

ICS

T/GSJP

CCS

团 体 标 准

T/GSJP XXXX. -XXXX

岩土热物性参数的测定 瞬态平面热源法

Determination of thermal physical parameters of rock and soil by transient plane heat source method

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX发布

XXXX-XX-XX实施

江苏省地质学会 发布

目 次

前言.....	1
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 原理.....	2
5 仪器设备.....	2
6 样品.....	3
7 测定.....	3
8 数据处理.....	4
9 精密度.....	5
10 试验报告.....	5
附录 A（资料性） 常见岩土热物性参数.....	6
附录 B（资料性） 计算原理.....	7

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省地质调查研究院提出。

本文件由江苏省地质学会归口。

本文件起草单位：江苏省地质调查研究院、南京市测绘勘察研究院股份有限公司、江苏南京地质工程勘察院、江苏省地质局第一地质大队、凯戈纳斯仪器商贸（上海）有限公司。

本文件主要起草人：

岩土热物性参数的测定 瞬态平面热源法

1 范围

本文件规定了瞬态平面热源法测定岩土导热系数、热扩散系数和比热容的技术方法。

本文件适用于不同含水状态岩土样品在室温下导热系数、热扩散系数和比热容的测定，以及干燥岩土样品在室温~300°C下导热系数、热扩散系数和比热容的测定。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 11615-2010 地热资源地质勘查规范

GB/T 32064-2015 建筑用材料导热系数和热扩散系数瞬态平面热源测试法

GB/T 50123 土工试验方法标准

DZ/T 0276.2 岩石物理力学性质试验规程 第2部分：岩石含水率试验

DZ/T 0276.4 岩石物理力学性质试验规程 第4部分：岩石密度试验

DZ/T 0276.5 岩石物理力学性质试验规程 第5部分：岩石吸水性试验

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

导热系数 thermal conductivity

沿热流传导方向，单位厚度岩土样品当两侧表面温差为1°C时，单位时间内通过样品单位截面的热量。

[来源：GB/T 11615-2010，3.20，有修改]

3.2

热扩散系数 thermal diffusivity

表征岩土样品受热或冷却时，其内部温度趋于一致的能力。

3.3

比热容 specific heat capacity

单位质量的岩土样品当温度升高或降低1°C时所吸收或释放的热量，数值上等于导热系数与热扩散系数和密度乘积的比值。

[来源：GB/T 11615-2010，3.21，有修改]

3.4

测定总时间 total measuring time

测定样品时，仪器系统软件设置的施加恒定直流电的时间。

[来源：GB/T 32064-2015，3.1.1，有修改]

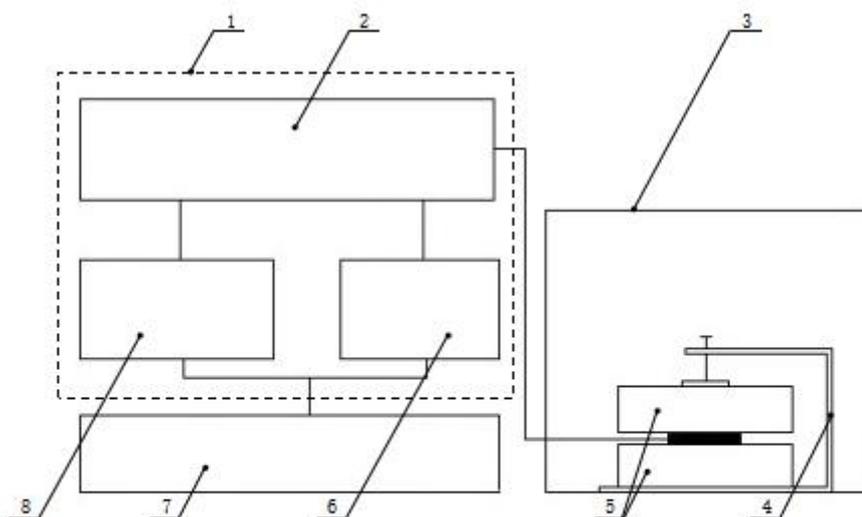
4 原理

假定将平面探头放置在无限大的岩土样品中，在初始热平衡状态下，探头受到瞬间加热脉冲后在样品内产生动态温度场，记录热传导过程样品表面温度增值随时间的变化关系，利用热传导方程的数学求解方法计算得到样品的导热系数和热扩散系数。

5 仪器设备

5.1 仪器设备主要结构组成

岩土热物性参数测定仪，其结构组成如图1所示，主要包括主机、计算机、恒温箱、样品架等。



说明：

1—主机； 2—电桥回路； 3—恒温箱； 4—样品架；
5—试样； 6—电压源； 7—计算机； 8—电压表。

图1 岩土热物性参数测定仪结构组成示意图

5.2 主要技术指标

5.2.1 导热系数测定范围不低于 $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})\sim 10\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，热扩散系数测定范围不低于 $0.1\text{mm}^2/\text{s}\sim 5\text{mm}^2/\text{s}$ 。

5.2.2 测试探头材质应为双螺旋结构的镍，外包绝缘薄膜可根据使用温度采用聚酰亚胺或云母，适用测试温度范围不低于 $5^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。

6 样品

6.1 一般要求

6.1.1 每个样品需制备成两块形状一致的试样，试样形状宜为圆柱体、方柱体或立方体。

6.1.2 试样与探头接触的测试面应平整光滑，平整度允许偏差为 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

6.1.3 试样测试面的直径或边长应大于探头直径的2倍，试样厚度应大于探头半径的1.2倍。

6.2 土样制备

6.2.1 扰动土可采用击样法、击实法和压样法进行试样的制备，具体操作按GB/T 50123有关步骤进行。

6.2.2 原状土宜采用直径为61.8mm的环刀进行试样的制备，具体操作按GB/T 50123有关步骤进行。

6.2.3 需要饱和的试样，可根据土的透水性能，选用浸水饱和法、真空抽气饱和法及毛管饱和法，具体操作按GB/T 50123有关步骤进行。

6.2.4 需要干燥的试样，应先将试样风干，然后放入烘箱，在 $105^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重。

6.2.5 土样的密度宜采用环刀法测定，土样的含水率宜采用烘干法测定，具体操作按GB/T 50123有关步骤进行。

6.2.6 制备好的试样在热物性参数测定前应保存在保湿器内。

6.3 岩样制备

6.3.1 根据岩石的岩性、结构特征和风化程度，选择适宜的制样工具，将样品制备成符合6.1要求的试样。

6.3.2 需要饱和的试样，可根据岩性特征，选择自由浸水法或真空抽气法，具体操作按DZ/T 0276.5有关步骤进行。

6.3.3 需要干燥的试样，应将试样放入烘箱，在 $105^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重。

6.3.4 岩样的密度可根据岩性特征，选择量积法、水中称量法和蜡封法测定，具体操作按DZ/T 0276.4有关步骤进行。

6.3.5 岩样的含水率采用烘干法测定，具体操作按DZ/T 0276.2有关步骤进行。

6.3.6 制备好的试样在热物性参数测定前应保存在保湿器内。

7 测定

7.1 环境条件

7.1.1 岩土热物性参数测定仪应避免阳光直射，室内环境温度应控制在 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间，连续2小时内温度波动范围不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，连续8小时内温度波动范围不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不超过65%，室内风速小于 0.3m/s 。

7.1.2 在室温下测试的试样，测试前应放置在岩土热物性参数测定仪所在的房间8小时以上，进行温度平衡。

7.1.3 在室温 $\sim 300^{\circ}\text{C}$ 下测试的干燥试样，先按照7.3安装好试样，再将恒温箱温度升至目标温度后保温，当恒温箱内温度连续4个小时波动范围不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，且探头电阻在连续30分钟内波动范围不超过 $\pm 0.002\Omega$ 时，方可视为试样温度与恒温箱内温度达到平衡状态。

7.2 探头和仪器参数的选择

7.2.1 半径为 6.4mm 和 9.9mm 的探头均适合岩土热物性参数的测定，在试样尺寸满足6.1要求的同时，宜选择较大半径的探头。

7.2.2 参考附录A，预估试样的导热系数范围，选择并设置合适的测定总时间和输出功率，见表1。

表1 探头和仪器参数参考表

导热系数/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})]$		>3		$2\sim 3$		$1\sim 2$		<1	
探头半径/ mm		6.4	9.9	6.4	9.9	6.4	9.9	6.4	9.9
仪器参数	测定总时间/ s	10	20	20	40	40	80	80	160
	输出功率/ W	0.5	0.8	0.25	0.5	0.15	0.35	0.15	0.3

7.3 安装试样

将两块试样放置于探头的上下两端，调节样品架，使两个测试面与探头平行且接触良好。具体要求如下：

a) 试样为强度较高的岩样时，应通过调节夹具将试样和探头夹紧，使试样测试面与探头紧密接触；

b) 试样为土样或强度较低的软岩样时，在调节夹具时，既要让试样与探头良好接触，又不能使试样产生变形或破坏。

7.4 仪器分析过程

7.4.1 平衡电桥

调节电压使电桥电流不大于 1mA ，电桥平衡后电桥测试系统电压为零。

7.4.2 施加热脉冲

根据设置的测定总时间及输出功率，对探头施加恒定的直流电，在试样内产生热脉冲。

7.4.3 采集不平衡电压

在测定总时间内，以不小于0.1s的时间间隔进行扫描并记录不平衡电压，采集次数应大于100次。

7.5 测定结果有效性判定

单次测定后，计算时间最大值 t_{\max} 与探头半径 r 、热扩散系数 a 的关系式 $t_{\max} \cdot a / r^2$ 计算值应0.3~1.0之间，探测深度 $\Delta P_{\text{prob}} = 2(a \cdot t_{\max})^{1/2}$ 计算值应在1.1 r ~2.0 r 之间。否则应调整测定总时间和输出功率，重新试验。

8 数据处理

导热系数和热扩散系数由仪器配套的数据分析软件自动计算得到，计算原理见附录B。比热容由公式（1）求出。

$$c = \frac{\lambda}{a\rho} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- c ——比热容（kJ/(kg·°C)）；
- λ ——导热系数（W/(m·°C)）；
- a ——热扩散系数（mm²/s）；
- ρ ——试样的密度（g/cm³）。

在相同条件下，3次重复测定结果的算术平均值作为测定结果，保留3位有效数字。

9 精密度

导热系数的重复性偏差不大于2%，热扩散系数和比热容的重复性偏差不大于5%。

10 试验报告

试验报告至少应包括下列内容：

- a) 报告编号；
- b) 依据的方法标准；
- c) 环境温度、湿度；
- d) 样品信息，包括样品原编号、密度、含水率等；
- e) 检测仪器信息，包括名称、型号等；
- f) 测定结果；
- g) 试验日期。

附录 A

(资料性)

常见岩土热物性参数

表A.1为几种常见岩土的导热系数、热扩散系数和比热容。

表 A.1 常见岩土热物性参数表

名称	密度/(g/cm ³)	含水率/%	测试温度/°C	导热系数 /[W/(m·°C)]	热扩散系数 /(mm ² /s)	比热容 /[kJ/(kg·°C)]
黏土	2.09	15.7	22	1.75	0.544	1.54
黏土	2.04	20.6	19	1.41	0.374	1.85
粉质黏土	2.07	19.0	23	1.87	0.627	1.44
粉质黏土	1.98	19.5	21	1.32	0.344	1.94
粉土	2.02	24.5	18	1.77	0.551	1.59
粉土	2.04	20.5	19	1.69	0.611	1.36
粉砂	1.69	10.3	20	1.34	0.539	1.47
细砂	1.50	6.5	24	1.09	0.621	1.17
砂岩	2.39	1.2	25	3.98	1.77	0.941
粉砂质泥岩	2.36	7.8	26	2.56	1.26	0.861
泥质粉砂岩	2.68	3.8	25	2.17	1.18	0.686
石灰岩	2.73	0.1	21	3.34	1.48	0.827
石灰岩	2.70	0.1	21	2.81	1.36	0.765
白云岩	2.82	0.2	20	5.82	2.29	0.902
白云岩	2.81	0	50	5.26	2.00	0.936
白云岩	2.81	0	100	4.79	1.75	0.974
白云岩	2.81	0	200	3.98	1.28	1.11
花岗岩	2.71	0	21	2.49	1.33	0.691
花岗岩	2.71	0	200	2.37	0.852	1.03
花岗岩	2.71	0	300	2.23	0.736	1.12

附 录 B
(资料性)
计算原理

当探头被电加热时，探头电阻按公式B.1计算。

$$R(t) = R_0 \{1 + \beta[\Delta T_i + \Delta T_s(\tau)]\} \dots\dots\dots (B.1)$$

导热系数按公式 B.2 计算。

$$\Delta T_s(\tau) = \frac{Q}{\lambda r \sqrt{\pi^3}} D(\tau) \dots\dots\dots (B.2)$$

τ 按公式B.3计算。

$$\tau = \frac{\sqrt{\alpha t}}{r} = \sqrt{\frac{t}{\theta}} \dots\dots\dots (B.3)$$

将B.2式代入B.1式，并假设 $R^* = R_0(1 + \beta\Delta T_i)$ 和 $k = \frac{R_0 a Q}{\lambda r \sqrt{\pi^3}}$ ，则可得公式B.4。

$$R(t) = R^* + kD(\tau) \dots\dots\dots (B.4)$$

$D(\tau)$ 按公式B.5计算。

$$D(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^\tau \sigma^{-2} \left[\sum_{l_1=1}^m l_1 \sum_{l_2=1}^m l_2 \exp\left(\frac{-(l_1^2+l_2^2)}{4m^2\sigma^2}\right) J_0\left(\frac{l_1 l_2}{2m^2\sigma^2}\right) \right] d\sigma \dots\dots (B.5)$$

式B.1~式B.5中：

$R(t)$ ——探头在 t 时刻的瞬时电阻， Ω ；

R_0 ——探头初始电阻， Ω ；

β ——探头电阻率温度系数(TCR)， $1/^\circ\text{C}$ ；

ΔT_i ——探头绝缘薄层的温差， $^\circ\text{C}$

$\Delta T_s(\tau)$ ——样品表面温差， $^\circ\text{C}$ ；

Q ——探头输出功率，W；

λ ——导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ；

r ——探头双螺旋结构最外层半径，mm；

$D(\tau)$ ——无量纲的特征时间函数；

a ——热扩散系数， mm^2/s ；

t ——测试时间，s；

θ ——中间变量；

m ——探头双螺旋结构的总环数；

T/GSJP XXXX. -XXXX

σ ——无量纲的特征时间函数的积分变量；

l_1 、 l_2 ——不大于双螺旋结构总环数的求和变量；

J_0 ——零阶修正贝塞尔函数。

将测得的电阻值 $R(t)$ 对 $D(\tau)$ 作图应得到一条直线，截距是 R^* ，斜率是 k 。通过反复选择不同的测试参数来变换特征时间 θ 拟合，使 $R(t)$ 对 $D(\tau)$ 的线性相关达到最大，此时，导热系数 λ 可由直线的斜率 k 计算得出，热扩散系数可由 $\alpha=r^2/\theta$ 得到。