

土壤热导率的影响因素实验研究

曾召田^{1,2}, 范理云¹, 莫红艳¹, 徐云山¹, 刘方毅¹

(1. 桂林理工大学广西建筑新能源与节能重点实验室, 桂林 541004;

2. 国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 桂林 541004)

摘 要: 采用热针法测定室内不同条件下红粘土、粉土和细砂的热导率,着重分析含水率、干密度和土壤质地对土壤热导率的影响规律及机理。研究结果表明:1)相同干密度情况下,粉土和细砂两者的热导率均随含水率的增加而单调线性递增,红粘土的热导率则随含水率的增加而呈现出分段递增的趋势;2)含水率对热导率的影响主要归结为土样中液相(水)热导率、结合水膜(“液桥”效应)2个主要因素,而“液桥”效应对红粘土的热导率影响显著;3)相同含水率情况下,3种土样的热导率均随干密度的增加而递增,具有较好的线性关系;4)土壤质地(细颗粒和石英含量)对土样热导率具有显著影响。

关键词: 地源热泵; 热导率; 影响因素; 热针法; 结合水膜

中图分类号: TK529

文献标识码: A

0 引 言

土壤热特性在很多工程应用领域具有十分重要的作用,例如浅层地热能开采,城市“热岛”效应,地铁、隧道等地下空间开发,矿井热害预防,石油、天然气管道及核废料处置设备的设计和放置等^[1]。以目前应用最为广泛的地源热泵技术为例,其通过埋管管内水循环与地表浅层岩土体进行热量交换,使不能直接利用的岩土低品位热能转换为可利用的高品位热能,具有节能、环保、无污染等优点,可有效解决日益激烈的资源匮乏、能源短缺问题^[2];然而,在这一技术中,岩土导热参数选取的不确定性严重制约了换热系统设计的科学性、合理性,成为人们关注的热点问题;而土壤热导率是最关键的因素之一,因此,有必要对其进行研究,以达到节能、高效、安全的目的。

土壤热导率受诸多因素的影响,一般随土壤质地、矿物成分、干密度、含水率的变化而变化^[3,4];在所有影响因素中,含水率起主要作用,也是最难控

制的因素^[5,6]。近年来,众多学者对土壤热导率进行了广泛研究:Tang等^[7]针对压实膨润土,分析了干密度、含水率、水分滞留、饱和度及土样成分对其热导率的影响;Abu-Hamdeh等^[8]、Milly^[9]通过实验得到土壤热导率随密度和含水率增加而递增的结论,并给出了土体热导率与孔隙率、干密度及含水率之间的经验公式;栾英波等^[10]发现粉质粘土和细砂的热导率均随体积含水率的增加而递减,随密度的增加而递增;邸佳颖等^[11]探讨了不同含水率范围土体结构对热导率的影响;周媛媛等^[12]的研究表明含水砂土的热导率随含水率的增加而增大,但粒径对热导率影响不大;陈宝等^[13]对上海淤泥质粉质粘土的热传导特性进行试验,分析了热导率与孔隙比的相关性;于明志等^[5,14]利用Hotdisk热常数分析仪对不同含湿率的土壤导热系数进行测量,研究分析了水分含量对土壤导热系数的影响及机理。

上述文献大多只研究某一类土,即使研究多类土也认为不同土的热导率随含水率或饱和度

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(41502284; 51568014); 国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室资助项目(KDL201603); 广西建筑新能源与节能重点实验室资助项目(桂科能 15-J-21-1); 桂林理工大学博士科研启动基金(2016254)

通信作者: 曾召田(1981—), 男, 博士、高级实验师、硕士生导师, 主要从事浅层地热能的应用技术及环境岩土工程问题等方面的研究
zengzhaotian@163.com

的变化趋势相同。由于不同质地土体性质不同,其内部水分分布随含水量的变化也各不相同,因此土壤热导率随含水率或饱和度变化的趋势也应各不相同。同时,有关岩溶地区浅层地热能开采过程中经常遇到的浅层土壤热传导特性的文献也较匮乏。本文以地源热泵现场所取 2 种土壤和 1 种建筑用细砂为试验对象,采用热针法室内测定不同条件下土壤热导率,着重分析含水率、干密度和土壤质地对土壤热导率的影响,为地源热泵技术的合理利用提供理论依据和技术支持。

表1 实验土样的基本物理性质指标
Table 1 Basic physical properties index of soils

| 土样 类型 | 含水率 $\omega/\%$ | 密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 比重 G_s | 饱和度 $S/\%$ | 液限 $\omega_L/\%$ | 塑限 $\omega_P/\%$ | 石英 含量/ $\%$ | 颗粒组成/ $\%$ | | |
|----------|--------------------|--|-------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------|------------|------|------|
| | | | | | | | | 黏粒 | 粉粒 | 砂粒 |
| 红粘土 | 32.1 | 1.90 | 2.74 | 97.0 | 77.8 | 42.1 | 12.5 | 53.8 | 32.6 | 13.6 |
| 粉土 | 23.1 | 1.99 | 2.69 | 93.6 | 26.0 | 15.8 | 24.8 | 25.9 | 48.9 | 25.2 |
| 细砂 | 16.4 | 2.05 | 2.65 | 86.4 | — | — | 92.6 | 0.3 | 6.6 | 93.1 |

1.2 实验过程

1)配制不同含水率的土料。将上述 3 种土样风干、碾碎(过 2 mm 筛),按要求配制一系列不同含水率的土料(见表 2);焖土 24 h,使土料内含水率均匀。

表2 实验土样的配制干密度和含水率
Table 2 The dry density and water content of soils

| 干密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 质量含水率 $\omega/\%$ | | |
|---|--------------------------|----------------------|----------------------|
| | 红粘土 | 粉土 | 细砂 |
| 1.1 | — | 每个 ρ_d 共 8 | 每个 ρ_d 共 8 |
| 1.2 | 每个 ρ_d 共 11 组 | 每个 ρ_d 共 8 | 组 $\omega(\omega=3;$ |
| 1.3 | $\omega(\omega=0;2;6;8;$ | 组 $\omega(\omega=4;$ | 组 $\omega(\omega=3;$ |
| 1.4 | 10;12;16;21; | 7;9;11;13; | 6;8;10; |
| 1.5 | 26;31;35) | 15;18;21) | 12;15;17; |
| | | | 20) |

2)按设定的干密度制备试样(见表 2)。为满足探针测定范围的要求,试样直径为 10.4 cm,高度为 12.0 cm;在 PVC 管中分 4 层击实试样,为消除分层面影响,每一层击实后均将试样层面“刮毛”;每一含水率备 3 个平行试样;试样制备后,静置 12 h。

3)采用 KD2-Pro 测定土样热导率^[15,16]。将探针 SH-1(双针)依次插入制备好的试样中,测试试样的热导率 K ,测试过程如图 1 所示。

1 实验方案及过程

1.1 实验土样

实验土样分别为红粘土、粉土和细砂;其中,红粘土和粉土取自于地源热泵实验平台监测现场^[2,15],细砂为一种常用的建筑材料,与膨润土混合可用于地埋管换热器埋设时的回填材料;通过室内土工测试,所取 3 种土样的基本物理性质指标见表 1。



图1 土壤热导率测试过程

Fig. 1 Testing process of soil thermal conductivity

4)采用烘干法实测试样含水率。每个试样测试完毕后,取探针插入孔周边区域的土料,用烘干法实测试样的质量含水率。

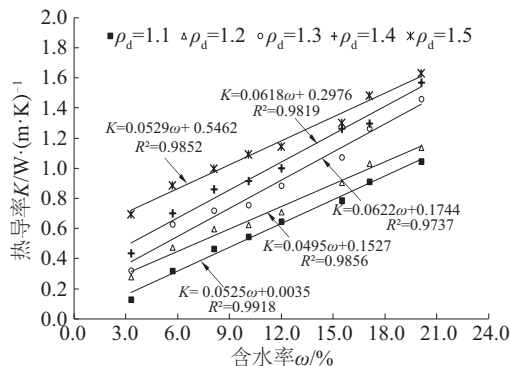
5)数据处理。将 3 个平行测试值进行比较,剔除异常值,取余下数据平均值作为最终实验结果。

2 实验结果及分析

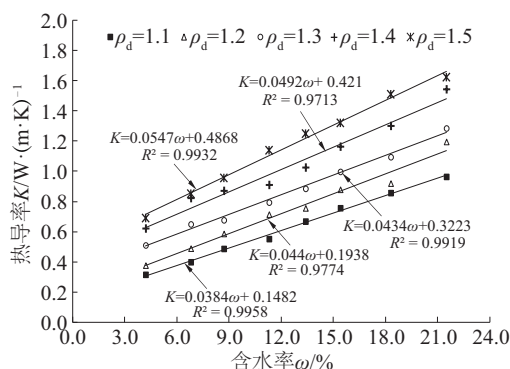
2.1 含水率的影响

图 2 为上述 3 种土样热导率与含水率的关系曲线。从整体上来看,在相同的干密度情况下,3 种土样的热导率均随着含水率增加而递增;细砂和粉土具有较一致的变化趋势,热导率与含水率二者之间呈现出明显的线性增长关系(见图 2a、图 2b);但

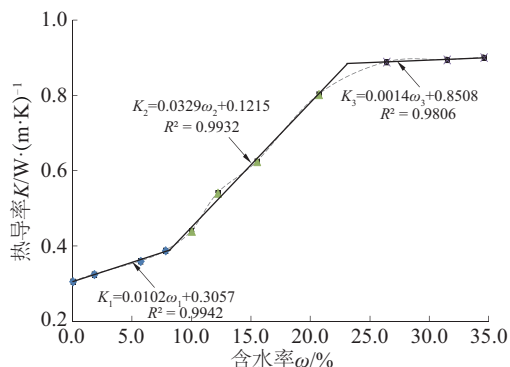
是,红粘土与前2种土样稍有差别,其热导率与含水率呈现出分段线性增长的趋势(见图2c~图2f)。



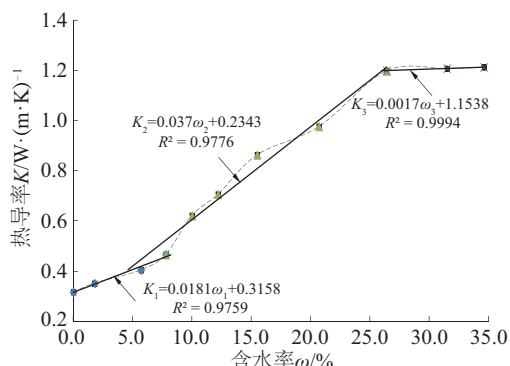
a. 细砂($\rho_d=1.1\sim1.5\text{ g/cm}^3$)



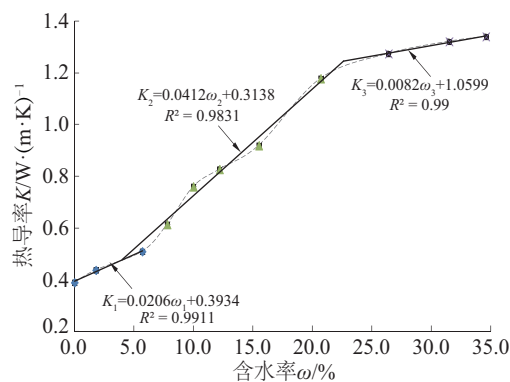
b. 粉土($\rho_d=1.1\sim1.5\text{ g/cm}^3$)



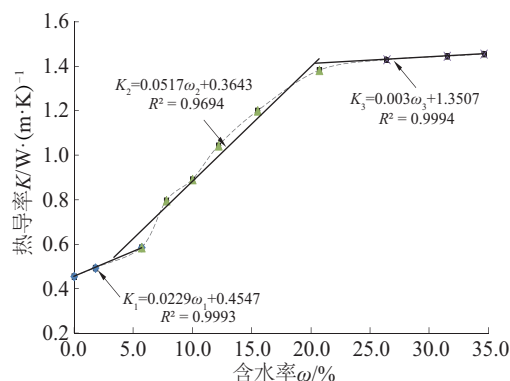
c. 红粘土($\rho_d=1.2\text{ g/cm}^3$)



d. 红粘土($\rho_d=1.3\text{ g/cm}^3$)



e. 红粘土($\rho_d=1.4\text{ g/cm}^3$)



f. 红粘土($\rho_d=1.5\text{ g/cm}^3$)

图2 土样的 $K-\omega$ 关系

Fig. 2 $K-\omega$ relations of soils

土壤热导率随含水率变化的规律,可从土壤的三相组成及其热物理特性方面进行解释。由土壤物理学^[17]可知,土壤是由固、液、气三相组成的多孔介质,液相(水溶液)的导热率为气相(空气)的20倍,当土壤固体部分维持一定(相同干密度)的情况下,土壤含水量状况将直接决定土壤热导率的大小;因此,热导率可表示为土壤含水率的函数。研究表明,土体内热传导的主要途径为土颗粒间的热传导,如图3所示:当含水率较低时,土壤处于干燥状态,土颗粒之间仅仅通过接触点的热传导方式传递热量,传递方式唯一,因此热导率非常小;随着水分的增加,一方面热导率相对较大的水分取代了土颗粒孔隙间热导率相对较小的空气,导热率大大增加;另一方面,增加的水分在土颗粒表面形成结合水膜,构成的“液桥”^[14]使土颗粒之间的有效接触面积明显增加,进而促使热导率迅速增加。因此,在上述两方面因素的影响下,土样的热导率均随着含水率的增加而递增。

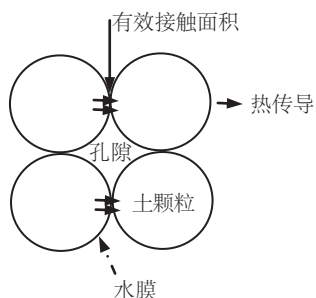


图3 土壤颗粒间热传导示意图

Fig. 3 Schematic diagram of heat conduction in soils

综上所述,土样中含水率对热导率的影响主要可归结为以下2个方面因素。

1) 土样中液相(水)热导率的影响

该因素对土样热导率影响的主要原因为:随着土样中含水率的增加,土样中液相(水)逐渐挤出了孔隙中的空气,并替代空气填充孔隙;前者具有较高的热导率($K_w=0.605 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$),而空气的热导率相对较低($K_a=0.024 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)。但是,对于各种不同质地的土样,由于液相(水)相对恒定的热导率值,因此,该因素对热导率的影响程度及趋势均基本一致。

2) 土样中结合水膜的影响(即“液桥”效应)

该因素对土样热导率影响的主要原因为:随着土样中含水率的增加,土样中吸附形成的结合水膜越厚,“液桥”效应越明显,土颗粒间距减小,接触面积增大,对土样热导率的增加具有显著的促进作用。根据物理化学的观点,土中结合水膜的形成主要取决于矿物成分,更确切地说,主要取决于土中黏粒含量,即由原生矿物组成的砂粒吸附能力弱,土颗粒周围的结合水少,只有百分之零点几到百分之几;而由粒径细小、具有很大的比表面积的黏土矿物组成的黏粒具有很大的静电引力,促使水分子定向排列在土粒周围形成一定厚度水化膜,结合水可达百分之几十,甚至更多。该因素对热导率的影响主要取决于土样中黏粒含量,由于各种土样的质地不同,因此,该因素的影响程度及趋势是不一样的——对于黏粒较多的红粘土来说,这一因素对热导率变化的影响效果非常显著,不容忽视;而对于黏粒含量相对较少的细砂、粉土来说,这一影响因素的作用很微弱,基本可以忽略。这就是上文中3种土样热导率与含水率关系出现异同的根本原因。

由上述分析可知,热导率是土壤含水率的函数,由于土壤导热特性的复杂性,很难从理论上推求出具有明确物理意义、简单易行的土壤热导率与含水率的理论关系。根据图2中的曲线特点,采用最小二乘法对上述3种土样的热导率与含水率的关系曲线进行分段拟合(见图2)。由此可知,3种土样的热导率与含水率具有较好的线性关系($R^2=0.9694\sim0.9994$),用公式可表示为:

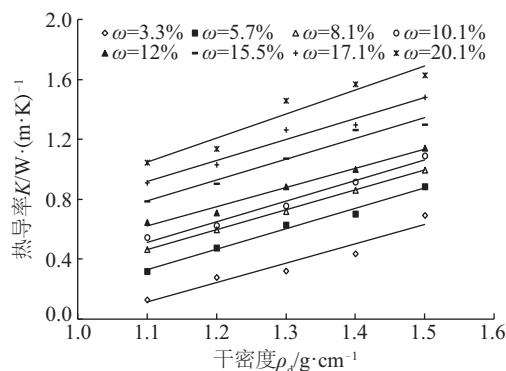
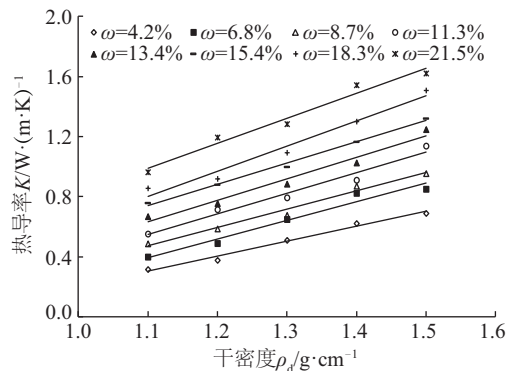
$$K=A\cdot\omega+B \quad (1)$$

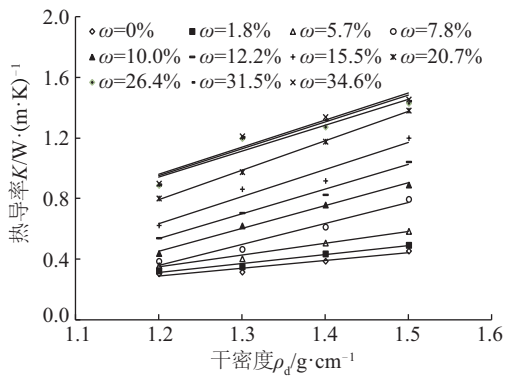
式中, A 、 B ——拟合系数,具体数值见图2。

式(1)近似地反映了土样热导率与含水率之间的关系,对工程实践有一定的参考价值。

2.2 干密度的影响

图4为上述3种土样热导率与干密度的关系曲线。由此可知,在相同的质量含水率情况下,3种土样的热导率均随着干密度的增大而呈现线性递增的趋势;这是因为土体干密度越大,单位体积土体中含有的固相物质就越多,土颗粒排列得越紧密,所以颗粒之间的接触面积相应地增加了,最终导致土体热导率增大。

a. 细砂($\omega=3.3\%\sim20.1\%$)b. 粉土($\omega=4.2\%\sim21.5\%$)



c. 红粘土(ω=0%~34.6%)
图4 土样的K-ρ_d关系
Fig. 4 K-ρ_d relations of soils

采用最小二乘法对上述3种土样的热导率与干密度的关系曲线进行拟合(见图4)。由此可知,3种土样的热导率与含水率具有较好的线性关系($R^2=0.9326\sim0.9995$),用公式表示为:

$$K=E\cdot\rho_d-F$$

(2)

式中, E 、 F ——拟合系数,具体数值见表3。

式(2)近似反映了土样热导率与干密度之间的关系,对工程实践有一定的参考价值。

由表1可知,上述3种土样按含有细颗粒(黏粒)数量的大小排序依次为:细砂(0.3%)<粉土(25.9%)<红粘土(53.8%)。Tavman^[18]研究表明,在相同的孔隙率情况下,土颗粒的粒径越小,就需要排列越多的土颗粒,这就意味着土颗粒之间的热阻就越大,土壤的热导率就越低。因此,上述3种土样中,含有最少细颗粒的细砂热导率值是最高的,粉土次之,含有最多细颗粒的红粘土具有最低的热导率值。

图5中土壤质地对热导率的影响规律也可从土样中石英含量方面加以解释。由土壤物理学知识可知,土壤的矿物成分中,石英具有最大的热导率值($8.9\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$),其他矿物的热导率值均在 $1.5\sim2.0\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 范围内,因此,石英含量对土壤热导率的影响占有绝对地位。由表1可知,上述3种土样按含有石英数量的大小排序依次为:细砂(92.6%)>粉土(24.8%)>红粘土(12.5%)。因此,含有最多石英含量的细砂热导率值是最高的,粉土次之,含有最少石英含量的红粘土具有最低的热导率值。

表3 拟合参数值

Table 3 The values of fitting parameters

| 土样 类型 | 含水率 ω/% | 拟合参数值 | | |
|----------|------------|-------|--------|--------|
| | | E | F | R^2 |
| 细砂 | 3.3 | 1.288 | 1.3022 | 0.9314 |
| | 5.7 | 1.361 | 1.1667 | 0.9876 |
| | 8.1 | 1.326 | 0.9952 | 0.9995 |
| | 10.1 | 1.383 | 1.0103 | 0.9817 |
| | 12.0 | 1.285 | 0.7925 | 0.9861 |
| | 15.5 | 1.385 | 0.7337 | 0.9699 |
| | 17.1 | 1.408 | 0.6328 | 0.9667 |
| | 20.1 | 1.600 | 0.7102 | 0.9326 |
| 粉土 | 4.2 | 0.991 | 0.7835 | 0.9855 |
| | 6.8 | 1.236 | 0.9628 | 0.9637 |
| | 8.7 | 1.219 | 0.8679 | 0.9802 |
| | 11.3 | 1.366 | 0.9526 | 0.9700 |
| | 13.4 | 1.428 | 0.9386 | 0.9715 |
| | 15.4 | 1.409 | 0.8075 | 0.9943 |
| | 18.3 | 1.683 | 1.0509 | 0.9705 |
| | 21.5 | 1.662 | 0.8382 | 0.9727 |
| 红粘土 | 0.0 | 0.522 | 0.3377 | 0.9315 |
| | 1.8 | 0.592 | 0.3972 | 0.9672 |
| | 5.7 | 0.782 | 0.5907 | 0.9799 |
| | 7.8 | 1.374 | 1.2884 | 0.9716 |
| | 10.0 | 1.494 | 1.3384 | 0.9938 |
| | 12.2 | 1.629 | 1.4194 | 0.9876 |
| | 15.5 | 1.783 | 1.5048 | 0.9469 |
| | 20.7 | 1.941 | 1.5351 | 0.9988 |
| | 26.4 | 1.701 | 1.0981 | 0.9301 |
| | 31.5 | 1.766 | 1.1666 | 0.9336 |
| | 34.6 | 1.792 | 1.1917 | 0.9352 |

2.3 土壤质地的影响

为了探讨土壤质地对热导率的影响规律,将上述3种土样在相同干密度情况下的热导率随含水率变化的关系绘于图5,由此可知,在干密度和含水率均相同的情况下,细砂具有较高的热导率,粉土次之,红粘土的热导率最低。

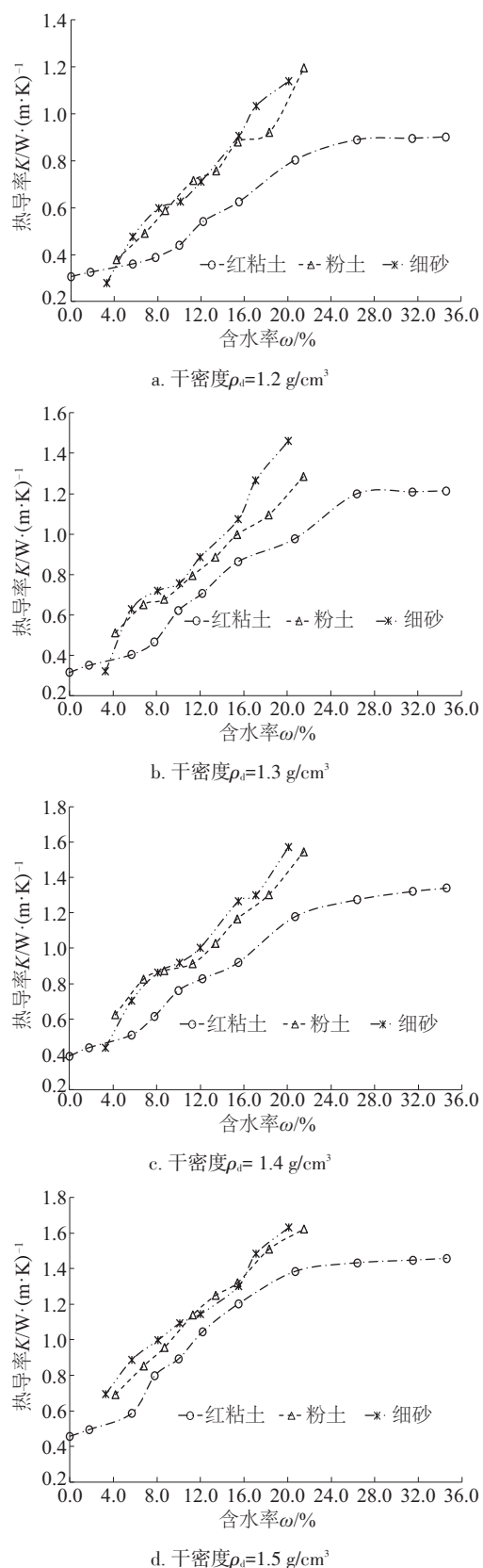


图5 土样质地对热导率的影响

Fig. 5 Influence of soil textures on the thermal conductivity

3 结 论

1) 相同干密度情况下, 3 种土样的热导率均随着含水率的增加而递增; 细砂和粉土具有较一致的变化趋势, 热导率与含水率二者之间呈现出明显的线性增长关系; 但是, 红粘土的热导率与含水率则呈现出分段线性增长的变化趋势。

2) 土样含水率对热导率的影响主要归结为土样中液相(水)热导率、结合水膜(“液桥”效应)2 个主要因素, 液相(水)热导率对 3 种土样具有一致的影响效果, “液桥”效应对红粘土的热导率影响显著。

3) 相同质量含水量情况下, 3 种土样的热导率均随干密度的增加而递增, 具有较好的线性关系。

4) 土壤质地对土样热导率具有显著的影响: 细颗粒越多, 热阻越大, 热导率越低; 石英含量越多, 热导率越高。

[参考文献]

- [1] 赵艳林, 曾召田, 吕海波, 等. 浅层地能开采中土体的热湿迁移机制及力学性状研究综述与展望[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 222—227.
- [1] Zhao Yanlin, Zeng Zhaotian, Lyu Haibo, et al. Review and prospect of study on heat and moisture migration mechanism and mechanical behavior of soil in shallow geothermal energy exploitation [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2): 222—227.
- [2] 曾召田. 岩溶地区红粘土热湿迁移及其对地源热泵系统换热性能的影响分析[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [2] Zeng Zhaotian. Research on heat and moisture migration of red clay and its influence on heat transfer performance of ground source heat pump system in karst region [D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [3] 苏天明, 刘 彤, 李晓昭, 等. 南京地区土体热物理性质测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(16): 1278—1283.
- [3] Su Tianming, Liu Tong, Li Xiaozhao, et al. Test and analysis of thermal properties of soil in Nanjing district [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(16): 1278—1283.
- [4] 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[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 9(3): 241—247.
- [4] Xiao Lin, Li Xiaozhao, Zhao Xiaobao, et al. Laboratory

- test on influences of moisture content and porosity on thermal conductivity of soils[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 9(3): 241—247.
- [5] 于明志, 曹西忠, 王善明, 等. 水分含量对土壤导热系数的影响及机理[J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27(2): 152—154, 159.
- [5] Yu Mingzhi, Cao Xizhong, Wang Shanming, et al. Influence of water content on soil thermal conductivity and the mechanism [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2012, 27(2): 152—154, 159.
- [6] 王铁行, 刘自成, 卢靖. 黄土导热系数和比热容的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 655—658.
- [6] Wang Tiexing, Liu Zicheng, Lu Jing. Experimental study on coefficient of thermal conductivity and specific volume heat of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 655—658.
- [7] Tang A M, Cui Y J, Le T T. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites [J]. Applied Clay Science, 2008, 41(3): 181—189.
- [8] Abu- Hamdeh N H, Khdaier A I, Reeder R C. A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils [J]. Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 1073—1078.
- [9] Milly P C D, Abu-Hamdeh N H. A simulation analysis of thermal effects on thermal properties of soils as affected by density and water content [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(1): 97—102.
- [10] 栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 北京平原区粉质粘土热导率影响因素实验研究[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 981—988.
- [10] Luan Yingbo, Zheng Guisen, Wei Wanshun. The experimental study of the factors affecting the rate of thermal conductivity of silty clay in Beijing plain [J]. Geology China, 2013, 40(3): 981—988.
- [11] 邸佳颖, 刘晓娜, 任图生. 原状土与装填土热特性的比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 74—79.
- [11] Di Jiaying, Liu Xiaona, Ren Tusheng. Comparative study on thermal properties of intact and repacked soil samples [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 74—79.
- [12] 周媛媛, 江海峰, 李辉, 等. 含水砂土导热系数实验研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(2): 265—268.
- [12] Zhou Yuanyuan, Jiang Haifeng, Li Hui, et al. Experimental study of the thermal conductivity of sand with different moisture content [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(2): 74—79.
- [13] 陈宝, 许邹. 上海第④层淤泥质粉质粘土的热传导特性[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 903—907.
- [13] Chen Bao, Xu Zou. Thermal conductivity of the No.4 soft silty clay in Shanghai [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 903—907.
- [14] 于明志, 陈汉翠, 胡爱娟, 等. 水分含量对颗粒型含湿多孔介质导热系数的影响及机理[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(10): 1910—1913.
- [14] Yu Mingzhi, Chen Hancui, Hu Aijuan, et al. The influence mechanism of moisture content on thermal conductivity of unsaturated wet porous medium [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(10): 1910—1913.
- [15] 曾召田, 徐云山, 赵艳林, 等. 岩溶区地源热泵系统土壤热湿迁移实验平台研制[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2016, 41(1): 178—186.
- [15] Zeng Zhaotian, Xu Yunshan, Zhao Yanlin, et al. Development of experimental platform on soil heat and moisture migration of ground source heat pump system in karst region [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2016, 41(1): 178—186.
- [16] 张延军, 于子望, 黄芮, 等. 岩土热导率测量和温度影响研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 213—217.
- [16] Zhang Yanjun, Yu Ziwan, Huang Rui, et al. Measurement of thermal conductivity and temperature effect of geotechnical materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 213—217.
- [17] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] Shao Ming'an, Wang Quanjiu, Huang Mingbin. Soil Physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [18] Tayman I H. Effective thermal conductivity of granular porous materials [J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 1996, 23(2): 169—176.

EXPERIMENTAL STUDY OF INFLUENCE FACTORS OF SOIL THERMAL CONDUCTIVITY

Zeng Zhaotian^{1,2}, Fan Liyun¹, Mo Hongyan¹, Xu Yunshan¹, Liu Fangyi¹

(1. *Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;*

2. *Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Ministry of Land and Resources, IRCK by UNESCO, Guilin 541004, China*)

Abstract: The thermal conductivities of red clay, silt and fine sand under different indoor conditions were measured by the heat probe method. Then the influence law and mechanism of water content, dry density and soil texture on soil thermal conductivity were analyzed emphatically. The research results showed that 1) Under the same dry density, the thermal conductivities of both silt and fine sand increase monotonically and linearly with the increase of water content, the thermal conductivity of red clay shows piecewise increase trend with the increase of water content. 2) The influence of water content on thermal conductivity is mainly attributed to the two main factors of liquid phase (water) thermal conductivity and absorbed water film (“liquid bridge” effect) in soil samples, and the effect of “liquid bridge” effect on the thermal conductivity of red clay is significant. 3) It is also found that under same water content, the thermal conductivities of three kinds of soil samples increase with the increase of dry density, and have a good linear relationship. 4) the soil texture (the contents of fine particle and quartz) has a significant influence on the soil thermal conductivity.

Keywords: ground source heat pumps; thermal conductivity; influence factors; heat probe method; absorbed water film