

电渗和振动对细尾矿砂静载固结排水的促进作用

林雪松¹, 王东², 陈殿强³, 王来贵⁴

(1. 辽宁工程技术大学理学院, 辽宁阜新123000; 2. 阜新高等专科学校工程系, 辽宁阜新123000;
3. 辽宁有色勘察研究院, 辽宁沈阳110013; 4. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁阜新123000)

摘要: 为研究电渗、振动对细尾矿砂静载固结排水的促进作用, 利用改装的空心圆柱扭剪仪进行试验研究, 分别得到了不同静载压力下, 单独静载、静载联合电渗和静载联合振动作用下的固结排水量。试验结果表明: 随着静载压力的增加, 排水量增加, 排水时间减小。在单独静载基础上增加一种排水措施即会增加排水量且减少排水时间。振动在静载压力较小或固结早期的促进作用较好, 电渗在静载压力较大或固结后期的促进作用较好。频率是影响振动排水的主要因素, 且存在最佳排水频率, 振动排水具有明显的时间优势。电渗排水的影响因素主要为电势梯度和试件导电性, 电势梯度越大排水效果越好。

关键词: 细尾矿砂; 静载; 电渗; 振动; 固结排水

中图分类号: TU411.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0201-05

The promotion effect of electro-osmosis and vibration to static loading consolidation drainage of fine tailings

LIN Xuesong¹, WANG Dong², CHEN Dianqiang³, WANG Laigui⁴

(1. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Department of Engineering, Fuxin Higher Training College, Fuxin 123000, China; 3. Liaoning Nonferrous Exploration and Research Institute, Shenyang 110013, China; 4. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the promotion effect of electro-osmosis and vibration to static loading consolidation drainage of fine tailings, the laboratory tests was carried out by converted hollow cylinder apparatus, the drainage of sole static loading and joint action of static loading with vibration or electro-osmosis were operated separately. The results showed that with increase of static loading pressure, quantity of drainage increased and drainage time decreased. Every new way will get new drainage and reduce drainage time on the basis of sole static loading. The vibration had better effect in time of smaller static loading pressure or early consolidation stage, the electro-osmosis had better effect in time of bigger static loading pressure or later consolidation stage. The frequency is important influence factors of vibration drainage, and there should have the best frequency, the advantage in time of vibration drainage is very obvious. The main influence factors of electro-osmosis drainage are potential gradient and electroconductivity of specimen, the bigger the potential gradient, the better the drainage effect.

Key words: fine tailing; static loading; electro-osmosis; vibration; consolidation drainage

1 研究背景

随着矿物采选技术水平的不断提高, 排入尾矿库的尾矿颗粒日益细化^[1], 固结越来越困难, 若继续沿袭旧方法, 仅依靠自重作用下的静载固结, 将会造成尾矿砂固结程度极差, 更容易发生溃决、污染地下水

等不良后果^[2]。如何加速固结排水是提升细尾矿砂筑坝安全性的一个重要问题。电渗和振动是目前能够促进细粒介质固结排水的主要方法, 前人已对这2种方法分别进行了研究。电渗方面, 1949年 Casagrand^[3]首次将电渗排水法成功运用于铁路挖方工程, 人们第一次认识到电渗法的实际作用, 也开始了

收稿日期: 2019-07-14; 修回日期: 2019-08-11

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC1503102); 国家自然科学基金项目(51474121、51704142); 辽宁省教育厅城市研究院项目(LJCL007); 辽宁省百千万人才项目([2015]33号)

作者简介: 林雪松(1979-), 男, 辽宁丹东人, 博士, 讲师, 主要从事尾矿坝安全中的力学问题研究。

电渗法的理论与实践研究。Esrig^[4]和 Lewis 等^[5]分别提出了一、二维电渗固结理论和控制方程,作为经典电渗固结理论被广泛接受;Guo 等^[6]对高水量且主要成分为伊利石、高岭石和石英的尾矿砂进行了电渗处理;Wu 等^[7-8]针对电极附近介质的微观结构变化以及该变化与电极种类的关系进行了研究;陶燕丽等^[9]通过试验研究了电极不同材质、布置方式对电渗过程与结果的影响;Wang 等^[10]对真空预压与电渗法联合使用的效果进行了研究;张恒等^[11]采用自制电渗试验装置,针对武汉市淤泥质黏土进行电渗试验,探讨了阳极处加入不同浓度氯化钙溶液后,电渗试验的结果会出现何种差别;罗战友等^[12]采用改进的 Miller Soil Box 试验装置,基于杭州淤泥质土,在 3 种不同含水量和含盐量下开展电渗试验,从总电导率和区域电导率 2 个方面分析了土体电导率变化规律和分布特征;王炳文等^[13]采用自制的电渗脱水试验和自然脱水试验装置,进行了全尾砂胶结充填料浆和非胶结充填料浆的脱水试验,并对试验结果进行了总结;张雷等^[14]采用辽宁沿海地区淤泥质软土,对铁、铜、铝和新型复合电极等不同电极材料进行室内电渗排水固结试验,从有效电势、电流、排水量与排水速率、能耗、电渗后土体含水量和承载力等对电渗效果进行了分析。在振动排水方面,房营光等^[15]根据不同排水固结试验的比较,分析了振动排水固结特性及振动排水效应,总结出振动排水的作用机制;丁智等^[16]通过室内动三轴试验系统测试研究了排水条件、固结度、振动次数对软黏土动孔压和应变的影响;苗永红等^[17]利用自主设计的动态固结渗透仪研究了饱和和软土在振动荷载作用下的响应;沈林等^[18]利用饱和粉细砂在持续振动荷载作用下容易液化的特点,进行了振动促进饱和粉细砂快速排水的研究;徐华荣等^[19]基于振动排水固结试验,对镇江地区河漫滩沉

积相软土的动力特性进行了研究,并对该地区软土在动力荷载作用下的排水固结机理进行了解释。

纵观以往的研究,前人在电渗与振动方法促进固结的作用机理、理论模型、与其他方法的结合和工程应用方面进行了大量的研究与探索,成果颇丰,但前人研究中未见到针对同一试验对象,分别进行静载联合电渗和静载联合振动的对比研究。理论上讲,电渗和振动均可促进细尾矿砂的固结排水,但 2 种方法各自的优缺点如何? 分别适用于何种工况? 若能事先搞清楚以上问题或引申出的类似问题,则可使各种方法的实际应用效率实现较大提升。

本文在前人研究的基础上拟利用简单改装的空心圆柱扭剪仪(Hollow Cylinder Apparatus, HCA)研究单独静载、静载联合电渗和静载联合振动作用下细尾矿砂的排水固结效果,并对结果进行比较分析,研究结果能够为多孔介质渗流和新时代下尾矿工程提供参考。

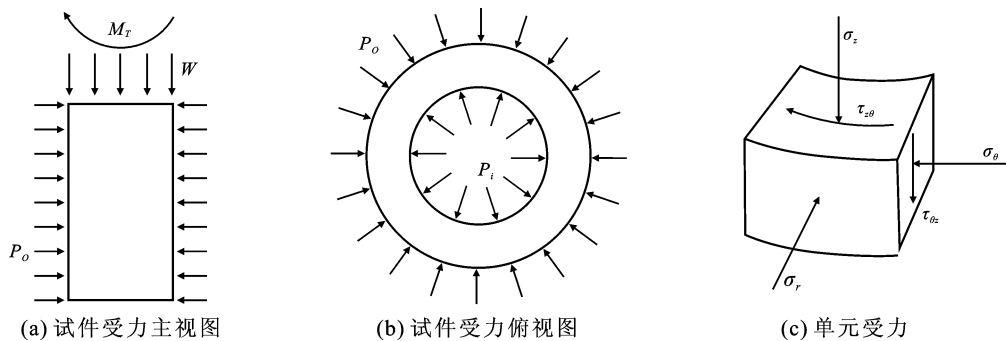
2 试验对象与设备

2.1 试验对象

试验对象为取自阜新市同乃尾矿库的铁尾矿砂,由于主要研究细尾矿砂特性,因此试验对象均取自尾矿库干滩最末端粒径最小颗粒集中区域。对象颗粒组成如表 1 所示,从表 1 中 0.019、0.074 和 0.037 mm 粒径含量可知,试验对象为细尾矿砂^[20-21]。试验中将尾矿砂制成空心圆柱体试件,外半径为 50 mm,内半径为 30 mm,高为 200 mm。试验中试件整体和内部任意单元的受力分别如图 1 所示。

表 1 细尾矿砂粒径组成

粒径范围/ mm	>0.074	0.074 ~ 0.037	0.037 ~ 0.019	0.019 ~ 0.01	<0.01
含量/%	4.31	17.13	25.03	29.37	24.16



注:图中 P_i 和 P_o 分别为作用于试件内、外侧面上的内、外围压,单位 kPa; W 为轴向荷载,单位 kN; M_T 为扭矩,单位 $N \cdot m$;
 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ 和 τ_{zr} 分别为轴向应力、径向应力、转角向应力和示剪应力,单位均为 kPa。

图 1 试件与单元的受力

2.2 试验设备

使用英国 GDS 公司生产的 HCA 进行试验。但试验之前需对设备进行简单改装。改装的主要内容为:在试件上、下底座分别装上电极,并将与电极连接的导线引到压力室外部。装入压力室的试件和导线如图 2 所示。

3 试验目的与内容

3.1 单独静载试验

试验目的在于研究恒定静载下细尾矿砂固结特性,研究结果的主要作用是用来与后续试验进行比较。为考查试验过程的可重复性,每种压力下分别进行 2 次固结试验,在接下来的叙述中,分别标记为静载 1 和静载 2。静载压力分别设置为 50、100、200 和 400 kPa。

3.2 两因素联合作用试验

试验目的:研究单独静载基础上,增加电渗和振动中的一种因素后,排水总量的变化情况。同时,比较电渗和振动两种因素对静载排水的促进作用随静载压力的变化是否会表现出各自的特点。具体的试验内容如下:

(1)静载与电渗联合作用试验。在每种静载设置下,静载与电渗荷载同时施加使试件达到固结稳定。静载压力取值同上。电渗电压分别取为 10、20 和 30 V,以此来研究电渗荷载数值变化对固结排水效果的影响。在接下来的叙述中,静载与电渗电压 10、20 和 30 V 联合作用分别标记为静载 + 10V、静载 + 20 V 和静载 + 30 V。

(2)静载与振动联合作用试验。在某一静载设置下,同时施加静载与振动荷载使试件达到固结稳定。静载压力取值同上。振动荷载的幅值保持 100 N 不变,频率分别取 1、6 和 12 Hz,以此研究频率对联合作用下固结排水效果的影响。在接下来的叙述中,频率为 1、6 和 12 Hz 分别标记为静载 + 1Hz、静载 + 6 Hz 和静载 + 12 Hz。

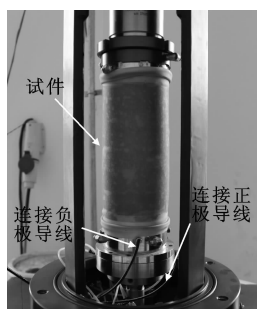


图2 试验装置及试件

4 试验结果与分析

4.1 单独静载结果

试验结果如图 3 所示。由图 3 可知,各种静载设置下 2 次单独静载试验曲线基本重合,试验总体重复性较好。对比各曲线还会发现,随着静载压力的增加,最终排水量在增加,排水总时间在减小。

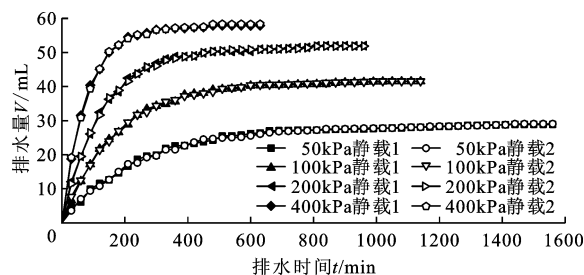


图3 单独静载试验结果

4.2 两因素联合作用结果

两因素联合试验结果如图 4~7 所示。分析各图可知,静载较小的 50 与 100 kPa 作用下,静载 + 电渗的试验曲线初始阶段与单独静载基本一致,但随着时间的推移,经历了一个斜率先增大再减小最后趋于 0 的过程。在静载较大的 200 与 400 kPa 试验中,此种变化过程并未明显存在。接下来从稳定时间和最终排水量两方面分析试验结果。

首先从稳定时间方面来看,相同静载条件下,联合作用均小于单独静载,静载 + 振动小于静载 + 电渗。静载 + 振动和静载 + 电渗在稳定时间方面的差别可从各曲线的变化趋势上看出,从各图中看出,静载 + 振动的曲线短时间内便逐渐趋于稳定,而静载 + 电渗却需在相对较长的时间之后才开始趋于稳定,此现象也可理解为振动可在试验开始后立刻起作用,而电渗则需在固结进行一段时间之后再起作用。联合作用各试验稳定时间随静载压力的增加而减小。在静载 + 振动和静载 + 电渗内部,稳定时间随各自的频率和电压变化不明显。

从最终排水量方面来看,对于静载 + 电渗,最终排水量随电压的增加单调递增,即电压值越大排水效果越好。但静载 + 振动排水量随频率变化并不是单调递增,而是先增加再减小,即频率值并不是越大越好,而是存在一个最佳振动排水频率,频率值大于或小于最佳频率的排水效果均不好。在各种静载压力下,静载 + 振动的最大排水量均出现在静载 + 6 Hz,静载 + 电渗的最大排水量均出现在静载 + 30 V,两因素联合作用下最大排水量的出现状态不随

静载压力的变化而变化。通过对比 2 种荷载组合的最大排水量会发现,总体来看静载 + 振动的最大排水量大于静载 + 电渗,但随着静载压力的增加,二者的差距在缩小,当静载压力为 400 kPa 时,静载 + 30 V 的最终排水量已经赶上了静载 + 6 Hz。通过与图 3 对比可发现:在各静载压力下,联合作用均相比于单独静载在最终排水量方面有所增加,为准确说明排水量增加水平,将联合作用与单独静载作用下的最终排水量差值列于表 2。

分析表 2 可看出,静载 + 振动照比单独静载的提升数值总体上明显大于静载 + 电渗,但从数据变化趋势来看,振动的促进作用随静载的增加大致呈减小的趋势,而电渗的促进作用随静载的增大表现出大致增加的趋势。若仅比较相邻数据,增加或减

小的趋势并不明显,且具有波动与反复。若直接对比 50 和 400 kPa 的数值,则增加或减小的趋势明显。静载 + 1 Hz、静载 + 6 Hz 和静载 + 12 Hz 分别减小了 16.60%、19.95% 和 14.30%。静载 + 10 V、静载 + 20 V 和静载 + 30 V 分别增加了 5.07%、9.42% 和 19.09%。400 kPa 时静载 + 30 V 的排水增加量已经非常接近静载 + 6 Hz,且此时排水量的增量出现了一个突变性的增加。试验结果说明:静载 + 振动虽然对排水促进作用很强,但随着静载压力的提升,其排水优势逐渐减弱,即使在最佳频率值状态也是同样的结果。静载 + 电渗虽然在较小静载压力下促进作用较小,但随着静载压力的提升却未减小,反而在电压较大时会出现较大幅度的增加,可预见若提升电压值则排水量还会继续增加。

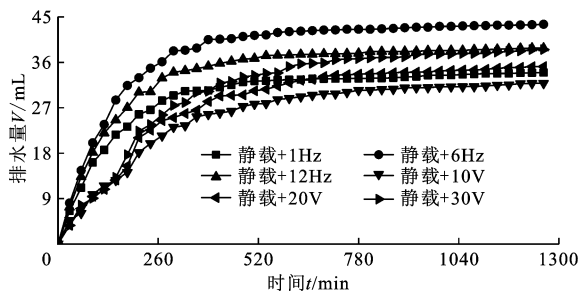


图 4 50 kPa 试验结果

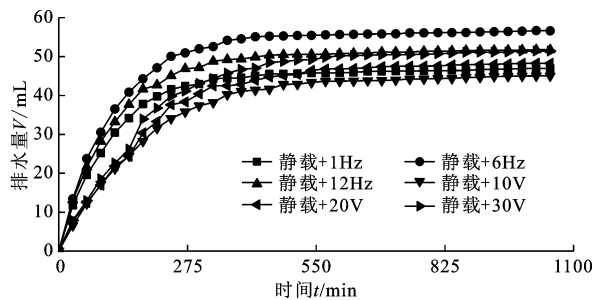


图 5 100 kPa 试验结果

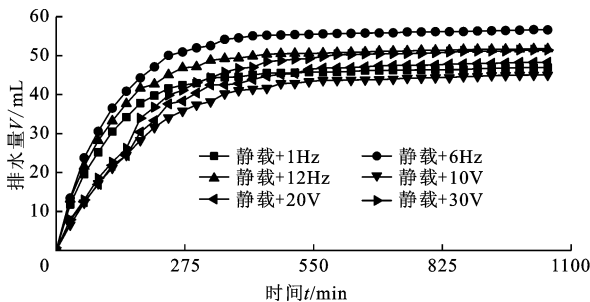


图 6 200 kPa 试验结果

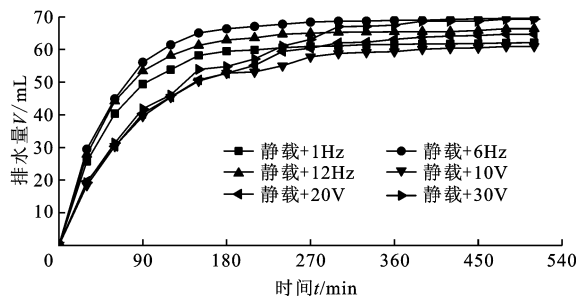


图 7 400 kPa 试验结果

表 2 相对于单独静载的排水增量

静载压 力/kPa	相对于单独静载的排水增量/mL					
	静载 + 1Hz	静载 + 6Hz	静载 + 12Hz	静载 + 10V	静载 + 20V	静载 + 30V
50	5.06	14.64	9.93	2.96	6.26	9.64
100	5.47	15.13	10.28	3.54	6.80	9.96
200	3.76	14.54	9.43	3.20	6.10	9.10
400	4.22	11.72	8.51	3.11	6.85	11.48

5 利用电渗、振动排水机理对试验结果的解释

5.1 电渗、振动的排水机理

(1) 电渗排水机理。电渗对排水的促进作用主

要可从两方面考虑:①从双电层理论来考虑,依靠自由层内的正离子拖拽水分子由正极到负极运动,促进排水。②通过电流热效应促进介质温度的升高,从而降低黏滞系数,提升渗透系数。通过以上两点可判断,若想提升电渗排水作用,应该做到两点,即增加可移动导电离子的浓度和增加有效电势梯度。

(2) 振动排水机理。振动排水的机理可从机械波在介质中传播所产生的作用谈起,振动在介质中传播,主要会产生线性交变振动作用、激波作用、定向作用和空化作用。理论上讲 4 种作用对排水的促进主要表现在 3 个方面:①利用振动步调不同步实现固体和液体的分离,从而减小固体介质对液体渗

流的阻碍作用进而提升渗透系数。②促进孔隙水压力的提升,形成较大的压力梯度和直流定向力,从而促进固结排水。③通过高温高压效应提升介质温度,减小黏滞系数。振动过程若想实现上述3种作用,一个主要前提是介质内部的质点必须能够振动起来,振动的幅度越大振动作用的排水效果会越明显,若某种原因抑制了介质内质点的振动,也就抑制了振动的排水作用。振动和电渗均具有热效应,但通过试验发现,振动作用的热效应并不明显,电渗的热效应明显一些。

5.2 对相关试验现象的解释

在联合作用试验中,静载较小时出现了斜率的变化,由振动和电渗的排水机理可解释为:静载压力较小的状态,电渗的排水作用与静载相比很小,基本可以忽略,因此曲线与单独静载排水基本相同,随着试验的进行,试件体积变小,内部导电离子浓度升高,试件与电极接触紧密,试件导电性增强,电渗排水能力得到提升,弥补了静载排水量的减小,因此曲线斜率出现增加的趋势。但静载较大的状态,试验开始后较短时间内即出现了试件体积的迅速减小和电极与试件的紧密接触,因此没有出现斜率的变化过程。

纵观所有联合作用试验结果,可概括出一个基本趋势为:静载压力越大,振动排水的作用便会减弱,电渗排水的优势便会凸显出来。比如前述振动与电渗的最大排水量差值随静载压力的增加而减小。该趋势出现的原因可从振动和电渗的排水机理方面来进行解释。原因为:随着静载的增加和固结的进行,试件密度越来越大,颗粒之间的作用越来越强,内部质元振动起来越来越困难,则固体和液体分离也越来越困难,因此振动荷载对排水的促进作用会越来越弱。但随着静载的增加和固结的进行,试件体积变小,导电离子的浓度变高,电极与试件的结合变得紧密,整个回路的导电能力得到了加强,因此电渗的作用开始变得明显。

6 结 论

(1)联合作用中,在静载的基础上增加排水因素进行组合排水时,若增加振动和电渗中的一种总排水量一定有所增加,同时固结稳定的时间也会减少,在静载较小状态,振动对静载排水的促进作用优于电渗,但随着静载的增加,电渗对静载排水的促进作用会赶上甚至超过振动。

(2)频率是振动排水的主要影响因素,频率值

越接近最佳频率排水量越大。电渗排水的影响因素为电势梯度,作用于试件内部的有效电势梯度越大排水量越大。在静载压力较小或是固结的初始阶段,振动排水效果比较明显,但静水压力较大或是固结后期,介质密度变大,内部质点振动困难,此时电渗排水效果较好。

参考文献:

- [1] 林雪松,陈殿强,王来贵,等. 细尾矿砂破坏准则的测试与安全影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(11): 48-53.
- [2] 王钰,强怡星,杨海瑞. 基于 Visual MODFLOW 的某尾矿库地下水污染模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 93-99.
- [3] CASAGRANDE L. Electroosmosis in soils[J]. Geotechnique, 1949, 1(3): 159-177.
- [4] ESRIG M I. Pore pressure, consolidation and electrokinetics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(4): 899-922.
- [5] LEWIS W R, HUMPHESON C. Numerical analysis of electroosmotic flow in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(8): 603-616.
- [6] GUO Y, SHANE J Q. A study on electrokinetic dewatering of oil sands tailing[J]. Environmental Geotechnics, 2014, 1(2): 121-134.
- [7] WU H, HU L. Microfabric change of electro-osmotic stabilized bentonite[J]. Applied Clay Science, 2014, 101: 503-509.
- [8] WU H, HU L, ZHANG G. Effects of electro-osmotic on the physical and chemical properties of bentonite[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(8): 06016010.
- [9] 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.
- [10] WANG J, MA J, LIU F, et al. Experimental study on the improvement of marine clay slurry by electroosmosis-vacuum preloading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(4): 615-622.
- [11] 张恒,马勤国,胡赫,等. 使用氯化钙溶液加固淤泥质黏土的电渗试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 119-125.
- [12] 罗战友,陶燕丽,周建,等. 杭州淤泥质土的电渗电导率特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3222-3228.
- [13] 王炳文,李全明,高利晶,等. 全尾砂充填料浆电渗脱水固结试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3163-3170.

(下转第211页)

- transfer and deformation in fractured porous rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(4): 429-442.
- [3] 刘波, 金爱兵, 高永涛, 等. 基于 Morris 法的单裂隙岩体温度场参数灵敏度分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 152-157.
- [4] 龙伟, 童富果, 李彪. 裂隙岩体水-岩耦合传热研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(3): 28-31.
- [5] 陈桂义, 张登春, 邹声华, 等. 裂隙水作用下巷道围岩体温度场的数值模拟[J]. 矿业工程研究, 2014, 29(2): 24-28.
- [6] 郑鑫, 郭春, 徐建峰. 单裂隙岩体的热流固耦合数值模拟与分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 1263-1268.
- [7] 胡剑, 苏正, 吴能友, 等. 增强型地热系统热流耦合水岩温度场分析[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1391-1398.
- [8] 许增光, 杨荣, 柴军瑞. 考虑岩体与裂隙水流热量交换作用的温度场有限元数值分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 69-72+78.
- [9] 高俊义, 项彦勇. 裂隙岩体交叉水流-传热对温度影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2): 598-604.
- [10] 路威, 秦景, 朱俊臣. 裂隙岩体水流-传热模型的理论计算和参数分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1396-1401+1420.
- [11] 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 等. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学报, 2018, 39(5): 523-532.
- [12] 汪新伟, 王婷灏, 张瑄, 等. 太原盆地西温庄地热田的成因机制[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 1042-1056.
- [13] 雷晓东, 胡圣标, 李娟, 等. 北京平原区西北部大地热流与深部地温分布特征[J]. 地球物理学报, 2018, 61(9): 3735-3748.
- [14] 刘长吉, 陈建生, 白兰兰, 等. 裂隙岩体地区导热-对流型温度场垂向渗透系数的计算及分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 780-786.
- [15] 唐志伟, 米倡华, 张学峰, 等. 增强型地热系统热流固耦合数值模拟与分析[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(10): 1560-1564.
- [16] 李馨馨, 李典庆, 徐轶. 地热对井系统裂隙岩体三维渗流传热耦合的等效模拟方法[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 238-247.
- [17] 张伟, 孙江, 曲占庆. 高温地热开采热流固耦合模型及综合评价方法[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 668-675.
- [18] 方艺蛟, 刘卫群, 王墨龙. 地热开采的裂隙渗透 T-H-M 耦合模型及模拟研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(1): 119-125.

(上接第 205 页)

- [14] 张雷, 王宁伟, 景立平, 等. 电渗排水固结中电极材料的对比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 1-11.
- [15] 房营光, 朱忠伟, 莫海鸿, 等. 碱渣土的振动排水固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 43-47.
- [16] 丁智, 张涛, 魏新江, 等. 排水条件对不同固结度软黏土动力特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 893-899.
- [17] 苗永红, 李瑞兵, 陈邦. 软土的振动排水固结特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1301-1306.
- [18] 沈林, 刘成彬, 吴国强. 振动液化排水技术在地基处理工程中的应用[J]. 施工技术, 2018, 47(增): 172-174.
- [19] 徐华荣, 刘刚. 基于振动排水固结试验的软土动力特性研究[J]. 城市勘测, 2019(2): 196-198+203.
- [20] 林雪松, 陈殿强, 王来贵. 尾矿砂二维非饱和渗流的实验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3): 435-441.
- [21] 林雪松, 陈殿强, 王来贵. 非饱和尾矿砂抗剪强度参数分布与安全影响[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(4): 116-121.