

doi: 10.11799/ce201810011

非饱和黄土物理力学参数与导热系数关系的研究

井彦林¹, 王梁鑫¹, 赵文文¹, 林杜军²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710075; 2. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了研究黄土导热性能与其物理力学参数之间的关系, 文章对宁东黄土进行了导热系数、标准贯入试验及含水率、密度等参数的测试, 对测得的数据进行了拟合及相关性分析, 讨论了不同参数与导热系数的关系。试验结果表明, 非饱和黄土中的气体和孔径是影响导热系数的关键。土越密实, 含水率越高, 土中气体的体积越小, 导热系数越大; 孔径越小, 导热系数越大。非饱和黄土强度越高, 其导热性能不一定越好。含水率、密度、干密度、饱和自重压力、液性指数、粘聚力、压缩系数和标准贯入等指标与导热系数有显著的相关性, 可以很好的评价黄土的导热性能。

关键词: 非饱和黄土; 物理力学参数; 导热系数; 统计分析

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2018)10-0046-04

Study on the relationship between physical and mechanical parameters and thermal conductivity of unsaturated loess

JING Yan-lin¹, WANG Liang-xin¹, ZHAO Wen-wen¹, LIN Du-jun²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710075, China;

2. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the relationship between the thermal conductivity of loess and its physical mechanical parameters, we test the thermal conductivity, standard penetration test and density of loess in Ningdong area, and the measured data is simulated. The correlation analysis of relationship between different parameters and thermal conductivity are discussed. The experimental results show that moisture content, density, dry density, saturated self-weight pressure, liquid index, cohesion, and standard penetration have significant correlation with thermal conductivity, which can evaluate the thermal conductivity of loess approximately. The gas and pore size in unsaturated loess are the critical factors to the thermal conductivity. The denser soil, the higher moisture content, the smaller volume of gas in the soil, and there is the greater thermal conductivity. The smaller aperture, and there is the greater thermal conductivity. With the increasing of soil strength, its thermal conductivity is not necessarily good.

Keywords: loess; physical and mechanical parameters; thermal conductivity; statistical analysis

伴随着西部大开发的快速发展, 越来越多的工程建设涉及到黄土传热性能方面的研究。比如, 由于冻结法施工在煤炭开采的含水地层中有着支护深度和广度的独特优势, 在设计井筒冻结壁时, 有必要对其地层冻结与解冻过程中岩土体的导热系数进行深入研究^[1,2]; 在城市的建设中, 各类机械的运动和人类的活动, 在一定范围内会产生一种“热套”, 这种“热套效应”^[3]会对地下工程的安全性产生一定危害, 在经济合理的配置通风散热设备和空调系统时, 需要对土体热物理参数和物理力学指标进行相关研究^[4]; 在深埋处理放射性核废料过程中, 由于核废料衰变会产生巨

大的热量, 其贮库周围介质(如回填材料、缓冲料、岩体等)的导热性能会严重影响贮库的安全性, 在设计贮库时, 需要对其周围介质进行导热性能方面的研究^[5,6]。目前, 国外 Nicolsky 等人提出了冻土水热的概念, 并给出了耦合模型^[7]; EPRI 和 Austin 等人提出了水、温度场和应力场的三场耦合问题, 并给出了简化的数学模型, 利用差分法进行了数值计算^[8,9]; 国内, 俞亚南等人采用稳态平板法测定了两种土在不同干密度和水的质质量分数条件下的导热系数, 并拟合出相应的经验公式^[10]; 李兴柏等人研究了污染强度、油水相互作用和温度对污染土导热系数的影响, 分析

收稿日期: 2018-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472267)

作者简介: 井彦林(1963—), 男, 陕西蒲城人, 教授, 主要研究方向为黄土力学与工程, E-mail: yanlinjing86@163.com。

引用格式: 井彦林, 王梁鑫, 赵文文, 等. 非饱和黄土物理力学参数与导热系数关系的研究 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 46-49.

了污染土导热系数变化的内在机理^[11]；张婷等人研究了不同因素对表层土导热系数的影响，得出热物理参数的取值主要取决于土颗粒组成、含水率和土密实度^[12]；王铁行等人基于平板导热原理，研制了一种导热系数测量装置，研究了不同干密度和含水率对黄土导热系数和比热容的影响^[13]。从目前结果表明，地层的密度、含水率及温度在很大程度上决定着其导热系数，但研究黄土的导热系数与其物理力学参数关系的甚少。本文以宁东地区红柳煤矿浅层黄土为研究对象，选取具有代表性的场地，进行了其导热系数、标准贯入、含水率、密度和粘聚力等参数的测试，重点研究分析其导热系数与其物理力学参数之间的关系。

1 导热系数测试原理

本文基于瞬态板热源法，采用由瑞典生产的 TPS-2500S 型 HotDisk，在西安交通大学能动学院热力学实验室测试了试样的导热系数。在测试试样导热系数时，把 HotDisk 传感器夹在待研究的两个试样之间，再向传感器提供恒定的小电流，通过电阻精确测量传感器的温度变化；然后通过分析以时间为变量的温度函数，得到试样的导热系数 K 和热扩散系数 κ 的关系式；其导热系数 K 和热扩散系数 κ 的计算式如下^[14,15]：

$$K = \frac{\pi a(m+1)Q_0}{\pi^{3/2} a \Delta \bar{T}(\tau)} D(\tau) \quad (1)$$

其中 $D(\tau)$ 是无量纲的时间函数，计算式如下：

$$D(\tau) = \frac{1}{m^2(m+1)^2} \int_0^\tau \frac{d\sigma}{\sigma^2} \sum_{k=1}^m k \times \sum_{l=1}^m l \exp\left(-\frac{(k^2+l^2)}{4m^2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{kl}{2m^2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中 τ 是特征时间比的无量纲参数，计算式如下：

$$\tau = \sqrt{\kappa t}/a \quad (3)$$

$I_0(x)$ 是零阶的第一种贝塞尔修正函数，计算式如下：

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \sin \theta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \cos \theta} d\theta \quad (4)$$

σ 为一个积分变量，计算式如下：

$$\sigma^2 = \frac{\kappa(t-t')}{a^2} \quad (5)$$

κ 为热扩散系数，计算式如下：

$$\kappa = K/\rho c \quad (6)$$

式中， a 为同心环最大环的半径，m； c 是导热材料在温度 T 下的比热容，J/(kg·K)； K 为导热系数，W/(m·K)； κ 为热扩散系数，m²/s； m 表示有同心环数量； ρ 为材料密度，kg/m³； r 为在时间 t 时的总电阻， Ω ； $\Delta \bar{T}(\tau)$ 为传感器随时间 t 所增加的平均温度，由传感器测得； Q_0 为传感器线圈单位时间单位长度释放的热量，J； t' 、 t 为从加热时起至测量时刻的时间，s。

在测得材料的密度 ρ 和比热容 c 后，联立式(1)和式(6)，计算得出试样的导热系数 K 和热扩散系数 κ 。

2 土样制备及测试

试验场地位于宁夏回族自治区灵武市马家滩镇以北约 6.3km 处的神华红柳煤矿工业场地，该地段位于鄂尔多斯盆地西缘褶皱冲断带的中部，断裂和褶皱发育非常，规模相对较大，西北高东南低，是一个低缓的丘陵地貌。场地内地层自上而下依次为全新世风积黄土(Q_4^{ol})、上更新统风积黄土(Q_3^{ol})、中更新统风积黄土(Q_2^{ol})、古近系(E)红粘土等。本次研究试验及测试对象均为黄土，黄土层厚度 15.0~40.0m。标准贯入试验采用落锤质量 63.5kg，落距 76cm，落锤自动脱钩的穿心锤在现场进行测试。

导热系数、密度、含水率、压缩系数等指标通过现场探井取样，在室内进行试验完成。探井采用人工挖掘，分别采取了 1 号井 2m，4m，5m 及 2 号井 1m，4m，6m，10m，12m，15m 处不扰动土，共 9 个试样，测试及试验方法依据文献 [16]，测试结果见表 1。

表 1 导热系数与各参数的测试数据

| 序号 | 取样深度/m | 导热系数/ W·(m·K) ⁻¹ | 含水率/% | 液性指数 | 密度/ (g·cm ⁻³) | 干密度/ (g·cm ⁻³) | 饱和自重压力/kPa | 标准贯入/击 | 压缩系数/ MPa ⁻¹ | 粘聚力/ kPa | 内摩擦角/(°) |
|----|--------|--------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------------------------------|------------|--------|----------------------------|-------------|----------|
| 1 | 2.0 | 0.68 | 4.3 | -1.62 | 1.45 | 1.39 | 35 | | 0.14 | 12.00 | 39.90 |
| 2 | 4.0 | 0.67 | 3.3 | -1.74 | 1.49 | 1.44 | 72 | | 0.09 | 7.00 | 33.00 |
| 3 | 5.0 | 0.77 | 3.2 | -1.77 | 1.56 | 1.51 | 92 | | 0.17 | 11.00 | 38.80 |
| 4 | 1.0 | 1.04 | 8.5 | -1.08 | 1.56 | 1.44 | | | 0.10 | | |
| 5 | 4.0 | 0.85 | 4.4 | -1.62 | 1.54 | 1.48 | 73 | 10.4 | 0.18 | | |
| 6 | 6.0 | 0.78 | 6.2 | -1.39 | 1.54 | 1.45 | | 9.9 | 0.12 | | |
| 7 | 10.0 | 1.06 | 6.3 | -1.36 | 1.52 | 1.43 | | 20.6 | 0.09 | | |
| 8 | 12.0 | 1.24 | 7.9 | -1.15 | 1.65 | 1.53 | 223 | 23.8 | 0.08 | | |
| 9 | 15.0 | 1.44 | 9.9 | -0.89 | 1.86 | 1.69 | 295 | | 0.08 | 27.00 | 25.20 |

3 结果分析

3.1 分析方法

本文对以上参数，采用最小二乘法，分别拟合得出其一元线性回归方程及相关系数 R ，再利用 T 检验法验证其

回归模型，具体过程可参考汪荣鑫的数理统计^[17]和文献 [18、19]。其中，当 $R < 0.4$ 时，线性相关度低；当 $0.4 \leq R < 0.7$ 时，线性相关度一般；当 $0.7 \leq R < 1$ 时，线性相关度高。

在原假设 $H_0: \beta = 0$ ，备择假设 $H_1: \beta \neq 0$ 的情况下，给

定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 当 $|t| = \frac{\hat{\beta}}{\sigma^*} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} > t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2)$ 时, 拒绝 H_0 , 即回归效果显著; 当 $|t| = \frac{\hat{\beta}}{\sigma^*} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \leq t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2)$ 时, 接受 H_0 , 即回归效果不显著。其中,

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 - \hat{\beta}^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-2}}$$

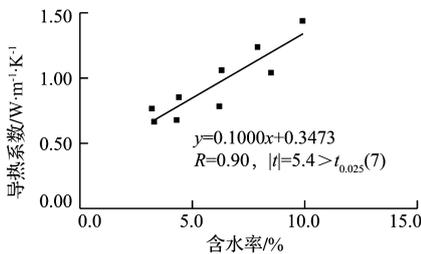


图3 含水率与导热系数的回归曲线

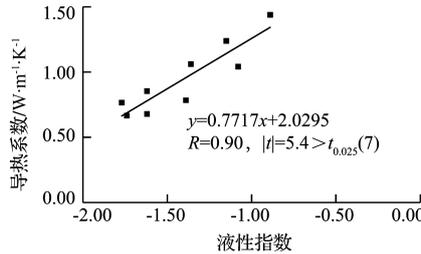


图4 液性指数与导热系数的回归曲线

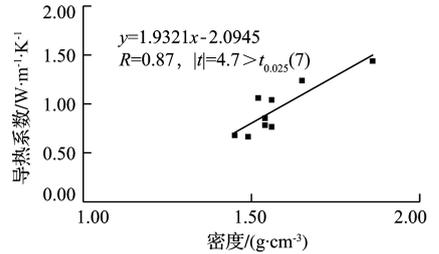


图5 密度与导热系数的回归曲线

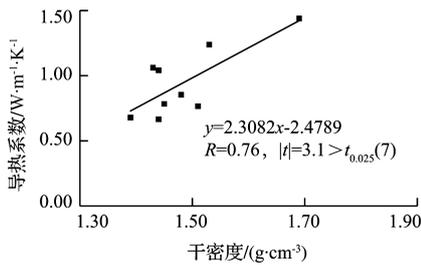


图6 干密度与导热系数的回归曲线

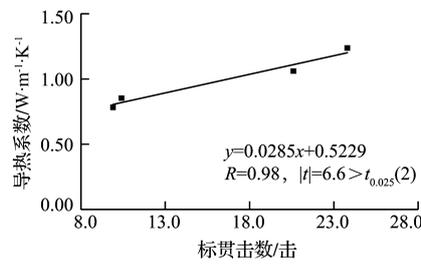


图7 标准贯入击数与导热系数的回归曲线

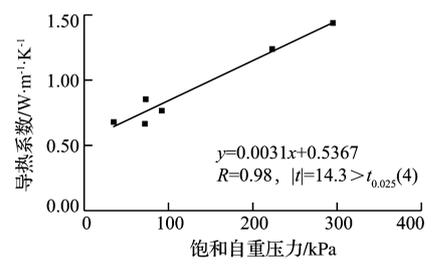


图8 饱和自重压力与导热系数的回归曲线

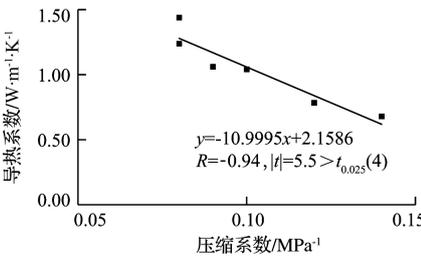


图9 压缩系数与导热系数的回归曲线

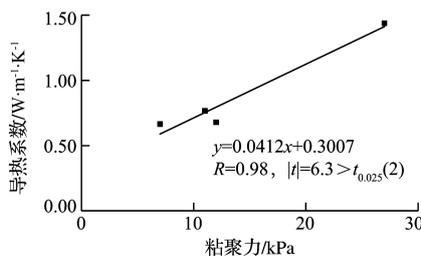


图10 粘聚力与导热系数的回归曲线

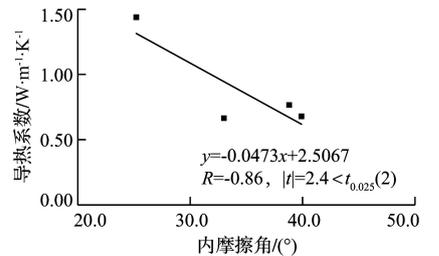


图11 内摩擦角与导热系数的回归曲线

式中, $\hat{\beta}$ 为回归方程斜率; n 为试样数量; x_i 为试样物性参数测试值; \bar{x} 为试样物性参数测试值平均值; y_i 为试样导热系数测试值; \bar{y} 为试样导热系数测试值平均值。

3.2 相关性分析

通过以上分析方法, 对实验数据进行线性拟合与评价, 其导热系数与各参数之间的统计结果及线性拟合图形, 如图3—11所示。

非饱和土是一种由固体、液体、气体组成的一种三相体, 热量主要通过土颗粒及土中的水传递, 且土颗粒的导热性能大于水; 土颗粒结合越紧密, 土体导热性能越好; 土中的水, 有一定的润滑和牵引作用, 在张力作用下, 土颗粒间不断形成液桥; 而土颗粒在液桥的牵引力下, 间距会变短, 颗粒间的孔隙变小^[20-22]。

从图3—7可以看出导热系数与含水率、液性指数、密度、干密度、标准贯入击数显著正相关, 与压缩系数显著负相关。这是由于, 随着含水率的增大, 黄土中的部分气

体被水替代, 土中的气体体积也随之减少, 而(浅部)黄土中的气体组成与空气中的基本一致, 主要是 CO_2 、 CH_4 、 O_2 、 N_2O 、 N_2 等^[23], 所不同的是, 各气体含量不同, 如黄土中 O_2 比空气中少很多。黄土中这些气体的导热系数均小于水, 所以含水率增大, 导热系数增大。而随着密度、干密度、标准贯入击数的增大, 土体变密实, 孔隙及气体体积减小, 土颗粒接触面积增多、间距减小, 孔径变小, 导致黄土体导热性能的提高。因而, 可有以下认识, 非饱和黄土中的气体和孔径是影响导热系数的关键。土越密实,

含水率越高,土中气体的体积越小,导热系数越大;孔径越小,导热系数越大。

压缩系数大,土的压缩性高,这一般是由于土的含水率高或密实度减小所致。由表1看出,试样压缩系数的增大是由于干密度减小而非含水率增高引起。干密度减小,孔隙度增大,孔径增大,土中气体增多,因而压缩系数增大,导热系数减小。

内摩擦角及粘聚力是土的重要抗剪强度指标,土的抗剪强度均随内摩擦角及粘聚力的增大而增大,减小而减小。粘聚力大,说明土的颗粒较小,粘粒含量高,颗粒之间的孔径小,因而导热系数变大;而内摩擦角大,则说明土的颗粒粒径较大,粘粒含量小,孔径也较大,因而导热系数变小。由图10、图11看出,导热系数随着粘聚力的增大而增大,随着内摩擦角的增大而减小,这与干密度、标准贯入击数对导热系数的影响机理相一致。由于导热系数增大,粘聚力增大而内摩擦角减小,所以非饱和黄土强度越高,其导热性能不一定越好。

4 结论

1) 非饱和黄土中的气体和孔径是影响导热系数的关键。土越密实,含水率越高,土中气体的体积越小,导热系数越大;孔径越小,导热系数越大。

2) 非饱和黄土强度越高,其导热性能不一定越好。

3) 含水率、密度、干密度、饱和自重压力、液性指数、粘聚力、压缩系数和标准贯入等指标可以很好的评价黄土的导热性能。

4) 导热系数与含水率、密度、干密度、饱和自重压力、液性指数、粘聚力和标准贯入等指标显著正相关,与压缩系数显著负相关,与内摩擦角负相关。

下一步还需对更深层的黄土进行导热性能与其他性能之间的研究,得出更多有益于理论实践的结果。

参考文献:

- [1] 渠成堃,周辉,任振群,等.热耦合下裂隙产状对导热系数影响的模拟分析[J].沈阳工业大学学报,2017(2):1-6.
- [2] 刘鹏,阎长虹,徐杨,等.南京地区下蜀土导热系数影响因素室内试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016(5):847-852.
- [3] 朴春德,王东,李亭.岩质边坡相似材料导热系数的试验研究[J].工程地质学报,2015(5):821-826.
- [4] 王军刚,胡爱娟,徐帮耀,等.影响岩土导热系数测试准确性的因素分析[J].建筑热能通风调,2015(4):14-17.
- [5] 申向梁.中俄原油管道多年冻土导热系数测试方法及比较研究[D].吉林:吉林大学,2015.
- [6] Zhuravlev Igor Igorevich, Motenko Rimma Grigoryevna. The oil contamination influence on heat transfer in frozensoils [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26 (Supp. 1): 128-132.
- [7] Nicolsky D J, Romanovsky V E, Panteleev G G. Estimation of soil thermal properties using insitu-temperature measurements in the active layer and permafrost [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(1): 120-129.
- [8] EPRI. 1989. (Bose, J. E. Editor) Soil and Rock Classification for the Design of Ground-Coupled Heat Pump Systems Field Manual. Electric Power Research Institute Special Report, EPRI CU-6600.
- [9] Austin W. A. Development of an Insitu System for Measuring Ground Thermal Properties, Master of Science Thesis, 1998, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- [10] 俞亚南,徐坚,冯建江. 粉性土导热系数的室内实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010(1): 180-183.
- [11] 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(6): 1114-1120.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 黄犊子,樊栓狮. 采用HOTDISK测量材料热导率的实验研究[J]. 化工学报, 2003(S1): 67-70.
- [15] Yi He. Rapid thermal conductivity measurement with a hotdisk sensor [J]. Thermochimica Acta, 2005(436): 122-129.
- [16] GBSL237-1999, 土工试验规程[S].
- [17] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1986.
- [18] 邓亮章. 最小二乘法的拟合及其应用[J]. 兰州教育学院学报, 2012, 28(8): 109-110, 131.
- [19] 张凤菊,刘晓娟,赵丽平,等. 数据差异显著性检验[J]. 农机使用与维修, 2012(4): 51-52.
- [20] 赵文文. 黄土物理力学参数与导热系数的关系及其统计中存在的问题的研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [21] 赵安平. 季冻区路基土冻胀的微观机理研究[D]. 吉林:吉林大学, 2008.
- [22] 张昭,刘奉银,张国平,等. 不等径湿颗粒与液桥相互作用的微观水力特性[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 810-817.
- [23] 刘嘉麒,钟华,刘东生. 渭南黄土中温室气体组分的初步研究[J]. 科学通报, 1996(24): 2257-2260.

(责任编辑 赵巧芝)