

ICS

CCS 点击此处添加 CCS 号

DB 11

北京市地方标准

DB XX/T XXXX—XXXX

地埋管地源热泵岩土热响应试验技术规范

Technical specification of rock-soil thermal response test of ground-coupled
heat pump

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

北京市市场监督管理局 发布

目 次

1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般要求	3
5 试验装置	3
6 试验钻孔	4
7 试验方法	5
8 试验报告	9
附 录 A （资料性） 岩土热响应试验报告	10
参 考 文 献	14

地埋管地源热泵岩土热响应试验技术规范

1 范围

本文件规定了岩土热响应试验的一般规定、试验装置、试验钻孔、试验方法和试验报告等内容。

本文件适用于竖直地埋管地源热泵系统的岩土热响应试验。

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。

DB11/T 1253 地埋管地源热泵系统工程技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

浅层地热能 shallow geothermal energy

蕴藏在地表以下一定深度范围内的岩土体、地下水中，温度一般低于25℃，可采用热泵技术提取用于建筑物供热或制冷的热能。

3.2

竖直地埋管换热器 vertical ground heat exchanger

换热管路埋置在竖直钻孔内的地埋管换热器，又称竖直土壤热交换器。

[来源：GB 50366—2005（2009年版），2.0.9]

3.3

岩土热响应试验 rock-soil thermal response test

通过试验仪器，对项目所在场区的试验孔进行一定时间的连续加热，获得岩土综合热物性参数及岩土初始平均温度的试验。

[来源：GB 50366—2005（2009年版），2.0.25，有修改]

3.4

岩土综合热物性参数 parameter of the rock-soil thermal properties

不含回填材料在内的，地埋管换热器深度范围内，岩土的综合导热系数、综合比热容。

[来源：GB 50366-2005（2009年版），2.0.26]

3.5

岩土初始平均温度 initial average temperature of the rock-soil

从自然地表下10m~20m至竖直地埋管换热器埋设深度范围内，岩土常年恒定的平均温度。

[来源：GB 50366-2005（2009年版），2.0.27]

3.6

试验孔 testing borehole

按照试验要求和拟采用的成孔方案，用于岩土热响应试验的由竖直地埋管换热器、回填材料和试验流体组成的孔。

[来源：GB 50366-2005（2009年版），2.0.28,有修改]

3.7

岩土体 rock-soil body

岩土和松散沉积物的集合体，如砂岩、砂砾石、土壤等。

[来源：GB 50366-2005（2009年版），2.0.24]

3.8

无负荷循环法 reactive circulation method

不向地埋管换热器内循环水加载冷、热量，利用循环水与岩土体达到热平衡时的温度，分析岩土体初始平均温度的方法。

[来源：DB11/T 1253-2022,3.4]

3.9

稳定热流试验 steady heat flow test

向地埋管换热器循环水提供稳定的热量，记录地埋管换热器进、出水温度的响应情况，计算岩土体综合热物性参数的试验方法。

[来源：DB11/T 1253-2022,3.6，有修改]

3.10

稳定工况试验 steady working condition test

建立稳定的地埋管换热器夏季或冬季运行工况，记录地埋管换热器进、出水温度的响应情况，计算岩土体在设定工况下的换热能力的试验方法。

[来源：DB11/T 1253-2022,3.7，有修改]

3.11

静态平衡法 static equilibrium method

地埋管安装完成后，静置不少于24h，在不引入任何热扰动的前提下，通过布设温度传感器测量井内不同深度的自然温度分布获取岩土初始平均温度的方法。

3.12

钻孔柱状图 drill column

根据钻孔资料编制的表示钻孔工程地质条件随深度变化的图表。

[来源：JGJ/T 84-2015,7.2.52]

4 一般要求

4.1 地埋管地源热泵系统设计前，应进行岩土热响应试验，通过实际测试获得地热参数和岩土热响应性能。

4.2 岩土热响应试验在实施过程中，应根据 5.2、5.3 选择试验装置，按照 6.2 的试验方法进行操作，确保试验数据的准确性和可靠性。

5 试验装置

5.1 一般规定

5.1.1 岩土热响应试验装置应按规定程序批准的图样和技术条件制造。

5.1.2 岩土热响应试验装置应至少包括热源装置、响应信号采集装置和稳压装置。

5.1.3 岩土热响应试验装置应通过电气安全性检测验证。

5.2 装置本体

5.2.1 岩土热响应试验装置应由加热器、水泵、温度/流量传感器等组成，宜设置制冷吸热模块。

5.2.2 岩土热响应试验装置的加热（制冷）设备应具备按试验工况进行调控和冷热源开闭的功能。

5.2.3 岩土热响应试验装置应具有流量调节功能。

5.2.4 岩土热响应试验装置应具有稳定热流试验功能，加热功率应与试验孔深度相适应，宜在 3kW ~ 15kW 范围内可连续调控。

5.2.5 岩土热响应试验装置的电气控制应具有超温保护、水系统断流保护等功能。

5.2.6 岩土热响应试验装置应具有循环水流量、加热功率、地埋管换热器的进出口水温等参数的实时数据采集、自动存储及传输功能，采样周期可按不同工况设置。

5.2.7 岩土热响应试验装置应对循环水系统采取保温措施。

5.3 仪器仪表

5.3.1 岩土热响应试验所用的仪器仪表的准确度应符合表 1 的规定。

表 1 试验仪器仪表准确度

序号	测量参数	测量仪表	测量项目	仪表最大允许误差
1	温度	水银温度计、电阻温度计、热电偶温度计、光纤测温计	进出水温度	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
			土壤温度	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
2	流量	流量计（如电磁流量计或超声波流量计等）	水流量	$\pm 1\%$
3	功率	功率计	加热电功率	$\pm 1\%$

5.3.2 温度计的量程应满足测量范围要求，不小于测定温度的 1.2 倍，传感器测量范围和精度应与二次仪表匹配，并高于工艺要求的精度。

5.3.3 流量计的量程应不小于测试流量的 1.5 倍，安装位置应符合产品安装要求，并具有瞬态值输出的测量功能。

5.3.4 功率计的量程应满足测量范围要求，并不小于测量设备或者系统额定功率的 1.5 倍，安装位置和环境条件应符合设备使用要求。

5.3.5 岩土热响应试验所用的仪器仪表应具有有效期内的检验合格证书。

6 试验钻孔

6.1 钻孔场地调查

6.1.1 岩土热响应试验前，应进行钻孔场地状况调查，调查内容应包括：

- 场地所在地理位置及其气候特征；
- 场地面积、形状、地质类型及地形地貌特征；
- 场地内已有建筑物的占地面积及其分布、基础形式及埋深；
- 场地内是否已有水源井及地下水监测点的分布；
- 场地内已有树木植被、池塘、排水沟及架空输电线、市政管线、交通设施、历史文化遗迹的分布及综合管线分布；
- 场地内已有的、计划修建的地下构筑物的分布及其埋深；
- 场地道路状况、平整情况及施工所需的电源、水源情况；
- 项目场地整体平面，可用布孔区域范围。

6.1.2 试验孔的数量应符合 DB11/T 1253 的相关规定，且应根据地埋管地源热泵系统应用场地情况、地质条件的复杂程度等因素综合确定。

6.2 钻孔施工

- 6.2.1 当室外环境温度低于 0℃时，不宜进行地埋管钻孔的施工。
- 6.2.2 试验孔钻孔前应进行地面清理，铲除地面杂草、杂物和浮土，平整地面，做好泥浆存储或转运措施。
- 6.2.3 施工前应进行防护设施、安全装置完好性检查，作业现场应设置醒目的安全警示标志，电气设备外壳应可靠接地。
- 6.2.4 试验孔的埋管管材、设置方式、竖直埋管深度、钻孔回填材料和回填方式应与实际换热孔一致。
- 6.2.5 试验孔施工过程使用的材料、配件等应符合有关标准规定，不应对环境造成污染，不应使用国家禁止或淘汰使用的材料。
- 6.2.6 试验孔钻孔应根据现场地质类型确定施工工艺。
- 6.2.7 岩土热响应试验孔钻孔深度应比实际的埋管换热器埋设深度长 5m。
- 6.2.8 钻孔开孔及终孔宜采用同一口径，当遇回填土、卵石层、流砂带、破碎带、孔洞、洞穴等复杂地层时，应采取泥浆护壁或埋设套管护壁，护壁套管内径应与设计钻孔口径一致。
- 6.2.9 单 U 管钻孔直径宜为 110mm~130mm，双 U 管钻孔直径宜为 150mm~180mm，钻孔孔径宜大于埋管与灌浆管组件 20mm 以上。
- 6.2.10 潜孔锤钻进成孔后下管前，采用压缩空气或清水进行清孔，孔底沉渣不大于 0.5m。
- 6.2.11 钻孔的垂直偏差不应大于 1.0%。
- 6.2.12 钻进过程中应做好相关记录，包括地下岩层情况、钻探效率、钻探工艺、基岩埋深、地下水水位等，并应通过地球物理测井或取芯钻探绘制项目场区钻孔柱状图。

6.3 下管回填

- 6.3.1 竖直埋管换热器安装应在钻孔完成且孔壁固化后立即进行。
- 6.3.2 钻孔完成后下管前，应对埋管换热器进行水压试验，水压试验应符合 DB11/T 1253 的相关规定。
- 6.3.3 水压试验合格后，泄压至适当压力后将埋管换热器带压下入孔内。下管应连续、缓慢，并应采取措施使埋管换热器各支管处于分开状态。
- 6.3.4 下管完毕后，埋管换热器上端应高出地面 0.5m 以上，管端应做好临时封闭措施，不应进入杂物。
- 6.3.5 竖直埋管换热器安装完毕后应立即回填封孔。
- 6.3.6 回填料应搅拌均匀后方可使用，回填应密实，无空腔。
- 6.3.7 采用孔底注浆时，注浆管和 U 型管应一起下入孔中，注浆管内径不宜小于 20mm，注浆管底端宜设防堵堵头，且注浆时应能够将其冲开，注浆管下入深度以距 U 型端头 0.3m~0.5m 为宜。
- 6.3.8 回填料传热系数不应小于地层传热系数，根据地质条件添加水泥基或者膨润土。

7 试验方法

7.1 一般规定

7.1.1 岩土热响应试验，应采用稳定热流试验法放热工况作为主要试验工况，吸热工况及稳定工况下的试验可作为补充校核或比对参考。

7.1.2 岩土热响应试验前，应进行钻孔勘察资料核对。

7.1.3 岩土热响应试验前，应对加热器、水泵、各类传感器等试验设备进行检查。

7.2 试验要求

7.2.1 试验现场应提供稳定的电源，具备可靠的试验条件。

7.2.2 岩土热响应试验的试验过程，应遵循下列步骤：

- a) 平整试验孔周边场地，提供水电接驳点；
- b) 钻凿试验孔，绘制项目场区钻孔柱状图；
- c) 在对试验设备进行外部连接时，应遵循先接水后接电的原则；
- d) 宜采用静态平衡法测试岩土初始温度；
- e) 测试仪器与试验孔的管道进行连接；
- f) 水电等外部设备连接完毕后，应对试验设备本身以及外部设备的连接再次进行检查；
- g) 采用无负荷循环法试验岩土初始温度，启动电加热、水泵等试验设备，待设备运转稳定后开始读取记录测试数据，包括循环水进出温度、流量以及试验过程中向地埋管换热器施加的加热功率等；
- h) 提取测试数据，分析计算得出岩土综合热物性参数；
- i) 测试试验完成后，对试验孔应做好密封、标识等防护工作，后续可转换为换热孔使用。

7.2.3 岩土热响应试验过程中，应做好对试验设备的保护工作。

7.2.4 宜就近试验孔布置试验设备，连接管应减少弯头、变径，连接管外露部分应保温。同一管路内，试验孔孔口水温与试验设备进、出口水温温差不应大于 0.1°C 。

7.2.5 岩土热响应试验应在试验孔完成后周围岩土体温度恢复至初始状态后进行，应根据钻孔回填方式确定试验孔放置时间，对于灌注水泥基料的回填方式，宜放置不少于 240h；对于其它的回填方式，宜放置不少于 48h。

7.2.6 采用静态平衡法测试岩土初始平均温度时，测点的布置宜在地埋管换热器埋设深度范围内，测点在地面以下位置开始，且间隔不宜大于 10m，以各测点实测温度的算术平均值作为岩土初始平均温度。

7.2.7 采用无负荷循环法测试岩土体初始平均温度时，地埋管出水温度连续 12h 变化不大于 0.5°C 后，以不少于 12h 的实测温度的算术平均值作为岩土初始平均温度。

7.2.8 岩土热响应试验应连续不间断，持续时间宜为 72h，不应少于 48h。

7.2.9 岩土热响应试验期间，加热功率应保持稳定，地埋管换热器的出口温度稳定后（1h 内出口温度变化不大于 0.5℃），其温度宜高于岩土初始平均温度 5℃以上，不宜高于 10℃，且维持时间不应少于 12h。

7.2.10 地埋管换热器内流速不应低于 0.2m/s。

7.2.11 试验数据读取和记录的时间间隔不应大于 10min，并应连续记录整个试验周期数据。

7.3 岩土综合热物性参数计算

7.3.1 岩土热响应试验数据处理应采用反算法推导出岩土综合热物性参数，包括斜率法，双参数回归法、三参数回归法、数值计算参数辨识等。

7.3.2 斜率法是采用简化线热源模型（式 1）将热响应试验数据回归，得到进出水温平均值与时间对数线性拟合直线的斜率，进而得到综合导热系数。

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda_s H} \left[\ln \frac{4\lambda_s \tau}{r_b^2 \rho_s c_s} + \gamma - \frac{Q}{H} R_b \right] + T_g \quad (1)$$

式中：

- T_f —— 管内循环流体平均温度，℃；
- T_g —— 土壤未受扰动时的温度（即土壤初始温度），℃；
- Q —— 恒定加热功率，kW；
- H —— 钻孔深度，m；
- λ_s —— 土壤综合导热系数，W/(m·K)；
- r_b —— 钻孔半径，m；
- $\rho_s c_s$ —— 土壤容积比热容，J/(m³·K)；
- τ —— 时刻，s；
- γ —— 欧拉常数；
- R_b —— 钻孔热阻，(m·K)/W。

其中

$$R_b = \frac{H}{Q} \left(m_0 T_g + \frac{Q\gamma}{4\pi\lambda_s H} \right) \quad (2)$$

则式（1）流体平均温度可写为线性形式，如式（3）所示：

$$T_f = k \ln(\tau) + m \quad \text{.....} \quad (3)$$

其中 k , m 如式 (4), (5) 所示:

$$k @ \frac{Q}{4\pi\lambda H} \quad \text{.....} \quad (4)$$

$$m @ \frac{Q}{H} \left(\frac{1}{4\pi\lambda_s} \left(\ln\left(\frac{4\alpha_s}{r^2}\right) 0 \gamma \right) \cdot R_b \right) \cdot T_g \quad \text{.....} \quad (5)$$

$$\alpha_s @ \frac{\lambda_s}{c_s \rho_s} \quad \text{.....} \quad (6)$$

式中:

k —— 进出水温平均值与时间对数线性拟合直线的斜率;

m —— 进出水温平均值与时间对数线性拟合直线的截距;

α_s —— 热扩散率, (m^2/s)。

根据式 (4) 拟合直线斜率, 可以得到综合导热系数如式 (7) 所示:

$$\lambda_s @ \frac{Q}{4\pi k H} \quad \text{.....} \quad (7)$$

7.3.3 双参数回归法、三参数回归法、数值计算参数辨识均需要借助计算机工具进行模拟计算, 提取现场热响应试验测试结果, 将其与软件模拟的结果进行对比, 采用式 (8) 进行方差和计算, 取得方差和最小值时, 认为此时传热模型中的热物性参数即为所在地的岩土综合热物性参数。

$$f @ \sum_{i=1}^N (T_{cal,i} - T_{f,i})^2 \quad \text{.....} \quad (8)$$

式中:

f —— 模拟值和测试值间的方差和;

T_{cal} —— 模拟计算得到的进出水温平均值, $^{\circ}\text{C}$;

T_f —— 试验得到的进出水温平均值, $^{\circ}\text{C}$;

i —— 时间步长。

7.3.4 岩土热物性参数采用斜率法反算宜采用试验开始 10h 后的数据。

7.3.5 应对现场试验数据进行综合分析, 剔除因试验条件变化等引起的异常数据。

7.3.6 对 2 个及以上竖直地埋管换热器试验孔的试验, 试验结果应取算术平均值。

8 试验报告

8.1 岩土热响应试验报告应包括下列内容：

- a) 项目概况；
- b) 试验设备及方案；
- c) 试验条件；
- d) 项目所在地钻孔柱状图；
- e) 参数的连续记录，应包括：循环水流量、加热功率、地埋管换热器的进出口水温；
- f) 岩土初始平均温度；
- g) 岩土的综合导热系数、综合比热容。
- h) 试验工况下的岩土体换热能力。

8.2 岩土热响应试验报告样式参照附录 A。

附 录 A
(资料性)
岩土热响应试验报告

岩土热响应试验报告

项目名称：_____

试验单位：_____

报告日期：_____

项目概况	项目所在区域				
	试验孔选址原则				
试验方案	试验时间				
	试验仪器名称		仪器精度	检验有效期	是否合格
	计算模型				
试验条件	项目	参数	项目	参数	
	钻孔深度（m）		钻孔直径（mm）		
	地埋管换热器形式		埋管材质		
	地埋管内径（mm）		地埋管外径（mm）		
	回填料组成		回填料导热系数 [W/(m·K)]		
	试验区地质环境条件				
	试验要求				
	试验方法及过程				

岩性统计表	编号	深度 (m)	厚度 (m)	岩性	备注
	1	0~.....			
	2	~.....			
					
	n-1				
	n				
综合柱状图	编号		地层柱状图		备注
	1				
	2				
					
	n-1				
	n				
连续记录的试验数据	循环水流量 (kg/s)				
	加热功率 (kW)				
	地埋管换热器进水 温度 (°C)				
	地埋管换热器出水 温度 (°C)				
数据处理方法					
计算结果	岩土初始平均温度 (°C)				
	岩土综合导热系数 [W/(m·K)]				
	岩土综合比热容 [J/ (m³·K)]				
	岩土换热能力 (W/m)				
试验负责人：	报告撰写人：		试验单位盖章		

日期:	日期:	
-----	-----	--

参 考 文 献

- [1] GB 50366-2005（2009年版） 地源热泵系统工程技术规范
- [2] JGJ/T 84-2015 岩土工程勘察术语标准
-