

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1102

重塑膨胀岩热传导性能及影响因素试验研究

欧孝夺^{1,2,3}, 甘 雨¹, 潘 鑫¹, 江 杰^{1,2,3}, 覃英宏^{1,2,3}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 广西瑞宇建筑科技有限公司 广西金属尾矿安全防控工程技术研究中心, 广西 南宁 530004)

摘 要: 以南宁第三系膨胀泥岩为研究对象, 采用热探针法研究含水率、干密度、温度及体积变形率对重塑膨胀岩试样导热系数的影响。研究表明: 重塑膨胀岩的导热系数随着含水率、干密度的增加而升高, 当含水率从 10.4% 上升至 21.9% 时, 其导热系数最高上升了 135.7%, 当干密度从 1.50 g/cm³ 增加到 2.00 g/cm³ 时, 其导热系数最高上升了 133.9%, 主要原因是含水率的增加减少了土中空气的热阻作用, 干密度的增加使土颗粒之间的接触更为紧密; 在潜热传输的作用下, 重塑膨胀岩的导热系数随温度的增长而升高, 土颗粒在温度的影响下粒径不断增大并发生聚集, 为潜热传输提供了有利的条件, 重塑膨胀岩导热系数随温度的增长呈现缓慢增长和迅速增长 2 个不同的阶段; 重塑膨胀岩的导热系数随体积变形率的增加而降低, 当变形率从 0.5% 增加到 5% 时, 膨胀岩的导热系数降幅在 5.7%~29.5% 之间, 这是由于吸水膨胀后膨胀岩试样更为松散, 土颗粒之间的接触减少。

关 键 词: 膨胀岩; 导热系数; 含水率; 干密度; 温度; 体积膨胀; 重塑试样

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022) 增刊 1-0367-08

Experimental study on thermal conductivity of remodel expansive rock and its influence factors

OU Xiao-duo^{1,2,3}, GAN Yu¹, PAN Xin¹, JIANG Jie^{1,2,3}, QIN Ying-hong^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

3. Guangxi Engineering Research Center for Metallic Tailings Security Prevention and Control, Guangxi Ruiyu Construction Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: The effects of moisture content, dry density, temperature and volume deformation on the thermal conductivity of remodeled Nanning Tertiary expansive mudstone specimens were investigated by the thermal probe method. The research showed that the thermal conductivity of the remodeled expansive mudstone increased with the increase of moisture content and dry density, mainly because the increase of water content lowered the thermal resistance of the air in the mudstone and the increase in dry density brought the mudstone particles into closer contact with each other. The thermal conductivity increased by 135.7% when the water content increased from 10.4% to 21.9%, and thermal conductivity increased by 133.9% when the dry density increased from 1.50 g/cm³ to 2.00 g/cm³. Under the effect of latent heat transfer, the thermal conductivity of remodeled expansive mudstone increased with the growth of temperature and exhibited two different stages of slow growth and rapid growth. The particle size kept expanding and aggregating under the influence of temperature, which provided favorable conditions for latent heat transfer. The thermal conductivity of remodeled expansive mudstone decreased with the increase of the volume deformation rate. When the deformation rate increased from 0.5% to 5%, the thermal conductivity of expansive mudstone decreased by 5.7%~29.5%, due to the fact that the expansive mudstones are looser after water absorption and expansion.

Keywords: expansive rock; thermal conductivity; moisture content; dry density; temperature; volume expansion; remodel sample

1 引 言

地铁的运营会产生大量的热量, 部分热量会传

递到围岩当中, 热在隧道围岩中的积累会影响地铁乘坐感受以及运营安全, 研究地铁积热问题对于隧道内的通风设计及地铁废热利用具有重要的意

收稿日期: 2020-07-30

修回日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51978179, No.51768006)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51978179, 51768006).

第一作者简介: 欧孝夺, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: ouxiaoduo@163.com

义^[1-5]。膨胀岩是一种对湿热环境极其敏感的常见软岩，其工程性质容易受到环境因素的改变而变化。当地铁隧道穿越膨胀岩层时，地铁运营产生的热量打破了膨胀岩围岩原有的热平衡，其温度场发生变化，湿热环境被改变，影响地铁运营的安全与结构的耐久性，膨胀岩地区地铁隧道的热效应问题不容忽视。但目前，针对该领域的研究仍较为空白，膨胀岩的传热规律以及热影响范围内的工程特性如何变化仍值得探索。

导热系数作为岩土体主要的热物理指标，能直接影响岩土体在稳定传热过程中的温度场分布，是研究岩土体与热相关的工程问题的重要因素^[6]；其易受岩土体、孔隙率、干密度、含水率、温度、矿物成分等因素的影响^[7-13]。近年来，许多学者针对不同岩土体的导热系数进行了深入的研究。曾召田等^[14]通过室内试验分析了干密度、含水率及矿物成分对广西 4 种红黏土导热系数的影响。刘晓燕等^[15]采用非稳态热探针研究了不同饱和度、干密度、含水率和孔隙率对南京河漫滩淤泥质粉质黏土导热系数的影响，并建立了高含水率下南京河漫滩淤泥质粉质黏土导热系数修正的预测模型。上述研究并未涉及到温度对于岩土体的导热系数的影响，在隧道围岩的传热过程中，当热环境发生改变后，其导热系数的变化影响到最终的“热套”影响范围。叶万军等^[16]通过常温下热参数试验，对不同含水率及干密度下的黄土热参数变化规律进行了研究。董西好等^[17]以此为基础，对不同温度下，不同含水率、干密度组合的黄土热参数进行试验分析，总结了其变化规律，当温度从 30 ℃下降至-30 ℃时，土体的导热系数呈三阶段上升。对于地铁隧道热效应问题来说，其温度范围并不适用，例如广州地铁的隧道

温度，在夏季时可以达到约 35 ℃^[18]。徐云山等^[19]在保持干密度和含水率不变的情况下，测定了 5 ℃上升至 90 ℃时高庙子（GMZ07）和美国怀俄明州（MX80）钠基膨润土的导热系数，得出膨润土的导热系数随温度的增大而增大的结果，但这与文献^[17]所得结果略有不同，由此可见不同岩土体的导热系数，其温度效应存在一定的差异性。膨胀岩导热系数的变化规律，不能盲目套用。除此之外，针对膨胀性岩土体，体积膨胀对其导热系数的影响研究仍较少，当地下湿热环境发生变化，膨胀岩土内部结构变化，亦会影响岩土体的导热性质，这些研究关系到膨胀岩地区地铁隧道的运营安全，具有重要的工程实用价值。

针对运营中的地铁隧道热问题，由于设备的限制及地铁运营安全的考虑，目前主要以数值模拟及室内模型试验的方式去评估热的影响范围。因此，本文主要针对重塑膨胀岩试样进行试验，采用 KD2 Pro 热特性分析仪，探讨重塑膨胀岩导热系数随含水率、干密度、温度、体积变形率的变化规律，为研究膨胀岩地铁隧道运营过程中产生的热问题的机制分析、模型试验、数值模拟等提供参考。

2 试样制备及试验方案

2.1 试样制备及养护

南宁盆地第三系泥岩为湖相沉积地层，其主要的矿物成分为伊利石、高岭石以及少量蒙脱石，主要分布在南宁东部和西南部，其自由膨胀率低于国内外典型膨胀岩，是一种中等偏弱膨胀潜势膨胀岩^[20]。试验所用膨胀岩取自南宁地铁一号线南宁东站基坑，通过室内试验，测得膨胀岩的物理力学参数如表 1 所示，颗粒级配组成如表 2 所示。

表 1 膨胀岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of expansive rock

天然密度 ρ /(g · cm ⁻³)	干密度 ρ_d /(g · cm ⁻³)	天然含水率 ω /%	液限 ω_L /%	塑限 ω_P /%	自由膨胀率 δ_{ef} /%	膨胀率 δ /%			膨胀力 P_e /kPa
						0 kPa	50 kPa	100 kPa	
2.21	1.90	16.4	36.9	17.2	51	7.10	1.72	1.11	150

表 2 膨胀岩原状土样颗粒级配组成（单位：%）

Table 2 Particle gradation composition of intact sample of expansive rock (unit: %)

砂粒 >0.075 mm	粉粒 0.005~0.075 mm	黏粒 <0.005 mm	胶粒 <0.002 mm
5.30	34.86	59.84	45.88

研究发现，重塑土的热传递内部机制条件会被不同程度的破坏，导热率与导热系数比原状土会有

一定程度的降低，对岩土体的热物理研究造成影响^[21]。为了使试验研究结果接近原状岩土，江杰等^[22]对原状膨胀岩和团粒粒径范围为 0.25 mm ≤ d < 0.5 mm、0.5 mm ≤ d < 1 mm、1 mm ≤ d < 2 mm、2 mm ≤ d < 5 mm 的 4 组重塑膨胀岩的物理力学性质进行了对比试验研究并发现：重塑膨胀岩的导热性质较原状膨胀岩均有下降，但粒径范围最小的 0.25 mm ≤ d < 0.5 mm 试样，其结构形状和孔经分布

规律与原状试样最为相似,当干密度含水率相同时,其导热系数也与原状试样的更为接近;重塑膨胀岩的无荷载膨胀率与原状膨胀岩的亦有所不同,但粒径范围为 $1\text{ mm} \leq d < 2\text{ mm}$ 的重塑膨胀岩试样的无荷载膨胀率更接近原状样的试验结果。因此,本次试验按照同样的试样制备方式,选用粒径范围 $0.25\text{ mm} \leq d < 0.5\text{ mm}$ 的膨胀岩团粒重塑试样进行传热特性试验;再按照同样的试样制备方式,选用粒径范围 $1\text{ mm} \leq d < 2\text{ mm}$ 的膨胀岩团粒重塑试样进行膨胀岩吸水膨胀后的传热特性试验。

将采集的膨胀岩试样自然风干后碾碎,分别过筛得到上述粒径范围的试验团粒。根据试验方案将团粒调配成不同含水率与干密度的组合,并置于密封容器内 24 h 使其含水率均匀,最后压制成重塑试样。

试样制作完成后放入 HUT301P 型试验箱中进行养护(HUT301P 型试验箱参数见表 3),研究表明,土体的物理力学性质会随温度和养护时间的增加发生变化^[23]。为保证试样的热平衡时间。本次试验选择的养护时间为 24 h。

表 3 HUT301P 型可编程高低温湿热试验箱参数

Table 3 Parameters of HUT301P experimental box

工作室尺寸 $D \times W \times H$ (mm×mm×mm)	温度范围 /°C	温度均匀度 /°C	温度波动度 /°C	相对湿度范围/%	湿度>75%时相对湿度偏差/%
450×500×600	-30~100	≤2	≤±0.5	5~98	≤±3

2.2 试验方案

2.2.1 含水率、干密度对膨胀岩导热系数影响

(1) 选用 $0.25\text{ mm} \leq d < 0.5\text{ mm}$ 的膨胀岩团粒重塑,设计含水率为 10.4%、12.2%、13.9%、16.9%、18.4%、20%、21.9%,在严格控制每种含水率的条件下分别制作干密度为 1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、2.0 g/cm³ 的试样,如表 4 所示。试样的规格为 $\phi 39.1\text{ mm} \times h 80\text{ mm}$ 。试样制备完成后,用保鲜膜密封好,放入 HUT301P 型恒温恒湿箱,在温度 25 °C、相对湿度 90% 的条件下静置 24 h。

(2) 使用小型电钻在试样平面钻出直径为 1.3 mm、深度为 30 mm 的两个小孔,间距为 6 mm,将导热性能良好的 Arctic silver 热油脂注射入孔中,将 KD2 Pro 的 SH-1 双针探头垂直插入试样后(参数见表 5),对试样的热物理指标进行测量。

2.2.2 温度对膨胀岩导热系数影响

(1) 试样的制备见第 2.2.1 节,试样制备完成后,用保鲜膜封好,放入 HUT301P 型恒温恒湿箱,分别在 10、20、30、40、50、60 °C 的温度条件下静

置 24 h,试验箱的相对湿度设为 90%。

(2) 采用 KD2 Pro 测量试样的热物理指标,测量方式见第 2.2.1 节。试验结束后测量试样的含水率。

表 4 重塑土样制备含水率、干密度组合表

Table 4 Preparation of remodel samples with different moisture contents and dry densities

含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)					
10.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
12.2	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
13.9	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
16.9	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
18.4	1.5	1.6	1.7	1.8	—	—
20.0	1.5	1.6	1.7	—	—	—
21.9	1.5	1.6	1.7	—	—	—

注:“—”表示试样因湿密度过大无法制备。

表 5 SH-1 双针探头参数

Table 5 Parameters of SH-1 dual needle probe

探头长/mm	直径/mm	双针间距/mm	测试量程/(W·(m·K) ⁻¹)	精度/%
30	1.3	6	0.02~2.00	±5

2.2.3 体积膨胀对膨胀岩导热系数影响

(1) 选用粒径范围 $1\text{ mm} \leq d < 2\text{ mm}$ 的膨胀岩团粒重塑膨胀岩试样,初始含水率设为 10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%,每个含水率分别制作干密度为 1.5、1.6、1.7、1.8、1.9 g/cm³ 的试样,试样的规格为 $\phi 61.8\text{ mm} \times h 20\text{ mm}$ 。

(2) 将环刀试样装入南京土壤仪器厂生产的 WG 型固结仪后,安装百分表以监测试样变形情况,将蒸馏水注入固结仪中,观察百分表读数,当变形量达到设计值(0.1、0.2、0.4、0.6、1 mm)时施加平衡荷载以保持变形量不变(0.1、0.2、0.4、0.6、1 mm 分别对应高度为 20 mm 的环刀试样 0.5%、1%、2%、3%、5% 的体积变形率)。一般情况下,单杠杆固结仪采用砝码的重量控制荷载的平衡,但为了保证在本试验过程中土体的变形量能精确的维持在设计值内,试验采用细砂代替砝码来维持荷载的平衡。

(3) 当平衡荷载量稳定不变且 2 h 内试样的变形量小于 0.01 mm 时,视为稳定,此时采用 KD2 Pro 对试样的热物理指标进行测量,测量方式与本文 2.2.1 小节相同,最后测量试验后的试样含水率。

3 含水率、干密度对重塑膨胀岩导热系数的影响

3.1 含水率对重塑膨胀岩导热系数的影响

不同干密度条件下重塑膨胀岩的导热系数与

含水率的关系如图 1 所示。由图可知, 重塑膨胀岩的导热系数在相同干密度的条件下随着含水率的增加总体上呈现升高的趋势。干密度为 1.5、1.6、1.7 g/cm³ 时, 当含水率从 10.4% 提高至 21.9%, 其导热系数分别升高了 135.7%、93.2% 和 72.7%。干密度为 1.8 g/cm³ 时, 当含水率从 10.4% 提高至 18.4%, 其导热系数升高了 55.2%。干密度为 1.9、2.0 g/cm³ 时, 当含水率从 10.4% 提高至 16.9%, 其导热系数分别升高了 30.7% 和 33.6%。

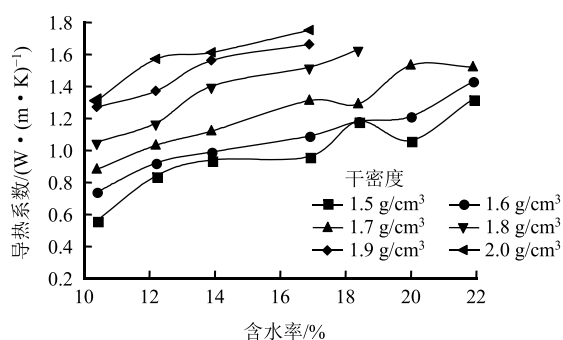


图 1 不同干密度重塑膨胀岩导热系数随含水率变化曲线

Fig.1 Variation curves of thermal conductivity with moisture content of remodel expansive rock in different dry densities

岩土体内主要通过固体颗粒、水和气体进行导热。当含水率较小时, 导热系数极低的空气在孔隙中阻碍了热量的传递, 且土颗粒和空气界面之间存在较大的接触热阻力, 导致了试样导热系数较低; 当含水率提高时, 孔隙中的水分形成水膜包裹住土壤, 土颗粒之间形成“水桥”, 促进了热量的传播, 并且水的导热系数远大于空气, 水膜的形成减小了土颗粒与空气界面之间的热阻力, 因此试样的导热系数升高^[6]。

3.2 干密度对重塑膨胀岩导热系数的影响

含水率不同时重塑膨胀岩的导热系数与干密度的关系如图 2 所示。从图中可以看出, 当含水率相同时, 随着干密度的增加导热系数呈现上升的趋势。当含水率控制在 10.4%、12.2%、13.9%、16.9% 时, 干密度从 1.5 g/cm³ 增加到 2.0 g/cm³, 膨胀岩试样导热系数分别升高了 133.9%、86.9%、71.3%、82.3%。当含水率控制在 18.4%, 干密度从 1.5 g/cm³ 增加到 1.8 g/cm³ 时, 重塑膨胀岩试样导热系数升高了 38.1%。当含水率控制在 20%、21.9% 时, 干密度从 1.5 g/cm³ 增加到 1.7 g/cm³, 重塑膨胀岩试样导热系数分别升高了 44.3%、15.2%。随着干密度的增加, 土体孔隙率减小, 土颗粒之间的接触点和接触面增加, 因而导热系数上升。

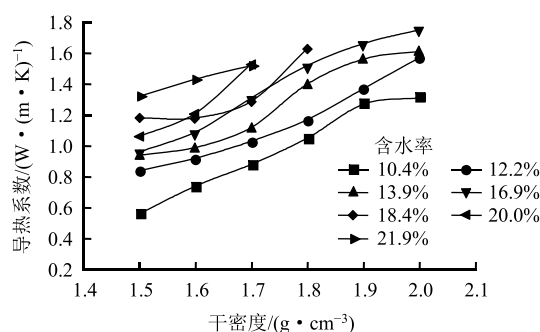


图 2 不同含水率重塑膨胀岩导热系数随干密度变化曲线

Fig.2 Variation curves of thermal conductivity with dry density of remodel expansive rock in different moisture contents

3.3 干密度、含水率与重塑膨胀岩导热系数的关系

由 3.1 节和 3.2 节试验结果可知, 重塑膨胀岩的导热系数与其含水率、干密度分别呈现良好的相关性。因此, 通过函数拟合, 可以建立重塑膨胀岩导热系数与含水率、干密度双参数之间的关系, 所得关系式如下 ($R^2 = 0.9692$):

$$K_c = -1.944 + 1.484\rho_d + 0.04377\omega - 2682e^{(-0.6814\rho_d - 0.834\omega)} \quad (1)$$

式中: K_c 为重塑膨胀岩土样的导热系数 ($W/(m \cdot K)$); ρ_d 为重塑膨胀岩的干密度 (g/cm^3); ω 为重塑膨胀岩的含水率 (%)。

相较于膨胀岩重塑试样, 原状膨胀岩中大团聚体含量较大, 导致小孔隙所占的比例比重塑试样高, 土颗粒间的接触面积也较大, 土颗粒之间的传热通道增加, 导热系数也随之增加^[20-21]。因此, 当使用式 (1) 预测原状膨胀岩导热系数时, 应进行修正。

重塑膨胀岩导热系数值与含水率及干密度的双参数拟合结果如图 3 所示。由图可知, 当重塑膨胀岩的含水率、干密度越低时, 导热系数越小; 当

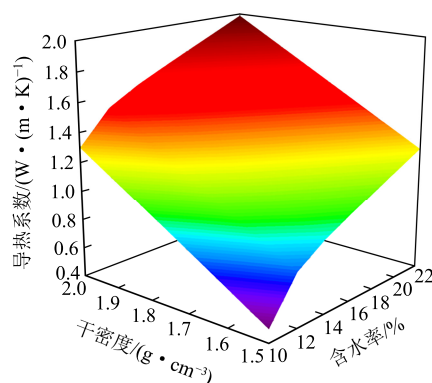


图 3 导热系数双参数拟合曲面

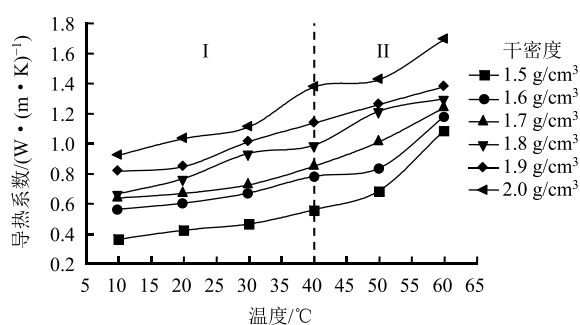
Fig.3 Fitting surface for thermal conductivity

含水率、干密度越高时,导热系数越大。分析可知,膨胀岩的含水率、干密度主要影响了土体内的三相比例,改变了土体内热传导的途径,因而导热系数发生变化。

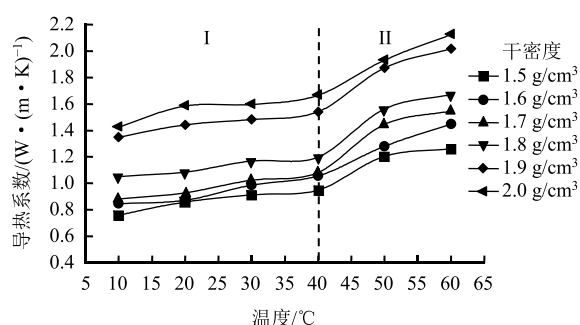
4 温度对重塑膨胀岩导热系数的影响

4.1 导热系数随温度的变化规律

选择不同温度条件下几组典型的导热系数进行分析,如图4、5所示。从图中可以看出,不论是在含水率相同的条件下还是在干密度相同的条件下,重塑膨胀岩的导热系数均会随着温度的升高而显著增大,且呈现出较为明显的2个阶段。I 缓慢增长阶段:当温度从10℃增加到40℃时,重塑膨胀岩的导热系数随温度的升高而缓慢增长,这一阶段导热系数增长量占整体增长量的30%~40%。II 迅速增长阶段:温度从40℃增加到60℃时,导热系数随着温度的升高而迅速增长,这一阶段导热系数增量占整体增量的60%~70%。



(a) 含水率为 10.4%

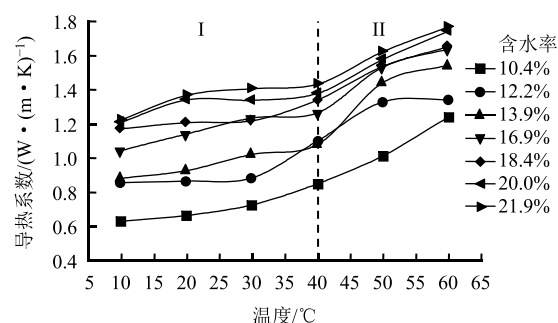


(b) 含水率为 13.9%

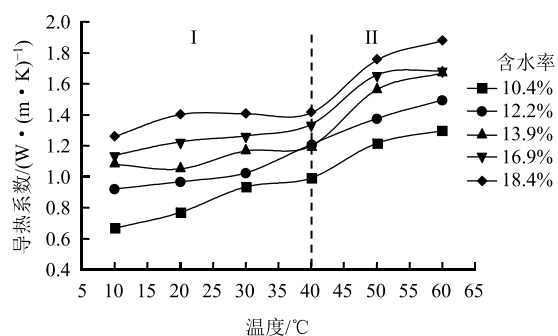
图4 含水率相同的重塑膨胀岩导热系数随温度的变化曲线
Fig.4 Variation curves of thermal conductivity with temperature of remodel expansive rock in the same moisture content

温度对岩土体导热系数的影响主要取决于土体内水气的潜热传输,即在土中水温度梯度的作用下,在“液岛”两端发生蒸发和凝结交替存在的潜

热传输,通过热扩散增强土壤内部的热传导^[11, 19]。Li等^[24]研究发现,膨胀土在100℃以内,土颗粒粒径随着温度的升高而增长且易于发生聚集,土体孔隙率增加。因此,膨胀岩试样在温度增长过程中,土体内水分发生潜热传输,导致了试样导热系数的升高,与此同时土体内土颗粒粒径及孔隙率不断增加,为潜热传输提供了更加有利的通道条件,导热系数的增长速率也随之增加。



(a) 干密度为 1.7 g/cm³



(b) 干密度为 1.8 g/cm³

图5 干密度相同的重塑膨胀岩导热系数随温度的变化曲线
Fig.5 Variation curves of thermal conductivity with temperature of remodel expansive rock in the same dry density

4.2 不同温度条件下导热系数与干密度、含水率的关系

通过试验可以发现,不同温度条件下导热系数与干密度、含水率的关系与常温时导热系数的规律基本一致,因此可以根据式(1)提出不同温度条件下导热系数的计算公式如下:

$$K = A + B\rho_d + C\omega + D e^{(E\rho_d + F\omega)} \quad (2)$$

式中: K 为导热系数 ($W/(m \cdot K)$); A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 为根据试验得出的拟合参数。

根据试验数据得到不同温度条件下导热系数与含水率、干密度关系式的参数如表6所示,拟合所得拟合曲面如图6所示。

表 6 不同温度下导热系数与含水率、干密度公式拟合参数

温度 /°C	拟合参数						R^2
	A	B	C	D	E	F	
10	1.455	0.609	0.282 00	-3.850	-0.113 6	0.039 09	0.910
20	1.292	0.692	0.267 50	-3.867	-0.139 3	0.038 07	0.895
30	-1.822	1.425	0.036 39	-115.200	0.754 3	-0.724 10	0.949
40	-1.494	1.338	0.030 12	-456.900	-0.572 4	-0.645 50	0.948
50	-1.272	1.509	0.014 84	-293.200	0.253 1	-0.666 50	0.962
60	1.407	0.775	0.238 00	-3.434	-0.158 2	0.038 86	0.911

5 体积膨胀对重塑膨胀岩导热系数的影响

重塑膨胀岩试样的导热系数随体积膨胀变形率的变化如图 7 所示。

从图中可以看出,在同一初始干密度条件下,重塑膨胀岩的导热系数随着变形率的增加而降低,且不同初始干密度下随膨胀变形率增大而降低的幅度也有所不同。在重塑膨胀岩试样初始干密度为 1.7、1.8、1.9 g/cm³ 时,当变形率从 0.5% 增加到 5.0%,

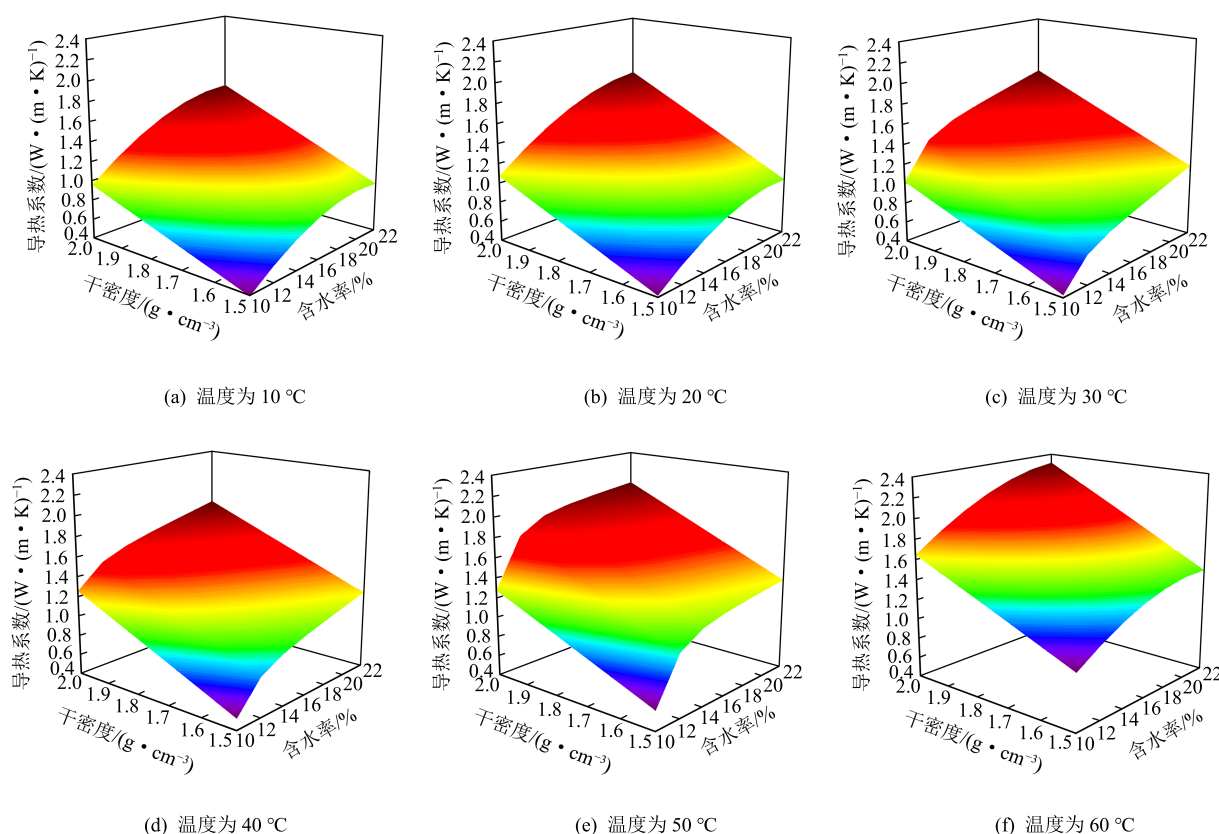


图 6 不同温度下导热系数拟合关系曲面

Fig.6 Thermal conductivity fitting surfaces at different temperatures

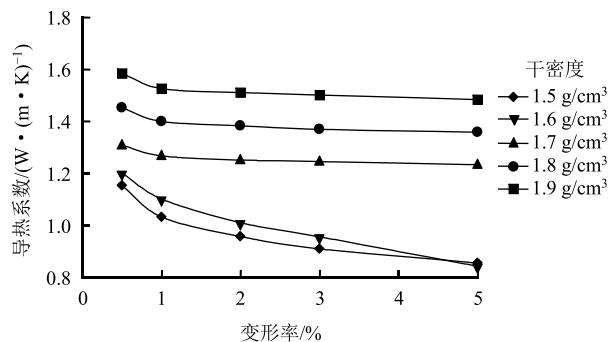


图 7 不同干密度膨胀岩导热系数随变形率的变化曲线

Fig.7 Variations curves of thermal conductivity with expansive rate of expansive rock in the different dry densities

导热系数降低的幅度较小,分别为 6.3%、6.5%、5.7%。而在膨胀岩试样初始干密度为 1.5、1.6 g/cm³ 时,当变形率从 0.5% 增加到 5.0%,导热系数降低的幅度较大,分别为 29.8%、25.8%。

重塑膨胀岩试样在试验过程中,含水率发生变化,实质上所测吸水膨胀后的试样导热系数与其初始含水率并无关系,只与试样最终含水率相关。

通过观察试验后的试样可以发现,在环刀的限制作用下,重塑膨胀岩试样吸水膨胀主要是沿着环刀高度方向,沿环刀径向的膨胀很少。因此,可以忽略膨胀岩试样的径向膨胀,重塑膨胀岩试样吸水膨胀后干密度产生了明显变化,新的干密度 d_n 计算

式为

$$d_n = \frac{V_h d_s}{V_h \left(1 + \frac{\Delta h}{h}\right)} \quad (3)$$

式中: d_n 为试样吸水膨胀后的干密度 (g/cm^3); d_s 为试样初始干密度 (g/cm^3); V_h 为试样体积 (cm^3); Δh 为试样变形量 (cm); h 为试样初始高度 (cm)。

在试验过程中膨胀岩试样浸泡在蒸馏水里, 孔隙中的空气逐渐被水代替, 含水率逐渐增高而趋于饱和, 按照 3.1 节所述重塑膨胀岩导热系数应呈现升高的趋势。但随着体积变形率的增加, 导热系数仍呈现下降的趋势。分析认为, 随着水分进入到膨胀岩中具有活动性的黏土矿物晶胞之间, 晶胞的间距发生改变, 使得重塑膨胀岩试样发生体积膨胀; 随之造成土颗粒之间的间距增加, 产生裂隙, 以至于土颗粒之间的点和面接触减少。并且由式 (3) 可知, 在体积变形之后的重塑膨胀岩试样的干密度明显低于试样初始干密度, 相较于试验前, 试验后的土颗粒更为松散, 因此土体的导热系数会随着体积变形率的增加而降低。当试样初始干密度较低时, 土体的孔隙率较大, 水分有着更充分的移动通道, 所以初始干密度较小的试样, 其导热系数随变形率增加而降低的幅度较大。

6 结 论

(1) 当干密度相同时, 重塑膨胀岩导热系数会随着含水率的增加而升高, 当含水率从 10.4% 上升至 21.9%, 其导热系数上升了 70% 以上。当含水率相同时, 导热系数随着干密度的增加而升高, 当干密度从 $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ 增加到 $2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$, 其导热系数上升了 70% 以上。主要是因为含水率升高时, 土颗粒之间的“水桥”促进了热量的传播, 且水膜的形成减小了土颗粒与空气界面的热阻力; 而干密度增加时, 土的孔隙率减小, 土颗粒之间的接触点和接触面增加。

(2) 随温度增长, 重塑膨胀岩导热系数的变化呈现 2 个阶段: 当温度从 10°C 增加到 40°C 时, 重塑膨胀岩的导热系数会随着温度的升高而缓慢增大 (阶段 I), 其增长量占整体增长量的 30%~40%; 当温度从 40°C 增加到 60°C 时, 导热系数迅速增大 (阶段 II), 其增长量占整体增长量的 60%~70%。这主要是由于在潜热传输的影响下, 岩土体的导热性能升高, 与此同时, 土颗粒在温度的影响下粒径不断增加并发生聚集, 重塑膨胀岩孔隙率升高, 为

潜热传输提供了更加有利的条件。

(3) 重塑膨胀岩导热系数与其含水率、干密度分别呈现良好的相关性, 与此同时, 不同温度条件下导热系数与干密度、含水率的关系与常温时的规律基本一致。通过双参数拟合, 建立了不同温度条件下重塑膨胀岩导热系数与含水率、干密度之间的关系。

(4) 当初始干密度相同时, 重塑膨胀岩的导热系数随着体积变形率的增加而降低。在重塑膨胀岩初始干密度为 1.7 、 1.8 、 $1.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时, 当变形率从 0.5% 增加到 5.0%, 导热系数降低的幅度较小, 分别为 6.3%、6.5%、5.7%。而在膨胀岩初始干密度为 1.5 、 $1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时, 当变形率从 0.5% 增加到 5.0% 时, 导热系数降低的幅度较大, 分别为 29.8%、25.8%。其主要是由于吸水膨胀后的重塑膨胀岩出现裂隙, 土颗粒之间点和面的接触相对减少。

参 考 文 献

- [1] AMPOFO F, MAIDMENT G, MISSENDEN J. Underground railway environment in the UK Part 2: investigation of heat load[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(5-6): 633-645.
- [2] 于连广, 吴喜平, 于赫男. 高频热扰对地铁隧道土壤温度的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(5): 95-101.
YU Lian-guang, WU Xi-ping, YU He-nan. Effect of high-frequency thermal disturbance on soil temperature around the metro tunnels[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(5): 95-101.
- [3] 刘逸, 李炳熙, 徐心海, 等. 地铁废热-土壤源热泵联合供暖系统研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(6): 754-758.
LIU Yi, LI Bing-xi, XU Xin-hai, et al. Study on the heating system combined subway exhaust heat with geothermal source heat pump[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2010, 31(6): 754-758.
- [4] 肖琳, 杨成奎, 胡增辉, 等. 地铁隧道围岩内温度分布规律的模型试验及其热导率反算研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增刊 2): 86-91.
XIAO Lin, YANG Cheng-kui, HU Zeng-hui, et al. Model test on temperature distribution in metro tunnel surrounding rock and inverse calculation of its thermal conductivity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Suppl.2): 86-91.
- [5] 张虎元, 朱江鸿, 马国梁, 等. 兰州地铁地温分布特性及其演化规律[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(2): 63-72.
ZHANG Hu-yuan, ZHU Jiang-hong, MA Guo-ling, et al. Distribution characteristics and evolution law of ground temperature in Lanzhou Subway[J]. *China Railway Science*, 2020, 41(2): 63-72.

- [6] 张楠, 夏胜全, 侯新宇, 等. 土热传导系数及模型的研究现状和展望[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1550-1562.
ZHANG Nan, XIA Sheng-quan, HOU Xin-yu, et al. Review on soil thermal conductivity and prediction model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1550-1562.
- [7] ABU-HAMDEH N H. Thermal properties of soils as affected by density and water content[J]. **Biosystems Engineering**, 2003, 86(1): 97-102.
- [8] COTE J, KONRAD J. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42(2): 443-458.
- [9] 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.
- [10] LU S, REN T, GONG Y, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 2007, 71(1): 8-14.
- [11] 刘晨晖, 周东, 吴恒. 土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1877-1886.
LIU Chen-hui, ZHOU Dong, WU Heng. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(12): 1877-1886.
- [12] 曾召田, 范理云, 莫红艳, 等. 土壤热导率的影响因素实验研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 377-384.
ZENG Zhao-tian, FAN li-yun, MO Hong-yan, et al. Experimental study of influence factors of soil thermal conductivity[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**, 2018, 39(2): 377-384.
- [13] TONG B, KOOL D, HEITMAN J L, et al. Thermal property values of a central Iowa soil as functions of soil water content and bulk density or of soil air content[J]. **European Journal of Soil Science**, 2020, 71(2): 169-178.
- [14] 曾召田, 赵艳林, 吕海波, 等. 广西红黏土热物理特性及影响因素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 252-258.
ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin, LÜ Hai-bo, et al. Experimental study on thermal properties of red clay in Guangxi province and its influence factors[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(Suppl.1): 252-258.
- [15] 刘晓燕, 蔡国军, 刘路路, 等. 南京河漫滩淤泥质粉质黏土导热系数特性及预测模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(5): 989-995.
LIU Xiao-yan, CAI Guo-jun, LIU Lu-lu, et al. Thermal conductivity and prediction model of mucky silty clay in Nanjing floodplain[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2019, 49(5): 989-995.
- [16] 叶万军, 董西好, 杨更社, 等. 含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 656-662.
YE Wan-jun, DONG Xi-hao, YANG Geng-she, et al. Effect of moisture content and dry density on thermal parameters of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 656-662.
- [17] 董西好, 叶万军, 杨更社, 等. 温度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2888-2894, 2900.
DONG Xi-hao, YE Wan-jun, YANG Geng-she, et al. Experimental study of influence of temperature on thermal properties of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2888-2894, 2900.
- [18] ZHANG Yue, LI Xiao-feng. Monitoring and analysis of subway tunnel thermal environment: a case study in Guangzhou, China[J]. **Sustainable Cities and Society**, 2020, 55: 102057.
- [19] 徐云山, 孙德安, 曾召田, 等. 膨润土热传导性能的温度效应[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 39-45, 56.
XU Yun-shan, SUN De-an, ZENG Zhao-tian, et al. Temperature effect on thermal conductivity of bentonites[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(1): 39-45, 56.
- [20] 唐迎春, 黄钟晖, 张凯, 等. 南宁第三系浅层风化泥岩物理力学及膨胀特性指标分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 144-151.
TANG Ying-chun, HUANG Zhong-hui, ZHANG Kai, et al. Physical mechanical indexes and swelling property of weathered tertiary mudstone at shallow depth in Nanning[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2014, 22(1): 144-151.
- [21] SMITH W O. The thermal conductivity of dry soil[J]. **Soil Science**, 1942, 53(6): 435-460.
- [22] 江杰, 魏丽, 潘鑫, 等. 不同颗粒粒径重塑与原状膨胀岩物理力学性质变化规律研究[J]. 力学与实践, 2020, 42(2): 189-195.
JIANG Jie, WEI Li, PAN Xin, et al. The variations of physical and mechanical properties of remodeling and undisturbed expansive rocks of different particle sizes[J]. **Mechanics in Engineering**, 2020, 42(2): 189-195.
- [23] 欧孝夺. 城市环境下黏性土微观结构的热力学行为研究[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
OU Xiao-duo. Thermodynamic behavior research on the soil structure about urban environment[D]. Nanning: Guangxi University, 2004.
- [24] LI J, WU X, HOU L. Physical, mineralogical, and micromorphological properties of expansive soil treated at different temperature[J]. **Journal of Nanomaterials**, 2014, 2014: 848740.