

北京平原区粉质粘土热导率影响因素实验研究

栾英波¹ 郑桂森¹ 卫万顺^{1,2}

(1.北京市地质矿产勘查开发局,北京 100195;2.中国地质调查局浅层地温能研究与推广中心,北京 100195)

摘要:岩土体热导率是热物理性质重要参数之一,不仅仅决定着浅层地温场的展布形态,而且也是整个热泵功率计算的核心,是影响地源热泵工程投资和运行能耗的关键因素。本文通过一系列实验,对粉质粘土的热导率与含水量、密度、孔隙比进行研究和统计,从实验研究结果来看,粉质粘土热导率随着含水量的增大而增大,可以用对数关系和乘幂关系进行拟合,相关系数较好,由于样品物质成分和微观结构差异影响着传热方式组合,难以用统一的拟合方程表示同一地区热导率与含水量等因素变化规律。在含水率不变的情况下随着孔隙比的增大而热导率逐渐减小,随密度的增加而热导率增大的规律趋势明显。粉质粘土热导率随含水量的变化可分为 3 个阶段,含水量在 0~5%,热导率随之增加急剧,含水量 5%~20%时,热导率随之增加较快,含水量大于 20%时,热导率随之增加缓慢并趋于稳定。

关键词:热导率;粉质粘土;统计分析;北京地区

中图分类号:TK521 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)03-0981-08

1 前 言

能源、环境和可持续发展备受世界各国关注,随着经济社会的发展和相关技术的进步,作为清洁可再生资源的浅层地温能逐渐得到人们接受、认可,并快速发展。世界地热能利用中,浅层地温能利用能量以每年超过 20%的速度增长^[1],中国应用浅层地温能供暖制冷的建筑物面积近 $8000 \times 10^4 \text{ m}^2$,对改善能源结构、节约资源和保护大气环境将起到重要的作用^[2]。岩土体是浅层地温能储藏、传递、散失的物质基础,表示岩土体导热能力大小的热导率是岩土体热物理性质重要参数之一,不仅仅决定着浅层地温场的展布形态,而且也是整个热泵功率计算的核心,是影响地源热泵工程投资和运行能耗的关键因素,以适当的参数计算能够取得最大的经济效益和社会效益^[3],因此有必要对岩土体的热物理性质进行研究,以达到节能、高效、安全的目的。

浅层地温能作为一种积蓄在地下(0~200 m)的无形自然资源,是地球深部的热传导和热对流与太

阳辐射共同作用的产物。为地表以下 0~200 m 深度内温度与距离地表 1.5 m 处不被阳光直接照射情况下(百叶箱)的温度之间存在常年温差而形成的能量,是两个状态不同的温度场之间存在的势能,人们借助热泵技术实现了在两个温度场之间建立恒定温度场的目的^[3~4]。为提高热泵使用效率、降低投资成本,众多学者对岩土体热导率与含水量、孔隙率关系、浅层地温能适宜区划、钻孔成孔及回填等问题进行了广泛研究取得了丰富的科研成果^[5~10]。在北京平原区浅层地温能资源地质勘查项目和北京市优秀人才培养基金资助下,通过室内试验,统计分析了热导率与含水量、密度、孔隙比等影响因素之间的关系,在对测试数据统计的基础上提出了含水量、孔隙比与热导率关系的经验计算公式。

2 北京平原区第四纪地质概况

北京平原由永定河、潮白河等河流的冲洪积物堆积塑造而成,第四纪沉积物分布广泛,厚度变化很大,从山前到平原由几十米到数百米,在沉积凹陷中

收稿日期:2012-07-23;改回日期:2013-03-28

基金项目:北京市优秀人才培养资助计划(2010D00201100000)和北京平原区浅层地温能资源地质勘查项目(pxm2006-000-043289)资助。

作者简介:栾英波,男,1973 年生,高级工程师,主要从事基础地质、城市地质、浅层地温资源研究;E-mail:lybdkch@126.com。

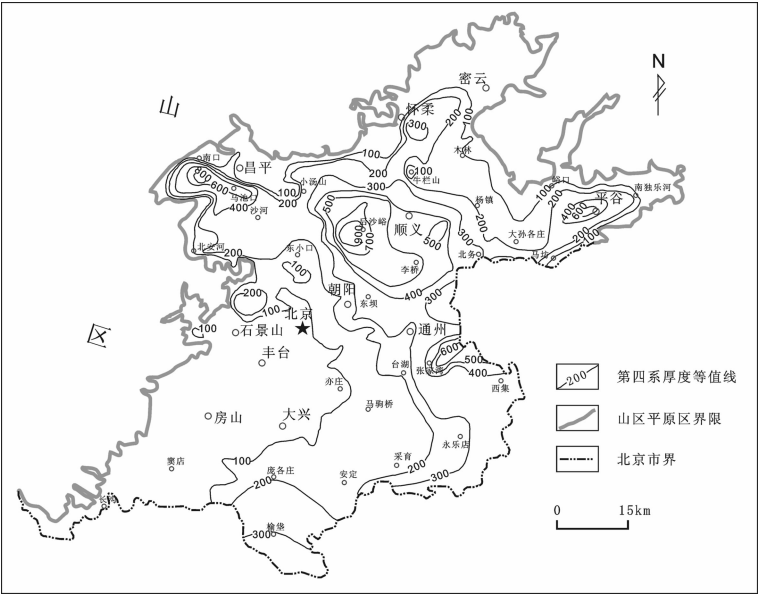


图 1 北京平原区第四系等厚图

Fig.1 Isopach map of Quaternary sediments in Beijing plain

心最厚达一千余米(图 1)。通过卫星像片可清晰地看到, 每次永定河的改道形成的巨大冲洪积扇相互叠压(图 2), 这些冲洪积扇结构清楚, 从扇顶到扇缘沉积物由砂砾石、中粗砂、粉细砂到粘土, 由粗到细的

趋势明显。在扇间洼地和扇缘分布有湖相和沼泽相沉积。由于河流的摆动, 冲洪积扇内岩性横向变化迅速, 第四纪沉积物成因类型主要有冲积相、洪积相、湖沼相, 有些地区发现海相沉积物^[17-18]。

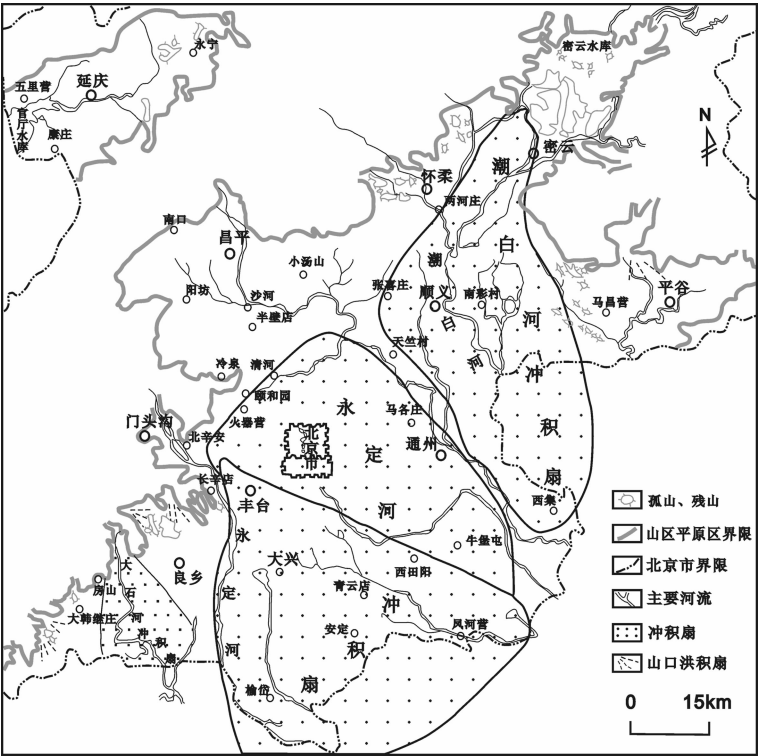


图 2 晚更新世时期永定河、潮白河冲洪积扇位置示意图

Fig.2 Yongding River fan and Chaobai River fan in Late Pleistocene

3 样品采集与测试

3.1 样品的采集与测试

本次工作共采集粉质粘土样品 8 件,样品的采集、保管运输严格按照《《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)^[19]进行,浙江地质调查研究院土工实验室按照《《土工试验方法标准》GB/T50123-1999)^[20]在测试了天然含水率、天然密度、比重、孔隙比等指标的基础上进行了热导率测试。在完成天然含水率热导率测试后,将土样放置在恒温 105℃ 的烘箱内使其蒸发水分以此改变含水量,每隔 20 min、40 min、60 min、90 min、120 min、170 min、290 min、410 min、680 min 和 2120 min 称取土样质量并计算相应的含水率,同时测试相应的热物性指标见表 1。

3.2 热导仪工作原理简介

热导率测试采用瑞典凯戈纳斯有限公司生产的 Hot disk 热常数分析。Hot Disk 的核心元件是一个导电金属镍经蚀刻处理后形成的连续双螺旋结构薄层圆盘温度探头,测试时,在探头上通过恒定输出的电流,由于温度的增加,探头的电阻发生变化,从而在探头两端产生一定程度的电压降,通过记录在一段时间内电压的变化,可以较为精确地得到被测样品的导热性能。精度为 3%,范围为 0.005~500 W/mK。

4 测试数据的数理统计分析

测试数据见表 1。第四纪松散堆积物中能量传递的机理要比固相岩石复杂的多,其中颗粒的大小、形状、排列方式、孔隙度、含水性质、含水率、物质成分、密实度、结构等都是影响因素^[3,7-12,21-22]。将表 1 中样品热导率与含水率的关系进行线性、对数、指数和乘幂拟合,通过拟合,得到了粉质粘土热导率与含水率关系拟合曲线及拟合参数,由于得出的 8 个试验样品的拟合曲线类似,文中列出 bj-1、bj-4 两个样品的各种拟合曲线(图 3~4)。由图 3、图 4 和表 2 可知,北京地区粉质粘土热导率与含水率可以用对数和乘幂关系来拟合,相关性较好,对数和乘幂拟合关系的相关性数据大小各占一半且在伯仲之间。与前人研究的结果相比有一定的出入;如肖琳^[9]在排除孔隙比、干密度、土样成分等影响因素的情况下,独立分析了粉土的热导率与含水量之间的关系,两者符合对数变化规律,苏天明^[9]指出南京地区饱和状态下粘性土的热导率与含水量可以用对数关系拟合,相关性较好。可能由于样品物质成分和微观结构差异影响着传热方式组合,因而导致不同地区乃至相同地区热导率与含水量等因素拟合方程形式不尽相同,但变化规律趋势相似,Salomone 等^[23]文章中指出了砂土和粘土在不同密度范围内热导率随含水量的

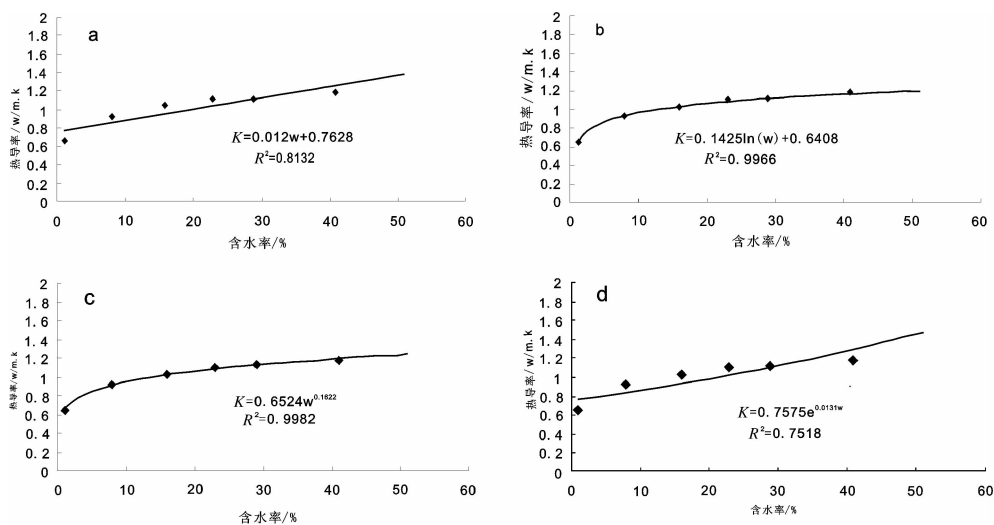


图 3 北京地区 bj-3 粉质粘土热导率与含水率关系模拟曲线
a—线性关系;b—对数关系;c—乘幂关系;d—指数关系

Fig.3 Simulation curve of the relationship between thermal conductivity and natural water content rate of silty clay from sample bj-3 in Beijing area
a-Linear relationship; b-Logarithmic relationship; c-Power relationship; d-Exponential relationship)

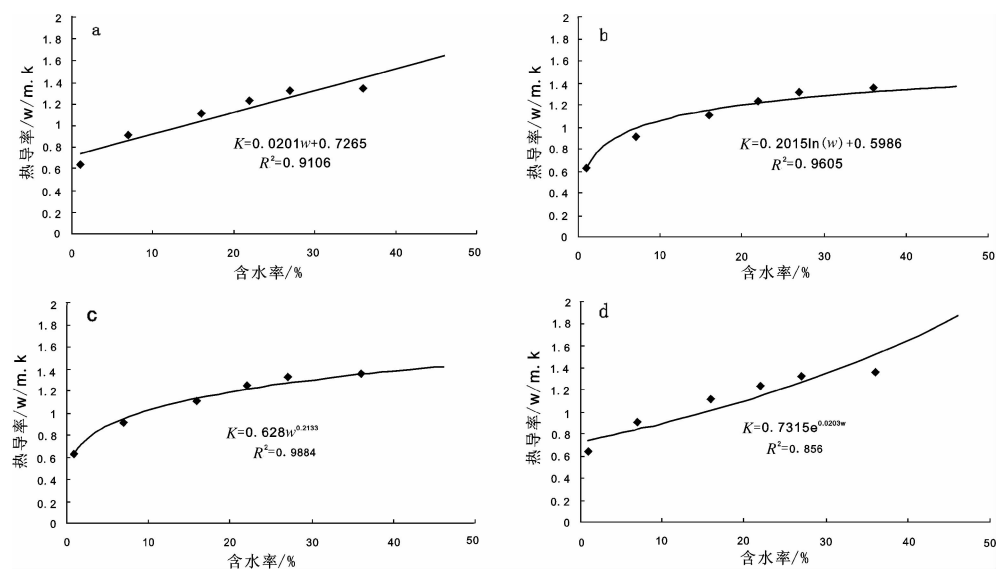


图 4 北京地区 bj-4 粉质粘土热导率与天然密度模拟关系曲线
a—线性关系;b—对数关系;c—乘幂关系;d—指数关系

Fig.4 Simulation curve of the relationship between thermal conductivity and natural density of silty clay from sample bj -4 in Beijing area
a—Linear relationship; b—Logarithmic relationship; c—Power relationship; d—Exponential relationship)

增大而增大,其值在含水量较低值时增加急剧。从本次统计分析总体来看样品热导率随着含水率的增大而增大,含水量在 0~5%,热导率增加急剧,含水量 5%~20%时,热导率增加较快,含水量大于 20%时,热导率增加缓慢并趋于稳定。可能是因为岩土体由固体颗粒、水和空气组成,水的平均热导率为 0.599 w/m.k,空气在常压下为 0.023 w/m.k,干燥状态下颗粒间热传导主要途径为接触传导,少量的水加入增大

了颗粒的有效接触面积,能使热导率迅速增加^[6],随着水的逐渐增多,颗粒有效面积增加不明显,而孔隙水逐渐增加,水的热导率比空气热导率大,所以热导率增加变缓并趋于稳定。

密度、孔隙比是影响岩土体热导率另一个重要因素,将表 1 中样品热导率与天然密度进行线性、对数、指数和乘幂拟合,通过拟合,得到了粉质粘土热导率与天然密度拟合曲线及拟合参数,由图 5 可知,

表 1 北京地区粉质粘土热导率测试分析数据

Table 1 Analytical data of the rate of thermal conductivity of silty clay in Beijing area

项目 编号	岩性 定名	天然含 水率/%	土粒 比重	湿密度 /(g/cm ³)	干密度 /(g/cm ³)	饱和度 / %	天然 孔隙比	不同含水率下热导率(w/m.k)					
								3%	8%	16%	21%	25%	35%
BJ-1	粉质粘土	35	2.72	1.82	1.35	93.6	1.018	0.6789	0.9658	1.124	1.172	1.216	1.289
BJ-2	粉质粘土	23	2.72	1.88	1.53	80.2	0.78	2%	7%	10%	14%	21%	23%
								1.223	1.412	1.507	1.543	1.588	1.599
BJ-3	粉质粘土	41	2.72	1.77	1.26	95.6	1.167	1%	8%	16%	23%	29%	41%
								0.649	0.919	1.028	1.099	1.121	1.176
BJ-4	粉质粘土	36	2.72	1.81	1.33	93.8	1.044	1%	7%	16%	22%	27%	36%
								0.6418	0.9078	1.109	1.23	1.316	1.346
BJ-5	粉质粘土	19	2.72	1.86	1.56	69.8	0.74	4%	8%	11%	15%	17%	19%
								1.331	1.491	1.542	1.622	1.731	1.779
BJ-6	粉质粘土	29	2.72	1.84	1.43	87.0	0.907	4%	11%	16%	19%	26%	29%
								1.089	1.336	1.42	1.464	1.559	1.56
BJ-7	粉质粘土	36	2.72	1.80	1.32	92.8	1.055	2%	11%	18%	26%	30%	36%
								0.9502	0.9683	0.9787	0.9729	1.018	1.059
BJ-8	粉质粘土	21	2.72	1.85	1.53	73.3	0.779	5%	8%	13%	16%	19%	21%
								1.118	1.289	1.341	1.428	1.372	1.438

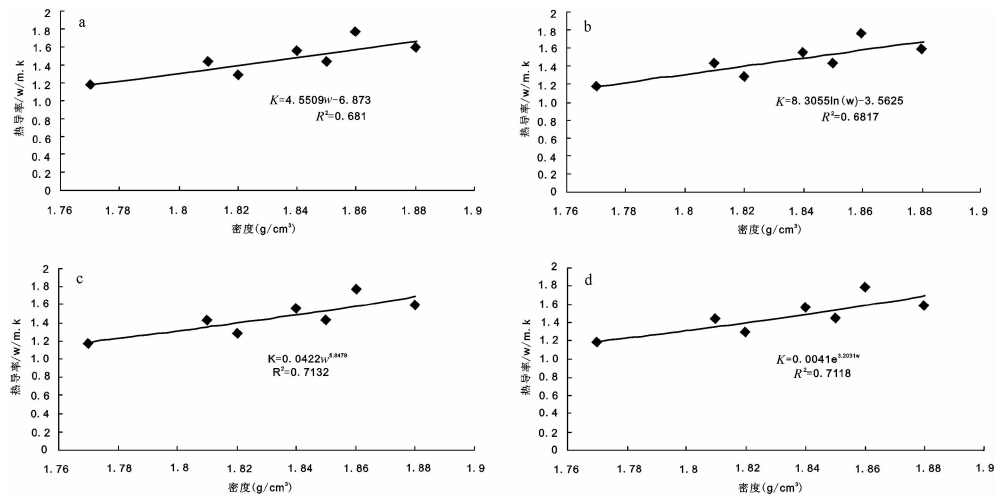


图 5 北京地区粉质粘土热导率与天然密度模拟关系曲线
a—线性关系;b—对数关系;c—乘幂关系;d—指数关系

Fig.5 Simulation curve of the relationship between thermal conductivity and natural density of silty clay in Beijing
a—Linear relationship; b—Logarithmic relationship; c—Power relationship; d—Exponential relationship

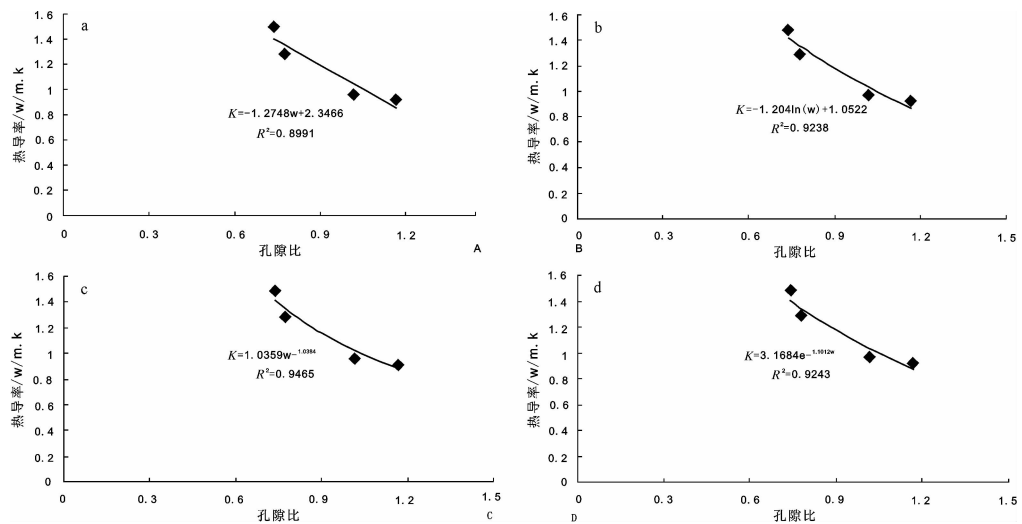


图 6 北京地区粉质粘土热导率与孔隙比关系模拟曲线
a—线性关系;b—对数关系;c—乘幂关系;d—指数关系

Fig.6 Simulation curve of the relationship between thermal conductivity and pore ratio of silty clay in Beijing
a—Linear relationship; b—Logarithmic relationship; c—Power relationship; d—Exponential relationship

表 2 粉质粘土热导率与含水率关系拟合方程

Table 2 Simulation equation of the rate of thermal conductivity and water content of silty clay

样品编号	对数关系拟合方程	相关系数	乘幂关系拟合方程	相关系数
Bj-1	$k = 0.2461\text{Ln}(w) + 0.4276$	$R = 0.997$	$k = 0.5331w^{0.2885}$	$R = 0.987$
Bj-2	$k = 0.1566\text{Ln}(w) + 1.1194$	$R = 0.994$	$k = 1.1404w^{0.1115}$	$R = 0.992$
Bj-3	$k = 0.1425\text{Ln}(w) + 0.6408$	$R = 0.998$	$k = 0.6524w^{0.1622}$	$R = 0.999$
Bj-4	$k = 0.2015\text{Ln}(w) + 0.5986$	$R = 0.980$	$k = 0.628w^{0.2133}$	$R = 0.994$
Bj-5	$k = 0.2738\text{Ln}(w) + 0.9279$	$R = 0.972$	$k = 1.0287w^{0.1782}$	$R = 0.981$
Bj-6	$k = 0.2429\text{Ln}(w) + 0.7517$	$R = 0.999$	$k = 0.8481w^{0.185}$	$R = 0.998$
Bj-7	$k = 0.0271\text{Ln}(w) + 0.918$	$R = 0.724$	$k = 0.9202w^{0.0272}$	$R = 0.732$
Bj-8	$k = 0.2016\text{Ln}(w) + 0.8265$	$R = 0.948$	$k = 0.8926w^{0.1582}$	$R = 0.945$

注:热导率单位:w/m.k。

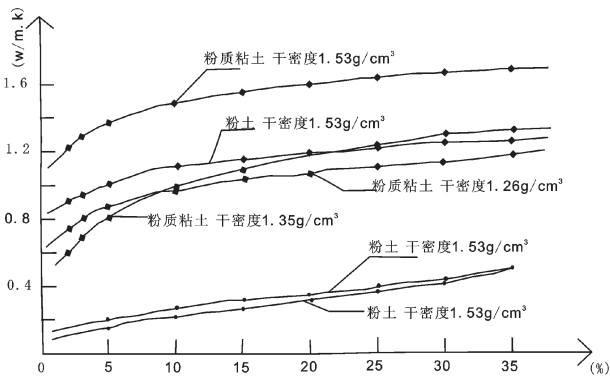


图 7 不同密度情况下热导率随含水量变化对比图(据肖琳^[7])
Fig.7 Comparative diagram of water content diversification with the rate of thermal conductivity at different densities

粉质粘土热导率与天然密度大体上可用乘幂关系来描述,经验计算公式: $\gamma=0.0422x^{5.8479}$, $R=0.845$,拟合结果表明,在天然状态下随着密度的增加热导率增大的趋势明显,呈非线性规律。将表 1 中含水率为 8% 的样品热导率与孔隙率的关系进行线性、对数、指数和乘幂拟合,通过拟合,得到了粉质粘土热导率与孔隙率关系拟合曲线及拟合参数,由图 6 可知,粉质粘土热导率与可孔隙比用乘幂关系来描述,相关性较好,经验计算公式: $\gamma=1.0359x^{-1.0384}$, $R=0.973$,拟合结果表明,在含水率不变的情况下随着孔隙比的增大而热导率逐渐减小的趋势明显。

5 对比分析

国内外学者对热导率进行了大量研究,取得了丰富资料,并提出了经验公式。本文将 bj-1、bj-2 和 bj-3 的对数拟合曲线与肖琳^[7]文献中的 s1 样品拟合曲线进行对比。从图 7 中可以看出粉土热导率在含水量 0~5% 范围内变化很快,含水量大于 20% 范围内热导率的变化趋于稳定,在干密度相同情况下,粉质

粘土热导率要大于粉土热导率,可能由于粉质粘土颗粒较细,接触面积较大有关。从侧面也可以证明,在含水量相同的情况下,热导率随着密度的增大而增加。从表 2 不难看出,对于同一样品用对数和乘幂关系进行模拟相关性较好,但是用拟合方程计算干密度情况下的热导率,计算公式就是失去意义。将表 2 中对数方程式系数进行平均,得到新的对数方程为 $k=0.2093\ln(w)+0.7561$,利用 $k=0.2093\ln(w)+0.7561$ 进行反演计算,得到计算的热导率(表 3),从表 3 中可以看出计算数据与实测数据误差较大,同一地区粉质粘土热导率尚难以用统一经验公式表示,可能与岩土体的岩性、接触关系、粒度组合等微观结构有关。但本次研究过程中尚未对整个钻孔进行系统取样测试和求取综合平均热导率研究,今后将进一步对天然条件下岩土体热物性参数和综合热导率的变化规律研究,更具有现实的工程意义。

6 结 论

本文在对北京地区粉质粘土的热导率、含水率、密度、孔隙比等指标进行了测试的基础上,统计分析粉质粘土的热导率随含水率、密度和孔隙比的变化规律,得出以下结论:

从实验研究结果来看,在其他因素不变的情况下粉质粘土热导率随着含水量的增大而增大,可以用对数关系和乘幂关系进行拟合,相关系数较好,由于样品物质成分和微观结构差异影响着传热方式组合,尚难以用统一的拟合方程表示热导率与含水量等因素变化规律。

在含水率不变的情况下随着孔隙比的增大而热导率逐渐减小,随密度的增加而热导率增大的规律趋势明显。

从本次研究分析来看本地区粉质粘土热导率随含水量的变化可分为 3 个阶段,含水量在 0~5% 内,

表 3 热导率反演计算与实测数据对比

Table 3 Comparison of the rate of thermal conductivity inversion calculations and measured data

含水率	实测值	计算值	误差率	含水率	实测值	计算值	误差率	含水率	实测值	计算值	误差率
1%				1%				1%			
21	1.438	1.393	3.1%	24.6	1.755	1.426	18.7	22.6	1.485	1.409	5.1
29	1.56	1.461	6.4%	24.7	1.746	1.427	18.3	22.7	1.738	1.410	18.9
19	1.779	1.372	22.9%	25.5	1.455	1.434	1.4	22.9	1.777	1.411	20.6
36	1.346	1.506	11.9%	26.1	1.684	1.439	14.6	23.7	1.98	1.419	28.4
41	1.176	1.533	30.4%	26.6	1.178	1.443	22.5	23.8	1.634	1.420	13.1
18	1.875	1.361	27.4%	26.7	1.327	1.444	8.8	23.9	1.505	1.420	5.6
19.8	1.61	1.381	14.2%	26.8	1.424	1.444	1.4	24	1.656	1.421	14.2

注:热导率单位:w/m·k。

热导率随之增加急剧,含水量 5%~20%时,热导率随之增加较快,含水量大于 20%时,热导率随之增加缓慢并趋于稳定。

参考文献(References):

- [1] 郑克桢. 浅层地热能开发利用的世界现状及在我国的发展前景 [C]//浅层地热能论文集, 北京:地质出版社, 2007:16-19.
Zheng Keyan. The world situation and development prospects in China of shallow geothermal energy development and utilization[C]//Proceedings of Shallow Geothermal Energy. Beijing:Geological Publishing House, 2007:16-19(in Chinese).
- [2] 郑桂森, 栾英波, 白凌燕. 我国浅层地温能资源分区探讨[J]. 城市地质, 2011, 6(1):12-16.
Zheng Guiseng, Luan Yingbo, Bai Lingyan. Discussion on the zonations of shallow geothermal energy resources in China[J]. Urban Geology, 2011, 6(1):12-16 (in Chinese with English abstract).
- [3] 卫万顺, 郑桂森, 栾英波. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质, 2010, 37(6):1733-1739.
Wei Wanshun, Zheng Guising, Luan Yingbo. The characteristics of shallow geothermal field and its influencing factors in Beijing plain area [J]. Geology in China, 2010, 37 (6): 1733-1739 (in Chinese with English abstract).
- [4] 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 等. 浅层地热能勘查评价[J]. 中国地质, 2007, 34(6):1115-1121.
Han Zaisheng, Ran Weiyan, Tong Hongbing, et al. Exploration and evaluation of shallow geothermal energy [J]. Geology in China, 2007, 34(6):1115-1121(in Chinese with English abstract).
- [5] 陶庆法, 胡杰. 浅层地热能开发利用现状、发展趋势与对策[C]//浅层地热能论文集. 北京:地质出版社, 2007:3-9.
Tao Qingfa, Hu Jie. Shallow geothermal energy development and utilization, trends and countermeasures [C]//Proceedings of Shallow Geothermal Energy. Beijing:Geological Publishing House, 2007:3-9(in Chinese).
- [6] 高新宇, 范伯元, 张宏光, 等. 浅层地温能开发利用对地质环境影响程度的探索性研究[J]. 现代地质, 2009, 23(6):1185-1194.
Gao Xinyu, Fan Boyuan, Zhang Hongguang, et al. Frontier research on the impact extent of geological environment during the development and utilization of shallow geothermal resources [J]. Geoscience, 2009, 23 (6):1185-1194 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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试验 [J]. 解放军理工大学学报, 2008, 9(3):241-246.
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, 2008, 9(3):241-246 (in Chinese with English abstract).
- [8] 肖琳, 李晓昭, 胡增辉, 等. 土体内在结构对热导率计算模型的影响研究[J]. 地质论评, 2009, 55(4): 598-605.
Xiao Lin, Li Xiaozhao, Hu Zenghui, et al. The influences of the soil structure on the calculation model of thermal conductivity [J]. Geological Review, 2009, 55(4):598-605(in Chinese with English abstract).
- [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(16):1278-1283.
Su Tianming, Liu Tong, Li Xiaozhao. Test and analysis of thermal properties of soil in Nanjing district[J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2006, 25(16):1278-1283(in Chinese with English abstract).
- [10] Rao, M.V.B.B.G, Singh D N. Generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4):767-773.
- [11] 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):209-216.
- [12] Singh D N, Devid K. Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity[J]. Exp. Thermal Fluid Sci, 2000, 22:133-143.
- [13] 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):83-89.
Zhang Xu, Gao Xiaobing. Experimental study of soil and mixture of soil and sand thermal conductivity in East China [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, 34 (5):83-89 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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.
Chen Shanxiong, Chen Shouyi. Experimental study on thermal conductivity of sands [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16 (5): 47-53 (in Chinese with English abstract).
- [15] 卫万顺, 郑桂森, 栾英波, 等. 浅层地温能资源地质勘查评价体系探讨——以北京平原区浅层地温能资源地质勘查为例[J]. 城市地质, 2010, 5(1)29-35.
Wei Wanshun, Zhen Guisen, Luan Yingbo, et al. Discussion on the geological exploration and evaluation system of shallow geothermal energy resources——Take the geological survey on shallow geothermal energy resources of Beijing plain area as an example[J]. Urban Geology, 2010, 5 (1)29-35 (in Chinese with English abstract).
- [16] 卫万顺, 李宁波, 冉伟彦, 等. 浅层地温能开发利用中的关键问题研究[J]. 城市地质, 2009, 4(3)20-24.
Wei Wanshun, Li Ningbo, Ran Weiyan, et al. Study on the key problems of development and utilization of shallow geothermal energy [J]. Urban Geology, 2009, 4 (3)20-24 (in Chinese with English abstract).
- [17] 蔡向民, 栾英波, 郭高轩, 等. 北京平原第四系的三维地质结构 [J]. 中国地质, 2009, 36(5):1021-1029.
Cai Xiangmin, Luan Yingbo, Guo Gaoxuan, et al. 3D Quaternary geological structure of Beijing plain [J]. Geology in China, 2009, 36(5):1021-1029 (in Chinese with English abstract).
- [18] 蔡向民, 郭高轩, 栾英波, 等. 北京山前平原区第四系三维地质

结构调查方法研究 [J]. 地质学报, 2009, 83(7):1047–1057.

Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, Luan Yingbo, et al. Quaternary geological of Beijing piedmont plain 3 -d structural [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(7):1047–1057(in Chinese with English abstract).

[19] 中华人民共和国标准. 土工试验方法标准 (GB/T 50123—1999) [S].北京: 中国计划出版社, 1999.

Professional Standards Compilation Group of People’s Republic of China. Standard for Soil Test Method (GB/T 50123—1999) [S]. Beijing:China Planning Press, 1999(in Chinese).

[20] 中华人民共和国标准. 岩土工程勘察规范 (GB50021–2001)[S]. 北京:中国计划出版社, 2009.

Professional Standards Compilation Group of People’s Republic of China, Code for Investigation of Geotechnical Engineering (GB/T 50123—1999) [S]. Beijing:China Planning Press, 2009 (in Chinese).

[21] Devendra N S,Konchenapalli D. Generalizen relationships for estimating soil thermal resistivity [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 22:133–143.

[22] Cosenza P, Guerin R, Tabbagh A. Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modeling [J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54:581–587.

[23] Salomone L A. Thermal performance of fine -graines soils [J]. Geotech Engrg ASCE,1990, (116):359–374.

The experimental study of the factors affecting the rate of thermal conductivity of silty clay in Beijing plain

LUAN Ying-bo¹, ZHENG Gui-sen¹, WEI Wan-shun^{1,2}

(1. Beijing Geological Mineral Exploration and Development Bureau, Beijing 100195, China; 2. Bureau of Shallow Geothermal Energy Research and Extension Center, China Geological Survey, Beijing 100195, China)

Abstract:Being one of the most important parameters, the rate of thermal conductivity of rock and soil not only decides the distribution of the shallow geothermal field but also constitutes the core of the whole calculation of the heat pump power, thus serving as the key factor affecting the investment on ground-source heat pump projects and the operating energy consumption. Based on a series of experiments, the authors made a full study and statistic analysis of the relationship of the rate of thermal conductivity to water content, natural density and porosity. The test results show that the natural water content increases with the increase of the silty clay thermal conductivity, which can be fitted with the logarithmic and power relationship to obtain the better correlation coefficient. Because the differences in material compositions and microstructures of the samples affect the combination of the heat transfer, it is difficult to indicate the variation trend of the thermal conductivity and water content in the same area with the uniform fitting equations. With the increasing porosity, the rate of thermal conductivity decreases under the condition of constant water content. With the increasing density, the authors obtained the clear trend of increasing rate of thermal conductivity. There are three stages in the variation of rate of thermal conductivity and water content of silty clay. The rate of thermal conductivity increases dramatically when the water content varies in the range of 0–5%. The rate of thermal conductivity increases faster when the water content varies in the range of 5%–20%. The rate of thermal conductivity increases slowly and tends to stabilize when the water content is over 20%.

Key words:rate of thermal conductivity;silty clay;statistical analysis;Beijing area

About the first author:LUAN Ying-bo, male, born in 1973, senior engineer, specializes in geological survey in urban areas and the study of basic geology and the shallow geothermal energy resources;E-mail:lybdkch@126.com.