

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0030

JIN Doudou, ZHANG Ze, FENG Wenjie, et al. Experimental study on the influence of electric potential gradient on the electroosmosis effect of frozen loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4):1083-1091. [金豆豆, 张泽, 冯文杰, 等. 电势梯度对冻结黄土电渗效果影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4):1083-1091.]

## 电势梯度对冻结黄土电渗效果影响的试验研究

金豆豆<sup>1,3</sup>, 张泽<sup>1,2,4</sup>, 冯文杰<sup>1</sup>, 王金国<sup>5</sup>, 岳攀<sup>5</sup>, 杨曙光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000; 2. 东北林业大学 土木工程学院/寒区科学与工程学院, 哈尔滨 黑龙江 150040; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 东北多年冻土区地质环境系统教育部野外科学观测研究站(东北林业大学)/东北多年冻土区环境、道路建设与养护协同创新中心(东北林业大学), 哈尔滨 黑龙江 150040; 5. 雅砻江水电开发有限公司, 四川成都 610051)

**摘要:** 研究发现, 通电作用下冻土中的未冻水会发生迁移, 这种持续的迁移是一个复杂的物理化学过程, 并最终伴随着冻胀的过程。为了探究这一电场作用对冻土的影响, 选取冻结冻胀敏感性较高的粉质兰州黄土作为研究对象, 分析其在3、4和5 V·cm<sup>-1</sup>电势梯度作用下的阴阳极变形量、通电前后水分分布规律和电流及电能损耗。结果表明: 随着电势梯度的增大, 土体阴阳极变形量的差值逐渐增大, 且阴极都发生膨胀, 阳极发生沉降; 随着电势梯度的增大, 水分由阳极至阴极的迁移量增大, 电流降低的幅度增大, 两者变化特征与含水率差值变化特征类似; 在5 V·cm<sup>-1</sup>的电势梯度下, 电能总能耗最大, 单位含水率能耗最小。

**关键词:** 冻土; 电渗; 电势梯度; 冻胀; 水分迁移

**中图分类号:** P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)04-1083-09

### 0 引言

土壤冻结过程中, 水分向冻结锋面迁移并发生相变, 当土壤中某些部位含水(冰)量超过了其原始孔隙体积时, 会发生冻胀现象<sup>[1]</sup>。冻胀是引起寒区工程病害的主要因素之一, 可导致道路变形、输水渠道渗漏、建筑物基础破坏以及天然气管道翘曲等等<sup>[2-5]</sup>, 治理冻胀问题的基本思路是阻水和换填, 通过切断水源或者改变土性治理冻胀灾害, 但已建工程中发生冻胀灾害后, 上述的施工难度将大大增加。

由于土颗粒大多带负电, 且土中的水极易与溶解物质结合形成水化阳离子, 在外加电场作用下, 水流会向电势低处迁移, 此现象称为电渗<sup>[6]</sup>。电渗法即通过施加电场排出土中多余水分从而达到

到加固地基的目的, 在加固软土地基方面应用较多。大量学者试验研究电场电极类型、含水率、通电方式等如何影响电渗排水效果<sup>[7-12]</sup>; Tang等<sup>[13]</sup>从工程实际出发研究了温度对海洋土壤电渗脱水的影响, 发现温度升高时土壤电导率增大; Vakili等<sup>[14]</sup>发现电渗处理显著提高了经历多次冻融泥灰岩的承载能力。融土电渗试验一般在阴极设置透水板, 流向阴极的水分可直接流出土体; 研究者们将真空预压<sup>[15]</sup>、土中添加盐溶液<sup>[16]</sup>或化学剂<sup>[17-18]</sup>等方法与电渗法结合进一步提高软土加固效果。如果利用电场作用与冻土之上, 从而达到将水分迁移走的目的, 是否可以有效的缓解或者治理冻胀灾害?

由于冻土中始终存在一定数量未冻水, 对冻土试样加上电场后, 孔隙未冻水也会发生迁移, 在阴

收稿日期: 2021-03-14; 修订日期: 2021-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771078; 41871061); 国家自然科学基金委员会(NSFC)与俄罗斯基础研究基金会(RFBR)合作基金项目(42011530083); 雅砻江流域水电开发有限公司科学技术项目(YLLHK-LHA-2019006); 中国地质调查局发展研究中心《找矿哲学研究》项目(D219043); Совместный конкурс фундаментальных проектов РФФИ-ГФЕН(《ГФЕН\_a》-20-55-53006) [俄罗斯基础科学基金委员会-中国国家自然科学基金委员会合作基金项目(《ГФЕН\_a》-20-55-53006)]资助

作者简介: 金豆豆, 硕士研究生, 主要从事冻土工程研究. E-mail: jidoudou@163.com

通信作者: 张泽, 教授, 主要从事冻土工程与环境研究. E-mail: zez@nefu.edu.cn

极处会产生冻胀。研究发现:土壤的成分、性质、结构和环境温度等均可通过影响冻土中未冻水含量改变冻土电渗效果<sup>[19]</sup>。对不同冻土试样通电24小时,发现阴阳极含水率发生变化,明确电场作用下冻土中确实存在水分迁移<sup>[20]</sup>,但电势梯度与冻土水分迁移量及变形量之间存在何种关系尚未知晓。研究发现:粉粒(0.01~0.05 mm)含量较高的土其冻胀敏感性较强,在有水源补充的情况下比一般的砂性或黏性土冻胀量都大。黄土(或黄土状土)由于其粉粒级含量较高(可达到60%~70%),经常在其分布地区出现冻胀灾害过程<sup>[21]</sup>。因此,为进一步加深对冻土电渗过程的了解,本文选取冻胀敏感性较高的黄土作为研究对象,考虑到黄土的冻结温度为 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右且目前冻土电渗试验温度主要集中在 $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间<sup>[19-20]</sup>,由于高温冻土的稳定性和相变过程比较复杂,本文选用 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下分别观测电势梯度为 $3\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $4\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $5\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 情况下冻结黄土阴阳极变形量的变化,分析其通电后土样的含水量分布规律,期望进一步了解电场作用下冻土中水分迁移的规律及机理,为后续正冻土电渗试验以及野外实际应用等提供参考。

## 1 土样及试验设计

### 1.1 土样

试验黄土取自甘肃兰州市区兰山附近边坡(北纬 $35^{\circ}57'$ 、东经 $103^{\circ}53'$ ),海拔1600 m。将土样过2 mm筛,按照《土工试验方法标准》<sup>[22]</sup>利用液塑限联合测定仪进行液塑限测试,土样液限为23.3%,塑限为13.87%,塑性指数 $I_p=9.43$ 。土颗粒粒径使用全自动激光粒度分析仪测定,级配曲线见图1。为

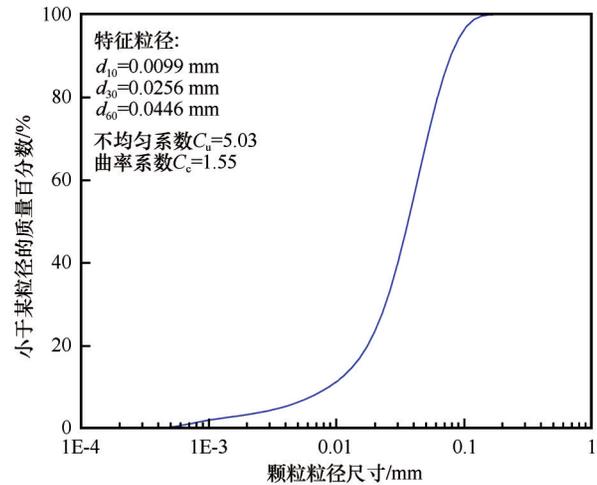


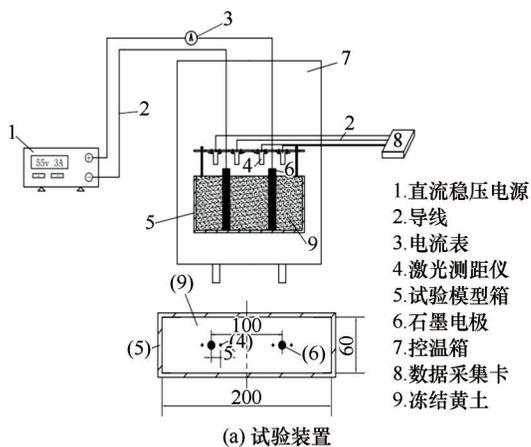
图1 颗粒级配半对数累计曲线

Fig. 1 The grain size distribution semi-logarithmic curve of soil sample

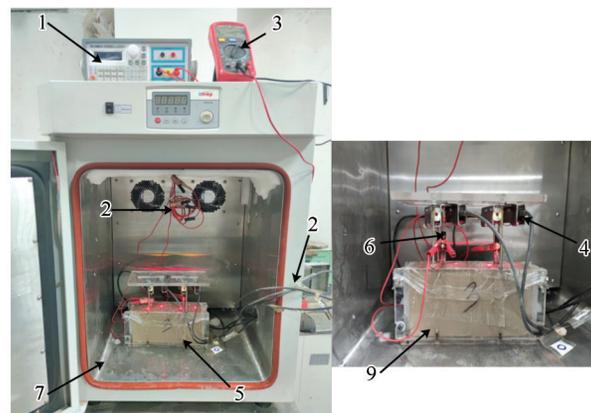
尽量避免水中离子对试验结果的影响,试验中均采用离子含量可忽略的I级纯水。

### 1.2 试验装置

试验装置如图2所示,控温箱(7)为Xutemp高低温交变式(控温范围为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度误差 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),用于对土样环境进行控温;试验模型箱(5)为有机玻璃保温材质,其内部尺寸为 $200\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ,模型箱上部支架用于固定激光测距仪[图2(b)];电源(1)采用直流稳压电源,最大输出值为 $60\text{ V}/3\text{ A}$ ;试验选用SENSOPATRT FT25激光测距仪(4)实时测量阴阳极变形量,激光测距仪连接MC usb1608G数据采集仪(8)记录变形量;电流表(3)采用UNI-T UT39C,电流测量精度为1 mA;试验电极(6)为石墨材质,长150 mm,直径为8 mm。



(a) 试验装置



(b) 试验照片

图2 变形量测量装置图(单位:mm)

Fig. 2 Deformation measurement device diagram (unit: mm)

### 1.3 试验内容及步骤

分别在 30, 40 和 50 V 稳压下对冻结黄土进行通电试验, 实时监测其阴阳极变形量; 3 种电压下的电势梯度分别为 3, 4 和 5  $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 当变形量变化稳定后试验终止。

具体试验步骤如下:

(1) 取适量原状土和水, 用电动搅拌机充分搅拌均匀, 制成重塑土样, 静置一昼夜后测量重塑土样含水率; (2) 取土样分层装入试验模型箱, 将电极润湿插入黄土试样, 样品密封后将试验模型箱放置到  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  控温箱中, 安装激光测距仪, 冻结 24 小时确保土样完全冻结; (3) 取出冻结黄土, 拆除盖板, 将冻胀高出试验模型箱的部分磨平后再次密封放入温度  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  的试验箱中; (4) 再次安装导线, 打开激光位移计; 调节电源输出到所需电压, 接通电路; (5) 通电结束, 停止试验, 断开电源; (6) 拆除装置; 取出试验土样, 均匀分层测量试样含水率。

表 1 试验条件汇总表

Table 1 Summary of test conditions

电源电压/V	电势梯度/ $(\text{V}\cdot\text{cm}^{-1})$	电极材料	初始含水量/%
30	3	石墨	26.7
40	4		
50	5		

### 1.4 含水率测点布置

为了验证电场作用下冻土中的水分迁移规律, 对通电前后土样按阴阳极距离被切为 6 等份, 每层按图 3 方式切块进行含水率测量, 总计 54 个含水率测点, 将每层土取得的 9 个含水率取平均值作为该层含水率值。含水率变化分析时将土样按电极间距分为两部分, 阴极所在截面称为阴极, 阳极所在区域称为阳极区, 则含水率区差值为阴极区含水率减去阳极区含水率。

## 2 试验结果及分析

试验结果参照常規融土电渗试验研究<sup>[7]</sup>的分析方法, 对电渗效果的描述主要从排水量、排水速率、电渗后土体含水量的分布、能耗等方面展开。本文将从土体阴阳极变形量、通电前后含水量分布、电流变化以及电能消耗三个方面讨论电场对冻土的影响。

### 2.1 变形量

图 4 与图 5 分别为土样通电前初始冻胀量随时间的变化曲线和土样电场有效变形量随时间的变化曲线。由图 4 可以看出, 土体在  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  状态下初始(未通电)冻结 5 h 左右冻胀量不再发生变化, 初始稳定冻胀量为 2 mm。

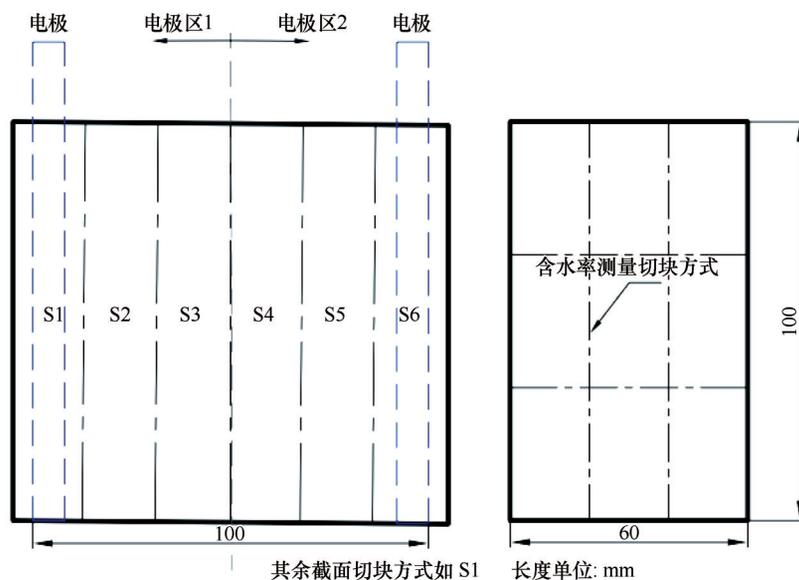


图 3 含水率测量布置图

Fig. 3 Water content measurement chart

由图 5 可知, 在电场梯度作用下土样阴极变形量始终均为正值, 即阴极处发生膨胀, 其中土样通电 15 天后  $3\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  的电势梯度下阴极膨胀量最大,

为 1.383 mm;  $4\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  次之, 为 0.356 mm,  $5\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  电势梯度作用下膨胀量最小为 0.111 mm。在电势梯度作用下土样阳极变形量始终均为负值, 即阳极

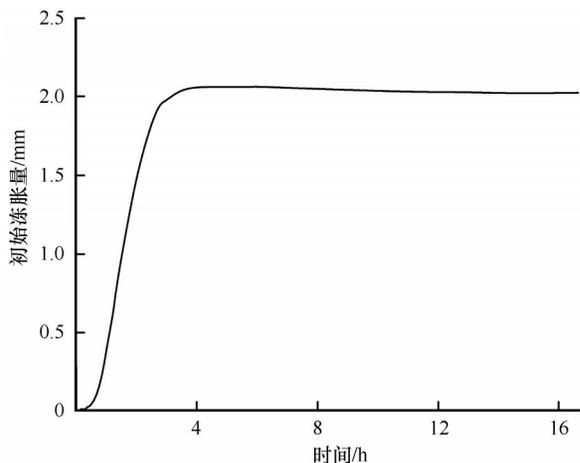


图4 初始冻胀量随时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of initial frost heave with time

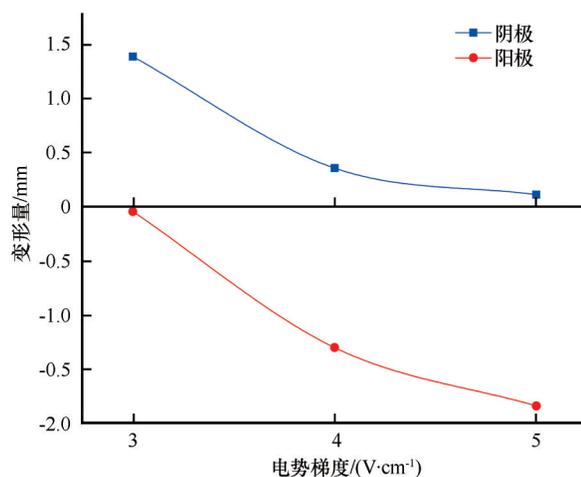


图6 变形量对比图

Fig. 6 Comparison chart of deformation

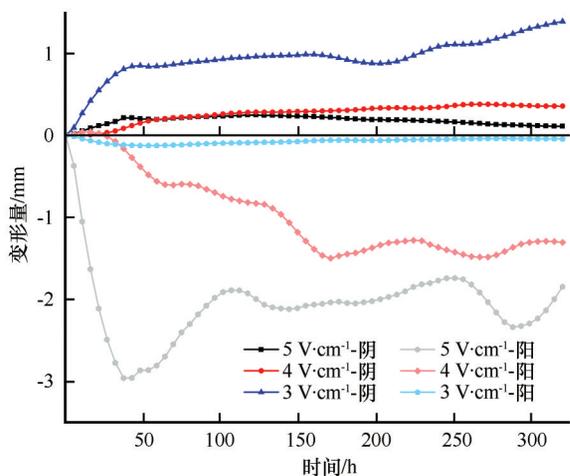


图5 电场有效变形量随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of effective electric field deformation with time

处发生沉降,其最终变形量大小排序则与阴极正好相反,在  $5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  的电势梯度下阳极沉降量最大,为  $1.888 \text{ mm}$ ,  $4 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  次之,为  $1.301 \text{ mm}$ ,  $3 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  电势梯度作用下阳极沉降量最小,为  $0.045 \text{ mm}$ 。

将不同电势梯度下土样阴阳极最终变形量汇总成图6。我们可以发现,土样阴极变形量随电势梯度增大而减小,而土样阳极沉降量则随电势梯度的增大而增大;通电15天后  $3 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  电势梯度下存在土样阳极沉降量约等于零,而阴极膨胀量较大。 $5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  电势梯度下的最终变形量与  $3 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  电势梯度下的情况相反。

2.2 含水量分布

为了探究不同电势梯度对冻土电渗效果的影响,试验结束按图3方式对试验后冻土试样均匀分层切块得到土体分层含水率,由于土样未通电初始

冻胀过程中碳棒与土样导热系数不同,使得水分向碳棒及四周迁移,水分不再均匀分布,此时测得含水率值由初始冻胀与电场双重作用共同产生。为排除初始冻胀过程中水分迁移对试验结果的影响,进行补充试验:对相同含水率融土进行不通电初始冻胀,24 h后测定土样含水率分布。则实际电场产生的含水率变化可由双重作用下含水率值减去补充试验含水率值表示,图7所示为含水率变化值及双重作用下最终含水率值。

由双重作用后各层含水率值可以看出,试验结束水分主要集中在两电极附近,在  $4 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  及  $5 \text{ V} \cdot$

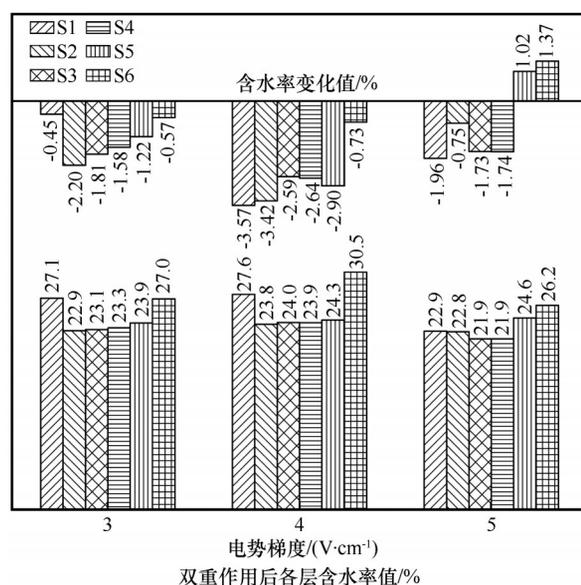


图7 含水率汇总图(S1为阳极,S2~S5为中间土体,S6为阴极)

Fig. 7 Summary diagram of water content (S1 is the anode, S2~S5 is the middle soil, S6 is the cathode)

$\text{cm}^{-1}$ 电势梯度下阴极处含水率明显高于阳极处含水率,即存在水分由阳极处迁至阴极处。含水率变化值直观反映电场对冻土中水分迁移的作用,由图7可以看出, $3 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 电势梯度下土样阴阳极含水率变化值差别不大,但其余部分含水率变化值从阳到阴呈线性递增;电场作用下除  $5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 电势梯度下阴极处含水率为正值,其余含水率均为负值,这可能是由于电场作用过程中不仅存在水分迁移,而且存在复杂的化学反应等消耗水分,其次考虑实验过程中样品密封性不足所导致的水分损耗。

为更加直观看出电势梯度与水分迁移量的关系,本文作出含水率区差值随电势梯度的变化曲线,如图8所示。

由图8可知,含水率变化值基本为负值,即土样通电结束后含水率相比初始冻胀后整体呈下降趋势,而含水率区差值均为正值且随电势梯度的增大而增大,证明电场作用下部分水分由阳极区迁移至阴极区。

通电前后土体中心剖面含水率分布如图9所示,纵坐标为土样高度,高度为0 cm代表此平面为土样底面。在未通电初始冻胀过程中,由于土样表面及石磨电极温度首先降低土壤中水分由温度高

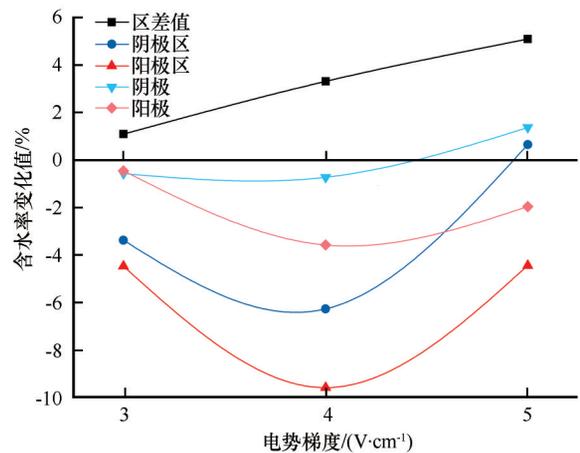


图8 土样含水率变化汇总表

Fig. 8 Summary of changes in soil moisture content

处向温度低处迁移,使得水分积聚在电极附近,而土样中部水分向电极及土样上下表面迁移,造成如图9(a)所示水分分布图。 $3 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 电势梯度下,阴阳极含水率分布大致相同,而随着电势梯度的增大,阳极含水率逐渐减少,阴极含水率逐渐增大。由于水分的迁移造成样品含水量“中空”效应,与初始的含水量相比,土样中部的含水量减少了大约5%左右。观察中空部分的含水量分布发现都具有“哑铃状”形态,而持续通电可能会使水分持续向阴极迁移从而改善“中空”效应。

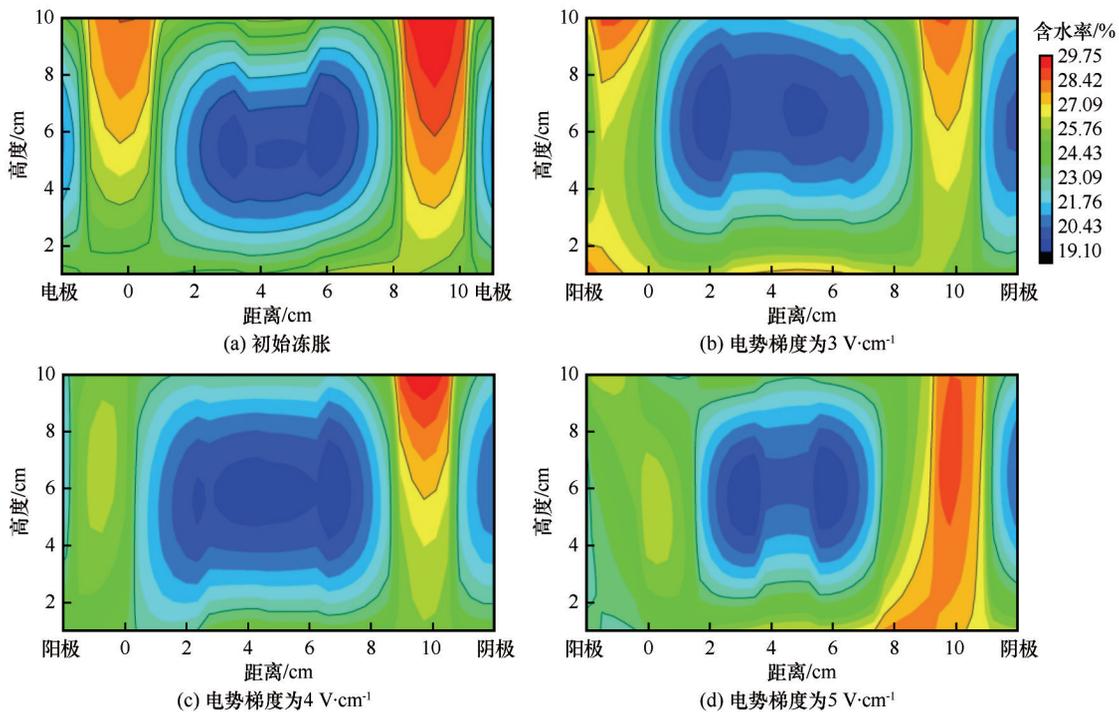


图9 通电前后土体含水率分布

Fig. 9 Distribution of soil moisture content before and after electrification

### 2.3 电流及电能损耗

图 10 为通电过程中电流随时间的变化趋势。可以看出 3 条曲线整体呈下降趋势,初始状态下电势梯度越大电流也越大。在  $3 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  电势梯度下,电流随着时间的变化幅度不大,且试验结束时电流值最大; $5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  电势梯度下电流值表现出下降稳定再下降稳定的规律;电流随着时间变化的幅度大小为  $5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1} > 4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1} > 3 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,此与含水率区差值随电势梯度的增大而增大的特征类似。

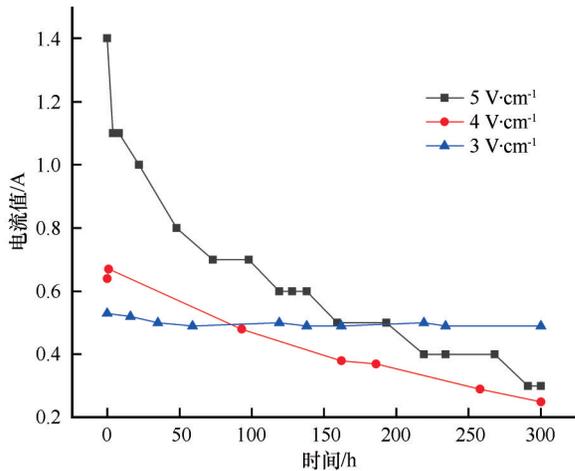


图 10 电流随时间的变化曲线  
Fig. 10 Variation of current with time

经济适用性是电法能否实际应用的重要因素,能耗越高费用越昂贵。本文作为电场作用下冻土中水分迁移的机理研究,考虑水分迁移量与能耗的关系期望为后续野外试验提供参考。因此本文进一步计算了各试验的总能耗和单位含水率(区差值)能耗,计算式分别如下:

总能耗为

$$W = \int_0^T uidt \quad (1)$$

则单位含水率能耗为

$$w = W/Q \quad (2)$$

式中:  $T$  为通电时间;  $u$  为电源输出电压,本试验中  $u$  分别为 30、40 和 50 V;  $i$  为电路中的电流;  $Q$  为含水率阴阳极区差值。本试验  $u$  为恒定值,电流值和通电时间已知,则可计算得到不同电势梯度作用下电能总能耗与单位含水率能耗,如图 11 所示。

由图 11 可知,黄土在液限含水率下通电 320 h 时  $4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  的电势梯度总能耗最小,  $3 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  次之,  $5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  最大,而单位含水率能耗则  $5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$  电势梯度下最小。

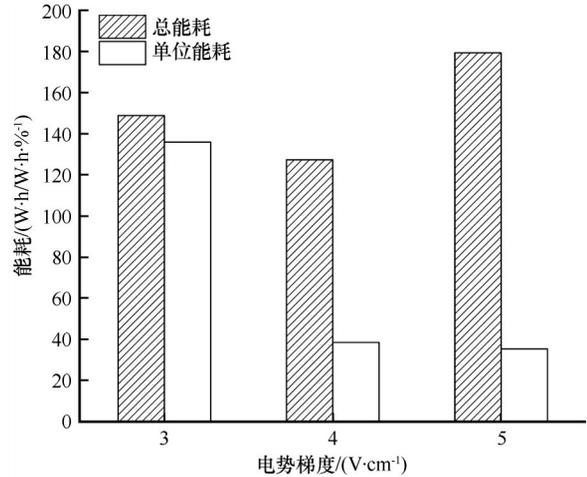


图 11 总能耗及单位能耗柱状图

Fig. 11 Histogram of total consumed energy and energy unit content

### 3 讨论

已往电渗试验的研究关注点主要是集中在融土,特别是软土<sup>[6-11]</sup>,而对于冻土通电后会产生什么样的反应关注较少。

若在理想环境中,即忽略水分损耗的情况下,当冻土中存在电势差时,电渗力使得弱结合水中水化阳离子摆脱土颗粒表面静电场作用向电势低处迁移,水化阳离子周围的未冻水吸引残留水也向这一方向移动,如图 12 所示。此时已冻土中已有的固液平衡被破坏,为维持土体固液平衡,阳极区部分冰变成水补充水的损耗,而迁移至阴极的水分在阴极似乎是多余的,因此阴极区高于平衡状态的未冻水变成了冰,使得阴极产生冻胀。

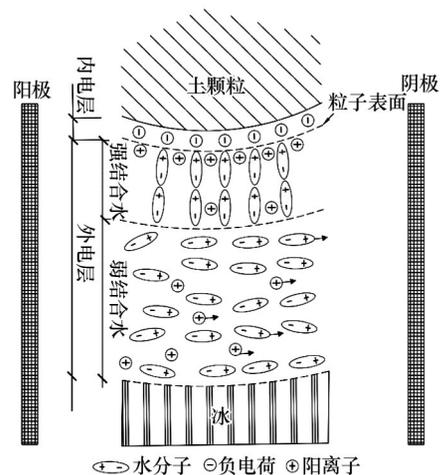


图 12 电场作用下冻土水分迁移机理微观示意图

Fig. 12 Microscopic schematic diagram of water migration mechanism of frozen soil under electric field

事实上,在整个电渗过程中,通常伴随着水的电解、石墨电极失能等化学现象<sup>[6,23]</sup>使得实际结果与理想状态相差甚远。本文采用兰州黄土试验对比不同电势梯度对冻土电渗结果的影响,试验发现含水率区差值、电流值差值及土体阴阳极变形量差值随电势梯度的增加而增加(图13),差值是指试验结束时土体的阴极特征值减去土体阳极特征值。含水率区差值反映冻土中电场作用水分迁移量的

大小,即随着电势梯度的增加冻土中由于电场产生的水分迁移量越大。冻土中含水率变化在一定程度上决定土体的变形情况,由图13(c)可知,土体变形量差值也随着电势梯度的增大而增大,与含水率区差值表现出相似的变化规律。融土电渗试验中电流值随时间发生变化主要是由于金属电极钝化及水分被排出<sup>[7]</sup>使得土体电阻率增大或电极部分与土体脱离。

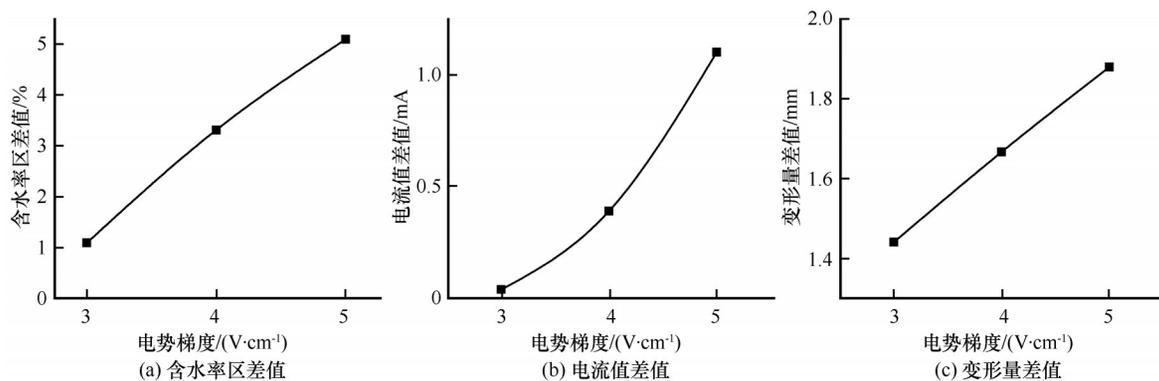


图13 总变化汇总图

Fig. 13 Summary of each changes

冻结黄土通电过程中电流减小的原因主要是:

1) 土体中水分发生迁移,改变土体原有的导电通道,阳极区含水率降低,电阻率增大;2) 在通电过程中,与电极接触部分产生水的电解或电能转换为热能从而消耗掉一部分水,使得接触部分含水率降低,电阻率增大。而当电势梯度增大时,上述原因均会增强,使得电流值降低幅度变大。

#### 4 结论

对冻结黄土进行不同电势梯度下电渗试验研究,并从变形量、含水率、电流及电能损耗等三方面进行了对比分析,得出以下结论:

(1) 在 $3\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $4\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 及 $5\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 电势梯度下通电320 h后土样阴极均发生膨胀,阳极均发生沉降;且阴极处的膨胀量随电势梯度的增大而减小,阳极处的沉降量随电势梯度的增大而增大。

(2) 在不同电势梯度作用下,土体中的水分发生重分布;随着电势梯度的增大,水分由阳极区至阴极区的迁移量随之增大,

(3) 电流值随时间延长而减小,电势梯度越大电流降低的幅度越大; $5\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 电势梯度下电能总能耗最大,单位含水率能耗最小。

#### 参考文献(References):

- [1] Xu Xuezu, Deng Yousheng. Experimental research on water migration in frozen soil [M]. Beijing: Science Press, 1991. [徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [2] He Pengfei, Ma Wei. Study of canals in cold regions of China: achievements and prospects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 182-194. [何鹏飞, 马巍. 我国寒区输水工程研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 182-194.]
- [3] Liu Yong. Analysis on relationship between frost depth and track deformation for Harbin-Dalin High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2016(10): 79-82. [刘勇. 哈大高铁轨道变形与路基冻结深度的关系[J]. 铁道建筑, 2016(10): 79-82.]
- [4] Li Xianming, Niu Fujun, Liu Hua, et al. Characteristics and engineering significance of frost heaving in subgrade of Harbin-Dalian High-Speed Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 55-61. [李先明, 牛富俊, 刘华, 等. 哈大高铁路基面冻胀变形特征及工程意义[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 55-61.]
- [5] Huang Long, Sheng Yu, Hu Xiaoying, et al. Interactions between the pipeline and soils in permafrost regions: a review [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 112-122. [黄龙, 盛煜, 胡晓莹, 等. 冻土区管土相互作用研究综述[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 112-122.]
- [6] Cao Yonghua, Gao Zhiyi, Liu Aiming. Characteristics and development of electro-osmotic treatment for ground improvement [J]. Port & Waterway Engineering, 2008(4): 92-95. [曹永华, 高志义, 刘爱民. 地基处理的电渗法及其进展[J]. 水运工程, 2008(4): 92-95.]
- [7] Tao Yanli, Zhou Jian, Gong Xiaonan, et al. Comparative ex-

- periment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(2): 388-394. [陶燕丽, 周建, 龚晓南, 等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(2): 388-394.]
- [8] Jiao Jun. Experimental and theoretic study on electro-osmosis drainage and consolidation of soft clay [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013. [矫军. 软黏土电渗排水固结试验与理论研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.]
- [9] 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. [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.]
- [10] Fan Yichao, Chen Panhao. Influence of potential gradient on electro-osmosis method dispose [J]. *Build Technology*, 2019, 3(2): 40-42. [范一超, 陈潘浩. 电势梯度对电渗法处理效果影响探析[J]. *建筑科技*, 2019, 3(2): 40-42.]
- [11] Wang Ningwei, Jiao Jun, Xiu Yanji, et al. Effect of electrode spacing on standard electro-osmotic dewatering [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(Suppl 1): 177-181. [王宁伟, 矫军, 修彦吉, 等. 电极距对水平电渗排水影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(增刊1): 177-181.]
- [12] Wang Li. Primary studies on the mechanism of electro-osmosis in saturated soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. [王立. 饱和土体电渗机理及基本理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.]
- [13] Tang X, Xue Z, Yang Q, et al. Water content and shear strength evaluation of marine soil after electro-osmosis experiments [J]. *Drying Technology*, 2017, 35(14): 1696-1710.
- [14] Vakili A H, Narimousa R, Salimi M, et al. Effect of freeze-thaw cycles on characteristics of marl soils treated by electroosmosis application [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019: 102861.
- [15] Peng J, Ye H, Alshawabkeh A N. Soil improvement by electroosmotic grouting of saline solutions with vacuum drainage at the cathode [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 114: 53-60.
- [16] Ou C Y, Chien S C, Wang Y G. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions [J]. *Applied Clay Science*, 2009, 44(1/2): 130-136.
- [17] Ou C Y, Chien S C, Lee T Y. Development of a suitable operation procedure for electroosmotic chemical soil improvement [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(6): 993-1000.
- [18] Chien S C, Ou C Y, Lee Y C. A novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement [J]. *Applied Clay Science*, 2010, 50(4): 481-492.
- [19] Yershov. Principles of geocryology [M]. Liu Jingren, trans. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2015. [叶尔绍夫. 冻土学原理[M]. 刘经仁, 译. 兰州大学出版社, 2015.]
- [20] Hoekstra P, Chamberlain E. Electro-osmosis in frozen soil [J]. *Nature*, 1964, 203(4952): 1406-1407.
- [21] Sun Jianzhong. Loess [M]. Hong Kong: Hong Kong Archaeological Society Press, 2005: 19-25. [孙建中. 黄土学[M]. 香港: 香港考古学会出版, 2005: 19-25.]
- [22] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. [中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.]
- [23] Tang Kangwei. Study on the law of moisture migration in unsaturated subgrade soil under electroosmosis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. [唐康为. 电渗作用下非饱和路基土水分迁移规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.]

## Experimental study on the influence of electric potential gradient on the electroosmosis effect of frozen loess

JIN Doudou<sup>1,3</sup>, ZHANG Ze<sup>1,2,4</sup>, FENG Wenjie<sup>1</sup>, WANG Jinguo<sup>5</sup>,  
YUE Pan<sup>5</sup>, YANG Shuguang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering / Institute of Cold Regions Science and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Northeast-China Observatory and Research-Station of Permafrost Geo-Environment-Ministry of Education / Coordinated Innovation Center for Permafrost Environment and Road Construction and Maintenance in Northeast-China, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 5. Yalong River Hydropower Development Company, Chengdu 610051, China)

**Abstract:** Studies have found that unfrozen water in frozen soil will migrate under the action of electrification. This continuous migration is a complex physical and chemical process and is eventually accompanied by a process of frost heave. Laboratory tests of frozen Lanzhou loess were conducted to investigate the electro-osmosis effects of deformation, distribution of water content, current and energy consumed of each test, the following conclusions were drawn. With the increase of the electric potential gradient, the difference between the deformation of the anode and the cathode of the soil gradually increases, and the cathodes both expand and the anodes settle; with the increase of the electric potential gradient, the amount of water migration from the anode to the cathode increasing, the amplitude of current reduction increases, and the change characteristics of the two are similar to the change characteristics of the water content difference; under a potential gradient of  $5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ , the total energy consumption of electric energy is the largest, and the energy consumption per unit of water content is the smallest.

**Key words:** frozen soil; electro-osmosis; potential gradient; frost heave; moisture migration

(责任编辑: 温智; 编辑: 周成林)