

实验 10—Part 2 准稳态法比热、导热系数测试仪测量材料的导热系数和比热

【实验目的】

- 1、了解准稳态法测量导热系数和比热的原理
- 2、学习热电偶测量温度的原理和使用方法
- 3、用准稳态法测量不良导体的导热系数和比热

【实验仪器】

- 1、ZKY-BRDR 型准稳态法比热、导热系数测定仪
- 2、实验装置一个，实验样品 2 套（橡胶和有机玻璃，每套 4 块），加热板 2 块，热电偶 2 只，导线若干，保温杯 1 个

【原理概述】

热传导是热传递三种基本方式之一。导热系数定义为单位温度梯度下每单位时间内由单位面积传递的热量，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。它表征物体导热能力的大小。

比热是单位质量物质的热容量。单位质量的某种物质，在温度升高（或降低）1K 时所吸收（或放出）的热量，叫做这种物质的比热，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

以往测量导热系数和比热大都使用稳态法，稳态法要求温度和热流量均要稳定，但在学生实验中实现这样的条件比较困难，因而会导致测量的重复性、稳定性、一致性较差，误差也较大。为了克服稳态法测量的这些弊端，本实验使用一种新的测量方法——准稳态法，使用准稳态法只要求温差恒定和温升速率恒定，而不必通过长时间的加热达到稳态，就可通过简单计算得到导热系数和比热。

1、准稳态法测量原理

考虑如图 1 所示的一维无限大导热模型：一无限大不良导体平板厚度为 $2d$ ，初始温度为 T_0 ，现在平板两侧同时施加均匀的指向中心面的热流密度 q_c ，则平板各处的温度 $T(x, t)$ 将随加热时间 t 而变化。

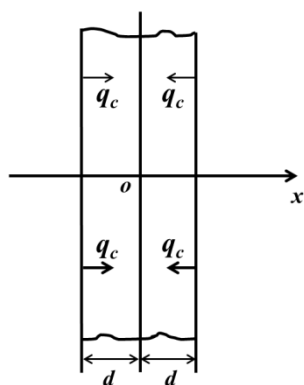


图 1 理想中的无限大不良导体平板

以试样中心为坐标原点，上述模型的数学描述可表达如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T(d,t)}{\partial x} = \frac{q_c}{\lambda} & \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \\ T(x,0) = T_0 \end{cases}$$

式中 $a = \lambda / \rho c$ ， λ 为材料的导热系数， ρ 为材料的密度， c 为材料的比热。可以给出此方程的解为：

$$T(x,t) = T_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left(\frac{a}{d} t + \frac{1}{2d} x^2 - \frac{d}{6} + \frac{2d}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos \frac{n\pi}{d} x \cdot e^{-\frac{an^2\pi^2}{d^2}t} \right) \quad (1)$$

考察 $T(x,t)$ 的解析式(1)可以看到，随加热时间的增加，样品各处的温度将发生变化，而且我们注意到式中的级数求和项由于指数衰减的原因，会随加热时间的增加而逐渐变小，直至所占份额可以忽略不计。

定量分析表明当 $\frac{at}{d^2} > 0.5$ 以后，上述级数求和项可以忽略。这时式(1)可简写成：

$$T(x,t) = T_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{at}{d} + \frac{x^2}{2d} - \frac{d}{6} \right] \quad (2)$$

这时，在试件中心处有 $x = 0$ ，因而有：

$$T(0,t) = T_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{at}{d} - \frac{d}{6} \right] \quad (3)$$

在试件加热面处有 $x = d$ ，因而有：

$$T(d,t) = T_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{at}{d} + \frac{d}{3} \right] \quad (4)$$

由式(3)和(4)可知，当加热时间满足条件 $\frac{at}{d^2} > 0.5$ 时，在试件中心面和加热面处的温度与加热时间成线性关系，温升速率同为 $\frac{aq_c}{\lambda d}$ ，此值是一个和材料导热性能和实验条件有关的常数，此时加热面和中心面间的温度差为：

$$\Delta T = T(d,t) - T(0,t) = \frac{1}{2} \frac{q_c d}{\lambda} \quad (5)$$

由式(5)可以看出，此时加热面和中心面间的温度差 ΔT 和加热时间 t 没有直接关系，保持恒定。系统各处的温度和时间呈线性关系，温升速率也相同，我们称此种状态为准稳态。当系统达到准稳态时，由式(5)得到

$$\lambda = \frac{q_c d}{2\Delta T} \quad (6)$$

根据式(6)，只要测量出进入准稳态后加热面和中心面间的温度差 ΔT ，并由实验条件确定相关参量 q_c 和 d ，就可以得到待测材料的导热系数 λ 。

另外，进入准稳态后，由比热的定义和能量守恒关系，我们有：

$$q_c = c \rho d \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

$$\text{比热为: } c = \frac{q_c}{\rho d \frac{\partial T}{\partial t}} \quad (8)$$

式中 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为准稳态条件下试件中心面的温升速率（备注：进入准稳态后，各点的温升速率是相同的）。

由以上分析可以得到结论：只要在上述模型中测量出系统进入准稳态后加热面和中心面间的温度差和中心面的温升速率，就可由式(6)和式(8)求出待测材料的导热系数和比热。

2、热电偶温度传感器

热电偶结构简单，具有较高的测量准确度，可测温度范围为-50~1600℃（223~1873K），在温度测量中应用极为广泛。

由 A、B 两种不同的导体两端相互紧密的连接在一起，组成一个闭合回路，如图 2(a)所示。当两接点温度不等（ $T > T_0$ ）时，回路中就会产生电动势，从而形成电流，这一现象称为热电效应，回路中产生的电动势称为热电势。

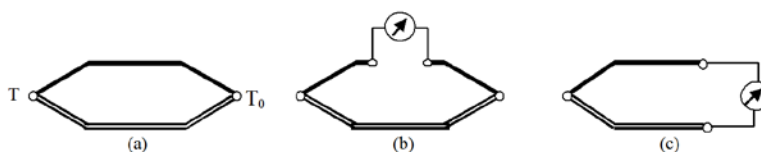


图 2 热电偶原理及接线示意图

上述两种不同导体的组合称为热电偶，A、B 两种导体称为热电极。两个接点，一个称为工作端或热端（T），测量时将它置于被测温度场中，另一个称为自由端或冷端（ T_0 ），一般要求测量过程中恒定在某一温度。

理论分析和实践证明热电偶的如下基本定律：

热电偶的热电势仅取决于热电偶的材料和两个接点的温度，而与温度沿热电极的分布以及热电极的尺寸与形状无关（热电极的材质要求均匀）。

在 A、B 材料组成的热电偶回路中接入第三导体 C，只要引入的第三导体两端温度相同，则对回路的总热电势没有影响。在实际测温过程中，需要在回路中接入导线和测量仪表，相当于接入第三导体，常采用图 2(b)或 2(c)的接法。

热电偶的输出电压与温度并非线性关系。对于常用的热电偶，其热电势与温度的关系由热电偶特性分度表给出。测量时，若冷端温度为 0℃（273K），由测得的电压，通过对应分度表，即可查得所测的温度。若冷端温度不为 0℃（273K），则通过一定的修正，也可得到温度值。在智能式测量仪表中，将有关参数输入计算程序，则可将测得的热电势直接转换为温度显示。

【实验内容】

注意事项：

(1) 在保温杯中加水时应注意，不能将杯盖倒立放置，否则杯盖上热电偶处残留的水将倒流

到内部接线处，导致接线处生锈，从而影响仪器性能和使用寿命。

(2) 根据图 2 所示，中心面横梁的热电偶应该放在样品 2 和样品 3 之间，加热面热电偶应该放在样品 3 和样品 4 之间。中心面热电偶和加热面热电偶的位置不要放错，同时要注意热电偶不要嵌入到加热薄膜里。

(3) 在取样品的时候，必须先将中心面横梁热电偶取出，再取出实验样品，最后取出加热面横梁热电偶。严禁以热电偶弯折的方法取出实验样品，这样会大大减小热电偶的使用寿命。

(4) 连接线路前，首先确保实验主机前面板的电源开关处于关闭状态，实验主机后面板的加热开关也处于关闭状态。

1、测量有机玻璃样品的导热系数和比热容

(1) 安装样品并连接各部分连线

旋松螺杆旋钮，轻轻拔出左、右横梁，注意左、右横梁下有热电偶，不能损坏热电偶，且不能颠倒左、右横梁的位置。拉出样品架。为了避免沾污样品和尽可能确保四个实验样品具有相同的初始温度，戴上手套将冷却好的“有机玻璃”样品放进样品架中。将中心面横梁（左横梁）的热电偶插入到样品 2 和样品 3 之间，右横梁的加热面热电偶插入到样品 3 和样品 4 之间。为了避免由于边缘效应影响测量精度，应将热电偶的测温端置于样品的中心位置。然后旋紧螺杆旋钮压紧样品。在保温杯中加入自来水，水量约为保温杯容量的 3/5 为宜。

连接线路前，请先用万用表检查两只热电偶冷端和热端的电阻值大小，一般在 3~6 欧姆之间，如果偏差大于 1 欧姆，有可能是热电偶出现问题，遇到此情况应请指导教师帮助解决。根据实验要求连接好各部分连线（其中包括主机与样品架放大盒，放大盒与横梁，放大盒与保温杯，横梁与保温杯之间的连线）。

(2) 设定加热电压

检查各部分接线是否有误。确认各部分接线无误后，打开主机前面板的电源开关。与此同时，检查主机后面板上的加热开关是否关闭。除了从实验主机后面板观察加热开关是否关闭以外，还可以根据前面板上加热计时指示灯的亮和不亮来判断加热开关是否关闭，若加热计时指示灯亮说明加热开关处于打开状态，不亮则说明加热开关处于关闭状态。如果加热开关处于打开状态，应立即关闭加热开关。

开机后，先让仪器预热 10 分钟左右再进行实验。在记录实验数据之前，必须先设定所需要的加热电压，步骤为：先将“电压切换”按钮按到“加热电压”档位，再由“加热电压调节”旋钮来调节到所需要的加热电压（参考值为 18V 或者 19V）。

(3) 测量样品的加热面和中心面间的温差电动势 V_t 值和每分钟温升热电势

将“电压切换开关”调到“热电势”档位；然后将“热电势切换开关”调到“温差”档位，如果“测量电压显示”的温差热电势（加热面和中心面间的温差电动势）的绝对值小于 0.004mV，就可以开始加热了，否则应等到“测量电压显示”的温差热电势降到小于 0.004mV 再加热。（如果实验要求精度不高，“测量电压显示”的温差热电势在 0.01mV 左右也可以，但不能太大，以免降低实验的准确性）。

保证上述条件后，打开主机后面板上的加热开关，与此同时，将“加热计时显示”的计时清零，然后，每隔 1 分钟分别记录一次中心面热电势和温差热电势。需要注意的是，一旦打开“加热开关”，就要开始计时。将测得的数据记入表 1 中。一次实验时间最好在 25 分钟之内完成，一般在 15 分钟左右为宜。

记录实验数据技巧：读数时，要反复按下“热电势切换”按钮以使“测量电压显示”交替显示温差电动势 V_t 值和中心面热电势。实验时，可先读温差电动势 V_t ，过半分钟后读中心面热电势，再过半分钟读温差电动势 V_t ，……，这样可保证温差电动势 V_t 的读数间隔是 1min，而且中心面热电势的读数间隔也是 1min。

表 1 有机玻璃样品导热系数及比热测定的实验数据

记录次数	V_t (mV)	中心面热电势 V (mV)	每分钟温升热电势 ΔV (mV/min)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

2、测量橡胶样品的导热系数和比热容

当需要更换样品进行下一次实验时，其操作顺序是：关闭加热开关 → 关闭电源开关 → 旋松螺杆旋钮以松动实验样品 → 取出实验样品 → 取下热电偶传感器 → 取出加热薄膜冷却，冷却至室温 → 加装新的样品和热电偶进行下一次实验。

测量橡胶样品的导热系数和比热容的操作步骤与测量有机玻璃样品的导热系数和比热容的实验步骤类似，以下不再赘述。将橡胶样品导热系数及比热测定的实验数据记入表 2。

表2 橡胶样品导热系数及比热测定的实验数据

记录次数	V_t (mV)	中心面热电势 V (mV)	每分钟温升热电势 ΔV (mV/min)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

16			
17			
18			
19			
20			

3、数据处理

(1) 根据实验记录的“加热面和中心面间的温差电动势”和“中心面热电势”计算每分钟温升热电势，再根据(6)式和(8)式计算两种材料的导热系数和比热

准稳态的判定原则是温差热电势和温升热电势趋于恒定。实验中有有机玻璃一般在 8~15 分钟，橡胶一般在 5~12 分钟，处于准稳态状态。有了准稳态时的加热面和中心面间的温差电动势 V_t 值和每分钟温升热电势 ΔV 值，就可以由(6)式和(8)式计算材料的导热系数和比热容数值。(6)式和(8)式中各参量如下：样品厚度 $d=0.01\text{m}$ ，有机玻璃密度 $\rho=1196\text{ kg/m}^3$ ，橡胶密度 $\rho=1374\text{ kg/m}^3$ 。热流密度的计算公式如下：

$$q_c = \frac{V^2}{2FR} \quad (\text{W/m}^2)$$

式中 V 为两并联加热器的加热电压， $F=A \times 0.09\text{m} \times 0.09\text{m}$ 为边缘修正后的加热面积， A 为修正系数，对于有机玻璃和橡胶， $A=0.85$ ， $R=110\ \Omega$ 为每个加热器的电阻。

铜—康铜热电偶的热电常数为 0.04 mV/K 。即温度每差 1K ，温差热电势为 0.04 mV 。据此可将温度差和温升速率的电压值换算为温度值。

$$\text{温度差 } \Delta T = \frac{V_t}{0.04} \quad (\text{K}), \quad \text{温升速率 } \frac{dT}{dt} = \frac{\Delta V}{60 \times 0.04} \quad (\text{K/s}).$$

(2) 已知有机玻璃的导热系数 $\lambda=0.17\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，比热容 $c=1.31 \times 10^3\text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ；橡胶的导热系数 $\lambda=0.426\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；比热容 $c=1.19 \times 10^3\text{ J/kg}\cdot\text{K}$ 。根据实测值和参考值估算两种材料的导热系数和比热的相对误差，并分析误差的来源。

$$(\text{提示：相对误差计算公式 } \Delta A = \left| \frac{A_{\text{measure}} - A_{\text{theoretical}}}{A_{\text{theoretical}}} \right|)$$

【思考题】

1. 试分析本实验误差的主要来源。
2. 本实验中怎样实现稳定导热？如何判定已经达到稳定的导热状态？

【附录】

1. ZKY-BRDR 型准稳态法比热、导热系数测定仪简介

仪器设计必须尽可能满足理论模型。模型中的无限大平板条件是无法满足的，实验中总是要用有限尺寸的试件来代替。实验表明，当试件的横向尺寸大于试件厚度的六倍以上时，可以认为传热方向只在试件的厚度方向进行。为了精确测定加热面的热流密度 q_c ，利用超薄型加热器作为热源，其加热功率在整个加热面上均匀并可精确控制，加热器本身的热容可忽略不计。为了在加热器两侧得到相同的热阻，采用四个样品块的配置，可认为热流密度为功

率密度的一半，如图 3 所示。

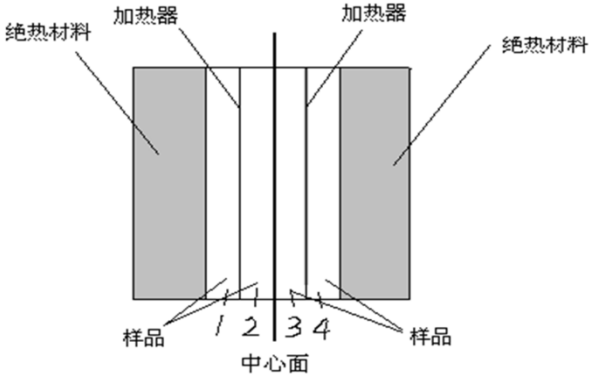


图 3 被测样件的安装

为了精确地测出温度和温差，可用两个分别放置在加热面和中心面中心部位的热电偶作为传感器来测量温差和温升速率。

实验仪主要包括主机和实验装置，另有一个保温杯用于保证热电偶的冷端温度在实验中保持恒定。

1.1 主机

主机是控制整个实验操作并读取实验数据的装置。主机前、后面板如图 4 和图 5 所示。

- 0—加热指示灯：指示加热控制开关的状态。亮时表示正在加热，灭时表示加热停止。
- 1—加热电压调节：调节加热电压的大小（范围：15.00V~19.99V）。
- 2—测量电压显示：显示两个电压，即“加热电压（V）”和“热电势（mV）”。
- 3—电压切换：在“加热电压”和“热电势”之间切换，同时电压表显示相应的电压。
- 4—加热计时显示：显示加热的时间，前两位表示分，后两位表示秒，最大显示 99:59。
- 5—热电势切换：在中心面热电势（实际为“中心面—室温”的温差热电势）和“中心面—加热面”的温差热电势之间切换，同时电压表显示相应的热电势。
- 6—清零：当不需要当前计时显示数值而需要重新计时时，可按此键实现清零。
- 7—电源开关：打开或关闭实验仪器。
- 8—电源插座：接 220V、1.25A 的交流电源。
- 9—控制信号：为放大盒及加热薄膜提供工作电压。
- 10—热电势输入：将传感器感应的热电势输入到主机。
- 11—加热控制：控制加热的开关。

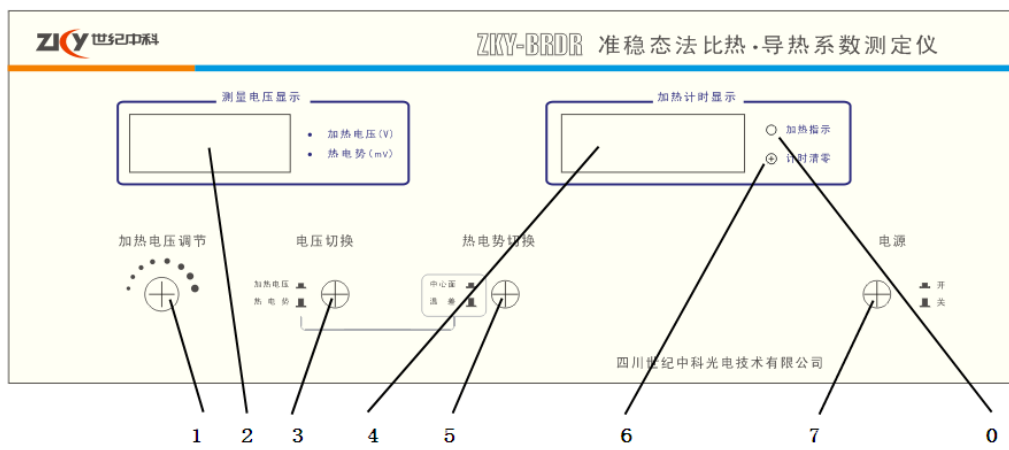


图 4 主机前面板示意图

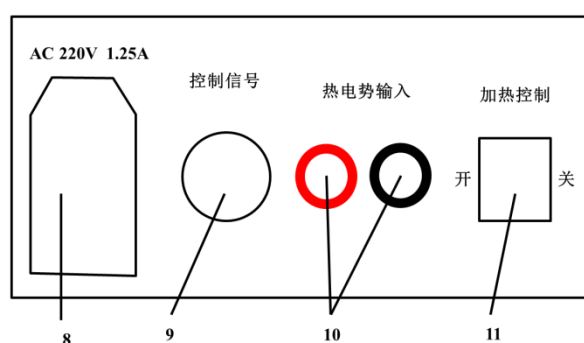


图 5 主机后面板示意图

1.2 实验装置

实验装置是安放实验样品和通过热电偶测温并放大感应信号的平台。实验装置采用卧式插拔组合结构，直观、稳定、便于操作和易于维护，如图 6 所示。

12—放大盒：将热电偶感应的电压信号放大并将此信号输入到主机。

13—中心面横梁：承载中心面的热电偶（图 6 中的“左横梁”）。

14—加热面横梁：承载加热面的热电偶（图 6 中的“右横梁”）。

15—加热薄膜：给样品加热（在加热薄膜的两侧安装样品，参见图 3）。

16—隔热层：防止加热样品时散热，从而保证实验精度。

17—螺杆旋钮：推动隔热层压紧或松动实验样品和热电偶。

18—锁定杆：实验时锁定横梁，防止未松动螺杆取出热电偶导致热电偶损坏。

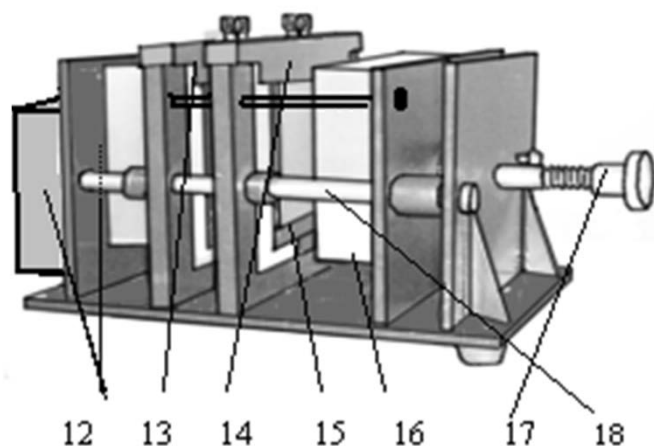


图 6 实验装置示意图

1.3 接线原理图及接线说明

实验时，将两只热电偶的热端分别置于样品的“加热面中心”和“中心面中心”，冷端置于保温杯中，接线原理如图 7 所示。

放大盒的两个“中心面热端+”相互短接，再与左横梁的中心面热端“+”相连（3 个绿色插孔连在一起）；放大盒的“中心面冷端+”与保温杯的“中心面冷端+”相连（2 个蓝色插孔连在一起）；放大盒的“加热面热端+”与右横梁的加热面热端“+”相连（2 个黄色插孔连在一起）；“热电势输出-”和“热电势输出+”则与主机后面板的“热电势输入-”和“热电势输出+”相连（红接红，黑接黑）；左、右横梁的两个“-”端分别与保温杯上相

应的“—”端相连（均为黑接黑）；放大盒左侧面上的七芯插座与主机后面板上的“控制信号”相连。

主机面板上的热电势切换开关相当于图 7 中的切换开关 K。开关合在上边时，B 点为中心面热电偶的高温端，C 点为中心面热电偶的低温端，测量的是“中心面与室温”的温差热电势，此时 A、D 端不起作用；开关合在下边时，A 点为加热面的高温端，B 点为中心面的高温端，测量的是加热面与中心面热端之间的温差热电势，此时 C、D 端不起作用。

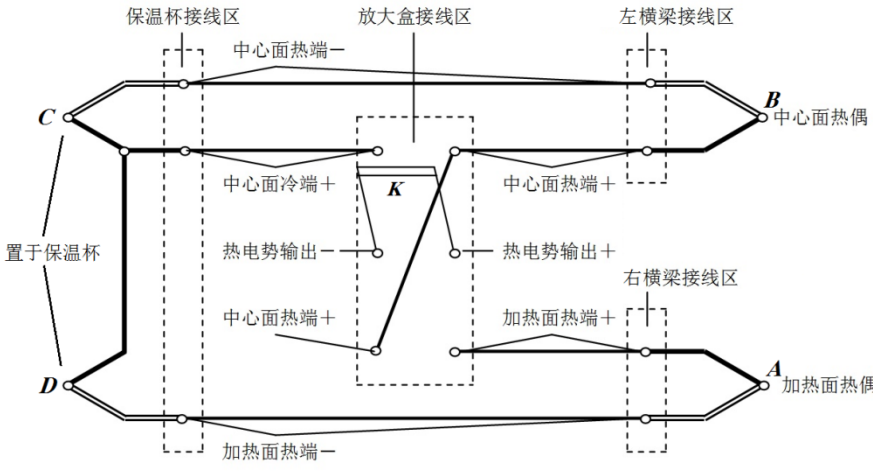


图 7 接线方法及测量原理图