

含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究

叶万军, 董西好, 杨更社, 陈强, 彭瑞奇, 刘宽

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 黄土的热参数是黄土灾害成因机制研究及热工计算中的重要指标, 而含水率和干密度对黄土的热参数具有一定的影响。对不同含水率、不同干密度黄土试样, 采用 Test Protocol Hot Disk TPS 2500S 型热常数分析仪, 在常温下开展热参数试验, 探讨黄土热参数随含水率及干密度的变化规律。研究结果表明: 黄土试样含水率一定时, 干密度越大, 其导热系数、比热容及热扩散系数也越大; 黄土试样的导热系数和比热容随含水率的增大基本呈线性规律增大; 当含水率较低时, 热扩散系数随含水率的增大而增大; 当达到一定含水率时, 热扩散系数随含水率的增大而减小; 继续增大含水率, 热扩散系数趋于稳定。含水率对黄土热参数的影响程度大于干密度对其热参数的影响程度。在热工计算中, 可根据土体含水率和干密度动态地选择热参数。

关键词: 黄土; 热参数; 含水率; 干密度; 导热系数; 比热容; 热扩散系数

中图分类号: TU 441+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)03-0656-07

Effect of moisture content and dry density on thermal parameters of loess

YE Wan-jun, DONG Xi-hao, YANG Geng-she, CHEN Qiang, PENG rui-qi, LIU Kuan

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The thermal parameters of loess are the important indexes in the study of loess disaster and thermal calculation, while the water content and dry density have a certain influence on the parameters. Thermal parameters of loess samples with different dry densities and different moisture contents are tested in normal temperature by using thermal constant analyzer Test Protocol Hot Disk TPS 2500S to explore the variations of thermal parameters of loess which are influenced by moisture contents and dry densities. The study reveals that: with a constant moisture content of the loess samples, the higher the dry density is, the greater the thermal conductivity, the specific heat capacity and the thermal diffusivity are. The thermal conductivity and specific heat capacity of loess samples increase linearly with the increase of moisture contents. When the moisture content is low, the thermal diffusivity increases with the increase of moisture content. When a certain moisture content is reached, the thermal diffusivity decreases with the increase of the moisture content. The thermal diffusivity tends to be stabilized with the continual increase of the moisture content of loess samples. The impact on the thermal parameters by the moisture content of loess is greater than that by the dry density of loess. In thermal engineering calculation, thermal parameters can be dynamically selected in accordance with soil moisture.

Keywords: loess; thermal parameter; moisture content; dry density; thermal conductivity; specific heat capacity; thermal diffusivity

1 引言

我国黄土地区处于季节性冻土区, 黄土受外界环境影响明显, 工程性质易发生变化^[1-4]。黄土灾害的形成受土体中水分迁移、热量贮运及能量交换的影响^[2-3], 而土体热参数(导热系数、热扩散系数及比热容)是影响土体水分迁移、热量贮运及能量交

换的主要因素^[4-6]。关于土体热参数问题, 不少学者也进行了深入的研究^[7-12], 但针对土体特别是原状黄土的热参数影响因素的量化分析仍需亟待开展。黄土的热参数与土体粒径、成分、孔隙率、含水状态、干密度等参数密切相关^[8-9], 而含水状态对黄土热参数的确定尤为显著, 目前确定土体热参数或者实测热参数方法的可行性值得探讨, 在土体热工计

收稿日期: 2015-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41672305, No.41172262); 陕西省青年科技新星项目(No.KJXX-37); 陕西省重点科技创新团队计划(No.2014KCT-30)。

This work was supported by Chinese National Natural Science Foundation (41672305, 41172262), the Youth Star Project of Science and Technology in Shaanxi Province (KJXX-37) and the Key Technology Innovation Team in Shaanxi Province (2014KCT-30).

第一作者简介: 叶万军, 男, 1976年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、地质工程等方面的教学与科研工作。E-mail: 63451400@qq.com

算分析中, 由于土体热参数的取值基于人们对土体性质的经验判断, 主观成分较大, 造成计算结果的误差也较大; 另外, 黄土为一种特殊的第四纪沉积物, 区域性较强, 经验取值不能从总体上描述含水率和干密度对黄土热参数的影响。

本文采用 Test Protocol Hot Disk TPS 2500S 型热常数分析仪, 在常温下开展原状黄土热参数试验, 探讨黄土热参数随含水率及干密度的变化规律, 为黄土土工计算理论研究提供合理的计算参数, 为黄土地质灾害形成机制分析、模拟和计算参数的选取提供参考。

2 试验介绍

2.1 试验土样

试验所用土样为陕西宝鸡陈仓区、铜川王益区、榆林府谷县等地区不同深度的 Q_2 黄土。各地区黄土试样平均物理指标见表 1。由表可见, 宝鸡黄土的初始天然含水率及干密度最大, 铜川黄土的次之, 榆林黄土的最小。

表 1 原状黄土样平均物理性质指标

Table 1 Indexes of physical properties of undisturbed loess samples

地区	含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	相对密度 ρ_s
宝鸡	4.21	1.65	0.648	29.6	18.3	2.72
铜川	3.03	1.59	0.704	24.9	15.5	2.71
榆林	2.37	1.46	0.856	15.9	8.7	2.71

2.2 试验设备

本次试验采用西安科技大学冻融灾害试验室引进的 Test Protocol Hot Disk TPS 2500S 型热常数分析仪 (见图 1) 完成, 该仪器内阻值 $R=6.936\ 806\ \Omega$, 导热系数测试范围为 $0.005\sim 500\ W/(m\cdot K)$, 温度范围为 $-10^\circ C\sim 1\ 000^\circ C$, 可同时测得导热系数、热扩散系数和比热容, 测量精度分别为 $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 7\%$



图 1 Test Protocol Hot Disk TPS 2500S 型热常数分析仪

Fig.1 Test Protocol Hot Disk TPS 2500S thermal constant analyzer

倍的对应热参数值。

Hot Disk 是材料热传导性能测试的高性能仪器, 应用范围较广。从绝缘材料到高散热材料都可以检测, 是目前全世界应用面及检测应用面最广的热导系数仪。该仪器采用瞬态平面热源法 (transient plane source method, TPS) 测定材料的热物性, 其原理是假定探头被置于无限大介质中形成热源产生的瞬态温度响应。测试时, 探头被夹在两块样品中间, 当探头输出功率恒定的直流电时, 探头被加热, 可测得电阻值随时间变化的关系, 进而求得探头温度随时间的变化, 从而得到材料的导热系数、比热容、热扩散系数。

2.3 试验参数的确定

(1) 测试时使用 5501 型探头, 半径为 $6.403\ mm$, 需满足探头半径的二倍加 $10\ mm$ 小于试样的高度, 且试样直径不小于高度, 确定土样尺寸为 $\phi 50\ mm\times 30\ mm$ 。

(2) 陕西黄土区地处半干旱、半湿润地区, 考虑天然含水率一般为 $5\%\sim 20\%$, 本次试验确定黄土目标含水率为 6% 、 10% 、 14% 、 18% 。

2.4 试验步骤

在试验室配备不同含水率黄土试样, 开展不同地区黄土样热参数试验。试验步骤如下:

(1) 在试验室制备土样, 为了保证试验结果的可靠性, 每个地区各取 10 组土样, 按照 8 个土样为一组进行编号, 以便于进行双面法测试;

(2) 测试天然含水率下试样热参数值;

(3) 按照目标含水率为 6% 、 10% 、 14% 、 18% 的顺序采用“水膜迁移法”依次改变土样含水率, 即根据所配水量的多少, 用 $5\ ml$ 的医用注射器在试样表面各处均匀、缓慢滴入所需的水量, 然后将试样放在密闭的养护缸里养护 $48\ h$, 试验过程中严格控制所滴入试样的用水量。每次改变土样含水率后待水分迁移扩散均匀, 从养护缸中取出, 对其热参数进行测试。

测试时设置初始试验参数加热时间 (s) 和加热功率 (w), 根据初次测试结果调整试验参数, 直至系统采集的数据温升在 $0.3^\circ C\sim 3^\circ C$ 范围内, 特征比值在 $0.3\sim 1.0$ 范围内, 试验数据为有效值。

(4) 在 3 个地区各选择 5 种干密度土样, 重复步骤 (2)、(3), 测定不同干密度下黄土的热参数。

试验完毕后, 测定各土样最终的实际含水率和干密度。表 2 为实测的不同地区黄土的部分导热系数 ($W/(m\cdot k)$)、比热容 ($MJ/(m^2\cdot k)$)、热扩散系数值 (mm^2/s)。

表2 黄土的热参数值实测结果
Table 2 Tested thermal parameters of loess

地区	含水率 /%	干密度 /(g/cm ³)	导热系数 W/(m·K)	比热容 MJ/(m ² ·K)	热扩散系数 /(mm ² /s)
宝鸡	6.0	1.600	0.781	1.297	0.539 7
	10.1	1.630	1.063	1.472	0.585 9
	14.1	1.670	1.220	1.991	0.678 1
	17.9	1.598	1.198	2.118	0.495 6
	18.0	1.651	1.308	2.519	0.558 9
	18.2	1.709	1.382	2.723	0.825 8
铜川	6.2	1.510	0.687	1.174	0.524 0
	9.9	1.550	0.926	1.472	0.545 5
	14.0	1.610	1.102	1.990	0.590 3
	18.1	1.511	1.001	1.938	0.507 7
	18.1	1.592	1.140	2.183	0.522 2
	17.9	1.629	1.172	2.311	0.549 8
榆林	6.2	1.390	0.531	0.994	0.423 2
	10.0	1.430	0.673	1.357	0.447 0
	14.1	1.500	0.918	1.900	0.503 1
	18.2	1.390	0.947	1.775	0.420 5
	17.8	1.461	1.027	2.009	0.450 4
	18.1	1.518	1.099	2.162	0.484 3

3 试验结果及分析

3.1 含水率对黄土导热系数的影响规律

图2为不同地区原状黄土导热系数随含水率的变化曲线。由图可以看出,3个地区Q₂黄土导热系数均随含水率的增大基本呈线性规律增大,且不同地区黄土导热系数随含水率增大而增大的幅度略有不同。例如,当目标含水率由6%增大到18%时,榆林、铜川、宝鸡黄土的导热系数分别增大了67.3%、46.0%、32.7%。为了进一步探讨导热系数与土体含水率的关系,也为了应用的方便,通过分析试验结果,对其进行拟合,土体导热系数 λ 与含水率 w 的关系可表达为

$$\lambda = aw + b \quad (1)$$

式中: w 为土体的含水率; a 、 b 为与土体、试验条件等有关的参数,具体数值见表3。以榆林黄土为例,采用关系式(1)对不同含水率土体的导热系数进行拟合,得到 $a=0.0366$ 、 $b=0.3683$ 。由图2可以发现,拟合效果较好,拟合直线的相关系数 $R^2=0.9992$,因此,在黄土样含水率在5%~18%范围内, λ 与 w 之间呈极好的线性相关性。

根据图2及式(1)分析如下:土体由固体颗粒、水和孔隙中的气体导热,固体颗粒的导热系数通常为1~5 W/(m·K),而水、气导热系数分别为0.5 W/(m·K)、0.023 W/(m·K),当土体含水率较小时,

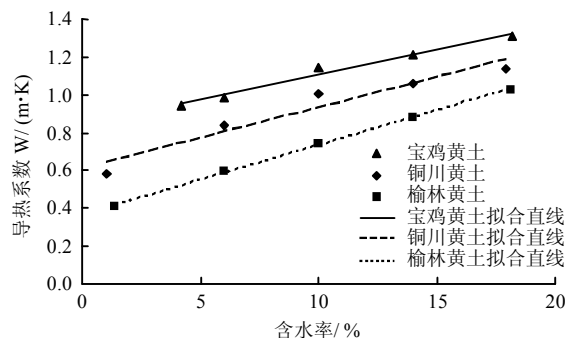


图2 不同地区黄土导热系数随含水率的变化曲线
Fig.2 Variation curves of thermal conductivity with moisture content of loess in different regions

表3 导热系数拟合曲线的参数
Table 3 Thermal conductivity fitting curve parameters

地区	a	b	R^2
宝鸡	0.026 4	0.842 3	0.980 0
铜川	0.032 3	0.610 2	0.936 6
榆林	0.036 6	0.368 3	0.999 2

孔隙较多,土体主要通过颗粒进行热量的传导,导热性能较差,增加土体的含水率,孔隙中的一部分气体被水填充,导热性能好的水代替了导热性能差的气体,且水分增加了矿物颗粒骨架之间的联系,颗粒间接触点上出现的水膜减小了颗粒间接触热阻,使土体的导热性能增强。另外,黄土具有湿陷性,随着含水率的增大,一系列物理、化学变化随之发生,在自重的作用下,土体产生压缩变形,土颗粒之间的接触面积增大,接触热阻减小,从而提高了整体的导热性能。榆林黄土的湿陷性最大,铜川的次之,宝鸡的最小,增加相同的含水率,初始含水率、自重湿陷系数越大,黄土的导热系数的变化值也越大。

3.2 含水率对黄土比热容的影响规律

图3为不同地区黄土比热容随含水率的变化曲线。由图可见,随着含水率的增大,Q₂黄土的比热容亦呈线性规律增大,且含水率对不同地区黄土比热容的影响程度不同。如目标含水率由6%增大到18%时,每增加4%的含水率,宝鸡、榆林、铜川黄土的比热容平均增大0.301、0.294、0.255 MJ/(m³·K)。分析认为,土是由固、液、气组成的三相物质,常温下水和空气的比热容约为4.183×10⁻³ MJ/(m³·K)、1.005×10⁻³ MJ/(m³·K),由于单位体积的物质改变单位温度时,水要比气体吸收或释放的热量,增大含水率,土体中的气体不断地排除,比热容大的水代替了比热容较小的气体,因此,土体的比热容 c 随含水率 w 的增大而增大。

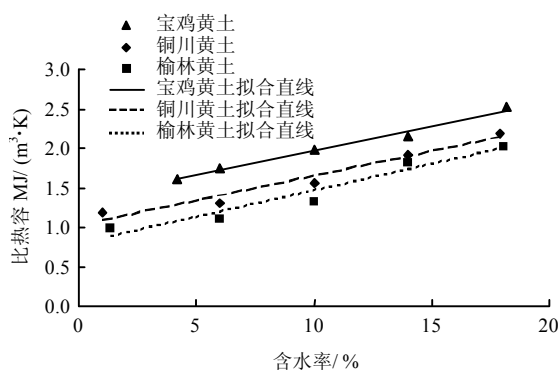


图3 不同地区黄土比热容随含水率的变化曲线
Fig.3 Variation curves of specific heat capacity with moisture content of loess in different regions

从理论上分析, 土体的体积比热容 c 是土体各组成部分——固体颗粒、水、空气的热容量的加权平均, 可以用下式计算^[11]:

$$c = c_s \rho_s + c_l \rho_l + c_g \rho_g \quad (2)$$

式中: c_s 为固体土颗粒的体积比热容; ρ_s 为单位体积土体所含固体土颗粒的质量, 即土体的干密度 ρ_d ; c_l 为水的体积比热容; ρ_l 为体积含水率, $\rho_l = \rho_d w$; c_g 为空气的比热容; ρ_g 为土体中空气的含量。

由于土颗粒和水的体积比热容比空气的大得多, 所以 $c_g \rho_g$ 非常小, 在一定程度上可以不计, 由于 $\rho_l = \rho_d w$, $\rho_s = \rho_d$, 于是式 (2) 可写成为

$$c = c_s \rho_s + c_l \rho_l = \rho_d (c_s + c_l w) \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出, 土体的比热容 c 与含水率 w 呈正比, 这与试验结果一致。各地区黄土热参数拟合公式如下:

$$c = \rho_{d\text{宝鸡}} (0.821 + 0.037w) \quad (4)$$

$$c = \rho_{d\text{铜川}} (0.644 + 0.039w) \quad (5)$$

$$c = \rho_{d\text{榆林}} (0.542 + 0.045w) \quad (6)$$

3.3 含水率对黄土热扩散系数的影响规律

图4为不同地区黄土热扩散系数随含水率的变化曲线。由图可以发现, 含水率对黄土热扩散系数的影响明显不同于对导热系数和比热容的影响。当含水率较低时, 热扩散系数随含水率的增大而增大; 当达到一定含水率时, 热扩散系数随含水率的增大而减小; 继续增大含水率, 热扩散系数趋于稳定。不同地区黄土热扩散系数 α 达到最大值时对应的含水率不同, 宝鸡、榆林黄土的为10%, 铜川黄土

的为6%。分析认为, 当含水率较低时, 土体内的孔隙率较大, 土体主要依靠土颗粒和孔隙间的气体进行热量的扩散, 随着含水率的增大, 土体发生自重湿陷, 土体变得更加密实, 且颗粒间接触点上出现的水膜促进了颗粒间的联系, 热量的扩散加快。常温下空气的热扩散系数大约是水的1500倍, 当达到一定的含水率时, 空气随着含水率的增大被排出土体, 热扩散系数小的水代替了热扩散系数大的空气, 导致土体整体的热扩散系数降低。继续增大含水率, 土体接近饱和状态, 此时空气对土体的热扩散贡献几乎可以忽略, 主要由土颗粒和水进行热量的扩散, 而且此时土体内部的物理、化学等一系列变化也基本完成, 土体微观结构不再发生较大的变化, 因此, 热扩散系数趋于稳定。

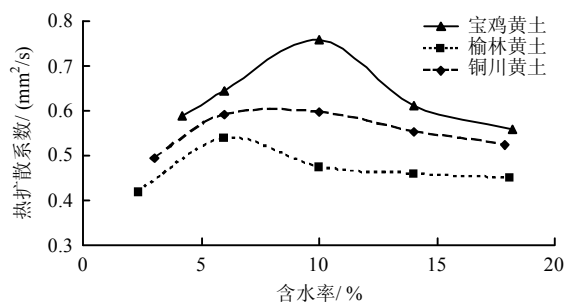


图4 不同地区黄土热扩散系数随含水率的变化曲线
Fig.4 Variation curves of coefficient of thermal diffusivity with moisture content of loess in different regions

由图还可以看出, 含水率一定时, 不同地区黄土热扩散系数不同, 最大值亦不同, 宝鸡黄土的热扩散系数最大值可达 $0.758 \text{ mm}^2/\text{s}$, 铜川黄土的为 $0.597 \text{ mm}^2/\text{s}$, 榆林黄土的仅有 $0.539 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。达到最大值后不同地区黄土热扩散系数降低速度不同, 宝鸡、榆林、铜川黄土的热扩散系数降低速度依次减小。例如, 当热扩散系数达到峰值后再增大4%的含水率, 宝鸡、榆林、铜川黄土的热扩散系数依次减小了 0.1472 、 0.0645 、 $0.0451 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。分析认为, 虽然形成于同一时代, 但由于地区不同, 所处的环境不同, 温度、湿度等一系列差异导致不同地区黄土的孔隙率及孔隙之间的连通性不同, 若孔隙率大, 孔隙之间的连通性好, 则热量扩散的速度快, 反之则慢。另外, 当含水率增大幅度相同时, 由于不同地区黄土的自重湿陷性不同, 初始含水率不同, 导致土体的压缩变形不同, 从而密实度改变量不同, 热扩散系数改变量亦不同。

3.4 干密度对黄土热参数的影响规律

图5~图7为不同地区黄土热参数随干密度的变化曲线。由于目标含水率和实际含水率相差很小,采用目标含水率代替实际含水率基本上不影响分析结果。为了更直观地通过图表反应热参数的变化规律,含水率均采用目标含水率绘制图表。从图5中可以看出,在含水率一定的条件下,不同地区黄土的导热系数均具有随着干密度的增大而增大的趋势。不难发现,导热系数与土体的干密度呈正相关关系,干密度越大,导热系数越大。分析认为,这主要与土体内部矿物质的含量有关,同一地区黄土矿物成分基本相同,所占比例也差别不大,但单位体积不同干密度土体矿物质的含量不同,矿物质含量越多,土体导热能力越强。因此,干密度越大,矿物质的含量越多,孔隙比越小,土体的热参数也就越大。

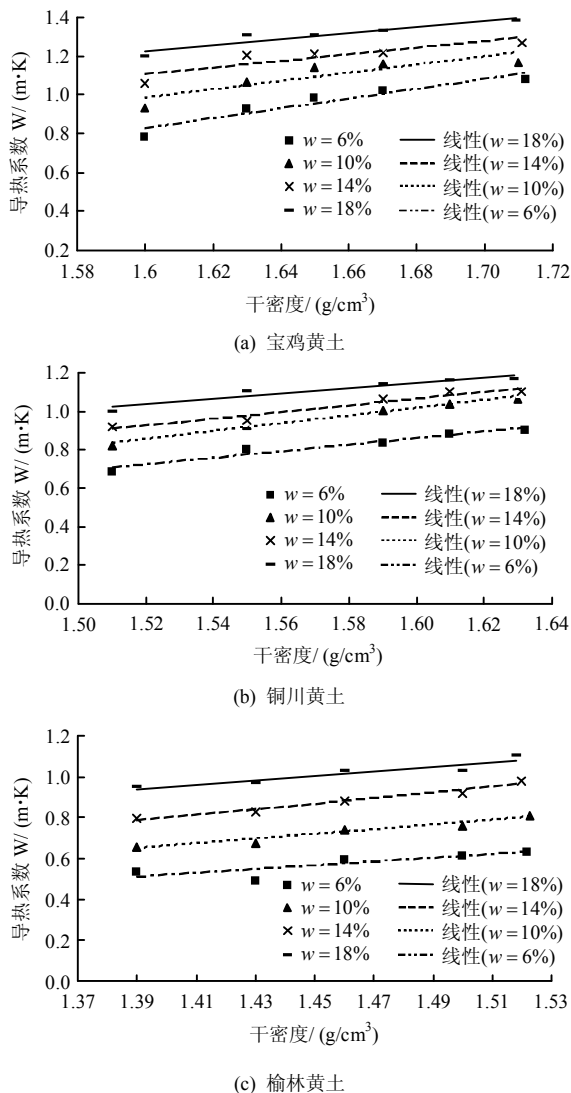


图5 不同地区黄土导热系数随干密度的变化曲线
Fig.5 Variations curves of thermal conductivity with dry density of loess in different regions

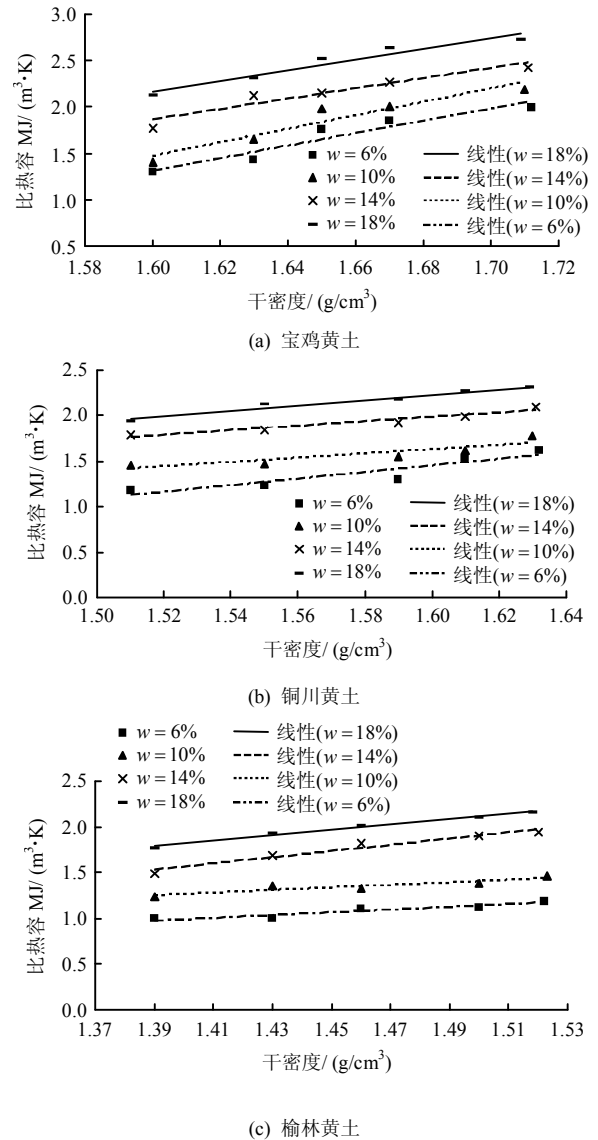
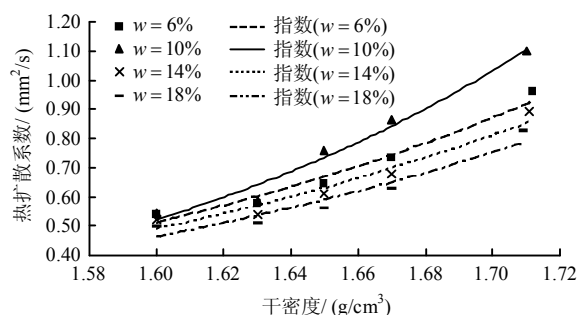


图6 不同地区黄土比热容随干密度的变化曲线
Fig.6 Variations curves of specific heat capacity with dry density of loess in different regions

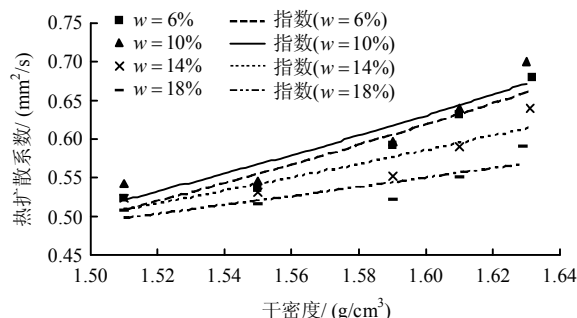
由图6可以发现,在含水率一定的条件下,不同地区黄土的比热容与土样的干密度呈正相关关系,且不同地区黄土的比热容不同,宝鸡黄土的比热容较大,铜川的次之,榆林的最小。分析认为,土颗粒和水的比热容比气体的大得多,因此,土体主要由土颗粒和水吸收热量,当含水率一定时,干密度越大,矿物颗粒含量越多,单位体积的土体升高相同的温度所需的热量就越多,从而比热容越大,即干密度越大,比热容越大,反之亦然。不同地区土体内部各种矿物质的含量不同,而不同矿物质的比热容是不同的,比热容高的矿物质含量越高,土体的吸收的热量就越多,比热容就越大。

由图7可以看出,干密度对黄土的热扩散系数具有一定的影响,热扩散系数随干密度增大大致呈指数关系增长,且干密度越大,热扩散系数增大的

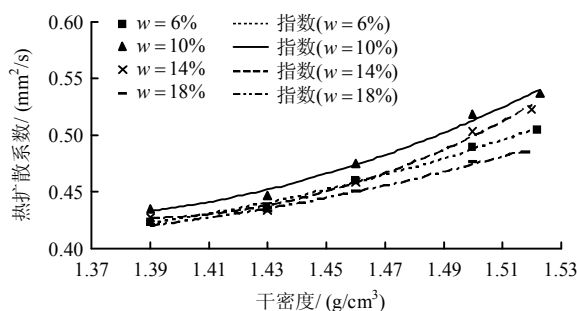
幅度越大。



(a) 宝鸡黄土



(b) 铜川黄土



(c) 榆林黄土

图7 不同地区黄土热扩散系数随干密度的变化曲线
Fig.7 Variations curves of thermal diffusivity with dry density of loess in different regions

从图5~7中还可以发现,不同地区黄土的热参数随干密度增大而增大的幅度略有不同,宝鸡的最大,铜川的次之,榆林的最小。分析认为,这可能有3方面的原因:①黄土的胶结物成份主要是黏土矿物(伊利石、高岭石、绿泥石等)和碳酸钙,不同地区黄土体内不同胶结物所占比例不同,而不同胶结物的热参数是不同的,例如,绿泥石的导热系数高达 $5.15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[16],而碳酸钙的导热系数仅有 $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,若绿泥石含量高、碳酸钙含量低,则黄土导热系数增大的幅度大。②这与土颗粒粒径和微观结构密切相关,陕西地区由西北向东南, Q_2 黄土颗粒粒径逐渐减小,榆林、铜川、宝鸡3地区黄土砂粒含量依次降低,黏粒含量依次增高,而粒

径越小,颗粒之间的接触面积越大,导热性能越好。

③榆林、铜川、宝鸡3地区黄土微观结构也由支架大孔半胶结结构向镶嵌微孔半胶结结构或凝块胶结结构过渡,土颗粒之间的接触更加紧密,导热性能有所提高。

比较不同地区黄土热参数随含水率的变化,可以发现,相对于干密度的不同,黄土热参数随含水率的变化尤为显著,含水率变化可以引起热参数较大的变化。将本文试验结果与已有重塑黄土热参数测试^[8]对比后发现,在含水率相同或者接近的条件下,原状黄土的导热系数比重塑土的要大3%~5%,而比热容比重塑土的要小。分析认为,这是由于原状黄土的干密度比重塑土大的缘故。

4 结 论

(1) 黄土试样的导热系数和比热容均随含水率的增大而增大,而含水率对黄土热扩散系数的影响明显不同于对导热系数和比热容的影响,当含水率较低时,热扩散系数随含水率的增大而增大;当达到一定含水率时,热扩散系数随含水率的增大而减小;继续增大含水率,热扩散系数趋于稳定。

(2) 含水率一定时,不同地区黄土的热参数值不同,宝鸡黄土的热参数值普遍较大,铜川黄土的热参数值次之,榆林黄土的热参数值相对较小,这与土体的干密度有关。黄土的热参数与其干密度呈正相关关系,干密度越大,土体的热参数越大,反之亦然。

(3) 含水率对黄土热参数的影响大于干密度对其热参数的影响。在热工计算中,可根据土体含水率动态及干密度选择热参数。

参 考 文 献

- [1] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 10(2): 2—4.
QI Ji-lin, ZHANG Jian-ming, ZHU Yuan-lin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 10(2): 2—4.
- [2] 齐吉琳, 程国栋, VERMEER P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 887—893.
QI Ji-lin, CHENG Guo-dong, VERMEER P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2005, 20(8): 887—893.
- [3] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性

- 质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1078—1080.
- SONG Chun-xia, QI Ji-lin, LIU Feng-yin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 1078—1080.
- [4] 李国玉, 马巍, 李宁, 等. 冻融对压实黄土工程地质特性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 5—7.
- LI Guo-yu, MA Wei, LI Ning, et al. Experimental research on impact of freezing and thawing on geotechnical properties of compacted loess[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2010, 8(4): 5—7.
- [5] 毕贵权, 张侠, 李国玉, 等. 冻融循环对黄土物理力学性质影响的试验[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(2): 114—117.
- BI Gui-quan, ZHANG Xia, LI Guo-yu, et al. Experiment of impact of freezing-thawing cycle on physico-mechanical properties of loess[J]. **Journal of Lanzhou University of Technology**, 2010, 36(2): 114—117.
- [6] 叶万军, 杨更社, 彭建兵, 等. 冻融循环导致洛川黄土边坡剥落病害产生机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 199—205.
- YE Wan-jun, YANG Geng-she, PENG Jian-bing, et al. Test research on mechanism of freezing and thawing cycle resulting in loess slope spalling hazards in Luochuan[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 199—205.
- [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(6): 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(6): 1278—1283.
- [8] 王铁行, 刘自成, 卢靖. 黄土导热系数和比热容的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 655—658.
- WANG Tie-hang, 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.
- [9] 张三定, 王小波. 武汉地铁二号线土体热参数研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(1): 86—88.
- ZHANG San-ding, WANG Xiao-bo. Soil thermal parameters research on the second subway line of Wuhan[J]. **South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology**, 2009, 7(1): 86—88.
- [10] 张婷, 杨平. 不同因素对浅表土导热系数影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1233—1238.
- ZHANG Ting, YANG Ping. Effect of different factors on the heat conduction coefficient of shallow top soil[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2012, 8(6): 1233—1238.
- [11] 袁巧霞. 温度和含水率对土壤比热容影响的神经网络预测[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 108—111.
- YUAN Qiao-xia. Prediction for the effect of temperature and water content on the soil specific heat by BP neural network[J]. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, 2008, 39(5): 108—111.
- [12] 李兴柏, 李国玉, 毕贵权, 等. 石油污染土体导热系数变化规律和变化机制[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1114—1120.
- LI Xing-bai, LI Guo-yu, BI Gui-quan, et al. Processes and mechanisms of thermal conductivity change of soils polluted by petroleum[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(6): 1114—1120.
- [13] 张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣. 季节性冻土地区高速铁路路基基温分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1807—1812.
- ZHANG Yu-zhi, DU Yan-liang, SUN Bao-chen. Processes and mechanisms of thermal conductivity change of soils polluted by petroleum[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(6): 1807—1812.
- [14] 王旭, 蒋代军, 刘德仁. 低温多年冻土地基大直径钻孔灌注桩未回冻状态承载性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1186—1296.
- WANG Xu, JIANG Dai-jun, LIU De-ren. Experimental study of bearing characteristics of large-diameter cast-in-place bored pile under non-refreezing condition in low-temperature permafrost ground[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(6): 1186—1296.
- [15] 涂新斌, 戴福初. 土体一维传热方程解析解及热扩散系数测定[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 652—657.
- TU Xin-bin, DAI Fu-chu. Analytical solution for one-dimensional heat transfer equation of soil and evaluation for thermal diffusivity[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(5): 652—657.
- [16] 肖衡林, 吴雪洁, 周锦华. 岩土材料导热系数计算研究[J]. 路基工程, 2007, 132(3): 54—56.
- XIAO Heng-lin, WU Xue-jie, ZHOU Jin-hua. Calculation for the coefficient of thermal conductivity of rock and soil materials[J]. **Subgrade Engineering**, 2007, 132(3): 54—56.