CECS CECS×××

中国工程建设协会标准

**地埋管地源热泵岩土热物性测试技术规程**

**Technical specification for testing of geothermal properties of ground-coupled heat pump**

（征求意见稿）

**20×× 北京**

**前 言**

根据中国工程建设标准化协会发布的《关于印发2018年第一批工程建设协会标准制订、修订计划的通知》（建标协字[2018]015号）文件要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制订本规程。

本规程共分6章，主要技术内容是：总则、术语、测试装置、测试钻孔、测试方法、测试报告。

本规程由中国工程建设标准化协会归口管理，由中国建筑科学研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送中国建筑科学研究院有限公司（地址：北京市北三环东路30号，邮政编码：100013）。

|  |  |
| --- | --- |
| 主 编 单 位： |  |
| 参 编 单 位： |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
| 主要起草人： |  |
|  |  |
|  |  |
| 主要审查人： |  |

目 录

[**1 总则** 1](#_Toc17390644)

[**2 术语** 3](#_Toc17390645)

[**3 测试装置** 5](#_Toc17390646)

[3.1 一般规定 5](#_Toc17390647)

[3.2 装置本体 5](#_Toc17390648)

[3.3 仪器仪表 9](#_Toc17390649)

[**4 测试钻孔** 11](#_Toc17390650)

[4.1 一般规定 11](#_Toc17390651)

[4.2 钻孔施工 12](#_Toc17390652)

[4.3 下管回填 14](#_Toc17390653)

[**5 测试方法** 17](#_Toc17390654)

[5.1一般规定 17](#_Toc17390655)

[5.2 测试要求 18](#_Toc17390656)

[5.3 岩土热物性参数计算 24](#_Toc17390657)

[**6 测试报告** 25](#_Toc17390658)

[**附录A 岩土热物性测试报告样例** 26](#_Toc17390659)

[**本规程用词说明** 29](#_Toc17390660)

[**引用标准名录** 30](#_Toc17390661)

**CONTENTS**

[**1 General Provisions 1**](#_Toc12511219)

[**2 Terms 3**](#_Toc12511220)

[**3 Test Device 5**](#_Toc12511221)

 **3.1 General Requirements 5**

  **3.2 Device Body 5**

 **3.3 Instruments 9**

[**4 Test Borehole 11**](#_Toc12511222)

 **4.1 General Requirements 11**

  **4.2 Drilling Construction 12**

 **4.3 Installation Pipe Backfilled 14**

[**5 Test method 17**](#_Toc12511223)

 **5.1 General Requirements 17**

  **5.2 Test Requirements 18**

 **5.3 Calculations of Parameters 24**

[**6 Test Report 25**](#_Toc12511224)

[**Appendix A. Sample Of Geothermal Property Test Report 26**](#_Toc12511226)

[**List of Quoted Standards 29**](#_Toc12511229)

**Addition：Explanation of** [**Provisions 30**](#_Toc12511230)

#

# **1 总则**

1.0.1 为规范地埋管地源热泵系统岩土热物性试验技术和方法，科学合理地指导地埋管地源热泵系统的设计和应用，制定本标准。

【条文说明】岩土热物性测试也称岩土热响应测试，目的是通过现场试验获得岩土的导热系数等热物性参数。1983年，第一篇关于移动式岩土热物性测试设备的学术论文由摩根森教授在斯德哥尔摩的一次国际会议上正式发表，标志着岩土热物性测试作为一项专业的测试技术，正式进入人们的视线。而此后直到上世纪90年代中期，岩土热物性测试技术仅在美国和瑞典得到开发应用。历经多年的发展，目前该技术已经推广到30多个国家，遍布欧洲、亚洲、美洲甚至是非洲。2013年11月，IEA ECES发表了基于全球32个国家的岩土热物性测试调查总结报告。通过此次调查，不仅完成了对该技术在应用情况、测试目的、测试设备、测试方法和理论分析模型等方面的全面总结，也借此发掘目前共同关注的问题和今后可能的发展方向。

岩土热物性测试技术作为地埋管地源热泵系统应用的先导，不仅在国际上，在我国也得到了广泛而深入的研究。我国对该技术的研究同样呈现出百花齐放的态势，衍生出形式各异的测试设备，同时又不断丰富着测试方法。

为使测试设备更加标准化，测试方法更加实用化，测试技术更加规范化，进而为地埋管地源热泵设计应用提供科学合理的岩土热物性参数，制定本规范。

1.0.2 本标准规定了地埋管地源热泵系统中开展岩土热物性测试的装置、测试钻孔、测试方法和测试报告等技术要求。

【条文说明】本标准适用于采用地埋管作为换热器，利用浅层地热能作为低温热源的地源热泵系统，地埋管埋设深度≤200m，包括竖直地埋管系统和能源桩系统。地埋管地源热泵系统岩土热物性测试，包括测试装置、测试钻孔、测试工作开展具备的技术条件、测试方法以及最终形成的测试报告的技术要求。

1.0.3 当地埋管地源热泵系统的应用建筑面积在3000㎡~5000㎡时，宜进行岩土热物性测试；当应用建筑面积大于等于5000㎡时，应进行岩土热物性测试。

【条文说明】规定了本标准的应用场景。应用建筑面积是指在同一个工程中，应用地埋管地源热泵系统的各个单体建筑面积的总和。根据近几年对我国应用地埋管地源热泵系统情况的调查，大中型地埋管地源热泵系统的应用建筑面积多在5000 m2以上，5000 m2以下多为小型单体建筑；根据国外对商用和公用建筑应用地埋管地源热泵系统的技术要求，应用建筑面积小于3000m2时至少设置一个测试孔进行岩土热物性测试。考虑我国目前地埋管地源热泵系统应用特点，结合国外已有的经验，为了保证大中型地埋管地源热泵系统的安全运行和节能效果，作此规定。

1.0.4 地埋管地源热泵系统岩土热物性测试的装置、测试方法和测试技术除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

【条文说明】根据国家主管部门有关编制和修订工程建设标准、规范等的统一规定，为了精简标准内容，已有的相关国家和行业标准、规范等明确规定的内容，除确有必要明确说明的部分外，本标准均不再另设条文。本条文的目的是强调在执行本标准的同时，还应注意贯彻执行相关标准、规范等的有关规定。

地埋管地源热泵岩土热物性测试技术相关的标准主要包括：《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736-2012、《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015、《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366-2005（2009年版）。其中，《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366-2005涵盖了工程勘察、设计、施工、运转、调试与验收等各环节，是地源热泵行业的基础性标准。

# **2 术语**

2.0.1 竖直地埋管换热器 vertical ground 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。

2.0.2 岩土热物性测试 rock-soil thermal response test

通过测试仪器，对项目所在场地的测试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。

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

是指不含回填料在内的，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。

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

从自然地表下10~20m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。

2.0.5 测试孔 exploration and vertical testing exchanger

按照测试要求和拟采用的成孔方案，将用于岩土热物性测试勘察和测试的竖直地埋管换热器称为测试孔。

2.0.6 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。

2.0.7 无功循环法 reactive circulation method

不向地埋管换热器内循环介质加载冷、热量，利用循环介质和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。

2.0.8 恒热流测试法 steady heat flow test

向地埋管换热器循环介质提供稳定的热量或冷量，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或换热能力的测试方法。

2.0.10 稳定工况测试法 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，计算岩土体综合热物性参数或换热能力的测试方法。

2.0.11 能源桩 geothermal pile

在建筑物的桩基中埋设闭合换热管路，与岩土体进行热交换，同时具有承载结构和换热双重功能额桩。

2.0.12 钻孔地质综合柱状图drill columnar section

将测试钻孔穿过的全部地层按接触关系顺序及各层位的厚度大小绘制的图件。

【条文说明】钻孔地质综合柱状图是为描述钻孔穿过岩层的层性、厚度、岩性、结构构造和接触关系、地下水深度、钻孔结构和钻进等情况而绘制，是地下勘探信息可视化的基本工具。

# **3 测试装置**

## 3.1 一般规定

3.1.1 岩土热物性测试装置应按规定程序批准的图样和技术条件制造，并具有合格证。

【条文说明】岩土热物性测试装置尚无专用产品规范，为满足测试工作需要，达到测试精度要求，对测试装置提出了制造生产要求，测试装置应为按照用户协议，符合产品制造规定程序，进行生产制造的合格产品，各功能部件及测试仪器仪表也应达到本标准要求。

3.1.2 岩土热物性测试装置应具有热源装置和响应信号采集装置。

【条文说明】岩土热物性测试装置需满足岩土热物性测试工况需求，岩土热响应测试可分为两种测试工况：模拟夏季放热工况，模拟冬季取热工况。根据调查，目前全世界范围内已有调查记录的32个国家中，约90%的热响应测试方法采用的是单一放热工况。而仅有中国、西班牙、荷兰、意大利和日本探索采用了放热与取热双工况的测试方法。究其原因，一方面是由于在模拟放热工况下，测试设备的构成易于实现，测试过程易于掌控；另一方面，与测试相适应的理论分析方法更为成熟，通过测试得到的数据波动性小，连续性好，能够较准确地得出真实的岩土热物性参数。因此，规定岩土热响应试验装置必须具有模拟放热工况的热源装置和信号采集装置，模拟吸热工况的冷源装置则为选配，不做强制性要求。

3.1.3 岩土热物性测试装置应具有稳压系统。

【条文说明】由于试验装置需要在测试场地连接电源，电源电压受现场用电设备影响会出现波动，影响系统加热量的稳定性，因此试验装置应具有稳压系统。

## 3.2 装置本体

3.2.1 岩土热物性测试装置出厂时外表面应无明显划伤、锈斑和压痕，表面光洁，喷涂层均匀，色调一致，无流痕、气泡和剥落，各种接口标识明确。

【条文说明】对岩土热物性测试装置出厂时外表面及标识做规定，方便测试人员便捷的连接组装和操作应用。

3.2.2 岩土热物性测试装置的结构应满足下列要求：

1 装置的检查门应严密、灵活、安全；

2室外放置的装置应有防渗雨、防冻措施；

3 以水作为循环介质的测试装置应设置便捷的进、排水口，排水时应畅通、无渗漏。

【条文说明】岩土热物性测试装置应用阶段为项目前期阶段，为适应运输及不同场地的多样复杂测试条件，对测试装置本身结构提出具体要求。测试装置的检查门为了便于检修需要灵活、安全设置，同时考虑到搬运和测试等情况，检查门应注意保证严密闭合，避免影响测试或者伤及测试人员。

为了减少试验装置与试验孔地埋管间连接距离，降低此在测试过程中与周围换热对测试结果产生不利影响，测试仪器的放热装置应临近测试钻孔，因此，在特殊天气下的防护措施十分重要，装置具备防渗防冻措施，以避免因此导致的测试中断。

此外，以水作为循环介质的时候，进水、排水口设置对测试装置的便捷性也具有较大影响，尤其是排水口设置，需要考虑设置在容器最底部，确保排水顺畅。

3.2.3 岩土热物性测试装置采用黑色金属制作的构件表面应作除锈和防腐处理。

【条文说明】试验装置使用场合多为室外，为保证试验装置使用寿命和耐久性，对其外表面处理做出要求。

3.2.4 岩土热物性测试装置内配置的加热（制冷）设备应符合国家现行标准《储水式电热水器》GB/T 20289、《低环境温度空气源热泵（冷水）机组 第2部分：户用及类似用途的热泵（冷水）机组》GB/T 25127.2等规范要求。

【条文说明】试验装置为多种设备集成装置，冷（热）源装置是组成测试装置的核心部件，满足国家产品规范要求，是保证试验装置功能可靠实现的基础。

3.2.4 岩土热物性测试装置内配置的水泵能效应满足国家现行标准《清水离心泵能效限定值及节能评价值》GB 19762的要求。

【条文说明】试验装置应注意节能性，采用水泵性能满足国家产品能效要求是基础。

3.2.5 岩土热物性测试装置所采用的管材、阀门、仪表及配件等，除应符合国家现行有关标准的规定外，尚应满足测试所需要的承压要求。

【条文说明】采用符合国家标准规定的管材、阀门、仪表及配件等满足，是保证测试装置质量的基本措施。试验装置应考虑测试钻孔深度不同，所有配件承压能力应满足其测试深度范围内压力要求。

3.2.6 岩土热物性测试装置的加热（制冷）设备应根据测试工况的不同，可调可控。

【条文说明】试验装置测试对象不同，其加热（制冷）量不同，要求试验装置应具有较宽的适用范围，因此规定其调节性。

3.2.7 岩土热物性测试装置应具有流量调节功能，宜采用变频水泵方式实现，并应安装滤波器，避免水泵变频运行时影响加热功率稳定性。

【条文说明】进行流量调节可以采用水泵变频或者水环路旁通阀门调节两种方式实现，采用变频水泵是较为方便的形式，但是要注意变频器谐波对电加热控制装置的影响，必须安装滤波器避免相互干扰，确保加热功率稳定性。

3.2.8 岩土热物性测试装置应具有采用恒热流测试法功能，加热功率宜在0~12kW，根据测试孔深度不同合理选择加热功率。

【条文说明】恒热流测试法加热功率应接近测试孔实际放热功率，根据钻孔深度不同，加热功率设置应不同，加热功率可进行分级设置，采用加热器数量调节，也可以采用控制器进行调节。加热量可根据测试孔深度和相关经验值设置，ASHRAE推荐加热功率应为每米钻孔50W-80W，大致为实际U型管换热器高峰负荷值。

3.2.9 岩土热物性测试装置的电气控制应具有超温保护、水系统断流保护等功能。

【条文说明】本条是从安全角度，对试验装置进行规定，防止在设备故障时造成更大的损失，避免因使用环境温度导致设备损坏。

3.2.10 岩土热物性测试装置的安全性能应符合如下要求：

1装置应有可靠的电气绝缘性能，带电回路之间以及带电回路与地之间的绝缘电阻应不小于1MΩ；

2装置外壳及可能带电的金属件与接地端之间应有可靠的电气连接，其与接地端之间的连接电阻不得大于0.1Ω，装置内有明显得接地符号；

3装置应有足够的电气耐压强度，应能承受冷态电压2000V和热态电压1000V、50Hz的1min的耐压试验，无击穿和闪络现象；

4装置应设置过电流保护、短路保护、漏电保护、过电压保护和缺相保护（三相电源）等功能。

【条文说明】岩土热物性测试装置采用电加热作为水路加热热源并对出水温度进行控制，采用变频水泵提供额定的水流量，装置的安全性能参照JB/T 10393-2002《电加热锅炉技术条件》第6.5条。

3.2.11 岩土热物性测试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、土壤温度等参数的实时数据采集及存储功能，采样周期可设置，最小采样周期应不大于5min。

【条文说明】岩土热物性测试装置模拟夏季工况的放热试验，系统的进口水温及水量相对稳定，土壤换热过程非常缓慢，需要测试时间较长，为减少现场记录工作量，要求具有数据采集及存储功能。不同阶段出口水温的变化幅度不同，因此要求采样周期可调，为保证数据准确性，采样周期应不大于5min。

3. 3.12 岩土热物性测试装置应做好各个环节的保温，防止环境温度变化导致的热损失。

【条文说明】在实际工程中，岩土热响应测试的持续时间长，在测试期间内，循环水箱、测试车壁面等都不可避免地与测试环境发生热交换，对测试结果产生影响，因此，做好循环放热系统各环节装置外表面保温，降低环境温度影响十分必要。

3.2.13 岩土热物性测试装置应便于运输，可适应项目场地情况。

【条文说明】测试场地情况各异，为方便测试的开展，需要测试装置具有便携性和环境适应性，方便运输至现场，开展测试工作。

## 3.3 仪器仪表

3.3.1 岩土热物性测试所用的测试仪器仪表的准确度要求详见表3.3.1所示。

表3.3.1 测量仪器仪表准确度

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测量参数 | 测量仪表 | 测量项目 | 仪表准确度 |
| 1 | 温度 | 水银温度计、电阻温度计、热电偶温度计 | 进出水温度 | ±0.2℃ |
| 土壤温度 | ±0.5℃ |
| 2 | 流量 | 流量计（如电磁流量计或超声波流量计等） | 水流量 | 1% |
| 3 | 功率 | 功率计 | 加热电功率 | 1% |

【条文说明】岩土热响应装置产品，内置高精度仪表，仪器精度参照实验室对冷热量的检测标准要求，如GB/T10870-2014《蒸气压缩循环冷水（热泵）机组性能试验方法》表C.1的规定，其中进出水温度采用铂电阻，准确度要求0.1℃，土壤温度采用热电偶，准确度可要求0.5℃，水流量及功率均为1%。

3.3.2 温度传感器的测量范围应为测定温度的1.2~1.5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；安装位置需考虑太阳辐射等可能影响因素，并作好保护。

【条文说明】温度传感器的设置宜保证以下测量范围。水温度测量范围:0℃~50℃；防冻介质测量范围：-10℃~50℃；室外温度测量范围:-30℃~80℃。

3.3.3 流量传感器的量程应为测试流量的1.2~1.3倍；流量传感器安装位置前后应有保证产品所要求的直管段长度或其他安装条件；应选用具有瞬态值输出的流量传感器。

【条文说明】根据选择流速及地埋管孔径，可确定测试孔流量，流量传感器类型多样，安装要注意按照传感器的安装要求，避免测量误差的发生，流量具有瞬态值输出功能便于计算对应时刻的参数及记录变化规律。

3.3.4 功率计量设备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满足设备的正常运行。

【条文说明】功率计量设备宜保证测量分辨率≤1W；工作环境:电源为单相交流220V，50Hz。

3. 3.5 岩土热物性测试装置所用的测试仪器仪表应具有有效期内的检验合格证、校准证书或测试证书。

【条文说明】测试用的仪器仪表应按照相应国家计量标准进行检定和校准，确保其准确性和精度，采用在有效期内的计量仪器仪表是确保试验准确性的前提，因此作此规定。

# **4 测试钻孔**

## 4.1 一般规定

4.1.1 岩土热物性测试前，应进行钻孔场地状况调查，调查内容应包括：

1. 场地面积、形状及地形地貌特征；
2. 场地内已有建筑物的占地面积及其分布、基础型式及埋深；
3. 场地内已有树木植被、池塘、排水沟及架空输电线、市政管网、交通设施、历史文化遗迹、电信电缆的分布及规划综合管线分布；
4. 场地内已有的、计划修建的地下管线和地下构筑物的分布及其埋深；
5. 交通道路状况及施工所需的电源、水源情况。

【条文说明】岩土热物性测试钻孔前调查场地的基本信息，主要有三方面的原因，一是通过调查场地面积、地貌和已有建筑物等基本信息，选择适合的钻孔位置；二是避让场地中现有建筑及设施，确保钻孔不会对建筑基础、市政设施、历史遗迹等造成损害；三是确认场地满足施工机具安装和钻孔工作开展的条件，同时确认道路情况满足岩土热物性测试装置的运输要求。

4.1.2 测试孔的数量应符合国家现行标准《地源热泵系统工程技术规范》GB50366的相关规定，同时根据地埋管地源热泵系统应用规模、场地情况、地质条件的复杂程度等因素综合确定。

【条文说明】国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB50366中对地埋管岩土热物性测试给出了推荐进行和必须进行的范围，热物性测试钻孔数量在不低于国家标准的要求下，还要根据对测试地点的地质条件和场地分散情况进行综合分析后确定，当地埋管埋设区域比较分散或场区地质条件差异大时，应根据设计和施工的要求划分区域，分别设置测试孔，相应增加测试孔数量。

4.1.3岩土热物性测试前，应确定测试孔的数量和测试方案；对2个及以上测试孔的测试，其测试结果应取算术平均值。

【条文说明】工程场地状况及浅层地热能资源条件是能否应用地源热泵系统的前提。地源热泵系统方案设计之前，应根据实地勘查情况，选择测试孔的位置及测试孔的数量，确定钻孔、成孔工艺及测试方案。如果在打孔区域内，由于设计需要，存在成孔方案或成孔工艺不同，应各选出一个孔做为测试孔，并分别进行测试；此外，对于地埋管换热器埋设面积较大，或地埋管换热器埋设区域较为分散，或场区地质条件差异性大的情况，应根据设计和施工的要求划分区域，分别设置测试孔，相应增加测试孔的数量，进行岩土热物性参数的测试。

4.1.4 测试孔的施工应由具有相应资质的专业队伍承担。

【条文说明】测试孔施工不同于常规水井施工和常规空调管道安装，需要具有相关地勘资质及地源热泵施工经验的队伍来实施，以保证钻孔工作的顺利开展。

4.1.5 岩土热物性测试前，应通过钻孔进行勘察；钻进过程中，做好钻孔记录，包括地下岩层情况、地下水情况，绘制项目场区钻孔地质综合柱状图。

【条文说明】通过对岩土层分布、各层岩土土质以及地下水情况的掌握，为地源热泵系统的设计方案遴选提供依据。钻孔地质综合柱状图是指通过现场钻孔勘察，并综合场区已知水文地质条件，绘制钻孔揭露的岩土柱状分布图，获取地下岩土不同深度的岩性结构。

## 4.2 钻孔施工

4.2.1 测试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。

【条文说明】测试孔钻孔之前进行地面清理，是为施工提供方便的场地条件，同时做好泥浆的存储或转运措施，防止因此对场地周边环境造成污染。

4.2.2 测试孔的埋管管材、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的用孔相一致。

【条文说明】岩土热物性测试中采用的管材、设置方式、埋管深度、回填材料、回填方式等因素，对测试结果和回归得到的岩土热物性参数有直接影响，为了使热物性测试结果对地埋管设计有实际指导意义，必须保证测试钻孔和实际孔完全一致，否则不可采用。

回填料宜采用膨润土和细砂（或水泥）的混合浆，不应使用钻孔得到的场地原土回填。当地埋管换热器设在密实或坚硬的岩土体中时，宜采用水泥基料回填。

4.2.3 测试孔施工过程使用的材料、配件等必须符合国家现行有关标准，不得对环境造成污染，严禁使用国家禁止或淘汰使用的材料。

【条文说明】岩土热物性测试钻孔过程中要用到一些钻机设备及辅助材料和配件等，钻孔过程中，设备及材料的与地下水及土壤等直接接触，为避免对地下环境造成污染，特别明确其必须符合国家现有标准要求，不可以使用禁止、淘汰产品。

4.2.4 测试孔钻孔应根据现场地质类型确定施工工艺。

【条文说明】换热孔钻孔方法应根据地质条件选择，根据施工经验总结，推荐：

1. 第四系细颗粒地层宜采用回转钻进；
2. 第四系粗颗粒地层宜采用回转钻进或冲击钻进；
3. 基岩地层宜采用潜孔锤钻进；
4. 若基岩地层上覆第四系地层，则钻进第四系地层时应采用跟管钻进，但跟管深度不宜大于40m。

此外，钻孔施工过程还应符合《水文水井地质钻探规程》 DZ-T0148-2014的相关规定。

4.2.5 岩土热响应测试孔深度宜比实际的用孔深度深2m。

【条文说明】考虑钻孔过程中岩土碎屑掉落，以及泥浆沉淀等因素，钻孔深度比实际用孔深度增加一些，以保证地埋管换热器下管至预设深度。

4.2.6 钻孔开孔及终孔宜采用同一口径，如遇回填土、卵石层、流砂带、破碎带、孔洞、洞穴等复杂地层，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。

【条文说明】换热孔钻孔采用相同口径便于施工，便于后续实际用孔实现与测试孔一致性。在特殊复杂地层，存在钻孔导致局部孔径变化的地方，采用护壁套管，可以有效保障孔径与上下的一致性。

4.2.7 单U管钻孔直径宜为110mm~130mm，双U管钻孔直径宜为150mm~180mm，钻孔孔径宜大于地埋管与灌浆管组件20mm以上。

【条文说明】针对目前我国常用的两种地埋管换热器管径型号DN25和DN32，分别提出采用单U和双U时的钻孔孔径，推荐孔径综合考虑了施工技术难度和成本，在满足地埋管换热器安装需求的同时，为了保证灌浆管能正常工作，钻孔孔径应大于地埋管与灌浆管组件尺寸。

4.2.8 潜孔锤钻进成孔后下管前，采用压缩空气或清水进行清孔，孔底沉碴不大于0.5m。

【条文说明】钻孔方式不同易导致孔底沉渣，如不进行沉渣去除，会影响埋管有效深度。

4.2.9 钻孔的垂直偏差不应大于1.0％。

【条文说明】实际用孔施工过程中应确保钻机钻杆垂直度，是为了避免深部钻孔垂直交叉，垂直度可通过钻机水平面上设置框式水平仪来控制，为保证热物性测试钻孔和实际用孔各项物理参数的一致性，试验钻孔的垂直偏差也做同一要求。

## 4.3 下管回填

4.3.1 竖直地埋管换热器安装应在钻孔完成且孔壁固化后立即进行。

【条文说明】为防止钻孔完成后，由于放置时间较长导致的孔洞塌陷，钻孔壁及地面渣土掉落等不利因素影响，地埋管换热器安装应在钻孔后立即进行。

4.3.2 钻孔完成后下管前，应先将地埋管换热器按设计要求组装好，并对地埋管换热器进行水压试验。

【条文说明】地埋管换热器组装质量对岩土热物性测试影响巨大，若存在质量问题，可能导致泄露，则后续工作无法正常开展，也不具备对实际用孔的指导作用，因此，为保证热物性测试准确性，需要提前将地埋管换热器在地面上组装完成，同时按照《地源热泵系统工程技术规范》GB50366中要求进行水压试验，确保没有问题后再进行安装。

4.3.3 水压试验合格后将地埋管换热器带压下入孔内。下管应连续、缓慢，并应采取措施使地埋管换热器各支管处于分开状态。

【条文说明】地埋管换热器水压试验后，带压下管有利于克服钻孔中可能存在的泥水混合物浮力作用，缓慢连续下管和设置管卡等必要措施可以避免地埋管换热器入出水管缠绕，避免热短路。

4.3.4 下管完毕后地埋管换热器上端应高出地面1m以上，管端应作好临时封闭措施，防止进入杂物。

【条文说明】为方便后期与岩土热物性测试装置的连接，下管完毕后，换热器上端应高出地面一定距离，管端做好防护措施避免杂志进入，对后续连接测试装置的流量装置等造成损害或者测量误差。

4.3.5 竖直地埋管换热器安装完毕后应立即回填封孔；

【条文说明】地埋管换热器安装完毕之后应马上进行回填灌浆，避免地面污染物掉落，污染地下环境，避免不同含水层之间交叉污染。

4.3.6 回填料应搅拌均匀后方可使用，回填应密实，无空腔。

【条文说明】回填材料应根据当地的地质条件进行选配，由于非单一物质，其性能发挥与混合物比例相关，因此要求在回填料使用前将其充分搅拌，同时为保证地埋管换热器和岩土体间换热性能，回填应做到密实，避免空气穴的存在。

4.3.7 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。

【条文说明】注浆管管径与回填材料混合物的性能相关，不低于20mm，可以有效保证回填速度，防堵设计是为了避免下管过程中早晨的注浆管堵塞，无法进行注浆工作。

4.3.8 注浆设备应选用与回填材料浆体输配特性匹配的专用注浆泵。

【条文说明】回填材料的水合过程与其成分相关，通常速度型的泵会加速水合过程，根据回填材料成分和性能，选择与其想匹配的容积型泵，是成功开展回填灌浆工作的前提。

# **5** **测试方法**

## 5.1一般规定

5.0.1岩土热物性测试，应采用恒热流法放热工况作为主要测试工况，吸热工况及稳定工况下的测试可作为补充校核或比对参考。

【条文说明】目前国外针对岩土热物性测试的理论分析模型主要还是基于两大经典传热学模型，以及在此基础上衍生出的数值分析模型。基于同一测试条件下，各个传热模型虽然假设条件有所差别，但分析计算结果上的差异并不明显。

两种模型最根本的差异是对模型的假设条件不同。线热源模型以其简便易于实现的特点，在实际应用中占主流，其次是圆柱热源模型。据统计，目前在全世界范围内，单独运用线热源理论模型进行分析的约占总数的93%；单独运用圆柱热源理论模型进行分析的约占总数的10%。而在我国，线热源理论模型应用较多，但在运用的数量和规模上，相比于圆柱热源理论模型并未体现出绝对的优势。此外，我国一些高校还基于数值分析，自行开发出一套针对岩土热物性测试的分析计算方法。由于经典传热学理论模型在相关文献中已有大量的分析和论述，本标准不再熬述。

基于数值分析的计算模型相比于上述两大经典模型，具有更强的针对性、灵活性和适应性。由于数值分析模型基于数学分析和计算机编程，具有很大的发挥空间，因而在建立分析模型上，可以更贴近实际的测试情况，甚至是为自主开发的测试设备进行量身订做，形成一套专有的分析模型。但也正是由于其专有性特点的限制，所以很难形成适用性更广，被接受程度更高的通用分析模型。

而绝大多数采用模拟夏季工况的同时又采用恒定热流法的原因主要有：

1. 理论分析模型较为成熟；
2. 测试设备各个元器件的组成相对较为简易，设备本体的构建较易实现；
3. 能大幅降低测试设备的体积和重量；
4. 测量精度易于掌控；
5. 设备的可靠性和操作性更强；
6. 测试周期相对较短，经济性更高。

基于上述原因，无论是在国外还是在国内，基于模拟夏季工况的同时又采用恒定加热量的这样一种工作原理，来指导岩土热物性测试设备研发，仍然占据着岩土热物性测试测试的主流，因此本规范中只要求采用向岩土施加一定加热功率的方式，来进行热物性测试。

5.1.2 岩土热物性测试过程应遵守国家和地方有关安全、劳动保护、防水、环境保护等方面的规定。

【条文说明】测试过程中的安全操作、劳动保护方面，以及对现场和周边环境的保护等方面应遵守国家和地方相关要求，确保不产生不利影响。

## 5.2 测试要求

5.2.1 岩土热物性测试的测试过程，应遵循下列步骤：

1 制作测试孔，绘制项目场区钻孔地质综合柱状图；

2 平整测试孔周边场地，提供水电接驳点；

3 测试岩土初始温度；

4 测试仪器与测试孔的管道连接；

5 水电等外部设备连接完毕后，应对测试设备本身以及外部设备的连接再次进行检查；

6 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试验数据，包括循环水进出口温度、流量以及试验过程中向地埋管换热器施加的加热功率等；

7 提取试验数据，分析计算得出岩土综合热物性参数；

8 测试试验完成后，对测试孔应做好密封、标识等防护工作，后续可与其他钻孔等同使用。

【条文说明】岩土热物性测试直接测试目标为岩土初始温度、循环水进出口温度、流量以及试验过程中向地埋管换热器施加的加热功率等参数，因此需要按照参数提取顺序进行测试。测试步骤为通过实际测试工作开展积累总结得到的，按照此顺序可以有序开展工作，避免因条件准备不足，或者测试顺序失误导致测试时间加长、测试精度受影响等问题。

* + 1. 岩土热物性测试过程中，应做好对试验设备的保护工作。

5.2.3 测试现场应提供稳定的电源，具备可靠的测试条件。

【条文说明】输入功率的变化会导致热物性测试误差，为减小误差，应保持加热功率恒定。

5.2.4 在对测试设备进行外部连接时，应遵循先接水后接电的原则。

【条文说明】为保护测试安装人员安全、以及避免误操作触发水泵等设备角度出发，作此规定。

5.2.5 宜就近测试孔布置测试设备，连接应减少弯头、变径，连接管外露部分应保温，保温层厚度不应小于20mm。同一管路内，测试孔孔口水温与试验设备进、出口水温温差不应大于0.2℃。

【条文说明】为减少周围环境对测试结果的影响，将测试设备靠近测试孔，减少连接部件和管道的使用，连接部分采用保温，可以有效减少热损失，保温材料宜采用闭孔保温材料，避免因现场吸湿导致保温失效。测试孔孔口与对应的设备进、出口水温温差可以用于衡量保温情况。

5.2.6 岩土热物性测试应在测试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测试孔放置时间，对于灌注水泥基料的回填方式，宜放置不少于10d；对于其它的回填方式，宜放置不少于2d。

【条文说明】土壤温度场对岩土热物性测试结果影响显著，通过试验验证表明，热响应测试孔施工及地埋管换热器安装过程会引起岩土体温度波动，回填灌浆材料不同，其释热时间长短也不同，温度恢复到初始状态需要一定时间，通常48h后测试埋管的状态基本恢复，但对于采用水泥基料作为回填材料的，由于在水泥失水过程中会缓慢放热，因此应延长放置时间，10天以上可以保证温度恢复，此外放置一段时间也可以使回填料充分沉淀密实。

5.2.7 岩土体初始平均温度测试，可采用埋设温度传感器、无功循环法等方法。

【条文说明】岩土体初始温度是岩土热响应第一项内容，目前国内分为两种测试方法，一种是以布置温度传感器的方法，沿深度方向每隔一定间距，测量一个初始地温。该方法测试精度高，且能够实现在地埋管换热器垂直深度范围内分层测试，这种方法也是目前国际上较为通用的一种方法，不足之处在于对测试的软硬件水平要求较高；另一种方法是行业标准《浅层地热能勘查评价技术规范》DZ/T0225-2009中提出的无功循环法，即仅在循环水泵开启的情况下，温度稳定（温度变化幅度小于0.5℃）后观测时间不少于24h。

在采用后一种方法的情况下，要求一方面管内流动的状态要为紊流（雷诺数要大于3000），以确保流体与周围岩土体的充分换热，使管内流体温度尽可能接近土壤温度；另一方面，适当提高数据记录的频次，推荐每10s记录一组数据，而后再采用算术平均的方法，得到岩土体的初始平均温度。此种方法，水泵自身的功率势必不可避免的会对测量岩土体初始温度产生影响；而且，这种方法也抹除了岩土体的竖向温度分布（多次试验和调查发现，在地表以下20m至40m之后，深度每增加10m，地温会上升0.2-0.4K）。因而也就无法应用于更深一步——岩土体分层热物性参数的测试研究。若岩土热物性测试是服务于工程设计或咨询，则两种初始地温的测试方法均可使用；但若用于岩土热物性参数的研究，采用分层埋设温度传感器测试初始地温的方法更佳。

5.2.8 采用埋设温度传感器方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，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。

【条文说明】岩土体初始温度是岩土热响应第一项内容，目前国内分为两种测试方法，一种是以布置温度传感器的方法，沿深度方向每隔一定间距，测量一个初始地温。该方法测试精度高，且能够实现在地埋管换热器垂直深度范围内分层测试，这种方法也是目前国际上较为通用的一种方法，不足之处在于对测试的软硬件水平要求较高；

5.2.9 采用无功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℃后，持续时间不宜少于12h；

【条文说明】为了明确地埋管中循环水与土壤已经实现热平衡，水温可以代表土壤温度，必须设置一个长时段稳定运行区间，在此期间温度变化低于0.5℃，可认为其满足要求。

5.2.10 岩土热物性测试应连续不间断，持续时间宜为72h，不应少于48h。

【条文说明】采用线热源模型进行分析计算时得出地埋管换热器同周围土壤间换热的数学描写：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

由于偏微分方程求解的复杂性，采用玻尔兹曼变换为主的数学变换对上述数学描写处理，得到周围土壤温度场的数学表达式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

式中，为指数积分函数；

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *T*(*r*,*τ*) | —— | 任一位置r处，在计算时刻τ时的土壤温度，℃； |
| *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* | —— | 计算位置到钻孔中心线的距离，m； |
| *ρ*s*c*s | —— | 土壤容积比热容，J/(m3·K)。 |

其中指数积分函数Ei(x)可通过级数进行近似展开，展开式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

当未知数足够小时，指数积分函数可近似用展开式前两项进行替代，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

钻孔外传热模型的一个重要目标是得到钻孔壁的温度，将钻孔半径rb代入，即可得到钻孔壁的温度：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

在线热源模型当中，当时采用上述替代公式，其最大误差为10%，当，采用上述替代公式进行替代，最大误差为2.5%，取值不同最大误差值如下表所示。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| n | 5 | 10 | 20 | 40 | 50 | 100 |
| Error(%) | 10.5 | 5.3 | 2.5 | 1.5 | 1.0 | 0.5 |

简化后的线热源模型数学表达式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

由于假定钻孔内传热过程为稳态传热过程，管内循环流体平均温度同钻孔壁温度的关系如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

联立上两式得到运行τ时刻时，管内循环流体平均温度表达式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

计算误差与岩土体导热系数、比热容和钻孔半径相关，此三个参数不同，达到相同误差率需要的时间也不相同。关于测试的时间长度，在对国外一些文献的调查中发现，推荐的测试时长为50或60小时，但最少不少于48小时。而在实际测试中，国外的测试时长一般为4~7天。通过实际测试表明测量时间越长，所得的结果就越准确。但是，如果测量时间太长，就会耗费较多的人力物力，且放热试验持续时间越长，会因为土壤湿迁移等问题，导致导热系数测试值逐渐降低，偏离真值。因此测量时间必须考虑经济性。值得注意的是，想要缩短测试的时间是受条件限制的，因为在测试的最初的几小时内，温度的变化是由钻孔内的回填材料引起，而不是周围的岩土。具体的判断标准是当地埋管的进出水的温度在单位时间内的变化达到一定程度，即变化很小时即可认为传热稳定了。综合国内外研究及应用经验，综合考虑不同地质条件，岩土热响应测试试验应连续不间断，持续时间不应少于 48h，最好持续时间为 72h，在地埋管换热器的出口温度稳定后（出口参数稳定的判断依据是在 12h 小时内，其温度波动小于 1℃），可以取得较好的测试结果和较小误差。

5.2.11 岩土热物性测试期间，加热功率应保持恒定，地埋管换热器的出口温度稳定后，其温度宜高于岩土初始平均温度5℃以上且维持时间不应少于12h。

【条文说明】岩土热物性测试是一个对岩土缓慢加热直至达到传热平衡的测试过程，因此需要有足够的时间来保证这一过程的充分进行。在试验过程中，如果要改变加热功率，则需要停止试验，待测试孔内温度恢复至与岩土的初始平均温度一致时，才能再进行岩土热物性测试。

对于采用加热功率的测试时，加热功率大小的设定，应使换热流体与岩土保持有一定的温差，在地埋管换热器的出口温度稳定后，其温度宜高于岩土初始平均温度5℃以上。如果不能保持一定的温差，试验过程就会变得缓慢，影响试验效果，不利于计算导出岩土热物性参数。本条文的目的就是为了确保测试数据和理论分析数据的可比性，提高测试精度，获得更为准确的测试参数。

地埋管换热器出口温度稳定，是指在不少于12h的时间内，其温度的波动小于1℃。

5.2.12 地埋管换热器内流速不应低于0.2m/s。

【条文说明】为有效测定项目所在地岩土热物性参数，应在测试开始前，对流量进行合理化设置：地埋管换热器内流速应能保证流体始终处于紊流状态，且雷诺数应不小于3000，流速的大小可视管径、测试现场情况进行设定，但不应低于0.2 m/s。

5.2.13 试验数据读取和记录的时间间隔不应大于10min。

【条文说明】试验数据的读取和记录时间间隔影响岩土热物性参数回归计算的准确性，较长的时间间隔容易导致较大误差，较短的时间间隔会造成处理数据量大、延长计算时间等问题，因此，根据测试系统实际情况选择满足计算精度需要的时间间隔，不大于10min。

## 5.3 岩土热物性参数计算

5.3.1 岩土热物性测试数据处理应采用反算法推导出岩土综合热物性参数。

【条文说明】通过热响应测试获得地埋管换热器逐时进出口水温及加热功率后，需要根据传热模型反向计算得到岩土热物性参数。此过程实际上是传热问题的反问题，即根据已获得的响应数据去反算得到热物性参数。工程上常用的反算方法有：斜率法，双参数回归法、三参数回归法、数值计算参数辨识等。根据选用的计算模型不同、计算条件、计算工具的不同进行选择，由岩土热物性测试得到的数据进行反推。由稳定工况法测得的地埋管平均传热系数，仅为测试工况下，系统运行参考数据，并非岩土热物性参数。

5.3.2 岩土热物性参数反算，筛除测试数据从试验开始不宜少于10h。

【条文说明】根据线热源理论，其成立应满足一定的前提，即$\frac{αt\_{start}}{r\_{b}^{2}}\geq n$，当n=5时，参数辨识误差小于10%，另外就是孔内为稳态导热。这两个条件在试验开展的初期无法实现，初期采集的数据进行辨识的结论显然存在问题，因此，需要对初始数据进行筛除舍去。筛除时间长短与加热功率相关，当加热功率低时，筛除时间短，加热功率高时，需要筛除的数据时间长。综合国内外现有研究成果，筛除时间均在10h以上，因此作此规定。

5.3.3 应对现场测试资料进行综合分析，剔除因试验条件如气温变化等造成的异常数据。

【条文说明】针对现场测试环境进行综合分析，避免由于外扰造成的试验条件变化带来的温度变化对测试结果造成影响。

# **6 测试报告**

6.0.1 岩土热物性测试报告应包括下列内容：

1项目概况；

2测试设备及方案；

3测试条件；

4项目所在地岩土地质综合柱状图；

5参数的连续记录，应包括：循环水流量、加热功率、地埋管换热器的进出口水温；

6岩土初始平均温度；

7岩土综合热物性参数（岩土的综合导热系数、综合比热容）。

6.0.2 岩土热物性测试报告样例见附录A.

**附录A 岩土热物性测试报告样例**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1项目概况1. 项目所在区域；
2. 测试孔选址原则；

2测试设备方案1. 仪器介绍；
2. 仪表精度及标定；
3. 计算模型；

3 测试条件1）测试孔基本参数表1 测试孔基本参数表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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） |  |

1. 勘查区地质环境条件
2. 岩性统计表及综合柱状图；

表2 岩性统计表及柱状图

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 深度（m） | 厚度（m） | 岩性 | 地层柱状图 | 备注 |
| 1 | 0～-…… | …… |  |  |  |
| 2 | ……～…… |  |  |  |  |
| …… |  |  |  |  |  |
| n-1 |  |  |  |  |  |
| n |  |  |  |  |  |

4）测试要求；5）测试方法及过程；4测试参数及数据处理1）岩土初始平均温度 (a)测试参数； (b)数据处理；2）岩土综合导热系数 (a)测试参数：测试过程中连续记录的参数，应包括循环水流量、加热功率、地埋管换热器的进出口水温； (b)数据处理；5测试结果表3 测试孔测试结果汇总

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 测试参数 | 测试结果 |
| 1 | 岩土体初始平均温度（℃） |  |
| 2 | 岩土体综合导热系数（W/m.K） |  |
| 3 | 岩土体容积比热容（J/m³.K） |  |

 |

**本规程用词说明**

1为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2）表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。

 4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的：采用“可”。

2规程中指明应按其他有关标准执行时，写法为：“应符合*……*的规定”或“应按……执行”。

**引用标准名录**

1. 《地源热泵系统工程技术规范》GB50366
2. 《储水式电热水器》GB/T 20289
3. 《低环境温度空气源热泵（冷水）机组 第2部分：户用及类似用途的热泵（冷水）机组》GB/T 25127.2
4. 《清水离心泵能效限定值及节能评价值》GB 19762