(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105372288 B
(45)授权公告日 2018.02.13

(21)申请号 201510711511.9

(22)申请日 2015.10.28

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105372288 A

(43)申请公布日 2016.03.02

(73)专利权人 中国农业大学
地址 100083 北京市海淀区清华东路17号

(72)发明人 袁小艳 桂心哲 高明 赵淑梅 王建平 李桂朋

(74)专利代理机构 北京中安信知识产权代理事务所(普通合伙) 11248
代理人 徐林

(51)Int.Cl.
G01N 25/20(2006.01)

(56)对比文件
CN 105223232 A,2016.01.06,
CN 201508338 U,2010.06.16,
CN 102768225 A,2012.11.07,
CN 201397310 Y,2010.02.03,
CN 203965369 U,2014.11.26,
CN 104792376 A,2015.07.22,
CN 102590271 A,2012.07.18,
CN 101487805 A,2009.07.22,
US 8308349 B1,2012.11.13,
Ernst Rohner et al..A New, SMall, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-situ for Borehole Heat Exchanger Design.《Proceedings World Geothermal Congress 2005》.2005,
Heyi Zeng et al..Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers.《International Journal of Heat and Mass Transfer》.2003,第46卷
蔺文静 等.我国陆区干热岩资源潜力估算.《地球学报》.2012,第33卷(第5期),

审查员 李悦

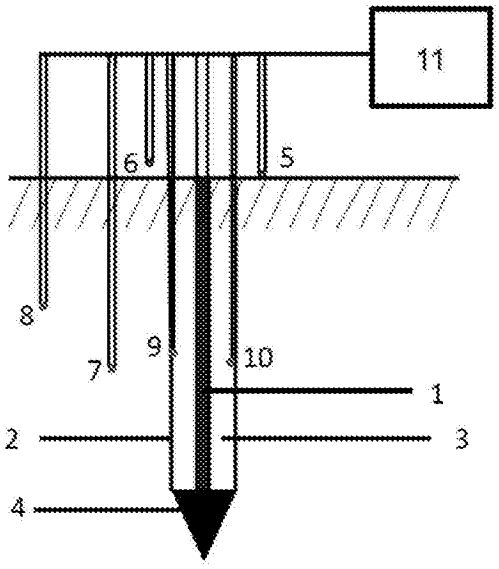
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54)发明名称

一种热流率测量仪和测量方法

(57)摘要

本发明涉及一种热流率测量仪和测量方法，尤其涉及一种散状材料热流率测量仪和测量方法。该测量仪包括热源、多个温度传感器、温度控制器(12)和信号处理器(11)。所述温度控制器(12)与热源的加热棒(1)相连；所述信号处理器(11)与多个温度传感器相连，还与热源的加热棒(1)相连。该测量方法包括如下步骤：测量仪的布置→读取配置→参数设置→数据采集→热导率计算→热流率测量的准备→热流率数据采集→热流率计算。本发明的热流率测量仪和测量方法，在现场测量被测媒质的热导率，根据热导率以及两个温度传感器的温度测量热流率，对现场很少干扰，灵敏度高，热流通路无遮挡，大大提高测试灵敏性及精度。



CN 105372288 B

1.一种热流率测量仪,其特征在于:

包括:热源、地表温度传感器(5)、大气温度传感器(6)、第一温度传感器(7)、第二温度传感器(8)、加热套管表面温度传感器(9)、加热套管内壁温度传感器(10)、信号处理器(11)和温度控制器(12),其中,

所述热源包括:加热棒(1)、加热套管(2)、增强填充剂(3)和锥形钻头(4),其中,加热棒(1)位于加热套管(2)的内部,增强填充剂(3)位于加热套管(2)内部除加热棒(1)以外的空间中,锥形钻头(4)设置在加热套管(2)的下端;

所述温度控制器(12),与热源的加热棒(1)相连;

所述加热棒(1)的温度高于环境温度20℃-30℃;

所述加热套管(2)外径D与加热套管(2)的长度H之比小于0.1;

地表温度传感器(5)的温度感应探头位于地表;大气温度传感器(6)的温度感应探头位于空气中;第一温度传感器(7)和第二温度传感器(8)的温度感应探头位于被测材料中;加热套管表面温度传感器(9)的温度感应探头紧贴于加热套管(2)的外壁;加热套管内壁温度传感器(10)与温度控制器(12)连接,其温度感应探头固定于加热套管(2)的内壁;

所述信号处理器(11)与地表温度传感器(5)、大气温度传感器(6)、第一温度传感器(7)、第二温度传感器(8)、加热套管表面温度传感器(9)和加热套管内壁温度传感器(10)相连,所述信号处理器(11)包括数据采集模块(14)、数据存储与处理模块(15)、人机交互模块(16)、电源模块(17)以及辅助装置(18),数据采集模块(14)、人机交互模块(16)、电源模块(17)以及辅助装置(18)通过数据存储与处理模块(15)彼此互相连接。

2.如权利要求1所述的热流率测量仪,其特征在于:

所述增强填充剂(3)为导热树脂。

3.如权利要求1所述的热流率测量仪,其特征在于:

所述信号处理器(11)还具有外部通信接口,与上位机(13)连接。

4.如权利要求1所述的热流率测量仪,其特征在于:

所述数据采集模块(14)包括抗混叠滤波模块(19)、多路切换开关(20)、A/D转换模块(21)和电压采集模块(22),其中,抗混叠滤波模块(19)依次连接多路切换开关(20)和A/D转换模块(21),电压采集模块(22)连接A/D转换模块(21);

所述数据存储与处理模块(15)包括MCU核心控制器(23)、FLASH存储模块(24)和晶振及复位电路(25),MCU核心控制器(23)分别与FLASH存储模块(24)和晶振及复位电路(25)连接;

人机交互模块(16)包括液晶显示模块(26)和键盘接口模块(27),两者分别与数据存储与处理模块(15)的MCU核心控制器(23)连接;

电源模块(17)包括5V电源转换模块(28);

辅助装置(18)包括内部温度传感器(29)、时钟模块(30)和串口通信模块(31),三者分别与数据存储与处理模块(15)的MCU核心控制器(23)连接。

5.一种采用如权利要求1-4之一所述的热流率测量仪测量热流率的测量方法,其特征在于:

包括如下步骤:

a、测量仪的布置:将包括加热棒(1)、加热套管(2)、增强填充剂(3)和锥形钻头(4)的热

源和温度感应探头位于加热套管(2)内壁的加热套管内壁温度传感器(10)一起插入被测材料中，地表温度传感器(5)的温度感应探头放置于地表，大气温度传感器(6)的温度感应探头放置于空气中，第一温度传感器(7)和第二温度传感器(8)的温度感应探头放置于被测材料中，加热套管表面温度传感器(9)的温度感应探头紧贴于加热套管(2)的外壁，并将加热棒(1)以及各个温度传感器连接至信号处理器(11)；

b、读取配置：启动测量仪，MCU核心控制器(23)读取配置数据；

c、参数设置：设置温度控制器(12)的温度、测试时间、加热棒的电阻值和地表温度传感器(5)、大气温度传感器(6)、第一温度传感器(7)、第二温度传感器(8)、加热套管表面温度传感器(9)和加热套管内壁温度传感器(10)的位置参数，对地表温度传感器(5)、大气温度传感器(6)、第一温度传感器(7)、第二温度传感器(8)、加热套管表面温度传感器(9)和加热套管内壁温度传感器(10)调零，开启温度控制器(12)，温度控制器(12)通过加热套管内壁温度传感器(10)感应加热套管(2)的温度，并对加热棒(1)加热；

d、热导率数据采集：地表温度传感器(5)、大气温度传感器(6)、第一温度传感器(7)、第二温度传感器(8)、加热套管表面温度传感器(9)和加热套管内壁温度传感器(10)的温度信息为每秒采集一次，每分钟计算一次平均值，存储在FLASH存储模块(24)中；

e、热导率计算：变化第一温度传感器(7)的位置得到第一温度传感器(7)的温度T(x1,y1)，变化第二温度传感器(8)位置得到第二温度传感器(8)的温度T(x2,y2)，

信号处理器(11)获得第一温度传感器(7)的温度和第二温度传感器(8)的温度，信号处理器(11)计算被测材料热导率，并将热导率结果输出，其中，

热导率的计算方法如下：

$$\lambda = \frac{q}{4\pi}\left\{\frac{\ln\left[\frac{(y_1+H)+\sqrt{x_2^2+(y_2-H)^2}}{(y_1-H)+\sqrt{x_1^2+(y_1-H)^2}}\right]-\ln\left[\frac{(y_2+H)+\sqrt{x_2^2+(y_2-H)^2}}{(y_2-H)+\sqrt{x_1^2+(y_1-H)^2}}\right]}{T(x_1,y_1)-T(x_2,y_2)}\right\}$$

其中，λ为热导率，q为热功率，H为加热棒(1)的长度，T(x1,y1)为第一温度传感器(7)在(x1,y1)处的温度，T(x2,y2)为第二温度传感器(8)在(x2,y2)处的温度，x1、x2分别为第一温度传感器(7)和第二温度传感器(8)的测量点距加热棒(1)中心轴的距离，y1、y2分别为第一温度传感器(7)和第二温度传感器(8)的测量点距地面的距离，测量点坐标满足如下关系：x1≠x2且x1<x2，x1≥5D，x2>5D并按照测试数据调整能够满足：T(x1,y1)-T(x2,y2)≥5℃，其中，D为加热套管(2)的外径；

f、热流率测量的准备：待被测材料冷却后，将第一温度传感器(7)的温度感应探头移动到地表温度传感器(5)正下方，被测材料中；

g、热流率数据采集：地表温度传感器(5)和第一温度传感器(7)的温度信息为每秒采集一次，每分钟计算一次平均值，存储在FLASH存储模块(24)中；

h、热流率计算：垂直变化第一温度传感器(7)的位置得到第一温度传感器(7)的温度T(x3,y3)，根据信息处理器(11)获得地表温度传感器(5)和第一温度传感器(7)的温度和已获得的热导率，信号处理器(11)计算被测材料热流率，并将热流率结果输出，其中，

热流率的计算方法如下：

$$\Phi = \lambda \frac{Te - T(x3, y3)}{y3}$$

其中，λ为热导率，Te为地表温度传感器(5)的温度，T(x3,y3)为第一温度传感器(7)在(x3,y3)处的温度，x3为第一温度传感器(7)的测量点距加热棒(1)中心轴的距离，y3为第一温度传感器(7)的测量点距地面的距离。

6.如权利要求5所述的测量热流率的测量方法，其特征在于：

在步骤a中，对所测量地表进行遮阴防风。

7.如权利要求5所述的测量热流率的测量方法，其特征在于：

在步骤e中，热导率的计算默认采用30分钟的滑动滤波方法进行数据的平滑与计算，在测试30分钟以内时，无热导率信息输出，测试时间大于30分钟，则开始输出热导率信息，直至测试时间结束或者测量结果达到收敛条件，其中，

所述收敛条件为5分钟内输出热导率波动范围小于或等于3％。

8.如权利要求5所述的测量热流率的测量方法，其特征在于：

在步骤a之后，步骤b之前，还包括如下步骤：在上位机(13)设置端口通信速率后，启动上位机(13)。

一种热流率测量仪和测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种热流率测量仪和测量方法，尤其涉及一种散状材料热流率测量仪和测量方法。

背景技术

[0002] 热流率是表征热量传递转移的强度物理量，相应的量化检测仪器是热流计。目前，使用最广泛的热阻式表面热流计采用的是热电堆原理，在被测表面附加一层已知热导率的附加壁，测量附加壁面内外热电堆温差，由热流密度方程推算得出通过附加壁的热流，这种方法容易对被测表面实际状况造成干扰，从而导致测量的较大误差。

[0003] 无干扰测量表面热流分布的热流计，包括纯辐射式热流计、全热流计、流体(热水)热流计和辐射热流计。纯辐射式热流计要消除对流和其他影响，得到纯辐射热流，适合高温辐射表面测试，如工业炉膛表面，但在常温条件下测试结果有较大误差；全热流计测量对流与辐射之和，高温测试较准确，在常温条件下测量结果有较大误差；流体(热水)热流计则测量流体的流量和焓值的乘积，常用于管路流动流体热量计量，不能用于地表面热流率测量；辐射热流计采用已知吸收率的测头铜片来测量辐射热流，主要为空间研究服务，也可用于地面环境辐射测量，但其仅适用于测量辐照热流，但不能测得包括对流辐射的综合热流率。

[0004] 国际上报道的稳态热流计要求有特定测试板且精度较低；激光法及瞬态热带法测量热流率的处理过程复杂，并且要求额外对密度及热容进行测试；地表太阳能及热传递规律的研究者通常采用粗糙的经验值估算。

发明内容

[0005] 本发明提供了一种热流率测量仪和测量方法，可解决现有技术中热流率测量精度较差的问题。

[0006] 为实现上述目的，本发明的技术方案如下：

[0007] 一种热流率测量仪，包括：热源、地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9、加热套管内壁温度传感器10、信号处理器11和温度控制器12，其中，

[0008] 所述热源包括：加热棒1、加热套管2、增强填充剂3和锥形钻头4，其中，加热棒1位于加热套管2的内部，增强填充剂3位于加热套管2内部除加热棒1以外的空间中，锥形钻头4设置在加热套管2的下端；

[0009] 所述温度控制器12，与热源的加热棒1相连；

[0010] 地表温度传感器5的温度感应探头位于地表；大气温度传感器6的温度感应探头位于空气中；第一温度传感器7和第二温度传感器8的温度感应探头位于被测材料中；加热套管表面温度传感器9的温度感应探头紧贴于加热套管2的外壁；加热套管内壁温度传感器10与温度控制器12连接，其温度感应探头固定于加热套管2的内壁；

[0011] 所述信号处理器11与地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第

二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10相连，所述信号处理器11包括数据采集模块14、数据存储与处理模块15、人机交互模块16、电源模块17以及辅助装置18，数据采集模块14、人机交互模块16、电源模块17以及辅助装置18通过数据存储与处理模块15彼此互相连接。

[0012] 所述加热套管2外径D与加热套管2的长度H之比小于0.1。

[0013] 所述增强填充剂3为导热树脂。

[0014] 所述加热棒1的温度高于环境温度20℃-30℃。

[0015] 所述信号处理器11还具有外部通信接口，与上位机13连接。

[0016] 所述数据采集模块14包括抗混叠滤波模块19、多路切换开关20、A/D转换模块21和电压采集模块22，其中，抗混叠滤波模块19依次连接多路切换开关20和A/D转换模块21，电压采集模块22连接A/D转换模块21；

[0017] 所述数据存储与处理模块15包括MCU核心控制器23、FLASH存储模块24和晶振及复位电路25，MCU核心控制器23分别与FLASH存储模块24和晶振及复位电路25连接；

[0018] 人机交互模块16包括液晶显示模块26和键盘接口模块27，两者分别与数据存储与处理模块15的MCU核心控制器23连接；

[0019] 电源模块17包括5V电源转换模块28；

[0020] 辅助装置18包括内部温度传感器29、时钟模块30和串口通信模块31，三者分别与数据存储与处理模块15的MCU核心控制器23连接。

[0021] 一种测量热流率的测量方法，包括如下步骤：

[0022] a、测量仪的布置：将包括加热棒1、加热套管2、增强填充剂3和锥形钻头4的热源和温度感应探头位于加热套管2内壁的加热套管内壁温度传感器10一起插入被测材料中，地表温度传感器5的温度感应探头放置于地表，大气温度传感器6的温度感应探头放置于空气中，第一温度传感器7和第二温度传感器8的温度感应探头放置于被测材料中，加热套管表面温度传感器9的温度感应探头紧贴于加热套管2的外壁，并将加热棒1以及各个温度传感器连接至信号处理器11；

[0023] b、读取配置：启动测量仪，MCU核心控制器23读取配置数据；

[0024] c、参数设置：设置温度控制器12的温度、测试时间、加热棒的电阻值和地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的位置参数，对地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10调零，开启温度控制器12，温度控制器12通过加热套管内壁温度传感器10感应加热套管2的温度，并对加热棒1加热；

[0025] d、热导率数据采集：地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的温度信息为每秒采集一次，每分钟计算一次平均值，存储在FLASH存储模块24中；

[0026] e、热导率计算：变化第一温度传感器7的位置得到第一温度传感器7的温度T(x1,y1)，变化第二温度传感器8位置得到第二温度传感器8的温度T(x2,y2)，

[0027] 信号处理器11获得第一温度传感器7的温度和第二温度传感器8的温度，信号处理器11计算被测材料热导率，并将热导率结果输出，其中，

[0028] 热导率的计算方法如下：

[0029]

$$\lambda = \frac{q}{4\pi}\left\{\frac{\ln\left[\frac{(y_1+H)+\sqrt{x_2^2+(y_2-H)^2}}{(y_1-H)+\sqrt{x_1^2+(y_1-H)^2}}\right]-\ln\left[\frac{(y_2+H)+\sqrt{x_2^2+(y_2-H)^2}}{(y_2-H)+\sqrt{x_1^2+(y_1-H)^2}}\right]}{T(x_1,y_1)-T(x_2,y_2)}\right\}$$

[0030] 其中，λ为热导率，q为热功率，H为加热棒1的长度，T(x1,y1)为第一温度传感器7在(x1,y1)处的温度，T(x2,y2)为第二温度传感器8在(x2,y2)处的温度，x1、x2分别为第一温度传感器7和第二温度传感器8的测量点距加热棒1中心轴的距离，y1、y2分别为第一温度传感器7和第二温度传感器8的测量点距地面的距离，测量点坐标满足如下关系：x1≠x2且x1<x2，x1≥5D，x2>5D并按照测试数据调整能够满足：T(x1,y1)-T(x2,y2)≥5℃，其中，D为加热套管2的外径；

[0031] f、热流率测量的准备：待被测材料冷却后，将第一温度传感器7的温度感应探头移动到地表温度传感器5正下方，被测材料中；

[0032] g、热流率数据采集：地表温度传感器5和第一温度传感器7的温度信息为每秒采集一次，每分钟计算一次平均值，存储在FLASH存储模块24中；

[0033] h、热流率计算：垂直变化第一温度传感器7的位置得到第一温度传感器7的温度T(x3,y3)，根据信息处理器11获得地表温度传感器5和第一温度传感器7的温度和已获得的热导率，信号处理器11计算被测材料热流率，并将热流率结果输出，其中，

[0034] 热流率的计算方法如下：

[0035] $$\Phi = \lambda\frac{Te - T(x3,y3)}{y3}$$

[0036] 其中，λ为热导率，Te为地表温度传感器5的温度，T(x3,y3)为第一温度传感器7在(x3,y3)处的温度，x3为第一温度传感器7的测量点距加热棒1中心轴的距离，y3为第一温度传感器7的测量点距地面的距离。

[0037] 在步骤a中，对所测量地表进行遮阴防风。

[0038] 在步骤e中，热导率的计算默认采用30分钟的滑动滤波方法进行数据的平滑与计算，在测试30分钟以内时，无热导率信息输出，测试时间大于30分钟，则开始输出热导率信息，直至测试时间结束或者测量结果达到收敛条件，其中，

[0039] 所述收敛条件为5分钟内输出热导率波动范围小于或等于3％。

[0040] 在步骤a之后，步骤b之前，还包括如下步骤：在上位机13设置端口通信速率后，启动上位机13。

[0041] 本发明的有益效果在于：

[0042] 本发明的热流率测量仪和测量方法，可在现场直接测量被测媒质的热流率，因无需将待测媒质送入实验室，减少了人为干扰对测试过程带来的各种影响，从而避免了因采样而改变环境对测量结果所带来的不利影响，大大提高了被测媒质热流率的测量精度。采用现场测得热导率，再根据热导率以及两个温度传感器的温度测量热流率，对现场很少干扰、灵敏度高、对热流通路无遮挡，可大大提高测试灵敏性及精度。

附图说明

[0043] 图1示出了本发明的热流率测量仪测量热导率时温度传感器的布置示意图；

[0044] 图2示出了本发明的热流率测量仪测量热流率时温度传感器的布置示意图。

[0045] 图3示出了本发明的热流率测量仪的整体示意图；

[0046] 图4示出了本发明的热流率测量仪的信号处理器11各个模块的关系示意图；

[0047] 图5示出了采用本发明的热流率测量仪测量热流率的流程图。

[0048] 图6为本发明的实施例1的热流率曲线。

[0049] 附图标记

[0050]	1	加热棒	2	加热套管
[0051]	3	增强填充剂	4	锥形钻头
[0052]	5	地表温度传感器	6	大气温度传感器
[0053]	7	第一温度传感器	8	第二温度传感器
[0054]	9	加热套管表面温度传感器	10	加热套管内壁温度传感器
[0055]	11	信号处理器	12	温度控制器
[0056]	13	上位机	14	数据采集模块
[0057]	15	数据存储与处理模块	16	人机交互模块
[0058]	17	电源模块	18	辅助装置
[0059]	19	抗混叠滤波模块	20	多路切换开关
[0060]	21	A/D转换模块	22	电压采集模块
[0061]	23	MCU核心控制器	24	FLASH存储模块
[0062]	25	晶振及复位电路	26	液晶显示模块
[0063]	27	键盘接口模块	28	5V电源转换模块
[0064]	29	内部温度传感器	30	时钟模块
[0065]	31	串口通信模块		

具体实施方式

[0066] 下面结合附图和实施例，对本发明的具体实施方式作进一步详细描述。

[0067] 本发明的热流率测量仪和测量方法的理论基础为稳态映像法，理论表明，当将一个细杆作为热源垂直埋入地下并控制该细杆的温度时，该细杆对埋设于其周围的材料产生稳定的温度场分布，而且其温度场分布与热导率呈确定关系。本发明是在此理论基础上开发的一种测量仪，其原理是：埋设合理尺寸的细杆、对细杆加热并控制细杆的温度，然后根据平均加热量以及周边测试点的温度场，经计算测出热导率值，在获得热导率值的基础上，监测不同层面的温差，计算获得垂直通过层间的热流率，因此，在测定散状天然材料如土壤的热流率时，可保持土壤原有的状态，测定结果更符合土壤现场情况，测量通过层间的热流率时，不覆盖另类材料，遮挡少，测量精度增加。

[0068] 如图1-3所示，本发明的热流率测量仪包括：热源、地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9、加热套管内壁温度传感器10、信号处理器11和温度控制器12。

[0069] 热源，以预定温度向周围散热，包括：加热棒1、加热套管2、增强填充剂3和锥形钻头4，其中，加热棒1位于加热套管2的内部，增强填充剂3位于加热套管2内部除加热棒1以外的空间中，锥形钻头4设置在加热套管2的下端，以便进入待测媒质；其中，加热套管2外径D与加热套管2的长度H之比小于0.1，以保证测试系统符合细杆模型条件，减少误差。增强填充剂3为导热树脂，以增强加热棒1与加热套管2的传热性能及加热套管2管壁的温度均匀性。为了提高测量精度，加热棒1的温度高于环境温度20℃-30℃。

[0070] 温度控制器12，与热源的加热棒1相连，用于为加热棒1提供热功率并控制加热棒1的温度，使加热棒1温度高于环境温度20℃-30℃，从而使稳态映像法测量时的温度测量环境参数始终保持在要求范围内。

[0071] 地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10用于检测因热源发出的热量而产生的温度场变化。其中，地表温度传感器5的温度感应探头位于地表，用于测量土壤表面温度；大气温度传感器6的温度感应探头位于空气中，用于测量环境温度，从而判断环境温度是否恒定以符合稳态映像法模型要求；第一温度传感器7和第二温度传感器8的温度感应探头位于被测材料中，用于测量被测材料的温度；加热套管表面温度传感器9的温度感应探头紧贴于加热套管2的外壁，用于测量加热套管2表面的温度；加热套管内壁温度传感器10与温度控制器12连接，其温度感应探头固定于加热套管2的内壁，用于将热源的温度信号提供给温度控制器12从而通过温度控制器12控制加热棒1的温度。所述信号处理器11与地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10相连，用于采集、存储温度传感器的温度；这样，信号处理器11就可根据热源的温度和地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8的温度计算所测媒质的热导率。信号处理器11还具有外部通信接口，与上位机13连接，进行通信，以方便分析处理。

[0072] 如图4所示，所述信号处理器11包括数据采集模块14、数据存储与处理模块15、人机交互模块16、电源模块17以及辅助装置18。其中，数据采集模块14、人机交互模块16、电源模块17以及辅助装置18通过数据存储与处理模块15彼此互相连接。

[0073] 地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的温度信号或加热棒1的电压信号经由数据采集模块14进行采集，转换为数字信号后传送入数据存储与处理模块15，由数据存储与处理模块15进行数据的存储与计算，最后由人机交互模块16显示测量结果，或经由辅助装置18中的串口通信模块31与上位机13相连，在上位机13分析显示测量结果。

[0074] 其中：

[0075] 数据采集模块14用于地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的温度信号和加热棒1的电压信号的调理、采集与转换，包括抗混叠滤波模块19、多路切换开关20、A/D转换模块21和电压采集模块22，其中，抗混叠滤波模块19依次连接多路切换开关20和A/D转换模块21，电压采集模块22连接A/D转换模块21。地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的温度信号经过抗混叠滤波模块19进行信号调理，再由多路切换开关20分时输入A/D转换模块

21，转换为数字信号后传入数据存储与处理模块15；加热棒1的电压信号通过含有抗混叠滤波的电压采集模块22进行采集，再由A/D转换模块21进行模数转换，最后转换为数字信号后传入数据存储与处理模块15。

[0076] 数据存储与处理模块15包括MCU核心控制器23、FLASH存储模块24和晶振及复位电路25，其中，MCU核心控制器23分别与FLASH存储模块24和晶振及复位电路25连接。来自数据采集模块14的数据首先被保存入FLASH存储模块24，每隔一定时间间隔，由MCU核心控制器23进行热导率和热流率的计算及测量结束条件的判定，晶振及复位电路25为MCU核心控制器23的正常工作提供支持。

[0077] 人机交互模块16用于测量仪的人机交互操作，包括液晶显示模块26和键盘接口模块27，两者分别与数据存储与处理模块15的MCU核心控制器23连接。

[0078] 电源模块17用于为各个模块提供电能，包括5V电源转换模块28，主要是把220v电压转换为5v电压，提供给各个模块使用。

[0079] 辅助装置18用于给MCU核心控制器23提供辅助功能，如实时时钟、机箱温度传感、温度补偿、串口通信，包括内部温度传感器29、时钟模块30和串口通信模块31，三者分别与数据存储与处理模块15的MCU核心控制器23连接。内部温度传感器29可以检测地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的内部节点温度，用于地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的温度补偿。时钟模块30提供实时时钟，保证系统时钟运行无误。串口通信模块31用于连接上位机13进行数据通信。

[0080] 采用本发明的热流率测量仪测量热流率的测量方法，包括如下步骤，如图5所示：

[0081] a、测量仪的布置：将包括加热棒1、加热套管2、增强填充剂3和锥形钻头4的热源和温度感应探头位于加热套管2内壁的加热套管内壁温度传感器10一起插入被测材料中，地表温度传感器5的温度感应探头放置于地表，大气温度传感器6的温度感应探头放置于空气中，第一温度传感器7和第二温度传感器8的温度感应探头放置于被测材料中，加热套管表面温度传感器9的温度感应探头紧贴于加热套管2的外壁，并将加热棒1以及地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10连接至信号处理器11；在测量期间对所测量地表进行遮阴防风，以防止不良天气对土壤温度的过度干扰，以便使地表温度应保持较为恒定，波动幅度不超过2℃，从而提高了测量精度；

[0082] b、读取配置：启动测量仪，MCU核心控制器23读取配置数据；

[0083] c、参数设置：设置温度控制器12的温度、测试时间、加热棒的电阻值和地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的位置参数，对地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10调零，开启温度控制器12，温度控制器12通过加热套管内壁温度传感器10感应加热套管2的温度，并对加热棒1加热；

[0084] d、热导率数据采集：地表温度传感器5、大气温度传感器6、第一温度传感器7、第二温度传感器8、加热套管表面温度传感器9和加热套管内壁温度传感器10的温度信息为每秒

采集一次，每分钟计算一次平均值，存储在FLASH存储模块24中；

[0085] e、热导率计算：变化第一温度传感器7的位置得到第一温度传感器7的温度T(x1，y1)，变化第二温度传感器8位置得到第二温度传感器8的温度T(x2,y2)；

[0086] 信号处理器11获得第一温度传感器7的温度和第二温度传感器8的温度，信号处理器11计算被测材料热导率，并将热导率结果输出，其中，

[0087] 热导率的计算方法如下：

[0088]
$$\lambda = \frac{q}{4\pi}\left\{\frac{\ln\left[\frac{(y_1+H)+\sqrt{x_2^2+(y_2-H)^2}}{(y_1-H)+\sqrt{x_1^2+(y_1-H)^2}}\right]-\ln\left[\frac{(y_2+H)+\sqrt{x_2^2+(y_2-H)^2}}{(y_2-H)+\sqrt{x_1^2+(y_1-H)^2}}\right]}{T(x_1,y_1)-T(x_2,y_2)}\right\}$$

[0089] 其中，λ为热导率，q为热功率，由温度控制器12供给加热棒1，H为加热棒1的长度，T(x1,y1)为第一温度传感器7在(x1,y1)处的温度，T(x2,y2)为第二温度传感器8在(x2,y2)处的温度，x1、x2分别为第一温度传感器7和第二温度传感器8的测量点距加热棒1中心轴的距离，y1、y2分别为第一温度传感器7和第二温度传感器8的测量点距地面的距离，这样T(x1,y1)是指距地面为y1、距加热棒1中心轴为x1处的温度，T(x2,y2)是指距地面为y2、距加热棒1中心轴为x2处的温度，其中(x1,y1)分别确定了距地面为y1、距加热棒1中心轴为x1处的周线，(x2,y2)分别确定了距地面为y2、距加热棒1中心轴为x2处的周线，即第一温度传感器7的坐标(x1,y1)、第二温度传感器8的坐标(x2,y2)是以加热棒1中心轴与地面的交点为坐标原点，测量点坐标满足如下关系：x1≠x2且x1<x2，x1≥5D，x2>5D并按照测试数据调整能够满足：T(x1,y1)-T(x2,y2)≥5℃，其中，D为加热套管2的外径；

[0090] 例如，第一温度传感器7的坐标为(10,30)，即其距加热棒1的中心轴为10cm，距地面深度为30cm；第二温度传感器8的坐标为(20,30)，即其距加热棒1的中心轴为20cm，距地面深度30cm；

[0091] 热导率的计算默认采用30分钟的滑动滤波方法进行数据的平滑与计算，在测试30分钟以内时，无热导率信息输出，测试时间大于30分钟，则开始输出热导率信息，直至测试时间结束或者测量结果达到收敛条件。

[0092] 测量结果收敛条件为5分钟内输出热导率波动范围小于或等于3％。

[0093] f、热流率测量的准备：待被测材料冷却后，将第一温度传感器7的温度感应探头移动到地表温度传感器5正下方、被测材料中；

[0094] g、热流率数据采集：地表温度传感器5和第一温度传感器7的温度信息为每秒采集一次，每分钟计算一次平均值，存储在FLASH存储模块24中；

[0095] h、热流率计算：垂直变化第一温度传感器7的位置得到第一温度传感器7的温度T(x3,y3)，根据信息处理器11获得地表温度传感器5和第一温度传感器7的温度和已获得的热导率，信号处理器11计算被测材料热流率，并将热流率结果输出，其中，

[0096] 热流率的计算方法如下：

[0097]
$$\Phi = \lambda\frac{Te - T(x3,y3)}{y3}$$

[0098] 其中，λ为热导率，Te为地表温度传感器5的温度，T(x3,y3)为第一温度传感器7在(x3,y3)处的温度，x3为第一温度传感器(7)的测量点距加热棒(1)中心轴的距离，y3为第一温度传感器7的测量点距地面的距离。

[0099] 在测量过程中，如果测量环境不符合数据模型要求，在液晶显示模块26的显示界面会提示测量者改善测量环境，该提示会一直持续至测量环境符合要求为止。

[0100] 采用本发明的热流率测量仪测量热流率的测量方法，在步骤a之后，步骤b之前，还包括如下步骤：在上位机13设置端口通信速率后，启动上位机13。

[0101] 实施例1

[0102] 在相同条件下，采用本发明的热流率测量仪和测量方法测量热流率的测量结果与采用现有技术中的热阻式热流板测量热流率的测量结果的对比如图5所示。

[0103] 结果表明，采用本发明的热流率测量仪和测量方法测量热流率的测量结果与采用现有技术中的热阻式热流板测量热流率的测量结果趋势一致；比较而言，白天蓄热过程热阻式热流板测量的热流率数值大，这是因为本发明传感器对地表遮挡极小，导致对太阳辐射蓄热干扰小，测试结果更趋于真实；而夜间土壤放热过程，由于本发明的热流率测量仪没有热阻板的遮挡，更易于放热，热率流大。

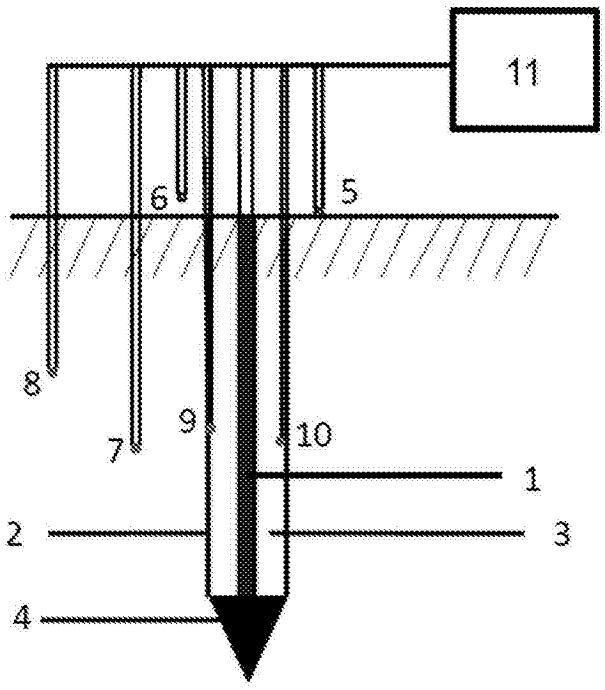


图1

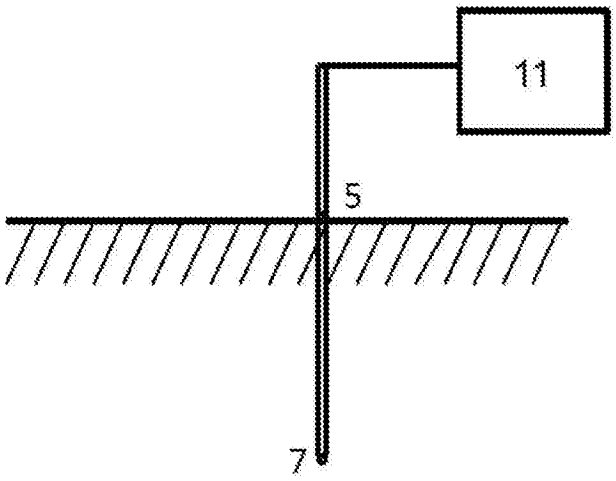


图2

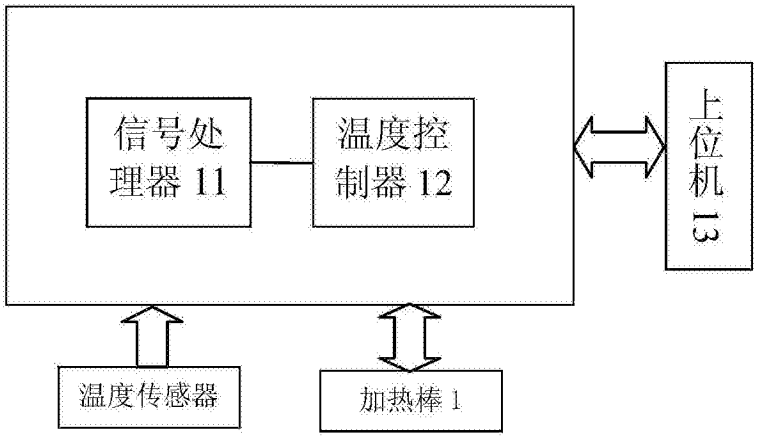

信号处理器 11
温度控制器 12
上位机 13
温度传感器
加热棒 1

图3

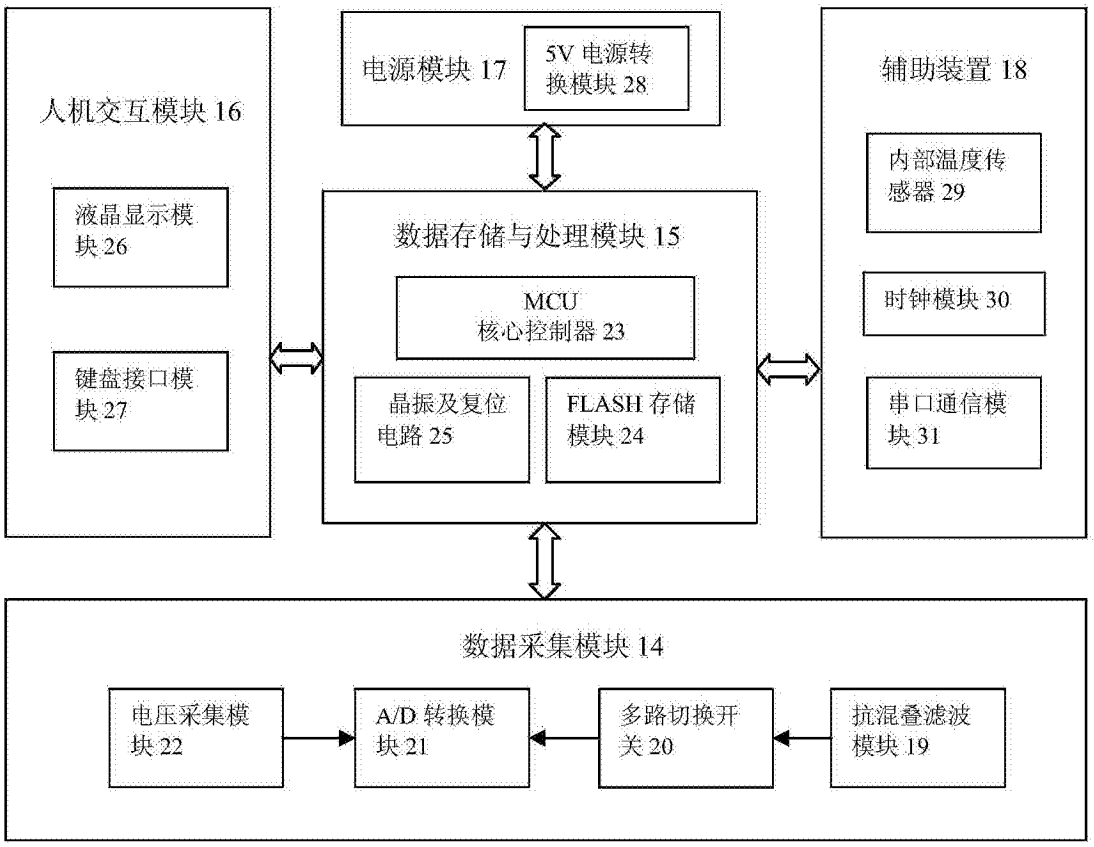

人机交互模块 16
液晶显示模块 26
键盘接口模块 27
电源模块 17
5V 电源转换模块 28
数据存储与处理模块 15
MCU 核心控制器 23
晶振及复位电路 25
FLASH 存储模块 24
辅助装置 18
内部温度传感器 29
时钟模块 30
串口通信模块 31
数据采集模块 14
电压采集模块 22
A/D 转换模块 21
多路切换开关 20
抗混叠滤波模块 19

图4

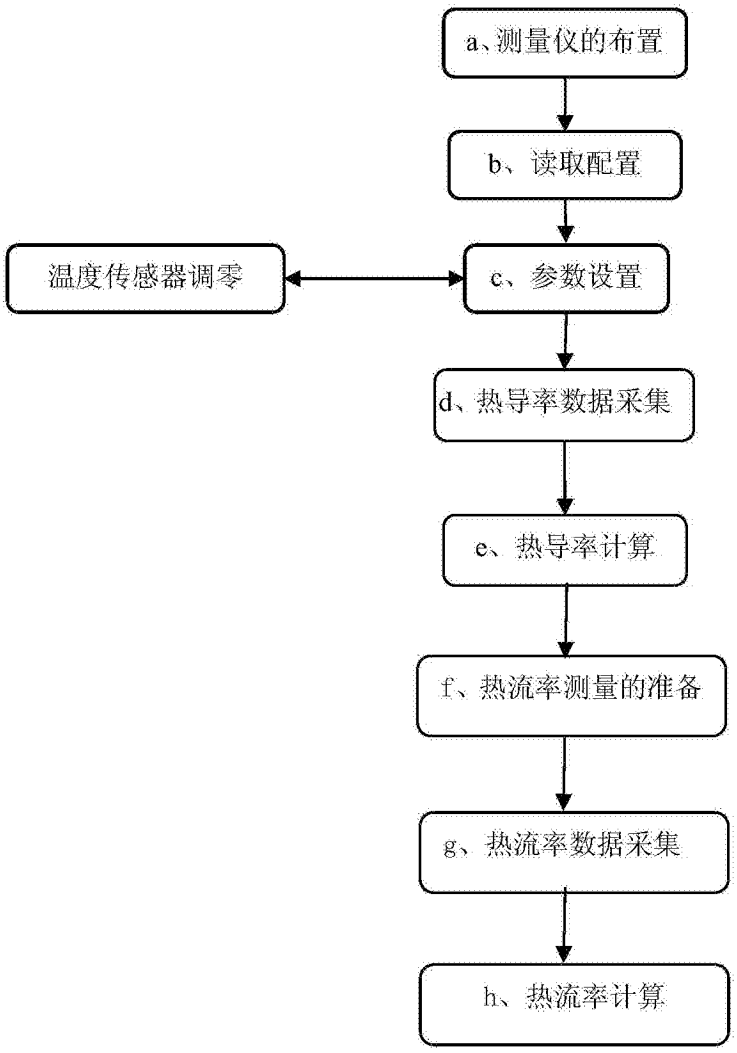

a、测量仪的布置
b、读取配置
温度传感器调零
c、参数设置
d、热导率数据采集
e、热导率计算
f、热流率测量的准备
g、热流率数据采集
h、热流率计算

图5

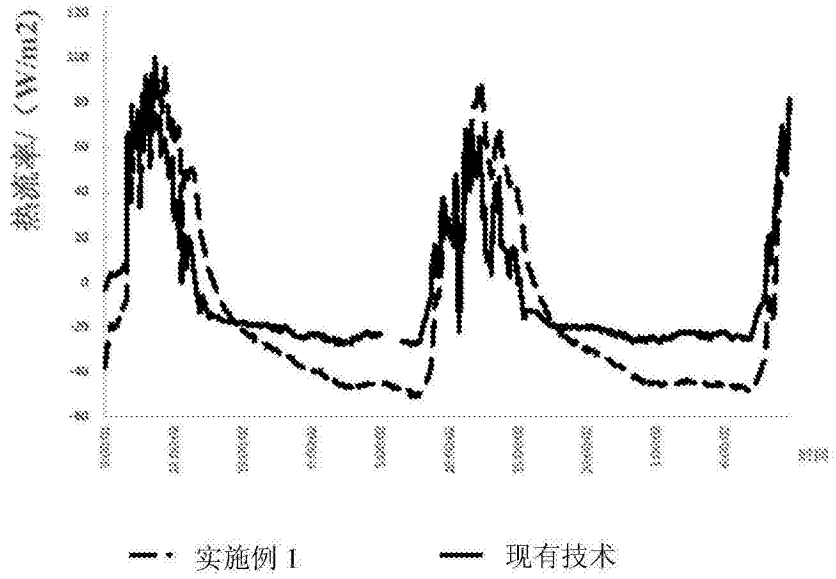


图6