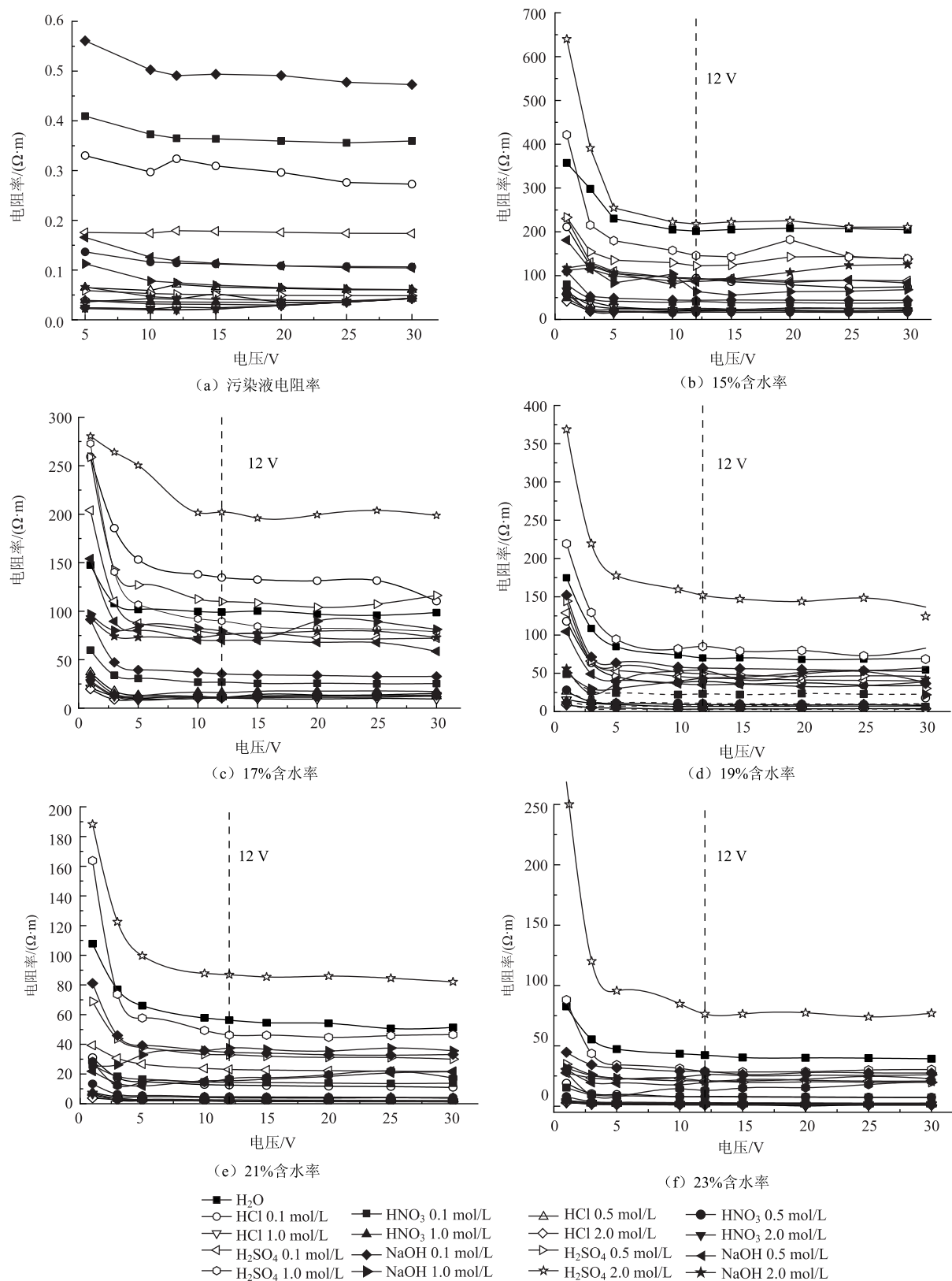


图5 电阻率随电压大小变化关系

Fig. 5 Relations of resistivity varying with voltage

从图6 (a) 和 (c) 中可以看出, 污染土的电阻率随含水率的变化趋势与未污染土相似, 且电阻

率随浓度的增加均呈现了不同程度的降低, 尤其 0.1 mol/L 低浓度污染时降幅最为明显。且在含水率

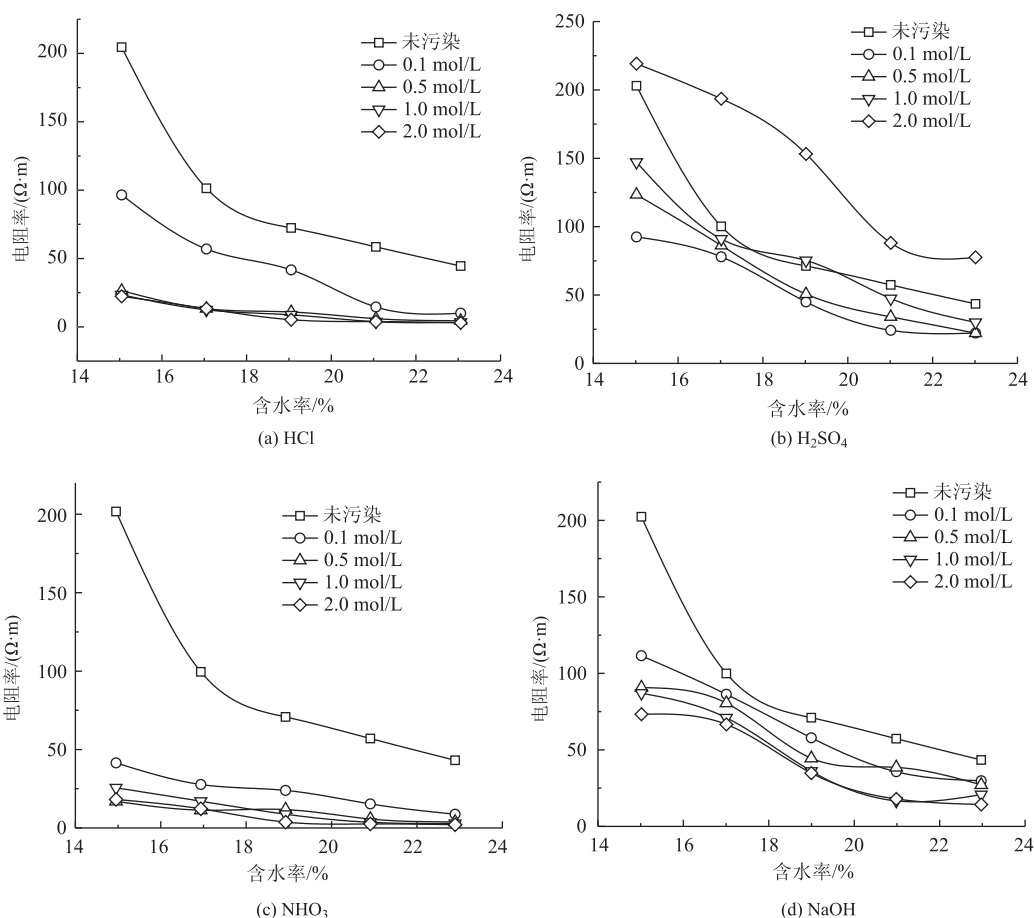
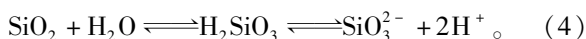
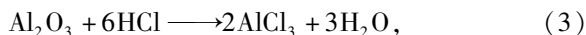
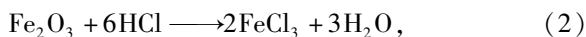


图 6 电阻率随含水率变化关系

Fig. 6 Relations of resistivity varying with water content

相同条件下, 污染土击实试样电阻率随着污染浓度的增加而降低; 同一浓度下, 污染土的电阻率随含水率升高降幅较小。出现这种现象的原因在于, HCl、HNO₃ 等污染物对黄土进行污染时, 黄土中的化学成分有较多氧化物等次生矿物, 当被酸污染后, 发生化学反应的几率会大大增加, 生成氯化物以及水分, 通过扩散作用运移至土颗粒之外, 增大了孔隙液的连通性, 增强了土颗粒孔隙及土颗粒表面的电学性能, 且浓度越高, 该反应进行得越完全。具体反应方程式^[28]如式 (2) ~ (3) 所示 (以 HCl 为例)。同时, 土体中含有的微量 SiO₂, 能够与水发生双向可逆的水解反应, 随着酸浓度的增大, 反应式逆向进行, 水的质量分数增大, 也使污染土的电阻率降低, 反应方程式见公式 (4)。

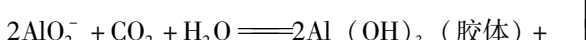
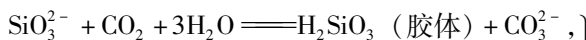
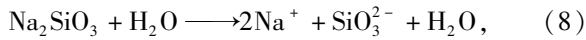
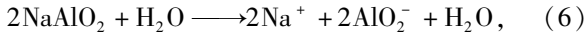


从图 6 (b) 中可以看出, H₂SO₄ 污染土的电阻率随含水率的变化趋势也与未污染土击实试样

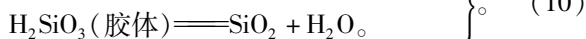
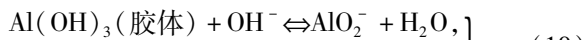
电阻率变化规律相似, 但其电阻率与污染浓度的关系呈现先减后增的现象, 甚至在污染物浓度 2.0 mol/L 时, 击实土样的电阻率高于未污染^[29]。分析其原因可知, 较低浓度的硫酸腐蚀性相对较弱, 使得孔隙液成分类似盐酸和硝酸, 离子增多, 增大了孔隙液的连通性, 导电性能得到增强, 促使电阻率降低; 随着硫酸浓度的增加, 致使土颗粒间的原生结构破坏以及新生胶结结构的形成, 使得粒径及孔径均增大^[30], 浓度越高, 腐蚀性越强, 孔隙液中析出的胶结物质的黏滞作用和沉淀作用极易造成孔隙连通性降低, 使得高浓度下电阻率高于未污染土。

从图 6 (c) 中可以看出, NaOH 污染土的电阻率变化规律与 HCl 呈现出的规律相同, 但其侵入机理不同。碱液侵入黄土发生侵蚀 - 胶结 - 溶解等一系列反应^[27], 其中, 初期发生公式 (5) ~ (8) 所示的侵蚀, 水解电离出的 OH⁻ 与 SiO₂, Al₂O₃ 反应生成 SiO₃²⁻ 和 AlO₂⁻, 消耗了土颗粒中的胶结氧化物, 生成 H₂O。进一步侵入发生胶结反应, 如式 (9) 所示, 在此过程中生成絮状沉淀, 同时生成了 OH⁻,

增加了孔隙液中的离子数目。随着碱液进一步增加以及 OH^- 的产生, 新生胶体稳定性较差, 极易溶于水, 又产生可溶盐, 生成水, 增加了孔隙液的连通性和导电性^[7]。随着碱液浓度升高, 化学反应不断反复进行, 离子数目、离子所带电荷总数不断增加, 电场驱动下导电性增强, 电阻率越低。



(9)



(10)

3 基本参数间的相互关系

3.1 HCl 污染与电阻率的关系

图7为击实盐酸污染试样的电阻率随盐酸浓度变化关系, 由图可知, 随着污染浓度的增加, 击实试样电阻率变化幅度呈指数关系减小。在浓度较低时, 电阻率变化幅度大; 浓度较高时, 电阻率变化幅度减小且逐渐趋于稳定^[31]。且随着含水率的增加, 拟合的指数函数模型(11)中 a 值逐渐减小, 低含水率时, b 值在 $-4.8 \sim -6.8$ 左右; 高含水率时, b 值在 -15 左右。这也与前人的研究成果相互契合: 一方面, 孔隙水的连通性提高, 孔隙液导电性能得到改善, 使得击实土体的导电性能增强, 试

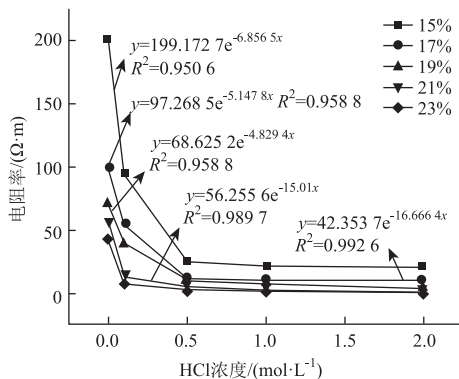


图7 不同含水率下电阻率-HCl浓度关系曲线

Fig. 7 Curves of resistivity vs. HCl concentration with different water contents

样的电阻率值降低; 另一方面, 盐酸污染使得土颗粒表面电荷发生改变。

$$\rho = ae^{bn}, \quad (11)$$

式中, ρ 为电阻率; n 为浓度; a 、 b 为系数。

3.2 H_2SO_4 污染与电阻率的关系

图8为不同含水率下电阻率- H_2SO_4 浓度关系曲线, 从图中可以看出, 随着污染浓度的增大, 粒径及孔径均增大, 孔隙液中析出的胶结物质的黏滞作用和沉淀作用极易造成孔隙连通性降低, 电阻率增加。拟合参数结果见表2。其中, $0.1 \sim 2 \text{ mol/L}$ 电阻率的拟合度很高, 且随着含水率的升高, 式(12)拟合线的斜率逐渐降低, 截距也逐渐减小。原因在于, 硫酸污染造成了原生结构破坏及新胶结物的形成, 黄土中土颗粒的分解与再造是电阻率升高的主要原因; 同时硫酸污染土通过改变颗粒新生胶结盐的综合作用使得击实土样的孔隙连通性较差, 而孔隙水导电是土体中电荷移动的重要途径, 因此, 硫酸污染土电阻率在浓度稍大时出现升高。而在 0.1 mol/L 时出现了硫酸污染土电阻率均低于未污染时的“异常现象”, 可能是由于浓度较低时, 腐蚀性较差, 孔隙液的离子含量升高, 而此时孔隙连通性并未发生明显变化所致。此外, 图8中17%拟合线与试验数据存在偏差, 17%含水率下, 随着 H_2SO_4 污染浓度升高, 电阻率呈现增加趋势, 但在 1.0 mol/L 和 2.0 mol/L 时与拟合线偏差较大, 可能是由于该含水率接近击实土的最佳含水率, 相同击实功条件下, 污染对该击实土样的电阻率影响改变较小所致。

$$\rho = kn + b, \quad (12)$$

式中, ρ 为电阻率; n 为浓度; k 、 b 为系数。

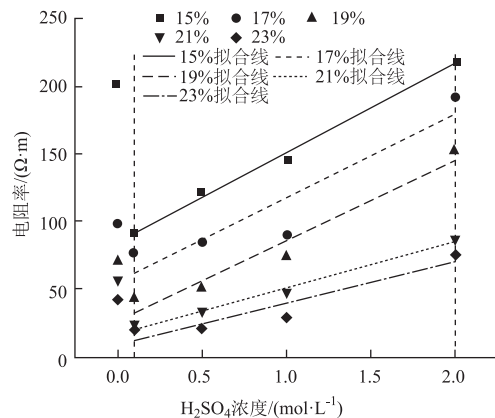


图8 不同含水率下电阻率- H_2SO_4 浓度关系曲线

Fig. 8 Curves of resistivity vs. H_2SO_4 concentration with different water contents

表 2 拟合参数结果
Tab. 2 Parameter fitting result

含水率/%	k	b	R^2
15	65.496 1	85.338 1	0.992 5
17	61.897 6	55.238 2	0.869 8
19	59.228 1	26.513 0	0.952 1
21	33.939 0	16.735 1	0.985 5
23	30.521 6	9.360 5	0.884 8

3.3 HNO₃ 污染与电阻率的关系

图 9 为电阻率随 HNO₃ 浓度变化关系。随着酸污染浓度的升高, 土体固相成分组成发生改变, 使得土的电率明显降低直至出现拐点后逐渐趋于稳定。一方面孔隙水的导电性得到改善, 增加了孔隙水的导电性; 另一方面, 可能与硝酸污染改变了土的颗粒级配及液塑限等相关物理力学性质有关。利用式 (13) 对不同含水率下击实试样的电阻率与污染浓度的关系曲线进行拟合, 如图 9 所示, 拟合结果中可以看出, 由于硝酸污染的影响, 电阻率随浓度升高弱化了含水率的影响。

$$\rho = ae^{bn} + c, \quad (13)$$

式中, ρ 为电阻率; n 为浓度; a, b, c 为系数。

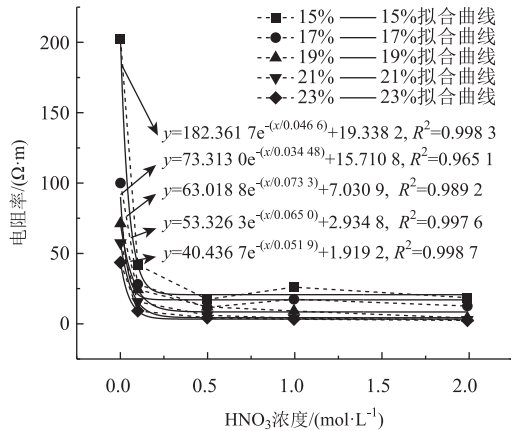


图 9 不同含水率下电阻率 - HNO₃ 浓度关系曲线

Fig. 9 Curves of resistivity vs. HNO₃ concentration with different water contents

3.4 NaOH 污染与电阻率的关系

图 10 为电阻率随 NaOH 浓度变化关系, 碱污染土的电率随浓度增加逐渐降低, 且降低趋势越来越小。用式 (14) 拟合度较高。高含水率下, 污染土的 b 值在 0.3 ~ 0.6 区间内, 比低含水率 15% 时污染土的 b 值高 5 ~ 10 倍左右, 随着含水率的升高, a, c 两参数值逐渐降低。原因在于, 氢氧化钠随使得孔隙液导电性增强, 电阻率减低, 与盐酸及硝酸不同的是, 盐酸和硝酸的电阻率在低浓度时降低较为明显, 随浓度升高进一步变化较小; 氢氧化钠污

染土电阻率的降低随浓度升高呈现逐步变化的趋势较为明显。氢氧化钠浸润黄土时的碱土作用, 产生的胶结物质 (絮状沉淀、晶体及胶体) 会使击实土样更加密实, 颗粒间距减小, 联络更加紧密, 导电性能提高, 电阻率降低。

$$\rho = ae^{-\left(\frac{n}{b}\right)} + c, \quad (14)$$

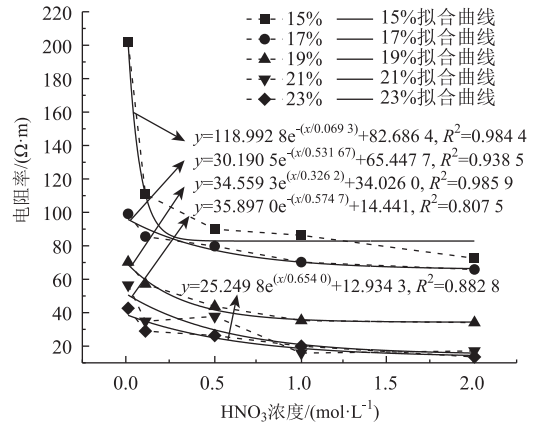


图 10 不同含水率下电阻率 - NaOH 浓度关系曲线

Fig. 10 Curves of resistivity vs. NaOH concentration with different water contents

式中, ρ 为电阻率; n 为浓度; a, b, c 为系数。

4 结论

本研究对击实酸碱污染黄土的电阻率特性进行了测试分析, 探明了土的含水率、污染物种类及污染浓度等因素对击实酸碱污染黄土电阻率的影响, 研究了击实酸碱污染黄土的电阻率特性, 得出了以下主要结论:

(1) 击实黄土试样的电阻率随含水率的增加呈现减小趋势, 当含水率处于较低水平时, 相同梯度的含水率增量使得击实试样的电阻率降低较为明显; 当含水率增加至某一临界值时, 同等梯度的含水率增量使得击实试样的电阻率降低幅度减小。

(2) HCl, H₂SO₄, HNO₃, NaOH 污染后黄土体的电阻率变化显著, 土体导电性受土颗粒和孔隙液化学成分影响显著。HCl, HNO₃, NaOH 污染后使黄土体的电阻率明显降低, 且随浓度增加, 降低幅度减小; H₂SO₄ 污染黄土击实试样的电阻率值随污染浓度增加呈现增大趋势, 原因在于硫酸污染对土颗粒架构的改变以及对孔隙液成分的影响。

(3) 击实酸碱污染黄土体的电阻率随浓度的变化关系可用具有拟合度较高的相关曲线进行描述, 二者的相关性可以用来通过电阻率法评价及预测污染土体的侵蚀程度及相关物理力学参数。

参考文献:

References:

- [1] 古冰, 朱方明. 我国污染密集型产业区域转移动机及区位选择的影响因素研究 [J]. 云南社会科学, 2013 (3): 66-70.
GU Bing, ZHU Fang-ming. Research on Influencing Factors of Motivation of Pollution-intensive Industry Regional Transfer and Location Selection in China [J]. Social Sciences in Yunnan, 2013 (3): 66-70.
- [2] 高彦斌, 刘佳丹, 王雨滢. 酸碱污染重塑粉质黏土的塑性及其与力学特性的关系 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (11): 2103-2109.
GAO Yan-bin, LIU Jia-dan, WANG Yu-ying. Plasticity and Its Relationship with Mechanical Properties of a Remolded Silty Clay Contaminated by Several Acids and Bases [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (11): 2103-2109.
- [3] 黄世铭. 酸碱介质对粘性土工程地质性质的影响 [J]. 水文地质工程地质, 1981 (4): 45-49.
HUANG Shi-ming. Influence of Acid-base Medium on Engineering Geological Properties of Clay Soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1981 (4): 45-49.
- [4] 查甫生, 刘松玉, 杜延军. 击实黄土的电阻率特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (增2): 155-158.
ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Characteristics of Electrical Resistivity of Compacted Loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (S2): 155-158.
- [5] SRIDHARAN A, NAGARAJ T S, SIVAPULLAIAH P V. Heaving of Soil due to Acid Contamination [C] // Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1981: 383-386.
- [6] 查甫生, 刘松玉, 杜延军. 击实膨胀土的电阻率特性试验研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (2): 28-32.
ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Electrical Resistivity Characteristics of Compacted Expansive Soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (2): 28-32.
- [7] 牟春梅, 韦瑜玺, 张岩. 桂林地区碱污染红黏土力学效应弱化试验 [J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39 (2): 376-382.
MOU Chun-mei, WEI Yu-xi, ZHANG Yan. Experiment of the Mechanical Effect Weakening for Alkali Polluted Red Clay in Guilin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39 (2): 376-382.
- [8] PICCOLL, STEFANO, BENOIT. Geo-environmental Testing Using the Envirocone [C] // Proceedings of the ASCE Specialty Conference Geoenvironment 2000. New Orleans: ASCE, 1995, 93-104.
- [9] 刘汉龙, 朱春鹏, 张晓璐. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (8): 1213-1217.
LIU Han-long, ZHU Chun-peng, ZHANG Xiao-lu. Fundamental Physical Properties of Soil Polluted by Acid and Alkali in Laboratory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (8): 1213-1217.
- [10] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (7): 1146-1152.
ZHU Chun-peng, LIU Han-long, SHEN Yang. Laboratory Tests on Shear Strength Properties of Soil Polluted by Acid and Alkali [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (7): 1146-1152.
- [11] 顾季威. 酸碱废液侵蚀地基土对工程质量的影响 [J]. 岩土工程学报, 1988, 10 (4): 72-78.
GU Ji-wei. Effect of Acid and Alkali Waste Liquid Eroding Foundation Soil on Engineering Quality [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10 (4): 72-78.
- [12] 王麒, 陈筠, 赵鹏, 等. 碱污染红黏土物理性质及微观结构试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13 (6): 1483-1492.
WANG Qi, CHEN Yun, ZHAO Peng, et al. Experimental Study on Physical Properties and Microstructure of Red Clay Polluted by Alkali [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13 (6): 1483-1492.
- [13] 李琦, 施斌, 王友诚. 造纸厂废碱液污染土的环境岩土工程研究 [J]. 环境污染与防治, 1997, 19 (5): 16-18.
LI Qi, SHI Bin, WANG You-cheng. Environmental-geotechnical Properties of Soils Contaminated by Waste Alkaline Liquor from Paper Mills [J]. Environmental Pollution and Control, 1997, 19 (5): 16-18.
- [14] 孙重初. 酸液对红黏土物理力学性质的影响 [J]. 岩土工程学报, 1989, 11 (4): 89-93.
SUN Chong-chu. Effect of Acid Solution on Physical and Mechanical Properties of Red Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11 (4): 89-93.
- [15] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 一种检测污染土的新方法: 电阻率法 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (8): 1028-1032.
HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-jun. New Method for Testing Contaminated Soil: Electrical Resistivity Method

- [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (8): 1028 – 1032.
- [16] 董晓强, 白晓红, 赵永强, 等. 硫酸侵蚀下水泥土的电阻率特性研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (7): 1453 – 1458.
DONG Xiao-qiang, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, et al. A Study of Electrical Property of Cemented Soil Eroded by H_2SO_4 Solution [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (7): 1453 – 1458.
- [17] 陈开圣, 沙爱民. 黄土压实影响因素分析 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (7): 54 – 58.
CHEN Kai-sheng, SHA Ai-min. Study of Influencing Factors of Loess Compaction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (7): 54 – 58.
- [18] ABU-HASSANEIN Z S, BENSON C H, BLOTZ L R. Electrical Resistivity of Compacted Clays [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122 (5): 397 – 406.
- [19] 刘松玉, 边汉亮, 蔡国军, 等. 油水二相体对油污染土电阻率特性的影响 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (1): 170 – 177.
LIU Song-yu, BIAN Han-liang, CAI Guo-jun, et al. Influences of Water and Oil Two-phase on Electrical Resistivity of Oil-contaminated Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (1): 170 – 177.
- [20] 于小军, 刘松玉. 电阻率特性参数法应用于高速公路路基土结构性研究综述 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (6): 8 – 11.
YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Application of Electrical Resistivity Indices in Soil Structure Study [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (6): 8 – 11.
- [21] RHOADES J D, MANTEGHI N A, SHOUSE P J, et al. Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53 (2): 433 – 439.
- [22] JACKSON P. An Electrical-resistivity Method for Evaluating the In-situ Porosity of Clean Marine Sands [J]. Marine Geotechnical, 1975, 1 (2): 91 – 115.
- [23] RHOADES J D, RAATS P A C, PRATHER R J. Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40 (5): 651 – 655.
- [24] MITCHELL J K. Fundamentals of Soil Behavior [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1993.
- [25] YEHIA S, TUAN C Y, FERDON D. Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing: Mixture Proportioning, Optimization, and Properties [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97 (2): 172 – 181.
- [26] 边汉亮, 刘松玉, 蔡国军, 等. 柴油污染粉质黏土的电阻率特性及影响因素 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2017, 38 (8): 1177 – 1182.
BIAN Han-liang, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. Electrical Resistivity Characteristic and Influence Factors of Diesel Contaminated Silty Clay [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2017, 38 (8): 1177 – 1182.
- [27] 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 Mechanism of Loess High-fill Foundation Based on Soil Electrical Resistivity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (3): 640 – 648.
- [28] 牟春梅, 韦瑜玺. 桂林地区酸、碱污染红黏土力学效应弱化试验研究 [J]. 重庆大学学报, 2019, 42 (6): 109 – 118.
MOU Chun-mei, WEI Yu-xi. Experimental Study on the Weakening of Mechanical Properties of Red Clay Contaminated by Acid and Alkali in Guilin Area [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42 (6): 109 – 118.
- [29] 储亚, 刘松玉, 蔡国军, 等. 锌污染土物理与电学特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (10): 2862 – 2868.
CHU Ya, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. An Experimental Study of Physical and Electrical Characteristics of Zinc Contaminated Silty Clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (10): 2862 – 2868.
- [30] 路世豹, 张建新, 雷扬, 等. 某硫酸库地基污染机理的探讨 [J]. 矿产勘查, 2003, 6 (5): 37 – 39.
LU Shi-bao, ZHANG Jian-xin, LEI Yang, et al. An Approach to Pollution Mechanisms of the Foundation of One Sulphuric Acid Storehouse [J]. Mineral Exploration, 2003, 6 (5): 37 – 39.
- [31] 边汉亮. 基于电学热学参数的有机物污染场地工程特性评价方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
BIAN Han-liang. Research on Evaluation Method of Engineering Characteristics of Organic Contaminated Sites Based on Electrical and Thermal Parameters [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.