



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103308205 A

(43) 申请公布日 2013. 09. 18

(21) 申请号 201310257809. 8

(22) 申请日 2013. 06. 26

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

(72) 发明人 张仕忠 李进平 俞鸿儒

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390

代理人 王艺

(51) Int. Cl.

G01K 7/16(2006. 01)

G01K 17/00(2006. 01)

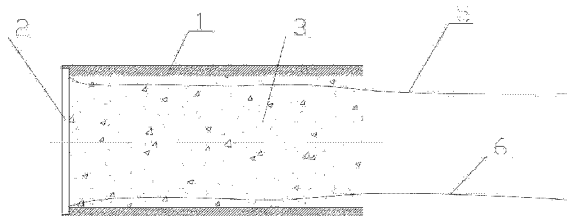
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

## (54) 发明名称

一种电阻测温量热计及其测量方法

## (57) 摘要

本发明提供了一种电阻测温量热计及其测量方法,包括绝热管、固定在绝热管一端的量热片,以及填充在绝热管内的高分子化合物,其中,所述量热片朝向绝热管内部的一侧设置有金属薄膜,所述金属薄膜的两端分别连接有测量引线。上述量热计其通过将薄膜电阻即金属薄膜设置在量热片的背面,可避免热流对薄膜电阻的直接冲刷,可有效的提高薄膜电阻的阻值稳定性,且进一步的提高了测量精度和可靠性;金属薄膜为贵金属结构,因此使量热计具有更好的重复性和更高的灵敏度;且该量热计结构简单,安装和使用方便。



1. 一种电阻测温量热计,包括绝热管、固定在绝热管一端的量热片,以及填充在绝热管内的高分子化合物,其特征在于,所述量热片朝向绝热管内部的一侧设置有金属薄膜,所述金属薄膜的两端分别连接有测量引线。

2. 如权利要求1所述的电阻测温量热计,其特征在于,所述量热片为具有高热导率和高电阻率的材料。

3. 如权利要求1所述的电阻测温量热计,其特征在于,所述金属薄膜为贵金属薄膜。

4. 如权利要求1中所述的电阻测温量热计,其特征在于,所述金属薄膜的厚度为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ m。

5. 如权利要求1中所述的电阻测温量热计,其特征在于,所述量热片的厚度为0.15mm-0.2mm。

6. 如权利要求1中所述的电阻测温量热计,其特征在于,所述金属薄膜通过溅射的方法镀在量热片上。

7. 如权利要求1中所述的电阻测温量热计,其特征在于,所述金属薄膜包括中间的矩形结构,以及设置在两端的圆弧状结构,所述测量引线与所述圆弧状结构相连。

8. 如权利要求1中所述的电阻测温量热计,其特征在于,所述金属薄膜的阻值和温度呈线性变化。

9. 如权利要求1中所述的电阻测温量热计,其特征在于,所述高分子化合物为环氧树脂,所述金属薄膜为铂薄膜,所述量热片为金刚石片。

10. 一种如权利要求1中所述的电阻测温量热计的测量方法,其特征在于,若量热片背面及侧面绝缘无热损失,则单位面积量热片在某一时间间隔传入其中的热量应等于量热片蓄积的热量,因此得出热流量的计算公式:

$$q \cdot \Delta t = \int_0^l \rho c \Delta T \cdot \Delta x$$

上述公式取极限得出:

$$q = \int_0^l \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx$$

若  $\rho$  和  $c$  为常数,则

$$q = \rho c \int_0^l \frac{\partial T}{\partial t} dx = \rho c l \frac{d\bar{T}}{dt}$$

式中: $\Delta t$  为单位时间间隔, $\rho$  为量热片材料的密度, $c$  为量热片材料的比热, $\Delta T$  为单位时间间隔内量热片温度升高值, $\Delta x$  是沿量热片厚度方向  $x$  的单位位置量, $\bar{T}$  为量热片平均温度, $l$  为量热片的厚度;

在此方法中由测量量热片背面温度变化率代替平均温度变化率,且通过薄膜电阻的阻值变化得出量热片背面温度的变化率。

## 一种电阻测温量热计及其测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及热流率测量和瞬态温度测量,属激波和激波风洞热流测量领域,尤其涉及一种电阻测温量热计及其测量方法。

### 背景技术

[0002] 高超声速飞行器是 21 世纪世界航空航天事业发展的一个主要方向,对国际战略格局、军事力量对比、科学技术和经济社会发展以及综合国力提升等产生重大和深远的影响。而其中的防热问题是高超声速飞行器设计的关键问题。随着临近空间飞行器研究的发展,飞行器表面气动热及热防护技术成为与推进技术并列的高超声速飞行的关键之一,气动热测量技术在实验研究中越来越重要。在高超声速飞行器地面防热试验研究中,模型表面热流率测量是试验的关键技术。

[0003] 常用的测热传感器主要分为表面温度计类和量热计类:

[0004] 表面温度计类是利用表面温度计测出半无限体的表面温度随时间变化的历史,然后按热传导理论计算表面热流率,如:薄膜电阻温度计,同轴热电偶。量热计类是利用量热元件吸收传入其中的热量,测量量热元件的平均温度变化率再计算表面热流率,如塞形铜箔量热计。

[0005] 下面简要介绍下这几种传感器的结构形式及测热原理:

#### [0006] 1. 薄膜电阻温度计

[0007] 薄膜电阻温度计是将金属薄膜镀在非金属材料上,当金属薄膜受到气动热时其电阻值发生改变从而测出表面温度,一般是将铂通过真空溅射的方法溅射到玻璃的表面。

[0008] 薄膜电阻温度计的优点是反应快,灵敏度高;缺点是使用的温度范围较小,温升过大会导致基底物性发生变化,从而引起较大误差。抗冲刷能力差,薄膜与气流直接接触,经不住含固体微粒气流的正面冲刷。薄膜受气流冲刷过程中自身电阻发生变化而引起严重的实验测量误差。当空气发生解离时,电阻也会发生变化,从而引起较大的测量误差。

#### [0009] 2. 同轴热电偶热流计

[0010] 热电偶是一种基于热电效应的温度传感器,其测量原理是将两种不同材料的导体或半导体 A 和 B 连接成一个闭合回路。当导体 A 和 B 之间存在温度差时,两者之间便产生电动势,因而在回路中形成电流,这种现象称为塞贝克效应。同轴热电偶的一般结构为将康铜丝穿入紫铜管中,使用环氧树脂隔离,通过处理使其表面导通,从而构成铜—康铜热电偶。

[0011] 同轴热电偶热流计的特点是抗冲刷能力强,频响较高,结构简单,尺寸较小,便于安装;缺点是灵敏度较低。

#### [0012] 3. 塞形铜箔量热计

[0013] 塞形铜箔量热计前端为圆形铜箔,铜箔背面中心处焊接细康铜丝,该处即是热偶节点;圆周附近焊细铜丝,作为铜—康铜热偶引出线;将铜箔用环氧树脂粘在绝缘管上。

[0014] 塞形铜箔量热计的优点是能够在高热流情况下进行测量,抗冲刷能力较强,结构简单;缺点是频响较低,灵敏度低,由于工艺限制,尺寸不能小,节点焊接难度大。

## 发明内容

[0015] 本发明解决的一个技术问题就是,提出一种电阻测温量热计及其测量方法,其具有更高的灵敏度,薄膜电阻可避免热流冲刷,阻值稳定性强,且测量值精确、可靠。

[0016] 为了解决上述问题,本发明提供一种电阻测温量热计,包括绝热管、固定在绝热管一端的量热片,以及填充在绝热管内的高分子化合物,其中,所述量热片朝向绝热管内部的一侧设置有金属薄膜,所述金属薄膜的两端分别连接有测量引线。

[0017] 作为上述电阻测温量热计的一种优选方案,所述量热片为具有高热导率和高电阻率的材料。

[0018] 作为上述电阻测温量热计的一种优选方案,所述金属薄膜为贵金属薄膜。

[0019] 作为上述电阻测温量热计的一种优选方案,所述金属薄膜的厚度为  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  m。

[0020] 作为上述电阻测温量热计的一种优选方案,所述量热片的厚度为 0.15mm-0.2mm。

[0021] 作为上述电阻测温量热计的一种优选方案,所述金属薄膜通过溅射的方法镀在量热片上。

[0022] 作为上述电阻测温量热计的一种优选方案,所述金属薄膜包括中间的矩形结构,以及设置在两端的圆弧状结构,所述测量引线与所述圆弧状结构相连。

[0023] 作为上述电阻测温量热计的一种优选方案,所述金属薄膜的阻值和温度呈线性变化。

[0024] 作为上述电阻测温量热计的一种优选方案,所述高分子化合物为环氧树脂,所述金属薄膜为铂薄膜,所述量热片为金刚石片。

[0025] 一种采用如以上所述的电阻测温量热计的测量方法,其中,若量热片背面及侧面绝缘无热损失,则单位面积量热片在某一时间间隔传入其中的热量应等于量热片蓄积的热量,因此得出热流量的计算公式:

$$[0026] \quad q \cdot \Delta t = \sum \rho c \Delta T \cdot \Delta x$$

[0027] 上述公式取极限得出:

$$[0028] \quad q = \int_0^l \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx$$

[0029] 若  $\rho$  和  $c$  为常数,则

$$[0030] \quad q = \rho c \int_0^l \frac{\partial T}{\partial t} dx = \rho c l \frac{d\bar{T}}{dt}$$

[0031] 式中: $\Delta t$  为单位时间间隔, $\rho$  为量热片材料的密度, $c$  为量热片材料的比热, $\Delta T$  为单位时间间隔内量热片温度升高值, $\Delta x$  是沿量热片厚度方向  $x$  的单位位置量, $\bar{T}$  为量热片平均温度, $l$  为量热片的厚度;

[0032] 在此方法中由测量量热片背面温度变化率代替平均温度变化率,且通过薄膜电阻的阻值变化得出量热片背面温度的变化率。

[0033] 本发明的有益效果为:本发明通过提供一种电阻测温量热计及其测量方法,其通过将薄膜电阻即金属薄膜设置在量热片的背面,可避免热流对薄膜电阻的直接冲刷,可有效的提高薄膜电阻的阻值稳定性,且进一步的提高了测量精度和可靠性;金属薄膜为贵金属结构,因此使量热计具有更好的重复性和更高的灵敏度;且该量热计结构简单,安装和使

用方便。

#### 附图说明

- [0034] 图 1 为本发明具体实施方式提供的电阻测温量热计的结构示意图；
- [0035] 图 2 为本发明具体实施方式提供的量热片和金属薄膜的结构示意图；
- [0036] 图 3 为本发明具体实施方式提供的爆轰激波管实验装置的结构示意图；
- [0037] 图 4 为本发明具体实施方式提供的电阻测温量热计和同轴热电偶安装位置的结构示意图；
- [0038] 图 5 为本发明具体实施方式提供的某组电阻测温量热计和同轴热电偶的时间-电压曲线图；
- [0039] 图 6 为本发明具体实施方式提供的电阻测温量热计和同轴热电偶的时间-频响曲线图；
- [0040] 图 7 为本发明具体实施方式提供的两个电阻测温量热计热流结果曲线图；
- [0041] 图 8 为本发明具体实施方式提供的多组电阻测温量热计热流结果的曲线图；
- [0042] 图 9 为本发明具体实施方式提供的热流的热传导过程示意图；
- [0043] 其中：
- [0044] 1:绝热管;2:量热片;3:高分子化合物;4:金属薄膜;5:第一测量引线;6:第二测量引线;7:驱动段;8:被驱动段;9:卸爆段;10:皮托耙;11:电阻测温量热计;12:同轴热电偶。

#### 具体实施方式

[0045] 下文中将结合附图对本发明的实施例进行详细说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

[0046] 如图 1、图 2 所示,本发明提供了一种电阻测温量热计,包括绝热管 1、固定在绝热管 1 一端的量热片 2,以及填充在绝热管 1 内的高分子化合物 3,其中,量热片 2 朝向绝热管 1 内部的一侧设置有金属薄膜 4,且金属薄膜 4 的两端连接有测量引线,其中两根测量引线分别为第一测量引线 5 和第二测量引线 6。

[0047] 上述金属薄膜 4 的阻值和温度呈线性变化,通过测量金属薄膜 4 的阻值变化进而能够得出金属薄膜 4 的温度变化率。金属薄膜 4 设置量热片 2 上,且位于朝向绝热管 1 内部的一侧,可避免热流对金属薄膜 4 直接冲刷,其阻值可以保持相对稳定,从而使测热数据更加精确、可靠。

[0048] 金属薄膜 4 为贵金属薄膜,且薄膜的厚度为  $10^{-8} \sim 10^{-7}$ m,并采用溅射的方法将金属薄膜 4 镀在量热片 2 上。在此实施方式中,金属薄膜 4 的具体结构为,此金属薄膜 4 包括中间的矩形结构,以及设置在矩形结构两端的圆弧状结构,上述测量引线与圆弧状结构相连。优选的,金属薄膜为铂薄膜,当然也可以采用其它金属材料,如钛薄膜。只要能够保证金属薄膜的阻值和温度呈线性变化即可。

[0049] 为了避免量热片 2 材料对测量温度精确度造成的影响,量热片 2 优选的为具有高热导率和高电阻率的材料,更具体的,量热片 2 为热导率大于  $400\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  和电阻率大于  $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$  的材料。且量热片 2 的厚度为  $0.15\text{mm} \sim 0.2\text{mm}$ 。在此实施方式中,量热片 2 为金

刚片,其热导率为  $1400\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,电阻率大于  $10^{14}\Omega\cdot\text{cm}$ ,是一种比较理想的量热片材料,当然也可以选用其他材料作为量热片,只要能够保证材料的高热导率和高电阻率即可。

[0050] 在此实施方式中,填充在绝热管 1 内的高分子化合物 3 为环氧树脂。

[0051] 电阻测温量热计具体的安装过程为:将金属薄膜 4 通过溅射的方法镀在量热片 2 的背面,金属薄膜 4 一般选用贵金属如铂金膜,通过测量金属薄膜 4 阻值变化就可以获得温度变化,金属薄膜 4 两端焊接出测量引线,金属薄膜 4 两端的测量引线分别为第一测量引线 5 和第二测量引线 6,将它们穿过绝热管 1,然后将量热片 2 固定在绝热管 1 端部的阶梯孔中,量热片 2 镀有金属薄膜 4 的一侧朝绝热管 1 的内部,固定好量热片 2 后将绝热管 1 背面空腔用环氧树脂填满。

[0052] 本实施方式还提供了一种上述电阻测温量热计测量热流率的方法,如图 9 所示热流的热传递过程示意图,其中箭头方向为热传递方向,假设量热片背面及侧面绝缘且无热量损失,则单位面积量热片在某一时间间隔传入其中的热量等于量热片蓄积的热量,因此得出热流量的计算公式  $q\cdot\Delta t=\sum\rho c\Delta T\cdot\Delta x$

[0053] 上述公式取极限得出:

$$[0054] \quad q = \int_0^l \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx$$

[0055] 若  $\rho$  和  $c$  为常数,则

$$[0056] \quad q = \rho c \int_0^l \frac{\partial T}{\partial t} dx = \rho c l \frac{d\bar{T}}{dt}$$

[0057] 上式中: $\Delta t$  为单位时间间隔, $\rho$  为量热片材料的密度, $c$  为量热片材料的比热, $\Delta T$  为单位时间间隔内量热片温度升高值, $\Delta x$  是沿量热片厚度方向  $x$  的单位位置量, $\bar{T}$  为量热片平均温度, $l$  为量热片的厚度;

[0058] 其中:测量出量热片平均温度变化率就可以求出热流率。由于量热片的平均温度变化率不好测量,所以一般是测量量热片背面温度变化率代替平均温度变化率,本电阻测温量热计就是通过薄膜电阻温度计测量出量热片的背面温度,从而换算出热流值。

[0059] 本发明的电阻测温量热计是一种用于瞬态温度和热流测量的传感器,比较适用于激波管和激波风洞实验中的热流测量。其响应时间小于 20 微秒。一般工业上的温度和热流传感器的响应时间都在秒级以上,而激波管和激波风洞实验的有效时间一般都是几毫秒到几十毫秒。所以在激波管和激波风洞实验中必须使用这种瞬态热流测量传感器。

[0060] 这种电阻测温量热计和以前的塞形铜箔量热计最大区别在于,以前的塞形铜箔量热计铜箔背面温度是用铜-康铜热电偶测出来的,由于热电偶的灵敏度较薄膜电阻温度计低且输出灵敏度也低,所以以前制作的塞形铜箔量热计实验结果散差较大,误差也较大。这种新型设计从根本上改变了量热计测热原理,能够大幅度的提高信号输出灵敏度,且由于薄膜电阻温度计是在量热片背面,可以避免热流冲刷,其阻值可以保持相对稳定,从而使测热数据更加可靠、精确。

[0061] 电阻测温量热计结合了薄膜电阻温度计灵敏度高和塞形铜箔量热计耐冲刷的优点,其测热适用范围更广。由于薄膜电阻温度计在量热片的背面,经过气流的冲刷其阻值可以保持不变,从而可以保证气动热测量的准确性,同时,由于薄膜电阻温度计的输出灵敏度高,可以大大提高气动热测量的信噪比,从而提高气动热测试的精度。

[0062] 使用薄膜电阻温度计测出量热片背面温度从而换算出热流率。本实例电阻测温量热计制作的量热片采用的是金刚石片,热导率  $1400\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 当于铜的三倍,在实际制作过程中只要能保证量热片的导热率高也可以采用其它材料作为量热片,背面薄膜电阻温度计本实例采用的是铂金膜,实际制作中只要能保证薄膜阻值的线性度也可以采用其它金属膜代替。

[0063] 为了对上述电阻测温量热计进行进一步说明,本实施方式还提供了一种验证上述量热计有益效果的实验装置。

[0064] 如图 3、图 4 所示,上述实验装置包括高焓爆轰激波管,该高焓爆轰激波管包括驱动段 7、被驱动段 8 和卸爆段 9,其中被驱动段 8 的端部试验段仓内设置有皮托耙 10,即皮托耙 10 设置在与被驱动段 8 连接的实验段内。。

[0065] 该设备激波管全长 31m,包括驱动段 7、被驱动段 8 和卸爆段 9,三者内径均为 224mm;试验段直径 1m、长大于 8m。实验气体为空气,驱动气体是氢气和氧气,使用火花塞+点火管装置点火。

[0066] 为了获得最佳的运行时间,驱动段 7 和被驱动段 8 最佳长度比是根据模拟飞行马赫数不同计算出来。该激波管比较适合模拟飞行高度  $H=30\sim 60\text{km}$ ,飞行马赫数  $8\sim 18$  范围内的模型头部驻点区气动加热实验。

[0067] 皮托耙 10 为十字架结构,其包括相互垂直设置的横杆和竖杆,且横杆和竖杆上分别对称设置有两个电阻测温量热计 11 和两个同轴热电偶 12,其中同轴热电偶用来跟电阻测温量热计做对比试验。

[0068] 如图 5 所示为某组电阻测温量热计和同轴热电偶的时间-电压曲线图,通过随机抽取一组试验数据通过放大器放大,上述放大器为东华 DH-3840P 放大器,采集为拓普 UDAQ 数据采集系统,采样频率 1Mhz,试验段有效时间为 1ms。同轴热电偶信号为经过放大器内置热点模拟网络转换后的热流曲线,放大倍数为 1000 倍。电阻测温量热计为铂膜电阻温度信号,放大倍数为 100 倍。电阻测热量热计比同轴热电偶输出灵敏度要高出一个量级。

[0069] 如 6 图所示的电阻测温量热计和同轴热电偶的时间-频响曲线图;由于量热计是测量量热片背面温度,而同轴热电偶是直接接触气流(频响为 3 微秒),所以量热计响应比热电偶要慢,电阻测温量热计跟同轴热电偶比响应时间滞后 14 微秒,,而整个实验的有效实验时间为 1ms,所以电阻测温量热计可以满足瞬态热流测量要求。

[0070] 如图 7 所示,其为两个电阻测温量热计热流结果曲线图;两个电阻测温量热计的热流曲线分别为 X501、X502,根据 F-R 驻点热流公式计算,在此激波管运行参数下,热流理论值为  $2.534\text{Mw}/\text{m}^2$ ,根据两个量热计算得出的时间-热流图可以看出量热计的测量误差较小。

[0071] 如图 8 所示,多组电阻测温量热计热流结果的曲线图,在此实施方式中为 6 次,没次热流曲线分别为图 8 中的曲线 160、161、162、163、164、165,通过在激波管试验中进行多次重复性试验,测得热流值结果如图 8 所示,可见电阻测温量热计所测量的热流值波动不大,可见电阻测温量热计的重复性很好。

[0072] 基于以上实验可以看出,本发明的电阻测温量热计具有灵敏度高,重复性好的特点,采用这种测热方法可以大大提高热流测量的精度,具有很好的实用价值。

[0073] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技

术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。



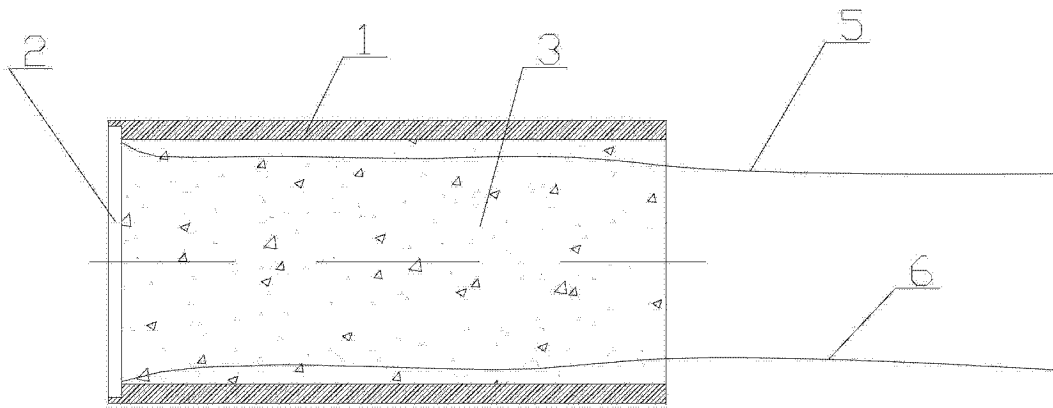


图 1

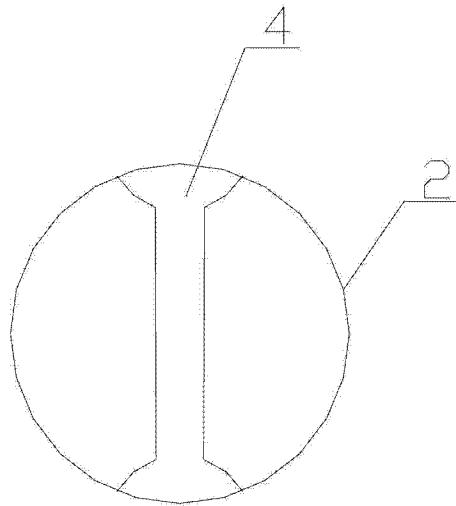


图 2

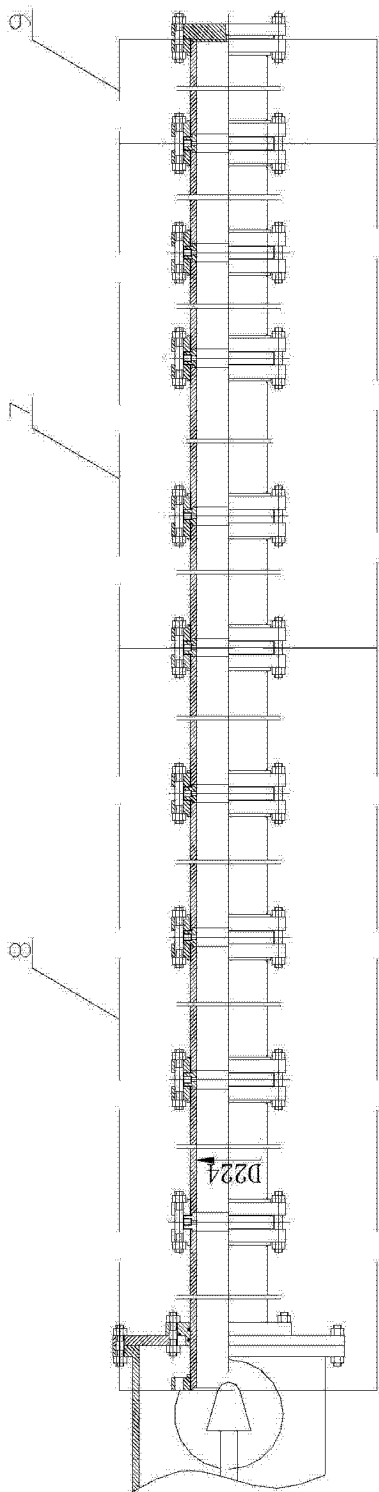


图 3

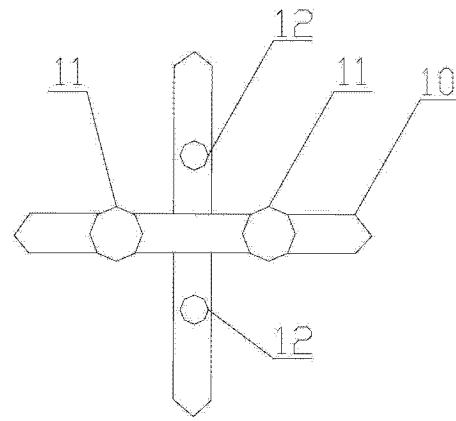


图 4

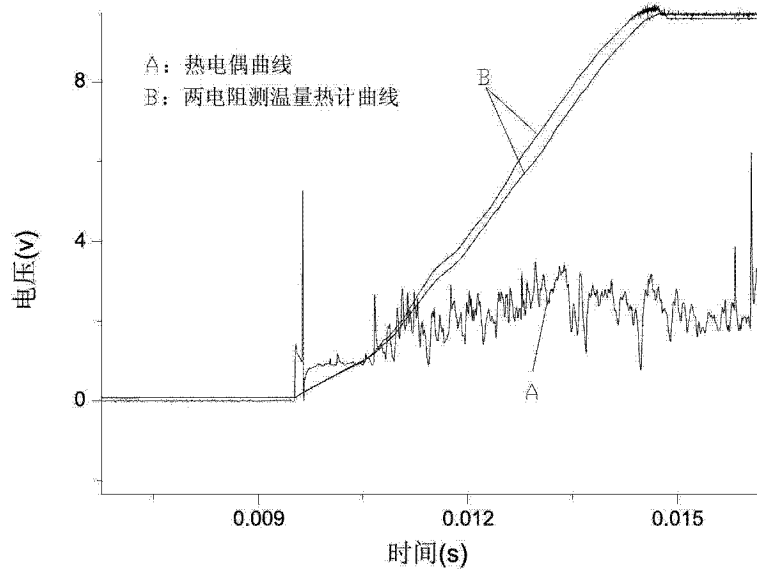


图 5

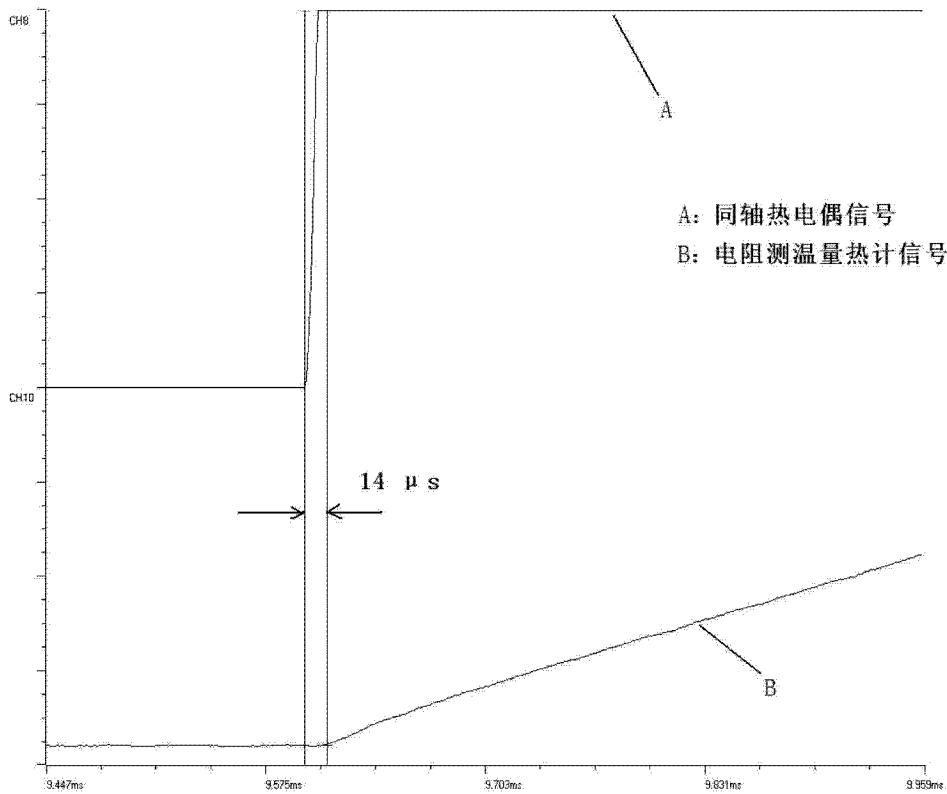


图 6

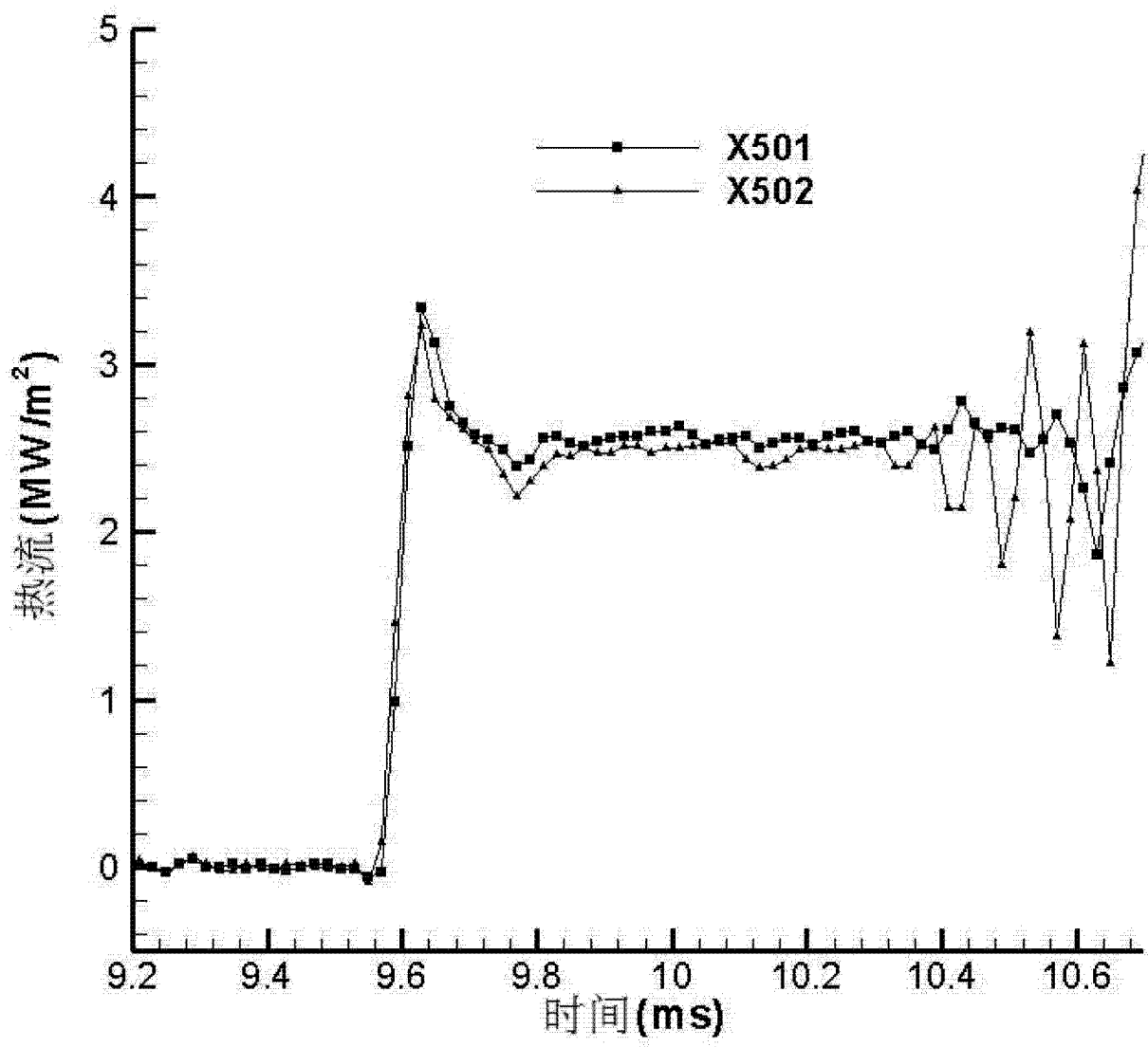


图 7

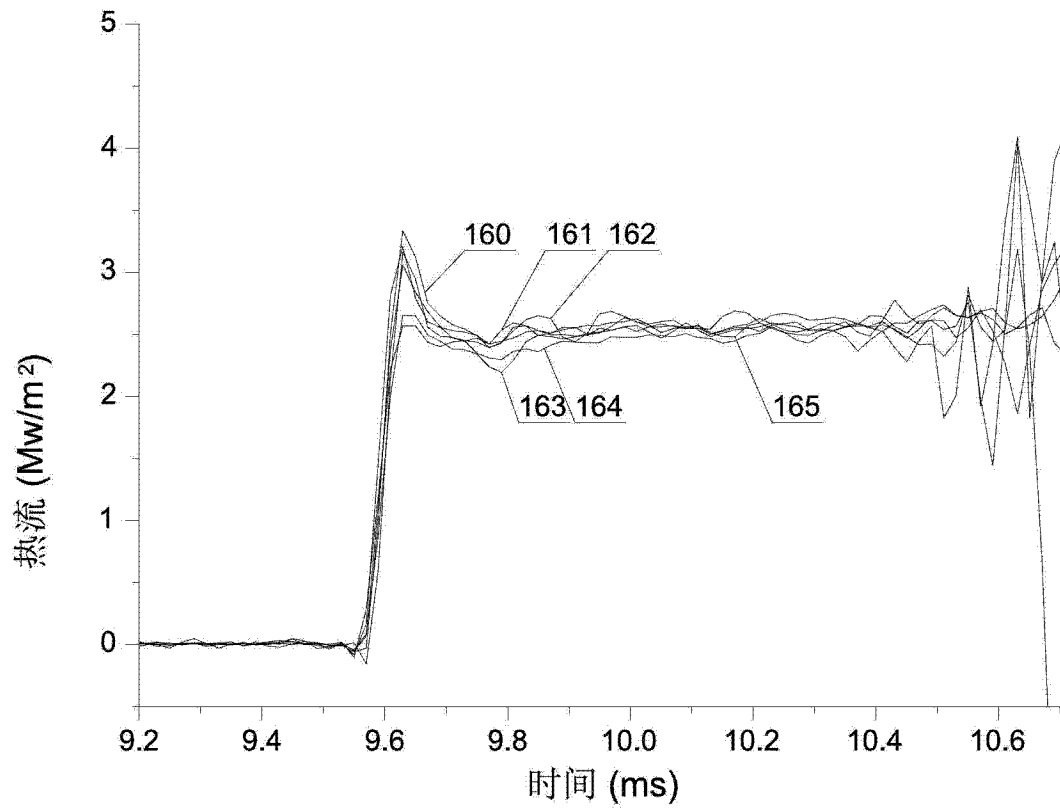


图 8

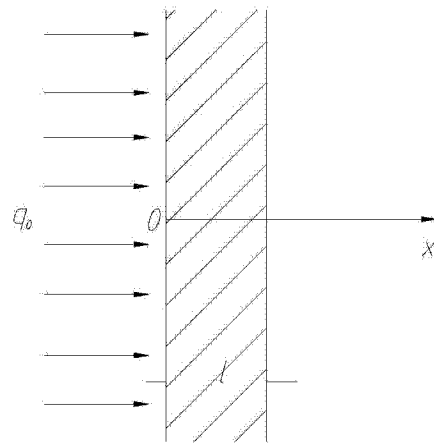


图 9