

酚醛树脂防热材料烧蚀过程中的高温导热系数测试解决方案

Solution of High Temperature Thermal Conductivity Measurement in the Ablation Process of Phenolic Resin Thermal Protection Material

摘要：针对酚醛树脂这类烧蚀型防热材料导热系数测试中多年来存在的稳态法测试温度不高、闪光法测量误差大和无法测量烧蚀过程中的导热系数，本文提出了一种新型测试方法——恒定加热速率法，以期测试树脂类防热材料的高温导热系数，由此得到整个烧蚀过程中导热系数随表面温度线性变化的测试结果，以对烧蚀型防热材料的隔热性能做出更准确的测试评价。

一、问题的提出

酚醛树脂复合材料做为一种轻质强韧化防热材料，由于其具有防隔热一体化、抗剪切能力强、线烧蚀率和导热系数小及成炭率高等优点，被广泛地应用于飞行器的热防护系统（TPS）。而热防护系统占飞行器较大的比重，是飞行器安全性和可靠性的重要保证。因此，对酚醛树脂防热复合材料导热系数的准确测量，是合理设计和优化热防护系统的前提条件，也是解决过度冗余或防热设计可靠性不足等问题的有效途径。

酚醛树脂防热材料的防热机理是主动式防热。如图1所示，一方面，树脂基高分子材料在高温下发生吸热的碳化反应，从而吸收外界热量。另一方面，碳化反应分解释放的气体可以被用来实现阻隔散热，同时形成的多孔结构的碳化层也具有较为优良的隔热性能。在三者协同作用下，飞行器在高热流环境下的使用和运行变得安全可靠。

由此可见，如此复杂的防热过程，使得准确测量防热材料的导热系数变得十分困难，用传统方法进行导热系数测试会出现巨大偏差。针对酚醛树脂这类烧蚀型防热材料，传统测试方法存在以下几方面的问题：

(1) 无法测量烧蚀材料物理和化学变化过程中的导热系数，只能测试烧蚀前（原材料）和烧蚀碳化后（多孔炭层）的取样品。

(2) 烧蚀前样品的导热系数测试普遍采用稳态法，此方法目前多用于防热材料质量控制中的导热系数监控，但测试温度不超过300℃。

(3) 烧蚀后的多孔碳层导热系数，目前国内外普遍还都采用激光闪光法进行测试，主要原因是这种方法可以达到2000℃以上的高温。但由于多孔碳层导热系数较低，取样必须很薄（厚度一般小于1mm），由此容易造成加热激光脉冲透过被测样品带来严重误差。如果对样品前后表面进行遮光处理（如喷涂石墨或镀金），而高温下表面涂层会脱落而无法实现高温测试。另外，闪光法只能测试热扩散系数，还需采用其他高温设备测试相应的比热容和密度随温度变化数据。

针对上述树脂基防热材料导热系数测试中多年来存在的问题，本文将提出一种新型测试方法——恒定加热速率法，以期测试树脂类防热材料的高温导热系数，由此得到烧蚀型防热材料在整个烧蚀过程中导热系数随表面温度线性变化的测试结果，以对烧蚀型防热材料的隔热性能做出更准确的测试评价。

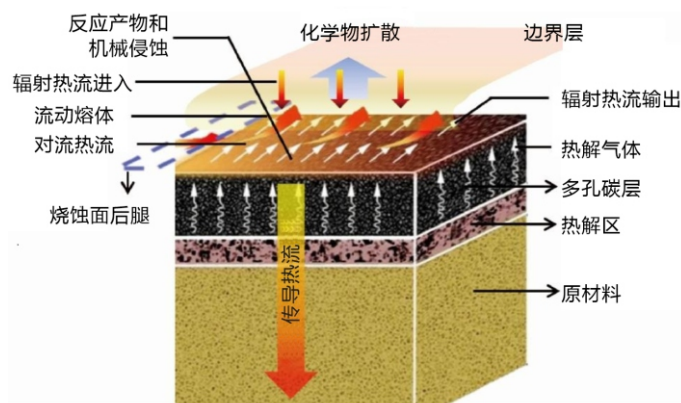


图1 酚醛树脂防热材料烧蚀过程中的复杂物理和化学变化

二、恒定加热速率测试方法

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，由此提出了如图2所示的测试模型，即对被测样品表面进行恒定速率加热，样品表面温度呈线性变化，样品背面布置一用来测量流经样品厚度方向上热流的金属板，样品四周和金属板背面为绝热边界条件，使得整个测试过程保持一维热流形态。

在图2所示的一维热流测试模型中，根据傅里叶传热定律，样品厚度方向上的传热方程为：

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

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

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

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导热系数随温度的变化曲线。

在这种恒定加热速率测试方法中，金属板起到量热计的作用，即在线性升温过程中测量金属板温度（即样品背面温度），并结合金属板的已知热物理性能参数，可计算得到金属板所吸收的热量，由此间接获得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导热系数随温度的实时变化曲线。

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材料导热系数测量的有效性。

三、结论

这种恒定加热速率测试方法，是一种动态测试方法，准确的说是一种准稳态测试方法，即在样品热面温度线性升温过程中，样品中的各个位置处的温度在经历初期的非线性升温后，也会逐渐演变为相同速率的线性变化。

恒定加热速率导热系数测试方法的最大特点是可以测量样品相变和热解过程中的导热系数，由此可见，采用此方法，完全可以测量酚醛树脂隔热材料在整个烧蚀过程中的导热系数变化。当然，此方法也非常适合单独测量高温下碳化层导热系数随温度的变化。

对于烧蚀型低密度的酚醛树脂隔热材料，其特征之一是烧蚀后表面层会发生烧蚀退后现象，即样品厚度会发生变小现象。对于这种样品边界发生移动的条件，会对恒定加热速率测试方法的准确性带来影响，在测试方法中还需进一步的深入研究。

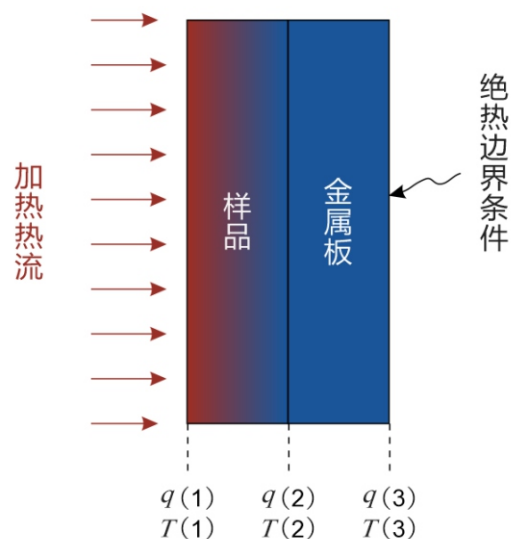


图2 恒定加热速率测试模型