

# 上海⑤<sub>1</sub>层粉质黏土的热传导特性

陈宝, 许邹, 姚聪琳, 张会新

(同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 采用基于热探针法的热传导仪, 对上海地区地铁隧道主要穿越的⑤<sub>1</sub>层粉质黏土的热传导特性进行了试验研究. 实验结果表明: 饱和粉质黏土试样的孔隙比越大, 其热导率越小; 随着土样含水率从饱和状态逐渐降低, 初期土样会出现明显体积收缩、热导率升高, 而后当含水率降低到塑限的时候, 土样体积收缩速率明显变缓, 热导率则逐渐降低, 热导率总体上呈现出先升后降的规律, 最大值出现在塑限左右. 此外, 还应用若干现有经验公式对上述热传导试验数据进行了拟合, 由此验证各经验公式的适用性.

**关键词:** 粉质黏土; 热导率; 含水率; 孔隙比

**中图分类号:** TU411.2

**文献标识码:** A

## Thermal Conductivity of Shanghai ⑤<sub>1</sub> Silty Clay

CHEN Bao, XU Zou, YAO Conglin, ZHANG Huixin

(Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A series of tests were carried out with the heat probe method by thermal properties analyzer to investigate the thermal conductivity of shanghai ⑤<sub>1</sub> layer silty clay, the most common type in the metro tunnel engineering. The test results show that the thermal conductivity of saturated silty clay decreases with the void ratio. When the water contents drop down gradually from saturated value to dry value, the soil sample shrinks evidently first and then its thermal conductivity increases. While the water contents drop down near the plasticity limit, the volumetric shrinkage becomes stable and the thermal conductivity reaches its maximum value. After the peak, the thermal conductivity decreases with water contents. Finally, some existing empirical formulas were introduced to fit the test data, and their fitness was verified.

**Key words:** silty clay; thermal conductivity; water content; void ratio

近年来, 随着经济日益繁荣, 上海大力开发地铁项目来缓解城市交通压力. 而地铁投入运营后, 隧道内会产生大量的热量, 使得地铁内的热环境状况日益恶劣; 此外, 地铁内一旦发生火灾, 隧道内的热量会通过衬砌管片向外传播扩散到周围土体中去, 温度升高将影响土体的强度和变形特性, 改变隧道结构所受水、土压力的量值, 从而影响隧道的稳定性和安全性<sup>[1-5]</sup>. 因此, 需要对火灾条件下隧道周围土层内的温度场变化与分布进行研究, 而土体的热传导特性直接影响隧道内的热量向周围介质场的传递规律, 故有必要首先研究隧道周围土体的热传导参数及其影响因素.

国内外众多学者已对土壤的热传导特性开展了大量的研究, 发现土体热导率受土体孔隙比(干密度)、含水率(饱和度)、温度、盐浓度、矿物成分等因素的影响<sup>[6-12]</sup>. Lu等<sup>[13]</sup>研究了室温条件下(20℃±1℃)孔隙率、含水率、饱和度等对土的导热系数的影响, 并提出了改进的计算热导率的公式; Hiraiwa等<sup>[9]</sup>发现, 较大范围的温度变化对热导率会产生显著影响; Abu-Hamdeh<sup>[14-15]</sup>通过单探针和双探针法定性得到黏土热导率随着密度和含水率增加而增加的结论, 并对砂土和黏土比热容理论预期值和试验测试值进行了对比, 导出了土体比热容、导热系数与干密度、含水率的经验公式. 陈善雄等<sup>[16]</sup>对4种砂土的热导率进行研究, 归纳出了热导率与孔隙率和饱和度的经验公式. 张旭等<sup>[17]</sup>对华东地区土和砂土混合物的导热系数进行了研究, 给出了土及砂土混合物导热系数的实验关联式, 但该文只选用了上海地区的表层土, 且数据量太少. 苏天明等<sup>[18]</sup>给出了饱和黏土、粉质黏土热导率与含水率、孔隙比之间的经验计算公式, 指出饱和土体的热导率随含水率增加而降低, 呈非线性规律, 可用对数关系拟合. 肖琳等<sup>[19]</sup>给出了砂土、粉土和粉质黏土在不同干密度范

围内的热导率随含水率的变化曲线,可用对数关系拟合,并指出热导率随含水率的增大而增大,其值的变化在含水率较小范围内比在含水率较大范围内变化剧烈.但其试验土样的含水率普遍低于 25%,所得热导率随含水率变化趋势与文献[18]中的相反.已有研究表明,在影响土体热导率的众多因素中,孔隙比和含水率是主要因素,且有关上海地区地铁隧道工程中经常遇到的土的传热特性的文献尚很少.

本文拟以上海地铁隧道经常穿越的⑤<sub>1</sub>层粉质黏土为试验对象,重点研究孔隙比和含水率对其热导率的影响,在实验室恒温条件下采用基于热探针法的热传导仪对土样的热导率进行测试,开展以下研究工作:① 对不同孔隙比的饱和土样的热导率进行量测,分析孔隙比对热导率的影响,并运用若干热传导经验公式对试验数据进行拟合;② 研究具有不同初始孔隙比的土样在含水率降低时,土样热导率及体积变形随含水率的变化规律;③ 运用②中的试验规律对不同经验公式的适用性进行验证.

## 1 热导率预测理论

因土体热导率主要受土体孔隙比与含水率影响,且两者易于通过常规试验方法获取,所以许多学者均尝试利用土的孔隙比(干密度)与含水率(饱和度)来预测其热导率,但很多文献集中在膨润土材料研究方面<sup>[20-21]</sup>,有关黏性土的热导率与含水率、孔隙比的关系上则主要集中在低含水率的非饱和土研究方面<sup>[12-19]</sup>.

### 1.1 饱和土体热传导公式

Woodside 等提出了一种预测饱和土热导率的公式<sup>[22]</sup>

$$\lambda_{sr} = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n \quad (1)$$

式中: $\lambda_{sr}$ 为饱和土体热导率预测值; $\lambda_s$ 为土颗粒热导率; $\lambda_w$ 为水的热导率(温度为 20℃时, $\lambda_w = 0.594 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ); $n$ 为饱和土体的孔隙率.

### 1.2 非饱和土体热传导公式

Johansen 提出了如下公式<sup>[23]</sup>:

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) K_e + \lambda_{dry} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为非饱和土体热导率预测值; $\lambda_{sat}$ 和 $\lambda_{dry}$ 分别为饱和度 $S_r$ 等于 1 和 0 时的热导率; $K_e$ 为饱和度的函数,表示饱和度对热导率的影响.具体数值可由下列公式求取:

$$\begin{cases} \lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n \\ \lambda_{dry} = (0.135\rho_d + 64.7)/(\rho_s - 0.947\rho_d) \\ K_e = 1.0 + \lg S_r \quad \text{细粒土} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\rho_d$ 为土的干密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\rho_s$ 为土颗粒密度  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Cosenza 等<sup>[24]</sup>提出了可考虑土、水、气三相热导率的一般性计算公式

$$\lambda = \{\sqrt{\lambda_s}(1-n) + \sqrt{\lambda_w}w + \sqrt{\lambda_a}(n-w)\}^2 \quad (4)$$

式中: $\lambda_a$ 为空气的热导率,  $\lambda_a = 0.024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,只需拟合出 $\lambda_s$ ,即可得到热导率随含水率 $w$ 和孔隙率 $n$ 的变化关系;如果去掉气相 $\sqrt{\lambda_a}(n-w)$ ,取 $n = wG_s/(1+wG_s)$ ,便可得饱和状态时土体的热导率计算公式

$$\lambda_{sr} = \{\sqrt{\lambda_s}(1-wG_s/(1+wG_s)) + \sqrt{\lambda_w}w\}^2 \quad (5)$$

肖琳等<sup>[19]</sup>进行了含水率与孔隙率对土体热导率影响的室内实验,提出了粉质黏土热导率与含水率、孔隙比的关系式

$$\lambda = (1.07 - 0.458e^{(-w/15.4)}) \ln(3.88 - 2.664n) \quad (6)$$

## 2 试验研究

### 2.1 试验材料

本文试验所采用的⑤<sub>1</sub>层灰色粉质黏土是上海地区隧道经常穿越的主要土层之一,其基本性质见表 1.

表 1 粉质黏土的基本性质  
Tab.1 Basic properties of silty clay

指标	数值
相对密度 $G_s$	2.72
液限 $w_L/\%$	37.7
塑限 $w_P/\%$	24.6
塑性指数 $I_p$	13.1
孔隙比 $e$	0.82~1.13

### 2.2 土样制备

上海地区⑤<sub>1</sub>层粉质黏土的孔隙比变化范围较大,在实际中又很难取得所需孔隙比的饱和土样,且考虑到土样运输保存的困难,试验中采用固结法制取既定孔隙比的土样进行热传导性研究.采用固结法制取孔隙比为 0.85, 0.90, 0.95, 1.00, 1.05, 1.10 6 组土样,测量其在饱和状态及含水率每下降 5% (含水率从 30%至 20%按 2.5%降低含水率)时的热导率.同时,为了获得更多饱和状态时的热导系数,增加了孔隙比为 0.83, 0.87, 0.93, 0.97, 1.03, 1.07 6 组土样.

制取土样之前,首先将原状土样风干、碾碎、过

筛. 取过筛土放入密封盒中并与水均匀拌合至 1.1 倍液限附近, 测量其含水率.

根据既定土样尺寸, 计算制取一定孔隙比饱和土样所需泥浆质量, 用注射器吸入计算所需质量泥浆注入特制的圆柱形有机玻璃模具内, 采用固结法制得一定孔隙比土样. 设计土样尺寸为: 直径 50 mm, 高 70 mm. 固结完成后, 将土样缓慢推出放置于烧杯中, 记录固结后的土样质量以及计算含水率  $w_c$ , 可按以下步骤计算:

固结后土样中水的质量  $m''_w$  为

$$m''_w = m'_w - \Delta m_w$$

固结后土样中土颗粒的质量  $m''_s$  为

$$m''_s = m'_s - \Delta m_s$$

固结后含水率, 即计算含水率  $w_c$  为

$$w_c = m''_w / m''_s$$

其中:  $\Delta m_w$  为制样过程中水分损失;  $\Delta m_s$  为制样过程中泥浆损失;  $m'_w$  为固结前土样中水的质量;  $m'_s$  为固结前土样中土颗粒的质量.

试验过程中需要控制含水率变化, 因此需要知道固结法制取的每组土样的含水率. 这里用计算含水率来表示固结后土样的含水率, 待试验结束后再烘干土样, 测量其真正孔隙比及含水率, 计算试验过程中每次测量热导率时对应的含水率, 进而得到不同孔隙比的饱和土样含水率降低时, 土样的热导率随含水率变化时的变化规律. 本次试验实际制取的土样孔隙比见表 2.

表 2 制备土样的孔隙比

Tab.2 Void ratio of soil samples

土样编号	预设孔隙比	实际孔隙比	饱和状态时热导率/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
A102	0.85	0.88	1.33
A201	0.90	0.90	1.32
A301	0.95	0.98	1.28
A401	1.00	1.00	1.27
A501	1.05	1.04	1.23
A601	1.10	1.10	1.21
S01	0.83	0.84	1.34
S02	0.87	0.92	1.31
S03	0.93	0.95	1.29
S04	1.03	1.03	1.24
S05	1.07	1.07	1.22

### 2.3 试验仪器

热传导特性测定仪器采用美国培安公司的 KD2 型热传导仪(图 1), 其测试原理基于热探针法. 仪器通过监测特定电压下线性热源的热消散来计算试样的热导率<sup>[25]</sup>. 热传导仪包括控制器和探针两部分(图 1), 其探针(长 60 mm, 直径 1.28 mm)兼有发热和监测的双重功能.

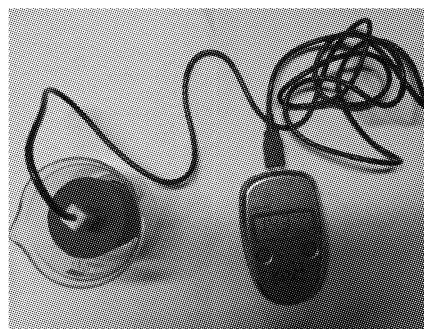


图 1 KD2 型热传导仪

Fig.1 KD2 thermal properties analyzer

测量时需将探针插入试样, 控制器首先平衡 30 s, 随后探针持续加热 30 s, 接着监测热传递过程中探针的冷却速度, 最后热传导仪利用温度变化监测数据自动计算并显示试样的热导率.

KD2 型热传导仪探针可直接插入较软土壤, 但随着量测次数增多, 测量孔的孔径会逐渐变大. 为使探针和土样良好接触, 插入土样前在探针表面均匀涂抹一层导热膏. 由于探针直径较小, 可忽略探针插入对样品的压紧作用; 试验过程中加热时间短, 土样内温度升高不超过  $1^\circ C$ , 避免了因探针加热导致周围材料中水分迁移. 热导仪测试范围为  $1.0 \sim 2.0 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , 精确度为  $\pm 5\%$ .

### 2.4 测试方法

实验时分别制取不同孔隙比时的土样, 改变各个土样的含水率, 对样品进行热导率测试, 从而得到一定孔隙比饱和土样的热导率和不同孔隙比的饱和土样含水率降低时, 土样的热导率及体积随含水率变化时的变化规律.

同一土样只钻取 1 个测量孔, 取 3 次测量结果的平均值作为该含水率时的热导率, 每次测量的时间间隔为 8 min.

测试中的假定: ① 水和土颗粒的热导率为定值; ② 土样中土颗粒和水分均匀分布; ③ 土样内温度分布均匀, 较小的温度变化对土样热导率影响不大.

热传导率测试: ① 取出固结好的土样装入烧杯中, 用保鲜膜封住烧杯口, 放入保湿皿中保湿 24 h 后进行第一次热导率测试, 并记录土样直径和高度, 实验过程中实验室温度保持恒定温度 ( $20^\circ C \pm 1^\circ C$ ); ② 测试后即将土样放置在自然条件下风干, 使含水率降低 5% (含水率从 30% 至 20% 按 2.5% 降低含水率), 水分蒸发量通过称量土样质量进行控制; ③ 当含水率降低 5% (或 2.5%) 时, 记录土样水分损失  $\Delta m$ , 用保鲜膜封住烧杯口, 放入保湿皿中保

湿 24 h 进行下一次测试,根据已有试验经验,土样放置一昼夜后,其内部水分基本分布均匀;④ 保湿 24 h 后,测试记录土样在此时含水率下的热导率及土样直径和高度;⑤ 重复②~④过程,测试和记录土样在含水率降低到预计值时对应的热导率及土样直径和高度。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 饱和粉质黏土的热导率与孔隙比的关系

在不同孔隙比条件下饱和上海⑤<sub>1</sub> 层粉质黏土的热导率见表 2 和图 2。

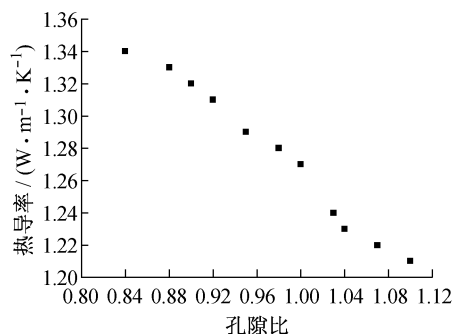


图 2 饱和粉质黏土热导率与孔隙比关系的实测曲线  
Fig.2 The measured curve of thermal conductivity against water content for saturated silty clay

从图 2 可知:对于处于饱和状态的上海⑤<sub>1</sub> 层粉质黏土,其孔隙比越大、含水率越大,相应的热导率越小,取值在 1.21~1.34 之间呈下降趋势,热导率与孔隙比之间表现为明显的指数关系。可能的原因是:土样孔隙比变大时,单位体积土样中水分变多,土颗粒体积减少,由于固体矿物的热导率比水的热导率大,所以饱和粉质黏土孔隙比越大,热导率越小。

#### 3.2 热导率与含水率和体积变形的关系

##### 3.2.1 含水率降低与土样体积变形

饱和度是衡量土样含水率的重要指标,当初始饱和土样的含水率逐渐减小时,其饱和度也逐渐降低。土样体积随饱和度的变化情况如图 3 所示,即当前饱和度状态下土样体积与初始饱和状态下土样体积的百分比。

从图 3 可知:当粉质黏土试样的饱和度从饱和状态开始减小时,初期土样的体积收缩量较大,但当饱和度降低到对应的含水率接近于塑限及以下时,体积收缩速率则明显变缓。

##### 3.2.2 含水率降低时热导率的变化规律

热导率随含水率的变化如图 4 所示。

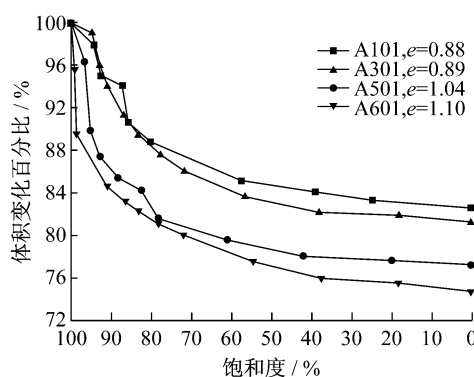


图 3 粉质黏土体积变形与饱和度的关系

Fig.3 Relationship between volume change and saturation for silty clay

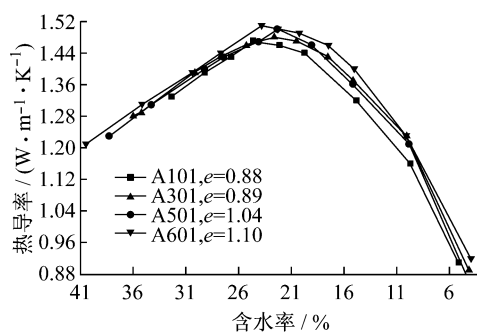


图 4 粉质黏土热导率与含水率关系的实测曲线

Fig.4 The measured curves of thermal conductivity against water content for silty clay

从图 4 可见:随着含水率降低,粉质黏土的热导系数呈现先增后减的规律,最大值出现在塑限附近,且热导率上升的速率随含水率的减小而降低,总体较热导率下降的速率偏小;不同孔隙比的土样随着含水率降低时热导率增大的比例较为一致;此外,随着含水率降低,具有不同初始孔隙比的土样的热导率变化比例较为一致;虽然孔隙比较大的土样饱和状态时的热导率较小,但当初始孔隙比不同的饱和土样的含水率降到相同值时,初始孔隙比较大的土样的热导率较大。

根据前人已有研究成果<sup>[15,18-19,26]</sup>,土样热导率应随含水率的减小而降低,表现为单调下降的关系,而本实验得到的结果却出现先升后降的规律。原因可能是:粉质黏土含水率从饱和状态开始降低时,土样的体积会产生明显的收缩,孔隙比减小,土颗粒之间接触更为紧密,单位体积内土颗粒变多,因此土体的热导率呈上升趋势;而当含水率降到塑限附近时,土样收缩变形趋于稳定,孔隙比变化不大,单位体积土样中土颗粒体积变化不大,而水分损失使得单位体积内水分比例减小,被水化膜包裹的土颗粒即被空

气间隔开,使得土样热导率开始降低,随着含水率的进一步减小,水化膜变薄,土颗粒之间的有效接触面积减小,导致热导率急剧降低。

## 4 热导率公式的比较

### 4.1 饱和粉质黏土热导率预测

用文献[22,24]公式对图2中饱和粉质黏土热导率与含水率的关系进行拟合,分别求得 $\lambda_s$ 为2.68,2.83,拟合公式为

$$\lambda = 2.68^{1-w} 0.594^w, R^2 = 0.973 \quad (7)$$

$$\lambda = \{ \sqrt{2.83(1-wG_s/(1+wG_s))} + \sqrt{0.594w} \}^2, R^2 = 0.943 \quad (8)$$

根据拟合公式计算粉质黏土的热导率预测值,与实测值的比较结果见图5,图中+20%和-20%线分别表示预测值与实测值的误差为±20%。

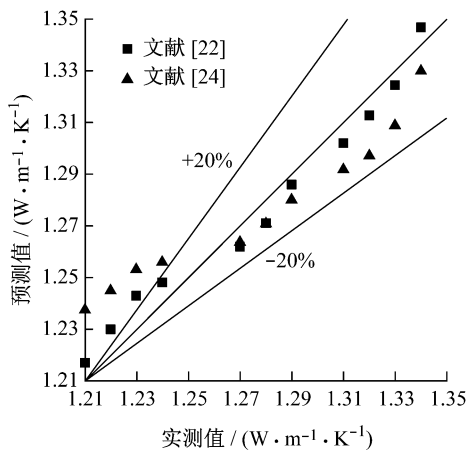


图5 饱和粉质黏土的热导率预测值与实测值比较

Fig. 5 Comparison between the predicted and the measured thermal conductivities values for saturated silty clay

由图5可见,Woodside公式预测的上海地区的热导率值与实测值较为相近,说明使用此公式能较好地预测饱和⑤<sub>1</sub>层粉质黏土的热导率。

### 4.2 含水率降低时热导率的变化规律预测

分别利用文献[19,23-24]的热导率公式,并考虑试验过程中粉质黏土的体积收缩,对随着含水率减小而出现的热导率变化情况进行拟合,图6为土样A601的热导率变化情况的拟合值与实测结果。

从图6中可以看出:3条拟合曲线均能在一定程度上反映实测热导率的变化趋势。文献[23]公式的拟合结果在量值上与实测结果最接近;而文献[19]公式的拟合结果虽较实测结果小很多,但其显示的热导率变化趋势与实测结果最接近,即随着含水率

减小,热导率出现先升后降的变化。

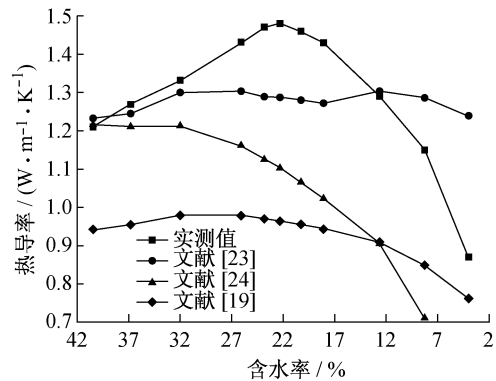


图6 土样A601的热导率与含水率的拟合关系曲线

Fig. 6 Fitting curves of thermal conductivity and water content for sample A601

## 5 结论

(1) 对于上海⑤<sub>1</sub>层饱和粉质黏土,孔隙比越大,含水率越大,热导率越小,呈下降趋势,热导率与孔隙比(含水率)呈明显的指数关系,取值范围在1.21~1.34之间。

(2) 随着土样含水率从饱和状态逐渐降低,初期土样会出现明显体积收缩、热导率升高,而后当含水率降低到低于塑限的时候,土样体积收缩速率明显变缓,热导率则逐渐降低,土样热导率总体上呈现出先升后降的规律,最大值出现在塑限左右。此外,随着含水率降低,具有不同初始孔隙比的土样的热导率变化比例较为一致;虽然孔隙比较大的土样饱和状态时的热导率较小,但当初始孔隙比不同的饱和土样的含水率降到相同值时,初始孔隙比大的土样的热导率较大。

(3) 对于上海⑤<sub>1</sub>层饱和粉质黏土,使用文献[22]公式能较好地拟合不同孔隙比状态下的热导率;当粉质黏土含水率降低时,可利用文献[19]公式拟合热导率变化趋势,但拟合值偏小,将来可参考此方法建立能综合反映含水率、孔隙比影响的新型热导率公式,以便更好地拟合本文试验结果。

### 参考文献:

- [1] Ampofo F, Maidment G, Missenden J. Underground railway environment in the UK part 1: review of thermal comfort [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 611.
- [2] Ampofo F, Maidment G, Missenden J. Underground railway environment in the UK Part 2: investigation of heat load [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 633.

- [3] 高曼. 日本地铁排热利用介绍[J]. 能源研究与信息, 1995, 11(1): 50.  
GAO Man. Observation and analysis of the heat flux in Japanese subway [J]. Energy Research and Information, 1995, 11(1): 50.
- [4] 北京城建设计研究总院. GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.  
Beijing Urban Engineering Design & Research Institute GB50157—2003 Code for design of metro[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [5] 肖琳, 杨成奎, 胡增辉, 等. 地铁隧道围岩内温度分布规律的模式试验及其热导率反算研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 86.  
XIAO Lin, YANG Chengkui, HU Zenghui, 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(S2): 86.
- [6] Abu-Hamdeh N H, Reeder R C. Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1285.
- [7] Noborio K, McInnes K J. Thermal conductivity of salt-affected soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(2): 329.
- [8] 邓友生, 何平, 周成林. 含盐土导热系数的试验研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 319.  
DENG Yonsheng, HE Ping, ZHOU Chengliu. An experimental research on the thermal conductivity coefficient of saline soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 319.
- [9] Hiraiwa Y, Kasubuchi T. Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5—75℃) [J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51: 211.
- [10] Nusier O K, Abu-Hamdeh N H. Laboratory techniques to evaluate thermal conductivity for some soils [J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 39(2): 119.
- [11] De Vries D A. Thermal properties of soil [C]//Physics of Plant Environment. Now York: John Wiley & Sons, 1963: 210.
- [12] Tarnawski V R, Leong W H. Thermal conductivity of soils at very low moisture content and moderate temperatures [J]. Transport in Porous Media, 2000, 41(2): 137.
- [13] LU Sen, REN Tusheng, GONG Yuanshi. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature [J]. Soil Physics, 2007, 71(1): 8.
- [14] Abu-Hamdeh N H. Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(2): 209.
- [15] Abu-Hamdeh N H. Thermal properties of soils as affected by density and water content [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(1): 97.
- [16] 陈善雄, 陈守义. 砂土热导率实验研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(5): 47.  
CHEN Shanxiong, CHEN Shouyi. Experimental study on thermal conductivity of sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(5): 47.
- [17] 张旭, 高晓兵. 华东地区土壤及土沙混合物导热系数的实验研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(5): 83.  
ZHANG Xu, GAO Xiaobing. Experimental study on thermal conductivity of soil and its mixture with sand [J]. Journal of Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, 34(5): 83.
- [18] 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.  
SU Tianming, LIU Tong, LI Xiaozhao, 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.
- [19] 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.  
XIAO Lin, LI Xiaozhao, ZHAO Xiaobao, et al. Laboratory 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.
- [20] Tang A M, Cui Y J, Le T T. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites [J]. Applied Clay Sciences, 2008, 41: 181.
- [21] 叶为民, 王琼, 潘虹, 等. 高压实高庙子膨润土的热传导性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 32(6): 821.  
YE Weimin, WANG Qiong, PAN Hong, et al. Thermal conductivity of compacted GMZ01 bentonite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 32(6): 821.
- [22] Woodside W, Messmer J. Thermal conductivity of porous media [J]. Appl Phys, 1961, 32: 1688.
- [23] Johansen O. Thermal conductivity of soils [D]. Norwegian University of Science and Technology, 1975.
- [24] Cosenza P, Guérin R, Tabbagh A. Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modeling [J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54: 581.
- [25] ASTM. ASTM D5334—2008. Standard test methods for determining of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2008.
- [26] Cote J, Konrad J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 443.