

# 兰州地铁围岩热物理参数测试研究

盖玉玺<sup>1</sup>, 甄作林<sup>1,2</sup>, 马国梁<sup>1</sup>

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000 ;

2. 中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

**摘要:** 本文通过采取地铁站原状土样, 使用 Hot Disk 热常数分析仪测量, 研究了兰州地铁站围岩的热物理性质。通过对不同深度试样的导热系数、热扩散系数、体积比热的测量, 发现导热系数随深度增加而增加, 体积比热和热扩散系数不具有明显规律; 通过分析影响热物理参数的因素发现, 含水量是各因素中变化最大的, 于是利用烘干法调节试样含水量, 研究了热物理参数随含水量变化的规律, 发现兰州地铁站围岩土体试样随含水量增加土体导热系数呈线性增长, 体积比热随含水量增加先降低后增高, 热扩散系数随含水量增加先升高后缓慢降低。

**关键词:** 兰州地铁; 导热系数; 热扩散系数; 体积比热

**中图分类号:** TU 411

## Test Study on thermal physical parameters of surrounding rock of Lanzhou subway

Gai Yuxi<sup>1</sup>, Zhen Zuolin<sup>1,2</sup>, Ma Guoliang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Northwest Research Institute Co., Ltd. of China Railway Engineering Corporation)

**Abstract:** In this paper the thermal properties of soils taken from Lanzhou subway station was studied by Hot Disk heat constant analyzer. Firstly, thermal conductivity, thermal diffusion coefficient and volume specific heat of samples from different depth had been measured, as a result, thermal conductivity increases with depth deepens, at the same time, volume specific heat and thermal diffusion coefficient have no remarkable law. With changing moisture content by drying, as the moisture content is the most changeable factor among all factors which would influence thermal properties of soils, the law of soils had been discussed. With increasing moisture content, the thermal conductivity increases linearly, the volume specific heat increases after decreasing to minimum at relatively lower moisture content, the thermal diffusion coefficient decreases slowly beyond increasing to maximum at relatively lower moisture content.

**Key words:** The Lanzhou subway; thermal conductivity; thermal diffusion coefficient; volume specific heat

## 0 引言

地铁隧道围岩的热物理特性对地铁暖通空调设计具有重要意义, 近年来, 地下空间开发利用<sup>[1,2]</sup>的深度与广度不断增加, 能否创造一个舒适满意的地下环境是提高地铁运营能力的重点工作之一, 应对地铁空调系统进行优化合理设计, 以达到高效节能的目的。地铁厢体中的温湿度主要依赖暖通空调系统进行人工调节, 达到人体的舒适程度。暖通空调系统的优化设计除了与地铁乘客的时空分布密切相关外, 与地铁隧道所在地层的温度场<sup>[3]</sup>年际变化及隧道围岩的热物理性质密切相关。对于以上问题国内外众多学者进行了大量研究。关于地铁围岩的初始地温研究, 我国北京、武汉、南京、西安等地, 都已经积累了一定的数据, 兰州地铁与我国其他地方的地铁不同, 它处于我国高海拔地区, 缺少地铁埋深范围内的地层温度分

**基金项目:** 兰州市 2015 年第三批科技计划项目资助(No.2015-3-110)

**作者简介:** 盖玉玺 (1990-), 男, 硕士, 主要从事岩土工程性质研究

**通信联系人:** 甄作林 (1965-), 男, 高工, 结构建筑工程. E-mail: zhenz113@lzu.edu.cn

布规律的资料,但兰州地铁相关资料仍为空白,研究结果可为地铁车站和区间隧道的空调工程  
45 的初步设计提供参考,为今后地铁暖通空调系统的优化设计提供可靠的依据。因此,对地  
铁隧道围岩的岩土体进行热物理参数测定是十分必要的。针对岩土体的热物理特性,中外众  
多专家学者进行了大量研究,并得到了众多有价值的结论。Hooper 等<sup>[4]</sup>把探针法和线热源模  
型结合起来,成功测定了岩土体的导热系数。Johansen 等<sup>[5]</sup>从岩土体干密度、孔隙率等因素上  
归纳总结出计算岩土体导热系数的经验公式。Barry-Macaulay 等<sup>[6]</sup>用探针法,得到了干密度  
50 和含水量与玄武质粘性土的导热系数和体积热容的关系,导热系数和体积热容随着含水量和  
干密度的增大而增大。陈善雄等<sup>[7]</sup>采用热针法测定了四种砂土的热导率,并归纳总结出了计  
算砂土热导率的经验公式。冯健美等<sup>[8]</sup>运用探针法测试了土壤和黄砂在不同含水量、不同干  
密度的条件下的导热系数。

试验室直接测定时,国内外大多采用的设备为单探针、多探针和热量测定,原理为点热  
55 源与线热源法,本实验所用的瑞典 Hot Disk 热常数分析仪使用现今测量热物性最先进、准  
确和便捷的方法——瞬变平面热源法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本文试验所用的材料为取自兰州地铁一号线地铁站内的原状土。用环刀取原状土试样,  
60 测原状土天然密度,含水量,土粒比重,如表 1 所示。

表 1 土样的基本物理性质参数

Tab. 1 Basic physical parameters of soil samples

取样深度 / (m)	土粒相对密度	天然密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	含水量 / (%)	干密度 / (g/cm <sup>3</sup> )
3	2.7	1.58	0.09	1.44
5	2.7	1.65	0.19	1.39
7	2.7	1.68	0.25	1.35
9	2.7	1.78	0.24	1.43
11	2.7	1.82	0.23	1.47
13	2.7	1.86	0.13	1.64

### 1.2 试验方法

通常影响土体热物理参数变化的因素有:组成土体矿物成分、含水量、干密度、孔隙率、  
65 易溶盐含量等。在自然情况下,地下土体的矿物成分、干密度、孔隙率等基本保持不变,而  
变化最大的是含水量以及由于水分变化引起的易溶盐状态的变化。本文主要研究在相对封闭  
环境下,土体热物理参数随着含水量变化而变化的规律。首先测量原状土体天然含水量状态  
下的热物理参数;其次,通过烘干法来调节土体中含水量,测量不同含水量条件下土体热物  
理参数,以此来研究随含水量变化,土体导热系数、热扩散系数和比热的变化规律。试验过  
70 程中,土样分次烘干,烘干温度 105℃,每次烘干时长分别为 5min、10min、20min、30min、  
40min、60min、90min、1day,烘干后放在保湿器里养护一段时间,待土体中水分分布均匀  
后称取试样质量并测得试样热物理参数。

### 1.3 测试方法及原理

本研究所用的瑞典 Hot Disk 热常数分析仪是采用瞬变平面热源法,其原理为:测试时,  
75 探头给最初等温的试样提供恒定的功率,在有限的加热时间里,把探头作为电阻温度计,同  
时记录温度的升高。温度的动态升高反映在探头的电阻升高,从而在探头两端产生一定程度

80 的电压降。一般情况下，200 个电阻被记录下来，由这些数据可以建立时间和时间的关系。这个过程被准确的记录下来，并加以分析，由此，导热系数和热扩散系数可以通过单次的瞬态记录被计算出来。根据试样的导热性能不同，探头的热量散失不同，产生的电压变化也不同。因此通过记录在一段时间内的电压变化，可以较为准确地得到探头温度的变化。通过数学模型处理测点，得到导热系数和热扩散系数的结果。最后，计算体积比热=导热系数/热扩散系数。

2 试验结果与分析

2.1 不同深度天然状态下土体热物理参数

85

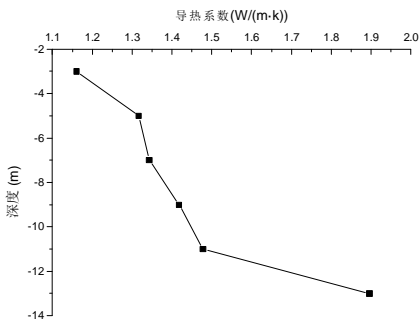


图 1 导热系数随深度变化图  
Fig. 1 The change of thermal conductivity with depth

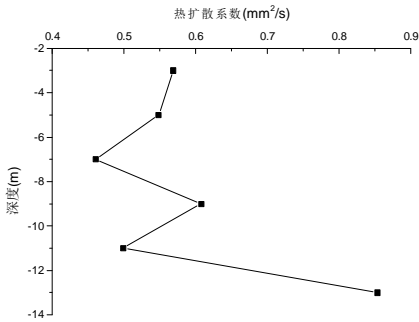


图 2 热扩散系数随深度变化图  
Fig. 2 The change of thermal diffusion coefficient with depth

90

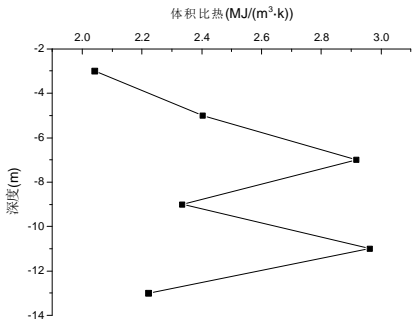


图 3 体积比热随深度变化图  
Fig. 3 The change of volume specific heat with depth

如表 1 所示，可以看出随深度的增加土体密度逐渐增大。3m 处为灰褐色黄土状土，密

95 度最小为 1.58g/cm<sup>3</sup>，13m 处为灰黄色中砂，密度最大为 1.86g/cm<sup>3</sup>。7m 处淤泥质土干密度最小，13m 处灰黄色中砂干密度最大。含水率在 7m、9m、11m 处较高分别为 25%、24%、23%，在 3m 处最小为 9%。

图 1 为土体导热系数随深度的变化曲线。由图 1 可见，原状土体天然含水量状态下，随深度的增加导热系数呈逐渐增大的趋势，从 5m 到 11m 基本呈线性增长规律，导热系数由 1.317 W/(m·k)增长大到 1.478 W/(m·k)，13m 处到达中砂层，土体导热系数增量显著达到 1.896 W/(m·k)。图 2 为土体热扩散系数随深度的变化曲线，图 3 为土体体积比热随深度的变化曲线。由图 2 和图 3 可见，随深度的增加，土体热扩散系数和体积比热变化规律不明显，但是 13m 处的中砂热扩散系数明显比其它深度土类的热扩散系数要大，而体积比热比其它土类处要小。本测试研究是针对兰州地铁原状土体热物理参数的实测研究。

105 2.2 土体热物理参数随含水量变化特征

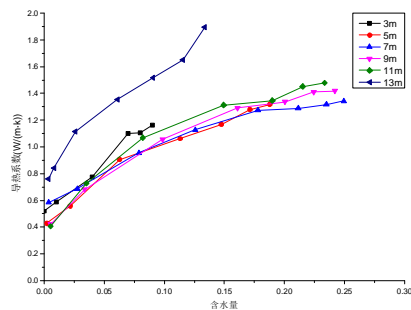


图 4 导热系数随含水量的变化

Fig. 4 The change of thermal conductivity along with moisture content

由于是同一土样用烘干法调节试样中的含水量，所以在整个过程中土体结构和成分保持不变，对可变因素的控制比较好。图 4 为土样导热系数随含水量的变化曲线，由图 4 中可见，当土的干密度保持一定的状态下，不同深度处的原状土的导热系数均随着含水量的增加而增加，13m 处的中砂层依然变化较为突出。首先当含水量改变时，土粒与土粒之间的接触方式发生变化，含水量低时土粒间以点接触为主，当含水量高时土粒接触点被水膜包围，接触方式为面接触，接触面积变大，土粒间空隙被水充填；其次水的导热系数大约是空气的 22 倍。所以当含水量增高时，土的导热系数增大。同过分析导热系数与含水量的关系，得到拟合方程如表 2 所示。

表 2 导热系数与含水量关系拟合关系

Tab. 2 Correlation of thermal conductivity of soils with moisture content

取样深度(m)	导热系数与含水量关系拟合方程	相关系数 R <sup>2</sup>
3	$\lambda=0.075\omega-0.511$	0.986
5	$\lambda=0.047\omega-0.488$	0.958
7	$\lambda=0.031\omega-0.647$	0.934
9	$\lambda=0.041\omega-0.526$	0.930
11	$\lambda=0.043\omega-0.549$	0.907
13	$\lambda=0.079\omega-0.807$	0.970

由表 2 的拟合方程可以看出，兰州地铁土体由上及下的拟合方程斜率先减小再增大，其中，3m 处跟 13m 处拟合直线的斜率最大，7m 处拟合直线的斜率最小。由此可以看出，兰州地铁土体中，3m 跟 13m 处土层的导热系数随含水量变化的更为显著。

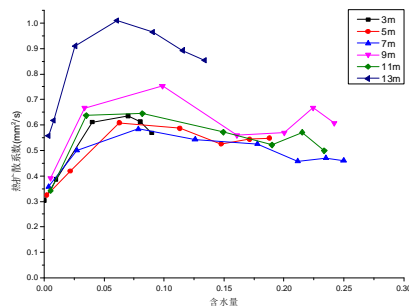


图5 热扩散系数随含水量的变化

Fig. 5 The change of thermal diffusion coefficient along with moisture content

125 图5为土样热扩散系数随含水量的变化曲线,由图5可见,当含水量较小时,土样热扩散系数随含水量增加显著增加,在0-5%范围内增量很大,在5%-10%范围内达到最大值,然后随含水量增加,热扩散系数缓慢降低。

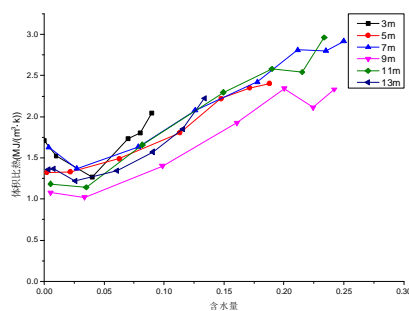


图6 体积比热随含水量的变化

Fig. 6 The change of volume specific heat along with moisture content

130 图6为土样体积比热随含水量的变化曲线,由图6可见,土样体积比热规律比较明显,在含水量较低时体积比热随含水量升高而降低,在2.5%-5%范围内出现极小值,超过此值后体积比热随含水量增加而增加。

图5与图6结果与赵秀峰报道的泥质粉砂岩热物性参数与含水量的变化关系较为相似。

### 135 3 结论

(1) 兰州地铁土体的导热系数随深度增加而增加,13m处的中砂层导热系数和热扩散系数最大,明显比其它深度处的黄土层和淤泥质土层的导热系数和热扩散系数大,而中砂层体积比热较小。

(2) 兰州地铁围岩土体的导热系数均随含水量增加而大致呈线性增加。

140 (3) 在含水量低时,兰州地铁围岩土体的热扩散系数随含水量增加而增加,并且增幅较大,在含水量5%-10%范围内达到最大值;当含水量超过这一极值点,土体的热扩散系数随含水量增加而减小,减小幅度较小。

(4) 在含水量低时,兰州地铁围岩土体的体积比热随含水量增加而减小,在2.5%-5%范围内出现极小值;当含水量超过极值点时,土体的体积比热随含水量增加而增加。

## 145 4 期望

在未来的实验研究中,针对不同深度土体的热物理参数变化规律,分析研究影响兰州地铁土体在不同深度处土层的热物理参数的主导因素,争取为今后地铁暖通空调系统的优化设计提供可靠的依据。

**[参考文献] (References)**

- 150 [1] 钱七虎. 城市可持续发展与地下空间开发利用[J]. 地下空间与工程学报, 1998, (02): 69-74.  
[2] 陈之毅. 城市地下空间利用与可持续发展[J]. 地下空间与工程学报, 2001, 21 (03): 188-191.  
[3] 王世东, 虎维岳. 深部矿井煤岩体温度场特征及其控制因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41 (08): 18-21.
- 155 [4] LEPPER F R, HOOPPER F C. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivity[J]. Journal of American Society of Heating and Ventilating Engineers, 1950, (56): 309-322.  
[5] JOHANSEN O. Thermal conductivity of soils[D]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 1975.  
[6] Barry-Macaulay D, Bouazza A, Singh R M. Study of thermal properties of a basaltic clay[J]. Geo-Frontiers, 2011: 480-487.
- 160 [7] 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.  
[8] 冯健美, 高晓兵, 屈宗长. 土壤热源热泵地下换热性能分析[J]. 太阳能学报, 2002, 23 (3): 349-352.