

DOI: 10.11779/CJGE2020S1048

压实度和含水率对非饱和土导热系数的影响

徐 洁^{1, 2}, 胡海涛^{1, 2}, 郑 植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 210029; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 土体的导热系数是地下空间结合地热能开发等岩土工程重要的热物理参数。现场土往往处于非饱和状态, 研究其导热性能有重要工程价值。采用瞬态法测量了不同压实度和含水率下非饱和石英砂、石英粉和高岭土的导热系数, 研究这3种非饱和土体的导热系数与含水率和干密度的关系。研究结果表明, 在相同压实度下, 石英砂、石英粉和高岭土的导热系数在临界含水率之前随着含水率的增加而快速增加, 之后增势变缓趋于稳定; 临界含水率从大到小依次为: 高岭土、石英粉、石英砂; 在相同压实度和含水率下, 石英砂的导热系数最大, 石英粉次之, 高岭土最小; 相同含水率时, 3种土体的导热系数均随干密度的增加而线性增加。

关键词: 非饱和土; 导热系数; 压实度; 含水率

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0244-05

作者简介: 徐洁(1982—), 女, 副教授, 主要从事非饱和土力学、能源岩土工程等方面的研究工作。E-mail: cexujie@163.com。

Effects of compaction and water content on thermal conductivity of unsaturated soils

XU Jie^{1, 2}, HU Hai-tao^{1, 2}, ZHENG Zhi²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210029, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210029, China)

Abstract: The thermal conductivity of soils is an important thermal physical parameter for geotechnical engineering such as underground space and geothermal development. Field soils are generally under unsaturated state, and studying on the thermal conductivities of unsaturated soils has important engineering value. The thermal conductivities of quartz sand, quartz powder and kaolin clay under different degrees of compaction and different water contents are measured by using the transient state method, and the relationships between thermal conductivities of the three unsaturated soils with water content and dry density are studied. The results show that under the same degree of compaction, the thermal conductivities of quartz sand, quartz powder and kaolin clay all increase rapidly with the increase of water content before critical water contents, and then tend to be stable. The critical water content of kaolin clay is the highest, followed by quartz powder and then quartz sand. Under the same degree of compaction and the same water content, the thermal conductivity of quartz sand is the largest, followed by quartz powder and then kaolin clay. Under the same water content, the thermal conductivities of the three soils all increase linearly with the increase of dry density.

Key words: unsaturated soil; thermal conductivity; degree of compaction; water content

0 引言

地下空间开发是解决城市交通拥堵、用地紧张等问题的有效途径。地热能的开发利用是响应中国“绿色发展, 节能减排”科学理念的重要举措。地下空间结合地热能的开发利用具有重要工程意义, 也是当今国内外研究热点之一。工程现场土在自然条件下大多处于非饱和状态, 其工程特性与饱和土大不相同。非饱和土的力学特性和水力特性已经有众多学者进行了深入研究^[1], 而对于非饱和土热力学特性的研究相对较少且不够全面。土的热力学参数主要有导热系数、

热扩散系数和比热容, 其中导热系数可以影响和决定土体热量传播速度与温度场的分布^[2], 成为众多学者研究的重点因素。对非饱和土导热系数进行全面系统的研究有助于了解非饱和土的热力学特性, 为地下空间及地热能开发相关岩土工程设计提供参考依据。

岩土体为多孔隙介质, 其导热系数主要与矿物成

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019B13714); 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金项目(GHXN201903); 留学人员科技活动项目择优资助经费项目(2013) 收稿日期: 2020-06-04

分、含水率、干密度和温度等有关。Salomone 等^[3]研究发现粉质黏土在不同干密度下低于临界含水率时, 含水率对导热系数有较大影响。陈守义^[4]利用自制 HA-1 型土壤热参数测定仪得到了高岭土的导热系数随含水率的增加几乎呈线性增加, 且当含水率一定时随干容重增加而增加。谈云志等^[5]通过推导岩土体材料非饱和状态下的导热系数预估模型验证岩土体的导热系数首先取决于固体颗粒导热系数, 其次取决于孔隙率的大小, 且随孔隙率的增加而急剧降低。叶万军等^[6]、董西好等^[7]研究发现在常温时黄土的导热系数与含水率和干密度呈正相关关系, 且含水率的影响较大。随后研究发现随着温度降低, 黄土的导热系数会经历 3 个阶段, 最后趋于稳定。Nguyen 等^[8]研究发现法国北部黄土的导热系数与含水率间没有滞回效应。Boukelia 等^[9]通过室内试验研究表明导热系数随温度变化在压实曲线干侧比湿侧更明显。国内外学者对非饱和土导热系数的研究多针对细粒土, 对砂土等粗颗粒土的相关研究相对缺乏。

本文以工程常用材料——石英砂、石英粉和高岭土为研究对象, 通过室内单元试验测定其在不同压实度和含水率下的导热系数, 研究压实度和含水率对这 3 种非饱和土导热系数的影响。

1 试验仪器与材料

1.1 试验仪器及原理

导热系数是表示物质导热能力的物理量, 其指单位厚度、单位温度梯度条件下 1 s 内通过面积为 1 m²范围内传递的热量, 用 K 表示, 单位 W/(m·K)。

本文测定非饱和土的导热系数利用 Hukseflux 公司的 TP08 小型瞬态导热系数探针, 如图 1 (a) 所示。测试范围为 0.2~6 W/(m·K)。图 1 (b) 为导热系数测量容器, 可为土样导热系数的测定创造一个更加稳定的测试环境, 提高测量的准确性。试验时将 TP08 探针从顶部插入土样, 其计算模型可简化为常功率线热源的径向一维导热问题, 求解公式^[4]为

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi K} (\Delta \ln t) , \quad (1)$$

式中, T 为温度, t 为时间, K 为导热系数, Q 为单位时间单位长度线热源提供的热量。



图 1 TP08 小型瞬态导热系数探针及其测量容器

Fig. 1 TP08 small transient thermal conductivity probe and its measuring vessel

试验中控制 Q 为常量, 则热线源处温度 T 与时间对数 $\ln t$ 呈线性关系, 由该直线斜率确定导热系数 K 。

1.2 试验用土

为保证研究的基础性与重复性, 试验材料均采用商用土。砂土选用石英砂(20 目), 粉土选用石英粉(500 目)和石英粉(200 目), 黏土选用高岭土(800 目)。土样主要物理力学基本参数如表 1 所示。

表 1 试验用土的基本参数

Table 1 Basic properties of test soils

土类	类型	最大干密度 / (g·cm ⁻³)	最优含水率/%	饱和含水率/%
石英砂 (20 目)	砂土	1.68	19	25
石英粉 (200 目)	粉土	1.68	19	30
石英粉 (500 目)	粉土	1.68	19	40
高岭土 (800 目)	黏土	1.29	37	45

2 试验方案与步骤

2.1 试验方案

本文主要研究压实度和含水率对石英砂、石英粉和高岭土导热系数的影响。根据不同土类的液塑限和最优含水率设定含水率梯度, 压实度分别为 80%, 90% 和 100%, 具体试验方案见表 2。每组编号做 3 个样进行平行试验, 通过计算分析各土类的导热系数与压实度、含水率的关系。

表 2 试验方案

Table 2 Test programs

编号	土类	压实度/%	质量含水率/%
1-6	石英砂	80	
7-12	(20 目)	90	0, 10, 15, 20, 25, 饱和
13-18		100	
19-23	石英粉	80	
14-28	(200 目)	90	10, 15, 20, 25, 30 (饱和)
29-33		100	
34-38	石英粉	80	
39-43	(500 目)	90	10, 15, 20, 25, 40 (饱和)
44-48		100	
49-54	高岭土	80	
55-60	(800 目)	90	20, 25, 30, 35, 40, 45
61-66		100	

2.2 试验步骤

(1) 对于砂土和粉土, 基于干土计算配制额定含水率土样。对长期暴露于空气中易吸水的黏性土样高岭土在配置额定含水率土样之前, 利用烘干法测定其初始含水率, 在此基础上配置所需含水率的土样。

(2) 称取适量干土, 采用喷雾器加水搅拌配土, 搅拌均匀后过 2 mm 筛(对于含水率较高的黏性土过 5 mm 筛), 后密封土样静置 24 h。

(3) 采用烘干法测定配土静置后的含水率。根

据试验所需干密度和含水率称取适量的湿土制样，放入高为65 mm，直径为50 mm的圆柱制样容器，分5层击实，以保证试样具有比较均匀的干密度，击实后试样再静置24 h，使试样中水分均匀分布。

(4) 将TP08探针从容器顶盖处的预留孔插入土样，为防止在插入时手部温度对传感器的冷端温度的影响，使用具有隔热功能的手套进行上述操作。

(5) 测试时间为3 min。测试过程中尽量控制恒温环境(20℃左右)，并关闭试验室门窗防止空气对流影响传感器冷端的温度。等待1 h后进行重复测试，3次测试后取平均值，即为所测得的导热系数。

3 试验结果与分析

3.1 不同压实度下含水率对非饱和土导热系数的影响

图2~5是不同压实度下石英砂、石英粉和高岭土测得的导热系数与质量含水率的关系图，可以得出3种土类的导热系数在某一压实度下均随着含水率的增加而增加。如图2所示，当石英砂(20目)处于完全干燥状态时，在各压实度下的导热系数均很小，仅有0.16 W/(m·K)(压实度80%)、0.25 W/(m·K)(压实度90%)和0.32 W/(m·K)(压实度100%)。当石英砂的含水率增加到8.9%时，其导热系数快速增加到1.47 W/(m·K)(压实度80%)、1.60 W/(m·K)(压实度90%)和2.11 W/(m·K)(压实度100%)，为干燥时的8倍左右。随着含水率的继续增加，导热系数增加稍缓，当含水率超过15%后，石英砂的导热系数慢慢趋于稳定，直到达到饱和含水率。如图3和图4所示，当含水率小于25%时，粉土的导热系数与含水率呈现近似线性变化关系，但当含水率超过25%后，导热系数随含水率的变化趋于平缓。如图5所示，当含水率接近饱和时，高岭土导热系数仍有增加，但增势变缓。

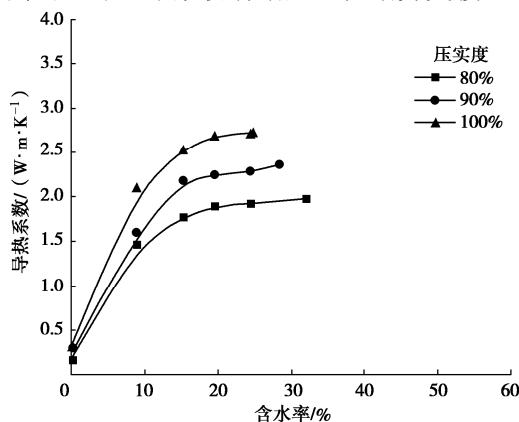


图2 石英砂(20目) 导热系数与含水率的关系

Fig. 2 Relationship between thermal conductivity and water content of quartz sand (20)

土体为多孔隙介质，土体的导热系数主要与其孔隙率和孔隙填充物有关。Gangadhara等^[10]将导热系数

随含水率的变化过程分为两个阶段：急剧变化阶段和平缓变化阶段，这两个阶段的转折点对应的含水率定义为临界含水率。干燥状态下，热传导主要通过土颗粒间的接触。当含水率增加时，颗粒表面形成一层水膜，此时颗粒间的有效接触面明显增加，由于水的导热系数大于空气，导热性能迅速增加^[11]，图2中石英砂从干燥状态曲线的陡增的现象与此相符。但当土颗粒被水膜接触完全，即达到临界含水率后，继续增加含水率土颗粒间有效接触面增加不明显，导热性能增加变缓并趋于稳定。图2~5各土类均反映了这种现象。

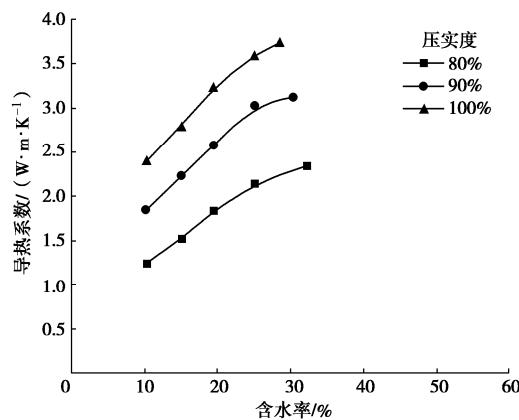


图3 石英粉(200目) 导热系数与含水率的关系

Fig. 3 Relationship between thermal conductivity and water content of quartz powder (200)

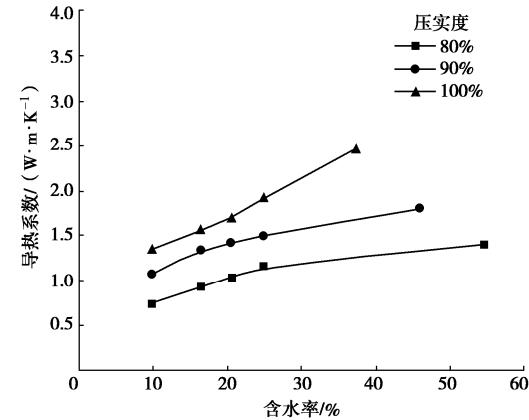


图4 石英粉(500目) 导热系数与含水率的关系

Fig. 4 Relationship between thermal conductivity and water content of quartz powder (500)

对于同一土类在不同的压实度下，其临界含水率稍有不同，但不同土类的临界含水率总体规律为 $w_{\text{石英砂}} < w_{\text{石英粉}} < w_{\text{高岭土}}$ 。其原因是土样颗粒越细，比表面积越大，颗粒表面形成水膜的水便越多。石英砂和石英粉颗粒的粒径较大，吸附能力差，颗粒周围的结合水相对少。而高岭土颗粒除比表面积大吸附能力强之外，其土体中的黏土矿物存在的静电引力能够使水分子与土粒结合，形成导热的水膜。因此黏土颗粒越多，就需要更多的水分来形成水膜，临界含水率就越大。

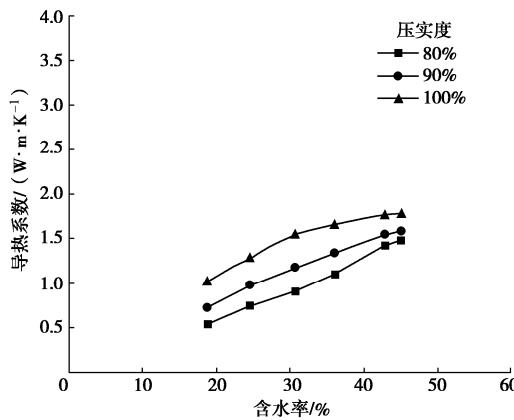


图 5 高岭土 (800 目) 导热系数与含水率的关系

Fig. 5 Relationship between thermal conductivity and water content of kaolin clay (800)

比较图 2~5 可以发现, 在相同含水率及压实度下, 导热系数 $K_{\text{石英砂}} > K_{\text{石英粉}} > K_{\text{高岭土}}$, 对应土类导热系数 $K_{\text{砂土}} > K_{\text{粉土}} > K_{\text{黏土}}$ 。不同土体的导热系数与土体的矿物组成成分有很大关系。相关研究表明, 富含石英、长石等导热系数大的矿物的岩土体, 其导热系数明显大于富含黏粒的土类^[12-13]。同时土颗粒尺寸越小, 导热系数越小^[2]。本文试验用土中的砂土为石英砂 (20 目), 其主要成分为石英, 且颗粒尺寸最大, 所以其导热系数最大; 黏土为高岭土 (800 目), 是黏粒含量很高的土类, 且颗粒尺寸最小, 所以其导热系数最小。

3.2 干密度对非饱和土导热系数的影响

图 6~9 是不同含水率的高岭土、石英粉和石英砂的导热系数与干密度的关系图。由图可知, 在相同含水率下, 各土类的导热系数与干密度几乎成线性变化关系, R^2 值均大于 0.97, 拟合度高。并且同一土类在不同含水率下导热系数与干密度的变化关系斜率相差不大。

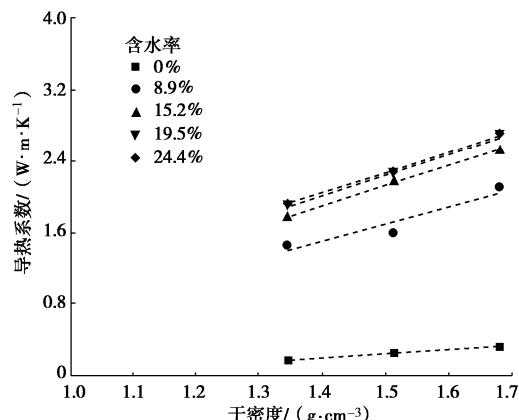


图 6 石英砂 (20 目) 导热系数与干密度的关系

Fig. 6 Relationship between thermal conductivity and dry density of quartz sand (20)

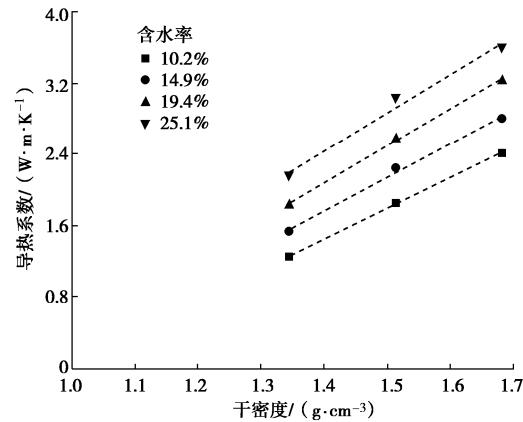


图 7 石英粉 (200 目) 导热系数与干密度的关系

Fig. 7 Relationship between thermal conductivity and dry density of quartz powder (200)

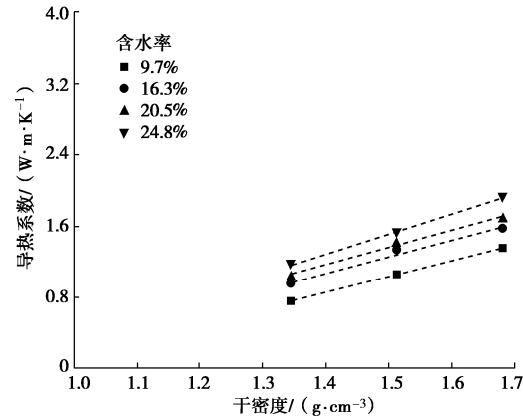


图 8 石英粉 (500 目) 导热系数与干密度的关系

Fig. 8 Relationship between thermal conductivity and dry density of quartz powder (500)

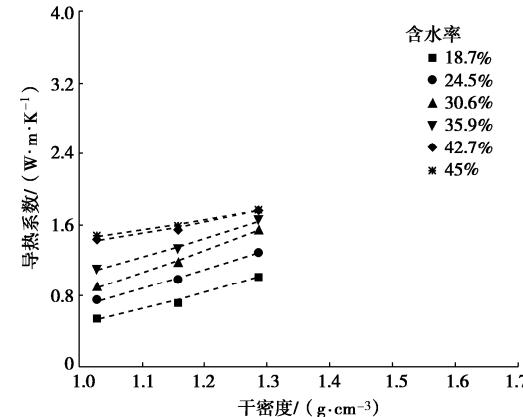


图 9 高岭土 (800 目) 导热系数与干密度的关系

Fig. 9 Relationship between thermal conductivity and dry density of kaolin clay (800)

土的干密度与土的压实度直接相关, 压实度越大, 非饱和土中的含气量就越少, 颗粒间有效接触面积增加, 单位体积的矿物质含量越高^[6], 则土体的导热系数越接近土颗粒固体的导热系数^[2]。空气的导热系数约为 $0.02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 远小于土粒 (均大于 $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 和水的导热系数 ($0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)。因此, 在一定范围内, 压实度越大, 土体导热系数越大。

4 结 论

通过测定石英砂、石英粉和高岭土在不同压实度和含水率下的导热系数，研究了这3种不同非饱和土的导热系数与含水率和干密度的关系，得到结论如下：

(1) 在相同压实度下，石英砂、石英粉和高岭土的导热系数均随含水率增加而增大。含水率增加时，土颗粒表面形成水膜使土颗粒间的有效接触面增加，从而导热性能增大。但当土颗粒被水膜接触完全后，继续增加含水率土颗粒间有效接触面增加不明显，导热系数增势变缓并趋于稳定。

(2) 临界含水率从大到小依次为：高岭土、石英粉、石英砂。因为土颗粒越细，比表面积越大，颗粒表面形成水膜所需的水便越多。

(3) 在相同含水率和压实度下，石英砂的导热系数最大，石英粉次之，高岭土最小。因为石英的导热系数大于黏粒；且土颗粒尺寸越小，导热系数越小。

(4) 在相同含水率下，石英砂、石英粉和高岭土的导热系数均随干密度的增加呈线性增加。因为空气的导热系数远小于土粒与水的导热系数，而压实度越大，土中含气量越少，故导热系数越大。

参 考 文 献：

- [1] NG C W W, MENZIES B. Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering[M]. London: Taylor and Francis, 2007.
- [2] 张楠, 夏胜全, 侯新宇, 等. 土热传导系数及模型的研究现状和展望[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1550–1562. (ZHANG Nan, XIA Sheng-quan, HOU Xin-yu, et al. Review on soil thermal conductivity and prediction model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1550–1562. (in Chinese))
- [3] SALOMONE L A, KOVACS W D, KUSUDA T. Thermal performance of fine-grained soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(3): 359–374.
- [4] 陈守义. 用热针法测定土的导热热导率[J]. 岩土力学, 1989, 10(1): 60–65. (CHEN Shou-yi. Measurement of soil thermal conductivity with thermal needle method[J]. Rock and Soil Mechanics, 1989, 10(1): 60–65. (in Chinese))
- [5] 谈云志, 喻波, 胡新江, 等. 非饱和土热导率预估模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 129–133. (TAN Yun-zhi, YU Bo, HU Xin-jiang, et al. Prediction model for thermal conductivity of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 129–133. (in Chinese))
- [6] 叶万军, 董西好, 杨更社, 等. 含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 656–662. (YE Wan-jun, DONG Xi-hao, YANG Geng-she, et al. Effect of moisture content and dry density on the thermal parameters of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 656–662. (in Chinese))
- [7] 董西好, 叶万军, 杨更社, 等. 温度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2888–2894, 2900. (DONG Xi-hao, YE Wan-jun, YANG Geng-she, et al. Experimental study of influence of temperature on thermal properties of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2888–2894, 2900. (in Chinese))
- [8] NGUYEN V T, HEINDL H, PEREIRA J M, et al. Frost, Water retention and thermal conductivity of a natural unsaturated loess[J]. Géotechnique, 2018, 7(4): 1–6.
- [9] BOUKELIA A, ESLAMI H, ROSIN-PAUMIER S, et al. Effect of temperature and initial state on variation of thermal parameters of fine compacted soils[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 23(9): 1125–1138.
- [10] GANGADHARA M S, KOLAY P K. Thermal characteristics of a Class F fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(6): 841–846.
- [11] 肖琳, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 含水量与孔隙率对土体热导率影响的室内实验研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, 9(3): 241–247. (XIAO Lin, LI Xiao-zhao, ZHAO Xiao-mao, et al. Laboratory on influences of moisture content and porosity on the thermal conductivity of soils[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2008, 9(3): 241–247. (in Chinese))
- [12] HORAI K. Thermal conductivity of rock-forming minerals[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(5): 1278–1308.
- [13] 刘建军, 刘海蕾. 岩石热物理性质测试与分析[J]. 西部探矿工程, 2009, 21(4): 144–148. (LIU Jian-jun, LIU Hai-lei. Test and analysis of thermophysical properties of rocks[J]. West-China Exploration Engineering, 2009, 21(4): 144–148. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)