

# 南京地区土体热物理性质测试与分析

苏天明<sup>1</sup>, 刘彤<sup>1</sup>, 李晓昭<sup>2</sup>, 俞缙<sup>3</sup>, 肖琳<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093;  
3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 通过对南京地区大量黏土和粉质黏土样品的比热容值和导热值的测试, 分析土体热物理性质与其含水量、孔隙比的相关关系。对影响土体比热容值、导热值的因素作了详细分析, 提出根据土体含水量计算土体比热容和根据含水量、孔隙比值计算土体热导率的经验计算公式。

**关键词:** 土力学; 含水量; 孔隙比; 热物理性质; 经验公式; 南京地区土体

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2006)06-1278-06

## TEST AND ANALYSIS OF THERMAL PROPERTIES OF SOIL IN NANJING DISTRICT

SU Tianming<sup>1</sup>, LIU Tong<sup>1</sup>, LI Xiaozhao<sup>2</sup>, YU Jin<sup>3</sup>, XIAO Lin<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;  
2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;  
3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

**Abstract:** According to the test data of the thermal capacity and thermal conductivity of large amounts of soil samples in Nanjing district, the relationship between soil thermal properties and moisture content and pore-solid ratio are analyzed. The soils used are classified as clay loam and sandy loam. At the same time, elements which have effects on the thermal capacity and thermal conductivity are analyzed. Finally, empirical formulas of thermal capacity and thermal conductivity are proposed on the basis of moisture content and pore-solid ratio.

**Key words:** soil mechanics; moisture content; pore-solid ratio; thermal properties; empirical formulas; soil samples in Nanjing district

## 1 引言

岩土体的热学性质是岩土体的一个基本性质, 在诸如深埋高压电缆<sup>[1]</sup>、地下油气管道<sup>[2]</sup>、核废料填埋<sup>[3]</sup>、浅层地下空间、地热开发中都具有重要的意义。传热研究的主要任务就是研究传热传质的基本

规律以及具体运用, 计算给定条件下的传热传质的速率及其控制, 寻求传热强化和削弱的技术途径<sup>[4]</sup>。随着地球表面土地资源的逐渐匮乏, 能源短缺情况的不断加剧和人类工程活动的发展, 对地下空间的有限热能资源利用、环境的热调控能力设计以及采用适当的参数计算以最大限度的节能和节约投资等问题将日益成为人们关注的热点问题。因此, 有必

**收稿日期:** 2004-12-22; **修回日期:** 2005-02-25

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412701); 国家自然科学基金资助项目(90302011); 中国青年科学基金资助项目(20494650)

**作者简介:** 苏天明(1970-), 男, 2003年于南京大学地质工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事地质工程方面的研究工作。E-mail: sutianming@mail.iggcas.ac.cn

要研究岩土体传热过程、规律以及热环境变化的规律,以达到节能、高效、安全的目的<sup>[5]</sup>。很多学者对岩土体热学性质作了研究,例如用“瞬态测试法”对影响土体热阻( $1/K$ )的因素进行了研究<sup>[6]</sup>;通过试验定性得到壤土热导率随着密度和含水量增加而增加的结论<sup>[7]</sup>,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,并导出土体比热容、导热与孔隙率、干密度、含水量的经验公式<sup>[8]</sup>。但因数据量太小,说服力不够。

一些学者用同样的方法通过测试土体不同成分的热阻以对土体热阻进行模拟<sup>[9]</sup>;一些用该法得到土体热导率与密度和含水量的对数成正比的关系<sup>[10]</sup>。研究认为岩土体的导热和其孔隙率  $n$  指数呈正比关系<sup>[11, 12]</sup>。

本文通过对南京地区土体样品含水量、孔隙比、比热容值和导热值等参数的测试,分析了土体热物理性质与含水量、孔隙比之间的关系,对影响比热容值、导热值的因素作了详细分析,并在对测试数据统计的基础上提出了根据土体含水量计算比热容值、根据含水量、孔隙比值计算热导率的经验计算公式。

## 2 南京地区地质概况及工程地质条件

南京市三面环山,一面临水,地势起伏较大。市区及市郊的一些剥蚀残丘大致呈北东向分布,形成 3 段基岩隆起,将南京市分割为南北 2 个小盆地,并由 1 条纵贯南北的秦淮河古河道将这 2 个盆地联系为整体。

3 段基岩隆起构成低山丘陵地貌,主要由剥蚀残丘及侵蚀堆积阶地组成。其间发育有坳沟或山间洼地,地形起伏较大。低山丘陵区覆盖土层厚度一般不超过 20 m,局部地段基岩直接出露地表。覆盖土层除坳沟中分布有较弱土层外,均为中、晚更新世沉积的下蜀组黏土和粉质黏土。

古河道冲积平原主要由河漫滩及古河床构成,其一般发育有 4 级埋藏阶地。构成埋藏阶地的土层主要为晚更新世末期至早全新世沉积的可塑状态粉质黏土,局部为软~流塑状态的黏土及粉土等,接地面以上则为中、晚全新世沉积的淤泥质粉质黏土、粉土,粉细砂层,其中粉、细砂主要分布于古河床之中。本次测试样品均来自这些地层。

## 3 土体的比热容和导热

为了研究饱和土体的含水量、孔隙比和比热容、热导率的相互关系,本文对南京地区部分黏性土样品的含水量、孔隙比、比热容值和热导率值进行了测试和分析。为尽量减少样品成分的不同对比热容测试可能产生的影响,样品全部采用流塑~软塑范围内的粉质黏土或者黏土。它们在形成历史、沉积环境上基本相似,可以保证固体成分上具有相似性。对每个样品均测试 3 次以上,取其结果近似的 3 个值取平均。并在分析中假设:(1) 岩土体均饱和和含水;(2) 水的热导率为定值;(3) 因为统计采用土性相近的样品,假设干土的热导率也为定值。

### 3.1 比热容测试

#### 3.1.1 测试仪器和原理

比热容测试采用美国 Perkin Almer 公司的差示扫描量热仪 DSC - 6(differential scanning calorimetry, DSC)对土样比热容进行测量。差示扫描量热法就是在程控温度下,测量输入到试样和参比样之间的功率差与温度关系的技术<sup>[13]</sup>。

(1) 差示扫描量热仪测试采用热动态零位平衡原理。

该原理要求无论试样吸热还是放热,试样和参比样温度都要处于动态零位平衡,使 $\Delta T$ (温度差) $\rightarrow 0$ 。DSC 通过功率补偿来维持试样和参比样处于相同温度所需要的能量差 $\Delta W$ 。在 DSC 仪器中,试样支持器与参比样支持器各有一个独立的热源(见图 1),并在试样皿和参比样皿底部除有测温原件以外,还有为补偿热量用的电阻加热装置。测试时,保持参比样侧以给定的升温速率升温,通过变化试样侧的加热量来达到补偿的作用。如试样放热,则试样侧少加热;如试样吸热,则试样侧多加热。这样,就能及时通过输入功率来消除温度差,使得 2 个试样托架总是处在相同温度,从理论上讲可以做到功率补偿而不破坏程序温度。这就是所谓动态零位平衡原理。

(2) 差示扫描量热仪的温度和能量的校正。

温度校正的最简便的方法是实测一系列熔点不同的标准物质。DSC - 6 采用高纯度的锌或铟作为标准的校正物质。对于纯物质来说,熔融是一级相变等温过程,转变峰形尖锐,其相变温度是开始转

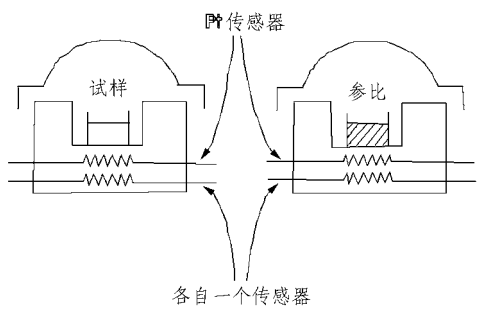


图 1 美国 Perkin Almer DSC - 6 型样品支持器的示意图  
Fig.1 Schematic diagram of sustain box of Perkin Almer DSC - 6

变的温度。

能量的校正标准采用熔融热焓精确测定过的高纯金属。最常用的校准物质是铟，其纯度为 99.999%，熔点为 156.4 ℃，熔融热  $\Delta H = 28.45 \text{ J/g}$ 。根据仪器常数  $K$ ，任何试样的熔融热均可求出

$$\Delta H = \frac{KAR}{mS}$$

(1)

式中： $A$  为 DSC 曲线下面包围的面积( $\text{mm}^2$ ，校正曲线的峰面积)， $\Delta H$  为校正样或试样的熔融热焓( $\text{J/mg}$ )， $m$  为试样(校正样)质量( $\text{mg}$ )， $S$  为升温速率； $R$  为设定的量程( $\text{J/s}$ )， $K$  为岩石热导率( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )。DSC 还常采用比热容数据已精确测定过的蓝宝石来进行能量校正。

3.1.2 比热容测试数据分析

表 1 列出了 19 个粉质黏土样品的比热容和含水量。为了尽量减少样品成分的不同对比热容测试可能产生的影响，样品全部采用流塑~可塑范围内的粉质黏土。图 2 所示为粉质黏土的比热容和含水量关系曲线。

由图 2 可知，粉质黏土比热容随含水量增大而增大，含水量和比热容之间具有较好的线性关系，比热容和含水量的经验计算公式为

$$C = 0.1477w + 2.6213$$

(2)

式中： $C$  为样品的比热容( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )， $w$  为含水量(%)。

根据式(2)就可以通过测定土体的含水量来计算粉质黏土的比热容值。

3.2 导热测试

3.2.1 测试仪器和原理

热导率测试采用美国 Pricis 公司的 TC Probe<sup>tm</sup> 热导仪<sup>[14]</sup>。TC Probe<sup>tm</sup> 热导仪是一种测试界面热反射系数的仪器。测试时，探头对被测材料发射一个

表 1 粉质黏土样品含水量、比热容

Table 1 Results of moisture content and thermal capacity of silty clay

样品号	土样描述	含水量 w/%	平均 C/(J · (kg · K) <sup>-1</sup> )
DJ22 - 7	粉质黏土(可塑)	27.92	6.417
DJ15 - 11	粉质黏土(可塑)	33.81	7.935
DJ4 - 4	粉质黏土(可塑)	29.18	7.528
DJ24 - 3	粉质黏土(可塑)	27.8	7.146
DJ56 - 8	粉质黏土(可塑)	21.47	5.701
DJ13 - 7	粉质黏土(可塑)	26.04	6.842
DJ58 - 10	粉质黏土(软塑)	27.14	6.194
DJ4 - 13	粉质黏土(软塑)	25.42	6.769
DJ20 - 13	粉质黏土(软塑)	26.26	6.314
DJ7 - 8	粉质黏土(可塑)	25.79	6.477
DJ52 - 4	粉质黏土(软塑)	30.83	7.275
DJ10 - 5	粉质黏土(软塑)	33.37	7.948
DJ18 - 2	粉质黏土(软塑)	28.54	6.276
DJ16 - 6	粉质黏土(软~流塑)	31.39	6.842
DJ26 - 8	粉质黏土(软~流塑)	38.82	8.145
DJ24 - 7	粉质黏土(软~流塑)	33.51	7.489
DZJ5 - 15	灰粉质黏土(软塑)	34.24	7.528
DJ2 - 4	粉质黏土(可塑)	29.10	6.949
DJ24 - 10	粉质黏土(可塑)	23.72	5.899

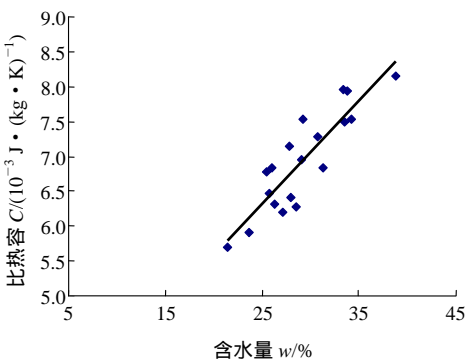


图 2 粉质黏土的比热容和含水量关系曲线

Fig.2 Curve of thermal capacity and moisture content of silty clay

恒定的热源，仪器自动记录界面上的温度变化，通过被测材料的密度、比热容和温度升高率的关系，直接计算出材料的热导率。TC Probe<sup>tm</sup> 在测试过程中温度升高小于 5 ℃，测试温度范围为 5 ℃~122 ℃，测试热导率范围为 0.001~10.000 W/(m · K)，

测试时间约为 10 s, 测试精度±2%。仪器标准传感器尺寸为 5 mm×50 mm 以及 5 mm×25 mm(宽×长), 可以测试样品最小尺寸为 5 mm×25 mm(宽×长)。TCProbe™ 热导仪测试的非破坏性、灵活的样本尺寸以及快速广范围的测试能力使其在空间、自动化、电子、医药、纺织等领域有着广泛的应用。

3.2.2 导热测试数据分析

含水岩土体热导率主要取决于材料的固体矿物成分、含水量和结构。当样品固体成分相同或者相似时, 含水量和孔隙比是影响含水岩土体热导率的重要因素。含水量反映的是岩土体组成成分变化, 孔隙比反映孔隙对岩土体结构的影响。表 2 列出了 20 个黏性土样品的含水量、孔隙比和热导率测试数据。

表 2 黏性土的热导率和孔隙比

Table 2 Thermal conductivity and pore-solid ratio of clay

样品号	土样描述	含水量 w/%	孔隙比 e	热导率 $K$ /(W·(m·K) <sup>-1</sup> )
DJ4-13	粉质黏土(软塑)	25.42	0.716	1.486
DJ7-8	粉质黏土(软塑)	25.79	0.807	1.447
DJ13-7	粉质黏土(软塑)	26.04	0.746	1.457
DJ20-13	粉质黏土(软塑)	26.26	0.710	1.556
DJ22-12	黏土(软塑)	27.10	0.795	1.386
DJ24-3	粉质黏土(软塑)	27.80	0.809	1.420
DYZJ15-5	黏土(流塑)	33.40	1.007	1.253
DJ24-7	粉质黏土(软~流塑)	33.51	0.964	1.290
J4-8	可塑黏土	36.90	1.114	1.247
DXZJ6-26	粉质黏土(软~可塑)	37.00	1.104	1.158
DXZJ9-6	淤泥(软~可塑)	37.60	1.084	1.247
DXZJ4-8	淤泥(流塑)	37.90	1.135	1.210
DJ2-14	黏土(软塑)	38.10	1.112	1.269
DOYJ27-4	软塑黏土(软塑)	38.20	1.073	1.226
DYZJ19-4	粉质黏土(流塑)	39.40	1.099	1.249

3.2.2.1 含水量对饱和土体热导率的影响

对干燥样热导率的测量结果进行饱水或含水量校正, 目前尚缺乏有关此类校正的统一的理论公式或实用的经验曲线, 一般都是随岩而异<sup>[15]</sup>。因此, 在天然含水条件下进行测量才能得到岩土体的真实热导率。对表 2 样品的热导率和含水量数据进行多

种数学拟合, 以对数关系拟合程度最高。通过拟合, 得到黏性土样品热导率和含水量相关曲线(见图 3)以及拟合参数。

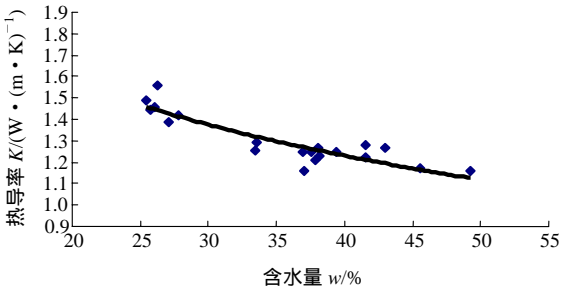


图 3 黏性土含水量和热导率的关系曲线

Fig.3 Curve of moisture and thermal conductivity of clay

由图 3 可知, 黏性土含水量和热导率的关系可以用对数关系来描述, 经验计算公式:  $K = -0.504 \ln w + 3.09$ , 相关系数  $R^2 = 0.8125$ 。

根据拟合结果, 可以得到如下结论:

(1) 饱和土体的热导率随着含水量的增加而降低, 呈下降曲线, 非线性规律。

(2) 从拟合曲线来以及相关系数来看, 用对数关系比用乘幂关系或指数关系拟合程度要高, 经验计算公式:

$$K = -0.504 \ln w + 3.09 \tag{3}$$

(3) 含水量增大导致饱和土体热导率降低的原因是水的热导率比固体矿物的热导率低。随着含水量增大, 岩土体中固体颗粒所占的比例相应降低, 导致饱水岩土体的热导率降低。

3.2.2.2 孔隙比对热导率的影响

为了减少样品中含水量的差异对孔隙比和热导率之间关系的造成的影响, 将表 2 数据中的含水量差别较大的部分数据剔除(含水量范围为 0.254~0.394)。黏性土的热导率和孔隙比数据见表 3。图 4 为热导率和孔隙比关系曲线。

黏性土孔隙比和热导率的关系可用对数关系拟合, 拟合为

$$K = -0.6335 \ln e + 1.2858$$

$$R^2 = 0.923$$

分析如上数据, 可得到如下结论:

(1) 饱和土体孔隙比和热导率的关系可以用对数关系进行拟合, 不同土体参数不同, 粉质黏土孔隙比和热导率的关系可用对数关系拟合, 经验公式

为

表 3 黏性土的热导率和含水量  
Table 3 Thermal conductivity and moisture content and pore-solid ratio of clay

样品号	土样描述	含水量 <sup>*</sup> w/%	孔隙比 e	热导率 $K$ /(W · (m · K) <sup>-1</sup> )
DJ4 - 13	粉质黏土(软塑)		0.716	1.486
DJ7 - 8	粉质黏土(软塑)		0.807	1.447
DJ13 - 7	粉质黏土(软塑)		0.746	1.457
DJ20 - 13	粉质黏土(软塑)		0.710	1.556
DJ22 - 12	黏土(软塑)		0.795	1.386
DJ24 - 3	粉质黏土(软塑)		0.809	1.420
DYZJ15 - 5	黏土(流塑)		1.007	1.253
DJ24 - 7	粉质黏土(软~流塑)		0.964	1.290
J4 - 8	黄色黏土(软塑)		1.114	1.247
DXZJ6 - 26	粉质黏土(软~可塑)		1.104	1.158
DXZJ9 - 6	淤泥(软~可塑)		1.084	1.247
DXZJ4 - 8	淤泥(流塑)		1.135	1.210
DJ2 - 14	黏土(软塑)		1.112	1.269
DOYJ27 - 4	黏土(软塑)		1.073	1.226
DYZJ19 - 4	粉质黏土(流塑)		1.099	1.249
DJ6 - 5	黏土(软塑)	41.60	0.937	1.277
DYZJ22 - 6	黏土(流塑)	41.60	1.147	1.221
DJ54 - 8	粉质黏土(软塑)	43.00	1.201	1.265
DJ2 - 7	粉质黏土(流塑)	45.60	1.111	1.175
DJ6 - 8	粉质黏土(软塑)	49.30	0.981	1.157

\*注: 前 15 个样品的含水量见表 2。

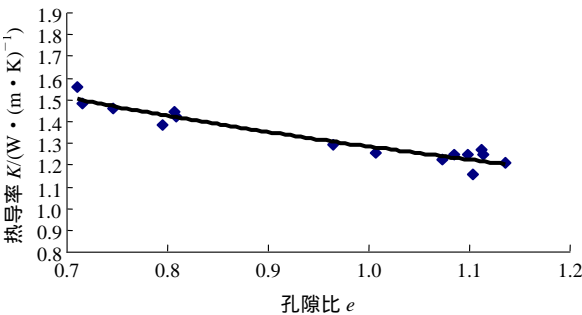


图 4 热导率和孔隙比关系曲线

Fig.4 Curve of thermal conductivity and pore-solid ratio

$$K = -0.633 \ 5 \ln e + 1.285 \ 8 \quad (4)$$

(2) 孔隙比对于岩土体的传热影响, 与孔隙的性状、尺寸、分布规律及排列方式等几何因素以及孔隙的连通性等因素有关, 这种相关性取决于土体

的微观结构, 具有很大的随机性。

(3) 样品虽然都是南京地区的粉土或者粉质黏土, 但是可以肯定的是因为沉积历史、环境、受力历史和状态等方面必然导致土体成分性质等各方面的差异, 因此把固体颗粒部分的  $K_s$  假设为常值必然导致误差的产生。

(4) 仪器的测试精度、外界测试条件方面等方面影响测试结果精度。

4 结 论

(1) 饱和土体比热容值随含水量增大而增大, 含水量和比热容之间的关系可用线性关系描述。不同成分土体的经验公式拟合参数不同。粉质黏土的比热容和含水量经验计算公式可表示为:  $C = 0.147 \ 7w + 2.621 \ 3$ 。

(2) 饱和岩土体的热导率随含水量增加而降低, 呈非线性规律, 可用对数关系拟合。黏性土含水量计算热导率经验公式为:  $K = -0.504 \ln w + 3.09$ 。

(3) 在含水量变化不大时, 黏性土孔隙比和热导率关系也可用对数关系描述, 拟合公式为  $K = -0.633 \ 5 \ln e + 1.285 \ 8$ 。

(4) 样品成分、结构差异, 仪器测试精度, 外界测试条件等因素对测试结果有一定的影响。

(5) 不同地区的粉质黏土很可能具有不同的热学性质, 本文中所得经验公式适用于南京地区, 其他地区土体的热学性质应根据当地情况采用不同参数。

参考文献(References):

[1] King S Y, Halfter N A. Underground Power Cables[M]. Longman, London: [s. n. ], 1982.

[2] Slegel D L, Davis L R. Transient heat and mass transfer in soils in the vicinity of heated porous pipes[J]. J. Heat Transfer 99, 1977, 6: 541 - 621.

[3] Davies T G, Banerjee P K. Constitutive relationships for ocean sediments subjected to stress and temperature gradients[R]. Cardiff: Department of Civil and Structural Engineering, Cardiff University, 1980.

[4] 王补宣. 我国传热研究的进展与展望[M]. [s. l. ]: [s. n. ], 2002.(Wang Buxuan. Summary and View about Research of

- Thermal Transmission in China[M]. [s. l. ]: [s. n. ], 2002.(in Chinese))
- [5] 王树刚, 朱颖心, 江 亿. 北京地铁热环境壁面热流的实测与分析[J]. 隧道译丛, 1997, 3: 32 - 37.(Wang Shugang, Zhu Yingxin, Jiang Yi. Test and analysis about underground mural thermal transmissions of Beijing tunnel[J]. Journal of Tunnel Translations, 1997, 3: 32.(in Chinese))
- [6] Rao M V B B, Singh D N. Generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 767 - 773.
- [7] Abu-Hamdeh N H. Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes[J]. J. Agric. Engine Res., 2001, 80(2): 209 - 216.
- [8] Abu-Hamdeh N H. Thermal properties of soils as affected by density and water content[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(1): 97 - 102.
- [9] Singh D N, Devid K. Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity[J]. Exp. Thermal Fluid Sci., 2000, 22: 133 - 143.
- [10] Arnepalli D N, Devendra N S. Generalized procedure for determining thermal resistivity of soils[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43: 43 - 51.
- [11] Johansen O. Thermal conductivity of soils[Ph. D. Thesis][D]. Trondheim, Norway: [s. n. ], 1975.
- [12] Vanpelt D J. Thermal conductivity measurements of crushed stone and gravel aggregate[J]. CRREL Technical Note, 1976, 6: 25 - 28.
- [13] 美国 Perkin Almer 公司. DSC6 操作手册[R]. [s. l. ]: 美国 Perkin Almer 公司, 2002.(Perkin Almer Co., America. DSC6 operation manual[R]. [s. l. ]: Perkin Almer Co., America, 2002.(in Chinese))
- [14] 美国 Prics 公司. TC Probe<sup>tm</sup> 热导仪操作手册[R]. [s. l. ]: 美国 Prics 公司, 2002.(Prics Co., America. TC Probe<sup>tm</sup> operation manual[R]. [s. l. ]: Prics Co., America, 2002.(in Chinese))
- [15] 沈显杰, 杨淑贞, 张文仁, 等. 岩石热物理性质及其测试[M]. 北京: 科学出版社, 1988.(Shen Xianjie, Yang Shuzheng, Zhang Wenren, et al. Thermal Properties and Test of Rock[M]. Beijing: Sciences Press, 1988.(in Chinese))

## 下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程;
- (2) 围岩松动圈的弹塑性位移反分析方法探索;
- (3) 基于热力学的砂土不排水统一模型;
- (4) 滑面正应力分布对边坡安全系数的影响;
- (5) 岩石软(硬)化特性转化的统计损伤理论研究;
- (6) 充填法开采引起的地表裂缝分布特征与现场监测分析;
- (7) 岩石 Kaiser 效应测定地应力场的试验研究;
- (8) 盐岩蠕变特性的试验研究;
- (9) 研究进展与工程实录。