

高低温 (-180~1500℃) 和真空环境下的 隔热材料热物理性能测试系统初步设计

Preliminary Design of Thermophysical Property Test System for Thermal Insulation Materials in High and Low Temperature (-180~1500℃) and Vacuum Environment

摘要：针对各种柔性和刚性隔热材料对变温和变真空环境下热物理性能参数的测试要求，本文介绍了采用准稳态法ASTM E2584 进行的测试系统初步设计方案，拟实现的高低温测试温度范围为-180~1500℃，真空度范围为0.05 Pa~0.1MPa，样品尺寸为300mm×300mm×50mm，可实现导热系数、热扩散系数和比热容三个热物理性能参数的快速连续测量，并同时可通过热扩散系数的连续测量确定复合材料的固化度及优化固化工艺。

一、概述

随着空间技术和半导体行业的发展，对各种高温隔热材料的热物理性能测试提出了更高的要求，如温度范围要宽可覆盖高低温、可变真空以模拟空间环境和真空炉气氛环境。

在目前的全球商用热物性测试设备中，具有高低温和变真空功能的只有德国耐驰公司和上海依阳公司的产品。如图1所示，采用稳态保护热板法，耐驰公司设备最高温度达到600℃，测试样品冷热面温差为20℃左右的导热系数。如图2所示，采用稳态热流计法，上海依阳公司设备最高温度达到1000℃（热流计法），测试样品冷热面温差最大可达1000℃的等效导热系数，可更接近实际隔热工况的对隔热材料中导热、辐射和对流复合传热机理共同作用结果做出测试评价。



图1 德国耐驰公司GHP 456保护热板法导热仪



图2 上海依阳公司TC-HFM-1000热流计法导热仪

目前上述两种设备都在进行繁忙的常规测试，尽管都可以对隔热材料进行准确测试，但面对目前的各种新型高温隔热材料的发展，还是存在以下不足：

- (1) 测试温度范围基本已经达到稳态法的极限，受材料和其他技术限制，再提升稳态法测试温度难度极大，同时会大幅提升造价。
- (2) 稳态法只能测试导热系数一个参数，无法测试存在挥发和相变过程的热物性变化。
- (3) 稳态法测试周期漫长，无法满足高通量隔热材料性能测试需求。

为解决上述隔热材料热物理性能测试中存在的问题，本文将介绍采用准稳态法ASTM E2584 进行的隔热材料热物理性能测试系统初步设计方案。

二、拟达到的技术指标和初步方案

拟达到的技术指标如下：

- (1) 测试参数：导热系数、热扩散系数和比热容，测量不确定度 $\pm 5\%$ 。
- (2) 温度范围： $-180^{\circ}\text{C}\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ，发热体设计温度最高 2000°C ，测量不确定度 $\pm 1\%$ 。
- (3) 气氛环境：真空度 $0.01\text{Pa}\sim 0.1\text{MPa}$ ，可充各种惰性气体。
- (4) 样品尺寸：截面积 $200\times 200\text{mm}\sim 300\times 300\text{mm}$ ，厚度 $20\sim 150\text{mm}$ 。
- (5) 升降温速度： $1\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{分钟}$ 。
- (6) 测试方法：ASTM E2584。

为实现上述技术指标，设计了隔热材料热物理性能测试系统，系统整体结构的初步设计如图3所示。

整个测试系统设计为高低温分体结构，即分为高温测试和低温测试两套装置，高温覆盖室温 $\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ，低温覆盖室温 $\sim -180^{\circ}\text{C}$ 。两套装置分别安装在卧式真空腔体的前后推拉腔门上，公用一个真空腔体，整个真空腔体和前后门通过循环水进行冷却保护，并同时保证环境温度恒定。真空腔体内的气体种类和气压大小通过腔体侧面布置的真空系统进行精确控制。

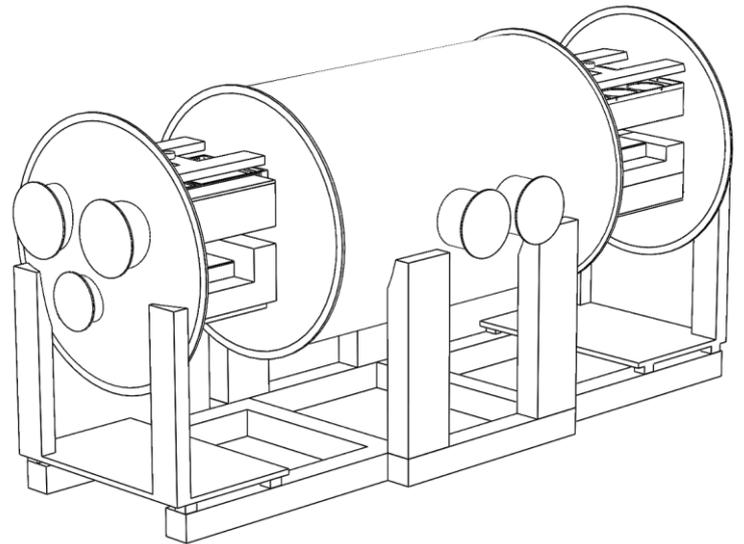


图3 高低温和真空环境下隔热材料热物理性能测试系统

为实现 1500°C 甚至更高温度 2000°C 的材料热物性测试，测试系统的高温发热体为矩形钼加热片结构。为实现最低温度 -180°C 下的测试，采用液氮作为冷却介质，并结合矩形电加热薄膜进行温度精密调节和控制。高温和低温测量装置中的热源和冷源都采用薄片结构，可保证样品表面温度的均匀性和满足一维热流条件，同时可降低侧向高低温热防护装置的复杂程度。

在测试系统中，高温加热装置和低温冷却装置都为升降结构，通过升降来完成被测样品的放入、取出和压紧，并实现不同厚度样品的测试。对于柔性隔热材料，可在测试过程中准确恒定样品厚度。

在高低温真空试验设备中，高温发热体一般采用极易氧化的高温材料，同时频繁的高低温冷热交变会带来很大的热变形和热损伤等不利影响，这些都要求高低温设备的结构设计要便于维护和维修。因此本文所述高低温测试系统的设计采用了分体结构，非常便于拆装和维护。

本文所述的高低温热物理性能测试系统，采用了准稳态测试方法，主要有以下优势：

(1) 可测量多个热物性参数，如导热系数、热扩散系数和比热容，特别是可以在整个相变过程中测试材料热物性的连续变化情况。同时还可以通过热扩散系数测试来确定固化度。

(2) 测试温度可以达到很宽的范围，而且测试速度快，通过一个完整的线性升降温过程就可以得到整个温区范围内的热物性随温度变化曲线，大幅缩短测试周期提高测试效率。

(3) 准稳态法测试原理是基于平板样品的一面线性温度变化，另一面绝热的边界条件，因此会在平板样品厚度方向上会形成更接近实际隔热应用时的较大温差，测试结果会包含导热、辐射和对流的复合传热效应，测试结果更能表征隔热材料的真实性能。