

# TEC可编程温控技术在复合相变材料蓄热性能测试中的应用

## Application of TEC Programmable Temperature Control Technology In Thermal Storage Performance Test of Composite Phase Change Materials

摘要：针对定形相变复合材料热性能测试中ASTM C1784动态热流计法和ASTM C518稳态热流计法的高精度可编程快速温度控制问题，本文提出了采用单独两路TEC半导体热电加热制冷模组作为执行机构的解决方案。解决方案中还配备了不同加热功率的TEC控制电源模块、高精度热电阻温度传感器和超高精度PID程序控制器以构成闭环控制回路，模块式结构完全能满足两种热流计法测试需求，并便于快速搭建和开发相应的热流计法设备。

### 1. 问题的提出

在储能和建筑节能领域中，会使用各种新型的定形相变复合材料，这些PCM的蓄热性能测试通常使用ASTM C1784“采用热流计装置测量相变材料及其产品蓄热特性的标准测试方法”。

ASTM C1784方法是一种基于传统稳态热流计法隔热性能测试技术（HFM）的动态测试方法，称之为动态热流计法（DHFM），因此在稳态时可测量样品的导热系数，在动态时可测量样品的热焓和比热容。建立这种动态热流计法，主要是为了进行板状大尺寸相变材料多个热性能的测试，样品尺寸通常为边长100~300mm之间的正方形板材，这种尺寸易于从定形相变复合材料实际板材中取样测试，与DSC差热扫描量热仪测试中毫克量级样品形式相比更具有材料的代表性，也是DSC的一种补充拓展测试方法。

动态热流计法的测量原理如图1所示，其原理与低导热系数稳态热流计法基本相同，不同之处一是在样品的上下两面都安装有热流传感器，二是上下加热板的温度变化相同且同步，即被测样品上下两面始终处于等温边界条件。

动态热流计法可以测试不同温度下的热焓和比热容，同时也能测量相变材料的熔点温度区间，所以在测试过程中热板温度是以很小的间隔（如0.5~1°C）进行台阶式上升或下降，同时测量温度变化过程中的热流计输出信号，由此可确定不同温度下的测量结果。测试过程中样品上下两表面和样品中心处的温度和热流变化曲线如图2所示。

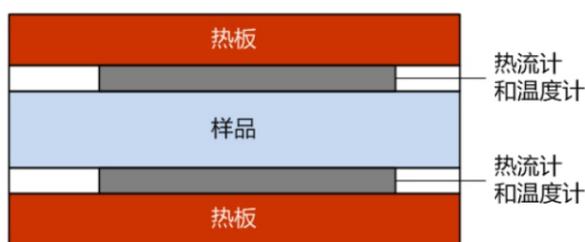


图1 ASTM C1784测量原理示意图

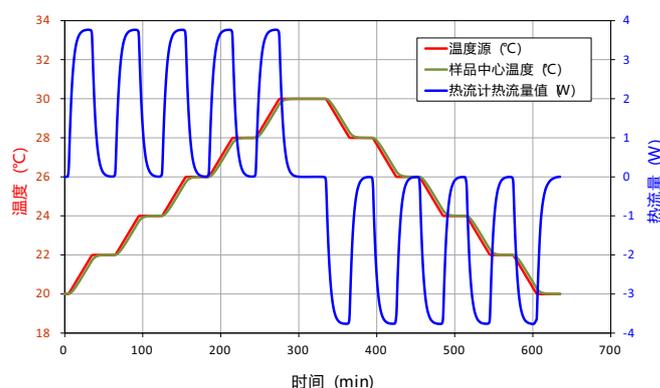


图2 C1784法测试过程中的温度和热流变化曲线

从上述动态热流计法的测试过程可以看出，整个测试过程对样品表面的温度变化及其控制有以下几方面的要求：

(1) 台阶式温升控制过程要求产生尽可能小的温度超调，减少热流测量值的积分误差。

(2) 0.5℃甚至更小的温升步长或台阶，这就要求具有温度控制具有足够高的控制精度，如至少要达到0.02℃的控温精度才能实现不超过4%的测量误差。

(3) 测试过程中，需要通过多个台阶升温测试过程才能完成全温度范围的测试，整个测试过程非常漫长。为此需要每个台阶升温过程的时间尽可能短，特别是从一个温度上升恒定到下一个更高温度台阶时的用时越小越好，而且还需同时满足温度不超调要求。

(4) 整个控温过程除了快速和无超调外要求之外，还需能进行可编程自动温度控制，可根据温度范围和温度变化步长设置温度变化程序控制曲线，由此可实现整个过程的自动测试。

为了实现动态热流计法温度控制过程中的上述几个方面要求，本文提出了以下的解决方案。

## 2. 解决方案

在储能和建筑节能领域，大量使用的是相变温度较低（几十摄氏度）的定形相变材料，因热流计的使用温度较低，因此动态热流计法也只能适合这类较低温度的复合相变材料。由此，上述动态热流法温度控制过程中所需解决的问题就是一个100℃以下的高精度快速温度控制问题。

为了在10~100℃范围内实现上述高精度可编程快速温度控制，解决方案采用的TEC半导体热片作为热板的加热器件，在此温度范围内TEC所具备的加热和制冷功能，结合高精度热电阻温度传感器和超高精度可编程PID调节器，可实现温度快速和高精度的程序控制。整个TEC温控系统结构如图3所示。

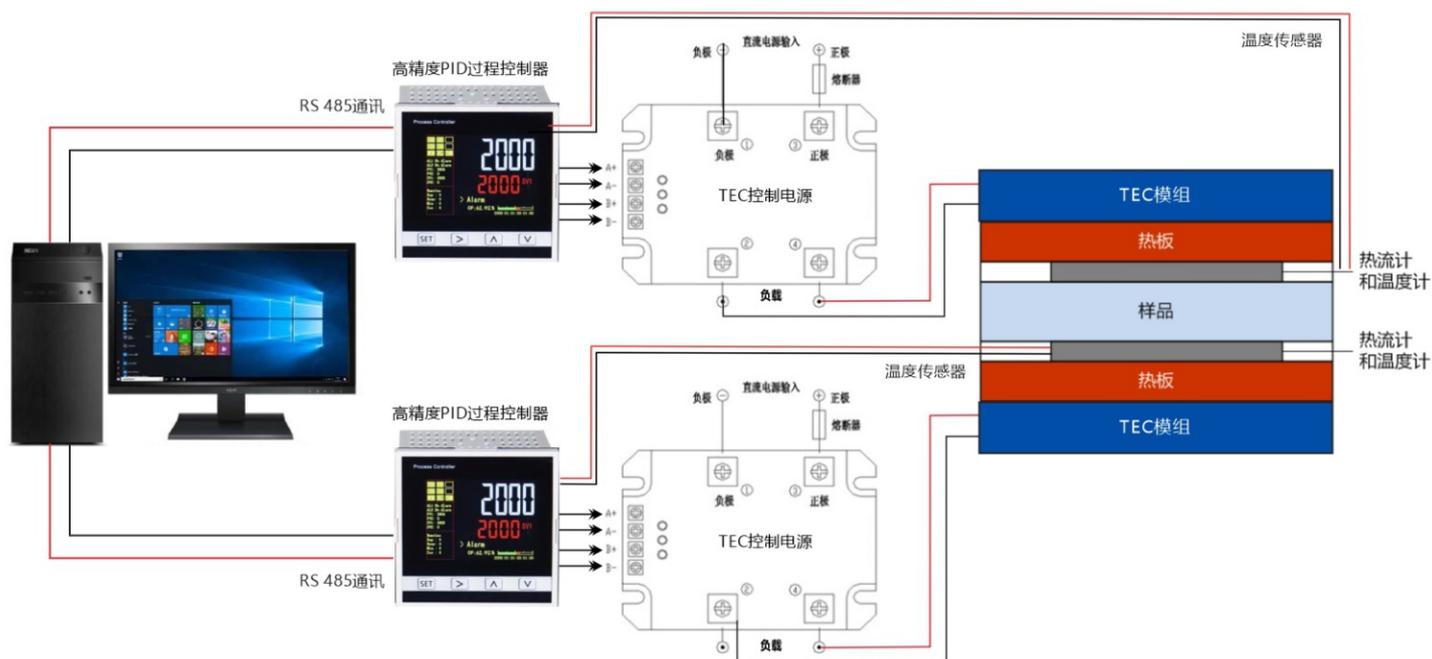


图3 可编程TEC半导体热电温控系统结构示意图

在图3所示的TEC温控系统中，除充分利用TEC器件的加热制冷特殊功能之外，为了保证温度变化的高精度、快速和可编程控制的技术要求，本解决方案还对温度闭环控制回路的结构和其他相关器件进行了以下设计和配置：

(1) 样品上下两面的温度采用各自独立的TEC模组进行温度控制，即两个TEC闭环温度控制回路。这种结构既可以用来执行ASTM C1784 动态热流计法测试，又可以执行ASTM C518热流计法测试，区别只是上下两个热板的温度控制程序不同。

(2) 特制的TEC控制电源可根据TEC热电片加热制冷功率来进行选择，适用于多个TEC片的串联或并联使用，以满足不同样品尺寸大小的温控需要。

(3) 温度传感器采用了较高精度的热电阻温度传感器，如铂电阻或热敏电阻温度传感器，由此可至少达到优于 $0.02^{\circ}\text{C}$ 的测温精度。

(4) 在高精度温度传感器基础上，为了保证控制精度，解决方案中特别配备了高精度的可编程PID控制器。此控制器的最大特点是采集和控制精度高，具有24位AD和16位DA，采用了双精度浮点运算，可使最小控制输出百分比达到 $0.01\%$ ，比普通的PID控制器提高了1~2个数量级。

(5) 解决方案所配置的高精度控制器同时还具备程序控制功能，支持20条程序曲线的编辑。还具有PID参数自整定功能和标准MODBUS协议的RS 485通讯接口，控制器自带的计算机软件可在计算机上运行，通过通讯接口计算机可直接运行控制软件，可进行所有参数的设置，控制参数和过程参数的显示和存储。

### 3. 总结

综上所述，通过本文的解决方案可以高精度和快速的实现动态热流计法测试中的温度控制，同时也能满足稳态热流计法测试中的温度控制需要。特别是模块式结构非常便于搭建和开发相关的定形相变复合材料热性能测试仪器，自带的功能强大的控制软件避免了再进行繁琐和较大工作量的软件程序编写。