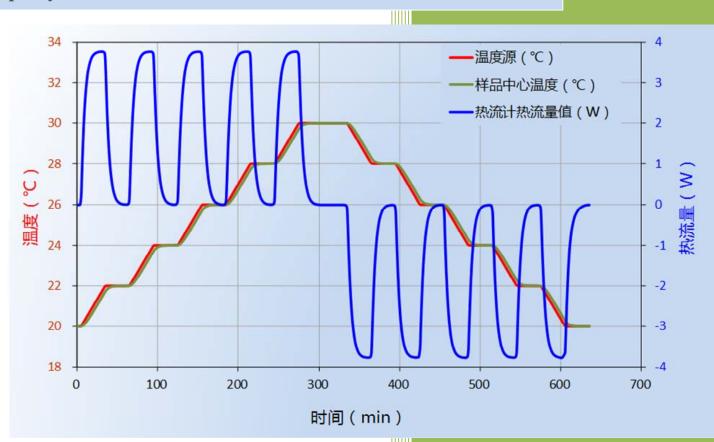
采用Modelica语言建模模拟分析研究 相变材料比热容动态热流计测试方法

Using Modelica Language Modeling Simulation Analysis to Study Phase Change Material Dynamic Heat Flow Meter Specific Heat Capacity Test Method





摘要:本文针对测试定形相变材料热性能的 ASTM C1784 动态热流计法(DHFM),采用基于 Modelica 语言的 SimulationX 软件,建立测试热焓和比热容的模拟仿真模型,对测试方法开展更深入的研究。通过对不锈钢和沙子样品材料的测试模拟仿真,优化了试验参数,使得动态热流计法更容易被理解、掌握和推广应用。

关键词:定形相变材料 热性能 动态热流计法 热焓 比热容 导热系数

1. 概述

随着建筑节能以及能量存储的需要,相变材料技术得到了飞速发展,出现了各种新型的定形相变复合材料,而定形相变复合材料的热焓、比热和导热系数等是相变材料设计、研制和生产过程中的重要物理性能参数。为了保证新型定形相变材料的热物理性能测试的准确性,ASTM 在 2013 年制定了一个新的测试标准:ASTM C1784-13 "采用热流计装置测量相变材料及其产品储热特性的标准测试方法",并在 2014 年颁布的修订版。

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),是为了解决板状大尺寸相变材料热性能测试的一种实验室级别测试方法,样品尺寸一般为边长 100~300 mm 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 测试中毫克量级样品形式相比更具有材料的代表性。

本文针对测试定形相变材料热性能的 ASTM C1784 动态热流计法(DHFM), 采用基于 Modelica 语言的 SimulationX 软件,建立测试热焓和比热容的模拟仿真模型,对测试方法开展更深入的研究。通过对不锈钢和沙子样品材料的测试模拟仿真,优化了试验参数,使得动态热流计法更容易被理解、掌握和推广应用。

2. 动态热流计法基本原理

动态热流计法(DHFM)是基于传统稳态热流计法(HFM)测量仪器上的一种动态测试方法,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。如图 2-1 所示,动态热流计法测试仪器结构与稳态热流计法测试仪器基本相同,不同之处是在样品的上下两面都安装有热流传感器,而且上下加热板的温度变化使用相同目同步。

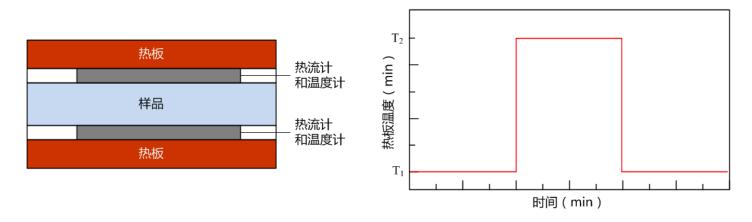


图 2-1 动态热流计法测量原理

按照 ASTM C1784 规定,两个热板为台阶式升降温方式,如<mark>图 2-1</mark> 所示,当样品和上下热板在初始温度 T_1 时达到稳态,将上下两个热板台阶式升温到另一个温度 T_2 并达到恒定。这个温度变化过程中的测量不再时稳态测量而是非稳态测量,但记录了样品两侧的温度和热流密度随时间的变化,经过一定时间后两个均热板再次冷却到初始温度 T_1 ,这是一个典型的台阶式升降温测试过程。在此温度变化 ΔT 范围内,样品吸收的总热焓 Δh 可以通过对热流密度进行时间积分计算得到,而热容 Cp 则等于 $\Delta h/\Delta T$ 。

3. 测试仿真模型和参数

为了建立仿真模型进行瞬态分析计算,使用了 SimulationX 软件。SimulationX 是基于 Modelica 语言模型的一维仿真软件之一,而 Modelica 是基于模型设计的基

础设计研究的语言模型之一,采用模块式结构可以非常快速的设计仿真模型,仿真模型的物理意义直观和明确,能完美结合传统的热阻网络分析方法,非常适合瞬态传热的快速仿真计算,较传统的有限元瞬态分析方法的速度大为提高,可以在几秒内完成整个瞬态传热过程的模拟分析计算。

在采用 SimulationX 建模中,样品尺寸设置为 300 mm×300 mm×20 mm,初始 温度为 20° C,对样品的两个表面按照相同的温度波形程序同时进行加热到 30° C。

建模分析中采用了两种典型材料,其中不锈钢 304 的热物性参数分别是:导热系数为 14.9 W/mK,比热容为 0.477~J/gK,密度为 $7900~kg/m^3$ 。沙子的热物性参数分别是:导热系数为 0.60~W/mK,比热容为 0.80~J/gK,密度为 $1515~kg/m^3$ 。

4. 无热损情况下的模仿仿真

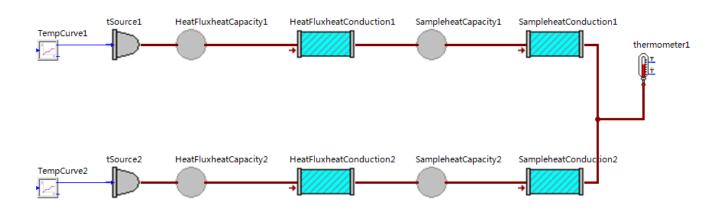


图 4-1 使用 SimulationX 软件建立的无侧向热损仿真模型

4.1. 不锈钢比热容测量的模拟计算

首先对不锈钢 304 材料进行模拟仿真计算,按照 ASTM 标准方法规定,加热采用一个方波形式。在方波加热过程中,方波加热时温度变化,以及仿真模拟计算得到的不锈钢样品中心温度和进出样品的热流变化如<mark>图 4-2 所示。通过对上述热流随时间变化曲线按照时间进行积分,最终得到此波形加热过程中的单位质量不锈钢样品的热焓值变化曲线,如图 4-3 所示。</mark>

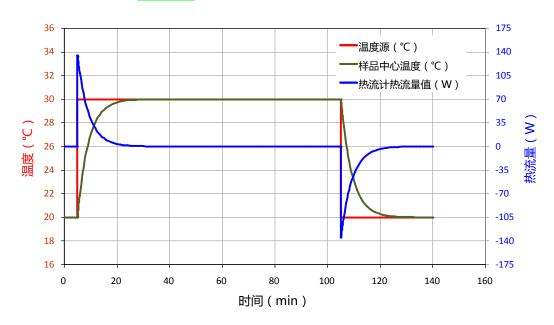


图 4-2 矩形加热波形时不锈钢样品温度和热流变化曲线

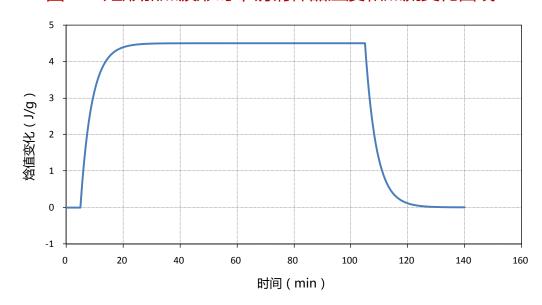


图 4-3 矩形加热波形时单位质量不锈钢样品热焓值变化曲线

根据<mark>图 4-3 所示的模仿仿真结果,可以计算出 20~30°C温度范围内不锈钢平均比热容为 0.450~J/gK,与设定值 0.477~J/gK 的相对误差为 5.7%。</mark>

通过<mark>图 4-2 所示的热流量随时间变化曲线可以看出,对热流量变化曲线进行积分相当于求此曲线相对于时间坐标轴所包含的面积,而对图 4-2 中如此突变的尖峰信号进行积分,由于时间间隔选取不可能无限小,这势必会带来积分误差,由此可见,对于方波加热形式,温度的突变是造成仿真计算误差的直接原因。在试验测试过程中,由于数据采集速度不可能很快,时间间隔也不可能非常小,这同样会带来相应测量误差。</mark>

4.2. 沙子比热容测量的模拟计算

同样,在方波加热过程中,计算得到的沙子样品中心温度和进出样品的热流变化如<mark>图 4-4</mark> 所示。通过对上述热流随时间变化曲线按时间进行积分,最终得到此波形加热过程中的单位质量沙子样品的热焓值变化曲线,如<mark>图 4-5</mark> 所示。

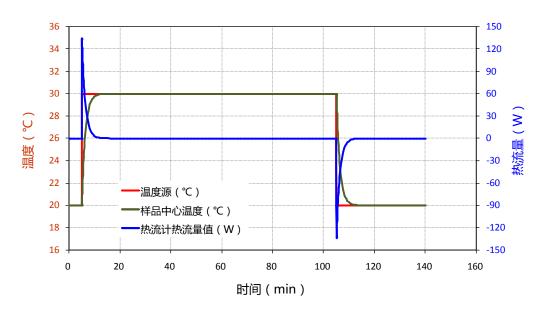


图 4-4 矩形加热波形时沙子样品温度和热流变化曲线

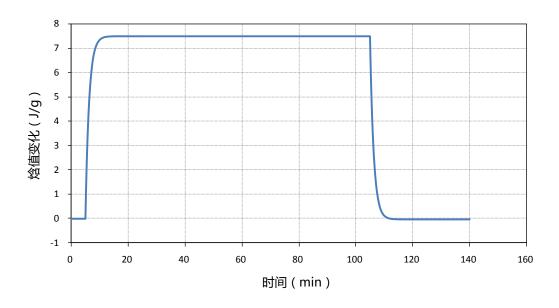


图 4-5 矩形加热波形时单位质量沙子样品热焓值变化曲线

根据图 4-5 所示的模仿仿真结果,可以计算出 20~30 C温度范围内沙子平均比 热容为 $0.750~\mathrm{J/gK}$,与设定值 $0.80~\mathrm{J/gK}$ 的相对误差为 6.3%。

4.3. 改变加热波形的模拟计算结果

鉴于上述方波加热波形仿真计算结果有较大误差,对于 304 不锈钢材料样品, 将加热波形调整为梯形,如<mark>图 4-6</mark> 中的红线所示,用时 30 分钟温度从 20℃线性升 温到 30℃后恒温 40 分钟,然后按照相同的变温速率用时 30 分钟再降到 20℃。

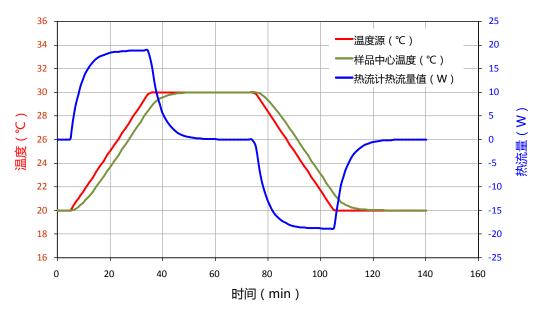


图 4-6 改变加热波形后的不锈钢样品温度和热流变化曲线

在这种加热波形下,计算得到的样品中心温度和进出样品的热流变化如<mark>图 4-6</mark> 所示。通过对上述热流随时间变化曲线按照时间进行积分,最终得到此波形加热过程中的单位质量不锈钢样品的热焓值变化曲线,如<mark>图 4-7</mark> 所示。

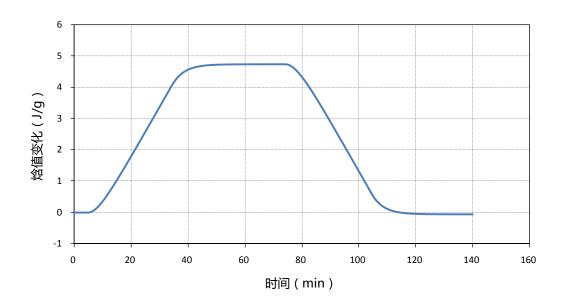


图 4-7 梯形加热波形时单位质量不锈钢样品热焓值变化曲线

根据<mark>图 4-7</mark> 所示的模仿仿真结果,可以计算出 20~30℃温度范围内的 304 不锈钢平均比热容为 0.473 J/gK,与设定值相比没有误差,这说明通过改变加热波形,降低加热温度突变速率,可显著提高积分计算精度,大幅度减少最终计算结果误差。

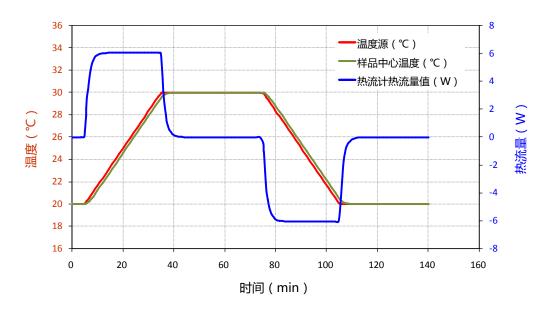


图 4-8 改变加热波形后的沙子样品温度和热流变化曲线

同样,对于沙子材料样品,将加热波形调整为梯形,如<mark>图 4-8</mark>中的红线所示,用时 30 分钟温度从 20℃线性升温到 30℃后恒温 40 分钟,然后按照相同的变温速率用时 30 分钟再降到 20℃。

在这种加热波形下,计算得到的样品中心温度和进出样品的热流变化如<mark>图 4-8</mark> 所示。通过对上述热流随时间变化曲线按照时间进行积分,最终得到此波形加热过程中的单位质量样品的热焓值变化曲线,如<mark>图 4-9</mark> 所示。

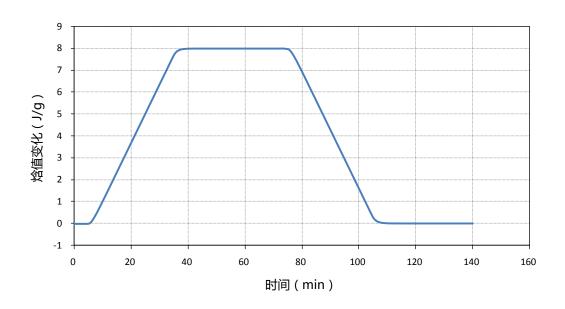


图 4-9 梯形加热波形时单位质量沙子样品热焓值变化曲线

根据<mark>图 4-9 所示的模仿仿真结果,可以计算出 20~30℃温度范围内的平均比热容为 0.799 J/gK,与设定值相比没有误差,这说明通过改变加热波形,降低加热温度的突变速率,可显著提高积分计算精度,大幅度减少最终计算结果误差。</mark>

5. 有热损条件下的模仿仿真

上述仿真模拟是假设样品侧向无热损,而在实际测试条件下,样品侧面尽管采用了低导热材料进行防护,但还是存在侧向热损。为此,针对热流计法导热仪结构建立带热损效应的仿真模型,如图 5-1 所示。

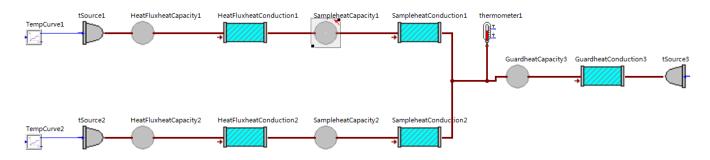


图 5-1 使用 SimulationX 软件建立的存在侧向热损仿真模型

其中假设样品侧向热防护材料为软木,软木导热系数为 0.048 W/mK,比热容为 2.03 J/gK,密度为 86 kg/m³,软木截面积为 300 mm×20 mm,厚度为 50 mm,软木的外侧温度始终保持为 20℃。考虑到样品的四个侧面都有软木隔热材料,所以侧面仿真模型中的软木尺寸应为截面积为 300 mm×80 mm,厚度为 50 mm。

为了便于观察热损的影响,对沙子样品进行了有热损情况下的模拟仿真计算,结果如<mark>图 5-2</mark> 所示。从<mark>图 5-2</mark> 中可以看出,当有侧向热损存在时,样品达到热平衡后,焓值随时间的变化并未呈水平方向的曲线形式,而是向上倾斜,而且焓值要比无热损时要大(误差将近 10%左右),这证明其中有一部热量被侧向热损带走,因此在实际测试中要对测试曲线进行侧向热损修正。

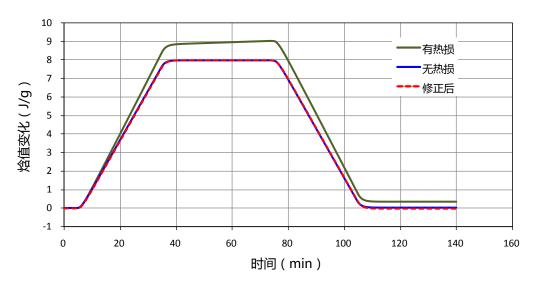


图 5-2 沙子样品有热损、无热损和修正后的模拟仿真计算结果

从图 5-2 中的修正后结果可以看出,修正后的结果与无热损计算结果完成重合,修正后的比热容为 $0.80~\mathrm{J/gK}$,与设定值 $0.8~\mathrm{J/gK}$ 的相对误差基本为零。

同样,对不锈钢样品进行有热损存在时的模拟仿真计算结果证明也存在相同规律,如图 5-3 所示,修正后的误差基本为零。

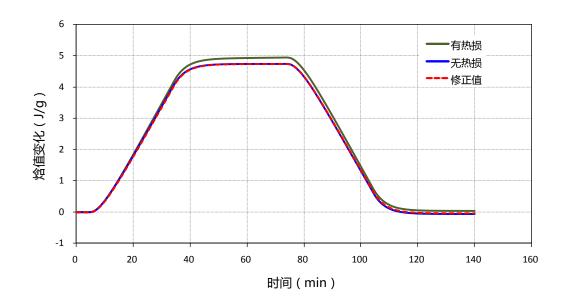


图 5-3 不锈钢样品有热损、无热损和修正后的模拟仿真计算结果

6. 结论

综上所述,采用 SimulationX 软件的动态仿真模拟,计算了不锈钢和沙子材料的热焓和比热容动态热流法测量结果,由此可得出以下结论:

- (1)采用动态热流计法以及相应的修正手段,可以准确测量样品的热焓和热容随温度的变化,证明了 ASTM C1784 的有效性。
- (2)在动态热流计法实际应用中,并不能完全采用 ASTM C1784 中规定的方波加热方式,因为这种突变型的变温方式会对测量数据处理带来较大误差,更准确的变温方式应为变化较缓慢的梯形的升降温方式。
- (3) 动态热流计法本质上还是属于一种稳态法,只是将大的温度区间分割为许多个小温度区间进行测试,按照 ASTM 中的规定,单个测试温度区间一般设定为1.5℃±0.5℃,由此来覆盖相变材料的相变温度变化范围,由此带来的问题就是测试时间十分漫长,通过上述仿真分析也得到了证明这个特点。