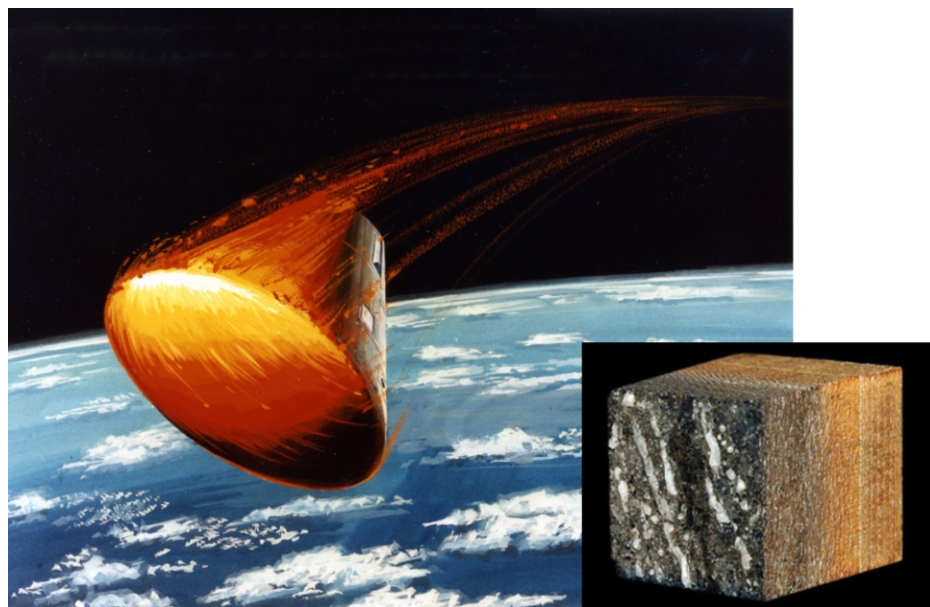


烧蚀防热材料高温热物理性能测试方法的初步研究

Preliminary Study on the Test Method of High Temperature Thermophysical Properties of Ablative Heat Protection Materials



摘要：文本针对高温下存在热化学反应的烧蚀防热材料，提出一种新型测试方法——恒定加热速率法，以期准确测试烧蚀防热材料的高温热物理性能，由此得到烧蚀防热材料在热化学反应过程中的热导率、热扩散率和比热容随温度的变化曲线。

一、问题的提出

烧蚀防热材料的高温热物理性能是高温下的传热管理和热化学烧蚀建模的必要参数，但因为烧蚀材料具有特殊性：它们具有相当低的热导率，加热过程中会产生气体，热性能非单调变化，甚至材料的热性能还取决于加热速率。这种特殊性造成目前的各种稳态法和瞬态法都不适合烧蚀防热材料的热物理性能测试，主要是在测试之前的温度稳定期间就已经发生了热化学反应。因此，烧蚀防热材料的高温热物理性能测试一直是个技术难题，需要开发一种新型测试方法，对整个使用温度范围内含有热化学反应过程的烧蚀防热材料热物理性能进行准确测量，甚至测试出不同加热速率下烧蚀防热材料的热物理性能。

文本将针对高温下存在热化学反应的烧蚀防热材料，提出一种新型测试方法——恒定加热速率法，以期测试烧蚀防热材料的高温热物理性能，由此得到热化学反应过程中的热导率、热扩散率和比热容随温度的变化曲线。

二、测试方法

测试方法基于热物理性能测试中一般都需要测量热流和温度的基本理念，由此建立了如图1所示的传热学第二类正规热工工况测试模型，即对被测样品表面进行恒定速率加热，样品背面为绝热条件。

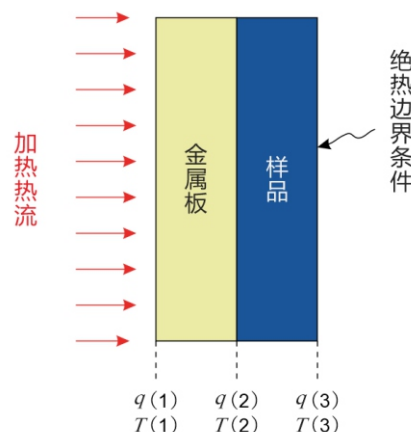


图1 恒定加热速率法测量原理

在图1所示的测试模型中，假设其中的热传递为一维热流，根据傅里叶传热定律，样品厚度方向上的传热方程为：

$$\rho_{(x)} \cdot C_{(x)} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{(x)} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (0.0.1)$$

$$T_1(0, t) = T_0 + (t \cdot b) \quad (0.0.2)$$

$$q_3 = 0 \quad (0.0.3)$$

式中： ρ 为样品密度， C 为样品比热容， λ 为样品热导率， T 为温度， t 为时间， T_0 是 $t=0$ 时的样品初始温度， b 是加热速率。

当加热速率 b 为一常数时，通过测试样品前后两个表面温度，并求解上述传热方程，可得到被测样品的等效热扩散率随平均温度的变化曲线。

在这种恒定加热速率测试方法中，金属板起到热流传感器的作用，即在线性升温过程中测量金属板前后两表面的温度，并结合金属板的已知热物理性能参数，可计算得到流经金属板的热流密度，由此间接测量得到流经被测样品的热流密度。

通过测量得到的热流密度，结合测量得到的被测样品两个表面温度，求解上述传热方程，可得到被测样品的等效热导率随平均温度的变化曲线。

根据上述测量获得热扩散率和热导率，并依据比热容、密度、热扩散率和热导率之间的关系式 $\lambda = \rho \times C \times \alpha$ ，可计算得到被测样品的质量热容随温度的变化曲线。如果采用热膨胀仪和热重分析仪精确测量被测材料在不同温度下的密度变化，通过关系式就可获得被测样品的比热容随温度变化曲线。

对于上述恒定加热速率法测试模型，我们采用有限元进行了热仿真模拟和计算，证明了此方法对于低导热隔热材料热物性测试的有效性。

三、今后的工作

尽管进行了详细的测试公式推导和有限元仿真计算，但对于这种新型的恒定加热速率热物性测试方法，还需进一步开展以下研究工作：

(1) 采用无热化学反应的高温隔热材料进行测试，以考核测试方法的重复性和进行测量不确定度评估。

(2) 采用无热化学反应的高温隔热材料与其他高温热物性测试方法进行对比，如稳态热流计法、热线法和闪光法等。

(3) 采用烧蚀耐热材料进行高温测试，以考核测试方法的重复性，并结合其他热分析方法、热模拟考核试验（石英灯、氧乙炔、小发动机火焰和风洞）和建模分析，验证新型测试方法的有效性。