

DOI: 10.11779/CJGE2018S1041

广西红黏土热物理特性及影响因素试验研究

曾召田^{1, 2}, 赵艳林^{1, 2}, 吕海波^{*1, 2}, 徐云山¹, 李其林¹, 蔡於芬¹

(1. 桂林理工大学广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 广西大学土木建筑工程学院防灾减灾研究所, 广西 南宁 530004)

摘要:结合矿物组成分析,通过室内试验对广西4种红黏土的热物理特性从土质学角度进行了深入研究,探讨了红黏土的热特性参数与各影响因素之间的关系。研究结果表明:当土体干密度保持不变,红黏土的热导率、比热容随体积含水率的增加而线性递增;热导率变化曲线存在临界含水率点,土体含水率低于该点时,热导率呈线性急剧增加,反之,热导率增长缓慢,趋于稳定;热扩散率以临界含水率点为界,先随含水率的增大而递增,到达临界含水率后随含水率的增加而递减,整体呈抛物线的变化趋势;当土体含水率保持不变,红黏土的热导率、比热容、热扩散率均随干密度的增加而线性递增;红黏土矿物成分中的石英含量对土体的热导率具有显著影响,石英含量与热导率的增长速率呈正相关的关系。

关键词:红黏土;热物理特性;影响因素;热导率;矿物成分;体积含水率

中图分类号: TU446 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)S1-0252-07

作者简介:曾召田(1981-),男,湖南邵阳人,博士,高级实验师,硕士生导师,主要从事非饱和土力学、浅层地热能利用技术及相关环境岩土工程问题等方面的研究与教学工作。E-mail: zengzaotian@163.com。

Experimental study on thermal properties of red clay in Guangxi province and its influence factors

ZENG Zhao-tian^{1, 2}, ZHAO Yan-lin^{1, 2}, LÜ Hai-bo^{1, 2}, XU Yun-shan¹, LI Qi-lin¹, CAI Yu-fen¹

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

2. Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters, College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: By analyzing their mineral compositions, the thermo-physical properties of 4 kinds of red clay in Guangxi Province are studied from the perspective of soil mechanics. The relationship between the thermal parameters and their impact factors also discussed. The results show that the thermal conductivity and specific heat capacity both increase linearly with the increasing water content when the dry density of soil samples keeps the same value. There is a critical water content point on the change curves of thermal conductivity. The thermal conductivity increases sharply in a line with the increasing water content when the water content is lower than the critical point. Conversely, the thermal conductivity increases slowly and tends to a stable constant. The thermal diffusivity increases with the water content when the water content is lower than the critical value. However, the thermal diffusivity decreases with the water content when the water content is larger than the critical value. The change curves of thermal diffusivity are shown as parabolic shape. It is also found that the thermal conductivity, specific heat capacity and thermal diffusivity show a linear increase with the dry density when the soil water content keeps the same value. Finally, the quartz content of mineral composition of red clay has obvious impact on its thermal conductivity. The increase rate of thermal conductivity of red clay is positively related with its quartz content.

Key words: red clay; thermal property; influence factor; thermal conductivity; mineral composition; volumetric water content

0 引言

红黏土在广西地区广泛分布,其特殊的工程性质早已引起工程、学术界的广泛关注^[1-4]。近年来,人们在各种工程建设中遇到了一系列与红黏土热物理特性密切相关的问题,譬如浅层地热能开采过程中土体的热湿迁移、城市“热岛”效应对土体的影响、地铁隧道等地下空间中的土体热量传递与扩散、矿井热害的

预防等^[5]。在这些工程问题中,一方面红黏土的热物理特性影响着热量传递过程,另一方面工程活动改变

基金项目:国家自然科学基金项目(51568014; 41502284);广西建筑新能源与节能重点实验室资助课题(桂科能17J-21-2);桂林理工大学博士科研启动基金项目(2016254)

收稿日期:2017-04-14

*通讯作者(E-mail: lhb@glut.edu.cn)

了地质环境的温度场, 又影响了红黏土的工程性质, 表现出复杂的耦合效应。岩土体作为热量贮存、传递、散失的物质基础, 表征其能力大小的比热容、热导率、热扩散率等热物理参数不仅仅决定着土体温度场的分布形态, 而且土壤质地、密度、含水率、矿物成分等诸多因素对其影响显著^[6-12]。因此, 在研究上述与“热”相关的工程问题时, 土体的热物理特性参数是至关重要的因素。红黏土由于特殊的矿物成分和独特的“二级”微孔隙结构^[13-14], 因而具有特殊的热物理性质, 但直至目前, 对红黏土的热物理特性及其影响因素仍缺乏定量的认识, 严重阻碍了广西地区有关“热”问题的工程应用和灾害防治; 因此, 有必要针对该问题进行深入的研究。

本文以广西地区的4种红黏土为研究对象, 分别进行室内热物理特性试验, 结合地质成因、矿物成分, 从土质学角度对红黏土的热物理特性进行研究, 深入分析红黏土热特性参数与各影响因素之间的关系, 为相关工程设计和灾害防治中参数选取提供理论依据。

1 试验土样

笔者经过广泛调研, 选择广西红黏土分布典型的4个地区进行现场取样^[15], 由北至南依次为桂林、柳州、来宾、武鸣(见图1)。桂林、武鸣两地采用挖坑取土的方法取得原状土样, 从表观上看, 土样均稍湿, 呈硬塑状态, 属碳酸盐岩形成的残坡积红黏土; 柳州、来宾两地采用钻探方法取得原状土样, 从表观上看, 柳州红黏土呈棕黄色, 分为较明显的两层, 属碳酸盐岩形成的残坡积红黏土, 来宾红黏土以网纹状结构黏土层为主, 呈现分层现象, 属碳酸盐岩形成的冲洪积红黏土。桂林、武鸣两地取土深度分别为2.4~3.6 m和2.5~3.2 m, 柳州、来宾两地取土深度均为地表至基岩, 样品的采集、保管运输严格按照《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)进行。

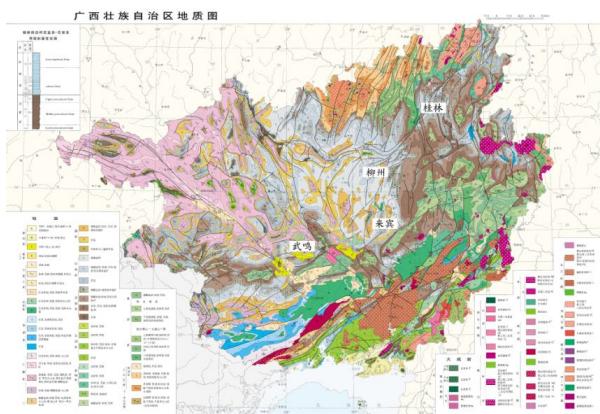


图1 取样地点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling locations

通过室内试验, 获取4种红黏土试样的基本物理性质指标和矿物成分组成, 结果见表1, 2。

表1 红黏土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of red clays

取样地点	密度 ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率 $w/\%$	土粒相对密度 G_s	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	含水比 μ
桂林	1.90	32.1	2.74	0.91	77.8	42.1	0.41
柳州	1.87	33.2	2.75	0.96	70.8	29.3	0.46
来宾	1.85	34.8	2.76	1.01	82.0	42.4	0.42
武鸣	1.70	34.3	2.75	1.17	83.0	54.1	0.41

表2 红黏土的矿物成分组成

Table 2 Mineral compositions of red clays

取样地点	矿物成分组成/%				
	高岭石	三水铝石	伊利石	针铁矿	石英
桂林	58.89	11.90	—	16.25	12.96
柳州	20.91	—	24.52	7.90	46.67
来宾	25.60	—	7.47	13.98	52.95
武鸣	83.38	14.12	—	2.50	—

2 试验方案及过程

土样的热物理特性参数测试采用Decagon公司研制的KD2 Pro土壤热特性分析仪(见图2), 其测试原理基于线热源理论, 可归结于在无限大介质中有一恒定线热源径向一维稳态导热的求解问题^[16]。

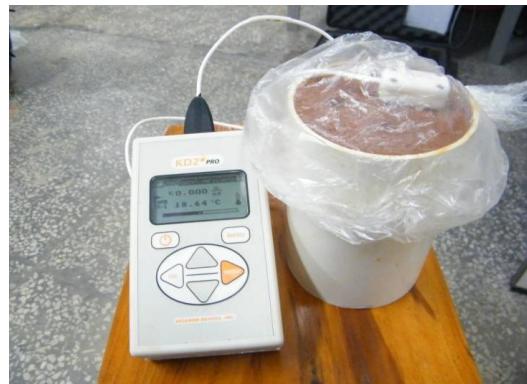


图2 土样热物理特性参数测试过程

Fig. 2 Testing process of thermal properties of soil

试验过程如下:

(1) 制备试样。按设定的干密度和含水率(见表3, 4)在PVC管中分4层击实试样(直径 $\phi=10.4\text{ cm}$, 高度 $h=12.0\text{ cm}$); 为消除层面影响, 每一层击实后均将试样层面“刮毛”; 每组准备3个平行试样(相同干密度和含水率); 试样制备后, 静置12 h。

(2) 测定试样的热物理特性参数。将KD2 Pro土壤热特性分析仪的传感器TR-1(单针)和SH-1(双针)依次插入制备好的红黏土试样中, 测试试样的热

物理特性参数(热导率 K , 容积比热容 C_v , 热扩散系数 D), 测试过程如图2所示。

表3 含水率影响试验试样的制备要求

Table 3 Preparation requirements of samples for water content impact tests

取样地点	干密度 ρ_d ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	质量含水率 w
桂林	1.0	9%, 14%, 17%, 19%, 23%, 25%, 28%, 30%, 33%, 35%, 37%, 41%, 43%, 46%, 48%, 50%
		8%, 12%, 14%, 16%, 17%, 18%, 21%, 24%, 26%, 28%, 30%, 32%, 34%, 38%, 42%, 44%
		14%, 16%, 17%, 19%, 21%, 23%, 25%, 28%, 30%, 32%, 34%, 39%, 47%, 49%
	1.0	16%, 20%, 22%, 24%, 28%, 31%, 34%, 40%, 44%, 47%, 49%, 52%, 54%, 56%, 58%, 60%
		30%, 32%, 34%, 40%
		30%, 32%, 34%, 40%

表4 干密度影响试验试样的制备要求

Table 4 Preparation requirements of samples for dry density impact tests

取样地点	密度 ρ_d ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	质量含水率 w
桂林	1.0	30%, 32%, 34%, 40%
	1.1	30%, 32%, 34%, 40%
	1.2	30%, 32%, 34%, 40%
柳州	1.0	24%, 26%, 28%, 30%
	1.1	24%, 26%, 28%, 30%
	1.2	24%, 26%, 28%, 30%
来宾	1.0	23%, 26%, 29%, 32%
	1.1	23%, 26%, 29%, 32%
	1.2	23%, 26%, 29%, 32%

(3) 实测试样的含水率。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 w , 并换算成体积含水率 θ_v ($\theta_v = \rho_d \cdot w$)。

(4) 数据处理。将每组试样的测试结果进行比较, 剔除异常值, 取余下数据的平均值作为最终试验结果。

3 试验结果及分析

3.1 含水率对红黏土热物理特性的影响

(1) 红黏土热导率与体积含水率的关系

图3为桂林、柳州、来宾、武鸣4种红黏土试样热导率与体积含水率的关系曲线。由此可知: 在相同干密度情况下, 4种红黏土的热导率均随体积含水率增加而呈现分段递增的趋势; 低含水率时, 热导率随着含水率的递增而急剧增加; 当含水率增加到某个点

时, 热导率随着含水率的递增而增加的速度大大减缓, 即热导率随着含水率的递增呈缓慢增加甚至趋于稳定的趋势。这个含水率点可称为红黏土的“临界含水率”, 由图3中曲线拐点可估算出桂林、柳州、来宾、武鸣4种红黏土的“临界含水率”分别为0.443、0.350、0.383、0.494 $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

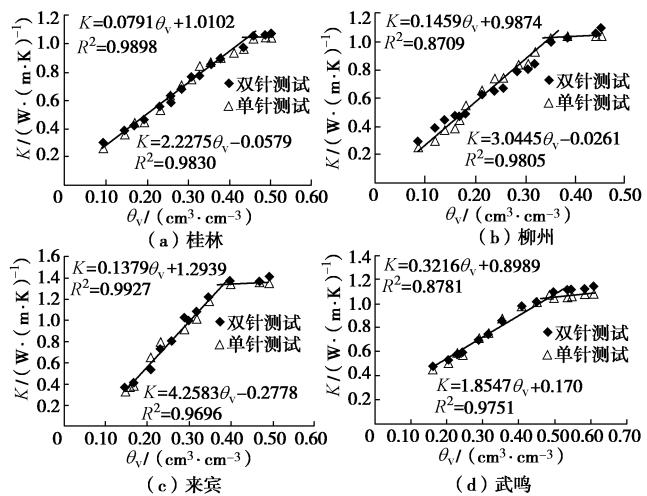


图3 红黏土热导率与体积含水率的关系曲线

Fig. 3 Relationship between thermal conductivity and volumetric water content of red clays

红黏土热导率随体积含水率变化的规律, 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。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”^[10]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。但是, 随着水分的不断增加, 土壤内部的孔隙全部充满水(空气已被完全挤出), 土颗粒之间有效接触面积将增加不明显, 因此, 土壤热导率的增长速率将逐渐变缓并最终趋于稳定。

上述规律也可以从非饱和土理论^[17]方面进行阐述。当土壤饱和度小于80%(即 $S_r < 80\%$)时, 土壤是具有连续气相的非饱和土, 土壤中液态孔隙水被土颗粒或连续气相分隔, 处于不联通的状态。在这种情况下, 由上述分析可知, 土壤含水量状况将直接决定土壤热导率的大小, 土壤热导率将随着含水率的递增而迅速增加。当土壤饱和度大于90%(即 $S_r > 90\%$)时,

土壤是具有连续液相的非饱和土, 即空气被液态孔隙水分隔形成封闭气泡。在这种情况下, 由于液态水是联通的, 土壤孔隙几乎由水充填, 封闭气泡对土壤热导率的影响基本可以忽略, 因此土壤的热导率将维持于一个相对稳定值。当土壤饱和度在 80% 至 90% 之间时, 非饱和土出现介乎连续气相与封闭气泡之间的过渡状态。在这种情况下, 随着含水率的增加, 由于封闭气泡的存在, 土壤液态水对热导率的影响将不如含水率低 ($S_r < 80\%$) 时那么显著, 而是一个缓慢的增长过程。

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 3 中的曲线特点, 采用最小二乘法对上述 4 种红黏土的热导率与含水率的关系曲线进行分段拟合, 结果见图 3。由此可知, 4 种红黏土的热导率与含水率具有较好的线性关系, 用公式表示如下:

$$\left. \begin{array}{l} K = A \cdot \theta_v + B \quad (0 \leq \theta_v \leq \theta_{v-critical}), \\ K = C \cdot \theta_v + D \quad (\theta_v > \theta_{v-critical}) \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中 A, B, C, D 为拟合系数; $\theta_{v-critical}$ 为临界含水率, 与红黏土类型有关 (本文中桂林、柳州、来宾、武鸣 4 种红黏土的临界含水率依次为 0.443、0.350、0.383、0.494 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)。该公式近似地反映了广西红黏土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) 红黏土容积比热容与体积含水率的关系

图 4 为上述 4 种红黏土试样容积比热容与体积含水率的关系曲线。由此可知, 在相同的干密度情况下, 4 种红黏土的容积比热容均随体积含水率的增加而线性递增。

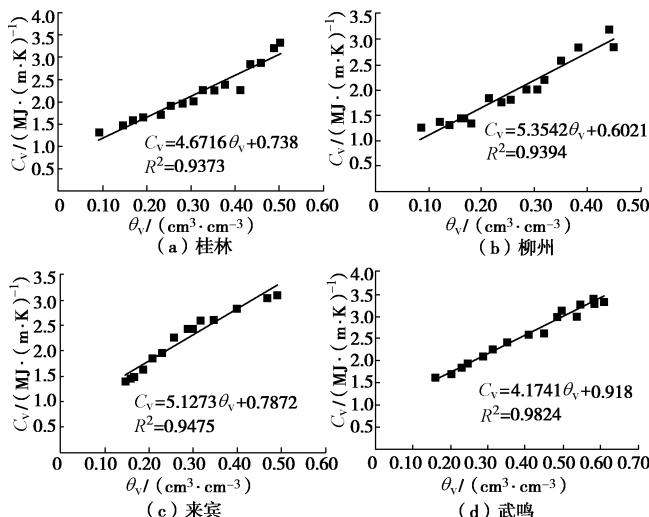


图 4 红黏土容积比热容与体积含水率的关系曲线

Fig. 4 Relationship between specific heat capacity and volumetric water content of red clays

土壤固、液、气三相组成的容积比热容存在很大差异, 而且土壤基本固体物质的比热容也不相同^[17], 一般固体矿物质的比热容小于有机质的值。De Vires^[18]建议将土壤矿物质和有机质的容积比热容分别定为 1.932 和 2.52 $\text{MJ} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{k})^{-1}$, 水的容积比热容为 4.2 $\text{MJ} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{k})^{-1}$, 而空气容积比热容的值很小, 可以忽略。这样, 土壤的体积比热容表示为

$$C_v = \theta + 0.46(\phi - X_0) + 0.6X_0 \quad , \quad (2)$$

式中, X_0 为有机质的容量分数, ϕ 为土壤孔隙度, θ 为土壤体积含水率。

由公式 (2) 可知, 由于土壤空气的热容量比较小, 固相的热容量又小于水的热容量值, 一般情况下固相的热容量为常数, 因此, 土壤的热容量主要取决于土壤的含水量状况, 随着含水率的增加而递增。由图 4 可知, 上述 4 种红黏土的容积比热容与体积含水率呈现较好的线性拟合关系, 两者的关系可统一表达为

$$C_v = E \cdot \theta_v + F \quad , \quad (3)$$

式中, E, F 为拟合系数, 与红黏土类型有关。

(3) 红黏土热扩散率与体积含水率的关系

热扩散率为热导率与相应比热容的比值, 可由上文中实测的红黏土热导率和比热容值计算得出, 其与体积含水率之间的关系曲线如图 5 所示。

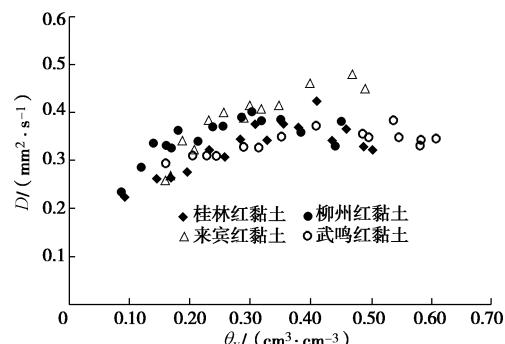


图 5 红黏土热扩散率与体积含水率的关系曲线

Fig. 5 Relationship between thermal diffusivity and volumetric water content of red clays

由上述分析可知: 红黏土的热导率和比热容均是含水率的函数, 而且二者均随着含水率的增加而递增; 比热容与含水率呈单一线性关系 (见图 4), 而热导率与含水率呈分段线性递增关系 (见图 3), 二者随含水率的递增幅度与含水率大小有关, 低含水率时, 随着体积含水率的增加, 红黏土热导率的增长幅度远大于比热容的增加值, 高含水率时, 情况则截然相反。因此热扩散率与含水率的关系呈现出抛物线变化趋势。由图 5 可看出, 上述 4 种红黏土的热扩散率在开始阶段均随着含水率的增加而递增, 在某个含水率临

界点出现峰值，此后，随着含水率的增加，各个土样的热扩散率反而递减。即热扩散率与含水率的关系呈现出抛物线变化趋势，造成这一现象的主要原因是红黏土的热导率和比热容随含水率变化的增加幅度不同。进一步分析图 5 中各曲线拐点，可估算出桂林、柳州、来宾、武鸣 4 种红黏土的热扩散率出现最大值的含水率点依次为 0.443、0.350、0.383、0.494 cm³·cm⁻³，与上述的“临界含水率”一一对应。

3.2 干密度对红黏土热物理特性的影响

(1) 红黏土热导率与干密度的关系

图 6 为桂林、柳州、来宾 3 种红黏土试样热导率与干密度的关系曲线。

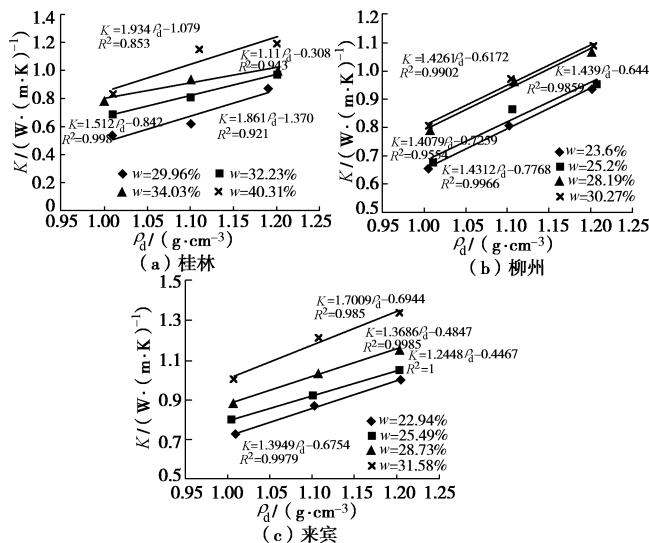


图 6 红黏土热导率与干密度的关系曲线

Fig. 6 Relationship between thermal conductivity and dry density of red clays

由此可知，在相同的质量含水率情况下，3 种红黏土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。

(2) 红黏土容积比热容与干密度的关系

图 7 为桂林、柳州、来宾 3 种红黏土试样热导率与干密度的关系曲线。

由图 7 可知，在相同的质量含水率情况下，桂林、柳州、来宾 3 种红黏土从整体趋势来看，容积比热容随干密度的增加而递增。理论上来说，土体的比热容取决于其所含固相、液相、气相的百分比含量及三相组成各自的比热容，但固相中矿物成分对其影响显著，这将在后文中论述。

(3) 红黏土热扩散率与干密度的关系

图 8 为桂林、柳州、来宾 3 种红黏土试样热扩散

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，上述 3 种红黏土的热扩散率均随着干密度的增大而呈现线性递增的趋势。

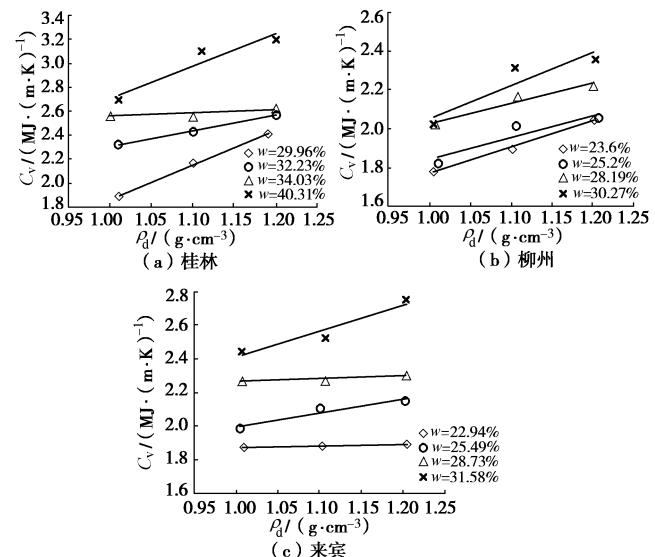


图 7 红黏土比热容与干密度的关系曲线

Fig. 7 Relationship between specific heat capacity and dry density of red clays

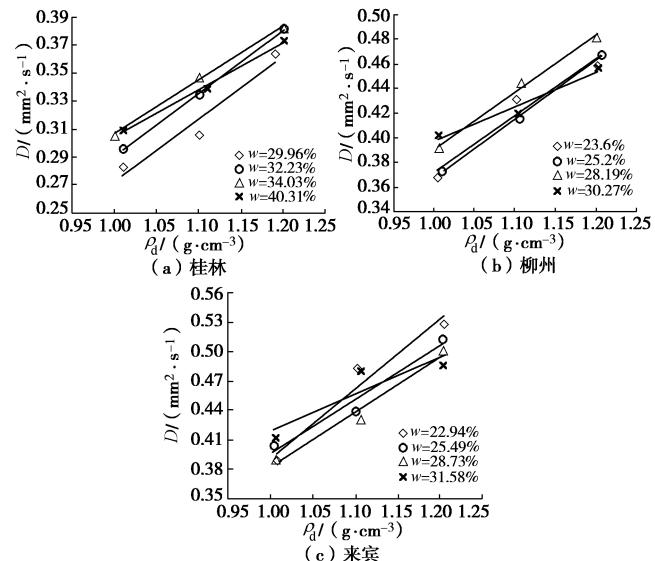


图 8 红黏土热扩散率与干密度的关系曲线

Fig. 8 Relationship between thermal diffusivity and dry density of red clays

3.3 矿物成分对红黏土热物理特性的影响

研究表明，影响土体热物理特性的因素除了含水率和干密度，矿物成分也是一个重要因素，土壤中石英含量越高，热量在土体中的热传导就越快。由表 2 可知，上述 4 种红黏土的矿物组成中，石英的含量最大，而热导率是红黏土热物理特性中最显著和常用的参数，因此，本文仅探讨石英对红黏土热导率的影响。

N.H.Abu-Hamdeh^[19]研究了土壤黏粒含量对土壤

热导率的影响, 结果表明黏粒含量越多, 土壤的热导率越小。文献[19]中采用的 3 种土壤 (Sand, Sand loam 和 Clay loam) 分别是由砂、粉土和黏土按不同比例混合制成的土样, 其最主要的矿物成分是石英。因此, 可以利用文献[19]和上述 4 种红黏土的试验数据研究石英对土壤热导率的影响。

(1) 各种土样中石英含量的确定

根据文献[19]和表 2 分别确定 Sand、Sand loam、Clay loam、桂林红黏土、柳州红黏土、来宾红黏土和武鸣红黏土各自的石英含量, 见表 5。

表 5 各种土样中石英含量

Table 5 Quartz contents of soils

土样类型	Sand	Sand loam	Clay loam	来宾红黏土	柳州红黏土	桂林红黏土	武鸣红黏土
石英含量/%	98.27	85.20	56.71	52.95	46.67	12.96	0.00

(2) 各土样热导率随体积含水率变化曲线的确定

文献[19]的试验数据综合考虑了矿物成分、含水率、干密度等诸多因素对热导率的影响。为了仅考虑石英含量对热导率的影响, 笔者将文献[19]中各土样的热导率拟合成受干密度和体积含水率二者共同影响的一个线性函数 $f(w, \rho_d) = aw + b\rho_d + c$, 拟合结果见表 6。假设各土样干密度均保持不变, 即 $\rho_d = 1.0 \text{ g/cm}^3$, 分别得到 Sand、Sand loam、Clay loam 三种土样热导率与体积含水率的关系曲线, 如图 9 所示。

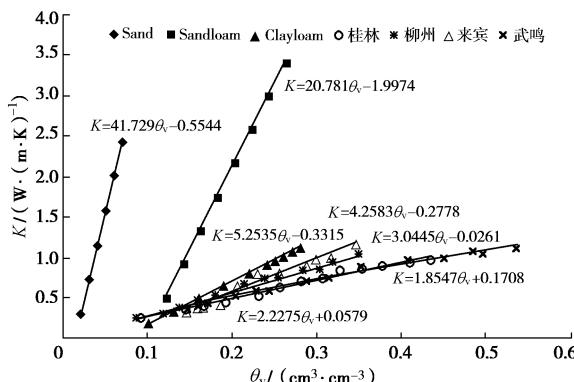


图 9 热导率随体积含水率增长的关系曲线

Fig. 9 Relationship between thermal conductivity and volumetric water content

表 6 函数拟合值

Table 6 Fitting values of function

土样类型	a	b	c	R ²
Sand	42.72865	2.915064	-3.46945	0.8359
Sand loam	20.78078	5.764563	-7.76200	0.9918
Clay loam	5.253502	1.382321	-1.71386	0.8930

为了探讨土样热导率与石英含量的关系, 结合图 3, 将桂林、柳州、来宾、武鸣 4 种红黏土热导率与体积含水率的关系曲线 (土样含水率低于“临界含水率”部分) 也绘于图 9 中。

(3) 石英含量对土体热导率的影响规律

由图 9 可知, 上述 7 种土样按照曲线斜率值大小排列依次为: Sand (42.729) > Sand loam (20.781) > Clay loam (5.254) > 来宾红黏土 (4.258) > 柳州红黏土 (3.045) > 桂林红黏土 (2.228) > 武鸣红黏土 (1.855)。根据表 5 可知, 上述 7 种土样按照土中石英含量的多少排列依次为: Sand (98.27) > Sand loam (85.20) > Clay loam (56.71) > 来宾红黏土 (52.95) > 柳州红黏土 (46.67) > 桂林红黏土 (12.96) > 武鸣红黏土 (0)。由此可见, 曲线斜率值和石英含量具有非常好的对应关系, 如图 10 所示。综合以上分析可知, 石英含量对土体的热导率具有显著的影响, 两者呈正相关的关系。

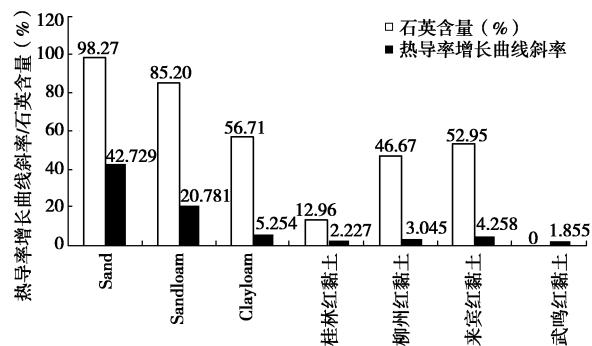


图 10 石英含量与热导率曲线斜率值对照图

Fig. 10 Comparison between slope value of thermal conductivity and quartz content

4 结 论

(1) 相同干密度情况下, 4 种红黏土的热导率、比热容均随体积含水率的增加而递增; 热导率以临界含水率为界点分为两个阶段, 第一阶段热导率急剧增加, 第二阶段热导率增长缓慢, 渐趋于稳定; 比热容与体积含水率呈单一的线性增长关系。4 种红黏土的热扩散率均先随含水率的增加而递增, 到达临界含水率后随含水率的增加而递减, 整体呈抛物线的变化趋势。

(2) 相同质量含水率情况下, 4 种红黏土的热导率、比热容、热扩散率均随干密度的增加而递增, 具有较好的线性关系。

(3) 红黏土矿物组成中的石英含量对土体的热导率具有显著的影响, 石英含量与热导率增长速率呈正相关的关系。

参考文献:

- [1] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3345 - 3351. (SUN De-an, LIU Wen-jie, LU Hai-bo. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3345 - 3351. (in Chinese))
- [2] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红黏土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, **25**(3): 369 - 373. (ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behavior of compacted lateritic clay in Guangxi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(3): 369 - 373. (in Chinese))
- [3] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红黏土的基本特性与微观结构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, **33**(4): 458 - 462. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **33**(4): 458 - 462. (in Chinese))
- [4] 吕海波, 曾召田, 尹国强, 等. 广西红黏土矿物成分分析[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(5): 651 - 656. (LU Hai-bo, ZENG Zhao-tian, YIN Guo-qiang, et al. Analysis of mineral composition of red clay in Guangxi[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(5): 651 - 656. (in Chinese))
- [5] 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. (ZHAO Yan-lin, ZENG Zhao-tian, LU Hai-bo, 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. (in Chinese))
- [6] ABU-HAMDEH N H. Thermal properties of soils as affected by density and water content[J]. Biosystems Engineering, 2003, **86**(1): 97 - 102.
- [7] 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. (SU Tian-ming, LIU Tong, LI Xiao-zhao, 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. (in Chinese))
- [8] 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. (WANG Tie-xing, LIU Zi-cheng, 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. (in Chinese))
- [9] 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. (XIAO Lin, LI Xiao-zhao, ZHAO Xiao-bao, 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. (in Chinese))
- [10] 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. (YU Ming-zhi, CAO Xi-zhong, WANG Shan-ming, 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. (in Chinese))
- [11] 栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 北京平原区粉质黏土热导率影响因素实验研究[J]. 中国地质, 2013, **40**(3): 981 - 988. (LUAN Ying-bo, ZHENG Gui-sen, WEI Wan-shun. 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. (in Chinese))
- [12] 陈善雄, 陈守义. 砂土热导率的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(5): 47 - 53. (CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Experimental study on thermal conductivity of sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(5): 47 - 53. (in Chinese))
- [13] 廖义玲, 余培厚. 红黏土的微结构及其概化模型[J]. 工程地质学报, 1994, **2**(1): 27 - 37. (LIAO Yi-ling, YU Pei-hou. The microstructure and generalized model of red clay[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, **2**(1): 27 - 37. (in Chinese))
- [14] 廖义玲, 朱立军, 周训华. 土体中惰性孔隙及其物理力学属性的研究[J]. 工程勘察, 2001(1): 5 - 8. (LIAO Yi-ling, ZHU Li-jun, ZHOU Xun-hua. Study on inert pore in soil and its physical mechanic property[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(1): 5 - 8. (in Chinese))
- [15] 曾召田. 岩溶地区红黏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. (ZENG Zhao-tian. 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. (in Chinese))

(下转第 134 页)